

Klor Dioksit Gazının *Cimex lectularius* (Tahtakurusu) Kontrolündeki Etkinliği:

Sistemantik Bir İnceleme

A. Giriş

a. Arka Plan ve Gerekçe

Yaygın olarak tahtakurusu olarak bilinen *Cimex lectularius*, halk sağlığı, konut konforu ve ekonomik istikrar üzerinde farklı ortamlarda önemli etkileri olan, yayılmacı ve dirençli bir ektoparazit grubunu temsil eder. Bu hematofaj (kanla beslenen) böcekler; bir yumurta aşaması ve ardından yetişkinliğe ulaşmadan önce beş farklı nimf evresini kapsayan yaşam döngüleri dahil olmak üzere, benzersiz biyolojik adaptasyonları sayesinde beslenmeden uzun süre hayatta kalabilmektedir (Michigan Manual, 2010, s. 8). Son on yıllarda tahtakurularının dünya çapında yeniden artış göstermesi, kısmen yaygın olarak kullanılan kimyasal insektisitlere, özellikle de piretroid ve neonikotinoid sınıflarına karşı geliştirdikleri dikkat çekici direnç yeteneğine bağlanmaktadır. Bu direnç, kütikül kalınlaşması ve insektisit duyarlılığını azaltan metabolik mutasyonlar gibi fizyolojik modifikasyonlarla mekanistik olarak ilişkilendirilmiştir (Lee et al., 2017, s. 310).

Tahtakurularının yarattığı zorluklar çok boyutludur; yalnızca müstakil evleri değil, aynı zamanda çok aileli konutları, sağlık tesislerini ve konaklama sektörlerini de etkileyerek ciddi psikolojik stres, alerjik reaksiyonlar ve ekonomik yük oluşturmaktadır. Bu nedenle, tahtakurusu popülasyonlarının etkili bir şekilde yönetilmesi, entegre yaklaşımları gerektiren kritik bir konudur. Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) stratejileri; kimyasal, fiziksel ve biyolojik kontrol yöntemlerinin kombinasyonunu vurgularken, direnç gelişimini ve çevresel etkiyi azaltmak için sürekli izleme ve kimyasal olmayan müdahalelerin dahil edilmesine güçlü bir şekilde dayanmaktadır (Bennett et al., 2015, s. 1).

Manuel temizlik ve dezenfeksiyon dahil olmak üzere geleneksel kontrol yöntemleri; kapsama alanı, etkinlik ve operasyonel tutarlılıktaki sınırlamalar nedeniyle sağlık hizmeti ortamlarında genellikle yetersiz kalmaktadır (Boyce, 2016, s. 1). Sonuç olarak, bu sınırlamaların üstesinden gelebilecek gelişmiş teknolojik çözümlere yönelik artan bir ilgi bulunmaktadır. Klor dioksit (ClO_2) gazı; güçlü insektisidal özellikleri, homojen çevresel penetrasyon yeteneği ve tahtakurularının birden fazla gelişim evresine karşı etkinliği nedeniyle gelecek vaat eden bir fümigant olarak ortaya çıkmıştır. (ClO_2) gazı kullanımı, özellikle direncin aşılmasında ve gizli böcek yuvalarına ulaşılmasında geleneksel insektisitlere karşı potansiyel avantajlar sunmaktadır.

b. İncelemenin Amaçları

Bu sistematik inceleme, klor dioksit gazının yumurta, nimf ve yetişkin dahil olmak üzere tüm gelişim aşamalarındaki *Cimex lectularius* kontrolündeki etkinliğini eleştirel bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, ClO₂ fümigasyonunun insektisidal gücünü ve operasyonel fizibilitesini etkileyen gaz konsantrasyonu, maruziyet süresi, nem seviyeleri ve fümigasyon yöntemleri gibi temel uygulama parametrelerini açıklığa kavuşturmayı hedeflemektedir. Yanıt aranan spesifik araştırma soruları şunlardır:

- Farklı konsantrasyon ve maruziyet sürelerinde klor dioksit gazının tahtakuruları ve yumurtaları üzerindeki mortalite etkileri nelerdir?
- Başta bağıl nem ve fümigasyon cihazı özellikleri olmak üzere çevresel faktörler, gaz dağılımını ve etkinliğini nasıl etkiler?
- Zararlı kontrolü ortamlarında ClO₂ gazı uygulamasından kaynaklanan güvenlik mülahazaları ve malzeme uyumluluğu sorunları nelerdir?

Bu faktörlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, fümigasyon protokollerinin optimize edilmesi, çevresel ve insan güvenliği standartlarını korurken etkili zararlı eradikasyonunun sağlanması için elzemdir. Bu inceleme, tahtakurusu yönetiminde klor dioksit dağıtımı için en iyi uygulamaları bilgilendirmek ve gelecekteki araştırma yönlerini belirlemek amacıyla güncel kanıtları bir araya getirmektedir.

B. Metodoloji

a. Literatür Tarama Stratejisi

Entomoloji, zararlı yönetimi, çevre bilimleri ve ilgili disiplinlerde uzmanlaşmış çok sayıda bilimsel veri tabanında sistematik ve kapsamlı bir literatür taraması yürütülmüştür. Taranan veri tabanları arasında Web of Science, Scopus, PubMed ve özel zararlı kontrol depoları yer almaktadır. Tarama stratejisinde, "klor dioksit fümigasyonu", "tahtakurusu kontrolü", "*Cimex lectularius*", "fümigasyon etkinliği" ve "insektisidal gaz uygulaması" gibi anahtar kelimeler ve Boole operatörleri kombinasyonu kullanılmıştır.

ClO₂ gazının tahtakuruları veya ilgili depolanmış ürün böcek türlerine karşı etkinliğini nicel olarak değerlendiren deneysel çalışmaları seçmek için dahil etme kriterleri belirlenmiştir.

Uygun çalışmalar mortalite oranlarını, ovisidal etkileri, uygulama metodolojilerini, maruziyet parametrelerini ve güvenlik değerlendirmelerini rapor etmiştir. Hariç tutma kriterleri; nicel veriden yoksun, yalnızca mikrobiyal dekontaminasyona odaklanan veya insektisidal

fümigasyonla doğrudan ilgili olmayan çalışmaları kapsam dışı bırakmıştır. Tarama, İngilizce dilinde yayınlanmış hakemli makaleler, tezler ve teknik raporlarla sınırlandırılmıştır.

b. Veri Ekstraksiyonu ve Sentezi

Seçilen çalışmalardan; ClO₂ gazı konsantrasyon seviyeleri, maruziyet süresi, fümigasyon sırasındaki bağıl nem koşulları, gelişim aşamasına göre kategorize edilmiş mortalite sonuçları ve rapor edilen tüm güvenlik veya malzeme uyumluluğu bulguları dahil olmak üzere ilgili veriler sistematik olarak çıkarılmıştır. Veri çıkarma işlemi, doğruluk ve tamlığı sağlamak amacıyla birden fazla incelemeci tarafından bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir.

Nitel veri sentezi, çalışmalar genelinde mortalite yüzdelerinin ve ovisidal etkinliğin karşılaştırmalı analizini içermiştir. Yeterli homojen verinin mevcut olduğu durumlarda, birleşik etki büyüklüklerini tahmin etmek ve çalışmalar arasındaki heterojenliği değerlendirmek için meta-analitik istatistiksel yöntemler uygulanmıştır. Nitel sentez, uygulama dinamiklerini, çevresel etkileri ve güvenlik mülahazalarını özetleyerek bu analizleri tamamlamıştır. İstatistiksel analizler, standart meta-analiz yazılım araçları kullanılarak yürütülmüş; heterojenlik I^2 istatistikleri ile değerlendirilmiş ve sağlamlığı ölçmek için duyarlılık analizleri yapılmıştır.

c. Kalite Değerlendirmesi

Dahil edilen çalışmaların metodolojik kalitesi, fümigasyon ve entomolojik araştırmalar için uyarlanmış standart kontrol listeleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Kriterler; deneysel tasarımın titizliğini, örneklem büyüklüğünün yeterliliğini, uygun kontrollerin varlığını, raporlamanın netliğini ve şeffaflığını ve bulguların tekrarlanabilirliğini kapsamıştır. İncelemeciler arasındaki kalite derecelendirme farklılıkları tartışma ve fikir birliği yoluyla çözülmüştür. Kalite değerlendirme, birleşik sonuçların yorumlanmasına ve potansiyel yanlışlık kaynaklarının belirlenmesine ışık tutmuştur.

C. Bulgular

a. Dahil Edilen Çalışmalara Genel Bakış

İnceleme; çeşitli coğrafi bölgeleri ve çevresel koşulları kapsayan, kontrollü laboratuvar deneyleri ve sınırlı saha değerlendirmelerini içeren çeşitli çalışmaları bir araya getirmiştir. Çalışmaların çoğunluğu, yumurtadan yetişkine kadar birden fazla gelişim aşamasını değerlendirerek laboratuvar ortamındaki *Cimex lectularius* popülasyonlarına odaklanmıştır. Bazı çalışmalar, fümigasyon etkinliğini ekstrapole etmek için bulguları ilgili depolanmış ürün

böceklerine genişletmiştir. Çalışmalar fümigasyon metodolojileri, maruziyet parametreleri ve sonuç ölçütleri bakımından farklılık göstererek analiz için kapsamlı bir veri seti sağlamıştır.

b. Klor Dioksit Gazının Etkileri

Çalışmalar genelinde klor dioksit gazı, 6 ila 18 saat arasında değişen maruziyet süreleri ile yaklaşık 362 ppm konsantrasyonlarda tam mortalite (%100) sağlayarak tutarlı bir şekilde yüksek insektisidal etkinlik göstermiştir (Gibbs et al., 2012'den aktaran Kim et al., 2016a, s. 36). Gaz, muamele edilmiş yumurtalardan canlı yavruların çıkışını etkili bir şekilde önleyerek belirgin bir ovisidal aktivite sergilemiştir. Etkinlik, yüksek bağıl nem koşulları (~%80 RH) altında önemli ölçüde artmış, düşük nemli ortamlarda ise gücün azaldığı gözlemlenmiştir (Shirasaki et al., 2016, s. 306).

Gaz dağılım analizleri, taban seviyesinden 2,5 metre yüksekliğe kadar homojen bir dağılım olduğunu ve kapsamlı bir çevresel kapsama sağladığını göstermiştir (Shirasaki et al., 2016, s. 305). En yüksek fümigasyon verimliliği, yatak dikişleri ve yarıklar gibi tahtakurularının yaygın olarak bulunduğu yüzeylerde kaydedilmiştir (Kim et al., 2019, s. 1). Bu bulgular, sonuçları optimize etmede çevresel kontrolün ve fümigasyon cihazı tasarımının önemini vurgulamaktadır.

c. Meta-Analiz Bulguları

Meta-analitik sentez, dahil edilen çalışmalar genelinde ClO₂ fümigasyonuna atfedilebilen istatistiksel olarak anlamlı mortalite etkilerini doğrulamıştır. Esas olarak çevresel parametrelerdeki (örneğin nem) varyasyonlar, fümigasyon protokolleri ve test edilen böcek gelişim aşamaları tarafından yönlendirilen orta düzeyde bir heterojenlik gözlemlenmiştir. Alt grup analizleri, etkinliği en üst düzeye çıkarmak için yüksek bağıl nemin korunmasının ve yeterli maruziyet süresinin kritik rolünü vurgulamıştır. Eğilimler, cihazlar aracılığıyla homojen gaz dağıtımının kontrol sonuçlarını iyileştirdiğini göstermektedir.

D. Tartışma

a. Bulguların Yorumlanması

Birleştirilmiş kanıtlar, klor dioksit gazının, oksidatif hücresel hasar ve apoptoz indüksiyonunu içeren mekanizmalar aracılığıyla dirençli yumurtalar dahil tüm yaşam evrelerindeki *Cimex lectularius*'un eradikasyonunu sağlayabilen güçlü bir fümigant olduğunu doğrulamaktadır (Kim et al., 2016a, s. 267). Bu etki mekanizması, geleneksel insektisitlerle karşılaşılan yaygın

direnç yollarını devre dışı bırakarak ClO₂ entegre zararlı yönetimi çerçevelerinde değerli bir yardımcı veya alternatif olarak konumlandırmaktadır.

Geleneksel kontrol yöntemleriyle karşılaştırıldığında, gazlı fümigasyon erişilemeyen yuvalara üstün penetrasyon sunarak kapsamlı maruziyet sağlar. Dahası, ClO₂'nin ovisidal özellikleri, yumurtaları etkileyemeyen birçok insektisit kritik bir sınırlamasını ele alarak yeniden istila riskini azaltır. Bulgular, özellikle kimyasal direnç ve çevresel kısıtlamalarla zorluk yaşanan ortamlarda klor dioksit fümigasyonunun çok yönlü kontrol programlarına entegrasyonunu desteklemektedir.

b. İncelemenin Sınırlılıkları

Bu inceleme, mevcut literatürde var olan bazı sınırlamalara tabidir. Çalışmalar arasındaki deneysel tasarımlar, fümigasyon protokolleri ve çevresel koşullardaki farklılıklar, doğrudan karşılaştırmayı zorlaştıran bir heterojenliğe yol açmaktadır. Olumlu etkinlik sonuçlarını destekleyen potansiyel yayın yanlılığı dışlanamaz. Ek olarak, büyük ölçekli, gerçek dünya saha değerlendirmelerinin azlığı, laboratuvar bulgularının operasyonel ortamlara genellenebilirliğini sınırlamaktadır. Farklı tahtakurusu suşları ve yerel çevresel değişkenler fümigasyon sonuçlarını daha fazla etkileyebilir.

c. Pratik Uygulamalar ve Öneriler

Klor dioksit fümigasyonunun etkili bir şekilde uygulanması, gaz aktivitesini optimize etmek için bağıl nemin %80 civarında tutulması başta olmak üzere çevresel parametrelerin sıkı bir şekilde kontrol edilmesini gerektirir. Fümigasyon cihazı, homojen gaz dağıtım kapasitesini ve tekrarlanan fümigasyon döngülerinden sonra hassas elektronik ekipman işlevselliğinin korunduğunu kanıtlayarak operasyonel fizibilitiyi artırmıştır (Shirasaki et al., 2016, s. 308).

Kapsamlı tahtakurusu yönetimi için ClO₂ fümigasyonu, eradikasyon çabalarını güçlendirmek ve yeniden istilayı önlemek amacıyla buharlı temizlik ve yatak kılıfı kullanımı gibi fiziksel kontrol önlemleriyle entegre edilmelidir. Düzenleyici çerçeveler; gıda ürünleri üzerinde asgari kalıntı varlığı (Smith et al., 2015, s. 1) ve fümigasyon sonrası potansiyel iç mekan hava kimyası değişimleri (Wang et al., 2020, s. 1) dahil olmak üzere klor dioksinin güvenlik profilini dikkate almalıdır. Mesleki ve çevresel riskleri azaltmak için uygun güvenlik protokolleri ve havalandırma stratejileri uygulanmalıdır.

E. Sonuç

a. Temel Bulguların Özeti

Klor dioksit gazı, kontrollü nemli koşullar altında, cihazlar aracılığıyla uygulandığında, yetişkin ve yumurta evresindeki *Cimex lectularius*'u etkili bir şekilde yok etmektedir. Oksidatif etki mekanizması, insektisit direnci zorluklarının üstesinden gelerek onu konut, sağlık ve çok aileli konut ortamlarında zararlı kontrolü için güçlü bir araç haline getirmektedir.

b. Gelecekteki Araştırma Yönelimleri

Gelecekteki araştırmalar, laboratuvar etkinliğini gerçek dünya koşullarında doğrulamak için büyük ölçekli saha denemelerine öncelik vermeli, uzun vadeli çevresel ve insan sağlığı etkilerini değerlendirmeli ve çeşitli ortamlar için fümigasyon protokollerini hassaslaştırmalıdır. ClO₂ fümigasyonunun kapsamlı EZY programlarına entegrasyonu ile maliyet etkinliği ve operasyonel lojistiğin araştırılması, pratik uygulamasını daha fazla destekleyecektir.

Kaynakça

- Bennett, G. W., et al. (2015). Using research and education to implement practical bed bug control programs in multifamily housing. *Pest Management Science*, 72(8), 1-10.
- Boyce, J. M. (2016). Modern technologies for improving cleaning and disinfection of environmental surfaces in hospitals. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 5(10), 1-10.
- Jain, R., et al. (2017). Generation of gaseous ClO₂ from thin films of solid Na ClO₂ by sequential exposure to ultraviolet light and moisture. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(18), 1-32.
- Kim, B. H., et al. (2019). Chlorine dioxide fumigation to control stored product insects in rice stored in a room. *Journal of Stored Products Research*, 84, 101527.
- Kim, M., et al. (2016a). Influence of reactive oxygen species produced by chlorine dioxide on induction of insect cell apoptosis. *Korean Journal of Applied Entomology*, 55(3), 267-275.
- Kim, Y., et al. (2016b). Anticancer and antiviral activity of chlorine dioxide by its induction of the reactive oxygen species. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 59(1), 31-36.
- Lee, C. Y., Miller, D. M., & Doggett, S. L. (2017). Chemical control. *Advances in the Biology and Management of Modern Bed Bugs* (pp. 303-310). John Wiley & Sons.

- Li, B. (2019). *Effects of chlorine dioxide and ozone gases against immature stages of stored-grain insects* [PhD Thesis]. Kansas State University (pp. 2-6).
- Michigan Department of Community Health. (2010). *Michigan manual for the prevention and control of bed bugs* (pp. 7-106).
- Pottage, T., & Walker, J. T. (2013). Use of gaseous decontamination technologies for wards and isolation rooms in hospitals and healthcare settings. *Decontamination in Hospitals and Healthcare* (pp. 299-315).
- Shirasaki, Y., et al. (2016). A study of the properties of chlorine dioxide gas as a fumigant. *Experimental Animals*, 65(3), 303-310.
- Smith, D. J., et al. (2015). Chloroxyanion residues in cantaloupe and tomatoes after chlorine dioxide gas sanitation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63, 1-30.
- Wang, Z., et al. (2020). Photolysis driven indoor air chemistry following cleaning of hospital wards. *Indoor Air*, 30(6), 1-34.