

EDITORIAL BOARD

EDITOR-in-CHIEF

Taki DEMİR, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

ASSISTANT EDITOR-in-CHIEF:

Mustafa YILMAZ, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

TECHNICAL EDITOR:

Bahadır ŞİN, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

SECRETARIAT (*):

Melike KÖSE, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

Neslihan BABALI, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

Yasin YAMAN, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

AREA/SECTION EDITORS: (*)

Adem YAĞCI, Horticulture Department, Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Agriculture (Turkey)

Alireza TARİNEJAD, Agricultural Biotechnology Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Faculty of Agriculture, (Iran)

Altijana Hromic JAHJEFENDIĆ, Department Genetics and Bioengineering, International University of Sarajevo, Faculty of Engineering and Natural Sciences (Bosnia and Herzegovina)

Bilge Hilal ÇADIRCI, Genetics and Bioengineering Department, Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering and Architecture, (Turkey)

Elisa Azura Azman , Department of Crop Science, Putra University, Faculty of Agriculture (Malaysia)

Esmail Ebrahimie, Animal and Veterinary Science Department, The University of Adelaide, Faculty of Sciences (Australia)

Ferzat TURAN, Field Crops Department, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

Ghizan Bin SALEH, Department of Crop Science, Putra University, Faculty of Agriculture (Malaysia)

Gülay ZÜLKADİR, Organic Farming Management Department, , Mersin University, Silifke Applied Technology and Management Vocational School, (Turkey)

Hüseyin İrfan BALIK, Horticulture Department, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

İsmail Oğuz ÖZDEMİR, Plant Protection Department, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

Joseph Yakubu, Biometry Department, University of Maiduguri, Faculty of Science (Nigeria)

Mehmet Ali SAKİN, Field Crops Department, Tokat Gaziosmanpaşa University (Turkey)

Mehmet KOYUNCU, Food Engineering Department, Karamanoğlu Mehmetbey University, Engineering Faculty (Turkey)

Mehmet ÖTEN, Field Crops Department, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

Melih YILAR, Plant Protection Department, Ahi Evran University, Faculty of Agriculture (Turkey)

Mohamed Ragab ABDELGAWWAD, Department Genetics and Bioengineering, International University of Sarajevo, Faculty of Engineering and Natural Sciences (Bosnia and Herzegovina)

Muhammad ASLAM, Plant Breeding and Genetics Department, University of Agriculture (Pakistan)

Orhan KARAKAYA, Horticulture Department, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

Ömer BEYHAN, Horticulture Department, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

Ömer Faruk UZUN, Landscape Architecture Department, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

Rahime CENGİZ, Field Crops Department, Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture (Turkey)

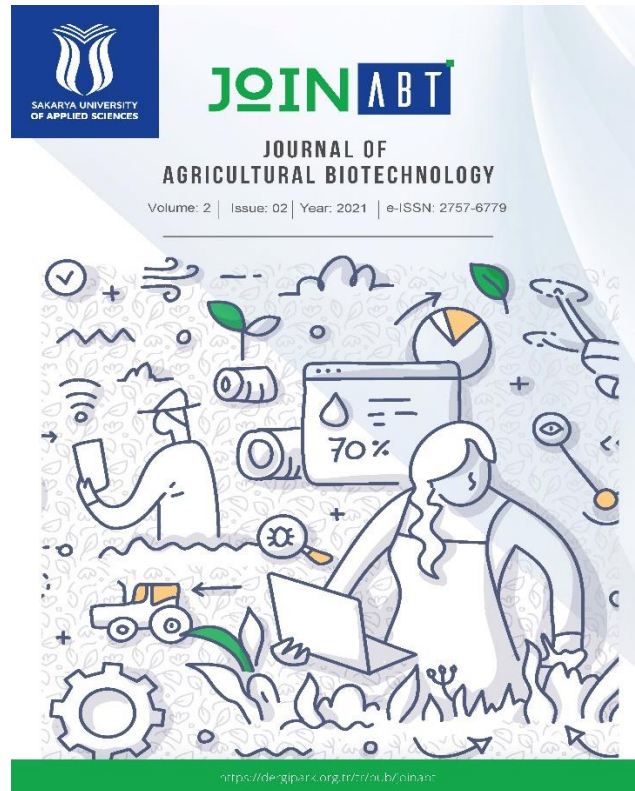
Saim ÖZDEMİR, Environmental Engineering Department, Sakarya University, Engineering Faculty (Turkey)

(*): The list is based on name of the editors in alphabetical order.

Journal of Agricultural Biotechnology (JOINABT)

Volume 2, Issue 2,
December 31, 2021

No	Articles	Author/s	Pages
1	Bitkilerde Ağır Metal Hiperakümülyasyonu ve Fitoremediasyon <i>Heavy Metal Hyperaccumulation and Phytoremediation in Plants</i>	Ali DOĞRU Hüseyin ALTUNDAĞ M. Şahin DÜNDAR	32-55
2	Farklı Kurutma ve Ambalaj Uygulamalarının Dilimlenmiş İncirlerin Mikrobiyolojik Özelliklerine Etkileri <i>The Effects of Different Drying and Packaging Applications on the Microbiological Properties of Sliced Figs</i>	Tuba BÜYÜKSİRİT BEDİR Ayşe Özge YAVUZ Harun BÜYÜK Hakan KULEAŞAN	56-65
3	Farklı Tuz Konsantrasyonlarının Bazı Serin İklim Çim Alan Buğdaygillerinin Çimlenmesi ve Sürgün Gelişimi Üzerine Etkiler <i>Effects Of Different Salt Concentrations on the Germination and Shoot Development in Some Cool Climate Turfgrass</i>	Mustafa YILMAZ Ali DOĞRU Melike Halime KILDIŞ	66-77
4	Nematicidal Weeds in the Control of Plant Parasitic Nematodes	Bahadır ŞİN Lerzan ÖZTÜRK	78-96
5	Kültürü Yapılan Bazı Tarla Bitkilerinde Allelopatik Etkinin Değerlendirilmesi <i>Evaluation of Allelopathic Effect in Some Cultivated Field Crops</i>	Mustafa YILMAZ Melike KÖSE	97-104





Bitkilerde Ağır Metal Hiperakümüasyonu ve Fitoremediasyon

Ali DOĞRU^{1,*} , Hüseyin ALTUNDAĞ² , M. Şahin DÜNDAR²

¹Sakarya Üniversitesi Fen-Ed. Fak. Biyoloji Böl., Esentepe kampüsü, Sakarya.

²Sakarya Üniversitesi Fen-Ed. Fak. Kimya Böl., Esentepe kampüsü, Sakarya.

Özet

Hiperakümülatör bitkiler çeşitli ağır metalleri toprak üstü organlarında aşırı miktarda biriktiren ancak bundan olumsuz etkilenmeyen bitki türleridir. Hiperakümülatörlerin diğer bitki türlerinden farkı yüksek hızda ağır metal alınımı yapmaları, bu ağır metalleri köklerden gövde ve yapraklara etkili bir şekilde taşımaları ve ağır metaller yapraklarda detoksifiye etmeleridir. Hiperakümülatör yeteneğinin temelinde, aslında hiperakümülatör olmayan bitkilerde de bulunan bazı genlerin farklı şekilde ekspresyonu ve regüle edilmesi yatmaktadır. Ayrıca hiperakümülatör bitkilerin topraktan etkili bir şekilde absorbe ettiği ağır metallerin bir kısmı canlılar için esansiyeldir. Bu çalışmada hiperakümülatör bitkilerin genel özellikleri, fitoremediasyon kapasitesi ve tipleri ile bu bitkilerin fitomadencilik alanında kullanılabilirliği literatür bilgilerinden faydalanılarak tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ağır metal, detoksifikasyon, fitoremediasyon, fitomadencilik, hiperakümülatör.

Heavy Metal Hyperaccumulation and Phytoremediation in Plants

Abstract

Hyperaccumulator plants can accumulate extraordinary amount of heavy metals in their aerial organs and they are not negatively affected from heavy metals. Three basic differences distinguish hyperaccumulators from non-hyperaccumulators: an effectively accelerated rate of heavy metal uptake from soil, a faster translocation of heavy metals from roots to shoots and a greater ability of detoxification in leaves. Both hyperaccumulators and non-hyperaccumulators share the common genes and hyperaccumulation ability depends on the different expression and regulation of these genes. In addition, it is an important detail that some heavy metals that are effectively absorbed from soil by hyperaccumulators are essential for plants and animals. In this review, an overview of literature discussing general features of hyperaccumulator plants, phytoremediation types and ability and using these plants for phytomining is presented.

* Ali DOĞRU, adogru@sakarya.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-0060-4691>

Keywords: *Heavy metal uptake, detoxification, phytoremediation, phytomining, hyperaccumulation.*

1. Giriş

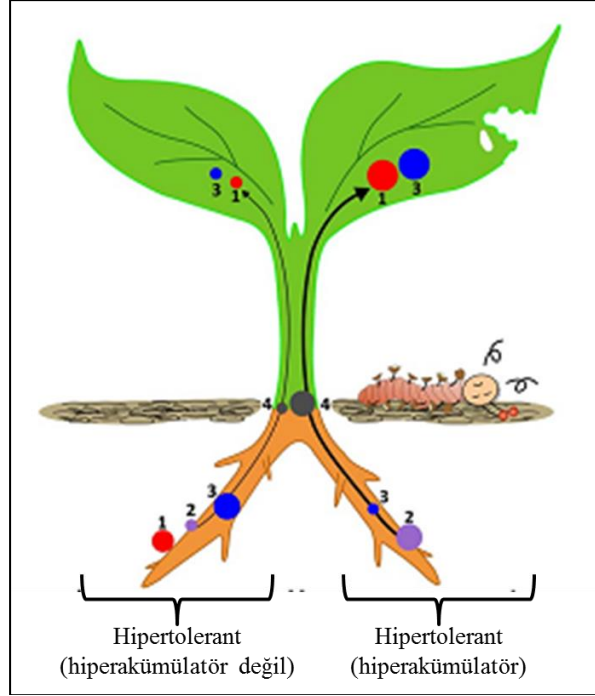
Kimyasal açıdan “ağır metal” terimi atom ağırlığı 20 g/mol’den ve yoğunluğu 5 g cm⁻³’den büyük olan geçiş metalleri için kullanılmaktadır. Biyolojik olarak değerlendirildiğinde ise düşük konsantrasyonlarda bile bitki ve hayvanlar için toksik etkiler yaratan metaller ve metaloidler için “ağır” terimi kullanılmaktadır.

Arsenik (As), kadmiyum (Cd), civa (Hg), kurşun (Pb) veya selenyum (Se) gibi bazı ağır metaller bitki metabolizmasında herhangi bir fizyolojik olayda fonksiyona sahip olmadıkları için esansiyel değildir. Ancak kobalt (Co), bakır (Cu), demir (Fe), mangan (Mn), nikel (Ni) ve çinko (Zn) gibi diğerleri bitkilerde normal büyüme ve metabolizma için gereklidir. İkinci grupta bulunan ağır metallerin konsantrasyonları belirli bir değerin üzerine çıktığı zaman kolayca toksik etkilere yol açabilirler. Ağır metal fitotoksitesisi, enzimlerin inaktivasyonu, metabolik olarak önemli olan moleküllerdeki fonksiyonel grupların inhibisyonu, bir moleküldeki esansiyel elementlerin yer değiştirmesi ve membran bütünlüğünün bozulması gibi olaylar yüzünden hücrel ve moleküler seviyede değişimlere yol açan birçok fizyolojik değişimden kaynaklanabilir. Bitkilerde metal zehirlenmelerine neden olan diğer bir olay da özellikle kloroplast membranlarındaki elektron taşınım reaksiyonlarında meydana gelen bozulmalar nedeniyle aktif oksijen türlerinin (AOT) oluşmasıdır [1]. AOT’lerin etkisiyle hücrelerde oluşan oksidatif stres de lipid peroksidasyonu, biyolojik makromoleküllerin zarar görmesi, membranların parçalanması, iyon sızıntısı ve DNA zincirlerinde kırılmalar gibi anormalliklere yol açar [2]. Bitkiler bu elementlerin alımını, birikimini ve taşınımının kontrolünü haricinde bunları sitoplazmadan iyonik formda dışarı atarak detoksifiye etmek gibi bazı savunma mekanizmalarına sahiptir (Şekil 1). Bitkiler tarafından bu amaçla kullanılan diğer bir strateji de ağır metalleri apoplastik bölgede organik asitlere [3] veya hücre çeperinin anyonik gruplarına [4] bağlayarak bunların kök hücrelerine girişini engellemektir. Bitkiler tarafından alınan ağır metallerin büyük kısmı köklerde tutularak bazı amino asitlere, organik asitlere veya metal bağlayan peptidlere bağlanarak detoksifiye edilir veya vakuollerde hapsedilir [5]. Bu şekilde ağır metallerin toprak üstü organlara translokasyonu sınırlanır ve fotosentetik mekanizma ağır metallerin neden olabileceği hasarlardan korunmuş olur. Ağır metal stresine maruz kalan bitkilerin kullandığı diğer bir savunma mekanizması da oksidatif stresle mücadele etmek amacıyla antioksidant sistemin aktivasyonudur [6].

Ancak yeryüzünde antropojenik aktiviteler sonucunda ağır metallerle kontamine olmuş doğal ortamlarda vejetatif ve generatif gelişmesini sürdürerek canlılığını devam ettirebilen bitki türleri vardır. Diğer bitkiler için oldukça toksik olan yüksek ağır metal konsantrasyonlarını tolere edebilen bu bitki türlerinin çoğunluğu “dışlayıcı (excluder)” olarak bilinir (Şekil 1). Bu türlerdeki tolerans mekanizmasının temeli ağır metallerin bitkiye girişinin sınırlandırılmasıdır. Böylece ağır metallerin fitotoksik etkilere oldukça duyarlı olan yapraklara translokasyonu minimum seviyeye indirilir ve kök dokularında detoksifiye edilir [5]. Ancak “hiperakümülatör” olarak bilinen birçok toleran bitkide de ağır metaller bitki dokularına alınır ve bütün dokulara taşınır (Şekil 1).

Hiperakümülatör terimi, bir veya daha fazla ağır metali topraktan aktif mekanizma ile çok fazla miktarda alabilen bitki türleri için kullanılır [7]. Bu türler aynı zamanda aldıkları ağır metalleri toprak üstü organlarına ve özellikle de yapraklarına kadar taşıyarak, hiperakümülatör olmayan bitki türlerine göre 100-1000 kat daha yüksek konsantrasyonda

biriktirebilirler. Ancak buna rağmen herhangi bir fitotoksisite belirtisi göstermezler [8]. Hiperakümülyasyon özelliği aynı zamanda hipertolerans özelliği de gerektirir. Çünkü hipertolerans özelliği, ağır metallere en azından hiperakümülyatör olmayan bitkiler kadar duyarlı olan hiperakümülyatör bitkilere savunma ve korunma sağlar [9].



Şekil 1. Dışlayıcı-hiperakümülyatör olmayan (soldaki) ve hiperakümülyatör (sağdaki) bir bitkide ağır metal hipertoleransı ile ilgili mekanizmalar ve metal dağıtımı. (1) Ağır metalin hücre çeperlerine ve/veya hücre eksüdatlarına bağlanması, (2) kök tarafından alınması, (3) sitosolde şelasyonu ve/veya vakuollerde depolanması, (4) kökten gövdeye translokasyonu. Spotlar, farklı bitki organlarında bulunan mekanizmaları ve spotların boyutları ise bu mekanizmaların kullanılma yoğunluğunu göstermektedir. Elementel savunma mekanizmasına göre, yüksek metal konsantrasyonları, hiperakümülyatör bitkilerin yapraklarını herbivorlar için toksik duruma getirmektedir [10].

Yaklaşık 450 angiosperm türü bazı ağır metaller (As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, Zn) için hiperakümülyatör olarak tanımlanmıştır. Bu rakam bilinen bütün bitki türlerinin yaklaşık %0.2'sidir. Ancak bu özelliğe sahip yeni bitki türleri ile ilgili sonuçlar her geçen günü artmaktadır [11]. Aynı zamanda arazi çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre hiperakümülyatör olarak tanımlanan bazı bitki türleri, kontrollü koşullarda çelişkili sonuçlar verdikleri için bu listeden silinmektedir [12]. Örneğin önceden bakır ve kobalt elementleri için hiperakümülyatör olarak kabul edilmiş olan bazı bitki türlerinde, bakır ve kobalt birikiminin tarla koşullarında tamamen yaprak yüzeyi kontaminasyonundan kaynaklandığı ortaya çıkarılmıştır [13].

Hiperakümülyatör bitki türleri büyük ölçüde uzaktan akraba olan familyalarda yer alırlar. Bu durum hiperakümülyasyon özelliğinin seçici ekolojik faktörlere birden fazla kez maruz kalınmasıyla birbirinden bağımsız olarak ortaya çıktığını göstermektedir. Hiperakümülyatör bitkilerin ortaya çıkmasına neden olan evrimsel sebeplerin bilinmemesine rağmen, bazı hipotezler oluşturulmuştur. Hiperakümülyatör bitkiler Güney

Afrika, Yeni Kaledonya, Latin Amerika, Kuzey Amerika ve Avrupa'ya kadar hem ılıman hem de tropik bölgelerdeki metal yönünden zengin topraklarda yayılış gösterirler [14]. Başlangıçta hiperakümülatör terimi gövde dokularında 1 mg g⁻¹'dan (kuru ağırlık) daha fazla nikel içeren bitkiler için kullanılmıştır. Bu değer oldukça yüksektir çünkü birçok bitkide nikel toksisitesi vejetatif organlardaki nikel konsantrasyonu 10-15 µg g⁻¹ seviyesine çıktığı zaman başlar. Spesifik fitotoksitesine göre herbir metalin hiperakümülyasyon derecesi için eşik değeri tanımlanmaktadır. Bu kriterlere göre hiperakümülatör bitkiler doğal topraklarda yetiştirildiğinde, fitotoksik hasarlar göstermeden toprak üstü organlarında 10 mg g⁻¹'dan fazla Mn veya Zn, 1 mg g⁻¹'dan fazla As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Se veya Tl ve 0.1 mg g⁻¹'dan fazla Cd biriktiren bitkilerdir [15]. Nikel elementi çok sayıda takson tarafından biriktirebilirken, en toksik ağır metallere birisi olan kadmiyum için çok daha az sayıda (sadece 5 tür) bitki hiperakümülatör olarak tanımlanmıştır. Nikel aynı zamanda bir bitkinin dokularında konsantrasyonu en yüksek seviyeye çıktığı belirlenen elementtir. Bu gözlem Yeni Kaledonya'nın serpentin topraklarına endemik bir ağaç türü olan *Sebertia acuminata* (Sapotaceae)'dan elde edilmiştir. Bu ağaç lateksinin yapısında kuru ağırlık olarak %26 oranında nikel içermektedir [16]. Hiperakümülatör olduğu tanımlanan bitki türlerinin yaklaşık %25'i Brassicaceae familyasına ve özellikle de *Thlaspi* ve *Alyssum* genuslarına aittir. En fazla sayıda nikel hiperakümülatörü de bu genoslara aittir [17]. Çinko hiperakümülatörü olan bitki sayısı daha azdır. Bunlara örnek olarak Brassicaceae familyasına ait *Thlaspi* türleri ve *Arabidopsis halleri* [14] ile Crassulaceae familyasına ait *Sedum alfredii* verilebilir [18]. *A. halleri*, *S. alfredii*, *Thlaspi caerulescens* ve *T. praecox* ise çinko dışında kadmiyum da biriktirmektedir. Son yıllarda *Solanum nigrum* (Solanaceae)'un da kadmiyum hiperakümülatörü olduğu belirlenmiştir [11]. Selenyum hiperakümülatörü olan türler ise Fabaceae, Asteraceae, Rubiaceae, Brassicaceae, Scrophulariaceae ve Chenopodiaceae familyalarına ait türlerdir [19]. Brassicaceae familyasına ait *Isatis cappadocica* ve *Hesperis persica* [20] gibi angiosperm dışındaki, *Pteris* genusuna ait olan birçok eğrelti türünün de arsenik hiperakümülatörü olduğu belirlenmiştir [21].

Birçok hiperakümülatör bitki türü metal içeren topraklarda yaşayan endemik bitkilerdir ve "tam metalofit" olarak bilinir. Ancak bazıları da "fakültatif metalofit" olarak bilinir ve aynı zamanda metal içermeyen topraklarda da yaşayabilirler. Ancak metal yönünden zengin habitatlarda gene de baskın olarak bulunurlar [22]. Ayrıca aynı populasyon içindeki aynı türler arasında metal içeren ve içermeyen topraklarda yaşayabilen bireyler de vardır. *A. halleri* ve *T. caerulescens* gibi çinko hiperakümülatörlerinde, hiperakümülyasyon özelliği tür seviyesinde temel ve belirleyici bir özelliktir ve tüm populasyonda görülen bir özelliktir [23]. Çinko hiperakümülatörü olan *S. alfredii* ve kadmiyum hiperakümülatörlerinde ise bu özellik tür seviyesinde belirleyici değildir fakat sadece metal içeren topraklarda yaşayan populasyonlarında görülen bir özelliktir [24].

Bir veya daha fazla ağır metalin hiperakümülyasyon derecesi, farklı türlerde, populasyonlarda ve hatta aynı türün farklı ekotiplerinde değişiklik gösterebilir [25]. Ancak hiperakümülatör bitkileri bu özelliğe sahip olmayan taksonlardan ayıran üç temel özellik vardır. Bu özellikler topraktan çok daha fazla ağır metali alma kapasitesi, metallere köklerden gövdeye hızlı ve etkili taşınımı ve fazla miktarda metali yaprak dokularında detoksifiye etme ve tutma kapasitesidir. Metal hiperakümülyasyon özelliği ile ilgili mekanizmaların anlaşılması için hem hiperakümülatör hem de hiperakümülatör olmayan türler üzerinde birçok fizyolojik, genomik ve proteomik çalışma yapılmıştır. Bu türlerden *T. caerulescens* ve *A. halleri* üzerinde en çok çalışma yapılan model türlerdir.

Elde edilen sonuçlar, her iki grup bitkide de bu özelliğın yeni genlere bağılı olmadığını, ancak sadece bu genlerin farklı şekilde ekspresyonuna ve regülayonuna bağılı olduğunu göstermiştir [14].

2. Bitkilerde ağır metal alınımı

Yapılan çalışmalar, *T. caerulescens* and *A. halleri* köklerinde artan çinko alınımının, ZIP ailesine ait olan ve plazma membranında lokalize olmuş olan katyon taşıyıcılarını kodlayan bazı genlerin konstitütif ekspresyonundan kaynaklandığını göstermiştir [26] (Şekil 2). Ayrıca bu ZIP genlerinin (*T. caerulescens*'deki *ZTN1* ve *ZTN2* ile *A. halleri*'deki *ZIP6* ve *ZIP9*) ekspresyonunun hiperakümülatör olmayan bitkilerde çinko ile düzenlendiğini ve sadece çinko eksikliği koşullarında belirlenebilir seviyede olduğunu; hiperakümülatörlerde ise çinkodan bağımsız olduğunu göstermiştir [26].

Cd/Zn hiperakümülatörlerinde (*A. halleri* ve *T. caerulescens*'in birçok ekotipi) artan çinko uygulamalarının kadmiyumun köklerle alınıml hızını azalttığı belirlenmiştir. Bu durum kadmiyum alınımının çinko taşıyıcıları ile gerçekleştirildiğini göstermiştir (Şekil 2). Ancak normal koşullarda bu taşıyıcı çoğunluklu çinko taşınımından sorumludur [27]. Ancak *T. caerulescens*'in toprak üstü kısımlarında yüksek oranda kadmiyum biriktiren Ganges ekotipinde, kadmiyum alınımının çinko ile inhibe edilmediği ortaya çıkarılmıştır. Bu da kök hücrelerinde kadmiyum alınımından sorumlu spesifik ve etkili bir kadmiyum taşıyıcısının varlığını göstermektedir [28]. Esansiyel olmayan bu elemente (kadmiyum) spesifik olabilecek bir taşıyıcının bulunma olasılığı, kadmiyumun *T. caerulescens*'in bu aksesyonunda fizyolojik bir fonksiyonunun olup olmayacağı sorusunu akla getirmektedir. Ganges ekotipinin gövdesinde kadmiyum konsantrasyonu ile karbonik anhidraz aktivitesi arasında pozitif bir korelasyon bulunmuştur [29]. Daha önce kadmiyumun bir deniz diatomu olan *Thalassiosira weissglogii* için fizyolojik olarak gerekli olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu diatomun sahip olduğu karbonik anhidraz enziminin yapısında kadmiyum bağlayan aktif bir bölge bulunmaktadır [30].

Nikel hiperakümülayonu ile ilgili günümüze kadar herhangi bir spesifik taşıyıcı tanımlanmamıştır. Ancak her iki metalin eşit miktarda uygulandığı Zn/Ni hiperakümülatörlerinde çinkonun nikel göre daha fazla alınması, çinko taşınım sisteminin aynı zamanda köklerdeki nikel alınımı için de kullanıldığını göstermektedir. Yapılan çalışmalar arsenik elementinin bitki köklerine fosfat taşıyıcılarının yardımıyla arsenat formunda girdiğini ortaya çıkarmıştır [31]. Arsenik hiperakümülatörü olan *Pteris vittata*'nın kök hücrelerindeki plazma membranlarında, hiperakümülatör olmayan *P. tremula*'ya göre daha fazla miktarda fosfat/arsenat taşıyıcısı bulunur. Bunun nedeni büyük olasılıkla *P. vittata*'daki konstitütif gen ekspresyonudur [32]. Bunun dışında hiperakümülatör olan eğrelti türlerinde gözlenen aşırı arsenik alınımının nedeni, fosfat/arsenat taşıma sisteminin arsenik elementine olan yüksek afinitesi [33] ve bu bitkilerin kök salgıları ile rizosferdeki pH değerini azaltması sonucu arsenik biyoyararlılığını artırma kapasitesine sahip olmalarıdır [34]. pH değerinin azalması arsenik elementinin sudaki çözünürlüğünü artırır ve köklerle kolayca alınabilir [34].

Sülfat ve selenatın kimyasal benzerliği, selenatın kökler tarafından bu formda sülfat taşıyıcıları tarafından alınmasını açıklamaktadır. Bu taşıyıcıların aktivitesi ise bitkilerin kükürt durumu ile regüle edilir [35]. Selenyum hiperakümülatörü olan *Astragalus bisulcatus* (Fabaceae) ve *Stanleya pinnata* (Brassicaceae)'da gövdedeki Se/S oranı, hiperakümülatör olmayan yakın türlere göre daha yüksektir. Bu durum aşırı Se alınımının, bitkinin kükürt durumundan bağımsız olarak bazı sülfat taşıyıcılarının selenyuma spesifite kazanması olabilir [36].

olan *A. lesbiacum*' un köklerinde *TP-PRT1* geninin (biyosentetik mekanizmanın ilk adımını katalizleyen ATP-fosforibozil transferaz enzimini kodlar) konstitütif aşırı ekspresyonu endojen histidin havuzunun büyümesine ve dolayısıyla nikelin nikel-histidin kompleksi formunda ksileme yüklenme oranını artırır. Nikel hiperakümülatörü olan farklı *Thlaspi* türlerinin köklerindeki yüksek histidin konsantrasyonu, bu amino asidin diğer hiperakümülatör bitkilerde de aynı fonksiyona sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca sadece hiperakümülatör bitkilerde nikel-histidin kompleksinin oluşması, ksileme nikel verilmesi dışında, ağır metallerin kök hücrelerinin vakuollerinde tutulmasını önleyen ve sitoplazmada detoksifiye edilmeden translokasyon için hazır tutulmasında da rol oynar. Nikotinamin biyosentez mekanizmasındaki enzimleri kodlayan genler, Zn/Ni hiperakümülatörü olan *T. caerulea* ve *A. halleri*'nin köklerinde fazla miktarda ekspreslenir. Sonuçta bu iki türün köklerindeki nikotinamin miktarı, aynı familyadaki hiperakümülatör olmayan türlerden 3 kat daha fazladır. Ancak *T. caerulea*'de nikotinamin sentez hızının artışı ve nikotinamin-metal şelasyonu ile nikel hiperakümülayonu arasında pozitif bir korelasyon bulunmuştur. Ancak *A. halleri*' de bu bileşikler çinko hiperakümülayonu ile ilgilidir. Bu bileşikler muhtemelen *A. halleri*'de metal iyonlarının ksileme yüklenmesi için uygun formda tutulmasını sağlamaktadır [38]. Yapılan çalışmalar hiperakümülatör bitkilerde fazla miktarda ağır metalin köklerden gövdeye doğru hızlı ve etkili translokasyonunun, hiperakümülatör olmayan bitkilerde de bulunan transport sistemlerini kodlayan genlerin konstitütif aşırı ekspresyonu ile ksileme yüklenmesinin artmasına bağlı olduğunu göstermiştir. Bu konuda HMA (ağır metal taşıyan ATPazlar) olarak da bilinen P1B-tipi ATPazlar önemli bir konuma sahiptir. Bu proteinler ağır metallerin taşınımı dışında metal homeostasisi ve toleransı için de önemlidir. HMA ailesine ait olan ve bivalent katyon taşıyıcılarını kodlayan genler, Zn/Cd hiperakümülatörü olan *T. caerulea* ve *A. halleri*'nin kök ve gövdelerinde aşırı ekspreslenmektedir. Ayrıca bu bitkiler yüksek konsantrasyonda kadmiyum ve çinkoya maruz kaldıklarında *HMA4* ekspresyonu hızlanmakta ancak hiperakümülatör olmayan akraba türlerde ise yavaşlamaktadır. *HMA4*'ün aşırı ekspresyonu bu proteinin, hiperakümülayon için gerekli olan kadmiyum ve çinkonun köklerden ksileme ulaştırılmasındaki rolünü kanıtlamaktadır. *HMA4* aktivitesinin hiperakümülayon özelliği konusunda çeşitli rollere sahip olması muhtemel diğer genleri de olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir. *HMA4* ekspresyonundaki artış, ağır metal alınımında etkili olan *ZIP* ailesine ait genlerin ekspresyonunu da artırmaktadır. Bu sonuçlar köklerden gövdeye doğru gerçekleşen translokasyonun, köklerde sürekli bir metal eksikliği yaratarak hiperakümülayon için gerekli itici gücü oluşturduğunu göstermektedir [39].

Küçük organik moleküllerin transportunda rol oynayan *MATE (Multidrug And Toxin Efflux)* ailesinin de hiperakümülatör bitkilerdeki ağır metal translokasyonunda etkili olan diğer bir transport proteini olabileceği bildirilmiştir. Bu ailenin bir üyesi olan bir gen olan *FDR3*, *T. caerulea* ve *A. halleri* 'nin köklerinde konstitütif olarak aşırı derecede ekspreslenmektedir. *FDR3* proteini kökteki perisikl hücrelerinin plazma membranlarında lokalize olmuştur ve genellikle demir homeostasisi ve translokasyonu için gerekli bir ligand olan sitratın ksileme doğru taşınımı konusunda etkilidir, ancak bunun hiperakümülatör türlerdeki aşırı ekspresyonu *FDR3*'ün çinko gibi diğer metallerin translokasyonunda rol oynayabileceğini göstermektedir. Bunun dışında *YSL (Yellow Strip1-Like)* ailesi üyelerinin de nikotinamin-metal şelatlarının ksileme yüklenmesi ve boşaltılması konusundaki fonksiyonlarından dolayı, ağır metal translokasyonunda etkili olabileceğine dair kanıtlar vardır [40]. Nikotinamin-metal komplekslerinin, özellikle de nikotinamin-Ni komplekslerinin taşınmasında ve vasküler sisteme yüklenmesinde *YLS*

proteinlerinin etkili olduğu *T. caerulea*'nin kök ve gövdelerinde üç tane gen (*TcYSL3*, *TcYSL5* ve *YSL7*) konstitütif olarak aşırı derecede ekspreslenmektedir. Hiperakümülayör bitkilerin köklerinde görülen Ni-histidin komplekslerinin ksileme yüklenmesinde rol oynayan taşınım sistemi henüz aydınlatılamamıştır. Nikel hiperakümülayörü olan *Thlaspi goesingense* ve hiperakümülayör olmayan *T. arvense*'de yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, toksik olmayan koşullarda her iki türün de nikelin kökten gövdeye translokasyon hızı bakımından benzer davranışlar sergilediği belirlenmiştir. Buna göre *T. goesingense*'nin hiperakümülayör yeteneğinin, hızlı taşınımından çok, nikelin oldukça etkili detoksifikasyonu ve/veya sınırlandırarak biriktirme mekanizmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Hiperakümülayör olan *P. vittata*'da, hiperakümülayör olmayanlarla karşılaştırıldığında, arsenik gövdeye özellikle arsenit formunda taşınmaktadır. Arsenit bu türde ksilem öz suyundaki arseniğin yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır. Bunun sebebi, hiperskümlatör olan eğrelti türünün köklerindeki arsenatın (AsV) büyük kısmının glutatyona bağımlı arsenat redüktaz enziminin aktivitesiyle arsenite (AsIII) indirgenmesidir. Arsenatın kalan kısmı da fosfat taşıyıcıları ile ksileme yüklenebilir ancak baskın olan arsenitin vasküler dokulara doğru hareketi farklı transport sistemlerine gereksinim duyulabilir. Bu konudaki en kuvvetli adayın *NIP (Nodulin 26-like Intrinsic Proteins)* alt ailesindeki akugliseroproteinler olduğuna dair kanıtlar vardır. Memelilerdeki arsenit taşınımında rol oynayan bu plazma membran proteinleri, bitkilerde de arsenitin taşınımında etkilidir. Sonuç olarak, bu tip proteinlerin yüksek ekspresyonu, arsenik hiperakümülayörü olan türlerde, arsenitin kök hücrelerinin sitoplazmasından ksilem borularına transferini açıklayabilir. Selenyum hiperakümülayörlerinin kök hücreleri tarafından alınan selenyumun büyük kısmı selenat olarak kalır. Sonuç olarak bu elementin köklerden gövdeye translokasyonu sülfat taşıma sistemleri ile gerçekleştirilir [41].

Ağır metallerin ksilemdeki uzun mesafeli taşınımının serbest iyonik formda mı yoksa organik asitlerle oluşturulan kompleksler formunda mı gerçekteştiği bilinmemektedir. Örneğin çinko ve kadmiyumun büyük kısmı *T. caerulea* and *A. halleri*'nin ksilem öz suyunda serbest hidrate olmuş katyonlar halinde bulunurken; bir hiperakümülayör olan *Stackhousia tryoni* (Celastraceae)'nin ksilemindeki nikelin sadece 1/3'ü sitrata bağlı olarak bulunur. Ekstrem bir nikel hiperakümülayörü olan *S. acuminata*'nın lateksindeki nikelin ise tamamı sitrat ve diğer organik asitlerle kompleks oluşturmuş durumdadır [42].

4. Detoksifikasyon/sınırlandırma

Hiperakümülayörlerin en önemli özelliği detoksifikasyon ve sınırlandırma mekanizması konusundaki etkinliğidir. Bu mekanizmalar bu tip bitkilere, herhangi bir fitotoksik etkiye maruz kalmadan, çok fazla miktarda ağır metali toprak üstü organlarında biriktirme yeteneği verir. Bu ağır metal birikiminin bitki için çok önemli olan ve bu tip faktörlerden olumsuz yönde etkilenme olasılığı yüksek olan fotosentez olayının meydana geldiği yapraklarda gerçekteşmesi de oldukça ilginçtir. Ağır metallerin detoksifikasyon ve/veya sınırlandırma olayı fotosentetik aygıtta daha az zarar verilmesini sağlamak amacıyla, öncelikli olarak epidermis, trikoma ve kütikula gibi yerlerde görülür. Birçok durumda da ağır metaller stoma bekçi hücreleri ve arkadaş hücreleri tarafından dışarıya atılır [43]. Bu da fonksiyonel stoma hücrelerini metallerin fitotoksik etkilerinden koruyan bir mekanizmadır.

Hiperakümülayör bitkilerin toprak üstü organlarındaki detoksifikasyon ve/veya sınırlandırma mekanizması, ağır metallerin ligandlarla kompleks oluşturması ve/veya ağır metallerin metabolik olarak aktif olan sitoplazmadan vakuol ve çeperler gibi inaktif olan bölgelere taşınması esasına dayanır. Aralarında evrimsel akrabalık bulunan

hiperakümülatör ve hiperakümülatör olmayan bitkilerde yapılan çalışmalar, sınırlama mekanizmasının ağır metallerin tonoplast ve/veya plazma membranından taşınımı ile ilgili olan proteinleri kodlayan genlerin konstitütif aşırı ekspresyonuna ve ağır metallerin sitoplazmadan dışarı atılmasına bağlı olduğunu göstermiştir. Bu konuda fonksiyonel olabilecek adaylar arasında, bivalent katyonların sitoplazmadan atılması konusunda önemli olan, özellikle *MTP (Metal Transporter Proteins)* ailesi olarak da bilinen *CDF (Cation Diffusion Facilitator)* ailesi sayılabilir. Tonoplastta lokalize olan bir proteini kodlayan *MTP1*' in Zn/Ni hiperakümülatörü olan türlerde aşırı derecede ekspreslendiği belirlenmiştir. Ayrıca *MTP1*'in çinko toleransının yanı sıra çinko birikimini de artırdığı ileri sürülmüştür. Çinkonun vakuole taşınımı hiperakümülatör bitkilerde, *ZIP* taşıyıcılarının ekspresyonunun artması sonucu ağır metal alınımı ve taşınımının artması şeklinde sistemik bir çinko eksikliği cevabının oluşumuna yol açabilir. *MTP* üyeleri aynı zamanda *T. goesingense*' nin gövdesinde nikelin vakuolar birikimini de düzenlemektedir. Ayrıca *MTP1*'in hem tonoplast hem de plazma membranında lokalize olması, bu proteinin çinko ve nikelin sitoplazmadan hücre çeperine gönderilmesi konusunda da fonksiyonel olduğunu göstermektedir [44].

Vakuolar bir P1B-ATPaz'ı kodlayan *HMA3*'ün aşırı ekspresyonu çinko elementinin sınırlandırılması ile ilgilidir. Ayrıca *T. caerulea* ve *A. halleri*'de kadmiyumun sınırlandırılması ile ilgili olduğu zannedilen ve katyon değiştirici ailesinin bir üyesini kodlayan *CAX* genlerinin de ağır metal hiperakümüülasyonu ile ilgili olduğu ileri sürülmüştür.

Arsenik elementinin inorganik arsenit formunda vakuollerde depolanması ise hiperakümülatör eğreltilerin yapraklarındaki temel mekanizmadır. Ancak bu türlerde tonoplastlarda lokalize olmuş bir bir transport sistemi henüz tanımlanmamıştır.

Organik asitler gibi küçük ligandları detoksifiye edici faktörler arasında önemli bir konuma sahiptir. Bu tip ligandlar, ağır metallerin serbest iyonlar halinde sitoplazmada uzun süre kalmasını engelleyici ve ağır metallerin metal-organik asit şelatlarının özellikle depolandığı yer olan vakuollerde tutulmasını sağlayıcı bir fonksiyona sahiptir. Örneğin sitrat *T. goesingense*'de yapraklardaki nikelin temel ligandı olarak görev yaparken, *S. nigrum*'da ise sitrat ve asetat yapraklardaki kadmiyumu bağlamaktadır. Bunun dışında *A. halleri*'de çinkonun, *T. caerulea*'de de kadmiyumun büyük kısmı malatla kompleksler oluştururlar [45].

Toleranslı hiperakümülatör olmayan türlerin tersine, hiperakümülatörlerdeki ağır metal detoksifikasyonu, fitoşelatinler gibi yüksek moleküler ağırlıklı ligandlara bağımlı değildir. Bunun sebebi muhtemelen fitoşelatinlerin yapısında fazla miktarda kükürt bulunması ve bu tip şelatörlerin aşırı miktarda sentezlenmesi için gerekli olan metabolik maliyetin engelleyici özelliğidir. Hiperakümülatör bitkilerde, antioksidant sistemle ilgili genlerin aşırı ekspresyonu ve önemli bir antioksidant molekül olan glutatyonun sentezini artması, ağır metallerin neden olduğu aktif oksijen türlerinin neden olduğu riski ortadan kaldırmak için kullanılan önemli bir stratejidir.

Selenyum hiperakümülatörlerindeki temel detoksifikasyon stratejisi, kloroplastlardaki selenat asimilasyonu sonucu oluşan selenoamino asitlere, özellikle de selenosisteine (SeCys) bağlıdır. Selenoamino asitler proteinlerin yapısına kükürt içeren amino asitler yerine yanlışlıkla girer ve bu da selenyum toksisitesine yol açar. Buradaki detoksifikasyon mekanizması SeCyS'nin metilasyonu sonucunda zararsız bir nonproteinik amino asit olan metilselenosisteinin oluşumuna dayanır. Bu reaksiyon hiperakümülatör türlerin yapraklarında konstitütif olarak ekspreslenen ve aktif hale getirilen selenosistein metiltransferaz enzimi ile katalizlenir [46].

5. Bitkilerde ağır metal hiperakümülyasyon mekanizmasının evrimi

Normalde toksik olan ağır metalleri yapraklarında yüksek miktarlarda depolayan bir grup bitkinin keşfedilmesi, bilim adamlarını bu olayın sebeplerini araştırmaya yönlendirmiştir. Bu nedenle bu sıra dışı özelliğe neden sadece bazı bitki türlerinin sahip olduğunu, bu tip bitkilerde hangi fonksiyonların aktif olduğunu ve hiperakümülyasyon özelliğinin faydalı olup olmadığını araştırmak önemlidir.

Yapraklarda yüksek konsantrasyonda metal birikiminin rolü konusunda birçok hipotez ortaya atılmıştır. Bunlar arasında tolerans/dışlama, kuraklık direnci, komşu bitkilerle rekabet ve doğal düşmanlara karşı savunma sayılabilir. Tolerans/dışlama hipotezine göre, spesifik hiperakümülyasyon özelliği bitkilere ağır metalleri köklerden uzak ve tolerant olan yaprak dokularında sınırlayarak biriktirme yeteneği vermektedir. Bu şekilde bitkiler yaprak absisyonu sayesinde ağır metalleri elimine edebilirler. Bazı araştırmacılar da yüksek miktardaki ağır metalin çeperlerde suyun tutulma oranını artırarak ve hücrelerde ozmolit olarak rol oynayarak bitkilerde kuraklık direncini artırdığını ileri sürmüştür. Ancak yapılan deneysel çalışmalar bu hipotezleri fazla desteklememektedir. Rekabet veya aynı zamanda elementel allelopati olarak bilinen hipoteze göre de çok yıllık hiperakümülatör bitkiler toprak yüzeyindeki metal miktarını artırarak diğer bitkilerle rekabet etmektedir. Bu şekilde toprak yüzeyinde ağır metal içeriği yüksek olan bir yaprak tabakası oluşmakta ve bu şekilde ağır metallere daha az dayanıklı olan türlerin bu toprakta büyümesi mümkün olmamaktadır. Yapılan bir çalışmada hiperakümülatör olan *S. acuminata*'nın yaşadığı toprakta nikel konsantrasyonunun, hiperakümülatör olmayan türlerin yaşadığı toprağa göre, oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak diğer bir çalışmada da, nikel hiperakümülatörü olan *Alyssum murale*'nin yaprak dökümü sonucunda toprakta toksik bir bölge oluşturmadığı ve diğer bitki tohumlarının kolayca çimlendiği belirlenmiştir. Bunun nedeni muhtemelen toprağa düşen yaprakların yapısındaki nikelin çözünür formda kalmaması ve hızlıca toprak partiküllerine bağlanarak diğer bitkileri etkilememesidir. Ayrıca bu hipotezi destekleyen araştırma sonuçlarına da henüz ulaşılammıştır [47].

5.1. Elementel savunma hipotezi

Bu hipotez, bitkilerin toprak üstü organlarındaki yüksek ağır metal konsantrasyonunun hiperakümülatör bitkilerde herbivor canlılar ve patojenlere karşı bir savunma mekanizması olarak evrimleştiğini iddia etmektedir. Elementel savunma hipotezi geniş ölçüde test edilmiştir ve birkaç çalışma dışında destekleyici sonuçlar alınmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda Ni, Cd, Zn, As ve Se için savunma mekanizmasının varlığı kanıtlanırken; diğer elementler için böyle bir savunma mekanizması bulunamamıştır. Bu hipotezle ilgili birçok araştırmaya rağmen, sadece birkaç ailya (Brassicaceae) ve sadece birkaç element (Ni, Zn, Cd, As, Se) üzerine yoğunlaşıldığı için daha fazla çalışmaya gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalar sadece laboratuvar koşulları ve birkaç herbivor ile sınırlıdır. Halbuki doğal koşullarda hiperakümülatör bitkiler çok daha fazla doğal düşmanla karşılaşmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalarda elde edilen çelişkili sonuçlar, farklı deneysel koşullardan, kullanılan ağır metal konsantrasyonlarından ve kullanılan herbivorların bitkilerin savunma mekanizması ile başa çıkabilme yeteneğinden kaynaklanabilir. Ağır metaller bitkilerin doğal koşullarda karşılaşabilecekleri birçok düşmana karşı koruma sağlayabilir ancak bazı hiperakümülatör bitkiler de yüksek metal konsantrasyonuna rağmen herbivorlar tarafından besin olarak kullanılır. Herbivor canlıları bitkilerin savunma mekanizmasından koruyan faktör sakınma olabilir. Bu durumda herbivorlar seçici olarak sadece ağır metal miktarı düşük olan bitki dokularını gıda olarak tüketmektedir. Bunun dışında herbivorlar hem yüksek hem de düşük miktarda metal içeren dokuları tüketerek, aldıkları metal

miktarını azaltmalarını sağlayan besinsel dilüsyon mekanizmasını da kullanabilir. Bu konudaki diğer bir mekanizma da herbivorların fizyolojik adaptasyonlar yoluyla yüksek miktarda metal içeren besinlere karşı koymasını sağlayan ve elementel savunma mekanizmasını etkisiz kılan tolerans özelliğidir. Örneğin bir böcek türü olan *Melanotrichus boydi* özellikle nikel hiperakümülatörü olan *Streptanthus polygaloides* ile bir güve türü olan *Plutella xylostella* ise selenyum hiperakümülatörü olan *S. pinnata* ile beslenmekte ve yüksek selenyum miktarından etkilenmemektedir [48].

Ağır metaller toksik oldukları için herbivorlara karşı etkili olabilirler ancak bu durum bitkileri düşmanlarını dokularındaki ağır metallerle zehirlemeden önceki dönemde koruyamaz. Bu durumda herbivor saldırılarına karşı en iyi savunma gıda olarak tüketilme konusunda herbivorları caydırmaktır. Yapılan çalışmalar herbivorlara seçenek sunulduğu zaman bu canlıların düşük miktarda çinko içeren *T. caerulescens* ve düşük miktarda nikel içeren *Senecio coronatus*' u tercih ettiklerini göstermiştir. Benzer caydırıcı etkiler Cd, As ve Se elementleri için de belirlenmiştir. Yüksek konsantrasyonda ağır metal içeren bitkilerle beslenmekten kaçınma davranışı herbivorların metallerin tadını alabildiklerini göstermektedir. Ancak bu davranışı nasıl sergiledikleri konusunda bilgi yoktur. Bazı araştırmacılar da herbivorların bitki dokularındaki metalleri değil de metallerin indüksiyonu ile sentezlenen metabolitleri algıladıklarını ileri sürmektedir [48].

5.2. Bileşik etkiler hipotezi

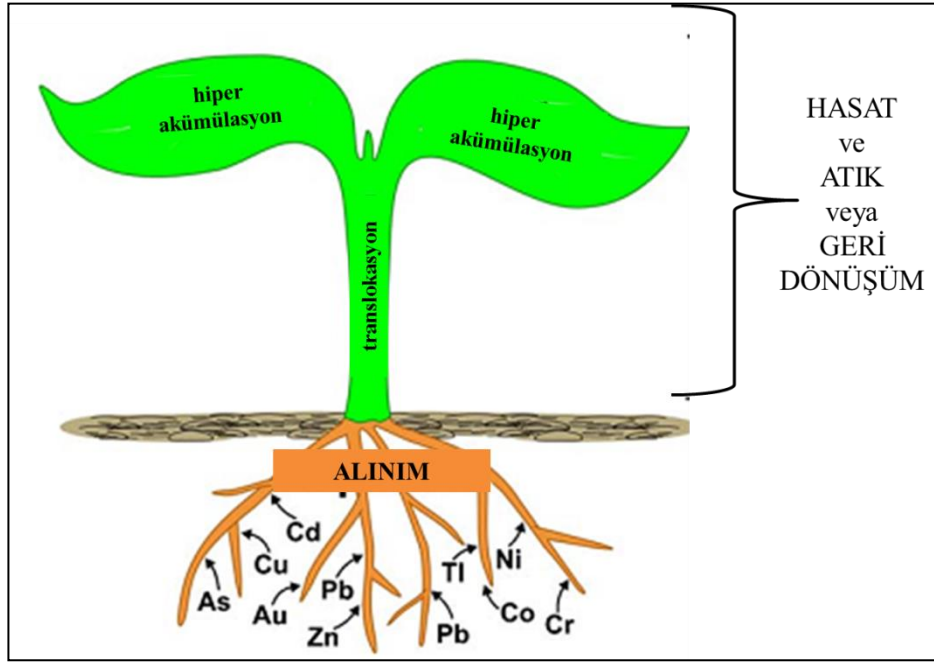
Bitkilerdeki herbivor saldırılarına karşı mevcut olan kimyasal savunma mekanizması birçok organik bileşikle (sekonder metabolit) ilgilidir. Ancak elementel savunma hipotezinin organik savunma mekanizmasına göre bazı avantajları vardır. Örneğin toksik elementler bitki tarafından sentezlenmeyip topraktan alındığı için elementel savunma hipotezi organik mekanizmaya göre metabolik olarak daha ekonomiktir. İnorganik elementler birçok herbivor tarafından biyokimyasal olarak parçalanamaz. Sekonder metabolit biyosentezinin metabolik olarak daha az ekonomik olması, değiş-tokuş hipotezinin ortaya çıkmasını açıklayabilir. Buna göre hiperakümülatör bitkilerdeki metale bağımlı savunma mekanizması, organik savunma mekanizmasının gerektirdiği fazla enerjinin korunması amacıyla evrimleşmiştir. Hiperakümülatör olmayan akraba türlerle karşılaştırıldığında, nikel hiperakümülatörü olan *S. polygaloides* ve çinko hiperakümülatörü olan *T. caerulescens*' de herbivorlara karşı savunma sağlayan glukosinolatların düşük miktardaki varlığı, metal hiperakümüülasyonu ile sekonder metabolit sentezi arasındaki değiş-tokuşu göstermektedir. Ancak değiş-tokuş hipotezi ile ilgili çelişkili bazı noktalar vardır. Nikel hiperakümüülasyonu yapan ve yapmayan türler arasında total glukosinolat miktarından çok spesifik glukosinolatların konsantrasyonu bakımından farklılıklar vardır. Bu durum *T. caerulescens* populasyonlarındaki antiherbivor savunma mekanizmasında caydırıcı olarak çinkodan çok glukosinolatların rol oynadığını göstermektedir [49].

Elementel ve organik bitki bileşikleri arasında bileşik bir savunma etkisi var olabilir ve bu iki mekanizma bitkinin savunma potansiyelini artırmak amacıyla birbiriyle uyumlu bir şekilde fonksiyon gösterebilir. Bir nikel hiperakümülatörü olan *S. polygaloides*' de herbivorlara karşı hem ağır metallerin hem de savunma sağlayıcı çeşitli organik metabolitlerin birlikte rol oynadıkları belirlenmiştir. Sonuç olarak bu yeni bileşik etkiler hipotezi, hem elementel ve organik savunma mekanizmasının birlikte fonksiyonel olabileceğini hem de aynı bitki türünde birden fazla ağır metalin biriktirilebileceğini kanıtlayabilir. Hem farklı ağır metaller arasında hem de bir ağır metal ile bir organik bileşik arasında bileşik etkiler hipotezinin geçerli olduğu belirlenmiştir.

6. Hiperakümülatör bitkilerin önemi

Fizyolojik ve ekolojik önemlerinin yanı sıra hiperakümülatör bitkiler, ağır metallere kontamine olmuş toprakların fitoremediasyonu amacıyla çeşitli teknolojiler geliştirmek gibi konularda akümülayon özelliklerinden faydalanılma olasılıkları nedeniyle büyük ilgi görmektedir.

Son yıllarda bitkilerin kullanımı ile gerçekleştirilen ve fitoremediasyon olarak bilinen ekolojik anlamda önemli olan bazı tekniklerin geliştirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Bu tip teknikler diğer geleneksel yöntemlere göre daha uygun bulunmaktadır. Doğal bitki örtüsünün birer üyesi olan hiperakümülatör bitkiler, metal konsantrasyonu yüksek olan habitatlarda yetiştirildiği zaman, normal bitkilere göre 100-1000 kat daha fazla miktarda metali dokularında biriktirdiklerinden dolayı fitoekstraksiyon için oldukça uygundur (Şekil 3).



Şekil 3. Toprak üstü organlarında ağır metalleri aşırı miktarda depolayan bitkilerin kullanılması ile kontamine olmuş toprakların fitoremediasyonu ve fito madencilik. Bitkilerin toprak üstü organlarının hasat edilmesi ile topraktan aşırı miktarda toksik ağır metalin uzaklaştırılması sağlandığı gibi, bazı değerli metallerin de geri dönüşümü mümkündür [10].

Chaney ve ark. (1983), kontamine olmuş bölgelerin temizlenmesi için hiperakümülatör bitkilerden faydalanılabileceği fikrini ilk olarak ortaya atmışlardır [50]. Ancak daha sonra bu bitkilerin, birçoğunun metallere karşı seçici davranmaları, her element için uygun bir bitki türünün bulunamaması, sadece doğal habitatlarında kullanılabilmeleri, yavaş büyümeleri ve metallerin topraktan hem alınımları hem de taşınım hızını kısıtlayan yüzeysel kök sistemine ve yavaş büyüme hızına sahip olmaları gibi nedenlerden dolayı fitoremediasyon alanında kullanımlarının sınırlı olacağına inanılmıştır. Ayrıca bu bitki türlerinin tarımsal ve genetik özellikleri ile ıslah potansiyelleri ve hastalık spektrumları hakkında da yeterli bilgi yoktur. Bu durum, hektar başına 2 ton kadar kuru madde verimine sahip olan ve bir Zn/Cd hiperakümülatörü olan *T. caerulescens* için de geçerlidir. Bir bitkinin yıllık biyokütle veriminin fitoremediasyon açısından oldukça önemli olmasına rağmen, bu bitkinin metalleri aşırı derecede biriktirip tolere edebilmesi

daha önemli bir özelliktir. Yapılan saksı ve arazi çalışmaları bir hiperakümülatör bitki türü olan *T. caerulescens*' in ıslah çalışmaları sonucu hem veriminin hem de biriktirdiği metal konsantrasyonunun 5 tona kadar çıkabileceğini göstermiştir. Ayrıca bu bitkilerin yakılmasıyla oluşan külün yapısındaki metallerin tekrar değerlendirilebilmesi de önemli bir faktördür. *Thlaspi* genusuna ait çeşitli bitki türlerinin birden fazla metali dokularında biriktirebildikleri bilinmektedir. *Thlaspi* türleri özellikle nikelle kontamine olmuş bölgelerde büyüüp kuru ağırlığının %3'ü kadar metali biriktirebilirken, *T. caerulescens* Cd, Ni, Zn ve Pb'yi dokularında biriktirebilmektedir. *T. caerulescens* hem Cd hem de Zn hiperakümülatörü olarak hektar başına 60 kg Zn ve 8.4 kg Cd'yi topraktan uzaklaştırabilir. *T. goesingese* ve *T. ochroleucum* Ni ve Zn, *T. rotundifolium* ise Ni, Pb ve Zn hiperakümülatörü olarak bilinir. Kuzgun otu olarak bilinen *P. vittata*, uygun iklimsel koşullar altında fazla miktarda biyokütle oluşturma yeteneğine sahiptir ve yapraklarında 22 g kg⁻¹ civarında As biriktirebilmektedir. Bu sonuçlar en azından orta derecede kirlenmiş olan alanların As'den fitoremediasyon tekniği ile temizlenmesinin mümkün olabileceğini göstermektedir. Pb'nin toprakta hem hareketsiz olması hem de çözünürlüğünün ve kök yüzeyine difüzyonunun sınırlı olmasından dolayı ekstraksiyon hızının düşük olmasına rağmen, yüksek biyokütle birikimine sahip olan karabuğday (*Fagopyrum esculentum*, Polygonaceae) bitkisinin gövdelerinde 4.2 mg kg⁻¹ civarında Pb'yi biriktirdiği ve iyi bir Pb hiperakümülatörü olabileceği belirlenmiştir. Toprağa biyolojik olarak parçalanabilen metilglisin diasetik asidin ilavesi ile bu bitkinin gövdesindeki Pb miktarının yaklaşık 5 kat arttığı gözlenmiştir. Bu bulgular kara buğday bitkisinin Pb ile kontamine olmuş toprakların fitoremediasyonu için iyi bir aday olduğunu göstermektedir. *Phytolacca acinosa* (Phytolaccaceae), da hızlı büyüme ve yüksek biyokütle oluşturma özelliğinden dolayı fitoremediasyon amacıyla kullanılabilir. Bu bitki Mn bakımından zengin topraklarda yetiştirildiğinde dokularında yaklaşık 19.3 g kg⁻¹ Mn biriktirebilir. *Alyssum serpyllifolium* subsp. lusitanicum bitkisinin de birçok metalle kontamine olmuş topraklarda metallerin fitoekstraksiyonu konusunda etkinliği araştırılmıştır. Buna göre topraklardaki Cu konsantrasyonunun fitotoksik olmaması şartıyla bu bitkinin birden fazla metalle (Cr, Cu, Pb ve Zn) kontamine olmuş toprakların fitoekstraksiyonu için uygun olduğu belirlenmiştir. Ancak hiperakümülatör bitkiler söz konusu olduğunda kontamine olmuş bölgelerin temizlenmesi için çok uzun süreler gerekmektedir. Örneğin topraktaki Zn konsantrasyonunun 440 mg kg⁻¹' dan 300 mg kg⁻¹'a düşürülmesi için *T. caerulescens*' in 9 sezon boyunca yetiştirilmesi, topraktan 2100 mg kg⁻¹ Zn'nin uzaklaştırılması için de 28 yıl boyunca yetiştirilmesi gerektiği hesaplanmıştır. *T. caerulescens* bitkisinin Zn ve Cd bakımından orta derecede kontamine olmuş toprakların fitoremediasyonu için uygun olduğu, ancak aşırı kirlenmiş toprakların temizlenmesi için çok uzun süreye gereksinim duyulduğu belirlenmiştir. Ayrıca *T. caerulescens* bitkisi ile toprakların Zn ve Cd' dan temizlenebilmesi için mevsimin uzunluğu, tohumların ekiliş şekli ve toprağın pH değeri gibi faktörlerin de etkili olduğu ileri sürülmüştür. Bunun dışında *T. caerulescens* bitkisinin fitoremediasyon potansiyeli bu türün farklı populasyonları arasında da değişiklik göstermektedir. Örneğin bu türün Güney Fransa' da yayılık gösteren ekotiplerinde Cd ve Zn' yi biriktirme kapasitesi oldukça yüksektir. Cd ve Zn' nin alınımında gözlenen farklılıklar, her iki metalin hiperakümülatör bitkiler tarafından biriktirilme mekanizmalarında önemli farkların olduğunu göstermektedir. Bu nedenle istenen özelliğin seleksiyonundaki artış, hiperakümülatör bitkilerin fitoremediasyon kapasitesinin artmasına da yardımcı olabilir. *T. caerulescens* veya *A. halleri*' nin kullanılmasıyla Cd bakımından zengin fosfat gübrelerinin kullanıldığı arazilerin

temizlenmesi onlarca yıl sürebilir. Nikel hiperakümülatörü olarak bilinen *Alyssum bertolonii* ve *Berkheya coddii* ile gerçekleştirilen küçük ölçekli arazi çalışmaları, özellikle *B. coddii*'nin yüksek biyokütle oluşturma, yüksek miktarda Ni biriktirme, kolay yetiştirilme ve soğuk iklimlere kolay adapte olma özelliklerinden dolayı Ni fitoremediasyonu için uygun bir tür olduğunu ortaya çıkarmıştır. Orta derecede Ni kontaminasyonu gösteren arazilerde *B. coddii*'nin 2 sezon, *A. bertolonii*'nin ise 5-10 sezon boyunca yetiştirilmesi topraklardaki Ni konsantrasyonunun Avrupa Birliği tarafından belirlenen değerlere inmesini sağlamaktadır. As ile kontamine olmuş topraklarda bu metalin temizlenmesi amacıyla *P. vittata*'nın kullanıldığı 2 yıllık bir çalışma sonucunda, topraktan yaklaşık 19.3 g As'nin uzaklaştırıldığı belirlenmiş; bu toprakların tamamen temizlenebilmesi için de 8 yıllık bir sürenin gerektiği ortaya çıkarılmıştır. Ancak toprağın yapısında bulunan Pb'nin *P. vittata*'nın toprakları As'den temizleme yeteneğini ortadan kaldırdığı da bilinmektedir. *T. caerulescens* bitkisinin, metallerin rizosferdeki kullanılabilirliğini akümülatör olmayan bitkilerle aynı derecede artırdığı gösterilmiş ve metallerin çözünürlüğünü artırmak için bazı bileşiklerin kullanılması gerektiği savunulmuştur. Yapılan arazi çalışmalarında etilen diamın tetra asetik asit (EDTA), nitrilotriasetik asit (NTA) ve sitrik asit gibi birçok bileşik test edilmiş ve sonuçta bu uygulamaların metal miktarını artırmadığı ancak hiperakümülatör bitkilerin hem biyokütle birikimini hem de fitoekstraksiyon kapasitelerini azalttığı belirlenmiştir. Polisiklik aromatik hidrokarbonların (PAH), *A. lesbiacum* bitkisinin Ni elementini ekstrakte edebilme yeteneği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak PAH'ların bitki büyümesini olumsuz etkilediği ve gövdedeki birim biyokütle başına Ni fitoekstraksiyon derecesinin önemli oranda etkilenmediği bulunmuştur. Bu sonuçlar *A. lesbiacum*'un aşırı derecede PAH kirlenmesine maruz kalmış alanlarda Ni'nin fitoekstraksiyonu konusunda etkili olabileceğini göstermektedir [51].

Sonuç olarak bu konuda yapılan çalışmalar fitoremediasyon teknolojisinin özellikle Ni ve As için daha uygun olduğunu, diğer metaller için daha ayrıntılı bazı ön çalışmalara gereksinim duyulduğunu göstermiştir. Ayrıca fitoremediasyon teknolojisinin düşük veya orta derecede kontamine olmuş topraklar için ideal bir çözüm yöntemi olmasına rağmen, aşırı derecede kirlenme gösteren topraklar için uygun değildir.

7. Hiperakümüülasyon özelliğinin hızlı büyüyen türlere transferi

Hiperakümülatör türlerin büyüme hızının ıslah çalışmaları ile artırılması veya metal hiperakümüülasyonu ile ilgili genlerin yüksek biyokütle oluşturan türlere transfer edilmesi, metal fitoekstraksiyon potansiyelini artırmak için kullanılacak biyoteknolojik yaklaşımlardır. Hiperakümülatör bitkilerde boyutların artırılması amacıyla, *T. caerulescens* ve *Brassica napus* arasında somatik hibritler oluşturulmuştur. Zn toleransı için seçilen yüksek biyokütleyle sahip hibritler, *B. napus* için toksik etki yapacak seviyedeki Zn'yi biriktirme kapasitesine sahiptir. Bu sonuçlar metal hiperakümüülasyon yeteneğinin transfer edilebileceğini göstermektedir. *T. caerulescens* ve *B. juncea*'dan elde edilen somatik hibritlerin de önemli miktarda Pb'nin topraktan uzaklaştırılmasını sağladığı belirlenmiştir. *T. caerulescens* türü aynı zamanda metalle kontamine olmuş toprakların fitoremediasyonu için uygun türlerin geliştirilmesi için bir gen kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Biyoteknolojik yöntemlerle geliştirilen ve Cd, Zn, Cr, Cu, Pb, As ve Se gibi metallerin toksik seviyelerine toleranslı olan bitki türleri rapor edilmiştir. Hızlı büyüyen bitki türlerinde kullanılan transporter genlerin kombinasyonları umut verici sonuçların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Transgenik *B. juncea* bitkisinin hem hidroponik kültür ortamında

hem de toprakta yabancı türlere göre daha fazla Se aldığı ve Se' ye daha toleranslı olduğu belirlenmiştir. Se toleransı gelişimini sağlamak amacıyla Se hiperakümülatörü olan *A. bisulcatus*'dan Se'ye toleransı olmayan *B. juncea*'ya selenosistein metiltransferaz (SMT) geni transfer edilmiş ve bu şekilde oluşturulan transgenik *B. juncea*'nın kontamine olmuş topraklarda büyütülmesi durumunda dokularında yabancı tiplere göre %60 oranında daha fazla Se biriktirdiği belirlenmiştir [52].

Transgenik bitkilerin oluşturulmasına yönelik yaklaşımlar umut verici olmasına rağmen, bu konuda yapılan arazi çalışmalarının sayısı oldukça azdır. Ayrıca bitkilerde ağır metallerin birikimi, ağır metallere tolerans ve fitoekstraksiyon potansiyelleri gibi özelliklerin birçok gen tarafından kontrol edilmesi de söz konusudur. Bu durumda hızlı büyüyen bitkilerde bu tip özelliklerin geliştirilmesi için yapılan genetik manipülasyonlar, birçok genin ekspresyon derecesinde değişikliklerin meydana gelmesine neden olacaktır. Bu genlerin sayılarının ve özelliklerinin belirlenmesi de oldukça önemlidir. Metal hiperakümüülasyonu, metallerin alınımı, köklerden gövdeye taşınımı, detoksifikasyon/sınırlandırma mekanizmaları ile ilgili genlerin fonksiyonları ve regülasyon mekanizmalarının tamamen anlaşılması, transgenik yaklaşımlarla bu problemin çözümüne katkı sağlayacaktır.

8. Fitoremediasyon tipleri

Fitoremediasyon teknikleri arasında fitoekstraksiyon (fitoakümüülasyon), fitofiltrasyon, fitostabilizasyon, fitovolatilizasyon ve fitodegradasyon gibi yöntemler bulunur [53].

8.1. Fitoekstraksiyon

Aynı zamanda fitoakümüülasyon, fitoabsorbsiyon gibi isimlerle de anılan fitoekstraksiyon tekniğinin esası, su veya topraktaki kontaminantların bitki kökleriyle alındıktan sonra bunların toprak üstü organlarına taşınıp burada biriktirilmesidir [54]. Bu teknikte önemli olan ortamdan alınan metal iyonlarının gövdeye taşınmasıdır. Bu olay gövdenin hasat edilmesi köklere göre daha kolay olduğu için oldukça önemli biyokimyasal bir süreçtir [55].

8.2. Fitofiltrasyon

Fitofiltrasyon kirletici bileşiklerin yüzey sularından veya atık sulardan bitkiler yardımıyla uzaklaştırılmasıdır [56]. Bu tekniğin de temizleme işleminde etkin olan bitki organına göre alt grupları vardır. Örneğin temizleme işleminde etkili olan organ kökler ise bu olaya rizofiltrasyon, fideler ise blastofiltrasyon, gövdeler ise kaulifiltrasyon adı verilir. [57]. Bu teknikte kontaminantlar bitkiler tarafından ya absorblanarak ya da adsorbe edilerek su ortamındaki hareket yetenekleri minimum seviyeye indirilir.

8.3. Fitostabilizasyon

Fitostabilizasyon veya fitoimmobilizasyon kirletici bileşiklerin kontamine olmuş topraklarda stabilize edilmesi için belirli bitki türlerinin kullanılması esasına dayanan bir tekniktir [58]. Böylece kontaminant bileşiklerin topraktaki hareketi büyük ölçüde azaltılır ve bunların su kaynaklarına ve dolayısıyla besin zincirine girmesi engellenir [59]. Bitkiler rizosferde bulunan ağır metalleri kökleriyle absorblayarak, toprak çözeltisinde çöktürerek, başka bileşiklerle kompleksleşmesini sağlayarak veya indirgeyerek hareketsiz duruma getirebilirler [60]. Metal iyonlarının toksisite dereceleri sahip oldukları değerliklere göre değişiklik gösterir. Bitkiler bazı spesifik redoks enzimlerini kullanarak metalleri toprakta daha az toksik olan formlara dönüştürerek olası metal stresini veya hasarını azaltabilir. Örneğin toprakta bulunan krom (VI) bu tip bir mekanizma ile bitkiler tarafından daha az hareketli ve daha az toksik olan krom (III) formuna dönüştürülür [61]. Bitkiler bu şekilde ağır metallerin topraktaki birikimini ve bunların yer altı sularına

karışma oranını sınırlandırır. Ancak bu olayda ağır metaller toprakta kaldığı için fitostabilizasyon kalıcı bir çözüm oluşturmaz.

8.4. Fitovolatilizasyon

Bu teknikte kirletici bileşiklerin bitkiler tarafından topraktan alınması, uçucu bileşiklere dönüştürülmesi ve atmosfere geri verilmesi söz konusudur. Fitovolatilizasyon özellikle bazı organik atıklar için uygun olduğu gibi civa ve selenyum gibi bazı ağır metallerin topraktan uzaklaştırılmasında da kullanılabilir. Ancak kirletici bileşiklerin topraktan tamamen uzaklaştırılması sağlamayıp sadece topraktan atmosfere aktarılmasını sağladığı için biyolojik ve çevresel faydası daha sınırlıdır. Çünkü bu kirleticilerin atmosferden tekrar toprak yapısına katılma riski her zaman vardır. Bu nedenle fitovolatilizasyon her zaman tartışmaya açık bir fitoremediasyon tekniğidir [62].

8.5. Fitodegradasyon

Bu teknik organik kirleticilerin dehalogenaz ve oksijenaz gibi bitkisel enzimlerin yardımıyla parçalanmasını sağlar ve toprak florasındaki mikroorganizmaların hiçbir payı yoktur [63]. Organik kirletici bileşikler bitkiler tarafından topraktan alındıktan sonra metabolik olarak detoksifiye edilir. Bu açıdan bitkiler doğanın “yeşil karaciğeri” olarak tanımlanabilir. Fitodegradasyon tekniğinin kullanımı da sadece organik bileşiklerle sınırlıdır. Çünkü metaller biyolojik olarak parçalanma özelliğine sahip değildir. Son yıllarda bu tekniğin sentetik herbisitler ve insektisitlerin doğadan uzaklaştırılması amacıyla yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır.

8.6. Rizodegradasyon

Bu teknikte topraktaki organik kirleticilerin rizosferde yaşayan mikroorganizmalar tarafından parçalanması söz konusudur [64]. Rizosfer kökün çevresini saran yaklaşık 1 mm kalınlığındaki toprak tabakasıdır ve büyük ölçüde bitki köklerinin metabolit etkisi altındadır. Kirleticilerin rizosferde parçalanma hızının artması, bu bölgedeki mikroorganizmaların sayı ve metabolik aktivitesindeki artıştan kaynaklanır. Bitkiler kökleriyle rizosfere karbohidrat, amino asit ve flavonoid içeren salgılar vererek bu bölgedeki mikrobiyal aktiviteyi 10-100 kat artırabilir. Çünkü bitki köklerinin rizosfere salgıladığı bu bileşikler mikroorganizmalar için uygun bir karbon ve azot kaynağıdır. Bitkiler rizosfere ayrıca organik kirleticileri parçalama özelliğine sahip olan enzimler de salgırlar [65].

Bunun dışında son yıllarda ortaya çıkan ve fitodesalinizasyon olarak bilinen bir teknikte günümüzde halofit bitkilerin kullanımı ile tuzlu toprakların tarımsal bitkilerin büyümesi için uygun duruma getirilmesi hedeflenmektedir [66]. Halofit bitkilerin glikofitlere göre ağır metallerle kontamine olmuş topraklara daha iyi adapte olduğu bilinmektedir [67]. Yapılan araştırmalar sonucunda, birer halofit bitki olan *Suaeda maritima* ve *Sesuvium portulacastrum*' un 1 hektarlık bir alandan 4 ay içinde sırasıyla 504 ve 474 kg NaCl' yi temizleyebileceği tahmin edilmektedir. Buna göre bu iki bitki türünün aynı ortamda birkaç defa yetiştirilmesi ile tuzdan temizlenebileceği ve bu alanın tekrar tarımsal amaçlarla kullanılabilirliği düşünülmektedir [68]. Yapılan bir çalışmada da *S. portulacastrum* adlı halofit bitkinin yetiştirildiği aşırı tuzlu topraklardan hektar başına 1 ton Na⁺ nın uzaklaştırıldığı ve aynı alanda başarılı bir şekilde arpa tarımının yapılabildiği rapor edilmiştir [69].

Yukarıda bahsedilen bu teknikler arasında fitoekstraksiyon tekniği, hem ağır metallerin hem de metaloidlerin toprak, sediment ve su gibi ortamlardan uzaklaştırılması konusunda, en tatmin edici sonuçları sağlaması nedeniyle, en yoğun şekilde tercih edilen fitoremediasyon şeklidir [70]. Fitoekstraksiyon tekniğinin etkinlik derecesini etkileyen faktörler arasında topraktaki ağır metallerin tipi ve biyolojik kullanılabilirliği, toprağın

fiziksel ve kimyasal özellikleri kullanılan bitkinin türü sayılabilir. Bir bitki türünün fitoekstraksiyon tekniği ve dolayısıyla fitoremediasyon konusunda uygun olabilmesi için aşağıda belirtilen özellikleri taşıması gerekmektedir [71]:

- 1- Yüksek büyüme hızı
- 2- Toprak üstü organlarının yüksek biyokütle üretme yeteneği
- 3- Oldukça gelişmiş ve dallanmış kök sistemi
- 4- Hedeflenen metali dokularında biriktirme bakımından yüksek bir kapasite
- 5- Köklerle topraktan alınan metalin gövdeye yüksek oranda taşınımı
- 6- Hedeflenen ağır metalin toksik etkilerine karşı yüksek tolerans
- 7- O bölgede hakim olan çevresel ve iklimsel koşullara yüksek derecede adaptasyon
- 8- Patojen ve diğer zararlılara karşı yüksek derecede direnç
- 9- Yetiştirme ve hasat kolaylığı
- 10- Besin zinciri kontaminasyonuna yol açmamak için herbivorlardan sakınma

Bir bitki türünün fitoremediasyon potansiyelini etkileyen iki temel faktör vardır. Bunlardan biri bitkinin gövde dokularında biriktirdiği metal konsantrasyonu diğeri ise gövdenin sahip olduğu biyokütledir [72]. Bu nedenle ağır metallerin fitoremediasyonunda iki farklı yaklaşım test edilmektedir. Bazı çalışmalarda toprak üstü organlarının biyokütlesi nispeten düşük ancak hedeflenen ağır metali biriktirme yeteneği fazla olan hiperakümülatör bitki türleri; bazılarında ise *Brassica juncea* gibi tam tersi özelliklere sahip olan bitki türleri kullanılmaktadır. *Brassica juncea* gibi bitkilerin metal biriktirme kapasitesinin düşük olması, yüksek gövde biyokütlesine sahip olma özelliği ile dengelenmektedir [73]. Bazı araştırmacılar, bu amaçla kullanılacak olan bitki türlerinde yüksek gövde biyomasına sahip olma özelliğine göre ağır metale karşı olan hiperakümüülasyon ve hipertolerans özelliklerinin daha önemli olduğunu savunmaktadır [9]. Hiperakümülatör bitkilerin kullanılması her zaman biyokütle bakımından fakir ancak metal konsantrasyonu bakımından zengin ve hem metalin geri eldesi hem de güvenli bir şekilde imha etme bakımından kolay taşınacak bir kütle vermektedir.

Bunun dışında tek bir büyüme periyodu boyunca birden fazla defa ürün veren *Trifolium* spp. gibi bitki türleri, ağır metallerin fitoremediasyonu konusunda daha büyük bir potansiyele sahiptir. Fitoremediasyon tekniği için stres faktörlerine karşı daha dayanıklı olmaları ve daha yüksek bir biyokütle sağlamaları nedeniyle çalı formundaki bitkiler ve ağaçlara göre, tek yıllık bitkiler daha çok tercih edilmektedir. Bazı araştırmacılar da mısır ve arpa gibi ekonomik bitkilerin ağır metallerin fitoremediasyonu için kullanılmasını değerlendirmişlerdir. Bu durumda adı geçen bitki türlerinin ağır metal kontaminasyonunu uygun seviyeye düşürmek için bir sezonda birkaç kez yetiştirilmesi gerekir. Ayrıca bu tip bitki türlerinin ağır metal fitoremediasyonunda kullanılması durumunda besin zincirine olası bir kontaminasyonu engellemek için gerekli önlemlerin de alınması zorunludur. Bu bitkilerin hiçbir şekilde insan gıdası veya hayvan yemi olarak kullanılmaması gereklidir [74].

9. Fitomadencilik

Ağır metalleri içeren bitkisel biyokütle enerji elde etmek amacıyla yakıldıktan sonra kalan kül kısmına “biyo-cevher” adı verilmektedir. Bu biyo-cevher daha sonra ağır metallerin geri eldesi veya ekstraksiyonu için kullanılabilir. Fitomadencilik bir avantajı biyokütlenin yakılmasından sonra oluşan enerjinin pazara sunulmasıdır. Belçika ve Hollanda’ da mısır bitkisiyle yapılan bir tarla denemesinde fitomadencilik sayesinde hektar başına yaklaşık 30,000-42,000 kWh yenilenebilir enerji elde edilmiştir [75]. Kömürle işleyen bir elektrik santrali düşünüldüğünde bu uygulama yılda hektar başına

atmosfere verilen CO₂ miktarını yaklaşık 21 ton azaltacaktır. Ayrıca biyo-cevherlerin işlenmesi, kükürt miktarı düşük olduğundan, atmosfere verilen SO_x gazlarının miktarını da azaltmaktadır. Bu durumda fitomadencilik diğer konvansiyonel ekstraksiyon yöntemlerine göre hen ekonomik hem de ekolojik olarak daha uygundur. Ancak fitomadencilikğin ticari varlığı fitoekstraksiyon olayının etkinliği ve işlenen metallerin güncel pazar değeri gibi bazı faktörlere bağlıdır. Ancak fitomadencilik özellikle nikel elementi için çok uygun bir yöntemdir. Bu nedenle çevre kirliliğini engelleyecek yasal düzenlemelerin biyolojik temellere dayana madencilikği teşvik etmesi düşünülmektedir [76].

10. Fitoremediasyon üzerindeki sınırlandırıcı faktörler

Fitoremediasyon ağır metallerle kontamine olmuş toprakların temizlenmesi için kullanılan uygun bir yaklaşım olmasına rağmen, bu teknoloji üzerinde bazı sınırlayıcı faktörler vardır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [56]:

- 1- Toprakların temizlenebilmesi için uzun zaman gerekmesi
- 2- Birçok hiperakümülatör bitkinin fitoremediasyon etkinliğini, düşük büyüme hızı ve düşük biyokütle birikimi nedeniyle sınırlı olması
- 3- Metal iyonlarının topraktaki hareket yeteneğinin, dolayısıyla biyolojik kullanılabilirliğinin sınırlı olması
- 4- Yüksek metal konsantrasyonunun bitki büyümesini olumsuz etkilemesinden dolayı, bu tekniğin sadece düşük ya da orta derecede kontaminasyonun olduğu alanlarda uygulanabilir olması
- 5- Besin zincirine kontaminasyon riskini taşıması

SONUÇ

Ağır metal kirliliği ile ilgili çevresel problemler çeşitli insan aktiviteleri nedeniyle her geçen gün daha ciddi boyutlar kazanmaktadır. Doğal olarak doğadaki ağır metal kontaminasyonunun fitotoksik etkileri ve bitkilerin ağır metal stresi altında oluşturdukları metabolik cevaplar ve tolerans mekanizmaları konusundaki araştırmalar da yoğunlaşmaktadır. Bu konuda özellikle yaprak dokularında ağır metalleri diğer bitkilere göre çok daha yüksek oranda biriktiren ve ağır metalle kirlenmiş topraklarda büyüeyebilen hiperakümülatör bitkilerde gözlenen metabolik değişimlerin incelenmesi önem kazanmıştır. Hiperakümülatör bitkilerle yapılan araştırmalarda da bu bitkilerdeki hiperakümüülasyon yeteneğinin altında yatan fizyolojik ve moleküler mekanizmalar ve bu tip bitkilerin gerek ağır metallerle kontamine olmuş gerekse doğal olarak yüksek konsantrasyonda metal içeren toprakların temizlenmesinde nasıl kullanılabileceği belirlenmeye çalışılmaktadır. Hiperakümülatör bitkiler farklı ailyalara mensup olan ve ağır metal konsantrasyonu yüksek olan ılıman ve tropikal bölgelerdeki topraklarda yayılış gösteren bitkilerdir. Bu durum hiperakümüülasyon yeteneğinin farklı bitki türlerinde farklı şekilde evrimleştiğini göstermektedir. Hiperakümülatör bitkilerde ağır metallerle karşı geliştirilen savunma mekanizmalarının anlaşılması için farklı hiperakümülatör bitkiler ve farklı ağır metaller üzerinde geniş çaplı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Ayrıca araştırmaların daha gerçekçi sonuçlar vermesini sağlamak için, çeşitli patojenlerin, parazitlerin ve herbivorların doğal olarak bulunduğu arazi koşullarında gerçekleştirilmesi de faydalı olacaktır. Son yıllarda hiperakümülatör bitkilerin fitoremediasyon ve fitomadencilik gibi alanlarda kullanılabilirliği araştırılmaya başlanmıştır. Bunun yanı sıra, daha farklı bitki türlerinin hiperakümülatör yeteneklerinin belirlenmesi ve bu bitkilerin yetiştirilerek fitoremediasyon alanındaki kullanılabilirliğinin araştırılması

önemlidir. Bu konuda elde edilecek başarılı sonuçlar ıslah çalışmalarında gereksinim duyulan genetik kaynakların çeşitliliğinin artmasına da katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2012-02-04-014).

Çıkar Çatışması

Makaleyi yazan yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkısı

Makaleyi yazan yazarlar yayına eşit miktarlarda katkı sağlamışlardır.

Kaynaklar

- [1]. La Rocca, N., Andreoli, C., Giacometti, G.M., Rascio, N. ve Moro, I., Responses of the Antarctic microalga *Koliella antarctica* (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) to cadmium contamination, **Photosynthetica**, 47, 471–479, (2009).
- [2]. Quartacci, M.F., Cosi, E. ve Navari-Izzo, F., Lipids and NADPH-dependent superoxide production in plasma membrane vesicles from roots of wheat grown under copper deficiency or excess, **Journal of Experimental Botany**, 52, 354, 77-84, (2001).
- [3]. Watanabe, T. ve Osaki, M., Mechanism of adaptation to high aluminum condition in native plant species growing in acid soils: a review, **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, 33, 1247-1260, (2002).
- [4]. Rascio, N., Metal accumulation and damage in rice (c.v. Vialone nano) seedlings exposed to cadmium, **Environmental and Experimental Botany**, 62, 267–278, (2008).
- [5]. Hall, J.L., Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance, **Journal of Experimental Botany**, 53, 1–11, (2002).
- [6]. Sgherri, C., Cosi, E. ve Navari-Izzo, F., Phenols and antioxidative status of *Raphanus sativus* grown in copper excess, **Physiologia Plantarum**, 118, 21–28, (2003).
- [7]. Brooks, R.R., Lee, J., Reeves, R.D. ve Jaffré, T., Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants, **Journal of Geochemical Exploration**, 7, 49–57, (1977).
- [8]. Rascio, N., Metal accumulation by some plants growing on zinc-mine deposits, **Oikos**, 29, 250–253, (1977).
- [9]. Chaney, R.L., Malik, M., Li, Y.M., Brown, S.L., Brewer, E.P., Angle, J.S. ve Baker, A.J.M., Phytoremediation of soil metals. **Current Opinion in Biotechnology**, 8, 279–284, (1997).
- [10]. Rascio, N., Navari-Izzo, F., Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? **Plant Science**, 180, 169-181, (2011).
- [11]. Sun, R., Zhou, Q. ve Jin, C., Cadmium accumulation in relation to organic acids in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator, **Plant and Soil** 285, 125–134, (2006).
- [12]. Macnair, M.R., The hyperaccumulation of metals by plants, **Advances in Botanical Research**, 40, 63–105, (2003).

- [13]. Faucon, M.P., Soil influence on Cu and Co uptake and plant size in the cuprophytes *Crepidiorhopalon perennis* and *C. tenuis* (Scrophulariaceae) in SC Africa, **Plant and Soil**, 317, 201–212, (2009).
- [14]. Baker, A.J.M. ve Brooks, R.R., Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistry, **Biorecovery**, 1, 81–126, (1989).
- [15]. Verbruggen, N., Hermans, C. ve Schat, H., Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants, **New Phytologist**, 181, 759–776, (2009).
- [16]. Sagner, S., Hyperaccumulation, complexation and distribution of nickel in *Sebestia acuminata*, **Phytochemistry**, 47, 339–347, (1998).
- [17]. Brooks, R.R., (Ed.), Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals, CAB International, Wallingford, UK, 1998, p. 380.
- [18]. Yang, X.E., Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance), **Plant and Soil**, 259, 181–189, (2004).
- [19]. Reeves, R.D. ve Baker, A.J.M., Metal-accumulating plants, in: I. Raskin, B.D. Ensley (Eds.), Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment, John Wiley & Sons, 2000, pp. 193–229.
- [20]. Karimi, N., Ghaderian, S.M., Maroofi, H. ve Schat, H., Analysis of arsenic in soil and vegetation of a contaminated area in Zarshuran, Iran, **International Journal of Phytoremediation**, 12, 159–173, (2010).
- [21]. Ma, L.Q., Komar, K.M., Tu, C., Zhang, W. ve Cai, Y., A fern that hyperaccumulates arsenic, **Nature**, 409, 579, (2001).
- [22]. Assunção, A.G.L., Schat, H. ve Aarts, H.G.M., *Thlaspi caerulescens*, an attractive model species to study heavy metal hyperaccumulation in plants, **New Phytologist**, 159, 351–360, (2003).
- [23]. Bert, V., Macnair, M.R., De Laguerie, P., Saumitou-Laprade, P. ve Petit, D., Zinc tolerance and accumulation in metallicolous and nonmetallicolous populations of *Arabidopsis halleri* (Brassicaceae), **New Phytologist**, 146, 225–233, (2000).
- [24]. Bert, V., Genetic basis of Cd tolerance and hyperaccumulation in *Arabidopsis halleri*, **Plant and Soil**, 249, 9–18, (2003).
- [25]. Roosens, N., Verbruggen, N., Meerts, P., Ximenez-Embun, P. ve Smith, J.A.C., Natural variation in cadmium tolerance and its relationship to metal hyperaccumulation for seven populations of *Thlaspi caerulescens* from Western Europe, **Plant Cell and Environment**, 26, 1657–1672 (2003).
- [26]. Assunção, A.G.L., Elevated expression of metal transporter genes in three accessions of the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, **Plant Cell and Environment**, 24, 217–226, (2001).
- [27]. Zhao, F.J., Hamon, R.E., Lombi, E., McLaughlin, M.J. ve McGrath, S.P., Characteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, **Journal of Experimental Botany**, 53, 535–543, (2002).
- [28]. Lombi, E., Zhao, F.J., McGrath, S.P., Young, S.D. ve Sacchi, G.A., Physiological evidence for a high-affinity cadmium transporter highly expressed in a *Thlaspi caerulescens* ecotype, **New Phytologist**, 149, 53–60, (2001).
- [29]. Liu, M.Q., Does cadmium play a physiological role in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*? **Chemosphere**, 7, 1276–1283, (2008).

- [30]. Lane, T.W. ve Morel, F.M.M., A biological function for cadmium in marine diatoms, **Proceeding of National Academy of Science U.S.A.** 97, 4627–4631, (2000).
- [31]. Meharg, A.A. ve Hartley-Whitaker, J., Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and non-resistant plant species, **New Phytologist**, 154, 29–42, (2002).
- [32]. Caille, N., Zhao, F.J. ve McGrath, S.P., Comparison of root absorption, translocation and tolerance of arsenic in the hyperaccumulator *Pteris vittata* and the nonhyperaccumulator *Pteris tremula*, **New Phytologist**, 165, 755–761, (2005).
- [33]. Poynton, C.Y., Huang, J.W.W., Blaylock, M.J., Kochian, L.V. ve Ellass, M.P., Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris* species: root As influx and translocation, **Planta**, 219, 1080–1088, (2004).
- [34]. Gonzaga, M.I., Ma, L.Q., Santos, J.A. ve Matias, M.I., Rhizosphere characteristics of two arsenic hyperaccumulating *Pteris* ferns, **Science and Total Environment**, 407, 4711–4716, (2009).
- [35]. Shibagaki, N., Selenate-resistant mutants of *Arabidopsis thaliana* identify Sultr1;2, a sulfate transporter required for efficient transport of sulfate into roots, **Plant Journal**, 29, 475–486, (2002).
- [36]. Galeas, M.L., Zhang, L.H., Freeman, J.L., Wegner, M. ve Pilon-Smits, E.A.H., Seasonal fluctuations of selenium and sulphur accumulation in selenium hyperaccumulators and related nonaccumulators, **New Phytologist**, 173, 517–525, (2007).
- [37]. Lasat, M.M., Pence, N.S., Garvin, D.F., Abbs, S.D. ve Kochian, L.V., Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, **Journal of Experimental Botany**, 51, 71–79, (2000).
- [38]. Becher, M., Talke, I.N., Krall, L. ve Krämer, U., Cross-species microarray transcript profiling reveals high constitutive expression of metal homeostasis genes in shoots of the zinc hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*, **Plant Journal**, 37, 251–268, (2004).
- [39]. Hanikenne, M., Evolution of metal hyperaccumulation required cisregulatory changes and triplication of HMA4, **Nature**, 453, 391–395, (2008).
- [40]. Colangelo, E.P. ve Guerinot, M.L., Put the metal to the petal: metal uptake and transport throughout plants, **Current Opinion in Plant Biology**, 9, 322–330, (2006).
- [41]. Sors, T.G., Ellis, D.R. ve Salt, D.E., Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants, **Photosynthesis Research**, 86, 373–389, (2005).
- [42]. Callahan, D. L., LC–MS and GC–MS metabolite profiling of nickel (II) complexes in the latex of the nickel hyperaccumulating tree *Sebertia acuminata* and identification of methylated aldaric acid as a new nickel (II) ligand, **Phytochemistry**, 69, 240–251, (2008).
- [43]. Cosio, C., De Santis, L., Frey, B., Diallo, S. Ve Keller, C., Distribution of cadmium in leaves of *Thlaspi caerulescens*, **Journal of Experimental Botany**, 56, 565–575, (2005).
- [44]. Kim, D., The plant CDF family member TgMTP1 from the Ni/Zn hyperaccumulator *Thlaspi goesingense* acts to enhance efflux of Zn at the plasma membrane when expressed in *Saccharomyces cerevisiae*, **Plant Journal**, 39, 237–251, (2004).
- [45]. Sarret, G., Forms of zinc accumulated in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*, **Plant Physiology**, 130, 1815–1826, (2002).

- [46]. Sors, T.G., Martin, C.P. ve Salt D.E., Characterization of selenocysteine methyltransferases from *Astragalus* species with contrasting selenium accumulation capacity, **Plant Journal**, 59, 110–122, (2009).
- [47]. Morris, C., Grossi, P.R. ve Call, C.A., Elemental allelopathy: processes, progress, and pitfalls, *Plant Ecology*, 202, 1–11, (2009).
- [48]. Freeman, J.L., Quinn, C.F., Marcus, M.A., Fakra, S. ve Pilon-Smits, E.A.H., Selenium tolerant diamondback moth disarms hyperaccumulator plant defense, **Current Biology**, 16, 2181–2192, (2006).
- [49]. Tolrà, R.O., Poschenrieder, C., Alonso, R., Barceló, D. Ve Barceló, J., Influence of zinc hyperaccumulation on glucosinolates in *Thlaspi caerulescens*, **New Phytologist**, 151, 621–626, (2001).
- [50]. Chaney, R.I., Plant uptake of inorganic waste constituents, in: J.F. Parr, P.B. Marsh, J.M. Kla, (eds), land treatment of hazardous wastes, Noyes Data Corp., park Ridge, 1983, pp. 50-76.
- [51]. Singer, A.C., Bell, T., Heywood, C.A., Smith, J.A. C. ve Thompson, I.P., Phytoremediation of mixed-contaminated soil using the hyperaccumulator plant *Alyssum lesbiacum*: evidence of histidine as a measure of phytoextractable nickel, **Environmental Pollution**, 147, 74–82, (2007).
- [52]. Zhao, F.J. ve McGrath, S.P., Biofortification and phytoremediation, **Current Opinion in Plant Biology**, 12, 373–380, (2009).
- [53]. Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J., Amezaga, I., Albizu, I. ve Garbisu, C., Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic, **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, 3, 71–90, (2004).
- [54]. Rafati, M., Khorasani, N., Moattar, F., Shirvany, A., Moraghebi, F. ve Hosseinzadeh, S., Phytoremediation potential of *Populus alba* and *Morus alba* for cadmium, chromium and nickel absorption from polluted soil. *Int. J. Environ. Res.* 5, 961–970, (2011).
- [55]. Tangahu, B.V., Abdullah, S.R.S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N. ve Mukhlisin, M., A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation, **International Journal of Chemical Engineering**, (2011).
- [56]. Mukhopadhyay, S. ve Maiti, S.K., Phytoremediation of metal enriched mine waste: a review, **Global Journal of Environmental Research**, 4, 135–150, (2010).
- [57]. Mesjasz-Przybylowicz, J., Nakonieczny, M., Migula, P., Augustyniak, M., Tarnawska, M., Reimold, W.U., Koeberl, C., Przybylowicz, W. ve Glowacka, E., Uptake of cadmium, lead, nickel and zinc from soil and water solutions by the nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii*. **Acta Biologia Cracovena Botany**, 46, 75–85, (2004).
- [58]. Singh, S., Phytoremediation: a sustainable alternative for environmental challenges, **International Journal of Green and Herbal Chemistry**, 1, 133–139, (2012).
- [59]. Erakhrumen, A.A., Phytoremediation: an environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation in developing countries, **Educational Research and Reviews**, 2, 151–156, (2007).
- [60]. Wuana, R.A. ve Okieimen, F.E., Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation, **ISRN Ecology**, 2011, 1–20 (2011).

- [61]. Wu, G., Kang, H., Zhang, X., Shao, H., Chu, L. ve Ruan, C., A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities, **Journal of Hazardous Materials**, 174, 1–8, (2010).
- [62]. Padmavathiamma, P.K. ve Li, L.Y., Phytoremediation technology: hyperaccumulation metals in plants. **Water, Air and Soil Pollution**, 184, 105–126, (2007).
- [63]. Vishnoi, S.R. ve Srivastava, P.N., Phytoremediation-green for environmental clean. In: The 12th World Lake Conference, pp. 1016–1021, (2008).
- [64]. Mukhopadhyay, S. ve Maiti, S.K., Phytoremediation of metal enriched mine waste: a review, **Global Journal of Environmental Research**, 4, 135–150, (2010).
- [65]. Yadav, R., Arora, P., Kumar, S. ve Chaudhury, A., Perspectives for genetic engineering of poplars for enhanced phytoremediation abilities, **Ecotoxicology**, 19, 1574–1588, (2010).
- [66]. Zorrig, W., Rabhi, M., Ferchichi, S., Smaoui, A. ve Abdelly, C., Phytodesalination: a solution for salt-affected soils in arid and semi-arid regions, **Journal of Arid Land Studies**, 22, 299–302, (2012).
- [67]. Manousaki, E. ve Kalogerakis, N., 2011, Halophytes present new opportunities in phytoremediation of heavy metals and saline soils, **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 50, 656–660, (2011).
- [68]. Ravindran, K.C., Venkatesan, K., Balakrishnan, V., Chellappan, K.P. ve Balasubramanian, T., Restoration of saline land by halophytes for Indian soils. **Soil Biology and Biochemistry**, 39, 2661–2664, (2007).
- [69]. Rabhi, M., Ferchichi, S., Jouini, J., Hamrouni, M.H., Koyro, H.-W., Ranieri, A., Abdelly, C. ve Smaoui, A., Phytodesalination of a salt-affected soil with the halophyte *Sesuvium portulacastrum* L. to arrange in advance the requirements for the successful growth of a glycophytic crop, **Bioresouce Technology**, 101, 6822–6828, (2010).
- [70]. Milic, D., Lukovic, J., Ninkov, J., Zeremski-Skoric, T., Zoric, L., Vasin, J. ve Milic, S., Heavy metal content in halophytic plants from inland and maritime saline areas, **Central European Journal of Biology**, 7, 307–317, (2012).
- [71]. Shabani, N. ve Sayadi, M.H., Evaluation of heavy metals accumulation by two emergent macrophytes from the polluted soil: an experimental study. **Environmentalist**, 32, 91–98, (2012).
- [72]. Li, J.T., Liao, B., Lan, C.Y., Ye, Z.H., Baker, A.J.M. ve Shu, W.S., Cadmium tolerance and accumulation in cultivars of a high-biomass tropical tree (*Averrhoa carambola*) and its potential for phytoextraction, **Journal of Environmental Quality**, 39, 1262–1268, (2010).
- [73]. Tlustoš, P., Száková, J., Hruby, J., Hartman, I., Najmanová, J., Nedelník, J., Pavlíková, D. ve Batysta, M., Removal of As, Cd, Pb, and Zn from contaminated soil by high biomass producing plants, **Plant Soil and Environment**, 52, 413–423, (2006).
- [74]. Vamerli, T., Bandiera, M. ve Mosca, G., Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review, **Environmental Chemical Letters**, 8, 1–17, (2010).
- [75]. Meers, E., Slycken, S.V., Adriaensen, K., Ruttens, A., Vangronsveld, J., Laing, G.D., Witters, N., Thewys, T. ve Tack, F.M.G., The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for ‘phytoremediation’ of heavy metals on moderately contaminated soils: a field experiment, **Chemosphere**, 78, 35–41, (2010).

- [76]. Siddiqui, M.H., Kumar, A., Kesari, K.K. ve Arif, J.M., Biomining—a useful approach toward metal extraction, **American-Eurasian Journal of Agronomy**, 2, 84–88, (2009).



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Research Article

Journal of Agricultural Biotechnology (JOINABT) 2(2), 56-65, 2021

Received: 25-Nov-2021 Accepted: 25-Dec-2021



SAKARYA UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

The Effects of Different Drying and Packaging Applications on the Microbiological Properties of Sliced Figs

Tuba BÜYÜKSİRİT BEDİR^{1*}, Ayşe Özge YAVUZ², Harun BÜYÜK², Hakan KULEAŞAN²

¹Hitit Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Çorum.

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Isparta.

ABSTRACT

In this research, two different drying and packaging methods were applied to the Sarılop cultivar figs obtained from Aydın province. Some quality criteria of dried figs were followed during storage. Figs were dried traditionally under the sun and by lyophilization, and dried product was packed conventionally and under nitrogen gas and stored in room conditions (25°C) for 6 months. Chemical (total titratable acidity, total sugar, ash, dry matter), physical (color) and microbial (total mesophilic aerobic bacteria, mold and yeast, coliform group bacteria) analyses were done on fresh and dried figs. Total bacteria and total coliform bacteria counts were higher in freeze-dried figs (6.57 log cfu g⁻¹; 4.32 log cfu g⁻¹) than the ones dried under the sun (5.13 log cfu g⁻¹; 3.76 log cfu g⁻¹). In contrast, yeast and mold counts were higher in sun-dried figs (5.69 log cfu g⁻¹). It was determined that microbial load decreased with storage under room conditions for 6 months, and these values were lower in dried figs packed with nitrogen. It also was determined that the color values were better preserved in lyophilized samples packed with nitrogen.

Keywords: Sarılop, dried figs, freeze-drying, sun-drying.

Farklı Kurutma ve Ambalaj Uygulamalarının Dilimlenmiş İncirlerin Mikrobiyolojik Özelliklerine Etkileri

ÖZ

Bu araştırmada, Aydın ilinden temin edilen Sarılop çeşidi incirlere iki farklı kurutma ve paketlenme yöntemi uygulanmıştır. Depolama boyunca kurutulmuş incirlerin bazı kalite kriterleri takip edilmiştir. İncirler geleneksel olarak güneşte ve dondurarak kurutma yöntemleriyle kurutulmuş, son ürün direkt ve azot gazı altında paketlenerek 6 ay boyunca oda koşullarında (25°C) saklanmıştır. Taze ve kurutulmuş incir örneklerinde kimyasal (toplam titrasyon asitliği, toplam şeker, kül, kuru madde), fiziksel (renk) ve mikrobiyolojik (toplam mezofilik aerobik bakteri, küf ve maya, koliform grup bakteri) analizleri yapılmıştır. Toplam bakteri ve koliform bakteri sayılarının dondurarak kurutulmuş incirlerde (6.57 log kob g⁻¹; 4.32 log kob g⁻¹) güneşte kurutululardan (5.13 log kob g⁻¹; 3.76 log kob g⁻¹) daha yüksek olduğu

¹ Tuba BÜYÜKSİRİT BEDİR, tubabuyuksirit@hitit.edu.tr

belirlenmiştir. Bunun aksine, maya ve küf sayısı güneşte kurutulan incirlerde ($5.69 \log \text{ kob g}^{-1}$) daha yüksek bulunmuştur. 6 aylık oda koşullarında depolama ile mikrobiyal yükün azaldığı, azotla paketlenmiş kuru incirlerde bu değerlerin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Renk değerlerinin dondurarak kurutulmuş ve azot altında paketlenen örneklerde daha iyi korunduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sarılop, kuru incir, dondurarak kurutma, güneşte kurutma

1 Introduction

Fig (*Ficus carica* L.) plant belongs to the Moraceae family, which has more than 1400 species. Approximately 700 of these species are in the *Ficus* genus [1]. *F. carica* L. is an important commercial fruiting member of the genus *Ficus* [2]. Figs are commercially produced in countries where the Mediterranean climate prevails, such as California, Australia and South America, and in Mediterranean countries [3]. According to 2019 data, 1315588 tons of figs were produced in the world, and Turkey became the largest producer in the world with 310000 tons [4].

Figs are grown in almost all regions of our country, except for the Eastern Anatolia region. The coastal belt is the region where it is grown the most, thanks to its ecological harmony. Therefore, table figs are also grown in Marmara, Mediterranean, Black Sea and Southeastern Anatolia Regions [5]. The fig tree is grown in warm and dry climates [6]. 65% of the fig trees are located in the Western Aegean Region, especially in the Küçük and Büyük Menderes basins. From these basins, 75% of the fresh fig production and the total product in the dried fig export are supplied. Since the climate conditions in the region are suitable for fig cultivation, the highest quality figs are grown in these basins [7].

Dried figs are among the top traditional export products of Turkey [8]. Turkey provides approximately 60% of the world dried fig production and Aydın province provides 85% of them [5]. Generally, Sarılop cultivar is used as dried figs and is widely grown in Aydın and İzmir regions [9].

Quality dried figs according to TSE 541 [10] standard; It must be mature, sound, completely dried, clean and free of foreign matter. There should be no visible live or dead insects, rodents and other parasites, foreign matter exceeding tolerance, spoiled, sunburned, slit. It should not contain abnormal external humidity, foreign taste and odor.

Figs are consumed fresh, dried or canned, and are also used in jam making. It is a nutritious fruit with high protein content, rich in calcium (higher than milk), iron and fiber content. Its chemical composition and aroma vary according to the variety. The total sugar content of fresh figs is 16%, and dried figs are around 52%. Fresh figs (100 g) contains moisture (88.1%), protein (1.3 g), oil (0.2%), minerals (0.6%), fiber (2.2%), carbohydrates (7.6%), phosphorus (22 mg), iron (0.6 mg), vitamin A (80 IU), thiamine (0.1 mg) and calcium (35 mg). The edible part (100 g) of dried figs includes moisture (23.0 g), protein (4.3 g), oil (1.3%), minerals (2.4%), fiber (5.6%), carbohydrates (69%), phosphorus (77 mg), iron (4 mg), vitamin A (100 IU), thiamine (0.1 mg) and calcium (200 mg) [11].

The purpose of drying agricultural products is to remove the free water in the wet products and to prevent the deterioration of the food by stopping the biochemical reactions and microbial activities that may occur in the products. In addition, the decrease in the volume and weight of dried products also reduces transportation and storage costs [12]. In freeze-drying, the product to be dried is first frozen and thus the water in the food is bound in the form of ice, and then the ice is sublimated (transformation of ice into steam without melting) under appropriate conditions. The quality of the freeze-dried product is superior

to the products dried by other methods. Therefore, although it is an expensive method compared to others, it is used commercially for drying many valuable and heat sensitive products. On the other hand, the nutritional value of freeze-dried products is also higher. The reason for this is that the substances inside the cell do not disperse out of the cell and on the surface of the material as in other methods [13]. Shape, appearance, taste, nutrient content, color, texture and biological activity properties of freeze-dried samples are very close to the properties of the fresh product. For this reason, it is seen as one of the methods that affect the structure and properties of food the least. Moreover, this method reduces the risk of deterioration of the antioxidant components of the food [14].

In this study, sun and freeze drying methods were applied to Sarılop cultivar figs. Dried figs, which were packaged using two different packaging techniques, were stored under room conditions for 6 months. Physicochemical (ash determination, dry matter determination, acidity determination, moisture, color determination) and microbiological (total mesophilic aerobic bacteria, total mold and yeast, coliform bacteria) analyzes were performed in dried figs and the changes were monitored during storage.

2 Material and Methods

In these research, Sarılop (*F. carica* L.) cultivar of figs were used as material. Figs were obtained from the fig orchard located in Güzönü area, parcel no 260-41 in Nazilli district of Aydın province. All of the fruits used for the production of dried figs were collected from the same garden.

2.1 Drying Methods

Figs belonging to the Sarılop cultivar were dried using two different techniques, namely sun drying and freeze drying. After the figs were picked from the trees in the morning hours, they were transported in wooden crates. In order to remove the dust layer on the figs and to reduce the microbial load, they were washed by dipping them into a container filled with water. It was sliced into 4 mm thick round rings to ensure a homogeneous drying. In the sun drying method, it was kept on sofas made of wood or plastic, known as kerevet, for 4-7 days. In the lyophilized drying method, sliced fig samples, on which blotting paper was laid, were prepared for drying conditions by freezing them in a deep freezer at -20°C for 1 day. Then, the frozen figs were dried in a lyophilizer equipment (VirTis Freeze Dryer 2KBTES-55 Model, USA) for 24 hours. The freeze-drying (lyophilized) process was carried out at -60°C under 100 mTorr vacuum. Fresh figs prepared for drying, sun dried and lyophilized figs are shown in Figure 1. Dried figs are placed in sterile bags and packaged in two different ways, directly and under nitrogen gas. Stored at room temperature (25°C) in a dark condition.



Figure 1: a) fresh figs; b) sun-dried figs; c) lyophilized figs

2.2 Chemical Analyzes

Chemical analysis were performed initially to fig samples. The fresh and dries figs moisture content was determined by method TS 1129 ISO 1026. The amount of ash was calculated as % of the weight loss caused by burning at 500-550 °C [15]. Titration acidity was determined with 0.1 N NaOH by titrimetric method, calculating in terms of citric acid [16]. Total sugar analysis was done by Luff-Schoorl method according to Cemeroglu [15].

2.3 Color Analyzes

Color parameters on the Hunter scale were expressed L, a, b. Negative L indicates darkness, and positive L indicates lightness, whereas negative a indicates green color, positive a indicates red color, positive b indicates yellow color, and negative b indicates blue color. Depending on these values, color clarity (Chroma) and hue values were calculated using the 1 and 2 equations. Hue value varies between 0°–360°; 0° and 360° are evaluated as red-violet, 90° yellow, 180° green and 270° blue.

$$\text{Chroma} = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{Hue} = \text{Arctan} (b/a) \quad (2)$$

2.4 Microbiological Analyzes

Total mesophilic aerobic bacteria, total coliform, yeast-mold counts were determined in fresh figs, and figs packed with different drying and packaging methods. Under aseptic conditions, sequential dilutions were prepared by homogenizing 5 g of sample in 45 ml of physiological saline. Eosin Methyl Blue agar (EMB) for total coliform bacteria analysis, Patato Dextrose Agar (PDA) for mold and yeast count, and Plate Count Agar (PCA) for total mesophilic aerobic bacteria count were inoculated from appropriate dilutions. PCA plates were incubated at 30°C for 24-48 hours, PDA plates at 25°C for 72 hours, and EMB plates at 37°C for 24-48 hours.

2.5 Statistical Analysis

Physicochemical and microbiological analysis results during storage were compared statistically. Each trial was conducted in two parallels. Evaluation of the results was made using Minitab Statistics Package Program [17]. Data are calculated as mean and standard error. One-way analysis of variance was applied to the data to determine the differences between the samples, and the Tukey Multiple Comparison Test was used for the significant differences. Significance levels ($P < 0.05$) for statistical differences are shown with letters [18].

3 Results and Discussion

3.1 Determination of Chemical Properties of Fresh and Dried Figs

Drying methods can be evaporated free water from food by drying or dehydration. With this application, it is aimed to slow down or stop the growth of microorganisms or chemical reactions [19]. At the same time, the use of quality raw materials reduces the physical and chemical deterioration that may occur in the final product. For this purpose, analyzes were made to determine the physicochemical properties of fresh and dried fig samples using two different methods, and the results are given in Table 1. The amount of dry matter, which was 28.46% in fresh figs, increased to 82.17% in sun-dried figs and 92.72% in freeze-dried figs. When the dry matter content obtained from dried figs were compared, it was determined that more water was removed in the freeze-drying method. In both drying methods, the moisture content of the dried figs remained below the maximum 26% moisture value specified in the

TSE 541 dried fig standard [10]. This difference is due to the fact that freeze-drying is carried out under controlled conditions and vacuum, and moisture absorption from the outside is prevented. In a similar study, it was reported that the dry matter content of Sarılop figs, which was 27.4% in fresh fruit, increased to 82.70% when dried [20]. In another study, the dry matter content, which was 25.55% at the beginning, increased to 86.43% with drying [21].

Table 1: Analytical properties of fresh and dried figs

Analysis	TI	GK	LK
Total solid (%)	28.46 ± 0.86 ^c	82.17 ± 0.84 ^b	92.72 ± 0.10 ^a
Ash (%)	1.00±0.07 ^c	2.84±0.02 ^b	3.81±0.25 ^a
Total titratable acidity (%)	0.23±0.44 ^c	1.20±0.05 ^b	1.26±0.10 ^a
Total Sugar (g kg ⁻¹ DW)	505.10±3.15 ^c	642.97±4.52 ^b	776.18±0.95 ^a

* TI: Fresh figs, GK: Sun-dried figs, LK: Lyophilized-dried figs

**a,b,c Different letters on same row indicate statistically significant difference (P <0.05)

Ash is the inorganic residue left after the combustion of organic materials and increase with drying of fruits. The ash amount of all samples is expressed on a dry weight (DW) basis in Table 1, which was 1.00% on DW in fresh figs, increased to 2.84% on DW with sun drying and 3.81% on DW with freeze drying. The ash content was higher in freeze-dried figs. This is due to the lower moisture content and therefore less water amount in the sample weight.

The total acidity value generally gives information about the ripening status of the figs. Total titratable acidity of fresh fig fruit was determined as 0.23±0.44% in terms of citric acid. In a study conducted with 9 black and 2 yellow fruited fresh figs, it was reported that the total total titratable acidity was between 0.14% and 0.29% [22]. A high total titratable acidity value is not a desirable parameter, as sourness and quality deterioration will occur in fruits [23]. Total acidity in dried figs was found to be 1.20% and 1.26%. In a study conducted with sun-dried fig varieties, it was reported that the total acidity in the samples varied between 0.75-1.67% and it was 1.01% in the Sarılop cultivar [22].

In fresh figs, the total sugar content was determined as 505.10 g kg⁻¹ DW. Similarly, in a study conducted with Sarılop figs, it was stated that the total sugar amount was 230.01 g kg⁻¹ DW [24]. As the water content of the dried figs with two different methods decreases, the volume decreases and the amount of sugar per unit increases. The amount of sugar in sun-dried figs was 642.97 g kg⁻¹ DW, and 776.18 g kg⁻¹ DW by freeze drying. This difference is due to the removal of more water in the freeze-drying method. It has been reported that the amount of sugar in sarılop figs dried with traditional methods is 291.35 g kg⁻¹ DW [24]. In another study, the total sugar content in fresh, sun-dried and oven-dried figs was determined as 56.36, 229.73, 418.85 g kg⁻¹, respectively [25].

3.2 Color Analysis

Color L (brightness), a (+red, - green) and b (+yellow, - blue) values of sliced fig samples (fresh, directly packaged sun dried, directly packaged lyophilized dried, sun dried packaged under nitrogen, lyophilized dried packaged under nitrogen) were measured before storage (0. month), after 3 and 6 months of storage. After the measurement of these values, the chroma value and Hue angle are calculated and the results are given in Table 2. While the results were similar to the L and a values obtained in fresh figs in the freeze drying method, a decrease was observed in the L and a values with sun drying. It was observed that the b value decreased in both drying methods compared to fresh figs. The difference

between these values was found to be statistically significant. Similar to our study, the a and b values of dried figs changed depending on the storage temperature and duration, and these values decreased significantly, especially at the end of the 9-month storage period [26]. Kelebek et al. [24] in their study, when the yellow fig variety was examined, they found that drying in the sun caused a decrease in the yellow color and stated that there was a sharp decrease in the brightness value. It has been reported that the L* value is 63.4 in the color measurements made on the shells of fresh Sarılop figs, and it decreases to 59.4 when dried [20]. In another study, it was reported that the initial L value was 34.70 in the color measurement of dried figs from the peel [26]. This difference is thought to be due to the fact that the color measurements are made on the inner surface of the figs by slicing.

Table 2: Color changes in dried figs during storage

	Months	TI	GKD	GKN	LKD	LKN
L value	0	51.41±0.93 ^b	47.22±1.46 ^c		52.39±1.73 ^a	
	3		41.41±0.48 ^d	42.24±0.24 ^c	44.65±0.38 ^b	46.63±0.43 ^a
	6		40.17±1.41 ^c	36.65±1.39 ^d	49.92±0.94 ^b	50.60±1.81 ^a
a value	0	9.00±0.57 ^b	6.28±0.28 ^c		10.72±1.19 ^a	
	3		5.63±0.30 ^d	5.91±0.48 ^c	10.95±0.96 ^a	10.81±0.82 ^b
	6		5.65±0.24 ^c	5.40±0.29 ^d	6.37±0.79 ^b	7.39±0.50 ^a
b value	0	14.85±0.53 ^a	12.67±2.29 ^b		11.78±0.42 ^c	
	3		6.20±0.48 ^d	11.78±0.42 ^a	7.30±0.23 ^c	8.61±0.43 ^b
	6		7.97±0.50 ^c	7.06±0.58 ^d	12.86±0.54 ^a	10.14±1.04 ^b
Chroma	0	17.36 ^a	14.14 ^c		15.93 ^b	
	3		8.38 ^c	13.18 ^b	13.16 ^b	13.82 ^a
	6		9.77 ^c	8.89 ^d	14.35 ^a	12.55 ^b
Hue angle	0	58.78 ^b	63.63 ^a		47.70 ^c	
	3		47.76 ^b	63.36 ^a	33.69 ^d	38.54 ^c
	6		54.67 ^b	52.59 ^d	63.65 ^a	53.92 ^c

* TI: fresh figs, GKD: sun-dried figs directly packed, GKN: sun-dried figs packed under nitrogen, LKD: lyophilized-dried figs directly packed, LKN: lyophilized-dried figs packed under nitrogen

**a,b,c,d Different letters on same row indicate statistically significant difference (P <0.05)

After 3 and 6 months storage at room conditions, there was a decrease in brightness, which is the L value, but it was determined that dried figs packaged under nitrogen were better preserved. Likewise, it was determined that packaging under nitrogen was more effective in maintaining the a and b values. However, at the end of the 6th month, it was observed that the b value increased in freeze-dried fig samples. This increase is explained by the fact that the packaging material causes gas passage over time. It is reported that from the first months of storage, depending on the film permeability, the gas composition in the package comes into balance with the atmospheric gas composition to a great extent [27]. While the C value was 17.36 in fresh figs, it was determined that it was better preserved in freeze-dried figs, although it decreased gradually in sun-dried figs with storage. The difference between color values during storage was significant (P <0.05).

3.3 Changes in Microbiological Properties During Storage

After the figs were dried in the sun or by freeze drying methods, they were packaged directly or under nitrogen gas and stored at room conditions for 6 months. Microbiological changes in dried figs during

storage were followed and evaluated with statistical analyzes (Table 3). Although all dried fig samples comply with legal criteria in terms of moisture content according to TSE 541[10], dry matter amounts were not the same in the samples produced with two drying methods. The number of microorganisms are calculated for per gram of each product and presented as the log of microbial counts. The total number of mesophilic aerobic bacteria at the beginning of storage in sun-dried figs was 5.13 ± 0.07 log cfu g⁻¹, and 6.57 ± 0.20 log cfu g⁻¹ in lyophilized figs. Villalobo et al. [28] found that the total number of mesophilic bacteria in sun-dried figs was 5.2 log cfu g⁻¹. It was observed that the number of mesophilic aerobic bacteria in dried figs decreased during 6 months of storage. This is due to the decrease in water content with drying, thus limiting the growth of microorganisms. In a study conducted with dried figs that were not treated with any chemicals, it was determined that the microbial load decreased with storage [29]. The decrease in microbial load in the samples packed under nitrogen gas during storage was faster than in the directly packed samples. Because nitrogen is an inert gas used as a packaging filler due to its low solubility in water and lipid. It also prolongs the shelf life of foods by preventing rancidity and inhibiting the growth of aerobic organisms [30].

Table 3. Microbiological changes (log cfu g⁻¹) in dried figs during storage

	Months	GKD	GKN	LKD	LKN
TMAB	0	5.13 ± 0.07^b		6.57 ± 0.20^a	
	1	4.36 ± 0.18^c	4.69 ± 0.16^a	4.44 ± 0.06^b	4.00 ± 0.08^d
	2	4.20 ± 0.10^b	4.41 ± 0.03^a	3.91 ± 0.07^c	3.67 ± 0.33^d
	4	3.26 ± 0.14^a	3.16 ± 0.16^c	3.20 ± 0.10^b	3.06 ± 0.14^d
	6	3.02 ± 0.03^b	2.36 ± 0.06^d	3.10 ± 0.10^a	2.92 ± 0.16^c
Yeast and mold	0	5.69 ± 0.18^a		5.57 ± 0.34^b	
	1	4.01 ± 0.14^c	3.68 ± 0.12^d	5.36 ± 0.04^a	5.10 ± 0.10^b
	2	3.32 ± 0.02^d	3.42 ± 0.03^c	4.04 ± 0.02^b	4.10 ± 0.10^a
	4	3.22 ± 0.14^c	2.87 ± 0.13^d	3.69 ± 0.23^b	3.78 ± 0.04^a
	6	2.74 ± 0.13^a	2.20 ± 0.10^d	2.48 ± 0.00^b	2.39 ± 0.06^c
Total coliform	0	3.76 ± 0.06^b		4.32 ± 0.02^a	
	1	3.61 ± 0.01^a	3.62 ± 0.16^a	3.52 ± 0.11^b	3.47 ± 0.09^c
	2	3.20 ± 0.10^c	3.29 ± 0.02^a	2.64 ± 0.11^d	3.26 ± 0.15^b
	4	2.09 ± 0.05^c	2.06 ± 0.06^d	2.52 ± 0.04^b	2.56 ± 0.06^a
	6	1.92 ± 0.05^c	1.67 ± 0.03^d	2.20 ± 0.20^a	2.10 ± 0.10^b

* GKD: Sun-dried figs directly packed, GKN: Sun-dried figs packed under nitrogen, LKD: Lyophilized-dried figs directly packed, LKN: Lyophilized-dried figs packed under nitrogen

** TMAB: Total mesophilic aerobic bacteria

***a,b,c,d Different letters on same row indicate statistically significant difference (P < 0.05)

In this study, the total number of yeast and molds in sun-dried figs was determined as 5.69 ± 0.18 log cfu g⁻¹, and 5.57 ± 0.34 log cfu g⁻¹ in freeze-dried figs. Villalobos et al. [28] found the total number of mold and yeast in sun-dried figs to be 4.6 log cfu g⁻¹; Akbal and Vural [31] determined it as 3.00 log cfu g⁻¹. The fact that our values are higher indicates that there is contamination from the raw material or in the next stages. Yeast and mold can be transmitted to dried fruits during planting, growth, ripening, processing, drying, storage and transportation [31]. During 6 months of storage, the number of yeast and mold decreases, and a more effective preservation is provided in figs packed under nitrogen gas. The yeast amount values of dried figs, which were determined as 2.97 log cfu g⁻¹ at the beginning of storage, changed between 2.67-2.99 log cfu g⁻¹ at the end of the storage period [26].

The number of coliform bacteria was found 3.76 ± 0.06 log cfu g⁻¹ in sun-dried figs and 4.32 ± 0.02 log cfu g⁻¹ in freeze-dried figs. Villalobos et al. [28] in their study evaluating different drying systems, found that the total number of coliforms in sun-dried figs was 2.3 and 2.5 log cfu g⁻¹. It was observed that the total number of coliforms in dried figs decreased during storage.

4 Conclusions

In this study, figs, which are an important commercial product and mostly traditionally sun-dried whole, were sliced and dried. Thus, it is aimed to produce dried figs, which dry in a shorter time, have a more crispy and different structure. With the controlled freeze-drying method, moisture absorption from the outside is prevented, thus limiting the activities of microorganisms. Today, figs dried whole with the traditional method need to be stored at lower temperatures than room temperatures. The increase in storage and marketing temperature in figs preserved by this method rapidly reduces the shelf life of the product. In this study, microbiological changes were observed during both drying methods and storage under room conditions for 6 months by packing directly or under nitrogen gas. According to the results obtained, it has been determined that the figs packed with sealed packages can be stored at room temperature by preventing moisture absorption from the outside. In this way, it is foreseen that the energy costs spent for keeping the warehouses cool can be reduced. In addition, by freeze drying method, dried figs were obtained closer to fresh figs in color and form of the product compared to the traditional method. This supported that the sensory properties of freeze-dried figs are closer to fresh figs.

5 Declarations

5.1 Study Limitations

None.

5.2 Funding source

None.

5.3 Competing Interests

There is no conflict of interest in this study.

5.4 Authors' Contributions

Ayşe Özge YAVUZ and **Harun BÜYÜK** provided laboratory studies, follow-up of analyzes and evaluation of results. **Tuba BÜYÜKSİRİT BEDİR** and **Hakan KULEAŞAN** provided the planning, execution and writing of the research. The authors have read and approved the final version of the article.

References

- [1] O. Çalışkan, "Türkiye'de sofralık incir yetiştiriciliğinin mevcut durumu ve geleceği," *Bursa Uludağ Üni. Ziraat Fak. Derg.*, vol. 26, no. 2, pp. 71-87, 2012.
- [2] S. Mawa, K. Husain, I. Janta, "*Ficus carica* L. (Moraceae): phytochemistry, traditional uses and biological activities," *Evid.-Based Complementary Altern. Med.*, vol. 974256, no. 8, 2013.
- [3] V.V. Patil, V.R. Patil, "*Ficus carica* Linn.-An overview," *J Med. Plant Res.*, vol. 5, pp. 246-253, 2011.
- [4] FAO, "FAOSTAT", 2012. Retrieved from: <http://faostat.fao.org>
- [5] İ.V. Kösoğlu, "Sarılöp incir (*Ficus carica* L.) çeşidinin kurutulmuş meyvelerinde fumonisin varlığının araştırılması," *EÜ Fen Bil. Enstitüsü*, İzmir, 2008

- [6] K. Hatano, K. Kubota, M. Tanokura, "Investigation of chemical structure of nonprotein proteinase inhibitors from dried figs," *Food Chem.*, vol. 107, no. 1, pp. 305-311, 2008.
- [7] E. Nakilcioglu, Y. Hışıl, "Research on the phenolic compounds in sarılop (*Ficus carica* L.) fig variety," *GIDA*, vol. 38, no. 5, pp. 267-274, 2013.
- [8] F. Çobanoğlu, G. Armağan, H. Kocataş, B. Şahin, B. Ertan, M. Özen, "Aydın ilinde incir üretiminin önemi ve kuru incir üretim faaliyetinin ekonomik analizi," *ADÜ Ziraat Fak. Derg.*, vol. 2 no. 2, pp. 35-42, 2005.
- [9] A. Göçmez, H.G. Seferoğlu, "Sofralık ve kurutulmuş incir kalite kriterleri ve kaliteyi etkileyen faktörler," *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Derg.*, vol. 2014, no. 1, pp. 98-108, 2014.
- [10] Anonymous, "TSE 541 ICS 67.080.10," Kuru İncir, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü Yayını, 2006.
- [11] A. Singh, J. Prakash, P.R. Meghwal, S.A. Ranpise, "Fig (*Ficus carica* L.)," Ghosh S.N. (Ed), In: *Breeding of Underutilized Fruit Crops*. (pp. 149-179). New Delhi: Jaya Publishing House, 2015.
- [12] S. Tarhan, G. Ergüneş, O. Tekelioğlu, "Tarımsal ürünler için güneş enerjili kurutucuların tasarım ve işletme esasları," *Tesisat Müh. Derg.*, vol. 99, pp. 26-32, 2007.
- [13] B. Cemerioğlu, F. Karadeniz, M. Özkan, "*Meyve ve sebze işleme teknolojisi*," Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları, Ankara, Türkiye, 690 s. ISBN: 975935750X, 2003.
- [14] N. M. Shofian, A. Abdul Hamid, A. Osman, N. Saari, F. Anwar, M. S. Pak Dek, M. R. Hairuddin, "Effect of freeze-drying on the antioxidant compounds and antioxidant activity of selected tropical fruits," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 12, pp. 4678-4692, 2011.
- [15] B. Cemerioğlu, "*Gıda analizleri*," Ankara: Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları, 2007.
- [16] Anonymous, "TSE 1125", Meyve ve Sebze Ürünleri Titre Edilebilir Asitlik Tayini Standardı. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü Yayını, 2002.
- [17] Anonymous, "Minitab reference manual release 8. pc. Version," Minitab Inc., State College, P.A. Mmbaga, M.T., J.R., 1991.
- [18] O. Düzgüneş, T. Kesici, O. Kavuncu, F. Gürbüz, "Araştırma ve deneme metotları". *Ankara Üniv. Ziraat Fak. Yayınları*, Ankara, 1987.
- [19] S. Karaaslan, "Meyve ve sebzelerin mikrodalga destekli kurutma sistemleri ile kurutulması," *SDÜ Ziraat Fak. Derg.*, vol. 7, no. 2, pp. 123-129, 2012.
- [20] S. Kamiloğlu, "Effect of sun-drying on polyphenols and in vitro bioavailability of sarılop and bursa siyahi figs (*Ficus carica* L.)," *ITU Graduate School of Science Engineering and Technology*, İzmir, 2012
- [21] A. Piga, I. Pinna, K.B. Özer, M. Agabbio, U. Aksoy, "Hot air dehydration of figs (*Ficus carica* L.): drying kinetics and quality loss," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 39, pp. 793-799, 2004.
- [22] R. Konak, İ. Kösoğlu, N. Tan, H. Kocataş, A. Yemenicioğlu, "Siyah meyveli incir çeşitlerinin kurutularak değerlendirilmesi," *PÜ Müh. Bilimleri Derg.*, vol. 21, no. 9, pp. 394-397, 2015.
- [23] Z.E. Yaşartürk, "Sarılöp incir çeşidinde bazı uygulamaların meyve kalitesi üzerine etkileri," *AMÜ Fen Bil. Enst.*, Aydın, 2016.
- [24] H. Kelebek, S. Dıblan, P. Kadiroğlu, O. Kola, S. Selli, "Kurutma işlemlerinin incirlerin (*Ficus carica* L.) fenolik bileşikler," *Çukurova Tarım Gıda Bil. Derg.*, vol. 33, no. 2, pp. 127-136, 2018.
- [25] A. Slatnar, U. Klancar, F. Stampar, R. Veberic, "Effect of drying of figs (*Ficus carica* L.) on the contents of sugars, organic acids, and phenolic compounds," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 59, no. 21, pp. 11696-11702, 2011.

- [26] İ. Özer, "Modifiye atmosfer paketleme koşullarında depolamanın kuru incirin kalite özellikleri üzerine etkisi," *AMÜ Fen Bil. Enst.*, Aydın, 2021
- [27] G. Miranda, A. Berna, A. Mulet, "Dried-fruit storage: an analysis of package headspace atmosphere changes," *Foods*, vol. 8, no. 56, pp. 1-11, 2019.
- [28] M. Villalobo, M. Serradilla, A. Martín, C. Pereira, M. Lopez-Corrales, M. Cordoba, "Evaluation of different drying systems as an alternative to sundrying forfigs (*Ficus carica* L)," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 36, pp. 155-165, 2016.
- [29] D. Demirbükler, "Control of microbial and enzymatic changes in intermediate moisture sun-dried figs by mild heating and hydrogen peroxide disinfection," İzmir Institute of Technology, İzmir, 2003.
- [30] A. Conte, L. Angiolillo, M. Mastromatteo, M. A. Del Nobile, "Technological options of packaging to control food quality," In Muzzalupo, I. (Ed.), *Food Industry* (pp. 354–379). Rijeka, Croatia: InTech, 2013.
- [31] N. Akbal, A. Vural, "Kurutulmuş meyve örneklerinde mikrobiyolojik kalite özelliklerinin araştırılması," *Dicle Üni. Vet. Fak. Derg.*, vol. 11, no. 2, pp. 93-97, 2018.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Farklı Tuz Konsantrasyonlarının Bazı Serin İklim Çim Alan Buğdaygillerinin Çimlenmesi ve Sürgün Gelişimi Üzerine Etkileri

¹Mustafa YILMAZ , ²Ali DOĞRU , ³Melike Halime KILDIŞ 

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sakarya

²Sakarya Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Sakarya

³Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Ana Bilim Dalı, Sakarya

ÖZ

Bu çalışma, serin iklim çim alan buğdaygillerinden; *Lolium*, *Poa*, *Agrostis* ve *Festuca* cinslerine ait 10 farklı çeşidin çimlenme döneminde tuz stresine dayanıklılığının belirlenmesi amacıyla Eylül 2020 tarihinde Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yüksekokulu laboratuvarlarında yürütülmüştür. Tuz stresini oluşturmak için farklı tuz konsantrasyonları (0, 50, 100, 150, 200 mMol) kullanılmıştır. Araştırmada; çimlenme oranı, sapçık uzunluğu, kökçük uzunluğu, vigor indeksi, sapçık/kökçük oranı, sapçık yaş ağırlığı, kökçük yaş ağırlığı, sapçık kuru ağırlığı, kökçük kuru ağırlığı ve tuza tolerans indeksi özellikleri incelenmiştir. Araştırmada tuz konsantrasyonlarının artmasıyla çimlenme oranlarının tüm çeşitlerde azaldığı görülmüştür. İncelenen türler arasında *Festuca arundinacea* Starlett ve *Festuca arundinacea* Titan RX Rizomlu çeşitlerinin diğer çeşitlere göre tuzluluğa daha toleranslı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tuzluluk stresi, NaCl, Çimlenme, Sürgün gelişimi, Serin iklim çim bitkileri.

Effects Of Different Salt Concentrations on the Germination and Shoot Development in Some Cool Climate Turfgrass

ABSTRACT

This study was carried out in order to determine the resistance of 10 varieties belonging to the species *Lolium*, *Poa*, *Agrostis* and *Festuca*, which have a cool climate turfgrass to salinity stress during germination, in the laboratories of Sakarya University of Applied Sciences Pamukova Vocational School in September 2020. Salt (NaCl) concentrations (0, 50, 100, 150, 200 mMol) were used to create different levels of salinity stress. In this study; germination rate, stem length, root length, vigor index, stem/root ratio, stem wet weight, root wet weight, stem dry weight, root dry weight and salinity tolerance index were investigated. According to the findings obtained in the study, it was observed that as the salt concentrations increased. *Festuca arundinacea* Starlett and *Festuca arundinacea* Titan RX Rhizome varieties were found to be more salinity tolerant than other varieties in terms of the characteristics examined.

Keywords: Salinity stress, NaCl, Germination, Shoot development, Cool climate turfgrass.

1. Giriş

Tuzluluk; özellikle kurak ve yarı kurak iklim bölgelerinde yıkanarak yeraltı suyuna karışan çözünebilir tuzların yüksek taban suyuyla birlikte kapillarite yoluyla toprak yüzeyine çıkması ve buharlaşma sonucu suyun topraktan ayrılarak tuzun toprak yüzeyinde ve yüzeye yakın bölümünde çok fazla mineral iyon birikmesi olayıdır [1, 2, 3, 4, 5].

Dünyadaki 135 milyon km²'lik toplam kara alanının 4 milyon km²'si tuzluluk sorunu yaşamakta [6], yine dünyadaki sulu tarım alanlarının yaklaşık 1/3'lük kısmında (950 milyon ha) da sulama sistemlerinin yetersiz olmasına bağlı olarak yanlış sulama uygulamalarının tuzluluk tehlikesini arttırdığı düşünülmektedir [7].

* Corresponding Author's email: mustafayilmaz@subu.edu.tr

Sonuç olarak dünyada her yıl 10 milyon ha tarım arazisi üretim yapılamayacak şekilde elden çıkmaktadır [8]. Türkiye’de ise toplam 78 milyon ha yaklaşık 1.5 milyon hektarında tuzluluk ve alkalilik sorunu bulunmakta olup, sulamaya uygun arazilerin yaklaşık %32,5’ine denktir [9, 10].

Toprakların tuzlulaşma ve alkalileşmesini; sulama, drenaj toprak özellikleri ve iklim faktörleri gibi etmenler önemli ölçüde etkilemektedir. FAO’nun tahminlerine göre, sulanan alanların yaklaşık yarısı “sessiz düşman” olan tuzluluk, alkalilik ve yüzeyde göllenme tehdidi altındadır. Tuzluluk nedeniyle bitkisel üretimin ya da verimin düşmesinde bitkilerin, tuz düzeyi sürekli artan çevreye uyum gösterememeleri ana etmen olmaktadır. Çözünebilir tuzlar, bitkiler tarafından kolayca alınabilirler. Bitki bünyesine giren tuz bileşikleri çeşidine ve miktarına göre belli bir konsantrasyonu aşınca bitkiye zararlı olmaktadır [11].

Toprakta en çok rastlanan tuz formu olan sodyum klorür (NaCl) strese sebep olduğunda bitkide suyun topraktan alınamamasına, yani fizyolojik kuraklığa neden olmaktadır [9]. Özellikle çimlenme ve fide gelişim dönemlerine daha fazla etki ettiğinden, araştırmacılar çalışmalarında bu dönemleri daha çok dikkate almaktadırlar. Ayrıca tuzlu topraklarda yetiştirilen bitkilerde verim azalışının yanı sıra, Na⁺ ve Cl⁻ iyonlarının neden olduğu toksik etki, bitki iyon dengesindeki bozulmalar, bitkinin farklı bölgelerinde besin taşınamamasındaki problemler, fotosentez ve solunum gibi fizyolojik işlevlerin zarar görmesi de ortaya çıkan olumsuz sonuçlardandır [3, 9, 12]. Bitki büyümesindeki yavaşlamaya bağlı olarak yaprak sayısı ve alanında azalmaların görülmesi, bitki yaş ve kuru ağırlıkları azalırken meyve tat ve kalitesinin bozulması da yine tuz stresinin bitkiler üzerindeki olumsuz etkilerindenendir. Tuzluluk, tohumların çimlenmesinde azalmaya veya çimlenmemeye neden olmaktadır [3, 9, 12].

Bazı buğdaygil tohumlarının çimlenmesi üzerine çalışma yapan Demiroğlu ve ark., [13] uygulanan tuz konsantrasyonları arttıkça verim ve verim özelliklerinde istatistiki olarak önemli düşüşlerin gözlemlendiği tespit etmişlerdir. Yılmaz ve Kısakürek [14] ise çok yıllık çim bitkisinde artan tuz konsantrasyonlarının çeşitlerin çimlenme oranlarını, çimlenme indekslerini, kök uzunluklarını ve sap yaş ağırlıklarını 0 (kontrol) uygulamasına göre önemli ölçüde azalttığını ve aynı zamanda ortalama çimlenme sürelerini ise arttırdığını belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmada elde edilen sonuçlar tümüyle göz önüne alındığı zaman, tuz konsantrasyonunun artmasıyla birlikte ele alınan çimlenme parametrelerinin de etkilendiğini bildirmişlerdir. Tatar ve ark., [15] çok yıllık çim bitkisinde NaCl ön uygulamalarının, çimlenme yüzdesi ve kökçük uzunluğu hariç incelenen tüm özellikleri olumlu yönde etkilediğini belirtmiştir. Kamışsı yumak ile yapılan başka bir araştırma sonucunda tuz yoğunluğundaki artışların; çimlenme oranı, sürgün ve kök uzunluğu, sürgün ve kök yaş ağırlığı ve tuza dayanım indeksinde önemli ölçüde azalmalara neden olduğunu bildirilmektedir [16]. Tuza tolerans düzeylerinin belirlenmesi amacıyla buğdaygil bitkileriyle yapılan çok sayıda araştırma sonuçları [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25] ile farklı bitkilerle yapılan çalışmalar [26, 27, 28, 29, 30] ayrıntılı bilgiler vermektedir.

Tüm bu çalışmaların ışığında ülkemizde tuzluluk problemi olan toprakların ıslah edilmesi ve tuz stresine toleranslı türlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada; bazı buğdaygil tohumlarının çimlenme ve erken fide gelişimi dönemleri incelenip tuz stresine dayanıklı, çimlenme gücü yüksek ve fide gelişimi en ideal olan çeşitlerin belirlenmesi ve ortaya konulan sonuçlarla, tuz stresi koşullarında yapılacak buğdaygil yetiştirme ve üretim faaliyetlerine katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Araştırma, Eylül 2020 tarihinde Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Pamukova Meslek Yüksekokulu laboratuvarında yürütülmüştür.

Bitki materyali olarak; *Lolium perenne* L. “Esquire”, *Poa pratensis* L. “Evora”, *Agrostis stolonifera* L. “Emerald”, *Agrostis tenuis* Sibth. “Denso”, *Festuca arundinacea* Schreb. “Titan RX Rizomlu”, *Festuca arundinacea* Schreb. “Starlett”, *Festuca rubra commutate* Gaudin. “Casanova”, *Festuca rubra rubra* L. “Maxima”, *Festuca rubra trichophylla* L. “Samanta” ve *Festuca ovina* L. “Ridu” çeşitleri kullanılmıştır.

Araştırmada tuzluluk oluşturacak materyal olarak NaCl kullanılmıştır. Tuz oranları; 0 mMol için 0 g/l (EC: 0,061, tuzsuz), 50 mMol için 2,93 g/l (EC: 5,30, hafif tuzlu), 100 mMol için 5,85 g/l (EC: 9,92, orta tuzlu), 150 mMol için 8,78 g/l (EC: 14,53, Tuzlu) ve 200 mMol için 11,70 g/L (EC: 18,81, çok tuzlu) olarak uygulanmıştır [13, 14, 20, 26].

2.2. Yöntem

Çalışma, “Tesadüf Parselleri Deneme Deseni”ne göre 2 faktörlü ve 3 tekerrürlü olarak kurulmuştur. 9 cm çapında petri kaplarına kurutma kâğıdı konularak tohumlar üzerine serpilmiş ve üzerlerine sırasıyla 10 ml NaCl konsantrasyonlarından 50, 100, 150 ve 200 mMol içeren solüsyon uygulanmıştır. Daha sonra $20\pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 15 gün bekletilmiştir. Etüvde bekleme sürecinde herhangi bir besin maddesi eklenmemiş yalnızca kuruyan petrilere ilave solüsyon uygulaması yapılmıştır. Araştırmada aşağıdaki karakterler incelenmiştir;

- ✓ Çimlenme Oranı (%): 15 günün sonunda çimlenen tohumlar sayılıp, (çimlenen tohum/toplam tohum) $\times 100$ formülüyle hesaplanmıştır [20, 26].
- ✓ Sapçık ve Kökçük Uzunluğu (mm): Çimlenmeden sonra tesadüfen seçilen 10 bitkinin uzunlukları milimetrik cetvelle ölçülmüş, 2 mm’yi geçen tohumlar çimlenmiş olarak kabul edilmiştir [20, 26].
- ✓ Vigor İndeksi: Elde edilen verilerden, kökçük uzunluğu + sapçık uzunluğu \times çimlenme oranıyla hesaplanmıştır [20, 23, 31].
- ✓ Sapçık/Kökçük Oranı: Sapçık ve kökçük verilerinin oranlanmasıyla elde edilmiştir.
- ✓ Sapçık ve Kökçük Yaş Ağırlığı (mg): Çimlenmeden sonra tesadüfen seçilen 30 bitkinin yaş ağırlıkları hassas terazide tartılarak bulunmuştur.
- ✓ Sapçık ve Kökçük Kuru Ağırlığı (mg): Örneklerin 70°C ’de 48 saat kurutma dolabında kurutulup tartılması ile belirlenmiştir.
- ✓ Tuza Tolerans İndeksi = $(TKA/KKA) \times 100$: Elde edilen kuru ağırlıklar üzerinden yapılan hesaplamalarla bulunmuştur. (TKA: toplam kuru ağırlık, KKA: kontrol uygulamasındaki kuru ağırlık) [20, 23, 31].

Araştırmadan elde edilen veriler, tesadüf parselleri deneme deseninde 2 faktöriyel düzene göre 3 tekerrürlü olarak varyans analizine tabi tutulmuştur. Varyans analizleri JMP 13.0 istatistik paket programı kullanılarak yapılmış ve ortalamalar arasındaki farklılıklar %5 EÖF (en küçük önemli fark) testiyle hesaplanarak tabloların altlarında verilmiştir.

3. Araştırma Bulguları

3.1. Çimlenme oranı (%)

Araştırma sonunda farklı tuz konsantrasyonlarının uygulanması sonucu 10 çeşit buğdaygil tohumunun ortalama çimlenme oranları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Araştırmada elde edilen ortalama çimlenme oranı değerleri (%)

Çeşitler	Tuz Konsantrasyonları (mMol)					Çeşit Ortalama
	0	50	100	150	200	
<i>L. perenne</i> Esquire	96,30	98,27 b	91,43	88,33	82,53	91,37 b
<i>P. pratensis</i> Evora	90,47	92,43	82,40	32,60	23,40	64,26 g
<i>A. stolonifera</i> Emerald	94,43	97,33 c	92,20	85,30	82,43	90,34 d
<i>A. tenuis</i> Denso	90,43	91,27	72,50	48,43	21,30	64,79 f
<i>F. arundinacea</i> Titan RX	98,53 b	99,87 a	95,20	91,50	87,70	94,56 a
<i>F. arundinacea</i> Starlett	95,43	97,40 c	92,43	86,07	81,37	90,54 c
<i>F. r. commutata</i> Casanova	69,27	71,37	52,40	25,43	8,47	45,39 ı
<i>F. r. rubra</i> Maxima	86,27	91,23	58,33	26,40	15,27	55,50 h
<i>F. r. trichophylla</i> Samanta	67,37	68,37	48,40	28,30	5,33 z	43,55 j
<i>F. ovina</i> Ridu	92,13	96,13	82,50	61,33	35,43	73,51 e
Tuz Ortalaması	88,06 b	90,37 a	76,78 c	57,37 d	44,32 e	----
(E.Ö.F.) %5	Çeşit: 0,162		Tuz: 0,114		Çeşit \times Tuz: 0,361	

Bulgular çeşitler açısından incelendiğinde en yüksek çimlenme oranının %94,56 ile Titan RX’ten, en düşük oranın ise %43,55 ile Samanta çeşidinden elde edildiği görülecektir.

Tuz konsantrasyonları ortalamalarına göre en yüksek değer %90,37 ile 50 mMol konsantrasyonunda, en düşük değer ise %44,32 ile 200 mMol konsantrasyonunda ortaya çıkmıştır.

Veriler çeşit \times tuz konsantrasyonları açısından ele alındığında en yüksek değer %99,87 ile 50 mMol konsantrasyonunda Titan RX çeşidinden alındığını ve konsantrasyonların artmasıyla çimlenme oranı en az etkilenen çeşit olduğu görülmektedir. Bu çeşit 50 mMol tuz konsantrasyonunda oranında en yüksek çimlenme oranına sahipken 200 mMol’de %87,70’lik çimlenme oranı göstermiştir. Tuzluluktan en fazla

etkilenen Samanta çeşidi olup kontrol uygulamasında %67,37'lik çimlenme oranı gösterirken 200 mMol'de ise %5,33 ile en düşük çimlenme oranına sahip olmuştur.

Bu çalışmada elde edilen veriler birlikte değerlendirildiğinde, artan tuz konsantrasyonlarına bağlı olarak çimlenme oranının azaldığını gösteren birçok çalışma [13, 14, 15, 16, 17, 18] sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Çimlenmenin gerçekleştiği ortamda tuz konsantrasyonunun artması, ozmotik strese neden olarak kullanılabilir su oranını azaltıp çimlenmeyi olumsuz yönde etkilemiş veya tohum içerisinde iyon birikimini arttırıp toksik etki sonucu yine çimlenme oranını azaltıcı etki göstermiş olabileceği düşünülmektedir [19].

3.2. Sapçık uzunluğu (mm)

Buğdaygil yem bitkileri çeşit ortalamalarında, sapçık uzunluğu çeşit ve tuz konsantrasyonlarına göre önemli farklılıklar bulunmuştur. Çeşitlere ait ortalama değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Araştırmada elde edilen ortalama sapçık uzunluğu değerleri (mm)

Çeşitler	Tuz Konsantrasyonları (mMol)					Çeşit Ortalama
	0	50	100	150	200	
<i>L. perenne</i> Esquire	73,07	94,33 b	51,30	27,77	15,27	52,34 c
<i>P. pratensis</i> Evora	42,97	47,37	22,83	11,30	5,33	25,96 f
<i>A. stolonifera</i> Emerald	23,50	26,53	21,47	12,57	11,30	19,07 h
<i>A. tenuis</i> Denso	22,63	23,67	15,13	11,27	4,33 z	15,40 ı
<i>F. arundinacea</i> Titan RX	85,37 c	96,60 a	84,43 c	51,37	51,36	69,34 a
<i>F. arundinacea</i> Starlett	75,33	81,93	73,80	47,93	26,03	61,01 b
<i>F. r. commutata</i> Casanova	35,80	37,40	25,33	11,27	5,27	23,01 g
<i>F. r. rubra</i> Maxima	43,17	46,30	35,27	22,40	11,50	31,72 e
<i>F. r. trichophylla</i> Samanta	37,03	38,70	28,30	15,10	10,63	25,95 f
<i>F. ovina</i> Ridu	51,50	53,73	47,93	24,20	12,93	38,06 d
Tuz Ortalaması	49,03 b	54,66 a	40,58 c	23,51 d	13,15 e	----
(E.Ö.F.) %5	Çeşit: 0,511		Tuz: 0,361		Çeşit × Tuz: 1,143	

Çeşitler ortalamasına bakıldığında en yüksek sapçık uzunluğuna sahip çeşit 69,34 mm ile Titan RX, en düşük sapçık uzunluğuna sahip çeşit 15,40 mm ile Denso çeşidi olmuştur. Tuz konsantrasyonları ortalamaları arasında en uzun sapçık uzunluğu 54,66 mm, 50 mMol uygulamasında en kısa sapçık uzunluğu ise 200 mMol konsantrasyonda 13,15 mm olarak gözlemlenmiştir.

Değerlere çeşit×tuz interaksyonu açısından bakıldığında en uzun sapçık uzunluğunun 96,60 mm ile 50 mMol konsantrasyonunda Titan RX çeşidinde görülmektedir. Bu sırayı 94,33 mm ile 50 mMol konsantrasyonda Esquire ve 85,37 mm ile kontrol grubunda Titan RX çeşitleri takip etmiştir. Tuzluluktan en fazla etkilenen Denso çeşidinin sapçık uzunluğu değeri kontrol uygulamasında 22,63 mm olarak ölçülürken 200 mMol tuz konsantrasyonunda 4,33 mm değeri elde edilmiştir. Araştırma verileri, artan tuz konsantrasyonlarının sapçık boy uzunluğunu olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır.

Atış [19], sorgum türünde yaptığı çalışmada düşük tuz konsantrasyonunun çimlenmeyi teşvik ettiğini ve tuz stresinin olmadığı koşullarda daha yüksek sap uzunluğunun görüldüğü çeşitlerin artan tuz stresine bağlı olarak daha az etkilendiklerini belirtmiştir. Doğru [24], farklı mısır genotiplerinde tuz stresi sonucunda oluşan iyon toksisitesinin bitki büyümesine olumsuz etki ettiğini ve etki oranının genotiplerde tuz alım ve taşınımının farklı şekilde regüle edildiğinin göstergesi olabileceğini belirtmiştir. Yine aynı çalışmada tuz stresi sonucunda oluşan kuraklığın kök ve gövde büyümesindeki azalmanın bir sebebi olabileceği de ortaya konulmuştur. Bu veriler ışığında artan tuz konsantrasyonlarının bitki boy uzamasını engellediği sonucuna varılmaktadır. Tatar ve ark. [15], *Lolium perenne* çimlenmesinde NaCl ön uygulamaları yaparak tuz konsantrasyonlarıyla meydana gelen etkileşimde 15 ve 30 dS m⁻¹ ön uygulamalarının 0 ve 5 dS m⁻¹ tuz konsantrasyonlarında sapçık uzunluğunu kontrole kıyasla arttırırken daha yüksek tuz konsantrasyonlarında aynı olumlu etkinin görülmediğini belirtmişlerdir. Daha önce yapılan benzer çalışmaların, bizim çalışma sonuçlarımızı destekler nitelikte olduğu belirlenmiştir.

3.3. Kökçük uzunluğu (mm)

Araştırmada elde edilen ortalama kökçük uzunluğu değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Bulgular çeşitler açısından incelendiğinde en yüksek kökçük uzunluğuna sahip çeşitler 33,43 mm ile Starlett ve Esquire, en düşük kökçük uzunluğuna sahip çeşit ise 6,11 mm ile Denso çeşidi olmuştur. Denso çeşidinin kontrol

grubunda elde edilen kökçük uzunluğu değeri (7,73 mm) ile 200 mMol tuz uygulamasındaki değeri (2,53 mm) karşılaştırıldığında artan tuz konsantrasyonuna bağlı olarak kökçük uzunluğunun olumsuz etkilendiği görülmektedir.

Tablo 3. Araştırmada elde edilen ortalama kökçük uzunluğu değerleri (mm)

Çeşitler	Tuz Konsantrasyonları (mMol)					Çeşit Ortalama
	0	50	100	150	200	
<i>L. perenne</i> Esquire	42,83 b	44,27 a	42,27 c	26,27	11,50	33,43 a
<i>P. pratensis</i> Evora	17,13	17,70	12,50	9,20	3,20	11,95 f
<i>A. stolonifera</i> Emerald	9,20	10,50	8,50	6,37	5,33	7,98 h
<i>A. tenuis</i> Denso	7,73	8,63	7,30	4,33	2,53 z	6,11 ı
<i>F. arundinacea</i> Titan RX	40,67	41,73	35,13	20,67	13,47	30,33 b
<i>F. arundinacea</i> Starlett	41,20	44,50 a	39,33	26,83	15,30	33,43 a
<i>F. r. commutata</i> Casanova	14,50	15,47	13,50	10,53	3,40	11,48 g
<i>F. r. rubra</i> Maxima	21,77	22,63	21,63	13,53	9,37	17,79 c
<i>F. r. trichophylla</i> Samanta	21,40	23,03	18,37	11,50	5,43	15,95 d
<i>F. ovina</i> Ridu	21,17	22,30	17,57	11,20	5,20	15,49 e
Tuz Ortalaması	23,76 b	25,08 a	21,61 c	14,04 d	7,47 e	----
(E.Ö.F.) %5	Çeşit: 0,176		Tuz: 0,125		Çeşit × Tuz: 0,394	

Tuz konsantrasyonları ortalamaları arasında en uzun kökçük uzunluğu 25,08 mm ve 50 mMol uygulamasında görülürken, en kısa kökçük uzunluğu ise 7,47 mm ile 200 mMol konsantrasyonda elde edilmiştir.

Deneme sonunda elde edilen bulgulara göre çeşit×tuz konsantrasyonları açısından en yüksek değer 44,50 mm ile 50 mMol konsantrasyonda Starlett çeşidinde görülmüştür. Bu sırayı 50 mMol konsantrasyonda 44,27 mm, kontrol grubunda 42,83 mm ve 100 mMol konsantrasyonda 42,27 mm değerleri ile Esquire çeşidi takip etmiştir. En kısa kökçük uzunluğu ise 2,53 mm ile 200 mM tuz konsantrasyonunda Denso çeşidinde görülmüştür.

Demiroğlu ve ark., [13] ile Türk ve Alagöz [16] kamışsı yumakta, Yılmaz. ve Kısakürek [14], Tatar ve ark., [15] ile Sürmen ve ark. [17] çok yıllık çim bitkilerinde, Yılmaz ve Bayram [26] ile Özkurt ve ark., [28] yoncada, yaptıkları çalışmalarında kökçük uzunluğunun tuz stresine bağlı olarak azaldığını bildirmişlerdir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile araştırmamız benzerlik göstermektedir.

3.4. Vigor İndeksi

Ortalama vigor indeksi değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Araştırmada elde edilen ortalama vigor indeksi değerleri

Çeşitler	Tuz Konsantrasyonları (mMol)					Çeşit Ortalama
	0	50	100	150	200	
<i>L. perenne</i> Esquire	1116,10	1361,97 b	855,57	477,33	220,93	806,39 c
<i>P. pratensis</i> Evora	543,67	601,47	291,17	66,83	19,97	304,62 f
<i>A. stolonifera</i> Emerald	308,80	360,50	276,27	161,47	137,13	248,83 g
<i>A. tenuis</i> Denso	274,63	294,83	162,67	75,57	14,67	164,47 j
<i>F. arundinacea</i> Titan RX	1241,87 c	1381,47 a	1138,27	659,13	371,87	958,52 a
<i>F. arundinacea</i> Starlett	1112,10	1231,47 c	1045,73	643,50	336,33	873,83 b
<i>F. r. commutata</i> Casanova	348,43	377,30	203,47	55,43	7,33 z	198,39 ı
<i>F. r. rubra</i> Maxima	560,17	628,90	328,90	94,87	31,87	328,94 e
<i>F. r. trichophylla</i> Samanta	393,63	422,07	225,90	75,30	8,60	225,10 h
<i>F. ovina</i> Ridu	669,47	730,97	540,37	217,13	64,27	444,44 d
Tuz Ortalaması	656,89 b	739,09 a	506,83 c	252,66 d	121,30 e	----
(E.Ö.F.) %5	Çeşit: 4,785		Tuz: 3,383		Çeşit × Tuz: 10,699	

Çeşitler ortalamasında en yüksek vigor indeksi değeri 958,52 ile Titan RX çeşidinde elde edilmiştir. En düşük vigor indeksi değeri ise 164,47 ile Denso çeşidinde belirlenmiştir. Tuz konsantrasyonları ortalamaları arasında en yüksek vigor indeksi değeri 739,09, 50 mMol uygulamasında ve en düşük değer ise 200 mMol konsantrasyonda 121,30 olarak gözlemlenmiştir.

Tablo 4'te çeşit×tuz konsantrasyonları interaksiyonuna bakıldığında en yüksek vigor indeksi değeri 1381,47 ile 50 mMol tuz konsantrasyonunda Titan RX çeşidinde gözlenirken bu sırayı 1361,97 ile 50 mMol tuz konsantrasyonunda Esquire, 1241,87 değeri ile kontrol grubundan Titan RX ve 1231,47 ile yine 50 mMol tuz konsantrasyonunda Starlett çeşitleri takip etmiştir. En düşük değer ise 7,33 ile Casanova çeşidinde ve 200 mMol tuz konsantrasyonunda görülmüştür. Aynı çeşit, kontrol uygulamasında 348,43 vigor indeksi değerini göstermiştir.

Çalışmamızda artan tuz konsantrasyonu uygulamalarının vigor indeksi değerlerini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Bitkiler çimlenme ve erken fide döneminde hassas olduklarından tarımda değişen çevre şartlarından en az etkilenen, çimlenme hızı ve fide oluşturma yetenekleri yüksek tohumların kullanılması çok önemlidir. Verimliliği arttırmak için tarım endüstrisinin ilk hedefi tohum çimlenme gücü yüksek olan çeşitlerin belirlenmesi ve tohum performanslarının artırılması olmalıdır [31].

Tohum çimlenme gücü üzerine yapılan çalışmalarla, tohum kalitesinin belirlenmesinin yanı sıra arazi performansı ve depolama yeteneği hakkında da fikir sahibi olunacağından büyük ölçüde tarıma katkı sağlanmaktadır. Bu amaçla çeşitli fiziksel, biyokimyasal, performans testleri ve stres testleri uygulanmaktadır [31]. Bizim çalışmamızda, uyguladığımız tuz stresi sonucu elde ettiğimiz verilerin de bu anlamda katkı sağlayacağını düşünmekteyiz.

3.5. Sapçık-kökçük oranı

Araştırmada elde edilen ortalama sapçık/kökçük oranı değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Bulgular çeşitler açısından incelendiğinde en yüksek sapçık/kökçük değeri 2,78 ile Emerald çeşidinden, en düşük sapçık/kökçük değerinin ise 1,49 ile Esquire çeşidinden elde edileceği görülecektir.

Tablo 5. Araştırmada elde edilen ortalama sapçık-kökçük oranı değerleri

Çeşitler	Tuz Konsantrasyonları (mMol)					Çeşit Ortalama
	0	50	100	150	200	
<i>L. perenne</i> Esquire	1,71	2,13	1,22	1,06	1,33	1,49 h
<i>P. pratensis</i> Evora	2,51	2,67 c	1,83	1,01	0,63 z	1,73 f
<i>A. stolonifera</i> Emerald	2,87 b	2,74 c	2,87 b	2,33	3,11 a	2,78 a
<i>A. tenuis</i> Denso	2,93 b	2,74 c	2,07	2,60	1,34	2,34 c
<i>F. arundinacea</i> Titan RX	2,10	2,32	2,40	2,49	2,15	2,29 d
<i>F. arundinacea</i> Starlett	1,83	1,84	1,87	1,79	1,70	1,81 e
<i>F. r. commutata</i> Casanova	2,47	2,42	1,88	1,07	1,22	1,81 e
<i>F. r. rubra</i> Maxima	1,98	2,04	1,63	1,66	1,00	1,66 g
<i>F. r. trichophylla</i> Samanta	1,73	1,68	1,54	1,31	2,36	1,73 f
<i>F. ovina</i> Ridu	2,43	2,42	2,73 c	2,17	3,08 a	2,57 b
Tuz Ortalaması	2,26 b	2,30 a	2,00 c	1,75 e	1,79 d	----
(E.Ö.F.) %5	Çeşit: 0,044		Tuz: 0,031		Çeşit × Tuz: 0,0098	

Tuz konsantrasyonları ortalamalarına göre en yüksek değer 2,30, 50 mMol uygulamasında ve en düşük sapçık/kökçük oranı değeri ise 150 mMol konsantrasyonda 1,75 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5'te çeşit×tuz konsantrasyonlarına ait rakamlara bakıldığında en yüksek değer 3,11 ile 200 mMol tuz konsantrasyonunda Emerald çeşidinde gözlemlenmiştir. En düşük değer ise 0,63 ile 200 mMol tuz uygulamasında Evora çeşidinde görülmüştür.

Çalışmada elde edilen verilere bakıldığında, en yüksek ve en düşük sapçık/kökçük oranlarının her ikisi de 200 mMol tuz konsantrasyonunda elde edilmiştir. Bu durumun çeşitlerin genetik özelliklerinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Doğru [24], bazı mısır genotiplerinde kök uzunluğunun, bazı mısır genotiplerinde ise gövde uzunluğunun tuz stresinden daha fazla etkilendiğini belirterek bu durumun, genotiplere göre tuz alınımı ve taşınımının farklı olmasından kaynaklanabileceğini ortaya koymuştur.

3.6. Sapçık yaş ağırlığı (mg)

Ortalama sapçık yaş ağırlığı verileri Tablo 6'da verilmiştir. Çeşitler ortalamasına ait veriler incelendiğinde en yüksek sapçık yaş ağırlığı değeri 463,07 mg ile Titan RX çeşidinde, en düşük ağırlık ise 53,95 mg ile Denso çeşidinde görülmüştür.

Tablo 6. Araştırmada elde edilen ortalama sapçık yaş ağırlık değerleri (mg)

Çeşitler	Tuz Konsantrasyonları (mMol)					Çeşit Ortalama
	0	50	100	150	200	
<i>L. perenne</i> Esquire	463,40	483,27	412,37	334,17	235,20	385,68 c
<i>P. pratensis</i> Evora	178,80	187,87	143,00	95,37	56,10	132,23 h
<i>A. stolonifera</i> Emerald	76,87	86,47	72,47	58,07	42,00	67,17 ı
<i>A. tenuis</i> Denso	62,97	74,50	56,87	43,27	32,17 z	53,95 j
<i>F. arundinacea</i> Titan RX	512,00 b	522,63 a	492,40 c	433,80	354,50	463,07 a
<i>F. arundinacea</i> Starlett	472,23	484,13	455,73	383,47	311,93	421,50 b
<i>F. r. commutata</i> Casanova	207,53	217,03	194,80	164,03	138,23	184,33 g
<i>F. r. rubra</i> Maxima	278,43	288,37	275,93	248,70	212,53	260,79 e
<i>F. r. trichophylla</i> Samanta	262,40	273,20	262,57	235,93	197,63	246,35 f
<i>F. ovina</i> Ridu	378,67	389,10	373,07	342,60	308,70	358,43 d
Tuz Ortalaması	289,33 b	300,66 a	273,92 c	233,94 d	188,90 e	----
(E.Ö.F.) %5	Çeşit: 0,546		Tuz: 0,386		Çeşit × Tuz: 1,221	

Tuz konsantrasyonları ortalamalarına göre en yüksek değer 50 mMol uygulamasında 300,66 mg ve en düşük değer ise 200 mMol uygulamasında 188,90 mg olduğu kaydedilmiştir.

Deneme sonucunda elde edilen veriler çeşit×tuz konsantrasyonları açısından ele alındığında en yüksek sapçık yaş ağırlığı 522,63 mg olup 50 mMol tuz uygulamasında ve Titan RX çeşidinde elde edilirken, bu değeri aynı çeşidin kontrol grubunda 512,00 mg ve 100 mMol tuz konsantrasyonunda 492,40 mg olarak ölçülen değerleri takip etmiştir. En düşük sapçık yaş ağırlığı ise 200 mMol tuz konsantrasyonunda 32,17 mg ile Denso çeşidinde görülmüştür.

Arslan ve Aydınoglu [29], iki mürdümük çeşidinde çimlenme ve erken fide gelişimi üzerinde tuzluluğun etkisini araştırdıkları çalışmalarında, sapçık yaş ağırlığı değerlerinin 807,6 mg ile 479,97 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. En yüksek tuz seviyesinde (150 mMol) her iki çeşitte de en düşük sapçık yaş ağırlığı elde edilmiştir. Önal Aşçı ve Üney [30], macar fiği ile yaptıkları çalışmada düşük miktarda tuz konsantrasyonu uygulamalarında Na⁺ ve Cl⁻ iyonlarının bitki için gerekli besin elementi özelliği gösterdiğini, artan tuz dozlarında ise toksik etkiyle beraber kuraklığa yani bitkinin su alımına engel olarak yaş ağırlıkta azalmaya neden olduğunu aktarmışlardır. Yaptıkları çalışmada bitki yaş ağırlığının tuz konsantrasyonunun artışına bağlı olarak azalış göstermesi de bu bilgiyi destekler niteliktedir.

3.7. Kökçük yaş ağırlığı (mg)

Araştırmada elde edilen ortalama kökçük yaş ağırlığı değerleri Tablo 7’de görülmektedir.

Tablo 7. Araştırmada elde edilen ortalama kökçük yaş ağırlık değerleri (mg)

Çeşitler	Tuz Konsantrasyonları (mMol)					Çeşit Ortalama
	0	50	100	150	200	
<i>L. perenne</i> Esquire	161,97	172,63 b	132,37	102,17	75,33	128,89 c
<i>P. pratensis</i> Evora	61,97	72,57	43,13	24,50	12,37	42,91 h
<i>A. stolonifera</i> Emerald	26,60	35,03	25,33	17,07	14,40	23,69 ı
<i>A. tenuis</i> Denso	24,13	22,57	18,77	15,27	11,60 z	18,47 j
<i>F. arundinacea</i> Titan RX	168,50 c	179,00 a	152,33	134,50	118,53	150,57 a
<i>F. arundinacea</i> Starlett	162,57	172,53 b	135,50	125,23	112,73	141,71 b
<i>F. r. commutata</i> Casanova	68,03	78,37	52,50	38,53	25,60	52,61 g
<i>F. r. rubra</i> Maxima	94,53	112,57	82,50	65,27	51,83	81,34 e
<i>F. r. trichophylla</i> Samanta	86,00	96,00	68,53	55,07	35,37	68,19 f
<i>F. ovina</i> Ridu	122,43	132,83	105,33	88,50	73,37	104,49 d
Tuz Ortalaması	97,67 b	107,41 a	81,63 c	66,61 d	53,11 e	----
(E.Ö.F.) %5	Çeşit: 0,495		Tuz: 0,350		Çeşit × Tuz: 1,107	

Tablo 7 incelendiğinde çeşitler ortalamasına ait verilerde en yüksek kökçük yaş ağırlığının 150,57 mg olup Titan RX çeşidinde, en düşük kökçük yaş ağırlığı değerinin ise 18,47 mg olup Denso çeşidinde elde edildiği görülmektedir. Tuz konsantrasyonları ortalamalarına göre en yüksek değer 107,41 mg ile 50 mMol tuz konsantrasyonunda görülürken, en düşük ortalama 53,11 mg ile 200 mMol tuz konsantrasyonunda gözlemlenmiştir.

Çeşit×tuz konsantrasyonları açısından bulgular incelendiğinde en yüksek değer 179,00 mg ile 50 mMol tuz konsantrasyonunda Titan RX çeşidinde görülürken, onu sırasıyla 50 mMol tuz konsantrasyonunda 172,63 mg ile Esquire ve yine 50 mMol tuz konsantrasyonunda 172,53 mg ile Starlett çeşitleri takip etmiştir. En düşük kökçük yaş ağırlığı ise 200 mMol tuz konsantrasyonunda 11,60 mg ile Denso çeşidinde görülmüştür.

Bu araştırma sonuçları, Yılmaz ve Kısakürek [14]'in *Lolium perenne* çeşitlerinin uygulanan tuz yoğunluklarına karşı farklı tepkiler verdiklerini ve buna rağmen artan tuz dozlarına bağlı olarak tüm çeşitlerde kök yaş ağırlıklarında azalmanın olduğunu bildirdiği sonuçları destekler niteliktedir.

3.8. Sapçık kuru ağırlık (mg)

Araştırmada elde edilen ortalama sapçık kuru ağırlığı değerleri Tablo 8'de verilmiştir. Çim bitkisi çeşitlerinde farklı tuz konsantrasyonlarının sapçık kuru ağırlığı üzerine etkisi incelendiğinde en yüksek sapçık kuru ağırlığı ortalaması 129,68 mg ile Titan RX çeşidi olurken en düşük ortalama sapçık kuru ağırlığına sahip çeşit ise 15,13 mg ile Denso olmuştur.

Tablo 8. Araştırmada elde edilen ortalama sapçık kuru ağırlık değerleri (mg)

Çeşitler	Tuz Konsantrasyonları (mMol)					Çeşit Ortalama
	0	50	100	150	200	
<i>L. perenne</i> Esquire	129,73	135,30	115,47	93,57	65,90	107,99 c
<i>P. pratensis</i> Evora	50,07	52,57	40,03	26,70	15,73	37,02 h
<i>A. stolonifera</i> Emerald	21,50	24,23	20,30	16,27	11,73	18,81 ı
<i>A. tenuis</i> Denso	17,60	20,90	15,93	12,17	9,03 z	15,13 j
<i>F. arundinacea</i> Titan RX	143,37 b	146,37 a	137,90 c	121,47	99,30	129,68 a
<i>F. arundinacea</i> Starlett	132,20	135,57	127,60	107,37	87,33	118,01 b
<i>F. r. commutata</i> Casanova	58,10	60,80	54,57	45,93	38,73	51,63 g
<i>F. r. rubra</i> Maxima	78,00	80,77	77,30	69,63	59,50	73,04 e
<i>F. r. trichophylla</i> Samanta	73,47	76,50	73,53	66,10	55,33	68,99 f
<i>F. ovina</i> Ridu	106,07	109,00	104,47	95,97	86,43	100,39 d
Tuz Ortalaması	81,01 b	84,20 a	76,71 c	65,52 d	52,90 e	----
(E.Ö.F.) %5	Çeşit: 0,162		Tuz: 0,115		Çeşit × Tuz: 0,362	

Tuz konsantrasyonları ortalamalarına göre en yüksek değer 50 mMol tuz konsantrasyonunda 84,20 mg iken en düşük sapçık kuru ağırlık ortalaması ise 200 mMol tuz konsantrasyonunda 52,90 mg olarak elde edilmiştir.

Veriler çeşit×tuz konsantrasyonları açısından ele alındığında en yüksek sapçık kuru ağırlığı, 146,37 mg ile 50 mMol tuz konsantrasyonunda Titan RX çeşidinde olurken, bu ağırlık değerini aynı çeşidin kontrol grubu 143,37 mg ile ve yine aynı çeşidin 100 mMol tuz uygulanan grubu 137,90 mg ile takip etmiştir. En düşük sapçık kuru ağırlığı ise 9,03 mg ağırlığı ile 200 mMol tuz konsantrasyonunda Denso çeşidinde görülmüştür.

Bu sonuçlar tuz konsantrasyonunun artmasıyla sapçık kuru ağırlığının önemli bir şekilde azaldığını açıklayan benzer çalışmalarla da desteklenmiştir [20, 26]. Güneş ve Çakıcı [18], çim buğdaygillerinin yeşil aksam toplam kuru ağırlık miktarına ait en düşük değeri 300 mMol tuz konsantrasyonunda 1,60 g ile Zenci darısında gözlemlemişlerdir. En yüksek değer ise kontrol grubunda 5,50 g ile Yengeçotu çeşidinde elde edilmiştir. Kullanılan üç çeşit buğdaygilin de kuru ot verimine ait değerlerin artan tuz konsantrasyonuyla birlikte azaldığı kaydedilmiştir.

3.9. Kökçük kuru ağırlık (mm)

Araştırmada elde edilen kökçük kuru ağırlığı ortalama değerleri Tablo 9'da verilmiştir.

Çeşitler ortalamasında en yüksek kökçük kuru ağırlığı ortalaması 45,18 mg olup Titan RX çeşidinde, en düşük ortalama kökçük kuru ağırlığı ise 5,54 mg ile Denso çeşidinde görülmüştür. Tuz konsantrasyonları ortalamalarına göre en yüksek değer 50 mMol uygulamasında 32,24 mg ve en düşük değer ise 200 mMol uygulamasında 15,93 mg olduğu kaydedilmiştir.

Tablo 9'da çeşit×tuz konsantrasyonlarına ait rakamlar ele alındığında en yüksek kökçük kuru ağırlığı 53,70 mg ile 50 mMol tuz konsantrasyonunda Titan RX çeşidi olmuştur. Bu ağırlık değerini 50 mMol tuz konsantrasyonunda 51,80 mg ile Esquire ve Starlett çeşitleri takip etmiştir. Üçüncü sırada en yüksek kökçük kuru ağırlığı ise 50,57 mg ile kontrol grubunda Titan RX çeşidinde elde edilmiştir. En düşük

kökçük kuru ağırlığı ise 3,47 mg ağırlığı ile 200 mMol tuz konsantrasyonunda Denso çeşidinde görülmüştür.

Tablo 9. Araştırmada elde edilen ortalama kökçük kuru ağırlık değerleri (mg)

Çeşitler	Tuz Konsantrasyonları (mMol)					Çeşit Ortalama
	0	50	100	150	200	
<i>L. perenne</i> Esquire	48,60	51,80 b	39,73	30,67	22,60	38,68 c
<i>P. pratensis</i> Evora	18,60	21,83	12,93	7,37	3,70	12,89 h
<i>A. stolonifera</i> Emerald	8,03	10,53	7,60	5,13	4,33	7,13 ı
<i>A. tenuis</i> Denso	7,23	6,80	5,63	4,57	3,47 z	5,54 j
<i>F. arundinacea</i> Titan RX	50,57 c	53,70 a	45,70	40,37	35,57	45,18 a
<i>F. arundinacea</i> Starlett	48,80	51,80 b	40,67	37,57	33,80	42,53 b
<i>F. r. commutata</i> Casanova	20,40	23,50	15,80	11,53	7,70	15,79 g
<i>F. r. rubra</i> Maxima	28,37	33,80	24,77	19,60	15,57	24,42 e
<i>F. r. trichophylla</i> Samanta	25,80	28,80	20,57	16,50	10,60	20,45 f
<i>F. ovina</i> Ridu	36,80	39,83	31,60	26,57	22,00	31,36 d
Tuz Ortalaması	29,32 b	32,24 a	24,50 c	19,99 d	15,93 e	----
(E.Ö.F.) %5	Çeşit: 0,156		Tuz: 0,110		Çeşit × Tuz: 0,349	

Kara ve ark., [3] tritikale genotipleri ile yürüttükleri çalışmada tuz konsantrasyonu oranının artışı ile birlikte tüm çeşit/hatlarda kök kuru ağırlıklarının önemli derecede azaldığını belirtmişlerdir. Çaçan ve Kökten [27] yonca çeşitlerinin tuza toleransını belirlemek için yaptıkları araştırmada tuz konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak kök kuru ağırlıklarında büyük oranda azalmanın meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Bu çalışmaların sonuçları da bizim çalışma bulgularımızla benzerlik göstermektedir.

3.10. Tuza tolerans indeksi

Tuza tolerans indeksine ait ortalama değerler Tablo 10'da görülmektedir. Tablo 10 incelendiğinde çeşitler ortalamasına ait verilerde tuza tolerans indeksi en yüksek çeşitin 92,39 ile Ridu, en düşük ise 72,73 ile Evora çeşidinde olduğu görülmektedir. Tuz konsantrasyonları ortalamalarına göre en yüksek değer 50 mMol tuz konsantrasyonunda 107,35 ve en düşük değer 200 mMol tuz konsantrasyonunda 59,27 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 10. Araştırmada elde edilen ortalama kuraklığa tolerans indeksi değerleri

Çeşitler	Tuz Konsantrasyonları (mMol)					Çeşit Ortalama
	0	50	100	150	200	
<i>L. perenne</i> Esquire	100,00	104,97	87,13	69,80	49,67	82,31 h
<i>P. pratensis</i> Evora	100,00	108,13 c	77,30	49,80	28,40 z	72,73 ı
<i>A. stolonifera</i> Emerald	100,00	117,50 a	94,50	72,63	54,53	87,83 e
<i>A. tenuis</i> Denso	100,00	111,47 b	86,87	67,23	50,23	83,16 g
<i>F. arundinacea</i> Titan RX	100,00	103,10	94,73	83,50	69,50	90,17 c
<i>F. arundinacea</i> Starlett	100,00	103,40	93,13	80,13	66,90	88,71 d
<i>F. r. commutata</i> Casanova	100,00	107,23	89,73	73,50	59,47	85,99 f
<i>F. r. rubra</i> Maxima	100,00	107,50 c	96,13	84,20	70,87	91,74 b
<i>F. r. trichophylla</i> Samanta	100,00	106,03	95,03	83,53	66,90	90,30 c
<i>F. ovina</i> Ridu	100,00	104,17	95,47	86,07	76,23	92,39 a
Tuz Ortalaması	100,00 b	107,35 a	91,00 c	75,04 d	59,27 e	----
(E.Ö.F.) %5	Çeşit: 0,316		Tuz: 0,224		Çeşit × Tuz: 0,707	

Veriler çeşit×tuz konsantrasyonları interaksiyonu açısından değerlendirildiğinde tuza tolerans indeksi en yüksek olan çeşit 117,50 ile 50 mMol tuz konsantrasyonunda Emerald çeşidi olmuştur. Bu değeri sırasıyla 111,47 ile 50 mMol tuz konsantrasyonunda Denso çeşidi, 108,13 ile 50 mMol tuz konsantrasyonunda Evora ve 107,50 ile 50 mMol tuz konsantrasyonunda Maxima çeşitleri takip etmiştir. Tuza tolerans indeksi en düşük olan çeşit ise 200 mMol tuz konsantrasyonunda 28,40 ile Evora olmuştur.

Buğday ve diğer bazı tahılların tuza toleransını arttırmaya yönelik yapılan bir çalışmada, buğdayın tuza orta derecede toleranslı olduğunu belirterek 100 mMol NaCl konsantrasyonunda pirinçte büyümenin olmadığını buğdayda ise verimin düştüğünü eklemiştir. Ayrıca tuzluluğa en toleranslı olan arpada

250 mMol NaCl konsantrasyonunda bitki ölümlerinin görülebileceğini ifade etmişlerdir [25]. Uygulanan tuz konsantrasyon seviyesine bağlı olarak tuza tolerans indeksinin azaldığı diğer birçok araştırma sonucunda da ifade edilmiştir [16, 21, 22].

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Farklı tuz konsantrasyonlarının çim bitkileri çeşitlerinde çimlenme ve erken fide gelişim dönemine etkisinin incelendiği bu çalışmada, dikkate alınan parametreler bakımından önemli sonuçlar elde edilmiştir.

- ✓ Uygulanan tuz konsantrasyonu seviyesi arttıkça çimlenme oranı ve fide gelişimi özelliklerinin azaldığı görülmüştür. Ancak incelenen tüm parametrelerde kontrol grubuna göre 50 mMol tuz konsantrasyonunda olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum belli miktardaki tuz oranının çimlenmeyi teşvik ettiği sonucunu göstermektedir.
- ✓ İncelenen çeşitler arasında *Festuca arundinacea* Rizomlu Titan RX ve *Festuca arundinacea* Starlett çeşitlerinin diğer çeşitlere göre tuzluluğa daha toleranslı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle tuzluluk problemi yaşanan alanlarda bu çeşitlerin kullanılması önerilebilir. En düşük çimlenme oranı *Festuca rubra trichophylla* Samanta ile *Agrostis tenuis* Denso çeşitlerinde olmuştur. Bu çeşitlerin tuzluluk oranı yüksek topraklarda ya da sulama sorunu yaşanan alanlarda kullanımı önerilmemektedir.
- ✓ Sonuç olarak, kontrollü koşullarda elde edilen bu sonuçların öncelikle daha büyük hacimli saksılarla ya da tarla çalışmalarıyla desteklenmesi ve ayrıca benzer konularda daha kapsamlı çalışmaların yürütülmesi gerektiği kanaatine varılmıştır.

5. Çıkar Çatışması

Makaleyi yazan yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

6. Yazar Katkısı

Mustafa YILMAZ: Makaleyi yazdı.

Ali DOĞRU: Makale için gerekli araştırmaları yapıp, çalışma taslağını oluşturdu.

Melike Halime KILDIŞ: Literatür taramasında ve makalenin düzenlenmesinde katkıda bulundu.

KAYNAKLAR

- [1] A. Ergene, "Toprak Bilgisi", Atatürk Üniv. Ziraat Fakültesi Yayınları No:267, Ders Kitapları Serisi No:42, Erzurum, (1982).
- [2] J. Kwiatowsky, "Salinity classification, mapping, and management in Alberta", *Internet: www.agric.gov.ab.ca/soil/*, (1998).
- [3] B. Kara, İ. Akgün ve D. Altındal, "Tritikale genotiplerinde çimlenme ve fide gelişimi üzerine tuzluluğun (NaCl) etkisi", *Selçuk Üniversitesi, Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*. 25(1):19, (2011).
- [4] L. Taiz ve E. Zeiger, "Bitki Fizyolojisi", Üçüncü Baskıdan Çeviri (Prof. Dr. İsmail TÜRKAN), *Palme Yayıncılık*, 33-65, Ankara, (2008).
- [5] Ş. Çulha ve H. Çakırlar, "Tuzluluğun bitkiler üzerine etkileri ve tuz tolerans mekanizmaları", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11: 11-34, (2011).
- [6] K. Süyüm, "Karpuz genetik kaynaklarının tuzluluk ve kuraklığa tolerans seviyelerinin belirlenmesi", *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Konya, (2011).
- [7] F. Altuner, E. Oral, R. Tunçtürk ve İ. Baran, "Gibberellik asit ön uygulamasına tabi tutulmuş triticale (*Triticosecale* Wittmack) de tuz (NaCl) stresinin çimlenme üzerine etkisi", *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 22(2): 235-242, (2019).
- [8] F. Baltacı, D. Can, A. Karaoğlu ve A. Tantar, "Tuzluluk, Nedenleri ve Çevresel Etkileri", *Sulanan Alanlarda Tuzluluk Yönetimi Sempozyumu*, 20-21 Mayıs, 185-190, Ankara, (2004).

- [9] E. Ekmekçi, M. Apan ve T. Kara, "Tuzluluğun bitki gelişimine etkisi", *OMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20 (3): 118-125, (2005).
- [10] A. Deliboran ve Ş. Şavran, "Toprak tuzluluğu ve tuzluluğa bitkilerin dayanım mekanizmaları", *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 8(1): 57-61, (2015).
- [11] R. Kanber, M.A. Çullu, B. Kendirli, S. Antepli ve N. Yılmaz, "Sulama, Drenaj ve Tuzluluk", www.zmo.org.tr/etkinlikler/6tk05/013rizakanber.pdf, (2005).
- [12] H. Turhan ve İ. Başer, "Toprak tuzluluğu ve bitki gelişimi", *Akdeniz Üniv. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 14(1): 171-179, (2001).
- [13] G. Demiroğlu-Topçu, A. Çelen, E. Kuru ve Ş. Özkan, "Farklı tuz konsantrasyonlarının kamışsı yumak (*Festuca arundinacea*) ve mavi ayrık (*Agropyron intermedium*) bitkilerinin çimlenme ve erken gelişme dönemindeki etkileri üzerine araştırma", *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Ens., Der.*, 25 (2):219-224, (2016).
- [14] M. Yılmaz ve Ş. Kısakürek, "Bazı çok yıllık çim (*Lolium perenne* L.) çeşitlerinde tuz stresinin çimlenme ve erken fide gelişimi üzerine etkisi", *MKÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 23(2):204-217, (2018).
- [15] N. Tatar, Y. Öztürk ve E. Budaklı-Çarpıcı, "NaCl ön uygulamalarının farklı tuz seviyelerinde çok yıllık çim (*Lolium perenne* L.)'in çimlenme özellikleri üzerine etkileri", *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 5(1): 28-33, (2018).
- [16] M. Türk ve M. Alagöz, "Kamışsı yumak (*Festuca arundinaceae* Schreb.) tohumlarının çimlenme üzerine tuz stresinin etkileri", *Bursa Uludağ Üniv. Ziraat Fak. Dergisi*, 34(2): 317-324, (2020).
- [17] M. Sürmen, H. Erdoğan, A. Özeroğlu ve E. Kara, "Farklı Tuz Konsantrasyonlarının Çim Bitkilerinde Çimlenme ve Erken Fide Dönemi Özellikleri Üzerine Etkileri", *Uluslararası Katılımlı AGRIFOR Kongresi*, Marmaris, (2018).
- [18] E. Güneş ve H. Çakıcı, "Farklı tuz konsantrasyonlarının bazı sıcak iklim çim buğdaygillerinde verim ve beslenme durumu üzerine etkileri", *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 55 (3):341-349, (2018).
- [19] İ. Atış, "Bazı silajlık sorgum (*Sorghum bicolor* L. Moench) çeşitlerinin çimlenmesi ve fide gelişimi üzerine tuz stresinin etkileri", *Süleyman Demirel Üniv. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 6 (2):58-67, (2011).
- [20] A.D. Sharma, M. Thakur, M. Rana and K. Singh, "Effect of plant growth hormones and abiotic stresses on germination, growth and phosphoaphatse activities in *Sorghum bicolor* (L.) moench seeds", *Afr. J. Biotechnol*, 3: 308-312, (2004).
- [21] S. Çiçek, B. Kilercioğlu, R. Doğan ve E. Budaklı-Çarpıcı, "Bazı ileri makarnalık buğday (*Triticum turgidum* var. *durum* L.) genotiplerinin çimlenme döneminde tuz stresine tepkileri", *Bursa Uludağ Üniv. Ziraat Fak. Dergisi*, 32 (2), 19-29, (2018).
- [22] H. Akay, E. Öztürk, İ. Sezer ve M.C. Bahadır, "Farklı tuz konsantrasyonlarının şeker mısır (*Zea mays* L. var. *saccharata* sturt.) çeşitlerinde çimlenme ve erken fide gelişimi üzerine etkileri", *Türk Tarım- Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(sp2): 103-108, (2019).
- [23] B. İnan, O. Emir, R. Doğan ve E. Budaklı-Çarpıcı, "Bazı ekmeklik buğday (*Triticum aestivum* L.) hatlarının çimlenme döneminde tuz stresine tepkileri", *U. Ü. Ziraat Fak., Dergisi*, Cilt 32, Sayı 1, 69-78, (2018).
- [24] A. Doğru, "Farklı Mısır Genotiplerinde Tuz Stresinin Antioksidant System Üzerindeki Etkileri", *22. Ulusal Biyoloji Kongresi*, 430, Eskişehir, (2014).
- [25] R. Munns, R.A. James and A. Lauchli, "Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals", *Journal Exp. Botany*, 57(5): 1025-1043, (2006).
- [26] M. Yılmaz ve G. Bayram, "Bazı yonca çeşitlerinin farklı tuz konsantrasyonlarında çimlenme özelliklerinin belirlenmesi", *Türk Tarım-Gıda ve Teknoloji Dergisi*, 7(sp2): 169-176, (2019).
- [27] E. Çağan ve K. Kökten, "Bazı Yonca (*Medicago sativa* L.) Çeşitlerinin Tuzluluğa Toleransının Belirlenmesi", *Türkiye 5. Uluslararası Katılımlı Tohumculuk Kongresi*, Diyarbakır, (2014).
- [28] M. Özkurt, İ. Saygılı ve K. Özdemir-Dirik, "Bazı yonca (*Medicago sativa* L.) çeşitlerinin erken gelişme dönemindeki tuz toleransının belirlenmesi", *Uluslararası Tarım ve Doğa Bilimleri Der.*, 1(3): 251-258, (2018).
- [29] M. Arslan, ve B. Aydınoglu, "Tuzluluk (NaCl) stresinin mürdümükde (*Lathyrus sativus* L.) çimlenme ve erken fide gelişme özelliklerine etkisi", *Akademik Ziraat Dergisi*, 7(1):49-54, (2018).
- [30] Ö. Önal Aşçı ve H. Üney, "Farklı tuz yoğunluklarının macar figinde (*Vicia pannonica* Crantz) çimlenme ve bitki gelişimine etkisi", *Akademik Ziraat Dergisi*, 5(1):29-34, (2016).

- [31] W.E. Finch-Savage and G.W. Bassel, “Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation”, *Journal of Experimental Botany*, 67, 567–591, (2015).



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Nematicidal Weeds in the Control of Plant Parasitic Nematodes

Bahadır ŞİN¹ , Lerzan ÖZTÜRK^{2*} 

¹ Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Sakarya University of Applied Science, 54580, Arifiye, Sakarya, Turkey bahadirsin@subu.edu.tr

² Viticulture Research Institute, 59100, Süleymanpaşa, Tekirdag, Turkey, lerzanzoturk@gmail.com

ABSTRACT

Weeds are one of the important pests of agricultural production that affect the yield of cultivated plants. These unwanted plants pose a problem, especially in vegetable fields. Synthetic chemicals are used against weeds, but their use is limited due to the uncontrolled application of these substances threatening animal and environmental health, the risk of residues in air, soil and food products, the emergence of poor-quality products by causing phytotoxicity in plants, and the formation of resistance in the targeted pests. The use of plant secretions provides eco-friendly nematode control. In this review, the allelochemicals secreted by plants were discussed and the information on weed species with nematicidal potential was given.

Keywords: Nematode, weed, suppression, allelopathy, secondary metabolites.

Introduction

Regular growth in world population increases the demand for agricultural land and products. The inability to supply food will lead to the emergence of hunger in the future. In parallel with the population increase, the production areas are decreasing day by day due to the opening of agricultural lands for zoning in order to solve the housing problem. For this reason, agriculture is carried out in many countries with the aim of obtaining the highest yield in limited areas. Agricultural production encounters various abiotic and biotic factors that negatively affect crop yield. Causing significant yield loss, weeds, soil-born pathogens and plant parasitic nematodes gain importance within biotic factors. On-time management of these harmful organisms is recommended to achieve production with higher yield [32].

* Sorumlu yazar: lerzanzoturk@gmail.com

Plant parasitic nematodes are important soil born pests of agricultural production that significantly affect crop yield. Many species were identified all around the world and these threaten especially vegetable production. There are 4,100 species of herbivorous nematodes identified and these species are the leading species that cause yield and quality losses in cultivated plants [61]. Among plant parasitic nematodes, 250 species belonging to 43 genera are considered harmful pests in agricultural production in many countries in the world, and 126 species belonging to 33 genera are included in the quarantine pests list [62]. Plant parasitic nematodes feed on parts of the plant such as roots, stems, leaves and flowers. Plant feeders are divided into three groups as endoparasites, ectoparasites and semi-endoparasites according to their feeding patterns in the plant. Ectoparasitic nematodes including genera such as *Longidorus*, *Criconema* and *Xiphinema* feed by sinking their stylets from the outer surface of the plant root, while *Meloidogyne* sp. and *Pratylenchus* sp. endoparasitic nematodes enter the root and feed inside the cell. Semiocto and endoparasitic nematodes usually immerse the head of the body into the tissue [63]. While nematodes feed on their stylets in the plant, they cause death by emptying the cell contents. Some nematodes do not cause cell death but stimulate elongation and growth, and as a result, giant cells with richer nutrient content are formed [64]. In addition to these harmful effects, nematodes lead important pathogens to enter the plant and cause disease [65].

Various methods have been proposed for the control of nematodes but cannot be applied due to inefficient results. In Europe, there were 520 licensed pesticides with active substances in 2019, of which 64% are synthetic chemicals, 9% are organics, 7% are inorganic substances and pheromones, 5% planted extracts and oils, 2% are fatty acids, 1% plant hormones, 1% paraffin and 4% others. Only 110 of these active substances were in the low risk group in terms of harmful effects, and the majority of them planted extracts and pheromones. In chemical control, broad-spectrum fumigants such as methyl bromide and specific pesticides are used. However, a big portion of pesticides is banned in some European countries and some states of the USA due to their harm to human and environmental health and residues that reach dangerous levels in groundwater [66]. Despite the significant increases in the application of synthetic chemicals, their use is limited by harmful effect to the environment and animal health as a result of their uncontrolled use, residual risks on air, soil and food resources, decrease in product quality due to phytotoxicity in plants, and the emergence of resistance in target organisms.

Based on these disadvantages, researches on eco-friendly alternative management methods have become one of the most studied issues in recent years. Until now the efficiency of several

methods including allelopathy, crop rotation, mulching, was approved in many studies and nonharmful, environmentally friendly and low-cost management was achieved with the use of plants and their secretions with nematode suppressive potential.

Allelochemicals

Many plants can secrete chemicals that will affect the growth of other organisms around them, and the phenomenon of affecting other living things in this way is called allelopathy. Allelopathic interaction can occur between different plants, between plants and other organisms (fungi, viruses and microorganisms), or between different kinds of organisms (fungi, virus and microorganisms) [58]. This phenomenon has been observed for 2000 years, and the first serious studies began in the 1900s. The term allelopathy was first defined by the German scientist Molisch in 1973. In later years, Rice [54] from the University of Oklahoma explained allelopathy in all its aspects.

Chemical secretions with an allelopathic effect are called allelochemicals [11]. The suppressive effect of many allelochemicals from different organisms have been studied for years and plant derived allelochemicals gave the most promising result in the control of several weed species, nematodes and plant pathogens. Plant derived allelochemicals are found in all plant parts, including leaves, flowers, fruits, stems, roots, rhizomes, seeds and pollen and their release to the environment occurs by root exudation, plant residue decomposition, leaching from plants and volatilization [67]. Allelochemicals are grouped into several categories including organic acids, fatty acids, lactones, coumarins, flavonoids, quinones, phenols, aliphatic aldehydes, terpenoids and steroids, alkaloids, amino acids and peptides, nucleosides and tannins, sulfides and glucosinolates, nucleosides and purines ([54]; [11]). The number of 10,000 different allelochemicals with the varying modes of action are It has been estimated that higher plants can produce over 10,000 different allelochemicals, which vary in their activity and mode of action in receptor plants. A single plant may contain and secrete more than one allelochemical and these components together increase the plant's allelopathic potential. The plants with this feature increase the success in pest and disease management [30].

The allelochemicals are applied in crop protection in four different ways; 1) Using allelopathic plant residues as mulch or manure material; 2) Growing allelopathic plants in crop rotation or intercropping; 3) Cultivation of crop plants with allelopathic potential as a cover crop; 4) Applying the aqueous extracts of the plants with allelopathic potential ([8]).

Weeds are harmful plants that also secrete many allelochemicals that affect the growth of plants and many organisms. Weed can be defined as unwanted plants competing with crops for water, light and nutrients, causing yield and quality losses [68]. Weeds are very dense and common in areas with suitable temperature and moisture conditions. Depending on various abiotic and biotic factors such as temperature and crop system, weed density varies, but weeds continue to cause damage in infested areas every year. Among 250.000 identified plants in the world 8000 have been recognized as weeds and of these 250 were included in the list of most harmful pests [20], [21]. Unless there is no interference by humans, animals, microorganisms and other plants weeds have high adaptation potential to newly introduced environments [69]. Furthermore, some pests and pathogens overwinter and survive on weed plants. A dense weed population complicates agriculture and increases production expenditures [43]. Weeds also may interfere with the harvested product and endanger human and animal health.

Weeds produce toxic derivatives like phenolic acids, glycosides, terpenoids, alkaloids, terpenes and flavonoids may have detrimental effect on soil microorganisms and crop plants [48]. Allelochemicals play four different roles in increasing or decreasing nematode density; 1) Release of nematicidal secretions from roots that kill nematodes, inhibit nematode movement, affect physiological and biological parameters like egg hatching; 2) Release of nematode suppressing substance after decomposition of weed residues in the soil; 3) Increase of microorganisms antagonistic to nematodes due to improvement of soil organic matter through weed residues and secretions; 4) Alteration of host plant defense system due to promotion or inhibition of plant growth by allelochemicals [8].

Nematicidal Allelochemicals

Nematicidal weeds mostly belonged to Asteraceae, Compositae, Fabaceae and Brassicaceae families. Glucosinolates, saponins, limonoid triterpenes, essential oils, polyphenols, alkaloids, phenolics, flavonoids, tannins, cyanogenic glycosides are the main groups of nematicidal compounds produced by weeds.

- Glucosinolates

The order Brassica includes 3000 plant species belonging to 350 genera. Species in this order produce glucosinolate secondary metabolites that enable plants to protect themselves from biotic and abiotic stress conditions. Furthermore, glucosinolates were found in about 500 dicotyledonous species which are not belonged to Brassica [25]. These are accumulated in the leaf, root, seed and stems of plants from Caricaceae, Resedaceae, Akaniaceae, Brassicaceae, Bataceae, Capparidaceae, Gyrostemonaceae, Moringaceae, Limnanthaceae, Tropaeolaceae

Pentadiplandraceae, Salvadoraceae, Tovariaceae, Koeberliniaceae, Cleomaceae, Emblingiaceae, and Setchellanthaceae families [37]. The number of glucosinolates is higher in Brassicales which contain more than 80% [22]. Glucosinolates (GSL) are secondary metabolites containing S and N. These metabolites are composed of sulfonated oxime and β -thioglucose [70]. It is an organic anion (Figure 1). When glucosinolates are hydrolyzed by the myrosinase enzyme in plants, chemicals such as isothiocyanate, thiocyanate and nitrile are released. Hydrolysis occurs after cell disruption due to severe plant damage. All these compound have biopesticidal impacts on nematodes, pathogens and harmful organisms. Because of these properties, these plants are also called biofumigants ([39]; [66]; [71]).

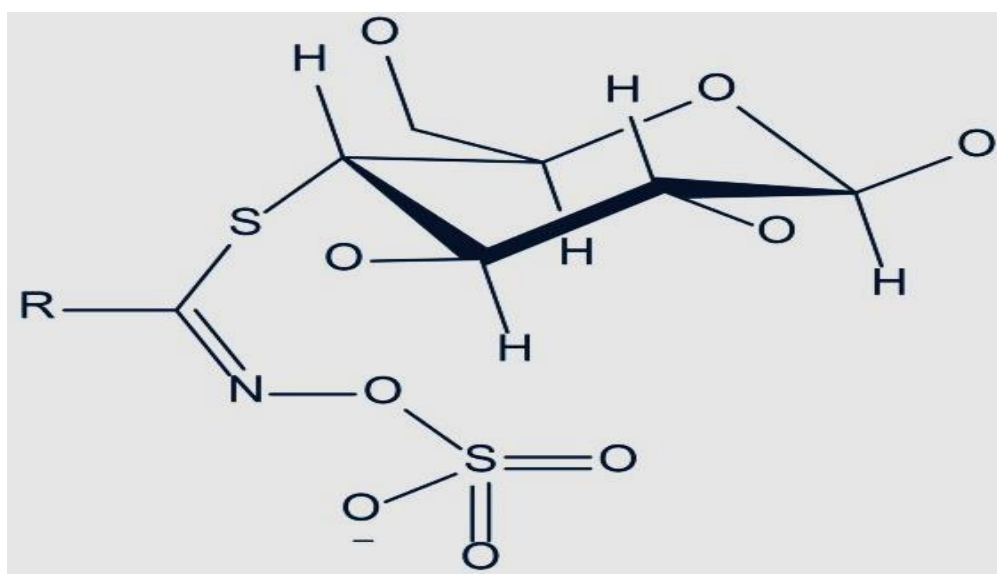


Figure 1. Structure of glucosinolates [9]

GSL, has a function in the defense against fungi and pests, regulation of growth, regulation of nitrogen and sulfur metabolism. It also plays a role in plant defense against heat-related stress effects. More than 130 different compounds were identified belonging to the group of glucosinolates and they are divided into three groups as aliphatic, indole, and aromatic glucosinolates. The nematode suppressive substances called isothiocyanates are released by aliphatic and aromatic glucosinolates. Indole glucosinolates have no ability to produce isothiocyanates ([72]; [2]).

The suppressive effect of *Brassicales* crops (*Brassica napus*, *Brassica hirta*, *Raphanus sativus* L. ssp. *oleiformis*, *Eruca sativa* L.) species has been investigated for years and experiments with these plants have yielded promising results regarding their use as an alternative bio-

nematicide to synthetic chemicals. The significant nematode reduction was observed in *Xiphinema index*, *X. americanum*, *Goboderia rostochiensis*, *G. pallida*, *Meloidogyne incognita*, *M. hapla*, *M. javanica*, *M. chitwoodi*, *Tylenchus semipenetrans*, *Pratylenchus penetrans*, *P. neglectus*, *Heterodera carotae* ([40]; [51]; [59]; [33]; [56]; [7]; [24]). Common glucosinolates with nematicidal potential include gluconapin, progoitrin, sinigrin, glucoraphanin, glucocapparin, gluconasturtin, glucolepdiin, grucin, glucoiberin, glucotropeolin, sinalbin, epi-progoitrin, ([59]; [7]). In many studies, it has been revealed that many weeds from the brassica order, as well as cultivated plants, have nematidal potential.

- Saponins

Saponins are secondary metabolites divided to two groups based on steroid or triterpenoid aglycone content. In saponins steroids or triterpenoids are attached via three carbons of sapogenin (Figure 2). More than 50.000 plants have been reported to possess saponins in their seeds, flowers, leaves, stems and fruit. The highest level of these compounds was measured in legume crops [18].

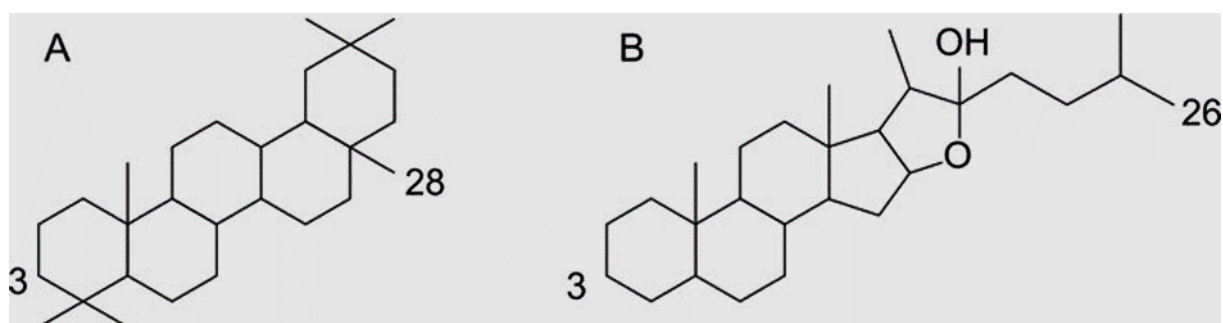


Figure 2. Structure of saponins A: Triterpenoid B: Steroidal saponins (Kreigel et al., 2017).

Until now 150 different natural saponins were revealed in plants and they were grouped into 11 classes including tirucallanes, cycloartanes, cucurbitanes, dammaranes, lupanes, oleananes, hopanes, ursanes, taraxasteranes, lanostanes and steroids [35]. Saponins have been isolated from some plants belonging to families like Leguminosae, Agavaceae, Caryophyllaceae, Amarathaceae, Apiaceae, Araliaceae, Chenopodiaceae, Euphorbiaceae, Rosaceae, Prumulaceae, Poaceae, Liliaceae, Convolvulaceae, Fabaceae, Scrophulariaceae and Solanaceae. The distribution of saponins vary among different plants. In some plants, saponins accumulate in the root phloem, while in some in the epidermal cell membrane or the periderm and outer cambium tissue of the root [17]. Species from the *Medicago* genus have higher saponin content and contain 95 saponin species which belonged to triterpene glycosides, steroid alkaloid glycosides, and steroid glycosides groups [57]. The nematicidal potential of *Medicago*

arborea, *M. heyniiana* Greuter, *M. lupulina* L. and *M. truncatula* Gaertn., *M. arabica*, *M. hybrida* (Pourr.) Trautv., *M. murex* Willd and *M. sativa* against *Meloidogyne incognita*, *Xiphinema index*, *H. Carotae* and *Gobodera rostochiensis* were demonstrated in several studies. These secondary metabolites are found to affect cell permeability of mature or juvenile nematodes and decrease cholesterol levels of eggs [6]; [23].

- Limonoid triterpenes

Limonoids are formed after an alteration of triterpenes. Families belonging to Cneoraceae Rutaceae, Cucurbitaceae, Simaroubaceae and Meliceae contain a higher amount of limonoids (Figure 3). The number of limonoids identified across the world reached 227 and these belonged to plants from 21 families [49]. *Azadrachta indica* A. Juss neem tree was the most studied plant that carried more than 100 limonoids such as salannin, mahmoudin, gedunin, nimbolide, azadirachtin, nimbidin, sodium nimbidate and nimbin ([73]; [31]). These compounds are accumulated in leaves, seeds, stem, bark and fruits of plants [14].

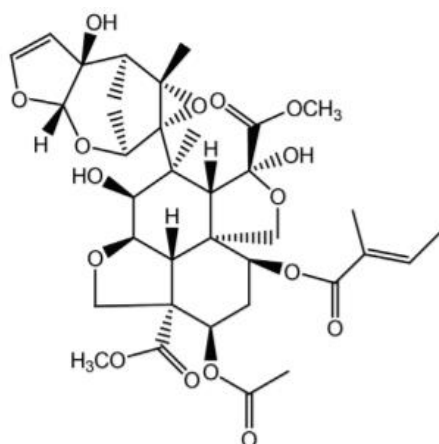


Figure 3. Structure of azadirachtin [42].

The nematicidal effect of azadirachtin from neem was revealed in several studies. The suppressive impact was determined on *Heterodera jacani*, *Heterodera glycines*, *Meloidogyne incognita* and some other nematode species ([41]; [55]; [34]).

- Essential oils

Essential oils (EOs) are secondary metabolites produced by plants belonging to families such as Myrtaceae, Apiaceae, Burseraceae, Asteraceae, Laurenceae, Lamiaceae, Zingiberaceae, Poacea and Pinaceae. The plants from genera *Thymus*, *Mentha*, *Artemisia*, *Cympogon*, *Ocimum*, *Lavandula*, *Oreganum*, *Rosmarinus*, *Melaleuca*, *Citrus*, *Eucalyptus* and *Eugenia* contain higher amount of essential oils. Essential oils contain non-polar and polar compounds (Figure 4).

These secondary metabolites are classified into four groups like Phenylpropanoids, terpenes, sulphur or nitrogen containing compounds, straight chain compounds.

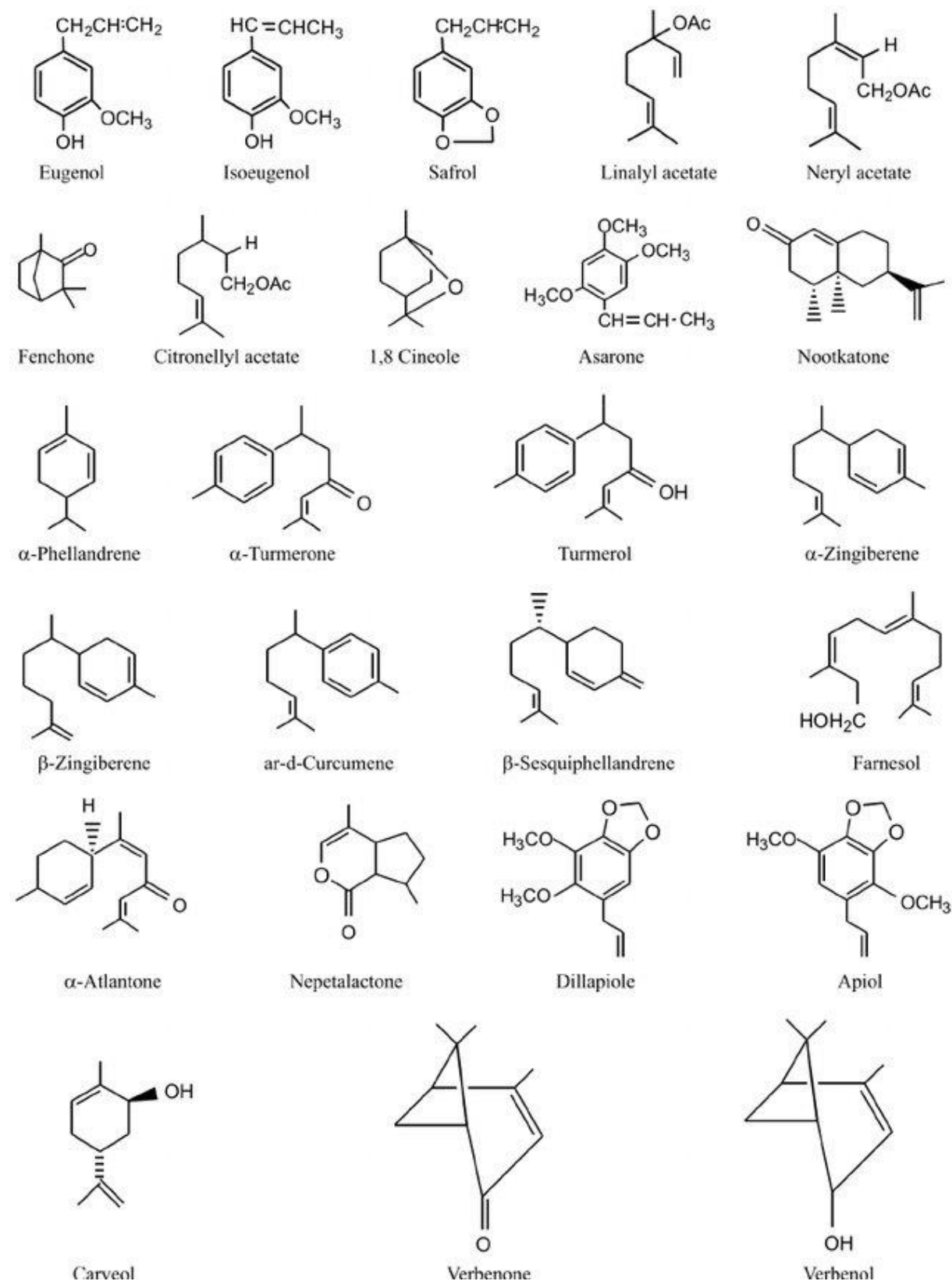


Figure 4. Structure of essential oils [29].

The impact of these compounds on nematodes was investigated and results indicated the nematicidal potential of several plants. Root-knot nematode *Meloidogyne* spp. was successfully suppressed by oils from *Mentha rotundifolia*, *Carum carvi*, *Foeniculum vulgare* and *Mentha spicata* plants [46]. More than 310 plant species like *Artemisia arborescens*, *Boswellia carterii*, *Cymbopogon citrates*, *Cinnamomum zeylanicum*, *Coriandrum sativum*, *Zingiber officinalis*, *Origanum vulgare*, *Pimenta dioica*, *Thymus vulgaris*, *Allium cepa*, *Paeonia moutan*, *Perilla frutescens*, *Schizonepeta tenuifolia*, *Pelargonium inquinans*, *Syzygium aromaticum*, *Coriandrum sativum*, *Liquidambar orientalis* and *Pimpinella anisum* decreased *Bursaphelenchus xylophilus* nematode populations in in-vitro studies [5].

- Polythienyls

Polythienyls are compounds accumulated in plant parts of Asteraceae family [12]. *Tagetes* spp. is the genus that accumulates polythienyls and contains plant species with nematicidal potential. *Tagetes petula* and *T. erecta* caused significant death of *Meloidogyne incognita*, *M. javanica*, *M. hapla*, *Pratylenchus penetrans*, *Globodera rostochiensis*, *Ditylenchus dipsaci*, *Narcissus tazetta* nematode individuals [12].

- Alkaloids

Alkaloids are secondary metabolites containing nitrogen (Figure 5). The alkaloid group constitutes approximately 15,000 secondary metabolites [36]. Plants from families like Solanaceae, Liliaceae, Fabaceae, Apocynaceae and Papaveraceae have alkaloids. The nematicidal potential of pyrrolizidine alkaloids and steroidal alkaloids [12].

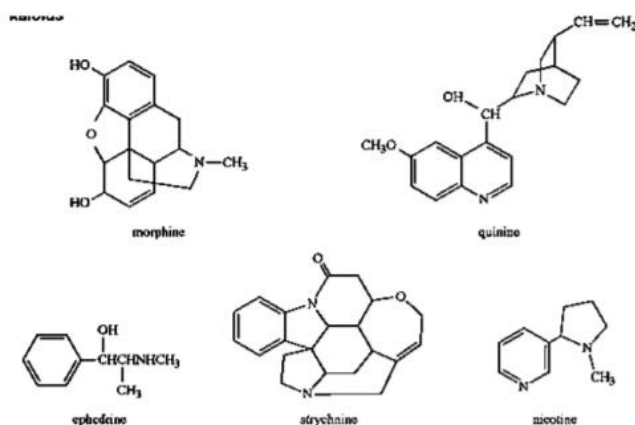
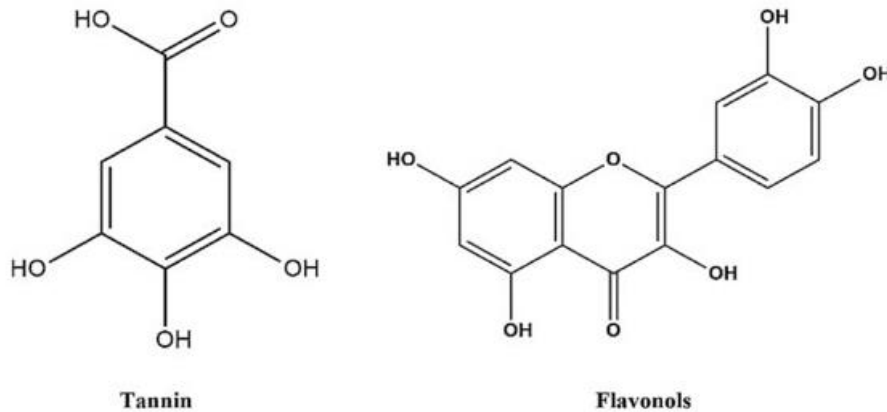
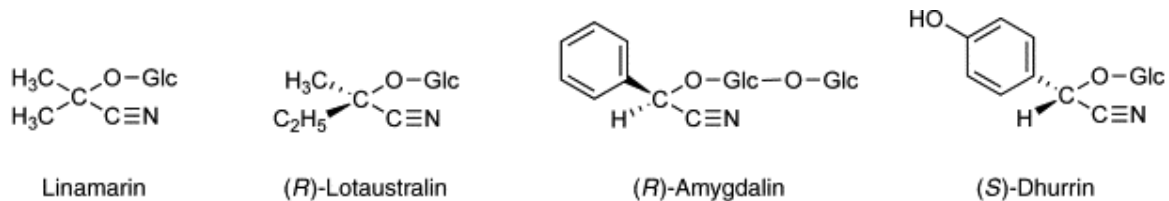


Figure 5. Structure of alkaloids [36].- **Phenolics, flavonoids, tannins, cyanogenic glycosides**

Phenolics are compounds that are present in several plant species (Figure 6). Especially phenolics from this group have nematicidal potential on several nematode species [45]. Compounds like tannic acid derived from plants like Chesnut showed nematicidal activity on *Meloidogyne* species [12].

**Figure 6.** Structure of tannins and flavonoids [26].

Cyanogenic glucosides are aminoacids that release cyanids (Figure 7). Plants like *Sorghum sudanense* contain cyanogenic glucosides and suppress many nematode species [12].

**Figure 7.** Structure of cyanogenic glucosides [74].

All secondary metabolite groups described in the previous part of this manuscript are present in several weed species and these weeds were found to have nematode inhibitory potential. The list of weeds with nematicidal potential were given in Table 1.

Conclusion

Plant derivatives secondary metabolites provides ecofriendly and low cost nematode suppression. In addition the use of plant secretions have potential to improve soil structure and

plant growth. In this review major groups of secondary metabolites are discussed and nematode suppressive potentials are explained with samples.

Table 1. Some weeds with nematidical potential

Weed latin name	Common name	Target nematode species	Literature
<i>Acalypha indica</i> L.	Indian copperleaf	<i>Meloidogyne incognita</i>	[27]
<i>Acanthospermum hispidum</i> DC	Bristly starbur	<i>Meloidogyne incognita</i>	[10]
<i>Achyranthes aspera</i> L.	Chaff flower	<i>Meloidogyne incognita</i>	[27]
<i>Aerva persica</i> (Burm.fil.) Merr	-	<i>Meloidogyne incognita</i>	[10]
<i>Argemone mexicana</i> L.	Mexican poppy	<i>Meloidogyne incognita</i>	[27]
<i>Armoracia rusticana</i> P.Gaertn.,Mey and Sherb.	Horse radish	<i>Meloidogyne incognita</i>	[4]
<i>Artemisia judaica</i> L.	Judean wormwood	<i>Meloidogyne javanica</i>	[46]
<i>Artemisia dracuncululus</i> L.	Tarragon	<i>Meloidogyne javanica</i>	[28]
<i>Asparagus</i> spp.	Sparagus fern	<i>Meloidogyne incognita</i>	[12]
<i>Barbarea verna</i> (Mill)Asch	Early yellow-rocket	<i>Meloidogyne incognita</i>	[15]
<i>Bidens pillosa</i> L.	blackjack	<i>Meloidogyne incognita</i>	[10]
<i>Brassica juncea</i> L.	Wild mustard	<i>Meloidogyne incognita</i> , <i>Meloidogyne javanica</i> <i>Globodera pallida</i> , <i>Pratylenchus neglectus</i> ,	[53]; [47]; [44]
<i>Brassica tournefortii</i> Gouan	African mustard	<i>Pratylenchus penetrans</i> , <i>Meloidogyne chitwoodi</i>	[51]; [13]
<i>Brassica oxyrrhina</i> Cos (Wilk)	Smooth-stemmed turnip	<i>Pratylenchus penetrans</i> , <i>Meloidogyne chitwoodi</i> , <i>Pratylenchus neglectus</i>	[51]; [13]
<i>Calotropis procera</i> (Aiton) W. T. Aiton	Calotrope	<i>Tylenchulus semipenetrans</i>	[3]
<i>Capparis spinosa</i> L.	Caper bush	<i>Meloidogyne incognita</i>	[75]
<i>Chenopodium ambrosioides</i> L.	Mexican tea	<i>Meloidogyne incognita</i>	[76]
<i>Cleome viscosa</i> L.	Asian spiderflower	<i>Meloidogyne incognita</i>	[77]
<i>Cymbopogon martinii</i> (Roxb.) J.F.Watson	Palmarosa	<i>Meloidogyne incognita</i>	[77]
<i>Chrysanthemum coronarium</i> L.	Crown daisy	<i>Meloidogyne artiellia</i>	[50]
<i>Datura alba</i>	Angel's trumpet	<i>Tylenchulus semipenetrans</i>	[3]
<i>Datura stramonium</i> W.	Jimson weed	<i>Globodera rostochiensis</i> <i>Meloidogyne incognita</i>	[10]
<i>Descurainia sophia</i> (L.) Webb ex Prantl	Flixweed	<i>Meloidogyne javanica</i>	[78]

<i>Flaveria trinervia</i> (Spreng.) Mohr.	Gaika weed	<i>Meloidogyne incognita</i>	[10]
<i>Glycyrrhiza glabra</i>	Licorice	<i>Meloidogyne</i> spp.	[19]
<i>Heliotropium indicum</i> L.	Indian heliotrope	<i>Meloidogyne incognita</i>	[10]
<i>Lepidium draba</i> L.	Hoary cress	<i>Tylenchulus semipenetrans</i>	[38]
<i>Lippia juneliana</i> L.	-	<i>Meloidogyne</i> spp	[79]
<i>Lippia turbinata</i> Griseb.	-	<i>Meloidogyne</i> spp	[79]
<i>Mentha pulegium</i>	Penroyal	<i>Meloidogyne incognita</i>	[45]
<i>Melissa officinalis</i> L.	Common balm	<i>Meloidogyne incognita</i>	[45]
<i>Nasturtium officinale</i> R. Br.	Watercress	<i>Meloidogyne hapla</i>	[60]
<i>Ononis natrix</i> L.	Yellow Restharrow	<i>Meloidogyne</i> spp.	[16]
<i>Peganum harmala</i> L.	Syrian rue	<i>Meloidogyne</i> spp.	[16]
<i>Raphanus raphanistrum</i> L.	Wild radish	<i>Meloidogyne incognita</i>	[80]
<i>Ricinis communis</i>	Castor bean	<i>Meloidogyne incognita</i>	[51]; [13]
<i>Ruta chalepensis</i> L.	-	<i>Meloidogyne incognita</i> , <i>Meloidogyne javanica</i>	[45]
<i>Senna tora</i>	Sickle senna	<i>Meloidogyne incognita</i>	[10]
<i>Sinapis arvensis</i> subsp. <i>arvensis</i>	Wild mustard	<i>Xiphinema index</i> , <i>Pratylenchus penetrans</i> , <i>Meloidogyne chitwoodi</i> <i>Rotylenchulus reniformis</i> <i>Meloidogyne incognita</i>	[1]; [80]
<i>Sinapis alba</i>	White mustard	<i>Pratylenchus penetrans</i> , <i>Meloidogyne chitwoodi</i>	[13]
<i>Sisymbrium irio</i>	London rocket	<i>Rotylenchulus reniformis</i> , <i>Meloidogyne incognita</i>	[52]
<i>Xanthium strumarium</i> L.	Cocklebur	<i>Meloidogyne incognita</i>	[10]

DECLARATION OF COMPETING INTEREST

The authors declare that there are no conflict of interest.

CREDIT AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT

Lerzan Öztürk: carried out reviewing and final edition of the manuscript

Bahadır ŞİN: carried out literature review writing and editing of manuscript.

References

- [1] Aballay E., Parraguez A. and Insunza V. (2005). Nematicidal evaluation of five plant species incorporated into the soil as organic matter on the population of *Xiphinema index* in *Vitis vinifera* L. cv. *Thompson Seedless*. *634 Phytopathology Fitopatología* 40:35-42.
- [2] Agerbirk N. and Olsen C.E. (2012). Glucosinolate structures in evolution. *Phytochemistry*. 77, 16-45.

- [3] Ahmad M.S., Tariq M. and Riaz A., (2004). Some studies on the control of citrus nematode (*Tylenchulus semipenetrans*) by leaf extracts of three plants and their effects on plant growth variables. *Asian Journal of Plant Sciences*, 3: 544-548.
- [4] Aissani N., Tedeschi P., Maietti A., Brandolini V., Garau V.L. and Caboni P. (2013). nematicidal activity of allylisothiocyanate from horseradish (*Armoracia rusticana*) Roots against *Meloidogyne incognita*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(20), 4723-4727. doi:10.1021/jf4008949
- [5] Andres M.F., González-Coloma A., Sanz J., Burillo J. and Sainz Sotomayor P. (2012). Nematicidal activity of essential oils: A review. *Phytochemistry Reviews*. 11. 10.1007/s11101-012-9263-3.
- [6] Argentieri M.P., D'Addabbo T., Tava A., Agostinelli A., Jurzysta M. and Avato P. (2008). Evaluation of nematicidal properties of saponins from *Medicago* spp. *Eur. J. Plant Pathol.* 120, 189-197.
- [7] Avato P., D'Addabbo T., Leonetti P. and Argentieri M., (2013). Nematicidal potential of Brassicaceae. *Phytochemistry Reviews* 12(4): 791-802. doi: 10.1007/s11101-013-9303-7.
- [8] Bittencourt H.V.H., Bonome L.T.D.S., Pagnoncelli Jr. F.D.B., Lana M.A. and Trezzi M.M., (2016). Seed germination and emergence of *Eragrostis tenuifolia* (A. Rich.) Hochst. ex Steud. in response to environmental factors. *J. Plant Protect. Res.*, 56(1), 32-38. doi: 10.1080/17429145.2016.1159342.
- [9] Castro-Torres, Ibrahim & de la O Arciniega, Minarda & Martinez-Vazquez, Mariano. (2014). Two glucosinolates and their effects related to the prevention of cholesterol gallstones: A review. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*. 13. 1-9.
- [10] Chaudhary K.K., Haile A., Ayresea Z. G., Semereab G., and Weldegergish T. (2013). Nematicidal activity of Eritrean weed plants against the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* (Kofoid and White) Chitwood. *Nematropica* 43:207-.215
- [11] Cheng, F. and Cheng, Z. (2015) Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy. *Front. Plant Sci.* 6:1020. doi: 10.3389/fpls.2015.01020
- [12] Chitwood D.J. (2002). Phytochemical based strategies for nematode control. *Ann. Rev. Phytopathol.* 40:221-49.
- [13] Golec C. and Franco A. (2019). In vitro study on the nematicidal effect of different plant extracts on *Pratylenchus penetrans* and *Meloidogyne chitwoodi*. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(3), 8945-8952. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n3.76070>
- [14] Drijfhout F.P., and Morgan E. (2010). Terrestrial natural products as antifeedants. *Comprehensive Natural Products II*, 457–501. doi:10.1016/b978-008045382-8.00103-9.

- [15] Dutta T.K., Khan M.R., and Phani V. (2019). Plant-parasitic nematode management via biofumigation using Brassica and non-brassica plants: Current status and future prospects. *Current Plant Biology*, 17, 17–32. doi:10.1016/j.cpb.2019.02.001
- [16] El Allagui N, Tahrouch S, Bourijate M, Hatimi A (2007) Action of plant extracts on root-knot nematods (*Meloidogyne* spp.) mortality 503. *Acta Bot Gallica* 154:503–509
- [17] Faizal A. and Geelen D. (2013). Saponins and their role in biological processes in plants. *Phytochemistry Reviews*. 12. 10.1007/s11101-013-9322-4.
- [18] Faisal, M., Saeed, A., & Shahzad, D. (2019). Portrait of the synthesis of some potent anti-inflammatory natural products. *Discovery and Development of Anti-Inflammatory Agents from Natural Products*, 141–183. doi:10.1016/b978-0-12-816992-6.00005-x
- [19] Haroon S.A., Hassan B.A.A., Hamad F.M.I. (2018). The efficiency of some natural alternatives in root-knot nematode control. *Adv Plants Agric Res.* 8(4):355-362. DOI: [10.15406/apar.2018.08.00337](https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00337)
- [20] Holm L.G., Donald P., Pancho J.V. and Herberger J.P, (1977). The World's worst weeds: Distribution and biology. *The University Press of Hawaii, Honolulu, Hawaii.* 609 pp.
- [21] Holm L. (1978) Some characteristics of weed problems in two worlds, *Proc. Western Soc. Weed Sci.* 31, 3–12.
- [22] Holst, B., & Fenwick, G. R. (2003). Glucosinolates. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 2922–2930. doi:10.1016/b0-12-227055-x/00561-7
- [23] Ibrahim M.A. and Srour H.A (2013). Saponins suppress nematode cholesterol biosynthesis and inhibit root knot nematode development in tomato seedlings. *Nat. Prod. Chem. Res.* 2013, 2, 1–4.
- [24] Jing, G. N., & Halbrecht, J. M. (1994). Nematicidal compounds from rapeseed (*Brassica napus* and *B. campestris*). *Journal of the Pennsylvania Academy of Science*, 68(1), 29–33. <http://www.jstor.org/stable/44148985>
- [25] Karavina C., Kamota A., Mandumbu R., Parwada C., Mugwati I. and Masamha B. (2015). Nematicidal effects of Brassica formulations against root knot nematodes (*Meloidogyne javanica*) In Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). 27. 2015-109.
- [26] Kassie F. and Knasmüller S. (2004) Glucosinolates and the prevention of cancer. In: Remacle C, Reusens B (eds) *Functional foods, ageing and degenerative diseases.* Woodhead Publishing Limited CRC, Boca Raton, pp. 615-7
- [27] Kavitha V., Kandasubramanian B. (2020). Tannins for wastewater treatment. *SN Applied Sciences*. 2. 10.1007/s42452-020-2879-9.
- [28] Khan A., Mohd A., Moh T., Bushra R., Kavita P. and Mansoor A.S. (2017). Phytochemical investigation, nematostatic and nematicidal potential of weeds extract against the root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* In Vitro. *Asian Journal of Biological Sciences*, 10: 38-46.

- [29] Klein E., Katan J., Gamliel A. (2011) Combining residues of herb crops with soil heating for control of soilborne pathogens in a controlled laboratory system. *Crop Prot* 30:368–374.
- [30] Koul O. (2008). Essential oils as green pesticides: Potential and Constraints. *Biopesticides International*. 4. 63-84.
- [31] Kruse, M., Strandberg, M. and Strandberg, B. (2000). Ecological effects of allelopathic plants – A Review. National Environmental Research Institute, Silkeborg, Denmark. 66 pp. – NERI Technical Report No. 315.
- [32] Kumar R., Mehta S. and Pathak S.R. (2018). Bioactive constituents of neem. Synthesis of Medicinal Agents from Plants, 75–103. doi:10.1016/b978-0-08-102071-5.00004-0
- [33] Liliane T.N. and Charles M.S. (2020). Factors Affecting Yield of Crops. Factors Affecting Yield of Crops. *Agron. Clim. Chang. Food Secur.* 1–16. doi:10.5772/intechopen.90672
- [34] Lord J., Lazzeri L., Atkinson H. and Urwin P. (2011). Biofumigation for control of pale potato cyst nematodes: Activity of brassica leaf extracts and green manures on *Globodera pallida* in vitro and in soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59(14): 7882-7890. doi: 10.1021/jf200925k
- [35] Lynn, Ohn Mar & Song, Woo-Geun & Shim, Jae-Kyoung & Kim, Jang-Eok & Lee, Kyeong-Yeoll. (2010). Effects of azadirachtin and neem-based formulations for the control of sweetpotato whitefly and root-knot nematode. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*. 53. 10.3839/jksabc.2010.092.
- [36] Man S, Gao W, Zhang Y, Huang L, Liu C. (2010). Chemical study and medical application of saponins as anti-cancer agents. *Fitoterapia*. 81(7):703-14. doi: 10.1016/j.fitote.2010.06.004. Epub 2010 Jun 13. PMID: 20550961.
- [37] Mendoza N. and Escamilla-Silva E. (2018). Introduction to phytochemicals: secondary metabolites from plants with active principles for pharmacological importance. 10.5772/intechopen.78226.
- [38] Merillon J.M., Ramawat K.G. (2017). Advances in botanical research: Glucosinolates. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 473
- [39] Mohammad H.Y., Husain S.I. and Al-Zarari A.J. (1981). Effect of plant extracts of some poisonous plants of Iraq on mortality of the citrus nematode *Tylenchulus semipenetrans*.
- [40] Mojtahedi H., Santo G.S., Hang A.N., Wilson J.H. (1991) Suppression of root-knot nematodes with selected rapeseed cultivars as green manures. *J Nematol* 23:170–174 *Acta Bot. Indica* 9: 198-200.
- [41] Mojtahedi H., Santo G.S., Wilson J.H. and Hang A.N. (1993). Managing *Meloidogyne chitwoodi* on potato with rapeseed as green manure. *Plant Disease* 77(1): 42-46. doi: 10.1094/PD-77-0042

- [42] Mojumder V, Raman R. (1999). Nematicidal efficacy of Neema-SI, an experimental formulation for neem seed treatment against *Heterodera cajani* and *Meloidogyne incognita* in cowpea and chick-pea, respectively. In: Singh R.P and Saxena R.C. (Eds.), *Azadiractaindica A. Juss. Science Publ. Inc., Enfield, NH, USA*, pp 217-222
- [43] Mpumi N., Mtei K., Machunda R. and Ndakidemi P. (2016). The Toxicity, Persistence and Mode of Actions of Selected Botanical Pesticides in Africa against Insect Pests in Common Beans, *P. vulgaris* : A Review. *American Journal of Plant Sciences*. 07. 138-151. 10.4236/ajps.2016.71015.
- [44] Nasr N., Hajar B. and Miyandeh B.H. (2013). Weeds identification in west of Mazandaran Province Citrus Orchards (Iran). *American Journal of Research Communication*, 1(6):27-38.
- [45] Ngala B.M., Haydock P.P., Woods S. and Back M.A. (2015). Biofumigation with *Brassica juncea*, *Raphanus sativus* and *Eruca sativa* for the management of field populations of the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Pest Management Science* 71:759-769.
- [46] Ntalli N.G., Manconi F., Leonti M., Maxia A., Caboni P. (2011) Aliphatic ketones from *Ruta chalepensis* (Rutaceae) induce paralysis on root knot nematodes. *J Agric Food Chem* 59:7098–7103.
- [47] Oka Y, Nacar S, Putievsky E, Ravid U, Yaniv Z, Spiegel Y (2000) Nematicidal activity of essential oils and their components against the root-knot nematode. *Phytopathology* 90:710–715
- [48] Oliveira R.D., Dhingra O.D., Lima A.O., Jham G.N., Berhow M.A., Holloway R.K. and Vaughn S.F. (2010). Glucosinolate content and nematicidal activity of Brazilian wild mustard tissues against *Meloidogyne incognita* in tomato. *Plant and Soil*, 341, 155-164.
- [49] Oplos C., Eloh K., Spiroudi U.M., Pierluigi C. and Ntalli N. (2018). Nematicidal Weeds, *Solanum nigrum* and *Datura stramonium*. *Journal of nematology*, 50(3), 317–328. <https://doi.org/10.21307/jofnem-2018-017>
- [50] Passos, M., Nogueira, T.S.R., Azevedo, O. et al. Limonoids from the genus *Trichilia* and biological activities: review. *Phytochem Rev* 20, 1055–1086 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09737-x>
- [51] Pe´rez M.P., Navas-Corte´s J.A., Pascual-Villalobos M.J., Castillo P. (2003) Nematicidal activity of essential oils and organic amendments from Asteraceae against root-knot nematodes. *Plant Pathol* 52:395–40
- [52] Potter M., Davies K. and Rathjen A. (1998). Suppressive impact of glucosinolates in *Brassica* vegetative tissues on root lesion nematode *Pratylenchus neglectus*. *Journal of Chemical Ecology* 24(1): 67-80. doi: 10.1023/A:1022336812240
- [53] Radwan M.A., Abu-Elamayem M.M., Kassem S.M., El-Maadawy E.K. (2006) Soil amendment with dried weed leaves as non-chemical approach for the management of *Meloidogyne incognita* infecting tomato. *Commun Agric Appl Biol Sci*. 2006;71(4):25-32. PMID: 17612348.

- [54] Rahman L., and Somers, T. (2005). Suppression of root knot nematode (*Meloidogyne javanica*) after incorporation of Indian mustard cv. Nemfix as green manure and seed meal in vineyards. *Australasian Plant Pathology* 34:77-83.
- [55] Rice E.L. (1974). Allelopathy. New York: Academic Press
- [56] Rodrigues A.C., Jham G.N., Oliveira R.D., (2001). Mortality of the soybean cyst nematode in aqueous extracts of neem plant parts. *Nematol.Medit.* 29:173-5.
- [57] Serra B., Rosa E., Iori R., Barillari J., Cardoso A., Abreu C. and Rollin P. (2002). In vitro activity of 2-phenylethyl glucosinolate, and its hydrolysis derivatives on the root-knot nematode *Globodera rostochiensis* (Woll.). *Scientia Horticulturae* 92(1): 75-81. doi: 10.1016/S0304-4238(01)00277-1.
- [58] Wang G., Wang J., Liu W., Nisar F. M., El-Esawi M. A., Wan C. (2021), "Biological activities and chemistry of triterpene saponins from *Medicago* Species: An Update Review", Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, vol. 2021, 11 pages, . <https://doi.org/10.1155/2021/6617916>
- [59] Wato T. (2020). The role of allelopathy in pest management and crop production. *Food Science and Quality Management*, 13–21. doi: 10.7176/FSQM/93-02
- [60] Zasada I and Ferris H. 2003. Sensitivity of *Meloidogyne javanica* and *Tylenchulus semipenetrans* to isothiocyanates in laboratory assays. *Nematology* 93(6): 747-750. doi: 10.1094/PHYTO.2003.93.6.747
- [61] Zahradníková, Helena & Petříková, Kristína. (2013). Nematocid effects of watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.). *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 61. 233-236. 10.11118/actaun201361010233
- [62] Luc M., Bridge J. and Sikora RA. (2005). Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture, 2nd eds. CAB International, Wallingford, UK.
- [63] Singh K.S., Paini R.D., Ash. J.G. and Hodda M. (2013). Prioritising plant-parasitic nematode species biosecurity risks using self-organising maps. *Biological Invasions*.
- [64] Decraemer W. and Hunt D.J. (2006). "Structure and classification". In: Perry, R.N. and Moens, M. (eds) *Plant Nematology*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 3–32.
- [65] Lambert, K. & Bekal S. (2002). Introduction to plant-parasitic nematodes. *The Plant Health Instructor*. DOI: 10.1094/PHI-I-2002-1218-01
- [66] Melakeberhan H., Jones A.L. and Bird G.W. (2000). Effects of soil pH and *Pratylenchus penetrans* on the pathogenesis of *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* and Mazzard seedling mortality. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 22: 131-137.
- [67] Brown P. and Matthew M. (1997). Control of Soil-Borne Plant Pests Using Glucosinolate-Containing Plants. *Advances in Agronomy - ADVAN AGRON.* 61. 167-231. 10.1016/S0065-2113(08)60664-1.

- [68] Halbrecht J.M. (1996). Allelopathy in the management of plant parasitic nematodes. *J. Nematol.*, 28(1): 8–14.
- [69] Edwards R. and Hannah M. (2014). Focus on weed control. *Plant Physiology*, 166(3), 1087–1089. <http://doi.org/10.1104/pp.114.900496>
- [70] Özer Z., Önen H. Tursun, N. and Uygur F.N. (1999). Türkiye'nin bazı önemli yabancı otları (Tanımları ve kimyasal savaşmaları)/ Some important weeds of Turkey (Definition and Chemical Management).
- [71] Malka S.K. and Cheng Y. (2017). Possible interactions between the biosynthetic pathways of indole glucosinolate and auxin. *Front. Plant Sci.* 8:2131. doi: 10.3389/fpls.2017.02131
- [72] Haramoto E. and Gallandt E. (2004). Brassica cover cropping for weed management: A review. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 19. 187 - 198. 10.1079/RAFS200490.
- [73] Ludwig-Müller J., Krishna P. and Forreiter C. (2000). A glucosinolate mutant of *Arabidopsis* is thermosensitive and defective in cytosolic Hsp90 expression after heat stress. *Plant physiology*, 123(3), 949–958. <https://doi.org/10.1104/pp.123.3.949>
- [74] Akhtar M. and Malik A. (2000). Roles of organic soil amendments and soil organisms in biological control of plant parasitic nematodes: A review. *Bioresource Technology*, 74: 35-47.
- [75] Yamane H., Konno K., Sabelis M., Takabayashi J., Sassa T. and Oikawa H. (2010). Chemical defence and toxins of plants. *Journal of Hospital Infection*. 4. 339-385. 10.1016/B978-008045382-8.00099-X.
- [76] Caboni P., Giorgia S., Nadhem A., Graziella T., Nicola S., Barbara L., Annarosa C. and Alberto A. (2012). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60 (30), 7345-7351 DOI: 10.1021/jf302075w
- [77] Chuan B., Liu Z. and Qi-zhi L. (2011). Nematicidal constituents from the essential oil of *Chenopodium ambrosioides* aerial parts. *Journal of Chemistry*. 8. 10.1155/2011/470862.
- [78] Williams L.A., Vasques E., Reid W., Porter R., Kraus W. (2003). Biological activities of an extract from *Cleome viscosa* L. (Capparaceae). *Naturwissenschaften* ;90(10):468-72. doi: 10.1007/s00114-003-0460-1. Epub PMID: 14564407.
- [79] Soheili A. and Saedizadeh A. (2017). Suppression of Brassicaceous tissue on *Meloidogyne javanica* in a rhizosphere. *International Journal of Agriculture and Biology*. 19. 1012-1018. 10.17957/IJAB/15.0400.
- [80] Duschatzky C., Martinez A., Almeida N., Bonivardo S. (2004). Nematicidal activity of the essential oils of several argentina plants against the root-knot nematode. *Journal of Essential Oil Research* 16. 626-628. 10.1080/10412905.2004.9698812.
- [81] Zaidat S.A.E., Mouhouche F., Djaafar B., Nesma A., de Cara M. and Hammache M. (2020). Nematicidal activity of aqueous and organic extracts of local plants against *Meloidogyne incognita* (Kofoid and White) Chitwood in Algeria under laboratory and greenhouse conditions. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*. 30. 10.1186/s41938-020-00242-z



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Review Article

Journal of Agricultural Biotechnology (JOINABT) 2(2), 97-104, 2021

Received: 10-Dec-2021 Accepted: 29-Dec-2021



SAKARYA UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

Kültürü Yapılan Bazı Tarla Bitkilerinde Allelopatik Etkinin Değerlendirilmesi

Mustafa YILMAZ^{1*} , Melike KÖSE¹ 

¹ Tarla Bitkileri Bölümü, Ziraat Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

ÖZ

Allelopati çoğunlukla bir bitkinin diğer organizmalar üzerinde gösterdiği olumsuz yönde etki olarak bilinmesine karşın olumlu yönde etkisinin de bulunduğu kanıtlanmıştır. Allelopati etmeni olan allelokimyasallar, hem türiçi (ototoksik) hemde türlerarası (heterotoksik) etki gösterebilmektedir. Olumlu yönde etkisi münavebe sistemlerinde ve verim artışı hususunda, olumsuz yönde etkisi ise doğal mücadele yöntemi olarak yabancı ot, hastalık ve zararlıların kontrolünde önemli role sahiptir. Bu çalışmada; kültüre alınmış bazı tarla bitkileri üzerinde allelopatik etkiler incelenmiş, geçmişten günümüze allelopati üzerine yapılan çalışmalar derlenmiş ve değerlendirilmiştir. Bitki yetiştiriciliği yapılırken; çeşit özelliği, iklim faktörleri, toprak bileşenleri gibi ana etmenlerin yanı sıra allelopatik etkininde göz önünde bulundurulması gerektiğine dikkat çekilmiş ve yapılacak olan çalışmalara temel oluşturulması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Allelokimyasallar, doğal mücadele, ekolojik faktörler

Evaluation of Allelopathic Effect in Some Cultivated Field Crops

ABSTRACT

Although allelopathy is mostly known as the negative effect of a plant on other organisms, it has also been proven that it has a positive effect. Allelochemicals that cause allelopathy can have both intraspecific (ototoxic) and interspecies (heterotoxic) effects. Its positive effect has an important role in rotation systems and yield increase, its negative effect has an important role in the control of weeds, diseases and pests as a natural control method. In this study; Allelopathic effects on some cultivated field crops were examined, studies on allelopathy from the past to the present were compiled and evaluated. In agronomy; In addition to the main factors such as variety characteristics, climatic factors, soil components, attention was drawn to the allelopathic effect and it was aimed to form the basis for the studies to be carried out.

Keywords: Allelochemicals, natural struggle, ecological factors

* Mustafa YILMAZ, mustafayilmaz@subu.edu.tr

1. Giriş

Artan Dünya nüfusunun gıda ihtiyacının karşılanabilmesi için birim alandan alınacak verimi arttırmak tarımın öncelikli hedefleri arasındadır [1]. Fakat yetiştiricilik yapılan alanlarda hastalık, zararlı ve yabancı ot gibi çeşitli faktörlerin etkisiyle verim kayıpları yaşanmaktadır. Dünya’da üretimi yapılan bütün tarımsal ürünlerin %13,7’sinin zararlı etmenlerinden, %11,6’sının hastalık etmenlerinden ve %9,5’inin de yabancı otlardan dolayı kaybedildiği bildirilmiştir [2]. Bu kayıpları en aza indirmek için kullanılan çok sayıda kimyasal madde tarımda bağımlılık haline gelmiştir. Ekonomik açıdan girdi maliyetinin artmasının yanı sıra toprak yapısına ve mikroorganizma faaliyetlerine de olumsuz yönde etki ederek doğal dengeye müdahale edilmektedir [3]. Bunu önlemek için doğal yöntemlerle mücadeleye olan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Agronominin henüz genç dallarından biri olan allelopati de, doğal yöntemlerle mücadelede ön plana çıkan alternatif bir çözüm kaynağıdır [4, 5]. Allelopati terimi ilk olarak 1937’de Hans Molisch tarafından iki Yunanca kökenli “Allelo” ve “Pathos” kelimelerinin birleşimiyle ortaya çıkmış olup, organizmaların karşılıklı acı çekmesi olarak tanımlanmıştır [6]. Molisch’in tanımlamasına dayalı olarak 1984 yılında bu terim Rice tarafından; bir bitkinin çeşitli aksamlarından kimyasalların çevreye salınımıyla mikroorganizmalar da dahil olmak üzere diğer canlıların üzerinde dolaylı ya da direkt olarak olumlu veya olumsuz etkisi olarak revize edilmiştir [7, 8]. Allelopatik etki alanındaki gelişmeler başlangıçta oldukça yavaş ilerlese de özellikle Rice’ın kapsamlı çalışmaları sonucu büyük ilerleme kaydetmiş ve günümüzde; botanik, agronomi, toprak bilimi, ekoloji ve ormancılık gibi disiplinler arası yoğun çalışmalara konu olan bilim sanatı haline gelmiştir [9].

Organizmalarda allelopatik interaksyonlar çoğunlukla toksik etki göstermektedir. Bu olumsuz etki ototoksik ve fitotoksik etki olarak ikiye ayrılmaktadır. Ototoksik etki (türiçi toksidite); aynı tür içerisinde bir bitkinin diğer bitkinin büyüme ve gelişimini olumsuz yönde etkilemesi durumudur. Fitotoksik etki ya da heterotoksik etki (türlerarası toksidite) ise; farklı tür bitkiler arasında bir bitkinin diğer bitkinin büyüme ve gelişimini olumsuz yönde etkilemesi durumudur [10]. Allelopatik etkinin toksik etkiye oranla daha az olsa da olumlu yönde etkisi de vardır. Bir bitkinin diğer bitkinin büyüme ve gelişimine katkı sağlaması özelliğinden yararlanılarak olumlu yöndeki allelopati ekim nöbetinde ve karışık ekimde göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur [11, 12]. Allelopati; kültürü yapılan bitkiler arasında, kültürü yapılan bitki ve yabancı ot arasında, böcek ve yabancı ot arasında, mikroorganizma ve yabancı ot arasında gözlenebilmektedir [13, 14].

Bir kültür bitkisinin allelopatik etki gösterdiğini belirlemek için;

- Diğer bitkilerin gelişimi ve verimi üzerinde etki göstermesi,
- Aynı tür bitkinin monokültür yetiştiricilikte kendi büyüme ve gelişimini etkilemesi,
- Toprak bünyesinde, bitki besin maddesi alımında ve topraktaki mikroorganizma faaliyetlerinde dengesizliklere sebep olması,
- Farklı yollarla yabancı otlar üzerinde kontrolü sağlayabilmesi gibi sonuçlardan bazılarını göstermesi gerekmektedir [15, 16].

2. Allelokimyasallar

Allelopatik etkiye yol açan fitokimyasallar olarak tanımlanan allelokimyasallar; bitkinin kök, rizom, gövde, yaprak, çiçek, meyve ve tohum gibi aksamlarındaki hücrelerden sentezlenmekte ve kendi bünyesindeki hücresel faaliyetlerine zarar vermemektedir. Bu aksamlardan salgılanan allelokimyasallar sekonder bileşik ürünleri olup, sayıca çok fazla olduğundan hepsini belirlemek oldukça zordur. Bitkide bulunan bu sekonder metabolitler genellikle bitkinin büyüme ve gelişmesine etki etmeyen kimyasal maddeler olmakla birlikte hücre duvarlarında ara madde olarak görev yapanları mevcuttur [17].

Allelokimyasallar genel olarak; alkaloidler, asetogeninler, fenil propanlar, steroidler, terpenoidler olmak üzere beş ana gruba ayrılmıştır [11]. Fakat bu gruplarda yer alan her madde allelokimyasal niteliği taşımamaktadır. Konuyla ilgili daha detaylı bir sınıflandırma Tablo 1’de yapılmıştır.

Tablo 1. Bitkiler tarafından salgılanan allelokimyasal gruplar

Sekonder Bileşik Ürünler	
Basit suda çözülebilir organik asitler	Tanenler
Düz zincirli alkoller	Terpenoidler
Uzun zincirli yağ asitleri ve poliasetilenler	Steroidler
Naftokinonlar, antrokinonlar ve kompleks kinonlar	Aminoasitler ve polipeptitler
Basit fenoller, benzoik asit ve türevleri	Alkaloidler ve siyanohidrinler
Sinamik asit ve türevleri	Sülfidler ve glukosidler

Kaynak: [15, 16, 18, 19].

Allelopati çoğunlukla karasal bitkiler arasında görülmektedir. Karasal bitkilerden salgılanan allelokimyasallar doğrudan veya dolaylı olarak toprak bünyesine dahil olurlar ve burada güçlü etki ortaya koyarlar. Az da olsa sucul bitkiler de allelopatik etki göstermektedir. Fakat sucul bitkilerden salgılanan allelokimyasallar suya karıştığında yoğunluklarının seyrelmesinden dolayı etkileri zayıflamaktadır. Tablo 2’de bazı karasal kültür bitkilerinin allelokimyasal türü ve allelopatik etki gösterdiği bitkiler verilmiştir.

Tablo 2. Allelopatik Etki Gösteren Tarla Bitkileri, Salgıladığı Allelokimyasal Türü ve Etki Ettiği Bitkiler

Allelopatik Etki Gösteren Bitki	Allelokimyasal Türü	Allelopatik Etkiye Olumsuz Yönde Maruz Kalan Bitkiler
Arpa (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	4(2H)-Benzoksasin-3-1 (DİBOA), Gramine, Hordenine, İndolalkilamin, Ferulik asit, Kafeik asit, p- hidroksi benzoik asit, p-Kumarik Asit, Salisilik asit, Skopoletin, Vanilik Asit, α -Naftol, Annuiononlar, Cis-Germakradienolid 14, Germakranolidler, Guaianolidler, Helianon A-C, Heliangolid, İzoklorogenik asit, Kaffeoylikuinik asit Klorogenik asit, Kukulkanin B, Melampolid 16, Skopolin, Tambulin	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.) Üçgül (<i>Trifolium</i> spp.) Yonca (<i>Medicago sativa</i> L.)
Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.)		Buğday (<i>Triticum</i> spp.) Sorgum (<i>Sorghum</i> spp.) Soya (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.)
Börülce (<i>Vigna unguiculata</i> L.)	Fenolik asitler	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.)
Çavdar (<i>Secale cereale</i> L.)	2(3H)-Benzoksazolinon (BOA), DİBOA, β -Fenil Laktik asit, β -Hidroksibutirik asit, Fenolik asitler	Arpa (<i>Hordeum vulgare</i> L.) Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.) Kum Darı (<i>Panicum miliaceum</i> L.) Üçgül (<i>Trifolium</i> spp.) Yonca (<i>Medicago sativa</i> L.)
Çeltik (<i>Oryza sativa</i> L.)	0-Hidroksi Fenil Asetik asit 2,4-dihydroxy-2H-1, Benzoik asit, Bütirik asit, DİBOA, 4-benzoksazin-3-1 (DIMBOA),	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.) Ekmeklik Buğday (<i>Triticum aestivum</i> L.)

	Fenolik asitler, Ferulik asit, Phitotoksin, Propiyonik asit, Siringik asit, Vanillik asit	
Çok yıllık çim (<i>Lolium perenne</i> L.)	Fenolik asitler	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.)
Dalıdarı (<i>Panicum glaucum</i> L.)	Fenolik asitler	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.)
Ekmeklik buğday (<i>Triticum aestivum</i> L.)	2-hydroxy-7-methoksi, DIMBOA, 2-dihidroksi-1,4- benzoksazin-3-1, Hydroxamic acid, 2-hydroxy-1, 4- benzoksazin-3-1 (HBOA), 4-benzoksazin-3-1 (HMBOA), 2,7-dihidroksi-1, 4- benzoksazin-3-1 (DHBOA), β- Hidroksibutirik asit, β-phenyl laktik asit, Alifatik Asitler, Alkaloidler, Benzoksazinonlar, Basit asitler, Fenolik asitler, Flavonoidler, Kumarinler, Kinonlar, Steroidler, Skopoletin, Taninler, Terpenoidler, Trans-feruik asit,	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.) Bezelye (<i>Pisum sativum</i> L.) Çeltik (<i>Oryza sativa</i> L.) Fasulye (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) Kırmızı Üçgül (<i>Trifolium incarnatum</i> L.) Pamuk (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) Yer Altı Üçgülü (<i>Trifolium subterraneum</i> L.) Yulaf (<i>Avena sativa</i> L.)
Makarnalık buğday (<i>Triticum durum</i> (L.) Desf.)	p-hidroksi benzoik asit, Vanilik Asit, p-Kumarik Asit	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.) Pamuk (<i>Gossypium hirsutum</i> L.)
Keten (Lif) (<i>Linum usitatissimum</i> L.)	Benzilamin	Şeker Pancarı (<i>Beta vulgaris</i> L.)
Kolza, Yağ şalgamı, Hardal (<i>Brassica</i> spp.)	Alil ve Benzil izotiyosiyanat, Fenolik asitler	Arpa (<i>Hordeum vulgare</i> L.) Buğday (<i>Triticum</i> spp.) Kum Darı (<i>Panicum miliaceum</i> L.) Maş Fasulyesi (<i>Vigna radiata</i> (L.) Wilczek)
Mısır (<i>Zea mays</i> L.)	DIBOA, Fenolik asitler, Hidroksiamik asit	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i>) Çeltik (<i>Oryza sativa</i> L.) Ekmeklik Buğday (<i>Triticum aestivum</i> L.) Şeker Pancarı (<i>Beta vulgaris</i> L.) Soya (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.)
Pamuk (<i>Gossypium hirsutum</i> L.)	Fenolik asitler, Gossipol	Arpa (<i>Hordeum vulgare</i> L.)
Sorgum - Kocadarı (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench.)	Benzoik asit, Dhurrin, Ferulik asit, Gallik asit, Kafeik asit, Kuininolin, m-kumarik asit, p-Hidroksibenzoik asit, p-kumarik asit, Protokateuik asit, Siyanogenetik glikozidler, Sorgolene, Siringik asit, p-hidroksibenzaldehid, Vanillik asit	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.) Ekmeklik Buğday (<i>Triticum aestivum</i> L.) Soya (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.) Yonca (<i>Medicago sativa</i> L.)
Soya (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.)	Fenolik asitler	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.) Buğday (<i>Triticum</i> spp.)

		Mısır (<i>Zea mays</i> L.) Tritikale (<i>Triticale</i>) Yonca (<i>Medicago sativa</i> L.)
Şeker pancarı (<i>Beta vulgaris</i> L.)	Fusarik asit	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.) Buğday (<i>Triticum</i> spp.) Pamuk (<i>Gossypium hirsutum</i> L.)
Üçgül (<i>Trifolium</i> sp.)	Fenolikler, İzoflavonoidler	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.)
Yonca (<i>Medicago sativa</i> L.)	4-Methoxi medikarpın, Fitotoksik fenolik asitler, Glikozitler, Glukozid, Glukuronik asit, Hederagenin monoglikozit, Kanavanine, Klorogenik asit, Medikagenik asit, Medikarpın, Saponin, Tridesmozit, Zahnik asit	Ayçiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.) Buğday (<i>Triticum</i> spp.) Pamuk (<i>Gossypium hirsutum</i> L.)
Yulaf (<i>Avena sativa</i> L.)	Hydroxamic acid, L-triptofan, Skopoletin	Şeker Pancarı (<i>Beta vulgaris</i> L.) Üçgül (<i>Trifolium</i> spp.) Yonca (<i>Medicago sativa</i> L.)

Kaynak: [9, 16, 22]

2.1. Allelokimyasalların Salınım Yolları

Bitkilerin bünyesinde bulunan sekonder metabolitler olarak isimlendirilen allelokimyasallar çevrenin de etkisiyle birlikte 4 farklı yolla bitkiden salınımı olayı gerçekleşmektedir. Bu temel 4 grup ise;

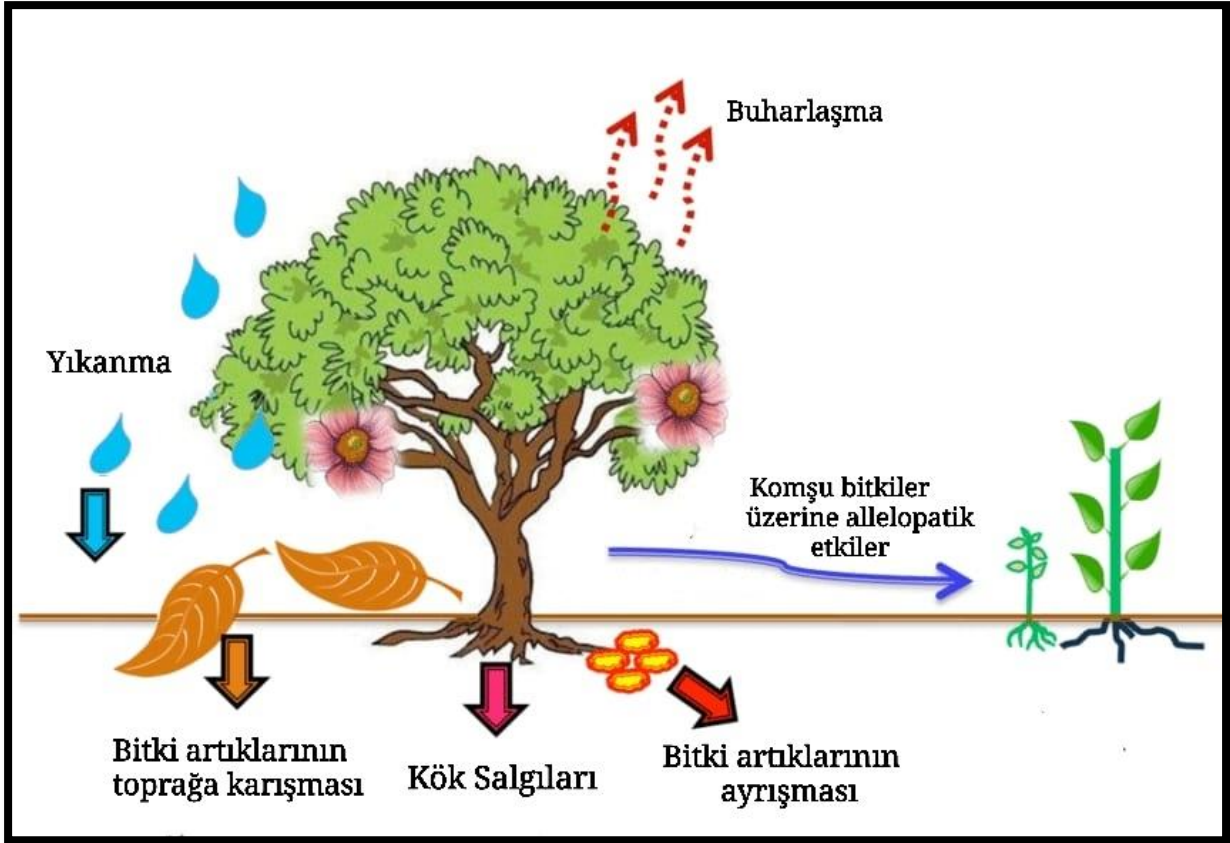
1) *Buharlaştırma*: Allelokimyasallar bitkilerin yapraklarının terlemesi sonucu uçucu buhar olarak atmosfere dağılır. Atmosferde absorbe edilen bu buhar yoğunlaşarak çiy halinde yeryüzüne düşüp toprağın derinlerine doğru ilerler.

2) *Yıkanma*: Bitkinin toprak üstü aksamlarından salgılanan allelokimyasallar; yağmur, çiy, sis ve kar gibi yağış faktörlerinin etkisiyle yıkanarak bitkiden uzaklaşarak toprağa karışır.

3) *Kök Salgıları*: Kök hücrelerinden farklı allelokimyasallar kök çevresine salgılanmaktadır. Fakat bu aksamdaki allelokimyasalların tespiti, mikrobiyal aktivitenin bu maddeleri değiştirebilecek potansiyele sahip olmalarından dolayı nispeten daha zordur.

4) *Bitki Artıklarının Ayrışması*: Bitkiler çeşitli nedenlerin etkisiyle öldükten sonra toprak bünyesinde var olan saprofit bakteriler tarafından ayrıştırılır. Böylece dokularda bulunan allelokimyasallar toprak bünyesinde yayılır.

Yukarıda belirtilen çeşitli yollarla toprağa dahil olan allelokimyasalların salınımı sonucunda, bir başka bitkinin köklerinden emilmesi suretiyle bünyelerine geçmektedir. Buna bağlı olarak; tohum çimlenmesinin engellenmesi, büyüme ve gelişmede yavaşlama, primer kök gelişiminin engellenmesi, sekonder köklerde artış, bitki besin maddelerinin alımında eksiklikler, kloroz ve geç olgunlaşma gibi allelopatik etkiler gözlenebilmektedir [20].



Şekil 1. Allelokimyasalların Salınım Yolları [21]'den düzenlenmiştir.

2.2. Allelokimyasalların Bitki Fizyolojisine ve Morfolojisine Etkileri

Allelopatik ajanlar, bitkiler arası interaksyonlara bağlı olarak bitki bünyesi üzerinde olumlu ya da olumsuz etkiler göstermektedir. Fizyolojik etki mekanizmalarından bazıları; fitohormonların dengesi, topraktan mineral madde alımı, biyolojik azot fiksasyonu, ksilem dokularının mantarlaştırması, suyun gövdeye iletimi, belirli enzimlerin aktivitesi, protein sentezi ve leg-hemoglobin sentezi, membran geçirgenliği, hücre bölünmesi, polen çimlenmesi, stoma faaliyetleri ve solunum gibi faaliyetler üzerinedir [20, 22, 23, 24, 25]. Morfolojik etkiler ise; geç çimlenme ya da çıkış olmaması durumu, fide gücünün zayıf olması, popülasyondaki birey sayısında azalma, kök ve sürgünlerde deformasyon, bodur tip bitki, kardeşlenme sayısında azalma, kloroz, solma, yatma, kök çürüklüğü ve fidelerin ölümü gibi gözlemler allelokimyasal maddelerin bitki üzerindeki etkilerinden bazılarıdır [20].

2.3. Allelokimyasal Miktarını ve Üretimini Etkileyen Faktörler

Yüksek yapılı gelişmiş bitkilerin bünyesinde bulunan allelokimyasallar genel olarak 4 ana gruba ayrılmaktadır. Bitkilerden salgılanan bu allelokimyasalların miktarı güneş ışınları, bitki besin minerallerinin yetersizliği, bitki organlarının yaşı, su stresi, sıcaklık, nem gibi fizyolojik stresler ile zararlı ve hastalıklar ve yabancı otlar gibi çevresel kaynaklı faktörler ile toprak kökenli mikroorganizmaların faaliyetlerinden etkilenmektedir [7, 26, 27]. Bu etmenler arasında sıcaklığın, bitki bünyesinde allelokimyasal üretimini ve salınımını arttıran en önemli faktör olduğu tespit edilmiştir [28]. Yüksek sıcaklık allelokimyasalların üretimini ve etkisini arttırmaktadır. Ortamdaki yararlanılabilir suyun az bulunması durumunda oluşan su stresinde ise ferulik asit sentezi tetiklenerek, çimlenme ve gelişim engellenmektedir. Ayrıca ultraviyole ışınlar maruz kalan bitkilerde fotosentetik foton flux yoğunluğu artarak allelokimyasal üretiminin arttığı tespit edilmiştir.

2.4. Allelopatinin Kullanım Alanları

Allelokimyasalların organizmaların büyüme ve gelişiminde olumsuz etkilere yol açması hususu agronomiye uyarlanarak bir dezavantaj olmaktan çıkıp avantaja dönüştürülebilmektedir. Çoşkun ve arkadaşlarının (2021) kekik (*Thymus vulgaris* L.) uçucu yağı kullanarak bir yabancı ot türeviden olan yabancı yulafın (*Avena fatua*) çimlenme ve gelişimine etkisini inceledikleri bir çalışmada; uçucu yağın içeriğinde bulunan karvakrol ve timol allelokimyasallarının yabancı yulafın çimlenme oranına ve kök uzunluğuna olumsuz yönde etki ettiklerini belirterek, biyoherbisit olarak kullanılabileceğini saptamışlardır [29]. Buna ek olarak pelin otunun (*Artemisia annua* L.) bitki özünden elde edilen terpenoidler grubundaki piretrin, sinerin ve jasmolin allelokimyasallarının sivrisineklerin üzerinde öldürücü etki gösterdiği ve bu biyokimyasalların biyoinsektisit olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [30]. Ayrıca yetiştirilmek istenen bitki türünün hastalık-zararlı ve yabancı ot potansiyelleri ve allelopatik etkileri göz önüne alınarak uygun münavebe sistemine alınmasıyla hem bitkiler arası sinerjik etki gözetilmekte hem de doğal yollar mücadelesi sağlanmış olmaktadır. Bu bağlamda Kitiş ve arkadaşlarının (2016), adi fiğın (*Vicia sativa* L.) bitki ekstraktlarını ve kök salgılarını kullanarak yabancı otlar üzerinde etkilerini incelemek amacıyla yürüttüğü çalışmada; bitki ekstraktlarının yabancı otların çimlenmelerini engellediğini tespit etmişlerdir. Gerek biyoherbisit özelliği gerekse bir baklagil yem bitkisi olması sebebiyle münavebede önemli bir yere sahip olduğunu vurgulamışlardır [31]. Allelopatinin bitkinin vejetasyon dönemindeki etkilerine ek olarak toprağa faydası da oldukça önemlidir. Bitkilerden çeşitli yollarla salgılanıp toprağa karışan allelokimyasallar, kimyasal gübrelere nazaran toprakta daha hızlı ve kolay biyolojik parçalanma süresine sahip olmalarından dolayı çevre dostu olarak da ön plana çıkmaktadır [22, 32].

3. Sonuç

Bitki yetiştiriciliği yapılacak alanlarda özellikle tek yıllık bitki yoğunluğunun daha fazla olduğu tarlalarda yılda iki veya üç ürün yetiştirilebilmektedir. Bu alanlarda yapılan tarımın, sürdürülebilirliğinin sağlanması için bitkinin; çevre, hastalık-zararlı, yabancı ot ve mikroorganizmalarla olan etkileşimlerinin tespiti önem arz etmektedir. Allelopatinin tüm bu değerleri kapsamı münasebetiyle yapılacak olan çalışmalarda göz önünde bulundurularak tarla tarımın gelişmesini destekleyeceği, girdi maliyetlerinde azalma sağlayacağı ve verim artışına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması

Makaleyi yazan yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkısı

Mustafa YILMAZ: Makaleyi yazdı.

Melike KÖSE: Makale için gerekli araştırmaları yapıp, makaleyi düzenledi.

4. Kaynakça

- [1] Aydın, İ., (2019). Çevre Dostu Tarım Uygulamalarının Vazgeçilmez Olan Biyogübre Üretim Faaliyetlerine Gönen Örneği. Kesit Akademi Dergisi, (20): 11-25.
- [2] Cramer, H.H., (1967). Pflanzenschutz und welterente, pflanzenschutz nachrichten Bayer. Aus der Abteilung Beratung Pflanzenschutz der Farbenfabriken, Bayer AG, Leverkusen, 20(1): 52.
- [3] Özdemir, N., (2021). Bazı Orman Bitkilerinin Bitkisel Kökenli Pestisit Olarak Kullanım Potansiyeli. Theoretical and Applied Forestry, 1(1): 5-16.

- [4] Macias, F.A., Molinillo, J.M., Varela, R.M., Galindo, J.C., (2007). Allelopathy - A Natural Alternative for Weed Control. *Pest Management Science: Formerly Pesticide Science*, 63(4): 327-348.
- [5] Özen, F., Yaldız, G., Çamlıca, M., (2017). Yabancı Ot Mücadelesinde Bazı Aromatik Bitkilerinin Uçucu Yağlarının Allelopatik Etkisi. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 3(1): 40-48.
- [6] Molisch, H., (1937). *Der einfluss einer pflanze auf die andere, allelopathie* von Hans Molisch. Mit 15 abbildungen im text. Verlag von Gustav Fischer.
- [7] Rice, E.L., (1984). *Allelopathy*, Academic Pres, New York.
- [8] Rizvi, S.J.H., Haque, H., Singh, V.K., Rizvi, V., (1992). A Discipline Called Allelopathy. In *Allelopathy. Basic and Applied Aspects*, pp. 1-8. Chapman & Hall, London.
- [9] Singh, H.P., Batish, D.R., Kohli, R.K., (2001). Allelopathy in Agroecosystems: An Overview. *Journal of Crop Production*, 4(2): 1-41.
- [10] Bayram, M., (2018). Ayçiçeği ve Buğday Bitkisi Kök Eksudatlarının *Sinapis Arvensis* ve *Sinapis Alba* Türlerinin Tohum Çimlenmesi ve Fide Gelişimi Üzerine Allelopatik Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı, Niğde.
- [11] Kocaçalışkan, İ., (2006). *Allelopati 2*. Baskı, Bizim Büro Basımevi, Ankara.
- [12] Arıkan, N., Elibüyük, İ.Ö., (2015). Yabancı Otlarla Mücadelede Allelopatinin Kullanımı. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 8(1), 46-50.
- [13] Çamurköylü, N., Demirkan, H., (1993). Yabancı Ot-Kültür Bitkisi Arasındaki Allelopati ve Pratikteki Önemi, Türkiye 1. Herboloji Kongresi, 3-5 Şubat 1993, 203- 211, Adana.
- [14] Anaya, A.L., (1999). Allelopathy as a Tool in The Management of Biotic Resources in Agroecosystems. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 18(6), 697-739.
- [15] Einhellig, F.A., (1986). Mechanisms and Modes of Action of Allelochemicals. *The Sci. of Allelopathy*, 171-188.
- [16] Batish R.D., Singh H.P., Kaur S., (2001). Crop Allelopathy and Its Role in Ecological Agriculture. *Journal Crop Product*. 4, 121-161.
- [17] Hock, B., Elstner, E.F. (Eds.), (2004). *Plant Toxicology*. CRC Press, Boca Roca.
- [18] Seigler, D.S., (1996). Chemistry and Mechanisms of Allelopathic Interactions. *Agronomy Journal*, 88: 876-885.
- [19] Özer, Z., Kadioğlu, İ., Önen, H., Tursun, N., (2001). *Herboloji (Yabancı Ot Bilimi) Gaziosmanpaşa Üniv. Ziraat Fak. Yayınları No:20 Kitap Serisi No:10, Tokat*.
- [20] Kamal, J., (2020). Allelopathy; A Brief Review. *Journal of Novel Applied Sciences*, 9(1), 1-12.
- [21] Chick, T.A., Kielbaso, J.J., (1998). Allelopathy as an Inhibition Factor in Ornamental Tree Growth: Implications from The Literature. *Journal of Arboriculture (USA)*.
- [22] Gürsoy, M., Balkan, A., Ulukan, H., (2013). Bitkisel Üretimde Allelopati. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(2): 115-122.
- [23] Şahin, C.B., Arslan, M., Kırmaz, S., (2013). Bazı Yabancı Ot Tohumlarının Çimlenmesi Üzerine Uçucu Yağların Herbisidal Etkisi. *Türkiye 10. Tarla Bitkileri Kongresi*, 10-13 Eylül, Konya.
- [24] Kılınç, C.Y., (2015). Bazı Allelopatik Bitki Özütlelerinin Farklı Yabancı Ot Tohumlarının Çimlenmesi Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitki Koruma Anabilim Dalı, Konya.
- [25] Trezzi, M.M., Vidal, R.A., Junior, A.A.B., Bittencourt, H.V.H., Filho, A.P.D.S.S., (2016). Allelopathy: Driving Mechanisms Governing Its Activity in Agriculture. *Jour. of Plant Interactions*, 1, 53-60.
- [26] Ferguson, J.J., Rathinasabapathi, B., (2003). Allelopathy: How Plants Suppress Other Plants. *EDIS*, 2003(18).
- [27] Blanco, J.A., (2007). The Representation of Allelopathy in Ecosystem-Level Forest Models. *Ecological Modelling*, 209(2-4), 65-77.
- [28] Pramanik, M.H.R., Nagai, M., Asao, T., Matsui, Y. (2000). Effect of Temperature and Photoperiod on Phytotoxic Root Exudates of Cucumber in Hydroponic Culture, *Journal Chem. Ecol.*, 26: 1953- 1967.
- [29] Coşkun, Y., Taş, İ., Oral A., Tütenocaklı, T., Türker, G., (2021). Kekik Uçucu Yağı Bileşenlerinden Timol, Karvakrol ve Alfa-Terpinen'in Yabani Yulaf Üzerine Allelopatik Etkileri. *Lapseki Meslek Yüksekokulu Uygulamalı Araştırmalar Dergisi*, 2(3): 116-121.
- [30] Duke, S.O., Paul, R.N., Lee, S.M., (1988). Terpenoids from the genus *Artemisia* as potential pesticides. *American Chem. Soc. Symp. Ser.* 829, 52-66.
- [31] Kitiş, Y., Kolören, O., Uygur, F., (2016). Allelopathic Effects of Common Vetch (*Vicia sativa* L.) on Seed Germination and Development of Some Weed Species. *Tarla Bitkileri Merkez Araş. Ens. Dergisi*, 25(1): 100-106.
- [32] Yıldız E., (2019). Bazı Tıbbi Ve Aromatik Bitki Ekstraktlarının Allelopatik Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, Ordu.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).