



Review /Derleme

İmidazolinone-Tolerant Kültür Bitkileri ve Yabancı Ot Mücadelesinde Kullanımı

Fulya BAŞARAN*

ÖZET

Yabancı otlar, kültür bitkileriyle su, besin maddesi, ışık ve yer gibi kaynaklar için rekabete girerek zarar oluştururlar. Mücadelesinde, kısa sürede sonuç vermesi ve kullanım kolaylığı gibi avantajları sebebiyle daha çok kimyasal mücadele yöntemi tercih edilmektedir. Ancak yoğun herbisit kullanımı sonucu ortaya çıkan direnç sorunu, selektif herbisitlerin geliştirilmesiyle daha da artmıştır. Özellikle ALS (Asetolaktat sentaz) inhibitörü herbisitlere olan dayanıklılık sorunu ilk sıradadır. Dar ve geniş yapraklı yabancı otlara karşı yaygın olarak ALS inhibitörü herbisit grubundan Sulfonylurea sınıfı içerisinde yer alan aktif maddelerden imidazolinonlar kullanılmaktadır. İmidazolinonlar, düşük dozlarda bile etkili olan çok geniş yabancı ot etki spektrumuna sahip olup hayvanlar, kuşlar, balıklar ve omurgasızlar üzerinde düşük toksisite olması ile nispeten çevresel profile uygun herbisitlerdir. Bu özellikleri, geleneksel üretim teknikleri (transgenik olmayan) ile imidazolinon-tolerant (imi-tolerant) kültür bitkilerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. İmi-tolerant kültür bitkilerinden kasıt, imidazolinon grubu herbisitlere karşı toleranslı bitkilerdir. Bu bitkilerin kullanıldığı üretim alanlarında yabancı otların kontrolü sağlanırken, ürünün zarar görmesini engellemek amaçlanmaktadır. Yabancı otlarla mücadelede düşük maliyet, daha iyi ve etkin kontrol sayesinde tarımsal üretimde verim artış sağlanması gibi avantajları vardır. Ancak imi-tolerant bitkilerin ekimi yapılan alanlarda yoğun herbisit kullanımına bağlı olumsuz çevresel etkiler, kültür bitkisine akraba yabancı ot türlerine gen kaçıışı ve buna bağlı olarak dirençli yabancı otların ortaya çıkışı gibi bir takım dezavantajları olabilir. Bu derlemede, imi-tolerant bitkilerin yabancı ot mücadelesinde kullanım avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Herbisit, Herbisit Toleransı, İmidazolinon, ALS inhibitörü, İmi-tolerant

Imidazolinone-Tolerant Crop Plants and Their Use in Weed Control

ABSTRACT

Weeds cause damage by competing with crops for resources such as water, nutrients, light and space. In its control, chemical control methods are preferred due to its advantages such as short-term results and ease of use. However, the problem of resistance, which arises as a result of intensive use of herbicides, has increased with the development of selective herbicides. In particular, the problem of resistance to ALS (Acetolactate synthase) inhibitor herbicides is in the first place. Imidazolinones, one of the active substances in the sulfonylurea class from the ALS inhibitor herbicide group, are widely used against narrow and broad-leaved weeds. Imidazolinones have a very broad weed spectrum that is effective even at low doses, and are herbicides with a relatively environmental profile, with low toxicity to animals, birds, fish and invertebrates. These features have enabled the development of imidazolinone-tolerant (IMI-tolerant) crops with traditional production (non-transgenic) techniques. IMI-tolerant crops mean that are tolerant to imidazolinone group herbicides. While controlling weeds in the production areas where these crops are used, it is aimed to prevent the product from being damaged. It has advantages such as low cost, better and more effective control of weeds, increasing the yield in agricultural production. However, there may be some disadvantages such as negative environmental effects due to intensive use of herbicides in the areas where IMI-tolerant plants are cultivated, gene escape to weed species related to the cultivated plant and the emergence of resistant weeds accordingly. In this review, the advantages and disadvantages of using IMI-tolerant plants in weed control are discussed.

Keywords: Herbicide, Herbicide Tolerance, Imidazolinone, ALS inhibitor, IMI-tolerant

¹Fulya BAŞARAN (Orcid ID:0000-0002-7381-9215), Atatürk Bahçe Kültürleri Merkez Araştırma Enstitüsü, Bitki Sağlığı Bölümü, Yalova, Türkiye, *Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Fulya BAŞARAN, e-mail: fulya.basaran@tarimorman.gov.tr

GİRİŞ

Yabancı otlar, kısaca istenmeyen yerde yetişen ve zararı yararından fazla olan bitkilerdir. Buldukları alanda kültür bitkisi ile kaynak (su, besin maddesi, ışık, yer vb.) rekabetine girerek verimi düşürürler. Belli başlı ürünlerde yabancı otlardan kaynaklanan potansiyel verim kayıpları yaklaşık olarak %34 oranındadır (Oerke, 2006). Yabancı otlarla mücadelede çoğunlukla mekanik (elle yolma, çapalama gibi) mücadele ve kimyasal mücadele uygulanmaktadır. Mekanik mücadele için gereken işgücünün fazla ve maliyetli olması gibi sebeplerden tercihen kimyasal mücadele amacıyla herbisitler kullanılmaktadır (Uygur ve Uygur, 2010). Herbisitler, yabancı otların çimlenmesini ve gelişmesini engelleyen kimyasallardır. İlk sentetik herbisit 1940'ların başında keşfedilmiş olup tarımsal yabancı ot kontrolünde önemli bir adım sayılmıştır (Sterling ve Hal, 1997).

Herbisit kullanım artışıyla herbisit direnci ve bitkilerin kendi doğasında var olan herbisit toleransı terimleri ortaya çıkmıştır. Herbisit direnci, bir bitkinin normalde yabancı ot türüne karşı öldürücü olan bir doz herbisite maruz kaldıktan bir süre sonra hayatta kalma ve çoğalma yeteneği göstermesidir. Bir bitkide direnç, doğal olarak meydana gelebilir. Bununla birlikte direnç sağlamak için doku kültürü veya mutajenez yoluyla yeni varyantların geliştirilmesi ile mümkündür. Herbisit direnci oluştuğunda kısaca "Eskiden bu yabancı otu bu herbisit uygulamasıyla kontrol edebiliyorduk ama artık işe yaramıyor gibi görünüyor..." düşüncesini akla getirir. Buna karşılık, herbisit toleransı, bir yabancı ot türünün herbisit uygulanmasına rağmen hayatta kalma ve çoğalma yeteneğidir (Gray ve ark. 2010). Bu, bitkinin toleranslı olması için hiçbir seçim veya genetik manipülasyon yoktur çünkü doğal olarak toleranslıdır. Kısaca bir herbisit ile bir yabancı otu hiçbir zaman güvenilir bir şekilde kontrol edemedik..." diye düşünüyorsanız – bu durum herbisit toleransı olarak tanımlanır (Anonim, 2021a).

Bir herbisitinin başarılı olması, kültür bitkisi ve yabancı ot arasında seçicilik gösterebilmesiyle ilgilidir. Her ne kadar herbisitler, bitkilerin fotosentez ve aminoasit sentezi gibi işlevlerini etkilemek için tasarlanmış olsa da bu işlev süreçleri hem kültür bitkisi hem de yabancı otlar için benzerdir. Sonuç olarak bu seçicilik, yabancı ot ve kültür bitkisi tarafından farklı herbisit alımına, uygulama alanına ve zamanına veya kültür bitkisi tarafından herbisit detoksifikasyonuna dayanmaktadır. Çevre sağlığı konularına artan hassasiyet, hızlı çözünebilir, yüksek etki gösteren ve hayvanlara toksik olmayan herbisitlerin geliştirilmesini teşvik etmiştir. Son yıllarda bu herbisitlerin ticarileştirilme stratejileri ve yapılan araştırmalar, yüksek dozda herbisit kullanımının azaltılmasını, çevresel açıdan kabul edilebilir ve herbisitlerin daha ekonomik üretimini amaçlamaktadır. Herbisitlere tolerant kültür bitkilerinin geliştirilmesi de bu amaçlarla örtüşmektedir (Tsaftaris, 1996).

Tüm bitkiler doğal olarak bazı herbisitlere karşı toleranslıdır. Bu, onlarca yıldır selektif yabancı ot kontrolünün temelini sağlamıştır. Bu sebeple, araştırmacılar bu doğal direnci tarımsal ürün çeşitlerine tolerans sağlamak için kullanmaktadırlar (Gray ve ark., 2010). Bu amaçla bazı biyoteknolojik genetik değiştirme teknikleri (transgenik) ve geleneksel üretim teknikleri (transgenik olmayan) kullanılarak herbisite toleranslı bitkiler elde edilmektedir. Bitkilerin çoğunda herbisitlere toleranslı hale getirmek için genler mevcuttur (Duke, 2005). Herbisite toleranslı bitkilerin geliştirilmesi; başka bir organizmadan bir "yabancı" genin bir kültür bitkisine eklenmesiyle GDO (genetiği değiştirilmiş organizma)'lu olarak veya mevcut bitki germplazmından herbisite toleranslı mutantların yeniden üretilmesiyle GDO olmayan bir hibrit üretilmesi şeklindedir (Knezevic ve Cassman, 2003). Transgenik yolla elde edilen

herbisite tolerant bitkiler, bakteriler veya diğer bitkiler gibi çeşitli kaynaklardan dirençli genler alınarak ve bunları, herbisite dirençli hale getirmek için bitkiye dahil ederek geliştirilmektedir. Herbisite toleranslı transgenik bitkiler, dünyada toplam transgenik üretim alanının %47'sini kaplamaktadır (Prakash ve ark., 2020). Tarımsal Biyoteknoloji Uygulama ve Bilgilendirme Kurulu (ISAAA)'nın verilerine göre pamuk (*Gossypium hirsutum* L.), soya fasulyesi (*Glycine max* L. Merr.), kanola (*Brassica napus* L.) ve mısır (*Zea mays* L.) dahil olmak üzere 4 bitkide herbisit tolerans transgen işlemi gerçekleştirilmiştir. 16 çeşit organizmadan türetilen 19 herbisit tolerans geni, bu dört bitkinin herbisit tolerans geni olarak rol oynamıştır. 19 herbisit tolerans geninden 7'si, mısır, arabidopsis (*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.), soya fasulyesi, tütün (*Nicotiana tabacum* L. cv. Xanthi) ve yulaf (*Avena sativa* L.) dahil olmak üzere beş bitki genomundan ve geri kalanı da mikrobiyal genomlardan elde edilmiştir. Bu 19 gen, glifosat, glufosinat, imidazolinonlar, 2,4-diklorofenoksi (2,4-D), izoksazolon, dikamba, sülfonilüreler, mezotrion ve bromoksinil olan dokuz çeşit herbisite tolerans geliştirmektedir (Wang ve ark., 2018). Transgenik yolla üretilmeyen herbisite toleranslı kültür bitkisi örnekleri arasında Sülfonilüre'ye toleranslı soya fasulyesi (STS) ve Clearfield® teknolojisi ile üretilmiş mısır ve buğday bulunur (Knezevic ve Cassman, 2003; Knezevic, 2010).

Herbisitlere karşı bitki toleransı elde etmek için çok sayıda olası strateji vardır. Bunlar; hedef geni değiştirmek, arttırmak veya aşırı olarak üretmek; hedef enzimi alternatif bir yoldan bertaraf etmek, herbisiti detoksifiye etmek (Tsiftaris, 1996), herbisitini alımını ve translokasyonunu kısıtlayarak hedef bölgeye ulaşmasını engellemek (Knezevic ve Cassman, 2003), herbisitini ayrı tutulmasını (tecrit etmek) sağlamak ve substrat akışını hızlandırmaktır (Tan ve ark., 2006). Bununla birlikte, ticarileştirilmiş herbisit toleranslı kültür bitkisi elde etmede yalnızca iki strateji başarıyla kullanılmıştır. Bunlar; hedef genin değiştirilmesi ve herbisitini metabolizma yoluyla detoksifikasyonudur (Kirkwood, 2002; Naidu ve Ranganath, 2011). Memeliler için düşük toksisite ve yabancı otları kontrol etmedeki yüksek başarısına sahip aminoasit biyosentezini inhibe eden herbisitler, herbisite toleranslı kültür bitkisi geliştirmek için ideal seçimlerdir (Vaughn and Duke, 1991; Reade ve Cobb, 2002).

Herbisit toleransı için geniş genetik varyasyona sahip kültür bitkilerinden bazıları; mısır, buğday, çeltik, soya, nohut ve yoncadır (Prakash ve ark., 2020). Hâlihazırda ticari olarak kullanılan herbisite toleranslı kültür bitkileri arasında, üç ana bitki, aminoasit biyosentezi inhibitörü herbisitlere toleranslı olarak geliştirilmiştir (Duke, 2005). Bunlar; sırasıyla sırasıyla Clearfield®, Roundup Ready® ve LibertyLink® ticari isimli, imidazolinonlara, glyphosatlara ve glufosinatlara tolerant olarak geliştirilmiş bitkilerdir (Tan ve ark., 2006).

Herbisit tolerant bitkilerin yetiştirildiği alanlarda amaç, herbisitlerin üründe zararlanma oluşturmasını engellerken yabancı otların kontrolünü sağlamaktır. Aynı zamanda herbisitlerin üreticiler tarafından daha efektif kullanmasını amaçlamaktadır. 1996-2010 yılları arasında herbisit tolerant bitkilerin kullanımı, sürdürülebilir tarıma katkı sağlayan, daha uygun ve esnek ürün yönetimi, daha yüksek üretkenlik veya net getiri/hektar ve çevresel anlamda daha güvenli, herbisitlerin kullanımının azaltılması gibi önemli faydalar sunan bir yöntem olarak küresel anlamda benimsenmiştir (Naidu ve Ranganath, 2011). Ancak, son yıllarda yapılan bir çok araştırma raporuna göre herbisit tolerantlı kültür bitkilerinin kullanımıyla herbisit kullanımında artış (Peerzada ve ark., 2019) ve buna bağlı olarak çevreye olumsuz etkiler,

biyoçeşitlilik üzerinde değişim, akraba türler arasında gen kaçıışı nedeniyle dirençli yabancı otların ve kendiliğinden gelen bitkilerin gelişimi gibi sorunlar bildirilmiştir (Chen ve ark., 2004; Sudianto ve ark., 2013; Bourdineaud, 2020; Prakash ve ark., 2020).

İmi-Tolerant Kültür Bitkileri

İmidazolinonlar; imazamethabenz-methyl, imazamox, imazapic, imazapyr, imazaquin, imazethapyr aktiflerini içeren asetohidroksiasit sentaz (AHAS) veya diğer adıyla asetolaktatın sentezini inhibe eden ALS (Asetolaktat sentaz) inhibitörü herbisit grubu içinde yer alır (Vencill, 2002). Geniş spektrumda dar ve geniş yapraklı yabancı otların kontrolünde kullanılırlar. İmidazolinonlar, baklagillerde, hububatlarda, ormancılıkta, tarım dışı alanlarda ve imidazolinona dayanıklı mısır, çeltik, kanola, ayçiçeği ve buğdayda kullanılır (Shaner, 2003).

İmidazolinonlar, bitkilerin tüm kök ve sürgün büyüme noktalarında protein sentezinde dallanmış zincir aminoasitlerin (valin, lösin, ve izölösin) biyosentezi için gerekli bir enzim olan asetolaktatın, sentezini inhibe ederek bitkileri öldürürler (Tan ve ark., 2005). İmidazolinon grubundaki herbisitler, çok geniş spektrumda yabancı otlarda etkili olması, hayvanlar, kuşlar, balıklar ve omurgasızlar üzerinde düşük toksisite göstermesiyle çevresel profile uygundur (Shaner, 2003). Hayvanlar, ihtiyaç duydukları tüm aminoasitleri sentezlemeyip, bazı aminoasitleri bitkilerden veya bakterilerden elde ettikleri için, imidazolinonlar, diğer etki şekline sahip herbisitlere göre hayvanlar üzerinde daha az toksik etkiye sahip olma eğilimindedir (Reade ve Cobb, 2002). Tüm bu özelliklerinden dolayı ALS inhibitörü herbisit grubundan olan imidazolinonlar herbisit tolerant bitkilerin geliştirilmesi için öncelikli seçilmiştir. İmidazolinon toleranslı bitkiler, kimyasal mutajenez (bir organizmanın genetik bilgisinin bir mutasyon üreterek değiştirildiği bir süreç)'den doğal olarak oluşan ALS gen varyantları veya mutasyonları seçilerek ve bitkiye hiçbir yabancı gen eklenmeden geliştirilmiştir (Tan ve ark., 2005). Değiştirilmiş ALS enzimi, imidazolinon herbisitlere karşı daha az duyarlı hale gelmekte ve sonuç olarak, asetolaktat ve 2-asetohidroksibutirat sentezleri, toleranslı bitkilerde imidazolinonlardan daha az etkilenmektedir (Newhouse ve ark. 1990; Shaner ve ark., 1996).

İlk olarak 1992'de imidazolinon mısır bitkisi ticari olarak geliştirilmiş daha sonra dört imi-tolerant kültür bitkisi geleneksel üretim teknikleri ile elde edilmiştir. ALS mutantları ve seleksiyon kullanılarak imidazolinon bileşiklerine tolerans gösteren imi-tolerant; mısır (*Z. mays* L.), buğday (*Triticum aestivum* L.), çeltik (*Oryza sativa* L.), kanola (*B. napus* L.) ve ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) elde edilmiştir. Bu bitkiler, Clearfield® bitkiler olarak 1992 yılından beri kullanılmaktadır (Tan ve ark., 2005; Anonim, 2012). Mutasyona uğramış imidazolinon toleranslı ALS genlerinin tümü yarı baskındır ve gen dozajı ile ürün toleransı artabilmektedir. Bu beş ticari imidazolinon toleranslı kültür bitkisinin yanı sıra, diğer birkaç kültür bitkisinde de imidazolinon toleransı gösteren ALS gen varyantları keşfedilmiştir (Tan ve ark., 2005).

Mısır, imidazolinon toleransı kazandırmak için seçilen ilk bitki türüdür. İmi-tolerant mısır, imidazolinona toleranslı olarak geliştirilmiş bitkilerin en iyi özelliklerine sahip olanıdır (Newhouse ve ark., 1990). İmi-tolerant mısır melezleri, standart mısır melezlerine göre imazetaphayr ve imazapiclere karşı 1000 kat daha fazla toleranslıdır (Newhouse ve ark., 1990).

Ayçiçeği (*H. annuus* L.), bilhassa erken gelişim döneminden kanopi oluşturuncaya kadarki geçen dönemde yabancı otlarla zayıf rekabet gösterir. Bu nedenle ayçiçeği yetiştiriciliğinde üretimi sınırlandıran faktörlerden biri yabancı otlardır. Genellikle geniş yapraklı yabancı otlarla mücadelede ekim öncesi ve çıkış öncesi herbisitler kullanılmaktadır. Bununla birlikte geniş yapraklı yabancı otların kontrolünde kullanılan ticari herbisitlerden kaynaklı ürün verim kayıpları ise önemli bir sorundur. Clearfield® üretim teknolojisiyle geliştirilen imi-tolerant hibritlerde bazı yaygın yabancı otlara ve orobanşa karşı çıkış sonrası imidazolinon herbisitleri kullanılmaktadır. The Clearfield® teknolojisi, ayçiçeğinde yabancı ot mücadelesinde çıkış sonrası kullanılan imidazolinon herbisitlerin kullanımına kolaylık sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Clearfield® ayçiçeğindeki imidazolinon herbisitlere tolerans özelliği, vahşi bir ayçiçeği popülasyonunda saptanan ALS geninde doğal olarak oluşan bir mutasyondan geliştirilmiştir (Al-Khatib ve ark., 1998). Geleneksel ayçiçeği üretiminde, ürün imidazolinon herbisitlerine karşı duyarlıyken, Clearfield® ayçiçeği hibritleri, bu herbisitlerin lethal dozlarında bile hayatta kalabilmektedir. Bu teknoloji, yabancı genetik bir materyalin girişini içermez ve bu nedenle GDO'suz (genetiği değiştirilmiş organizma) bir süreç olarak ifade edilir (Pfenning ve ark., 2008).

İmi-tolerant çeltik, 1993'de kimyasal mutajenez yoluyla elde edilen ve hayatta kalan tek bir çeltik bitkisinden geliştirilmiştir. İmazetapir, imi-tolerant çeltikte özellikle kırmızı çeltik (*Oryza sativa* var *slyvatica* L.) olarak bilinen yabancı otta etkili olarak kullanılmaktadır. Çıkış sonrası imazetapirin 70-140 gr.ha⁻¹ uygulamasıyla kırmızı çeltik yabancı otlarında %93 kadar kontrol sağladığı bildirilmiştir (Steele ve ark., 2002). Bununla birlikte Indica pirincinden imazetapir herbisitini tolere edebilen imidazolinona toleranslı yeni bir mutant geliştirilmiştir (Shoba ve ark., 2017).

Yer fıstığı tarlalarında bulunan yabancı otların çoğu mısırdaki da yaygın olduğu için, imazapic kullanılarak denemeler yapılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Yer fıstığı (*Arachis hypogaea* L.) ve soya fasulyesi (*G. max* L.) gibi bazı kültür bitkilerinde imidazolinonlar seçici olsalar da, diğer başka bitkilere uygulandığında ciddi hasar gözlemlenebilmektedir. (Monks ve ark., 1996).

Dünyada İmi-Tolerant Kültür Bitkilerinin Kullanımı

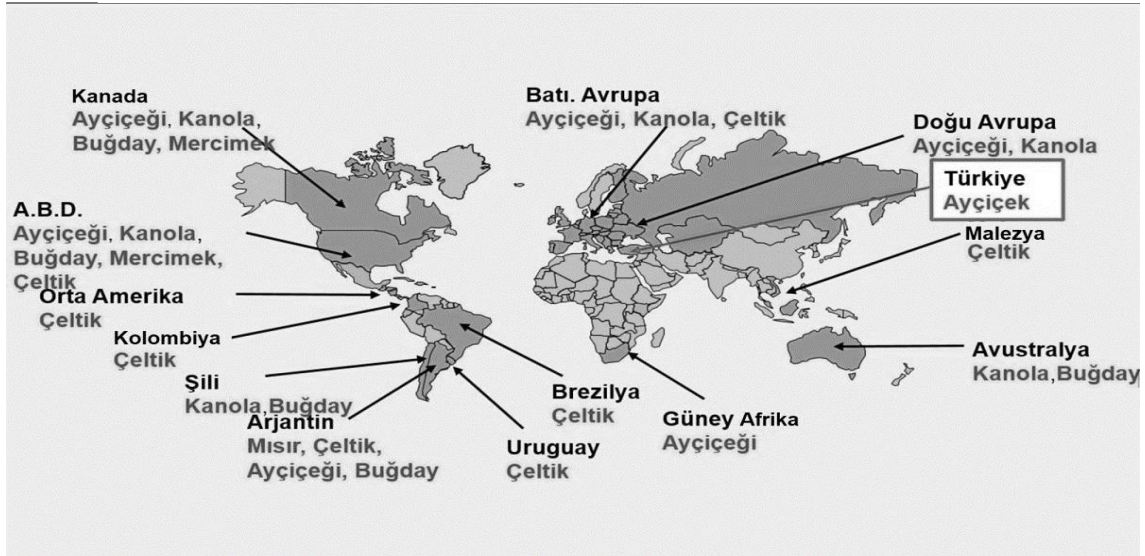
ALS inhibitörü herbisitlere karşı tolerans, mısırdaki, çeltik, buğday, kanola ve ayçiçeği dahil olmak üzere çeşitli kültür bitkilerinde geliştirilmiştir. İmi-tolerant kültür bitkileri geleneksel yetiştirme yöntemleriyle elde edildiğinden ve transgenik olmadığından tüm dünya pazarında kabul edilebilir. (Tan ve ark., 2005).

İmi-tolerant mısır üretimi ilk kez 1982'de başlamıştır. Ancak ilk kez 1992'de ticarileştirilmiştir. İlk olarak 1992'te kullanılan herbisit dayanıklı bitki olarak İMI mısır hibriti ve STS (sulfonilurea tolerant) soya çeşitleri olmuştur (Naidu ve Ranganath, 2011).

Clearfield® üretimde imi-tolerant mısır tohumlarının kullanım miktarı 2002'de Amerika'da yaklaşık olarak 4.9 milyon hektarlık alan olmasına rağmen, toplam mısır ekim alanının sadece %15'ini oluşturmuştur (Tan ve ark., 2005). Clearfield® yetiştiricilik sistemine adapte olan bir örnek olarak kanola bitkisi, Kanada'da 2000-2001 yılları arasında 4-4.9 milyon hektarlık ekim alanıyla toplam üretim alanının %20'sinde kullanılmıştır (Simard ve ark., 2002). Mısır ve kanola, pazarın önemli bir kısmını paylaşmakla birlikte çeltik, buğday ve ayçiçeği de ticari olarak herbisit tolerant teknolojisinde kullanılmaktadır. 2005-2006 yılları

arasında Kanada’da üreticilerin sahip olduğu üretim alanlarının %48’ini herbisit tolerant bitki çeşitlerinin yetiştirilmesinde kullandığı, bunun %10’unu ise Clearfield® teknolojisiyle geliştirilmiş imi-tolerant kanola çeşitlerinden seçildiği bildirilmiştir (Smyth ve ark., 2011). 2004 itibariyle dört imidazolinon herbisitiyle kombinasyon olan beş imi-tolerant bitki Clearfield® üretim sisteminde dünyanın farklı coğrafik bölgelerinde kullanılmaktadır (Şekil 1.). ABD’de onaylanmış imi-tolerant transgenik çeşitler/hibritlerden mısırdaki *IMI* ve *Optimum™ GAT* ve soyadaki *Cultivance* ‘dır. (Prakash ve ark., 2020; Anonim, 2021c).

Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA)’nın introgresyon (aralarındaki hibridizasyon ve tekrarlanan geri çaprazlama sonucunda bir türden diğerine genetik bilginin aktarılması) çalışmasından doğan ticari imidazolinon toleranslı çeşit IMISUN, 2004 yılında ABD, Arjantin ve Türkiye’de ticari olarak piyasaya sürülmüştür. İlk lansmandan bugüne kadar, IMISUN kullanımında hem bu teknolojiyi benimseyen ülke sayısında hem de pazar payında artış meydana gelmiştir. Ayçiçeği hibrit çeşitleri şu anda Avrupa Birliği (AB), Doğu AB, Kuzey Amerika ve Güney Amerika’daki ayçiçeği yetiştirilicisi yapan 15 ülkede Clearfield® markası altında ticarileştirilmiştir (Sala ve ark., 2008). Ayçiçeği üretiminde özellikle son yıllarda gittikçe artış gösteren canavar otu (*Orabanche* spp.) ve domuz pıtrağı (*Xanthium strumarium* L.) başta olmak üzere, kontrolü zor olan yabancı otlara karşı mücadele sağlamak amacıyla Clearfield® teknolojisi kullanılmıştır. Dünyada Clearfield® adı altında farklı kültür bitkilerinin ülkeler bazında kullanım durumu Şekil 1.’de gösterilmiştir (Anonim, 2021c).



Şekil 1. Dünyada Clearfield® Kullanımı

Avrupa’da imidazolinona toleranslı kışlık kanola (*B. napus* L.)’nın piyasaya sürülmesi, yabancı ot mücadelesinde iyi bir gelişme olarak kaydedilmiştir. Kanola, turpgiller (Cruciferae) ailesindedir ve bu yüzden çok sayıda crusifer yabancı ot türleri ile akrabadır. Genelde kanola birçok herbisite karşı düşük toleranslıdır ve özellikle imidazolinonlara karşı duyarlıdır. Kanolanın doğal hassasiyeti, önceki sezonda uygulanan imidazolinon herbisitler tarafından dahi zarar görmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, imi-tolerant kanola, daha iyi yabancı ot kontrolü için potansiyel sunabilmektedir. Bu anlamda imidazolinona toleranslı bir kanolanın geliştirilmesi, potansiyel ürün hasarı endişelerini azaltacağı düşünülmektedir.

Clearfield® üretim sisteminin geliştirilmesiyle elde edilen deneyimle, mücadelede standart herbisitlerin kullanımına kıyasla bu bitkilerin daha güvenilir ve sürdürülebilir olduğu bildirilmiştir (Pfenning ve ark., 2012a).

Amerika'da kışlık buğdaylarda sorun olan sakal otu (*Aegilops cylindrica* Host), püsküllü çayır (*Bromus tectorum* L.), çavdar (*Secale cereale* L.), yabancı yulaf (*Avena fatua* L.) ve İtalyan çimi (*Lolium multiflorum* Lam.), konvansiyonel üretimde ciddi verim ve kalite kayıplarına yol açan önemli yabancı otlardır. İmi-tolerant kışlık buğday çeşitleri 2003 yılında Pasifik Kuzeybatısı'nda ilk kez geliştirilmiştir. İmazamox tek gen toleransı olan Clearfield® varyetelerinde, herbisit uygulamaları sonrası üründe verim düşüşü ve zararlanma gözlemlenmiştir. Bu durum, imi-tolerans herbisitinin uygulama zamanı, buğdayın fenolojik dönemi ve çevresel koşullara bağlı olarak, Clearfield® varyetesi imi-tolerant buğday çeşidinin herbisiti (imiazamox) metabolize kabiliyetini azaltabilmesinden kaynaklı olabileceği rapor edilmiştir. Sonuç olarak, bölgede gözlemlenen imiazamox toleransındaki küçük farklılıkların herbisitinin uygulama zamanı ve dozundan kaynaklandığı kanaatine varılmıştır (Ball ve Peterson, 2017).

Clearfield® ayçiçeği üretimi, İmiSun sistemi olarak da adlandırılmaktadır. Clearfield® İmiSun özellik, ilk kez Amerika'da 1996 yılında imi-tolerant olan yabancı ayçiçeği varyetelerinden elde edilmiştir (Al-Khatib et al, 1998). İlk Clearfield® üretim imi-tolerant bitki melezleri ilk olarak 2003 yılında Türkiye'de son olarak Arjantin, ABD ve diğer ülkelerde çiftçilere tanıtılmıştır. Bununla birlikte dünyanın farklı yerlerinde imi-tolerant kültür bitkilerinin uygulandığı tarım arazilerinde yabancı otlarla mücadelede kullanılan farklı aktif içerik miktarlarıyla çıkış öncesi ve çıkış sonrası kullanılabilen ticarileştirilmiş herbisitler mevcuttur (Tan ve ark., 2006; Anonim, 2017). Clearfield® İmiSun üretim sisteminde kullanılmak üzere ticarileştirilmiş imidazolinonun çıkış sonrası 6-8 yapraklı dönemde (İmazamox (40 g/l)) uygulanmasıyla ayçiçeğinde önemli bazı geniş yapraklı yabancı otlar mücadelede başarı sağlanmıştır (Pfenning ve ark., 2012b). Clearfield Plus® (CL Plus), ayçiçeğinde imiazapyre seçici mutant olan tohumlar olarak geliştirilmiştir. Bu uygulama, klasik Clearfield® teknolojisine göre farklı çevresel koşullarda daha esnek yabancı ot kontrolü, yüksek ürün yağ içeriği sağlamak gibi avantajları mevcuttur (Kaya ve ark., 2018). Clearfield Plus®'ın geliştirilmesiyle, nispeten daha yüksek bir imidazolinon toleransı sağlanmıştır (Sala ve ark., 2012).

Ülkemizde ilk defa olarak ayçiçeğinde Clearfield® marka adıyla yapılan uygulamalar 2003 yılında olarak çok sayıda yapılan demonstrasyonlar ile çiftçilere tanıtılmıştır. Bu yöntem ile hem canavar otu, hem de birçok yabancı otla mücadele edilebilmektedir. Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü (TTAE)'nde yapılan çalışmalarda, seçilen bitkilerde ilaçlama sonucu oluşan hafif sararma, ilaçlamadan itibaren, ikinci haftada büyük ölçüde kayb olduğu belirlenmiştir. Gözlemlenen yabancı otlardan domuz pıtrağı (*Xhantium strumarium* Wallr.), köy göçüren (*Cirsium arvense* L.), yabancı yulaf (*Avena sterilis* L.), tarla sarmaşığı (*Colvolvulus arvensis* L.), sirken (*Chenopodium album* L.), darıcan (*Echinochloa crus-galli* (L.) P.Beauv.) yabancı hardal (*Sinapsis arvensis* L.) horoz ibiği (*Amaranthus albus* L.)'nin büyüme noktalarının tamamen öldüğü belirlenmiştir (Aksoy ve Pekcan, 2014). Ülkemizde TTAE'nde tescil edilen ve yağlık ayçiçeğinde imidazolinon grubu herbisitlere yüksek toleranlı ıslah yöntemiyle elde edilmiş 10 İMI TR 029 çeşidi mevcuttur (Anonim, 2021b).

Kanada Sağlık Dairesi, imidazolinon herbisitlerine tolerans sağlamak amacıyla bitki genetik materyalinde nokta mutasyonuna neden olduğu bilinen kimyasal mutajen Etil metan sülfonat (EMS)'a maruz bıraktığı mercimek kültürvarları olarak RH44 mercimek hattı geliştirmiştir (Anonim, 2012).

Çeltik tarlalarında dayanıklılık geliştirmiş olan kırmızı çeltik kontrolü için, imidazolinon grubu herbisitlere toleranslı çeltik çeşitleri geliştirmek amacıyla 2007-2014 yılları arasında 8 yıllık bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü'nde, ticari çeltik çeşitleriyle imidazolinon grubu herbisitlere dayanıklı bir çeşit arasında gerçekleştirilen 13 kombinasyon melez geliştirilmesiyle başlamıştır. Bu melez kombinasyonları kullanılarak, bir ıslah çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda; 2011 yılından itibaren saf hatlar elde edilmeye başlanmıştır. Elde edilen hatlar, 2012 yılından itibaren, Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü tarlalarında denemeye alınarak agronomik ve teknolojik özellikler bakımından gözlem ve değerlendirmeler yapılmış, 2014 yılı sonunda, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sonucu, imi-tolerant 5 ümitvar hat, tescile aday gösterilmiştir. Bunlardan ikisine, 2014 yılının aralık ayında üretim izni alınmıştır (Sürek ve ark., 2016).

Etil metan sülfonat (EMS) ile mutajene edilmiş Fırat-87 çeşidinden seçilen 139 M5 mercimek genotipi ile 6 mercimek çeşidi (Fırat-87, Çağıl ve 4 Kanada menşeli) dahil toplam 145 genotipin, imazamox herbisitine toleransları belirlenmiştir. Yapılan denemelerde herbisit uygulaması, önerilen dozun %50 fazlası (1500 ml.ha⁻¹ veya 60 g a.i. ha⁻¹) olacak şekilde bitkiler 5-6 boğumlu olduğu dönemde uygulanmıştır. Genotiplerin herbisite karşı tepkisi, bitki boyu ölçümleri ve 1-5 skalası (1=dirençli, 5= ölü) ile tarla şartlarında herbisit uygulamasından 45 ve 60 gün sonra, sera şartlarında ise 30 ve 60 sonra değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre dört genotip (IMI-128, IMI-130, IMI-138 ve IMI-139), hem tarla hem de sera şartlarında yüksek herbisit toleransı sergilemiştir. Bu genotiplerin, herbisite toleranslı mercimek çeşitlerinin geliştirilmesi için ıslah programlarında kullanılabileceği rapor edilmiştir (Ahmed, 2019).

Kanada'nın batısında nohut (*Cicer arietinum* L.) yetiştirilen alanlarda imidazolinon herbisitlerine toleranslı genlerin tanımlanması ve gelecek kültür bitkisi varyetelerinde kullanılmasına yönelik yapılan araştırmalarda, nohutta imazethapyr/imazamox toleransı için geleneksel ıslahın mümkün olduğu bildirilmiştir (Taran ve ark., 2010).

İmi-Tolerant Kültür Bitkilerinin Avantajları

Herbisit tolerant bitkiler, üreticilere yabancı otlarla mücadelede daha iyi ve etkin kontrol, ürün zararlanmasında azalma, düşük maliyet, daha az herbisit kullanımı, dayanıklı yabancı ot gelişiminin önlenmesi, toprak işlemenin azalması ve çevresel risklerin azaltılması gibi fırsatlar sunmaktadır (Felton ve ark., 1996; Vrbničanin ve ark., 2017). İmidazolinon herbisitler, çevresel profile uygun, düşük dozlarda bile etkili olan çok geniş yabancı ot etki spektrumuna sahip olup hayvanlar, kuşlar, balıklar ve omurgasızlar üzerinde düşük toksisite olması ile nispeten çevresel profile uygun herbisitlerdir. Bu özellikleri, geleneksel üretim teknikleri (transgenik olmayan) ile imidazolinona tolerant (imi-tolerant) bitkilerin geliştirilmesine olanak sağlamış ve imi-tolerant bitkiler kullanılarak yapılan yabancı ot mücadelesinde ülkemizde başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Aksoy ve Pekcan, 2014). İmidazolinona toleranslı kültür bitkilerinin geliştirilmesinde GDO'suz yani yabancı genetik

bir materyalin girişini içermeyen yöntemin kullanılmaması da GDO'lu bitkilerden elde edilen ürünlerin sağlık riski taşıdığı görüşü (EFSA, 2004) oluşmayacaktır.

Son dönemde birçok önemli yabancı ot türünde ALS inhibitörü herbisitlerine karşı yaygın bir direnç görülmektedir. Dünya genelinde hali hazırda ALS grubu herbisitlere karşı 2021 yılı sonuna kadar 191 yabancı ot türü dayanıklılık vakası bildirilmiş olup, gün geçtikçe de bu rakam artmaktadır (Heap, 2021). Elbette yoğun herbisit kullanımı yerine ruhsatlı ve uygun dozların uygulanması her teknikte esastır. Böylece hem direnç hem de üründe meydana gelebilecek fitotoksite engellenmiş olacaktır. Tek bir uygulamayla dar ve geniş yabancı otlara karşı mücadele sağlanmış olacak ve bu sayede makine kullanımını azaltılmasıyla enerji tasarrufu sağlanarak çevresel olarak da CO₂ salınımının azalması (Ali ve ark., 2014) ürün yönetimi esnekliği ve kolaylığı sağlayabilecektir. Direnç sorununa karşı yeni seçici herbisitlerin geliştirilmesi ve özellikle pazarda yer edinmesi gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu anlamda yeni ticari herbisitlerin tescilinde meydana gelen zorlukların üstesinden gelmede imi-tolerant bitkilerin kullanımı başarılı bir yöntem olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca yabancı ot mücadele problemlerine alternatif bir çözüm sunmasıyla yeni bir tekniktir (Prakash ve ark., 2020).

İmi-tolerant kültür bitkilerin kullanımı son yıllarda yabancı ot mücadelesinde alternatif bir mücadele yöntemi olarak karşımıza çıkmakta ve adaptasyonunun sağlanarak tarımsal uygulamalardaki kullanımıyla herbisit dayanıklılığı sorununa çözüm sunabileceği düşünülmektedir. Bu tür sürdürülebilir uygulamalar, yetiştiriciler için kısa vadede maliyetli olsa da, özellikle uygun politikalar ve teşvikler uygulandığında, uzun vadede faydalı sağlayacaktır (Lamichhane ve ark., 2017). Bununla birlikte spesifik imi-tolerant ürünlerin ticarileştirilmesinde nihai karara varmadan önce, üründe potansiyel verim kaybı, herbisit performansı, ürün tescil ve kimyasal maliyetleri, yabancı ot türlerine gen kaçış potansiyeli gibi konular dikkate alınmalıdır (Tsafaris, 1996). Tarım işçiliğinin azalması, mekanik mücadele ve herbisit uygulama maliyetinin artması gibi konular herbisit toleransı için ıslahı zorunlu kılmaktadır.

İmi-Tolerant Kültür Bitkilerinin Dezavantajları

Herbisit tolerant bitkiler; herbisitlere dirençli yabancı ot ve kültür bitkilerinin gelişmesi, duyarlı akraba yabancı otlara gen akışı ve kendiliğinden gelen bitkilerde artış gibi riskleri de beraberinde getirmektedir (Powles ve Shaner, 2001; Devine, 2005; Prakash ve ark., 2020). Öte yandan, yoğun herbisit kullanımı sonucu oluşabilecek herbisit sürüklenmesiyle çevresel olumsuzlukların ortaya çıkması endişesi oluşabilmektedir (Felton ve ark., 1996). Zira son yıllarda özellikle herbisit toleranslı kültür bitkilerinin kullanımının pestisit kullanımı üzerindeki etkileri önemli bir tartışma konusu olmuştur. Bazıları bu çeşitlerin herbisit kullanımında azalma sağladığını iddia ederken, bazıları ise tam tersini iddia etmektedir (Bonny, 2016).

Herbisit tolerant bitkiler, yabancı ot mücadelesinde küresel üretime katkı sağlayacak yeni bir çözüm sunmuş olsa da, herbisite toleranslı kültür bitkilerinin yetiştirildiği tarımsal üretim sistemlerinde aynı etki mekanizmasına sahip tek bir herbisite veya herbisit grubuna aşırı bağımlılık nedeniyle herbisite dayanıklı yabancı otların evrimleşmesini hızlandırma ve aynı zamanda tarım arazilerinin biyolojik çeşitliliğini azaltma gibi bir endişe ortaya çıkmaktadır (Malidza ve ark., 2016; Prakash ve ark., 2020). Ayrıca Avrupa ülkelerinde son

dönemde görülen önemli sorunlardan biri de sürekli monokültür yapılan alanlarda uzun süre herbisit tolerant bitkilerin kullanımıyla kendiliğinden gelen bitkilerdir. Kendiliğinden gelen bitki kültürvarları çeltik, soya, ve hardal gibi bitkilerin hasat döneminde tohumların yayılmasıyla ortaya çıkarlar ve mücadelesi oldukça zordur (Prakash ve ark.,2020).

Herbisit tolerant bitkilerin kullanımında dezavantajlardan biri, süper yabancı otların ortaya çıkışıdır. Süper yabancı otlar, genetiği değiştirilmiş bir bitki tarafından kazara tozlaşan ve bitkinin herbisitlere ve böceklere direnme yeteneği geliştirmiş vahşi bitkilerdir. Süper yabancı otlar, herbisite toleranslı kültür bitkisindeki direnç geninin doğal yollarla akrabalığı olan yabancı ota transferi ile ortaya çıkar (Prakash ve ark., 2020).

Herbisit tolerant bitkilerin kullanımıyla meydana gelen dez avantajlardan biri de “gen kaçıışı”dır. Transgenik özelliğin tozlaşma yoluyla akraba yabancı ota aktarılması şeklinde gerçekleşebilir. Kültür bitkileri ve buna akraba yabancı otlar fırsat bulduklarında polen transferi ile gen değiştirme gerçekleşebilmektedir. Dane sorgum (*Sorghum bicolor* L.) kültür bitkisi ile akraba yabancı ot olan kanyaş (*S. halepense* L. (Pers.)) arasında kendiliğinden oluşan gen kaçıışının gerçekleştiği (Vrbničanin ve ark., 2017) ve hibrit formların oluştuğu bilinmektedir (Naidu ve Ranganath, 2011).

Seefeldt ve ark. (1998) bildirdiğine göre, sakal otu (*A. cylindrica*) buğdayda önemli bir yabancı ottur ve imi-tolerant buğday bitkilerinin polenlerinden sakal otuna gen transferi olabildiğini rapor etmiştir. Bu durumda, imi-tolerant buğday üretimi yapan üreticilerin imidazolinon herbisitleri kullanmaya devam etmek istemesiyle sorun giderek artmaktadır. Aynı gen transferinin imi-tolerant çeltikte, dünyada çeltik alanlarında yaygın bir yabancı ot olan kırmızı çeltik yabancı otunda da meydana geldiği bildirilmiştir (Langevin ve ark., 1990; Tan ve ark., 2005).

İmi-tolerant kültür bitkilerinin kullanımı ile ortaya çıkabilecek olası negatif etkiler aşağıda listelenmiştir (Prakash ve ark., 2020)

- Artan herbisit kullanıma bağlı çevre ve insan sağlığına olumsuz etkileri (Goldburg, 1992; Bourdineaud, 2020).
- Ekotoksosite (toprak mikroorganizmaları, tarımsal fauna ve flora üzerinde yan etkiler)
- Herbisite dayanıklı yabancı ot ve kendiliğinden gelen kültür bitkilerinin gelişmesi (Senior ve Dale, 2002; Sudianto ve ark., 2013).
- Tarımsal verim performansının etkilenmesi (Ball ve Peterson, 2007).
- Yabancı ot türlerinde değişimler (büyüklük veya gellişim farkları)(Casquero ve ark., 2012).
- Gen kaçıışı (Chen ve ark., 2004).
- Herbisit tolerant yabancı otların gelişmesi ve yabancı ot popülasyonları içinde gen akışı (Knezevic ve Cassman, 2003).
- Herbisit sürüklenmesinin artması (Sharkey ve ark., 2021).

SONUÇ

İmidazolinonlar, düşük dozlarda bile etkili olan geniş spektrumda yabancı ot kontrolü sağlayan, çevresel anlamda düşük toksisiteye sahip ALS grubu herbisitlerdir. İmi-tolerant bitkilerle yapılan üretimle, üründe fitotoksosite gelişiminin azalması, yabancı ot mücadelesine karar vermede EZE (ekonomik zarar eşiği) belirlenmesinin daha kolay olabilmesi ve bu

sayede daha iyi ve etkin kontrol sağlanması, kalıntı gibi sorunların azalması, toprak işlemenin azalması hedeflenmektedir. İmi-tolerant bitkilerin geliştirilmesinde geleneksel üretim teknikleri kullanıldığından GDO'lu bitkilere olan bakış açısı gelişmeyecek, çok geniş spektumda yabancı ot kontrolü sağlanacak ve böylece ürün veriminin artması sağlanabilecektir. Ancak bu avantajların yanında yoğun herbisit kullanımı endişesi ortaya çıkmaktadır. Bu da doğrudan ve dolaylı olarak çevresel olumsuzlukların ortaya çıkmasını ve dirençli yabancı otların artışı teşvik edebilir. Tek bir herbisite toleranlı bitkilerin kullanımı sonucu yabancı otlarda evrimleşmeyi arttırarak süper yabancı otların ortaya çıkışına ve biyoçeşitliliğin bozulmasına neden olabilir. Herbisit tolerant ürünler entegre yabancı ot mücalesinde en etkili ve sürdürülebilir araçlardan biri gibi görülse de pratikte herbisit tolerant bitkilerin entegre yabancı ot yönetimine dahil edilmesini çoğu kez teknik ve sosya-ekonomik faktörler sınırlandırmaktadır. Bunlar; yabancı otlar ve bunların mücadelesi hakkındaki bilgileri öğrenmek ve geliştirmek için eğitim programlarının gerekliliği, mevcut mücadele programlarının revizyonu ve ürün rotasyonunun dahil edilmesinin sağlanması, bahsi geçen konularda yetiştiriciler için eğitim kurslarının zorunlu hale getirilmesi, üreticilerin biyolojik çeşitliliği korumaya yönelik farkındalığının artırılması, kamu politikasının geliştirilmesi ve çevresel risk değerlendirmesinin kapsamının genişletmesi olarak sayılabilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, Z. H., 2019. Screening of advanced generation lentil mutant genotypes for tolerance to imazamox herbicide /Mercimekte ileri generasyon mutant hatlarda imazamox herbisite dayanıklılığın belirlenmesi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Basılmış).
- Aksoy, E., Pekcan, V., 2014. Canavar otları (Orobanche spp., Phelipanche spp.) ve Mücadelesi. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü Bitki Sağlığı Araştırmaları Daire Başkanlığı Yayınları, Ankara, 80s.
- Ali, M. A., Rehman, I., Iqbal, A., Din, S., Rao, A. Q., Latif, A., Husnain, T., 2014. Nanotechnology, a new frontier in Agriculture. *Adv life sci*, 1(3), 129-138.
- Al-Khatib, K., Baumgartner, J. R., Peterson, D. E., Currie, R. S., 1998. Imazethapyr resistance in common sunflower (*Helianthus annuus*). *Weed Science*, 403-407.
- Anonim, 2012. Implementing Integrated Weed Management for Herbicide Tolerant Crops, CropLife International, <https://croplife.org/wp-content/uploads/2014/04/Implementing-Integrated-Weed-Management-for-Herbicide-Tolerant-Crops.pdf> (Erişim tarihi: 01.11.2021)
- Anonim, 2017. The guide to nufarm imicrops® herbicides and best management practices. https://cdn.nufarm.com/wp-content/uploads/sites/22/2018/05/06182501/BRimiCrops-2017imiCropsTheGuideToNufarmImiCropsHerbicidesAndBestManagementPractice_WEB_V1.pdf (Erişim tarihi: 09.04.2021)
- Anonim, 2021a. Weed Technology Volume 12, Issue 4 (October-December) 1998. p. 789. <https://wssa.net/wssa/weed/resistance/herbicide-resistance-and-herbicide-tolerance-definitions/> (Erişim tarihi: 25.05.2021)
- Anonim, 2021b. 10 İmı Tr 029 Hibrit Ayçiçeği Çeşit Üretim Ve Satış Hakkı Teknik Şartnamesi. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/ttae/> (Erişim tarihi: 17.04.2021)
- Anonim, 2021c. Clearfield® Üretim Sistemi, <https://www.agro.basf.com.tr/tr/%C3%9Cr%C3%BCnler/Clearfield/Clearfield/> (Erişim tarihi: 01.11.2021).
- Ball, D. A., Peterson, C. J., 2007. Herbicide tolerance in imidazolinone-resistant wheat for weed management in the Pacific Northwest USA. In *Whea tproduction in stressed environments*. pp. 243-250.
- Bonny, S., 2016. Genetically modified herbicide-tolerant crops, weeds, and herbicides: overview and impact. *Environmental management*, 57(1), 31-48.
- Bourdineaud, J. P., 2020. Toxicity of the herbicides used on herbicide-tolerant crops, and societal consequences of their use in France. *Drug and Chemical Toxicology*, 1-24.
- Casquero, M., Luisoni, A. J., Kiehr, K., Cantamutto, M., 2012. Invasive helianthus interference in an imi sunflower crop. In *Proc of 18 th International Sunflower Conference, Mar del Plata, Argentina*. pp. 513-518.

- Chen, L. J., Lee, D. S., Song, Z. P., Suh, H. S., Lu, B. R., 2004. Gene flow from cultivated rice (*Oryza sativa*) to its weedy and wild relatives. *Annals of botany*, 93(1), 67-73.
- Devine, M. D., 2005. Why are there not more herbicide- tolerant crops?. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 61(3), 312-317.
- Duke, S. O., 2005. Taking stock of herbicide-resistant crops ten years after introduction. *Pest Manage Sci* 61: 211–218.
- EFSA (European Food Safety Authority), 2004. Opinion of the Scientific Panel on genetically modified organisms [GMO] on a request from the Commission related to the safety of foods and food ingredients derived from herbicide- tolerant genetically modified maize NK603, for which a request for placing on the market was submitted under Article 4 of the Novel Food Regulation (EC) No 258/97 by Monsanto. *EFSA Journal*, 2(3), 9.
- Felton, W. L., Medd, R. W., Martin, R. J., 1996. An ecological perspective on the use of herbicide tolerant crops in integrated weed management. In *Eleventh Australian Weeds Conference Proceedings* (Vol. 11, pp. 586-592).
- Goldburg, R. J., 1992. Environmental concerns with the development of herbicide-tolerant plants. *Weed Technology*, 6(3), 647-652.
- Gray, J., Shattuck, J., Bradford, K., 2010. Herbicide Tolerance in Agricultural Crops, Biotechnology for Sustainability, <https://ucanr.edu/sites/sbc/files/191417.pdf> (Erişim tarihi:06.06.2021)
- Heap, I., 2021. The International Herbicide-Resistant Weed Database. <http://www.weedscience.org/Pages/SOASummary.aspx> (Erişim tarihi: 15.12.2021).
- Kaya, Y., Sahin, S., Beşer, N., 2018. Determining of yield performances of some imi resistant sunflower hybrids in Trakya region, Turkey. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, (3), 126-132.
- Kirkwood R.C., 2002. Herbicide-tolerant crops. In: Naylor REL (ed) *Weed management handbook*. Blackwell, Oxford, pp 253–279.
- Knezevic, S. Z., Cassman, K. G., 2003. Use of herbicide- tolerant crops as a component of an integrated weed management program. *Crop Management*, 2(1), 1-7.
- Knezevic, S. Z., 2010. Use of Herbicide-Tolerant Crops as Part of an Integrated Weed Management Program, <https://extensionpublications.unl.edu/assets/html/g1484/build/g1484.htm> (Erişim tarihi: 10.06.2021)
- Lamichhane, J. R., Devos, Y., Beckie, H. J., Owen, M. D., Tillie, P., Messéan, A., Kudsk, P., 2017. Integrated weed management systems with herbicide-tolerant crops in the European Union: lessons learnt from home and abroad. *Critical reviews in biotechnology*, 37(4), 459-475.
- Langevin S. A., K. Clay, Grace, H. B., 1990. The incidence and effects of hybridization between cultivated rice and its related weed, red rice (*Oryza sativa* L.). *Evolution* 44: 1000-1008.
- Malidza, G., Vrbnicanin, S., Bozic, D., Jovic, S., 2016. Integrated weed management in sunflower: challenges and opportunities. *ISC 2016*, 90.
- Monks, C. D., Wilcut, J. W., Richburg, J. S., Hatton, J. H., Patterson, M. G., 1996. Effect of AC 263,222, imazethapyr, and nicosulfuron on weed control and imidazolinone-tolerant corn (*Zea mays*) yield. *Weed technology*, 822-827.
- Naidu, V. S. G. R., Ranganath, A. R. G., 2011. Herbicide Tolerant Crops Emerging Tool in Weed Management. *pp. 173, 173*.
- Newhouse, K. E., Shaner, D. L., Wang, T., Fincher, R., 1990. Genetic modification of crop responses to imidazolinone herbicides.
- Oerke, E., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31-43.
- Peerzada, A. M., O'Donnell, C., Adkins, S., 2019. Optimizing Herbicide Use in Herbicide-Tolerant Crops: Challenges, Opportunities, and Recommendations. In *Agronomic Crops*. pp. 283-316.
- Pfenning, M., Palfay, G., Guillet, T., 2008. The CLEARFIELD® technology—A new broad-spectrum post-emergence weed control system for European sunflower growers. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 21, 649-654.
- Pfenning, M., Kehler, R., Bremer, H., 2012a. New perspectives for weed control in winter oil seed rape due to the introduction of the Clearfield® system. *Julius-Kühn-Archiv*, 2(434), 435-442.
- Pfenning, M., Tan, S., Perez-Brea, J., 2012b. Weed control in Clearfield-Plus sunflowers with superior herbicide solutions. In *Proc XVIII Sunflower Conf., Mar del Plata-Balcarce, Argentina*. pp. 535-538.
- Powles, S. B., Shaner, D. L., 2001. *Herbicide resistance and world grains*. Crc Press.
- Prakash, N. R., Chaudhary, J. R., Tripathi, A., Joshi, N., Padhan, B. K., Yadav, S., Kumar, R., 2020. Breeding for herbicide tolerance in crops: a review.
- Reade, J. P. H., Cobb, A. H., 2002. *Herbicides: Modes of Action and Metabolism*. I: Naylor, REL (red), *Weed Management Handbook*.
- Sala, C. A., Bulos, M., Echarte, A. M., Whitt, S., Budziszewski, G., Howie, W., Weston, B., 2008. Development of CLHA-Plus: a novel herbicide tolerance trait in sunflower conferring superior imidazolinone tolerance

- and ease of breeding. In *Proceedings of XVII International Sunflower Conference, Cordoba, Espana*. pp. 489-494.
- Sala, C. A., Bulos, M., Altieri, E., Weston, B., 2012. Response to imazapyr and dominance relationships of two imidazolinone-tolerant alleles at the Ahasl 1 locus of sunflower. *Theoretical and Applied Genetics*, 124(2), 385-396.
- Seefeldt S. S., R. Zemetra, F., Youngand, S. Jones.,1998. Production of herbicide-resistance jointed goat grass (*Aegilops cylindrica*) x wheat (*Triticum aestivum*) hybrids in the field by natural hybridization. *Weed Sci.* 46, 632- 634
- Senior, I. J., Dale, P. J., 2002. Herbicide- tolerant crops in agriculture: oilseed rape as a case study. *Plant Breeding*, 121(2), 97-107.
- Shaner, D. L.,2003. Imidazolinone herbicides. In: Plummer, D., Ragsdalr, N. (ed.): *Encyclopedia of Agrochemicals*. Pp. 769-784. John Wiley and Sons, Hoboke 2003.
- Sharkey, S. M., Williams, B. J., Parker, K. M., 2021. Herbicide Drift from Genetically Engineered Herbicide-Tolerant Crops. *Environmental Science & Technology*.
- Shoba, D., Raveendran, M., Manonmani, S., Utharasu, S., Dhivyapriya, D., Subhasini, G., Sharma, R. P., 2017. Development and genetic characterization of a novel herbicide (Imazethapyr) tolerant mutant in rice (*Oryza sativa* L.). *Rice*, 10(1), 1-12.
- Simard, M. J., Légère, A., Pageau, D., Lajeunesse, J., Warwick, S., 2002. The frequency and persistence of volunteer canola (*Brassica napus*) in Quebec cropping systems. *Weed Technology*, 16(2), 433-439.
- Smyth, S. J., Gusta, M., Belcher, K., Phillips, P. W., & Castle, D. (2011). Environmental impacts from herbicide tolerant canola production in Western Canada. *Agricultural Systems*, 104(5), 403-410.
- Steele, G. L., Chandler, J. M., McCauley, G. N., 2002. Control of Red Rice (*Oryza sativa*) in Imidazolinone-Tolerant Rice (*O. sativa*) 1. *Weed Technology*, 16(3), 627-630.
- Sterling, T. M., Hal, J. C., 1997. Mechanism of action of natural auxins and the auxinic herbicides. *Reviews in Toxicology*, 1, 111-142.
- Sudianto, E., Beng-Kah, S., Ting-Xiang, N., Saldain, N. E., Scott, R. C., Burgos, N. R., 2013. Clearfield® rice: Its development, success, and key challenges on a global perspective. *Crop Protection*, 49, 40-51.
- Sürek, H., Ünan, R., Beşer, N., Kaya, R., Kara, A., 2016. Yabancı ot ilaçlarına dayanıklı bazı çeltik (*Oryza sativa* L.) genotiplerinin geliştirilmesi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 94-99.
- Tan, S., Evans, R. R., Dahmer, M. L., Singh, B. K., Shaner, D. L., 2005. Imidazolinone- tolerantcrops: history, currentstatusandfuture. *Pest Management Science: FormerlyPesticideScience*, 61(3), 246-257.
- Tan, S., Evans, R., & Singh, B., 2006. Herbicidal inhibitors of amino acid biosynthesis and herbicide-tolerant crops. *Amino acids*, 30(2), 195-204.
- Taran, B., Warkentin, T. D., Vandenberg, A., Holm, F. A., 2010. Variation in chickpea germplasm for tolerance to imazethapyr and imazamox herbicides. *Canadian Journal of Plant Science*, 90(1), 139-142.
- Tsaftaris, A., 1996. The development of herbicide-tolerant transgenic crops. *Field Crops Research*, 45(1-3), 115-123.
- Uygur, S., Uygur, F. N., 2010. Yabancı Otların Biyolojik Mücadelesi. *Türkiye Biyolojik Mücadele Dergisi*, 1(1), 79-95.
- Vaughn, K. C., Duke, S. O., 1991. Biochemical basis of herbicide resistance. In *Herbicide Resistance—Brassinosteroids, Gibberellins, Plant Growth Regulators* (pp. 141-169). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Vencill, W. K. 2002. *Herbicide hand book* (No. Ed. 8). Weed Science Society of America. 2002 No.Ed. pp. 493.
- Vrbničanin, S., Božić, D., & Pavlović, D., 2017. Gene flow from herbicide-resistant crops to wild relatives. *Herbicide Resistance in Crops and Weeds* (Ed. Pacanoski, Z.), InTech, 37-63.
- Wang, Y., Wang, M., Xiang, S., Liu, Q., Qiang, S., Song, X., 2018. Analysis on the event of global herbicide tolerant transgenic crops. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 26(1), 167-175.