

BİYOLOJİ

Alanındaki Güncel Konular

Editör

Gül ESMA AKDOĞAN KARADAĞ

Neslihan MUTLU

BİDGE Yayınları

Biyoloji alanındaki güncel konular

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Gül Esmâ Akdoğan Karadağ & Doç. Dr. Neslihan Mutlu

ISBN: 978-625-372-787-1

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.12.2024

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara



İçindekiler

Mikrobiyolojik Uygulamalarda Nanoteknolojinin Yeri ve Nanomateriyaller.....	4
Neslihan MUTLU.....	4
Akıllı Paketleme: Doğal Pigmentli pH Göstergeleri.....	41
Ümmü Gülsüm KOÇ.....	41
Gıda Paketlemede Yenilikçi Yaklaşımlar: Aktif Paketleme, Akıllı Paketleme ve Antimikrobiyal Paketleme Sistemleri.....	82
Ümmü Gülsüm KOÇ.....	82
Türkiye Atmosferinde Gymnosperm Polenlerinin Dağılımları ...	106
Salih AKPINAR.....	106
Gül Esmâ AKDOĞAN KARADAĞ.....	106
Doğu Anadolu Bölgesinin Alerjik Polen Profili: Literatür Derlemesi	143
Gül Esmâ AKDOĞAN KARADAĞ.....	143

BÖLÜM I

Mikrobiyolojik Uygulamalarda Nanoteknolojinin Yeri ve Nanomateryaller

Neslihan MUTLU¹

Giriş

Nanoteknoloji, mikrobiyoloji alanında yeni antimikrobiyal tedavilerin geliştirilmesi ve mevcut tedavi yöntemlerinin iyileştirilmesi gibi konularda umut vadeden bir alan haline gelmiştir. Nanomateryallerin geniş yüzey alanı ve yüksek reaktivite gibi benzersiz özellikleri, mikroorganizmalarla geleneksel antimikrobiyal ajanların yapamayacağı şekillerde etkileşime girmelerine imkân tanımaktadır. Bu özellikler, nanoteknolojik materyallerin, artan antibiyotik direnci karşısında, mikrobiyal enfeksiyonlarla mücadelede önemli ajanlar haline gelmesine yol açmıştır.

¹ Doç. Dr., Kafkas Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Kars/Türkiye, Orcid: 0000-0002-1339-3267, n.mutlu@kafkas.edu.tr

Mikrobiyolojide nanoteknolojinin başlıca uygulamalarından biri, antimikrobiyal nanopartiküllerin geliştirilmesidir. Gümüş, çinko oksit ve demir oksit gibi nanopartiküller, bakteri, mantar ve virüsler dahil olmak üzere çeşitli patojenlere karşı geniş spektrumlu antimikrobiyal aktivite göstermiştir (Correa & ark., 2020; Spirescu & ark., 2021; Zúñiga-Miranda, 2023). Örneğin, gümüş nanopartiküller, mikroorganizmaların hücre zarlarını bozup hücresel süreçleri engelleyen gümüş iyonlarını serbest bırakabilme özellikleri nedeniyle güçlü antimikrobiyal özellikleriyle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Silva & ark., 2018; Wahab & ark., 2021). Benzer şekilde, demir oksit nanopartiküller, biyomoleküllerle benzersiz etkileşimleri sayesinde antimikrobiyal direnci aşmada umut vaat etmektedir (Correa & ark., 2020; Zúñiga-Miranda, 2023).

Doğrudan antimikrobiyal uygulamaların yanı sıra, nanoteknoloji ilaç taşıma sistemlerinde de kritik bir rol oynamaktadır. Nanopartiküller, antimikrobiyal ajanları enkapsüle etmek üzere tasarlanabilmekte; bu da bu ajanların çözünürlüğünü, stabilitesini ve biyoyararlanımını artırırken, enfekte bölgelere hedefli taşıma sağlamaktadır (Kim, 2016; Sharma 2024). Bu hedefli yaklaşım, biyofilmlerle ilişkili kronik enfeksiyonların tedavisinde özellikle faydalıdır; zira geleneksel tedaviler, zayıf penetrasyon ve direnç mekanizmaları nedeniyle genellikle başarısız olmaktadır (Kim, 2016; Mihai & ark., 2018). Son çalışmalar, nanopartikül tabanlı tedavilerin mevcut antibiyotiklerin etkinliğini artırma ve gereken dozları azaltma potansiyeline dikkat çekmiş, böylece yan etkileri ve daha fazla direnç gelişme riskini en aza indirmiştir (Ribeiro, Dias & Zille., 2022; Alamgir, 2024).

Öte yandan, su içinde yağın kararlı dispersiyonu olan nanoemülsiyonlar, antimikrobiyal özellikleri artırılmış biyoaktif bileşenleri, özellikle uçucu yağları kapsülleyip iletme yetenekleri nedeniyle dikkat çekmektedir. Nanoemülsiyonların antimikrobiyal etkinliği, damlacık boyutu, yüzey aktif madde tipi ve aktif bileşenlerin konsantrasyonu gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Daha küçük damlacık boyutları, mikrobiyal hücrelerle etkileşim için mevcut yüzey alanını artırarak kapsüllenen antimikrobiyal ajanların penetrasyonunu ve etkinliğini artırır (Liang & ark., 2012; Salvia-Trujillo & ark., 2014; Fang & ark., 2019). Örneğin, kekik yağı nanoemülsiyonlarının, formülasyonlarında kullanılan olgunlaşma inhibitörlerine bağlı olarak hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakterilere karşı önemli antimikrobiyal aktivite gösterdiği belirlenmiştir (Ziani & ark., 2011; Chang, McLandsborough & McClements, 2012).

Nanoemülsiyonların antimikrobiyal etkilerini gösterdiği mekanizmalar çok yönlüdür. Mikrobiyal hücre zarlarını bozabilirler ve bu durum zar geçirgenliğinin artmasına ve nihayetinde hücre ölümüne yol açabilir (Lü & ark., 2018; Hassanzadeh, Alizadeh & Bari, 2018). Ayrıca, nanoemülsiyonlardaki yüzey aktif maddelerin varlığı, aktif bileşenlerin çözünürlüğünü ve biyoyararlanımını artırarak mikrobiyal hücrelerle etkileşimlerini kolaylaştırır (Ziani & ark., 2011; Fang & ark., 2019). Araştırmalar, uçucu yağların nanoemülsiyonlara eklenmesinin sinerjik etkiler yaratabileceğini ve yağ bileşenlerinin birleşik etkisinin genel antimikrobiyal aktiviteyi artırabileceğini göstermiştir (Shen & ark., 2018).

Ayrıca, nanopartikül ve nanoemülsiyonların sentezi için biyojenik yöntemlerin kullanımı, antimikrobiyal özellikleri artırmak

için sürdürülebilir bir yaklaşım olarak araştırılmıştır. Örneğin, bitki özütleri kullanılarak gümüş nanopartikülleri sentezlenebilir ve bu nanopartiküller çeşitli patojenlere karşı güçlü antimikrobiyal aktivite sergiler (Govindappa & ark., 2016; Correa & ark., 2020). Nanoemülsiyonlara doğal özlerin eklenmesi, antimikrobiyal etkinliklerini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sentetik kimyasallara olan bağımlılığı azaltarak daha çevre dostu olmalarını sağlar (Patel & ark., 2019; Nanakali, 2023).

Buna ek olarak, nanoteknolojinin uygulama alanları, tıbbi cihazlar ve gıda güvenliği için antimikrobiyal kaplamaların geliştirilmesine kadar uzanmaktadır. Araştırmacılar, nanopartikülleri tıbbi implantlar ve gıda ambalajlarının yüzeylerine dahil ederek mikrobiyal yapışmayı ve biyofilm oluşumunu azaltmayı, böylece enfeksiyonları ve bozulmayı önlemeyi amaçlamaktadır (Polívková & ark., 2017; Yemmireddy & Hung, 2017). Bu kaplamalar, klinik ve gıda endüstrisi ortamlarında hayati öneme sahip olan uzun süreli antimikrobiyal etkiler sağlayabilir.

1. Antimikrobiyal Nanopartiküller

Antimikrobiyal nanopartiküller, antibiyotik direncine sahip olanlar da dahil olmak üzere geniş bir patojen yelpazesıyla mücadele potansiyelleri nedeniyle önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Özellikle gümüş, çinko oksit ve titanyum dioksit gibi metal bazlı nanopartiküller, antimikrobiyal etkinliklerine katkıda bulunan benzersiz özellikler sergilemektedir. Bu nanopartiküllerin antimikrobiyal etkilerini ortaya koyan mekanizmalar, boyut, şekil, yüzey yükü ve reaktif oksijen türleri (ROS) üretme yetenekleri gibi çeşitli faktörlere dayanmaktadır.

Gümüş nanopartiküller en çok çalışılan antimikrobiyal ajanlar arasındadır. Etkinlikleri büyük ölçüde bakteriyel hücre zarlarını bozarak hücre lizisine ve ölüme yol açmalarına bağlıdır. Çalışmalar, Gümüş nanopartiküllerinin konsantrasyona bağlı bir antimikrobiyal aktivite sergilediğini göstermiştir; daha yüksek dozların, çeşitli bakteri türlerine karşı artan antibakteriyel etkilere neden olduğu bulunmuştur (Varghese, 2024a). Etki mekanizması, gümüş iyonlarının serbest bırakılmasıyla ilgilidir; bu iyonlar proteinlerdeki tiyol grupları ile etkileşime girerek temel hücresel fonksiyonların inaktif hale gelmesine yol açar (Niaraki, 2024). Ayrıca, Gümüş nanopartiküllerinin küçük boyutu, mikrobiyal hücrelerle daha geniş yüzey alanı etkileşimi sağlayarak antimikrobiyal aktivitelerini artırır (Savitha, Dayalan & Choudhary, 2023).

Çinko oksit nanopartikülleri de önemli antimikrobiyal özellikler göstermektedir. Son araştırmalar, bu nanopartiküllerin faydalı bakterileri korurken patojenik bakterileri seçici olarak hedef alabildiğini ve bu durumun ağız mikroflorasının dengesini korumak açısından önemli olduğunu göstermektedir. Çinko oksit nanopartiküllerinin antimikrobiyal etkisi, ışığa maruz kaldıklarında reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretebilme yeteneklerine dayanmaktadır; bu ROS, lipitler, proteinler ve DNA gibi hücresel bileşenlere zarar verebilir (Azam & ark., 2012). Ayrıca, Çinko oksit nanopartiküllerinin bitkisel formülasyonlarla yeşil sentezi, antimikrobiyal etkinliklerini artırarak bu partikülleri ağız sağlığı gibi çeşitli uygulamalar için uygun hale getirmektedir (Varghese, 2024b).

Titanyum dioksit nanopartikülleri, ultraviyole ışık altında aktive edilebilen fotokatalitik özellikleriyle bilinmektedir ve bu

durum bakterileri etkili bir şekilde öldüren ROS üretimini sağlar (Senarathna & ark., 2017). Titanyum dioksit nanopartiküllerinin polimer matrislere dahil edilmesi, sağlık hizmetleri ve gıda güvenliği uygulamaları için antimikrobiyal materyaller geliştirmek amacıyla araştırılmıştır (Olmos & ark., 2018). Titanyum dioksit nanopartiküllerinin antimikrobiyal aktivitesi, boyutları ve kristal yapılarından etkilenmektedir; daha küçük nanopartiküller, artan yüzey alanları ve reaktiviteleri nedeniyle daha yüksek aktivite göstermektedir (Senarathna & ark., 2017).

Kitosan bazlı nanopartiküller de antimikrobiyal özellikleriyle dikkat çekmektedir. Doğal bir polisakkarit olan kitosan, negatif yüklü mikrobiyal zarlarla etkileşime girmesini sağlayan katyonik yapısı nedeniyle kendiliğinden antimikrobiyal aktiviteye sahiptir (Friedman & ark., 2013). Uçucu yağlarla birleştirildiğinde, kitosan nanopartikülleri daha iyi stabilite ve çözünürlük göstererek çoklu ilaca dirençli patojenlere karşı artırılmış antimikrobiyal etkiler sergilemektedir (Niaraki, 2024). Bu sinerjik etki, biyopolimer bazlı nanopartiküllerin etkili antimikrobiyal ajanlar geliştirilmesinde potansiyelini vurgulamaktadır.

Ayrıca, farklı metal nanopartiküllerin kombinasyonu, sinerjik antimikrobiyal etkileri açısından araştırılmıştır. Çalışmalar, gümüş ve bakır nanopartiküllerinin kombinasyonunun *Staphylococcus aureus* ve *Pseudomonas aeruginosa* gibi yaygın patojenlere karşı antibakteriyel aktivitelerini artırabileceğini göstermiştir (Bankier & ark., 2019). Bu yaklaşım, daha geniş bir antimikrobiyal etki spektrumu elde etmek için her nanopartikülün benzersiz özelliklerinden yararlanmaktadır.

Özetle, antimikrobiyal nanopartiküller, antibiyotik dirençli patojenlerin oluşturduğu zorluklarla başa çıkmak için umut verici bir çözüm sunmaktadır. Etki mekanizmaları çok yönlü olup mikrobiyal zarların bozulmasını, reaktif oksijen türleri üretimini ve metal iyonlarının salınımını içermektedir. Araştırmalar, çeşitli nanopartiküllerin ve bunların kombinasyonlarının potansiyelini keşfetmeye devam ettikçe, bu materyallerin sağlık hizmetleri, gıda güvenliği ve çevre uygulamalarında giderek daha önemli bir rol oynaması muhtemeldir.

1.1. Antimikrobiyal Nanopartiküllerin Üretimi

Nanopartiküllerin üretimi, benzersiz özellikleri ve tıp, malzeme bilimi ve çevresel iyileştirme gibi geniş kapsamlı uygulamaları nedeniyle önemli bir ilgi kazanmıştır. Çeşitli sentez yöntemleri geliştirilmiş olup, her birinin avantajları ve sınırlamaları vardır ve bu yöntemler genel olarak "top-down" (yukarıdan aşağı) ve "bottom-up" (aşağıdan yukarı) yaklaşımlar olarak kategorize edilebilir.

Top-down yöntemler, metal nanopartiküllerin sentezinde yaygın olarak kullanılmaktadır; lazer ablasyon ve gaz yoğunlaştırması gibi yöntemler bu grupta yer alır. Örneğin, lazer ablasyon tekniği, yüzey aktif maddeler veya kimyasal katkı maddeleri gerektirmeden yüksek saflıkta nanopartiküller üretebilmesi nedeniyle basitliğiyle öne çıkmakta ve nanopartikül üretimi için çevre dostu bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Sadrolhosseini & ark., 2019). Benzer şekilde, son teknoloji gaz çökelti yöntemleri, monodispers metal nanopartiküllerin üretilmesi için geliştirilmiş olup, homojen parçacık boyutları gerektiren uygulamalar için kritik olan log-normal boyut dağılımı

sergilemektedir (Welearegay & ark., 2018). Bu yöntemler, nanopartiküllerin boyut ve morfolojisi üzerinde hassas kontrol sağlamaktadır ve bu, çeşitli uygulamalarda işlevsellik için önemlidir (Stavis & ark., 2018).

Öte yandan, mikroakışkan (microfluidic) destekli sentez ve sol-jel yöntemleri gibi bottom-up yaklaşımlar, spesifik özelliklere sahip nanopartiküller üretmek için alternatif bir yol sunar. Microfluidic teknolojileri, nanopartiküllerin ölçeklenebilir üretimi için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır; bu teknolojiler, reaksiyon koşulları ve parçacık özellikleri üzerinde hassas kontrol sağlamaktadır. Örneğin, microfluidic destekli teknikler, ilaç taşıma uygulamaları için uygun olan 100-200 nm aralığında boyutlara sahip lipozomlar ve diğer nanopartiküller üretmek için başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Kara & ark., 2021; Wongpinyochit & ark., 2019). Microfluidic cihazlarda akış hızlarını ve karıştırma koşullarını manipüle etme yeteneği, belirli şekil ve boyutlara sahip nanopartiküllerin üretimini mümkün kılarak, hedeflenmiş uygulamalardaki performanslarını artırmaktadır (Ballacchino & ark., 2021).

Ayrıca, biyojenik yöntemlerle nanopartikül sentezi, sürdürülebilir bir alternatif olarak önem kazanmaktadır. Yeşil sentez yöntemleri, nanopartiküller üretmek için bitki özleri ve diğer biyolojik malzemeleri kullanarak geleneksel kimyasal sentez yöntemleri ile ilişkili çevresel etkiyi azaltabilir. Örneğin, altın nanopartiküllerin sentezinde fitokimyasalların kullanılması, metal iyonlarının azaltılmasına yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda nanopartiküllerin stabilitesini ve biyoyumluluğunu artıran kaplama ajanı olarak da işlev görür (Jha, Prasad & Jha, 2018). Bu yaklaşım,

biyomedikal uygulamalar için çevre dostu ve güvenli nanopartiküller geliştirme bağlamında özellikle önemlidir.

Sentez yöntemlerinin yanı sıra, nanopartiküllerin karakterizasyonu da özelliklerini anlamak ve belirli uygulamalar için uygunluğunu sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Nanopartiküllerin boyutunu, şeklini ve bileşimini analiz etmek için genellikle geçirimli elektron mikroskobu (TEM), X-ışını kırınımı (XRD) ve enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDS) gibi teknikler kullanılmaktadır (Garcia & ark., 2022; Tania, Ali & Akter, 2022). Bu karakterizasyon teknikleri, nanopartiküllerin yapısal özellikleri hakkında değerli bilgiler sağlamakta ve bu bilgiler, ilaç taşıma ile çevresel iyileştirme gibi uygulamalardaki performanslarını etkileyebilmektedir.

Sonuç olarak, nanopartikül üretimi, her biri belirli uygulamalar için benzersiz avantajlar sunan çeşitli sentez yöntemlerini kapsamaktadır. Sentez tekniğinin seçimi, elde edilen nanopartiküllerin özelliklerini önemli ölçüde etkiler ve bu da farklı alanlardaki işlevselliğini belirler. Araştırmalar ilerledikçe, daha verimli, ölçeklenebilir ve çevre dostu sentez yöntemlerinin geliştirilmesi, nanopartikül uygulamalarının geleceği için kritik olacaktır.

1.2. Antimikrobiyal Etki Mekanizmaları

Nanopartiküllerin antimikrobiyal mekanizmaları, çeşitli patojenlerle mücadelede potansiyel uygulamaları nedeniyle araştırma konusu olmuştur. Bu mekanizmalar, reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimi, hücresel bütünlüğün bozulması, iyon

salınımı ve mikrobiyal yapılarla doğrudan etkileşimler gibi birkaç ana başlıkta kategorize edilebilir.

Nanopartiküllerin antimikrobiyal etkilerini gösterdiği başlıca mekanizmalardan biri ROS üretimidir. Çinko oksit ve bakır oksit gibi metal oksit nanopartiküllerinin, ışığa veya neme maruz kaldıklarında ROS üretebildiği gösterilmiştir ve bu durum mikroorganizmalar üzerinde oksidatif strese neden olur. Bu oksidatif stres, lipitler, proteinler ve DNA dahil olmak üzere hücresel bileşenlere zarar verebilir ve nihayetinde hücre ölümüne yol açabilir (He & ark., 2016; Francis, Jayakumar, & Gokhale, 2023). Çinko oksit nanopartiküllerinin bakteriyel DNA çoğalmasını bozma ve virülans ile ilişkili gen ekspresyonunu değiştirme yeteneği, bunların antimikrobiyal ajanlar olarak etkinliğini daha da vurgulamaktadır (Gudkov & ark., 2021).

Bir diğer önemli mekanizma, nanopartiküllerin mikropların hücre duvarları ve zarları ile fiziksel etkileşimidir. Örneğin, gümüş nanopartiküllerinin bakteriyel zarları delip geçebileceği ve zar bütünlüğünü bozan delikler oluşturabileceği gösterilmiştir. Bu bozulma, hücresel içeriklerin sızmasına neden olur ve mikroplarda hücre ölümünü tetikleyebilir (Macieja & ark., 2022; Francis, 2023). Ayrıca, bazı metal nanopartiküllerinin pozitif yüklü doğası, negatif yüklü bakteriyel zarlarla olan affinelerini artırarak, nanopartiküllerin alımını ve sonraki antimikrobiyal etkisini kolaylaştırır (Miyazawa, Hakamada & Mabuchi, 2018; Niño-Martínez & ark., 2019).

Nanopartiküllerden metal iyonlarının salınımı da antimikrobiyal aktivitede önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, bakır nanopartikülleri Cu^{2+} iyonları salarak, bakterilerde çeşitli

metabolik süreçleri etkileyebilir ve bu da hücre ölümüne yol açabilir (Delgado & ark., 2011; Sánchez-Sanhueza, Fuentes-Rodríguez, & Bello-Toledo, 2016). Bu iyon salınım mekanizması, nanopartiküllerin özellikle bir polimer matris içerisinde gömülü olduğu kompozit materyaller açısından önemlidir. Su moleküllerinin difüzyonu, bu nanopartiküllerin korozyonunu kolaylaştırarak, antimikrobiyal iyonların sürekli salınımını mümkün kılar (Delgado & ark., 2011).

Ayrıca, nanopartiküllerin boyutu ve şekli antimikrobiyal özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Daha küçük nanopartiküller genellikle daha yüksek bir yüzey alanı-hacim oranına sahiptir ve bu da reaktiviteyi ve mikroorganizmalarla etkileşimi artırır (Silva & ark., 2019; Fierascu & ark., 2022). Çalışmalar, nanopartiküllerin boyutlarının ROS üretme ve mikropların zarlarına nüfuz etme yeteneklerini etkileyebileceğini, dolayısıyla genel antimikrobiyal etkinliklerini etkilediğini göstermiştir (Miranda & ark., 2022).

Bu mekanizmalara ek olarak, nanopartiküllerin biyojenik yöntemlerle sentezlenmesi, antimikrobiyal özellikleri artırma potansiyeli nedeniyle dikkat çekmiştir. Örneğin, fitosentez yoluyla üretilen gümüş nanopartikülleri, nanopartikülleri stabilize eden ve fonksiyonelleştiren biyomoleküllerin varlığı nedeniyle artırılmış antimikrobiyal aktivite gösterdiği tespit edilmiştir (Fierascu & ark., 2022; Albrahim, 2023). Doğal özlerin entegrasyonu da ek antimikrobiyal etkiler sağlayabilir; bu durum biyojenik nanopartikülleri gelecekteki araştırmalar için umut verici bir alan haline getirmektedir.

Özetle, nanopartiküllerin antimikrobiyal mekanizmaları çok yönlüdür ve ROS üretimi, hücresel bütünlüğün bozulması, iyon salınımı ve mikroorganizmalarla boyut bağımlı etkileşimleri içerir. Bu mekanizmalar keşfedilmeye devam ettikçe, nanopartikül bazlı antimikrobiyal ajanların, antibiyotik direnci gösteren patojenlerin oluşturduğu zorlukları ele alma konusunda büyük bir umut taşıdığı görülmektedir.

1.3. Antimikrobiyal Nanopartiküllerin Uygulama Alanları

Antimikrobiyal nanopartiküllerin uygulama alanları geniş ve çeşitlidir. Tıp alanında, enfeksiyonları önlemek için tıbbi cihaz kaplamalarında ve mikrobiyal yükü azaltarak iyileşmeyi desteklemek için yara örtülerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Wang, Hu & Shao, 2017). Örneğin, enfeksiyon riskini azaltmak için cerrahi dikişlere ve kateterlere gümüş nanopartiküller eklenmiştir (Rai & ark., 2012). Ayrıca, nanopartiküllerin ilaç taşıma sistemlerindeki rolü dikkate değerdir; nanopartiküller, antimikrobiyal ajanların çözünürlüğünü ve biyoyararlanımını artırarak hedefe yönelik tedaviye olanak tanır (Azam & ark., 2012).

Gıda endüstrisinde, antimikrobiyal nanopartiküller, mikrobiyal kontaminasyonu önleyerek ürünlerin raf ömrünü uzatmak için kullanılmaktadır. Gıda ambalaj malzemelerine eklenmeleri, bozulmayı azaltmak ve gıda güvenliğini sağlamak açısından umut vaat etmektedir (Lozhkomoev & ark., 2014). Ayrıca, tarımsal uygulamalarda, pestisitler ve gübrelerde kullanılarak ürünlerin patojenlere karşı korunmasını artırma potansiyeli araştırılmaktadır (Fernando, Gunasekara & Holton, 2018).

Sonuç olarak, antimikrobiyal nanopartiküller, enfeksiyon hastalıkları ve mikrobiyal direnç karşı mücadelede umut verici bir alanı temsil etmektedir. Çeşitli üretim yöntemleri, etki mekanizmaları ve geniş uygulama alanları, bu nanopartiküllerin geleneksel antimikrobiyal ajanlara etkili alternatifler olarak potansiyellerini ortaya koymaktadır.

2. Antimikrobiyal Nanoemülsiyonlar

Antimikrobiyal nanoemülsiyonlar, özellikle uçucu yağların çeşitli patojenlere karşı etkisini artırma ve bu bileşiklerin iletimini geliştirme potansiyeli nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Suda dağılmış ince yağ damlacıklarından oluşan bu nanoemülsiyonlar, antimikrobiyal etkinliklerine katkıda bulunan benzersiz fizikokimyasal özelliklere sahiptir.

Nanoemülsiyonların başlıca avantajlarından biri, antimikrobiyal özellikleriyle bilinen uçucu yağların biyoyararlanımını ve stabilitesini artırma yetenekleridir. Nanoemülsiyonların küçük damlacık boyutu (genellikle 30 ile 200 nm arasında) mikrobiyal hücrelerle etkileşim için mevcut yüzey alanını artırarak hedef organizmalarla daha iyi temas ve nüfuz sağlar (Salvia-Trujillo & ark., 2014; Nirmama & Nagarajan, 2017). Örneğin, tarçın yağı ve eugenol içeren nanoemülsiyonların *Staphylococcus aureus* ve *Bacillus cereus* gibi patojenlere karşı artırılmış antimikrobiyal etki gösterdiği, portakal suyu gibi gıda matrislerinde bakteriyel popülasyonları etkin bir şekilde azalttığı belirlenmiştir (Nirmala & Nagarajan, 2017).

Nanoemülsiyonların antimikrobiyal etkilerini gösterdiği mekanizmalar çok yönlüdür. Damlacıkların küçük boyutu, bakteri

hücre duvarlarıyla yakın ve yoğun temas sağlar ve bu, uçucu yağ bileşenlerinin mikrobiyal hücrelere nüfuz etmesini artırabilir (Radi & ark., 2017). Bu etkileşim hücre zarı bütünlüğünü bozarak hücre içi bileşenlerin sızmasına ve nihayetinde hücre ölümüne yol açabilir (Ros-Chumillas & ark., 2017). Ayrıca, uçucu yağların nanoemülsiyon içinde kapsüllenmesi, bu bileşiklerin bozunmaya karşı korunmasını sağlayarak antimikrobiyal aktivitelerinin zamanla devam etmesini sağlar (Cenobio-Galindo & ark., 2019).

Nanoemülsiyonları stabilize etmek için kullanılan yüzey aktif maddelerin seçimi de antimikrobiyal etkinliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Araştırmalar, yüzey aktif maddenin yükünün, nanoemülsiyon damlacıkları ile mikrobiyal hücreler arasındaki etkileşimi etkileyebileceğini göstermektedir. Örneğin, pozitif yüklü nanoemülsiyonların, negatif yüklü bakteriyel zarlarla elektrostatik çekim yoluyla etkileşimi artırarak antimikrobiyal aktiviteyi güçlendirdiği görülmüştür (Ziani & ark., 2011). Bu özellik, uçucu yağlara karşı dirençli olabilen Gram-negatif bakterileri hedef almak için özellikle faydalı olabilir (Bodea, 2023).

Doğrudan antimikrobiyal etkilerinin yanı sıra nanoemülsiyonlar, diğer antimikrobiyal ajanların taşıyıcısı olarak da işlev görebilir, bu da etkinliklerini genel olarak artırır. Örneğin, uçucu yağların polisakkarit bazlı yenilebilir filmlere dahil edilmesi, ürünlerin raf ömrünü uzatırken aynı zamanda antimikrobiyal koruma sağlayarak gıda güvenliğini iyileştirmek için bir yöntem olarak incelenmiştir (Kong, Degraeve & Piu, 2022). Bu uygulama, nanoemülsiyonların çeşitli gıda sistemlerindeki çok yönlülüğünü ve gıda güvenliği endişelerine çözüm sağlama potansiyelini ortaya koymaktadır.

Ayrıca, bitki özleri kullanılarak nanoemülsiyonların biyojenik yöntemlerle sentezlenmesi, antimikrobiyal özelliklerini artırmak için sürdürülebilir bir yaklaşım olarak ilgi görmüştür. Biyojenik nanoemülsiyonlar, uçucu yağların antimikrobiyal aktivitesini korumakla kalmaz, aynı zamanda sentetik kimyasalların kullanımını en aza indirerek çevre dostu hale gelir (Ahmad & ark., 2023).

Sonuç olarak, antimikrobiyal nanoemülsiyonlar, uçucu yağların çeşitli patojenlere karşı etkinliğini artırmak için umut verici bir stratejidir. Küçük damlacık boyutu, gelişmiş stabilite ve biyoaktif bileşenleri kapsülleyip koruma yetenekleri, onları gıda güvenliği ve koruma alanında değerli araçlar haline getirmektedir. Araştırmalar, bu materyallerin etki mekanizmaları ve uygulama alanlarını keşfetmeye devam ederken, nanoemülsiyonlar etkili antimikrobiyal stratejilerin geliştirilmesinde giderek daha önemli bir rol oynayacaktır.

2.1. Nanoemülsiyonların Üretimi

Nanoemülsiyonların üretimi, biyolojik olarak aktif bileşiklerin, özellikle uçucu yağlar ve antimikrobiyal ajanların çözünürlüğünü ve biyoyararlanımını artırabilme yetenekleri nedeniyle gıda bilimi ve ilaç gibi çeşitli alanlarda büyük ilgi görmektedir. Nanoemülsiyonlar, 20 ila 200 nm arasında değişen damlacık boyutlarına sahip yağ-su emülsiyonları olarak tanımlanır; bu özellikleri, mikroorganizmalarla etkileşim için daha geniş bir yüzey alanı sağlar ve antimikrobiyal etkinliklerini artırır (Rao & McClements, 2011).

Nanoemülsiyonların hazırlanması, yüksek basınçlı homojenizasyon, ultrasonikasyon ve mikroakışkanlaştırma gibi

yüksek enerjili tekniklerle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler, damlacık boyutunun küçültülmesini sağlar ve emülsiyonun kararlılığını temin eder (Rao & McClements, 2011). Örneğin, yüksek basınçlı homojenizasyon, daha büyük damlacıkları nano boyutlu parçalara ayırmak için yoğun mekanik kuvvetler uygular; ultrasonikasyon ise kavitasyon baloncukları oluşturan yüksek frekanslı ses dalgalarını kullanır; bu baloncuklar çöktüğünde kayma kuvvetleri oluşturur ve nanoemülsiyon oluşumuna yol açar (Tripathi & ark., 2021).

Mekanik yöntemlerin yanı sıra, emülgatör seçimi de nanoemülsiyonların stabilitesi ve antimikrobiyal özelliklerinde önemli rol oynar. Saponinler ve polisakkaritler gibi doğal emülgatörler, nanoemülsiyonları stabilize edebilme yetenekleri ve antimikrobiyal özellikleri nedeniyle de araştırılmıştır (Arredondo-Ochoa & ark., 2017; Doost & ark., 2018). Örneğin, bir biyosürfaktan olarak Quillaja saponin kullanımı, *Origanum compactum* uçucu yağı nanoemülsiyonlarını stabilize ederek çeşitli patojenlere karşı antimikrobiyal aktivitelerini artırmıştır (Doost & ark., 2018). Benzer şekilde, balmumu-nişasta nanoemülsiyonları, fizikokimyasal ve antimikrobiyal özellikleri açısından karakterize edilmiş olup, üretim sürecinde emülgatör seçiminin önemini vurgulamaktanmıştır (Arredondo-Ochoa & ark., 2017).

Uçucu yağların nanoemülsiyonlara dahil edilmesi, antimikrobiyal etkinliklerini önemli ölçüde artırır. Kekik, keklik otu ve karanfil gibi uçucu yağlar güçlü antimikrobiyal özelliklere sahiptir; ancak suda düşük çözünürlükleri gıda ürünlerinde kullanımını sınırlar (Nasim & ark., 2017). Gıda sınıfı emülgatörler kullanılarak hazırlanan nanoemülsiyonlar, bu uçucu yağların

çözünürlüğünü ve yüzey alanını artırarak antimikrobiyal etkilerini de yükseltir (Nasim & ark., 2017). Örneğin, kekik yağı nanoemülsiyonlarının, yağ bileşenleri ile mikrobiyal hücre zarları arasındaki etkileşimin artması sayesinde mikrobiyal büyümeyi etkili bir şekilde engellediği gösterilmiştir (Chang, McLandsborough & McClements, 2013).

Ayrıca, nanoemülsiyonların fiziksel özellikleri, örneğin damlacık boyutu ve dağılımı, antimikrobiyal aktivitelerini önemli ölçüde etkileyebilir. Araştırmalar, daha küçük damlacık boyutlarının antimikrobiyal ajanların mikrobiyal hücrelere nüfuz etmesini artırarak etkinliği artırabileceğini göstermiştir. Buna karşılık, daha büyük damlacıklar farklı antimikrobiyal özellikler sergileyebilir; *Escherichia coli* ve *Listeria innocua* gibi patojenlere karşı farklı damlacık boyutlarının etkinliğini karşılaştıran çalışmalarda bu durum gözlemlenmiştir (Touayar & ark., 2023).

Sonuç olarak, nanoemülsiyon üretimi, emülgatör seçimi, biyolojik aktif bileşiklerin dahil edilmesi ve fiziksel özelliklerin optimize edilmesi gibi çeşitli yöntemleri ve dikkate alınması gereken unsurları içerir. Nanoemülsiyonların, uçucu yağların çözünürlüğünü ve antimikrobiyal etkinliklerini artırma yetenekleri, onları gıda koruma ve etkili antimikrobiyal stratejiler gerektiren diğer uygulamalar için değerli araçlar haline getirmektedir.

2.2. Nanoemülsiyonların Antimikrobiyal Etki Mekanizmaları

Nanoemülsiyonların antimikrobiyal mekanizmaları, gıda koruma, ilaç ve diğer alanlardaki potansiyel uygulamaları nedeniyle artan bir ilgi konusu haline gelmiştir. Tipik olarak 20-200 nm boyutunda olan nanoemülsiyonlar, suda dağılmış yağ

damlacıklarından oluşur ve kapsüllenen antimikrobiyal ajanların, özellikle uçucu yağların, etkinliğini artıran benzersiz özellikler sergiler. Nanoemülsiyonların antimikrobiyal etkilerini göstermelerine katkıda bulunan mekanizmalar arasında damlacık boyutu, bileşimi ve emülsifiye edilmiş bileşiklerin mikrobiyal hücrelerle etkileşimi yer alır.

Antimikrobiyal nanoemülsiyonların etki mekanizmalarından biri, aktif bileşiklerin mikrobiyal hücre zarlarına daha fazla nüfuz etmesidir. Nanoemülsiyonların küçük damlacık boyutu, daha geniş bir yüzey alanı ve mikrobiyal hücrelerle daha iyi temas sağlar, böylece antimikrobiyal ajanların hücrelere difüzyonunu kolaylaştırır (Liang & ark., 2012; Radi & ark., 2017). Örneğin, yapılan çalışmalar, nanoemülsiyonlarda uçucu yağ damlacıklarının küçük boyutunun bakteriyel hücre duvarlarına nüfuz etme yeteneğini artırarak antimikrobiyal aktiviteyi yükselttiğini göstermiştir (Radi & ark., 2017). Bu durum, hücre zarının bütünlüğünü bozup hücre lizisine yol açabilen eugenol ve karvakrol gibi doğal antimikrobiyal özelliklere sahip uçucu yağlar için özellikle önemlidir (Nirmala & Nagarajan, 2017).

Ayrıca, nanoemülsiyonun bileşimi antimikrobiyal etkinliğinde kritik bir rol oynar. Kullanılan emülgatörlerin seçimi, kapsüllenen bileşiklerin stabilitesi ve biyoyararlanımını önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin, soya lesitini bir emülgatör olarak kullanıldığında, antimikrobiyal ajanlar ile bakteri zarları arasındaki etkileşimi etkileyerek uçucu yağların bakterisidal aktivitesini artırabileceği gösterilmiştir (Garre & ark., 2020). Ek olarak, aktif bileşiklerin sulu fazdaki konsantrasyonu da nanoemülsiyonların antimikrobiyal etkinliğini etkileyebilir; daha yüksek

konsantrasyonlar daha fazla antimikrobiyal etkiye yol açabilir (Liang & ark., 2012).

Nanoemülsiyonların mikrobiyal hücreleri bozma mekanizmaları, aynı zamanda ROS üretilmesini içerebilir. Bazı çalışmalar, nanoemülsiyonların mikrobiyal hücrelerle etkileşiminin oksidatif strese yol açarak lipidler, proteinler ve DNA gibi hücrenel bileşenlere zarar verebileceğini öne sürmektedir (Ros-Chumillas & ark., 2017). Bu oksidatif hasar, nihayetinde hücre ölümüne neden olarak nanoemülsiyonların antimikrobiyal etkinliğine katkıda bulunur.

Bunun yanı sıra, nanoemülsiyonların stabilitesi ve kapsüllenen bileşiklerin bütünlüğünü koruyabilme yeteneği gibi fiziksel özellikleri de antimikrobiyal aktiviteleri için çok önemlidir. Nanoemülsiyonların stabilitesi, aktif bileşiklerin zaman içinde etkili kalmasını sağlayarak bozulmalarını ve etkinlik kaybını önler (Ahmad & ark., 2023). Uçucu yağların nanoemülsiyonlarda kapsüllenmesi, yalnızca çözünürlüklerini artırmakla kalmaz, aynı zamanda antimikrobiyal özelliklerini azaltabilecek çevresel faktörlere karşı da koruma sağlar (Nirmala & Nagarajan, 2017).

Sonuç olarak, nanoemülsiyonların antimikrobiyal mekanizmaları, aktif bileşiklerin mikrobiyal hücrelere daha iyi nüfuz etmesini, emülgatör bileşiminin etkisini, reaktif oksijen türlerinin üretimini ve nanoemülsiyon sisteminin stabilitesini içeren bir kombinasyon içerir. Bu faktörler, nanoemülsiyonların antimikrobiyal ajan olarak etkinliğine topluca katkıda bulunarak onları gıda koruma ve tıbbi tedaviler gibi çeşitli uygulamalarda değerli araçlar haline getirir.

2.3. Antimikrobiyal Nanoemülsiyonların Kullanım Alanları

Antimikrobiyal nanoemülsiyonlar, özellikle gıda koruma, ilaç ve sağlık sektörlerinde çok yönlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Küçük damlacık boyutu ve artırılmış stabilite gibi benzersiz özellikleri sayesinde antimikrobiyal özelliklere sahip biyoaktif bileşenleri etkili bir şekilde taşımalarına olanak tanır. Aşağıda, antimikrobiyal nanoemülsiyonların bazı temel kullanım alanları literatürle desteklenmiştir.

Antimikrobiyal nanoemülsiyonların en önemli kullanım alanlarından biri gıda korumadır. Nanoemülsiyonlar, doğal antimikrobiyal özelliklere sahip esansiyel yağları kapsülleyerek, bu yağların gıda kaynaklı patojenlere karşı etkinliğini artırır. Örneğin, eugenol ve limonen nanoemülsiyonlarının tavuk ve meyve suları gibi gıda ürünlerinde mikrobiyal yükü önemli ölçüde azaltarak raf ömrünü uzattığı ve gıda güvenliğini sağladığı gösterilmiştir (Nirmala & Nagarajan, 2017; Ros-Chumillas & ark., 2017; Gürbüz, 2024). Nanoemülsiyonların küçük damlacık boyutu, mikrobiyal hücrelerle daha iyi etkileşim sağlayarak hücre zarlarının penetrasyonunu ve bozulmasını artırır (Ros-Chumillas & ark., 2017; Radi & ark., 2017).

İlaç alanında, nanoemülsiyonlar antimikrobiyal ajan taşıyıcılar olarak da araştırılmaktadır. Örneğin, esansiyel yağların nanoemülsiyonlarda kullanımı, antibiyotiklere dirençli bakterilerin neden olduğu enfeksiyonların tedavisinde umut verici bulunmuştur. Kekik ve kimyon gibi bitkisel esansiyel yağları içeren nanoemülsiyonların, *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli* gibi patojenlere karşı güçlü antibakteriyel aktivite sergilediği gösterilmiştir (Chang, McLandsborough & McClements, 2013;

Nirmala & ark., 2020). Bu nanoemülsiyonların aktif bileşenlerin çözünürlüğünü ve biyoyararlanımını artırma yeteneği, onları deri enfeksiyonları gibi çeşitli tedavi edici uygulamalar için uygun hale getirmektedir (Tominc, 2024).

Antimikrobiyal nanoemülsiyonlar, özellikle çürük yapıcı bakterilerle mücadelede diş sağlığı uygulamalarında umut vaat etmektedir. Araştırmalar, nanoemülsiyonların diş çürükleri ve ağız enfeksiyonları ile ilişkili Streptococcus mutans ve Candida albicans gibi mikroorganizmaların biyofilm oluşumunu etkili bir şekilde inhibe edebileceğini göstermektedir (Ramalingam & ark., 2012). Nanoemülsiyonların ağız gargaralarında veya diş kaplamalarında kullanımı, antibiyotik direncine katkıda bulunmadan diş hastalıklarının görülme sıklığını azaltmak için yeni bir yaklaşım sağlayabilir.

Antimikrobiyal nanoemülsiyonların kozmetik formülasyonlara dahil edilmesi de yeni bir kullanım alanıdır. Antimikrobiyal koruma sağlama yetenekleri sayesinde nanoemülsiyonlar, mikrobiyal kontaminasyonu önlemek ve ürün stabilitesini artırmak için cilt bakım ürünlerinde kullanılabilir. Örneğin, papatya özü içeren nanoemülsiyonlar, yara iyileşmesini desteklemek ve cilt patojenlerine karşı antimikrobiyal etkiler sağlamak amacıyla formüle edilmiştir (Tominc, 2024). Bu formülasyonlardaki biyoaktif bileşenlerin sinerjik etkisi, topikal uygulamalarda etkinliklerini artırabilir.

Tarımda nanoemülsiyonlar, haşere kontrolü ve bitki koruma için çevre dostu alternatifler olarak araştırılmaktadır. Nanoemülsiyonlarda kapsüllenen esansiyel yağların antimikrobiyal

özellikleri, mantar ve bakteri kaynaklı bitki hastalıklarının yönetilmesine yardımcı olarak sentetik pestisitlere olan bağımlılığı azaltabilir. Örneğin, biberiye esansiyel yağı nanoemülsiyonlarının önemli antifungal aktivite sergilediği gösterilmiş ve organik tarım uygulamaları için uygun hale gelmiştir (Martín-Piñero & ark., 2020).

Gıda ve tarım dışındaki alanlarda da antimikrobiyal nanoemülsiyonlar, çeşitli enfeksiyonların tedavisinde potansiyel olarak araştırılmaktadır. Nanoemülsiyonların antimikrobiyal ajanların etkinliğini artırma yeteneği, dirençli patojenlerin neden olduğu hastalıkların tedavi sonuçlarını iyileştirebilir. Örneğin, eugenol içeren nanoemülsiyonların *Listeria monocytogenes* ve *Salmonella enteritidis*'e karşı güçlü aktivite sergilediği ve klinik ortamlarda kullanıma potansiyel taşıdığı gösterilmiştir (Ahmad & ark., 2023).

Sonuç olarak, antimikrobiyal nanoemülsiyonlar, gıda güvenliği, ilaç, diş bakımı, kozmetik ve tarım gibi birçok sektörde umut verici bir yaklaşımı temsil etmektedir. Biyoaktif bileşenlerin etkinliğini artırma, stabilite sağlama ve hedefe yönelik taşıma özellikleri sayesinde, mikrobiyal tehditlerle mücadelede ve ürün güvenliğini artırmada değerli araçlar haline gelmişlerdir.

Sonuç

Antimikrobiyal nanopartiküller ve nanoemülsiyonlar, farklı alanlarda geniş bir uygulama alanı bularak mikrobiyal enfeksiyonların yönetiminde etkili araçlar olarak öne çıkmaktadır. Bu teknolojiler, gıda güvenliği, ilaç, diş sağlığı, kozmetik ve tarım gibi alanlarda antimikrobiyal etkinlikleriyle önemli faydalar sunmaktadır. Nano yapılar, yüksek yüzey alanları ve küçük boyutları

sayesinde, mikrobiyal hücrelerle daha iyi etkileşim kurar, biyoyararlanımı artırır ve aktif bileşenlerin hedefe yönelik etkili bir şekilde taşınmasını sağlar. Bu özellikler, özellikle antibiyotik direncinin arttığı günümüzde, bu nano çözümleri geleneksel antimikrobiyal yöntemlere sürdürülebilir ve yenilikçi bir alternatif haline getirmektedir.

Kaynaklar

Ahmad, A., Moris, M., Monib, M., Soliman, M., Thagfan, S., & Huseein, E. (2023). Eugenol essential oil and nanoemulsion as antihydatic agents with antifibrotic and immunomodulatory effects in cystic echinococcosis. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, 8(5), 253. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed8050253>

Alamgir, W. (2024). Nanoantibiotics: a tool against antimicrobial resistance. *Life and Science*, 5(2), 02. <https://doi.org/10.37185/lms.1.1.657>

Albrahim, J. (2023). Saussurea costus extract as bio mediator in synthesis iron oxide nanoparticles (ionps) and their antimicrobial ability. *Plos One*, 18(3), e0282443. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282443>

Arredondo-Ochoa, T., García-Almendárez, B., Escamilla-García, M., Martín-Belloso, O., Rossi-Márquez, G., Medina-Torres, L., ... & Regalado-González, C. (2017). Physicochemical and antimicrobial characterization of beeswax–starch food-grade nanoemulsions incorporating natural antimicrobials. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(12), 2712. <https://doi.org/10.3390/ijms18122712>

Azam, A., Ahmed, A., Oves, M., Khan, M., Habib, S., & Memić, A. (2012). Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles against gram-positive and gram-negative bacteria: a comparative study. *International Journal of Nanomedicine*, 7, 6003-6009. <https://doi.org/10.2147/ijn.s35347>

Ballacchino, G., Weaver, E., Mathew, E., Dorati, R., Genta, I., Conti, B., ... & Lamprou, D. (2021). Manufacturing of 3d-printed microfluidic devices for the synthesis of drug-loaded liposomal formulations. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(15), 8064. <https://doi.org/10.3390/ijms22158064>

Bankier, C., Edirisinghe, M., Cheong, Y., Ren, G., Cloutman-Green, E., & Ciric, L. (2019). Synergistic antibacterial effects of metallic nanoparticle combinations. *Scientific Reports*, 9(1), 16074. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52473-2>

Bodea, I. M., Cătunescu, G. M., Palop Gómez, A., Fernández Escámez, P. S., & Garre Perez, A. (2023). Training in tools to develop quantitative microbial risk assessment of ready-to-eat food with a comparison between the romanian and spanish food supply chains. *EFSA Journal*, 21, e211006. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.e211006>

Cenobio-Galindo, A. d. J., Campos-Montiel, R. G., Jiménez-Alvarado, R., Almaraz-Buendía, I., Medina-Pérez, G., & Fernández-Luqueño, F. (2019). Development and incorporation of nanoemulsions in food. *International Journal of Food Studies*, 8(2), 105-124. <https://doi.org/10.7455/ijfs.v8i2.614>

Chang, Y., McLandsborough, L., & McClements, D. (2012). Physical properties and antimicrobial efficacy of thyme oil nanoemulsions: influence of ripening inhibitors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(48), 12056-12063. <https://doi.org/10.1021/jf304045a>

Chang, Y., McLandsborough, L., & McClements, D. (2013). Physicochemical properties and antimicrobial efficacy of carvacrol

nanoemulsions formed by spontaneous emulsification. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(37), 8906-8913. <https://doi.org/10.1021/jf402147p>

Correa, M., Martínez, F., Vidal, C., Streitt, C., Escrig, J., & Dicastillo, C. (2020). Antimicrobial metal-based nanoparticles: a review on their synthesis, types and antimicrobial action. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 11, 1450-1469. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.129>

Delgado, K., Quijada, R., Palma, R., & Palza, H. (2011). Polypropylene with embedded copper metal or copper oxide nanoparticles as a novel plastic antimicrobial agent. *Letters in Applied Microbiology*, 53(1), 50-54. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765x.2011.03069.x>

Doost, A., Devlieghere, F., Dirckx, A., & Meeren, P. (2018). Fabrication of origanum compactum essential oil nanoemulsions stabilized using quillaja saponin biosurfactant. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(7), e13668. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13668>

Fang, J., Lin, Y., Wang, P., Alalaiwe, A., Yang, Y., & Yang, S. (2019). The droplet-size effect of squalene@cetylpyridinium chloride nanoemulsions on antimicrobial potency against planktonic and biofilm MRSA. *International Journal of Nanomedicine*, 14, 8133-8147. <https://doi.org/10.2147/ijn.s221663>

Fernando, S. S. N., Gunasekara, T. D. C. P., & Holton, J. (2018). Antimicrobial nanoparticles: applications and mechanisms of action. *Sri Lankan Journal of Infectious Diseases*, 8 (1):2-11. <https://doi.org/10.4038/sljid.v8i1.8167>

Fierascu, I., Fierăscu, I., Baroi, A., Ungureanu, C., Orțan, A., Avramescu, S., ... & Dinu-Pârvu, C. (2022). Phytosynthesis of biological active silver nanoparticles using echinacea purpurea l. extracts. *Materials*, 15(20), 7327. <https://doi.org/10.3390/ma15207327>

Francis, D., Jayakumar, M., & Gokhale, T. (2023). Antimicrobial activity of biogenic metal oxide nanoparticles and their synergistic effect on clinical pathogens. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(12), 9998. <https://doi.org/10.3390/ijms24129998>

Francis, K. (2023). Antibacterial activity of green synthesized silver nanoparticle using banana flower extract. *Iop Conference Series Materials Science and Engineering*, 1291(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1291/1/012010>

Friedman, A., Phan, J., Schairer, D., Champer, J., Qin, M., Pirouz, A., ... & Kim, J. (2013). Antimicrobial and anti-inflammatory activity of chitosan–alginate nanoparticles: a targeted therapy for cutaneous pathogens. *Journal of Investigative Dermatology*, 133(5), 1231-1239. <https://doi.org/10.1038/jid.2012.399>

Garcia, M., Silva, B., Sorrechia, R., Pietro, R., & Chiavacci, L. (2022). Sustainable antibacterial activity of polyamide fabrics containing zno nanoparticles. *Acs Applied Bio Materials*, 5(8), 3667-3677. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00104>

Garre, A., Espín, J., Huertas, J., Periago, P., & Palop, A. (2020). Limonene nanoemulsified with soya lecithin reduces the intensity of non-isothermal treatments for inactivation of listeria

monocytogenes. *Scientific Reports*, 10(1), 3656
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-60571-9>

Govindappa, M., Farheen, H., Chandrappa, C., Channabasava, C., Ravishankar, V., & Raghavendra, V. (2016). Mycosynthesis of silver nanoparticles using extract of endophytic fungi, penicillium species of glycosmis mauritiana, and its antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory and tyrokinase inhibitory activity. *Advances in Natural Sciences Nanoscience and Nanotechnology*, 7(3), 035014.
<https://doi.org/10.1088/2043-6262/7/3/035014>

Gudkov, S., Burmistrov, D., Serov, D., Rebezov, M., Semenova, A., & Lisitsyn, A. (2021). A mini review of antibacterial properties of zno nanoparticles. *Frontiers in Physics*, 9, 641481.
<https://doi.org/10.3389/fphy.2021.641481>

Gürbüz, M. (2024). The antimicrobial effect of eugenol against campylobacter jejuni on experimental raw chicken breast meat model. *Journal of Food Safety*, 44(1), e13104.
<https://doi.org/10.1111/jfs.13104>

Hasssanzadeh, H., Alizadeh, M., & Bari, M. (2018). Formulation of garlic oil-in-water nanoemulsion: antimicrobial and physicochemical aspects. *Iet Nanobiotechnology*, 12(5), 647-652.
<https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2017.0104>

He, Y., Shakuntala, I., Reed, S., Gehring, A., Strobaugh, T., & Irwin, P. (2016). Study on the mechanism of antibacterial action of magnesium oxide nanoparticles against foodborne pathogens. *Journal of Nanobiotechnology*, 14, 1-9.
<https://doi.org/10.1186/s12951-016-0202-0>

Jha, B., Prasad, K., & Jha, A. K. (2018). Cytotoxicity of biogenic gold nanoparticles against lung cancer cell line (A549): an application oriented perspective. <https://doi.org/10.20944/preprints201812.0308.v1>

Kara, A., Vassiliadou, A., Ongoren, B., Keeble, W., Hing, R., Lalatsa, A., ... & Serrano, D. (2021). Engineering 3d printed microfluidic chips for the fabrication of nanomedicines. *Pharmaceutics*, 13(12), 2134. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13122134>

Kim, M. (2016). Nanoparticle-based therapies for wound biofilm infection: opportunities and challenges. *Ieee Transactions on Nanobioscience*, 15(3), 294-304. <https://doi.org/10.1109/tnb.2016.2527600>

Kong, I., Degraeve, P., & Pui, L. P. (2022). Polysaccharide-based edible films incorporated with essential oil nanoemulsions: physico-chemical, mechanical properties and its application in food preservation—a review. *Foods*, 11(4), 555. <https://doi.org/10.3390/foods11040555>

Liang, R., Xu, S., Shoemaker, C., Li, Y., Zhong, F., & Huang, Q. (2012). Physical and antimicrobial properties of peppermint oil nanoemulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(30), 7548-7555. <https://doi.org/10.1021/jf301129k>

Lozhkomoev, A. S., Glazkova, E. A., Svarovskaya, N. V., Bakina, O. V., Khorobraya, E. G., Timofeev, S. S., ... & Psakhie, S. G. (2014, November). Antimicrobial activity of nanostructured composites produced in Al/Zn nanoparticle oxidation in aqueous-

alcoholic solutions. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1623, No. 1, pp. 367-370). American Institute of Physics.

Lü, W., Huang, D., Wang, C., Yeh, C., Tsai, J., Huang, Y., ... & Li, P. (2018). Preparation, characterization, and antimicrobial activity of nanoemulsions incorporating citral essential oil. *Journal of Food and Drug Analysis*, 26(1), 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.12.018>

Macieja, S., Środa, B., Zielińska, B., Roy, S., Bartkowiak, A., & Łopusiewicz, Ł. (2022). Bioactive carboxymethyl cellulose (cmc)-based films modified with melanin and silver nanoparticles (agnps)—the effect of the degree of cmc substitution on the in situ synthesis of agnps and films' functional properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 15560. <https://doi.org/10.3390/ijms232415560>

Martín-Piñero, M., García, M., Santos, J., Alfaro-Rodríguez, M., & Muñoz, J. (2020). Characterization of novel nanoemulsions, with improved properties, based on rosemary essential oil and biopolymers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(10), 3886-3894. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10430>

Mihai, M., Preda, M., Lungu, I., Gestal, M., Popa, M., & Holban, A. (2018). Nanocoatings for chronic wound repair—modulation of microbial colonization and biofilm formation. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(4), 1179. <https://doi.org/10.3390/ijms19041179>

Miranda, A., Akpobolokemi, T., Chung, E., Ren, G., & Raimi-Abraham, B. (2022). Ph alteration in plant-mediated green synthesis and its resultant impact on antimicrobial properties of silver

nanoparticles (Agnps). *Antibiotics*, 11(11), 1592.
<https://doi.org/10.3390/antibiotics11111592>

Miyazawa, N., Hakamada, M., & Mabuchi, M. (2018). Antimicrobial mechanisms due to hyperpolarisation induced by nanoporous Au. *Scientific Reports*, 8(1), 3870.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-22261-5>

Nanakali, N. (2023). Fabrication of nano-encapsulated angelica (heracleum persicum) essential oil for enriching dairy dessert: physicochemical, rheological and sensorial properties. *Iet Nanobiotechnology*, 17(3), 171-181.
<https://doi.org/10.1049/nbt2.12112>

Nasim, S., Tajik, H., Moradi, M., Forough, M., & Ezati, P. (2017). Physical, antimicrobial and antibiofilm properties of zataria multiflora boiss essential oil nanoemulsion. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(7), 1645-1652.
<https://doi.org/10.1111/ijfs.13438>

Niaraki, N. (2024). Antibacterial effects of chitosan-based hydrogels containing trachyspermum ammi essential oil on pathogens isolated from dogs with otitis externa. *BMC Veterinary Research*, 20(1), 130. <https://doi.org/10.1186/s12917-024-03971-7>

Niño-Martínez, N., Orozco, M., Martínez-Castañón, G., Méndez, F., & Ruíz, F. (2019). Molecular mechanisms of bacterial resistance to metal and metal oxide nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(11), 2808.
<https://doi.org/10.3390/ijms20112808>

Nirmala, M. J., & Nagarajan, R. (2017). Recent research trends in fabrication and applications of plant essential oil based nanoemulsions. *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 08(2), 000434. <https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000434>

Nirmala, M. J., Durai, L., Rao, K. A., & Nagarajan, R. (2020). Ultrasonic nanoemulsification of Cuminum cyminum essential oil and its applications in medicine. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 795-807. <https://doi.org/10.2147/ijn.s230893>

Olmos, D., Pontes-Quero, G., Corral, A., González-Gaitano, G., & González-Benito, J. (2018). Preparation and characterization of antimicrobial films based on ldpe/ag nanoparticles with potential uses in food and health industries. *Nanomaterials*, 8(2), 60. <https://doi.org/10.3390/nano8020060>

Patel, E., Pradeep, P., Kumar, P., Choonara, Y., & Pillay, V. (2019). Oroactive dental biomaterials and their use in endodontic therapy. *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials*, 108(1), 201-212. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34379>

Polívková, M., Hubáček, T., Staszek, M., Švorčík, V., & Siegel, J. (2017). Antimicrobial treatment of polymeric medical devices by silver nanomaterials and related technology. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(2), 419. <https://doi.org/10.3390/ijms18020419>

Radi, M., Akhavan-Darabi, S., Akhavan, H., & Amiri, S. (2017). The use of orange peel essential oil microemulsion and nanoemulsion in pectin-based coating to extend the shelf life of fresh-cut orange. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2), e13441. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13441>

Rai, M., Deshmukh, S., Ingle, A., & Gade, A. (2012). Silver nanoparticles: the powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 112(5), 841-852. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05253.x>

Ramalingam, K., Amaechi, B., Ralph, R., & Lee, V. (2012). Antimicrobial activity of nanoemulsion on cariogenic planktonic and biofilm organisms. *Archives of Oral Biology*, 57(1), 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2011.07.001>

Rao, J., & McClements, D. (2011). Formation of flavor oil microemulsions, nanoemulsions and emulsions: influence of composition and preparation method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(9), 5026-5035. <https://doi.org/10.1021/jf200094m>

Ribeiro, A., Dias, A., & Zille, A. (2022). Synergistic effects between metal nanoparticles and commercial antimicrobial agents: a review. *Acs Applied Nano Materials*, 5(3), 3030-3064. <https://doi.org/10.1021/acsanm.1c03891>

Ros-Chumillas, M., Garre, A., Maté, J., Palop, A., & Periago, P. (2017). Nanoemulsified d-limonene reduces the heat resistance of salmonella senftenberg over 50 times. *Nanomaterials*, 7(3), 65. <https://doi.org/10.3390/nano7030065>

Sadrolhosseini, A. R., Mahdi, M. A., Alizadeh, F., & Rashid, S. A. (2019). Laser ablation technique for synthesis of metal nanoparticle in liquid. *Laser Technology and its Applications*, 63-83. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80374>

Salvia-Trujillo, L., Rojas-Graü, M., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2014). Impact of microfluidization or ultrasound processing on the antimicrobial activity against *Escherichia coli* of lemongrass oil-loaded nanoemulsions. *Food Control*, 37, 292-297. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.09.015>

Sánchez-Sanhueza, G., Fuentes-Rodríguez, D., & Bello-Toledo, H. (2016). Copper nanoparticles as potential antimicrobial agent in disinfecting root canals: a systematic review. *International Journal of Odontostomatology*, 10(3), 547-554. <https://doi.org/10.4067/s0718-381x2016000300024>

Savitha, Pn., Dayalan, M., & Choudhary. V. T. (2023). Evaluation of antimicrobial properties of conventional poly methyl methacrylate denture base resin materials containing silver doped titanium dioxide nanoparticles against cariogenic bacteria and candida albicans. *Ip Annals of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, 9(4), 206-213. <https://doi.org/10.18231/j.aprd.2023.039>

Senarathna, U., Fernando, S., Gunasekara, T., Weerasekera, M., Hewageegana, H., Arachchi, N., ... & Jayaweera, P. (2017). Enhanced antibacterial activity of tio2 nanoparticle surface modified with garcinia zeylanica extract. *Chemistry Central Journal*, 11, 1-8. <https://doi.org/10.1186/s13065-017-0236-x>

Sharma, A. (2024). Biogenic zinc oxide nanoparticles: an insight into the advancements in antimicrobial resistance. *Ecs Journal of Solid State Science and Technology*, 13(4), 047002. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ad397f>

Shen, Y., Wu, C., Wu, T., Li, Y., Chen, S., Yuan, C., ... & Hu, Y. (2018). Eugenol-chitosan nanoemulsions by ultrasound-mediated

emulsification: formulation, characterization and antimicrobial activity. *Carbohydrate Polymers*, 193, 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.101>

Silva, B., Abuçafy, M., Manaia, E., Oshiro, J., Chiari-Andréo, B., & Pietro, R. (2019). <p>relationship between structure and antimicrobial activity of zinc oxide nanoparticles: an overview</p>. *International Journal of Nanomedicine*, 14, 9395-9410. <https://doi.org/10.2147/ijn.s216204>

Silva, M., Aguiar, M., Rodrigues, A., Miranda, M., Araújo, M., Rolim, I., ... & Souza, Â. (2018). Utilização de nanopartículas no tratamento de feridas: revisão sistemática. *Revista Da Escola De Enfermagem Da Usp*, 51. <https://doi.org/10.1590/s1980-220x2016043503272>

Spirescu, V., Chircov, C., Grumezescu, A., & Andronesu, E. (2021). Polymeric nanoparticles for antimicrobial therapies: an up-to-date overview. *Polymers*, 13(5), 724. <https://doi.org/10.3390/polym13050724>

Stavis, S., Fagan, J., Stopa, M., & Liddle, J. (2018). Nanoparticle manufacturing – heterogeneity through processes to products. *Acs Applied Nano Materials*, 1(9), 4358-4385. <https://doi.org/10.1021/acsanm.8b01239>

Tania, I., Ali, M., & Akter, M. (2022). Fabrication, characterization, and utilization of zno nanoparticles for stain release, bacterial resistance, and uv protection on cotton fabric. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 17, 15589250221136378. <https://doi.org/10.1177/15589250221136378>

Tominc, G. (2024). Formulation and characterization of nanoemulsion incorporating chamomilla recutita l. extract stabilized with hyaluronic acid. *Pharmaceutics*, 16(6), 701. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16060701>

Touayar, M., Zayani, R., Messaoud, C., & Salman, H. (2023). Influence of droplet size on the antibacterial efficacy of citral and citronella oil nanoemulsions in polysaccharide coated fresh-cut apples. *Scientific Reports*, 13(1), 10460. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37528-9>

Tripathi, A., Sharma, R., Agarwal, A., & Haleem, R. (2021). Nanoemulsions based edible coatings with potential food applications. *International Journal of Biobased Plastics*, 3(1), 112-125. <https://doi.org/10.1080/24759651.2021.1875615>

Varghese, R. (2024). Antimicrobial activity of silver nanoparticles synthesized using ocimum tenuiflorum and ocimum gratissimum herbal formulations. *Cureus*, 16(2). <https://doi.org/10.7759/cureus.54994>

Varghese, R. (2024). Antimicrobial activity of zinc oxide nanoparticles synthesized using ocimum tenuiflorum and ocimum gratissimum herbal formulation against oral pathogens. *Cureus*, 16(2). <https://doi.org/10.7759/cureus.53562>

Wahab, A., Li, L., Matin, A., Karim, M., Alharbi, H., Abdala, A., ... & Haque, R. (2021). Silver micro-nanoparticle-based nanoarchitectures: synthesis routes, biomedical applications, and mechanisms of action. *Polymers*, 13(17), 2870. <https://doi.org/10.3390/polym13172870>

Wang, L., Hu, C., & Shao, L. (2017). The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 1227-1249. <https://doi.org/10.2147/ijn.s121956>

Welearegay, T., Cindemir, U., Österlund, L., & Ionescu, R. (2018). Fabrication and characterisation of ligand-functionalised ultrapure monodispersed metal nanoparticle nanoassemblies employing advanced gas deposition technique. *Nanotechnology*, 29(6), 065603. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa9f65>

Wongpinyochit, T., Totten, J., Johnston, B., & Seib, F. (2019). Microfluidic-assisted silk nanoparticle tuning. *Nanoscale Advances*, 1(2), 873-883. <https://doi.org/10.1039/c8na00208h>

Yemmireddy, V. & Hung, Y. (2017). Using photocatalyst metal oxides as antimicrobial surface coatings to ensure food safety—opportunities and challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(4), 617-631. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12267>

Ziani, K., Chang, Y., McLandsborough, L., & McClements, D. (2011). Influence of surfactant charge on antimicrobial efficacy of surfactant-stabilized thyme oil nanoemulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(11), 6247-6255. <https://doi.org/10.1021/jf200450m>

Zúñiga-Miranda, J. (2023). Iron oxide nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activity. *Nanomaterials*, 13(22), 2919. <https://doi.org/10.3390/nano13222919>

BÖLÜM II

Akıllı Paketleme: Doğal Pigmentli pH Göstergeleri

Ümmü Gülsüm KOÇ²

Giriş

1. Akıllı Paketleme

Gıda ambalajı, gıdaların depolanması, taşınması ve satışı sırasında kalitesini ve güvenliğini korumak için kritik öneme sahiptir. Geleneksel ambalaj malzemeleri öncelikle gıdaları mekanik kötü muameleden, zararlı ışık dalgalarından ve istenmeyen reaksiyonları teşvik eden gazlardan korumak ve ayrıca bozulma/patojenik mikroorganizmalar veya toksik kimyasallarla kontaminasyonu önlemek için tasarlanmıştır (Wang & Wang, 2017). Bununla birlikte, gıda ambalajı, içindeki gıdaların doğası ve durumu hakkında bilgi sağlamak gibi başka roller de oynayabilir (Yam & Lee, 2012). Örneğin, ambalaj malzemelerindeki metin ve grafikler

² Kafkas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı, Kars/Türkiye, Orcid: 0000-0003-1478-2616, ummu199596@gmail.com

genellikle tüketicilere gıdaların türü, kökeni, bileşimi ve besin içeriği ile çevresel sürdürülebilirlikleri hakkında bilgi sağlar. Bu, metin ve resimlerin yüzeylerine basılabilmesini veya kazınabilmesini gerektirir. Ayrıca gıda ambalajları açılması ve kapatılması kolay olarak, gıdaların taşınmasını ve depolanmasını kolaylaştırmak için de tasarlanabilir. Bazı gıdalar için, ambalaj malzemelerinin kaynatma, fırınlama veya mikrodalgada pişirme gibi pişirme işlemlerine dayanacak şekilde tasarlanması da gerekebilir. Sonuç olarak, gıda ambalaj malzemelerinin son derece çok yönlü olması, farklı boyut ve şekillerde işlenebilmesi ve farklı işlevsel özelliklere sahip olması gerekmektedir (Yam & Lee, 2012).

Geleneksel olarak, yaygın olarak kullanılan birçok ambalaj malzemesi polietilen tereftalat, polietilen, polivinil klorür, polipropilen ve polistiren gibi petrol bazlı plastiklerden üretilmiştir (Napper & Thompson, 2019). Ancak, bu tür ambalaj malzemelerinin üretimi ve atılması, gelecekte önemli çevre kirliliğine neden olacağı düşünülmektedir (Napper & Thompson, 2019). Bu nedenle, yenilebilir proteinler, polisakkaritler ve gıda atığı akışlarından izole edilen lipidler gibi daha sürdürülebilir bileşenlerden ambalaj malzemelerinin tasarımı ve üretimine ilgi duyulmaktadır (Cazón & ark., 2017). Dahası akıllı ambalaj malzemeleri geliştirmeye ilgi duyulmaktadır (Firouz, Mohi-Alden & Omid, 2021). Akıllı ambalaj malzemeleri, bir paketin içindeki gıdanın kalitesi, uygunluğu veya kontaminasyon durumu gibi doğası hakkında bilgi sağlayabilir (Şekil 1).

Akıllı ambalaj malzemeleri ambalajlanmış gıdanın veya gıdanın çevresindeki ortamın durumunu izleyen malzemeler ve maddeler olarak tanımlanır (Cheng & ark., 2022). Bu nedenle bu

malzemeler tüketicilere gıdaların kalitesi ve güvenliği hakkında bilgi sağlayabilir ve bu da satın alma ve tüketim kararlarına yardımcı olabilir. Etkili akıllı ambalaj malzemelerinin geliştirilmesi, gıda bilimi, malzeme bilimi, mikrobiyoloji ve sensör teknolojisi dahil olmak üzere çeşitli disiplinlerinin beraber çalışmasını gerektirir. Çünkü bu ambalaj malzemeleri, paketlenmiş gıdanın iç veya dış ortamındaki değişiklikleri algılayabilen, kaydedebilen ve/veya sunabilen farklı akıllı bileşenleri entegre eder (Sohail, Sun & Zhu, 2018).



Şekil 1. Akıllı paketlenme ile gıdaların görsel olarak izlenmesi
Cheng & ark., 2022).

Akıllı ambalaj malzemeleri kullanılarak gıdaların durumunun sürekli izlenmesi, gıda kalitesini artırabilir, gıda israfını azaltabilir (Poyatos-Racionero & ark., 2018) ve tüketicileri gıda zehirlenmesinden koruyabilir (Sohail, Sun & Zhu, 2018). Gıda ürünlerindeki kalite veya güvenlik durumlarıyla ilişkilendirilebilen belirli değişikliklere yanıt veren çeşitli algılama mekanizmaları

içeren ambalaj malzemeleri mevcuttur. Bunlar şu şekildedir: (i) Zaman-sıcaklık sensörleri ve göstergeleri, (ii) Nem sensörleri, (iii) Oksijen sensörleri, (iv) Mikroorganizma sensörleri, (v) Spesifik kimyasal sensörler, (vi) pH sensörleri (Chen & ark., 2022).

1.1. Zaman-sıcaklık sensörleri ve göstergeleri

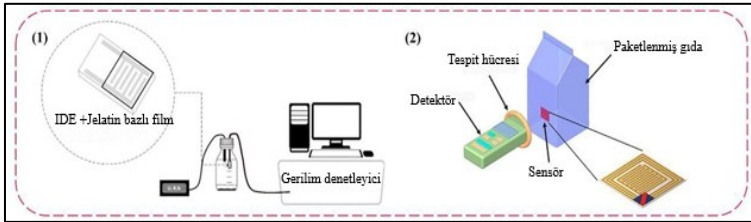
Zaman ve sıcaklık, çoğu gıdanın kalitesini etkileyen temel faktörlerdir. Hemen hemen tüm gıdaların bir raf ömrü sınırı vardır, ancak gıdanın son kullanma tarihinin diğer çevresel faktörlere maruz kalması nedeniyle kısalıp kısalmadığını belirlemek zordur (Zhang, & ark., 2016). Benzer şekilde, sıcaklık da çoğu gıdanın kalitesini etkileyen temel faktörlerden biridir. Bu nedenle, gıda tedarik zincirinde zaman ve sıcaklığın gerçek zamanlı izlenmesini gerçekleştirmek çok önemlidir. Zaman-sıcaklık göstergesi (TTI), depolama, dağıtım ve tüketim sürecinin tamamında gıdanın kalan raf ömrünün termal geçmişini kaydetmek ve göstermek için kullanılabilir (Wang & ark., 2015). Zaman-sıcaklık göstergesinin (TTI) çalışma prensibi, zaman ve sıcaklık değişiklikleri sürecinde iki veya daha fazla madde arasındaki farklı reaksiyonlara dayanır ve bunun sonucunda baskın reaksiyon olarak göstergenin geri döndürülemez şekilde renk değiştirmesi meydana gelir (Firouz, Mohi-Alden & Omid, 2021). Günümüzde zaman-sıcaklık göstergesi (TTI) farklı çalışma prensiplerine göre kimyasal TTI, fiziksel TTI, enzimatik reaksiyon TTI, mikrobiyal TTI ve diğer TTI olarak sınıflandırılabilir (Chen & ark., 2022).

1.2. Nem sensörleri

Et, balık, meyve, sebze ve diğer taze ürünler gibi yüksek su aktivitesine sahip gıdalar, ambalajın içindeki nem çok düşükse nem

kaybedecek ve kuruyacaktır. Tersine, kurutulmuş veya toz gıdalar gibi düşük su aktivitesine sahip gıdalar, ambalajın içindeki nem çok yüksekse nemi emecek ve bozulacaktır (Gaikwad, Singh & Ajji, 2019). Bu nedenle, gıda ambalajının içindeki nemin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi faydalı olacaktır. Şu anda, kristallerin dielektrik özellikleri, direnci ve rezonans frekansındaki değişikliklerin ölçümleri de dahil olmak üzere nem izleme için kullanılabilecek bir dizi yaklaşım bulunmaktadır (Chen & ark., 2022).

Proteinler, dielektrik özellikleri neme duyarlı olduğundan, genellikle akıllı gıda paketlenme malzemelerinin hazırlanmasında kullanılır. Örneğin, paketlenmiş gıdaların bağıl nemindeki değişiklikler, dielektrik özellikleri nem içeriğine bağlı olan jelatin bazlı bir tabaka ve algılanabilir bir sinyal sağlayan bir yarı iletken görevi gören bir ZnO tabakası içeren nanokompozit filmler kullanılarak izlenmiştir (Şekil 2) (Pereira & ark., 2020). Benzer şekilde, buğday gluteni de nem içeriğine bağlı olarak dielektrik özelliklerindeki değişikliklere dayanarak paketlenme malzemelerindeki bağıl nemdeki değişiklikleri tespit etmek için kullanılmıştır (Bibi & ark 2016).

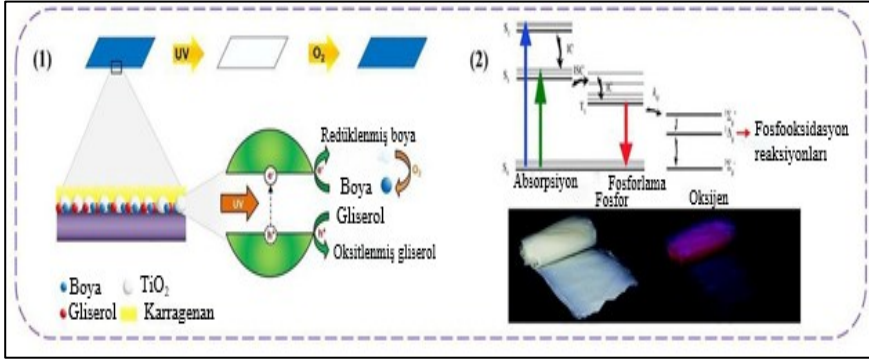


Şekil.2. Akıllı gıda ambalajı tanımlama ilkesinin şematik diyagramı. Nem sensörleri. IDE (İç içe geçmiş elektrot) (Cheng & ark., 2022).

Genel olarak, neme duyarlı akıllı ambalaj malzemeleri, tozlar, tahıllar ve atıştırılmalıklar gibi kurutulmuş paketlenmiş gıdaları içeren uygulamalar için özellikle yararlı olabilir, çünkü bu ürünlerin kalite özellikleri büyük ölçüde su aktivitelerine bağlıdır (Cheng & ark., 2022).

1.3. Oksijen sensörleri

Birçok gıda, uzun süre yüksek oksijen seviyelerine maruz kaldığında istenmeyen kimyasal bozulmaya uğrar, örneğin doymamış yağlar veya pigmentler. Sonuç olarak, gıda işleme operasyonları ve paketleme malzemeleri genellikle paketlenmiş gıdalardaki oksijen seviyesini kontrol etmek üzere tasarlanır; bu da genellikle oksijenin dışarı atılması ve nitrojen gibi inert bir gazla değiştirilmesi veya oksijeni gidermek için vakum çekilmesiyle sağlanır. Bununla birlikte, paketleme malzemesi tamamen geçirgen değilse veya hasar görmüşse oksijen paketlenmiş bir gıdaya girebilir ve bu da gıda kalitesinde bir azalmaya yol açabilir. Bu nedenle, gıdalardaki oksijen seviyelerini tespit edebilen akıllı paketleme malzemelerinin geliştirilmesine ilgi duyulmaktadır. Şu anda, gıda paketlemesindeki oksijen konsantrasyonunu izlemek için kullanılan iki ana yaklaşım vardır: kolorimetrik redoks tabanlı sensörler (Şekil 3 (1)) ve fosforesans tabanlı sensörler (Şekil 3 (2)) (Cheng & ark., 2022).



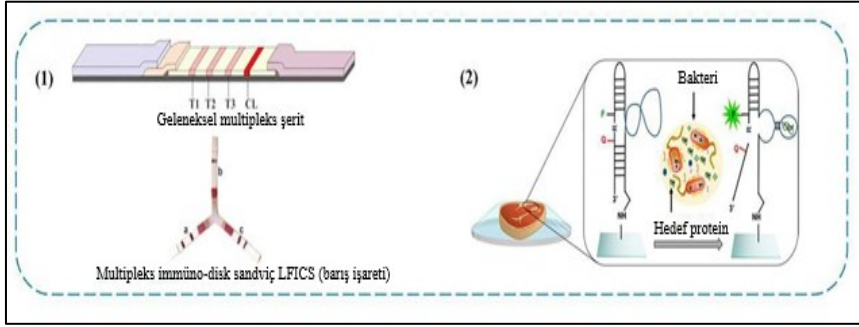
Şekil 3. Akıllı gıda ambalajı tanımlama ilkesinin şematik diyagramı. Oksijen sensörleri. IDE (İç içe geçmiş elektrot) (Cheng & ark., 2022).

1.4. Mikroorganizma sensörleri

Bazı mikroorganizmaların varlığı, ekmekte maya veya yoğurtta lactobacillus kullanımı gibi belirli gıdaların üretimi için gereklidir. Buna karşılık, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella typhimurium* ve *Listeria monocytogenes* gibi bozulmaya neden olan veya patojenik mikroorganizmaların varlığı gıda kalitesinde düşüşlere, gıda israfında artışa ve gıda zehirlenmesi riskine yol açar. Nitekim, bakteriyel kontaminasyon gıdalla ilişkili hastalıkların veya ölümlerin başlıca nedenlerinden biridir (Kim & Kim, 2020). Sonuç olarak, gıdalardaki mikroorganizmaların türünü ve sayısını izleme yeteneği, gıda kalitesini ve güvenliğini sağlamak için önemlidir (Cheng & ark., 2022).

Geleneksel olarak, mikrobiyal tespit yöntemleri genellikle bakteri kültürü, koloni sayımı, polimeraz zincir reaksiyonları (PCR), izotermal amplifikasyon ve enzim bağlı immünosorbent testleri (ELISA) (Kim & Kim, 2020) gibi gelişmiş laboratuvar tekniklerinin kullanımına dayanır. Bu yöntemler son derece hassas ve doğrudur,

ancak genellikle gerçekleştirilmesi zaman alıcı, zahmetli ve/veya pahalıdır. Bu nedenle, araştırmacılar, tüketicilerin gıdaların kontamine olup olmadığını hızlı bir şekilde tespit edebilmeleri için gıda ambalaj malzemelerine entegre edilebilecek hızlı mikrobiyal tespit yöntemleri geliştirmeye çalışmaktadır. Günümüzde, akıllı gıda ambalaj malzemelerinde bakteriyel tespit için başlıca iki yöntem kullanılmaktadır: lateral akış test şeridi (LFTS) teknolojisi (Şekil 4 (1)) ve DNAzyme prob teknolojisi (Şekil 4 (2)) (Cheng & ark., 2022).



Şekil 4. Akıllı gıda ambalajı tanımlama ilkesinin şematik diyagramı. Mikroorganizma sensörleri (Cheng & ark., 2022).

1.5. Spesifik kimyasal sensörler

Gıda bozulma sürecinde, genellikle uçucu bazik azot bileşikleri, biyogen aminler, kükürt bileşikleri ve biyotoksinler gibi çeşitli toksik ve zararlı maddeler üretilir. Bu maddelerin varlığının ölçülmesi, bu nedenle, gıda kalitesini ve bozulmasını gösterebilir (Cheng & ark., 2022).

Et ve deniz ürünlerinin bozulma sürecinde trimetilamin (TMA), dimetilamin (DMA) ve amonyak gibi uçucu bazik azot maddeleri üretilir. Şu anda, bu maddeleri izlemek için geliştirilmiş

üç ana sensör yöntemi bulunmaktadır: (i) pH duyarlı kolorimetrik gaz sensörleri; (ii) yarı iletken gaz sensörleri; (iii) metal nanopartikül plazma sensörleri. Bu sensörler, bu aminlerin alkali yapısının pH'ta bir artışa yol açması ve bunun da kullanılan boyada bir renk değişimi oluşturması gerçeğine dayanmaktadır (Huang & ark.,2016; Zhou & ark., 2019). Yarı iletken gaz sensörleri, aminler emildikten sonra elektrik direncindeki değişikliklerden kaynaklanan sensör malzemesinin elektrik iletkenliğindeki değişiklikleri ölçerek aminleri dolaylı olarak ölçer (Park & ark., 2013).

Aminler metal nanopartiküllerin yüzeylerine doğrudan veya modifiye edilmiş bir tabaka aracılığıyla adsorbe olduğunda, metal nanopartiküllerin yüzeyinin kırılma indisi değişir, bu da rezonans emilim dalga boyunun kırmızıya kaymasına ve LSPR zirvesinin sönümlenmesinin artmasına neden olur. Bu değişim, aminleri hızlı, basit ve uygun maliyetli bir şekilde tespit etmek için barkod tarayıcı gibi taşınabilir bir optik sistem tarafından tespit edilebilir (Tseng & ark., 2017) (Şekil 5 (1)).

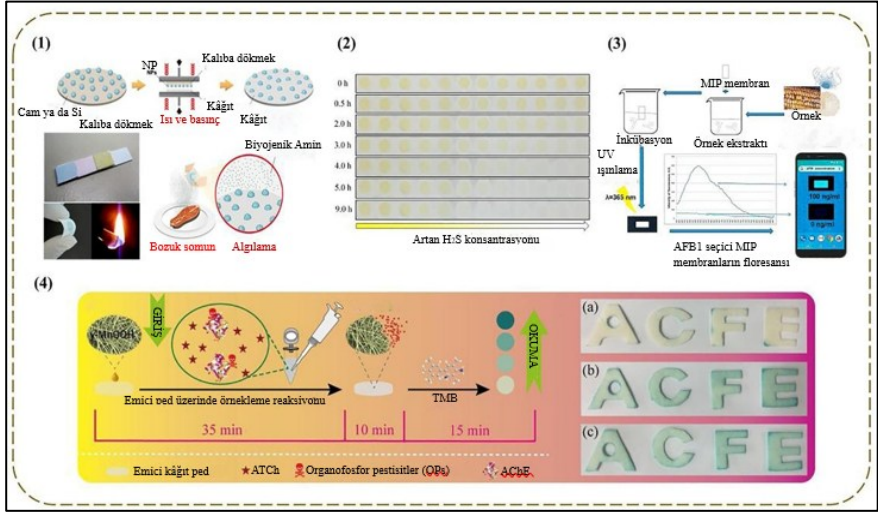
Hidrojen sülfür, et, yumurta ve süt gibi protein içeren gıdaların bozulması sırasında açığa çıkan başlıca uçucu maddelerden biridir. Çoğu tüketicinin istenmeyen bir aromaya yol açarak gıda kalitesini ve kabulünü azaltır. Son zamanlarda, hidrojen sülfürü izlemek için akıllı gıda ambalaj malzemeleri geliştirilmiştir. Bugüne kadar, akıllı gıda ambalajlarında hidrojen sülfür seviyelerinin tespiti için kullanılan iki ana yaklaşım olmuştur: (i) elektrokimyasal sensörler ve (ii) metal nanopartikül plazma sensörleri (Cheng & ark., 2022).

Hidrojen sülfürün tespiti, hidrojen sülfürün gümüş nanopartiküller gibi metal nanopartiküllerle reaksiyonuna dayanarak

gümüş sülfür üretir. Gümüş sülfürün oluşumu, yerel yüzey plazmon rezonansında (LSPR) önemli değişikliklere yol açar ve böylece gıdalardaki hidrojen sülfürün varlığını tespit etmek için kullanılabilen görünür renk değişimlerine neden olur (Zhai & ark., 2019) (Şekil 5 (2)).

Akıllı gıda paketlenme, organofosfatlı pestisitler ve aflatoksinler de dahil olmak üzere gıdalarda bulunabilecek diğer toksik madde türlerini tespit etmek için de geliştirilmektedir. Organofosfatlı pestisitler, organizmalarda AChE'nin aktif bölgesine geri dönüşümsüz şekilde bağlanarak asetilkolinesterazı (AChE) zehirleyen bir nörotoksin gibi davranır. Parçalanabilir bir nano-enzim olarak γ -MnOH nanoteli ve renk göstergesi olarak 3,3', 5,5'-tetrametilbenzidini (TMB) kullanan ve organofosforlu pestisitlerin ve asetilkolinesterazın aktivitesini hızlı ve hassas bir şekilde tarayan basit bir kolorimetrik kâğıt sensörü geliştirilmiştir (Huang & ark., 2019) (Şekil 5 (3)).

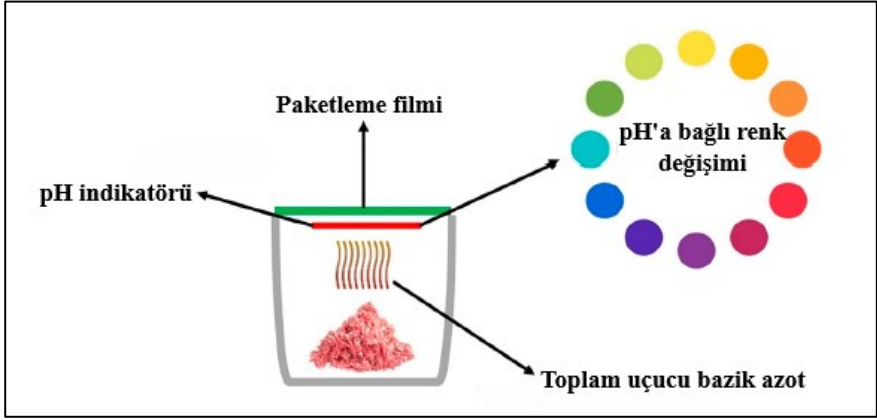
Aflatoksinler, *Aspergillus flavus* ve *Aspergillus parasiticus* gibi mikroskopik mantar türleri tarafından üretilen toksik mutajenler ve kanserojenlerdir. Bu mikotoksinler sıklıkla mısır, darı, buğday, baharatlar, kakao, kahve çekirdekleri, fındık, bazı meyve ve sebzeleri kirletir (Cheng & ark., 2022). Bu mikotoksinleri tespit etmek için akıllı telefona dayalı yeni bir optik biyonomik sensör geliştirilmiştir. Sensör, hedef analitleri seçici bir şekilde tanımlayabilen ve floresan bir sensör kullanarak ölçülebilir bir yanıt üretebilen moleküler olarak basılı bir polimer filme dayanmaktadır. Akıllı telefonun kamerası, Aflatoksin B1'in (Sergeyeva & ark., 2019) (Şekil 5 (4)) hızlı ve hassas bir şekilde gerçek zamanlı tespitini sağlayan kayıt ve görüntü analizi için kullanılabilir.



Şekil 5. Akıllı gıda ambalajı tanımlama ilkesinin şematik diyagramı. Spesifik kimyasal sensörler (Cheng & ark., 2022).

2. pH Göstergeleri

pH, paketlenmiş gıdaların dış ve iç özelliklerindeki değişimlerle birlikte, gıda bozulmasının hayati işaretlerinden biridir. Bu değer, mikrobiyal aktivite, endojen enzimler ve protein parçalanması ile ilişkilidir; bu durum gıdanın türüne (et, balık, süt, kümes hayvanları vb.) ve depolama koşullarına bağlıdır. Mikrobiyal büyüme tarafından salınan metabolitler (örneğin, organik asitler, aminler, hidrojen klorür, kükürt bileşikleri, karbondioksit vb.) gıdanın pH'ını veya gıda çevresindeki ortamın pH'ını değiştirir. Bu değişiklikler, gıda bozulmasının işareti olarak kabul edilebilir (Şekil 6) (Priyadarshi & ark., 2021).



Şekil 6. Uçucu bileşiklerin üretimi nedeniyle gıda pH'sında meydana gelen değişime yanıt olarak indikatör filmlerinde oluşan renk değişimlerinin gösterimi (Priyadarshi & ark., 2021)

pH göstergesi içeren bir paket, kalite değişikliklerine bağlı olarak pH değerindeki değişimleri tespit edip kaydederek, tüketicilere bir ürünün tazeliği hakkında görsel bilgi sağlar. Genellikle, pH göstergeleri esas olarak pH duyarlı boyalardan ve boya moleküllerini immobilize eden bir tuzak matrisi görevi gören katı desteklerden oluşur. Genel olarak, göstergelerin hazırlanması için üç ana yöntem önerilmektedir. İlk olarak, fiziksel adsorpsiyon: boya, iyon değişimi temelinde katı destek üzerinde immobilize edilir. İkinci olarak, kovalent bağlama prosedürü: boya, örneğin cam veya selüloz gibi bir hidrofilik matrise bağlıdır. Üçüncü olarak, fiziksel tuzaklama: boya, polimer bazlı destek içinde hapsolür (Priyadarshi & ark., 2021).

Bir dizi araştırmacı, pH duyarlı sensörler kullanarak pH değişikliklerini tespit edebilen akıllı gıda ambalaj malzemeleri geliştirmiştir (Pourjavaher & ark., 2017). Şu anda, bu sensörlerin

Jacobson, 2012) ve daha doğal ve biyolojik olarak parçalanabilir malzemelerin geliştirilmesine doğru bir hareket olduğu yönünde bazı endişeler vardır. Bu nedenle, doğal pH duyarlı boyalar, akıllı ambalaj malzemelerinin geliştirilmesine yönelik son araştırmaların çoğunun odak noktası olmuştur.

pH göstergelerinin performansının, hassasiyet, tersine dönebilirlik, stabilite ve tepki süresi açısından, boyanın türüne, katı desteğe ve immobilizasyon prosedürüne bağlı olduğu iyi bilinmektedir. Farklı bakteri popülasyonları, laktik asit, asetik asit, amonyak, karbon dioksit vb. gibi metabolitler salgılar ve bu metabolitler, gıda paketinin içine entegre edilmiş göstergelerle reaksiyona girerek renk değişimi yoluyla görsel bilgi sağlar. Genellikle, pH göstergeleri kimyasal dedektörler olarak işlev görür ve havadaki belirli koku bileşenlerini, örneğin alkali gazlar veya CO₂'yi gösterir. Bu arada, çözelti içinde hidrojen iyonları (H⁺) veya hidronyum iyonları (H₃O⁺) ile tepki verirler. pH duyarlı boyaların renk değişim mekanizması, asidik veya alkalın bileşiklerin neden olduğu rezonans etkisi ile ilgilidir. Asidik bileşikler, hidroksil gruplarındaki negatif yükün dağılımını sağlarken, alkalın bileşikler ise bunların deprotonasyonuna neden olur. Gösterge etiketleri genel olarak iki ana bileşenden oluşur: biri, pH-yanıtlı renk değişimi gösteren bir boyadır; diğeri ise boya moleküllerini immobilize eden bir katı destektir. Son zamanlarda, çeşitli sentetik boyalar ve doğal renkli maddeler, pH-yalıtım göstergeleri geliştirmek için çeşitli katı altlıklara immobilize edilmiştir (Priyadarshi & ark., 2021).

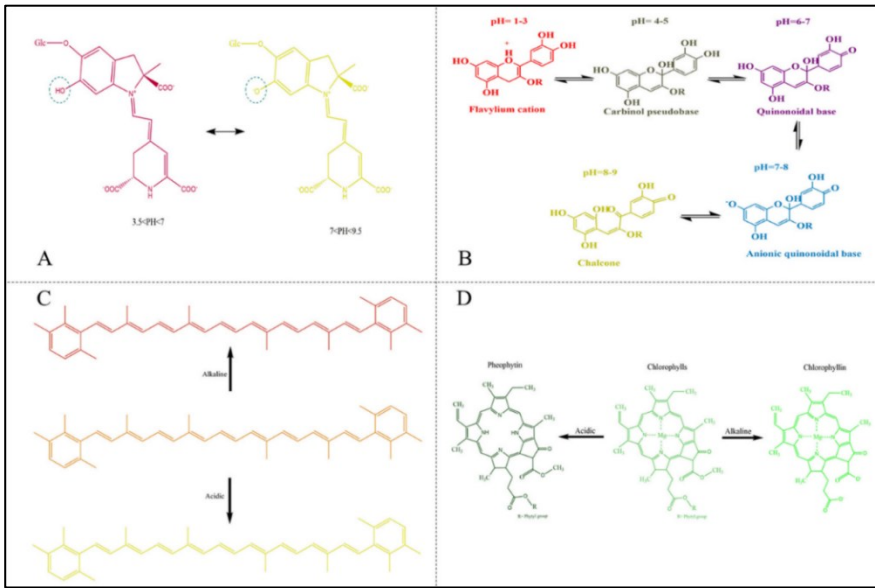
2.1. pH'a duyarlı paketlenme için doğal gıda renklendiricilerinin özellikleri

Temelde, kimyasal tepkiye duyarlı bir renk seçerken dört temel husus göz önünde bulundurulmalıdır: (i) renkli maddelerin istenen analiz ile güçlü bir tepki vermesi; (ii) reaksiyon sonrası renk farkı ve yoğun bir kromofora sahip çok güçlü bir renk etkileşimi; (iii) genellikle bir gösterge/sensör dizisinde çapraz tepki veren çeşitli pH duyarlı renk gruplarının varlığı ve (iv) bulguların yeniden üretilebilir ve güvenilir olması. Genellikle, kimyasal tepkimeye duyarlı (gösterge) boyalar pH değişiklikleri, gazlar, zaman-sıcaklık, kimyasal kirleticiler ve uçucu organik bileşenler üzerine kuruludur. Kimyasal tepkimeye duyarlı renkler, renkli sensörler gibi akıllı sistemlerin ana algılama birimlerini oluşturur. Bu bileşikler, çevresel koşullara bağlı olarak renklerini değiştirebilirler. Şu anda, pH göstergelerinin tasarımı, düşük maliyeti, bol bulunabilirliği, kolay hazırlanabilirliği ve güvenilir halokromik kapasitesi nedeniyle doğal boyalar temelinde optik sensörler (renkli) şeklinde araştırmacıların ilgisini çekmektedir (Alizadeh-Sani & ark., 2020).

Genellikle, pH, özellikle doğal renklerin stabilitesini değerlendirmek için en bilinen göstergelerden biridir. Doğal renklerin pH değişikliklerine ve diğer faktörlere olan stabilitesi ve tepkisi, pigmentin türüne bağlıdır. Örneğin, antosiyaninler neredeyse farklı renklerin tam bir spektrumunu içerir ve çözeltinin farklı pH değerlerinde çeşitli renklerde ve kimyasal formlarda bulunabilir (Şekil 8) (Alizadeh-Sani & ark., 2020).

Doğal pigmentlerin çoğu, genellikle doğrudan insan tüketimi için uygun bitki organlarında bulunur. Ancak, bunlar ayrıca gıda işleme endüstrilerinin ürettiği atıklardan, örneğin, yapraklar, kabuklar ve meyve ile sebzelerin kabuklarından elde edilebilir. Bu nedenle, bitki kaynaklarından elde edilen çeşitli doğal pigmentler,

akıllı gıda ambalaj uygulamaları için sentetik boyalara yeşil bir alternatif sağlayabilir (Priyadarshi & ark., 2021). Dünyada birçok doğal renklendirici bulunmasına rağmen, diğer doğal renklendirici bazlı ambalaj filmleri ve hem tazelik izleme hem de gıda koruma alanındaki uygulamaları hakkında incelemeler henüz yetersizdir. Bu nedenle, tüm yaygın doğal renklendiricileri içeren gösterge ve aktif ambalaj filmleri hakkında sistematik bir inceleme, gıda ambalaj endüstrisinin gelişimi için gereklidir (Huang & ark., 2022).

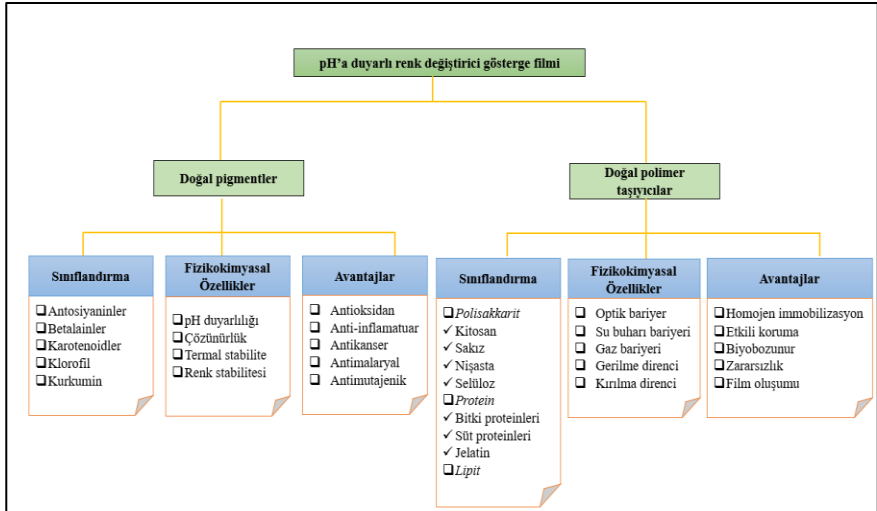


Şekil 8. Doğal renklendiricilerin sulu ortamda çeşitli pH değerlerinde yapısal dönüşümleri ve renk değişimleri Betalainler (A); Antosiyaninler (B); Karotenoidler (C); ve Klorofil (D) (Alizadeh-Sani & ark., 2020)

Günümüzde doğal renklendirici bazlı filmlerle ilgili araştırmaların iki ana konusu bulunmaktadır. Bunlardan biri, farklı renklendirici içeriklerinin veya hazırlık koşullarının film özellikleri

üzerindeki etkilerini değerlendirerek özelliklerin karakterizasyonudur Diğer i se, tazelik izleme ve raf ömrü uzatımı için gösterge veya aktif ambalaj olarak kullanılan ön uygulamalardır. İlginç bir şekilde, bu iki alan da ambalaj sisteminde bulunan moleküler etkileşimlerden etkilenebilmektedir. Genellikle, doğal renklendiricilerin stabilitesini artırmak amacıyla biyobozunur makromoleküler polimerler, petrol bazlı türevler yerine uygun alternatifler olarak kullanılmakta ve doğal renklendiricilerle sıkı bir etkileşim içinde olmaktadır. Doğal renklendirici ile polimer matrisi arasındaki moleküler etkileşimlerin, çeşitli yapısal konformasyonlar nedeniyle değişeceği ve ambalaj özellikleri üzerinde farklı etkiler yaratacağı düşünülmektedir. Ancak, moleküler etkileşimlerin türleri, oluşum mekanizmaları ve film özellikleri üzerindeki etkilerine dair sistematik incelemeler sınırlıdır. (Şekil 9) (Huang & ark., 2022).

Ancak, doğal pigmentlerin gıda göstergeleri olarak renk oluşturma aralığı, renk oluşturma hassasiyeti ve boya penetrasyonu, pH duyarlı gıda ambalajlama ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirilmesi gereken alanlardır. Ayrıca, biyolojik parçalanabilirlik ve yenilenebilirlik avantajları nedeniyle petrol bazlı polimerlerin yerine geçebilecek doğal polimer taşıyıcılar (örneğin nişasta, kitosan) üzerine yapılan araştırmalarda bir artış olmuştur. Ancak, doğal polimerlerin düşük uygunluk, yüksek kırılgenlık, düşük dayanıklılık ve yüksek su hassasiyeti gibi bazı dezavantajları hala mevcuttur. Pigmentler ve polimer taşıyıcıların yanı sıra, film özelliklerini iyileştirmek için bazı plastikleştiriciler veya nanomalzemelerin de eklenmesi gerekmektedir (Zheng & ark., 2022).

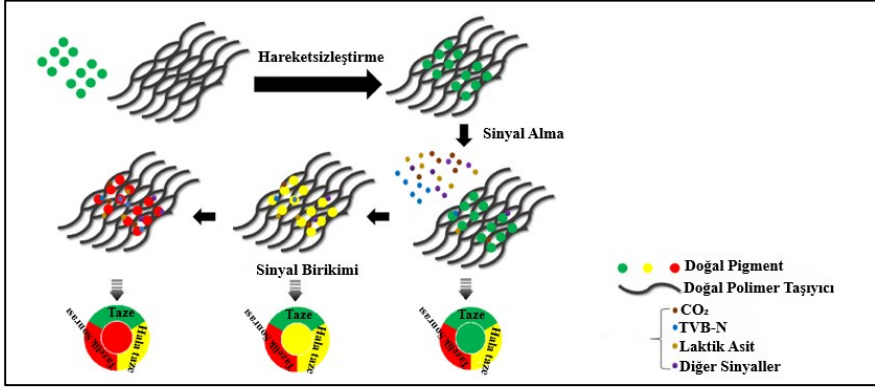


Şekil 9. pH duyarlı kolorimetrik indikatör filmlerin bileşimi, özellikleri ve avantajları (Zheng & ark., 2022)

3. Doğal Renklendiriciler

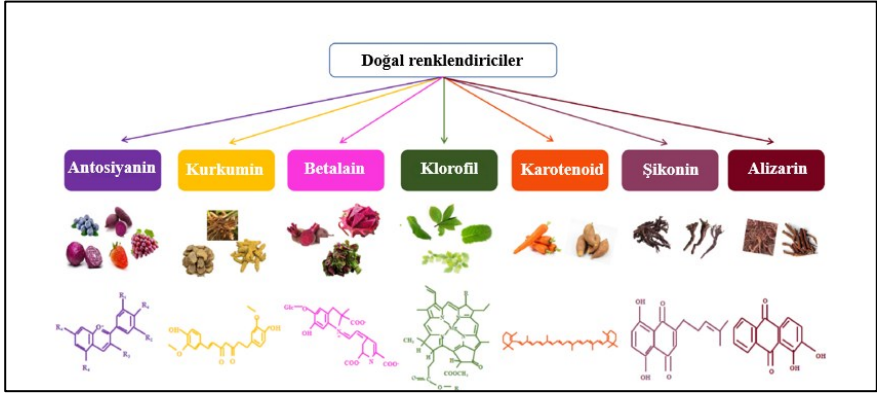
Doğal pigmentler, bol kaynak, kolay erişim, güvenlik, geniş gösterim aralığı, iyi pH duyarlılığı gibi özelliklere sahip oldukları için genellikle akıllı ambalajlama, özellikle de gıda tazeliği izleme amacıyla kullanılmaktadır. Doğal pigmentlerin rengi, meyve ve sebzelerden gelen belirli gazların (örneğin CO₂ ve etilen) konsantrasyon değişiklikleri veya et ürünlerinden gelen bazı uçucu maddelerin (örneğin toplam uçucu bazik azot (TVB-N) ve hidrojen sülfür (H₂S)) depolama sürecindeki değişiklikleri nedeniyle gıdanın kalitesi ile ilişkilidir. Bu durum, gıda bozulması sırasında bu gazların veya uçucu maddelerin birikmesinin ambalaj ortamında pH değişikliklerine yol açması ve bunun sonucunda pH duyarlı

pigmentlerin renginin değişmesiyle gıda kalitesini yansıtması ile ilgilidir (Şekil 10) (Zheng & ark., 2022).



Şekil 10. Doğal pH'a duyarlı kolorimetrik indikatör filminin şematik görünümü (Zheng & ark., 2022)

Doğal pigmentleri etkili bir şekilde kullanmak için göstergelerin film görünümü, depolama koşulları (ışık ve ısı) ve doğal pigmentlerin özellikleri gibi diğer faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Doğal pigmentlerin özellikleri, düşük stabilite, farklı çözünürlükleri ve benzersiz pH duyarlılıkları gibi sınırlı yönler olarak kabul edilmektedir (Zheng & ark., 2022). Doğal pigmentler genellikle antosiyanin, kurkumin, betalain, klorofil, karotenoid, şikonin ve alizarindir (Şekil 11) (Huang & ark., 2022).



Şekil 11. Yeni gıda ambalajlarında en sık kullanılan doğal renklendiricilerin çeşitleri, kaynakları ve yapıları (Huang & ark., 2022).

3.1. Antosiyaninler

Antosiyaninler (şeker bazlı olmayan antosiyaninler) çilek, mor tatlı patates ve sabah sefası gibi bitkilerde yaygın olarak bulunur. Yüksek renk hassasiyeti, iyi antibakteriyel ve antioksidan özellikleri nedeniyle genellikle akıllı gıda ambalajlarında kullanılırlar. Suda ve alkolde iyi çözünürlüğe sahiptirler. Antosiyaninler, benzen halkasındaki ikameleri takiben 6 yaygın antosiyanin formuna ayrılır: pelargonidin, siyanidin, peonidin, delfinidin, petunidin ve malvidin. Yapıları ve renkleri yüksek pH hassasiyeti nedeniyle kolayca değişir. Flavilyum formundaki antosiyaninler kırmızımsıdır ve güçlü asitlik koşullarında nispeten yüksek stabilite gösterirler. pH arttıkça antosiyaninler açık mavi kinoit bazına dönüşür ve stabiliteyi azalır. Alkali koşullar altında antosiyaninler çoğunlukla sarı kalkondur (Zheng & ark., 2022).

Antosiyaninlerin rengi ve stabilitesi, pH, ışık, sıcaklık, metal iyonları, enzimler, antioksidanlar, oksijen, hidroksil veya metoksil

grupları, UV radyasyonu ve kopigmentasyon gibi çeşitli faktörlerden büyük ölçüde etkilenir. Antosiyaninlerin çeşitli pH değerlerinde renk kararlılığı üzerine yapılan araştırmalar, düşük pH'ta flavilyum kationunun oluşumunun antosiyaninleri suda oldukça çözünür hale getirdiğini göstermiştir. Bu nedenle, bu bileşikler asidik koşullarda daha karardır. Öte yandan, antosiyaninler alkali koşullarda parçalanır ve daha belirgin renk değişimleriyle kararsız hale gelir (Şekil 12) (Priyadarshi & ark., 2021).

3.2. Kurkumin

Kurkumin, zerdeçalın (*Curcuma longa*) rizomlarından elde edilen biyolojik olarak aktif bir doğal bileşiktir. Zerdeçal, sarı-turuncu rengini veren dört kurkuminoid türevidir: kurkumin, demetoksikurkumin, bisdemetoksikurkumin ve siklokurkumin. Bunlar arasında kurkumin, diferuloylmetan, olarak da bilinen, en önemli bileşendir. Kurkumin, düşük moleküler ağırlığa, toksik olmayan bir yapıya sahip ve hidrofobik bir difenol bileşiktir; su ve eterde çözünmez, ancak metanol, etanol ve dimetil sülfoksit içinde çözünür. Paketleme uygulamaları için kompozit filmlerin üretilmesinde ilgi çekmiştir çünkü mekanik dayanım, UV koruma, antioksidan özellikler ve antibakteriyel aktivite gibi ek fonksiyonel özellikler sağlar (Priyadarshi & ark., 2021).

Kurkuminin başlangıçtaki rengi sarı-turuncudur ve farklı pH ortamlarında belirgin bir değişim gösterir, bu da onu tazelik izleme için uygun hale getirir. Kurkumin alkali koşullar altında daha stabil olup asidik koşullar altında stabilitesi düşmektedir. Kurkumin, asidik koşullarda (pH = 3.576) nötr koşullara (pH = 7.025) ve alkali koşullara (pH = 10.526) göre daha düşük bir stabilite göstermektedir.

Kurkuminin rengi, pH arttıkça yavaş yavaş parlak sarıdan turuncuya ve kahverengine dönüşmektedir (Şekil 12) (Zheng & ark., 2022).

3.3. Betalain

Betalainler, pancar, ejder meyvesi, armut kaktüsü ve amniyotik sıvı gibi hayvan ve bitkilerde yaygın olarak bulunan suda çözünür azot içeren heterosiklik bir bileşiktir. Betalainlerin rengi, yüksek stabiliteye sahip pH = 3,5-7'de değişmeden kalır. pH arttıkça renkleri mavimsi-kırmızıdan mavi-mora ve sarı kahverengiye değişir. Oksijen, betalainlerin stabilitesi için optimum pH'ı etkilemiştir; burada betalainlerin en yüksek stabilitesi, yüksek oksijen içeriğine sahip pH 5,5-5,8'dir ve oksijen içeriğinin azalmasıyla daha düşük pH'a (pH = 4-5) kayar. Renk, ısıl işleminden etkilenerek kırmızıdan açık kahverengiye doğru kademeli olarak değişmiştir. Betalainler, kırmızı-mor betasiyaninler ve sarı-turuncu betaksantinler olarak ikiye ayrılır (Zheng & ark., 2022).

Asidik ve nötr pH 'da (pH 3–7) yapısal stabiliteyi, betalainlerin çeşitli düşük asidik ve nötr gıdalar için doğal bir gıda renklendirici olarak ticarileştirilmesine katkıda bulunmuştur. Diğer yandan, betalainler belirli koşullarda, özellikle alkaline pH, ışık, sıcaklık, su aktivitesi, enzimler ve oksijen altında en savunmasızdır. İlginç bir şekilde, betalainler yüksek pH değerlerinde yapısal değişiklikler geçirerek renk değişimleri gösterebilir. Distile suda, betalainlerin doğal pH'ı 3.85'tir ve bu durum ona kırmızı bir renk verir; bu nedenle, pH aralığı 3–7'de çözeltinin rengi aynı kalır. pH değeri 8–9'a yükseldiğinde, çözeltinin rengi turuncuya dönerken, pH 10–12'de sarıya döner (Şekil 12) (Priyadarshi & ark., 2021).

3.4. Klorofil

Klorofilin parçalanması, yaprak yaşlanmasından sorumludur ve fotosentezde enerji sağlayan yeşilimsi renkte bir pigment olarak bilinir. Beş ana sınıfa ayrılabilir: Klorofil a ve b yeşil bitkilerde yayginken, klorofil c ve d alglerden, klorofil e ise fotosentetik bakterilerden elde edilir (Huang & ark., 2022).

Klorofil, merkezine bağlı bir iki değerli magnezyum iyonuna sahip bir porfirin bileşeni türüdür. Su ile çözünmez ve antioksidan, anti-inflamatuar ve antitümör etkiler gibi fizyolojik aktivitelere sahiptir. Klorofil, dış sıcaklık, pH ve diğer faktörlerin değişmesi nedeniyle kolayca renk değiştirebilir. Klorofil ısıtıldığında veya asidik bir ortama maruz kaldığında, merkezi magnezyum iyonunun hidrojen iyonları ile yer değiştirmesi nedeniyle rengi parlak yeşilden zeytin yeşiline dönüşür. Ayrıca, klorofilin, lutein, kurkumin ve β -karoten gibi bileşenlere göre hava koşullarına ve ultraviyole ışığa karşı daha iyi dayanıklılığı ve daha yüksek renk stabilitesi vardır; bu da klorofilin gıda ürünlerinde depolama koşullarına yüksek talepleri olmadan daha iyi uygulanabilirlik gösterdiğini kanıtlar (Şekil 11) (Zheng & ark., 2022).

3.5. Karotenoid

Karotenoidin ana kaynakları meyveler, sebzeler, algler, böcekler ve mantarlardır. Farklı biyolojik özelliklere sahip olmalarına rağmen, tüm karotenoidlerin renk oluşumunda benzerlikleri vardır; yani, birbirine bağlı $C=C$ kimyasal bağları, kırmızı/turuncu/sarı renklerinden sorumludur ve renkli bileşikler alkalik koşullarda parçalanır, bu da tazelik izleme için gösterge filmine eklenmeleri için uygundur (Huang & ark., 2022).

Karotenoidler nispeten stabildir ve rengi, düşük asidik ve nötr koşullarda (pH = 2–7) hemen hemen değişmeden kalır. Ancak, alkalın koşullar altında stabilitelele belırgın şekilde azalır. pH değeri yalnızca karotenoidlerin stabilitesini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda renk değışimleleyle de yakından ilişkilidir (Şekil 11) (Zheng & ark., 2022).

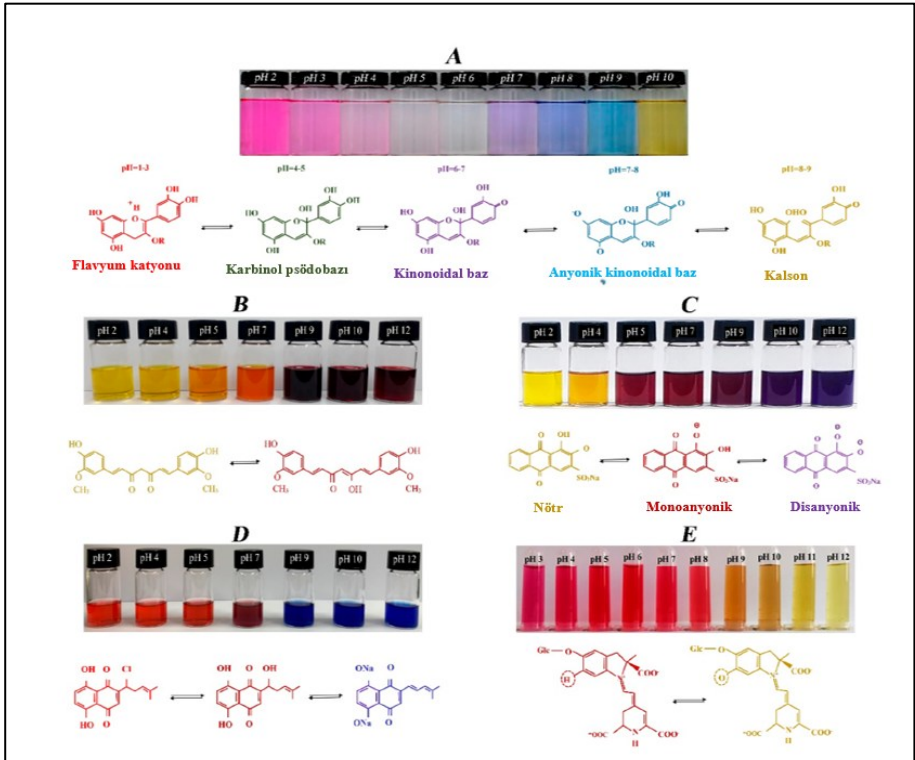
3.6. Şikonin

Şikonin, Doğu tıbbında kullanılan bitkilerden, özellikle *Arnebia euchroma* ve *Lithospermum erythrorhizon* köklerinden çıkarılan yeni ve toksik olmayan bir doğal renklendiricidir. Şikonin, başlangıçta parlak kırmızı bir renge sahiptir. Antosiyanin ile karşılaştırıldığında oda sıcaklığında nispeten stabil olmasına rağmen, farklı asit-baz koşullarında belırgın renk değışiklikleri gösterir. Ayrıca geleneksel bir Çin tıbbı olarak, şikonin anti-inflamatuar, yaraların iyileşmesi, antimikrobiyal, antioksidan, anti-tümör gibi geniş bir biyolojik özellik yelpazesine sahiptir (Şekil 12) (Huang & ark., 2022).

3.7. Alizarin

Antrakınon boyaya ait doğal bir renklendirici olan, Mordant Red 11 ve Türk Kırmızısı olarak da bilinen alizarin, *Rubia tinctorum* L.'nin köklerinden elde edilir. Alizarin, antik çağlardan beri tekstil kumaşlarında ve sanatta boya olarak yaygın olarak kullanılan, turuncu-kahverengi renkte fenolik alkolde çözünen bir bileşiktir. Alizarinin renk değışimleri, asidik, nötr ve alkali koşullar altında sırasıyla nötr, monoanyonik ve dianiyonik formların oluşmasıyla oluşur. pH 2-4'te, benzen halkarındaki fenolik hidroksil grubunun iyonlaşması ve azobenzen boyasının nitro ve azo gruplarının varlığı,

sarı renk gösteren yüksüz moleküllerin oluşmasına yol açar. pH'ın 5-7'ye yükseltilmesi, rezonans etkisi nedeniyle fenolik hidroksil grubunun ayrışmasına yol açar ve bunun sonucunda çözeltide kırmızı görünen monoanyonik moleküller oluşur. pH'ın 9-12'ye daha fazla yükseltilmesi, fenolik hidroksil gruplarının ikinci ayrışmasına neden olur ve bunun sonucunda dianiyonik moleküller birikir ve mor rengin yoğunluğu artar. (Şekil 12) (Priyadarshi & ark., 2021).



Şekil 12. (A) antosiyanin, (B) kurkumin, (C) alizarin, (D) şikonin ve (E) betalainlerin pH değişimlerine yanıt olarak renk değişimleri (Priyadarshi & ark., 2021)

4. Doğal gıda renklendiricilerine dayalı pH duyarlı filmler

Bu pH duyarlı doğal renk maddelerinin halokromik ambalajda potansiyelinden faydalanmak için, bu pigmentlerin polimer/biyopolimer matrisleri gibi bir temel malzeme içine hapsedilmesi gerekmektedir. Kimyasal tepkimeye duyarlı renk maddelerinin seçimi, akıllı ambalaj sistemleri ve kolorimetrik sensörlerin tasarımında önemli bir adımdır. Göstergeler/sensörler genellikle pH, tazelik, bozulma, zaman-sıcaklık, gazlar ve uçucu bileşenleri izleyen kolorimetrik sistemlerdir. Sensör/gösterge atılabilir veya "tek kullanımlık" olmalıdır ve bu sorunu aşmak için, doğal gıda renk maddeleri ile entegre edilmiş biyopolimer/polimer kompozitlere dayanan akıllı ambalaj sistemleri, bu alandaki çok işlevli ambalaj sağlamada geliştirilmiş yeniliklerden biridir (Alizadeh-Sani & ark., 2020).

Göstergelerin/sensörlerin ambalaj malzemelerine entegre edilmesi, akıllı ambalaj sistemlerinin gıda güvenliği ve kalitesi hakkında daha iyi izleme ve bilgi sağlamasına olanak tanır. Çeşitli sensörler arasında, pH göstergeleri akıllı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. pH göstergelerinin renk değişimleri, kimyasal ortamlarına bağlı olarak önemli ölçüde değişir, bu da onları akıllı ambalaj sistemleri ve kolorimetrik sensörlerin tasarımı için uygun hale getirir (Alizadeh-Sani & ark., 2020).

pH sensörleri/göstergeleri genellikle zayıf asitler veya zayıf bazlardır ve düşük maliyetleri, kolay hazırlanmaları, bulunabilirlikleri ve güvenilir halokromik özellikleri sayesinde etkili ve ekonomik alternatiflerdir. Genellikle, pH göstergeleri iki bölümden oluşur; bir katı temel ve pH değişikliklerine tepki veren bir renk maddesi. Bu göstergeler/sensörler, ambalaj malzemelerine

gömülebilir veya bir paketin iç veya dış kısmına eklenebilir. Gıda bozulma süreci başladığında, gıda kalitesinde bir değişimin işareti olan pH değişikliği meydana gelir. Bu değişiklik, ürün kalitesi ile ilişkilidir (Alizadeh-Sani & ark., 2020).

4.1. Matris

pH-reaktif göstergeler, bir boya ve matris destek olmak üzere iki temel bileşenden oluşur. Boyalar, pH değişikliklerine bağlı olarak renk değiştirirken, matris destek genellikle bir polimer matrisidir. Bu matris, boyanın düzgün yayılmasını sağlamak için uygun mikro yapı ve yüzey özelliklerine sahip olmalıdır. En yaygın matris destekler sentetik polimerler ve biyopolimerlerdir (Priyadarshi & ark., 2021).

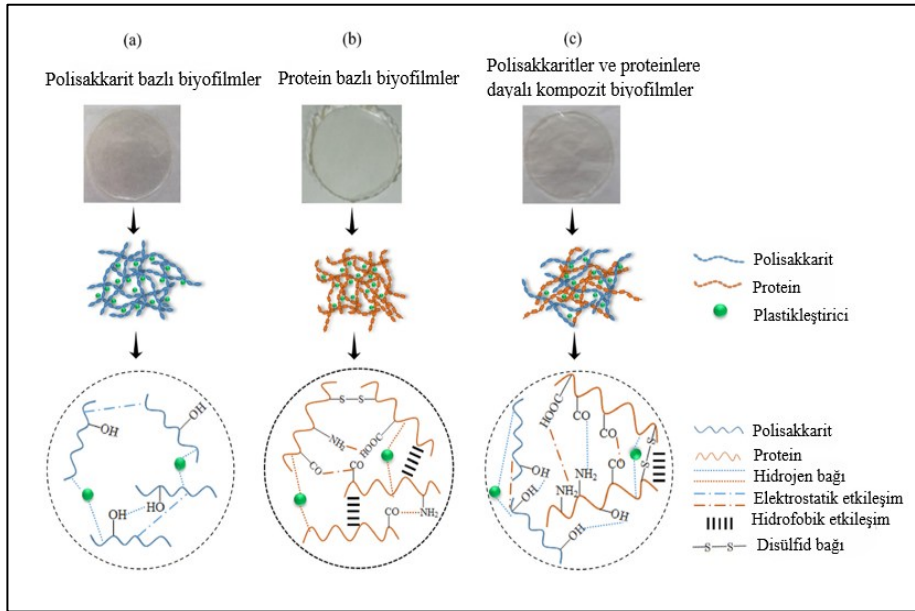
Sentetik polimerler, mükemmel fiziksel ve mekanik özellikler sunar, ancak aşırı kullanımları çevre sorunlarına yol açar. Bu nedenle, biyopolimerler giderek daha popüler hale gelmektedir. Biyopolimerler, doğal kaynaklardan elde edilen, biyo-parçalanabilir ve çevre dostu malzemelerdir. Polisakkaritler, proteinler ve lipitler gibi biyopolimerler, ambalaj malzemeleri için potansiyel uygulamalarda araştırılmaktadır (Priyadarshi & ark., 2021).

Kitosan, nişasta, agar ve selüloz türevleri gibi polisakkarit bazlı biyopolimerler, pH göstergeleri üretiminde sıklıkla kullanılır. Ayrıca, tarımsal atıklardan elde edilen biyopolimerler, çevre dostu malzeme kaynaklarıdır. Biyopolimerler, toksik olmamaları ve biyo-uyumlulukları sayesinde aktif ve akıllı ambalaj geliştirmek için uygundur. Ancak, mekanik ve bariyer özelliklerinin düşük olması gibi sınırlamaları bulunmaktadır. Bu eksiklikleri gidermek için biyopolimerlerin karıştırılması veya işlevsel dolgu maddeleri ile birleştirilmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. pH duyarlı

renklendiricilerin eklenmesi, bu biyopolimer bazlı ambalajların gıda kalitesi ve güvenliği hakkında bilgi vermesini sağlar, böylece gerçek zamanlı kalite izleme için etkili bir seçenek sunar (Priyadarshi & ark., 2021).

Polimer taşıyıcı, gıda ambalajında doğal pH-duyarlı pigmenti immobilize etmek için esas bileşen olarak kullanılır. Doğal pH-duyarlı gösterge filmlerinin özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, polimer matrisinin bazı koşulları karşılaması gerekir: (1) insan sağlığına karşı hiç/az toksik olmalı; (2) ambalajın su (nem ve yağmur gibi) ile hasar görmesi durumunda görece düşük su hassasiyetine sahip olmalı; (3) pH-duyarlı pigmentleri tutma yeteneğine sahip olmalı; (4) iyi film oluşturma özelliği, bariyer özellikleri ve mekanik özelliklere sahip olmalı (Zheng & ark., 2022).

Doğal polimer taşıyıcılar dört türde sınıflandırılabilir: polisakkaritler, proteinler, lipitler ve kompozit polimer taşıyıcıları; bunlar arasında polisakkaritler, proteinler ve kompozit polimer taşıyıcıları en yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 13). Protein ve şeker bazlı filmlerin mekanik özellikleri genellikle lipid bazlı filmlerden daha iyidir, ancak su buharı bariyer özelliği lipid bazlı filmler kadar iyi değildir. Dahası, protein bazlı filmler, bozunma sonrası gübre için bir azot kaynağı olarak kullanılabilirken, lipid bazlı filmlerin düşük elastikliği vardır (Zheng & ark., 2022).

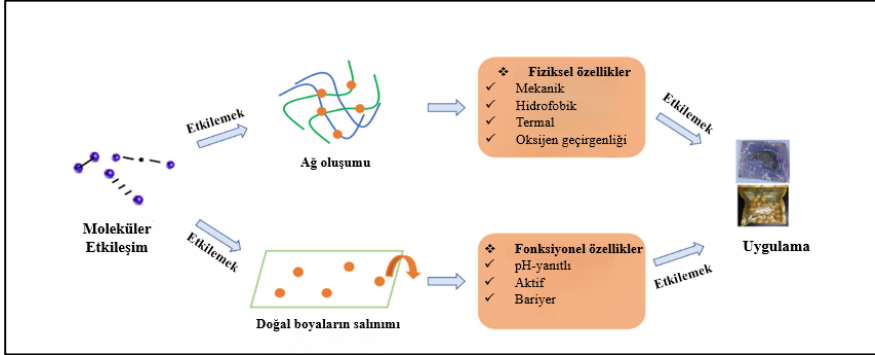


Şekil 13. Plastikleştiricilerin varlığında farklı polimer taşıyıcı türlerinin etkileşimleri. (a) polisakkarit bazlı biyofilmler (b) protein bazlı biyofilmler (c) polisakkarit ve protein bazlı kompozit biyofilmler (Zheng & ark., 2022)

4.2. Film Sisteminde Doğal Renklendirici ile Biyopolimerler Arasındaki Moleküler Etkileşimler

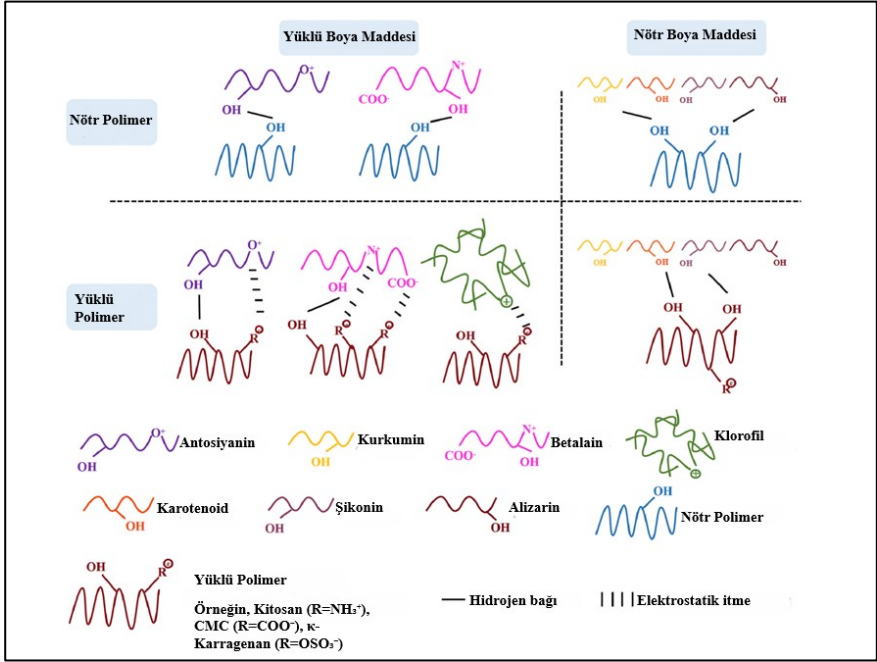
Genel olarak, doğal renklendiricilerle veya onlarsız ambalaj filminin Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) spektrumları oldukça benzer olup, ilave piklerin bulunmaması, renklendiricilerin biyopolimerlerin kimyasal bileşimini etkilemediğini göstermektedir. Bunun nedeni, doğal renklendiricilerin son derece düşük konsantrasyonlarda olmasıdır. Ancak, renklendiriciler ile polimerler arasındaki moleküler etkileşim nedeniyle bazı karakteristik piklerde hafif değişiklikler tespit edilebilir; bu da film özelliklerinin önemli parametreleridir. Bir

yandan, fiziksel özelliklerin oluşumunda önemli rol oynarlar. Diğer yandan, moleküler etkileşimler, doğal renklendiricinin film matrisinden salınımla yakından ilişkilidir ve fonksiyonel özellikleri etkiler (Şekil 14) (Huang & ark., 2022).



Şekil 14. Moleküler etkileşim ve film özellikleri arasındaki ilişki. Özellikle, moleküler etkileşim, yapı ağının değiştirilmesiyle filmin fiziksel özelliklerini etkileyebilir ve ayrıca renklendirici salınımını kontrol ederek filmin işlevsel özelliklerini etkileyebilir (Huang & ark., 2022).

Moleküler etkileşim türleri, film bileşenlerinin yüklenmiş doğasına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu nedenle, doğal renklendiricilerin farklı elektronik özelliklerine göre, onları iki gruba ayrılmaktadır: 1) yüklü renklendiriciler: antosiyanin, betalain ve klorofil; 2) nötr renklendiriciler: kurkumin, karotenoid, şikonin ve alizarin (Şekil 15) (Huang & ark., 2022).



Şekil 15. Nötr renklendiriciler ve ortak polimer matrisi arasındaki moleküler etkileşimlerin kısa bir açıklaması. Yüklü renklendiriciler (antosiyenin, betalain ve klorofil) nötr polimerle hidrojen bağları ile etkileşime girerken, yüklü polimerle hidrojen bağları ve elektronik itme ile etkileşime girer; nötr renklendiriciler (kurkumin, karotenoid, şikonin ve alizarin) ise polimerle esas olarak hidrojen bağları ile etkileşime girer (Huang & ark., 2022).

5. pH Göstergesi Paketleme Sisteminin Zorlukları ve Beklentileri

Son yıllarda, pH duyarlı renk göstergeleri içeren akıllı ambalaj, paketlenmiş gıdaların tazeliğini ve kalitesini gerçek zamanlı olarak tespit etmek veya değerlendirmek için pratik bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle, gıda güvenliği ve çevre

korumasına olan ilginin artmasıyla, petrol bazlı plastikler veya sentetik boyalar yerine doğal biyopolimerler ve doğal renklendiriciler kullanan gösterge filmlerine olan talep artmaktadır. Ancak çevre dostu ve güvenli doğal pigmentlerden ve doğal biyopolimerlerden yapılmış renk göstergesi ürünleri hala çok azdır. Bu teknolojinin geliştirilmesinde birçok kısıtlama ve zorluk bulunmaktadır ve bu da ticarileşmeyi engellemektedir (Priyadarshi & ark., 2021).

Gıdaların bozulmasının çoğu öncelikle mikroorganizmaların üremesi nedeniyle olmaktadır. Mikrobiyal faaliyet, asidik veya bazik metabolik ürünler oluşturarak pH duyarlı renk değişimi göstergesi filmi ile tespit edilebilir. Göstergenin renk değişimi, bozulma derecesine bağlı olarak bu metabolik ürünlerin konsantrasyonuyla orantılı olmalıdır. Ancak, çoğu gösterge, bozulmayı tespit etmek için dikkate alınacak metabolitlerin konsantrasyonu konusunda kısıtlamalara sahiptir. En önemli metabolik ürünler, et ve deniz ürünleri bazlı ürünlerde TVB-N ve süt ile süt ürünlerinde laktik asit, pirüvik asit, asetik asit gibi organik asitlerdir. Bu nedenle, bugüne kadar doğal renklendirici bazlı pH duyarlı filmlere ilişkin araştırmalar, öncelikle et, deniz ürünleri ve süt ürünleri ile meyve ve sebzelerle sınırlı kalmıştır (Priyadarshi & ark., 2021).

Doğal renklendirici bazlı pH sensörlerinin etkinliği de bir zorluktur. Genel olarak, çoğu doğal renklendirici, gıda bozulmasının erken aşamalarında kalite değişikliklerini tespit etmek için yeterince etkili değildir. Bozulmanın erken aşamalarında, bu metabolitlerin konsantrasyonu o kadar düşüktür ki pH duyarlı renk göstergesi filminin belirgin bir renk değişimi görülmez. Ayrıca, çoğu gıdanın pH'ı bozulduğunda 5.0-7.0 aralığında değişir. Diğer bir deyişle, hafif

asidik veya hafif bazik olma eğilimindedir. Ancak, çoğu doğal renklendirici, nötr etrafındaki küçük pH aralığında belirgin renk değişiklikleri göstermez. Diğer yandan, renk değişikliği, çok düşük veya çok yüksek pH değerlerinde belirgindir. Ayrıca, doğal renklendiricilerin renk değiştirme yeteneği, çıkarıldıkları kaynağa bağlıdır. Sıvı ürünler, süt ve meyve suyu gibi, gösterge kullanımının başka bir kısıtlamasıyla karşı karşıyadır. pH duyarlı film üretiminde kullanılan çoğu biyopolimer ve doğal renklendirici, hidrofilik olduğundan, sıvılara uzun süre maruz kalındığında bozulma eğilimindedir. Göstergenin bir hidrofobik film ile kaplanması, bu sorunu çözmek için kullanılabilir; ancak bu durumda, göstergenin hassasiyetinin kaçınılmaz olarak azalması söz konusu olacaktır. Ayrıca, çoğu pH duyarlı film gıda ile doğrudan temas halinde çalıştığından, göstergeye eklenen maddelerin gıdaya geçiş yapma olasılığı yüksektir; bu da hukuki sorunlara yol açabilir ve bu sensörlerin ticari kullanımını sınırlayabilir (Priyadarshi & ark., 2021).

Sonuç

Bu bölüm, akıllı paketleme sistemlerinin gıda güvenliği, kalite kontrolü ve çevresel sürdürülebilirlikteki artan önemine odaklanmaktadır. Çalışma, özellikle doğal pigmentlerin pH göstergeleri olarak kullanımını ele alarak, akıllı ambalajlama teknolojilerinin potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Geleneksel ambalaj malzemelerinin çevresel zararları ve gıda güvenliğindeki sınırlamaları göz önüne alındığında, doğal pigmentler ve biyobozunur polimerler, çevre dostu ve işlevsel bir alternatif sunmaktadır. pH göstergelerinin paketlenmiş gıdaların bozulma süreçlerini tespit etmedeki kritik rolü de vurgulanmaktadır.

Gıda bozulması genellikle mikrobiyal faaliyetlerin yol açtığı pH değişimleriyle ilişkilidir. Bu değişimlerin hızlı ve görsel olarak tespiti, doğal pH duyarlı pigmentler (antosiyenin, kurkumin, betalain, klorofil vb.) ve bu pigmentlerin biyopolimer matrislerde immobilizasyonu ile sağlanmaktadır. Antosiyenin gibi pigmentler, pH değişimlerine karşı yüksek hassasiyetleri ve geniş renk spektrumlarıyla öne çıkarken, kurkumin ve betalain gibi diğer pigmentler de kararlılık ve renk dönüşüm özellikleriyle bu sistemlere katkıda bulunmaktadır. Doğal pH göstergelerinin etkili kullanımında pigmentlerin stabilitesi, pH duyarlılığı ve renk değişim mekanizmalarının anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, doğal pigmentlerin farklı pH aralıklarında verdiği renk değişimleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Örneğin, antosiyeninlerin asidik ortamda kırmızıdan nötr ortamda mor ve alkali ortamda maviye değişim göstermesi, gıdaların bozulma derecesini açık bir şekilde izlemeye olanak tanımaktadır. Ancak doğal pigmentlerin stabilite sorunları, dar pH değişim aralıklarındaki renk duyarlılıkları ve ambalaj sistemleriyle entegrasyonunda karşılaşılan teknik zorluklar gibi konular, bu teknolojinin daha geniş çapta benimsenmesi için çözülmesi gereken önemli sorunlardır.

Sonuç olarak, bu çalışmada doğal pigment bazlı pH göstergelerinin akıllı ambalajlama sistemlerinde, özellikle gıda tazeliğinin görsel olarak izlenmesinde kritik bir potansiyele sahip olduğu gösterilmektedir. Bununla birlikte, bu teknolojilerin endüstriyel ve ticari uygulamalarının geliştirilmesi, pigmentlerin stabilitesini artıracak yenilikçi polimer matrislerin tasarlanması ve daha geniş bir pH aralığında hassasiyeti artıracak çözümlerin bulunması gerekmektedir. Bu tür gelişmeler hem gıda israfının

azaltılmasına hem de çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesine katkıda bulunacaktır.

Kaynaklar

Alizadeh-Sani, M., Mohammadian, E., Rhim, J. W., Jafari, S. M. (2020). pH-sensitive (halochromic) smart packaging films based on natural food colorants for the monitoring of food quality and safety. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 93-144. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.01>

Bibi, F., Guillaume, C., Vena, A., Gontard, N., & Sorli, B. (2016). Wheat gluten, a bio-polymer layer to monitor relative humidity in food packaging: Electric and dielectric characterization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 247, 355-367. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.06.017>

Cazón, P., Velazquez, G., Ramírez, J. A., & Vázquez, M. (2017). Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*, 68, 136-148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.009>

Cheng, H., Xu, H., McClements, D. J., Chen, L., Jiao, A., Tian, Y., ... & Jin, Z. (2022). Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. *Food Chemistry*, 375, 131738. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131738>

El-Wahab, H. M. F. A., & Moram, G. S. E. D. (2013). Toxic effects of some synthetic food colorants and/or flavor additives on male rats. *Toxicology and industrial health*, 29(2), 224-232. <https://doi.org/10.1177/0748233711433935>

Firouz, M. S., Mohi-Alden, K., & Omid, M. (2021). A critical review on intelligent and active packaging in the food industry:

Research and development. *Food Research International*, 141, 110113. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110113>

Gaikwad, K. K., Singh, S., & Ajji, A. (2019). Moisture absorbers for food packaging applications. *Environmental Chemistry Letters*, 17(2), 609-628. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0810-z>

Huang, J., Hu, Z., Li, G., Hu, L., Chen, J., Hu, Y. (2022). Make your packaging colorful and multifunctional: The molecular interaction and properties characterization of natural colorant-based films and their applications in food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 124, 259-277. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.028>

Huang, L., Sun, D. W., Pu, H., Wei, Q., Luo, L., & Wang, J. (2019). A colorimetric paper sensor based on the domino reaction of acetylcholinesterase and degradable γ -MnOOH nanozyme for sensitive detection of organophosphorus pesticides. *Sensors and actuators B: chemical*, 290, 573-580. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.04.020>

Huang, W. D., Deb, S., Seo, Y. S., Rao, S., Chiao, M., & Chiao, J. C. (2012). A passive radio-frequency pH-sensing tag for wireless food-quality monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 12(3), 487-495. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2107738

Huang, X., Aguilar, Z. P., Xu, H., Lai, W., & Xiong, Y. (2016). Membrane-based lateral flow immunochromatographic strip with nanoparticles as reporters for detection: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 75, 166-180. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.08.032>

Kim, S.O., & Kim, S.S. (2020). Bacterial pathogen detection by conventional culture-based and recent alternative (polymerase chain reaction, isothermal amplification, enzyme linked immunosorbent assay, bacteriophage amplification, and gold nanoparticle aggregation) methods in food samples: A review. *Journal of Food Safety*. <https://doi.org/10.1111/jfs.12870>

Kobylewski, S., & Jacobson, M. F. (2012). Toxicology of food dyes. *International journal of occupational and environmental health*, 18(3), 220-246. <https://doi.org/10.1179/1077352512Z.00000000034>

Musso, Y. S., Salgado, P. R., & Mauri, A. N. (2016). Gelatin based films capable of modifying its color against environmental pH changes. *Food Hydrocolloids*, 61, 523-530. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.013>

Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2019, January). Marine plastic pollution: Other than microplastic. In *Waste* (pp. 425-442). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815060-3.00022-0>

Park, Y. H., Choi, K. J., Bae, J. Y., Yoon, S. K., Jang, H. I., & Lee, C. S. (2013). Development of a detection sensor for mixed trimethylamine and ammonia gas. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(5), 1703-1707. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.02.009>

Pereira, P. F., Picciani, P. H., Calado, V. M., & Tonon, R. V. (2020). Gelatin-based nanobiocomposite films as sensitive layers for monitoring relative humidity in food packaging. *Food and*

Bioprocess Technology, 13(6), 1063-1073.
<https://doi.org/10.1007/s11947-020-02462-5>

Pourjavaher, S., Almasi, H., Meshkini, S., Pirs, S., & Parandi, E. (2017). Development of a colorimetric pH indicator based on bacterial cellulose nanofibers and red cabbage (*Brassica oleraceae*) extract. *Carbohydrate polymers*, 156, 193-201.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.027>

Poyatos-Racionero, E., Ros-Lis, J. V., Vivancos, J. L., & Martinez-Manez, R. (2018). Recent advances on intelligent packaging as tools to reduce food waste. *Journal of cleaner production*, 172, 3398-3409.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.075>

Priyadarshi, R., Ezati, P., Rhim, J. W. (2021). Recent advances in intelligent food packaging applications using natural food colorants. *ACS Food Science & Technology*, 1(2), 124-138.
<https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.0c00039>

Roy, S., & Rhim, J. W. (2021). Anthocyanin food colorant and its application in pH-responsive color change indicator films. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(14), 2297-2325.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1776211>

Sergeyeva, T., Yarynka, D., Piletska, E., Linnik, R., Zaporozhets, O., Brovko, O., ... & El'skaya, A. (2019). Development of a smartphone-based biomimetic sensor for aflatoxin B1 detection using molecularly imprinted polymer membranes. *Talanta*, 201, 204-210. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.04.016>

Sohail, M., Sun, D. W., & Zhu, Z. (2018). Recent developments in intelligent packaging for enhancing food quality and safety. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58(15), 2650-2662. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.04.016>

Tseng, S. Y., Li, S. Y., Yi, S. Y., Sun, A. Y., Gao, D. Y., & Wan, D. (2017). Food quality monitor: paper-based plasmonic sensors prepared through reversal nanoimprinting for rapid detection of biogenic amine odorants. *ACS applied materials & interfaces*, 9(20), 17306-17316. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b00115>

Wang, H., & Wang, L. (2017). Developing a bio-based packaging film from soya by-products incorporated with valonea tannin. *Journal of cleaner production*, 143, 624-633. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.064>

Wang, S., Liu, X., Yang, M., Zhang, Y., Xiang, K., & Tang, R. (2015). Review of time temperature indicators as quality monitors in food packaging. *Packaging Technology and Science*, 28(10), 839-867. <https://doi.org/10.1002/pts.2148>

Yam, K. L., & Lee, D. S. (2012). Emerging food packaging technologies: An overview. *Emerging food packaging technologies*, 1-9. <https://doi.org/10.1533/9780857095664.1c>

Zhai, X., Li, Z., Shi, J., Huang, X., Sun, Z., Zhang, D., ... & Wang, S. (2019). A colorimetric hydrogen sulfide sensor based on gellan gum-silver nanoparticles bionanocomposite for monitoring of meat spoilage in intelligent packaging. *Food chemistry*, 290, 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.138>

Zhang, X., Sun, G., Xiao, X., Liu, Y., & Zheng, X. (2016). Application of microbial TTIs as smart label for food quality: Response mechanism, application and research trends. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.02.006>

Zheng, L., Liu, L., Yu, J., Shao, P. (2022). Novel trends and applications of natural pH-responsive indicator film in food packaging for improved quality monitoring. *Food Control*, 134, 108769. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108769>

Zhou, X., Yang, R., Wang, B., & Chen, K. (2019). Development and characterization of bilayer films based on pea starch/polylactic acid and use in the cherry tomatoes packaging. *Carbohydrate Polymers*, 222, 114912. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.05.042>

BÖLÜM III

Gıda Paketlemede Yenilikçi Yaklaşımlar: Aktif Paketleme, Akıllı Paketleme ve Antimikrobiyal Paketleme Sistemleri

Ümmü Gülsüm KOÇ³

Giriş

Bu bölümün amacı gıda paketlemesinde kullanılan yenilikçi yaklaşımlar hakkında bilgi vermektir. Paketleme hijyenik koşullarda gerçekleştirilen gıda üretimin sürecindeki en son aşamadır. Gıda paketlemesinde kullanılacak olan ambalaj ürünü gıdanın besleyici özelliklerini korumalı, lojistik beklentileri karşılamalı ve tüketici beklentilerine uygun olmalıdır. Son yıllarda teknolojik ilerlemelerle birlikte gıdaların raf ömrünü uzatmak ve güvenliğini artırmak amacıyla aktif, akıllı ve antimikrobiyal paketleme sistemleri geliştirilmiştir. Aktif paketleme sistemleri, eklenen maddelerle gıda

³Kafkas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı, Kars/Türkiye, Orcid: 0000-0003-1478-2616, ummu199596@gmail.com

kalitesini korur ve kontrollü salınım teknikleriyle güvenliğı destekler. Antimikrobiyal paketleme ise gıdalarda mikrobiyal faaliyetleri azaltarak güvenliğı artırır. Akıllı paketleme ise, nem, sıcaklık ve pH gibi gıda kalitesindeki değışiklikleri tespit eden etiketlerle gıdanın tazeliğı hakkında bilgi verir.

1. Aktif Paketleme Sistemleri

Gıdalar ve paket arasındaki karşılıklı ilişkiler kalite ve/veya güvenlik açısından zararlı olabilir. Polimer esaslı malzemelerle paketlenen gıdalarda, aroma sorpsiyonu sonucu ürün lezzetinde meydana gelen değışimler ve istenmeyen tatların paketlerden gıdalara geçmesi, bozulmanın önemli mekanizmalarıdır. Paketleme malzemelerinin seçilmesi ve aktif paketlerin geliştirilmesi, paketin gıda ile bilinçli bir şekilde etkileşimine dayanır ve/veya istenmeyen değışiklikleri en aza indirirken ürün kalitesini, güvenliğini ve raf ömrünü en üst düzeye çıkarmak için doğrudan gıda kalitesini ve güvenliğini iyileştirir (Hotchkiss, 1997; Begley, 1997). Aktif paketleme gecikmiş oksidasyon ve kontrollü respirasyon oranındaki ilerlemeler, mikrobiyal büyümeyi engelleyen mikroorganizmalar ve nem göçü ve karbondioksit emiciler/yayıcılar, koku emiciler, etilen gidericiler ve aroma yayıcıların eklenmesi gibi özellikleri sahiptir. Paket, çevre ve gıda arasında yararlı bir etkileşim meydana geldiğinde, biyoaktif bileşik kontrollü salımlı paketlemede (CRP) olduğu gibi kontrollü salımlı hale gelir (Hotchkiss, 1997; Begley, 1997).

Aktif paketleme sistemleri, pakete kasıtlı olarak eklenen, gıda kalitesinin ve güvenliğinin istikrarını artıran veya gıdayla doğrudan temasa dayalı olarak gıdanın istikrarını artıran maddeler içeren sistemlerdir. Bu nedenle, kontrollü salımlı paketleme aktif

paketlemenin bir parçasıdır (Vasile & Baican, 2021). Paketleme, gıda kalitesi, güvenliği ve raf ömrünün uzatılması sürecinde önemli bir rol oynar. Gıdanın raf ömrü, "bir gıdanın, tanımlanmış çevre koşulları altında kabul edilebilir tat, renk, aroma, doku, besin değeri ve güvenlik özelliklerini koruduğu zaman dilimi" olarak tanımlanmaktadır (Li & ark., 2006). Gıda formülasyonuna sınırlı konsantrasyonda aktif bileşikler (antioksidanlar ve antimikrobiyaller gibi) hızlı veya anında içerik olarak eklemek veya aktif paket kullanmak gibi bazı etkili çözümler bilinmektedir (Vasile, 2018; Vasile & ark., 2017; Butnaru & ark., 2019).

1.1. Aktif paketleme çeşitleri

Aktif paketleme (AP) için çeşitli tasarımlar mevcuttur (Şekil 1), örneğin: (A) aktif poşetlerin (oksijen ve nem emiciler ve etanol buhar jeneratörleri) kullanılması, (B) polimer üzerine aktif bir bileşiğin (ısıya duyarlı aktif maddeler veya polimer matrisle uyumsuz ve karışmayan maddeler) kaplanması, (C) aktif bileşiğin polimer yüzeyinde hareketsizleştirilmesi (hem aktif madde hem de polimer üzerinde işlevsel etkileşimli grupların bulunması gereklidir). Aktif bileşiklerin polimerlere güçlü bir şekilde bağlanması, gıdaya yavaş salınım sağlar ve (D) polimer matrisine doğrudan dahil olma, polimerin işleme koşullarına yüksek direnç, polimer özellikleri üzerinde olumsuz bir etki olmaması ve gıdaya yavaş salınım sağlar. Kitosan gibi biyoaktif polimerlerin kullanımı, kompozitlerde veya kaplamalarda doğal olarak antimikrobiyal aktivite gösterir (E) (Wang & ark., 2018; Vasile & ark., 2013).

1.2. Aktif paketleme sistemlerinin gruplandırılması

Aktif paketleme sistemleri etki mekanizmasına göre üç türe ayrılır:

a-) Salgılayan sistemler (örneğin antimikrobiyaller, antioksidanlar, CO₂ veya etanol yayıcılar veya enzimler),

b-) Emici sistemler (örneğin oksijen, CO₂ veya etilen temizleyiciler, nem veya aroma emiciler)

c-) Göç etmeyen sistemler gıda ile AP'nin tam temasının gerektiği sistemler (örneğin gıdanın yüzeyinde etki eden enzimlerin göçünün gerekli olmaması ve nano-gümüş, titanyum dioksit (TiO₂) ve çinko oksit (ZnO) gibi antimikrobiyal nanopartiküller (NP'ler)). NP'ler antimikrobiyal ajanlar olarak kullanılabilir, ancak gıdaya göç etmeleri yasalarca yasaklanmıştır (Shen & ark., 2020).

Aktif salınımlı sistemler ayrıca şu şekilde gruplandırılabilir:

a-) Sızıntı sistemleri; gıda ile ambalaj malzemesi arasındaki doğrudan temasla elde edilen bir maddenin salınımı (örneğin, bakteriyosinler, antibiyotikler, antioksidanlar, polifenoller veya organik asitler tarafından),

b-) Uçucu sistemler; ambalaj katmanından gıda yüzeyine gaz fazı difüzyonu yoluyla gerçekleşen salınım. Bu tür salım, yalnızca uçucu aktif maddeler (esansiyel yağlar (EO'lar) veya mentol, karvakrol ve linalool) için uygulanabilir (Zactiti & ark., 2009).

1.3. Kontrollü salınımlı paketleme

Kontrollü salınımlı paketler (CRP), gıda ürünlerinin bozulmasını geciktirerek raf ömrünü uzatmak amacıyla, ambalaj içindeki aktif bileşiklerin zamanla kontrollü bir şekilde salınmasını

salınım sağlanır. (D) Aktif bileşenler, polimer matrisine doğrudan dahil edilerek yüksek işleme direnci ve polimer özelliklerinde olumsuz etki olmadan yavaş salınım sağlar. (E) Kitosan gibi biyoaktif polimerler, kompozitlerde veya kaplamalarda doğal antimikrobiyal aktivite gösterir (Vasile & Baican, 2021).

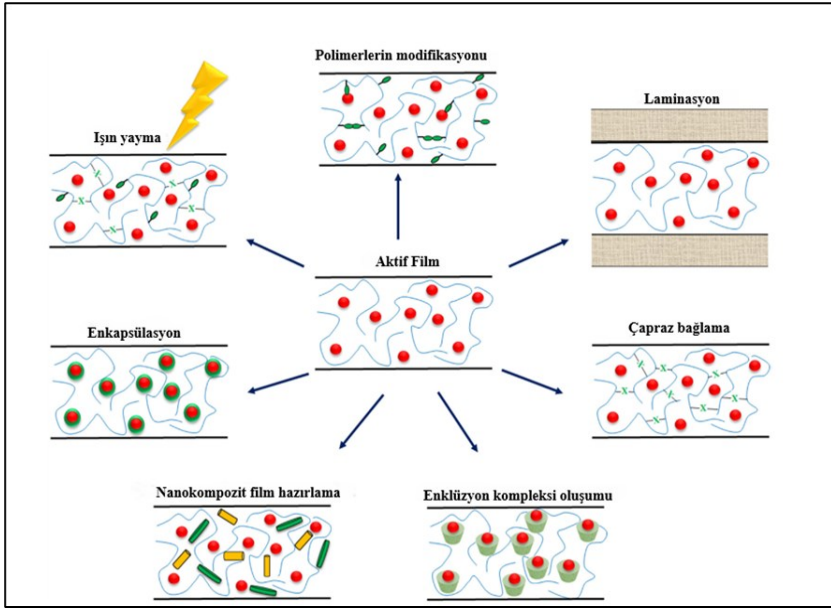
1.3.1. Kontrollü salınımlı paketleme tasarımı

CRP'nin temel hedefleri, gıda türüne uyacak şekilde gerekli salınım kinetiğini (hızlı veya yavaş salınım) elde etmek için polimer morfolojisini manipüle etmektir (Vasile & Baican, 2021).

Her yaklaşım, salınım oranını etkileyen özel bir faktöre odaklanır. Bazı teknikler, ambalaj malzemesinin özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Örneğin, polimerin kimyasal modifikasyonu, ışınlamanın uygulanması, çapraz bağlayıcı maddelerin kullanımı ve lamine filmlerin üretimi bu stratejiye odaklanmıştır. Mikro veya nano kapsülleme gibi bazı salınım kontrol yöntemlerinin amacı, aktif bileşiklerin özelliklerini değiştirmek ve uçuculuğunu veya difüzyon yeteneğini azaltmaktır. Nano takviyelerin kullanımı gibi bazı yaklaşımlar, çok disiplinli tekniklerdir. Nano dolgular, ambalaj malzemesinin özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra, film oluşturma süreci sırasında aktif maddelerin kararlılığını artırabilir ve ayrıca bu bileşiklerin rezervuarı olarak hareket ederek aktif bileşiklerin daha kontrollü salınımına yol açabilir (Şekil 2.) (Almasi, Jahanbakhsh Oskouie & Saleh 2021).

Aktif bileşik türü ilk tasarım faktörüdür. Aktif bileşik türünün seçimi etkinliğe, düzenleyici uyumluluğa ve maliyete bağlıdır. İkinci tasarım faktörü, aktif bileşiği kapsüllemek için bir paketleme filmi

gibi bir matris veya taşıyıcı oluşturan paket bileşimi ve yapısıdır. Üçüncü tasarım faktörü, aktif bileşiği paketleme polimerine dahil etme ve aktif bileşiğin salınmasına izin veren uygun bir morfoloji veya yapı oluşturma amacına hizmet eden döküm film ekstrüzyonu ve üflemleri film ekstrüzyonu gibi işleme yöntemleridir. Akıllı karıştırıcı ve polimer karışımları tarafından gerçekleştirilen işleme değişkenlerini değiştirmek ve yeni teknik yöntemleri uygulamak, difüzyonda değişikliklere yol açmıştır; dolayısıyla farklı salım profilleri elde edilmiştir. Pektin, jelatin, kitosan, polilaktik asit ve diğerleri gibi biyolojik olarak parçalanabilir polimerler uygun bileşenlerdir (Vasile & Baican, 2021).



Şekil 2. Gıda aktif ambalajlarından salınım kontrolü için kullanılan çeşitli yaklaşımların şematik gösterimi (Almasi, Jahanbakhsh Oskouie & Saleh 2021).

1.3.2. Aktif bileşikler

Aktif özellikler, doğal antioksidan ve antimikrobiyal özelliklere sahip maddelerin ambalaj malzemelerine dahil edilmesiyle sağlanabilir (Salevic & ark., 2019). CRP'de kullanılan yaygın aktif bileşikler arasında esas olarak gıda güvenliği için antimikrobiyaller ve gıda kalitesi için antioksidanlar, oksijen veya etanol temizleyiciler ve karbondioksit (CO₂) yayıcılar bulunur (Vasile & Baican, 2021).

Antimikrobiyaller, mikroorganizmaları öldüren veya büyümelerini durduran bir ajanlardır. Antimikrobiyal paketleme, gıdalardaki zararlı mikrobiyal aktiviteyi azaltarak gıda güvenliğini artırır, gıda israfını azaltır ve raf ömrünü iyileştirir (Sung & ark.,2013). Biyo-bazlı antimikrobiyal ajanlar, bozulma ve patojenik mikroorganizmaların büyümesini önlemek için kullanılır. Bu ajanlar, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157, *Salmonella* gibi hedef mikroorganizmaların aktivitelerini bastırmak için polimer film/paket içine dahil edilir (Vasile & Baican, 2021).

En yaygın antimikrobiyaller arasında bitkisel uçucu yağlar, hayvansal enzimler, mikrobiyal bakteriyosinler, organik asitler ve doğal polimerler bulunur. (Buonocore & ark., 2003). Ayrıca, aljinatlar ve karragenan gibi polisakkaritler de antimikrobiyal paketlemede kullanılır (Cha & ark., 2002). Gümüş nanopartiküllerinin dahil edilmesi, polisakkaritlerin antibakteriyel aktivitelerini artırır (Alavi & Rai 2019). Aljinat film matrisine eklenen laktik asit bakterileri, gıda kaynaklı patojenlerin büyümesini kontrol eder (Rinaudo, 2014). Antimikrobiyal aktif bileşiklerin salınımı, uçuculuk, moleküler yapı, boyut ve diğer biyoaktif bileşenlerin varlığı ile belirlenir. Protein bazlı film teknolojisi, gıda

paketlemesinde iyi mekanik ve oksijen bariyer özellikleri gösterirken, biyoaktif bileşenlerin salınımını etkili bir şekilde kontrol eder (Vasile & Baican, 2021).

Polifenoller, flavonoidler (örneğin, kuersetin), vitaminler, çoklu doymamış yağ asitleri, kurkumin, astaksantin, kateşinler, selenyum nanopartikülleri (SeNP) ve resveratrol gibi bileşikler, gıda ürünlerinde antioksidan özellikler gösterir. Bu bileşikler hem zincir kıran hem de hidroperoksit deaktivasyon antioksidanları olarak işlev görür. Reaktif oksijen türleri (ROS) ve reaktif oksijen içeren bileşikler, oksidatif stres ve biyomoleküllerin ayrışmasında rol oynar. Antioksidanlar, diğer molekülleri ROS'un zararlı etkilerinden korur ve oksidatif stres önleyen formülasyonlarda kullanılır (Vasile & Baican, 2021).

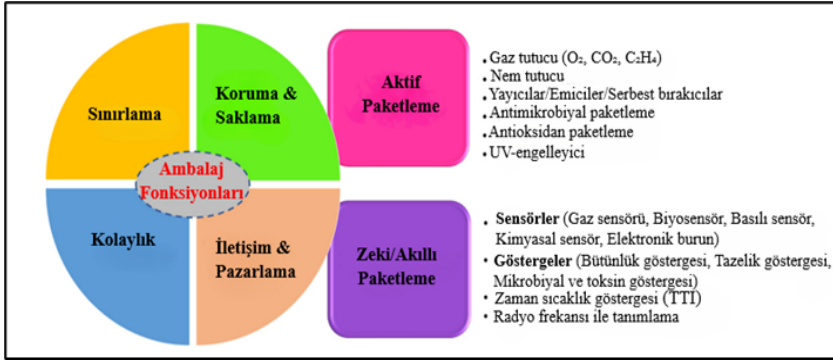
Antioksidanların uygun bir şekilde kapsüllemesi, kapsülleme malzemesi ile fonksiyonel gruplar arasında olumlu etkileşimler olduğunda gerçekleşir. Antioksidan ve antimikrobiyaller için kullanılan başlıca nanokapsülleme teknikleri şunlardır: kolloid bazlı nano-katılım, lipit bazlı nanokapsülleme, biyolojik ve biyolojik olmayan polimerik nano-taşıyıcılara dayalı kapsülleme, siklodekstrin katılımı, elektro-spreyleme, elektro-spinning, karbon nanotüpler ve nanokompozit kapsülleme (Vasile & Baican, 2021).

2. Akıllı Paketleme Sistemleri

Paketleme, gıda üretim süreçlerinden biri olup, gıda kalitesi ve güvenliğinin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Tüketicilerin yüksek kaliteli taze gıdaları tercih etmedeki artan bilinci, yaşam tarzı değişiklikleri ve pazarlama rekabeti, lezzetli, taze ve hazır gıda üretimi ile güvenlik ve kalite garantisi sağlamak

için yeni ambalaj teknolojilerinde gelişme taleplerini artırmaktadır. Geleneksel gıda paketlenme teknolojisinin sınırlayıcı faktörleri, dış ortama karşı istenilen gıda korumasının olmaması, gıda güvenliği ve kalitesinin izlenmesi ve gıda tazeliği etiketlemesi ihtiyacıdır. Sürekli gelişen gıda pazarı, gıda kalitesini, genel gıda güvenliğini ve organoleptik özellikleri korumak için çeşitli yeni ambalaj teknolojilerinin tasarımını ve geliştirilmesini gerektirmektedir ve ambalajlı gıdaların kalitesini kolayca izleme yeteneği talep etmektedir (Priyadarshi, Ezati & Rhim, 2021).

Akıllı veya zeki ambalaj yöntemleri, genellikle ambalajlı gıda kalitesindeki değişiklikleri belirtmek veya tanımlamak için etiketlerin eklenmesi veya entegre edilmesi anlamına gelir. Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi'ne (EFSA) göre, akıllı materyaller "ambalajlı gıdanın durumunu veya gıdanın etrafındaki ortamı izleyen malzemeler veya maddelerdir." Akıllı ambalaj, ambalajlı gıdanın durumunu veya ambalaj içindeki ortamı, sıcaklık, pH, nem seviyesi, gaz bileşimi ve bozulma metabolitleri gibi, izleyebilen bir ambalaj türünü ifade eder. Bu, gıdanın veya ambalaj ortamındaki değişiklikleri tespit etme ve kaydetme yeteneğine dayalı olarak tüketicilerle iletişim kurmaktan sorumlu geleneksel ambalajın bir uzantısıdır (Şekil 3) (Priyadarshi, Ezati & Rhim, 2021).



Şekil 3. Akıllı ambalaj çeşitleri ve ambalaj fonksiyonlarının temel özellikleri (Priyadarshi, Ezati & Rhim, 2021).

Akıllı ambalajın bir diğer avantajı, Tehlike Analizi ve Kritik Kontrol Noktaları (HACCP) ile Kalite Analizi ve Kritik Kontrol Noktaları (QACCP) sistemlerinin iyileştirilmesine katkıda bulunmasıdır. Böylece, gıda kalitesi değişikliklerini gerçek zamanlı olarak yerinde tespit edebilir, potansiyel sağlık risklerini belirleyebilir ve bunların oluşumunu azaltabilir, nihayetinde gıda kalitesini koruyabilir ve gıda güvenliğini sağlayabilir. Gıda kalitesini ve güvenliğini artırmanın yanı sıra, akıllı ambalajın gıda israfını azaltmada önemli bir rol oynaması beklenmektedir (Priyadarshi, Ezati & Rhim, 2021).

Günümüzde, işlenmiş gıdaların çoğu genellikle "Tüketim tarihi" veya "Son kullanma tarihi" sistemi kullanmaktadır. Ancak, bu tarihler geçmiş deneyimlere ve varsayımlara dayandığı için, birçok gıda ürünü hâlâ tüketilebilir olsalar bile sıklıkla atılmaktadır. Ayrıca, mevcut yönetim sisteminde, standart kalite kontrol protokollerine göre bir parti içerisindeki bazı ürünlerin örnekleme test sonuçlarına dayanarak tüm ürün partisinin imha edilmesiyle büyük miktarda gıda

israfı gerçekleşmektedir (Priyadarshi, Ezati & Rhim, 2021). Özellikle görsel renk değişim göstergesi malzemeleri temelinde akıllı ambalaj, bu sorunları çözmede ve gıda israfını azaltmada önemli bir rol oynayabilir. Renk değiştiren gösterge etiketlerinin uygulanması, ürünlere sabit "tüketim tarihi" veya "son kullanma tarihi" atama eğilimini değiştirebilir ve aynı parti içindeki ürünler arasında "Dinamik Raf Ömrü" kavramını getirebilir. Bu akıllı ambalajın vaat edilen potansiyeli, ekonomik etkiyi artırmaktadır (Priyadarshi, Ezati & Rhim, 2021). Ayrıca, bir akıllı gıda ambalaj sistemi, “duyma, tespit, izleme, iletişim, kayıt, bilimsel verilere dayalı karar verme, gıda güvenliğini artırma, gıda kalitesini iyileştirme, bilgi sağlama ve ürünle ilgili olası sorunlar hakkında uyarıda bulunma” gibi işlevleri yerine getirebilir (Alizadeh-Sani & ark., 2020).

Akıllı paketleme sistemi için ana teknolojiler üç tanedir: göstergeler, sensörler ve veri taşıyıcıları (Ghaani & ark.,2016). Göstergeler ve sensörler, ürün kalitesiyle ilgili bilgi sağlama ana işlevine sahipken, veri taşıyıcıları sınıfı tedarik zinciri lojistiğinin yönetiminde daha fazla yer alır. Bu sistemler birincil ambalajın içine veya dışına, ikincil veya üçüncül ambalajın üzerine yerleştirilebilir (Drago & ark., 2020).

2.1. Göstergeler

Göstergelerin temel işlevi, tüketiciye belirli bir maddenin varlığı veya yokluğuyla ilgili bilgileri iletmek, iki veya daha fazla bileşen arasında bir reaksiyonun gerçekleşip gerçekleşmediğini belirtmek veya belirli bir maddenin konsantrasyonunu izlemektir. Bu bilgiler genellikle anında görsel değişiklikler (örneğin, farklı renk yoğunlukları veya bir boyanın düz bir yol boyunca difüzyonu)

(Yam, Takhistov & Miltz, 2005) biçiminde sinyallere çevrilir ve nitel veya yarı nicel bilgiler sağlar. Çoğu durumda, bir göstergenin temel gereksinimi, renk veya yoğunluktaki bu değişikliklerin geri döndürülemez olmasıdır. Göstergeler, çok tutarlı bir akıllı ambalaj sınıfını temsil eder; bu inceleme için de en çok kullanılan sınıflandırma, kontrol edilen değişkenin türüne dayanmaktadır, bu nedenle üç makro kategoriye ayrılabilirler: zaman-sıcaklık göstergeleri, tazelik göstergeleri ve gaz göstergeleri. Daha genel bir sınıflandırma için, göstergeler ambalaj üzerindeki konumlarına göre harici veya dahili olarak sınıflandırılabilir (Kalpana & ark., 2019).

2.2. Sensörler

Sensör, bir kimyasal, biyolojik veya fiziksel özelliğe, ölçüme orantılı olarak ölçülebilir bir sinyal sağlayarak yanıt veren bir cihazdır (Ghaani & ark., 2016). En popüler geleneksel sensörler, sıcaklık, nem, pH ve ışık maruziyetini ölçmek için tasarlanmıştır (Vanderroost & ark., 2014). Bunlara ek olarak, gıda kalitesini ve ambalaj bütünlüğünü izleme ihtiyacı, araştırmacıları akıllı ambalajlama için tek kullanımlık ve gelişmiş sensörler (yenilebilir sensörler gibi) uygulamaya artan bir ilgi göstermeye yöneltmiştir. Sensör genellikle dört ana bileşenden oluşur: ilk kısım bir reseptördür (sensörün hassas kısmı), genellikle yüzey adsorpsiyonu ile belirli kimyasal analitin varlığını, aktivitesini, bileşimini veya konsantrasyonunu tespit edebilen bir örnekleme alanı görevi gören seçici bir kaplamadan oluşur ve buna bağlı olarak kaplamanın belirli bir özelliğinde değişiklik olur (Vanderroost & ark., 2014). Bu değişiklik, genellikle sensörün ikinci kısmı olan dönüştürücü tarafından tespit edilir ve sinyal değişikliğini bir çıkış sinyaline dönüştürür. Transdüserin ölçüm için harici güce ihtiyacı varsa,

transdüser "aktif" olarak adlandırılır, aksi takdirde "pasif" olarak adlandırılır (Vanderroost & ark., 2014; Siracusa & Lotti, 2019). Son olarak, sensör sinyal işleme için bir elektronik parçası ve bir sinyal görüntüleme ünitesi ile tamamlanır (Ghaani & ark., 2016).

2.3. Veri taşıyıcıları

Veri taşıyıcı cihazlar, paketlenmiş gıdaların kalite durumu hakkında herhangi bir bilgi sağlamazlar, ancak otomatik izlenebilirlik, hırsızlık önleme veya sahteciliğe karşı koruma için önemli bir destektir (Müller & Schmid, 2019). Özellikle izlenebilirlik, gıda güvenliğini iyileştirmeye ve paketin tüm geçmişini izlemek kolay olduğundan tüketiciler için daha iyi bir pazar elde etmeye olanak tanır (Kalpana & ark., 2019). Gıda ambalaj sektöründeki en önemli veri taşıyıcı cihazlar barkod etiketleri ve radyo frekansı tanımlama sistemleridir (RFID etiketleri). Bu tür cihazlar, tüm tedarik zinciri boyunca okunabilir olmak için esas olarak üçüncül ambalajlara (örneğin, kaplar, paletler, vb.) yerleştirilir (Ghaani & ark., 2016).

Bir RFID sistemi üç ana unsurdan oluşur: küçük bir antene bağlı bir mikroçipten oluşan bir etiket; radyo sinyalleri yayan ve karşılığında etiketten yanıtlar alan bir okuyucu; ve RFID donanımını ve kurumsal uygulamaları birbirine bağlayan bir ara yazılım (yerel ağ, web sunucusu, vb.) (Kumar & ark., 2009; Sarac, Absi & Dauzere-Pérès, 2010). RFID teknolojisini benzersiz kılan temel özellikler şunlardır: etikette saklanabilen çok sayıda farklı kod ve uzun mesafelerde bile bilgi aktarma ve iletme yeteneği, böylece otomatik ürün tanımlama ve izlenebilirlik işlemlerini iyileştirme (Plessky, 2010).

3. Antimikrobiyal Paketleme Sistemleri

Antimikrobiyal ambalaj malzemeleri, temel bariyer özelliklerinden daha fazlasını içeren antimikrobiyal özelliklere sahip gıda koruma sistemleridir. Bu nitelikler, mikrobiyal veya mikrobiyal statik maddelerin böyle bir paketleme sistemine dahil edilmesiyle veya aktif antimikrobiyal polimerik malzemelerin kullanılmasıyla elde edilebilir. Antimikrobiyal maddelerin gıda ambalaj malzemesine dahil edilmesi, mikroorganizma büyümesini engelleyerek gıda ürünlerinin raf ömrünün uzatılmasına yardımcı olur. Antimikrobiyal paketleme sistemleri, gecikme süresini uzatabilir ve mikroorganizmaların büyüme hızını azaltarak ürünün raf stabilitesini uzatabilir ve güvenliği artırabilir (Assefa & Admassu, 2013).

Antimikrobiyal filmler hazırlamak için, ambalaj malzemelerine organik veya inorganik asitler, metaller, alkoller, amonyum bileşikleri veya aminler dahil olmak üzere farklı sentetik antimikrobiyal kimyasallar dahil edilmiştir. Bununla birlikte, artan tüketici sağlığı kaygıları ve sağlıklı gıdalara yönelik artan talep, antimikrobiyal enzimler ve nişasta gibi bileşikler gibi doğal biyokoruyucuların kullanımını teşvik etmiştir. Doğal gıda antimikrobiyal filmleri bozulmayı ve patojenik mikroorganizmaları yavaşlatabilir veya etkisiz hale getirebilir ve bu fonksiyonların gıda güvenliğinin geliştirilmesi açısından önemi son zamanlarda artmıştır (Assefa & Admassu, 2013).

Antimikrobiyallerin kullanıldığı gıda paketleme sistemleri sadece patojenleri azaltmak için değil, aynı zamanda bozulmaya neden olan mikroorganizmaları da kontrol etmek için kullanılabilir. Gıdayı zararlı ortamdan ayırabilir ve gıdanın kendisini

değiştirmeden mikroorganizmaların büyümesini engelleyebilirler (Valencia-Chamorro & ark., 2011). Ek olarak, antimikrobiyal paketleme aynı zamanda dahil edilen maddenin kontrollü veya sürekli bir şekilde salınmasına izin vererek taşınma ve depolamada mikrobiyal inhibisyon sağlar (Malhotra & ark., 2015).

Antimikrobiyal gıda ambalajları, hazırlama yöntemlerine göre tipik olarak beş gruba ayrılır: (1) paketlere antimikrobiyal maddeler içeren poşetlerin/emici pedlerin eklenmesi; (2) antimikrobiyal maddelerin doğrudan polimerlere dahil edilmesi; (3) polimer yüzeylere antimikrobiyal kaplamanın uygulanması; (4) antimikrobiyallerin polimerlere iyon veya kovalent bağlarla immobilizasyonu; veya (5) film oluşturma özelliğine sahip antimikrobiyal polimerlerin kullanımı (Appendini & Hotchkiss, 2002; Khaneghah & ark., 2018; Véronique, 2008).

Ayrıca antimikrobiyal gıda ambalajlarının hazırlanmasında kombine yöntemlerin de kullanıldığı rapor edilmiştir. Örneğın, TiO₂ nanopartiküllerinin (fotokatalitik bir antimikrobiyal metal oksit) kitosan (film oluşturma özelliğine sahip bir antimikrobiyal biyopolimer) içeresine dahil edilmesi (yöntem [1] ve [5]'in kombinasyonu), görünür ışık altında mikropları öldürebilen bir kitosan-TiO₂ antimikrobiyal kompozit film ile sonuçlanmıştır (Zhang & ark., 2017). Döndürerek kaplama ve immobilizasyon (yani, yöntem [3] ve [4]'ün kombinasyonu) ile hazırlanan antimikrobiyal gıda ambalajının hem katyonik amin kısımlarının hem de N-halamin öncülünün varlığına bağlı olarak klorlama üzerinde hem içsel hem de yeniden şarj edilebilir antimikrobiyal etki gösterdiği rapor edilmiştir (Bastarrachea & Goddard, 2016; Hung & ark., 2018). Bu tür antimikrobiyal paketleme sistemlerinin

mikrobiyal büyümeyi kontrol ettiği ve gıda raf ömrünü etkili bir şekilde uzattığı laboratuvar ölçeğinde kanıtlanmıştır (Fu & Dudley, 2021).

Bununla birlikte, ticarileştirilmiş ürünler, uçucu antimikrobiyal maddelerle (örneğin, klor dioksit ve kükürt dioksit) veya metal oksitlerle birleştirilmiş plastik filmlerle (örneğin, gümüş bileşiği) paketlenmiş poşetlerle sınırlıdır (Sung & ark., 2013). Üretim teknolojisi, ekonomik etki, tüketici kabulü ve aktif paketlemeyi çevreleyen düzenleyici politikalar, antimikrobiyal gıda paketlemenin uygulanmasını sınırlamaktadır (Fu & Dudley, 2021).

Sonuç

Bu bölümde, gıda ambalajlama sistemlerinde kullanılan yenilikçi yaklaşımlar ele alınmıştır. Aktif, akıllı ve antimikrobiyal ambalajlama sistemleri, gıda güvenliği ve kalitesinin korunması, raf ömrünün uzatılması ve tüketici memnuniyetinin artırılmasında önemli rol oynamaktadır. Bu sistemler, gıdaların bozulmasını önlemek, tazeliklerini korumak ve gıda güvenliğini izlemek için tasarlanmıştır.

Aktif ambalajlama sistemleri, gıdaların raf ömrünü uzatmaya ve kalite kaybını önlemeye yönelik olarak geliştirilmiş, oksijen, nem veya mikrobiyal büyümeyi kontrol eden maddelerle zenginleştirilmiştir. Akıllı ambalajlama ise, tüketicilere gıda tazeliği ve güvenliği hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlayarak, yenilikçi teknolojilerle gıda kalitesini izlemeye olanak tanımaktadır. Antimikrobiyal ambalajlama sistemleri ise, zararlı mikroorganizmaların büyümesini engelleyerek gıdanın korunmasını desteklemekte ve gıda güvenliğini artırmaktadır.

Bu ambalajlama yaklaşımlarının gıda sektöründe uygulanabilirliği, yenilikçi materyallerin ve teknolojilerin geliştirilmesiyle desteklenmektedir. Ayrıca, bu sistemler sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerin azaltılması açısından da potansiyel sunmaktadır. Gelecekte, ambalajlama sistemlerinde daha entegre, çevre dostu ve tüketici odaklı çözümler geliştirilmesi beklenmektedir. Bu bağlamda, yapılan çalışmalar, sektördeki dönüşüm sürecine ışık tutmakta ve gıda ambalajlama teknolojilerinde yeni standartların belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Kaynaklar

Alavi, M., & Rai, M. (2019). Recent progress in nanoformulations of silver nanoparticles with cellulose, chitosan, and alginic acid biopolymers for antibacterial applications. *Applied microbiology and biotechnology*, 103(21), 8669-8676.

Alizadeh-Sani, M., Mohammadian, E., Rhim, J. W., & Jafari, S. M. (2020). pH-sensitive (halochromic) smart packaging films based on natural food colorants for the monitoring of food quality and safety. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 93-144.

Almasi, H., Jahanbakhsh Oskouie, M., & Saleh, A. (2021). A review on techniques utilized for design of controlled release food active packaging. *Critical reviews in food science and nutrition*, 61(15), 2601-2621.

Appendini, P., & Hotchkiss, J. H. (2002). Review of antimicrobial food packaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3(2), 113-126. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(02\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(02)00012-7)

Assefa, Z., & Admassu, S. (2013). Development and characterization of antimicrobial packaging films. *Food Processing & Technology*, 4 (235), doi:10.4172/2157- 7110.1000235

Bastarrachea, L. J., & Goddard, J. M. (2016). Self-healing antimicrobial polymer coating with efficacy in the presence of organic matter. *Applied Surface Science*, 378, 479-488. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.03.198>

Begley, T. H. (1997). Methods and approaches used by FDA to evaluate the safety of food packaging materials. *Food Additives & Contaminants*, 14(6-7), 545-553.

Buonocore, G. G., Del Nobile, M. A., Panizza, A., Corbo, M. R., & Nicolais, L. (2003). A general approach to describe the antimicrobial agent release from highly swellable films intended for food packaging applications. *Journal of controlled release*, 90(1), 97-107.

Butnaru, E., Stoleru, E., Brebu, M. A., Darie-Nita, R. N., Bargan, A., & Vasile, C. (2019). Chitosan-based bionanocomposite films prepared by emulsion technique for food preservation. *Materials*, 12(3), 373.

Cha, D. S., Choi, J. H., Chinnan, M. S., & Park, H. J. (2002). Antimicrobial films based on Na-alginate and κ -carrageenan. *LWT*, 35(8), 715-719.

Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., & Perego, P. (2020). Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. *Foods*, 9(11), 1628.

Fu, Y., & Dudley, E. G. (2021). Antimicrobial-coated films as food packaging: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3404-3437.

Ghaani, M., Cozzolino, C. A., Castelli, G., & Farris, S. (2016). An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 1-11.

Hotchkiss, J. H. (1997). Food-packaging interactions influencing quality and safety. *Food Additives & Contaminants*, 14(6-7), 601-607.

Hung, Y. T., McLandsborough, L. A., Goddard, J. M., & Bastarrachea, L. J. (2018). Antimicrobial polymer coatings with efficacy against pathogenic and spoilage microorganisms. *Lwt*, 97, 546-554. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.046>

Kalpana, S., Priyadarshini, S. R., Leena, M. M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Intelligent packaging: Trends and applications in food systems. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 145-157.

Khaneghah, A. M., Hashemi, S. M. B., & Limbo, S. (2018). Antimicrobial agents and packaging systems in antimicrobial active food packaging: An overview of approaches and interactions. *Food and Bioproducts Processing*, 111, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.05.001>

Kumar, P., Reinitz, H. W., Simunovic, J., Sandeep, K. P., & Franzon, P. D. (2009). Overview of RFID technology and its applications in the food industry. *Journal of food science*, 74 (8), R101-R106.

Li, B., Kennedy, J. F., Peng, J. L., Yie, X., & Xie, B. J. (2006). Preparation and performance evaluation of glucomannan–chitosan–nisin ternary antimicrobial blend film. *Carbohydrate Polymers*, 65(4), 488-494.

Malhotra, B., Keshwani, A., & Kharkwal, H. (2015). Antimicrobial food packaging: Potential and pitfalls. *Frontiers in microbiology*, 6, 611. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00611>

Müller, P., & Schmid, M. (2019). Intelligent packaging in the food sector: A brief overview. *Foods*, 8(1), 16.

Plessky, V. P., & Reindl, L. M. (2010). Review on SAW RFID tags. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 57(3), 654-668.

Priyadarshi, R., Ezati, P., & Rhim, J. W. (2021). Recent advances in intelligent food packaging applications using natural food colorants. *ACS Food Science & Technology*, 1(2), 124-138.

Salević, A., Prieto, C., Cabedo, L., Nedović, V., & Lagaron, J. M. (2019). Physicochemical, antioxidant and antimicrobial properties of electrospun poly (ϵ -caprolactone) films containing a solid dispersion of sage (*Salvia officinalis* L.) extract. *Nanomaterials*, 9(2), 270.

Sarac, A., Absi, N., & Dauzère-Pérès, S. (2010). A literature review on the impact of RFID technologies on supply chain management. *International journal of production economics*, 128(1), 77-95.

Shen, M., Forghani, F., Kong, X., Liu, D., Ye, X., Chen, S., & Ding, T. (2020). Antibacterial applications of metal–organic frameworks and their composites. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1397-1419.

Siracusa, V., & Lotti, N. (2019). Intelligent packaging to improve shelf life. *In Food quality and shelf life (pp. 261-279)*. Academic Press.

Sung, S. Y., Sin, L. T., Tee, T. T., Bee, S. T., Rahmat, A. R., Rahman, W. A. W. A., ... & Vikhraman, M. (2013). Antimicrobial agents for food packaging applications. *Trends in Food Science & Technology*, 33(2), 110-123.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.08.001>

Valencia-Chamorro, S. A., Palou, L., Del Río, M. A., & Pérez-Gago, M. B. (2011). Antimicrobial edible films and coatings for fresh and minimally processed fruits and vegetables: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 51(9), 872-900.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2010.485705>

Vanderroost, M., Ragaert, P., Devlieghere, F., & De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: The next generation. *Trends in food science & technology*, 39(1), 47-62.

Vasile, C. (2018). Polymeric nanocomposites and nanocoatings for food packaging: A review. *Materials*, 11(10), 1834.

Vasile, C., Baican, M. (2021). Progresses in food packaging, food quality, and safety—controlled-release antioxidant and/or antimicrobial packaging. *Molecules*, 26(5), 1263.

Vasile, C., Darie, R. N., Cheaburu-Yilmaz, C. N., Pricope, G. M., Bračić, M., Pamfil, D., ... & Duraccio, D. (2013). Low density polyethylene–chitosan composites. *Composites Part B: Engineering*, 55, 314-323.

Vasile, C., Râpă, M., Ștefan, M., Stan, M., Macavei, S., Darie-Niță, R. N., ... & Brebu, M. (2017). New PLA/ZnO: Cu/Ag bionanocomposites for food packaging. *Express Polymer Letters*, 11(7).

Véronique, C. O. M. A. (2008). Bioactive packaging technologies for extended shelf life of meat-based products. *Meat science*, 78(1-2), 90-103.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.07.035>

Wang, H., Qian, J., & Ding, F. (2018). Emerging chitosan-based films for food packaging applications. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(2), 395-413.

Yam, K. L., Takhistov, P. T., & Miltz, J. (2005). Intelligent packaging: concepts and applications. *Journal of food science*, 70(1), R1-R10.

Zactiti, E. M., & Kieckbusch, T. G. (2009). Release of potassium sorbate from active films of sodium alginate crosslinked with calcium chloride. *Packaging Technology and Science: An International Journal*, 22(6), 349-358.

Zhang, X., Xiao, G., Wang, Y., Zhao, Y., Su, H., & Tan, T. (2017). Preparation of chitosan-TiO₂ composite film with efficient antimicrobial activities under visible light for food packaging applications. *Carbohydrate Polymers*, 169, 101-107.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.073>

BÖLÜM IV

Türkiye Atmosferinde Gymnosperm Polenlerinin Dağılımları

Salih AKPINAR¹
Gül Esma AKDOĞAN KARADAĞ²

Giriş

Bitkiler tohumlu ve tohumuz bitkiler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tohumlu bitkilerde gynosperm ve angiosperm olarak ayrılmaktadır. Gymnospermilerin birçoğu rüzgârı tozlaştığı için ürettikleri polenler duyarlı insanlarda alerjik semptomlara neden olmaktadır.

Gymnosperm polenleri, alerjik reaksiyonlara neden olabilen önemli aeroallerjenlerdir. Özellikle çam (*Pinus*), sedir (*Cedrus*) ve

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Kars/Türkiye, ORCID: 0000-0003-2435-7373, slh_akpinar@hotmail.com,

² Dr. Öğr. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Kars/Türkiye, ORCID: 0000-0001-7959-2130, gulesmaakdogan@kafkas.edu.tr

serviler (Cupressaceae) gibi türlerin polenleri, mevsimsel alerjik rinit ve astım gibi solunum yolu hastalıklarının tetikleyicileri arasında yer almaktadır (Hussain, Chakraborty & Bhattacharya, 2011). Gymnosperm polenlerinin alerjenik potansiyeli, polenlerin yapısal özellikleri ve çevresel faktörlerle etkileşimleri ile ilişkilidir (Kim & ark., 2020). Örneğin, polenlerin havada uzun mesafelerde taşınabilmesi, alerjik bireylerin maruz kalma riskini artırmaktadır (Çakır & Doğan, 2020). Alerjik reaksiyonlar, genellikle polenlerin solunum yollarına girmesiyle başlar ve bu durum, bağışıklık sisteminin aşırı tepki vermesiyle sonuçlanır (Reese & Williams, 2019). Gymnosperm polenleri, özellikle anemofilik (rüzgarla tozlaşan) türler arasında yaygın olarak bulunur ve bu durum, alerjik hastalıkların prevalansını artırmaktadır (Seyfullah & ark., 2020). Sonuç olarak, gymnosperm polenlerine karşı duyarlılık, alerjik hastalıkların yönetiminde dikkate alınması gereken önemli bir faktördür (Ke & ark., 2021).

Bu çalışmada insanlarda alerjiye neden olan Türkiye’de doğal olarak yayılış gösteren Pinaceae – *Pinus* ve Cupressaceae/Taxaceae taksonlarının Türkiye’de yapılmış olan atmosferik polen çalışmalarındaki yoğunlukları, aylık dağılımları incelenmeye çalışılmıştır.

1. Pinaceae ve Cupressaceae Familya ve Alerjenik Özellikleri

Pinaceae (çamgiller) ve Cupressaceae (servigiller) familyaları, gymnospermiler arasında önemli bir yer tutar ve her iki grup da çeşitli ekolojik ve morfolojik özelliklere sahiptir. Pinaceae familyası, 11 cins ve 120’den fazla tür içermektedir. En büyük cins, 110’dan fazla türü olan *Pinus* (çam) cinsidir (Lin & ark., 2010). Diğer önemli cinsler arasında *Picea* (köknar), *Abies* (ladin) ve *Cedrus* (sedir) yer

almaktadır (Lin & ark., 2010). Bu familya, genellikle iğne yapraklı ağaçlardan oluşur ve çam türleri (*Pinus*) ile bilinir. *Pinus* polenleri, rüzgarla taşınan ve alerjik reaksiyonlara neden olabilen önemli aeroallerjenlerdir (Nikolaidis & ark., 2015; Bıçakçı & Tosunoğlu, 2019). Polenleri, genellikle iki katmanlı bir yapıya sahiptir ve bu yapı, polenlerin atmosferde uzun süre kalmasını sağlar (Otto, Simoneit & Wilde, 2007). *Pinus* türleri, genellikle kurak iklimlerde yetişir ve bu nedenle su tasarrufu sağlayan iğne yaprakları ile karakterizedir (Du & ark., 2020). Ayrıca, bu familya, terpenoid bileşikler açısından zengindir ve bu bileşiklerin bazıları alerjik reaksiyonları tetikleyebilir (Popova & ark., 2010).

Cupressaceae familyası (*Cupressus* ve *Juniperus*) ise 27 cins ve 140'tan fazla tür içermektedir. Önemli cinsler arasında *Cupressus* (servi), *Juniperus* (ardıç) ve *Taxodium* (bataklık servisi) bulunmaktadır (Woudstra, 2023). Ayrıca, Taxaceae (porsukgiller) familyası da Cupressaceae ile yakın akrabalık gösterir ve 6 cins içermektedir (Woudstra, 2023). Cupressaceae ve Taxaceae polenleri birbirine çok benzerlik gösterdiğinden teşhislerde ayırım yapılmamaktadır. Cupressaceae/Taxaceae polenleri, özellikle kış aylarında alerjik reaksiyonlara neden olabilen önemli bir faktördür (Nikolaidis & ark., 2015; Linares & ark., 2021). Polenleri, genellikle monoporate ve spheroidal yapıda olup, ince bir dış tabakaya sahiptir (Hidalgo, Galán & Domínguez, 2003). Cupressaceae familyası, çeşitli iklim koşullarında yaygın olarak bulunur ve bu durum, polenlerin mevsimsel dağılımını etkiler (Nikolaidis & ark., 2015; Linares & ark., 2021). Ayrıca, bu familya, alerjik bireylerde solunum yolu hastalıklarına yol açabilen önemli allerjenler içermektedir (Bıçakçı & Tosunoğlu, 2019; Marchuet, Luengo & Cardona, 2020).

Sonuç olarak, hem Pinaceae hem de Cupressaceae familyaları, alerjik etkileri olan polenler üretir ve bu durum, alerjik bireyler için önemli bir sağlık sorunu oluşturur (Bıçakçı & Tosunoğlu, 2019; Marchuet, Luengo & Cardona, 2020).

Pinaceae (amgiller) ve Cupressaceae (servigiller) familyalarının polenleri, alerjik reaksiyonlara neden olabilen önemli aeroallerjenlerdir. *Pinus* türleri, özellikle rüzėarla taşınan polenleri ile bilinir ve bu polenler, genellikle iki katmanlı bir yapıya sahiptir: iç katman (intine) ve dış katman (exine) (Bağcıoğlu, Zimmermann & Köhler, 2015). *Pinus* polenleri, alerjik bireylerde solunum yolu hastalıklarına yol açabilen IgE aracılı alerjik reaksiyonları tetikleyebilir (Domínguez-Ortega & ark., 2016). Ayrıca, *Pinus* polenlerinin boyutları, türler arasında değişiklik gösterebilir ve bu durum alerjenik potansiyeli etkileyebilir (Zamira, 2023). Cupressaceae polenleri de benzer şekilde yüksek alerjenik özellikler taşır. Bu polenler, özellikle kış aylarında polinosis vakalarına neden olabilir (Charpin & ark., 2017; Linares & ark., 2021). Cupressaceae polenleri, genellikle ince bir dış tabakaya (exine) ve iç tabakaya (intine) sahiptir ve bu yapı, polenlerin atmosferdeki alerjenik etkisini artırabilir (Linares & ark., 2021). Ayrıca, Cupressaceae polenleri, özellikle kış aylarında solunum yolu alerjilerine yol açan önemli bir faktördür (Charpin & ark., 2017; Linares & ark., 2021). Sonuç olarak, hem Pinaceae hem de Cupressaceae polenleri, alerjik hastalıkların yönetiminde dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir ve bu polenlerin özellikleri, alerjik bireyler için risk oluşturabilir (Bıçakçı & Tosunoğlu, 2019).

2. Pinaceae ve Cupressaceae/Taxaceae Alerji Çalışmaları

Pinaceae/*Pinus* polenlerinin düşük protein içeriği nedeniyle alerjik hastalıklara sebep olma potansiyelinin düşük olduğu ifade edilse de, bu polenlerin astım gibi ciddi alerjik rahatsızlıklara neden olabileceği durumlar da rapor edilmiştir (Speiksma, 1990). İspanya'nın Vigo kentinde alerjik rinit ve astım hastalarını içeren bir çalışmada, deri prik testi sonuçlarına göre hastaların %3'ünün *Pinus* polenlerine duyarlılık gösterdiği tespit edilmiştir (Belmonte, Roure & March, 1998). İtalya'nın Roma Üniversitesi'nde yürütülen bir başka araştırmada ise, test edilen 217 öğrencinin %3.7'sinde *Pinus* polenlerine karşı alerjik reaksiyonlar gözlenmiştir (Caiola & ark., 2002). Madrid'de yapılan çalışmalarda, *Pinus sylvestris* polenlerine hastaların %7'sinin, *Pinus pinaster* polenlerine %2'sinin, *Pinus halepensis* ve *Pinus pinea* polenlerine ise %4'ünün duyarlılık gösterdiği belirlenmiştir (Subiza & ark., 1995). Selanik'teki bir çalışmada ise astımlı bireylerin %9.30'unun *Pinus* türlerine ait polenlere karşı alerjik reaksiyon geliştirdiği ortaya konulmuştur (Gioulekas & ark., 2004).

Cupressaceae familyasına ait polenlerin de alerjen etkilerinin önemli olduğu belirtilmektedir. Örneğin, *Cupressus* sp. polenlerinin deri testlerinde pozitif reaksiyon gösterdiği ve saman nezlesine sebep olabildiği ifade edilmiştir (Bousquet & ark., 1984). *Juniperus* sp.'nin ise özellikle kış aylarında solunum yolu hastalıklarına yol açabileceği bildirilmiştir (Ramirez, 1984). Selanik'te yapılan bir çalışmada astım hastalarının %12.70'inin Cupressaceae polenlerine duyarlı olduğu, bu polenlerin en yoğun olduğu dönemin Mart ayı olduğu vurgulanmıştır (Gioulekas & ark., 2004). İspanya'nın Granada şehrinde yapılan araştırmalarda astım hastalarının

%30'unun bu familyanın polenlerine karşı duyarlılık gösterdiği, bu polenlerin Akdeniz bölgesinde artan önemde bir alerjen olduğu ifade edilmiştir (Guardia & ark., 2006). Bununla birlikte, Vigo kentinde yapılan atmosferik polen çalışmalarında, Cupressaceae polenlerine duyarlılık oranı %1 olarak kaydedilmiştir (Belmonte, Roure & March, 1998). Madrid'deki bir başka çalışmada ise *Cupressus arizonica* polenlerine hastaların %20'sinin, *Cupressus sempervirens* polenlerine ise %16'sının pozitif reaksiyon verdiği tespit edilmiştir (Subiza & ark., 1995).

Bu bilgiler, özellikle Pinaceae ve Cupressaceae familyalarına ait polenlerin alerjik etkileri ve bu etkilerin bölgesel farklılıklar gösterebileceği konusunda önemli bir çerçeve sunmaktadır.

3. Bulgular

Gravimetrik yöntem, yer çekimi etkisiyle polenlerin yakalanmasını ve analiz edilmesini temel alır. Bu yöntemde, birim alan başına düşen (cm^2) atmosferik polen yoğunluğu ölçülmektedir. Volümetrik yöntem ise vakum etkisini kullanarak atmosferdeki polenlerin toplanmasını sağlar ve birim hacim (m^3) başına polen yoğunluğu tespit edilmektedir. Bu derlemede, gravimetrik yöntemi kullanarak polen yoğunluğunu belirlemek amacıyla Durham cihazından, volümetrik yöntemi uygulamak için ise Lanzoni cihazından yararlanılan çalışmalar ele alınmıştır. Bu çalışmalar, farklı bölgelerde Cupressaceae/Taxaceae ve Pinaceae (özellikle *Pinus*) polenlerinin yoğunluklarını incelemiştir. Volümetrik ve gravimetrik yöntemlerle elde edilen bulgular, aylık polen dağılımları ile birlikte tablolar halinde sunulmuştur (Tablo 1 – Tablo 8).

3.1. Pinaceae/*Pinus* polenlerinin Türkiye atmosferindeki dağılımları

Pinaceae veya *Pinus* Polenlerinin aylık dağılımları incelendiğinde yılın büyük bölümünde atmosferde saptanmıştır. Toplam polen miktarına göre *Pinus* veya Pinaceae ait polenlerin görülme oranları %2.27 - %88.79 arasında değiştiği belirlenmiştir (Tablo 1 ve Tablo 2). En fazla %88.79 oranında Ankara – Çamkoru atmosferinde gözlenmiştir (Kızılpınar & Doğan, 2010). Bu bölgeden sonra sırasıyla Eskişehir – Sivrihisar (%69.31), Bursa – Harmancık (%63.5), Kırıkkale (%61.40), Balıkesir - Savaştepe (%58.20) ve İzmir (1,6 m) (57.30) gelmektedir (İnce, 1994; Güvensen & Öztürk, 2003; Bilisik, Akyalçın & Bıçakçı, 2008; Erkara, 2008; Kaya, 2020). Çalışmaların yapıldığı 82 bölgede Pinaceae/*Pinus* polenleri %10'un üzerinde polen yoğunluğuna sahip olup, Ankara – Çamkroru, Eskişehir – Sivrihisar, Bursa – Harmancık, Kırıkkale, Balıkesir – Savaştepe, İzmir, Çanakkale, Kütahya - Tavşanlı'da %50'den fazla konsantrasyona sahip olduğu görülmektedir (İnce, 1994; Güvensen & Öztürk, 2003; Guvensen & ark., 2005; Bilisik, Akyalçın & Bıçakçı, 2008; Erkara, 2008; Kızılpınar & Doğan, 2010; Celenk, Karasu & Malyer, 2016; Kaya, 2020). 51 bölgede en çok bulunan takson, 71 bölgede ise ilk üç takson arasında olduğu saptanmıştır. Pinaceae/*Pinus* polenlerinin yıl içerisindeki aylık dağılımları 4 - 12 ay arasında değişmektedir. Ardahan ve Sakarya'da dört ay ile en kısa, Aksaray, Nevşehir, Uşak, Muğla, Balıkesir – Ayvalık, Mersin, Manisa, Sinop, Nevşehir – Ürgüp, Antalya –Serik ve Adana'da ise 12 ay ile en uzun dönemde atmosferde rastlanmıştır (Tablo 3 ve Tablo 4) (İnce & Pehlivan, 1990; Bıcakçı, 2006; Ünver, 2012; Armutçuoğlu, 2015; Çetin & ark., 2015; Güvensen & ark., 2018; Uğuz & ark., 2018; Altıntaş & ark., 2019; Çakır & Doğan, 2020;

Çeter, Özler & Pınar, 2020; Hayoub, 2020; Yurtcan, 2020; Şafak, 2022). Pinaceae/*Pinus* polenleri aylık olarak incelendiğinde 43 bölgenin 25'inde 9 - 12 ay arası havada tespit edilmiştir. Aylara göre değerlendirdiğimizde Ocak'ta 43 bölgeden 19, Şubat'ta 23, Martta 42, Nisan, Mayıs ve Haziran'da tüm bölgelerde, Temmuz'da 41, Ağustos'ta 40, Eylül'de 32, Ekim'de 25, Kasım'da 23 ve Aralık'ta ise 20 bölgede atmosferde belirlenmiştir (Tablo). Pinaceae'nin aylık ve bölgesel dağılımına genel olarak bakıldığında, bu polen türünün yıl boyunca gözlemlendiği bölgelerde belirgin bir mevsimsel değişim gösterdiği görülmektedir. Kış aylarında (Aralık - Ocak – Şubat) yoğunluk oldukça düşük olup, yalnızca sınırlı sayıda bölgede tespit edilmiştir. Bu dönem, polen üretiminin doğal olarak azaldığı ve bitkilerin dinlenme dönemine girdiği zamanları temsil etmektedir. Bahar ayları (Mart – Nisan - Mayıs) ile birlikte Pinaceae'nin dağılımı hızlı bir şekilde artış göstermiştir. Özellikle Nisan ve Mayıs aylarında, 43 bölge ile en geniş yayılım gösterdiği dönemler olmuştur. Bu durum, Pinaceae familyasına ait bitkilerin bu aylarda polen üretimindeki zirve dönemlerini yansıtmaktadır. Yaz aylarında (Haziran – Temmuz - Ağustos) yayılımın hafif bir azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Ancak yine de Haziran ayında 43 bölgede görülmeye devam etmiş, Temmuz ve Ağustos aylarında ise bölgesel yoğunluk biraz daha azalarak sırasıyla 41 ve 39 bölgeye gerilemiştir. Sonbahar (Eylül – Ekim - Kasım) döneminde ise polen dağılımında belirgin bir düşüş gözlenmiş ve Eylül'den itibaren bölgesel yayılım azalmaya devam ederek Kasım ayında 23 bölgeye kadar düşmüştür. Bu dönem, polen üretiminin sonlarına yaklaşıldığını ve bitkilerin kış hazırlığına geçtiğini göstermektedir (Tablo 3 ve Tablo 4).

Genel eğilim incelendiğinde, Pinaceae'nin polen yayılımının en yoğun olduğu dönem ilkbahar ve erken yaz ayları (Mart - Haziran) olarak öne çıkmaktadır. Sonbahar ve kış aylarında (Eylül - Aralık) ise bu yoğunluk giderek azalmaktadır. Bu durum, Pinaceae familyasına ait bitkilerin biyolojik ritmini ve mevsimsel adaptasyonlarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. En yoğun olarak ilkbahar ve yaz döneminde özellikle Mart - Haziran aylarında görülmektedir (Tablo 3 ve Tablo 4).

Tablo 1. Türkiye Atmosferinde yapılan volumetrik çalışmalardaki Pinaceae/Pinus polen yoğunluğu (%)

Çalışılan Bölge	%	Kaynakça	Çalışılan Bölge	%	Kaynakça
Kastamonu	47.45	Çeter & ark., 2012	Elazığ	20.16	Kilic & ark., 2019
Kastamonu	42.90	Demirci, 2017	Kars	18.29	Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024
Ardahan - Posof	38.57	Karabağ, 2023	Manisa	17.38	Güvensen & ark., 2018
Nevşehir	35.00	Hayoub, 2020	Sinop	16.10	Ceter, Özler & Pınar, 2020
Ankara	32.43	Pınar & ark., 1999	Niğde	15.00	Seçil, 2018
Uşak	31.96	Uğuz & ark., 2018	Samsun	14.54	Erkan & ark., 2006
Gümüşhane	30.92	Türkmen, Çeter & Pınar, 2018	Nevşehir - Ürgüp	11.81	Ünver, 2012
Kars - Sarıkamış	29.8	Akpınar & Altunoğlu, 2024	Adana	10.41	Altıntaş & ark., 2019
Konya	29.36	Kızılpınar & ark., 2012	Muğla - Bodrum	9.78	Tosunoglu & Bicakci, 2015
Aksaray	28.34	Şafak, 2022	İzmir - Çeşme	8.41	Uğuz, Guvensen & Tort, 2017
Kayseri	27.73	Acar & ark., 2015	Yalova	7.34	Altunoglu & ark., 2009
Kırklareli	27.16	Erkan & ark., 2011	İstanbul - Anadolu Yakası	7.06	Celenk & ark., 2010
Balıkesir - Ayvalık	26.05	Yurtcan, 2020	Trabzon	6.44	Altunoğlu & ark., 2022
Mersin	25.61	Çakır & Doğan, 2020	Kocaeli	4.22	Saitoğlu, 2013
Diyarbakır	24.58	Bursalı, 2005	Mardin	3.84	Tosunoglu & ark., 2018a
Denizli	24.19	Güvensen & ark., 2013	Hatay	3.70	Tosunoglu & ark., 2018b
Antalya	24.18	Tosunoglu & ark., 2015	Van	2.94	Bicakci & ark., 2017
Bursa	21.37	Celenk & ark., 2009	İstanbul - Avrupa Yakası	2.73	Celenk & ark., 2010
Bursa	20.87	Bicakci & ark., 2003			

Tablo 2. Türkiye Atmosferinde yapılan gravimetrik çalışmalardaki Pinaceae/Pinus polen yoğunluğu (%)

Çalışılan Bölge	%	Kaynakça	Çalışılan Bölge	%	Kaynakça
Ankara - Çankoru	88.79	Kızılpınar & Doğan, 2010	Bilecik	25.33	Türe & Bökük, 2009
Eskişehir - Sivrihisar	69.31	Erkara, 2008	Bursa - İnegöl	23.90	Bıçakcı & ark., 1999
Bursa - Harmancık	63.5	Kaya, 2020	Çanakkale - Bozcaada	23.71	Bilgiç, 2008
Kırıkkale	61.40	İnce, 1994	Düzce	23.69	Serbes & Kaplan, 2014
Balıkesir - Savaştepe	58.20	Bilişik, Akyalçın & Bıçakçı, 2008	Balıkesir	23.04	Bıçakcı & Akyalçın, 2000
İzmir (1.6 m)	57.30	Güvensen & Öztürk, 2003	İzmir - Buca (20 m)	22.60	Güvensen & Öztürk, 2002
İzmir (20 m)	57.00	Güvensen & Öztürk, 2003	Bursa - Gemlik	22.14	Saatcıoğlu & ark., 2011
Çanakkale	56.04	Güvensen & ark., 2005	Ardahan	21.95	Çetin & ark., 2015
Kütahya - Tavşanlı	51.56	Celenk, Karasu & Malyer, 2016	Bursa - Karacabey	21.68	Bekil, Tosunoğlu & Bıçakçı, 2019
Osmaniye	48.75	Alaca, 2018	Konya	21.63	Altunoğlu & ark., 2010
Bursa - Keleş	48.32	Bıçakçı & ark., 2000	Aydın - Kuşadası	19.71	Tosunoğlu & ark., 2013
Balıkesir - Gönen	48.23	Tosunoğlu, Akyalçın & Bıçakçı, 2018	Ankara - Beytepe	19.63	Doğan & Inceoğlu, 1995
Eskişehir	48.1	Erkara, Pehlivan & Tokur, 2007	Bursa - Mustafakemalpaşa	19.59	Bıçakçı, Canitez & Malyer, 1999
Muğla - Köyceğiz	48.01	Tosunoğlu & ark., 2009	Balıkesir - Dursunbey	19.58	Akyalçın, Tosunoğlu & Bıçakcı, 2018
Karabük	46.84	Kaplan & Özdoğan, 2015	Bartın	19.53	Kaya & Aras, 2012
Aydın - Didim	45.58	Bilisik & ark., 2008b	Şanlıurfa	16.48	Çetin, Turfan & Güvensen, 2009
Muğla - Fethiye	42.46	Bilisik & ark., 2008a	Çanakkale - Gökçeada	16.05	Bilgiç, 2008
Bursa - Büyükorhan	36.93	Tosunoğlu, Babayigit & Bıçakçı, 2015	Tekirdağ	15.91	Erkan, Bıçakçı & Aybeke, 2010
Kütahya	35.8	Bıçakcı & ark., 1999	Bursa - Görükle	15.33	Bıçakçı, Malyer & Sapan, 1997
Kırşehir	33.70	Bülbül & Pehlivan, 2013	Sakarya	14.10	Bıçakcı, 2006
Gümüşhane - Şiran	33.38	Ergün, 2020	Bursa - İznik	13.35	Bıçakçı & ark., 1999
İzmir - Buca (1.6 m)	31.60	Güvensen & Öztürk, 2002	Trabzon	11.60	Fişne & Pehlivan, 2022
İsparta	30.94	Bıçakçı & ark., 2000	Bursa - Mudanya	11.50	Bıçakçı & ark., 1995
Zonguldak	29.73	Kaplan, 2004	Edirne	11.47	Bıçakcı & ark., 2004
Muğla	28.57	Armutçuoğlu, 2015	Antalya - Serik	10.90	İnce & Pehlivan, 1990
Burdur	28.13	Bıçakcı & ark., 2000	Rize	7.16	Bıçakçı & ark., 2002
İzmir - Karşıyaka	27.18	Güvensen, 2006	Kars - Kağızman	5.14	Yalçın & ark., 2017
İzmir - Dikili	26.54	Tosunoğlu, 2021	Bitlis	2.74	Celenk & Bıçakcı, 2005
Afyon	26.27	Bıçakcı & ark., 2000	Mardin - Kızıltepe	2.27	Erkara, Osoydan & Karataş, 2016
Bilecik - Bozüyük	26.16	Türe & Salkurt, 2005			

Tablo 3. Türkiye Atmosferinde yapılan çalışmalardaki Pinaceae/Pinus polenin aylık yoğunluğu (%)

Çalışılan Bölge	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam(%)	Kaynakça
Bursa - Harmanlık	-	0.01	0.28	6.84	50.45	5.45	0.25	0.07	0.16	-	-	-	63.50	Kaya, 2020
Kütahya - Tavşanlı	-	-	0.11	0.98	40.55	8.94	0.85	0.08	0.05	-	-	-	51.66	Celenk, Karasu & Malyer, 2016
Osmaniye	0.16	-	4.96	26.77	6.73	2.12	0.64	0.32	4.31	2.72	0.69	0.57	49.99	Alaca, 2018
Karabük	0.03	-	0.05	0.54	12.66	34.49	0.36	0.26	0.08	0.05	0.05	0.03	48.59	Kaplan & Özdoğan, 2015
Bahçeşehir - Dursunbey	-	-	0.20	6.55	26.02	14.54	0.67	0.18	0.18	-	-	-	48.23	Akyalcin, Tosunoğlu & Bilekci, 2018
Muğla - Köyceğiz	-	0.01	3.54	17.62	23.56	2.90	0.37	0.04	-	-	-	-	48.01	Tosunoğlu & ark., 2009
Kastamonu	-	-	0.07	0.84	30.27	15.00	0.63	0.21	0.04	0.38	0.01	0.004	47.45	Denirci, 2017
Aksaray	0.06	0.01	0.87	1.90	20.59	15.45	1.25	2.04	0.79	0.48	0.19	0.06	43.69	Şafak, 2022
Ardahan - Posof	-	-	0.01	0.04	16.07	22.40	0.05	-	-	-	-	-	38.57	Karabağ, 2023
Kütahya	-	-	0.03	1.38	26.10	7.76	0.36	0.18	-	-	-	-	35.82	Bilekci & ark., 1999
Neveşehir	0.18	0.30	1.12	4.80	19.82	6.72	0.27	0.39	0.37	0.84	0.10	0.09	34.98	Hayoub, 2020
Korşehir	0.05	0.33	0.56	0.67	11.26	3.52	1.32	0.62	3.97	9.45	1.94	-	33.68	Bülhül & Pehlivan, 2013
Gümüşhane - Şiran	-	0.03	0.10	0.42	31.22	1.15	0.23	0.10	0.13	0.01	-	-	33.38	Ergün, 2020
Uşak	0.11	0.12	0.69	10.72	13.9	5.38	0.33	0.2	0.14	0.16	0.13	0.08	31.96	Uğuz & ark., 2018
Kars - Sarıkams	-	-	0.03	0.34	0.67	26.66	1.46	0.18	0.23	0.10	0.11	0.01	29.79	Akpınar & Altunoğlu, 2024
Muğla	0.03	0.04	0.63	3.06	13.25	6.97	1.87	0.43	0.54	0.43	0.18	0.12	27.54	Armutcuoğlu, 2015
Kırklareli	-	-	0.04	0.67	25.16	0.84	0.23	0.13	0.09	-	-	-	27.16	Erkan & ark., 2011
Bahçeşehir - Ayvalık	0.06	0.02	1.59	12.78	9.71	1.04	0.27	0.05	0.09	0.03	0.06	0.03	25.72	Yurtcan, 2020
Mersin	0.19	0.04	10.66	7.06	2.70	2.27	0.71	0.43	0.20	0.71	0.25	0.40	25.61	Çakır & Doğan, 2020
Denizli	-	-	0.06	1.52	9.70	9.35	3.73	0.26	-	-	-	-	24.19	Güvensen & ark., 2013
Çanakkale - Bozcaada	0.01	0.04	0.98	16.58	4.88	0.86	0.20	0.07	0.05	0.03	0.01	-	23.71	Bilgiç, 2008
Düzce	-	0.11	0.16	1.79	7.98	12.66	0.21	0.26	0.26	0.26	-	-	23.69	Serbes & Kaplan, 2014

Tablo 4. Türkiye Atmosferinde yapılan çalışmalardaki Pinaceae/Pinus poleninın aylık yoğunluğu (%) (devamı)

Çalışılan Bölge	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplamı(%)	Kaynakça
Ardahan	-	-	0.11	0.16	13.98	7.70	-	-	-	-	-	-	21.95	Çetin & ark., 2015
Bursa - Karacabey	-	0.004	0.39	12.29	7.71	1.14	0.12	0.2	0.1	-	-	-	21.68	Bekil, Tosunoğlu & Bıçkıcı, 2019
Konya	-	-	-	1.11	3.42	15.79	1.13	0.18	-	-	-	-	21.63	Altunoglu & ark., 2010
Bursa	-	-	0.02	9.49	10.14	1.12	0.09	0.01	-	-	-	-	20.87	Bıçkıcı & ark., 2003
Elazığ	0.01	-	0.17	7.96	6.75	3.21	1.83	0.04	0.01	0.04	0.10	0.02	20.16	Kilic & ark., 2019
Balıkesir - Gönen	-	-	0.12	5.57	12.29	0.79	0.18	0.16	-	-	-	-	19.08	Tosunoğlu, Akyalcın & Bıçkıcı, 2018
Kars	-	-	0.01	0.08	1.84	15.70	0.54	0.08	0.03	0.003	-	-	18.29	Akdöğün Karadağ & Altunoglu, 2024
Manisa	0.14	0.03	0.22	7.44	6.91	1.61	0.33	0.22	0.18	0.12	0.03	0.14	17.38	Güvensen & ark., 2018
Çanakkale - Gökçeada	0.01	0.04	0.94	8.54	5.20	0.79	0.31	0.10	0.06	0.04	0.03	-	16.05	Bilgiç, 2008
Sinop	0.03	0.01	0.06	6.12	8.10	1.00	0.07	0.04	0.02	0.03	0.01	0.02	15.51	Ceter, Özler & Pınar, 2020
Niğde	0.03	0.07	2.14	7.70	3.78	1.32	0.07	0.02	0.10	0.07	0.01	-	15.31	Seçil, 2018
Sakarya	-	-	1.44	6.23	5.73	0.67	-	-	-	-	-	-	14.10	Bıçkıcı, 2006
Nevşehir - Ürgüp	0.05	0.07	0.50	1.21	4.89	3.87	0.66	0.15	0.09	0.24	0.05	0.03	11.81	Unver, 2012
Trabzon	-	0.15	3.16	4.38	1.76	0.74	0.16	0.17	0.12	0.57	0.31	0.06	11.59	Altunoglu & ark., 2022
Bursa - Mudanya	-	-	0.12	2.31	5.83	2.90	0.25	0.03	0.03	-	-	-	11.48	Bıçkıcı & ark., 1995
Antalya - Serik	0.37	0.37	0.48	2.60	1.21	2.23	0.74	0.86	0.56	0.55	0.39	0.52	10.90	İnce & Pehlivan, 1990
Adana	0.04	0.01	3.97	1.03	4.49	0.38	0.13	0.07	0.10	0.07	0.11	0.01	10.41	Altınbaş & ark., 2004
Yalova	-	-	0.05	2.55	3.48	1.16	0.1	-	-	-	-	-	7.34	Altunoglu & ark., 2009
Kocaeli	-	0.01	0.02	1.97	1.90	0.16	0.02	0.03	0.02	0.06	0.01	0.02	4.22	Satoglu, 2013
Mardin	0.01	0.04	0.40	2.05	0.44	0.63	0.18	0.04	0.03	-	-	0.01	3.84	Tosunoğlu & ark., 2018a
Hitay	-	-	1.00	0.90	0.91	0.79	0.09	0.02	-	-	0.001	0.001	3.70	Tosunoğlu & ark., 2018b

3.1. Cupressaceae/Taxaceae polenlerinin Türkiye atmosferindeki dağılımları

Cupressaceae/Taxaceae polen miktarının %0.91 – %54.01 arasında değiştiği görülmektedir. Adana %54.01 ile en yüksek yoğunluğa sahip bölge olmuştur (Altıntaş & ark., 2019). Bu bölgeyi sırasıyla Hatay (%50.86), İzmir – Buca (20 m) (%45.10), İzmir – Karşıyaka (%43.10), Muğla – Bodrum (%42.73) ve Antalya – Serik (%42.38) takip etmektedir (Tablo 5 ve Tablo 6) (İnce & Pehlivan, 1990; Güvensen & Öztürk, 2003; Güvensen, 2006; Tosunoglu & Bıçakcı, 2015; Tosunoglu & ark., 2018b). İncelenen bölgelerde Cupressaceae/ Taxaceae polenleri 14 bölgede 1. takson olarak 52 bölgede ise ilk üç takson içerisinde olduğu belirlenmiştir. Aylık olarak Cupressaceae/ Taxaceae polen yoğunlukları incelendiğinde polen yoğunluğunun 5 - 12 ay arasında değiştiği görülmektedir. Düzce, Karabük, Konya, Osmaniye ve Sakarya beş ay ile en kısa, Antalya – Serik, Bursa – Karacabey, Hatay, Kırklareli, Kocaeli, Manisa, Mardin, Mersin, Nevşehir, Sinop, Trabzon ve Uşak ise oniki ay ile en uzun dönemde atmosferde tespit edilmiştir (Tablo 7 ve Tablo 8) (İnce & Pehlivan, 1990; İnce, 1994; Bıçakcı, 2006; Altunoglu & ark., 2010; Saitoğlu, 2013; Serbes & Kaplan, 2014; Kaplan & Özdoğan, 2015; Alaca, 2018; Güvensen & ark., 2018; Tosunoglu & ark., 2018b; Tosunoglu & ark., 2018; Uğuz & ark., 2018; Bekil, Tosunoğlu & Bıçakçı, 2019; Çeter, Özler & Pınar, 2020; Çakir & Doğan, 2020; Hayoub, 2020; Altunoğlu & ark., 2022). Aylık incelenen Cupressaceae/Taxaceae polenlerine 43 bölgenin 24'ünde 9 - 12 ay arası atmosferde saptanmıştır. En yoğun görüldüğü dönem kış ve bahar ayları olurken, Ocak'ta 29, Şubat'ta 37, Mart'ta ve Nisan'da tüm bölgelerde, Mayıs'ta 42, Haziran'da 41, Temmuz'da 35, Ağustos'ta 28, Eylül'de 21, Ekim'de 24, Kasım'da

20 ve Aralık'ta 23 bölgede Cupressaceae/Taxaceae polenleri atmosferde belirlenmiştir (Tablo 7 ve Tablo 8).

Cupressaceae/Taxaceae familyasının polen dağılımı, mevsimsel döngüsüne göre belirgin değişiklikler göstermektedir. Özellikle kış aylarında (Ocak – Şubat - Aralık) polen yoğunluğunun düşük olması, bu bitkilerin dinlenme dönemine girdiğini ve polen üretiminin azaldığını göstermektedir. Bu dönemde sadece sınırlı sayıda bölgede polen tespit edilmesi, bitkilerin enerji tasarrufu sağladığı ve biyolojik faaliyetlerin yavaşladığı bir süreci işaret eder. Bahar ayları (Mart – Nisan - Mayıs), Cupressaceae/Taxaceae poleninin en yoğun yayıldığı dönemlerdir. Bu süreçte polen üretimi artar ve Mart ayından itibaren yayılma hızla artar. Özellikle Nisan ve Mayıs aylarında, 43 bölgeye kadar ulaşarak en geniş yayılımı göstermesi, bu dönemde bitkilerin polen üretimindeki zirveye ulaştığını belirtmektedir. Bu yüksek polen üretimi, bitkilerin üreme süreçlerini sürdürebilmesi için gerekli olan biyolojik aktivitenin artışı yansıtmaktadır. Yaz aylarında (Haziran – Temmuz - Ağustos) bir miktar azalma gözlenirse de, Haziran ayında 43 bölgede hala polen bulunması, bu bitkilerin yaz ortasında da polen üretimini sürdürdüğünü göstermektedir. Temmuz ve Ağustos ayında ise dağılım biraz daha daralmakta olup, bu, bitkilerin meyve verme ve olgunlaşma dönemine yaklaşmasıyla ilişkilendirilebilir. Sonbahar (Eylül - Ekim - Kasım) aylarında ise polen yayılımında belirgin bir azalma yaşanır. Eylül ayından itibaren azalan polen sayısı, bitkilerin biyolojik döngüsünün sonlarına yaklaşmakta olduğunu ve kış hazırlığına başladığını gösterir. Kasım ayında yalnızca 23 bölgeyle görülen polen yoğunluğu, bu türlerin kışa yönelik duraklama

evresine girdiğini ve polen üretiminin sonlandığını işaret eder (Tablo 7 ve Tablo 8).

Bu genel eğilim, Cupressaceae/Taxaceae familyasına ait bitkilerin biyolojik ritmini ve çevresel koşullara uyum sağlama süreçlerini açıkça ortaya koymaktadır. En yoğun polen yayılımı, ilkbahar ve yaz başlarında meydana gelirken, sonbahar ve kış aylarında bu yoğunluk önemli ölçüde azalır. Bu, bitkilerin çevresel koşullara, sıcaklık ve ışık değişimlerine göre adapte olduklarını ve bu süreçlerin polen üretimi üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Türkiye Atmosferinde yapılan volumetrik çalışmalardaki Cupressaceae/Taxaceae polen yoğunluğu (%)

Çalışılan Bölge	%	Kaynakça	Çalışılan Bölge	%	Kaynakça
Adana	54.00	Altıntaş & ark., 2019	Gümüşhane	17.73	Türkmen, Çeter & Pınar, 2018
Hatay	50.86	Tosunoglu & ark., 2018b	Denizli	15.99	Güvensen & ark., 2013
Muğla - Bodrum	42.73	Tosunoglu & Bicakci, 2015	Sinop	13.70	Ceter, Özler & Pınar, 2020
Antalya	38.33	Tosunoglu & ark., 2015	Aksaray	11.76	Şafak, 2022
İstanbul - Asya Yakası	36.52	Celenk & ark., 2010	Nevşehir - Ürgüp	11.20	Ünver, 2012
Niğde	35.00	Seçil, 2018	Kayseri	10.90	Acar & ark., 2015
İstanbul - Avrupa Yakası	34.42	Celenk & ark., 2010	Van	10.53	Bicakci & ark., 2017
Nevşehir	34.10	Hayoub, 2020	Uşak	10.22	Uğuz & ark., 2018
İzmir - Çeşme	33.07	Uguz & ark., 2017	Manisa	9.75	Güvensen & ark., 2018
Mardin	27.79	Tosunoglu & ark., 2018a	Bursa	9.44	Bicakci & ark., 2003
Mersin	26.49	Çakır & Doğan, 2020	Bursa	8.61	Celenk & ark., 2009
Kocaeli	25.60	Saitoğlu, 2013	Konya	8.29	Kızılpınar & ark., 2012
Kastamonu	24.70	Çeter & ark., 2012	Balıkesir - Ayvalık	7.51	Yurtcan, 2020
Diyarbakır	23.33	Bursalı & Doğan, 2005	Ardahan - Posof	7.35	Karabağ, 2023
Yalova	21.22	Altunoglu & ark., 2009	Trabzon	5.42	Fişne & Pehlivan, 2022
Kastamonu	20.60	Demirci, 2017	Kars - Sarıkamış	2.54	Akpınar & Altunoğlu, 2024
Elazığ	19.26	Kilic & ark., 2019	Kars	2.01	Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024
Ankara	19.08	Pınar & ark., 1999	Samsun	1.45	Erkan & ark., 2006
Kırklareli	17.88	Erkan & ark., 2011			

Tablo 6. Türkiye Atmosferinde yapılan gravimetrik çalışmalardaki Cupressaceae/Taxaceae polen yoğunluğu (%)

Çalışılan Bölge	%	Kaynakça	Çalışılan Bölge	%	Kaynakça
İzmir - Buca (20 m)	45.10	Güvensen & Öztürk, 2002	Afyon	10.30	Bıçakcı & ark., 2000
İzmir - Karşıyaka	43.10	Güvensen, 2006	Bursa - Gemlik	10.19	Bıçakcı & ark., 1997
Antalya - Serik	42.38	İnce & Pehlivan, 1990	Eskişehir - Sivrihisar	9.82	Erkara, 2008
Aydın - Kuşadası	30.04	Tosunoğlu & ark., 2013	Kırşehir	9.60	Bülbül & Pehlivan, 2013
Burdur	27.8	Bıçakcı & ark., 2000	Çanakkale - Bozcaada	9.24	Bilgiç, 2008
Şanlıurfa	25.95	Çetin & ark., 2009	Edirne	8.75	Bıçakcı & ark., 2004
Muğla - Fethiye	25.11	Bilisik & ark., 2008	Bursa - Mustafakemalpaşa	8.61	Bıçakcı & ark., 1999
İzmir - Buca (1.6 m)	22.50	Güvensen & Öztürk, 2002	İzmir - Dikili	7.75	Tosunoglu, 2021
Bursa - Karacabey	22.48	Bekil, Tosunoğlu, Bıçakcı, 2019	Çanakkale	7.47	Güvensen & ark., 2005
Balıkesir - Savaştepe	21.33	Akyalcın & ark., 2018	Bursa - Harmancık	7.27	Kaya, 2020
Bursa - Büyükkorhan	20.69	Tosunoğlu, Babayigit & Bıçakcı, 2015	Bursa - İznik	6.84	Bıçakcı & ark., 1999
Tekirdağ	19.69	Erkan, Bıçakcı & Aybeke, 2010	Kırıkkale	6.74	İnce, 1994
Trabzon	19.3	Altunoğlu & ark., 2022	Eskişehir	6.21	Erkara, Pehlivan & Tokur, 2007
Kütahya	18.6	Bıçakcı & ark., 1999	Muğla - Köyceğiz	5.09	Tosunoglu & ark., 2009
Balıkesir-Dursunbey	16.74	Akyalcın, Tosunoğlu & Bıçakcı, 2018	Düzce	4.89	Serbes & Kaplan, 2014
Konya	15.84	Altunoglu & ark., 2010	İzmir (20 m)	4.80	Güvensen & Öztürk, 2003
Balıkesir	15.73	Bıçakcı & Akyalcın, 2000	Bitlis	4.60	Celenk & Bıçakcı 2005
Gümüşhane - Şiran	14.90	Ergün, 2020	Ankara - Beytepe	4.52	Doğan & Inceoglu,
Kütahya - Tavşanlı	14.75	Celenk, Karasu & Malyer, 2016	Çanakkale - Gökçeada	4.17	Bilgiç, 2008
Bursa - Mudanya	14.7	Bıçakcı & ark., 1995	Bursa - İnegöl	3.81	Bıçakcı & ark., 1999
Osmaniye	13.75	Alaca, 2018	Bursa-Görtükle	3.05	Bıçakcı, Malyer & Sapan, 1997
Rize	13.56	Bıçakcı & ark., 2002	İzmir (1.6 m)	2.60	Güvensen & Öztürk, 2003
Aydın - Didim	13.49	Bilisik & ark., 2008	Zonguldak	2.40	Kaplan, 2004
Muğla	13.46	Armutçuoğlu, 2015	Karabük	2.15	Kaplan & Özdoğan, 2015
Isparta	13.16	Bıçakcı & ark., 2000	Kars - Kağızman	1.97	Yalçın & ark., 2017
Bilecik	12.34	Türe & Böcük, 2009	Ardahan	1.71	Çetin & ark., 2015
Bursa - Keleş	12.31	Bıçakcı & ark., 2000	Ankara - Çamkoru	1.36	Kızılpınar & Doğan, 2010
Bilecik - Bozüyük	11.85	Türe & Salkurt, 2005	Bartın	0.94	Kaya & Aras, 2012
Balıkesir - Gönen	10.50	Tosunoğlu, Akyalcın & Bıçakcı, 2018	Mardin - Kızıltepe	0.91	Erkara, Osoydan & Karataş, 2016
Sakarya	10.31	Bıçakcı, 2006			

Tablo 7. Türkiye Atmosferinde yapılan volumetrik çalışmalardaki Cupressaceae/Taxaceae polenin'in aylık yoğunluğu (%)

Çalışılan Bölge	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam(%)	Kaynakça
Adana	0.84	46.62	2.79	0.68	2.80	0.17	-	0.05	-	-	0.01	0.05	54.01	Altınbaş & ark., 2004
İzmir	0.93	34.41	13.04	0.91	1.14	0.21	0.08	0.04	0.02	0.07	0.04	0.01	50.86	Tosunoğlu & ark., 2018b
Ankara - Sırtk	0.60	28.40	3.39	3.73	2.10	2.32	0.32	0.48	0.40	0.22	0.14	0.28	42.38	İnce & Pehlivan, 1990
Niğde	0.90	16.71	5.62	9.34	2.20	0.14	-	-	-	-	-	0.02	34.94	Seçil, 2018
Neveşehir	0.38	9.34	9.15	8.93	5.55	0.56	0.05	0.07	0.02	0.05	0.005	0.02	34.11	Hayoub, 2020
Sinop	0.08	10.47	20.38	1.36	0.28	0.06	0.01	0.003	0.001	0.01	0.002	0.01	32.67	Ceter, Özler & Pınar, 2020
Mardin	1.75	4.86	16.77	2.13	1.11	0.26	0.13	0.10	0.03	0.09	0.35	0.22	27.79	Tosunoğlu & ark., 2018a
Mersin	0.27	2.50	16.57	4.89	1.20	0.54	0.14	0.10	0.105	0.05	0.07	0.07	26.49	Çakır & Doğan, 2020
Kocaeli	1.36	4.42	7.32	10.29	1.84	0.21	0.03	0.02	0.01	0.01	0.08	0.02	25.60	Saitoğlu, 2013
Kastamonu		0.01	0.75	2.71	17.74	3.45	-	0.03	-	-	-	-	24.70	Demirci, 2017
Bursa - Karacibey	5.30	5.73	6.47	1.15	0.28	0.03	0.02	0.02	0.32	0.12	3.00	0.04	22.48	Bekil, Tosunoğlu & Bıçkıcı, 2019
Yalova	0.48	10.66	4.33	2.85	2.45	0.23	0.09	0.01	0.07	0.03	-	-	21.22	Altunoglu & ark., 2009
Trabzon	0.27	9.54	1.94	4.44	0.24	0.09	0.08	0.13	0.05	0.10	0.26	2.15	19.29	Altunoglu & ark., 2022
Elazığ	0.03	8.15	4.47	4.44	1.89	0.08	0.16	0.003	-	0.003	0.01	0.02	19.26	Kılıç & ark., 2019
Kütahya		0.26	4.99	12.56	0.42	0.23	0.18	-	-	-	-	-	18.63	Bıçkıcı & ark., 1999
Kırklareli	0.35	6.02	7.78	2.52	0.56	0.10	0.06	0.03	0.03	0.15	0.12	0.15	17.88	Erkan & ark., 2011
Balıkesir - Dursunbey		1.88	5.44	6.47	2.35	0.46	0.07	0.02	0.03	0.02	-	-	16.74	Akyalelin, Tosunoğlu & Bıçkıcı, 2018
Denizli	0.34	1.96	6.79	4.82	1.82	0.26	-	-	-	-	-	-	15.99	Güvensen & ark., 2013
Konya		0.02	7.44	4.30	3.44	0.63	-	-	-	-	-	-	15.84	Altunoglu & ark., 2010
Gümüşhane - Şiran		0.01	1.09	10.32	3.30	0.15	0.02	0.01	-	-	-	-	14.90	Ergün, 2020
Kütahya - Tavşanlı		0.07	2.86	3.48	7.88	0.33	0.06	0.01	0.02	-	-	-	14.75	Celenk, Karasu & Malyer, 2016
Bursa - Mudanya	0.04		11.67	1.73	0.62	0.49	0.06	-	-	0.06	0.06	-	14.69	Bıçkıcı & ark., 1995

Tablo 8. Türkiye Atmosferinde yapılan volumetrik çalışmalardaki Cupressaceae/Taxaceae polenin aykık yoğunluğu (%) (devamı)

Çalışan Bölge	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam(%)	Kaynakça
Muğla	0.03	0.50	6.25	5.78	1.29	0.23	0.13	0.08	0.06	0.01	-	-	14.36	Armutcuoğlu, 2015
Osmaniye	-	6.01	7.33	0.40	-	-	0.01	-	-	0.04	-	-	13.78	Alaca, 2018
Neveşir - Ürgütp	0.03	0.10	1.68	2.65	5.89	0.61	0.07	-	-	0.15	0.02	-	11.20	Üner, 2012
Balıkesir - Günen	0.37	4.13	1.63	0.94	2.32	1.08	0.02	-	-	-	-	-	10.50	Tosunoğlu, Akyalcın & Bırcakı, 2018
Sakarya	-	0.71	4.94	3.72	0.92	-	0.02	-	-	-	-	-	10.31	Bırcakı, 2006
Uşak	0.12	0.43	2.34	4.09	2.46	0.52	0.09	0.004	0.03	0.04	0.03	0.06	10.22	Uğöz & ark., 2018
Manisa	0.46	3.78	3.39	0.62	0.67	0.13	0.09	0.15	0.08	0.10	0.20	0.08	9.75	Güvensen & ark., 2018
Kırşehir	1.23	2.67	2.37	1.19	1.12	0.23	0.08	-	-	-	-	0.67	9.56	Bulbul & Pehlivan, 2013
Bursa	0.07	1.23	2.72	4.25	1.11	0.05	0.01	-	0.001	0.001	-	0.001	9.44	Bırcakı & ark., 2003
Çanakkale - Bozcaada	1.75	3.54	0.69	2.07	0.92	0.14	-	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	9.24	Bilgiç, 2008
Balıkesir - Ayvalık	0.24	3.56	1.34	1.55	0.52	0.05	0.01	-	-	0.11	0.04	0.11	7.53	Yurtcan, 2020
Arđahan - Poşof	0.03	0.01	0.10	1.19	4.98	1.03	0.02	-	-	-	-	-	7.35	Karabağ, 2023
Bursa - Harmanlık	0.04	0.64	1.50	4.11	0.81	0.12	0.04	0.02	-	-	-	-	7.27	Kaya, 2020
Alsaray	-	0.09	0.81	1.21	4.38	0.64	0.04	-	-	-	-	-	7.16	Şafak, 2022
Muğla - Köyceğiz	0.12	0.60	2.61	1.32	0.29	0.07	0.02	-	-	-	0.01	0.05	5.09	Tosunoğlu & ark., 2009
Düzce	-	0.84	2.00	0.68	1.21	0.16	-	-	-	-	-	-	4.89	Serbes & Kaplan, 2014
Çanakkale - Gökçeada	0.04	0.47	0.98	1.63	0.87	0.07	0.05	0.01	0.01	-	0.01	0.04	4.17	Bilgiç, 2008
Kars - Sarıkamış	-	-	0.01	0.13	0.86	0.94	0.39	0.06	0.13	0.03	-	-	2.54	Akpınar & Altunoğlu, 2024
Korabük	-	-	0.08	2.01	0.15	0.03	-	0.05	-	-	-	-	2.32	Kaplan & Öздеęin, 2015
Kars	-	-	0.01	0.58	0.62	0.58	0.19	0.02	-	-	-	0.003	2.01	Akdogan Karabağ & Altunoğlu, 2024
Arđahan	-	-	0.32	0.51	0.43	0.16	0.05	0.11	0.11	0.03	-	-	1.71	Çetin & ark., 2015

Sonuç

Türkiye atmosferindeki Pinaceae/*Pinus* ve Cupressaceae/Taxaceae polen yoğunlukları, gravimetrik ve volumetrik yöntemlerle incelenmiş olup farklı bölgelerde belirgin mevsimsel ve coğrafi farklılıklar göstermektedir. Pinaceae/*Pinus* polenlerinin yoğunluğu, genel olarak %2,27 ile %88,79 arasında değişirken, en yüksek oran Ankara - Çamkoru'da tespit edilmiştir (Kızılpınar & Doğan, 2010). Bahar aylarında (Mart - Mayıs) polen yoğunluğunun en yüksek olduğu, yaz aylarında kısmi azalma ve sonbahar - kış döneminde ise belirgin bir düşüş yaşandığı gözlenmiştir. İlkbahar ve erken yaz döneminde bu polenler 43 bölgede yaygın olarak tespit edilmiştir.

Cupressaceae/Taxaceae polen yoğunluğu ise %0,91 ile %54,01 arasında değişim göstermekte olup en yüksek değer Adana'da kaydedilmiştir (Altıntaş & ark., 2019). Bu polenlerin en yoğun olduğu dönem kış ve bahar aylarıdır (Ocak - Nisan). Mart ve Nisan aylarında tüm bölgelerde yayılım göstermiştir. Yıl boyunca 9 - 12 ay süreyle polenlerin havada bulunduğu bölgeler olduğu gibi, polen dağılımının sonbahar ve kış aylarında önemli ölçüde azaldığı da belirlenmiştir.

Sonuç olarak, Pinaceae/*Pinus* ve Cupressaceae/Taxaceae polenlerinin dağılımları, hem mevsimsel döngüler hem de bölgesel farklılıklarla şekillenmekte olup bu durum, ilgili bitkilerin biyolojik ritimlerini ve çevresel uyum süreçlerini yansıtmaktadır.

Kaynaklar

Acar, A., Pinar, N. M., Şafak, F., & Silici, S. (2015). Analysis of airborne pollen grains in Kayseri, Turkey. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 5(2), 79–88.

Akdoğan Karadağ, G. E., & Altunoğlu, M. K. (2024). Airborne pollen seasonality of Kars province, a high-altitude region in NE Anatolia-Turkey. *Palynology*.
<https://doi.org/10.1080/01916122.2024.2382959>

Akpınar, S., & Altunoğlu, M. K. (2024). Determination of atmospheric pollen grains by volumetric method in Sarıkamış District (Kars-Türkiye). *Biology*, 13(7), 475.

Akyalcin, H., Tosunoğlu, A., & Bicakci, A. (2018). Analysis of atmospheric pollen grains in Dursunbey (Balıkesir), Turkey. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 19(2), 137–146.

Alaca, T. (2018). Osmaniye ilinin atmosferik polenlerinin mevsimsel dağılımı. [Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi].

Altıntaş, D. U., Karakoç, G. B., Yılmaz, M., Pinar, M., Kendirli, S. G., & Çakan, H. (2004). Relationship between pollen counts and weather variables in East-Mediterranean coast of Turkey. *Journal of Immunology Research*, 11(1), 87–96.

Altunoğlu, M. K., Bıçakçı, A., Çelenk, S., Canitez, Y., Malyer, H., & Sapan, N. (2008). Airborne pollen grains in Yalova, Turkey, 2004. *Biologia*, 63, 658–663.

Altunoğlu, M. K., Şahin, Ü., Karataş, M., Yılmaz, S., Akpınar, S., Akdoğan, G. E., & Bıçakçı, A. (2022). Trabzon ili atmosferindeki

alerjenik polenlerin volumetrik yöntemle belirlenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(3), 1364–1374.

Altunoğlu, M. K., Toraman, E., Temel, M., Bıçakçı, A., & Kargioğlu, M. (2010). Analysis of airborne pollen grains in Konya, Turkey, 2005. *Pakistan Journal of Botany*, 42(2), 765–774.

Armutçuoğlu, Ş. (2015). Muğla ili (merkez) atmosferik polenleri. [Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi].

Bağcıoğlu, M., Zimmermann, B., & Köhler, A. (2015). A multiscale vibrational spectroscopic approach for identification and biochemical characterization of pollen. *PLOS One*, 10(9), e0137899. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137899>

Bekil, S., Tosunoğlu, A., & Bıçakçı, A. (2019). Pollen diversity in the atmosphere of Karacabey (Bursa), Turkey. *Asthma Allergy Immunology*, 17, 140–151.

Belmonte, J., Roure, J. M., & March, X. (1998). Aerobiology of Vigo, North-Western Spain: Atmospheric pollen spectrum and annual dynamics of the most important taxa, and their clinical importance for allergy. *Aerobiologia*, 14, 155–163.

Bıçakçı, A., & Tosunoğlu, A. (2019). Allergenic pollen in Turkey. *Asthma Allergy Immunology*. <https://doi.org/10.21911/aai.434>

Bıçakçı, A., Akkaya, A., Malyer, H., Ünlü, M., & Sapan, N. (2000). Pollen calendar of Isparta, Turkey. *Israel Journal of Plant Sciences*, 48(1), 67–70.

Bıçakç1, A., Canitez, Y., & Malyer, H. (1999). Mustafakemalpaşa (Bursa) ilçesinin atmosferik polenleri. *FÜ Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11, 7–12.

Bıçakç1, A., Canitez, Y., Malyer, H., & Sapan, N. (1999). Airborne pollen concentration in Inegöl (Bursa), Turkey. *Scientific International (Lahore)*, 11(1), 99–102.

Bıçakç1, A., Canitez, Y., Malyer, H., Sapan, N., & Akkaya, A. (2000). Airborne pollen grains of Keles, Bursa. *OT Sistematik Botanik Dergisi*, 7(1), 179–186.

Bıçakç1, A., Canitez, Y., Öneş, Ü., & Sapan, N. (1999). İznik (Bursa) ilçesinin atmosferik polenleri. *Ot Sistematik Botanik Dergisi*, 6, 75–82.

Bıçakç1, A., Canitez, Y., Öneş, Ü., Sapan, N., & Malyer, H. (1999). İznik (Bursa) ilçesinin atmosferik polenleri. *Ot Sistematik Botanik Dergisi*, 6(1), 75–82.

Bıçakç1, A., Ergün, S., Tatlıdil, S., Malyer, H., Özyurt, S., Akkaya, A., & Sapan, N. (2002). Airborne pollen grains of Afyon, Turkey. *Acta Botanica Sinica*, 44(11), 1371–1375.

Bıçakç1, A., İphar, S., Malyer, H., & Sapan, N. (1995). Mudanya ilçesi (Bursa) polen takvimi. *UÜ Tıp Fakültesi Dergisi*, 1–2(3), 17–21.

Bıçakç1, A., Malyer, H., & Sapan, N. (1997). Airborne pollen concentration in Görükle campus (Bursa) 1991, 1992. *Tr J Botany*, 21, 145–153.

Bıçakçı, A., Malyer, H., Tatlıdil, S., Akkaya, A., & Sapan, N. (2002). Airborne pollen grains of Rize. *Acta Pharmaceutica Turcica*, 44, 3–9.

Bıçakçı, A., Olgun, G., Aybeke, M., Erkan, P., & Malyer, H. (2004). Analysis of airborne pollen fall in Edirne, Turkey. *Acta Botanica Sinica*, 46(10), 1149–1154.

Bıçakçı, A., Tatlıdil, S., Sapan, N., Malyer, H., & Canitez, Y. (2003). Airborne pollen grains in Bursa, Turkey, 1999–2000. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 10(1), 31–36.

Bıçakçı, A., Tosunoğlu, A., Altunoğlu, M. K., Saatçioğlu, G., Keser, A. M., & Özgökçe, F. (2017). An aeropalynological survey in the city of Van, a high-altitudinal region, East Anatolia-Turkey. *Aerobiologia*, 33, 93–108. <https://doi.org/10.1007/s10453-016-9466-y>

Bicakci, A. (2006). Analysis of airborne pollen fall in Sakarya, Turkey. *Biologia, Bratislava*, 61(4), 457–461.

Bicakci, A., & Akyalcin, H. (2000). Analysis of airborne pollen fall in Balıkesir, Turkey, 1996–1997. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 7(1).

Bilgiç, A. (2008). Gökçeada ve Bozcaada'daki atmosferik polenler. (Yüksek Lisans Tezi). Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale.

Bilisik, A., Bicakci, A., Malyer, H., & Sapan, N. (2008a). Analysis of airborne pollen spectrum in Fethiye-Muğla, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 17, 640-6.

Bilişik, A., Akyalçın, H., & Bıçakçı, A. (2008a). Airborne pollen grains in Savaştepe (Balıkesir). *Ekoloji*, 17(67), 8–14. <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2008.672>

Bilişik, A., Yenigün, A., Bıçakçı, A., Eliacık, K., Canitez, Y., Malyer, H., & Sapan, N. (2008b). An observation study of airborne pollen fall in Didim (SW Turkey): Years 2004–2005. *Aerobiologia*, 24(1), 61–66. <https://doi.org/10.1007/s10453-007-9079-9>

Bousquet, Y. J., Cour, P., Guerin, B., & Michel, F. B. (1984). Allergy in the Mediterranean area, I. Pollen counts and pollinosis of Montpellier. *Clinical Allergy*, 14, 249–258.

Bursalı, B. (2007). Diyarbakır ili atmosferik polen ve sporlarının araştırılması. (Doktora Tezi). Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Bülbül, A. S., & Pehlivan, S. (2013). Investigation of airborne pollen grains in Kırşehir. *Asthma Allergy Immunology*, 11(2), 86–95. <https://doi.org/10.21911/aai.4930>

Caiola, M. G., Mazzitelli, A., Capucci, E., & Travaglini, A. (2002). Monitoring pollinosis and airborne pollen in a Rome university. *Aerobiologia*, 18(3), 267–275.

Celenk, S., & Bıçakçı, A. (2005). Aerobiological investigation in Bitlis, Turkey. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 12(1), 87–93.

Celenk, S., Bicakci, A., Tamay, Z., Guler, N., Altunoğlu, M. K., Canitez, Y., Malyer, H., Sapan, N., & Ones, U. (2010). Airborne pollen in European and Asian parts of Istanbul. *Environmental*

Monitoring and Assessment, 164(1–4), 391–402.
<https://doi.org/10.1007/s10661-009-0900-1>

Celenk, S., Canitez, Y., Bıçakçı, A., Sapan, N., & Malyer, H. (2009). An aerobiological study on pollen grains in the atmosphere of north-west Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 158(1–4), 365–380. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0591-7>

Celenk, S., Karasu, A., & Malyer, H. (2016). Airborne pollen content of Tavşanlı, Kütahya (Turkey). *Annals of West University of Timișoara, Series Biology*, 19(2), 167–176.

Charpin, D., Pichot, C., Belmonte, J., Sutra, J., Zídková, J., Chanez, P., & Poncet, P. (2017). Cypress pollinosis: From tree to clinic. *Clinical Reviews in Allergy & Immunology*, 56(2), 174–195. <https://doi.org/10.1007/s12016-017-8602-y>

Çakir, N., & Doğan, C. (2020). Relationship between pollen counts and weather variables in the atmosphere of Mersin Province on the eastern Mediterranean coast of Turkey. *Turkish Journal of Botany*, 44(5), 526–538. <https://doi.org/10.3906/bot-2003-10>

Çeter, T., Özler, H., & Pınar, N. M. (2020). First aeropalynological survey on the atmosphere of Sinop, Turkey. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 20(3), 272–284.

Çeter, T., Pınar, N. M., Güney, K., Yildiz, A., Aşcı, B., & Smith, M. (2012). A two-year aeropalynological survey of allergenic pollen in the atmosphere of Kastamonu, Turkey. *Aerobiologia*, 28(4), 355–366. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9243-2>

Çetin, E., Altunoğlu, M. K., Akdoğan, G. E., & Akpınar, S. (2015). Ardahan ili atmosferik polenlerinin belirlenmesi. *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 80–94.

Çetin, E., Turfan, N., & Güvensen, A. (2009). Şanlıurfa ilinin atmosferik polen takvimi. *Ot Sistematik Botanik Dergisi*, 1(1), 147–158.

Demirci, C. B. (2017). Kastamonu ili 2017 yılı atmosferik polen konsantrasyonunun incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu.

Doğan, C., & İnceoğlu, Ö. (1995). Beytepe Kampüsü'nün (Ankara) atmosferik polenleri. II-Otsular. *Hacettepe Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 69–98.

Domínguez-Ortega, J., López-Matas, M., Alonso, M., Felú, A., Ruíz-Hornillos, J., González, E., Moya, R., & Carnés, J. (2016). Prevalence of allergic sensitization to conifer pollen in a high cypress exposure area. *Allergy & Rhinology*, 7(4). <https://doi.org/10.2500/ar.2016.7.0183>

Du, H., Ran, J., Feng, Y., & Wang, X. (2020). The flattened and needlelike leaves of the pine family (Pinaceae) share a conserved genetic network for adaxial-abaxial polarity but have diverged for photosynthetic adaptation. *BMC Evolutionary Biology*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12862-020-01694-5>

Ergün, N. (2020). Şiran (Gümüşhane) ilçesinin atmosferik polenlerinin belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Erkan, M. L., Çeter, T., Atıcı, A. G., Özkaya, Ş., Alan, Ş., Tuna, T., & Pınar, N. M. (2006). Samsun ilinin polen ve spor takvimi. XIII. Ulusal Allerji ve Klinik İmmünoloji Kongresi, 6–10 Kasım 2006, Antalya.

Erkan, P., Bıçakçı, A., Aybeke, M., & Malyer, H. (2011). Analysis of airborne pollen grains in Kırklareli. *Turkish Journal of Botany*, 35, 57–65.

Erkan, P., Bıçakçı, A., & Aybeke, M. (2010). Analysis of airborne pollen fall in Tekirdag, Turkey. *Asthma Allergy Immunology*, 8, 46–54.

Erkara, İ. P. (2008). Concentrations of airborne pollen grains in Sivrihisar (Eskişehir), Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 138, 81–91.

Erkara, İ. P., Osoydan, K., & Karataş, M. (2016). Relationship between meteorological factors and airborne pollen grains of Kızıltepe (Mardin), Turkey. *Journal of Applied Biological Sciences*, 10(1), 33–40.

Erkara, İ. P., Pehlivan, S., & Tokur, S. (2007). Concentrations of airborne pollen grains in Eskişehir City (Turkey). *Journal of Applied Biological Sciences*, 1(1), 33–42.

Fişne, A., & Pehlivan, S. (2022). Trabzon (Türkiye) atmosferindeki polenlerin araştırılması. *Bağbahçe Bilim Dergisi*, 9(1), 64–74.

Gioulekas, D., Papakosta, D., Damialis, A., Spieksma, F., Giouleka, P., & Patakas, D. (2004). Allergenic pollen records (15

years) and sensitization in patients with respiratory allergy in Thessaloniki, Greece. *Allergy*, 59(2), 174–184.

Guardia, C., Alba, F., Linares, C., & Lugilde, D. (2006). Aerobiological and allergenic analysis of Cupressaceae pollen in Granada (Southern Spain). *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 16(1), 24–33.

Güvensen, A., & Öztürk, M. (2002). Airborne pollen calendar of Buca-İzmir, Turkey. *Aerobiologia*, 18, 229–237.

Güvensen, A., & Öztürk, M. (2003). Airborne pollen calendar of Izmir-Turkey. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 10, 37–44.

Güvensen, A., Çelik, A., Topuz, B., & Öztürk, M. (2013). Analysis of airborne pollen grains in Denizli. *Turkish Journal of Botany*, 37, 74–84.

Güvensen, A., Uğuz, U., Buluş, E., Tort, N. Ş., Dereboylu, A. E., & Şık, L. (2018). Manisa atmosferinde önemli allerjenik polenler. *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 16(1/2), 141–166.

Güvensen, A., Uysal, İ., Çelik, A., & Öztürk, M. (2005). Analysis of airborne pollen in Çanakkale, Turkey. *Pakistan Journal of Botany*, 37(3), 507–518.

Hayoub, J. A. H. (2020). Nevşehir atmosferinde polen konsantrasyonunun incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu.

Hidalgo, P., Galán, C., & Domínguez, E. (2003). Male phenology of three species of Cupressus: Correlation with airborne

pollen. *Trees*, 17(4), 336–344. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0243-x>

Hussain, M., Chakraborty, P., & Bhattacharya, K. (2011). Pollen grains of Queen Sago (*Cycas circinalis* L.), a source of aeroallergen from West Bengal, India: An immunochemical approach. *Aerobiologia*, 28(1), 39–47. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9209-z>

İnce, A. (1994). Kırıkkale atmosferindeki allerjik polenlerin incelenmesi. *Turkish Journal of Botany*, 18, 43–56.

İnce, A., & Pehlivan, S. (1990). Serik (Antalya) havasının alerjik polenleri ile ilgili bir araştırılma. *Gazi Tıp Dergisi*, 1, 35–40.

Kaplan, A. (2004). Airborne pollen grains in Zonguldak, Turkey, 2001–2002. *Acta Botanica Sinica*, 46(6), 668–674.

Kaplan, A., & Özdoğan, Y. (2015). Seasonal variations of airborne pollen grains in Karabük, Turkey. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 5(2), 89–100.

Karabağ, M. (2023). Ardahan ili Posof ilçesi atmosferik polenlerinin belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Kafkas Üniversitesi, Kars.

Kaya, Ö. (2020). Harmancık (Bursa) ilçesi atmosferik polenlerinin belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı, Bursa.

Kaya, Z., & Aras, A. (2004). Airborne pollen calendar of Bartın, Turkey. *Aerobiologia*, 20, 63–67.

Ke, C., Lin, X., Zhang, B., & Chen, L. (2021). Turgor regulation defect 1 proteins play a conserved role in pollen tube reproductive innovation of the angiosperms. *The Plant Journal*, 106(5), 1356–1365. <https://doi.org/10.1111/tpj.15241>

Kılıç, M., Altunoğlu, M. K., Akpınar, S., Akdoğan, G. E., & Taşkın, E. (2019). Relationship between airborne pollen and skin prick test results in Elazığ, Turkey. *Aerobiologia*, 35, 593–604.

Kızılpınar, İ., & Doğan, C. (2010). Çamkoru (Ankara) atmosferindeki polenlerin araştırılması. *Astım Allerji İmmünoloji*, 8, 180–188.

Kızılpınar, İ., Doğan, C., Artaç, H., Reisli, İ., & Pekcan, S. (2012). Pollen grains in the atmosphere of Konya (Turkey) and their relationship with meteorological factors, in 2008. *Turkish Journal of Botany*, 36, 344–357.

Kim, I., Kwak, M., Lee, J., Lim, Y., Park, S., Kim, H., Lee, K., & Woo, S. (2020). Flowering phenology and characteristics of pollen aeroparticles of *Quercus* species in Korea. *Forests*, 11(2), 232. <https://doi.org/10.3390/f11020232>

Lin, C., Huang, J., Wu, C., Hsu, C., & Chaw, S. (2010). Comparative chloroplast genomics reveals the evolution of Pinaceae genera and subfamilies. *Genome Biology and Evolution*, 2, 504–517. <https://doi.org/10.1093/gbe/evq036>

Linares, C., Plaza, M., Valle, A., Alcázar, P., Guardia, C., & Galán, C. (2021). Airborne Cupressaceae pollen and its major allergen, Cup a 1, in urban green areas of southern Iberian Peninsula. *Forests*, 12(2), 254. <https://doi.org/10.3390/f12020254>

Marchuet, M., Luengo, O., & Cardona, V. (2020). Cypress pollen allergy in a Mediterranean area. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 30(1), 67–69. <https://doi.org/10.18176/jiaci.0444>

Nikolaidis, C., Katotomichelakis, M., Nena, E., Makris, M., Tsakas, M., Michopoulos, I., Constantinidis, T. C., & Danielides, V. (2015). Seasonal variations of allergenic pollen in a Mediterranean region – Alexandroupolis, North-East Greece. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 22(4), 685–689. <https://doi.org/10.5604/12321966.1185776>

Otto, A., Simoneit, B., & Wilde, V. (2007). Terpenoids as chemosystematic markers in selected fossil and extant species of pine (*Pinus*, Pinaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 154(1), 129–140. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2007.00638.x>

Pınar, N. M., Şakıyan, N., İnceoğlu, Ö., & Kaplan, A. (1999). A one-year aeropalynological study at Ankara, Turkey. *Aerobiologia*, 15, 307–310.

Popova, M., Graikou, K., Chinou, İ., & Bankova, V. (2010). GC-MS profiling of diterpene compounds in Mediterranean propolis from Greece. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(5), 3167–3176. <https://doi.org/10.1021/jf903841k>

Ramirez, D. A. (1984). The natural history of mountain cedar pollinosis. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 73, 89–93.

Reese, J., & Williams, J. (2019). How does genome size affect the evolution of pollen tube growth rate, a haploid performance trait?

American Journal of Botany, 106(7), 1011–1020.
<https://doi.org/10.1002/ajb2.1326>

Saatçioğlu, G., Tosunoğlu, A., Malyer, H., & Bıçakçı, A. (2011). Airborne pollen grains of Gemlik (Bursa). *Asthma Allergy Immunology*, 9, 29–36.

Saitoğlu, G. (2013). Kocaeli (İzmit) ili atmosferindeki bazı allerjik polenlerin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Seçil, D. (2018). Niğde ili atmosferik polenlerinin saatlik değişimlerinin araştırılması (Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi, Ankara.

Serbes, A. B., & Kaplan, A. (2014). The survey of pollen and spore dispersal in the atmosphere of Düzce City. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 4(2), 46–58.

Seyfullah, L. J., Roberts, E. A., Schmidt, A. R., Ragazzi, E., Anderson, K. B., Rodrigues do Nascimento Jr., D., Ferreira da Silva Filho, W., Kunzmann, L. (2020). Revealing the diversity of amber source plants from the Early Cretaceous Crato Formation, Brazil. *BMC Evolutionary Biology*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12862-020-01651-2>.

Spieksma, F. T. M. (1990). Allergenic plants in different countries. *Pollinosis*. CRC Press, 19–37.

Subiza, J., Jerez, M., Jimenez, J. A., Narganes, M. J., Cabrera, M., Varela, S., & Subiza, E. (1995). Clinical aspects of allergic disease: Allergenic pollen and pollinosis in Madrid. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 96, 15–23.

Şafak, F. (2022). Aksaray il merkezi atmosferinde bulunan polen ve sporların volümetrik yöntemlerle incelenmesi (Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi, Ankara.

Tosunoğlu, A. (2021). Pollen spectrum and the effects of weather variables on main pollen types in Dikili (Turkey) atmosphere. *Pakistan Journal of Botany*, 53(2), 621–630.

Tosunoğlu, A., & Bıçakçı, A. (2015). Seasonal and intradiurnal variation of airborne pollen concentrations in Bodrum, SW Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 1–21.

Tosunoğlu, A., Akyalçın, H., & Bıçakçı, A. (2018). Pollen spectrum of Gönen (Balıkesir) atmosphere. *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 38–46.

Tosunoğlu, A., Altunoğlu, M. K., Bıçakçı, A., Kılıç, O., Gonca, T., Yilmazer, İ., Saatçioğlu, G., Akkaya, A., Çelenk, S., Canitez, Y., Malyer, H., & Sapan, N. (2015). Atmospheric pollen concentrations in Antalya, south Turkey. *Aerobiologia*, 31, 99–109.

Tosunoğlu, A., Babayiğit, S., & Bıçakçı, A. (2015). Aeropalynological survey in Büyükşehir, Bursa. *Turkish Journal of Botany*, 39, 40–47.

Tosunoğlu, A., Bıçakçı, A., Malyer, H., & Sapan, N. (2009). Analysis of airborne pollen fall in Köyceğiz Specialty Protected Area (SW Turkey). *Fresenius Environmental Bulletin*, 18, 1860–1865.

Tosunoğlu, A., İlçim, A., Malyer, H., & Bıçakçı, A. (2018b). Aeropalynological spectrum of Hatay, Turkey, the eastern coast of the Mediterranean Sea. *Aerobiologia*, 34, 557–572.

Tosunoğlu, A., Saatçioğlu, G., Bekil, S., Malyer, H., & Bıçakçı, A. (2018a). Atmospheric pollen spectrum in Stone City, Mardin; the northern border of Mesopotamia/SE-Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 635.

Tosunoğlu, A., Yenigün, A., Bıçakçı, A., & Eliaçık, K. (2013). Airborne pollen content of Kuşadası. *Turkish Journal of Botany*, 37, 297–305.

Türe, C., & Böcük, H. (2009). Analysis of airborne pollen grains in Bilecik, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 151(1), 27–35. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0240-y>.

Türe, C., & Salkurt, E. (2005). Airborne pollen grains of Bozüyük (Bilecik, Turkey). *Journal of Integrative Plant Biology (Formerly Acta Botanica Sinica)*, 47(6), 660–667. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2005.00098.x>.

Türkmen, Y., Çeter, T., & Pınar, N. M. (2018). Analysis of airborne pollen of Gümüşhane Province in Northeastern Turkey and its relationship with meteorological parameters. *Turkish Journal of Botany*, 42, 687–700. <https://doi.org/10.3906/bot-1806-26>.

Uguz, U., Guvensen, A., & Tort, N. S. (2017). Annual and intradiurnal variation of dominant airborne pollen and the effects of meteorological factors in Çeşme (Izmir, Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(5), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5902-4>.

Uğuz, U., Güvensen, A., Şengonca Tort, N., Dereboylu, A. E., & Baran, P. (2018). Volumetric analysis of airborne pollen grains in

the city of Uşak, Turkey. *Turkish Journal of Botany*, 42(1), 57–72.
<https://doi.org/10.3906/bot-1710-3>.

Ünver, A. (2012). Ürgüp (Nevşehir)'ün atmosferik polenlerinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

Woudstra, Y. (2023). Conifers concentrate large numbers of NLR immune receptor genes on one chromosome. *bioRxiv*.
<https://doi.org/10.1101/2023.10.20.563305>.

Yalçın, Ş., Altunoğlu, M. K., Akpınar, S., & Akdoğan, G. E. (2017). Kars ili Kağızman ilçesi atmosferik polen ve mantar sporlarının belirlenmesi. *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 172–180.

Yurtcan, H. E. (2020). Ayvalık (Balıkesir) atmosferik polenlerinin volumetrik analizi (Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi, İzmir.

Zamira, D. (2023). Comprehensive study of allergenic tree species: Palynological insights enhanced by HPLC and GC–MS profiling. *Biomedical Chromatography*, 38(2).
<https://doi.org/10.1002/bmc.5774>.

BÖLÜM V

Doğu Anadolu Bölgesinin Alerjik Polen Profili: Literatür Derlemesi

Gül Esma AKDOĞAN KARADAĞ¹

Giriş

Polen taneleri, kapalı ve açık tohumlu bitkilerin ürettiği erkek üreme yapılarıdır ve haploit kromozom taşıyan erkek gametleri dişiye taşır. Bu süreç, polinasyon olarak adlandırılır ve böcekler, rüzgar, kuşlar gibi taşıyıcılar aracılığıyla gerçekleşir. Rüzgarla tozlaşan (anemofil) bitkiler, hafif ve çok sayıda polen üreterek polinasyonu mekanik olarak sağlar. Bu polenler aerodinamik yapıları sayesinde uzun mesafelere taşınabilir ve özellikle alerjiye duyarlı bireylerde alerjik rinit, konjonktivit ve astım gibi rahatsızlıklara neden olur (Lacey & West, 2006). Türkiye, üç farklı fitocoğrafik bölgenin etkisi altında, zengin bitki çeşitliliğine sahip

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Kars/Türkiye, ORCID: 0000-0001-7959-2130, gulesmaakdogan@kafkas.edu.tr

bir ülkedir (Çakır-Dindar & Güler, 2023). Araştırma konusu olan Doğu Anadolu Bölgesi dağlık ve rakımı yüksek ve bitki çeşitliliği bakımından zengin bir bölgedir. Yüksek rakımlarıyla öne çıkan Doğu Anadolu Bölgesi, atmosferik polen çalışmaları açısından önem taşımaktadır (Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024). Bu çalışmada, bölgedeki alerjen polenlerin durumu mevcut araştırmalar ışığında değerlendirilmiştir.

1. Doğu Anadolu Bölgesi

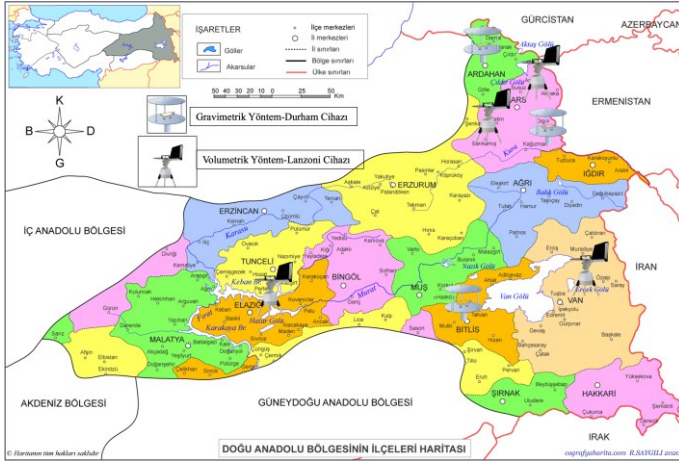
Doğu Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesinden biridir ve ülkenin doğusunda yer alır. Türkiye yüzölçümünün yaklaşık %21'ini kapsar ve en büyük coğrafi bölgedir. Bölge, "Türkiye'nin çatısı" olarak anılır (Karaoğlu & Çelim, 2018; <https://www.cografya.gen.tr>). Ortalama yüksekliği 1.829 metreyi bulmaktadır (Karaburun & Karakuyu, 2015). Türkiye'nin en yüksek ve en engebeli alanlarını içerir. Erzurum Ovası 1800 metre, Yüksekova ise 2200 metre yüksekliğe sahiptir ve bölgedeki ovaların ortalama yükseltisi 1500 metredir. Türkiye'nin en yüksek dağları burada bulunur, Ağrı Dağı (5137 m) ve Süphan Dağı (4058 m) bunlara örnek olarak verilir. Dağlar, doğu-batı doğrultusunda üç sıra halinde uzanır. Kuzeyde Çimen, Kop, Allahuekber ve Yalnızçam Dağları; orta kuşakta Munzur (Mercan), Karasu-Aras ve Ağrı Dağları; güneyde ise Güneydoğu Toroslar, Bitlis ve Cilo Dağları yer alır. Bölgenin volkanik yapısı da dikkat çeker. Van Gölü'nün kuzeyinde Nemrut, Süphan, Tendürek, Ağrı (5137m) volkanik dağları bulunur (Karaoğlu & Çelim, 2018; <https://www.cografya.gen.tr>). Bu dağlar, bölgenin doğal sınırlarını belirlerken, aynı zamanda su kaynaklarının dağılımını da etkilemektedir. Özellikle, bölgedeki volkanik dağlar, zengin mineral

kaynakları ile dikkat çekmektedir. Örneğin, Bingöl'deki obsidyen yatakları, bölgenin jeolojik zenginliğini göstermektedir (Tiryaki, 2020). Erzurum-Kars platosu, Muş ovası ve Malatya ovası bölgenin önemli düzlükleridir. Van Gölü, Türkiye'nin en büyük gölüdür ve Doğu Anadolu bölgesinde yer alır. Fırat ve Dicle nehirleri bu bölgeden doğar (Karaoğlu & Çelim, 2018; <https://www.cografya.gen.tr>). Doğu Anadolu bölgesinin rakımı, iklimini ve bitki örtüsünü doğrudan etkilemektedir. Özellikle, bölgenin iklimi karasal özellikler taşımakta olup, kışlar soğuk ve sert, yazlar ise sıcak ve kurak geçmektedir (Keskin & ark., 2018). Bu iklim koşulları, tarım ve hayvancılık faaliyetlerini de etkilemekte, bu nedenle bölge halkının geçim kaynakları üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek rakımlı alanlarda tarım yapmak zor olsa da, sulama sistemleri ile birlikte tarımsal üretim artırılabilir. Bunun yanı sıra, bölgedeki hayvancılık faaliyetleri, özellikle küçükbaş hayvancılık açısından oldukça yaygındır. Bu durum, bölgenin ekonomik yapısını da şekillendirmektedir (Eren, Yerdelen Tatoğlu & Akarsu, 2022). Bölgenin bitki örtüsü, iklim koşulları ve yüksekliğe bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Bölgede, alpin çayırlar ve bozkır bitkileri yaygındır. Bunun yanı sıra, bölgenin doğal çayır ve mera alanlarında birçok yem bitkisi bulunmaktadır (Temel, 2017). Step bitki örtüsü yaygındır, ancak yüksek rakımlarda ormanlık alanlar da bulunur. Endemik bitki türleri açısından zengindir (Karaoğlu & Çelim, 2018; <https://www.cografya.gen.tr>).

Bölgede nüfus yoğunluğu düşüktür. Van, Erzurum, Malatya ve Elazığ gibi büyük şehirler en önemli yerleşim alanlarıdır. Göç, ekonomik ve sosyal nedenlerle yaygındır. Ekonomi genellikle tarım,

hayvancılık ve madencilığe dayanır. Özellikle, bölgedeki maden kaynakları, sanayi ve inşaat sektörlerinde kullanılmakta ve bölge ekonomisine katkı sağlamaktadır (Tiryaki, 2020). Ayrıca, bölgenin jeotermal enerji ve yeraltı kaynakları açısından potansiyeli yüksektir (Selçuk, 2022). Doğu Anadolu'nun doğal kaynakları, bölgenin ekonomik gelişimi açısından büyük bir potansiyele sahiptir (Tiryaki, 2020).

Doğu Anadolu bölgesinde Ağrı, Ardahan, Bingöl, Bitlis, Elazığ, Erzincan, Erzurum, Hakkari, Iğdır, Kars, Malatya, Şırnak ve Tunceli illeri bulunmaktadır (Şekil 1.)



Şekil 1. Doğu Anadolu Bölgesi haritası

(http://cografyaharita.com/turkiye-cografi_bolge-haritalari.html)

2. Alerji

Alerjik hastalık, son yıllarda hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde hızla artan önemli bir halk sağlığı sorunudur ve artık büyük bir küresel salgın olarak kabul edilmektedir (Lake & ark., 2017). Alerji, bağışıklık sisteminin genellikle zararsız olan

maddelere (alerjenlere) karşı anormal ve aşırı tepki göstermesiyle ortaya çıkan bir durumdur. Normal şartlarda bağışıklık sistemi, vücudu enfeksiyonlara ve zararlı etkenlere karşı korumakla görevlidir. Ancak alerji geliştiğinde, bağışıklık sistemi polen, toz, hayvan tüyü, bazı yiyecekler veya ilaçlar gibi maddeleri tehdit olarak algılar ve bu maddelere karşı savunma mekanizmalarını devreye sokar. Solunum yoluyla vücuda alınarak duyarlılığa neden olan alerjenler bulunmaktadır ve bu alerjenler, iç ortam ve dış ortam olarak iki gruba ayrılır. İç ortam alerjenleri arasında akarlar, küf mantar sporları, böceklerin ve hayvanların dışkıları ile epitelyum döküntüleri yer almaktadır. (Sin & ark., 2007). Dış ortam alerjenleri ise atmosferde yer alan ve rüzgar ile uzak mesafelere taşınabilen polenler ve mantar sporlarıdır (Sin & ark., 2007; Burge&Rogers, 2000).

Polenlerin kaynağını ağaç ve otsu bitki çiçekleri oluşturmaktadır. Bitkilerin polenleri solunum yolu ile alınarak klinik olarak kişilerin duyarlanmasıya neden olan önemli alerjenlerdir (Sin & ark., 2007; Burge & Rogers, 2000).

2.1. Polen alerjisi

Polen alerjisi, bireylerin polenlere karşı geliştirdiği aşırı duyarlılık tepkimelerini içeren bir durumdur. Bu alerji, genellikle bahar aylarında, ağaç, çimen ve yabancı ot polenlerinin havada yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu dönemlerde ortaya çıkar. Polen alerjisi, burun akıntısı, hapsirme, gözlerde kaşıntı ve sulanma gibi alerjik rinit belirtileri ile kendini gösterir (Damialis & ark., 2019; Jantunen, Saarinen & Rantio-Lehtimäki, 2011). Bireylerin yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyebilir ve bu durum, özellikle polen mevsiminde belirginleşir (Pablos & ark., 2016). Polen alerjisi,

genellikle IgE antikorları ile ilişkilidir. Bu antikorlar, polen alerjenlerine karşı bağışıklık sisteminin verdiği tepki sonucu oluşur. Polene duyarlı bireylerde, spesifik IgE seviyeleri genellikle yüksektir ve bu durum, alerjik reaksiyonların tetiklenmesine yol açar (Bokanovic & ark., 2013; Ebo & ark., 2010). Örneğin, çim polenine karşı duyarlılığı olan bireylerde, Phleum pratense polenine karşı spesifik IgE antikorlarının varlığı, alerjinin tanısında önemli bir belirteçtir (Schmidt & ark., 2010). Ayrıca, polen alerjisi olan bireylerde, gıda alerjileri ile ilişkili çapraz reaktivite de sıkça görülmektedir. Bu durum, polen alerjisi olan bireylerin bazı meyve ve sebzelere karşı da alerjik reaksiyonlar geliştirmesine neden olabilir (Kawauchi & ark., 2022; Popescu, 2015). Polen alerjisi tanısı, genellikle deri prick testleri veya serumda spesifik IgE seviyelerinin ölçülmesi ile yapılır. Bununla birlikte, son yıllarda moleküler tanı yöntemleri ve komponent çözümlemesi gibi yeni yaklaşımlar, alerjinin daha doğru bir şekilde teşhis edilmesine olanak tanımaktadır (Pablos & ark., 2016; Kattan & Wang, 2012). Bu yöntemler, alerjenlerin spesifik bileşenlerini tanımlayarak, gerçek duyarlılığı belirlemeye yardımcı olur ve çapraz reaktiviteyi ayırt edebilir (Cuesta-Herranz & ark., 2010; Werfel & ark., 2015). Polen alerjisi tedavisinde, alerjenlerden kaçınma, antihistaminikler ve kortikosteroidler gibi ilaçlar sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, alerjen immünoterapisi, polen alerjisi olan bireylerde uzun vadeli bir çözüm sunabilir (Özdemir & ark., 2011; Geroldinger-Simic & ark., 2011). Alerjen immünoterapisi, bireylerin bağışıklık sistemini alerjenlere karşı tolerans geliştirmeye yönlendirir ve bu sayede alerjik semptomların şiddetini azaltabilir (Bokanovic & ark., 2013; Deng & Yin, 2019).

2.2. Alerjen polen grupları

İspanya Aerobioloji Ağı (Spanish Aerobiology Network - REA) sistemi, polen sayımlarını belirli eşik değerlere göre sınıflandırır. Polen sınıfları, bir türün alerjen kapasitesi ve yıllık polen indeksine dayalı olarak dört kategoriye ayrılmıştır: Yok, Düşük, Orta ve Yüksek. Bu sınıflar, hassas bireylerin polen nedeniyle semptom geliştirmesine yol açan eşikleri temsil eder (Tablo 1.).

Atmosferdeki polenlerin incelenebilmesi için öncelikle havadaki polenlerin toplanması ve analiz edilmesi gerekir. Günümüzde bu amaçla iki temel yöntem kullanılmaktadır. İlki, yerçekimine dayalı olarak çalışan Durham cihazının kullanıldığı Gravimetrik yöntem, ikincisi ise Lanzoni veya Burkard polen yakalama cihazlarının kullanıldığı Volümetrik yöntemdir. Her iki yöntem de havadaki polenlerin tespiti için farklı teknolojilere dayanmaktadır ve belirli durumlarda farklı avantajlar sunmaktadır. Yerçekiminin etkisiyle birim alan (cm^2) üzerine düşen polen miktarını ölçmek için gravimetrik yöntem kullanılır. Bununla birlikte 1 m^3 havadaki polenleri belirlemek için volümetrik yöntem kullanılır (Bıçakçı & ark., 2005).

Tablo 1. Polen grupları ve eşik değerleri (Soldevilla & ark., 2007)

Grup 1: <i>Apiaceae</i> , <i>Brassicaceae</i> , <i>Cannabis</i> , <i>Echium</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Mercurialis</i> , <i>Urticaceae</i> , <i>Urtica membranacea</i> .
Yok: $<1/m^3$
Düşük: $1-15/m^3$
Orta: $16-30/m^3$
Yüksek: $>30/m^3$
Grup 2: <i>Artemisia</i> , <i>Asteraceae</i> , <i>Chenopodiaceae</i> - <i>Amaranthaceae</i> , <i>Ericaceae</i> , <i>Helianthus</i> <i>Plantago</i> , <i>Poaceae</i> , <i>Rumex</i> .
Yok: $<1/m^3$
Düşük: $1-25/m^3$
Orta: $26-50/m^3$
Yüksek: $>50/m^3$
Grup 3: <i>Acer</i> , <i>Alnus</i> , <i>Betula</i> , <i>Casuarina</i> , <i>Castanea</i> , <i>Corylus</i> , <i>Eucalyptus</i> , <i>Ligustrum</i> , <i>Populus</i> , <i>Ulmus</i> .
Yok: $<1/m^3$
Düşük: $1-30/m^3$
Orta: $31-50/m^3$
Yüksek: $>50/m^3$
Grup 4: <i>Cupressus</i> , <i>Olea</i> , <i>Pinus</i> , <i>Platanus</i> , <i>Populus</i> , <i>Quercus</i> .
Yok: $<1/m^3$
Düşük: $1-50/m^3$
Orta: $51-200/m^3$
Yüksek: $>200/m^3$

3. Doğu Anadolu Bölgesinde yapılan atmosferik polen çalışmaları

Doğu Anadolu bölgesinde atmosferik polenlerin belirlenmesi için gravimetrik ve volümetrik yöntemler kullanılarak yapılmış araştırmalar vardır. Gravimetrik yöntem ile Kars ili Kağızman ilçesi, Bitlis, Ardahan atmosferindeki polenler; volümetrik yöntemle ise Van, Kars, Kars ili Sarıkamış ilçesi, Elazığ atmosferik polenleri

araştırılmıştır (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Bicakci & ark., 2017; Yalçın & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

Kars ili Kağızman ilçesinde 2014-2015 yılları arasında gravimetrik yöntem ile yapılan araştırmada yoğun olan polen taksonları Poaceae, Rosaceae, Amarathaceae, *Abies*, *Artemisia*, *Rumex*, Cupressaceae/Taxaceae, Apiaceae, *Populus*, *Plantago*, *Ulmus*, Caryophyllaceae, *Juglans* ve Lamiaceae olarak belirlenmiştir (Yalçın & ark., 2017).

Ardahan ili atmosferi 2013-2014 yılları arasında gravimetrik yöntem ile araştırılmıştır. Bu araştırmada 3741 polen belirlenmiştir. Ardahan atmosferinde yoğun olarak gözlenen polenler sırasıyla *Pinus*, Poaceae, *Artemisia*, *Xatnhium*, Urticaceae, *Carpinus*, *Acer*, Apiaceae, *Populus*, Amaranhaceae, *Betula*, *Abies* polenleri olmuştur (Çetin & ark., 2015).

Bitlis ilinde 2001 ve 2002 yıllarında gravimetrik yöntem ile yapılan araştırmada her iki yılın ortalama değerlerine göre yoğun olan polenler Gramineae, Urticaceae, *Juglans*, *Quercus*, Umbelliferae, Cupressaceae/Taxaceae, ile *Fraxinus*, *Salix*, *Plantago* polenleri olarak belirlenmiştir (Celenk & Bicakci, 2005)

Van ili atmosferinde 2010-2011 yıllarında volümetrik yöntem ile yapılan çalışmanın ortalama değerlerine göre 4163 polen/m³ belirlenmiş ve bu polenler Poaceae, Cupressaceae, *Fraxinus*, Amaranthaceae, *Populus*, *Quercus*, *Platanus*, *Morus*, *Plantago* polenleri olarak tespit edilmiştir (Bicakci & ark., 2017).

Elazığ ili atmosferinde volümetrik yöntem ile 2013 ve 2014 yıllarında yapılan araştırmada iki yıllık ortalama polen verilerine

göre Poaceae, Urticaceae, *Mercurialis*, Pinaceae, Cupressaceae/Taxaceae, *Fraxinus*, *Quercus*, *Alnus* polenleri yoğun gözlenen taksonlar olarak belirlenmiştir (Kilic & ark., 2019).

Kars ili Sarıkamış ilçesinde 2012-2013 yıllarında volümetrik yöntem ile yapılan atmosferik polen çalışmasında iki yıllık ortalama atmosferde yoğun olarak Poaceae, *Artemisia*, Amaranthaceae, *Rumex*, Urticaceae, *Plantago* polenleri gözlenmiştir (Akpınar & Altunoğlu, 2024).

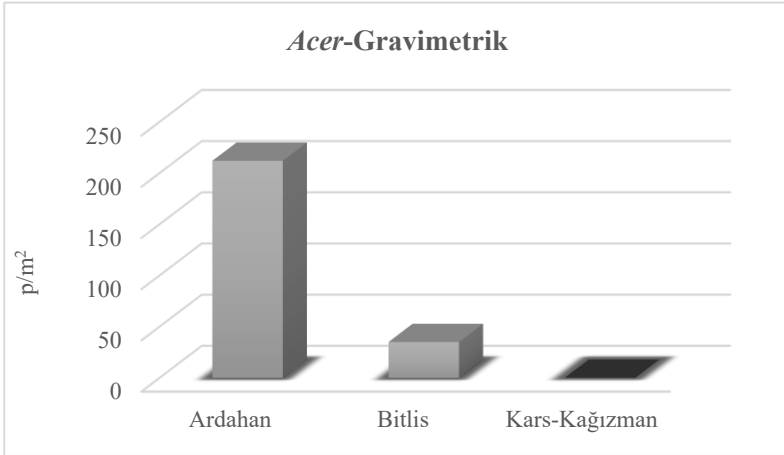
Kars ilinde 2012-2013 yıllarında volümetrik yöntem ile yapılan çalışmada iki yıllık ortalama verilere göre Kars ili atmosferinde yoğun olan taksonlar Pinaceae, Poaceae, *Artemisia*, Urticaceae, Amaranthaceae, *Quercus*, Cupressaceae/Taxaceae olarak gözlenmiştir (Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4. Doğu Anadolu Bölgesinde Yoğun Olarak Tespit Edilen Alerjen Polen Taksonları

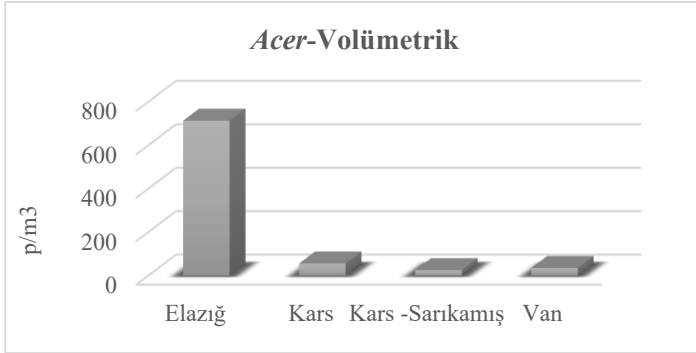
4.1. *Acer*

Acer polen tanecikler şekil olarak prolattan küresele kadar değişir; Şekli yuvarlak-üçgen ve 3-kolpat veya 3-kolporattır. Kolpiller uzun, sivri, küt veya yuvarlak uçludur. *Acer negundo*'nun (kutu-yaşlı) polen tanecikleri belirgin bir rugulat-dalgalı seksine sahiptir. Polen tanecikleri türe bağlı olarak boyut olarak değişir ve çapları 30-51 mikron x 20-36 mikron ile 22-26 x 20-36 mikron arasında değişebilir (<https://www.pollen.com/>). *Acer* polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–30 polen/m³ olması durumunda düşük; 31–50 polen/m³ olması durumunda orta; >50 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için *Acer*

polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 1 ve Grafik 2’de verilmiştir.



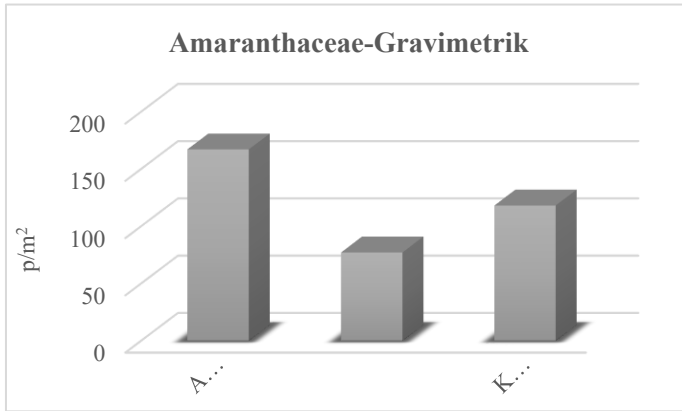
Grafik 1. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Acer taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



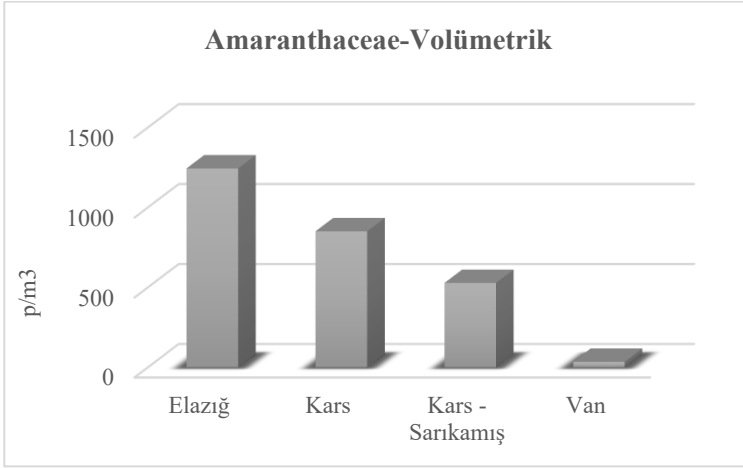
Grafik 2. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Acer taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.2. Amaranthaceae

Polen taneleri monad, radyal simetriye sahip, küresel şekillidir. Ortalama polen çapları, $6,70 \pm 0,53$ - $25,36 \pm 1,73$ μm , apolar, 12-54 açıklık, açıklık çapı 0,5-5 μm ve polipantoporat polenlerdir. Polen yüzeyi granüler, makrogranüler veya mikro dikenlerle kaplıdır. Ekzin granüler, makrogranüler veya mikrospsinal ile pürüzsüz olmakla beraber, ekzin kalınlığı $1,12 \pm 0,04$ ila $2,14 \pm 0,31$ μm 'dur (Saensouk, & Saensouk 2022). Amaranthaceae polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–25 polen/ m^3 olması durumunda düşük; 26–50 polen/ m^3 olması durumunda orta; >50 polen/ m^3 olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için Amaranthaceae polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 3 ve Grafik 4'te verilmiştir.



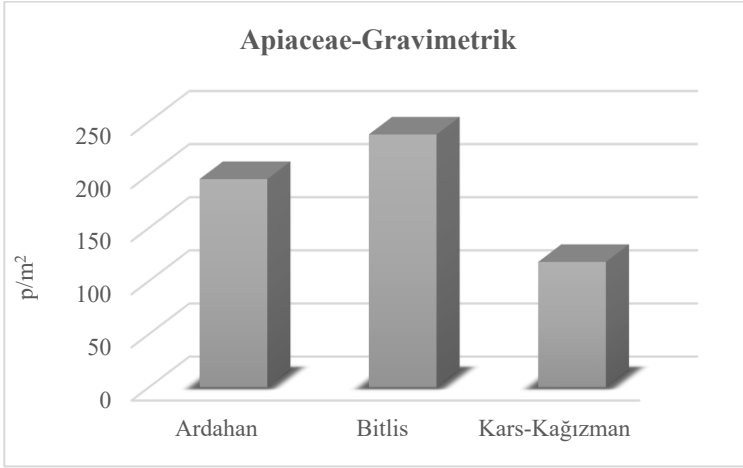
Grafik 3. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Amaranthaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



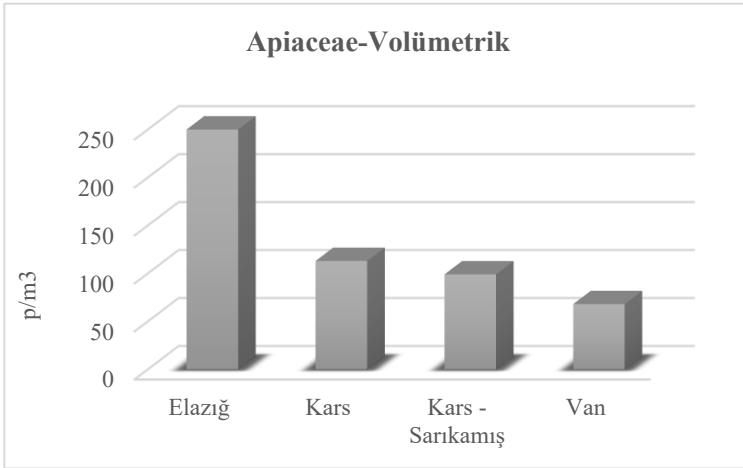
Grafik 4. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Amaranthaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.3. Apiaceae

Apiaceae polenleri genellikle triporat veya trikolpat yapıdadır. Bu ailenin polen taneleri neredeyse tamamı prolat ile perprolattır. Cins ve türlerde farklılıklar mevcuttur ancak küçüktür. Ekzin (dış duvar) genellikle ince olup, süslemeler (sculpture) granüler veya striat olabilir (<https://pollen.tstebler.ch/>). Apiaceae polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–15 polen/m³ olması durumunda düşük; 16–30 polen/m³ olması durumunda orta; >30 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için Apiaceae polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 5 ve Grafik 6’da verilmiştir.



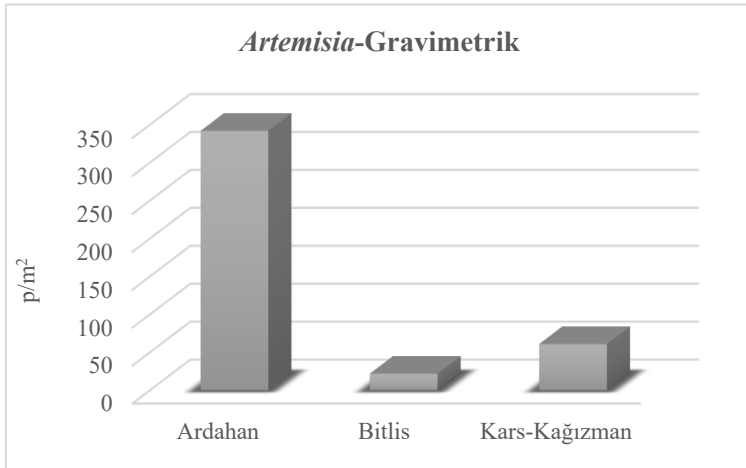
Grafik 5. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Apiaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



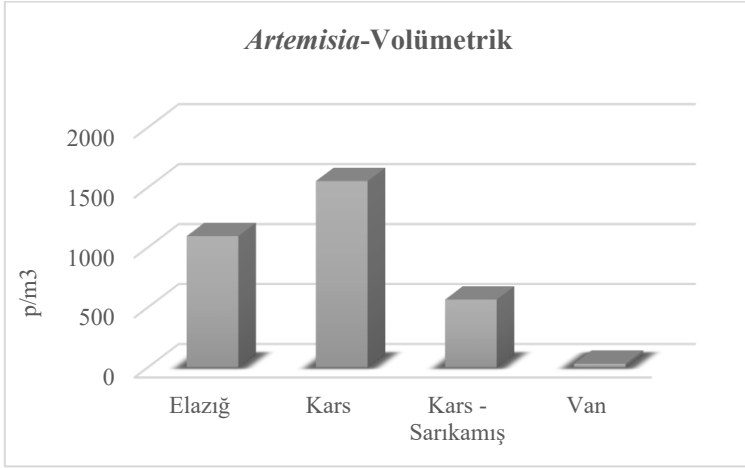
Grafik 6. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Apiaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.4. *Artemisia*

Artemisia'nın polen taneleri prolat küresel ila yarı küresel ve 3-kolporattır. Kolpiller uzundur ve sexin ekvatorial olarak kalınlaşmış ve kutuplarda daha incedir, kısa dikenler (0.6 μm uzunluğunda) granüllerle serpiştirilmiştir (<https://www.pollen.com/>). *Artemisia* polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–25 polen/ m^3 olması durumunda düşük; 26–50 polen/ m^3 olması durumunda orta; >50 polen/ m^3 olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için *Artemisia* polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 7 ve Grafik 8’de verilmiştir.



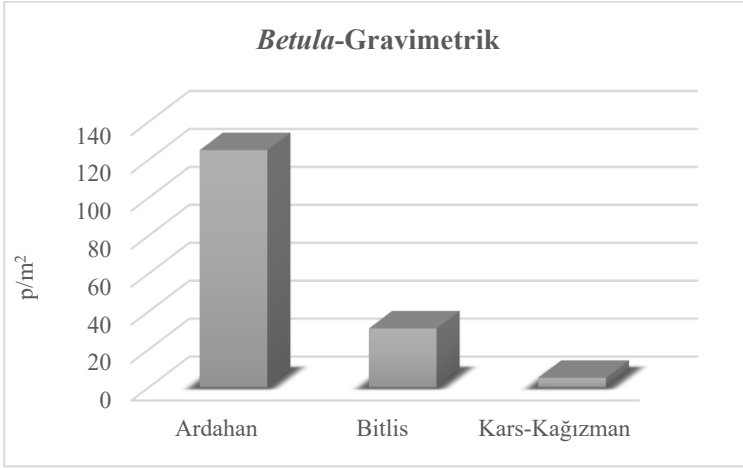
Grafik 7. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre *Artemisia* taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m^2) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



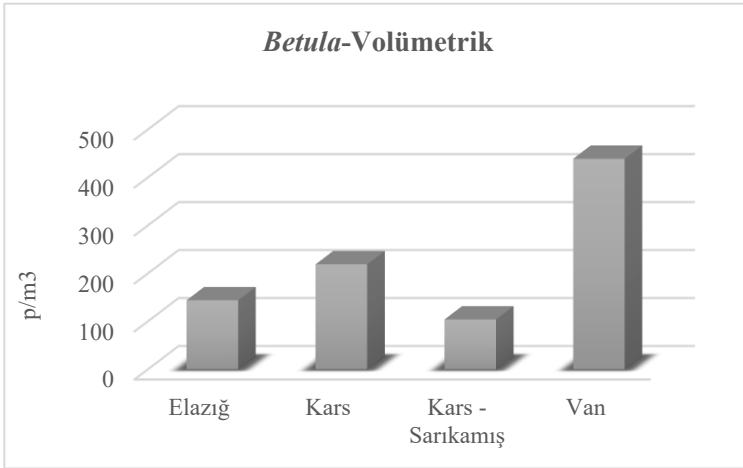
Grafik 8. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Artemisia taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.5. Betula

Betula polen taneler suboblat ila oblattır; Polenin 3 adet kuvvetli aspidat gözenekleri vardır. Taneler 18-23 x 21-30 mikrometre boyutlarındadır (<https://www.pollen.com/>). *Betula* polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–30 polen/m³ olması durumunda düşük; 31–50 polen/m³ olması durumunda orta; >50 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için *Betula* polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 9 ve Grafik 10’da verilmiştir.



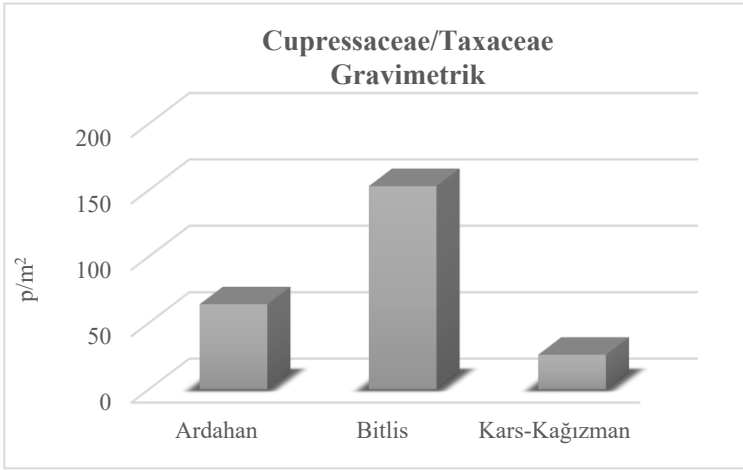
Grafik 9. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Betula taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



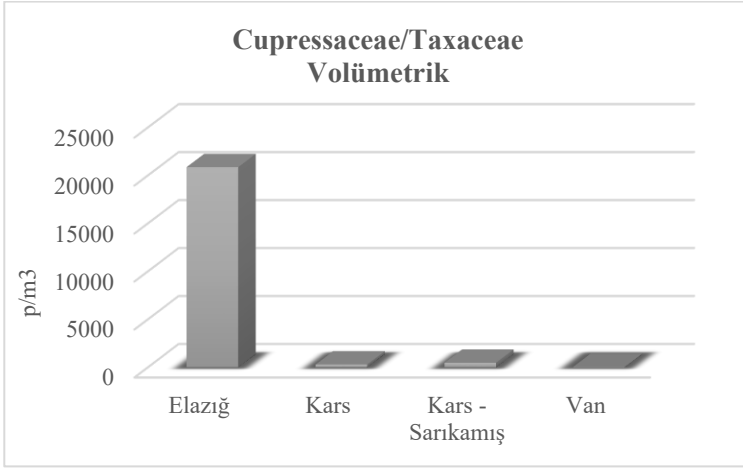
Grafik 10. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Betula taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.6. Cupressaceae/Taxaceae

Polen taneleri genellikle ince bir ekzinle kaplı ve küresel şekillidir. Hafif dairesel gözenekli olup 1-apertürlüdür. Aile içindeki polen taneleri genel olarak homojendir, bu da farklı cinsleri ayırt etmeyi zorlaştırır. Tanelerin çapı 25-36 mikrometre arasında değişmektedir (<https://www.pollen.com/>). Cupressus polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–50 polen/m³ olması durumunda düşük; 51–200 polen/m³ olması durumunda orta; >200 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için Pinaceae polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 11 ve Grafik 12’de verilmiştir.



Grafik 11. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Cupressaceae/Taxaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)

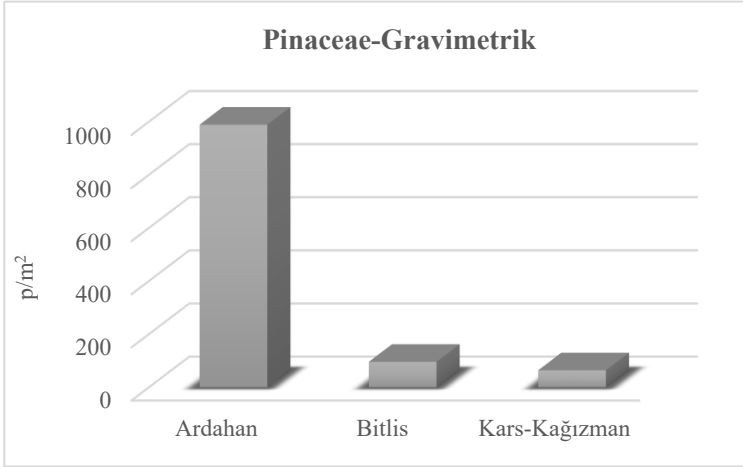


Grafik 12. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Cupressaceae/Taxaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

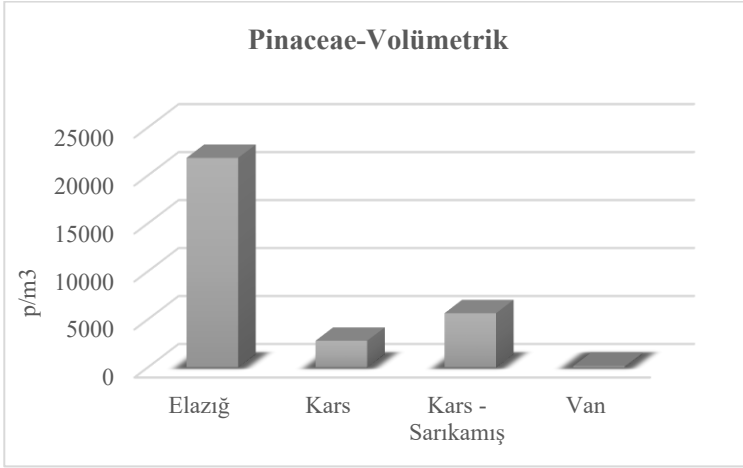
4.7. Pinaceae

Çam polen taneleri, sahip oldukları keseler nedeniyle oldukça büyüktür ve bu özellikleri onları tanımlanması en kolay polen tanelerinden biri haline getirir. Keseler, polen tanelerinin rüzgar yardımıyla uzun mesafelere taşınmasını da sağlar. Kanatlı polen taneleri arasında, gövde şekli yarı küreselden geniş elipsoide kadar değişiklik gösterebilir. Keseler genellikle ağsı bir yapıya sahip olup, bazen pürüzsüz de olabilir. Polen tanelerinin boyutları ise 40-160 mikrometre arasında değişir (<https://www.pollen.com/>). Pinaceae polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–50 polen/m³ olması durumunda düşük; 51–200 polen/m³ olması durumunda orta; >200 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu

söylenbilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için Pinaceae polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 13 ve Grafik 14’de verilmiştir.



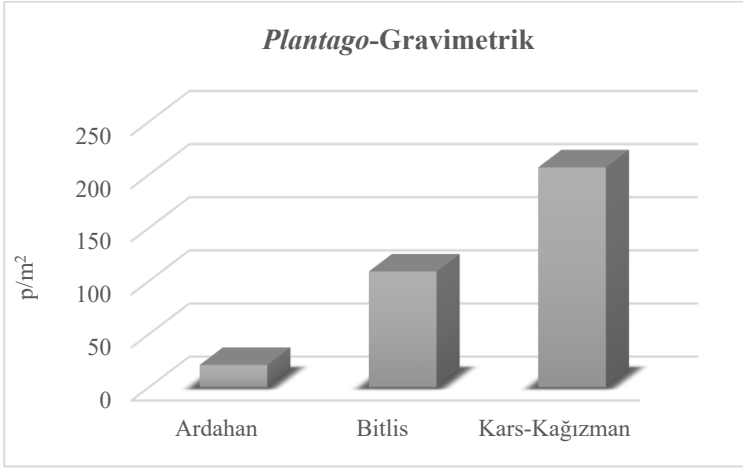
Grafik 13. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Pinaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bıakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



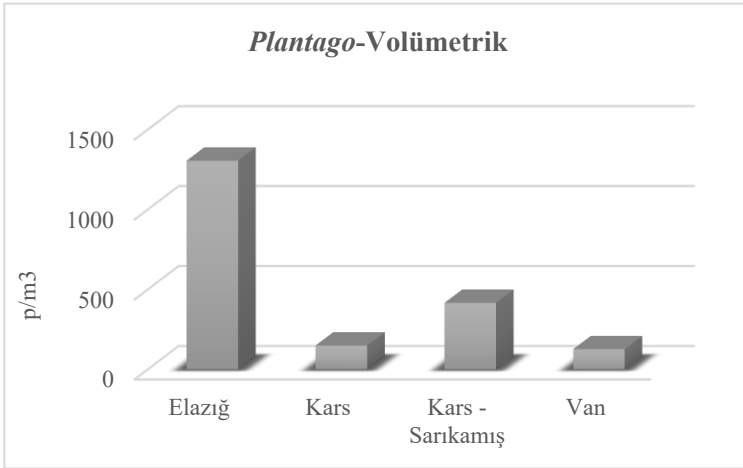
Grafik 14. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Pinaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.8. Plantago

Polen taneleri küresel şekilli ve pantoparat yapılıdır; gözenek sayısı 3 ile 10 arasında değişmekte olup, şekilleri daireselden hafifçe uzunlamasına doğru farklılık gösterebilir. Sexine tabakası, dalgalı ve yoğun granüler bir yüzeyle birlikte pullu bir yapıya sahiptir. Polen tanelerinin çapı ise 26-31 mikrometre arasında değişmektedir. (<https://www.pollen.com/>). *Plantago* polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–25 polen/m³ olması durumunda düşük; 26–50 polen/m³ olması durumunda orta; >50 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için *Plantago* polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 15 ve Grafik 16’da verilmiştir.



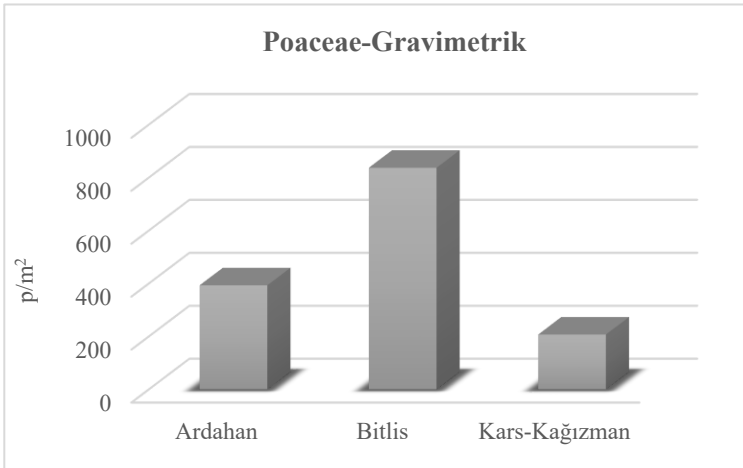
Grafik 15. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Plantago taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



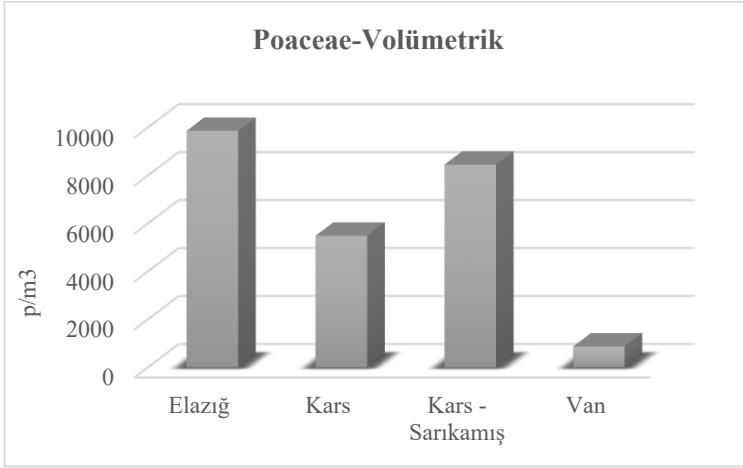
Grafik 16. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Plantago taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.9. Poaceae

Poaceae familyasının polenleri her zaman tek porlu ve heteropolar (<https://pollen.tstebler.ch/>). Poaceae polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–25 polen/m³ olması durumunda düşük; 26–50 polen/m³ olması durumunda orta; >50 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için Poaceae polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 17 ve Grafik 18’de verilmiştir.



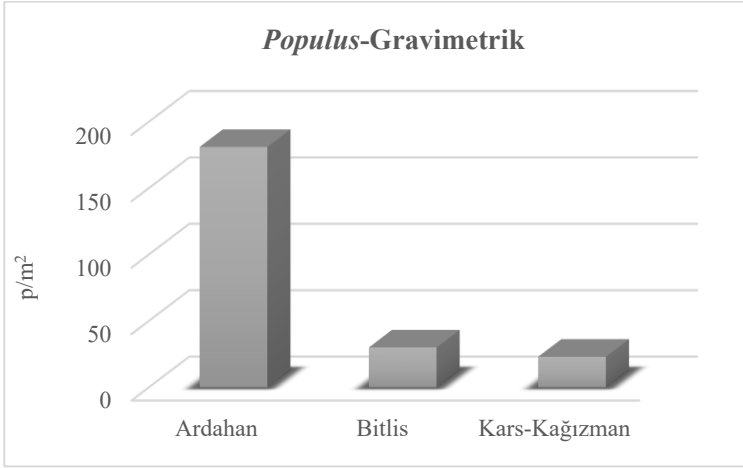
Grafik 17. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Poaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



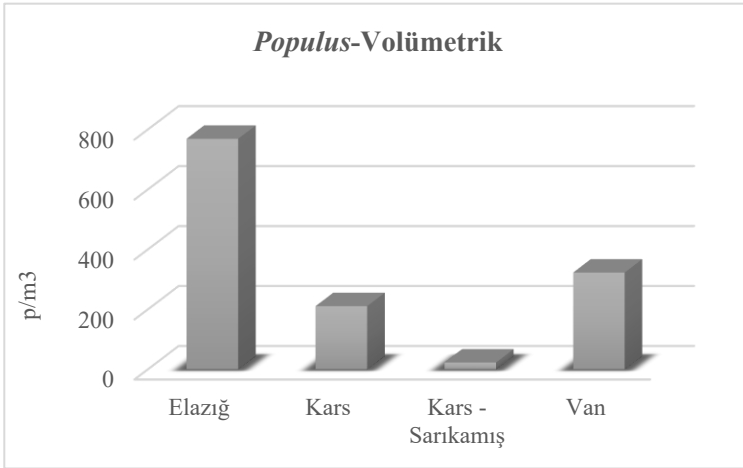
Grafik 18. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Poaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.10. *Populus*

Polen taneleri prolata, subprolata veya küresel şekillidir. Polen tanesinin sexine tabakası ince ve granüler yapıya sahiptir, intine tabakası ise daha kalındır. Tanelerin çapı 25-40 mikrometre arasında değişmektedir (<https://www.pollen.com/>). *Populus* polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–50 polen/m³ olması durumunda düşük; 51–200 polen/m³ olması durumunda orta; >200 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için *Populus* polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 19 ve Grafik 20’de verilmiştir.



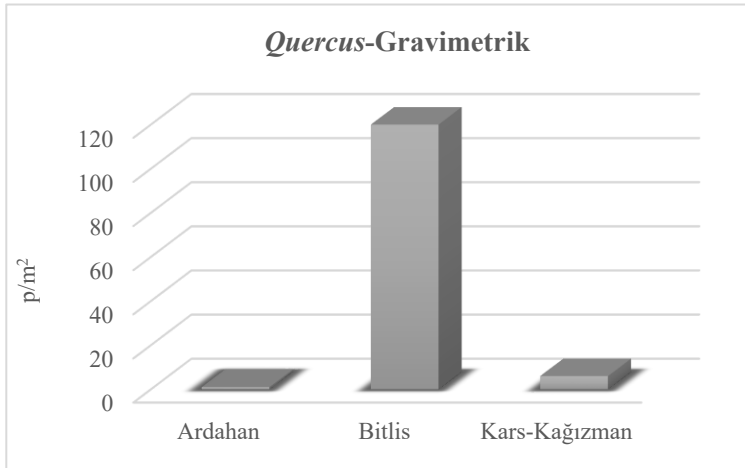
Grafik 19. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Populus taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m^2) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



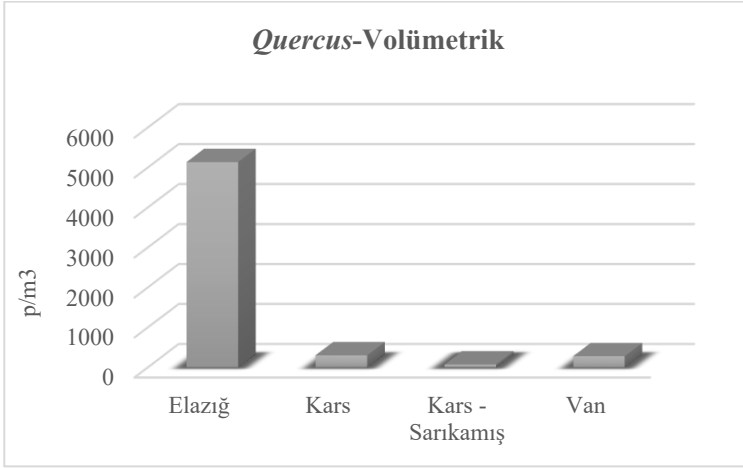
Grafik 20. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Populus taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m^3) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.11. *Quercus*

Polen taneleri küresel veya yassı üçgen şeklinde olup, uzun ve dar kolpilere sahip trikolpat yapılıdır. Tanelerin boyutu genellikle 24-38 mikrometre arasında değişmektedir (<https://www.pollen.com/>). *Quercus* polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–50 polen/m³ olması durumunda düşük; 51–200 polen/m³ olması durumunda orta; >200 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için *Quercus* polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 21 ve Grafik 22’de verilmiştir.



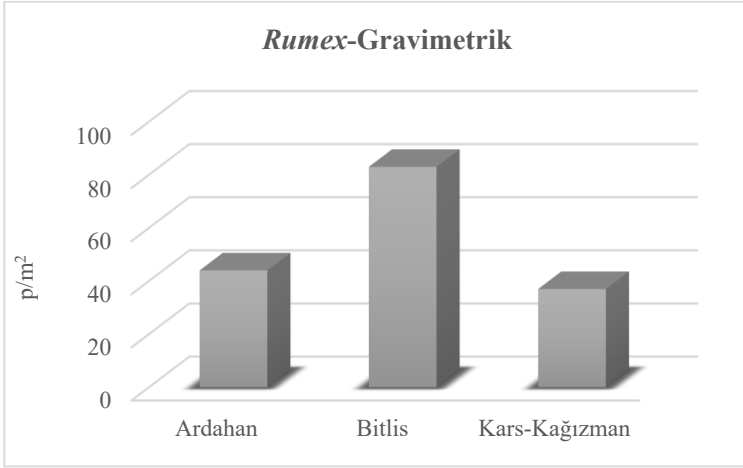
Grafik 21. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre *Quercus* taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



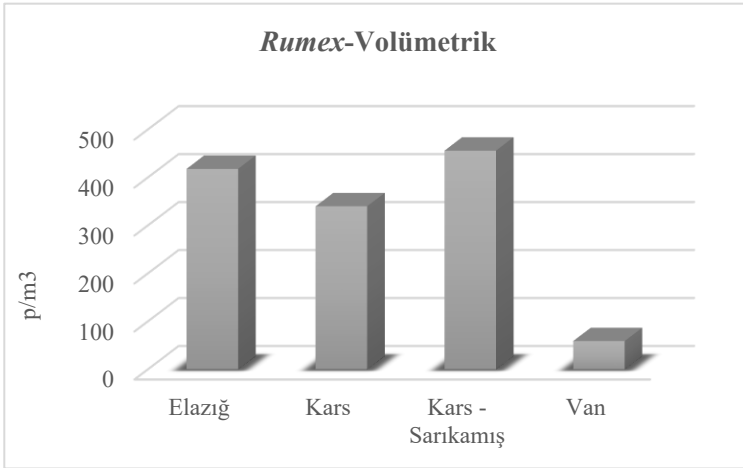
Grafik 22. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Quercus taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.12. Rumex

Polen taneleri ince bir sekzin tabakasıyla kaplı olup, şekilleri oblat-sferoidalden prolat formuna kadar değişiklik gösterir. Polenleri 3-4 kolporat özelliktedir. Kolpiller uzun ve dar, gözenekler ise uzundur. Tanelerin boyutu 15-35 mikrometre arasında değişmektedir (<https://www.pollen.com/>). *Rumex* polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–25 polen/m³ olması durumunda düşük; 26–50 polen/m³ olması durumunda orta; >50 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için *Rumex* polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 23 ve Grafik 24’te verilmiştir.



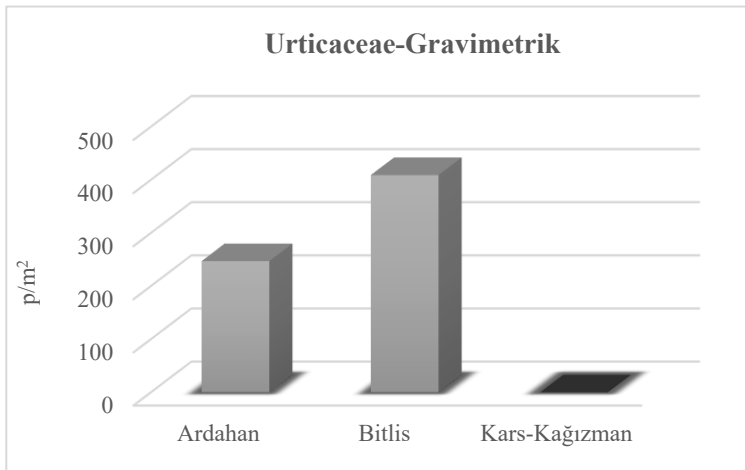
Grafik 23. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Rumex taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



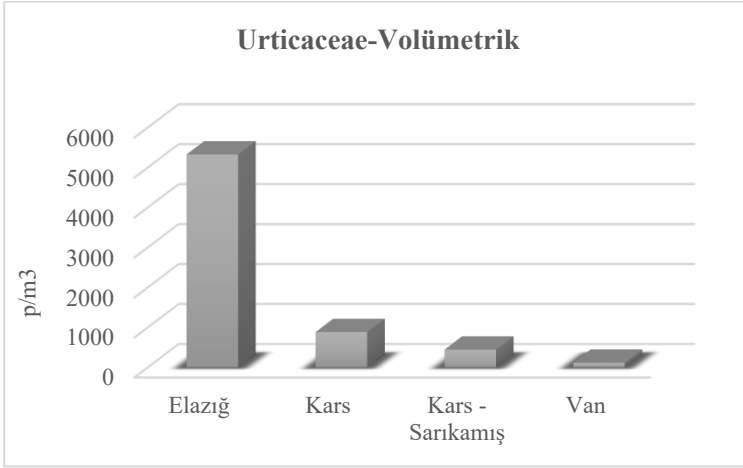
Grafik 24. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Rumex taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

4.13. Urticaceae

Polen taneleri oblat-sferoidal ile sferoidal şekilli olup, yuvarlak-üçgen bir görüntüye sahiptir ve boyutları küçüktür. Taneler 2-4 gözenekli olup, gözenekler dairesel yapıdadır. Polen tanelerinin boyutu genellikle 12-15 mikrometre arasında değişmektedir (<https://www.pollen.com/>). Urticaceae polen tanelerinin gün içinde atmosferde 1–15 polen/m³ olması durumunda düşük; 16–30 polen/m³ olması durumunda orta; >30 polen/m³ olması durumunda yüksek yoğunlukta olduğu söylenebilir (Soldevilla & ark., 2007). Doğu Anadolu bölgesi için Urticaceae polenlerinin yıllık ortalama yoğunlukları Grafik 25 ve Grafik 26’da verilmiştir.



Grafik 25. Gravimetrik yöntemle belirlenen illere göre Urticaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m²) (Celenk & Bicakci, 2005; Çetin & ark., 2015; Yalçın & ark., 2017)



Grafik 26. Volümetrik yöntemle belirlenen illere göre Urticaceae taksonunun yıllık ortalama polen miktarları (p/m³) (Bicakci & ark., 2017; Kilic & ark., 2019; Akpınar & Altunoğlu, 2024; Akdoğan Karadağ & Altunoğlu, 2024).

5. Bölgedeki polen duyarlılık araştırmaları

Doğu Anadolu Bölgesi'nde yapılan çeşitli çalışmalarda alerjik hastalıklarda polenlere karşı duyarlılık oranları incelenmiştir. Bingöl'de 211 hastanın %53,6'sında alerji testi pozitif bulunmuş, tahıl karışımına karşı %18,5, ağaç polen karışımına %8,5, *Alopecurus pratensis* polenine %13,7 ve *Triticum sativum* polenine %11,4 duyarlılık tespit edilmiştir. Erzurum'da 1152 hastanın %43,7'sinde en az bir alerjene karşı pozitif sonuç görülmüş, ot-tahıl karışımına %60,5, Akdeniz otlarına %43,6 ve ağaç polen karışımlarına %12,5-18 oranında duyarlılık saptanmıştır. Malatya'da 358 çocuk hastada Poaceae/tahıl polenlerine %48,9, yabancı ot karışımına %48,5 ve ağaç polenlerine %35,4 duyarlılık belirlenmiştir. Şırnak'ta 240 hastanın %17,1'inde çimen polen

karışımına, %11,6'sında tahıl karışımına duyarlılık tespit edilirken, Van'da 1052 çocuğun %5,1'inde çimen polen karışımına ve %1,9'unda *Betula* polenlerine duyarlılık saptanmıştır. Diğer çalışmalarda da benzer şekilde çayır, ot ve ağaç polenlerine değişen oranlarda alerjik duyarlılıklar bildirilmiştir (Şahin, Alan & Pınar, 2021).

Elazığ ilinde deri prik testi çalışması 2-18 yaş arası çocuklarda yapılmıştır. Çocukların %32,6'sında astım, %41'inde rinit, %26,4'ünde ise hem astım hem de rinit tanısı konulmuştur. Hastaların %47,1'i tek bir alerjene, %52,9'u ise birden fazla alerjene duyarlıdır. En sık duyarlılık, çimen/tahıl karışımına (%43,8) karşı saptanmıştır. Bunu sırasıyla *D. farinae* (%19,1), *D. pteronyssinus* (%18,2), yabancı ot karışımı (%14,1), küf karışımı I (%9,2), ağaç karışımı I (%8,8) ve ağaç karışımı II (%6,3) takip etmektedir (Kilic & ark., 2019).

Literatürde Doğu Anadolu Bölgesinde deri prik testi için önerilen alerjen polen taksonları; ağaç ve ağaçsı grubu, alerjik reaksiyonlara yol açabilen Cupressaceae, *Fraxinus*, *Quercus*, *Populus*, *Salix* ve *Morus* gibi türleri içermektedir. Otsu bitkiler arasında ise *Chenopodium album*, *Urtica*, *Parietaria*, *Artemisia*, *Xanthium* ve *Plantago* gibi alerjenik etkileri bilinen bitkiler yer almaktadır. Ayrıca, çayır ve tahıl grubunda yer alan Poaceae familyası da test için önerilen polen grubudur (Şahin, Alan & Pınar, 2021).

Sonuç

Bu çalışma, Doğu Anadolu Bölgesi'nde yapılan atmosferik polen araştırmalarını, yoğun olarak gözlenen alerjen taksonları ve

bunların literatürdeki verileriyle birlikte değerlendirmiştir. Ayrıca, bölgede yürütülen deri prik testi araştırmaları incelenerek, alerjik duyarlılığı yüksek bireylerde tespit edilen başlıca alerjen taksonlar belirlenmiştir. Bölgedeki yaygın alerjen taksonların tespiti, alerjik rahatsızlıkların yönetimi ve halk sağlığının korunması açısından önemli ipuğları sunmaktadır. Bu bağlamda, çalışma sonuçları hem bilimsel araştırmalara hem de bölgeye yönelik alerji kontrol stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Kaynaklar

Akdoğan Karadağ, G. E., & Altunoğlu, M. K. (2024). Airborne pollen seasonality of kars province, a high-altitude region in NE Anatolia-Turkey. *Palynology*, 2382959.

Akpınar, S., & Altunoğlu, M. K. (2024). Determination of atmospheric pollen grains by volumetric method in Sarıkamış district (Kars-Türkiye). *Biology*, 13(7), 475.

Bıçakçı, A., Çelenk, S., Canıtez, Y., Malyer, H., & Sapan, N. (2005). Türkiye'nin bazı bölgelerinde atmosferik polen çalışmaları. *Asthma Allergy Immunol* 2005; 3: 131, 7.).

Bıçakçı, A., Çelenk, S., Canıtez, Y., Malyer, H., & Sapan, N. (2005). Türkiye'nin bazı bölgelerinde atmosferik polen çalışmaları. *Asthma Allergy Immunol* 2005; 3: 131, 7.

Bicakci, A., Tosunoglu, A., Altunoglu, M. K., Saatcioglu, G., Keser, A. M., & Ozgokce, F. (2017). An aeropalynological survey in the city of Van, a high altitudinal region, East Anatolia-Turkey. *Aerobiologia*, 33, 93-108.

Bokanovic, D., Aberer, W., Hemmer, W., Heinemann, A., Komericki, P., & Sturm, G. (2013). Determination of sige to rphl p 1 is sufficient to diagnose grass pollen allergy. *Allergy*, 68(11), 1403-1409. <https://doi.org/10.1111/all.12263>

Burge, H. A., & Rogers, C. A. (2000). Outdoor allergens. *Environmental health perspectives*, 108(suppl 4), 653-659.

Celenk, S., & Bicakci, A. (2005). Aerobiological investigation in Bitlis, Turkey. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 12(1), 87-93.

Coğrafya Dünyası (2024). Doğu Anadolu Bölgesi 2024. (07.12.2024 tarihinde <https://www.cografya.gen.tr/egitim/bolgeler/dogu-anadolu.htm> adresinden ulaşılmıştır).

Coğrafya Harita (2024). *Türkiye Bölge Haritaları 2024* (07.12.2024 tarihinde http://cografyaharita.com/turkiye-cografi_bolge-haritalari.html adresinden ulaşılmıştır).

Cuesta-Herranz, J., Barber, D., Blanco, C., Cistero-Bahíma, A., Crespo, J. F., Fernández-Rivas, M., ... & Vegetalia Network. (2010). Differences among pollen-allergic patients with and without plant food allergy. *International archives of allergy and immunology*, 53(2), 182-192.

Çakır-dindar, E. G., & Güler, B. (2023). An endemic vascular plant species for Türkiye, *Ferulago humilis* boiss., and its potential distribution areas. *Sakarya University Journal of Science*, 27(6), 1226-1234.

Çetin, E., Altunoğlu, M. K., Akdoğan, G. E., & Akpınar, S. (2015). Ardahan ili atmosferik polenlerinin belirlenmesi. *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 80-94.

Damialis, A., Häring, F., Gökkaya, M., Rauer, D., Reiger, M., Bezold, S., ... & Traidl-Hoffmann, C. (2019). Human exposure to airborne pollen and relationships with symptoms and immune responses: indoors versus outdoors, circadian patterns and meteorological effects in alpine and urban environments. *The Science of the Total Environment*, 653, 190-199. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.366>

Deng, S. and Yin, J. (2019). Clinical utility of basophil activation test in diagnosis and predicting severity of mugwort pollen-related peach allergy. *World Allergy Organization Journal*, 12(6), 100043. <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2019.100043>

Ebo, D., Bridts, C., Verweij, M., Knop, K., Hagendorens, M., Clerck, L., ... & Stevens, W. (2010). Sensitization profiles in birch pollen-allergic patients with and without oral allergy syndrome to apple: lessons from multiplexed component-resolved allergy diagnosis. *Clinical & Experimental Allergy*, 40(2), 339-347. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2009.03345.x>

Eren, Z., Yerdelen Tatoğlu, F., & Akarsu, T. (2022). A statistical evaluation of the effect of natural gas usage for urban heating on the air quality of Erzurum City via SO₂ ve PM₁₀. *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences-Pamukkale Üniversitesi Muhendislik Bilimleri Dergisi*, 28(6).

Geroldinger-Simic, M., Zelniker, T., Aberer, W., Ebner, C., Egger, C., Greiderer, A., ... & Bohle, B. (2011). Birch pollen-related food allergy: clinical aspects and the role of allergen-specific ige and igg4 antibodies. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 127(3), 616-622.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2010.10.027>

Jantunen, J., Saarinen, K., & Rantio-Lehtimäki, A. (2011). Allergy symptoms in relation to alder and birch pollen concentrations in finland. *Aerobiologia*, 28(2), 169-176. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9221-3>

Karaoğlu, M., & Çelim, Ş. (2018). Doğu Anadolu Bölgesi ve Iğdır'ın jeolojisi ve toprak özellikleri. *Journal of Agriculture*, 1(1), 14-26.

Kattan, J., & Wang, J. (2012). Allergen component testing for food allergy: ready for prime time?. *Current Allergy and Asthma Reports*, 13(1), 58-63. <https://doi.org/10.1007/s11882-012-0311-2>

Kawauchi, H., Sato, Y., Honda, N., Furuhashi, K., Murata, K., Hayashi, A., ... & Yokogawa, N. (2022). Diagnosing pollen-food allergy syndrome allergologically in a patient with suspected eosinophilic gastroenteritis. *Internal Medicine*, 61(2), 185-188. <https://doi.org/10.2169/internalmedicine.7664-21>

Keskin, M. E., Çakto, İ., Çetin, V., & Bektaş, O. (2018). Doğu Anadolu Bölgesi sıcaklık ve yağış trend analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(2), 294-300.

Kilic, M., Altunoglu, M. K., Akpınar, S., Akdogan, G. E., & Taskin, E. (2019). Relationship between airborne pollen and skin prick test results in Elazığ, Turkey. *Aerobiologia*, 35, 593-604.

Lacey, M. E., & West, J. S. (2006). *The air spora: a manual for catching and identifying airborne biological particles* (Vol. 156). Dordrecht: Springer.

Lake, I. R., Jones, N. R., Agnew, M., Goodess, C. M., Giorgi, F., Hamaoui-Laguel, L., ... & Epstein, M. M. (2017). Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environmental health perspectives*, 125(3), 385-391

Özdemir, S., Güloğlu, D., Sin, B., Elhan, A., İkinçioğulları, A., & Mısırlıgil, Z. (2011). Reliability of basophil activation test using

cd203c expression in diagnosis of pollen allergy. *American Journal of Rhinology and Allergy*, 25(6), e225-e231. <https://doi.org/10.2500/ajra.2011.25.3723>

Pablos, I., Wildner, S., Asam, C., Wallner, M., & Gadermaier, G. (2016). Pollen allergens for molecular diagnosis. *Current Allergy and Asthma Reports*, 16(4). <https://doi.org/10.1007/s11882-016-0603-z>

Pollen.com (2024). (05.12.2024 tarihinde <https://www.pollen.com> adresinden ulaşılmıştır).

Popescu, F. (2015). Cross-reactivity between aeroallergens and food allergens. *World Journal of Methodology*, 5(2), 31. <https://doi.org/10.5662/wjm.v5.i2.31>

Schmidt, H., Gelhaus, C., Nebendahl, M., Janßen, O., & Petersen, A. (2010). Characterization of phleum pratense pollen extracts by 2-d dige and allergen immunoreactivity. *Proteomics*, 10(24), 4352-4362. <https://doi.org/10.1002/pmic.201000451>

Selçuk, A. S. (2022). Zilan jeotermal alanının (Erciş-Van) jeolojisi ve aktif tektonik özellikleri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(2), 416-435.

Saensouk, S., & Saensouk, P. (2022). Pollen morphology of some species in family Amaranthaceae from Thailand. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 23(1).

Sin, A. B., Pınar, N. M., Mısırlılıgil, Z., Çeter, T., Yıldız, A., & Alan, Ş. (2007). Polen allerjisi (Türkiye allerjik bitkilerine genel bir bakış). *Ankara: Engin Yayınevi*.

Soldevilla, C. G., González, P. C., Teno, P. A., & Vilches, E. D. (2007). Spanish Aerobiology Network (REA): Management And Quality Manual. *Servicio De Publicaciones De La Universidad De Córdoba, 184*, 1-300.)

Şahin, A. A., Alan, Ş., & Pınar, N. M. (2021). Doğu Anadolu Bölgesi alerjen polen dağılımı ve önerilen deri prik testi paneli. *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi, 14*(1), 20-29.)

Temel, S. (2017). Determination of feed contents of some wild species growing in the high-altitude grasslands. *Journal of the Institute of Science and Technology, 7*(3), 293-298.

Tiryaki, S. (2020). Arkeolojik yüzey araştırmaları ışığında Bingöl obsidyen kaynak alanlarına yönelik yeni değerlendirmeler. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 30*(2), 1-14.

Werfel, T., Asero, R., Ballmer-Weber, B., Beyer, K., Enrique, E., Knulst, A., ... & Hoffmann-Sommergruber, K. (2015). Position paper of the eaaci: food allergy due to immunological cross-reactions with common inhalant allergens. *Allergy, 70*(9), 1079-1090. <https://doi.org/10.1111/all.12666>

Yalçın, Ş., Altunoğlu, M. K., Akpınar, S., & Akdoğan, G. E. (2017). Kars ili Kağızman ilçesi atmosferik polen ve mantar sporlarının belirlenmesi. *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10*(2), 172-180.

