



Piretroid İnsektisit Deltametrinin Doza Bağlı Akut Toksisitesinin *Allium cepa* Test Modeli Kullanılarak Değerlendirilmesi

Evaluation of Dose-Dependent Acute Toxicity of the Pyrethroid Insecticide Deltamethrin Using the Allium cepa Test Model

Dilek Çavuşoğlu^{1*}, Kürşat Çavuşoğlu²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Atabey Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Isparta, Türkiye

Öz

Deltametrin, yaygın kullanımı ve düşük seçiciliği nedeniyle çevre ve özellikle bitkiler, hayvanlar ve insanlar üzerinde zararlı etkileri olan bir böcek ilacıdır. Mevcut çalışma, *Allium cepa* L. deneysel model organizmasında deltametrin insektisitinin akut toksisitesini araştırmak amacıyla yürütülmüştür. Bu amaçla, dört gruba ayrılan *A. cepa* bulblarına 7 gün süresince çeşme suyu (kontrol), 0.75, 1.0 ve 1.25 g L⁻¹ deltametrin uygulanmıştır. Çalışılan tüm deltametrin konsantrasyonları, çimlenme yüzdesi, kök uzaması, adventif kök sayısı ve taze ağırlık gibi morfo-fizyolojik özelliklerde önemli bir azalmaya neden olmuştur. Deltametrin uygulamasını takiben sitogenetik özellikler olan mitotik indekste belirgin bir azalma, mikronükleus sıklığı ve kromozomal anormalliklerde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Deltametrin uygulamasına bağlı olarak gözlenen kromozomal anormallikler arasında mikronükleus oluşumu, çekirdekte tomurcuklanma, biloblu çekirdek, kromozomal aglütinasyon, c-mitoz, yapışkan kromozomlar, kromatinin eşit olmayan dağılımı, kromozom fragmentasyonu, kromozom köprüleri, halka kromozom, kutup kayması, geri kalmış kromozomlar ve vagrant kromozom yer almıştır. Ayrıca, çeşme suyu ile muamele edilen kontrol bulblarının kökleri normal ve sağlıklı iken, deltametrin ile muamele edilen bulblarda belirgin bir kök anatomik yapı hasarı gözlenmiştir. Deltametrin kaynaklı anatomik hasarlar, epidermis ve korteks hücrelerinde hücresel madde birikimi, iletim dokusunda madde birikimi, çekirdek deformasyonu, epidermis ve korteks hücre deformasyonu, iletim dokusunda yapısal bütünlüğün bozulması, nekroz ve korteks hücre duvarında kalınlaşma olarak belirlenmiştir. Diğer yandan, incelenen morfo-fizyolojik, sitogenetik ve anatomik özelliklerdeki bozulmalar, deltametrin dozunun artmasıyla daha da belirginleşmiştir. Sonuç olarak, deltametrin biyoindikatör organizma olan *A. cepa* için çok yönlü toksik bir kimyasal ajandır.

Anahtar Kelimeler: Anatomi, büyüme, çimlenme, deltametrin, insektisit, kromozom, soğan

Abstract

Deltamethrin is a pesticide with harmful effects on the environment, especially on plants, animals, and humans, due to its widespread use and high non-selective potency. The current study was conducted to investigate the acute toxicity of deltamethrin insecticide on the model organism *Allium cepa* L. For this purpose, *A. cepa* bulbs, divided into four groups, were treated with tap water (control), 0.75, 1.0, and 1.25 g L⁻¹ deltamethrin for 7 days. All studied deltamethrin concentrations caused a significant decrease in morpho-physiological properties such as germination percentage, root elongation, number of hairy roots, and fresh weight. Following the application of deltamethrin, there was a marked decrease in the mitotic index and a significant increase in the frequency of micronucleus and chromosomal abnormalities, which are cytogenetic properties. Chromosomal abnormalities observed in relation to deltamethrin administration included micronucleus formation, nuclear budding, bilobed nucleus, chromosomal agglutination, c-mitosis, sticky chromosomes, unequal chromatin distribution, chromosome fragmentation, chromosome bridges, ring chromosomes, polar shift, lagging chromosomes, and vagrant chromosomes. Furthermore, while the roots of the control bulbs treated with tap water were normal

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: dilekcavusoglu@isparta.edu.tr

Dilek Çavuşoğlu orcid.org/0000-0002-7963-8204

Kürşat Çavuşoğlu orcid.org/0000-0001-6457-0457



and healthy, a significant root anatomical structure damage was observed in the bulbs treated with deltamethrin. Deltamethrin-induced anatomical damages were identified as accumulation of cellular substance in epidermis and cortex cells, substance accumulation in vascular tissue, nucleus deformation, deformation of epidermis and cortex cells, disruption of structural integrity in the vascular tissue, necrosis, and thickening of the cortex cell wall. On the other hand, the deteriorations in the morpho-physiological, cytogenetic, and anatomical properties examined became more pronounced with increasing doses of deltamethrin. In conclusion, deltamethrin is a multi-faceted toxic chemical agent for the bioindicator organism *A. cepa*.

Keywords: Anatomy, growth, germination, deltamethrin, insecticide, chromosome, onion

1. Giriş

Pest terimi, hasarat adı verilen zararlı organizmaları ifade etmek için kullanılan bir terimdir. Dolayısıyla pest terimi, zararlı organizmalarla mücadele için kullanılan kimyasal maddeler olan pestisit teriminin kökenidir. Pestisitler ise insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerinde bulunan veya yaşayan, ayrıca besin maddelerinin üretimi, hazırlanması, depolanması ve tüketimi sırasında onların besin değerini azaltan zararlıları öldürmek için kullanılan maddelerdir. Bu zararlı organizmalar; böcekler, yabani otlar, mantarlar, parazitler, algler, bakteriler, afidler, nematotlar, yumuşakçalar, kemirgenler ve akarlar gibi canlılardır (Kaya, 2005; Tudi vd., 2021). Pestisitler, çeşitli hastalıkların önlenmesinde, ürün kaybının azaltılmasında, ürün veriminin ve kalitesinin iyileştirilmesinde ve ürünün pazar değerinin artırılmasında kritik bir role sahip oldukları düşüncesiyle basit, hızlı ve etkili bir strateji olarak dünya çapında yaygın olarak kullanılırlar (Damalas & Eleftherohorinos, 2011). Yaygın olarak kullanılan pestisitlerin temel sınıfları organoklorinler, organofosfatlar, diamidler, neonikotinoidler, karbamatlar, fenoksiller ve piretroidlerdir (Doğaç vd., 2015; Bilal vd., 2019). Her yıl, dünya genelinde çeşitli uygulamalarda kullanılan yaklaşık üç milyar kilogram pestisitinin sadece %1'i hedef zararlıları öldürebilmek amacıyla kullanılırken geriye kalan pestisitler hedefleri dışındaki canlılara ve çevreye absorpsiyon, sızıntı, buharlaşma, sürüklenme ve akış yolu ile nüfuz ederek ekosistem istikrarını ve insan sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir (Bolle vd., 2004; Sharma vd., 2019; Tudi vd., 2021). Toprakla temas halinde, pestisitler bitkinin kök sistemi tarafından alınabilir ve daha sonra farklı bitki doku ve organlarında birikebilir (Shahid & Khan, 2022) ve bu da sonuçta büyümenin (Hatamleh vd., 2022), verimin (Glover-Amengor & Tetteh, 2009) fizyolojik (Shahid vd., 2021), metabolik (Shahid vd., 2023) ve simbiyotik (Gonzalez vd. 1996) özelliklerin azalmasına ve ayrıca hücrelerde reaktif oksijen türlerinin birikmesine, hücre zarının hasar görmesine ve iyon sızıntılarının artmasına neden olan oksidatif hasara (Parween vd., 2012) yol açabilir.

Deltametrin, zararlılara karşı geniş spektrumda etkili olan ve hızlı sonuç veren dibromo-piretroid grubu sistemik bir

böcek ilacıdır (Chauhan vd., 1999). Deltametrin, süs bitkilerinde, meyvelerde, sebzelerde ve tahıllarda görülen zararlı böcek türleri ile kimyasal mücadelede kullanılan etkili ve kalıcı bir insektisittir (Barlow vd., 2001; Şekeroğlu, 2010). Aynı zamanda, yaz aylarında ülkemizdeki belediyelerin sineklerle mücadele etmek amacıyla kullandıkları duman karışımının ana maddesini oluşturmaktadır (Özkan & Üstüner, 2012). Diğer bazı piretroidler ile karşılaştırıldığında üç kat daha güçlü olması, düşük konsantrasyonlarda yüksek etkisi, kolay parçalanması, ucuz olması, her yerde bulunabilmesi ve kullanım kolaylığı gibi temel avantajları nedeniyle hem iç hem de dış ortamlarda kullanımının arttığı bilinmektedir (Bradbury & Coats, 1989; Özkan & Üstüner, 2012; Kumar vd., 2015).

Deltametrinin bu yaygın kullanımı ve yüksek seçici olmayan gücü; çevre, özellikle de bitkiler, hayvanlar ve insanlar üzerinde zararlı etkilere neden olmaktadır (Leake vd. 1985). Deltametrin son derece lipofilik bir madde olduğu için organik çözücülerde kolaylıkla çözünür. Bu lipofilik özelliği sayesinde hücre zarından kolaylıkla geçerek hızlı bir şekilde hücre içerisine girebilir. Bu nedenle, deltametrinin sodyum kanallarında, zar proteinlerinde, hücre içi membran sistemlerinde, karaciğer ve böbrek fonksiyonlarında ve DNA'da hasarlara neden olduğu bildirmiştir (Chinn & Narahashi, 1986; Cabral vd., 1990; Michelangeli vd., 1990; Chargui vd., 2012).

Çevre kirliliğine neden olan çeşitli kimyasal ajanların genotoksik, mutajenik ve kanserojen etkilerini belirlemek amacıyla çeşitli testler ve bu testlerde farklı organizmalar kullanılmaktadır. Bu testlerden birisi, uzun yıllardır bilim insanları tarafından tercih edilen, önerilen ve mükemmel bir genetik model ve biyoindikatör olarak kabul edilen *Allium* testidir (Ünal vd., 2020). Bu test, prokaryotik ve ökaryotik organizmalarda bazı kimyasalların neden olduğu genotoksik potansiyeli belirlemek ve mitotik indeks, nükleer ve kromozomal anormallikleri değerlendirmek için kullanılan önemli bir toksisite test sistemidir (Khanna & Sharma, 2013). *Allium* testinde genellikle *Allium cepa* L. (soğan) bitkisi kullanılmakla birlikte *Allium sativum* L. (sarımsak), *Vicia faba* L. (bakla), *Zea mays* L. (mısır) ve *Hordeum vulgare* L. (arpa)

gibi bitki türleri de kullanılmaktadır (Leme & Marin-Morales, 2009; Tedesco & Laughinghouse, 2012). Önemli bir kültür bitkisi olan *A. cepa*, kolay bulunabilmesi, kısa sürede yetiştirilebilmesi, kromozom sayısının ($2n=16$) az olması ve kromozomlarının büyük ve ışık mikroskopunda incelenmelerinin kolay olması gibi çeşitli avantajları nedeniyle, *Allium* testinde en çok tercih edilen bitki türüdür (Sarac vd., 2019; Yalçın vd., 2021). Alternatif, kısa süreli, düşük maliyetli ve güvenilir bir test olan *Allium* testi, bilinen diğer toksisite testlerine kıyasla yüksek uyumluluk ve duyarlılık göstermektedir (Khanna & Sharma, 2013). Kök uçları test edilecek kimyasalla doğrudan temas halinde olduğundan, ilgili ajanların fizyolojik, sitotoksik ve genotoksik etkilerinin belirlenmesinde çok önemli bir model organizmadır (Barberio vd., 2011). Ayrıca, *Allium* testi kullanılarak yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçların, farklı hayvanların kullanıldığı in vivo çalışmalardan elde edilen sonuçlarla benzer olduğu birçok araştırmacı tarafından bildirilmiştir (Chaparro vd., 2010; Palmieri vd., 2016). Bu test, aynı zamanda hayvanların kullanıldığı deneysel çalışmalara kıyasla etik kaygılardan uzak bir rahatlık sağlamaktadır (Özkul vd., 2016; Bonciu vd., 2018).

Yapılan literatür araştırması sonucunda, bitki test sistemlerinde deltametrinin morfo-fizyolojik, sitogenetik ve anatomik özellikler üzerindeki etkilerini akut maruziyet koşulları altında birlikte ele alan çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, ticari insektisit deltametrinin yüksek dozlarda kısa süreli maruziyete bağlı akut toksik etkilerini, güvenilir bir biyoindeksör tür olan *Allium cepa* L. üzerinde *Allium* test modeli kullanılarak kapsamlı biçimde değerlendirmektir.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Test Organizması

Deney materyali olarak kullanılan bitki *Allium cepa* L. ($2n=16$) olup, Isparta ilindeki bir manavdan temin edilmiştir. Deneylere başlamadan önce, laboratuvarında soğanların kuru pulları ve kurumuş kökleri temizlenmiştir.

2.2. Test Kimyasalları ve LD₅₀ Değerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada kullanılan deltametrin, Hektaş firmasından temin edilen ve ticari adı Deltharin 2.5 EC olan insektisit formülasyonudur. Çalışmada belirtilen konsantrasyonlar (0.75, 1.0 ve 1.25 g L⁻¹), ticari ürünün birim hacimdeki miktarını ifade etmektedir. Deneylerde kullanılan diğer kimyasallar ise Merck firmasından satın alınmıştır.

LD₅₀, bir kimyasal maddenin tek seferde verildiğinde bir grup test materyalinin % 50'sinin (yarısının) ölümüne neden

olan miktardır. LD₅₀, bir materyalin kısa süreli zehirlenme potansiyelini ölçmenin bir yoludur. LD₅₀ (ölümcül doz) değerini belirlemek amacıyla soğan bulbları çeşitli konsantrasyonlardaki (0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75 ve 2.0 g L⁻¹) deltametrin ortamlarında 7 gün boyunca çimlendirilmiş ve bulbların yarısının ölümüne neden olan en uygun ve en yakın deltametrin dozu yani LD₅₀ değeri 1.0 g L⁻¹ olarak bulunmuştur. 1.0 g L⁻¹ deltametrin dozu, % 60 oranında soğan bulblarının ölümüne neden olmuştur. LD₅₀ değeriyle birlikte, % 90 oranında bulb ölümüne yol açan üst dozu 1.25 g L⁻¹ ve % 40 oranında bulb ölümüne yol açan alt dozu 0.75 g L⁻¹ olarak seçilmiştir. Bununla birlikte, 1.5 g L⁻¹ ve üzerindeki dozlarda bulb çimlenmesi tamamen engellenmiş, 0.25 ve 0.5 g L⁻¹ dozlarında ise sırasıyla % 100 ve % 80 arasında çok yüksek bir çimlenme oranı gerçekleşmiştir. Bu yüzden bu dozların çalışılması uygun bulunmamıştır.

2.3. Çimlenme Testi

Negatif kontrol grubunun kullanıldığı bu çalışmada, bilinen bir genotoksik ajan içeren pozitif kontrol grubuna yer verilmiştir. Bir negatif kontrol ve üç uygulama grubunun her biri için yirmişer adet temiz, benzer büyüklükte ve sağlıklı *A. cepa* bulbları seçilmiştir. Ardından, kapağında bulbların gireceği delikler ve içerisinde musluk suyu ve farklı konsantrasyonlarda (0.75, 1.0 ve 1.25 g L⁻¹) deltametrin bulunan steril plastik kaplara, soğan bulbları tabanları sıvı yüzeyine degecek şekilde yerleştirilmiş ve 7 gün süresince 20 °C'ye ayarlı bir inkübatörde karanlıkta köklenmeleri teşvik edilmiştir. Köklendirme periyodu sonunda, çimlenen bulbların adventif kök sayıları sayılarak; kök uzunlukları milimetrik bir cetvelle ölçülerek, taze ağırlıkları hassas terazide tartılarak; çimlenme yüzdeleri ise eşitlik (1) kullanılarak belirlenmiştir. 1 cm kök uzunluğuna ulaşan bulblar çimlenmiş kabul edilmiştir.

$$\text{Çimlenme yüzdesi (\%)} = \left[\frac{\text{Çimlenen bulb sayısı}}{\text{toplam bulb sayısı}} \right] \times 100 \quad (1)$$

2.4. Sitogenetik Analizler

Mikroskobik değerlendirmeler için kullanılan kök uçları 1-2 cm uzunluğunda kesilerek toplanmış ve %70 etanole aktarılmadan önce doymuş paradiklorobenzende 4 s boyunca bekletilmiş ve daha sonra etanol-asetik asitte (3:1 v/v) fiksasyona tabi tutulmuştur. Kök uçları sonra 60 °C'de 17 dk boyunca 1 N HCl'de hidrolize edilmiştir. Kök uçları, feulgen ile 1-1.5 s boyanmış ve ardından %45'lik asetik asitte

lam üzerinde ezilmiş, lamel kapatılmış, lamelin etrafına balsam sürülerek daimi preparat haline getirilmiştir. Kromozom fotoğrafları 100x büyütmede ışık mikroskobu altında çekilmiştir (Sharma ve Gupta 1982). Sitogenetik analizler için, her deney grubu başına 10 lam (n=10) hazırlanmıştır. Her lam başına bin (1.000) hücre ve deney grubu başına toplam on bin (10.000) hücre mitotik indeks (Mİ), mikronükleus (MN) sıklığı ve kromozomal anormalliklerin (KA'lar) oluşumunu belirlemek için sayılmış ve Mİ, eşitlik (2) kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, MN analizi sırasında üç kritik faktör göz önünde bulundurulmuştur. Birincisi, MN, ana çekirdeğin çapının yaklaşık üçte biri kadar bir çapa sahip olmalıdır. İkincisi, MN ve ana çekirdeğin boyama rengi uyumlu olmalıdır. Üçüncüsü ise MN ile ana çekirdek arasında, birbirlerine değiyor gibi görünseler bile, net bir ayırım olmalıdır (Fenech vd., 2003).

$$\text{Mİ (\%)} = \left[\frac{\text{mitoz geçiren hücre sayısı}}{\text{toplam hücre sayısı}} \right] \times 100 \quad (2)$$

2.5. Anatomik Yapı Hasarlarının Analizi

Anatomik yapı hasarının mikroskobik analizi amacıyla 0.75, 1.0 ve 1.25 g L⁻¹ deltametrin ihtiva eden ortamlarda ve çeşme suyu ortamında yetiştirilen *A. cepa* bulblarının köklerinden keskin bir jilet yardımıyla enine kesitler alınmıştır. Kök kesitleri, %2'lik metilen mavisi ile 5 dk boyanmış ve ardından lam üzerine alınmış, lamel kapatılmış, lamelin etrafına balsam sürülerek daimi preparat haline getirilmiştir. Anatomi fotoğrafları, üzerine kamera aparatı takılı olan bir ışık mikroskobu altında 500x büyütmede çekilmiştir.

2.6. İstatistiksel Analiz

Tüm deneyler üçer kez gerçekleştirilmiştir. Uygulama yapılan grupların ve kontrol grubunun morfo-fizyolojik ve sitogenetik özellikleri için elde edilen veriler ortalama ± standart sapma olarak ifade edilmiştir. Verilerin varyans analizi, SPSS 23.0 bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir. Ortalamalar arasındaki farklılıkların istatistiksel önemini belirlemek için Duncan'ın çoklu aralık testi kullanılmış ve p<0.05 anlamlı kabul edilmiştir.

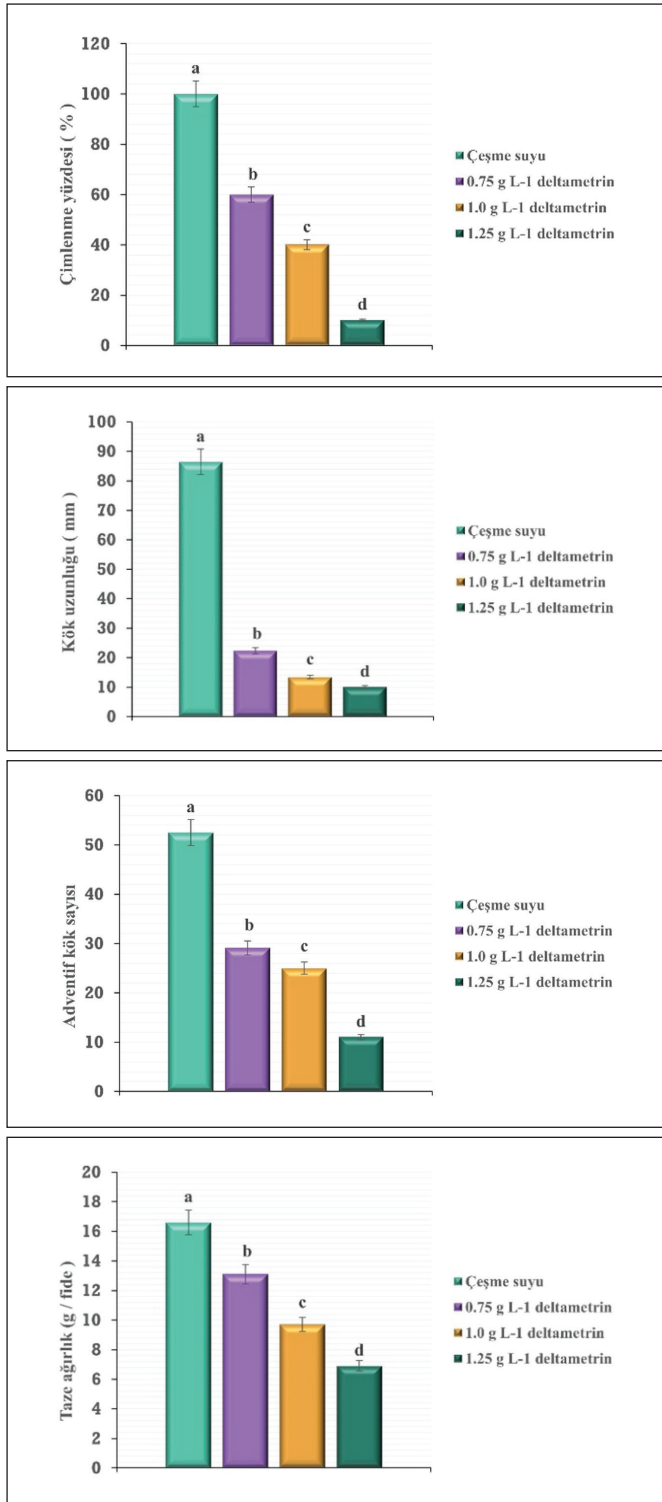
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Deltametrin Maruziyetinin Morfo-fizyolojik Etkileri

Deltametrin insektisit uygulamasının ardından *Allium cepa* L. bulblarının morfo-fizyolojik özelliklerindeki değişimler Şekil 1'de verilmiştir. 7 günlük inkübasyon süresi sonunda,

kontrol bulbları çeşme suyu ortamında %100±0.0 oranında bir çimlenme sergilemiştir. 0.75, 1.0 ve 1.25 g L⁻¹ deltametrin dozlarını içeren ortamlardaki bulblarda ise çimlenme oranları, sırasıyla %60±2.8, %40±2.4 ve %10±1.2 olmuştur. Uygulanan dozlar ve çimlenme tepkileri arasında bir ilişki bulunmuştur. Artan insektisit konsantrasyonlarıyla birlikte çimlenme oranlarında belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Diğer yandan, benzer ilişki bulbların taze ağırlıkları, kök uzunlukları ve adventif kök sayıları ile uygulanan dozlar arasında da bulunmuştur. Kontrol bulbları en yüksek kök büyümesine (86.4±1.5 mm) sahipken, 1.25 g L⁻¹ deltametrine maruz kalan bulblar en düşük kök büyümesine (10.0±0.1 mm) sahip olmuştur. Bulbların kök büyümesinde, kontrole göre 0.75 g L⁻¹ deltametrin ortamında 64.1 mm, 1.0 g L⁻¹ deltametrin ortamında 73.0 mm ve 1.25 g L⁻¹ deltametrin ortamında 76.4 mm'lik ciddi bir inhibisyon meydana gelmiştir. Kontrol bulblarının ortalama adventif kök sayısı 52.5±0.9 olarak sayılmıştır. Adventif kök sayısı, 0.75 g L⁻¹ deltametrin dozundaki bulblarda ortalama 29.1±0.5, 1.0 g L⁻¹ deltametrin dozundaki bulblarda ortalama 25.0±0.4 ve 1.25 g L⁻¹ deltametrin dozundaki bulblarda ortalama 11.0±0.2 olarak sayılmıştır. 1.25 g L⁻¹ en yüksek deltametrin dozunda, adventif kök sayısı kontrole kıyasla 3.8 kat azalmıştır. Kontrol bulbların ortalama taze ağırlığı 16.6±0.6 g iken, 0.75, 1.0 ve 1.25 g L⁻¹ deltametrine maruz kalan bulbların ortalama taze ağırlıkları sırasıyla 13.1±0.5, 9.7±0.2 ve 6.9±0.1 g olarak tartılmıştır. İncelenen tüm morfo-fizyolojik özelliklerdeki azalmalar p<0.05 düzeyinde anlamlı bulunmuştur (Şekil 1).

Deltametrin insektisitinin toksik etkilerinin incelendiği sınırlı sayıda çalışmada, bu insektisit uygulanan konsantrasyonuna ve uygulama süresine bağlı olarak çimlenme yüzdesi, kök uzaması ve taze ağırlık gibi morfo-fizyolojik özellikleri azalttığı yönünde sonuçlara ulaşılmıştır. Örneğin, Yekken ve Adeboye (2013), 48 sa boyunca 1, 5, 10, 20 ve 40 ppm deltametrin konsantrasyonuna maruz bırakılan *Allium cepa* L. bulblarının kök uzamasında konsantrasyon artışına paralel olarak belirgin bir inhibisyonun meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Benzer şekilde, Karaismailoğlu ve İnceer (2017), farklı doz (0.25, 0.5, 1 ve 2.0 ppm) ve sürelerde (24, 36 ve 48 saat) deltametrinle muamele edilen *Helianthus annuus* L. (ayçiçeği)'un kök uzamasında doz ve süreyle ilişkili olarak ciddi bir azalmanın meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Yine Kutluer vd. (2019), deltametrin insektisitinin 5, 10 ve 20 mg L⁻¹ konsantrasyonları ile 72 sa muamele edilen *A. cepa* bulblarının çimlenme yüzdeleri, kök uzunlukları ve taze ağırlıklarının çalışılan tüm konsantrasyonlarda kontro-



Şekil 1. Soğanın morfo-fizyolojik (çimlenme yüzdesi, kök uzunluğu, adventif kök sayısı ve taze ağırlık) özelliklerinde deltametrinin neden olduğu bozulmalar. 20 adet (n=20) soğan bulbu incelenmiş ve deneyler üç kez tekrarlanmıştır. Grafiklerdeki veriler ortalama $\pm$ standart sapmadır. a, b, c ve d harflerinden oluşan dört farklı harf, istatistiksel süreçte bu dört grup arasındaki anlamlı farklılıkları ($p < 0.05$) göstermektedir.

le kıyasla önemli derecede azaldığını belirlemişlerdir. Bütün bu bulgular, mevcut çalışma bulgularımızla benzerdir. Bununla birlikte, mevcut araştırmamız deltametrinin soğan bitkisinin adventif kök sayısı üzerindeki etkisini araştıran ilk çalışmadır.

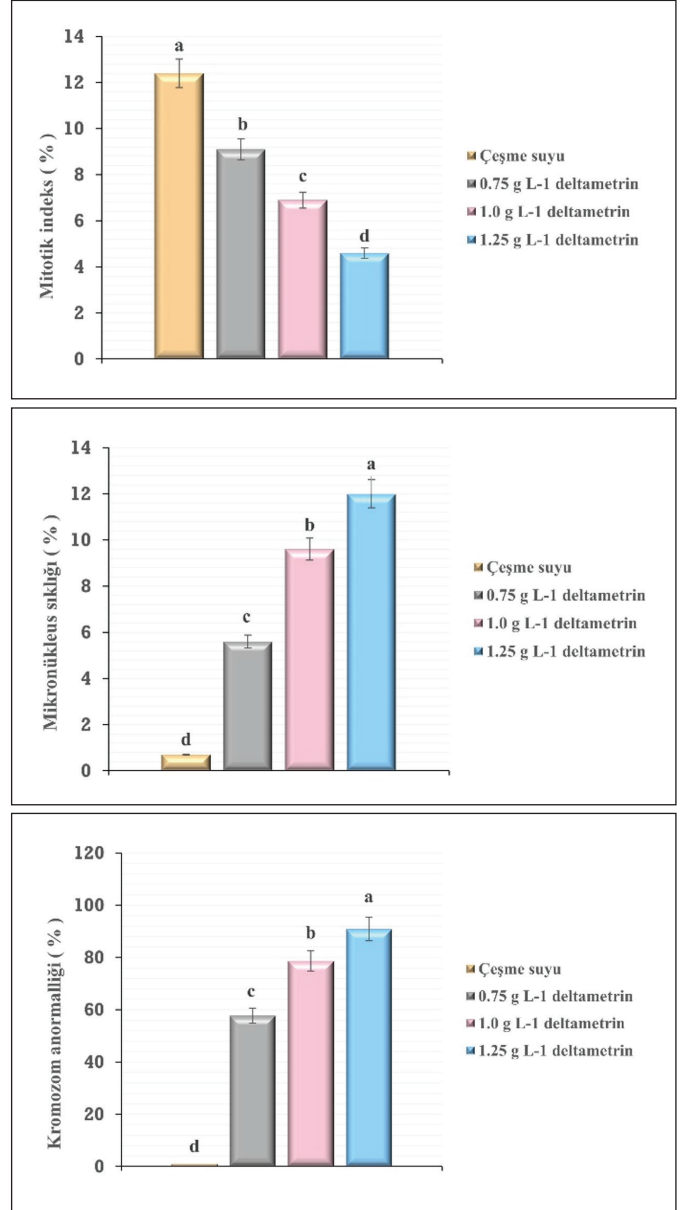
İzin verilen yasal sınırın üzerinde pestisit kullanımı özellikle bitkilerin farklı yaşam evrelerinde ciddi zararlara neden olmaktadır. Pestisitlerin bitkilere olan zararlı etkileri, bazı bitkilerde çimlenme ve kök büyüme testleri ile makroskobik olarak, kromozom anormalliklerinin tipleri ve sıklıkları da dahil olmak üzere sitogenetik testler ile mikroskobik olarak izlenebilir (Smaka-Kincl vd., 1996; Kamal vd., 2020). Deltametrin pestisitine maruziyetin ardından soğan bitkisinin morfo-fizyolojik özelliklerinde meydana gelen azalmaların pek çok nedeni olabilir. Çimlenme için gerekli depo maddelerinin inhibisyonu, hidrolitik enzimlerin baskılanması ve bozulmuş protein metabolizması gibi faktörler, çimlenmede gözlenen azalmanın sebebi olabilir (Dhungana vd., 2016). Kökler tarafından yeterli su ve mineral madde alınımı ve taşınımının gerçekleştirilememesi, fidelerin taze ağırlık ve su içeriğindeki azalmanın nedeni olabilir. Dolayısıyla, yetersiz su ve mineral madde alınımı kök hücrelerinde yapısal bozukluklara yol açabilir, mitoz bölünmeyi olumsuz etkileyebilir ve böylece kök uzunluğu ve kökçük sayısındaki azalmalar meydana gelebilir (Aktar vd., 2009; Begum vd., 2019). Ayrıca, deltametrinin lipofilik özelliği sayesinde hızlı bir şekilde hücre içerisine girebilmesi de çimlenme ve büyümenin baskılanmasında önemli bir rol oynayabilir. Zira, deltametrin bu özelliği sayesinde zar proteinlerinde, hücre içi membran sistemlerinde ve DNA molekülünde hasarlara neden olmaktadır (Cabral vd., 1990; Michelangeli vd., 1990; Chargui vd., 2012).

3.2. Deltametrin Maruziyetinin Sitogenetik Etkileri

Mutajenik potansiyele sahip birçok kimyasal, genetik materyalde zararlı ve kalıtsal değişimlere yol açabilmeleri nedeniyle test edilmektedir (Nwangburuka & Oyelana, 2011; Panneerselvam vd., 2012). Deltametrinin ticari formu olan Deltharin 2.5 EC, tarımda yaygın olarak kullanılan ve biyolojik sistemler üzerinde toksik etkilere yol açabildiği bildirilen bir insektisit olması nedeniyle bu çalışmada deneysel olarak incelenmiştir. Bitki test sistemlerinde deltametrinin morfo-fizyolojik, sitogenetik ve anatomik özellikler üzerindeki etkilerini birlikte ele alan çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, ticari insektisit deltametrinin doza bağlı akut toksik etkilerini, *Allium cepa* L. üzerinde Allium test modeli kullanılarak kapsamlı biçimde değerlendirmektir.

Mİ, hücre bölünme sıklığının tahmin edilmesini sağlayan ve toksik kimyasalların takibi için sıklıkla kullanılan bir parametredir (Linnainmaa vd., 1978; Marcano vd., 2004). Mİ, kontrole kıyasla uygulanan tüm insektisit konsantrasyonlarında belirgin şekilde azalmıştır. Mİ yüzdesi, kontrol bulplarının kök hücrelerinde 12.4 ± 1.5 iken, 0.75, 1.0 ve 1.25 g L⁻¹ deltametrin uygulanan bulplarının kök hücrelerinde sırasıyla 9.1 ± 1.0 , 6.9 ± 0.7 ve 4.6 ± 0.3 'ya düşmüştür. Görüldüğü gibi kontrol grubuyla karşılaştırıldığında, Mİ uygulama gruplarında sırasıyla %27, %44 ve %63 oranında azalmıştır (Şekil 2). Deltametrin insektisitinin Mİ üzerindeki benzer etkileri, birçok araştırmacı tarafından *Allium cepa* L. (Chauhan vd., 1986; Yekeen & Adeboye, 2013; Kutluer vd., 2019), *Allium sativum* L. (Saxena vd. 2009) ve *Helianthus annuus* L. (Karaismailoğlu & İnceer, 2017)'da da gözlemlenmiştir. Deltametrinin kullanılan bütün konsantrasyonlarında Mİ'yi anlamlı derecede düşürmüş olması güçlü sitotoksik potansiyelini göstermektedir. Mİ'deki azalma, hücre döngüsünün G₁ fazının baskılanmasından (Shneiderman vd., 1971), hücre döngüsünün S fazında DNA sentezinin inhibisyonundan (Van't Hof, 1968) veya hücre döngüsünün G₂ fazındaki bir bloke sonucu hücrenin mitozu girmesinin engellenmesinden (Sudhakar vd., 2001) kaynaklanabilir. Bununla birlikte, pestisitlerin etkisi sonucu oluşan metabolik hasarlar hücre bölünmesinin inhibisyonuna sebep olabilir, bu da RNA, DNA, protein ve enerji sentezini etkileyebilir (El-Ghamery vd., 2000; Adesuyi vd., 2018). Rank ve Nielsen (1997), toksisite analizi için kullanılan en yüksek konsantrasyonun LD₅₀ değerinin altına düşmeyeceğini ileri sürmüşlerdir. Mevcut çalışmada, kontrole karşılaştırıldığında 1.25 g L⁻¹ deltametrin konsantrasyonunda Mİ'deki azalma yüzdesi yaklaşık %63 olmuştur. Bununla birlikte, 0.75 ve 1.0 g L⁻¹ (LD₅₀ değeri) deltametrin konsantrasyonunda Mİ'deki azalma yüzdesi sırasıyla %27 ve %44 olmuş ve kontrolün %50'sinin altına düşmemiştir (Şekil 2).

MN ve KA testleri, kimyasalların genotoksisite potansiyelinin belirlenmesinde önemli bir role sahiptir. MN oluşum sıklığı ve KA yüzdesi, kontrole karşılaştırıldığında artan deltametrin konsantrasyonlarıyla kademeli olarak artmıştır. Bu bulgu, uygulanan deltametrinin genotoksitesinin konsantrasyonuna bağlı olduğunu ileri süren önceki çalışmalarla (Saxena vd., 2009; Yekeen & Adeboye, 2013; Karaismailoğlu & İnceer, 2017; Kutluer vd., 2019) uyumludur. Kontrol bulplarının kök meristem hücrelerinde 0.7 ± 0.2 oranında düşük bir MN oluşum sıklığı gözlenirken, farklı deltametrin konsantrasyonlarına (0.75, 1.0 ve 1.25 g L⁻¹) maruz bırakılan bulpların kök meristem hücrelerinde sırasıyla 5.6 ± 0.6 ,



Şekil 2. Soğan kök ucu hücrelerinde deltametrinin neden olduğu sitogenetik (mitotik indeks, mikronükleus sıklığı ve kromozomal anormallikler) özelliklerdeki bozulmalar. Grafiklerdeki veriler ortalama ± standart sapmadır. a, b, c ve d harflerinden oluşan dört farklı harf, istatistiksel süreçte bu dört grup arasındaki anlamlı farklılıkları ($p < 0.05$) göstermektedir.

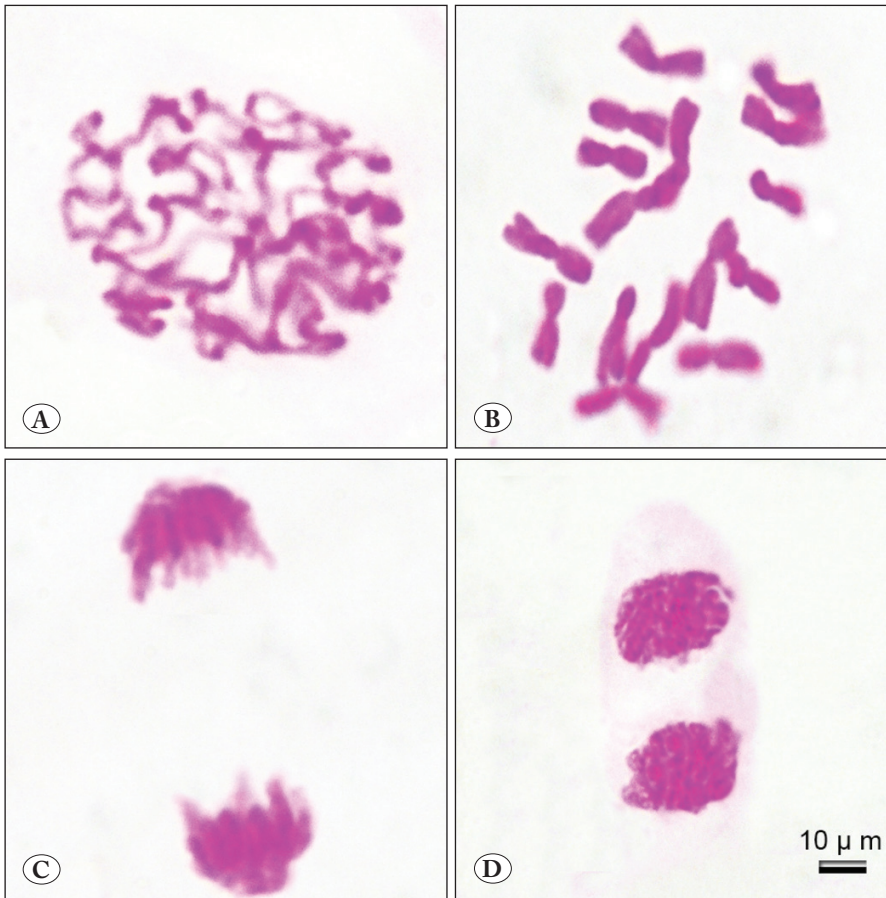
9.6 ± 0.9 ve 12.0 ± 1.3 oranında MN sıklığı belirlenmiştir. Kontrole kıyasla, en yüksek deltametrin konsantrasyonu olan 1.25 g L⁻¹'de MN sıklığı 17.1 kat artmıştır. Ayrıca, mikroskopik incelemeler sonucunda en düşük KA yüzdesi kontrol bulplarının kök hücrelerinde 0.9 ± 0.5 olarak bulunmuştur. Bu anormallik yüzdesi, 0.75 g L⁻¹ deltametrin

ortamındaki bulblarda 57.8 ± 1.1 , 1.0 g L^{-1} deltametrin ortamındaki bulblarda 78.6 ± 1.8 ve 1.25 g L^{-1} deltametrin ortamındaki bulblarda 90.9 ± 2.5 olarak hesaplanmıştır. Özellikle, 1.25 g L^{-1} deltametrin konsantrasyonunda KA yüzdesi kontrole kıyasla 101 kat artmıştır (Şekil 2).

Normal mitotik evreler Şekil 3'te, deltametrin uygulamasına bağlı mitotik ve kromozomal anormallikler ise Şekil 4'te verilmiştir. Soğan kök ucu meristem hücrelerinde kromozom organizasyonundaki değişiklikler incelenmiş ve en yaygın anormallikler; mikronükleus oluşumu (Şekil 4a), triloblu çekirdekte tomurcuklanma (Şekil 4b), biloblu çekirdekler (Şekil 4c), kromozomal aglütinasyon (Şekil 4d), c-mitoz (Şekil 4e), yapışkan kromozomlar (Şekil 4f), anafazda kromatinin eşit olmayan dağılımı (Şekil 4g), anafazda kromozom fragmentasyonu (Şekil 4h), anafazda kromozom köprüleri ve halka kromozom (Şekil 4i), telofazda kutup kayması (Şekil 4j), telofazda kromozom fragmentasyonu ile geri kalmış kromozomlar (Şekil 4k) ve telofazda vagrant kromozom (Şekil 4l) olarak kaydedilmiştir.

Bu kromozom anormalliklerin pekçoğu, *A. sativum* (Saxena vd. 2009), *H. annuus* (Karaismailoğlu & İnceer, 2017) ve *A.*

cepa (Kutluer vd., 2019) kök hücrelerine farklı konsantrasyonlarda deltametrin uygulandıktan sonra da bazı araştırmacılar tarafından gözlenmiştir. MN, hücre döngüsü boyunca tüm kromozomların veya asentrik parçaların ana çekirdekle birleşmemesi sonucunda oluşmaktadır (Fenech & Crott, 2002). Klastojenik etkiye sahip genotoksik kimyasallar MN oluşumunu artırmaktadır (Fernandes vd. 2006). Bu bilgi, artan MN sıklığının, gözlemlenen bölünen hücrelerdeki KA'ların proliferasyonuna yol açtığını ortaya koymaktadır (Fiskesjo, 1997). Hücre döngüsünün S fazı sırasında DNA sentezinin bloke edilmesi, çekirdekte tomurcuk oluşumuna yol açmakta ve bu tomurcuklu çekirdekler MN'lara oldukça benzemektedir (Fenech & Crott, 2002; Sutan vd., 2014). Uygulanan kimyasalın tübülün-SH grubuyla etkileşerek disülfid bağlarını bozması, güçlü mitotik iğ ipliğinin hasar görmesine ve bunun sonucunda c-mitoza neden olmaktadır (Kuriyama & Sakai, 1974). Kromatid tipi bir anormallik olan kromozom yapışkanlığı (Klasterska vd., 1976), kromozomlar arasında subkromatik bağlantıları sağlayan kromatin ipliklerinin bozulmasının (Mc-Gill vd., 1974) veya periferel proteinlerin etkilenmesinin (Datta vd., 2018) bir

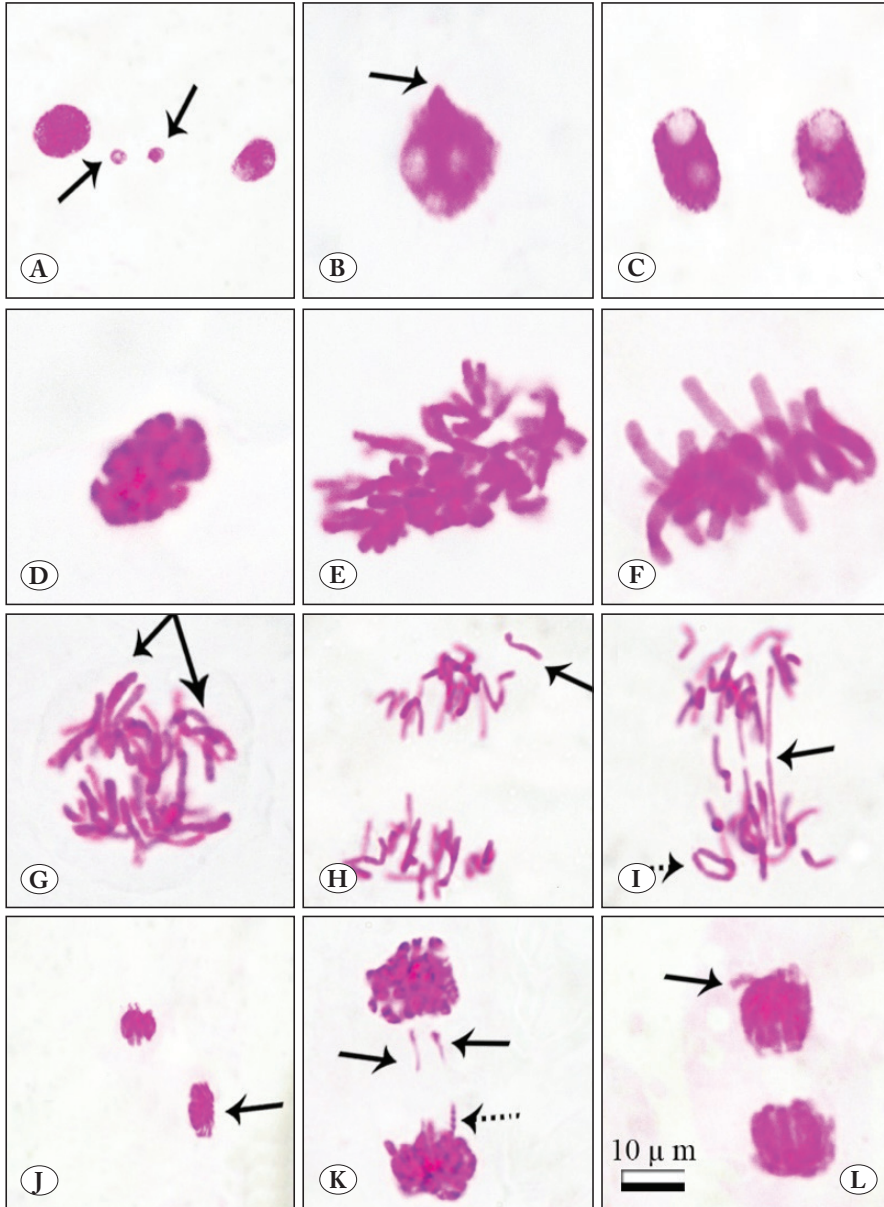


Şekil 3. Soğan kök meristem hücrelerinde normal mitoz evreleri. **a.** profaz, **b.** metafaz ($2n=16$ kromozom), **c.** anafaz, **d.** telofaz, ölçek çubuğu: $10 \mu\text{m}$.

sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Kromozom yapışkanlığı, geri dönüşümsüz olup sonuçta hücre ölümüne yol açmaktadır (Panda & Sahu, 1985). Kimyasal madde uygulaması ile oluşan anafazda kromatinin eşit olmayan dağılımı, iğ ipliği proteinlerindeki bozulmalarla ilişkilendirilmektedir (Amer ve Ali 1974).

Bu çalışmada, ayrıca deltametrin insektisiti, *A. cepa* kök meristem hücrelerinde hem anöjenik (iğ ipliği üzerinde) hem de klastojenik (DNA üzerinde) etkiye sahip olduğuna işaret eden, geri kalmış kromozomlar, kutup kaymaları, kromozom köprüleri ve kromozom fragmentasyonu gibi anormalliklere de yol açmıştır. Hücredeki iğ iplikleri kısmen etkilenmişse, geri kalmış kromozomlar ortaya çıkar ve

bu durum MN oluşumuna sebep olur. Dolayısıyla, MN'lerle birlikte hücreden genetik materyal kaybı gerçekleşir (Panda & Sahu, 1985). Fragmentasyonlar ise kromozomlarda ortaya çıkan kromatid veya kromozom kırıklarının yapısal sonuçlarıdır (Ahmad & Yasmin, 1992). Anafazdaki kromozom köprüleri, kromozomların metafaz evresindeki yapışkanlığından veya kromozomların kırılması ve yeniden birleşmesinden kaynaklanmaktadır (El-Ghamery vd., 2000; Özkara vd., 2015). Telofaz safhasında gözlenen kutup kaymaları, iğ bozukluklarından (Kalcheva vd., 2009), vagrant kromozomlar ise eşit olmayan kromozomlara sahip kardeş hücrelerdeki düzensiz şekilli veya eşit olmayan boyuttaki çekirdeklerden türemişlerdir (El-Ghamery vd., 2003).



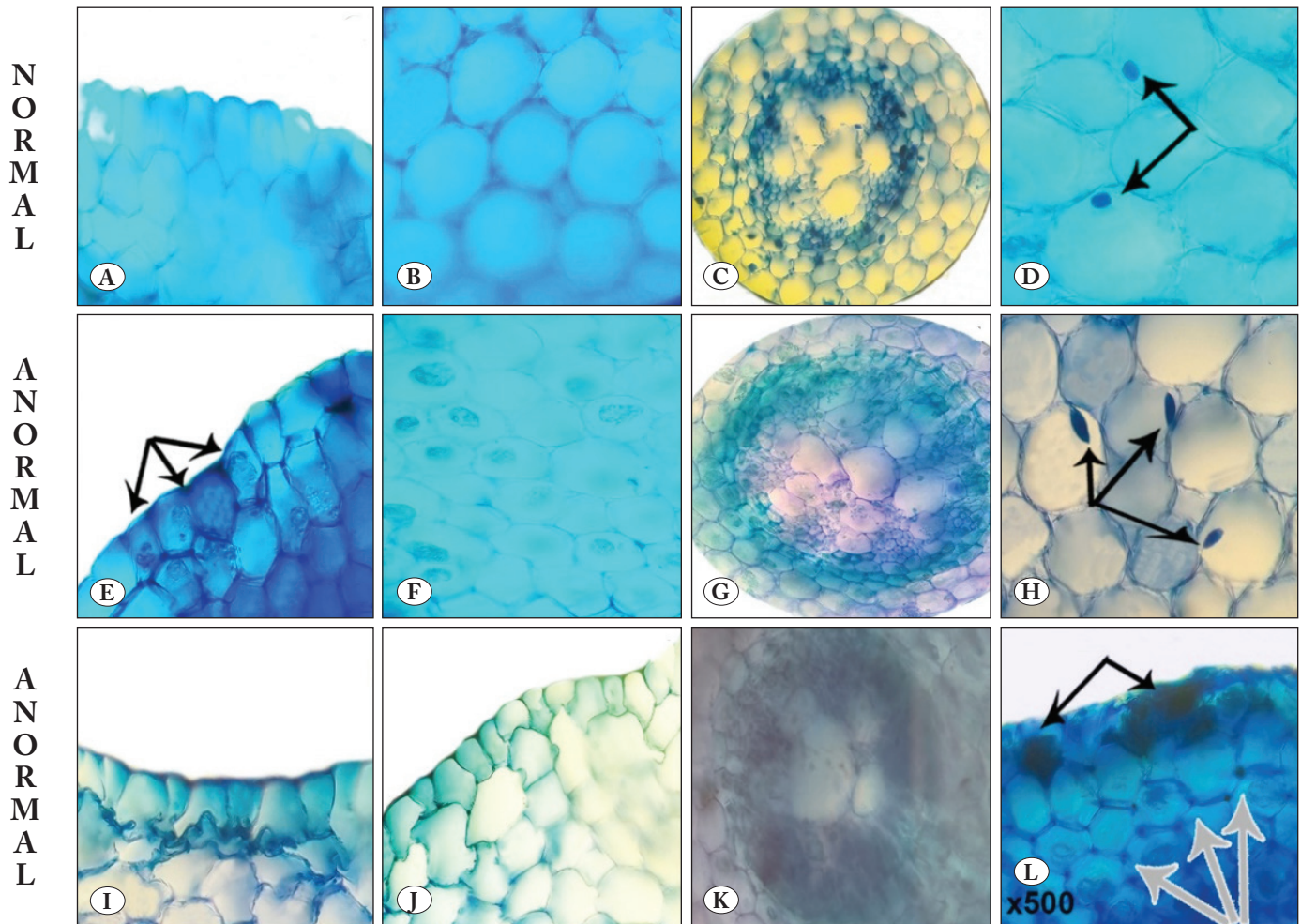
Şekil 4. Soğan kök meristem hücrelerinde deltametrin uygulamasına bağlı olarak gözlenen mitotik ve kromozomal anormallikler. **a.** mikronükleus oluşumları (oklar), **b.** triloblu çekirdekte tomurcuklanma (ok), **c.** biloblu çekirdekler, **d.** kromozomal aglütinasyon, **e.** c-mitoz, **f.** yapışkan kromozomlar, **g.** anafazda kromatinin eşit olmayan dağılımı (oklar), **h.** anafazda kromozom fragmentasyonu (ok), **i.** anafazda kromozom köprüleri (ok) ve halka kromozom (kesikli ok), **j.** telofazda kutup kayması (ok), **k.** telofazda kromozom fragmentasyonları (oklar) ve geri kalmış kromozomlar (kesikli ok), **l.** telofazda vagrant kromozom (ok), ölçek çubuğu: 10 µm.

3.3. Deltametrin Maruziyetinin Anatomik Etkileri

Karasal bitkilerin toprak içerisinde gelişen organı olan köklerin, bitkiyi toprağa bağlamak ve desteklemek, bitki için gerekli su ve suda erimiş besin maddelerini almak ve depolamak ve ayrıca bazı hormon ve organik bileşikler depolamak ve salgılamak gibi temel görevleri vardır. Toprakla temas halinde olan kökler, çeşitli çevresel streslere ve toksik kimyasallara maruz kalabilmekte ve bunun sonucunda anatomik yapısında ciddi hasarlar meydana gelmektedir (Çavuşoğlu & Çavuşoğlu, 2023).

Üç farklı deltametrin konsantrasyonunun *A. cepa* bitkisinin kök anatomik yapısında neden olduğu hasarlara ait mikros-

kop görüntüleri Şekil 5'te sunulmuştur. Kontrol bulblarına ait kök enine kesitlerinin ışık mikroskobu ile incelenmesi neticesinde herhangi bir anatomik hasar gözlenmemiştir (Şekil 5a-d). Fakat, 0.75, 1.0 ve 1.25 g L⁻¹ deltametrin uygulanan bulblarının kök enine kesitlerinde, insektisit dozundaki artışla ilişkili olarak ciddi anatomik hasarlar gözlenmiştir (Şekil 5e-l). Uygulama grubu bulblarına ait kök enine kesitleri dikkatli bir şekilde taranmış ve en yaygın 9 anormallik tipi: epidermis hücrelerinde hücresel madde birikimi (Şekil 5e), korteks hücrelerinde hücresel madde birikimi (Şekil 5f), iletim dokusunda madde birikimi (Şekil 5g), çekirdek deformasyonu (Şekil 5h), epidermis hücre deformasyonu (Şekil 5i), korteks hücre deformasyonu (Şekil 5j), iletim



Şekil 5. Deltametrin insektisitinin soğan köklerinin anatomik yapısı üzerindeki etkisi. Çeşme suyu ile muamele edilen kontrol grubu bulblarının kök enine kesitlerinde; **a.** epidermis hücrelerinin normal görünümü, **b.** korteks hücrelerinin normal görünümü, **c.** iletim dokusunun normal görünümü, **d.** hücre çekirdeklerinin normal görünümü. Deltametrin ile muamele edilen uygulama grubu bulblarının kök enine kesitlerinde; **e.** epidermis hücrelerinde hücresel madde birikimi (oklar), **f.** korteks hücrelerinde hücresel madde birikimi, **g.** iletim dokusunda madde birikimi, **h.** çekirdek deformasyonu (oklar), **i.** epidermis hücre deformasyonu, **j.** korteks hücre deformasyonu, **k.** iletim dokusunda yapısal bütünlüğün bozulması, **l.** nekroz (oklar) ve korteks hücre duvarında kalınlaşma (beyaz oklar).

dokusunda yapısal bütünlüğün bozulması (Şekil 5k), nekroz ve korteks hücre duvarında kalınlaşma (Şekil 5l) olarak kaydedilmiştir. Detaylı literatür taraması sonucunda, bitki test sistemlerinde deltametrin insektisitinin kök anatomik yapısı üzerindeki rolüne dair sadece Kutluer vd. (2019)'nin yaptığı çalışmaya rastlanmıştır. Söz konusu çalışmada, Kutluer vd. (2019), 72 s boyunca 5, 10 ve 20 mg L⁻¹ deltametrin konsantrasyonuna maruz bırakılan *A. cepa* bulblarının kök anatomik yapısında çekirdek deformasyonu, nekroz, iletim dokuda bazı maddelerin birikimi, korteks hücre çeperinde kalınlaşma, iletim dokusunda yapısal bütünlüğün bozulması ve hücre deformasyonu hasarlarını gözlemlemiş ve hasarların şiddetinin deltametrin dozuna bağlı olarak arttığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, tiyametoksam (Çavuşoğlu vd., 2012), permetrin (Himtaş vd., 2024), triflururan (Bıyıkşız vd., 2025), ometoat (Karagöl vd., 2025) ve esfenvalerat (Sarsar vd., 2025) gibi diğer bazı insektisitlerin özellikle test materyalimiz olan *A. cepa*'nın kök anatomik yapısı üzerindeki etkilerini ortaya koyan çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalarda kullanılan söz konusu insektisitlerin neden olduğu anatomik hasarların pekçoğu, deltametrin insektisiti ile yaptığımız mevcut çalışmamızda da gözlemlenmiştir.

Deltametrin maruziyeti sonucunda anatomik yapıda gözlemlenen epidermis (Şekil 5i) ve korteks (Şekil 5j) hücre deformasyonları, söz konusu hücrelerin sayısındaki artış ve bu artışla ilişkili olarak komşu hücrelerin birbirini sıkıştırması sonucu ortaya çıkan iç basınçtan kaynaklanabilir. Aynı zamanda bu deformasyonlar, deltametrinin epidermis ve korteks hücrelerinin zarlarında lipit peroksidasyonunu tetiklemesi sonucunda zar yapısının bozulmasından da kaynaklanabilir. Ayrıca, epidermis ve korteks hücrelerinde iç basıncın artması, bu hücrelerin çekirdeklerinde deformasyona (Şekil 5h) da sebep olabilir. Bununla birlikte, DNA çift sarmal yapısının, DNA hacminin ve nükleer protein konsantrasyonunun bozulması da çekirdeklerin hacim ve şeklinde değişikliklere yol açabilir (Dauer & Worman, 2009). Deltametrin maruziyetinin ardından meydana gelen korteks hücrelerinde duvar kalınlaşması (Şekil 5l) ile epidermis (Şekil 5e), korteks (Şekil 5f) ve iletim (Şekil 5g) dokusu hücrelerinde belirli kimyasalların birikmesi, insektisit maruziyetine karşı geliştirilen savunma adaptasyonlardır. Lignifikasyon ve süberizasyon sonucunda yapısal bir savunma mekanizması olan hücre duvarı kalınlaşması meydana gelmekte (Belete, 2018) ve bu da çeşitli kimyasal ajanlara karşı bir bariyer oluşturup merkezi silindire akışı azaltmakta (Singh vd., 2015) ve böylece toksik kimyasal ajanların bitkideki taşınımı sınırlanmaktadır. Dahası, bitkilerin taşıyıcı

proteinleri yardımıyla toksik kimyasalları belirli dokularda biriktirerek diğer dokulara geçişini sınırladıkları da bilinmektedir (Mithöfer & Maffei, 2017). Yaptığımız mikroskopik incelemeler sonucunda, epidermis ve korteks dokusundaki hücresel madde birikiminin iletim dokusundakine göre oldukça fazla olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan, bitkilerin yüksek konsantrasyonda toksik kimyasallara maruz kalması, kök anatomik yapılarında değişimden çok, hasara neden olmaktadır. Mevcut çalışmamızda, epidermis ve korteks hücrelerinde gözlemlenen kahverengi/siyah renkli ve geri dönüşümsüz nekrozlar (Şekil 5l) ile hücre deformasyonlarının (Şekil 5i, j) en yüksek deltametrin dozunda (1.25 g L⁻¹) daha fazla olması bu görüşümüzü desteklemektedir.

4. Sonuçlar

Mevcut araştırma, küresel bir gıda kaynağı ve ökaryotik bir model organizma olan soğanda (*Allium cepa* L.) dibromopiretroid bir insektisit olan deltametrinin çok yönlü akut toksik etkilerini ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Literatürde, *A. cepa* bitkisinin çeşitli morfo-fizyolojik, anatomik ve sitogenetik özellikleri üzerinde deltametrin insektisitinin doza bağlı akut toksisitesini ortaya koyan sınırlı sayıda araştırma mevcuttur. Bu araştırmadan elde edilen bulgular, deltametrinin kök uçlarında hücre çoğalmasını engellediğini, çeşitli kromozomal ve anatomik hasar oluşumlarını desteklediğini, ayrıca çimlenme ve büyümeyle ilgili morfo-fizyolojik özellikleri de azalttığını göstermiştir. Bu sebeple, tarımsal mücadelede bu insektisit çifçiler tarafından mümkün olduğunca az tercih edilmesi, izin verilen yasal sınırın üzerinde kullanılmaması ve kullanım dönemleri, süreleri ve yönergelerine harfiyen uyulmasının sağlanması gerekmektedir. Aksi taktirde deltametrin hedefi dışındaki canlılara ve çevreye nüfuz ederek ekosistem istikrarını ve insan sağlığını olumsuz etkileyebilecektir. Diğer yandan, bu çalışma hem literatüre önemli bir katkı sağlayacak hem de gelecekte yapılacak toksisite testleri için bir referans görevi görecektir.

Yazar katkısı: Dilek Çavuşoğlu ve Kürşat Çavuşoğlu çalışmayı planlamış ve tasarlamış, çalışma hakkında verileri toplamış ve analiz etmiş, çalışmanın analizlerini yaparak makaleyi yazmıştır.

Etik kurul onayı: Etik kurul izni gerektirmeyen bir çalışma olup, herhangi bir kurumdan etik kurul izni alınmamıştır.

Kaynaklar

- Adesuyi, A. A., Njoku, K. L., Ogonyebi, A. L., Dada, E. O., Adedokun, A. H., Jolaoso, A. O., & Akinola, M. O. (2018). Evaluation of the cytogenotoxic effects of emulsifiable concentrate form of amitraz pesticide on *Allium cepa* L. *J. Applied Sci. Env. Manag.*, 22(11), 1841-1847. <https://doi.org/10.4314/jasem.v22i11.20>
- Ahmad, S., & Yasmin R. (1992). Effects of methyl paration and tri-miltox on the mitosis of *Allium cepa*. *Cytologia.*, 57, 155-160.
- Aktar, W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdiscip. Toxicol.*, 2(1), 1-12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>
- Amer, S. M., & Ali, E. M. (1974). Cytological effects of pesticides-effects of some herbicides on *Vicia faba*. *Cytologia.*, 39, 633-643.
- Barberio, A., Voltolini, J. C., & Mello, M. L. S. (2011). Standardization of bulb and root sample sizes for the *Allium cepa* test. *Ecotoxicol.*, 20(4), 927-935. <https://doi.org/10.1007/s10646-011-0602-8>
- Barlow, S. M., Sullivan, F. M., & Lines, J. (2001). Risk assessment of the use of deltamethrin on bednets for the prevention of malaria. *Food Chem. Toxicol.*, 39(5), 407-422. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(00\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(00)00152-6)
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Front. Plant. Sci.*, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Belete, T. (2018). Defense mechanisms of plants to insect pests: from morphological to biochemical approach. *Trends Tech. Sci. Res.*, 2, 30-38. <https://doi.org/10.19081/TTSR.2018.02.555584>
- Byıksız, G., Kalefetoğlu Macar, T., Çavuşoğlu, K., & Yalçın, E. (2025). A study investigating the multifaceted toxicity induced by triflurumuron insecticide in *Allium cepa* L. *Sci. Rep.*, 15, 24839. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10777-6>
- Bilal, M., Iqbal, H. M., & Barcelo, D. (2019). Persistence of pesticides-based contaminants in the environment and their effective degradation using laccase-assisted biocatalytic systems. *Sci. Total Environ.*, 10, 695, 133896. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133896>
- Bolle, P., Mastrangelo, S., Tucci, P., & Evandri, M. G. (2004). Clastogenicity of atrazine assessed with the *Allium cepa* test. *Environ. Mol. Mutagen.*, 43(2), 137-141. <https://doi.org/10.1002/em.20007>
- Bonciu, E., Firbas, P., Fontanetti, C. S., Wusheng, J., Karaismaioğlu, M. C., Liu, D., & Schiff, S. (2018). An evaluation for the standardization of the *Allium cepa* test as cytotoxicity and genotoxicity assay. *Caryologia.*, 71(3), 191-209. <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1503496>
- Bradbury, S. P., & Coats, J. R. (1989). Toxicokinetics and toxicodynamics of pyrethroid insecticides in fish. *Environ. Toxicol. Chem.*, 8: 373-380. <https://doi.org/10.1002/etc.5620080503>
- Cabral, J. R. P., Galendo, D., Laval, M., & Lyandrat, N. (1990). Carcinogenicity studies with deltamethrin in mice and rats. *Cancer Lett.*, 49(2), 147-152. [https://doi.org/10.1016/0304-3835\(90\)90151-m](https://doi.org/10.1016/0304-3835(90)90151-m)
- Chaparro, T. R., Botta, C. M., & Pires, E. C. (2010). Biodegradability and toxicity assessment of bleach plant effluents treated anaerobically. *Water Sci. Technol.*, 62, 1312-1319. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.944>
- Chargui, I., Grissa, I., Bensassi, F., Hrira, M. Y., Haouem, S., Haouas, Z., & Bencheikh, H. (2012). Oxidative stress, biochemical and histopathological alterations in the liver and kidney of female rats exposed to low doses of deltamethrin (DM): a molecular assessment. *Biomed. Environ. Sci.*, 25(6), 672-683. <https://doi.org/10.3967/0895-3988.2012.06.009>
- Chauhan, L. K. S., Dikshith T. S. S., & Sundararaman, V. (1986). Effect of deltamethrin on plant cells I. cytological effects on the root meristems of *Allium cepa*. *Mutat. Res./Genet. Toxicol.*, 171(1), 25-30. [https://doi.org/10.1016/0165-1218\(86\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0165-1218(86)90005-4)
- Chauhan, L. K. S., Saxena, P. N., & Gupta, S. K. (1999). Cytogenetic effects of cypermethrin and fenvalerate on the root meristem cells of *Allium cepa*. *Environ. Exp. Bot.*, 42(3), 181-189. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(99\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(99)00033-7)
- Chinn, K., & Narahashi, T. (1986). Stabilization of sodium channel states by deltamethrin in mouse neuroblastoma cells. *J. Physiol.*, 380(1), 191-207. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1986.sp016280>
- Çavuşoğlu, K., & Çavuşoğlu, D. (2023). Investigation of the potential role of fusaric acid, a fungal phytotoxin, in mitigating salt stress in onion roots. *Sci. Rep.*, 13, 9801. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36917-4>
- Çavuşoğlu, K., Yalçın, E., Türkmen, Z., Yapar, K., & Sağır, S. (2012). Physiological, anatomical, biochemical and cytogenetic effects of thiamethoxam treatment on *Allium cepa* (Amaryllidaceae) L. *Environ. Toxicol.*, 27(11), 635-643. <https://doi.org/10.1002/tox.20680>
- Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, 8(5), 1402-1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>

- Datta, S., Singh, J., Singh, J., Singh, S., & Singh S. (2018).** Assessment of genotoxic effects of pesticide and vermicompost treated soil with *Allium cepa* test. *Sustain. Environ. Res.*, 28(4), 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.01.005>
- Dauer, W. T., & Worman, H. J. (2009).** The nuclear envelope as a signaling node in development and disease. *Dev. Cell.*, 17(5), 626-638. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2009.10.016>
- Dhungana, S. K., Kim, I. D., Kwak, H. S., & Shin, DH. (2016).** Unraveling the effect of structurally different classes of insecticide on germination and early plant growth of soybean [*Glycine max* (L.) Merr]. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 130, 39-43. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.12.002>
- Doğaç, E., Kandemir, I., & Taşkın, V. (2015).** Geographical distribution and frequencies of organophosphateresistant Ace alleles and morphometric variations in olive fruit fly populations. *Pest. Manag. Sci.*, 71(11), 1529-1539. <https://doi.org/10.1002/ps.3958>
- El-Ghamery, A. A., El-Kholy, M. A., & Abou El-Yousser, M. A. (2003).** Evaluation of cytological effects of Zn²⁺ in relation to germination and root growth of *Nigella sativa* L. and *Triticum aestivum* L. *Mutat. Res.*, 537(1), 29-41. [https://doi.org/10.1016/s1383-5718\(03\)00052-4](https://doi.org/10.1016/s1383-5718(03)00052-4)
- El-Ghamery, A. A., El-Nahas, A. I., & Mansour, M.M. (2000).** The action of atrazine herbicide as an inhibitor of cell division on chromosomes and nucleic acids content in root meristems of *Allium cepa* and *Vicia faba*. *Cytologia.*, 65(3), 277-287. <https://doi.org/10.1508/cytologia.65.277>
- Fenech, M., Chang, W. P., Kirsch-Volders, M., Holland, N., Bonassi, S., & Zeiger, E. (2003).** HUMN (human micronucleus) project: detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures. *Mutat. Res.*, 534(1-2), 65-75. [https://doi.org/10.1016/s1383-5718\(02\)00249-8](https://doi.org/10.1016/s1383-5718(02)00249-8)
- Fenech, M., & Crott, J. W. (2002).** Micronuclei, nucleoplasmic bridges and nuclear buds induced in folic acid deficient human lymphocytes-evidence for breakage-fusion-bridge cycles in the cytokinesis block micronucleus assay. *Mutat. Res.*, 504(1-2), 131-136. [https://doi.org/10.1016/s0027-5107\(02\)00086-6](https://doi.org/10.1016/s0027-5107(02)00086-6)
- Fernandes, T. C. C., Mazzeo, D. E. C., & Marin-Morales, M. A. (2006).** Mechanism of micronuclei formation in polyploidized cells of *Allium cepa* exposed to trifluralin herbicide. *Pest. Biochem. Physiol.*, 88(3), 252-259. <https://doi.org/10.1016/J.PESTBP.2006.12.003>
- Fiskesjo, G. (1997).** Allium test for screening chemical evaluation of cytological parameters. Wang, W., Gorsuch, JW., Hughes, JS. [eds.], Plants for Environmental Studies New York. NY: CRC Lewis Publishers, pp. 307-333.
- Glover-Amengor, M., & Tetteh, F. (2009).** Effect of pesticide application rate on yield of vegetables and soil microbial communities. *West Afr. J. Appl. Ecol.*, 12, 1-7. <https://doi.org/10.4314/wajae.v12i1.45749>
- Gonzalez, A., Gonzalez-Murua, C., & Royuela, M. (1996).** Influence of imazethapyr on Rhizobium growth and its symbiosis with pea (*Pisum sativum*). *Weed Sci.*, 44, 31-37. <https://doi.org/10.1017/S0043174500093516>
- Hatamleh, A. A., Danish, M., Al-Dosary, M. A., El-Zaidy, M., & Ali, S. (2022).** Physiological and oxidative stress responses of *Solanum lycopersicum* (L.) (tomato) when exposed to different chemical pesticides. *RSC Adv.*, 12, 7237-7252. <https://doi.org/10.1039/D1RA09440H>
- Himtaş, D., Yalçın, E., Çavuşoğlu, K., & Acar, A. (2024).** In-vivo and in-silico studies to identify toxicity mechanisms of permethrin with the toxicity-reducing role of ginger. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 31, 9272-9287. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31729-5>
- Kalcheva, V. P., Dragoeva, A. P., Kalchev, K. N., & Enchev, D. D. (2009).** Cytotoxic and genotoxic effects of Br-containing oxaphosphole on *Allium cepa* L. root tip cells and mouse bone marrow cells. *Genet. Mol. Biol.*, 32, 389-393. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572009000200028>
- Kamal, A., Ahmad, F., & Shafeeque, M. A. (2020).** Toxicity of pesticides to plants and non-target organism: a comprehensive review. *Iran. J. Plant. Physiol.*, 10(4), 3299-3313. <https://doi.org/10.22034/ijpp.2020.1885628.1183>
- Karagöl, S., Macar, O., Çavuşoğlu, K., & Yalçın, E. (2025).** Toxicological assessment of omethoate insecticide in *Allium cepa* L. *Sci. Rep.*, 15, 18663. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03923-7>
- Karaismailoğlu, M. C., & İnceer, H. (2017).** Evaluation of potential genotoxic and cytotoxic effects of deltamethrin insecticide on somatic chromosomes of *Helianthus annuus* L. *Caryologia.*, 70(4), 295-301. <https://doi.org/10.1080/00087114.2017.1339173>
- Kaya, E. (2005).** Klorprifos ve deltametrinin kan ve beyin lipid peroksidasyon ve antioksidan enzim aktivitelerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 69 s.
- Khanna, N., & Sharma, S. (2013).** *Allium cepa* root chromosomal aberration assay: a review. *Indian J. Pharm. Biol. Res.*, 1, 105-119. <https://doi.org/10.30750/ijpbr.1.3.15>
- Klasterska, I., Natarajan, A. T., & Ramel, C. (1976).** An interpretation of the origin of subchromatid aberrations of chromosome stickiness as a category of chromatid aberrations. *Hereditas.*, 83, 153-162. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1976.tb01581.x>
- Kumar, A., Sasmal, D., & Sharma, N. (2015).** An insight into deltamethrin induced apoptotic calcium, p53 and oxidative stress signalling pathways. *Toxicol. Environ. Health Sci.*, 7(1), 25-34. <https://doi.org/10.1007/s13530-015-0217-1>
- Kuriyama, R., & Sakai, H. (1974).** Roles of tubulin-bound guanosine triphosphate during microtubule assembly. *J. Biochem.*, 76, 651-654.

- Kutluer, F., Çavuşoğlu, K., & Yalçın, E. (2019). Deltametrin'in *Allium cepa* L.'daki fizyolojik, anatomik ve genotoksik etkilerinin araştırılması. *Düzce Üniv. Bilim ve Teknoloji Derg.*, 7(3), 961-972. <https://doi.org/10.29130/dubited.457074>
- Leake, L. D., Buckley, D. S., Ford, M. G., & Salt, D. W. (1985). Comparative effects of pyrethroids on neurones of target and non-target organisms. *Neurotoxicology*, 6(2), 99-116. PMID: 4022454
- Leme, D. M., & Marin-Morales, M. A. (2009). *Allium cepa* test in environmental monitoring: A review on its application. *Mutat. Res./Rev. Mutat. Res.*, 682(1), 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002>
- Linnainmaa, K., Meretoja, T., Sorsa, M., & Vainto, H. (1978). Cytogenetic effects of styrene and styrene oxide. *Mutat. Res.*, 58(2-3), 277-286. [https://doi.org/10.1016/0165-1218\(78\)90020-4](https://doi.org/10.1016/0165-1218(78)90020-4)
- Marcano, L., Carruyo, I., Del Campo, A., & Montiel, X. (2004). Cytotoxicity and mode of action of maleic hydrazide in root tips of *Allium cepa* L. *Environ. Res.*, 94(2), 221-226. [https://doi.org/10.1016/s0013-9351\(03\)00121-x](https://doi.org/10.1016/s0013-9351(03)00121-x)
- Mc-Gill, M., Pathak, S., & Hsu, T. C. (1974). Effects of ethidium bromide on mitosis and chromosomes: A possible material basis for chromosomes stickiness. *Chromosoma*, 47(2), 157-167. <https://doi.org/10.1007/BF00331803>
- Michelangeli, F., Robson, M. J., East, J. M., & Lee, A. G. (1990). The conformation of pyrethroids bound to lipid bilayers. *Biochim. Biophys. Acta (BBA)-Biomembranes*, 1028(1), 49-57. [https://doi.org/10.1016/0005-2736\(90\)90264-O](https://doi.org/10.1016/0005-2736(90)90264-O)
- Mithöfer, A., & Maffei, M. E. (2017). General mechanisms of plant defense and plant toxins. In *Plant Toxins*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, pp. 3-24. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6464-4_21
- Nwangburuka, C. C., & Oyelana, O. A. (2011). Cytological effects of chloroquine on root mitosis of *Allium cepa* (L.). *Acta SATECH*, 4(1), 25-35.
- Özkan, O., & Üstüner, O. (2012). Investigations about genotoxicity of deltamethrin. *Kafkas Üniv. Vet. Fak. Derg.*, 18, 69-74. <https://doi.org/10.9775/kvfd.2011.4858>
- Özkara, A., Akyıl, D., Eren, Y., & Erdoğmuş, S. F. (2015). Potential cytotoxic effect of anilofos by using *Allium cepa* assay. *Cytotechnology*, 67(5), 783-791. <https://doi.org/10.1007/s10616-014-9716-1>
- Özkul, M., Özel, Ç. A., Yüzbaşıoğlu, D., & Ünal, F. (2016). Does 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) induce genotoxic effects in tissue cultured *Allium* roots?. *Cytotechnology*, 68(6), 2395-2405. <https://doi.org/10.1007/s10616-016-9956-3>
- Palmieri, M. J., Andrade-Vieira, L. F., Trento, M. V. C., Eleutério, M. W. F., Luber, J., Davide, L. C., ... & Marcus-si, S. (2016). Cytogenotoxic effects of spent pot liner (SPL) and its main components on human leukocytes and meristematic cells of *Allium cepa*. *Water Air Soil Pollut.*, 227, 156. <https://doi.org/10.1007/S11270-016-2809-Z>
- Panda, B. B., & Sahu, U. K. (1985). Induction of abnormal spindle function and cytokinesis inhibition in mitotic cells of *Allium cepa* by the organophosphorus insecticide fensulfotion. *Cytobios.*, 42, 147-155.
- Panneerselvam, N., Palanikumar, L., & Gopinathan, S. (2012). Chromosomal aberrations induced by glycidol in *Allium*. *Int. J. Pharm. Sci. Res.*, 3(2), 300-304.
- Parween, T., Jan, S., Mahmooduzzafar, M., & Fatma, T. (2012). Evaluation of oxidative stress in *Vigna radiata* L. in response to chlorpyrifos. *Inter. J. Environ. Sci. Technol.*, 9(4), 605-612.
- Rank, J., & Nielsen, M. H. (1997). *Allium cepa* anaphase-telophase root tip chromosome aberration assay N-methyl-N-nitrosourea, malic hydrazide, sodium azide, ethyl methyl sulfonate. *Mutat. Res.*, 390(1-2), 121-127. [https://doi.org/10.1016/s0165-1218\(97\)00008-6](https://doi.org/10.1016/s0165-1218(97)00008-6)
- Sarac, I., Bonciu, E., Butnariu, M., Petrescu, I., & Madosa, E. (2019). Evaluation of the cytotoxic and geno-toxic potential of some heavy metals by use of *Allium* test. *Caryologia*, 72(2), 37-43. <https://doi.org/10.13128/cayologia-256>
- Sarsar, O., Macar, O., Kalefetoğlu, Macar, T., Çavuşoğlu, K., Yalçın, E., & Acar, A. (2025). Multifaceted investigation of esfenvalerate-induced toxicity on *Allium cepa* L. *Sci. Rep.*, 15, 16977. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01638-3>
- Saxena, P. N., Murthy, R. C., & Gupta, S. K. (2009). Evaluation of cytogenetic effects of deltamethrin in root meristem cells of *Allium sativum* and *Allium cepa*: a possible mechanism of chromosome damage. *Toxicol. Environ. Chem.*, 91(3), 577-594. <https://doi.org/10.1080/02772240802268965>
- Shneiderman, M. H., Dewey, W. C., & Highfield, D. P. (1971). Inhibition of DNA synthesis on synchronized Chinese hamster cell treated in G₁ with cycloheximide. *Exp. Cell Res.*, 67, 147-155. [https://doi.org/10.1016/0014-4827\(71\)90630-6](https://doi.org/10.1016/0014-4827(71)90630-6)
- Shahid, M., & Khan, M. S. (2022). Tolerance of pesticides and antibiotics among beneficial soil microbes recovered from contaminated rhizosphere of edible crops. *Curr. Res. Microb. Sci.*, 3, 100091. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100091>
- Shahid, M., Khan, M. S., Ahmed, B., Syed, A., & Bahkali, A. H. (2021). Physiological disruption, structural deformation and low grain yield induced by neonicotinoid insecticides in chickpea: a long term phytotoxicity investigation. *Chemosphere*, 262, 128388. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128388>

- Shahid, M., Singh, U. B., & Khan, M. S. (2023).** Metabolomics-based mechanistic insights into revealing the adverse effects of pesticides on plants: an interactive review. *Metabolites.*, 13(2), 246. <https://doi.org/10.3390/metabo13020246>
- Sharma, A., Yuan, H., Kumar, V., Ramakrishnan, M., Kohli, SK., Kaur, R., ... & Zheng, B. (2019).** Castasterone attenuates insecticide induced phytotoxicity in mustard. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 179, 50-61.
- Sharma, P. C., & Gupta, P. K. (1982).** Karyotypes in some pulse crops. *Nucleus.*, 25(3), 181-185.
- Singh, D., Pal, M., Singh, R., Singh, C. K., & Chaturvedi, A. K. (2015).** Physiological and biochemical characteristics of *Vigna* species for Al stress tolerance. *Acta Physiol. Plant.*, 37, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1834-7>
- Smaka-Kincl, V., Stegnar, P., Lovka, M., & Toman, M. J. (1996).** The evaluation of waste, surface and ground water quality using the *Allium* test procedure. *Mutat Res.*, 368(3-4), 171-179. [https://doi.org/10.1016/s0165-1218\(96\)90059-2](https://doi.org/10.1016/s0165-1218(96)90059-2)
- Sudhakar, R., Ninge Gowda, K. N., & Venu, G. (2001).** Mitotic abnormalities induced by silk dyeing industry effluents in the cell of *Allium cepa*. *Cytologia.*, 66(3), 235-239. <https://doi.org/10.1508/cytologia.66.235>
- Sutan, N. A., Popescu, A., Mihaescu, C., Soare, L. C., & Marinescu, M. V. (2014).** Evaluation of cytotoxic and genotoxic potential of the fungicide Ridomil in *Allium cepa* L. *Analele Stiint Univ. Al I Cuza Iasi.*, 60(1-5), 5-12. http://www.bio.uai.ro/publicatii/anale_vegetala/anale_veg_index.html
- Şekeroğlu, V. (2010).** Thiaklopid ve deltametrin insektisitlerinin tek başlarına ve karışım halinde kullanıldıkları zaman sıçan kemik iliği hücrelerinde in vivo (*Rattus Norvegicus* Berkenhout, 1769) genotoksik etkileri. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 148 s.
- Tedesco, S. B., Laughinghouse, I. V. H. D. (2012).** Bioindicator of genotoxicity: The *Allium cepa* test. Srivastava J. [ed.], *Environmental Contamination. Croatia: InTech*, pp. 137-156.
- Tudi, M., Ruan, H. D., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., ... & Phung, D.T. (2021).** Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, 18(3), 1112. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>
- Ünal, F., Tülek, N. D. H., Yüzbaşıoğlu, D., & Çelik, M. (2020).** Methodation insektisit/akarisitinin sitotoksik ve genotoksik potansiyelinin *Allium* testi ile incelenmesi. *Gazi Üniv. Fen Fak. Derg.*, 1-2, 1-12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4317924>
- Van't Hof, J. (1968).** The action of IAA and kinetin on the mitotic cycle of proliferative and stationary phase excised root meristem. *Exp. Cell Res.*, 51(1), 167-176. [https://doi.org/10.1016/0014-4827\(68\)90167-5](https://doi.org/10.1016/0014-4827(68)90167-5)
- Yalçın, E., Macar, O., Kalefetoğlu Macar, T., Çavuşoğlu, D., & Çavuşoğlu, K. (2021).** Multi-protective role of *Echinacea purpurea* L. water extract in *Allium cepa* L. against mercury (II) chloride. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 28, 62868-62876. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15097-6>
- Yekeen, T. A., & Adeboye, M. K. (2013).** Cytogenotoxic effects of cypermethrin, deltamethrin, lambdacyhalothrin and endosulfan pesticides on *Allium cepa* root cells. *African J. Biotech.*, 12(41), 6000-6006. <https://doi.org/10.5897/AJB2013.12802>