Artvin Çoruh Üniversitesi
Orman Fakültesi Dergisi
ISSN:2146-1880, e-ISSN: 2146-698X
Yıl:2026, Cilt:27, Sayı:2, Sayfa:1-12

ofd.artvin.edu.tr

Artvin Çoruh University
Journal of Forestry Faculty
ISSN:2146-1880, e-ISSN: 2146-698X
Year:2026, Vol:27, Issue:2, Pages:1-12

Pestisitlerin Sınıflandırılması, Formülasyonları, Toksikolojisi ve Etki Mekanizmaları

Classification, Formulations, Toxicology and Mechanisms of Action of Pesticides

Recep KOTAN[1], Meltem AVAN[2*]

[1]Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Bitki Koruma Anabilim Dalı, Erzurum

[2]Adıyaman Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Bitki Koruma Anabilim Dalı, Adıyaman

Eser bilgisi/*Article info*
Derleme/ *Review*
DOI: 10.17474/artvin.ofd.1738273

*Sorumlu yazar/*Corresponding author*
Meltem AVAN
e-mail: meltemavan@adiyaman.edu.tr

Gönderilme tarihi/*Submission date*
09.07.2025
Kabul tarihi/*Acceptance date*
11.05.2026
Yayımlanma tarihi/*Publication date*
20.06.2026

Anahtar kelimeler:
Çevre
Gıda güvenliği
Pestisitler
Hastalıklar
İnsan sağlığı
Toksikoloji

Keywords:
Environment
Food safety
Pesticides
Diseases
Human health
Toxicology

Öz

Bitkisel üretimde; cansız faktörler (meteorolojik faktörler, toprak faktörleri, zehirli gazlar ve hatalı tarımsal işlemler) ve canlı faktörlerin (hastalık etmenleri, zararlılar ve yabancı otlar) neden olduğu önemli kalite ve verim kayıpları olmaktadır. Bitkisel üretimde birim alandan elde edilen verimin artırılabilmesi ve/veya kalite kayıplarının kısmen de olsa önüne geçilebilmesi için yoğun bir kimyasal gübre ve pestisit kullanımı söz konusudur. Pestisitler; böcekler, akarlar, nematotlar, kemirgenler, funguslar, yabancı otlar ve diğer birçok istenmeyen organizmaların zararlarını önlemek veya kontrol etmek için kullanılan kimyasal bileşenlerdir. Kimyasal bileşimlerinde pek çok madde tek ve karışım halinde dolgu maddeleriyle birlikte farklı formülasyonlarda tarımda kullanılmaktadır. Özellikle pestisitlerin tabiattaki yararlı canlı türleri üzerindeki olumsuz etkileri neticesinde doğal dengenin bozulması, faydalı canlı türlerinin yok olmakla karşı karşıya kalması, hastalık ve zararlı etmenlerde zamanla gelişen dayanıklılık sorunları ve gıdalardaki kalıntı riskleri açısından oluşturduğu zararlar günümüzde artık tolere edilemeyecek boyutlara ulaşmıştır. Özellikle yoğun tarım yapılan alanlarda hastalık, zararlı ve yabancı ot popülasyonlarındaki çeşitlilik ve yoğunluk pestisit kullanımını zorunlu kılsa da yukarıda bahsedilen olumsuz etkilerin minimize edilebilmesi için üreticilerimizin pestisitler hakkında doğru bilgilendirilmesi bir zorunluluktur. Yönetmeliklerin uygulanması, uygun eğitim ve öğretim, pestisit kullanımının olumsuz etkilerini azaltmaya ve daha güvenli ve daha sürdürülebilir tarım uygulamalarını teşvik etmeye yardımcı olacaktır.

Abstract

In plant production, significant quality and yield losses occur due to abiotic factors (meteorological factors, soil factors, toxic gases, and improper agricultural practices) and biotic factors (disease agents, pests, and weeds). To increase yield per unit area and/or partially prevent quality losses in plant production, there is intensive use of chemical fertilizers and pesticides. Pesticides are chemical compounds used to prevent or control damage caused by insects, mites, nematodes, rodents, fungi, weeds, and other unwanted organisms. In their chemical compositions, many substances are used in agriculture in various formulations, either alone or in mixtures with fillers. In particular, the negative effects of pesticides on beneficial species in nature have led to the disruption of the natural balance, the extinction of beneficial species, the development of resistance to diseases and pests over time, and the risk of residues in food, which have now reached intolerable levels. Although the diversity and intensity of disease, pest, and weed populations in intensively farmed areas necessitate the use of pesticides, it is imperative that our producers be properly informed about pesticides in order to minimize the aforementioned negative effects. The implementation of regulations, along with appropriate education and training, will help reduce the negative effects of pesticide use and promote safer and more sustainable agricultural practices.

GİRİŞ

Pestisitler, bitkisel üretimde kalite ve verim kaybına sebep olan hastalık etmenleri, zararlılar ve yabancı otların zararlılarını önlemek, kontrol altına almak veya ortadan kaldırmak için uygulanan doğal veya sentetik bileşiklerdir (Ahmad vd., 2024). Bu yönleri ile değerlendirildiğinde bitkisel üretimde verimliliği artırmada önemli rol oynamalarının yanı sıra pek çok hastalık taşıyıcı vektörlerin kontrol edilmesindeki etkileri yönüyle de halk sağlığı açısından önemli katkılar sunmaktadırlar (Tudi vd., 2021). Bu kimyasalların olumlu etkilerinin yanı sıra çevre ve halk sağlığı açısından oluşturdukları riskler de göz önünde tutularak mutlaka "Entegre Zararlı Yönetimi" kurallarına dikkat edilmesi gerekmektedir (Ahmad vd., 2024).

 Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi Creative Commons Alıntı 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.

Küresel pestisit pazarı 1940'ların ortalarından bu yana öncelikle ticari işletmelerde hızlı ve istikrarlı bir şekilde artmıştır (Trellu vd., 2021). Aşırı ve kontrolsüz pestisit kullanımı hava, toprak, su kirliliğinin yanı sıra gıda güvenliğini de tehlikeli bir boyuta getirmiştir (Cech vd., 2023). Gıdalardaki kalıntı sorunu ve pestisit maruziyetinden kaynaklanan akut ve kronik sağlık sorunları özellikle gelişmekte olan ülkelerde tehlikeli boyutlara ulaşmıştır. İnsan sağlığı açısından kimyasal pestisitler kanserojen, sitotoksik ve mutajenik olabilmektedir (Fang vd., 2020). Pestisitlerin etki mekanizması tek bir canlı türüne özgü olmadığından, sıklıkla hedef organizmalar dışındaki canlılara ve insanlara da zarar verebilmektedirler.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) raporuna göre, çoğunlukla gelişmekte olan ülkeler başta olmak üzere dünyada her yıl 3 milyon kişi pestisit kaynaklı zehirlenmelere maruz kalmakta ve 200 bin kişi de hayatını kaybetmektedir (Boedeker vd., 2020). Pestisitler hücrelerdeki reaktif oksijen türlerinin üretimine yol açarak hücrelerdeki antioksidan seviyelerini ve oksidatif stresten koruma yeteneklerini azaltmaktadırlar. Bu dengesizlik nedeniyle insanlarda ve hayvanlarda proteinler, lipitler ve nükleik asitlerin üretiminde aktif rol oynayan hücresel sinyal yollarını da etkilemektedirler. Pestisitlerin uzun vadeli sağlık etkileri zaten reaktif oksijen türleri ve oksidatif stresten kaynaklanmaktadır (Kaur vd., 2019). Pestisitler bu olumsuzları yüzünden özellikle de dikkat edilmeden uygulandıklarında akut zehirlenmelere, beyin kanseri, meme kanseri, prostat kanseri, mesane kanseri ve kolon kanseri (Singh vd., 2018, Rani vd., 2021), Alzheimer (Frisoni vd., 2022), Parkinson (Perrin vd., 2021), nörotoksisite (Wang vd., 2024), kısırlık (Foucault vd., 2021), lösemi (Rafeeinia vd., 2023) ve diyabet (Hernandez vd., 2022) gibi çeşitli kronik hastalıklara neden olabilmektedir.

Bu derlemenin amacı; sürdürülebilir bitkisel üretimde insan ve çevre sağlığını tehdit eden bilinçsiz pestisit kullanımının zararlarını ortaya koymak ve bu sorunları azaltabilecek üretici eğitimleri ile yasal mevzuatların rolünü detaylı bir şekilde incelemektir. Literatürde pestisitlerin genel zararlarını baz alan pek çok araştırma bulunmasına rağmen, sahada yapılan pratik uygulamalar ile teorik düzenlemeler arasındaki kopukluğu giderecek, doğrudan üretici bilincini artırmaya yönelik genel derlemelerin eksikliği dikkat çekmektedir. Bu amaçla, tarımsal üretimde pestisit kullanımının kaçınılmaz olduğu üretim alanlarında, hastalık ve zararlılarla mücadele ederken aynı zamanda doğal dengeyi koruyacak güvenli pestisit kullanım metotları ve sürdürülebilir eğitim modelleri konusundaki literatür boşluğunu doldurmayı hedeflemektedir. Böylece hem üreticiler hem de düzenleyiciler için pratik, kolay uygulanabilir ve güncel bir rehber kaynak sunulması uygun olacaktır.

PESTİSİTLERİN SINIFLANDIRILMASI

Pestisitler, fiziksel, kimyasal ve diğer özellikleri bakımından birbirinden farklı olan maddeler veya madde karışımlarıdır (Ahmad vd., 2024). Bu nedenle, bu özelliklere göre farklı sınıflandırmalara ayrılırlar. Günümüzde yaygın olarak kullanılan pestisitler; pestisitin işlevine, öldürdüğü zararlı organizmaya ve pestisitin kimyasal bileşimine göre üç ana sınıflandırmaya ayrılır (Mirzayev, 2024). Dünya Sağlık Örgütü ise pestisitlerin toksisitesine göre; son derece tehlikeli, çok tehlikeli, orta derecede tehlikeli ve daha az tehlikeli pestisitler olarak dört gruba ayırmaktadır. Verdadero vd. (2025) kimyasal bileşimine göre pestisitleri doğal ve sentetik pestisitler olarak 2'ye ayırmıştır. Bu gruplandırmada sentetik pestisitler ise inorganik ve organik pestisitler olarak iki gruba; organik pestisitler ise organoklorinler, organofosfatlar, karbamatlar, piretrinler, neonikotinoidler ve piretroidler olmak üzere 6'ya ayrılmıştır. Bu gruplandırmalardan da anlaşılacağı üzere pestisitlerin sınıflandırılması ile ilgili literatürde oldukça farklı görüşler bulunmaktadır. Pestisitler konusundaki bilimsel gelişmelere göre de her geçen gün farklı sınıflandırmaların yapılabileceği düşünülmektedir. Ancak burada konunun daha sade ve anlaşılır olabilmesi açısından Khan vd. (2023)'nın yapmış oldukları sınıflandırma dikkate alınmış ve buna göre de pestisitler; kimyasal yapılarına, formülasyon şekillerine, oluşturdukları risklere ve uygulama şekillerine göre dört farklı gruba ayrılmıştır.

Kimyasal Bileşimlerine Göre Pestisitler

Organoklorinler

En az beş klor içeren organik insektisitlerdir. Organoklorinler veya klorlu hidrokarbonlar olarak bilinirler. Organoklorin pestisitleri, kimyasal yapılarında klor atomlarının varlığı ile karakterize edilir (Yang vd., 2023). Organoklorinler sadece hedef zararlı böcekleri değil aynı zamanda balıklar, memeliler (sıçan, yarasa vb.), amfibiler (kurbağa), deniz memelileri (foklar) ve insanlar gibi birçok hedef dışı birçok organizmada kalıcı toksik etkiler gösterirler. Ayrıca sucul organizmalar ve kuşlar üzerinde de olumsuz etkilerinin olduğu belirtilmektedir. Bu kimyasalların yağ dokusunda birikerek toksik etki yaptıkları, DNA hasarlarına sebep oldukları, nörotoksik ve endokrin bozucu etkilerinin olduğu belirtilmektedir (Singh vd., 2016). Örneğin; DDT ve klordan gibi organoklorin içeren pestisitler, sinir sistemi üzerinde akut nörotoksik etki oluşturarak aşırı uyarılma, tremorlar ve konvülsiyonlar (generalize nöbetler) meydana getirir; ileri düzey toksisitede bu uyarılmanın sonucunda felç ve ölüme kadar ilerleyen nörolojik tablolar görülebilir (Van Melis vd., 2025).

Organofosfatlar

Bu gruptaki pestisitler fosfor içerir ve fosforik asitten türetilirler. Bunlar genellikle akarisit ve insektisit olarak kullanılırlar. Böceklerde sinir fonksiyonu için gerekli bir enzim olan kolinesterazın aktivitesini inhibe ederek etkili olurlar. Örnek olarak Malathion, Klorpirifos ve Diazinon verilebilir. Bu gruptaki pestisitler orta düzeyde zararlı direncine sahip olsa da biyolojik olarak parçalanabilirler (Fahimi-Kashani ve Hormozi-Nezhad, 2016; Ahmad vd., 2024).

Karbamatlar

Bu gruptaki pestisitler organofosfatlara benzer ancak farklı bir kimyasal yapıya sahiptirler. Sinir sistemi üzerine etki ederek böcekleri öldürüler. Parçalanma süreleri genellikle organofosfatlara kıyasla daha kısadır. Karbaril, Metomil ve Propoksur bu gruptaki pestisitlere örnek verilebilir. Doğada parçalanma sürelerine dikkat edilerek çevresel kirlilik üzerindeki riski azaltılabilir (Sepahi vd., 2023; Ahmad vd., 2024).

Sentetik Piretrinler

Doğal piretrinlerin içeriklerinin sentetik olarak üretilerek farklı oranlardaki karışımlarından elde edilen pestisitlerdir. Bu grup pestisitler ışığa maruz kaldıktan sonra kolayca parçalanırlar. Örneğin; Neonikotinoidler, böceklerdeki nikotinik asetilkolin reseptörleri üzerinde etki ederek felce ve ölüme neden olan bir sistemik pestisittir. Tarımda yaygın olarak kullanılırlar ve emici böceklere karşı etkinlikleriyle bilinirler (Zaharia vd., 2023).

Giriş Yollarına Göre Pestisitler

Pestisitler dokuya giriş yollarına göre; sistemik pestisitler, sistemik olmayan pestisitler, mide zehirleri, fumigantlar ve repellentler olarak beş gruba ayrılırlar (Shekhar vd., 2024).

Sistemik Pestisitler

Sistemik pestisitler; bitkiler tarafından emilen ve gövde, yaprak, kök ve çiçekler dâhil olmak üzere bitki dokuları boyunca taşınmaktadırlar. Özellikle sokucu emici ağız yapısına sahip böcekler bitki yüzeyindeki pestisite doğrudan maruz kalmasalar bile bitki öz suyu ile beslenirken pestisiti bünyeye alır, yaralanır veya ölürler (Chagnon vd., 2015). Sistemik böcek öldürücülere örnek olarak İmidakloprid, Klotianidin örnek olarak verilebilir. Pestisit bitkinin bir kısmına temas etse bile yeni oluşan dokular da dâhil olmak üzere bitkinin bütün dokularına taşınarak etkili olmaktadır. Bu özellikleri sayesinde

sistemik böcek öldürücüler gizli veya ulaşılması zor zararlılara karşı da etkili olabilirler. Ancak, sistemik pestisitler hedef dışı bitkiler tarafından da emilebilir ve bu da faydalı böcekler veya işlenmiş bitkilerle beslenen türler için beklenmedik sonuçlara yol açabilmektedir (Ahmad vd., 2024).

Sistemik Olmayan Pestisitler

Sistemik olmayan pestisitler, uygulandıktan sonra bitkinin yüzeyinde kalır ve bitki içinde hareket etmezler. Doğrudan bitki yüzeylerine veya zararlılara uygulanırlar ve o anda ortamda bulunan zararlılarla temas ederek onları öldürür veya uzaklaştırırlar. Bu yüzden sistemik olmayan pestisitler, zararlıların anında kontrol altına alınması veya yok edilmesinin gerekli olduğu ve uzun süreli kalıcı korumaya gerek olmadığı durumlarda uygundurlar (Satpathy vd., 2020). Bu grup pestisitlerin etkinlikleri doğrudan uygulanan bitki bölümleriyle sınırlı olduğundan yeni oluşan bitki dokularını istila eden zararlıları kontrol etmek yeniden uygulanmaları gerekir.

Mide Zehirleri

Hedef haşere tarafından yutularak işlev görürler. Tüketildikten sonra, bu pestisitler haşerenin sindirim süreçlerini veya iç fonksiyonlarını bozarak hızlı zehirlenme, koordinasyon kaybı, felç ve ölümüne yol açarlar. Mide zehirleri genellikle yem veya yem katkı maddesi olarak formüle edilir ve bu da onları bitki materyali veya depolanmış ürünlerle beslenen haşerelerin kontrolü için özellikle kullanışlı hale getirir. Mide zehirlerinin etkinliği, haşerenin beslenme alışkanlıklarına ve pestisitin yeterli miktarda tüketilebilme yeteneğine bağlıdır (Oguh vd., 2019).

Fumigantlar

Fümigantlar, hava ve toprak yoluyla nüfuz ederek kapalı alanlardaki veya toprak içindeki zararlılara ulaşan gaz halindeki böcek ilaçlarıdır. Bu kimyasallar buharlaşarak çevreye yayılır ve gizlenmiş veya yüzey işlemlerine doğrudan maruz kalmayan zararlıları hedef alır. Fümigantlar, böcekler, nematodlar ve mantarlar gibi zararlıları kontrol etmek için tarım, depolama tesisleri ve binalar dâhil olmak üzere çeşitli ortamlarda kullanılır. Fümigantların gaz halindeki yapısı, ulaşılması zor alanlardaki zararlılara nüfuz etmelerini ve onları öldürmelerini sağlayarak kapsamlı zararlı yönetimi çözümleri sunar (Ducom, 2016).

Repellentler

Bu maddeler, zararlıların işlenmiş yüzeylere veya bitkilere temas etmesini veya bunlarla beslenmesini engellemek için tasarlanmıştır. Zararlıları öldüren diğer böcek ilaçlarının aksine bunlar zararlıları uzaklaştıran hoş olmayan veya tahriş edici bir etki yaratarak işlev görürler. Bitkilere, organizmalara veya yüzeylere uygulanabilirler ve mevcut zararlıları ortadan kaldırmak yerine zararlıları uzaklaştırarak onların istilalarını önlemek için kullanılırlar (Reddy ve Guerrero, 2010).

Fonksiyona Göre Pestisitler

Bu gruptaki pestisitlerde hedef organizmaya ya da kullanım amacına göre değişik gruplandırmalar yapılabilmektedir. Bu gruplandırmalar farklı ülkelerin yönetmeliklerinde farklı isimlendirilebilmektedir. Örneğin, büyüme düzenleyiciler zararlıların büyümesini teşvik eder veya engeller, yaprak dökücüler bitki yapraklarının dökülmesine yol açar, kurutucular böceklerin kurumasına ve ölmesine yol açar, kovucular zararlıları uzaklaştırır ve çekiciler zararlıları cezbederek tuzağa düşürürler (Dar ve Kaushik, 2022). Birden fazla etkinliği olan pestisitler birden fazla pestisit sınıfına dâhil edilebilmektedir. Örneğin; Aldikarb, Florida turunçgil üretiminde yaygın olarak uygulanmakta ve sırasıyla böcekleri, nematodları ve akarları kontrol ettiği için insektisit, akarisit veya nematisit olarak kategorize edilebilmektedirler (Ahmad vd., 2024). Hedef zararlılara göre pestisit türleri, işlevleri ve pestisit aktif maddelerini gösteren örnekler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Hedef zararlılara göre pestisitlerin sınıflandırılması (Ahmad vd., 2024)

Pestisit Türleri (Alfabetik yapı)	İşlevleri	Bazı Örnekler
Akarisitler	Akarları için kullanılan kimyasallar	Bifenazat
Alg öldürücüler	Algleri öldüren kimyasallar	Bakır, gümüş ve amonyum bileşikleri
Bakterisitler	Bakterilerin neden olduğu zararları engellemek için kullanılan kimyasallar	Antibiyotikler ve bakırlı bileşikler
Balık öldürücüler	Balıklara karşı kullanılan kimyasallar	Rotenon, niklosamid ve antimisin A
Fungisitler	Fungusların neden olduğu zararları engellemek için kullanılan kimyasallar	Benzimidazoller, diazinler, morfolinler, diazoller ve triazol
Herbisitler	İstenmeyen yabancı otları öldürmek için kullanılan kimyasallar	Triazinler, amidler, üre türevleri, sülfonil üre, urasil, karbamat herbisitler, bipiridiller ve dinitroanilinler
İnsektisitler	Böcekleri öldürmek veya gelişmelerini önlemek için kullanılan kimyasallar	Organofosfatlar, klorlu, hidrokarbonlar, piretrinler ve karbamatlar
Kurutucular	Bitkilerin dokularını kurutarak etki eden kimyasallar	Borik asit
Kuş öldürücüler	Kuşları öldüren kimyasallar	Anthraquinone, Capsaicin, Methiocarb, Methyl anthranilate ve Polybutene
Lampricitler	Lamprey balıklarını öldüren kimyasallar	TFM ve niklosamidler
Larvisitler	Larvaların büyümesini engellemek kimyasallar	Metopren ve temefos
Nematisitler	Nematodları öldürmek için kullanılan kimyasallar	Aldikarb ve karbamat
Ovisitler	Özellikle yumurtaları öldürmek kimyasallar	Benzoksazin
Repellentler	Zararlıları uzaklaştıran kimyasallar	DEET, Picardin veya IR 3535 ve sadece giysiler için permethrin
Rodentisitler	Kemirgenleri öldürmek için kullanılan kimyasallar	Klorofasinon ve varfarin
Silvisitler	Odunsu bitkilere karşı kullanılan kimyasallardır.	Tebuthiuron ve kakodilik asit
Termitisitler	Termitleri yok etmek için kullanılan kimyasallar	Fiproni ve klorantraniliprol
Yosun öldürücüler	Yosunları öldürmek ve büyümesini engellemek için kullanılan kimyasallar	Bakır sülfat
Yumuşakça öldürücüler	Yumuşakçaları öldüren kimyasallar	Niclosamide ethanolamine tuzu ve abamectin

TİCARİ PESTİSİT FORMÜLASYONLARI

"Ticari formülasyonlar" terimi, pestisitlerin güvenli, etkili ve uygulanması kolay olacak şekilde ilgili yönetmeliklere göre tasarlanmış pestisitleri ifade etmektedir. Farklı formülasyonlarda üretilebilirler (Çizelge 2). Etkili ve güvenli pestisit kullanımını sağlamak için ticari bir pestisit formülasyonu seçerken zararlı ve ürün, uygulama yöntemi, kalıcılık ve kalıntı etkiler, bölgesel düzenlemelere ve güvenlik normlarına uyumun sağlanması ve kullanım kolaylığı gibi birçok kıstas dikkate alınmalıdır.

Çizelge 2. Ticari pestisit formülasyonları (Ahmad vd., 2024)

Ticari Pestisit Formülasyonları	Tanımları
Granüller	Pestisit içeren küçük peletler veya granüller granüler formülasyonları oluşturur. Genellikle hedef boyunca dağılırlar.
Islatılabilir Tozlar	Bu pestisit parçacıkları ince toz haline getirilir ve zararsız maddelerle birleştirilir. Uygulamadan önce, bir süspansiyon oluşturmak için suyla birleştirilmeleri gerekir. Stabiliteleri ve uzun raf ömürleriyle önemlidirler.
Çözünebilir Tozlar	Çözünebilir tozlar ıslatılabilir tozlara benzer ancak suda tamamen çözünecek şekilde tasarlanmıştır.
Sıvı Konsantreler	Genellikle bu kompozisyonlar su ile seyreltildikten sonra uygulanır. Sıklıkla emülsifiye edilebilirler.
Tozlar	Genellikle bir toz aplikatörü vasıtasıyla uygulanırlar. Toz formülasyonları normalde düşük nem oranına sahip bölgelerde veya sıvı kullanımının mümkün olmadığı her yerde kullanılır.

Aerosoller	Aerosol formülasyonları, uçan böcekleri kontrol etmek için ince bir sprey yayan sıkıştırılmış kaplardır.
Mikrokapsüller	Mikrokapsüllenmiş pestisitler, aktif bileşeni çevreleyen küçük kapsüllerdir. Kontrollü salınım sağlarlar ve uzun süreli etkinlik için yüzeylere yapışabilirler.
Yemler	Yemler zararlıları çekmek için tasarlanmıştır ve aktif bileşen böcek ilacı içerir. Karıncalar, hamamböcekleri ve kemirgenler gibi böcekleri kontrol etmek için sıklıkla kullanılırlar. Yemler jel, macun veya katı bloklar halinde olabilir.
Nano-Bazlı Pestisit Formülasyonu	Kontrollü salınım mekanizmaları aracılığıyla, nano bazlı pestisit formülasyonunun geliştirilmesi, aktif bileşenlerin yeterli miktarını hassas bir şekilde sağlamayı amaçlamaktadır.
Ultra düşük hacimli sıvı	Orijinal sıvı formunda veya az miktarda çözücüde çözülmüş katı ürün olarak satılır. Bu konsantreler %100'e yakın aktif bileşen içerebilir. Bunlar, olduğu gibi kullanılmak veya yalnızca az miktarda belirtilen çözücülerle seyreltilmek üzere tasarlanmıştır. Bu özel amaçlı formülasyonlar tarım, orman, süs bitkileri ve sivrisinek kontrol programlarında kullanılır. Daha büyük damlacıklar verimsiz, israf edici ve istenmeyen çevresel etkilere sahip olarak kabul edilir. Ancak, ULV uygulamaları doğru yapıldığında çok etkilidir ve insanlar ve diğer hedef olmayan organizmalar için çok güvenlidir.

TİCARİ PESTİSİTLERİN TOKSİKOLOJİSİ

Ticari pestisitler, çeşitli toksisite derecelerine sahip çok çeşitli kimyasallar içermektedirler. Pestisit toksisitesi; aktif bileşen, formülasyon, aktif bileşen miktar ve maruz kalma yolu vb. çeşitli faktörlere bağlı olarak dâhil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenebilirler. Örneğin;

Klorpirifos; çok sayıda zararlıyı kontrol etmek için kullanılan bir organofosfat insektisit olup insanlar için orta ile ciddi bir risk oluşturur ve özellikle küçük bebeklerde nörogelişim üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu gösterilmiştir. Güvenlik sorunları nedeniyle, klorpirifos bazı ülkelerde ciddi şekilde kısıtlanmıştır. Balık, kuş ve faydalı böcekler gibi hedef dışı canlılar için ciddi şekilde tehlikeli olabilir (Wongta vd., 2022).

Glifosat; geniş spektrumlu bir herbisittir. Kusma, mide bulantısı, karın ağrısı ve ishal gibi düşük akut toksik sonuçlara sahiptir. Bazı araştırmalara göre, glifosatın hormonal sistemleri değiştiren bir endokrin bozucu olarak etki ettiği gösterilmiştir (Klatyik vd., 2023).

Paraquat; çeşitli ürünlerdeki yabancı otları kontrol etmek için kullanılırlar. Son derece zehirlidirler ve tüketildiğinde veya cilde uygulandığında ciddi zehirlenmelere neden olabilirler (Zhou vd., 2013). Solunması veya yanlışlıkla yutulması, akciğer dokusunun hasar görmesi ve kalınlaşmasıyla tanımlanan bir durum olarak ifade edilen pulmoner fibroza neden olabilir (Wu vd., 2018). Akciğer tahribatıyla bağlantısı nedeniyle, birçok ülkede yasaklanmıştır.

Malathion; tarım alanlarının çok çeşitli böcekleri kontrol etmenin yanı sıra sivrisinek kontrolü için açık havada kullanılırlar. İnsanlar için orta derecede tehlikeli olarak kabul edilir ve baş dönmesi ve mide bulantısına neden olabilirler. Çeşitli malathion formülasyonlarının gecikmiş nörotoksisite ile bağlantılı olabildiği belirtilmektedir (Elmorsy vd., 2022).

Organofosfat; gecikmiş nöropatiye, kademeli güçsüzlüğe, uyuşukluğa ve koordinasyon kaybına neden olabildiği belirtilmektedir (Lotti ve Moretto, 2005). Toksisitelerine göre pestisitlerin sınıflarını gösteren bilgiler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Toksisitelerine göre pestisitlerin sınıfları (Gupta, 2007; Ahmad vd., 2024)

Pestisit Sınıfı	Toksisite Seviyeleri	Sıçan Örnekleri İçin LD50 Değerleri	
		Ağız	Cilt
Sınıf Ia	Son derece tehlikeli	<5	<50
Sınıf Ib	Çok tehlikeli	5–50	50–200
Sınıf II	Orta derecede tehlikeli	50–2000	200–2000
Sınıf III	Biraz tehlikeli	>2000	>2000
Sınıf IV	Akut olma olasılığı düşüktür	5000 veya daha yüksek	

FARKLI PESTİSİTLERİN ETKİ MEKANİZMALARI

Pestisitler; içeriğindeki aktif maddeler ve yardımcı maddelerin türüne ve konsantrasyonlarına bağlı olarak farklı düzeylerde toksik etki göstermektedir. Yardımcı maddeler, pestisitlerin stabilitesini, uygulamasını veya etkinliğini artırmak için formülasyonlara eklenirler. Bu yardımcı maddeler; çözücüler, yüzey aktif maddeleri, koruyucular ve emülgatörler olarak isimlendirilirler. Yalnızca aktif bileşenlerle karşılaştırıldığında, pestisit yardımcı maddeleri daha yüksek toksisiteler göstermektedir. Hatta yardımcı maddelerin bir pestisit formülasyonundaki aktif kimyasallarla etkileşime girmesiyle sinerjik etkilerinin de ortaya çıkabildiği belirtilmektedir (Wu vd., 2018).

Pestisit formülasyonlarındaki aktif maddelerin ve yardımcı maddelerin toksisitelerinin ticari hale getirilmeden önce düzenleyici kurumlar tarafından değerlendirilmesi gerekir. Petrol damıtıkları gibi bazı çözücüler zararlı olabilir ve cilt ve diğer vücut sistemleri üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilirler (Gradiski vd., 1983). Yüzey aktif maddeleri, böcek ilaçlarının daha kolay dağılmasına, nemlenmesine ve nüfuz etmesine yardımcı olan kimyasallardır. Alkilfenol etoksilatlar ve nonilfenol etoksilatlar gibi belirli yüzey aktif maddelerin sucul yaşama zararlı olduğu ve endokrin bozucu etkilere sahip olduğu keşfedilmiştir (Guenther vd., 2003; Mesnage vd., 2019).

Benzer şekilde, pestisitin raf ömrü ve kararlılığı bazı stabilizatörler ve koruyucular tarafından sağlanmaktadır. Bunlara örnek olarak formaldehit dâhil olmak üzere zararlı olabilen çeşitli organometalik bileşikler insan kanserojeni olarak bilinirler (Kwak vd., 2020). Pestisit formülasyonlarında, emülgatörler su ve yağ bazlı bileşenlerin kombinasyonunu stabilize etmek için kullanılır. Bazı emülgatörlerin su yaşamına tehlikeli olduğu belirtilmektedir (Leal vd., 2020). Pestisitlerin içeriğindeki toksik yardımcı maddelere olan maruziyeti azaltmak için etiket talimatlarına uygun şekilde gerekli güvenlik önlemlerini almak gerekmektedir. Dolgu maddesi olarak kullanılanlar dışında pestisitlerde asıl etki etkili maddeden kaynaklanmaktadır. Bazı herbisit, insektisit ve fungusitlerin bileşiminde yer alan etkili maddelerin etki mekanizmaları aşağıdaki başlıklarda özetlenmiştir.

Herbisitler

Farklı herbisit aktif maddelerinin etki mekanizmaları Çizelge 4'te verilmiştir. Örneğin; amino asit sentez inhibitörleri, bitkilerin gelişimi ve büyümesi için önemli olan belirli amino asitlerin üretimini engellemek için bir enzim üzerinde etki etmektedir. Bu tür herbisitler, dallı zincirli amino asitler yapan Asetolaktat sentaz enzimini durdurmaktadır. Amino asit üretmeye yardımcı olan bir diğer enzim, amonyak ve glutamattan glutamin üreten glutamin sentazdır. Bu enzim aynı zamanda amino asitlerin yapımına yardımcı olduğu için herbisitler için de bir hedefidir (Pretty ve Hine, 2002). Bazı herbisitler ökaryotik hücreler için gerekli olan mikrotübül oluşturan tubulin proteinini hedef alarak çalışır. Bu maddeler tubuline bağlanarak düzenli hücre bölünmesini önler. Hücre bölünmesini engelleyen herbisitler piridinler, benzoik asitler ve dinitroanilinler gibi birçok farklı kimyasal sınıfta bulunabilir. Birçok herbisit bitkiler için hayati bir mekanizma olan fotosentezi önleyerek çalışır. Triazinler, fenilüreler, nitriller, piridazinler ve fenil karbamatlar gibi azot bazlı maddelerin

fotosentezi sınırladığı bilinmektedir. Herbisitler serbest radikallerin üretimini önleyerek, fotosentezi önleyerek, elektron taşıma sistemine zarar vererek ve koruyucu pigmentleri yok ederek çeşitli şekillerde çalışır (Thrall vd., 2011).

Çizelge 4. Farklı herbisit aktif maddelerinin etki mekanizmaları (Yadav ve Devi, 2017; Leoci ve Ruberti, 2021)

Bazı Herbisit Aktif Maddeleri	Etki Mekanizmaları
Fosfinik asit	Glutamin sentezini inhibe ederler.
İmidazolinon, Sülfonilüre, Triazolopirimidin	Asetohidroksiasit sentezini inhibe ederler.
Piridazinon, İzoksazol, Pirazol, Triketon, Triazol, İzoksazolidinon, Difenileter	Fitoen desaturaz veya 4-hidroksifenilpiruvat dioksijenazın sentezini inhibe ederler.
Kloroasetamid, Oksiasetamit, Asetamid	Yağ asidi sentezini inhibe ederler.
Benzoik Asit, Piridin Karboksilik Asit, Kinolin Karboksilik Asit	Taşıma inhibitörü yanıt proteini 1'i uyarırlar.
Difenil Eter, Tiadiazol, Fenilpirazol, Oksadiazol, Pirimidinon, Triazolinon	Protoporfirinojen sentezini inhibe ederler.
Ftalamat, Semikarbazon	Oksin taşımasını inhibe ederler.

İnsektisitler

Farklı insektisit aktif maddelerinin etki mekanizmaları Çizelge 5'te verilmiştir. Bu aktif maddeler genellikle bazı enzimlerin aktivitesini bozarlar, sodyum kanalları ile etkileşime girerek sinir sistemini bozarlar, bazı reseptörler ile etkileşime girerek bu reseptörlerin aktivitelerini bozarlar, ATP ve kitin sentezini inhibe ederler ve elektron taşıma zincirine müdahale ederek zararlılar üzerinde etkili olurlar. Örnek vermek gerekirse; başta piretrinler ve organoklorinler olmak üzere çok sayıda pestisit aktif maddesi gama-aminobütirik asit (GABA) kanallarını bloke ederek sinir sistemindeki klorür iyonu (Cl-) akışına etki ederek sinir sistemi sinyallerine müdahale ederler. Negatif yüklü klorür iyonlarının bu akışı nöronu hiperpolarize ederek bir aksiyon potansiyeli üretme olasılığını azaltır ve dolayısı ile nöronal aktiviteyi azaltırlar (Elbert vd., 2008). Ayrıca, kolinesteraz ve kitin sentezi inhibitörleri böcek öldürücüler olarak önemli bir rol oynar. Organofosforlu böcek öldürücüler ve karbamatlar sinir uyarılarının iletilmesinde rol oynayan bir nörotransmitter olan asetilkolinin parçalanmasından sorumlu asetilkolinesterazin (AChE) esteratik aktif bölgesini fosforile ederler (Songa ve Okonkwo, 2016). Kitin eklembacaklılar ve mantarlarda bulunur ancak bitkilerde veya memelilerde bulunmaz. Benzoilüreler, N-asetilglukozamin ünitelerinin kitin zincirine bağlantısını bozarak ve böceklerin tüy dökme sürecini engelleyerek böcek kütiküllerindeki kitinin sentezini bozar (Jayaraj vd., 2016).

Çizelge 5. Farklı insektisit aktif maddelerinin etki mekanizmaları (Wipff, 2002; Ruder ve Kayser, 1994)

Bazı İnsektisit Aktif Maddeleri	Etki Mekanizmaları
Karbamatlar	Asetilkolinesteraz enziminin aktivitesini inhibe ederler.
Organofosfatlar	Asetilkolinesteraz adı verilen bir enziminin aktivitesini inhibe ederler.
Piretrinler	Böceklerin sinir sistemini hedef alarak, özellikle sodyum kanallarıyla etkileşime girerler.
Hekzathiazox	Akar büyümesini inhibe ederler.
Neonikotinoidler	Böcek nikotinik asetilkolin reseptör bölgesi aracılığıyla özel olarak bağlanır ve etkileşime girerler.
Diafenthiuron, Propargit, Tetradifon	ATP sentezini inhibe ederler.
Buprofezin, Benzoilüreler	Kitin sentezini inhibe ederler.
Diamidler	Riyanodin reseptörü adı verilen belirli bir reseptörle etkileşime girerler.
Rotenon	Mitokondrideki kompleks içindeki elektron taşıma zincirine müdahale ederler.
Oksadiazinler	Voltaj kapılı sodyum kanal blokeri görevi yaparlar.

Fungisitler

Farklı fungusit aktif maddelerinin etki mekanizmaları da verilmiştir. Bu fungusit aktif maddeleri bazı enzimleri inhibe ederek metabolik süreçleri etkileyerek, mikrotübüllerin oluşumunu engelleyerek hücre bölünmesine engel olarak, solunumu engelleyerek, karotenoid ve ergosterol gibi bazı maddelerin biyosentezini engelleyerek etki ederler. Örnek vermek gerekirse; Sülfidril, fungisidal etkide önemli rol oynayan birçok enzimde bulunur. Ditiyokarbamatlar, Captan ve Folpet gibi aktif maddeler Sülfidril grubuna sahip fungal hücre enzimlerine ve koenzimlerine saldırarak hücre zarlarının yapısını ve işlevini değiştirir ve enzim sistemini durdururlar (Aponte vd., 2010). Tubulin, hücre içi iskeletin temel bir proteinidir ve Benzimidazol, tubulin ile reaksiyona girerek hücre içi iskeletin inşasını engeller. Yine Tiyabendazol, Karbendazim ve Benomil gibi bazı aktif maddeler mikrotübüllerin oluşumunu engelleyerek hücre bölünmesini önlerler (Oruc, 2010) (Çizelge 6).

Çizelge 6. Farklı fungisit aktif maddelerinin etki mekanizmaları (Sui vd., 2017; Beffa vd., 2019; Luo ve Ning, 2022)

Bazı Fungusit Aktif Maddeleri	Etki Mekanizmaları
Diklormat, Piriklor, Amitrol	Karotenoid sentezini inhibe ederler.
Tebukonazol, Popikonazol	Ergosterolün biyosentezini engellerler.
Benzimidazoller	Mikrotübüllere müdahale ederek hücre bölünmesini engellerler.
Azoksistrobin	Bir protein kompleksine bağlanarak solunumu engellerler.
Klorotalonil	Enzim aktivitesini bozarak bazı metabolik süreçleri bozarlar.
Karboksamid türevleri	Süksinat dehidrogenaz enzimini inhibe ederler.
Ziram	Metallo enzimlerin aktivitesini inhibe ederler.

SONUÇ

Pestisitler, tarımsal üretimde zararlı organizmaların kontrol altına alınmasında kritik öneme sahip bileşikler olup, bitkisel üretimde verim ve kalite artışına doğrudan katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, pestisitlerin bilinçsiz ve yoğun kullanımı sonucu; çevresel kirlilik, biyolojik çeşitlilik kaybı ve özellikle insan sağlığı üzerinde ciddi toksikolojik etkilere yol açmaktadır. Gıdalarda pestisit kalıntıları ve pestisit maruziyetine bağlı akut ve kronik sağlık sorunları, özellikle gelişmekte olan ülkelerde halk sağlığını tehdit eden başlıca risk faktörleri arasında yer almaktadır.

Kimyasal yapılarına göre organoklorinler, organofosfatlar, karbamatlar ve sentetik piretrinler gibi farklı gruplara ayrılan pestisitler; etki mekanizmaları, biyolojik parçalanabilirlikleri ve toksikolojik profilleri açısından farklılık göstermektedir. Aynı şekilde, sistemik ve sistemik olmayan pestisitler olarak uygulama yollarına göre sınıflandırılan bu bileşiklerin bitki bünyesindeki hareket kabiliyeti, etkinlik süreleri ve hedef dışı organizmalar üzerindeki etkileri de çeşitlilik arz etmektedir. Bu nedenle pestisitlerin sınıflandırılması, toksisite değerlendirmeleri ve çevresel davranışlarının kapsamlı şekilde analiz edilmesi, hem çevre sağlığı hem de insan sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Pestisitlerin kullanımında Entegre Zararlı Yönetimi (IPM) ilkelerine dayalı uygulamalar, pestisit bağımlılığını azaltırken, zararlı popülasyonlarının direnç geliştirme riskini en aza indirir. Ayrıca IPM yaklaşımları; biyolojik, fiziksel ve kültürel kontrol yöntemlerini pestisit kullanımı ile entegre ederek çevre dostu ve sürdürülebilir bir mücadele stratejisi sunar.

Sonuç olarak, pestisitlerin yalnızca kısa vadeli tarımsal faydaları değil, uzun vadeli ekolojik ve toksikolojik etkileri de dikkate alınması gerekmekle birlikte; kontrollü, sınırlı ve bilimsel temellere uygun olarak kullanımının teşvik edilmesi gerekmektedir. Gelecekte pestisitlerin çevresel etkilerini en aza indiren yeni formülasyonlar ile biyolojik kökenli alternatiflerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, sürdürülebilir tarım ve halk sağlığının korunması açısından öncelikli hedefler arasında yer almalıdır.

KAYNAKLAR

Ahmad, M.F., Ahmad, F.A., Alsayegh, A.A., Zeyaullah, M., AlShahrani, A.M., Muzammil, K., Saati, A.A., Wahab, S., Elbendary, E.Y., Kambal, N., Abdelrahman, M.H., & Hussain, S. (2024). Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. *Heliyon*, 10(7), e29128. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29128

Aponte, C., Maranon, T., & García, L.V. (2010). Microbial C, N and P in soils of Mediterranean oak forests: influence of season, canopy cover and soil depth. *Biogeochemistry*, 101 (1), 77-92. https://doi.org/10.1007/s10533.10.9418.5

Beffa, R., Menne, H., & Kocher, H. (2019). Herbicide resistance action committee (HRAC): herbicide classification, resistance evolution, survey, and resistance mitigation activities. *Modern Crop Protection Compounds*, 3, 5-32. https://doi.org/10.1002/9783527699261.ch1

Boedeker, W., Watts, M., Clausing, P., & Marquez, E. (2020). The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: estimations based on a systematic review. *BMC Publ. Health*, 20(1), 1-19. https://doi.org/10.1186/s12889-020-09939-0

Cech, R., Zaller, J.G., Lyssimachou, A., Clausing, P., Hertoge, K., & Linhart, C. (2023). Pesticide drift mitigation measures appear to reduce contamination of nonagricultural areas, but hazards to humans and the environment remain. *Sci. Total Environ.*, 854, 158814. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158814

Chagnon, M., Kreutzweiser, D., Mitchell, E.A., Morrissey, C.A., Noome, D.A., & Van der Sluijs, J.P. (2015). Risks of large-scale use of systemic insecticides to ecosystem functioning and services. *Environ. Sci. Pollut. Res*., 22, 119-134. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3277-x

Dar, M.A., & Kaushik, G. (2022). Classification of pesticides and loss of crops due to creepy crawlers. *Pesticides in the Natural Environment,* 1-21. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90489-6.00001-X

Ducom, P.J.F. (2016). The return of the fumigants. In *Proceedings of the Ninth International Working Conference on Stored Product Protection*, Campinas, Brazil, 15–18 October 2006, pp. 510–516.

Elbert, A., Nauen, R., & Salmon, E. (2008). Resistance management guidelines for the new ketoenol insecticide Movento. *Bayer CropScience Journal*, 61(2), 403-416.

Elmorsy, E., Al-Ghafari, A., Al Doghaither, H., Salama, M., & Carter, W.G. (2022). An investigation of the neurotoxic effects of malathion, chlorpyrifos, and paraquat to different brain regions. *Brain Sci.,* 12(8), 975. https://doi.org/10.3390/brainsci12080975

Fahimi-Kashani, N., & Hormozi-Nezhad, M.R. (2016). Gold-nanoparticle-based colorimetric sensor array for discrimination of organophosphate pesticides. *Anal. Chem.*, 88(16), 8099-8106. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b01616

Fang, L., Liao, X., Jia, B., Shi, L., Kang, L., Zhou, L., & Kong, W. (2020). Recent progress in immunosensors for pesticides. *Bioelectron,* 164, 12255. https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112255

Foucault, A., Vallet, N., Ravalet, N., Picou, F., Bene, M.C., & Gyan Herault, O. (2021). Occupational pesticide exposure increases risk of acute myeloid leukemia: a metaanalysis of case–control studies including 3.955 cases and 9.948 controls. *Sci. Rep.,* 11(1), 1-13. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81604-x

Frisoni, G.B., Altomare, D., Thal Ribaldi, D.R.F., Van Der Kant, R., Ossenkoppele, R., Blennow, K., Cummings, J., Van Duijn, C., & Nilsson, P.M. (2022). The probabilistic model of Alzheimer disease: the amyloid hypothesis revised. *Nat. Rev. Neurosci*., 23(1), 53-66. https://doi.org/10.1038/s41583-021-00533-w

Gradiski, D., Vinot, J., Zissu, D., Limasset, J., & Lafontaine, M. (1983) The carcinogenic effect of a series of petroleum-derived oils on the skin of mice. *Environ. Res*., 32(3), 258-68. https://doi.org/ 10.1016/0013-9351(83)90110-x

Guenther, K., Heinke, V., Thiele, B., Kleist, E., Prast, H., & Raecker, T. (2003). Response to comments on "Endocrine disrupting nonylphenols are ubiquitous in food". *Environ. Sci. Technol.,* 37(11), 2624-2624. https://doi.org/10.1021/es0300057

Gupta, R.C. (2007). *Avitrol*. Chapter 50. Basic and Clinical Principles, Veterinary Toxicology, 561-563.

Hernandez-Mariano, J.A., Baltazar-Reyes, M.C., Salazar-Martínez. E., & Cupul-Uicab, L.A. (2022). Exposure to the pesticide DDT and risk of diabetes and hypertension: systematic review and meta-analysis of prospective studies. *Int. J. Hyg Environ. Health,* 239, 113865. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113865

Jayaraj, R., Megha, P., & Sreedev, P. (2016). Organochlorine pesticides, their toxic effects on living organisms and their fate in the environment. *Interdiscipl. Toxicol*., 9(3-4), 90-100. https://doi.org/10.1515/intox-2016-0012

Kaur, R., Mavi, G.K., Raghav, S., & Khan, gI. (2019). Pesticides classification and its impact on environment. Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci., 8(3), 1889-1897. https://doi.org/ 10.20546/IJCMAS.2019.803.224

Khan, B.A., Nadeem, M.A., Nawaz, H., Amin, M.M., Abbasi, G.H., Nadeem, M., Ali, M., Ameen, M., Javaid, M.M., & Maqbool, R. (2023). Pesticides: Impacts on Agriculture Productivity, Environment, and Management Strategies. In: Aftab, T. (eds) Emerging Contaminants and Plants. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22269-6_5

Klatyik, S., Simon, G., Olah, M., Mesnage, R., Antoniou, M.N., Zaller, J.G., & Szekacs, A. (2023). Terrestrial ecotoxicity of glyphosate, its formulations, and co-formulants: evidence from 2010–2023. *Environ. Sci. Eur*., 35(1), 1-29. https://doi.org/10.1186/s12302-023-00758-9

Kwak, K., Paek, D., & Park, J.T. (2020). Occupational exposure to formaldehyde and risk of lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *Am. J. Ind. Med*., 63(4), 312-327. https://doi.org/ 10.1002/ajim.23093

Leal, J.S., Garcia, M., Ribosa, I., & Comelles, F. (2020). Environmental risk assessment of ethoxylated non-ionic surfactants. *Surfactants in Solution,* CRC Press, pp. 379-391.

Leoci, R., & Ruberti, M. (2021). Pesticides: an overview of the current health problems of their use. J. *Geosci. Environ. Protect*, 9 (8), 1-20. https://doi.org/10.4236/gep.2021.98001

Lotti, M., & Moretto, A. (2005). PNS effects and delayed polyneuropathy. In *R.C. Gupta (Ed.), Toxicology of organophosphate and carbamate compounds* (pp. 361–370). San Diego: Elsevier.

Luo, B., & Ning, Y. (2022). Comprehensive overview of carboxamide derivatives as succinate dehydrogenase inhibitors. *J. Agric. Food Chem*., 70 (4), 957-975. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06654

Mesnage R, Benbrook C, Antoniou MN (2019). Insight into the confusion over surfactant co-formulants in glyphosate-based herbicides. Food Chem. Toxicol., 128: 137-145. https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.03.053

Mirzayev, F. (2024). Chemical classification of pesticides. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 130. https://doi.org/10.5281/zenodo.10974874

Oguh, C.E., Okpaka, C.O., Ubani, C.S., Okekeaji, U., Joseph, P.S., & Amadi, E.U. (2019). Natural pesticides (biopesticides) and uses in pest management- a critical review. *Asian Journal of Biotechnology and Genetic Engineering*, 2(3), 126-143.

Oruc, H.H. (2010). In: O. Carisse (Ed.), *fungicides and their effects on animals.* Tech Publishers, Fungicides, pp. 349-362.

Perrin, L., Spinosi, J., Chaperon, L., Kab, S., Moisan, F., & Ebaz, A. (2021). Pesticides expenditures by farming type and incidence of Parkinson disease in farmers: a French nationwide study. *Environ. Res*., 197, 111161. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111161

Pretty, J., & Hine, R. (2002). Sustainable agriculture, reducing food poverty with sustainable agriculture: a summary of new evidence. *Essex: CES Report, University of Essex*, UK, 2002.

Rafeeinia, A., Asadikaram, G., Moazed, V., & Darabi, M.K. (2023). Organochlorine pesticides may induce leukemia by methylation of CDKN2B and MGMT promoters and histone modifications. *Gene,* 851, 146976. https://doi.org/10.1016/j.gene.2022.146976

Rani, L., Thapa, K., Kanojia, N., Sharma, N., Singh, S., Grewal, A.S., Srivastav, A.L., & Kaushal, J. (2021). An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *J. Clean. Prod.,* 283, 124657. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657

Reddy, G.V.P., & Guerrero, E. (2010). New pheromones and insect control strategies. *Vitamins & Hormones, 8*3, 493-519. https://doi.org/10.1016/S0083-6729(10)83020-1

Ruder, F., & Kayser, H. (1994). The thiourea insecticide diafenthiuron inhibits mitochondrial ATPase in vitro and in vivo by its carbodiimide product. *Biochem. Soc. Trans*., 22 (1), 241-244. https://doi.org/10.1042/bst0220241

Satpathy, S., Gotyal, B., & Babu, V.R. (2020). Role of novel insecticides in crop protection and their selectivity to natural enemies: a review. *J. Environ. Biol.*, 41(2), 149-160. https://doi.org/10.22438/jeb/41/2/MRN-1275

Sepahi, S., Gerayli, S., Delirrad, M., Taghavizadeh Yazdi, M.E., Zare-Zardini, H., Bushehri, B., & Ghorani-Azam, A. (2023). Biochemical responses as early and reliable biomarkers of organophosphate and carbamate pesticides intoxication: a systematic literature review. J. *Biochem. Mol. Toxicol*., 37(3), e23285. https://doi.org/10.1002/jbt.23285

Shekhar, C., Khosya, R., Thakur, K., Mahajan, D., Kumar, R., Kumar, S., & Sharma, A.K. (2024). A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and long-term human health impacts. *Toxicology Reports,* 13, 101840. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101840

Singh, Z., Kaur, J., Kaur, R., & Hundal, S.S. (2016). Toxic effects of organochlorine pesticides: a review. *American Journal of BioScience,* 4(3-1), 11-18.

Singh, N.S., Sharma, R., Parween, T., & Patanjali, P. (2018). Pesticide contamination and human health risk factor. *Modern Age Environmental Problems and their Remediation*, Springer, pp. 49-68.

Songa, E.A., & Okonkwo, J.O. (2016). Recent approaches to improving selectivity and sensitivity of enzyme-based biosensors for organophosphorus pesticides: A review. *Talanta*, 155, 289-304. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.04.046

Sui, G., Zhang, W., Zhou, K., Li, Y., Zhang, B., Xu, D., Zou, Y., & Zhou, W. (2017). Trialkylamine derivatives containing a triazole moiety as promising ergosterol biosynthesis inhibitor: design, synthesis, and antifungal activity. *Chem. Pharm. Bull*., 65 (1), 82–89. https://doi.org/10.1248/cpb.c16-00732

Thrall, P.H., Oakeshott, J.G., Fitt, G., Southerton, S., Burdon Sheppard, J.J., Russell, A., Zalucki, R.J., Heino, M.M., & Ford Denison, R. (2011). Evolution in agriculture: the application of evolutionary approaches to the management of biotic interactions in agro-ecosystems. *Evolutionary Applications*, 4(2), 200-215. https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00179.x

Trellu, C., Vargas, H.O., Mousset, E., Oturan, N., & Oturan, M.A. (2021). Electrochemical technologies for the treatment of pesticides. *Curr. Opin. Electrochem*., 26, 100677. https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.100677

Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D.T. (2021). Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health*, 18(3), 1112. https://doi.org/10.3390/ijerph18031112

Wang, C., Yao, X., Li, X., Wang, Q., Jiang, N., Hu, X., Lv Mu, H.B., & Wang, J. (2024). Fosthiazate, a soil-applied nematicide, induces oxidative stress, neurotoxicity and transcriptome aberrations in earthworm (*Eisenia fetida*). *J. Hazard Mater*., 463, 132865. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132865

Wipff, J.K. (2002). Gene flow in turf and forage grasses (Poaceae). In *Proceedings of Scientific Methods Workshop: Ecological and Agronomic Consequences of Gene Flow from Transgenic Crops to Wild Relatives,* Ohio State University, pp. 143-161.

Wongta, A., Sawang, N., Tongjai, P., Jatiket, M., & Hongsibsong, S. (2022). The assessment of organophosphate pesticide exposure among school children in four regions of Thailand: analysis of dialkyl phosphate metabolites in students' urine and organophosphate pesticide residues in vegetables for school lunch. *Toxics*, 10(8), 434. https://doi.org/10.3390/toxics10080434

Wu, M.R., Hsiao, C.Y., Cheng, C.H., Liao, F.C., Chao, C.L., Chen, C.Y., Yeh, H.I., & Su, M.I. (2018). Is endotracheal intubation a non-beneficial treatment in patients with respiratory failure due to paraquat poisoning? *PLoS One*, 13(3), e0195071. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195071

Van Melis, L., Bak, T., Peerdeman, A.M., van Kleef, R.G.D.M., Wopken, J.P., & Westerink, R.H.S. (2025). Acute, prolonged, and chronic exposure to organochlorine insecticides evoke differential effects on in vitro neuronal activity and network development. *NeuroToxicology*, 111,103308, https://doi.org/10.1016/j.neuro.2025.103308

Verdadero, F.X.D., Agarap, A.Z., Macatingrao, C.N.E., Ordonez, J.I.A., Tavu, L.E.J., Pires, D., & Balendres, M.A.O. (2025). Pesticides in the environment: benefits, harms, and detection methods. *Science*, 7(4), 171. https://doi.org/10.3390/sci7040171

Yadav, I.C., & Devi, N.L. (2017). Pesticides classification and its impact on human and environment. *Environ. Sci. Eng*., 6, 140-158. https://doi.org/10.20546/IJCMAS.2019.803.224

Yang, Y., Guo, Y., Jia, X., Zhang, Q., Mao, J., Feng, Y., Yin, D., Zhao, W., Zhang, Y., & Ouyang, G. (2023). An ultrastable 2D covalent organic framework coating for headspace solid-phase microextraction of organochlorine pesticides in environmental water. J*. Hazard Mater*., 452, 131228. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131228

Zaharia, R., Trotuș, E., Trașca, G., Georgescu, E., Șapcaliu, A., Fatu, V., Petrișor, C., & Mincea, C. (2023). Impact of seed treatment with imidacloprid, clothianidin and thiamethoxam on soil, plants, bees and hive products. *Agriculture*, 13(4), 830. https://doi.org/10.3390/agriculture13040830

Zhou, Q., Kan, B., Jian, X., Zhang, W., Liu, H., & Zhang, Z. (2013). Paraquat poisoning by skin absorption: two case reports and a literature review. *Exp. Ther. Med.,* 6(6), 1504-1506. https://doi.org/10.3892/etm.2013.1320