



Soğuk Plazma Teknolojisi ve Tarımdaki Çeşitli Uygulama Alanları^A

Hacer KANDEMİR^{*1}, Fulya AYDIN KANDEMİR², Begüm GÜLER³, Aynur GÜREL⁴

Öz: Maddenin katı, sıvı ve gaz halinden farklı, kendine özgü özellikleri ile uzun zamandır kullanılan plazma terimi, kısaca “iyonize olmuş gaz” olarak tanımlanmaktadır. Bir gazın ısıtılmaya devam etmesi sonucunda gerçekleşen sıralı reaksiyonlar ile oluşan iyon, elektron ve nötr atom karışımı, plazmanın temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Ayrıca plazma içerisinde; fotonlar, elektronlar, serbest radikaller ve nötral atomların yanısıra kovalent bağları parçalamakla görevli, yeterli elektrik enerjisine sahip reaktif türler de bulunmaktadır. Plazma sistemleri; termodinamik özelliklerine (yüksek ve düşük sıcaklık) ve çalışma basınçlarına (düşük basınç ve atmosferik basınç) göre sınıflandırılmaktadır. Düşük sıcaklık plazmaları arasında en yeni teknolojilerden olan soğuk plazma teknolojisi; belirli bir vakum altında ve oda sıcaklığında bulunan gazların, belirli bir elektrik akımı veya elektromanyetik radyasyon uygulaması sonucunda oluşturulan plazma olarak tanımlanmaktadır. Soğuk plazma; etki mekanizmalarının çeşitliliği ve diğer teknolojiler ile birleştirilebilmesini sağlayan uygulama esnekliği sayesinde, doğa ve yaşam bilimleri için yenilikçi, çevre dostu ve ekonomik çözümlerin sunulmasında zengin bir biyoteknolojik kaynaktır. Özellikle son yirmi yıldır soğuk plazma teknolojisi, etki mekanizmasını oluşturan reaktif türlerin biyolojik sistemlerle etkileşime geçebilmesinden dolayı tıp, medikal, çevre, tarım ve gıda gibi alanlarda karşılaşılan problemler için alternatif çözüm önerileri sunmaktadır. Gerçekleştirilen bu derlemede, soğuk plazma teknolojisinin tarım ve bitkisel uygulama alanlarından olan tohum çimlenmesi, tohum

^A Yapılan bu çalışma etik kurul izni gerektirmemektedir.

^{*} **Sorumlu yazar/Corresponding Author:** ¹Hacer KANDEMİR, Biyomühendislik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye,, [OrcID 0000-0001-9220-1317](https://orcid.org/0000-0001-9220-1317)

² Fulya AYDIN KANDEMİR, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, [OrcID 0000-0001-5101-6406](https://orcid.org/0000-0001-5101-6406)

³ Begüm GÜLER, Biyomühendislik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, [OrcID 0000-0002-9970-2111](https://orcid.org/0000-0002-9970-2111)

⁴ Aynur GÜREL, Biyomühendislik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, [OrcID 0000-0002-7002-9752](https://orcid.org/0000-0002-7002-9752)

dekontaminasyonu, toprak zenginleştirilmesi ve plazma aktif su konuları üzerine yoğunlaşmıştır ve ayrıca in vitro koşullarda bitkisel materyal üzerine olan etkilerinden de bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğuk plazma teknolojisi, Bitki, Tarım, *In vitro*.

Cold Plasma Technology and Various Applications Areas In Plants

Abstract: Different from the solid, liquid and gaseous state of the matter, the term plasma, which has been used for a long time by its unique properties, is briefly defined as “ionized gas”. The mixture of ions, electrons and neutral atoms formed by sequential reactions that occur as a result of the heating of a gas constitutes the basic components of the plasma. There are also photons, electrons, free radicals and neutral atoms in the plasma, as well as reactive species with sufficient electrical energy, which are responsible for breaking down covalent bonds. Plasma systems; thermodynamic properties (high temperature and low temperature) and operating pressures (low pressure and atmospheric pressure). Cold plasma technology, one of the newest technologies among low temperature plasmas; is defined as the plasma produced by the application of a certain electric current or electromagnetic radiation of gases present under a certain vacuum and at room temperature. Cold plasma; It is a generous biotechnological resource in the provision of innovative, environmentally friendly and economical solutions for the natural and life sciences, thanks to the variety of its mechanisms of action and its flexibility in application which allows it to be combined with other technologies. Especially in the last two decades, cold plasma technology offers alternative solutions for problems encountered in medicine, medical, environment, agriculture and food, because of reactive species that make up the mechanism of action can interact with biological systems. In this review, agricultural applications of cold plasma, seed germination and seed decontamination, soil enrichment, plasma active water applications and also effects of plasma on plant material in vitro are discussed.

Keywords: Cold plasma technology, Plant, Agriculture, *In vitro*.

Giriş

Maddenin dördüncü hali olarak adlandırılan plazma iyonlaşmış bir gazdır ve görünen evrenin %99.9'undan fazlasının plazma durumunda olduğu tahmin edilmektedir. Güneşimiz dahil, tüm yüksek sıcaklıklı yıldızlar, yıldızlar arası gazlar, Kuzey Işıkları ve şimşekler doğal plazma kaynaklarının en iyi örnekleridir. Ayrıca yapay yollarla maddenin enerji içeriği artırılarak, laboratuvar koşullarında plazma üretimi de gerçekleştirilebilmektedir (Baboo, 2018).

Maddenin enerji içeriği artırılarak katıdan sıvıya, sıvıdan gaz hal geçişi oluşturulur. Tüm maddeler için her faz geçişinde, etkileşimler ve moleküller arası yapılar zayıflar ve sonunda tümüyle kırılır. Eğer bu reaksiyonlar daha yüksek enerjilerde gerçekleşmeye devam ederse, moleküller ve atom altı yapılar birbirinden ayrışır (Niemira ve Gutsol, 2010; Niemira, 2012). Bu ayrışma sonucunda plazmayı meydana getiren elektronlar, pozitif ve negatif iyonlar, serbest radikaller, gaz atomları, fotonlar ve uyarılmış moleküller oluşur (Baysal ve İçier, 2012; Yüksel ve Karagözlü, 2017; Zhang ve ark., 2017a).

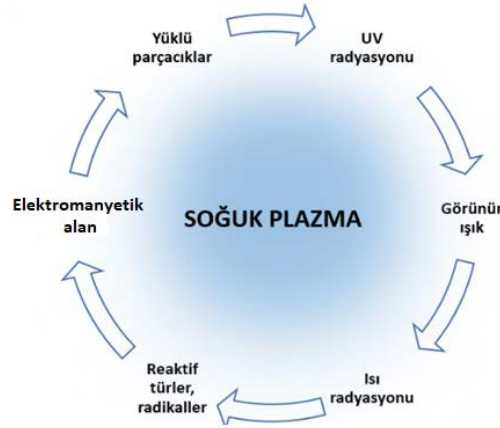
Maddenin dördüncü halinin keşfine giden yolda ilk adımlar, Sir Humphry Davy tarafından 1808 yılında kararlı halde DC ark deşarjının geliştirilmesi ve Michael Faraday ve ekibinin yüksek voltajlı DC elektriksel deşarj tüpüne yönelik araştırmaları ile atılmıştır (Akan, 2006). Plazma; ilk olarak Sir William Crookes tarafından 1879 yılında tanımlanmış, daha sonra 1897'de Thomson tarafından elektron ışınları (demeti) keşfedilmiştir (Baysal ve İçier, 2012; Korachi ve ark., 2015; Yüksel ve Karagözlü, 2017). Penning, 1926 yılında alçak basınçlı civa buharında radyo dalgası titreşimlerini belirlerken, Irving Langmuir 1929 yılında bu titreşimlerin bulunduğu bölge için ilk kez "PLAZMA" terimini kullanmıştır ve 1932 yılında Kimya dalında Nobel ödülünü kazanmıştır. 1970 yılında ise İsveçli Hannes Alfvén "Plazmaya verilen pertürbasyonun manyetik alan yönünde plazma frekansı ile yayılması" konulu çalışması kapsamında Fizik dalında Nobel ödülüne layık görülmüştür (Akan, 2006).

Plazmalar, geniş bir sıcaklık ve basınç aralığında uygulanan enerji ile üretilebilmektedir. Bu enerji, gaz halindeki molekülleri ayrıştırabilecek kadar etkin olan elektriksel, mekaniksel, termal ya da nükleer nitelikli bir enerji olabilmektedir. Bu amaçla kullanılan enerji kaynağının türüne ve miktarına bağlı olarak, plazma elektronlarının yoğunluk ve sıcaklığı değişmektedir. Bu nedenle yapay olarak üretilen plazma sistemleri genel olarak farklı bileşenler arasındaki enerji dağılımına göre; **termal plazma** ve **termal olmayan plazma** olmak üzere ikiye ayrılır (Misra ve ark., 2016; Zhang ve ark., 2017a).

Termal plazmalar, elektronların ve iyon türlerinin termodinamik dengede bulunduğu koşullarda ve yüksek sıcaklıklarda ($10^6\text{K} - 10^8\text{K}$) gazın ısıtılmasıyla üretilmektedir. Termal olmayan (veya soğuk) plazmalar ise düşük sıcaklıklarda yüksek enerji içeren ve termodinamik olarak dengede olmayan iyonların ve hareketli moleküllerin varlığı ile karakterize edilir (Bourke ve ark., 2018). Plazma oluşturulurken düşük sıcaklıklar kullanıldığı için **soğuk plazma** olarak da adlandırılır. Termal olmayan plazmalar; yüksek sıcaklıkta elektronları içerebilirler, ancak nötr parçacıklar, iyonlar ve radikaller oda sıcaklığına yakın kalırlar (Sarangapani ve ark., 2018). Termal olmayan plazmada yüksek enerjili elektronlar plazmadaki kimyasal reaksiyonların başlatılmasında en önemli rolü oynarlar. Burada elektron sıcaklığı, pek çok gaz molekülünün bağlarının kırılmasını sağlayacak şekilde 1-10 eV arasındadır (Yüksel ve Karagözlü, 2017; Zhang ve ark., 2017a). Diğer taraftan soğuk plazmadaki tüm gazın sıcaklığı, enerji maliyetini düşürecek şekilde, neredeyse oda sıcaklığına yakındır. Ek olarak yapılacak uygulamaya göre farklı plazma kaynakları, çeşitli uygulama gazları ve plazma özellikleri ile çok çeşitli uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir. Soğuk plazma, bahsedilen bu karakteristikleri nedeni ile birçok uygulama alanına sahiptir (Zhang ve ark., 2017b).

Soğuk Plazma Teknolojisi

Soğuk plazma teknolojisi; bir gaza enerji verilerek, gaz içindeki bazı moleküllerin nötr kalması, bazı moleküllerin ise serbest elektronlara, radikallere, pozitif ve negatif iyonlara, ısı ve elektromanyetik radyasyona kadar ayrıştırılması ile oluşturulur (Misra ve ark., 2014) (Şekil 1).



Şekil 1. Soğuk Plazma Kimyası (von Woedtke ve ark., 2018)

Soğuk plazma, uygulama noktasında 315.15 K (40°C)'den daha düşük olan özel bir plazma tipidir. Alçak veya atmosferik basınçta düşük derecede iyonlaşma ile karakterize edilir. Soğuk plazmayı oluşturan gazın iyonlaşması için gaza uygulanan enerjinin kaynağı, doğrudan veya alternatif bir elektrik akımı, radyasyon ya da lazer ışığı şeklinde olabilir (Singh ve ark., 2014). Kullanılan gaz karışımları oksijen (O₂), azot (N₂), hidrojen (H) ve karbon dioksit (CO₂) gibi normal atmosferik gazlar ile helyum (He) ve argon (Ar) gibi soy gazları içerebilir (Han ve ark., 2019) (Tablo 1). Uygulanan elektrik enerjisi, düşük kütleleri nedeniyle elektronları seçici olarak ısıtır ve ısınan elektron sıcaklığı; iyonların, nötr parçacıkların ve gazın sıcaklığından çok daha yüksektir. Ayrıca elektron sıcaklığı, özellikle reaktif oksijen ve azot türleri (ROS ve RNS) ile UV radyasyonu gibi çeşitli türleri üretecek kadar aktifleşir. Bu durum soğuk plazmanın temas ettiği yüzeylerde, dekontaminasyon ve sterilizasyonun gerçekleştirilmesini sağlar (Bogaerts ve Neyts, 2018; Laroussi ve Leipold, 2004; Misra ve ark., 2014). Bu nedenle soğuk plazma, özellikle bakterilerin dekontaminasyonunda oldukça etkilidir (Daeschlein, 2018; Misra ve ark., 2014).

Çizelge 1. Soğuk Plazmada Oluşan Bileşenler ve Oluşum Reaksiyonları

Bileşen	Reaksiyon	Kaynaklar
$N_2(A^3\Sigma_u^+)$	$N_2 + e^- \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + e^-$	(Uhm, 2015)
N	$N_2 + e^- \rightarrow N + N + e^-$	(Uhm, 2015)
NO	$N + O + M \rightarrow NO + M$ $O^* + N_2 \rightarrow NO + N$ $N^* + O_2 \rightarrow NO + O$ $N + OH \rightarrow NO + H$	(Uhm, 2015; Whitehead, 2016)
NO ₂	$O + NO + M \rightarrow NO_2 + M$ $O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$	(Whitehead, 2016)
N ₂ O	$NO_2 + N \rightarrow N_2O$ $N_2(A^3\Sigma_u^+) + O_2 \rightarrow N_2O + O$ $N_2(A^3\Sigma_u^+) + O + M \rightarrow N_2O + M$	(Whitehead, 2016)
NO ₃	$NO_2 + O + M \rightarrow NO_3 + M$	(Whitehead, 2016)
N ₂ O ₅	$NO_3 + NO_2 + M \rightarrow N_2O_5 + M$	(Whitehead, 2016)
O ₃	$O_2 + e^- \rightarrow O + O$ $O + O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O_2$	(Whitehead, 2016)
OH	$H_2O + e^- \rightarrow H + OH + e^-$ $H_2O^+ + e^- \rightarrow H + OH + e^-$ $N_2(A^3\Sigma_u^+) + H_2O \rightarrow OH + N_2 + H$	(Uhm, 2015; Whitehead, 2016)
HO ₂	$OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2$	(Uhm, 2015)
H ₂ O ₂	$OH + OH \rightarrow H_2O_2$	(Uhm, 2015)
NH	$N + H \rightarrow NH$	(Whitehead, 2016)
NH ₂	$NH + H \rightarrow NH_2$	(Whitehead, 2016)
NH ₃	$NH + H_2 \rightarrow NH_3$ $NH + 2H \rightarrow NH_3$ $NH_2 + H \rightarrow NH_3$	(Whitehead, 2016)

*M: Herhangi bir moleküldür. Reaksiyona diğer atom ve moleküller ile birlikte girerken, reaksiyon sonucu etkileşime girmeden oluşan enerji ile birlikte sistemden çıkar.

Yaygın olarak kullanılan plazma kaynakları tarafından üretilen reaktif türlerin çoğu; atomik oksijen [O], tekli oksijen (O=O, [¹O₂]), süperoksit anyon [O₂⁻] ve ozon [O₃⁻] gibi reaktif oksijen türleri (ROS) ve atomik azot [N], uyarılmış nitrojen [N₂(A)], nitrik oksit [NO] gibi reaktif azot türleri (RNS) ile eğer yeterli nem mevcutsa H₂O⁺, OH⁻ anyonu, OH radikal veya H₂O₂ gibi elektronik olarak uyarılmış oksijen (O₂) ve azot (N₂) türevleridir. ROS arasında ozon, atomik oksijen, tekli oksijen, süperoksit, peroksit ve hidroksil radikallerinin bakteriyel inaktivasyona katıldığı düşünülmektedir. Soğuk plazmanın kimyasal olarak karmaşık yapısı ve dolayısıyla da etkinliği; gaz bileşimi, gaz akış hızı, gaz basıncı, cihaz tasarımı (nem, sıcaklık, voltaj ve frekans), plazmanın işlem süresi ve plazmanın çalıştırılma koşulları (doğrudan veya dolaylı) gibi sistem parametrelerine bağlıdır (Bourke ve ark., 2017). Besleme gazının tipi; oluşacak reaktif türlerin aralığını ve türünü etkileyebilir. Çalışma gazı olarak havanın kullanılmasıyla, yüklü parçacıklar, enerjik iyonlar, ROS ve RNS gibi reaktifler üretilirken, ultraviyole (UV) radyasyonu da oluşturulabilir (Lu, Patil ve ark., 2014; Han ve ark., 2019).

Soğuk Plazma Tipleri

Soğuk plazma sistemleri; mekanizmalara, basınçla uygulamasına ve elektrot geometrisine dayanarak, pek çok farklı tipte üretilebilirler (Petitpas ve ark., 2007). Soğuk plazma üretim kaynaklarının çok yönlülüğü (elektriksel, termal, optik (UV ışığı), elektromanyetik ışınım, radyoaktif gama ve X-ışını gibi), güncel yaklaşımlarla uyumlu benzersiz tasarımlar sunar (Pankaj ve ark., 2018) (Tablo 2).

Çizelge 2. Soğuk Plazma Tipleri

Plazma çeşitleri	İşletim koşulları	Yaygın kullanılan besleme gazı	Avantajlar	Kaynaklar
Dielektrik deşarj plazma (DBD)	Dielektrik materyal ile kaplı iki paralel elektrot	Azot, helyum, argon, hava,	*Atmosferik veya daha yüksek basınçlarda çalışabilir, *Çok çeşitli gazlarla işletilebilir (asil gazlar, hava veya su buharı, öncüllerin özel karışımları ve hemen hemen tüm gaz kombinasyonları), *Farklı elektrot geometrileriyle üretilebilir ve reaksiyon verimliliğini artıracak şekilde geniş ve homojen bir deşarj alanı sağlanabilir, *Pek çok kimyasal reaktif tür oluşturabilir, *Geniş alanlı uygulamalar için idealdir.	Nehra ve ark., 2008; Han ve ark., 2019; Tolouie ve ark., 2018; Niemira, 2012.
Radyo-frekans (RF) soğuk plazma	Değişik güç ve voltaj ayarlarında işletilen hızlı döngülü elektriksel impulslar	Helyum, hava	*Uygulamanın frekans aralığı Hz'den MHz'e kadar ulaşabilir.	Han ve ark., 2019; Hoffman ve ark., 2013; Niemira, 2012.
Mikrodalga soğuk plazma (MCP)	Elektronların kullanılmadığı mikrodalga frekansı		*Elektrotsuz olduğu için üretilmesi kolaydır. *Kullanımı pratiktir. *Özel karışımlarda, öncüllerde, su buharında ve havayla kolayca oluşturulabilir.	Niemira, 2012; Tolouie ve ark., 2018
Atmosferik soğuk plazma (CAP) jet	İyonize edilecek gazın yüksek oranda aktığı 2 elektrot	Atmosferik hava, oksijen, argon, helyum	*Atmosferik basınçta stabil, homojen ve uniform deşarj sağlayabilir, *İyonize edilen gaz direkt olarak plazma jetine bağlandığı için kullanımı kolay ve pratiktir. *Gaz sıcaklığı düşük olduğu için hassas yüzeylere zarar vermez, daha sağlam yüzeylerde ise gaz sıcaklığı artırılabilir. *Direkt uygulanabilir ve böylece dar alanlarda bile etkin olabilir. *Korona plazma ile büyük bir benzerlik sergiler.	Nehra ve ark., 2008; Han ve ark., 2019; Tolouie ve ark., 2018; Thirumdas, 2018; Coutinho ve ark., 2018; Hoffman ve ark., 2013; Niemira, 2012.
Korona plazma (CDP)	Korona deşarj	Azot, helyum, hidrojen/metan	*Atmosferik veya daha yüksek basınçlardaki düşük sıcaklıklarda, gazlara uygulanabilir. *İyonize gaz uzun süre stabil ve sabit kalabilir.	Nehra ve ark., 2008; Han ve ark., 2019; Tolouie ve ark., 2018;

Termodinamik dengede olmayan soğuk plazma sistemlerinin; düşük güç gereksinimi ve nispeten düşük sıcaklıklarda gaz içindeki fiziksel ve kimyasal reaksiyonları tetiklemeleri nedeniyle organik sentez için oldukça

umut verici olarak kabul edilmektedir. Geçtiğimiz 20 yılda dielektrik bariyer deşarj (DBD), korona deşarj (CD), radyo frekans (RF), mikrodalga ve atmosferik basınçlı plazma jet (APPJ) gibi soğuk plazma tipleri farklı teknikler kullanılarak üretilmiştir. Üretilen tüm soğuk plazma tipleri endüstriyel uygulama alanları için oldukça etkindir (Hati ve ark., 2018).

Soğuk Plazma Teknolojisinin Uygulama Alanları

Pek çok farklı araştırma alanı olsa da, araştırmacılar son yıllarda, soğuk plazma teknolojisinin bilim ve mühendislik alanındaki uygulamaları üzerine yoğunlaşmıştır (Tablo 3) (ReynaMartinez ve ark., 2018).

Çizelge 3. Soğuk Plazma Teknolojisinin Kullanım Alanları

Soğuk Plazma Teknolojisinin Kullanım Alanları				
<u>Tıp</u>	<u>Gıda</u>	<u>Tarım</u>	<u>Su</u>	<u>Materyal</u>
*Yara iyileşmesi *Kanser tedavisi *Kan koagülasyonu *Diş tedavisi *Biyomedikal uygulamalar (Pankaj ve Keener, 2017; Misra ve ark., 2016; Gavahian ve Khaneghah, 2020).	*Dekontaminasyon *Enzim inaktivasyonu *Mikrobiyal inaktivasyon *Gıda paketlenme (Pankaj ve Keener, 2017; Misra ve ark., 2016; Gavahian ve Khaneghah, 2020)	*Dormansinin kırılması *Çimlendirme *Dekontaminasyon *Bitki büyümesi *Bitki direncinin iyileştirilmesi *Sürdürülebilirlik açısından kaynakların verimli kullanımı (Pankaj ve ark., 2018; Pankaj ve Keener, 2017; Misra ve ark., 2016; Pankaj ve Thomas, 2016; Iranbakhsh ve ark., 2020)	*Su saflaştırma *Atık su sterilizasyonu (Pankaj ve Keener, 2017; Misra ve ark., 2016; Attri ve ark., 2017).	*Tekstil *Polimer *Nanomateryal *Elektrokimya (Pankaj ve Keener, 2017; Misra ve ark., 2016; Attri ve ark., 2017; Gavahian ve Khaneghah, 2020).

Soğuk plazma; içerisinde bulunan, aktif atom, uyarılmış moleküller, yüklü parçacıklar, ROS, RNS ve UV fotonları ile yüksek antibakteriyel özellik göstermektedir. Bu özelliğinden dolayı bakterileri, kanser hücrelerini, fungusları, sporları, parazitleri, fajları ve virüsleri etkisiz hale getirebildiği bilinmektedir (Mai-Prochnow ve ark., 2014). Soğuk plazma teknolojisinin kendine has özellikleri (aktif parçacıkların, UV ışının ve elektromanyetik alanın varlığı vb.) biyolojik nesnelere üzerinde uyarıcı bir etki göstermektedir. Bu özellikleri ile plazma teknolojileri; tıp, tarım, çevre, ekoloji ve gıda gibi alanlarda yeni umutlar açan yeni nesil bir sterilizasyon uygulaması olarak görev yapabilmektedir (Filatova ve ark., 2018). Plazma teknolojisinde yeni tıbbi/terapötik araştırmalar; diş enfeksiyonlarının tedavisi, çeşitli dermatolojik uygulamalar, yara sterilizasyonu, yara iyileşmesi, kan koagülasyonu ve kanser tedavisini de içeren farklı uygulama alanlarında gerçekleştirilmektedir (Graves, 2014; Nishime ve ark., 2017). Ayrıca elektronik cihazlarda hassas yüzeylerin sterilizasyonu, endüstride tekstil ürünlerinin kalitesinin iyileştirilmesi ve tıbbi cihazların dekontaminasyonu gibi farklı alanlarda da uygulamaları bulunmaktadır (Mandal ve ark., 2018). Plazma teknolojisinin atık oluşturmeyen ve çevre dostu bir uygulama olmasının yanı sıra, malzemenin özelliklerinde arzu edilen değişiklikler sağlama nedeniyle özellikle polimer teknolojisinde kullanımı da oldukça yaygındır (Kusano, 2014). Son yıllarda, soğuk plazma

teknolojisinin tıbbi ve endüstriyel bitkiler üzerindeki potansiyel avantajları hakkında gerçekleştirilen çalışmalar hız kazanmıştır. Çalışmaların temel odak noktası; tohum dekontaminasyonu, tohum çimlenmesi ve bitki büyümesini etkileyen koşullar üzerinde yoğunlaşmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar plazma etkileşimli tarım uygulamaları adına geniş bir vizyon sağlasa da, bitki hücre içi moleküller ve plazma etkileşimleri hakkındaki bilgiler halen daha oldukça yetersizdir (Iranbakhsh ve ark., 2020). Gerçekleştirilen bu derlemede, soğuk plazma teknolojisinin tarım başta olmak üzere bitkiler üzerine yapılan çeşitli uygulamalarından bahsedilecektir.

Soğuk Plazmanın Tarım Uygulamaları

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO- Food and Agriculture Organization)'ne göre; iklim değişikliği, hızlı sanayileşme ve şehirleşme nedeniyle ilerleyen yıllarda küresel gıda ihtiyacı karşılanamaz hale gelecektir (Sivachandiran ve Khacef, 2017). 30 yıldan fazla bir süredir, tarım bölgelerinde artan sıcaklıkların ve değişen yağış rejiminin, tarım arazilerinin üretkenliğini büyük oranda olumsuz etkilediği ve önümüzdeki yıllarda küresel gıda üretimi üzerindeki baskıyı artıracığı genel olarak kabul edilmiştir (Elbehri, 2015). Ayrıca şehirleşme, çölleşme, toprak erozyonu vb. sebeplerden ötürü her yıl kaybedilen 5-10 hektarlık tarım arazileri ve 2050'de 9 milyara ulaşacağı tahmin edilen insan nüfusu nedeniyle, gıda talebinin karşılanamayacağı da düşünülmektedir. Bu nedenle 21. yy.'ın en büyük küresel sorunlarından biri gıda güvenliğinin korunması ve iyileştirilmesidir (Farsund ve ark., 2015). Ekili araziye artırmak zor olduğu için, gıda sıkıntısını gidermenin tek yolu, ekonomik olarak uygulanabilir bir süreçte mahsul verimini arttırmaktır. Tohum çimlenme ve bitki büyüme hızını artırarak, dünya nüfusunun gıda ihtiyacının karşılanabileceği düşünülmektedir. FAO'ya göre gıda kıtlığının en aza indirilmesinde yararlanılacak en iyi yöntem, toprak ve su kaynaklı kirlenmenin (mikroorganizma, bakteri, fungus ve diğer kimyasal bileşenler) tohum yüzeyinde neden olduğu kontaminasyonu elimine ederek çimlenme oranının artırılmasıdır. Ayrıca depolama, gübreleme, uygun olmayan iklim koşulları ve kimyasal (intestisit ve pestisit) kullanımı gibi diğer çevresel koşulların da iyileştirilmesi gereklidir. Ancak halihazırda mahsul verimini arttırmak için kullanılan geleneksel yöntemler (gübreleme, sulama) ekonomik değildir ve bazı çevresel problemlere neden olduğu bilinmektedir (Sivachandiran ve Khacef, 2017; Judée ve ark., 2018). Sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından çevrenin ve doğal kaynakların korunması göz önünde bulundurulduğunda, tarımsal verimliliği arttırmak ve verim açığını kapatmak adına yeni yaklaşımlara ve çözüm önerilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, soğuk plazma teknolojisi yenilikçi, hızlı, ekonomik ve atık üretmeyen çevre dostu bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Son 10 yıldır, plazma araştırmacıları, tarımda soğuk plazma (plazma tarımı) uygulamaları üzerinde çalışmaktadırlar. Plazma teknolojisinin tohumlara uygulanması ile çimlenme oranı ve bitki büyümesinin artırılacağı, tohum yüzeyinin dekontaminasyonunun sağlanabileceği ve toprak üzerine uygulanan plazma kimyası ile fazla su ve fazla kimyasal gübre talep etmeden verimin artırılarak ekosisteme ve çevreye daha az zarar verilebileceği ifade edilmiştir (Degutyte-Fomins ve ark., 2020; Brandenburg ve ark., 2019; Puač ve ark., 2018; Judée ve ark., 2018; Jiang ve ark., 2018).

Soğuk plazma uygulamaları sırasında canlı dokular; ozon, hidroksil radikalleri ve nitrik oksit (NO) gibi çeşitli ROS ve RNS molekülleri ile etkileşime girerken, moleküller ve fizyolojik seviyelerde etki eden UV

radasyonuna da maruz bırakılmaktadır. Bu özel sistemler; bitkilerde, tohumlarda (besin zincirinde başlangıç ana bileşeni) ve nihai olarak da gıdalarda çeşitli sinyal yollarını başlatarak, moleküler ve biyokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesine yol açabilirler (Babajani ve ark., 2019; Iranbakhsh ve ark., 2017; del Rio, 2015). Plazma tarafından oluşturulan ROS ve RNS'nin bitki hücreleri üzerindeki olumlu etkileri değerlendirilmiştir ve ROS'un; hücre çoğalması ve farklılaşması, programlanmış hücre ölümü, tohum çimlenmesi, gravitropizm, kök tüylerinin büyümesi, yaşlanma ve polen tüpünün gelişmesi vb. için sinyal molekülleri olarak hareket ederek bitki gelişim süreçlerine katıldığı bildirilmiştir. Ancak ROS'un çeşitli bitki gelişim aşamalarındaki düzenleyici etkisi henüz bilinmemektedir. RONS (Reaktif oksijen ve azot türleri); bitkilerde birçok önemli sinyal reaksiyonu için gerekli olmakla birlikte, aynı zamanda aerobik metabolizmanın yan ürünleridirler (Volkov ve Kolobov., 2017). ROS ve RNS, kritik sinyalizasyon bileşenleri olarak hareket ederler ve sinyal yollarının, hücrel fizyolojinin, gen ifadesinin, farklılaşmanın ve büyümenin düzenlenmesine katkıda bulunurlar. Kısa ömürlü radikallerin etkileri yerelken, uzun ömürlü bileşenler uzak bölgelere taşınabilir ve sistemik tepkilerin tetiklenmesinde görev alırlar (del Rio, 2015).

Gerçekleştirilen farklı araştırmalar, tohumun dekontaminasyonu, tohum çimlenme verimliliği ile fidelerin erken büyümesinin artırılması, farklılaşma sürecinin düzenlenmesi, hücrel fizyolojinin ve gen ekspresyon sisteminin değiştirilmesinin yanı sıra, bitki direncinin abiyotik-biyotik stres koşullarına karşı iyileştirilmesi gibi soğuk plazmanın potansiyel faydalarını göstermiştir (Degutyte-Fomins ve ark., 2020; Babajani ve ark., 2019; ve Stolárik ark., 2015; Singh ve ark., 2015). Çalışmalarda, plazmanın tohum yüzeyinde önemli miktarda mikroorganizma dekontaminasyonu sağladığı, islanabilirliği, tohumun su emme kapasitesini arttırdığı ve tohum çimlenmesini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca, plazmanın, tohum rezerv/depolama/stok kullanımını, çimlenme sırasında α -amilaz aktivitesini, fotosentetik pigment içeriğini, fotosentetik kapasiteyi ve süperoksidaz, peroksidaz ve polifenoloksidaz aktivitesini arttırdığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak tüm bu veriler değerlendirildiğinde, soğuk plazma uygulamasının bitkilerde gelişimin iyileştirilmesi ve verimin artırılmasına etkili olduğu belirlenmiştir (Ling ve ark., 2018).

Soğuk Plazmanın Tohum Çimlenmesi Üzerine Etkisi

Tohumların nem içeriği, hormon üretimi ve enzim aktivitesi gibi faktörler üzerinde etkili olan toprak sıcaklığındaki artış nedeniyle, tohum çimlenmesi ve bitki büyümesi olumsuz yönde etkilenmektedir. Tohumlarda çimlenmeyi geciktiren uyku halini (dormansi) kırmak ve böylelikle çimlenmeleri arttırmak amacıyla, tohumlara çeşitli fiziksel (kazıma, tabakalaşma, manyetik işlem, güneş ışığı, ultraviyole ışık ve sıcak suda ıslatma) ve kimyasal yöntemler (çeşitli bileşenler, fungusitler ve bitki büyüme düzenleyicileri) uygulanmaktadır. Emek isteyen ve zaman alıcı olan bu yöntemler, çeşitli çevresel problemlere yol açan bazı kimyasal atıkları oluşturabilirler (Kakati ve ark., 2019).

Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, soğuk plazma uygulamalarının tohum çimlenmesinin yanı sıra, bitki gelişimi ve büyümesi üzerindeki olumlu etkisini de göstermektedir. Tohum yüzeyinde gerçekleştirilen soğuk

plazma uygulamaları, tohum yüzeyinin sterilizasyonunun sağlanmasında oldukça etkilidir. Ayrıca tohum kabuğunun hidrofilik özelliğini etkileyerek su emilimini ve antioksidan enzim aktivitesini artırarak, tohumlarda çimlenme oranının ve potansiyelinin geliştirilmesine de yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte soğuk plazma uygulaması sırasında, kimyasal madde kullanılmaması tohumlarda oluşabilecek hasarı önler (Dobrin ve ark., 2015; Šimončicová ve ark., 2018; Los ve ark., 2019; Park ve ark., 2018). Soğuk plazma uygulamalarında; işlem sonrasında yüzey üzerinde hidrofobik ve hidrofilik ince bir tabaka oluşur ve bu değişiklik, farklı tohum tiplerinde ve farklı ekim koşullarında olumlu sonuç alınmasına katkı sağlar (Lotfy ve ark., 2019).

Genel olarak soğuk plazmanın tohum üzerindeki etkileri şu şekilde özetlenebilir (Ohta, 2016);

- Tohum yüzeyinde bulunan mikroorganizmaların inaktivasyonu gerçekleştirilir.
- Tohum kabuğunun çatlatılması sağlanır.
- Tohum içinde anti-oksidanların üretimi gerçekleştirilir.
- Bitki hormonları aktif hale gelir.
- Tohumun su emilimi artar.
- Yüzey ıslaklığı değişir.

Será ve ark., (2008), yaptıkları bir çalışmada, Ar/O₂ ve Ar/N₂ gazlarının kombinasyonunu kullanarak oluşturdukları düşük basınçlı deşarj plazma ile kazayağı (*Chenopodium album agg.*) bitkisine ait tohumlarda soğuk plazma uygulamalarını gerçekleştirmişler ve 360-2880 s (her deneme 360 s artırılarak)'lik soğuk plazma uygulamalarından sonra çimlenme oranlarını ve sürgün gelişimlerini takip etmişlerdir. Çalışma sonucunda, etkili sonuç 1800 ve 2880 s'lik uygulama sonucunda elde edilmiştir ve kontrol grubuna göre 3 kat (%55) daha fazla çimlenme oranı sağlanmıştır. Ayrıca kültürün 5. gününde en uzun sürgün boyu (5.16 cm) 2880 s'lik uygulama sonucunda elde edilirken, kontrol grubuna göre (3.96 cm) daha iyi sonuç elde edilmiş olması, soğuk plazma uygulamasının tohum çimlenmesi için iyi bir alternatif olduğunu göstermiştir.

Será ve ark., (2010), tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada ise, soğuk plazma uygulamasının buğday ve yulaf tohumlarının çimlenmesi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla Ar gazının kullanıldığı 500 W'da çalışan düşük basınçlı bir plazma örneği kullanmışlardır. 15 yıllık buğday tohumları ile 3 yıllık yulaf tohumlarında, farklı plazma uygulama süreleri (0-2400 s) gerçekleştirilerek, 12 günlük çimlendirme denemeleri kurulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre; plazma uygulamasının ardından yulaf tohumlarının yüzeyinde gözle görülür bir değişiklik olmazken, 600 s'lik plazma uygulaması gerçekleştirilen buğday tohumlarında hem görsel, hem de yapısal değişiklikler gözlenmiştir. Ayrıca uygulamanın yapıldığı buğday tohumlarının kontrol grubuna göre daha hızlı çimlendiği de çalışmada belirlenmiştir.

Henselová ve ark., (2012), yaptıkları çalışmada, mısır tohumlarına (*Zea mays L.*) Diffüz Coplanar Yüzey Bariyeri Deşarjı (DCSBD) kullanarak 60 ve 120 s süreyle düşük sıcaklıklı plazma uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen uygulamaya bağlı olarak üyüme parametreleri, kök anatomisi ve tohumlardan elde edilen köklerde bazı enzimlerin (CAT-katalaz, G-POX-peroksidaz, SOD-süperoksit dismutaz ve DHO-dehidrogenaz) aktivitelerini değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre; mısır tohumlarında soğuk plazma uygulaması ile birlikte çimlenme sonrası büyümesi üzerinde olumlu etkiler gözlemlenmiştir ve bu

etkilerin uygulamanın süresine bağlı olduğu belirlenmiştir. 60 s'lik plazma uygulama; kök uzunluğu (kontrol örneğinde 14.67 cm, plazma uygulaması gerçekleştirilen örnekte 21.02 cm), taze ağırlık (kontrol örneğinde 502.70 mg, plazma uygulaması gerçekleştirilen örnekte 551.17 mg) ve kuru ağırlık (kontrol örneğinde 29.78 mg, plazma uygulaması gerçekleştirilen örnekte 34.08 mg) üzerinde önemli ölçüde etkili bulunmuştur. Bununla birlikte, 120 s'lik plazma uygulamasının, çalışılan büyüme parametreleri üzerinde olumsuz bir etkiye neden olduğu belirlenmiştir. Bu durumun nedeni, plazma uygulamasının sadece tohumun yüzey özelliklerini değil, diğer biyokimyasal parametrelerini de etkileyerek zararlı etkilere neden olabileceği gerçeğine bağlanmıştır.

Mitra ve ark., (2014), nohut (*Cicer arietinum*) tohumlarının çimlenmesi üzerindeki yüzey mikro deşarj hava plazma teknolojisinin etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada; 60 s'lik plazma uygulamasının, tohum çimlenmesini (%89.2) ve çimlenme hızını ($7.1 \pm 0,1$ tohum/gün) kontrol grubuna göre arttırdığını, çimlenme süresini ise kontrol grubuna göre 2.7 gün azalttığını belirlemiştir.

Jiayun ve ark., (2014), *Andrographis paniculata* bitkisinde tohum kabuğunu modifiye ederek DBD hava plazmasının; tohum çimlenmesi, fide oluşum oranı ve biyokimyasal aktivitede meydana getirdiği değişimleri incelemek amacıyla bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada farklı voltajlarda ve farklı zamanlarda gerçekleştirilen soğuk plazma uygulaması sonucunda, 10 s boyunca 5950 V'da uygulanan hava plazmasından sonra tohumların yüzey geçirgenliğini önemli ölçüde iyileştirdiği, tohum çimlenmesi ve fide çıkışının hızlanmasına katkı sağladığı belirlenmiştir. Çevresel strese karşı geliştirilen katalaz aktivitesi ve katalaz izoenzim ekspresyonunda artış meydana gelirken, fidelerdeki malondialdehit içeriği azalmıştır. 10 s boyunca 4250 V'da ve 20 s boyunca 5950 V'da uygulanan plazma işleminden sonra ise, tohum çimlenmesinde artış olmasına rağmen, fide oluşum oranlarında belirgin bir farklılık görülmemiştir. 20 s boyunca 3400 V'da ve 10 s boyunca 5100 V'da uygulanan plazma işlemlerinden sonra ise tohumların geçirgenliği ve fide oluşumunun azaldığı belirlenmiştir.

Bormashenko ve ark., (2015), RF hava plazması kullanarak fasulye bitkisinin tohumlarında su emilimi ve ıslanabilirlik özelliklerini değerlendirip, kotiledon ile tohum kabuğunun ıslatılmasında plazma uygulamasının etkisini incelemiştir. 120 s süreyle plazma ve 180 s süreyle vakum uygulanan fasulye tohumlarında, tohum kabuğunun dış yüzeyinin belirgin şekilde hidrofilize olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar ile soğuk plazma uygulamasının tohumlarda su emilimini önemli ölçüde arttırdığını bildirmişlerdir.

Matra, (2016), gerçekleştirdiği bir çalışmada; argon gazlı plazma jeti kullanarak, turp (*Raphanus sativus*) tohumlarının çimlenme parametrelerini incelemek için atmosferik soğuk plazmanın etkilerini incelemiştir. Tohumların çimlenmesi için uygun koşulları elde etmek amacıyla farklı plazma üretim gücü (90 ve 140 W) ve plazma uygulama süresi (120, 240 ve 360 s) denenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 140 W'lık ve 360 s'lik uygulamadan 7 gün sonra kontrol grubuna göre (4.5 cm) daha yüksek (7.5 cm) kök uzunluğu belirlenmiştir.

Štěpánová ve ark., (2017), tarımda yaygın olarak kullanılan salatalık (*Cucumis sativus* L.) ve biber (*Capsicum annuum* L.) tohumlarına atmosferik hava kullanılan ve diffüz koplanar yüzey bariyeri deşarjı ile oluşturulan plazma uygulayarak tohumların çimlenme özelliklerinin geliştirilmesini ve bazı hastalık yapıcı patojenlerin giderilmesini sağlamak üzere bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Uygulama sonrasında her iki tür

tohumun yüzey morfolojisinde önemli bir değişiklik olmadığı saptanmıştır. Salatalık tohumlarının çimlenmesi için en iyi uygulama süresi 20 s, biber tohumları için ise 4 s olarak belirlenmiştir. Plazma uygulanmayan kontrol grubuyla karşılaştırıldığında ise plazma uygulaması gerçekleştirilen salatalık tohumlarında çimlenme oranı %92 iken, biber tohumlarında bu oran %72 olarak belirlenmiştir.

Jiang ve ark., (2018), tarafından domates (*Solanum lycopersicum L.*) bitkisinde helyum gazı kullanılan ve RF deşarj ile oluşturulan soğuk plazma uygulamasının tohum çimlenmesi, fide büyümesi, kök morfolojisi ve besin alımı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla; tohumlara 60, 80 ve 100 W'lık RF plazma uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre 80 W'lık uygulamanın domates tohumlarında; azot ve fosfor emilimini sırasıyla %12.7 ve %19.1, tohumun çimlenme potansiyelini %11.1 ve çimlenme oranını %13.8 oranında arttırdığı belirlenmiştir. Toplam kuru ağırlık, kök kuru ağırlığı, sürgün oranı ve yaprak alanı gibi fide büyüme özellikleri, 80 W'lık uygulamadan sonra önemli ölçüde artmıştır. Kök aktivitesi 80 W'luk uygulama ile %15.7, 100 W'luk uygulama ile %12.6 oranında artış göstermiştir. 80 W'lık uygulamanın, domates kök morfolojisi ve kök uzunluğu, yüzey alanı ve hacmini sırasıyla %21.3, %23.6 ve %29.0 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.

de Groot ve ark., (2018), tarafından, hava ve argon gazı kullanılarak işletilen DBD plazmanın pamuk (*Gossypium hirsutum L.*) tohumlarında çimlendirme oranı üzerine etkileri incelenmiş ve hava kullanan 1620 s'lik plazma uygulamasının tohumun su emilimini önemli ölçüde artırabildiği, çimlenmeyi ve pamukta soğuk toleransını iyileştirdiği belirlenmiştir. Argon gazı ile çalıştırılan plazma uygulaması, genel olarak tüm denemelerde hava ile çalıştırılan plazmaya göre daha düşük sonuçlar vermiştir.

Yodpitak ve ark., (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada argon gazı kullanılarak işletilen DBD plazmanın 20-300 s zaman aralığında ve 100, 135, 170 ve 200 W'lık işletim parametrelerinde, çeltik (*Oryza sativa L.*) tohumlarının gelişimlerini incelemiştir. Optimum plazma koşullarıyla (135 W, 75 s) işleminden sonra, en hassas çeltik çeşidinin çimlenme yüzdesi, kök uzunluğu ve fide yüksekliği ölçümleri sırasıyla %84, %57 ve %69 oranında artmıştır.

Soğuk Plazmanın Tohum Dekontaminasyonu Üzerine Etkisi

Çeşitli bitki türlerinin tohumlarında düşük çimlenme oranının nedeni, genellikle fitopatogenik bakteriler ve filamentöz fungusların kontaminasyonu ile ilişkilidir (Zahoranová ve ark., 2016). Gıdalar üzerinde kontaminasyona neden olan bakteriler genellikle, *E. coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* ve *Salmonella sp.* olarak belirlenmiştir. Bunların yanı sıra çeşitli virüsler, bakteriyel toksinler, pestisit kalıntıları ve mikotoksinler de gıdalar üzerinde olumsuz etkiler oluşturan gruplardır. Çeşitli bakteriler ve yüksek derecede dirençli sporlar gıdalar üzerinde biyofilm oluşturarak dezenfeksiyonun zorlaştırırlar (Bourke ve ark., 2017). Ayrıca tarımsal ürünlerin; *Aspergillus*, *Fusarium* ve *Penicillium* gibi fungus türlerinin ürettiği bir sekonder metabolit olan mikotoksinler ile kontaminasyonu da oldukça ciddi bir sorundur. Mikotoksinler; insan ve hayvan sağlığı için

oldukça tehlikeli olup, hepatotoksik, teratojenik, metajenik, kanserojenik ve nefrotoksik etkiler gösterebilirler (Reddy ve ark., 2009).

Çeşitli tohumların, meyve ve sebzelerin yüzey sterilizasyonunun gerçekleştirilmesi ve mikrobiyal inaktivasyonun sağlanması için soğuk plazma teknolojisinin kullanımı yaklaşık 10 yıllık bir süredir araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmektedir (Será ve Serý, 2018). Soğuk plazma uygulamasının, birçok gıda ürünüde gözlenen *E. coli*, *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Clavibacter michiganensis*, *Erwinia amylovora*, *Candida albicans*, *Aspergillus niger*, *Microdochium nivale*, *F. culmorum*, *Trichothecium roseum*, *Aspergillus flavus*, *A. clavatus* *Fusarium spp.* gibi çeşitli mikroorganizmaların plazma tarafından üretilen reaktif türlere maruz kalarak inaktive olduğu ve bu şekilde etkili bir sterilizasyon yönteminin gerçekleştirilebildiği ifade edilmiştir (Será ve ark., 2019; Han ve ark., 2016).

Soğuk plazmanın oluşturduğu reaktif türler, mikroorganizmalar ile kimyasal olarak etkileşime girerek hücre yüzeylerinde lezyonlar oluştururlar. Mikroorganizmaların hücre zarından geçebilen bu reaktif türler bu geçiş sırasında; membran lipitleri, proteinler ve nükleik asitler gibi zara ait makromoleküller ile reaksiyona girerler ve hücre bütünlüğünde ciddi bir hasara neden olurlar. Bu hasara bağlı olarak DNA modifikasyonları ve hatalı hücre replikasyonları oluşur (Kim ve ark., 2014). Reaktif türlerin verdiği hasara ek olarak, plazma kaynaklı UV fotonlarının hücre zarına ve hücresel bileşenlere verdiği zararlar da eklenince mikroorganizmalar inaktive edilir (Kim ve ark., 2017). Bu özellikleriyle değerlendirildiğinde, tohumlarda görülen mikrobiyal kontaminasyonun elimine edilmesinde soğuk plazma kullanımı; etkin bir mikrobiyal aktivite gösteren, kimyasal atık oluşturmayan ve tohum canlılığının devamlılığını sağlayan, umut verici bir yöntem olarak görülmektedir (Waskow ve ark., 2018).

Schnabel ve ark., (2012), *Brassica napus* (kolza) tohumları üzerine enfekte edilen *Bacillus atrophaeus* endosporlarına karşı argon gazlı DBD ve dolaylı MCP plazmanın antimikrobiyal etkinliği araştırmışlardır. Çalışmada ayrıca soğuk plazma uygulamasının, çimlenme özelliklerine etkisini de incelenmişlerdir. 9000 s'lik uygulama sonrasında *Bacillus atrophaeus* için 0.5 ve 5.2 log arasında mikroorganizma eliminasyonu sağlanırken, tohumların canlılığı/yaşayabilirliği plazma uygulamalarından etkilenmemiştir. Tohumların çimlenme oranında belirgin farklılıklar olmazken çimlenme hızında kayda değer bir artış gözlenmemiştir.

Filatova ve ark., (2013), gerçekleştirdikleri çalışmada, RF hava plazması sisteminin düz ve silindirik deşarj olmak üzere 2 farklı çeşidini kullanarak; kışlık buğday (*Triticum aestivum L.*), mısır (*Zea mays L.*) ve acı bakla olarak bilinen lüpen (*Lupinus angustifolius*) tohumları üzerinde *Fusarium spp.* ve *Aspergillus nigar* türlerinin inaktivasyonunu araştırmışlardır. Farklı zamanlarda ve farklı güçte tohumlar üzerine uygulanan plazma işleminden sonra kışlık buğdayda düz deşarj RF plazması ile *Fusarium* enfeksiyon yüzdesi %38'den %15 oranına düşürülmüştür. Buğdayda, 600 s'ye kadar olan plazma uygulaması her iki plazma türünde toplam enfeksiyonu azaltırken, daha uzun uygulama sürelerinin enfekte tohum yüzdesini arttırdığı belirlenmiştir. Bu durumun nedeni; tohum kabuğunun katmanlarının zarar görmesi sebebiyle tohumun enfeksiyona daha açık hale gelmesinden kaynaklanabileceği olarak ifade edilmiştir. Mısır tohumlarında ise, *Aspergillus niger*'in toplam enfeksiyon yüzdesi düz deşarj plazma ile %65'ten %35'e kadar düşürülmüş, mısır ve lüpen için 480 s'lik

uygulamanın inaktivasyon için uygun olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda plazma uygulamasının, dünya genelinde buğdayda görülen en zararlı kök hastalık etmeni olan *Fusarium spp.*'nin inaktivasyonunda etkili bir araç olduğu belirlenmiştir.

Mitra ve ark., (2014), gerçekleştirdikleri bir çalışmada yüzey mikro deşarj hava plazma teknolojisini kullanarak *Cicer arietinum* (nohut) tohumlarının üzerinde bulunan doğal mikrobiyotanın (*Aspergillus*, *Trichoderma*, *Penicillium*, *Botrytis*, *Sclerotinia*, ve *Rhizopus* türleri) azaltılmasını amaçlamışlardır. Soğuk plazma uygulama süresinin artışıyla birlikte, tohum yüzeyine bağlanan doğal mikrobiyotanın önemli ölçüde azalması sağlanmış, 120 ve 300 s'lik uygulamalar sonrasında mikrobiyotada sırasıyla 1 ve 2 log indirgeme elde edilmiştir.

Nishioka ve ark., (2014), çeltik tohumlarında enfeksiyona sebep olan patojen fungus *Rhizoctonia solani*'nin eliminasyonu amacıyla 600 s süreyle atmosferik basınç ve düşük basınç plazma uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Tohumlarda, 600 s süreli atmosferik basınç plazma uygulaması sonucunda *R.solani* sağkalım oranı %3'e düşürülmüş, ancak tohumların çimlenme oranı da azalmıştır. Düşük basınçlı plazma uygulamasında ise sağkalım oranı %83'den %1.7'ye düşürülmüş ancak çimlenme oranında kontrol grubuna göre belirgin bir farklılık olmamıştır.

Ziuzina ve ark., (2014), yaptıkları çalışmada dielektrik bariyer deşarjı (70 kV) ile oluşturulan atmosferik soğuk plazma cihazının, cherry domates ve çilek üzerinde bulunan *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* *Typhimurium* ve *Listeria monocytogenes*'e karşı antimikrobiyal etkinliğini incelemişlerdir. Çalışmada; 10, 60 ve 120 s'lik zaman periyodunda plazma uygulaması gerçekleştirilmiştir. Domates yüzeyinde gerçekleştirilen 10, 60 ve 120 s'lik plazma uygulamasından sonra, *S. enterica*, *E. coli* ve *L. monositogen* popülasyonlarında sırasıyla 3.1, 6.3 ve 6.7 log₁₀ CFU/örnek azalma gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, çileklerin daha karmaşık bir yüzeye sahip olması nedeniyle yapılan plazma uygulama süresi 300 s'ye çıkarıldıktan sonra *E. coli*, *S. enterica* ve *L. monositogen* popülasyonlarında 3.5, 3.8 ve 4.2 log₁₀ CFU/örnek'lik bir azalma gerçekleşmiştir.

Kordas ve ark., (2015), düşük basınçlı hava plazmanın, kışık buğday taneleri üzerinde kolonileşmeye neden olan fungus türleri üzerindeki potansiyel etkisini ve bu sürecin tohum kalitesi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Farklı sürelerde (3, 10, 30 s) ve farklı frekanslarda (100 ve 83 Hz) gerçekleştirilen plazma uygulaması sonucunda, optimum 10 s'lik uygulamanın, taneler üzerinde oluşan fungus kolonilerinin sayısını azalttığını bildirmişlerdir. Aynı zamanda soğuk plazma uygulamasının ilk büyüme aşamasında tohum gelişimine olumlu bir etkisi olduğunu da kanıtlamışlardır.

Abdi ve ark., (2016), gerçekleştirdikleri çalışmada Ar ve Ar-O₂ kombinasyonunun kullanıldığı bir DBD plazma uygulaması ile kimyon tohumlarında (*Cuminum cyminum* L.) gram negatif ve gram pozitif bakterilerin dekontaminasyon etkinliğini incelemişlerdir. Tohumlar üzerine 1200, 1800 ve 2400 s boyunca plazma uygulaması gerçekleştirdikten sonra elde edilen sonuçlara göre Ar gazının kullanıldığı 2400 s'lik ve Ar-O₂ gazının kullanıldığı 1200 s'lik plazma işleminden sonra yaşayan mikroorganizma sayısı sifira indirilmiştir.

Kim ve Min, (2018), soğan (*Allium cepa* L.) kuru pullarında enfekte olan *Salmonella enterica* serovar Enteritidis, *E. coli* O157: H7 ve *Listeria monocytogenes*'nin inaktivasyonunu gerçekleştirmek amacıyla helyum

gazı ile işlenen DBD plazmanın etkinliğini incelemişlerdir. Çalışmada DBD plazma uygulama sıklığı ve süresinin artışının bağlı olarak mikroorganizmaların azaldığı belirlenmiştir.

Thomas-Popo ve ark., (2019), tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada atmosferik soğuk plazmanın, buğday taneleri üzerinde Shiga-toksin üreten *E. coli*, *Salmonella enterica* ve doğal mikroflorayı yok etmedeki etkinliğini incelemişlerdir. 300, 600, 900 ve 1200 s'lik atmosferik hava ile işlenen DBD plazma uygulamasının ardından elde edilen sonuçlara göre; 1200 s'lik uygulama sonrasında mikroorganizma canlı sağkalım oranları TAL (Thin agar layer) ortamı ve SEL (Selective) agar üzerinde belirlenmiştir. TAL ve SEL sayımı sonrasında mikroorganizma canlı sağkalım oranlarında (log CFU/g), sırasıyla, 3.09 ve 4.84 (*E. coli*) ve 4.40 ve 4.32 (*S. enterica*) azalma olduğu belirlenmiştir. 1200 s boyunca plazma uygulamasından sonra, mezofiller, psikrotroflar ve *Enterobacteriaceae* 'nin log CFU/g azalmaları oranları ise sırasıyla 0.96, 2.14 ve 1.38 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, maya ve küller sadece 600 s'lik uygulama sonunda tamamen yok edilmiştir.

Soğuk Plazma Uygulamasının Toprak Zenginleştirme Üzerine Etkisi

Atık emisyonlar, böcek ilaçları, kimyasal gübreler, atık su sızıntıları, atmosferik birikintiler ve endüstrinin teknolojik gelişiminin hızlanması gibi sebeplere bağlı olarak oluşan toprak kirliliği, son yıllarda yoğun bir şekilde karşılaşılan küresel bir çevre problemidir (Bali ve ark., 2019). En gelişmiş ülkeler için bile kirlenmiş arazinin iyileştirilmesi ve suyun arındırılması karmaşık ve maliyetli bir sorundur. Toprak yıkama, bitki özütleme, elektrokinetik iyileştirme, fitostabilizasyon ve biyoremediasyon dahil olmak üzere kirlenmiş toprakların iyileştirilmesi için kullanılan çok çeşitli teknolojiler mevcuttur (Chiang ve ark., 2016). Bu tekniklerin bazıları çok fazla enerji tüketip, düşük iyileştirme verimliliği göstermekle birlikte çoğu zaman üretilen gazların veya sıvıların arıtılmasını da gerektirmektedir. Bu tekniklere bağlı olarak karşılaşılan bir diğer sorun ise kirletici kütlenin bir kısmının havaya ve yeraltı sularına karışmasıdır. Tüm bu nedenlerden dolayı, organik kirleticilerin topraklardan hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayan, su veya havaya karışmasını engelleyen ve diğer çevresel etkileri en aza indirgeyen uygun maliyetli teknolojilere gereksinim duyulmaktadır (Aggelopoulos ve ark., 2013) (Tablo 4). Tüm bu dezavantajlar araştırmacıları; toprak ve su kaynaklarının iyileştirilmesi için daha düşük maliyetli teknolojileri araştırmaya yönlendirmiş ve soğuk plazma teknolojileri iyi bir alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır (Ohta, 2016).

Soğuk plazma tekniği son yıllarda, çeşitli kirleticilerle seçici olmayan şekilde reaksiyona girebilmesi nedeniyle, kirlenmiş toprağın iyileştirilmesi için dikkat çeken hızlı ve etkili bir alternatif uygulama tekniği haline gelmiştir. (Li ve ark., 2017).

Çizelge 4. Toprak Zenginleştirme Alanında Soğuk Plazma Uygulamasının Sağladığı Avantaj ve Dezavantajlar

MEKANİZMA	AVANTAJ	DEZAVANTAJ
-Kontaminantların tahribatına önemli ölçüde katkıda bulunabilecek yüksek enerjili elektronların ve çeşitli kimyasal reaktif türlerin üretimi (ROS ve RNS) (Cheng ve ark., 2016; Stryczewska ve ark., 2013)	-Çeşitli radikaller ve oksitleyici bileşenleri üretmek için yüksek verimlilik, -Çeşitli kontaminantlar ve farklı konsantrasyonlar için geniş uygulanabilirlik, -Toprağın ön işlem süreci için düşük gereksinim, -Kirlenici maddelerin hızlı ve nispeten tam yıkımı, -Hızlı başlangıç ve sürecin kapatılması, -Basit ve kompakt tasarım, -Düşük sermaye ve işletme maliyetleri, -Diğer tekniklerle kombinasyona iyi uyum (Cheng ve ark., 2016, Stryczewska ve ark., 2013; Stryczewska ve ark, 2005)	-Derinlemesine çalışma gerektiren karmaşık süreç, -Plazma kimyasal reaksiyonları için bağıl kontrol edilemezlik, -Büyük hacimli plazmanın üretilmesi ve sürdürülmesi zorluğu (Cheng ve ark., 2016; Kulkarni ve ark., 2008)

Redolfi ve ark., (2010), atmosferik basınçta DBD reaktörü ile toprak matrisindeki kerosen bileşenlerinin oksidasyonunu inceledikleri bir çalışmada, plazma uygulaması ile topraktaki hidrokarbon türevli kerosen kirlenmelerin %90'a kadar uzaklaştırılabildiğini belirlemişlerdir. Ayrıca; toprak matrisinde gaz fazında oksidasyonun ardından, kerosen desorpsiyonuna göre kerosen oksidasyonunun daha fazla teşvik edildiği bildirilmiştir. Çalışma sonucunda, plazma teknolojisinin biyoremediasyon ile bağlantılı olarak toprağın iyileştirilmesi için umut verici bir oksidasyon tekniği olabileceği belirtilmiştir.

Lou ve ark., (2012), gerçekleştirdikleri bir çalışmada kloramfenikol ile kontamine olan toprağın iyileştirilmesi için atmosferik basınç DBD plazma uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre kloramfenikol bozunma verimliliğinin; toprağın nem içeriğine, plazma gazına ve uygulanan voltaja bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca çalışmada, aktif türlerin daha yüksek üretimi nedeniyle uygulanan voltajın artırılmasıyla kloramfenikol ayrıştırmasının daha etkili bir şekilde gerçekleştirilebileceğini de tespit etmişlerdir. Bununla birlikte farklı gaz atmosferlerinde (O₂, hava, N₂, Ar) yapılan deneyler sonucunda, O₃'ün kloramfenikol bozulmasına büyük katkı sağladığı belirlenmiştir. Yüksek oksijen akış hızı, topraktaki kloramfenikolün azaltımını desteklemiş ve optimum toprak nem içeriği %10 olarak bildirilmiştir.

Lu, Lou ve ark., (2014), gerçekleştirdikleri çalışmada, DBD plazma kullanarak, Asit Scarlet GR boyası ile kirlenmiş toprağa farklı zamanlarda ve farklı deşarj sıklığında DBD plazma uygulayarak toprak üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, 1500 s'lik DBD plazma uygulamasından sonra boyanın %93 oranında azaltıldığı belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma, asit scarlet GR'nin topraktan uzaklaştırılması için uygun bir yol olarak bildirilmiştir.

Wang ve ark., (2014), gerçekleştirdikleri çalışmada P-nitrofenol (PNP) ve pentaklorofenol (PCP) karışımları ile kirlenmiş toprağın iyileştirilmesi için hava gazı etkili CP plazma uygulamasının etkinliğini incelemişlerdir. 300 mg/kg PCP ve 300 mg/kg PNP ile kontamine edilen toprakta plazma uygulaması ile %86.0 PNP ve % 94.1 PCP giderimi elde edilmiştir.

Wang ve ark., (2016), gerçekleştirdikleri çalışmada glifosat ile kirlenmiş toprağın iyileştirilmesi amacıyla DBD plazma uygulamasının etkinliğini incelemişlerdir ve plazma uygulamasıyla iyileştirilen toprağı daha sonra

tohum çimlenme testi ile değerlendirmişlerdir. Çalışmada, glifosatın yaklaşık %93.9'unun, 0.47 g/kWh'lik enerji ile 2700 s boyunca uygulanan DBD plazma ile giderilebildiği belirlenmiştir. Plazma voltajının artırılması ve toprağın organik madde içeriğinin azaltılması ile glifosat degradasyonunun kolaylaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca plazma uygulamasından sonra iyileştirilen toprak üzerinde buğday tohumları ile yapılan çimlenme testinde, tohumların çimlenmesine engel teşkil edecek herhangi bir olumsuz etkiye rastlanmadığı da bildirilmiştir.

Zhan ve ark., (2018), gerçekleştirilen çalışmada fluoren ile kirlenmiş toprağı iyileştirmek amacıyla CP plazma etkinliğini incelemişlerdir ve pozitif-negatif gücün, deşarj geriliminin, deşarj sıklığının, elektrot boşluğunun, toprak neminin ve toprak pH'nın fluoren degradasyon verimine etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre optimal koşullarda (Deşarj gerilimi 30 kV, deşarj frekansı 50Hz ve elektrot aralığı 20mm) 2700 s'lik plazma uygulamasından sonra fluoren degradasyon oranının %99'a ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca toprağın içine direkt olarak uygulanan plazmanın, yüzeysel uygulamadan daha etkili sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Ayrıca düşük nem içeren, nötr ya da alkali topraklarda degradasyon veriminin daha yüksek olduğu da tespit edilmiştir.

Soğuk Plazma ile Su Muamelesi (Plazma Aktif Su)

Son yıllarda yapılan araştırmalara göre; 2025 yılına gelindiğinde küresel olarak en az 1,8 milyar insanın mutlak su kıtlığından etkileneceği tahmin edilmektedir. Günümüzde ise dünya nüfusunun yaklaşık olarak %25'inin tarımsal üretimin sürdürülmesi için gereken su kaynaklarından yoksun olduğu düşünülmektedir. Bitkilerin fizyolojik durumunu etkileyerek büyümesini engelleyen su stresi göz önüne alındığında, tarımın sürdürülebilirliği ve suyun etkin kullanımı için uygun maliyetli, çevre dostu ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi bir gereklilik haline gelmiştir (Peethambaran ve ark., 2015; Çamoğlu ve ark., 2018).

Soğuk plazma, son yıllarda gelişmekte olan ve çevresel problemlere karşı sunduğu avantajlar nedeniyle oldukça büyük bir ilgi gören sterilizasyon ve yüzey modifikasyon yöntemidir (Liao ve ark., 2020). Soğuk plazma teknolojisinin su yüzeyine veya suyun altına uygulanması ile elde edilen ve soğuk plazmanın dolaylı uygulaması olarak sınıflandırılan yöntem **plazma aktif su** (Plasma activated water-PAW) olarak adlandırılır. Kullanılan gaz, enerjiye ve plazmanın kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak plazma uygulanan suda birtakım reaksiyonlar gerçekleşir. Bu reaksiyonlar sonucunda, uygulama yapılan sıvı veya sıvı-gaz arayüzeyinde ROS ve RNS gibi reaktif türler açığa çıkar. Uygulama yapılan suda asidik bir ortam oluşturan bu türler, suyun bazı özelliklerinde önemli değişiklikler meydana getirir. Değişen bu özellikler; pH, redoks potansiyeli, iletkenlik, nitrit grupları ve nitrit konsantrasyonudur. PAW teknolojisinin sahip olduğu bu farklı kimyasal bileşim, mikrobiyal dezenfeksiyon için alternatif bir yöntem olarak kullanılmasında etkilidir. (Kakati ve ark., 2019; Thirumdas ve ark., 2018; Shen ve ark., 2016). PAW, su içerisinde ya da suyun yüzeyinde plazma deşarjı kullanılarak üretilir. Bu deşarjların ortak özelliği çeşitli reaktif türleri üretebilmeleridir. Direkt olarak su içinde uygulanan plazma deşarjı gaz plazma sistemlerinden çok daha düşük bir enerji verimliliğine sahiptir. PAW, yüksek bir oksidasyon-redüksiyon potansiyeli oluştururken düşük bir pH'a sahiptir (Ma ve ark., 2015).

Günümüzde PAW teknolojisine karşı olan ilgi, biyoloji ve tıp bilimlerinin yanı sıra tarım ve gıda endüstrisindeki potansiyel uygulamaları nedeniyle son yıllarda büyük ölçüde artmıştır (Bradu ve ark., 2020). Tarımsal uygulamalarda özellikle suyun verimli kullanımı, ürün kalitesinin artırılması, kimyasal ve böcek ilaçlarının azaltılması için çevre dostu bir uygulama olarak önerilmektedir (Porto ve ark., 2018). Ayrıca PAW ile temas halinde olan tohumlarda ROS ve RNS'nin etkileşimiyle; çimlenme oranı ve bitki büyümesi artırılarak tohum dekontaminasyonu da etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte yapılan çalışmalarda, PAW içerisinde eser miktarda bulunan metal iyonlarının (özellikle bakır ve çinko) bakteri inaktivasyonunda önemli rolleri olduğu ve antibakteriyel aktiviteye katkısının çalışmada kullanılan gaza bağlı olarak değişiklik gösterdiği de belirlenmiştir (Padureanu ve ark., 2018; Chen ve ark., 2018; Thirumdas ve ark., 2017).

Zhang ve ark. (2017b); mercimek tohumlarında çimlenme oranı ve kök uzama oranı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, atmosferik basınçlı plazma jeti (APPJ) kullanarak musluk suyu, demineralize su ve sıvı gübreyi aktive etmişlerdir. Musluk suyu ile elde edilen PAW'ın uygulandığı tohumlarda %80'e kadar çimlenme oranı elde edilmiştir. Ayrıca ticari gübre ile karşılaştırıldığında PAW uygulaması yapılan sıvı gübre ile daha yüksek bir gövde uzunluğu sağlanmıştır.

Qi ve ark. (2019), gerçekleştirdikleri bir çalışmada endüstriyel olarak kullanılan ve yeraltı suyuna karışarak insan sağlığı için oldukça tehlikeli bir kirletici olan Dimetil Flatat'ın, mikroplazma yardımıyla su içindeki degradasyonunu incelemişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; 17.8 W'da 1200 s boyunca yeraltı suyuna uygulanan plazma işleminden sonra, Dimetil Flatat'ın degradasyon oranının %99.9'a olarak belirlenmiştir.

Zheng ve ark. (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada tarımsal ürünlerdeki pestisit kalıntılarını azaltmak için PAW etkinliğini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada bir plazma jet ile oluşturulan PAW etkinliği asma bitkisinde foksim oranının azaltılması için kullanılmıştır. 600 s'lik PAW uygulamasından sonra asmalarda foksim degradasyon oranı %73.60 olarak belirlenmiştir. Ayrıca PAW'ın asidik doğasının ve oksidasyon kapasitesinin pestisitlerin azaltılmasında etkili olduğu da bildirilmiştir.

Xiang ve ark. (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada atmosferik plazma jet ile oluşturulan PAW'ın maş fasulyesinde mikrobiyal dekontaminasyon etkinliğini incelemişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre 1800 s boyunca PAW içine daldırılan maş fasulyelerinde, toplam aerobik bakteri ve maya-küf popülasyonları sırasıyla 2.33 ve 2.84 log₁₀CFU/g azalmıştır. Bu veriler PAW'ın filizlerde mikrobiyal kontaminasyonun kontrolü için umut verici bir teknoloji olarak kullanabileceğini göstermektedir.

Soğuk Plazmanın *In Vitro* Koşullarda Bitkisel Materyale Etkisi

Bitki biyoteknolojisinin en önemli uygulama alanlarından biri olan bitki doku kültürü yöntemleri, bitkilerin totipotensi (tek bir hücreden tam bir bitki üretimi) ve hücre plastisitesi (kültür hücrelerinin bölünme ve farklılaşma kapasitesi) özelliklerine dayanan modern bir uygulama tekniğidir. Bitki biyolojik sistemlerinin manipülasyonunu gerçekleştiren bu alan günümüzde hem akademik anlamda hem de ticari anlamda

uygulanmakta olup, insan ve çevre refahı için kullanılan eşsiz bir yöntemdir. Bitki biyoteknolojisinin başarısı, biyoteknolojik yaklaşımların bitki doku kültürü temel ilkeleri ile doğru kullanımına bağlı olup, bitki biyolojisi hakkında derin bir bilgi birikimi gerektirir. Bitki doku kültürü yöntemleri ile bitkisel uygulamalarda elde edilen başarı günümüzde beklenenin de ötesine geçmiş durumdadır (Altman, 2019; Singh, 2018; Anis ve Amad, 2016).

Bitki doku kültürü çalışmaları, bitki gelişim süreçlerini etkileyen morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal, genetik ve epigenetik değişikliklerin ortaya çıkmasına neden olabilecek bir dizi işlemler içerir. *In vitro* kültürlerde bitki elde etme konusunda yarım yüzyıllık bir araştırma alanı bulunmasına rağmen, birçok yönü de hala araştırılmaya devam etmektedir (Bednarek ve Orłowska, 2019). *In vitro* doku bitki doku kültürü, sürdürülebilir tarım için ümit verici bir role sahip olan güçlü bir teknolojidir ve çok az kimyasal kullanımıyla üstün kalitede elit ve hastaliksız bitkiler üretmek için büyük bir potansiyeldir (El-Sherif, 2018). Yeni ürünler geliştirmeye duyulan taleplerin artışıyla birlikte, *in vitro* doku kültürü bitki materyallerinin seri üretimi için zorunlu bir teknik haline gelmiştir. Ayrıca *in vitro* doku kültürü yöntemleri belirli bileşenlerin üretiminin ve birikiminin arttırmasında biyosentetik yolların manipülasyonuna olanak sağlayarak, fenolik bileşenler gibi bazı biyoaktif bileşenlerin üretimi için kullanılma potansiyeli oldukça fazladır (Dias ve ark., 2016).

Soğuk plazma teknolojisinin diğer teknolojiler ile kolaylıkla uyum sağlayabilen benzersiz özellikleri göz önüne alındığında, *in vitro* koşullarda bitki manipülasyonu için çeşitli amaçlara katkıda bulunabileceği birkaç alan olduğu düşünülmektedir. Bu alanlardan en önemlisi, bitki doku kültüründe uygulamalarında önemli bir kısıtlayıcı faktör olan tohum kaynaklı kirlenmenin, plazmanın antimikrobiyal etkileri ile giderilebileceğidir. Ancak plazma ile ön muamelesi gerçekleştirilen bitki eksplantlarının *in vitro* koşullardaki davranışı, anatomisi, fizyolojisi, morfogenezi, organogenezi ve fide büyümesi üzerindeki potansiyel yararları hakkında çalışmalar oldukça sınırlı olmasının yanında, olası tepkiler ve ilgili mekanizmalar henüz yeterince bilinmemektedir. Bu nedenle, bitki teknolojisindeki plazma teknolojisinin *in vitro* koşullarda işlevsel hale getirilmesi için yenilikçi ve inandırıcı araştırmalar yapılması gerekmektedir (Moghanloo ve ark., 2019; Iranbakhsh ve ark., 2018).

Safari ve ark., (2017), gerçekleştirdikleri çalışmada soğuk plazmanın dolmalık biberin (*Capsicum annuum*) yapısı ve büyüme modeli üzerindeki olası etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Tohumlara 60 ve 120 s boyunca argon türevli bir plazmaya (0.84Wcm^{-2} yüzey güç yoğunluğu) uygulaması gerçekleştirildikten sonra tohumlar, BA ve IAA bitki büyüme düzenleyicileri içeren MS (Murashige ve Sloop, 1962) besin ortamında kültüre alınmışlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; 60 s'lik plazma uygulamasının, toplam yaprak alanı ile birlikte sürgün ve kök uzunlukları üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğu ancak 120 s'lik uygulamanın olumsuz bir etki oluşturduğu belirlenmiştir.

Sonuç

Soğuk plazma teknolojisi; bugünün ve geleceğin teknolojik gelişimi göz önüne alındığında, tükenme tehlikesi ile karşı karşıya kalan doğal kaynakların korunması ve yeni kaynakların geliştirilmesi için umut verici bir alternatif

uygulama alanıdır. Günümüz biyoteknolojisi soğuk plazma teknolojisinin tıp, medikal, polimer, tekstil, otomotiv ve elektronik gibi alanlarda karşılaşılan sınırlamalara sunduğu çözüm önerileri ile endüstriyel boyutta bir gelişim göstermektedir. Ancak bu benzersiz teknolojinin sağladığı geniş vizyon tarım alanındaki uygulamalar için yetersiz kalmaktadır. Bilimsel literatürde plazma tarım olarak adlandırılan uygulamalarda son 10 yıldır hızlı bir artış olsa da hala plazma-bitki etkileşimi hakkındaki bilgiler oldukça eksiktir. Dünya bitki biyoçeşitliliğinin giderek yok olması, toprak, hava ve su kirliliğinin engellenememesi ve artan insan nüfusuna bağlı olarak gıda talebinin karşılanamayacak olması gibi küresel problemlerin önlenmesi için tarımsal uygulamalarda soğuk plazma teknolojisinin etki oranı artırılmalıdır. Soğuk plazma teknolojisinin tohum dekontaminasyonunun giderilmesi, çimlendirme potansiyelinin artırılması, sürdürülebilir ürün geliştirme, toprak ve su kirliliğinin önlenmesi gibi konularda sunduğu avantajlar ortadayken bilgi eksikliğinin giderilmesi adına yapılacak olan geniş kapsamlı çalışmalar oldukça önemlidir. Ayrıca bitki biyoteknolojisinin en önemli uygulama alanlarından biri olan bitki doku kültürü uygulamalarıyla plazma teknolojisinin birleştirilmesi, bitki fizyolojik süreçlerinin anlaşılmasına yardımcı olabileceği gibi sürdürülebilirlik açısından etkili ürünlerin ortaya çıkarılmasında ve ürüne özel uygulamaların geliştirilmesine de önemli katkılar sağlayabilir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, tarım alanında uygulanacak olan bilimsel çalışmaların, bitkilerde plazma ile tetiklenen reaksiyonların anlaşılması ve geliştirilmesine yönelik incelenmesi ve özellikle *in vitro* uygulamalar ile çeşitlendirilmesinin gerekliliği önemle vurgulanmalıdır.

Teşekkür Bilgi Notu

Yapılan bu çalışma etik kurul izni gerektirmemektedir. Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Bu makaleyi hazırlayan yazarlar, araştırmaya eşit oranda katkı sağlamıştır ve yazarlar arasında her hangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Abdi, S., Dorranean, D., & Mohammadi, K. 2016. Effect of oxygen on decontamination of cumin seeds by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma. *Plasma Medicine*, 6(3-4), 339–347.
- Aggelopoulos, C. A., Tsakiroglou, C. D., Ognier, S., & Cavadias, S. 2013. Ex situ soil remediation by cold atmospheric plasma discharge. *Procedia Environmental Sciences*, 18, 649-656.
- Akan, T. 2006. Maddenin 4. Hali Plazma ve Temel Özellikleri. *Elektronik Çağdaş Fizik Dergisi*, 4.
- Altman, A. 2019. Plant tissue culture and biotechnology: Perspectives in the history and prospects of the International Association of Plant Biotechnology (IAPB). *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 55(5), 590-594.

- Anis, M. and Ahmad, N. 2016. *Plant tissue culture: a journey from research to commercialization: Plant Tissue Culture: Propagation, Conservation and Crop Improvement*. Springer, Singapore, pp: 3-13.
- Attri, P., Arora, B. and Choi, E. H. 2017. Retraction: Utility of plasma: a new road from physics to chemistry. *RSC Advances*, 7(26), 15735-15735.
- Babajani, A., Iranbakhsh, A., Ardebili, Z.O. and Eslami, B. 2019. Seed priming with non-thermal plasma modified plant reactions to selenium or zinc oxide nanoparticles: cold plasma as a novel emerging tool for plant science. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 39(1), 21-34.
- Baboo, R. A., 2018. Study on plasma chemistry for human health & waste management. *International Journal of Research and Analytical Reviews*. 5(1), 194-197
- Bali, N., Aggelopoulos, C. A., Skouras, E. D., Tsakiroglou, C. D. and Burganos, V. N. 2019. Modeling of a DBD plasma reactor for porous soil remediation. *Chemical Engineering Journal*, 373, 393-405.
- Baysal, T. ve İçier, F., 2012. Gıda Mühendisliğinde Isıl Olmayan Teknolojiler. *Nobel Akademik Yayıncılık*, Ankara, 261-280p.
- Bednarek, P. T. and Orłowska, R. 2019. Plant tissue culture environment as a switch-key of (epi) genetic changes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 3, 1-13.
- Bogaerts, A. and Neyts, E. C. 2018. Plasma technology: an emerging technology for energy storage. *ACS Energy Letters*, 3(4), 1013-1027.
- Bormashenko, E., Shapira, Y., Grynyov, R., Whyman, G., Bormashenko, Y. and Drori, E. 2015. Interaction of cold radiofrequency plasma with seeds of beans (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of Experimental Botany*, 66(13), 4013-4021.
- Bourke, P., Ziuzina, D., Boehm, D., Cullen, P. J. and Keener, K. 2018. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production. *Trends in Biotechnology*, 36(6), 615-626.
- Bourke, P., Ziuzina, D., Han, L., Cullen, P. J. and Gilmore, B. F. 2017. Microbiological interactions with cold plasma. *Journal of Applied Microbiology*, 123(2), 308-324.
- Bradu, C., Kutasi, K., Magureanu, M., Puač, N. and Zivkovic, S. (2020). Reactive nitrogen species in plasma-activated water: generation, chemistry and application in agriculture. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(22), 223001.
- Brandenburg, R., Bogaerts, A., Bongers, W., Fridman, A., Fridman, G., Locke, B. R., Miller, V., Reuter, S., Schiorlin, M., Verreycken, T. and Ostrikov, K. 2019. White paper on the future of plasma science in environment, for gas conversion and agriculture. *Plasma Processes and Polymers*, 16(1), 1700238.
- Chen, T.P., Liang, J. and Su, T.L. 2018. Plasma-activated water: antibacterial activity and artifacts. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(27), 26699-26706.
- Cheng, M., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Xu, P., Zhang, C. and Liu, Y. 2016. Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: a review. *Chemical Engineering Journal*, 284, 582-598.

- Chiang, P.N., Tong, O.Y., Chiou, C.S., Lin, Y.A., Wang, M.K. and Liu, C.C. 2016. Reclamation of zinc-contaminated soil using a dissolved organic carbon solution prepared using liquid fertilizer from food-waste composting. *Journal of Hazardous Materials*, 301, 100-105. Cotton seed germination improvement. *Scientific reports*, 8(1), 14372.
- Coutinho, N.M., Silveira, M.R., Rocha, R.S., Moraes, J., Ferreira, M.V.S., Pimentel, T.C., Freitas, M.Q., Silva, M.C., Raices, R.S.L., Ranadheera, C.S., Borges, F.O., Mathias, S.P., Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S. and Cruz A.G. 2018. Cold plasma processing of milk and dairy products. *Trends in Food Science & Technology*, 74, 56-68.
- Çamoğlu, G., Demirel, K., Akçal, A., Genç, L., Su Stresinin Sofralık Domatesin Verimi ve Fizyolojik Özellikleri Üzerine Etkileri. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 33(1), 15-29.
- Daeschlein, G. 2018. Antimicrobial activity of plasma. *Comprehensive Clinical Plasma Medicine*. Ed: Metelmann H.R., Woedtke T.V. and Weltmann K.D., Springer, Cham, pp: 113-125.
- de Groot, G.J., Hundt, A., Murphy, A.B., Bange, M.P. and Mai-Prochnow, A. 2018. Cold plasma treatment for Degutyte-Fomins, L., Pauzaite, G., Zukiene, R., Mildaziene, V., Koga, K. and Shiratani, M. (2020). Relationship between cold plasma treatment-induced changes in radish seed germination and phytohormone balance. *Japanese Journal of Applied Physics*, 59, 1001.
- del Río, L.A. 2015. ROS and RNS in plant physiology: an overview. *Journal of Experimental Botany*, 66(10), 2827-2837.
- Dias, M.I., Sousa, M.J., Alves, R.C., and Ferreira, I.C. 2016. Exploring plant tissue culture to improve the production of phenolic compounds: A review. *Industrial Crops and Products*, 82, 9-22.
- Dobrin, D., Magureanu, M., Mandache, N.B. and Ionita, M.D. 2015. The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 29, 255-260.
- Elbehri, A. 2015. Climate change and food systems: global assessments and implications for food security and trade. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Ed: Elbehri, A., FAO, Rome, Italy, pp: 1-19.
- El-Sherif, N.A. 2018. Impact of plant tissue culture on agricultural sustainability. *Sustainability of Agricultural Environment in Egypt: Part II*, Ed: Negm A.N., Abu-Hasim M., Springer, Cham, pp: 93-107.
- Farsund, A.A., Daugbjerg, C. and Langhelle, O. 2015. Food security and trade: reconciling discourses in the food and agriculture organization and the world trade organization. *Food Security*, 7(2), 383-391.
- Filatova, I., Azharonok, V., Lushkevich, V., Zhukovsky, A., Gadzhieva, G., Spasic, K., Zickovic, S., Puac, N., Lazovic, S., Malovic, G. and Petrovic, Z. L. 2013. Plasma seeds treatment as a promising technique for seed germination improvement. Proceeding of the 31st International Conference on Phenomena in Ionized Gases. 14-19 July 2013, Granada, Spain.
- Filatova, I.I., Lyushkevich, V.A., Kalatskaja, J.N., Goncharik, S.V., Mildaziene, V. and Pauzaite, G. 2018. Influence of plasma and radio-wave treatment of seeds on the accumulation of some secondary metabolites in plants. 29 Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases: SPIG 2018

- Contributed Papers & Abstracts of Invited Lectures, Topical Invited Lectures, Progress Reports and Workshop Lectures, Institut za nuklearne nauke VINCA, 28 Aug-1 Sep 2018, Belgrade, Serbia, 234p.
- Gavahian, M. and Khaneghah, A. M. (2020). Cold plasma as a tool for the elimination of food contaminants: Recent advances and future trends. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60(9), 1581-1592.
- Graves, D.B., 2014. Low temperature plasma biomedicine: A tutorial review. *Physics of Plasmas*, 21(8), 080901.
- Han, L., Ziuzina, D., Heslin, C., Boehm, D., Patange, A., Sango, D.M., Valdramidis V.P., Cullen P.J. and Bourke, P. 2016. Controlling microbial safety challenges of meat using high voltage atmospheric cold plasma. *Frontiers in microbiology*, 7, 977.
- Han, Y., Cheng, J. H. and Sun, D. W. 2019. Activities and conformation changes of food enzymes induced by cold plasma: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59(5), 794-811.
- Hati, S., Patel, M. and Yadav, D. 2018. Food bioprocessing by non-thermal plasma technology. *Current Opinion in Food Science*, 19, 85-91.
- Henselová, M., Slováková, E., Martinka, M., & Zahoranová, A. 2012. Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma. *Biologia*, 67(3), 490-497.
- Hoffman, C., Berganza, C. and Zhang, J., 2013. Cold Atmospheric Plasma: methods of production and application in dentistry and oncology. *Medical Gas Research*, 3(1), 21.
- Iranbakhsh, A., Ghoranneviss, M., Ardebili, Z.O., Ardebili, N.O., Tackallou, S.H. and Nikmaram, H. 2017. Non-thermal plasma modified growth and physiology in *Triticum aestivum* via generated signaling molecules and UV radiation. *Biologia plantarum*, 61(4), 702-708.
- Iranbakhsh, A., Ardebili, Z. O., Ardebili, N. O., Ghoranneviss, M. and Safari, N. 2018. Cold plasma relieved toxicity signs of nano zinc oxide in *Capsicum annuum* cayenne via modifying growth, differentiation, and physiology. *Acta physiologiae plantarum*, 40(8), 154.
- Iranbakhsh, A., Ardebili, Z. O., Molaei, H., Ardebili, N. O. and Amini, M. 2020. Cold plasma up-regulated expressions of WRKY1 transcription factor and genes involved in biosynthesis of cannabinoids in Hemp (*Cannabis sativa* L.). *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 40(2), 527-537.
- Jiang, J., Jiangang, L.I. and Yuanhua, D.O.N.G. 2018. Effect of cold plasma treatment on seedling growth and nutrient absorption of tomato. *Plasma Science and Technology*, 20(4), 044007.
- Jiayun, T., Rui, H.E., Xiaoli, Z., Ruoting, Z., Weiwen, C. and Size, Y. 2014. Effects of atmospheric pressure air plasma pretreatment on the seed germination and early growth of *Andrographis paniculata*. *Plasma Science and Technology*, 16(3), 260.
- Judée, F., Simon, S., Bailly, C. and Dufour, T. 2018. Plasma-activation of tap water using DBD for agronomy applications: Identification and quantification of long lifetime chemical species and production/consumption mechanisms. *Water research*, 133, 47-59.

- Kakati, B., Bujarbarua, S. and Bora, D. 2019. An eco-friendly, pollution-free process for seed germination and plant yield. *AIP Conference Proceedings*, 2091(1), 020021.
- Kim, J.E., Lee, D.U. and Min, S.C. 2014. Microbial decontamination of red pepper powder by cold plasma. *Food Microbiology*, 38, 128-136.
- Kim, J.E., Oh, Y.J., Won, M.Y., Lee, K.S. and Min, S.C. 2017. Microbial decontamination of onion powder using microwave-powered cold plasma treatments. *Food Microbiology*, 62, 112-123.
- Kim, J.H. and Min, S.C. 2018. Moisture vaporization-combined helium dielectric barrier discharge-cold plasma treatment for microbial decontamination of onion flakes. *Food Control*, 84, 321-329.
- Korachi, M., Özen, F., Aslan, N., Vannini, L., Guerzoni, M., Gottardi, D. and Ekinçi, F., 2015. Biochemical changes to milk following treatment by a novel, cold atmospheric plasma system. *International Dairy Journal*, 42, 64-69.
- Kordas, L., Pusz, W., Czapka, T. and Kacprzyk, R. 2015. The Effect of Low-Temperature Plasma on Fungus Colonization of Winter Wheat Grain and Seed Quality. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(1).
- Kulkarni, P.S., Crespo, J.G. and Afonso, C.A. 2008. Dioxins sources and current remediation technologies—a review. *Environment International*, 34(1), 139-153.
- Kusano, Y. 2014. Atmospheric pressure plasma processing for polymer adhesion: a review. *The Journal of Adhesion*, 90(9), 755-777.
- Laroussi, M. and Leipold, F. 2004. Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure. *International Journal of Mass Spectrometry*, 233(1-3), 81-86.
- Li, R., Liu, Y., Mu, R., Cheng, W. and Ognier, S. 2017. Evaluation of pulsed corona discharge plasma for the treatment of petroleum-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(2), 1450-1458.
- Liao, X., Xiang, Q., Cullen, P. J., Su, Y., Chen, S., Ye, X., ... & Ding, T. (2020). Plasma-activated water (PAW) and slightly acidic electrolyzed water (SAEW) as beef thawing media for enhancing microbiological safety. *LWT*, 117, 108649.
- Ling, L.I., Jiangang, L.I., Hanliang, S.H.A.O. and Yuanhua, D.O.N.G. 2018. Effects of low-vacuum helium cold plasma treatment on seed germination, plant growth and yield of oilseed rape. *Plasma Science and Technology*, 20(9), 095502.
- Los, A., Ziuzina, D., Boehm, D., Cullen, P.J. and Bourke, P. (2019). Investigation of mechanisms involved in germination enhancement of wheat (*Triticum aestivum*) by cold plasma: Effects on seed surface chemistry and characteristics. *Plasma Processes and Polymers*, 16(4), 1800148.
- Lotfy, K., Al-Harbi, N.A. and El-Raheem, H.A. 2019. Cold atmospheric pressure nitrogen plasma jet for enhancement germination of wheat seeds. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 39(4), 897-912.
- Lou, J., Lu, N., Li, J., Wang, T. and Wu, Y. 2012. Remediation of chloramphenicol-contaminated soil by atmospheric pressure dielectric barrier discharge. *Chemical Engineering Journal*, 180, 99-105.

- Lu, H., Patil, S., Keener, K. M., Cullen, P.J. and Bourke, P. 2014. Bacterial inactivation by high-voltage atmospheric cold plasma: influence of process parameters and effects on cell leakage and DNA. *Journal of applied microbiology*, 116(4), 784-794.
- Lu, N., Lou, J., Wang, C.H., Li, J. and Wu, Y. 2014. Evaluating the effects of silent discharge plasma on remediation of acid scarlet GR-contaminated soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(6), 1991.
- Ma, R., Wang, G., Tian, Y., Wang, K., Zhang, J. and Fang, J. 2015. Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce. *Journal of Hazardous Materials*, 300, 643-651.
- Mai-Prochnow, A., Murphy, A.B., McLean, K.M., Kong, M.G. and Ostrikov, K.K. 2014. Atmospheric pressure plasmas: infection control and bacterial responses. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 43(6), 508-517.
- Mandal, R., Singh, A. and Singh, A.P. 2018. Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. *Trends in food science & technology*, 80, 93-103.
- Matra, K. (2016). Non-thermal plasma for germination enhancement of radish seeds. *Procedia Computer Science*, 86, 132-135.
- Misra, N.N., Keener, K.M., Bourke, P., Mosnier, J.P. and Cullen, P.J. 2014. In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes. *Journal of Bioscience And Bioengineering*, 118(2), 177-182.
- Misra, N.N., Schlüter, O. and Cullen, P.J. 2016. Cold plasma in food and agriculture: *Fundamentals and applications*. Academic Press, Elsevier, London, United Kingdom, 361p.
- Mitra, A., Li, Y.F., Klämpfl, T.G., Shimizu, T., Jeon, J., Morfill, G.E. and Zimmermann, J.L. 2014. Inactivation of surface-borne microorganisms and increased germination of seed specimen by cold atmospheric plasma. *Food and Bioprocess Technology*, 7(3), 645-653.
- Moghanloo, M., Iranbakhsh, A., Ebadi, M., Satari, T.N. and Ardebili, Z.O. 2019. Seed priming with cold plasma and supplementation of culture medium with silicon nanoparticle modified growth, physiology, and anatomy in *Astragalus fridae* as an endangered species. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(4), 54.
- Nehra, V., Kumar, A. and Dwivedi, H.K. 2008. Atmospheric non-thermal plasma sources. *International Journal of Engineering*, 2(1), 53-68.
- Niemira B.A. and Gutsol A. 2010. Nonthermal plasma as a novel food processing technology: *Nonthermal Processing Technologies for Food*, Ed: Zhang, H.Q., Barbosa-Canovas, G.V., Balasubramaniam, V.M., Dunne, P.C., Farkas, D., Yuan, J., Blackwell Publishing IFT Press, West Sussex, United Kingdom, pp: 271–88.
- Niemira, B.A. 2012. Cold plasma decontamination of foods. *Annual review of food science and technology*, 3, 125-142.
- Nishime, T.M.C., Borges, A.C., Koga-Ito, C.Y., Machida, M., Hein, L.R.O. and Kostov, K.G. 2017. Non-thermal atmospheric pressure plasma jet applied to inactivation of different microorganisms. *Surface and Coatings Technology*, 312, 19-24.

- Nishioka, T., Takai, Y., Kawaradani, M., Okada, K., Tanimoto, H., Misawa, T. and Kusakari, S. 2014. Seed disinfection effect of atmospheric pressure plasma and low pressure plasma on *Rhizoctonia solani*. *Biocontrol Science*, 19(2), 99-102.
- Ohta, T., 2016. Plasma in Agriculture: *Cold Plasma in Food and Agriculture: Fundamentals and Applications*, Ed: Misra, N.N., Schlüter, O.K., Cullen, P.J., Academic Press, Elsevier, London, United Kingdom, pp: 205-218.
- Padureanu, S., Stoleru, V., Patras, A., Burlica, R., Dirlau, D., Astanei, D. and Beniuga, O. 2018. Effect of Non-Thermal Activated Water on *Lactuca Sativa* L. Germination Dynamic. 2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), IEEE, 18-19 Oct. 2018, Iasi, Romania, p: 0889-0892.
- Pankaj, S.K. and Thomas, S. 2016. Cold plasma applications in food packaging: *Cold Plasma in Food and Agriculture*, Ed: Misra, N.N., Schlüter, O.K., Cullen, P.J., Academic Press, Elsevier, London, United Kingdom, pp: 293-307.
- Pankaj, S.K. and Keener, K.M. 2017. Cold plasma: Background, applications and current trends. *Current Opinion in Food Science*, 16, 49-52.
- Pankaj, S.K. and Keener, K.M. 2018. Cold plasma processing of fruit juices: *Fruit juices*, Ed: Rajauria G., Tiwari B.K., Academic Press, Elsevier, Dublin, Ireland, pp: 529-537.
- Pankaj, S.K., Wan, Z., and Keener, K.M. 2018. Effects of cold plasma on food quality: A review. *Foods*, 7(1), 4.
- Park, Y., Oh, K.S., Oh, J., Seok, D C., Kim, S.B., Yoo, S.J. and Lee, M.J. 2018. The biological effects of surface dielectric barrier discharge on seed germination and plant growth with barley. *Plasma Processes and Polymers*, 15(2), 1600056.
- Peethambaran, B., Han, J., Kermalli, K., Jiaying, J., Fridman, G., Balsamo, R., Fridman, A.A, and Miller, V. 2015. Nonthermal plasma reduces water consumption while accelerating arabidopsis thaliana growth and fecundity. *Plasma Medicine*, 5(2-4), 87-98.
- Petitpas, G., Rollier, J.D., Darmon, A., Gonzalez-Aguilar, J., Metkemeijer, R. and Fulcheri, L. 2007. A comparative study of non-thermal plasma assisted reforming technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(14), 2848-2867.
- Porto, C. L., Ziuzina, D., Los, A., Boehm, D., Palumbo, F., Favia, P., ... & Cullen, P. J. (2018). Plasma activated water and airborne ultrasound treatments for enhanced germination and growth of soybean. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 13-19.
- Puač, N., Gherardi, M. and Shiratani, M. 2018. Plasma agriculture: A rapidly emerging field. *Plasma Processes and Polymers*, 15, 1700174.
- Qi, Z.H., Yang, L., Xia, Y., Ding, Z.F., Niu, J. H., Liu, D.P., Zhao, Y., Ji, L.F., Song, Y. and Lin, X.S., 2019. Removal of dimethyl phthalate in water by non-thermal air plasma treatment. *Environmental Science. Water Research & Technology*, 5(5), 920-930.

- Reddy, K.R.N., Abbas, H.K., Abel, C.A., Shier, W.T., Oliveira, C.A.F.D. and Raghavender, C.R. 2009. Mycotoxin contamination of commercially important agricultural commodities. *Toxin reviews*, 28(2-3), 154-168.
- Redolfi, M., Makhlofi, C., Ognier, S. and Cavadias, S. 2010. Oxidation of kerosene components in a soil matrix by a dielectric barrier discharge reactor. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(3), 207-212.
- ReynaMartinez, R., Cespedes, R.N., Alonso, M.I. and Acosta, Y.R. 2018. Use of Cold Plasma Technology in Biomaterials and Their Potential Utilization in Controlled Administration of Active Substances. *Journal Material Science*, 4(5). 555649.
- Safari, N., Iranbakhsh, A. and Ardebili, Z.O. 2017. Non-thermal plasma modified growth and differentiation process of Capsicum annuum PP805 Godiva in in vitro conditions. *Plasma Science and Technology*, 19(5), 055501.
- Sarangapani, C., Patange, A., Bourke, P., Keener, K. and Cullen, P.J. 2018. Recent advances in the application of cold plasma technology in foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9, 609-629.
- Schnabel, U., Niquet, R., Krohmann, U., Winter, J., Schlüter, O., Weltmann, K.D. and Ehlbeck, J. 2012. Decontamination of microbiologically contaminated specimen by direct and indirect plasma treatment. *Plasma Processes and Polymers*, 9(6), 569-575.
- Será, B., Stranák, V., Serý, M., Tichý, M. and Spatenka, P. 2008. Germination of Chenopodium album in response to microwave plasma treatment. *Plasma Science and Technology*, 10(4), 506.
- Será, B., Spatenka, P., Sery, M., Vrchotová, N. and Hruskova, I. 2010. Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and early growth. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38(10), 2963-2968.
- Será B. and Serý M. 2018. Non-thermal plasma treatment as a new biotechnology in relation to seeds, dry fruits, and grains. *Plasma Science and Technology*, 20(4), 044012.
- Será, B., Zahoranová, A., Bujdaková, H. and Šerý, M. 2019. Disinfection from pine seeds contaminated with Fusarium circinatum Nirenberg & O'Donnell using non-thermal plasma treatment. *Romanian Reports in Physics*, 71, 701.
- Shen, J., Tian, Y., Li, Y., Ma, R., Zhang, Q., Zhang, J. and Fang, J. 2016. Bactericidal Effects against S. aureus and Physicochemical Properties of Plasma Activated Water stored at different temperatures. *Scientific Reports*, 6, 28505.
- Šimončicová, J., Kaliňáková, B., Kováčik, D., Medvecká, V., Lakatoš, B., Kryštofová, S., Hoppanová, I., Palušková, V., Hudecová, D., Durina, P. and Zahoranová, A. 2018. Cold plasma treatment triggers antioxidative defense system and induces changes in hyphal surface and subcellular structures of Aspergillus flavus. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(15), 6647-6658
- Singh, C. R., 2018, Review on problems and its remedy in plant tissue culture, *Asian Journal of Biological Sciences*, 11, 165-172 pp.
- Singh, H., Jassal, R.K., Kang, J.S., Sandhu, S.S., Kang, H. and Grewal, K. 2015. Seed priming techniques in field crops-A review. *Agricultural Reviews*, 36(4).

- Singh, S., Chandra, R., Tripathi, S., Rahman, H., Tripathi, P., Jain, A. and Gupta, P. 2014. The bright future of dentistry with cold plasma—review. *J Dent Med Sci*, 13, 6-13.
- Sivachandiran, L. and Khacef, A. 2017. Enhanced seed germination and plant growth by atmospheric pressure cold air plasma: combined effect of seed and water treatment. *RSC Advances*, 7(4), 1822-1832.
- Štěpánová, V., Slavíček, P., Kellar, J., Prášil, J., Smékal, M., Stupavská, M., Jurmanova, J and Černák, M. 2018. Atmospheric pressure plasma treatment of agricultural seeds of cucumber (*Cucumis sativus* L.) and pepper (*Capsicum annum* L.) with effect on reduction of diseases and germination improvement. *Plasma Processes and Polymers*, 15(2), 1700076.
- Stolárik, T., Henselová, M., Martinka, M., Novák, O., Zahoranová, A. and Černák, M. 2015. Effect of low-temperature plasma on the structure of seeds, growth and metabolism of endogenous phytohormones in pea (*Pisum sativum* L.). *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 35(4), 659-676.
- Stryczewska, H.D., Ebihara, K., Takayama, M., Gyoutoku, Y. and Tachibana, M. 2005. Non-Thermal Plasma-Based Technology for Soil Treatment. *Plasma Processes and Polymers*, 2(3), 238-245.
- Stryczewska, H.D., Pawłat, J. and Ebihara, K. 2013. Non-thermal plasma aided soil decontamination. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 16(1), 23-30.
- Thirumdas, R. 2018. Exploitation of cold plasma technology for enhancement of seed germination. *Agri. Res. Tech*, 13, 1-4.
- Thirumdas, R., Kothakota, A., Annapure, U., Siliveru, K., Blundell, R., Gatt, R. and Valdramidis, V.P. 2018. Plasma activated water (PAW): chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends in Food Science & Technology*, 77, 21-31.
- Thomas-Popo, E., Mendonça, A., Misra, N.N., Little, A., Wan, Z., Moutiq, R., Coleman, S. and Keener, K. 2019. Inactivation of Shiga-toxin-producing *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* and natural microflora on tempered wheat grains by atmospheric cold plasma. *Food Control*, 104, 231-239.
- Tolouie, H., Mohammadifar, M.A., Ghomi, H. and Hashemi, M. 2018. Cold atmospheric plasma manipulation of proteins in food systems. *Critical Reviews in Food Science And Nutrition*, 58(15), 2583-2597.
- Uhm, H.S. 2015. Generation of various radicals in nitrogen plasma and their behavior in media. *Physics of Plasmas*, 22(12), 123506.
- Volkov, A.G., Xu, K.G. and Kolobov, V.I. 2017. Cold plasma interactions with plants: Morphing and movements of Venus flytrap and *Mimosa pudica* induced by argon plasma jet. *Bioelectrochemistry*, 118, 100-105.
- von Woedtke T., Schmidt A., Bekeschus S., and Wende K., Introduction to plasma medicine: *Comprehensive Clinical Plasma Medicine*, Ed: Metelmann, H.M., von Woedtke, T., Weltmann, K.D., Springer, Berlin, Germany, pp: 3-21.
- Wang, T., Qu, G., Li, J. and Liang, D. 2014. Remediation of p-nitrophenol and pentachlorophenol mixtures contaminated soil using pulsed corona discharge plasma. *Separation and Purification Technology*, 122, 17-23.

- Wang, T., Ren, J., Qu, G., Liang, D. and Hu, S. 2016. Glyphosate contaminated soil remediation by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma and its residual toxicity evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 320, 539-546.
- Waskow, A., Betschart, J., Butscher, D., Oberbossel, G., Klöti, D., Büttner-Mainik, A., Adamecik, J., Rohr., P.R. and Schuppler, M. 2018. Characterization of Efficiency and Mechanisms of Cold Atmospheric Pressure Plasma Decontamination of Seeds for Sprout Production. *Frontiers in Microbiology*, 9, 3164.
- Whitehead, J.C. 2016. The Chemistry of Cold Plasma: *Cold Plasma in Food and Agriculture: Fundamentals and Applications*, Ed: Misra, N.N., Schlüter, O.K., Cullen, P.J., Academic Press, Elsevier, London, United Kingdom, pp: 53-78.
- Xiang, Q., Liu, X., Liu, S., Ma, Y., Xu, C. and Bai, Y. 2019. Effect of plasma-activated water on microbial quality and physicochemical characteristics of mung bean sprouts. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 49-56.
- Yodpitak, S., Mahatheeranont, S., Boonyawan, D., Sookwong, P., Roytrakul, S. and Norkaew, O. 2019. Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice. *Food chemistry*, 289, 328-339.
- Yüksel Ç.Y. ve Karagözlü, N. 2017. Soğuk Atmosferik Plazma Teknolojisi ve Gıdalarda Kullanımı. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 14(2), 81-86.
- Zahoranová, A., Henselová, M., Hudecová, D., Kaliňáková, B., Kováčik, D., Medvecká, V. and Černák, M. 2016. Effect of cold atmospheric pressure plasma on the wheat seedlings vigor and on the inactivation of microorganisms on the seeds surface. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 36(2), 397-414.
- Zhan, J., Liu, Y., Cheng, W., Zhang, A., Li, R., Li, X., Ognier, S., Cai, S., Yhang, C. and Liu, J. 2018. Remediation of soil contaminated by fluorene using needle-plate pulsed corona discharge plasma. *Chemical Engineering Journal*, 334, 2124-2133.
- Zhang, H., Ma, D., Qiu, R., Tang, Y. and Du, C. 2017a. Non-thermal plasma technology for organic contaminated soil remediation: A review. *Chemical Engineering Journal*, 313, 157-170.
- Zhang, S., Rousseau, A. and Dufour, T. 2017b. Promoting lentil germination and stem growth by plasma activated tap water, demineralized water and liquid fertilizer. *RSC Advances*, 7(50), 31244-31251.
- Zheng, Y., Wu, S., Dang, J., Wang, S., Liu, Z., Fang, J., Han, P. and Zhang, J. 2019. Reduction of phoxim pesticide residues from grapes by atmospheric pressure non-thermal air plasma activated water. *Journal of Hazardous Materials*, 377, 98-105.
- Ziuzina, D., Patil, S., Cullen, P.J., Keener, K.M. and Bourke, P. (2014). Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium and *Listeria monocytogenes* inoculated on fresh produce. *Food Microbiology*, 42, 109-111.

