

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOLOJİ ANABİLİM DALI



**SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM UYGULAMALARINDA YENİ NESİL İNSEKTİSİT
OLARAK BORAKS KULLANIMININ *Ephestia kuehniella* MODELİ ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

NURAY GÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Aylin ER** (Tez Danışmanı)
 Doç. Dr. Serhat KAYA
 Dr. Öğr. Üyesi Pınar GÜNER

BALIKESİR, HAZİRAN – 2026

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “Sürdürülebilir Tarım Uygulamalarında Yeni Nesil İnsektisit Olarak Boraksın *Ephestia kuehniella* Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Çalışma kapsamında kullanılan *Ephestia kuehniella* bireylerinin laboratuvar koşullarında üretildiğini ve araştırmada insan ya da omurgalı hayvan kullanılmadığını,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Nuray GÜN

ÖZET

**SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM UYGULAMALARINDA YENİ NESİL
İNSEKTİSİT OLARAK BORAKSIN
Ephestia kuehniella ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
NURAY GÜN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOLOJİ ANABİLİM DALI
TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. AYLİN ER
BALIKESİR, HAZİRAN-2026**

Bu çalışmada, *Ephestia kuehniella* (Lepidoptera: Pyralidae) larvaları üzerinde boraksın toksik, gelişimsel, immünolojik ve antibakteriyel etkileri araştırıldı. Deneylerde farklı konsantrasyonlarda (5, 10, 25, 50, 100 ve 200 mg/mL) hazırlanan boraks çözeltileri son evre larvalara topikal olarak uygulandı. Toksisite analizleri sonucunda boraksın larvalar üzerinde öldürücü etki gösterdiği belirlendi ve LD₅₀ değeri 45.130 mg/mL olarak hesaplandı. Gelişim biyolojisi üzerine etkiler incelendiğinde, artan boraks konsantrasyonlarına bağlı olarak koza örme süresi, pupal periyot ve ergin öncesi gelişim süresinde anlamlı artışlar tespit edildi. Bu durum, boraksın larvaların gelişim hızını yavaşlattığını ve yaşam döngüsünü geciktirdiğini göstermektedir. Gelişim süresinin uzaması, zararlı popülasyonunun yeni nesiller oluşturma hızını azaltabileceğinden biyolojik mücadele açısından önemli bir avantaj sağlayabilir. Buna karşın puplaşma süresinde anlamlı bir değişim gözlenmemesi, boraksın gelişim sürecinin tüm evrelerini aynı düzeyde etkilemediğini düşündürmektedir. Ayrıca yüksek doz uygulamalarında ergin yaşam süresi, ergin ağırlığı ve toplam yumurta sayısında anlamlı azalmalar belirlendi. Boraksın bağışıklık sistemi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla toplam hemosit sayıları analiz edildi. 25 ve 50 mg/mL dozlarında hemosit sayısında artış gözlenirken, 100 ve 200 mg/mL dozlarında azalma meydana geldi. Bu durum, boraksın düşük dozlarda immün sistemi uyardığını, yüksek dozlarda ise baskıladığını gösterdi. Hemolenfin antibakteriyel aktivitesi disk difüzyon yöntemi ile değerlendirildi. Elde edilen sonuçlar, hem kontrol hem de boraks uygulanan gruplarda antibakteriyel aktivite bulunduğunu; boraks uygulaması sonrasında ise özellikle bazı bakterilere karşı inhibisyon zonlarının daha belirgin hale geldiğini gösterdi. Özellikle yüksek doz ve uzun süreli uygulamalarda *Klebsiella pneumoniae* ve *Escherichia coli* üzerinde daha belirgin inhibisyon zonları oluştuğu belirlendi. Bu bulgular, boraksın *E. kuehniella* üzerinde doz bağımlı olarak toksik, fizyolojik ve immünolojik etkiler oluşturduğunu gösterdi ve bor bileşiklerinin biyolojik mücadele açısından potansiyel taşıdığı değerlendirildi.

ANAHTAR KELİMELELER: Antibakteriyel aktivite, biyoinsektisit, boraks, *Ephestia kuehniella*, hemosit, sürdürülebilir tarım

ABSTRACT

EVALUATION OF BORAX AS A NEXT-GENERATION INSECTICIDE IN SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRACTICES

ON *Ephestia kuehniella*

MASTER'S THESIS

NURAY GÜN

BALIKESIR UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF BIOLOGY

SUPERVISOR: PROF. DR. AYLİN ER

BALIKESIR, JUNE- 2026

This study investigated the toxic, developmental, immunological, and antibacterial effects of borax on the larvae of *Ephestia kuehniella* (Lepidoptera: Pyralidae). In the experiments, borax solutions prepared at different concentrations (5, 10, 25, 50, 100, and 200 mg/mL) were topically applied to last-instar larvae. Toxicity analyses revealed that borax exhibited a lethal effect on the larvae, and the LD₅₀ value was calculated as 45.130 mg/mL. Evaluation of developmental biology parameters showed that increasing borax concentrations caused significant increases in cocooning time, pupal period, and pre-adult development time. These findings indicate that borax slowed larval development and prolonged the life cycle, which may contribute to reducing the population growth rate of the pest. However, no significant change was observed in pupation time, suggesting that borax did not affect all developmental stages equally. In addition, significant decreases were determined in adult lifespan, adult weight, and total egg production at higher doses. To assess the effects of borax on the immune system, total hemocyte counts were analyzed. An increase in hemocyte numbers was observed at 25 and 50 mg/mL, whereas a decrease occurred at 100 and 200 mg/mL. These findings indicated that borax stimulated the immune system at lower doses but suppressed it at higher doses. The results showed that antibacterial activity was present in both the control and borax-treated groups; however, following borax treatment, inhibition zones became more pronounced, particularly against certain bacterial species. More pronounced inhibition zones were observed particularly against *Klebsiella pneumoniae* and *Escherichia coli* at higher doses and longer exposure times. These findings demonstrated that borax exerted dose-dependent toxic, physiological, and immunological effects on *E. kuehniella* and suggested that boron compounds may have potential in biological control strategies.

Keywords: Antibacterial activity, bioinsecticide, borax, *Ephestia kuehniella*, hemocyte, sustainable agriculture

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR	vii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Sürdürülebilir Tarım ve Zararlı Yönetimi	3
1.1.1 Sürdürülebilir tarım kavramı ve önemi.....	3
1.1.2 Kimyasal pestisitlerin çevresel ve ekonomik sorunları	4
1.1.3 Alternatif, çevre dostu insektisit ihtiyaçları	5
1.2 Bor ve Bor Bileşikleri: Genel Özellikleri	6
1.2.1 Borun ve bileşiklerinin kimyasal ve fiziksel yapısı	7
1.2.2 Temel özellikleri ve çevresel etkisi	8
1.3 Boraksın Tarım Alanındaki Kullanımı	9
1.3.1 Bitki beslenmesindeki rolü.....	9
1.3.2 Toprak sağlığına katkıları ve çevresel davranışı	10
1.3.3 Zararlılara karşı potansiyel insektisit etkisi.....	11
1.4 Boraksın Sağlık ve Tıp Alanındaki Kullanımı	12
1.4.1 Antiseptik ve mikrop öldürücü özellikleri	12
1.4.2 Yara bakımı ve cilt enfeksiyonları.....	13
1.4.3 Farmasötik ürünlerde katkı maddesi olarak kullanımı	14
1.5 Boraksın Endüstri ve Ev Yaşamındaki Kullanımı.....	15
1.5.1 Temizlik ve deterjan ürünlerinde kullanımı	16
1.5.2 Cam, seramik ve boya sanayiinde kullanımı.....	16
1.5.3 Diğer günlük uygulamalar.....	17
1.6 Yeni Nesil İnsektisitler ve Boraksın Potansiyeli	18
1.6.1 Modern insektisit stratejileri ve sorunlar	18
1.6.2 Boraksın zararlılar üzerindeki etkileri ve mekanizmaları	19
1.6.3 Literatürdeki uygulama örnekleri	19
2. MATERYAL-METOT.....	25
2.1 Böceklerin Üretilmesi- <i>E. kuehniella</i> (Lepidoptera:Pyralidea) Kültürü	25
2.2 Boraksın Dozlarının Belirlenmesi ve Uygulanması	26
2.3 Böceklerin Gelişim Biyolojisine Etkilerin Belirlenmesi	26
2.3.1 Koza örme süresi	26
2.3.2 Puplaşma süresi	26
2.3.3 Pupal periyot.....	27
2.3.4 Ergin öncesi dönem	27
2.3.5 Ergin hayat uzunluğu	27
2.3.6 Ağırlık	28
2.3.7 Toplam yumurta sayısı.....	28
2.4 Toplam Hemosit Sayısının Belirlenmesi	29
2.5 Hemolenfin Anti-bakteriyal Aktivitesinin Belirlenmesi.....	30
2.5.1 Mikroorganizmalar	30
2.5.2 Hemolenfin Toplanması.....	30
2.5.3 Disk Diffüzyon Testleri	31

İÇİNDEKİLER (DEVAM)

Sayfa

3. BULGULAR	32
3.1 Toksisite Testleri	32
3.2 <i>E. kuehniella</i> 'da Gelişim Biyolojisi Çalışmaları.....	32
3.3 Toplam Hemosit Sayısına Etkisi	35
3.4 Hemolenfin Antibakteriyel Aktivitesi.....	36
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	39
5. KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ	48

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: IPM bileşenleri ve uygulama çerçevesi.	20
Şekil 1.2: IPM kavramı ve temel bileşenleri.	20
Şekil 2.1: <i>E. kuehniella</i> kültürünün laboratuvar ortamında üretimi için hazırlanan yetiştirme kavanozları.	25
Şekil 2.2: Farklı boraks dozlarının uygulandığı <i>E. kuehniella</i> larvalarında koza örme, puplaşma ve ergin gelişim süreçlerinin gözlemlenmesine ait görüntüler.	27
Şekil 2.3: <i>E. kuehniella</i> 'da ergin ağırlık ölçümü ve yumurta veriminin belirlenmesine ait görüntüler.	28
Şekil 2.4: <i>E. kuehniella</i> larvalarından elde edilen hemolenf örneklerinin hazırlanması ve hemositlerin hemositometre üzerinde sayımına ait görüntüler.	30
Şekil 2.5: Disk difüzyon testine ait petri görüntüleri.	31
Şekil 3.1: Kontrol grupları ve indüklenen hemolenfin disk difüzyon testi sonuçları.	38

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: <i>E. kuehniella</i> 'da Boraks uygulamasına bağlı LD değerleri.	32
Tablo 3.2: <i>E. kuehniella</i> 'da Boraks uygulamasının koza örme ve puplaşma süresine etkisi.	33
Tablo 3.3: <i>E. kuehniella</i> 'da Boraks uygulamasının pupal periyot ve ergin öncesi gelişim süresine etkisi.	34
Tablo 3.4: <i>E. kuehniella</i> 'da Boraks uygulamasının ergin hayat uzunluğu, ağırlık ve toplam yumurta sayısına etkisi.	35
Tablo 3.5: Boraks dozlarının toplam hemosit sayısına (x106 hücre/mL) etkisi.	36
Tablo 3.6: Kontrol gruplarının anti-bakteriyel aktivitesinin belirlenmesi.	37
Tablo 3.7: Deney gruplarının anti-bakteriyel aktivitesinin belirlenmesi.	38

KISALTMALAR

IPM: Entegre zararlı yönetimi

SDGs: Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları

LD: Letal doz (LD_{50} , LD_{99} gibi ölüm oranlarını ifade eden değerler)

NA: Nutrient agar

SXT: Sulfametoksazol–trimetoprim

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince bilgi, deneyim ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim değerli danışman hocam Prof. Dr. Aylin ER'e, çalışmamın her aşamasında yol gösterici olduğu ve bilimsel bakış açımı geliştirmeme katkı sağladığı için teşekkürlerimi sunarım. Tez sürecim boyunca laboratuvar çalışmalarında, veri elde edilmesi ve değerlendirilmesi aşamalarında her türlü desteği sağlayan, bilgi ve tecrübeleriyle bana katkı sunan değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Pınar GÜNER'e içten teşekkür ederim. Çalışmam süresince akademik bilgi ve yönlendirmeleriyle destek olan Dr. Emrah ÖZCAN'a katkılarından dolayı teşekkür ederim. Bu süreçte her zaman yanımda olan, destekleri ve anlayışlarıyla bana güç veren arkadaşlarıma ve görev yaptığım kurumuma teşekkür ederim. Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her koşulda yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Balıkesir, 2026

Nuray GÜN

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış, iklim değışiklikleri ve doğal kaynakların sınırlı olması gibi faktörler tarımsal üretim sistemlerini çok boyutlu ve dinamik bir yapı haline getirmektedir (FAO, 2021; FAO, 2022; IPCC, 2023). Sıcaklık artışları, kuraklık ve düzensiz yağışların mevsimsel dağılımı gibi faktörler tarımsal üretimde verim ve kalite kayıplarına neden olan çevresel stres faktörleri arasındadır (IPCC, 2023). Bu durum, sürdürülebilir üretim sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmakta ve alternatif yaklaşımlara olan ihtiyacı artırmaktadır (FAO, 2022). Bu bağlamda, doğal kaynakların korunması, bozulan ekolojik dengenin yeniden düzenlenmesi ve biyolojik çeşitliliğin sürdürülebilirliğinin sağlanması temel hedefler arasında yer almaktadır. Toprak sağlığının korunması ve kimyasal pestisit kullanımının azaltılması, bu hedeflere ulaşılmasında temel unsurlar arasında yer almakta ve sürdürülebilir tarımsal üretimin devamlılığı açısından büyük önem taşımaktadır (Barzman et al., 2015; Carvalho, 2017; Pretty et al., 2018).

Tarımsal üretimde verim ve kalite kayıplarına neden olan başlıca biyolojik faktörler zararlı böcekler ve bitki hastalıklarıdır (Savary et al., 2019). Zararlı organizmaların neden olduğu ürün kayıplarının %20–40 seviyelerine ulaşabildiği ve bu kayıpların yalnızca üretim süreci ile sınırlı kalmayıp hasat sonrası depolama aşamasında da devam ettiği bildirilmektedir (FAO, 2021; Savary et al., 2019). Bu kapsamda, tarımsal depo zararlıları depolanan ürünlerde besin değeri azalma, fiziksel bozulma, mikrobiyal kontaminasyon ve ağırlık kaybı gibi önemli sorunlara yol açmaktadır (Hagstrum and Subramanyam, 2022). Ayrıca, bu zararlıların varlığı fungal gelişimi teşvik ederek mikotoksin oluşumunu artırmakta ve gıda güvenliği açısından ciddi riskler oluşturmaktadır (FAO, 2021).

Depolanmış ürün zararlıları arasında yer alan *Ephestia kuehniella* (Zeller, 1879) (Lepidoptera: Pyralidae), un güvesi olarak bilinen ve dünya genelinde tahıl ve tahıl ürünlerinde önemli ekonomik kayıplara neden olan başlıca depo zararlılarından biridir. Özellikle un değirmenleri, tahıl depoları ve gıda işleme tesislerinde yaygın olarak görülmekte; larvaları depolanan ürünlerle beslenerek ürün miktarında azalma, besin değeri düşüş, kalite kaybı ve ekonomik değer kaybına yol açmaktadır. Ayrıca oluşturdıkları yoğun ipek ağları nedeniyle ürünlerin fiziksel yapısını bozmakta, eleme ve işleme süreçlerini güçleştirerek ürünlerin pazarlanabilirliğini azaltmaktadır (Hagstrum and Subramanyam, 2022). Laboratuvar koşullarında kolay yetiştirilebilmesi, kısa yaşam

döngüsüne sahip olması ve biyolojik ile toksikolojik araştırmalarda yaygın olarak model organizma olarak kullanılması nedeniyle bu çalışmada model organizma olarak seçilmiştir (Klowden, 2013).

Zararlı organizmalarla mücadelede uzun yıllardır kimyasal pestisitler yaygın olarak kullanılmaktadır (Carvalho, 2017). Ancak bu pestisitlerin bilinçsiz ve kontrolsüz kullanımı; çevresel kirlilik, hedef dışı organizmalar üzerinde olumsuz etkiler ve insan sağlığı açısından riskler gibi önemli sorunlara yol açmaktadır (Nicolopoulou-Stamati et al., 2016). Ayrıca, bu kimyasalların yaygın kullanımı zararlı türlerde direnç gelişimine neden olarak mücadele etkinliğini azaltmakta ve daha yüksek doz veya alternatif kimyasalların kullanımını gerektirerek ekonomik yükü artırmaktadır (Sparks and Nauen, 2015; Canyurt, 1994). Bu durum, mevcut kimyasal mücadele yöntemlerinin sürdürülebilirliğini sınırlandırmaktadır.

Bu sınırlılıklar, zararlılarla mücadelede daha sürdürülebilir ve evre dostu yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu doğrultuda biyolojik kontrol yöntemleri ön plana çıkmakta olup, özellikle hedef zararlılara karşı yüksek özgüllükleri ve çevreye düşük olumsuz etkileri nedeniyle parazitoidler etkili biyolojik mücadele ajanları arasında yer almaktadır (Barzman et al., 2015; Zhou et al., 2024). Bununla birlikte, kimyasal pestisit kullanımını azaltmaya yönelik olarak Entegre Zararlı Yönetimi (Integrated Pest Management-IPM) stratejileri ve düşük toksisiteli alternatif bileşikler de önem kazanmaktadır (Barzman et al., 2015; Pretty et al., 2018).

Bu alternatifler arasında, düşük toksisiteye sahip olmaları, çevresel açıdan daha güvenli kabul edilmeleri ve aynı zamanda bitki gelişiminde rol oynamaları nedeniyle bor ve bor türevleri dikkat çekmektedir (Fenibo et al., 2025; Zhou et al., 2024). Bitki gelişimi için gerekli mikro besin elementlerinden biri olan bor, hücresel yapı ve metabolik süreçlerde önemli rol oynamaktadır (Brdar-Jokanovic, 2020). Borun önemli bileşiklerinden biri olan boraks ise kimyasal stabilitesi ve geniş kullanım alanı ile öne çıkmaktadır. Bor bileşiklerinin tarımsal sistemlerde kullanımı, bitki beslenmesine katkı sağlayanın yanı sıra toprak özelliklerinin iyileştirilmesine de destek olmaktadır (Brdar-Jokanovic, 2020).

Ancak, bor ve türevlerinin zararlı organizmalar üzerindeki etkileri ve özellikle depo zararlıları ile mücadeledeki potansiyelleri literatürde henüz sınırlı sayıda çalışmada ele alınmış olup, bu alanda daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Isman, 2020;

Fenibo et al., 2025). Bu nedenle, bor bazlı bileşiklerin alternatif ve sürdürülebilir zararlı kontrol ajanları olarak değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu çalışma, bor bileşiklerinin tarımsal zararlılar üzerindeki etkilerini inceleyerek sürdürülebilir zararlı yönetimi yaklaşımlarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1.1 Sürdürülebilir Tarım ve Zararlı Yönetimi

Sürdürülebilir tarım ve zararlı yönetimi, tarımsal üretimin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarını dengeli bir şekilde ele alan iki temel yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Tarımsal üretimde verimliliğin artırılması kadar, doğal kaynakların korunması, biyolojik çeşitliliğin sürdürülmesi ve ekosistem dengesinin bozulmaması da büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda zararlı organizmalarla mücadelede kullanılan yöntemlerin çevreye duyarlı, insan sağlığına zarar vermeyen ve uzun vadede etkili çözümler sunan nitelikte olması gerekmektedir. Geleneksel kimyasal mücadele yöntemlerinin neden olduğu olumsuz etkiler, alternatif ve sürdürülebilir zararlı yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (FAO, 2022). Bu nedenle, sürdürülebilir tarım uygulamaları ile IPM yaklaşımlarının birlikte ele alınması, modern tarım sistemlerinin temel gerekliliklerinden biri haline gelmiştir. IPM, zararlı popülasyonlarını ekonomik zarar eşiğinin altında tutmayı hedefleyen ve biyolojik, kültürel, mekanik, fiziksel ile kimyasal mücadele yöntemlerinin bir arada kullanılmasına dayanan bütüncül bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda öncelik çevreye en az zarar veren mücadele yöntemlerine verilmekte, kimyasal pestisitler ise yalnızca gerekli durumlarda ve uygun dozlarda kullanılmaktadır. Böylece hem zararlı popülasyonlarının etkin bir şekilde kontrol altına alınması hem de çevresel etkilerin ve pestisit direncinin azaltılması amaçlanmaktadır (Barzman et al., 2015; Zhou et al., 2024).

1.1.1 Sürdürülebilir Tarım Kavramı ve Önemi

Sürdürülebilir tarım, tarımsal üretimin uzun vadede devamlılığının sağlanmasını, doğal kaynakların korunmasını ve çevresel etkilerin minimuma indirilmesini amaçlayan bütüncül bir üretim yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır (FAO, 2022). Sürdürülebilir tarım yaklaşımı sadece tarımsal üretimin artırılmasıyla sınırlı kalmayıp biyoçeşitliliğin sürdürülebilirliğini ve doğal döngülerin devamlılığını da kapsamaktadır (Pretty et al., 2018; Rockström et al., 2017). Aynı zamanda, ekosistem hizmetlerinin korunması ve tarımsal faaliyetlerin çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması da bu yaklaşımın temel hedefleri arasında yer almaktadır.

Dünya nüfusundaki artış ve buna paralel olarak artan gıda ihtiyacı, tarımsal üretimde ciddi bir baskı yaratmaktadır (IPCC, 2023). Nüfusun 2050 yılına kadar önemli ölçüde artacağı öngörülmekte olup, tarımsal sistemlerin sürdürülebilir, kaliteli ve verimli hale getirilmesini zorunlu kılmaktadır (Tilman et al., 2011). Bu durum, mevcut üretim sistemlerinin yeniden değerlendirilmesini ve daha verimli kaynak kullanımını teşvik eden yaklaşımların benimsenmesini gerekli kılmaktadır. Ancak; su kaynaklarının azalması, erozyon, iklim değişikliği ve tarımsal üretimde verimlilik ya da kalite kalıplarındaki dalgalanmalar gibi sorunlar tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir (IPCC, 2023; Rockström et al., 2017). Buna ek olarak, yoğun kimyasal girdi kullanımı ve yanlış arazi yönetimi uygulamaları da uzun vadede toprak sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir.

Sürdürülebilir tarım uygulamaları; kimyasal pestisit kullanımının azaltılması, toprak yapısının ve içeriğinin korunması ve su kullanımının belli oranlarda kalması gibi temel faktörlere dayanmaktadır (Pretty et al., 2018). Bunun yanında, organik gübreleme, ürün rotasyonu ve biyolojik mücadele gibi yöntemler de sürdürülebilir üretim sistemlerinin önemli bileşenleri arasında yer almaktadır.

Bu kapsamda sürdürülebilir tarım ekolojik, sosyal ve ekonomik ilkeleri bütünleştiren, doğayla uyumlu, ekosistem temelli hem verimliliği hem de devamlılığı arttırmayı hedeflemektedir (Altieri, 2018). Ayrıca, çiftçilerin bilgi düzeyinin artırılması ve yerel koşullara uygun uygulamaların geliştirilmesi, sürdürülebilir tarımın başarısında kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, özellikle kimyasal pestisitlerin yoğun kullanımı hem çevresel hem de ekonomik açıdan çeşitli sorunlara yol açmakta olup, sürdürülebilir tarım uygulamaları kapsamında yeniden değerlendirilmesi gereken önemli bir konudur.

1.1.2 Kimyasal Pestisitlerin Çevresel ve Ekonomik Sorunları

Tarımsal zararlılarla mücadele yöntemleri arasında bulunan ve uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan kimyasal pestisitler, etkili sonuçlar sağlamasına rağmen uzun vadede ciddi oranda çevresel ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır (Carvalho, 2017). Kimyasal pestisitlerin bilinçsiz ve fazla miktarda kullanımı ekosistem üzerinde olumsuz etkiler bırakmakta, toprak ve su kirliliğine neden olmaktadır (Nicolopoulou-Stamati et al., 2016). Ayrıca kimyasal pestisitler; sadece hedef tarımsal zararlı organizmalar üzerinde değil, yararlı böcekler, mikroorganizmalar ve diğer canlılar üzerinde de olumsuz ve toksik etkilere yol açabilmektedir (Sparks and Nauen, 2015). Bu olumsuz durumlar biyolojik çeşitliliğin

azalmasına, ekolojik dengenin bozulmasına, çevresel ve sağlık sorunlarına neden olmaktadır (Geiger et al., 2010). Bahsedilen bu sorunlara ek olarak, kimyasal pestisitlerin bilinçsiz ve sürekli kullanımı tarımsal zararlılarda direnç gelişimine yol açmakta ve bu durum da daha güçlü ve yüksek dozlarda kimyasal pestisitlerin kullanımına neden olmaktadır (Sparks and Nauen, 2015). Günümüzde tarımsal zararlı türlerin çok sayıda kimyasal pestisit grubuna yönelik direnç geliştirdiği bildirilmektedir (Bass et al., 2015).

Direnç gelişimine paralel olarak yoğun kimyasal pestisit kullanımı ekonomik açıdan da maliyetleri giderek arttırmakta ve üreticiler üzerinde maddi yük oluşturmakla birlikte ürünlerin üzerindeki pestisit kalıntıları uluslararası ticarete zorluklar oluşturmaktadır (Carvalho, 2017). Bu durum, tarımsal üretimde verimliliğin sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkilemekte ve üretim süreçlerinin daha karmaşık ve maliyetli hale gelmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda, pestisit kalıntılarına ilişkin yasal düzenlemeler ve maksimum kalıntı limitleri (MRL) kapsamında yapılan denetimler, özellikle ihracata yönelik üretim yapan işletmeler için ek bir risk faktörü oluşturmaktadır. Bu bağlamda, üreticilerin hem iç pazarda hem de uluslararası pazarlarda rekabet edebilirliğinin korunması giderek zorlaşmaktadır.

Bu sorunlar sürdürülebilir sistemlere ve alternatif mücadele yöntemlerine olan ihtiyacı giderek arttırmaktadır (FAO, 2022; IPCC, 2023). Bu doğrultuda, kimyasal pestisit kullanımının azaltılmasına yönelik çevre dostu ve sürdürülebilir yaklaşımların geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Özellikle IPM kapsamında uygulanan biyolojik mücadele ve biyopestisit uygulamaları, zararlı popülasyonlarının kontrol altına alınmasında daha dengeli ve uzun vadeli çözümler sunmaktadır. Bu tür yaklaşımlar, hem çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamak hem de tarımsal üretimde ekonomik sürdürülebilirliğin desteklenmesine olanak tanımaktadır. Bu kapsamda, özellikle çevre dostu ve daha seçici etki gösteren alternatif insektisitlerin geliştirilmesi ve kullanımı önem kazanmaktadır.

1.1.3 Alternatif, Çevre Dostu İnsektisit İhtiyaçları

Kimyasal pestisitlerin sebep olduğu çevresel, ekonomik ve sürdürülebilirlik açısından ortaya çıkan sorunlar, çevre dostu, sürdürülebilirlik açısından tutarlı ve alternatif mücadele yöntemlerine olan ilgiyi arttırmıştır (Fenibo et al., 2025). Bitkisel ekstratlar, mikrobiyal ajanlar, mineral kökenli bileşikler ve biyopestisitler gibi alternatif ve sürdürülebilir çözümler dikkat çekmektedir (Zhou et al., 2024; Isman, 2020). Biyopestisitler, doğal kaynaklı ve

çevreye daha az zararlı bileşikler arasında yer almakta olup, sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından önem taşımaktadır (Isman, 2020). Bu bileşikler, çevre ve insan sağlığı bakımından daha güvenli olmakla birlikte, hedef tarımsal zararlılar üzerinde seçici etki gösterdiği kabul edilmektedir (Isman, 2020; Fenibo et al., 2025).

IPM, biyolojik, kültürel, mekanik ve kimyasal yöntemlerin bir arada ve dengeli şekilde kullanılmasını esas alan; zararlı popülasyonlarını ekonomik zarar eşiğinin altında tutmayı amaçlayan bir mücadele yaklaşımıdır (Barzman et al., 2015; FAO, 2022). Bu yaklaşım, kimyasal pestisit kullanımını en aza indirerek biyolojik, kültürel ve mekanik yöntemlerin birlikte kullanılmasını hedeflemekte, aynı zamanda çevresel olumsuz etkilerin azaltılmasına katkı sağlamakta ve zararlı popülasyonlarının ekonomik zarar eşiğinin altında tutulmasını desteklemektedir (Barzman et al., 2015).

Mineral kökenli bileşikler ve doğal elementler sürdürülebilir zararlılarla mücadelede son yıllarda dikkat çekmekte ve bu alanda çeşitli çalışmalar yürütülmektedir (Fenibo et al., 2025; Zhou et al., 2024). Mineral kökenli bileşikler, tarımsal zararlılar üzerindeki potansiyel biyolojik etkileri, düşük toksisite düzeyleri ve çevre dostu özellikleri ile alternatif mücadele yöntemleri arasında değerlendirilmektedir (Brdar-Jokanovic, 2020; Fenibo et al., 2025). Bu kapsamda, mineral kökenli bileşikler arasında yer alan bor ve bileşikleri, sahip oldukları biyolojik etkiler nedeniyle dikkat çeken alternatifler arasında yer almaktadır.

1.2 Bor ve Bileşikleri: Genel Özellikler

Bor, biyolojik sistemlerde esansiyellik ile toksisite arasındaki dar aralık nedeniyle mikrobesein elementleri arasında kendine özgü bir konuma sahip olan ametal bir elementtir. Doğal ortamlarda bor çoğunlukla borat ve borik asit formlarında bulunmakta olup, kimyasal davranışı; pH, derişim ve çevresindeki mineral bileşime bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Literatürde de belirtildiği üzere bor, hidroksil içeren organik moleküllerle kompleks oluşturma eğilimi yüksek olan bir elementtir ve bu özellik, özellikle bitkilerdeki yapısal ve fonksiyonel rollerinin temelini oluşturmaktadır (Brown et al., 2002; Brdar-Jokanovic, 2020).

Tarımsal bağlamda bor, normal bitki gelişimi için gerekli olan temel bir mikrobesein elementi olarak kabul edilmektedir. Hücre duvarı oluşumu, membran stabilitesi ve üreme gelişimi gibi kritik fizyolojik ve yapısal süreçlerde rol oynamaktadır. Bununla birlikte hem bor

eksikliği hem de fazlalığı bitkilerde ciddi fizyolojik bozukluklara yol açabilmekte olup, bu durum borun bitki dokularındaki dar optimal konsantrasyon aralığını ortaya koymaktadır. Bu çift yönlü etki, toprak-bitki sistemlerinde bor yönetimini oldukça zorlaştırmaktadır (Brown et al., 2002; Marschner, 2012).

Biyolojik öneminin yanı sıra bor bileşikleri, sahip oldukları farklı kimyasal formlar ve fonksiyonel özellikler nedeniyle tarım, tıp, farmasötik ve malzeme bilimi gibi çeşitli alanlarda giderek artan bir ilgi görmektedir (Diaz and Yudin, 2017; Soriano-Ursúa et al., 2019). Bu bağlamda, bor ve bileşiklerinin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin anlaşılması, onların çevresel ve biyolojik sistemlerdeki davranışlarının değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, takip eden bölümde bor ve bileşiklerinin kimyasal ve fiziksel yapısı ele alınmaktadır (Brđar-Jokanovic, 2020).

1.2.1 Borun ve Bileşiklerinin Kimyasal ve Fiziksel Yapısı

Bor elementi, periyodik tabloda 13. grupta bulunan ve yarı metal (metalloid) özellik gösteren bir elementtir ve doğada serbest halde bulunmayıp, borat mineralleri şeklinde bulunmaktadır (Brđar-Jokanovic, 2020). Borun atom numarası 5 olup, güçlü kovalent bağlar oluşturabilme yeteneği ve düşük atom numarasına sahip olması bor elementini diğer elementlerden ayırmaktadır (Emsley, 2001). Bu özellikler borun kimyasal reaktivitesini ve biyolojik sistemlerle etkileşimini belirleyen temel faktörlerdir (Brđar-Jokanovic, 2020).

Bor, doğada başlıca boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), borik asit (H_3BO_3), kernit ve kolemanit gibi bileşikler şeklinde bulunmakta olup, bu bileşikler farklı çözünürlük ve kimyasal davranış özelliklerine sahiptir (Woods, 1994). Bor bileşiklerinin su içeren ortamlarda genellikle borik asit ve borat iyonları şeklinde bulunması, biyolojik sistemlerdeki etkileşimlerini belirleyen önemli bir faktördür (Brđar-Jokanovic, 2020). pH'a bağlı olarak borun kimyasal formu değişmekte, bu durum ise bitkiler ve mikroorganizmalar tarafından biyoyararlanabilirliğini etkilemektedir (Brđar-Jokanovic, 2020).

Bor elementi, farklı geometrik yapılar oluşturabilme özelliğine sahiptir ve bu durum bor bileşiklerinin farklı kimyasal ortamlarda çeşitli etkileşimler göstermesine olanak sağlamaktadır (Emsley, 2001). Borik asit molekülleri, hidroksil grupları ile etkileşime girerek hücresel düzeyde metabolik süreçleri etkileyebilmektedir (Woods, 1994). Bu özellik,

bor elementinin bitki fizyolojisi ve diğ er canlı organizmalardaki  oneminin temel nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Br dar-Jokanovic, 2020).

Bor bile şikleri fiziksel açıdan değerlendirildiğinde genellikle kristal yapıda olup yüksek sıcaklığa dayanıklılık, kimyasal kararlılık ve belirli çözünürlük özellikleri göstermektedir (Woods, 1994). Bu  zellikleri nedeniyle bor ve bor bileşikleri cam, seramik, deterjan ve kimya sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Woods, 1994). Ayrıca bor bileşiklerinin düşük uçuculuk göstermesi, çevresel yayılım açısından daha kontrollü davranış sergilemelerini sağlamaktadır (Woods, 1994).

1.2.2 Temel  zellikleri ve  evresel Etkisi

Bor, bitkiler için gerekli bir mikro besin elementi, aynı zamanda hücre duvarı oluşumu, hücre zar stabilitesi, karbonhidrat metabolizması ve generatif gelişim süreçlerinde önemli rol oynamaktadır (Br dar-Jokanovic, 2020). Borun  evresel davranışı ve ekotoksikolojik etkileri, borun konsantrasyonuna ve bulunduğu ortamın şartlarına göre değişiklik göstermektedir (Woods, 1994).

Bor ve bor bileşikleri birçok sentetik pestisite göre düşük uçuculuk ve sınırlı biyobirikim özellikleri ile çevresel açıdan daha düşük riskli bileşikler olarak değerlendirilmektedir (Woods, 1994). Borun yüksek konsantrasyonlarda bulunması durumunda bitkilerde toksik etkiye sebep olabileceği ve fotosentez, hücre bölünmesi, su dengesi gibi temel fizyolojik süreçleri olumsuz etkileyebileceği bildirilmektedir (Br dar-Jokanovic, 2020).

Bor ve bor bileşikleri toprak ekosistemleri açısından değerlendirildiğinde, toprak pH'ı ve toprağın organik madde içeriği gibi faktörlere göre borun hareketliliği ve etkisi değişiklik gösterebilmektedir (Br dar-Jokanovic, 2020). Alkali ve kumlu topraklarda daha kolay ta ınabildi i için yer altı sularına taşınma riskini artırabildi i belirtilmektedir (Woods, 1994). Bu nedenlerle de bor uygulamalarında uygulama dozunun ve çevresel koşulların dikkate alınması olabilecek toksik etkilerin önlenmesi bakımından büyük ölçüde önem taşımaktadır (Br dar-Jokanovic, 2020; Zhou et al., 2024).

Suda   z nebilir olan bor bileşikleri, sucul ekosistemlerde e ik değerlerin üzerinde toksik etki oluşturabilmektedir ve bu durumda sucul organizmalarda büyüme geriliği ve fizyolojik strese neden olabilmektedir (Woods, 1994). Ancak uygun dozlarda kullanıldığında bor ve

bor bileşiklerinin çevreye karşı olumsuz etkilerinin sınırlı olduğu ve kontrollü kullanımının sürdürülebilir tarım uygulamalarında avantaj sağlayabileceği ön görülmektedir (Brdar-Jokanovic, 2020).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, bor bileşikleri bilinçli ve belirli dozlarda kullanıldığında çevresel toksik etkilerin minimuma inebileceğini ve bor bileşiklerinin geleneksel kimyasal pestisitlere göre daha çevre dostu alternatif bileşikler olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır (Zhou et al., 2024). Bu kapsamda bor ve bor bileşikleri potansiyel biyolojik etkilerinden dolayı çok yönlü bir kullanım alanına sahip olduğu düşünülmektedir (Brdar-Jokanovic, 2020; Zhou et al., 2024).

1.3 Boraksın Tarım Alanındaki Kullanımı

Bor ve bileşiklerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri ile çevresel davranışları, bu elementin farklı endüstriyel ve tarımsal alanlarda kullanım potansiyelini belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır (Brdar-Jokanovic, 2020; Emsley, 2001). Bu bileşikler arasında boraks, sahip olduğu çözünürlük özellikleri ve bor kaynağı olarak etkinliği nedeniyle özellikle tarımsal uygulamalarda yaygın olarak değerlendirilmektedir (Goldberg, 1997; Shorrocks, 1997). Boraks, toprak sistemlerinde borun bitkiler tarafından alınabilir formuna dönüşümünde önemli bir rol oynayarak bitki beslenmesi açısından kritik bir kaynak oluşturmaktadır (Goldberg, 1997; Marschner, 2012).

Tarımsal üretimde bor eksikliğinin yaygın olarak görülmesi ve bunun verim ile kalite üzerindeki olumsuz etkileri, bor içeren bileşiklerin gübreleme ve bitki besleme uygulamalarında kullanımını önemli hale getirmektedir (Gupta, 1993; Marschner, 2012). Bu kapsamda boraksın bitki gelişimi üzerindeki etkilerinin anlaşılması, tarımsal verimliliğin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır (Brdar-Jokanovic, 2020; Bell and Dell, 2008). Bu bölümde boraksın tarım alanındaki kullanımına genel bir çerçeve sunulmakta, ardından bitki beslenmesindeki rolü ayrıntılı biçimde incelenmektedir.

1.3.1 Boraksın Bitki Beslenmesindeki Rolü

Bor elementinin suda çözünebilen bileşiklerinden olan boraks (sodyum tetraborat), tarımsal üretimde bitkiler için bor kaynağı olarak kullanılan önemli bir mikro besin elementidir ve hücre duvarı stabilitesi, bitki hücre duvarı oluşumu ve metabolik süreçlerin düzenlenmesinde rol oynamaktadır (Marschner, 2012; Gupta, 1993). Bitkiler tarafından alınabilir bor

formunun sağlanmasında önemli bir kaynak olması nedeniyle, boraksın toprak-bitki sistemlerindeki davranışı bitki beslenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Pektin yapısının oluşumunda görev alarak hücre duvarının dayanıklılığını artırmakta, hücreler arası bağlantıyı sağlamakta ve karbonhidrat taşınımında rol oynayarak fotosentez ürünlerinin bitki içerisinde dağılımını desteklemektedir (Brown et al., 2002). Bu süreçler bitki dokularının yapısal bütünlüğünü ve fizyolojik işleyişini doğrudan etkileyerek sağlıklı gelişim için temel bir rol üstlenmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, bor eksikliği görülen topraklarda yapılan bor uygulamalarının bitki gelişimi ve verimi üzerinde artış sağladığı bildirilmiştir (Bell and Dell, 2008; Shorrocks, 1997). Uygun dozlarda boraks kullanımının ürün verimliliğinde artış sağladığı ve stres koşullarında bitkilerin daha dayanıklı hale geldiği rapor edilmektedir (Marschner, 2012). Bu durum, bor uygulamalarının özellikle bor eksikliği görülen tarım alanlarında verim ve kaliteyi iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Ancak borun bitkilerdeki etkisi optimum konsantrasyon aralığında gerçekleşmekte olup, eksikliği kadar fazlalığı da toksik etki oluşturabilmektedir. Bu nedenle boraks uygulamalarında doz kontrolü büyük önem taşımaktadır (Brdar-Jokanovic, 2020; Marschner, 2012). Bu dengenin korunması hem bitki sağlığının sürdürülebilirliği hem de tarımsal üretimde verim kayıplarının önlenmesi açısından kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Boraksın bitki beslenmesindeki rolünün yanı sıra, toprak sistemi içerisindeki davranışı ve çevresel etkileri de tarımsal sürdürülebilirlik açısından önemli bir araştırma konusudur.

1.3.2 Toprak Sağlığına Katkıları ve Çevresel Davranışı

Boraks yalnızca bitki beslenmesine katkı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda toprak kimyası ve element dengesi üzerinde de etkili bir rol oynamaktadır. Toprakta bor genellikle borik asit ve borat iyonları formunda bulunmakta olup, toprak içerisindeki hareketliliği pH, nem durumu ve organik madde içeriğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Woods, 1994). Bu nedenle borun toprak çözeltisindeki davranışı, bitkiler tarafından alınabilirliğini doğrudan etkileyen önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Bitkiler tarafından kolaylıkla topraktan alınabilen borun toprakta aşırı birikimi, özellikle hassas türlerde toksisiteye neden olarak büyüme geriliği, kök gelişiminde bozulma ve çeşitli fizyolojik stres belirtilerine yol açabilmektedir (Brđar-Jokanovic, 2020). Bu durum, bor uygulamalarında doz ve zamanlamanın toprak-bitki sistemi açısından kritik olduğunu göstermektedir. Ayrıca borun dar bir faydalı-toksik aralıkta etkili olması, toprakta yönetimini diğer bazı mikro besin elementlerine göre daha hassas hale getirmektedir (Marschner, 2012; Gupta, 1993; Brown et al., 2002).

Öte yandan bor bileşiklerinin düşük uçuculuk ve sınırlı biyobirikim özelliklerine sahip olması, çevresel davranışları açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu özellikler sayesinde bor bileşikleri, birçok sentetik pestisite kıyasla daha düşük çevresel kalıcılık ve daha sınırlı ekotoksik etki potansiyeli göstermektedir (Woods, 1994). Bununla birlikte, toprakta uzun süreli uygulamalar sonucu yerel birikim riski tamamen ortadan kalkmamakta, bu nedenle çevresel izleme ve kontrollü kullanım önemini korumaktadır. Bu çevresel davranış özellikleri, bor bileşiklerinin tarımsal zararlılar üzerindeki potansiyel etkilerinin değerlendirilmesini önemli hale getirmektedir.

1.3.3 Zararlılara Karşı Potansiyel İnsektisit Etkisi

Son yıllarda boraks ve diğer bor bileşiklerinin zararlı organizmalar üzerindeki etki mekanizmaları ile ilgili çalışmalar artış göstermiştir (Zhou et al., 2024; Fenibo et al., 2025). Yapılan çalışmalar, bor bileşiklerinin potansiyel biyoinspektisit özellikler taşıdığını göstermektedir (Fenibo et al., 2025).

Böcekler, akarlar, mantarlar ve bazı bitki patojenleri üzerinde etkili olabildiği bildirilen bor bileşikleri, geniş bir etki spektrumuna sahip alternatif kontrol ajanları arasında değerlendirilmektedir (Isman, 2020; Zhou et al., 2024). Bor bileşiklerinin genellikle sindirim ve temas yoluyla etki göstererek fizyolojik süreçleri bozduğu ifade edilmektedir (Klowden, 2013).

Boraksın böceklerde oluşturduğu etkinin, uygulama şekline bağlı olarak metabolik süreçlerin olumsuz etkilenmesiyle ilişkili olduğu, oral uygulamalarda ise sindirim sistemi fonksiyonlarının ve besin emiliminin bozulmasının önemli etki mekanizmalarından biri olduğu bildirilmektedir (Klowden, 2013). Bu etkiler sonucunda enzim aktivitesi ve osmotik dengenin bozulduğu, larval gelişim süresinin ise uzadığı bildirilmektedir (Klowden, 2013).

Bor bileşikleri düşük toksisite profiline sahip olmaları nedeniyle sentetik insektisitlere kıyasla daha güvenli alternatifler sunmaktadır (Isman, 2020; Fenibo et al., 2025). Ayrıca omurgalı canlılar ve çevre üzerinde daha düşük toksik etki göstermeleri, sürdürülebilir tarım uygulamalarında önemli bir potansiyel oluşturmaktadır (Fenibo et al., 2025; Zhou et al., 2024).

Bununla birlikte, direnç gelişimi riskinin görece düşük olması, bor bileşiklerini zararlı yönetimi açısından avantajlı hale getirmektedir (Sparks and Nauen, 2015; Zhou et al., 2024). Bu özellikleri, özellikle IPM sistemlerinde boraks kullanımını daha da önemli kılmaktadır (Barzman et al., 2015).

Genel olarak boraks hem bitki besin elementi hem de zararlılar üzerinde biyolojik etki gösterebilen çok yönlü bir bileşik olarak değerlendirilmekte ve sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından potansiyel bir alternatif insektisit adayı olarak kabul edilmektedir (Brđar-Jokanovic, 2020; Zhou et al., 2024). Bor bileşiklerinin tarımsal zararlılar üzerindeki biyolojik etkileri, bu bileşiklerin yalnızca tarımda değil, biyolojik sistemlerde ve sağlık alanında da potansiyel uygulamalara sahip olabileceğini göstermektedir.

1.4 Boraksın Sağlık ve Tıp Alanındaki Kullanımı

Boraks ve bor bileşikleri, tarımsal uygulamalardaki rollerinin yanı sıra biyolojik sistemler üzerindeki etkileri nedeniyle sağlık ve tıp alanında da dikkat çeken maddeler arasında yer almaktadır. Bu bileşiklerin düşük toksisite profili ve belirli konsantrasyonlarda biyolojik aktivite gösterebilme özellikleri, farklı medikal ve hijyen uygulamalarında potansiyel kullanım alanlarını gündeme getirmektedir (Nielsen, 2014; Demirci vd., 2016). Özellikle antimikrobiyal etkinlikleri ve mikroorganizmalar üzerindeki inhibe edici etkileri, bor bileşiklerinin antiseptik özellikleri açısından değerlendirilmesini önemli hale getirmektedir. Bu kapsamda boraksın sağlık ve tıp alanındaki kullanımı, özellikle antiseptik ve mikrop öldürücü özellikleri çerçevesinde ele alınmaktadır (Demirci vd., 2016; da Costa et al., 2023; Woods, 1994).

1.4.1 Antiseptik ve Mikrop Öldürücü Özellikleri

Bor bileşiklerinden olan borik asit ve boraks, antiseptik özellikleri nedeniyle tıbbi uygulamalarda uzun yıllardır kullanılan kimyasallar arasında yer almaktadır. Yapılan

Çalışmalarda bor bileşiklerinin bakteriler ve mantarlar üzerinde inhibitör etki gösterebildiği bildirilmektedir (Demirci vd., 2016). Bu geniş antimikrobiyal etki spektrumu, bor bileşiklerinin sağlık alanındaki potansiyel önemini artırmaktadır.

Bor bileşiklerinin antimikrobiyal etkisi, mikroorganizmaların hücresel bütünlüğünü ve temel metabolik süreçlerini hedef alması ile açıklanmaktadır. Özellikle hücre zarının bütünlüğünün bozulması, hücresel enerji üretim mekanizmalarının inhibe edilmesi ve metabolik enzimlerin baskılanması, bor bileşiklerinin mikroorganizmalar üzerindeki etkisinin temel mekanizmaları arasında gösterilmektedir (Demirci vd., 2016). Bu süreçler sonucunda mikroorganizmaların büyüme ve çoğalma kapasitesi önemli ölçüde azalmaktadır. Ayrıca bor bileşiklerinin mikroorganizmaların biyofilm oluşumu ve hücresel yapıları üzerinde etkili olabildiği ve bu durumun antimikrobiyal etkinliği artırabileceği bildirilmektedir (Demirci vd., 2016). Bu özellik, bor bileşiklerinin yalnızca doğrudan antimikrobiyal ajan olarak değil, aynı zamanda antibiyotik etkinliğini destekleyici bir unsur olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir (Rock et al., 2007; Soriano-Ursúa et al., 2019).

Tüm bu özellikler birlikte değerlendirildiğinde, bor bileşikleri alternatif antimikrobiyal ajanlar arasında potansiyel bir aday olarak öne çıkmakta ve özellikle antiseptik uygulamalar açısından dikkat çekmektedir (Demirci vd., 2016; da Costa et al., 2023). Bu antimikrobiyal özellikler, bor bileşiklerinin klinik uygulamalarda özellikle yara bakımı ve cilt enfeksiyonlarının tedavisinde değerlendirilmesini önemli hale getirmektedir (WHO, 2009).

1.4.2 Yara Bakımı ve Cilt Enfeksiyonları

Son yıllarda yapılan çalışmalarda borun yara iyileşmesini hızlandırdığı ve bu etkinin antiinflamatuvar, antioksidan ve hücre proliferasyonunu destekleyici mekanizmalar üzerinden gerçekleştiği ortaya konulmaktadır (Karaman ve Yavuz, 2024). Bu etkiler, doku onarımı sürecinde hücresel stresin azaltılması ve rejeneratif süreçlerin desteklenmesi açısından bor bileşiklerinin potansiyel rolünü göstermektedir.

Özellikle enfekte yaralarda borik asit içeren preparatların, mikrobiyal yükü azaltarak iyileşme sürecini hızlandırdığı ve yara ortamında enfeksiyon gelişimini baskılayarak doku bütünlüğünün yeniden kazanılmasına katkı sağladığı bildirilmektedir (da Costa et al., 2023).

Bu durum, bor bileşiklerinin hem antimikrobiyal etki hem de doku iyileşmesini destekleyici çift yönlü bir etki gösterebileceğini düşündürmektedir.

Ayrıca bor bileşiklerinin, *Candida albicans* gibi fungal patojenlere karşı antifungal etki gösterebildiği ve bu nedenle cilt ve mukozal enfeksiyonların tedavisinde alternatif bir yaklaşım olarak değerlendirildiği bildirilmektedir (da Costa et al., 2023). Bu antifungal etki, özellikle yüzeysel enfeksiyonların kontrolünde bor bileşiklerinin potansiyel kullanım alanını genişletmektedir.

Bununla birlikte, bor bileşiklerinin terapötik kullanımında dozun dikkatli şekilde ayarlanması gerektiği, yüksek konsantrasyonlarda sitotoksik etki oluşturabileceği ve hücrel canlılık üzerinde olumsuz sonuçlara yol açabileceği vurgulanmaktadır. Bu nedenle klinik uygulamalarda etkinlik–güvenlik dengesinin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Bor bileşiklerinin yara iyileşmesi ve cilt enfeksiyonları üzerindeki bu terapötik etkileri, farmasötik ürün formülasyonlarında katkı maddesi olarak potansiyel kullanım alanlarını da gündeme getirmektedir (Nielsen, 2014; Demirci et al., 2016).

1.4.3 Farmasötik Ürünlerde Katkı Maddesi Olarak Kullanımı

Bor ve bor bileşikleri, koruyucu ve antiseptik özellikleri nedeniyle farmasötik ürünlerde yardımcı bileşenler olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Borik asit özellikle antiseptik solüsyonlarda ve göz damlası formülasyonlarında pH dengesi ve formülasyon stabilitesini artırmak amacıyla değerlendirilmektedir (WHO, 2009). Bu özellikleri sayesinde bor bileşikleri, farmasötik ürünlerin etkinliğini ve raf ömrünü destekleyen önemli katkı maddeleri arasında yer almaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, bor bileşiklerinin yalnızca yardımcı bileşen olarak değil, aynı zamanda doğrudan terapötik ajan potansiyeli taşıyan aktif moleküller olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bor temelli ilaçların klinik uygulamalarda yer alması, bu elementin biyolojik sistemler üzerindeki etkilerinin yalnızca tarımsal değil, aynı zamanda farmakolojik açıdan da önemli olduğunu göstermektedir (Bross et al., 2004; Rock et al., 2007). Bu durum, bor kimyasının modern farmakolojideki önemini giderek artırmaktadır.

Ayrıca borik asit türevlerinin antibakteriyel ve antifungal özellikler gösterdiği ve bu özellikleri nedeniyle yeni ilaç geliştirme çalışmalarında dikkat çeken bir bileşik grubu olduğu ifade edilmektedir (Soriano-Ursúa et al., 2019).

Bu antimikrobiyal potansiyel, bor bileşiklerinin hem enfeksiyon hastalıklarının tedavisinde hem de yeni farmasötik formülasyonların geliştirilmesinde önemli bir araştırma alanı oluşturmasına katkı sağlamaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bor bileşiklerinin farmasötik uygulamalardaki rolü giderek genişlemekte olup hem yardımcı bileşen hem de aktif farmasötik ajan olarak modern ilaç araştırmalarında artan bir öneme sahip olduğu görülmektedir.

1.5 Boraksın Endüstri ve Ev Yaşamındaki Kullanımı

Boraks, kimyasal stabilitesi, suda çözünürlüğü ve çok yönlü reaksiyon özellikleri nedeniyle yalnızca tarımsal ve biyomedikal alanlarda değil, aynı zamanda endüstriyel üretim süreçleri ve günlük yaşam uygulamalarında da yaygın olarak kullanılan önemli bir bor bileşiğidir (European Chemicals Agency (ECHA), 2023). Bu özellikleri, boraksın farklı sektörlerde fonksiyonel bir katkı maddesi olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Endüstriyel uygulamalarda boraks; cam, seramik, metalurji, boya ve temizlik ürünleri gibi birçok alanda üretim süreçlerini destekleyen önemli bir bileşen olarak yer almaktadır. Özellikle pH düzenleme, su yumuşatma ve proses verimliliğini artırma gibi işlevleri, endüstriyel kullanım alanlarını genişletmektedir (ECHA, 2023).

Buna ek olarak boraks, ev yaşamında kullanılan çeşitli temizlik ve bakım ürünlerinin formülasyonlarında da yer almakta olup, çok yönlü kimyasal özellikleri sayesinde hem endüstriyel hem de günlük uygulamalarda önemli bir bileşik olarak değerlendirilmektedir (Emsley, 2001; ECHA, 2023). Bu bölümde boraksın endüstriyel ve evsel kullanım alanları, temizlik ve deterjan ürünlerindeki kullanımı, cam, seramik ve boya sanayiindeki uygulamaları ile diğer günlük yaşam alanlarındaki kullanımı ayrı başlıklar kapsamında değerlendirilmektedir.

1.5.1 Temizlik ve Deterjan Ürünlerinde Kullanımı

Temizlik ve deterjan ürünlerinde boraks, yumuşatıcı, pH düzenleyici ve kir çözücü gibi fonksiyonel özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan önemli bir bileşendir (ECHA, 2023). Su içerisindeki kalsiyum ve magnezyum iyonları ile kompleks oluşturabilme özelliği sayesinde suyun sertliğini azaltan boraks, bu özelliği ile deterjanların temizleme etkinliğini artırmaktadır (ECHA, 2023). Bu durum, özellikle sert su koşullarında temizlik performansının iyileştirilmesi açısından boraksın önemini artırmaktadır.

Ayrıca boraksın alkalın yapısı, yağ ve protein bazlı organik kirlerin daha kolay çözünmesini sağlayarak yüzeylerden uzaklaştırılmasını kolaylaştırmaktadır (ECHA, 2023). Bu özellik, temizlik süreçlerinde hem fiziksel hem de kimyasal temizleme etkinliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bunun yanında bor bileşiklerinin belirli düzeyde antiseptik özellik göstermesi, temizlik ürünlerinde yalnızca kir giderimi değil aynı zamanda mikrobiyal yükün azaltılmasına da katkı sunmasını sağlamaktadır (Nielsen, 2014).

Bu fonksiyonel özellikleri nedeniyle boraks, çamaşır deterjanları, yüzey temizleyiciler ve çeşitli dezenfektan ürünlerin formülasyonlarında önemli bir katkı maddesi olarak yer almaktadır (ECHA, 2023). Bu durum, boraksın hem evsel temizlik ürünlerinde hem de endüstriyel temizlik uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahip olduğunu göstermektedir.

1.5.2 Cam, Seramik ve Boya Sanayiinde Kullanımı

Cam ve seramik endüstrisinde bor bileşikleri, üretim süreçlerinde kritik rol oynayan önemli hammaddeler arasında yer almaktadır (Emsley, 2001). Özellikle bor oksit içeren bileşikler, cam üretiminde erime sıcaklığını düşürerek üretim sürecinin daha düşük enerji ile gerçekleşmesini sağlamak ve bu durum enerji verimliliğini artırmaktadır (Emsley, 2001). Buna ek olarak, cam yapısına dahil edilen bor bileşikleri ürünün termal şok direncini artırmakta ve kimyasal dayanıklılığını iyileştirerek daha uzun ömürlü malzeme elde edilmesine katkı sağlamaktadır (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2021).

Seramik üretiminde ise boraks, sır (glaze) oluşumunu kolaylaştıran ve yüzey özelliklerini iyileştiren önemli bir katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (IAEA, 2021). Bu sayede seramik yüzeylerde daha homojen bir yapı oluşmakta, parlaklık ve mekanik dayanım gibi

özellikler geliştirilmektedir. Ayrıca üretim sürecinde akışkanlığı artırması, seramik ürünlerin kalite kontrolünü destekleyen önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Boya sanayiinde bor bileşikleri, pigment stabilitesini artıran ve korozyon önleyici özellikler gösteren katkı maddeleri olarak değerlendirilmektedir (ECHA, 2023). Bu özellikleri sayesinde boyaların yüzeye daha iyi tutunmasına ve çevresel etkilere karşı daha dayanıklı olmasına katkı sağlamaktadır. Genel olarak bor bileşikleri, cam, seramik ve boya sanayiinde bulunduğu fiziksel ve kimyasal avantajlar sayesinde endüstriyel uygulamalarda çok yönlü kullanım imkânı sağlamaktadır.

1.5.3 Diğer Günlük Uygulamalar

Diğer günlük uygulamalarda bor bileşikleri, ev yaşamında farklı fonksiyonel özellikleri nedeniyle çok yönlü kullanım alanlarına sahip kimyasallar arasında yer almaktadır (ECHA, 2023; Cosmetic Ingredient Review (CIR), 2025).

Bu uygulamalar, bor bileşiklerinin yalnızca endüstriyel süreçlerde değil, aynı zamanda ev içi pratik kullanımlarda da önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Özellikle ev içi zararlılarla mücadelede bor bileşikleri, düşük toksisite profiline sahip kimyasallar olarak değerlendirilmekte ve böcek kontrolünde alternatif bir yöntem olarak tercih edilmektedir. Bu özellik, kimyasal pestisitlere kıyasla daha kontrollü ve hedefe yönelik bir kullanım imkânı sunmaktadır. Bunun yanı sıra boraksın koku giderici ve nem düzenleyici özellikleri, ev ortamlarında hijyen ve konforun artırılmasına katkı sağlamaktadır (ECHA, 2023).

Ayrıca bor bileşikleri, endüstriyel ve günlük yaşamda farklı alanlarda kullanmakta, kişisel bakım ve kozmetik ürünlerinde de formülasyon destekleyici bileşen olarak yer alabilmektedir (Nielsen, 2014). Bu kullanım alanı, bor bileşiklerinin formülasyon stabilitesini artırma ve ürün performansını destekleme özellikleri ile ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte, bor bileşiklerinin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin doz bağımlı olduğu ve yüksek konsantrasyonlarda toksik etki oluşturabileceği bildirilmektedir (World Health Organization (WHO), 2009). Bu nedenle hem endüstriyel hem de evsel uygulamalarda kullanım miktarının dikkatle kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır.

1.6 Yeni Nesil İnsektisitler ve Boraksın Potansiyeli

Yeni nesil insektisitler; seçicilik, düşük toksisite, çevresel uyumluluk ve direnç gelişimini sınırlandırma gibi özellikleri nedeniyle sürdürülebilir zararlı yönetiminde önem kazanmaktadır (Sparks and Nauen, 2015; Zhou et al., 2024). Bu bağlamda, yeni nesil insektisit stratejileri; seçicilik, düşük toksisite ve çevresel uyumluluk gibi kriterler doğrultusunda geliştirilmektedir. Bor bileşikleri, özellikle boraks, sahip olduğu biyosidal özellikler ve nispeten düşük toksisite profili nedeniyle bu yeni yaklaşımlar içinde dikkat çeken alternatifler arasında değerlendirilmektedir. Bu durum, bor bileşiklerinin yalnızca tamamlayıcı bir bileşen olarak değil, aynı zamanda potansiyel aktif ajan olarak da araştırılmasına zemin hazırlamaktadır. Bu çerçevede, modern insektisit yaklaşımlarında öne çıkan temel stratejiler ve karşılaşılan sorunlar ele alınmakta; boraksın bu sorunlara yanıt verebilecek potansiyel bir alternatif olarak sunduğu olanaklar literatür ışığında değerlendirilmektedir (Fenibo et al., 2025; Zhou et al., 2024).

1.6.1 Modern İnsektisit Stratejileri ve Karşılaşılan Sorunlar

Tarımsal üretimde zararlı organizmalarla mücadelede yaygın olarak kullanılan insektisitler, etkilerinin yüksek olmasına rağmen biyolojik ve çevresel ciddi sorunlara yol açabilmektedirler (Sparks and Nauen, 2015). Bilinçsiz ve yüksek miktarlarda kullanılan sentetik insektisitler, hedef dışı organizmalar üzerinde de toksik etki gösterdikleri için ekosistem dengesinin bozulmasına neden olabilmektedirler (Pimentel, 2005). Bunlarla birlikte zararlı türlerde insektisitlere karşı gelişen direnç, var olan kimyasal mücadele yöntemlerinin etkinliğini ciddi oranda azaltmaktadır (Sparks and Nauen, 2015). Direnç gelişimi ile birlikte kimyasal mücadelede kullanılan dozların artması, insan sağlığı açısından ciddi risklere yol açabilmekte ve çevresel kirliliği de artırmaktadır (Carvalho, 2017). Bahsedilen bu olumsuz durumlar nedeniyle sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından daha güvenli, hedefe yönelik ve çevre dostu insektisit arayışı giderek önem kazanmaktadır (Zhou et al., 2024). Bu durum, mevcut pestisit stratejilerinin yeniden değerlendirilmesini ve alternatif kontrol yöntemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Yeni nesil insektisit geliştirilmesinde, hedef organizmaya özgül etki gösteren ve çevresel etkileri en aza indiren düşük toksisiteli bileşiklerin kullanımına odaklanılmaktadır (Isman, 2020). Bu yaklaşım kapsamında biyopestisitler, bitkisel ekstraktlar, mikrobiyal ajanlar ve mineral kökenli bileşikler giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Fenibo et al., 2025). Özellikle mineral kökenli bileşikler arasında yer alan bor bileşikleri, sahip oldukları özgün

etki mekanizmaları nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu bağlamda boraksın zararlılar üzerindeki etkileri ve bu etkilerin altında yatan mekanizmalar, alternatif insektisit adayları arasında değerlendirilebilmesi açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

1.6.2 Boraksın Zararlılar Üzerindeki Etkileri ve Etki Mekanizmaları

Son yıllarda bor bileşikleri ve boraks, tarımsal zararlı organizmalar üzerinde gösterdikleri etkiler nedeniyle araştırılan bileşikler arasında yer almaktadır (Zhou et al., 2024). Böcekler üzerinde bor bileşiklerinin hem temas hem de sindirim yolu ile etki gösterebildiği bilinmektedir (Klowden, 2013). Orta bağırsak epitel hücrelerinde hasar oluşturarak besin emilimini etkilediği ve buna bağlı olarak metabolik süreçleri bozduğu belirtilmektedir (Klowden, 2013). Ayrıca enzim aktivitelerini etkileyerek enerji metabolizmasını bozabildiği ve bu durumun gelişim süreçlerinin yavaşlamasına neden olduğu ifade edilmektedir.

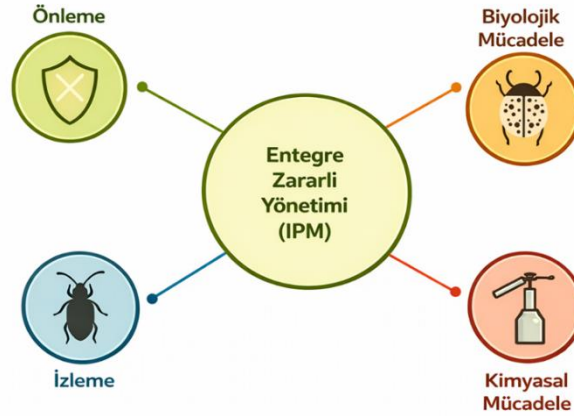
Yapılan çalışmalarda bor bileşiklerinin osmotik dengenin bozulmasına yol açarak hücresel stres oluşturduğu ve buna bağlı olarak ölüm oranlarında artış meydana getirdiği gösterilmiştir (Zhou et al., 2024). Bu fizyolojik etkilerin özellikle bağırsak fonksiyonları ve iyon dengesi üzerinde belirgin sonuçlar doğurduğu ve böceklerin homeostatik mekanizmalarını zayıflattığı bildirilmektedir. Bunun yanı sıra, bor bileşiklerinin ölümcül olmayan dozlarda dahi larval gelişim süresini uzattığı ve ergin çıkışını olumsuz yönde etkilediği ifade edilmektedir (Isman, 2020). Bu durum, popülasyon dinamikleri üzerinde baskı oluşturabilecek önemli bir gelişimsel etkiyi göstermektedir.

Bu etkiler, boraksın yalnızca öldürücü bir ajan olarak değil, aynı zamanda gelişim düzenleyici ve fizyolojik süreçleri etkileyen bir bileşik olarak da değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır (Isman, 2020). Etki mekanizmalarının çok yönlü olması, boraksın farklı zararlı türlere karşı potansiyel uygulama alanlarının daha geniş bir çerçevede ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, literatürde yer alan uygulama örnekleri ve elde edilen deneysel sonuçlar, boraksın pratik kullanım potansiyelinin değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle bir sonraki bölümde ilgili çalışmalar ve bulgular detaylı olarak incelenmektedir.

1.6.3 Literatürdeki Uygulama Örnekleri ve Değerlendirme

Bor bileşiklerinin zararlı organizmalara karşı etkili olduğunu gösteren çalışmalar, bu bileşiklerin IPM yaklaşımları içerisinde değerlendirilebilecek potansiyel alternatifler

arasında yer alabileceğini ortaya koymaktadır (Zhou et al., 2024; Şekil 1.1). IPM stratejileri, kimyasal pestisit kullanımını azaltırken biyolojik, kültürel ve hedefe yönelik kontrol yöntemlerinin birlikte uygulanmasını temel alan sürdürülebilir bir çerçeve sunmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca zararlı popülasyonlarının kontrolünü değil, aynı zamanda ekosistem dengesinin korunmasını da amaçlamaktadır.



Şekil 1.1: IPM bileşenleri ve uygulama çerçevesi (Zhou et al., v2024)

Zhou et al. (2024), tarafından yapılan derlemede IPM'nin temel bileşenleri; kültürel uygulamalar, biyolojik kontrol, genetik yaklaşımlar ve hedefe yönelik pestisit kullanımı olarak sınıflandırılmaktadır. Çalışmada özellikle biyolojik kontrol yöntemlerinin ve yeni nesil biyopestisitlerin IPM içerisindeki artan rolüne dikkat çekilmektedir. Ayrıca nano-formülasyonlar ve kontrollü salım sistemleri gibi yenilikçi pestisit uygulamalarının, çevresel etkileri azaltırken etkinliği artırma potansiyeli taşıdığı ifade edilmektedir (Zhou et al., 2024;



Şekil 1.2: IPM kavramı ve temel bileşenleri (Zhou et al., 2024)

Bununla birlikte, IPM uygulamalarının yaygınlaşmasında bilgi eksikliği, ekonomik kısıtlamalar, uygulama karmaşıklığı ve sosyo-kültürel engellerin önemli rol oynadığı ifade edilmektedir. Bu durum, IPM'nin etkin uygulanabilmesi için yalnızca teknik gelişmelerin

yeterli olmadığını, aynı zamanda eğitim, politika desteği ve paydaş katılımının da gerekli olduğunu göstermektedir (Barzman et al., 2015; FAO, 2022).

Bu çerçevede bor bileşiklerinin, özellikle boraksın hem biyosidal özellikleri hem de nispeten düşük toksisite profili nedeniyle IPM stratejileri içerisinde tamamlayıcı veya destekleyici bir bileşen olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Boraksın zararlılar üzerindeki gelişimsel ve fizyolojik etkileri, onu yalnızca doğrudan öldürücü bir ajan olmaktan öte, aynı zamanda popülasyon gelişimini baskılayıcı bir araç olarak da önemli kılmaktadır. Bu özellikler, boraksın IPM yaklaşımları kapsamında potansiyel kullanım alanlarının daha detaylı araştırılmasını gerekli kılmaktadır (Zhou et al., 2024; Fenibo et al., 2025).

Bor bileşikleri, genel olarak biyolojik sistemlerde beslenme davranışı, enzim aktivitesi ve metabolik süreçler üzerinde etkiler gösterebilmekte ve bu özellikleri nedeniyle zararlı kontrolü çalışmalarında dikkat çekmektedir (Diaz and Yudin, 2017). Özellikle bor içeren bileşiklerin hücresel düzeyde enzim fonksiyonlarını modüle edebilmesi, enerji metabolizmasını etkileyebilmesi ve çeşitli biyokimyasal yollarda aksamalara neden olabilmesi, bu bileşiklerin biyolojik aktivitesinin temelini oluşturmaktadır. Ayrıca bu etkilerin organizmaların büyüme, gelişim ve hayatta kalma süreçleri üzerinde dolaylı sonuçlar doğurabileceği ve bu nedenle bor bileşiklerinin potansiyel biyosidal ajanlar arasında değerlendirilebileceği bildirilmektedir (Coghi et al., 2021). Bu bilgiler, boraksın gelişim biyolojisi ve fizyolojik süreçler üzerinde etkili olabileceğini gösteren bu çalışmanın bulgularıyla uyumludur.

Bu mekanizmalar, bor bileşiklerinin IPM stratejileri içerisinde yalnızca doğrudan öldürücü ajanlar olarak değil, aynı zamanda gelişim ve davranış süreçlerini etkileyen tamamlayıcı bileşenler olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bu bağlamda boraks, IPM yaklaşımlarında yer alan alternatif ve düşük toksisiteli kontrol yöntemleri arasında potansiyel bir aday olarak öne çıkmaktadır (Fenibo et al., 2025; Zhou et al., 2024).

Biyopestisitlerin sürdürülebilir tarım uygulamalarındaki artan önemi, çevre dostu özellikleri ve kimyasal pestisitlere alternatif olma potansiyeli, bor bileşikleri gibi mineral kökenli ajanların alternatif insektisit adayları arasında değerlendirilmesini desteklemektedir (Fenibo et al., 2025).

Fenibo et al. (2025), tarafından yapılan kapsamlı derlemede biyopestisitlerin IPM sistemleri içerisinde giderek daha merkezi bir konuma geldiği, sürdürülebilir tarım, Tek Sağlık yaklaşımı (One Health) ve Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDGs) ile güçlü bir uyum gösterdiği vurgulanmaktadır. Bununla birlikte, yüksek üretim maliyetleri, formülasyon zorlukları, kısa raf ömrü ve dağıtım altyapısındaki sınırlamaların biyopestisitlerin geniş ölçekli kullanımını kısıtladığı ifade edilmektedir.

Buna karşılık, bitkisel kökenli pestisitler, doğal düşmanlar, entomopatojen nematodlar ve bitkisel ekstraktlar gibi daha erişilebilir ve düşük maliyetli yaklaşımların özellikle küçük ölçekli tarım sistemlerinde etkili sonuçlar verebildiği belirtilmektedir (Barzman et al., 2015; Isman, 2020).

Boraksın etkinliğinin doza, uygulama şekline ve hedef organizmaya bağlı olarak değiştiği için kontrollü kullanımın gerekli olduğu ifade edilmektedir (Zhou et al., 2024). Bu durum IPM yaklaşımının temel prensipleri ile uyumlu olup, zararlı kontrolünde kullanılan her bir ajan veya yöntemin stratejik ve optimize edilmiş bir çerçevede uygulanması gerektiğini göstermektedir. Özellikle doz artışıyla birlikte hedef dışı etkilerin ortaya çıkabileceği ve çevresel sistemler üzerinde olumsuz sonuçlar oluşturabileceği bildirilmektedir.

Bunun yanı sıra, bor bileşiklerinin etkinliğinin çevresel koşullar, uygulama yöntemi ve hedef türün biyolojik özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermesi, tek tip uygulama yaklaşımını sınırlamaktadır. Bu nedenle boraksın kullanımı yalnızca etki gücü açısından değil, aynı zamanda ekosistem güvenliği ve sürdürülebilirlik ilkeleri açısından da dikkatle değerlendirilmelidir. Bu çerçevede boraksın IPM stratejileri içerisinde fiziksel, biyolojik ve kimyasal kontrol yöntemleri ile birlikte dengeli şekilde uygulanması gerektiği ifade edilmektedir.

Barzman et al. (2015), tarafından vurgulandığı üzere IPM, tek bir evrensel çözüm yerine farklı agroekolojik ve sosyo-ekonomik koşullara uyarlanabilen dinamik bir prensipler bütünü olarak tanımlanmaktadır. Bu yaklaşım, zararlı kontrolünde kimyasal pestisit kullanımını azaltmanın yanı sıra önleyici tarımsal uygulamaların güçlendirilmesini, biyolojik kontrol ajanlarının kullanımını ve kimyasal olmayan yöntemlerin entegrasyonunu kapsamaktadır. Özellikle farklı kontrol yöntemleri arasında sinerjik etkilerin oluşturulması

IPM'nin uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Fenibo et al. (2025), ayrıca biyopestisitlerin IPM içerisindeki artan rolüne rağmen, üretim maliyetleri ve teknik sınırlamalar nedeniyle yaygın kullanımının kısıtlandığını belirtmektedir. Buna karşın düşük maliyetli ve yerel olarak uygulanabilir biyopestisit yaklaşımlarının özellikle küçük ölçekli tarım sistemlerinde önemli avantajlar sağladığı ifade edilmektedir. Bu durum IPM'nin yalnızca yüksek teknolojiye dayalı değil, aynı zamanda düşük teknoloji ve yerel bilgi ile desteklenen hibrit bir sistem olduğunu göstermektedir.

Barzman et al. (2015), tarafından ayrıca IPM'nin temel amacının pestisit kullanımını tamamen ortadan kaldırmak değil, çevresel etkileri minimize edecek şekilde optimize etmek olduğu belirtilmektedir. Zararlı popülasyonlarının ekonomik zarar eşiğinin altında tutulması, çok yıllık etkilerin dikkate alınması ve ekosistem temelli karar mekanizmalarının geliştirilmesi bu yaklaşımın temel bileşenleri arasındadır. İklim değişikliği ve küresel ticaretin etkisiyle zararlı türlerin yayılımındaki artış göz önüne alındığında IPM'nin adaptif yapısının önemi daha da artmaktadır.

Bu bağlamda bor bileşikler gibi mineral kökenli alternatiflerin IPM stratejileri içerisinde değerlendirilmesi, kimyasal pestisit bağımlılığını azaltmaya yönelik tamamlayıcı bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Fenibo et al. (2025), tarafından biyopestisitlerin sürdürülebilir tarım, Tek Sağlık Yaklaşımı ve Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile uyumlu olduğu vurgulanmakta, bu tür yaklaşımların çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlayabileceği ifade edilmektedir. Bu doğrultuda boraks gibi düşük toksisiteli ve çok yönlü etki mekanizmasına sahip bileşiklerin IPM tabanlı zararlı yönetim stratejilerinde gelecekte daha fazla araştırılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Genel olarak literatür bulguları değerlendirildiğinde, IPM yaklaşımının sürdürülebilir zararlı yönetimi açısından esnek, çok bileşenli ve yerel koşullara uyarlanabilir bir yapı sunduğu görülmektedir. Zhou et al. (2024) ve Barzman et al. (2015), tarafından vurgulanan prensipler, zararlı kontrolünde tek yönlü kimyasal bağımlılığın azaltılmasını ve farklı kontrol yöntemlerinin entegre edilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda biyopestisitler ve mineral kökenli bileşikler, özellikle çevresel etkileri minimize etme potansiyelleri nedeniyle giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Fenibo et al. (2025), ise bu bileşiklerin

sürdürülebilir tarım sistemleri içerisinde önemli bir alternatif oluşturabileceğini, ancak etkin kullanım için uygulamaya yönelik daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede boraksın, düşük toksisite profili, çok yönlü biyolojik etkileri ve farklı zararlı grupları üzerindeki potansiyel etkileri dikkate alındığında, IPM tabanlı sistemlerde değerlendirilmesi gereken aday bileşiklerden biri olduğu anlaşılmaktadır. Ancak literatürde boraksın etkinliğine ilişkin bulguların çoğunlukla farklı koşullar ve türler üzerinden dolaylı olarak raporlandığı, bu nedenle etki mekanizması ve etkinlik düzeyinin daha kontrollü deneysel çalışmalarla desteklenmesinin gerekli olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, *E. kuehniella* (Lepidoptera: Pyralidae) larvaları üzerinde boraksın toksik, gelişimsel, immünolojik ve antibakteriyel etkilerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda, farklı konsantrasyonlarda uygulanan boraks dozlarının larvaların gelişim biyolojisi, yaşam süresi, üreme kapasitesi ve bağışıklık sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, boraks uygulaması sonrasında elde edilen hemolenfin antibakteriyel aktivitesi değerlendirilerek, bu bileşiğin böcek fizyolojisi ve konak savunma mekanizmaları üzerindeki rolü ortaya konulmaya çalışılmıştır. Elde edilen bulguların, bor bileşiklerinin biyolojik mücadele ve alternatif zararlı kontrol yöntemlerindeki potansiyel kullanımına katkı sağlaması hedeflenmiştir.

2. MATERYAL-METOT

2.1 Böceklerin Üretilmesi- *E. kuehniella* (Lepidoptera: Pyralidae) Kültürü

Araştırmada kullanılan *Ephestia kuehniella* (Zeller) türüne ait bireylerin elde edilmesi amacıyla, laboratuvarımızda bulunan larva, pupa ve ergin dönemleri içeren çekirdek kültürlerden stok ve süksesif kültürler üretildi (Şekil 2.1). Kültürlerin devamlılığını sağlamak için hafta sonları dışında her gün belirli sayıda dişi ve ergin birey seçilerek farklı hacimlerde ve besin içeren cam kavanozlara aktarıldı. Kültür ortamında gelişimini tamamlayan ergin bireyler, hafta sonları dışında günlük olarak toplanmış ve besin karışımı içeren cam kaplara aktarıldı. Kapların üst kısmı, uygun hava dolaşımının sağlanabilmesi amacıyla gözenekli kumaş materyal ile örtüldü. Kültürlerin yetiştirilmesinde %40 buğday unu, %20 mısır unu, %20 arpa unu ve %20 ince kepekten oluşan besin oratmından yararlanıldı. Ana, stok ve süksesif kültürler, $26\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık, 65 ± 5 bağıl nem ve 12:12 saat (aydınlık: karanlık) fotoperiyot şartlarında sabit tutulan laboratuvar ortamında gerçekleştirildi (Boz, 2013; Shakarami et al., 2015). Laboratuvar sıcaklık düzenlemesi 9000 BTU kapasiteli soğutma ve ısıtma üniteleri ile kontrol altına alınırken, nispi nem düzeyi ise dijital termo-higrometre ile takip edilerek korundu. Laboratuvar sıcaklığı ve nem değerleri, TFA 30.5013 model dijital iç ve dış ortam termo-higrometre ve en yüksek-en düşük değerleri termometre kullanılarak belirli aralıklarla izlendi (Usta, 2021).



Şekil 2.1: *E. kuehniella* kültürünün laboratuvar ortamında üretimi için hazırlanan yetiştirme kavanozları

2.2 Boraks Dozlarının Belirlenmesi ve Uygulanması

Çalışmada kullanılan boraks, Eti Maden İşletmeleri Bandırma Bor ve Asit Fabrikası İşletme Müdürlüğü'nden temin edildi. Deneylerde kullanılacak toz halindeki boraks çözeltisinin hazırlanması amacı ile 5 g boraks hassas terazide tartıldı ve 10 mL saf su içerisinde tamamen çözdürüldü. Bu işlem sonucunda 500 mg/mL konsantrasyonunda ana stok çözelti elde edildi. *E. kuehniella* larvaları üzerinde toksik etkilerin belirlenmesi amacıyla, boraks ile yapılan denemeler için uygulama dozları 5, 10, 25, 50, 100 ve 200 mg/ml olarak belirlendi. Kontrol grupları, herhangi bir işlem uygulanmamış bireyler ve sadece saf su uygulanmış gruplardan oluşturuldu. Belirlenen dozlar, topikal aplikasyon yöntemi ile ileri dönem larvaların dorsal bölgesine, protorakstan başlayıp dorsal doğrultuda uzanan bir hat şeklinde, mikropipet yardımıyla 2 µL hacimde uygulandı. Deneyler üç tekrarlı olarak yapıldı ve her bir uygulama grubu için toplam 30'ar larva kullanıldı. Ayrıca, probit analizi ile boraksın larvalar üzerindeki öldürücü dozları belirlenerek LD50 ve LD99 hesaplamaları yapıldı.

2.3 Böceklerin Gelişim Biyolojisine Etkilerin Belirlenmesi

Boraksın farklı konsantrasyonlarının *E. kuehniella*'nın gelişim biyolojisi üzerindeki etkilerini belirlemek için larvalara farklı dozlarda boraks uygulanmış ve gelişim parametreleri izlenmiştir. Farklı konsantrasyonlarda doz uygulanan larvalar 60 × 15 mm ölçülerindeki plastik petrilere alınarak 26±2°C sıcaklık, %65±5 bağıl nem ve 12:12 saat (aydınlık: karanlık) fotoperiyot koşullarına ayarlanmış etüv içerisinde tutuldu. Bireylerin 40 gün boyunca gözlem çizelgesi tutularak gelişim sürecine ait veriler kaydedildi.

2.3.1 Koza Örme Süresi

Farklı konsantrasyonlarda boraks uygulanmış deney gruplarındaki larvalar ve kontrol gruplarındaki larvalar günlük olarak gözlemlendi. Koza örme süresi, larvanın petriye alındığı andan itibaren kozayı tamamen oluşturduğu döneme kadar geçen süre (gün) olarak kaydedildi.

2.3.2 Puplaşma Süresi

Farklı konsantrasyonlarda doz uygulanmış deney gruplarındaki ve kontrol gruplarındaki larvalar günlük olarak tek tek gözlemlendi. Puplaşma süresi, kozasını tamamlayan larvanın pupa evresine geçmesine kadar geçen süre (gün) olarak kaydedildi.

2.3.3 Pupal Periyot

Farklı konsantrasyonlarda doz uygulanmış deney gruplarındaki larvalar ve kontrol gruplarındaki larvalar her gün tek tek gözlemlendi. Pupal periyot, larvanın pupa evresine geçmesinden ergin bireyin pupadan çıkışına kadar geçen süre (gün) olarak kaydedildi.

2.3.4 Ergin Öncesi Gelişim Süresi

Farklı konsantrasyonlarda doz uygulanmış deney gruplarındaki larvalar ve kontrol gruplarındaki larvalar her gün tek tek gözlemlendi. Ergin öncesi gelişim süresi, larva döneminden başlayarak ergin bireyin oluşumuna kadar geçen toplam süre (gün) olarak kaydedildi.

2.3.5 Ergin Hayat Uzunluğu

Farklı konsantrasyonlarda doz uygulanmış deney gruplarındaki larvalar ve kontrol gruplarındaki larvalar her gün tek tek gözlemlendi. Ergin hayat uzunluğu, bireyin ergin olduğu dönemden ölümüne kadar geçen süre (gün) olarak kaydedildi (Şekil 2.2).



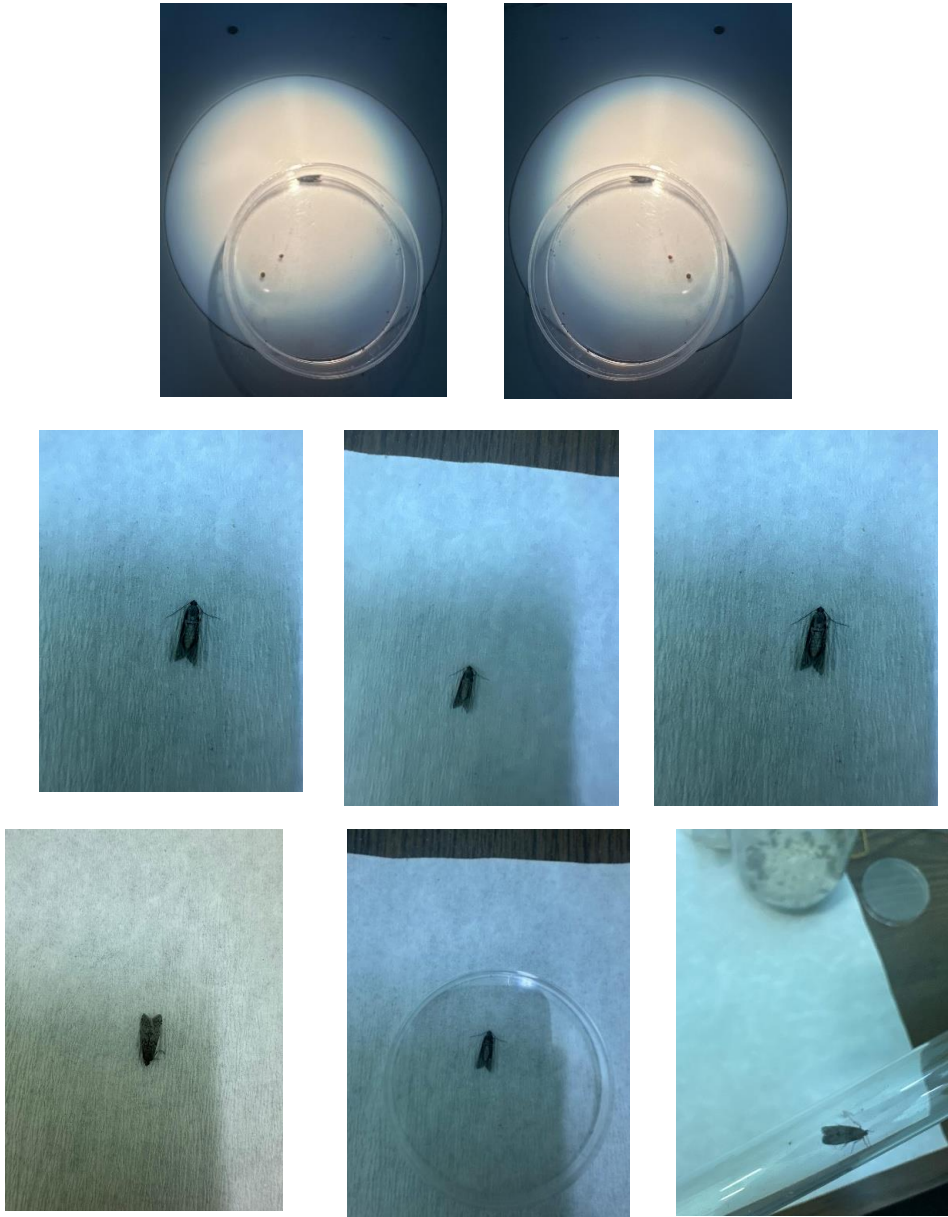
Şekil 2.2: Farklı boraks dozlarının uygulandığı *E. kuehniella* larvalarında koza örme, puplaşma ve ergin gelişim süreçlerinin gözlemlenmesine ait görüntüler

2.3.6 Ağırlık

Farklı konsantrasyonlarda doz uygulanmış deney gruplarındaki larvalar ve kontrol gruplarındaki larvaların ergin halleri, ergin çıkışı takiben canlı olarak hassas terazi kullanılarak tartıldı ve sonuçlar mg cinsinden belirlendi.

2.3.7 Toplam Yumurta Sayısı

Farklı konsantrasyonlarda doz uygulanmış deney gruplarındaki larvalar ve kontrol gruplarındaki larvaların ergin dişi halleri belirlendi. Yumurta sayımı dişi güvenin ölümüne kadar geçen sürede (gün) tek tek sayılarak toplam yumurta miktarı belirlendi (Şekil 2.3).

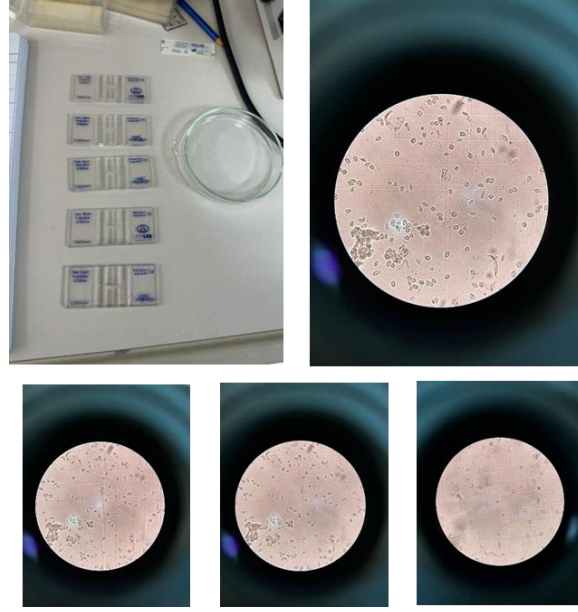


Şekil 2.3: *E. kuehniella*'da ergin ağırlık ölçümü ve yumurta veriminin belirlenmesine ait görüntüler

2.4 Toplam Hemosit Sayısının Belirlenmesi

Toplam hemosit sayısının belirlenmesi amacıyla, 2.2 bölümünde belirtilen yöntemle hazırlanan ve uygulanan 25, 50, 100 ve 200 mg/mL boraks dozları kullanıldı. Hazırlanan dozlar zaman kaybetmeden, topikal aplikasyon yöntemi ile larvaların toraksının dorsal bölgesine mikropipet ile uygulandı. Uygulama yapılan bireyler 60 × 15 mm boyutlarındaki plastik petri kaplarına alınarak, 26±2°C sıcaklık, %65±5 bağıl nem ve 12:12 saat (aydınlık: karanlık) fotoperiyot şartlarına sahip etüv ortamında tutuldu. Doz uygulamasını takiben 24 ve 48 saat sonra, boraksın erken ve gecikmiş etkilerini değerlendirmek amacıyla larvalardan hemolenf örnekleri alınarak toplam hemosit sayımları gerçekleştirildi (Er, 2011). Kontrol grupları, hiçbir bir işlem uygulanmamış bireyler ve sadece su uygulanmış gruplardan oluşturuldu. Deney grupları oluşturulurken her bir doz ve kontrol grubu için toplam 5'er larva kullanıldı. Toplam hemosit sayısının belirlenmesi için larvalar birinci arka bacak üzerinden ince uçlu iğne (lanset) ile delindi ve 4 µL hemolenf mikropipet tüp (Sigma) yardımıyla alındı. Elde edilen hemolenf örnekleri, buz üzerinde bekletilen ve içerisinde 36 µL antikoagülan (0,098 M NaOH, 0,186 M NaCl, 0,017 M Na₂EDTA ve 0,041 M sitrik asit; pH = 4,5) bulunan ependorf tüplerine aktarıldı. 1:10 oranında seyreltilmiş hücre süspansiyonu mikropipet yardımıyla homojenize edilmiş ve elde edilen karışımdan 10 µL mikropipet yardımı ile çekilerek 0,100 mm derinliğe sahip Neubauer hemositometresine (Improved Neubauer Hemocytometer; Superior, Germany) yüklendi (Şekil 2.4). Hemositler, Olympus BX51 marka ışık mikroskop altında sayılarak 1 mL hemolenf içerisindeki toplam hemosit sayısı tespit edildi. Mililitredeki toplam hemosit sayısının aşağıda verilen formül ile hesaplandı (Er, 2011).

$$\text{Hücre sayısı / mL} = \text{Büyük karede sayılan hücre sayısı} \times \text{Sulandırma katsayısı} \times 10^4$$



Şekil 2.4: *E. kuehniella* larvalarından elde edilen hemolenf örneklerinin hazırlanması ve hemositlerin hemositometre üzerinde sayımına ait görüntüler

2.5 Hemolenfin Antibakteriyel Aktivitesinin Belirlenmesi

2.5.1 Mikroorganizmalar

Antibakteriyel aktivitenin belirlenmesinde Gram-pozitif bakteriler olarak *Staphylococcus aureus* (SA, ATCC 6538P) ve *Bacillus cereus* (BC, CCM 99) ile Gram-negatif bakteriler olarak *Klebsiella pneumoniae* (KP, CCM 26 2318) ve *Escherichia coli* (EC, ATCC 11230) kullanıldı. Çalışmada kullanılan tüm bakteri kültürleri, Balıkesir Üniversitesi Fen–Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümü Mikrobiyoloji Araştırma Laboratuvarı’ndan alınmıştır.

2.5.2 Hemolenfin Toplanması

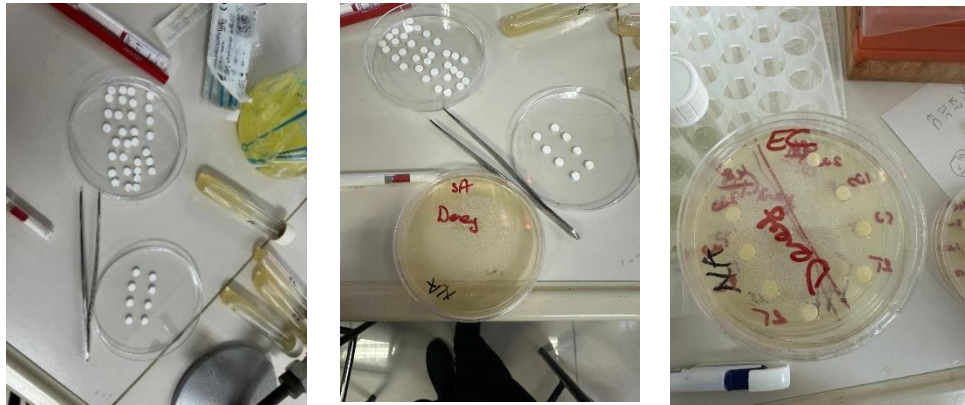
E. kuehniella larvalarına çeşitli derişimlerdeki boraks dozlarının uygulanması amacı ile dozlar (200, 100, 50 ve 25 mg/mL) hemen uygulama öncesinde hazırlandı. Hazırlanan dozlar geciktirilmeden, larvalara topikal aplikasyon yöntemi ile mipropipet kullanılarak toraksın dorsal bölgesine uygulandı. Uygulama sonrasında bireyler 60 × 15 mm boyutlarındaki plastik petri kaplarına alınarak 26±2°C sıcaklık, %65±5 bağıl nem ve 12:12 saat (aydınlık: karanlık) fotoperiyot koşullarına sahip etüvlerde bekletildi (Güner vd., 2023).

Doz uygulamasından 24 ve 48 saat sonra larvalar birinci arka bacak üzerinden ince uçlu iğne (lanset) ile delinmiş ve hemolenf örnekleri 5 µL hacimli mikrokapiler tüp (Hirschmann) yardımıyla elde edildi. Temin edilen hemolenf örneklerinin içinde bulunduğu eppendorf tüpleri işlem süresi boyunca soğuk zincir koşullarında tutuldu. Melanizasyon oluşumunu

önlemek için ependorf tüplerine 0,001 g 1-phenyl-2-thiourea (Merck, CAS 103-85-5) eklendi (Zupko et al., 1993; Du et al., 2020). Kontrol grupları herhangi bir işlem uygulanmamış bireyler, 24 ve 48 saatlik süre gruplarından elde edilen hemolenf örnekleri ve standart antibiyotik olarak kullanılan sulfametoksazol–trimetoprim (Oxoid, CT0052B, SXT 25 µg) disklerinden hazırlandı. Uygulama ve kontrol gruplarında hemolenf toplama işlemi, belirli sürelerde gerçekleştirilen ve her biri 10 larvayı içeren üç tekrar halinde gerçekleştirildi.

2.5.3 Disk Difüzyon Testleri

Kalitatif antibakteriyel aktivite testleri, Nutrient agar (NA, Merck) kullanılarak disk difüzyon (Kirby–Bauer) yöntemiyle gerçekleştirildi. Araştırmada yer alan bakterilerin 24 saat inkübe edilmiş kültürlerinden, 0,5 McFarland standardına eşdeğer bulanıkta bakteri süspansiyonları oluşturuldu (El-Saadony et al., 2021). Uygulama ve kontrol gruplarından elde edilen hemolenf numuneleri, 6 mm çapındaki steril boş filtre kağıdı disklerle (Oxoid, CT0998B, blank discs) 10 µL hacminde emdirilerek uygulandı. Bakteri süspansiyonları petri üzerine homojen olacak şekilde dağıtılmasının ardından, hemolenf emdirilmiş yaklaşık 2 cm aralıklarla steril pens kullanılarak besiyeri üzerine konuldu (Şekil 2.5). Petri kapları $37\pm0,1^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat süreyle inkübe edildikten sonra, besiyeri yüzeyinde gelişen inhibisyon zonları mm cinsinden ölçülerek elde edilen sonuçlar standart antibiyotik disklerle karşılaştırılarak değerlendirildi (Marshall and Arenas, 2003).



Şekil 2.5: Disk difüzyon testine ait petri görüntüleri

3. BULGULAR

3.1 Toksisite Testleri

Boraksa ait dozların uygulamalarına bağı olarak 45 günlük süre sonunda *E. kuehniella* larvalarında öldürücü doz değerleri Tablo 3.1’te verildi.

LD₅₀ ve LD₉₉ değerlerini hesaplanması ve uygun doz aralıklarının saptanması amacı ile probit analizi kullanıldı. Probit analizi sonucunda boraks için larval LD₅₀ değeri 45.130 mg/mL olarak belirlendi. LD₆₀, LD₇₀, LD₈₀, LD₉₀ ve LD₉₉ değerlerinin sırasıyla 76.236, 133.589, 257.555, 640.110 ve 5562.357 mg/mL olduğu saptandı (Tablo 3.1).

Tablo 3.1: *E. kuehniella*’da Boraks uygulamasına bağı LD değerleri

	N	X ² (sd)	Eğim ± SH	Öldürücü doz (min.–mak.) (mg/mL/larva)
Boraks	110	2.930(8)	1.113±0.201	LD ₅₀ = 45.130 (24.259-95.697)
				LD ₆₀ = 76.236 (40.582-189.606)
				LD ₇₀ = 133.589 (67.133-413.096)
				LD ₈₀ = 257.555 (116.508-1067.252)
				LD ₉₀ = 640.110 (241.330-4127.772)
				LD ₉₉ = 5562.357 (1269.792-109853.957)

(N: toplam birey sayısı; sd: serbestlik derecesi, y=a+bx)

3.2 *E. kuehniella* ‘da Gelişim Biyolojisi Çalışmaları

Farklı konsantrasyonlardaki boraks dozlarının *E. kuehniella* larvalarının koza örme süresi ve puplaşma süresi üzerindeki etkileri Tablo 3.2’te verildi.

E. kuehniella larvalarına boraks dozlarının uygulanması sonucu koza örme süresi incelendiğinde, kontrol gruplarına göre farklı doz uygulanan gruplarda koza örme süresinde artış gözlenmiş olup bu artış istatistiksel olarak anlamlı bulundu (F=8.972; sd=7, 232; p=0.000). 25 mg/mL dozunda koza örme süresi kontrol grubuna göre artış göstermekle birlikte, istatistiksel olarak hem kontrol hem de daha yüksek doz grupları ile benzerlik göstermiştir. Bu durum 25 mg/mL dozunun ara geçiş düzeyinde bir etki oluşturduğunu düşündürmektedir.

Puplaşma süresi açısından ise uygulama grupları ile kontrol grubu arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadı ($F=0.960$; $sd=7, 232$; $p=0.461$).

Tablo 3.2: *E. kuehniella*'da Boraks uygulamasının koza örme ve puplaşma süresine etkisi

Doz	<i>E. kuehniella</i>			
	Koza örme süresi (gün)		Puplaşma süresi(gün)	
	Min.-Mak.	$\bar{x} \pm SH^*$	Min.-Mak.	$\bar{x} \pm SH^*$
Kontrol	2-5	$3.20 \pm 0.211a$	6-7	$6.87 \pm 0.063a$
Su Kontrol	2-5	$3.27 \pm 0.151a$	6-7	$6.73 \pm 0.082a$
5mg/ml	3-6	$4.00 \pm 0.263ab$	6-8	$6.60 \pm 0.163a$
10 mg/ml	3-6	$4.40 \pm 0.201bc$	5-7	$6.20 \pm 0.101a$
25 mg/ml	3-8	$4.07 \pm 0.342abc$	6-8	$6.67 \pm 0.161a$
50 mg/ml	3-8	$4.60 \pm 0.278bc$	5-10	$6.73 \pm 0.374a$
100 mg/ml	3-7	$5.03 \pm 0.212bc$	5-9	$6.60 \pm 0.233a$
200 mg/ml	3-7	$5.10 \pm 0.216c$	5-9	$6.57 \pm 0.228a$

*Aynı sütunda (a-c) aynı harfi taşıyan değerler arasındaki fark istatistiksel olarak önemsizdir ($P>0.05$).SH; Standart Hata.

Farklı konsantrasyonlardaki boraks uygulamalarının pupal periyot ve ergin öncesi gelişim süresi üzerindeki etki sonuçları Tablo 3.3'te verilmiştir. *E. kuehniella*'ya farklı konsantrasyonlarda boraks dozları uygulanmasını takiben pupal periyot incelendiğinde, kontrol grubuna göre en düşük doz hariç diğer dozlarda görülen artmalar istatistiksel olarak anlamlı bulundu ($F=96.308$; $sd=7, 232$; $p=0.000$). Ergin öncesi gelişim süresi açısından değerlendirildiğinde ise kontrol gruplarına göre 25, 50,100 ve 200 mg/mL doz uygulamalarında görülen artmalar istatistiksel olarak anlamlı bulundu ($F=33.821$; $sd=7, 232$; $p=0.000$).

Tablo 3.3: *E. kuehniella*'da Boraks uygulamasının pupal periyot ve ergin öncesi gelişim süresine etkisi

Doz	<i>E. kuehniella</i>			
	Pupal periyot (gün)		Ergin öncesi gelişim süresi (gün)	
	Min.-Mak.	$\bar{x} \pm SH^*$	Min.-Mak.	$\bar{x} \pm SH^*$
Kontrol	8-9	8.60 $\pm$ 0.091a	14-16	15.47 $\pm$ 0.104a
Su Kontrol	8-9	8.67 $\pm$ 0.088ab	14-16	15.47 $\pm$ 0.124a
5mg/ml	8-9	8.87 $\pm$ 0.063ab	14-17	15.47 $\pm$ 0.190a
10 mg/ml	9-10	9.40 $\pm$ 0.091bc	14-17	15.60 $\pm$ 0.163ab
25 mg/ml	9-11	10.13 $\pm$ 0.164c	15-19	16.73 $\pm$ 0.239b
50 mg/ml	9-12	11.27 $\pm$ 0.172d	16-22	18.00 $\pm$ 0.359c
100 mg/ml	10-15	12.80 $\pm$ 0.289e	14-23	19.20 $\pm$ 0.430c
200 mg/ml	10-15	12.73 $\pm$ 0.295e	14-23	19.10 $\pm$ 0.435c

*Aynı sütunda (a-e) aynı harfi taşıyan değerler arasındaki fark istatistiksel olarak önemsizdir (P>0.05).SH; Standart Hata.

Farklı konsantrasyonlardaki boraks dozlarının *E. kuehniella* larvalarının ergin hayat uzunluğu, ağırlık ve toplam yumurta sayısı üzerindeki etkileri Tablo 3.4'te verildi.

Ergin hayat uzunluğu incelendiğinde, kontrol gruplarına göre 50, 100 ve 200 mg/mL doz uygulamalarında görülen azalmalar istatistiksel olarak anlamlı bulundu (F=18.963; sd=7, 232; p=0.000).

Ergin ağırlıkları incelendiğinde, tüm boraks dozlarında kontrol gruplarına göre azalma gösterdi (F=11.402; sd=7, 232; p=0.000). Ergin ağırlıklarında gözlenen azalmanın, gelişim sürecinde metabolik faaliyetlerin ve besin kullanım etkinliğinin olumsuz etkilenmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Toplam yumurta sayısı açısından veriler incelendiğinde tüm doz uygulama gruplarında kontrol gruplarına göre belirgin azalma gözlemlendi (F=18.180; sd=7, 232; p=0.000).

Tablo 3.4: *E. kuehniella*'da Boraks uygulamasının ergin hayat uzunluğu, ağırlık ve toplam yumurta sayısına etkisi

<i>E. kuehniella</i>						
Doz	Hayat (gün)	uzunluğu	Ağırlık (mg)		Toplam yumurta sayısı	
	Min.- Mak.	$\bar{x} \pm SH^*$	Min.- Mak.	$\bar{x} \pm SH^*$	Min.- Mak.	$\bar{x} \pm SH^*$
Kontrol	5-11	8.03±0.265a	9.25-20.36	16.00±0.751a	0-228	70.97±12.182a
Su	4-11	7.53±0.317a	12.11-20.29	16.07±0.631a	0-155	85.40±8.844a
Kontrol	4-9	7.80±0.256a	12.04-18.06	13.49±0.274b	0-135	25.93±7.075b
5mg/ml	7-9	7.80±0.182a	10.52-17.72	13.31±0.403b	0-77	18.07±3.575b
10 mg/ml	7-10	7.87±0.202a	9.28-19.93	13.11±0.583b	0-75	16.27±4.333b
25 mg/ml	4-9	6.20±0.256b	8.89-19.98	12.02±0.577b	0-52	10.07±2.860b
50 mg/ml	2-9	5.27±0.457bc	6.69-16.60	11.54±0.534b	0-71	13.93±4.191b
100 mg/ml	2-9	4.73±0.380c	6.69-15.60	11.27±0.476b	0-171	15.47±6.225b
200 mg/ml						

*Aynı sütunda (a-b) aynı harfi taşıyan değerler arasındaki fark istatistiksel olarak önemsizdir (P>0.05).SH; Standart Hata.

3.3 Toplam Hemosit Sayısına Etkisi

24 ve 48 saatlik farklı uygulama zamanlarında *E. kuehniella* larvalarına uygulanan farklı konsantrasyonlardaki boraks dozlarının toplam hemosit sayısı üzerindeki etkileri Tablo 3.5'te verildi. Hiçbir işlem uygulanmamış kontrol grubunda 24 ve 48 saatlik zaman dilimlerinde toplam hemosit sayıları sırasıyla 37.41 ve 34.76 x 10⁶ hücre/mL olarak belirlendi. Su kontrol grubunda ise bu değerlerin sırası ile 35.29 ve 35.27 x 10⁶ hücre/mL olduğu tespit edildi. Deneylerde elde edilen sonuçlar, 24 (F=781.998; sd=5, 24; p= 0.000) ve 48 (F=1178.273; sd=5, 24; p= 0.000) saatlik sürenin bitiminde *E. kuehniella* larvalarının hemosit sayısı uygulama ve kontrol grupları arasındaki istatistiksel olarak ciddi oranda değişiklik görüldü (Tablo 3.5). Farklı konsantrasyonlarda boraks dozlarına maruz bırakılan, 24 saat sonunda 25 mg/mL dozunda en yüksek hemosit sayısı (83.50 x 10⁶ hücre/mL) elde edilirken, en düşük değer 200 mg/mL dozunda (23.55 x 10⁶ hücre/mL) belirlendi. Bu durum, yüksek doz boraks uygulamasının toplam hemosit sayısını baskıladığını göstermektedir. 24 saat, 25, 50, 100 mg/ml konsantrasyonlarda boraks dozları uygulanan *E. kuehniella* larvalarının dolaşımdaki

hemosit sayıları hiçbir işlem uygulanmamış *E. kuehniella* larvalarına göre önemli ölçüde artarken, en yüksek konsantrasyonda boraks dozu uygulanan (200 mg/ml) *E. kuehniella* larvalarının dolaşımdaki toplam hemosit sayıları kontrol gruplarının toplam hemosit sayılarına göre önemli bir azalma gösterdi (Tablo 3.5).

48 saat sonunda ise, 25 mg/mL dozunda en yüksek değer (75.28×10^6 hücre/mL) elde edilirken, en düşük değer 200 mg/mL dozunda (10.82×10^6 hücre/mL) olarak belirlendi. 48 saat, boraks dozlarına 25 ve 50 mg/ml olarak uygulanan larvaların toplam hemosit sayıları kontrol gruplarının toplam hemosit sayılarına göre artış gösterirken, en yüksek konsantrasyonlardaki dozlar olan 100 ve 200 mg/ml'de ise toplam hemosit sayıları kontrol gruplarının toplam hemosit sayılarına göre azalma gösterdi.

Tablo 3.5: Boraks dozlarının toplam hemosit sayısına ($\times 10^6$ hücre/mL) etkisi

Deney Grupları	Toplam Hemosit Sayıları	
	(x10 ⁶ hücre/mL) (Ortalama±SH)*	
	GÖZLEM ZAMANI**	
	24 saat	48 saat
KONTROL	37.41±0.395a	34.76±0.246a
SU-KONTROL	35.29±0.441a	35.27±0.494a
25 mg/mL	83.50±1.346b	75.286±0.916b
50 mg/mL	57.90±0.574c	42.04±0.874c
100 mg/mL	42.34±0.878d	23.51±0.641d
200 mg/mL	23.55±0.967e	10.82±0.297e

*Her biri 5 larvanın toplam hemosit sayısı ortalamalarını göstermektedir.

**Aynı sütunda (a-e) aynı harfi taşıyan değerler arasındaki fark istatistiksel olarak önemsizdir (P>0.05; Tukey HSD testi).

3.4 Hemolenfin Antibakteriyel Aktivitesi

Hemolenfin antibakteriyel etkisinin incelenebilmesi için kontrol grupları ile uygulama gruplarındaki larvalardan mikropapiller tüp kullanılarak hemolenf örnekleri toplandı. Uygulama yapılmamış larvalardan toplanan saf hemolenf örneklerine ait antibakteriyel aktivite verileri Tablo 3.6, Tablo 3.7 ve Şekil 3.1'de verildi. Elde edilen veriler standart antibiyotik diskleri (Sulfamethoxazole 25µg) ile karşılaştırılarak sunuldu. Uygulama yapılmamış larvalardan toplanan hemolenf örneklerinin hem Gram (+) hem de Gram (-)

bakterilere antibakteriyel aktivite gösterdiği, 12 mm zon çapı ile en yüksek inhibisyon etkisinin *E. coli* üzerinde olduğu görüldü. Standart antibiyotiklerden SXT, 45 mm inhibisyon zonu çapı ile *S. aureus*' a karşı etki gösterdi. En yüksek inhibisyon zonu 48 saatlik uygulamada *E. coli* için 12 mm olarak ölçüldü.

Standart antibiyotik olarak kullanılan sulfametoksazol (25 µg) disklerinin ise en yüksek etkiyi 45 mm çapında inhibisyon zonu ile *S. aureus* üzerinde gösterdiği tespit edildi.

Boraksın farklı dozlarda *E. kuehniella* larvalarına 24 ve 48 süreyle gerçekleştirilmesi sonucunda saptanan hemolenf örneklerinin dört farklı bakteri türüne karşı gösterdiği antibakteriyel aktiviteye ilişkin veriler Tablo 3.6' de mm değerinden sunuldu. Sonuçlar incelendiğinde maksimum antibakteriyel aktivite 15 mm çapında inhibisyon zonu ile *K. pnemoniae*'ye karşı 200 mg/mL/48 saat ve 100 mg/mL/48 saat doz uygulanması sonucunda elde edilen hemolenf örneğinde gözlemlendi. 15 mm çapında inhibisyon zonunu, 13 mm çapında inhibisyon zonuyla *E. coli*'e karşı 50 mg/ml/24 saat, 25 mg/ml/24 saat, 50 mg/ml/48 saat ve 25 mg/ml/48 saat doz uygulaması sonucunda elde edilen hemolenf örneği takip etti (Tablo 3.6).

Tablo 3.6: Kontrol gruplarının anti-bakteriyel aktivitesinin belirlenmesi

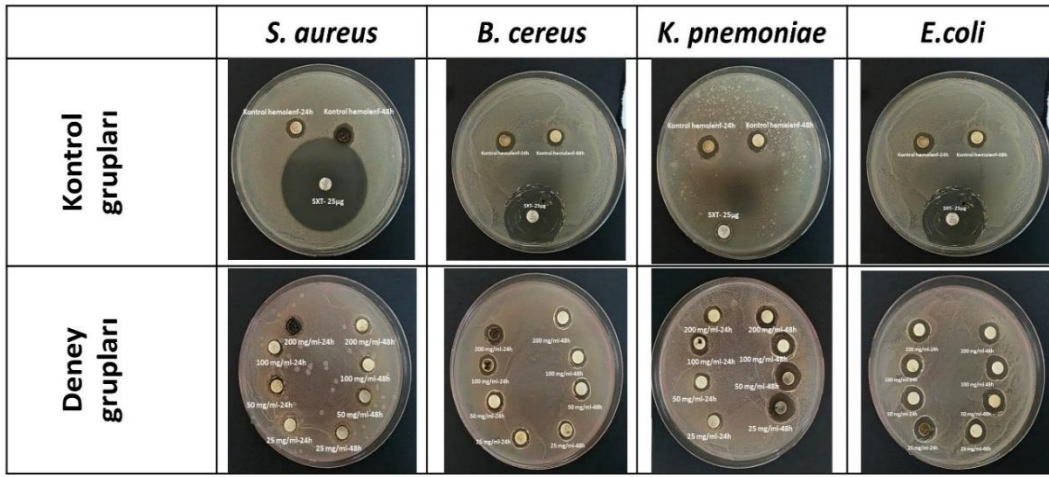
MİKROORGANİZMALAR	HEMOLENF (KONTROL)		Sulfamethoxazole 25µg
	24h	48h	
<i>E. coli</i>	10	12	32
<i>S. aureus</i>	11	10	45
<i>B. cereus</i>	9	9	-
<i>K. pnemoniae</i>	11	11	12

(-) zon olmadığını ifade etmektedir. Zon çapları mm cinsinden verildi.

Tablo 3.7: Deney gruplarının anti-bakteriyel aktivitesinin belirlenmesi

MİKROORGANİZMA LAR	DENEY GRUPLARI							
	24h				48h			
	200 mg/ ml	100 mg/ ml	50 mg/ ml	25 mg/ ml	200 mg/ ml	100 mg/ ml	50 mg/ ml	25 mg/ ml
<i>E. coli</i>	12	12	13	13	12	12	13	13
<i>S. aureus</i>	9	9	9	9	9	9	8	8
<i>B. cereus</i>	10	10	11	11	12	11	10	10
<i>K. pneumoniae</i>	9	9	11	11	15	15	13	12

(-) zon olmadığını ifade etmektedir. Zon çapları mm cinsinden verildi.

**Şekil 3.1:** Kontrol grupları ve indüklenen hemolenfin disk difüzyon testi sonuçları

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, boraksın *E. kuehniella* larvaları üzerindeki biyolojik etkileri kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, boraks uygulamalarının larvaların gelişim süreçleri üzerinde belirgin değişikliklere yol açtığı, aynı zamanda doza bağlı olarak toksik etkiler gösterdiği belirlenmiştir. Toksik etkiler değerlendirildiğinde, uygulanan boraks dozları arttıkça *E. kuehniella* larvalarındaki mortalite oranlarında da belirgin bir artış yaşanmıştır. Boraks uygulamasında doz arttıkça larvalarda ölüm oranı artmış ve probit analizi sonucunda LD₅₀ değeri 45.130 mg/mL olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, boraksın *E. kuehniella* larvaları üzerinde doza bağlı belirgin bir toksik etki oluşturduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, boraksın yüksek konsantrasyonlarda toksisiteye neden olduğunu bildiren mevcut literatür ile uyumlu olup, bor bileşiklerinin biyolojik sistemlerde dar bir tolerans aralığına sahip olduğunu desteklemektedir (Brdar-Jokanovic, 2020). Bor bileşiklerinin böcekler üzerindeki toksik etkilerinin genellikle sindirim sistemi fonksiyonlarının bozulması, iyon dengesinin değişmesi ve hücresel metabolizmanın aksaması yoluyla gerçekleştiği bilinmektedir (Woods, 1994). Bu çalışmada etki mekanizması doğrudan analiz edilmemiş olmakla birlikte, doz artışına bağlı olarak gözlenen yanıtlar gelişim süresinin uzaması ve yüksek dozlarda hemosit sayısının azalması, boraksın *E. kuehniella* larvaları üzerinde fizyolojik süreçleri bozarak mortaliteye neden olabileceğini düşündürmektedir. Benzer şekilde, farklı model organizmalar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda da bor bileşiklerinin konsantrasyona bağlı mortalite oluşturduğu ve immünotoksik etkiler gösterebildiği rapor edilmiştir (Gwokyalaya et al., 2019). Bu durum, elde edilen mortalite bulgularının yalnızca bu modele özgü olmadığını, bor bileşiklerinin genel biyolojik etkileriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Öte yandan, boraksın etkilerinin yalnızca mortalite üzerinden değerlendirilmesi yeterli olmayıp, letal ve subletal etkilerin birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle, elde edilen sonuçların fizyolojik ve gelişimsel parametrelerle birlikte bütüncül bir yaklaşımla yorumlanması önem taşımaktadır (Lisi et al., 2024).

Boraksın *E. kuehniella* larvaları üzerindeki gelişim biyolojisi etkilerine bakıldığında, koza örme süresi, pupal periyot ve ergin öncesi gelişim süresinde uzamalar gözlenmiştir. Gelişim süresindeki uzamalar, boraks uygulamasının büyüme ve gelişmeyle ilişkili fizyolojik süreçleri olumsuz etkileyerek metabolik faaliyetlerde ve enerji kullanımında aksaklıklar yaşanmasına neden olabileceğini düşündürmektedir. Boraksın subletal etkileri sonucunda

böcek gelişim süresini uzattığı, larva sonra koza örme, pupal periyot gibi süreçleri geciktirdiği ve popülasyon artış hızını düşürdüğü literatürde yer almaktadır (Desneux et al., 2007; Wang et al., 2025). Elde edilen bu veriler, boraksın aynı zamanda gelişim düzenleyici etki sahip olduğunu da göstermektedir. Ancak; koza örme süresinde gözlenen artış, puplaşma evresinde gözlenmemiştir. Bu da boraksın gelişim sürecinin tüm aşamalarında aynı etkiyi göstermediğini ortaya koymaktadır. Böceklerin farklı gelişim aşamalarında farklı duyarlılıklar gösterebileceğini düşündürmektedir (Desneux et al., 2007). Boraksın organizmanın gelişim süreci etkisinin evreye göre değiştiği ve fizyolojik durumla yakından ilişkili olduğu söylenebilir.

E. kuehniella ergin bireyleri üzerinde yapılan değerlendirmede, yapılan farklı dozlarda boraks uygulamalarının ergin yaşam süresi, ergin ağırlığı ve toplam yumurta sayısı üzerinde azaltıcı etki gösterdiği belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler, boraksın belirgin subletal etkileri olduğunu göstermektedir. Bahsedilen bu subletal etkilerin zararlı organizmaların popülasyon dinamikleri üzerinde etkili olduğunu ve popülasyon büyümelerini uzun vadede sınırladığı bildirilmektedir (Sparks and Nauen, 2015). Üreme kapasitesinde görülen azalma, zararlı yönetimi açısından önemli bir parametredir. Uygulanan boraksın tüm dozlarında yumurta sayısının azalması, boraksın üreme sistemleri üzerinde baskılayıcı bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Yumurta sayısındaki azalma ergin ağırlığındaki düşüş ile birlikte bakıldığında, boraks uygulamalarının enerji kullanımını etkilediğinden var olan enerjinin üreme faaliyetleri yerine yaşamsal fonksiyonlara yönlendirdiği düşünülebilir. Enerji kullanımlarında olan bu gibi değişimler subletal etkilerin temel mekanizmalarından biri olarak kabul edilmektedir (Desneux et al., 2007). Ergin yaşam süresinde görülen kısalma, popülasyonun sürdürülebilirliği açısından olumsuz etki oluşturmakta ve boraks uygulamalarının popülasyon baskılayıcı etkisini güçlendirmektedir.

Toplam hemosit sayısı sonuçları, boraksın böcek bağışıklık sistemi üzerinde doza bağlı olarak organizmanın düşük ve orta dozlarda uygulanan boraksa karşı savunma mekanizmalarını aktive ettiğini aynı zamanda yüksek dozlarda uygulanan boraksında böcek bağışıklık sistemini baskıladığını ve savunma mekanizmasının zayıfladığını göstermektedir (Eleftherianos et al., 2021; Gwokyalaya et al., 2019). Böcek bağışıklığında hemositler fagositoz, kapsül oluşumu ve yara iyileşmesi gibi birçok süreçten sorumlu olduğundan, hemosit sayılarındaki değişim tek başına immün yeterliliğin bir göstergesi olmayıp, hemositlerin fonksiyonel özellikleri ve diğer humoral bağışıklık bileşenleri ile birlikte

değerlendirilmelidir (Lavine and Strand, 2002). Borik asidin böceklerde bağışıklık baskılayıcı etki gösterdiği ve hemosit sayısında azalmaya neden olduğu daha önce yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Gwokyalaya et al., 2019). Bu çalışmada boraksın yüksek dozları uygulandığında gözlenen hemosit sayısındaki düşüş, bor bileşiklerinin bağışıklık sistemi üzerindeki olumsuz etkileri ile uyumludur. Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, boraks uygulamalarının düşük dozlarda bağışıklık uyarıcı, yüksek dozlarda ise bağışıklık baskılayıcı etki oluşturabileceği söylenebilmektedir. Bu durum, boraksın *E. kuehniella* larvalarında bağışıklık sistemi üzerinde doza bağlı farklı etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Boraks uygulamalarının hemolenfin antibakteriyal aktivitesi incelendiğinde ise, kontrol ve boraks uygulanan gruplarda bakterilere karşı inhibisyon zonlarının oluştuğu belirlenmiştir. Kontrol grubunda antibakteriyal aktivitenin gözlenmesi, böcek hemolenfinin antimikrobiyal peptitler içerdiğini göstermektedir (Scieuzo et al., 2023).

Boraks uygulanması ile bakterilere karşı antibakteriyal aktivitenin artması durumu bağışıklık sisteminin uyarılması ile ilişkili olabilir (Eleftherianos et al., 2021). Tüm bunlarla birlikte antibakteriyel etkinin bakteriye göre farklılık göstermesi mikroorganizma türünün önemli olduğunu göstermektedir (Scieuzo et al., 2023). Yapmış olduğumuz çalışmada özellikle bazı Gram-negatif bakterilere karşı daha yüksek inhibisyon zonlarının gözlenmesi, antibakteriyel etkinliğin hedef mikroorganizmaya göre değişebileceğini göstermektedir. Bu bulgu, mikroorganizma türünün antibakteriyel yanıt üzerinde etkili olabileceğini bildiren Scieuzo ve ark. (2023) ile uyumludur. Bu durumun doğrudan boraksın doğrudan etkisi mi yoksa uygulanan boraksın oluşturduğu fizyolojik stres sonucu oluşan immün yanıtın mı kaynaklandığı belirlenememiştir. Bu durum çalışmanın sınırlılıklarından biri olarak değerlendirilebilir.

Çalışmada elde edilen veriler birlikte değerlendirildiğinde, boraksın *E. kuehniella* üzerinde çok yönlü etkiler oluşturduğu görülmektedir. Boraks mortaliteyi arttırmakla birlikte gelişim sürecini yavaşlatmakta, ergin performansını düşürmekte, üreme hızını ve kapasitesini düşürmekte; ayrıca düşük ve orta dozlarda toplam hemosit sayısını artırırken yüksek dozlarda azaltmakta ve hemolenfin antibakteriyel aktivitesinde değişikliklere neden olmaktadır. Çok yönlü etki durumu, modern zararlı yönetimi yaklaşımlarında beklenen özelliklerle uyumludur. Literatürde alternatif insektisitlerin sadece öldürücü etkiler değil,

popölasyon dinamiklerini baskılayıcı subletal etkiler de oluşturmasının önemi üzerinde durulmaktadır (Lisi et al., 2024).

Boraksın özellikle depolanmış ürün zararlıları üzerinde alternatif bir biyoinektisit adayı olarak değeriendirilmesi mümkündür. Farklı türlerde oluşturduğu etkinlik, çevresel etkiler ve saha koşullarındaki etkisinin değeriendirilmesi gerekmektedir.

Boraksın *E. kuehniella* larvaları üzerinde doza bağı olarak mortaliteyi artırdığı, gelişim süresini uzattığı, ergin ağırlığı ve yumurta verimini azalttığı, ayrıca toplam hemosit sayısı ile hemolenfin antibakteriyel aktivitesinde değerişikliklere neden olduğu belirlenmiştir. Boraksın doz artışına bağı olarak larval mortaliteyi ciddi oranda arttırdığını ve yüksek dozlarda toksik etkilere yol açacağını sonuçlar göstermiştir. Boraksın koza örme, pupal periyot ve ergin öncesi gelişim döneminde süre uzatıcı etkiler gösterdiği, puplaşma süresinde belirgin bir değerişim göstermemesi gelişim biyolojisi bulgularıdır. Ergin yaşam süresi, ağırlık ve yumurta sayısının azalması boraksın ergin bireyler üzerindeki etkileridir. Boraks hem letal hem de popölasyon gelişimi baskılayıcı subletal etkiler göstermiştir. Bağıışıklık sistemi üzerinde kullanılan boraks dozuna bağı etkiler oluşturduğu, düşük dozlarda uyarıcı, yüksek dozlarda ise baskılayıcı etki oluşturduğu görölmüştür. Boraks böceklerin doğıal savunma sistemini etkileyebileceğı ve bu etkinin mikroorganizma türüne göre farklılık gösterebileceğı ortaya konulmuştur. Tüm bu bulgular gösteriyor ki boraks *E. kuehniella* üzerinde değerişikliklere yol açan çok yönlü bir bileşiktir. Zararlı organizmaların kontrolünde alternatif bir biyoinektisit adayı olarak değeriendirilebileceğı, farklı türler, dozlar ve uygulama koşulları altında etkinliğinin daha ayrıntılı olarak araştırılması gerektiğı düşünölmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Altieri, M. A.** (2018). *Agroecology: The science of sustainable agriculture*. CRC Press.
- Barzman, M., et al.** (2015). Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1199–1215. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0327-9>
- Bass, C., Denholm, I., Williamson, M. S., & Nauen, R.** (2015). The global status of insect resistance. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 121, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.04.004>
- Bell, R. W., & Dell, B.** (2008). *Micronutrients for sustainable production*. IFA.
- Boz, A.** (2013). Üç farklı konak türünün parazitoit *Venturia canescens* grav. (Hymenoptera: Ichneumonidae) erginlerindeki toplam protein, lipit, karbohidrat miktarlarına ve parazitoitin bazı biyolojik özelliklerine etkileri. (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 334888).
- Brdar-Jokanovic, M.** (2020). Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4), 1424. <https://doi.org/10.3390/ijms21041424>
- Bross, P. F., et al.** (2004). Approval summary for bortezomib for injection in the treatment of multiple myeloma. *Clinical Cancer Research*, 10(12), 3954–3964. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-03-0781>
- Brown, P. H., et al.** (2002). Boron in plant biology. *Plant Biology*, 4(2), 205–223.
- Canyurt, M. A.** (1994). Tarımda pestisit kullanımının su ürünleri üzerine etkileri. In *Kıyı Sorunları ve Çevre Sempozyumu* (p. 345). Belediye Yayınları.
- Carvalho, F. P.** (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, 6(2), 48–60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- Coghi, P., et al.** (2021). Organoboron compounds: Effective antibacterial and antiparasitic agents. *Molecules*, 26(11), 3309. <https://doi.org/10.3390/molecules26113309>
- Cosmetic Ingredient Review (CIR).** (2025). *Safety assessment of boric acid and sodium borate as used in cosmetics*. <https://www.cir-safety.org>
- da Costa, R. R., et al.** (2023). Antimicrobial effects of boric acid. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 76, 127118. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2022.127118>
- Demirci, S., Doğan, A., Şahin, F., & Bağcı, E.** (2016). Antimicrobial activity of boron compounds. *Biological Trace Element Research*, 173(2), 457–463. <https://doi.org/10.1007/s12011-016-0654-6>

KAYNAKLAR DİZİNİ (DEVAM)

- Desneux, N., Decourtye, A., & Delpuech, J.-M.** (2007). The sublethal effects of pesticides on beneficial insects. *Annual Review of Entomology*, 52, 81–106. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.52.110405.091440>
- Diaz, D. B., & Yudin, A. K.** (2017). The versatility of boron in biological target engagement. *Nature Chemistry*, 9(8), 731–742. <https://doi.org/10.1038/nchem.2814>
- Du, M., Liu, X., Xu, J., Li, S., Wang, S., Zhu, Y. And Wang, J.** (2020). Antimicrobial Effect of Zophobas morio Hemolymph against Bovine Mastitis Pathogens. *Microorganisms*, 8(10),1488, doi.org/10.3390/microorganisms8101488.
- Eleftherianos, I., et al.** (2021). Haemocyte-mediated immunity in insects. *Immunology*, 164(3), 401–432. <https://doi.org/10.1111/imm.13390>
- El-Saadony, M.T., Sitohy, M.Z., Ramadan, M.F. and Saad, A.M.** (2021). Green nanotechnology for preserving and enriching yogurt with biologically available iron (II). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 69, 102645. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102645>[Get rights and content](#)
- Emsley, J.** (2001). *Nature's building blocks*. Oxford University Press.
- Er, A.** (2011). Bazı böcek türlerinde hemosit sayımı ve immün yanıtın belirlenmesi (Yüksek lisans tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- European Chemicals Agency (ECHA).** (2023). *Borates: Uses and safety*. <https://echa.europa.eu>
- FAO.** (2021). *Global food losses and food waste*. <https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/en/>
- FAO.** (2022). *The state of food and agriculture 2022*. <https://www.fao.org/publications/sofa/en/>
- Fenibo, E. O., et al.** (2025). Biopesticides for sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1657000>
- Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., et al.** (2010). Persistent negative effects of pesticides. *Basic and Applied Ecology*, 11(2), 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.12.001>
- Goldberg, S.** (1997). Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, 193(1–2), 35–48.
- Gupta, U. C. (Ed.).** (1993). *Boron and its role in crop production*. CRC Press.
- Güner, P.** (2024). *Penicillium mallochii'nin DNA barkodlaması ve sürdürülebilir biyolojik mücadelede parazitoit Venturia canescens ile etkileşimleri* (Doktora tezi). Balıkesir Üniversitesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ (DEVAM)

- Gwokyalaya, R., et al.** (2019). Boric acid-induced immunotoxicity and genotoxicity in *Galleria mellonella*. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 102(3), e21588. <https://doi.org/10.1002/arch.21588>
- Hagstrum, D. W., & Subramanyam, B.** (2022). Stored-product insects. In *Stored-product insect resource*. Elsevier.
- International Atomic Energy Agency (IAEA).** (2021). *Industrial applications of boron compounds*.
- IPCC.** (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Isman, M. B.** (2020). Botanical insecticides in the twenty-first century. *Annual Review of Entomology*, 65, 233–249. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025010>
- Karaman, E., & Yavuz, A.** (2024). Boric acid protects the uterus and fallopian tubes from cyclophosphamide-induced toxicity in a rat model. *Pharmaceuticals*, 17(12), 1716. <https://doi.org/10.3390/ph17121716>
- Klowden, M. J.** (2013). *Physiological systems in insects*. Academic Press.
- Lavine, M. D., & Strand, M. R.** (2002). Insect hemocytes and their role in immunity. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 32(10), 1295–1309. [https://doi.org/10.1016/S0965-1748\(02\)00092-9](https://doi.org/10.1016/S0965-1748(02)00092-9)
- Lisi, F., et al.** (2024). Pesticide immunotoxicity on insects—Are agroecosystems at risk? *Science of the Total Environment*, 951, 175467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175467>
- Marschner, P.** (2012). *Mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Marshall, S. and Arenas, G.** (2003). Antimicrobial peptides: A natural alternative to chemical antibiotics and a potential for applied biotechnology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6, 271-284, doi.org/10.4067/S0717-34582003000300011.
- Nicolopoulou-Stamati, P., Maipas, S., Kotampasi, C., Stamatis, P., & Hens, L.** (2016). Chemical pesticides and human health: The urgent need for a new concept in agriculture. *Frontiers in Public Health*, 4, 148. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00148>
- Nielsen, F. H.** (2014). Human health effects of boron. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 28(4), 383–387. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.06.023>
- Pimentel, D.** (2005). Environmental and economic costs of pesticide use. *Environment, Development and Sustainability*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (DEVAM)

- Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., Goulson, D., Hartley, S., Lampkin, N., Morris, C., Pierzynski, G., Prasad, P. V. V., Reganold, J., Rockström, J., Smith, P., Thorne, P., & Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1, 441–446. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0>
- Rock, F. L., et al. (2007). An antifungal agent inhibits an aminoacyl-tRNA synthetase by trapping tRNA in the editing site. *Science*, 316(5832), 1759–1761. <https://doi.org/10.1126/science.1142189>
- Rockström, J., et al. (2017). Sustainable intensification of agriculture. *Ambio*, 46(1), 4–17. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
- Scieuzo, C., et al. (2023). In vitro evaluation of antibacterial activity of peptide fractions. *Insects*, 14(5), 464. <https://doi.org/10.3390/insects14050464>
- Shakarami, J., Eftekharifar, R., Latifian, M., and Jafari, S. (2015). Insecticidal activity and synergistic effect of Beauveria bassiana (Bals.) Vuill. and three botanical compounds against third instar larvae of Ephestia kuehniella Zeller. *Research on Crops*, 16(2), 296–303, doi.org/10.5958/2348-7542.2015.00044.3.
- Shorrocks, V. M. (1997). Boron deficiency. *Plant and Soil*, 193, 121–148.
- Soriano-Ursúa, M. A., Trujillo-Ferrara, J. G., & Correa-Basurto, J. (2019). Boron-containing compounds: Biological activity and pharmacological applications. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 182, 111653. <https://doi.org/10.1517/13543776.2014.881472>
- Sparks, T. C., & Nauen, R. (2015). IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 121, 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.11.014>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand. *PNAS*, 108(50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Usta, G. (2021). *Xylocoris flavipes* Reuter (Heteroptera: Anthocoridae) 'in depolanmış ürün zararlılarından Ephestia kuehniella Zeller (Lepidoptera: Pyralidae) yumurtalarında biyolojisi ve av tercihleri üzerine araştırmalar (Yüksek lisans tezi). Iğdır Üniversitesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ (DEVAM)

Wang, B., Hui, H., Li, X., Yang, X., & Li, Y. (2025). Sublethal effects of insecticides on insect biology and detoxification enzymes. *Insects*, 16(6), 629. <https://doi.org/10.3390/insects16060629>

Woods, W. G. (1994). An introduction to boron. *Environmental Health Perspectives*, 102(Suppl 7), 5–11. <https://doi.org/10.1289/ehp.94102s75>

World Health Organization. (2009). *Boron in drinking-water*. https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/boron.pdf

Zhou, W., et al. (2024). Integrated pest management: An update on the sustainability approach. *ACS Omega*, 9, 41130–41147. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06628>

Zupko, K., Sklan, D. and Lensky, Y. (1993). Proteins of the honeybee (*Apis mellifera* L.) body surface and exocrine glands. *Journal of Insect Physiology*, 39, 41-46, [doi.org/10.1016/0022-1910\(93\)90016-K](https://doi.org/10.1016/0022-1910(93)90016-K).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Nuray GÜN

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ Biyoloji Bölümü	2024-2026
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ Biyoloji	2008-2012
Lise	Neşet Yalçın Süper Lisesi	2004-2007

Yayın Listesi

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Tam Metin Olarak Basılan Bildiriler

GÜN Nuray, ER Ayin, GÜNER Pınar (2026). The Potential Of Borax As An Environmentally Friendly Insecticide Candidate In Sustainable Agricultural Systems. Ispec 19. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, 14-18 Şubat, Dubai. (TAM METİN) Proceeding book:826-833.