

Doğal Boyalarla Sürdürülebilir Gelecek: Yapay Zekâ, Biyokimya ve Yeşil Dönüşümle İş Sağlığı ve Güvenliğinin Yeniden Şekillendirilmesi

Elif Aktürk Bozdemir¹

Yakup Budak²

Özet

Doğal boyalar, tekstil endüstrisinde çevresel etkileri azaltma potansiyeliyle giderek daha fazla ön plana çıkarken, bu alandaki üretim süreçlerinin iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından da yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Geleneksel kimyasal boyalara kıyasla daha az toksik olmalarına rağmen, doğal boyaların üretimi ve kullanımı sırasında ortaya çıkabilecek biyolojik ve fiziksel risklerin göz ardı edilmemesi önemlidir. Bu bağlamda, teknolojik yeniliklerin ve sürdürülebilirlik politikalarının entegrasyonu, İSG'nin doğal boya üretiminde güçlü bir şekilde konumlandırılmasına olanak tanımaktadır.

Bu bölümde, doğal boyaların sürdürülebilir üretim süreçleri, kimyasal özellikleri ve iş sağlığı ve güvenliği (İSG) üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Araştırma, biyokimya ve yapay zekâ teknolojilerinin entegrasyonunun, doğal boya üretiminde verimliliği artırmak ve İSG standartlarını geliştirmek için sunabileceği katkıları detaylı biçimde ele almaktadır. Ayrıca, Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı ve Türkiye'nin 2053 Net Sıfır karbon emisyonu hedefi gibi önemli yeşil dönüşüm politikalarının, İSG uygulamalarının sosyal politikalarla entegrasyonundaki kritik rolü üzerinde durulmaktadır. Çalışmada, sürdürülebilir doğal boya üretiminin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları bütüncül bir perspektifle değerlendirilmekte; özellikle yapay zekâ destekli risk değerlendirme sistemlerinin, İSG yönetiminde etkinliğin artırılmasındaki potansiyeli ortaya konmaktadır. Bu kapsamda, doğal boya sektöründe hem işçi sağlığının korunması hem de

1 Öğr. Gör. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Meslek Yüksekokulu, elif.akturkbozdemir@gop.edu.tr, 0000-0001-9228-8635

2 Prof. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, ybudak74@hotmail.com, 0000-0001-7108-5548

çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması için teknolojik ve politik stratejilerin entegre edilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır.

Doğal boyaların sürdürülebilir üretiminde İSG'nin sağlanması, sadece işçi sağlığı açısından değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik için de kritik önemdedir. Biyokimya, yapay zekâ ve politika entegrasyonu ile desteklenen yenilikçi yaklaşımlar, bu alanda daha güvenli ve verimli üretim modellerinin önünü açmaktadır.

1. Giriş

Tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan sentetik boyaların çevre üzerindeki olumsuz etkileri ve insan sağlığına yönelik tehditleri, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatiflere olan ilgiyi artırmıştır. Bu bağlamda, biyolojik olarak parçalanabilir özellikleri ve düşük toksikolojik profilleriyle ön plana çıkan doğal boyalar, önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Sankari ve ark., 2024). Bununla birlikte, doğal boyaların endüstriyel ölçekte üretimi ve kullanımı; verimlilik, standardizasyon ve maliyet etkinliği gibi önemli zorlukları da beraberinde getirmektedir (Yusuf ve ark., 2017).

Bu bölümde, doğal boyaların sürdürülebilir üretim süreçleri ele alınmakta ve bu süreçlerin iş sağlığı ve güvenliği (İSG) perspektifinden değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Özellikle biyokimya ve yapay zekâ teknolojilerinin doğal boya üretiminde verimliliği artırma potansiyeli ile İSG standartlarının iyileştirilmesindeki işlevi incelenmektedir. Ayrıca Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı ve Türkiye'nin 2053 Net Sıfır emisyon hedefi gibi politikalar çerçevesinde, yeşil dönüşüm sürecinin İSG uygulamalarıyla entegrasyonu değerlendirilerek, bu dönüşümün sosyal politika boyutu da tartışılmaktadır. Günümüzde tekstil endüstrisinin küresel su kirliliğinin yaklaşık %20'sinden sorumlu olduğu bilinmektedir. Bu kirliliğin önemli bir kısmı, sentetik boya üretimi ve kullanımı kaynaklıdır (Das ve Maulik, 2024). Söz konusu çevresel etkiler yalnızca ekolojik sistemleri tehdit etmekte kalmayıp, aynı zamanda çalışan sağlığını da ciddi şekilde riske atmaktadır. Bu çerçevede, doğal boyaların kullanımı çevresel sürdürülebilirlik ve iş sağlığı açısından önemli bir alternatif sunmakla birlikte, bu potansiyelin etkin şekilde kullanılabilmesi için bilimsel ve teknolojik yeniliklerin üretim süreçlerine entegre edilmesi zorunludur.

2. Doğal Boyaların Sürdürülebilir Kalkınmadaki Rolü

2.1. Doğal Boyaların Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

Doğal boyalar; bitkiler, hayvanlar, mineraller ve mikroorganizmalar gibi çeşitli doğal kaynaklardan elde edilen pigmentlerdir. Tarihsel olarak insanlık,

tekstil başta olmak üzere farklı alanlarda bu boyaları uzun süre kullanmıştır. Ancak 19. yüzyılda sentetik boyaların geliştirilmesiyle birlikte doğal boyalar, endüstriyel ölçekteki önemini büyük ölçüde yitirmiştir (Benli ve Bahriyari, 2024). Bununla birlikte, son yıllarda artan çevresel kaygılar, sürdürülebilirlik arayışları ve insan sağlığına yönelik bilinç düzeyinin yükselmesiyle doğal boyalara olan ilgi yeniden artış göstermektedir. Kimyasal yapılarına göre sınıflandırıldığında doğal boyalar; antrakinonlar, indigoidler, flavonoidler ve karotenoidler gibi çeşitli bileşik gruplarına ayrılmaktadır (Li ve ark., 2022). Bu bileşiklerin her biri, kendine özgü renk tonları ve kimyasal özellikler sunmakta olup tekstil endüstrisinde farklı uygulama alanlarına sahiptir. Örneğin; *Rubia tinctorum* (kökboyası) bitkisinden elde edilen alizarin kırmızı tonları sağlarken, *Indigofera tinctoria* (çivit otu) bitkisinden elde edilen indigo mavi tonları üretmektedir. Benzer şekilde, *Rhamnus* türlerinden elde edilen flavonoid bileşikler ise sarı tonlarının elde edilmesinde kullanılmaktadır.

2.2. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve Doğal Boyalar

Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) arasında yer alan “Sorumlu Üretim ve Tüketim” (SKH 12), “Sudaki Yaşam” (SKH 14) ve “Karasal Yaşam” (SKH 15) başlıkları, doğal boyaların üretim ve kullanım süreçleriyle doğrudan ilişkilidir (United Nations, 2022). Sentetik boyaların neden olduğu çevresel kirliliğin azaltılması, ekosistemlerin korunması ve kaynakların daha verimli kullanılması açısından, doğal boyaların yaygınlaştırılması bu hedeflerle uyumlu stratejik bir yaklaşımdır. Doğal boyaların çevre dostu üretim yöntemleri sayesinde su kaynaklarının kirlenmesinin önlenmesi (SKH 14), toprağın ve biyolojik çeşitliliğin korunması (SKH 15) ve aynı zamanda üretim süreçlerinde daha az kimyasal girdiye ihtiyaç duyulması yoluyla daha sorumlu bir üretim-tüketim döngüsünün oluşturulması (SKH 12) mümkün hale gelmektedir (Alizadeh-Sani ve ark., 2020; Brudzyńska ve ark., 2021; Aggarwal, 2021; Saha, 2025). Bu yönüyle doğal boyalar, yalnızca endüstriyel uygulamalar açısından değil, aynı zamanda küresel çevre politikaları bağlamında da stratejik bir öneme sahiptir.

Doğal boyaların sürdürülebilir kalkınmaya sunduğu katkılar çok boyutlu olup, hem çevresel hem de sosyoekonomik faydaları içermektedir. Bu katkılar, özellikle biyolojik çeşitliliğin korunması, karbon ayak izinin azaltılması, su kaynaklarının kirlenmesinin önlenmesi ve kırsal kalkınmanın desteklenmesi gibi alanlarda somut biçimde gözlemlenebilmektedir:

- Biyolojik çeşitliliğin korunması: Doğal boya üretiminde kullanılan bitkilerin tarımsal üretimi, özellikle yerel ve endemik türlerin

sürdürülebilir biçimde yetiştirilmesini teşvik ederek, ekosistemlerin korunmasına ve biyolojik çeşitliliğin devamlılığına katkı sunmaktadır. Bu durum, özellikle geleneksel tarım bilgi ve yöntemlerinin yeniden değer kazanmasını da beraberinde getirmektedir.

- Karbon ayak izinin azaltılması: Doğal boyaların üretim süreçleri, sentetik boyalara kıyasla daha az enerji gerektirmekte ve fosil yakıt kullanımının minimize edilmesi sayesinde toplam sera gazı emisyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu yönüyle doğal boyalar, iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir araç olarak değerlendirilmektedir.
- Su kirliliğinin azaltılması: Doğal boyalar, biyolojik olarak parçalanabilir nitelikleri sayesinde su ekosistemleri üzerinde daha az toksik etki yaratmakta, böylece tatlı su kaynaklarının korunmasına doğrudan katkı sağlamaktadır. Sentetik boyaların aksine, doğal boyaların atıkları çevreye daha az zarar verir ve arıtma süreçlerini daha az zorlayıcı hale getirir.
- Kırsal kalkınma ve istihdam olanakları: Doğal boya bitkilerinin tarımı ve işlenmesi, özellikle kırsal bölgelerde ekonomik çeşitliliği artırarak yerel halk için yeni istihdam fırsatları sunmaktadır. Bu durum, tarımsal üretimin çeşitlendirilmesi ve katma değeri yüksek ürünlerin geliştirilmesi yoluyla yerel kalkınmayı desteklemektedir.

3. Doğal Boya Üretiminde İş Sağlığı ve Güvenliği

3.1. Sentetik Boyaların İSG Riskleri

Sentetik boyaların üretim ve kullanım süreçleri, çalışanlar açısından ciddi iş sağlığı ve güvenliği (İSG) riskleri barındırmaktadır. Bu riskler, hem doğrudan kimyasal maruziyetler hem de süreç kaynaklı fiziksel tehlikeler yoluyla ortaya çıkmaktadır (El-Helaly, 2024; Shah ve Mishra, 2024; Fazlı ve ark., 2025).

- Kimyasal maruziyetler, en yaygın risk kategorilerinden biridir. Sentetik boya üretiminde sıklıkla kullanılan benzen, formaldehit ve çeşitli ağır metaller gibi toksik bileşikler, çalışanlarda solunum yolu hastalıklarına, dermatolojik rahatsızlıklara ve uzun vadede kanser gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu maddelerin uçucu ve reaktif özellikleri, kapalı ortamlarda çalışanlar için ek bir tehdit oluşturmaktadır.
- Patlama ve yangın riskleri, sentetik boya bileşenlerinin yüksek yanıcılık özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle uçucu organik bileşikler

içeren hammaddelerin uygun olmayan koşullarda depolanması veya taşınması, işyerlerinde ciddi yangın ve patlama tehlikelerine neden olabilmektedir. Bu durum, yalnızca çalışan sağlığını değil, aynı zamanda üretim tesislerinin genel güvenliğini de tehdit etmektedir.

- Atık yönetimi sorunları da İSG açısından önemli bir diğer başlıktır. Sentetik boya üretimi sonucu ortaya çıkan kimyasal atıkların uygun şekilde bertaraf edilmemesi, hem çevre sağlığı hem de çalışanların maruz kalabileceği toksik etkiler açısından ciddi riskler oluşturmaktadır. Bu bağlamda, etkin bir atık yönetimi sisteminin kurulmaması durumunda hem kısa vadeli zehirlenmeler hem de uzun vadeli kronik etkiler kaçınılmaz hale gelebilir.

3.2. Doğal Boyaların İSG Avantajları

Doğal boyaların kullanımı, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından önemli avantajlar sunmakta olup, geleneksel sentetik boyalara kıyasla daha güvenli üretim ve çalışma koşullarının oluşmasına katkı sağlamaktadır (Nanda, 2022; Phys.org, 2022; Textile Value Chain, 2024). Bu avantajlar, üç temel başlık altında değerlendirilebilir:

- **Düşük toksisite:** Doğal boyalar, kimyasal yapıları gereği genellikle sentetik boyalara kıyasla daha düşük toksisiteye sahiptir. Bu durum, çalışanların maruz kaldığı sağlık risklerinin azaltılmasına katkı sağlar. Özellikle solunum yolu hastalıkları, cilt tahrişleri ve uzun vadede oluşabilecek kronik hastalıkların önlenmesi açısından doğal boyalar daha güvenli bir alternatif sunmaktadır.
- **Azaltılmış kimyasal maruziyet:** Doğal boya üretimi süreçlerinde kullanılan hammaddeler, sentetik boyaların üretiminde kullanılan agresif kimyasallara göre daha az zararlı madde içermektedir. Bu da çalışanların toksik kimyasallara doğrudan veya dolaylı maruziyetini azaltmakta, kişisel koruyucu donanım (KKD) gereksinimini hafifletmekte ve maruziyet kaynaklı meslek hastalıklarının önlenmesine katkıda bulunmaktadır.
- **İyileştirilmiş çalışma ortamı:** Doğal boya üretiminde daha az uçucu organik bileşik ve toksik buhar ortaya çıkması, üretim tesislerinde hava kalitesinin korunmasını kolaylaştırmakta ve genel anlamda daha sağlıklı bir çalışma ortamı sunmaktadır. Bu da çalışan konforunu ve işyeri memnuniyetini artırmakla birlikte, İSG standartlarının sürdürülebilirliğine de olumlu katkı sağlamaktadır.

3.3. Doğal Boya Üretiminde Potansiyel İSG Riskleri

Her ne kadar doğal boyalar iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından sentetik boyalara göre daha avantajlı bir alternatif sunsa da, üretim süreçlerinde bazı potansiyel risklerin bulunduğu da göz ardı edilmemelidir. Bu riskler, uygun önlemler alınmadığı takdirde çalışan sağlığını olumsuz etkileyebilir (Amogne ve ark., 2020; Pishgar ve ark., 2021; Amorim ve ark., 2022). Başlıca İSG riskleri aşağıda özetlenmiştir:

- **Alerjik reaksiyonlar:** Bazı doğal boya bileşenleri, özellikle bitkisel kökenli pigmentler, hassas bireylerde deri döküntüleri, solunum problemleri gibi alerjik reaksiyonlara yol açabilmektedir. Bu durum, bireysel duyarlılıkların göz önünde bulundurulmasını ve üretim ortamlarında gerekli önleyici tedbirlerin alınmasını gerektirir.
- **Mordan kullanımına bağlı riskler:** Doğal boyaların liflere kalıcı olarak tutunabilmesi için kullanılan mordanlar (örneğin, şap ve demir sülfat gibi metal tuzları), belirli koşullarda toksik etkiler gösterebilir. Mordanların uygun olmayan konsantrasyonlarda veya koruyucu önlemler alınmadan kullanılması durumunda, çalışanlarda cilt ve göz tahrişi gibi sağlık sorunları ortaya çıkabilir. Bu nedenle, mordan kullanımında standart prosedürlerin ve güvenlik yönergelerinin titizlikle uygulanması gerekmektedir.
- **Ergonomik riskler:** Doğal boya bitkilerinin tarımı, hasadı ve işlenmesi süreçleri, özellikle manuel emek yoğunluğu yüksek faaliyetler olduğunda, çalışanlarda kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları gibi ergonomik riskleri artırabilir. Bu bağlamda, çalışma koşullarının iyileştirilmesi, uygun ekipman kullanımı ve iş rotasyonu gibi önlemlerle ergonomik risklerin minimize edilmesi önem taşımaktadır.

4. Biyokimya ve Doğal Boya Üretimi

4.1. Doğal Boyaların Biyokimyasal Özellikleri

Doğal boyaların renk verme kapasiteleri, stabiliteleri ve liflere bağlanma kabiliyetleri, sahip oldukları biyokimyasal yapı ile yakından ilişkilidir. Bu pigmentler, kimyasal yapıları doğrultusunda farklı renk spektrumları sunmakta ve çeşitli tekstil uygulamalarında tercih edilmektedir (Baig, 2011; Boranbayeva ve ark., 2014; Borges ve ark., 2021; Bin-Jumah ve ark., 2021). Başlıca doğal boya sınıfları ve bunların biyokimyasal özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- Antrakininonlar: Bu grup pigmentler, kökboyası (*Rubia tinctorum*) bitkisi ve köşinil böceği (*Dactylopius coccus*) gibi kaynaklardan elde edilir. Özellikle kırmızı renk tonlarıyla karakterize edilirler. Antrakininon yapısındaki boyar maddeler, tekstil liflerine yüksek bağlanma kapasitesine sahip olup, yıkama ve ışık haslığı açısından dayanıklı sonuçlar verirler. Bu özellikleri, onları doğal boyama uygulamalarında oldukça değerli kılmaktadır.
- İndigoidler: Çivit otu (*Indigofera tinctoria*) ve Murex cinsi deniz salyangozu gibi organizmalardan elde edilen indigoidler, özellikle mavi tonlarıyla tanınır. İndigo, doğrudan çözünmeyen bir pigment olup, boyama sürecinde indirgenmiş (renksiz) forma dönüştürülerek liflere uygulanmakta; daha sonra hava ile temas ederek oksitlenmesiyle karakteristik mavi rengini kazanmaktadır. Bu kimyasal dönüşüm, indigonun boyama sürecindeki özgünlüğünü ortaya koymaktadır.
- Flavonoidler: Papatya (*Anthemis*), cehri (*Rhamnus*) ve soğan kabuğu (*Allium cepa*) gibi çeşitli bitkilerden elde edilen flavonoidler, sarı ve turuncu renk tonlarının elde edilmesinde kullanılır. Flavonoid pigmentleri, doğal ortamda antioksidan özellikler göstermeleriyle bilinir ve boyama işlemlerinde mordan kullanımına bağlı olarak farklı tonlarda renklenme sağlayabilirler.
- Karotenoidler: Başta havuç (*Daucus carota*) ve safran (*Crocus sativus*) olmak üzere bazı sebzelerden ve çiçeklerden elde edilen karotenoid pigmentleri, canlı sarı ve turuncu renkler sunmaktadır. Karotenoidler, yağda çözünebilen pigmentlerdir ve ışığa karşı orta düzeyde stabiliteye sahiptirler. Bu özellikleri, gıda ve kozmetik endüstrisinde de kullanım alanı bulmalarına olanak tanımaktadır.

4.2. Enzim Teknolojisinin Doğal Boya Üretimindeki Rolü

Doğal boya üretim süreçlerinde enzim teknolojisinin kullanımı, hem verimliliğin artırılması hem de çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önemli katkılar sunmaktadır (Bueno ve ark., 2020; Chen ve ark., 2020; Chandru ve Praveena, 2021). Enzimler, biyokatalizör özellikleri sayesinde, düşük sıcaklık ve nötr pH gibi çevre dostu koşullarda etkili olarak çalışabilmekte ve böylece kimyasal kullanımını azaltarak daha yeşil üretim süreçlerine olanak tanımaktadır. Enzimlerin doğal boyacılık uygulamalarındaki başlıca işlevleri şu şekilde özetlenebilir:

- Ekstraksiyon verimliliğinin artırılması: Bitki materyallerinden boya bileşiklerinin elde edilmesinde, selüloz, pektinaz ve proteaz gibi enzimlerin kullanımı, hücre duvarlarının parçalanmasını

kolaylaştırmakta ve böylece pigmentlerin çözünürlüğünü artırarak ekstraksiyon verimini önemli ölçüde yükseltmektedir. Bu sayede, daha düşük bitkisel hammadde kullanımıyla daha yüksek miktarda boya elde edilebilmektedir.

- Mordanlama alternatifi olarak enzim kullanımı: Geleneksel mordanlama yöntemlerinde kullanılan metal tuzlarının çevresel ve sağlık açısından oluşturduğu risklere alternatif olarak, lakkaz ve peroksidaz gibi oksidatif enzimler, tekstil lifleri ile boya molekülleri arasında kovalent bağlar oluşturarak renk sabitliğini artırabilmektedir. Bu yöntem, hem toksik mordan kullanımını ortadan kaldırmakta hem de çevre dostu bir boyama süreci sağlamaktadır.
- Boya sabitliğinin iyileştirilmesi: Enzimlerin kullanımı, doğal boyaların tekstil liflerine daha etkili biçimde bağlanmasını kolaylaştırmakta ve bu da yıkama, ışık ve sürtünme hasırlıklarının artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, enzim destekli boyama prosesleri hem renk kalıcılığını iyileştirmekte hem de ürün kalitesini artırmaktadır.

4.3. Biyoteknolojik Yöntemlerle Doğal Boya Üretimi

Biyoteknoloji, doğal boya üretiminde yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler sunarak geleneksel yöntemlere alternatif oluşturmaktadır [27, 28, 29]. Bu alandaki gelişmeler, boya üretiminde verimliliği artırmakta, çevresel etkileri azaltmakta ve hammaddelere erişimdeki sınırlılıkları aşma potansiyeli taşımaktadır (Brauch ve ark., 2016; Chen ve ark., 2020; Bujak ve ark., 2022). Biyoteknolojik uygulamalar kapsamında öne çıkan başlıca yaklaşımlar şunlardır:

- Mikrobiyal pigment üretimi: Bakteri, mantar ve alg gibi mikroorganizmalar, çeşitli doğal pigmentleri biyosentezleme kapasitesine sahiptir. Örneğin, *Monascus purpureus* mantarı kırmızı tonlarda pigment üretirken, *Serratia marcescens* bakterisi tarafından sentezlenen prodigiosin adlı bileşik de kırmızı renklendirici olarak değerlendirilmektedir. Bu mikroorganizmalar, kontrollü fermentasyon koşullarında yüksek verimli boya üretimi sağlayarak tarım alanlarına olan bağımlılığı azaltmaktadır.
- Bitki doku kültürü teknikleri: Doku kültürü, bitki hücre, doku veya organlarının steril koşullarda yapay besiyerlerinde çoğaltılmasını sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, mevsimsel değişkenliklerin ve coğrafi sınırlamaların ortadan kaldırılmasına olanak tanıyarak boya bitkilerinin sürdürülebilir ve sürekli üretimini mümkün kılmaktadır.

Ayrıca, nadir veya nesli tehlike altında olan bitki türlerinin korunması açısından da avantaj sağlamaktadır.

- Genetik mühendisliği uygulamaları: Genetik mühendisliği sayesinde, pigment üretiminden sorumlu genlerin mikroorganizmalara veya kültür bitkilerine transferi yoluyla boya verimi artırılabilir. Bu teknik, hedef pigmentin daha kısa sürede, daha yüksek miktarda ve daha düşük maliyetle üretilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda, pigmentlerin kimyasal yapısında modifikasyonlar yapılarak renk tonu, stabilite ve fonksiyonellik gibi özellikler iyileştirilebilir.

5. Yapay Zekâ ve Doğal Boya Üretiminde İSG

5.1. Yapay Zekâ Teknolojilerinin İSG Yönetimindeki Rolü

Yapay zekâ (YZ) teknolojileri, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) yönetiminde giderek artan bir şekilde benimsenmekte ve risk değerlendirmesi, tehlike tanımlama ile kaza önleme gibi kritik süreçlere önemli katkılar sağlamaktadır [30, 31, 32, 33]. Doğal boya üretiminde de YZ uygulamaları, üretim süreçlerinin güvenliğini artırmak ve işyeri risklerini minimize etmek amacıyla çeşitli şekillerde kullanılmaktadır (El Bouchikhi ve ark., 2024; Huber ve ark., 2025; Fiegler-Rudol ve ark., 2025; Cao ve ark., 2025). Bu kapsamda başlıca YZ tabanlı uygulamalar şunlardır:

- Makine öğrenimi tabanlı risk değerlendirmesi: Doğal boya üretim süreçlerindeki potansiyel tehlike ve risk faktörlerinin belirlenmesi için makine öğrenimi algoritmaları etkin bir şekilde kullanılabilir. Bu algoritmalar, üretim verilerini analiz ederek riskli durumları önceden tespit etmekte ve İSG yönetimine proaktif yaklaşım kazandırmaktadır.
- Görüntü işleme ve gerçek zamanlı tehlike tespiti: Bilgisayarlı görü sistemleri ve görüntü işleme teknikleri, üretim sahalarında gerçekleşebilecek tehlikeleri anlık olarak izleyebilmekte ve erken uyarı mekanizmaları oluşturarak iş kazalarının önüne geçilmesine katkı sağlamaktadır.
- Öngörücü bakım (Predictive Maintenance): YZ destekli modeller, üretim ekipmanlarının arıza ve bakım ihtiyaçlarını önceden tahmin ederek, ani arızalardan kaynaklanabilecek iş kazalarını ve üretim kesintilerini minimize etmektedir. Böylece hem iş güvenliği hem de üretim sürekliliği sağlanmaktadır.

5.2. Doğal Boya Üretiminde YZ Destekli İSG Sistemleri

Doğal boya üretim süreçlerinde yapay zekâ (YZ) destekli iş sağlığı ve güvenliği (İSG) sistemleri, çalışanların sağlık ve güvenlik koşullarını iyileştirmek amacıyla çeşitli yenilikçi uygulamalar sunmaktadır [34, 35, 36]. Bu sistemler, teknolojik gelişmelerin İSG alanına entegrasyonu ile risklerin azaltılmasına ve işyeri ortamının güvenli hale getirilmesine katkı sağlamaktadır (Biswas ve ark., 2018; Matyga ve ark., 2023; Avinash ve ark., 2025). Başlıca uygulama alanları şunlardır:

- Akıllı kişisel koruyucu donanımlar (KKD): Sensör teknolojileri ile donatılmış akıllı KKD'ler, çalışanların maruz kaldığı kimyasal ve fiziksel tehlikeleri anlık olarak izleyebilmekte ve potansiyel riskler hakkında gerçek zamanlı uyarılar ile bilinçlendirme sağlamaktadır. Böylece, kazaların önlenmesine yönelik hızlı müdahale imkânı doğmaktadır.
- Çalışan sağlığı izleme sistemleri: Giyilebilir teknolojiler ve Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı cihazlar, çalışanların biyometrik verilerini ve sağlık durumunu sürekli olarak takip ederek erken dönem sağlık problemlerinin tespit edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede, iş ortamında sağlık riskleri minimize edilmekte ve çalışan refahı artırılmaktadır.
- Ergonomik risk değerlendirmesi: Yapay zekâ algoritmaları, çalışanların iş sırasında gerçekleştirdiği hareketleri detaylı olarak analiz edebilmekte; bu sayede kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına yol açabilecek ergonomik riskler belirlenmekte ve iyileştirme önerileri sunulmaktadır. Bu uygulama, iş verimliliğinin artırılması ve meslek hastalıklarının önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

5.3. Vaka Çalışması: Doğal Boya Üretiminde YZ Destekli Risk Yönetimi

Hindistan'da bir doğal boya üretim tesisinde gerçekleştirilen vaka çalışması, yapay zekâ (YZ) destekli risk yönetimi sistemlerinin iş sağlığı ve güvenliği (İSG) performansına olumlu etkilerini ortaya koymaktadır (Qi ve ark., 2021). Bu sistemin temel bileşenleri ve işleyişi şu şekilde özetlenebilir:

- Veri toplama: Üretim sahasına yerleştirilen çeşitli sensörler aracılığıyla, sıcaklık, nem, hava kalitesi ve gürültü seviyesi gibi çevresel parametreler sürekli olarak izlenmektedir. Bu sayede, iş ortamındaki kritik değişkenler anlık olarak takip edilebilmektedir.

- Veri analizi: Toplanan çevresel veriler, makine öğrenimi algoritmaları tarafından işlenmekte ve potansiyel risklerin erken dönemde tespit edilmesi sağlanmaktadır. Bu analiz, risklerin önleyici tedbirlerle kontrol altına alınmasına olanak tanımaktadır.
- Uyarı sistemi: Sistem, belirlenen risk eşiklerinin aşılması durumunda, hem yönetici kadroya hem de çalışanlara gerçek zamanlı uyarılar iletilmektedir. Böylece, olası tehlikelere karşı hızlı müdahale imkânı doğmaktadır.

Bu yapay zekâ tabanlı risk yönetimi sisteminin uygulanması sonucunda, tesisin iş kazası oranlarında %45, meslek hastalıklarında ise %30 oranında anlamlı bir azalma kaydedilmiştir. Bu bulgular, YZ destekli İSG uygulamalarının doğal boya üretimi gibi geleneksel sektörlerde dahi etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

6. Yeşil Dönüşüm Politikaları ve İSG Entegrasyonu

6.1. AB Yeşil Mutabakatı ve İSG Etkileri

Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı (*European Green Deal*) (2019), AB'nin 2050 yılına kadar karbon nötr bir kıta olma hedefini destekleyen kapsamlı ve bütüncül bir politika paketidir. Bu mutabakat, tekstil sektörü başta olmak üzere pek çok endüstride sürdürülebilirlik uygulamalarının yaygınlaştırılmasını teşvik etmektedir. Yeşil Mutabakat'ın iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanına olan etkileri şu temel başlıklar altında toplanabilir:

- Kimyasal yönetimi: REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals – Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması*) (European Chemicals Agency, 2022) düzenlemesi kapsamında, tehlikeli kimyasalların kullanımının kısıtlanması ve azaltılması hedeflenmekte; bu da çalışanların maruz kaldığı sağlık risklerinin önemli ölçüde azalmasını sağlamaktadır.
- Döngüsel ekonomi uygulamaları: Atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi yoluyla, işyeri ortamındaki atıklardan kaynaklanan İSG riskleri minimize edilmektedir. Bu kapsamda, kaynakların etkin kullanımı hem çevresel hem de iş sağlığı açısından fayda sağlamaktadır (European Commission, 2020).
- Temiz enerjiye geçiş: Fosil yakıtların kullanımının azaltılarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi, bu enerji dönüşüm sürecine bağlı olarak ortaya çıkabilecek fosil yakıtla ilişkili sağlık ve güvenlik risklerini azaltmaktadır (European Commission, 2021).

6.2. Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Hedefi ve İSG Stratejileri

Türkiye'de Çevre, Şhircilik ve İklim Değışikliği Bakanlığı (2021), Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2021), Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı (2022) ve Milli Eğitim Bakanlığı (2022) tarafından 2053 yılına kadar net sıfır karbon emisyonuna ulaşma hedefleri resmen açıklamış ve bu doğrultuda çeşitli sektörlerde kapsamlı yeşil dönüşüm stratejileri geliştirmektedir. Tekstil sektöründe doğal boya kullanımının artırılması, bu stratejiler arasında önemli bir yer tutmaktadır. Türkiye'nin yeşil dönüşüm sürecinde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında benimsenen başlıca stratejiler şu şekilde özetlenebilir:

- Yasal düzenlemeler: İSG mevzuatının, yeşil dönüşüm politikalarıyla uyumlu hale getirilmesi; böylece çevresel sürdürülebilirlik ve çalışan sağlığı arasında bütünleşik bir yaklaşım sağlanması amaçlanmaktadır.
- Teşvik mekanizmaları: Sürdürülebilir üretim yapan ve İSG standartlarını yükselten işletmelere yönelik mali ve teknik teşviklerin geliştirilmesi, yeşil dönüşümün hızlandırılmasına katkı sağlamaktadır.
- Eğitim ve farkındalık artırma: Yeşil dönüşüm ile İSG konularında işverenler ve çalışanların bilinçlendirilmesi için kapsamlı eğitim programlarının hayata geçirilmesi, sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesini desteklemektedir.

6.3. Sosyal Politikalar ve İSG Entegrasyonu

Yeşil dönüşüm sürecinde iş sağlığı ve güvenliğinin (İSG), sosyal politikalarla entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Bu entegrasyon, özellikle "adil geçiş" (*just transition*) kavramı çerçevesinde ele alınmaktadır (International Labour Organization, 2022). Adil geçiş, yeşil dönüşümün sosyal boyutlarının dikkate alınmasını sağlayarak, sürecin hiçbir çalışanı geride bırakmadan ve dönüşümün sosyal maliyetlerinin adil biçimde paylaşılması amacıyla tasarlanmıştır. Doğal boya sektöründe adil geçiş stratejileri aşağıdaki unsurları içermektedir (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2022; İŞKUR, 2023; Sosyal Güvenlik Kurumu, 2023):

- Beceri geliştirme programları: Sentetik boya üretiminden doğal boya üretimine geçiş yapan çalışanların yeni süreçlere uyum sağlamaları için kapsamlı beceri geliştirme ve yeniden eğitim programlarının uygulanması.
- Sosyal diyalog mekanizmaları: İşverenler, çalışan temsilcileri ve sivil toplum kuruluşları arasında yeşil dönüşüm sürecine ilişkin etkili ve sürekli iletişim kanallarının oluşturulması.

- Sosyal koruma önlemleri: Yeşil dönüşüm sürecinde iş kaybı yaşayan çalışanların ekonomik ve sosyal açıdan desteklenmesi için kapsamlı sosyal koruma politikalarının geliştirilmesi.

7. Doğal Boya Üretiminde Sürdürülebilir İSG Uygulamaları

7.1. Risk Değerlendirmesi ve Önleme Stratejileri

Doğal boya üretiminde sürdürülebilir iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarının temelini, kapsamlı ve sistematik bir risk değerlendirmesi ile etkili önleme stratejilerinin geliştirilmesi oluşturmaktadır. Bu süreç, üretim aşamalarında çalışanların ve çevrenin maruz kalabileceği tehlikelerin doğru biçimde tanımlanması, risklerin bilimsel ve metodolojik yaklaşımlarla analiz edilmesi ve bu risklerin minimize edilmesine yönelik uygun kontrol önlemlerinin uygulanmasını içermektedir (International Labour Organization, 2021; Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2021; European Agency for Safety and Health at Work, 2022a).

- **Tehlike Tanımlama:** Risk yönetiminin ilk aşaması olan tehlike tanımlama, doğal boya üretim süreçlerinde karşılaşılabilecek fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ergonomik tehlikelerin detaylı ve sistematik bir şekilde belirlenmesini kapsar. Bu aşamada, üretim hattındaki ham maddelerden nihai ürüne kadar tüm aşamalarda potansiyel tehlikelerin envanteri çıkarılır. Özellikle doğal boya hammaddeleri, üretim ekipmanları ve iş süreçleri göz önünde bulundurularak, olası maruziyet kaynakları ve tehlike unsurları ayrıntılı olarak değerlendirilir.
- **Risk Analizi:** Tanımlanan tehlikeler, olasılık ve şiddet boyutları açısından çok boyutlu olarak analiz edilir. Bu analiz, risklerin gerçekleşme ihtimali ve gerçekleşmesi durumunda ortaya çıkabilecek zararların büyüklüğü dikkate alınarak yapılır. Nicel ve nitel yöntemlerin kullanıldığı bu aşama, önceliklendirme ve kaynakların etkin kullanımını sağlamak amacıyla kritik risklerin belirlenmesine olanak tanır. Ayrıca, üretim sürecine özgü koşullar ve çalışanların maruziyet profilleri risk analizinde dikkate alınır.
- **Kontrol Önlemleri:** Risk analiz sonuçlarına dayanarak, belirlenen tehlikelerle başa çıkmak için çok yönlü kontrol stratejileri geliştirilir ve uygulanır. Teknik önlemler, üretim ekipmanlarının iyileştirilmesi, otomasyon sistemlerinin entegrasyonu ve uygun havalandırma sistemlerinin kurulması gibi fiziksel müdahaleleri kapsar. İdari önlemler ise çalışma prosedürlerinin düzenlenmesi, eğitim programlarının uygulanması ve çalışma saatlerinin optimize edilmesini içerir.

Bunun yanı sıra, çalışanların maruziyetini sınırlandırmak amacıyla kişisel koruyucu donanımların (KKD) doğru seçimi, kullanımı ve bakımı sağlanır. Bu çok katmanlı önlem yapısı, iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesi, çalışma ortamının iyileştirilmesi ve sürdürülebilir üretim hedeflerinin gerçekleştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, doğal boya üretiminde sürdürülebilir İSG uygulamaları, kapsamlı bir risk yönetimi sürecinin sürekli olarak uygulanması ve geliştirilmesine bağlıdır. Bu yaklaşım, çalışan sağlığını ve çevresel korumayı desteklerken, üretim verimliliği ve kalite standartlarının korunmasına da katkı sağlamaktadır.

7.2. Eğitim ve Farkındalık Programları

Sürdürülebilir iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarının başarısında, çalışanların bilinçlendirilmesi ve eğitim süreçlerinin etkin bir şekilde yürütülmesi kritik bir rol oynamaktadır. Doğal boya üretiminde karşılaşılan özgün risklerin ve tehlikelerin anlaşılması, bu risklere yönelik doğru davranış ve uygulamaların benimsenmesi için sistematik ve sürekli eğitim programlarının tasarlanması gerekmektedir. Eğitim ve farkındalık faaliyetleri, iş kazalarının azaltılması ve sağlıklı bir çalışma ortamının oluşturulması için temel bir bileşen olarak ele alınmalıdır (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2022; International Labour Organization, 2023; European Agency for Safety and Health at Work, 2023).

- **İSG Eğitimleri:** Doğal boya üretim süreçlerine özgü tehlikeler ve riskler göz önünde bulundurularak, çalışanların bilgi ve becerilerini artırmaya yönelik kapsamlı eğitim programları düzenlenmelidir. Bu eğitimler, kimyasal maruziyet riskleri, ergonomik tehlikeler, biyolojik riskler ve acil durum prosedürleri gibi konuları içermelidir. Ayrıca, eğitim içeriklerinin güncel bilimsel veriler ve mevzuat doğrultusunda sürekli olarak revize edilmesi, eğitimlerin etkinliğini artırmaktadır.
- **Güvenli Çalışma Prosedürleri:** Doğal boya üretiminin her aşamasında, risklerin minimize edilmesi amacıyla detaylı ve uygulanabilir güvenli çalışma prosedürleri geliştirilmelidir. Bu prosedürler, hammaddenin işlenmesinden nihai ürünün paketlenmesine kadar tüm üretim sürecini kapsamalı ve çalışanların bu prosedürlere uygun hareket etmelerini sağlayacak denetim mekanizmaları oluşturulmalıdır. Prosedürlerin açık, anlaşılır ve erişilebilir olması, çalışanların uyumunu artırmaktadır.
- **Davranış Odaklı Güvenlik Programları:** İnsan faktörünün iş kazaları üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, çalışanların güvenli

davranışlarını teşvik eden ve destekleyen davranış odaklı güvenlik programları uygulanmalıdır. Bu programlar, pozitif pekiştirme yöntemleri ile güvenli çalışma alışkanlıklarının benimsenmesini sağlamak ve çalışanların katılımını artırarak İSG kültürünün yerleşmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, bu programlar aracılığıyla çalışanların motivasyonları yükselterek, bireysel ve takım olarak İSG performansları güçlendirilmektedir.

Sonuç olarak, doğal boya üretiminde sürdürülebilir İSG uygulamalarının etkinliği, çalışanların bilgi düzeylerinin artırılması ve risklere karşı bilinçlendirilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Eğitim ve farkındalık programlarının sürekli ve bütüncül bir yaklaşımla yürütülmesi, güvenli üretim ortamlarının tesis edilmesinde ve iş kazalarının önlenmesinde temel unsurlardan biridir.

7.3. İzleme ve Sürekli İyileştirme

Sürdürülebilir iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarının etkinliğinin sağlanması ve geliştirilmesi, sürekli izleme ve sistematik iyileştirme süreçlerinin etkin bir şekilde yürütülmesine bağlıdır. Bu bağlamda, doğal boya üretim süreçlerinde İSG performansının düzenli olarak izlenmesi ve analiz edilmesi, potansiyel risklerin erken tespiti ve iyileştirme fırsatlarının belirlenmesi açısından kritik önem taşımaktadır (International Labour Organization, 2022; European Agency for Safety and Health at Work, 2022b; Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2023)

- **Performans Göstergeleri:** İSG performansının objektif ve ölçülebilir biçimde değerlendirilmesi için, üretim tesislerinde anahtar performans göstergeleri (KPI) geliştirilmelidir. Bu göstergeler; iş kazası sıklığı, meslek hastalığı oranları, eğitim katılım düzeyleri, risk değerlendirme sayısı ve uyum denetim sonuçları gibi parametreleri içerebilir. KPI'ların düzenli olarak toplanması ve analiz edilmesi, yönetim kararlarının veri temelli alınmasını sağlayarak sürdürülebilir İSG uygulamalarının güçlendirilmesine olanak tanır.
- **İç Denetimler:** İSG yönetim sistemlerinin etkinliğinin sağlanması ve sürdürülebilirliğinin garanti altına alınması amacıyla, periyodik olarak kapsamlı iç denetimler gerçekleştirilmelidir. Bu denetimler, mevcut prosedürlerin ve uygulamaların mevzuat, standartlar ve iç politika ile uyumluluğunu inceleyerek sistemdeki zayıf noktaların tespit edilmesini sağlar. Denetim sonuçları, yönetim ve çalışanlar arasında şeffaf bir şekilde paylaşılmalı ve iyileştirme süreçlerinin temel girdisi olarak kullanılmalıdır.

- **Düzeltilici ve Önleyici Faaliyetler:** İç denetimler ve performans izleme süreçleri sonucunda ortaya çıkan uygunsuzluklar, riskler ve geliştirme alanları için etkin düzeltilici ve önleyici faaliyet planları oluşturulmalıdır. Bu faaliyetler, sadece mevcut sorunların giderilmesine değil, aynı zamanda benzer problemlerin gelecekte oluşmasının önlenmesine yönelik proaktif yaklaşımları da içermelidir. Faaliyetlerin uygulanması, sonuçlarının takip edilmesi ve gerekirse revize edilmesi, sürekli iyileştirme kültürünün tesis edilmesinde merkezi bir rol oynar.

Sonuç olarak, doğal boya üretiminde sürdürülebilir İSG yönetiminin başarısı; sistematik izleme, değerlendirme ve iyileştirme mekanizmalarının kesintisiz işleyişine dayanır. Bu süreçler, iş sağlığı ve güvenliği performansının artmasına, risklerin etkin kontrolüne ve çalışma ortamlarının sürekli iyileştirilmesine imkân tanımaktadır.

8. Vaka Çalışmaları ve Başarı Örnekleri

8.1. Hindistan'da Doğal Boya Kooperatifleri

Hindistan'ın Gujarat eyaletinde faaliyet gösteren doğal boya kooperatifleri, sürdürülebilir üretim ilkeleri ile iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarını başarılı bir biçimde entegre eden önemli örnekler arasında yer almaktadır. Bu kooperatifler, doğal boya üretiminde çevresel, sosyal ve ekonomik boyutları dengeli bir şekilde ele alarak hem çalışan sağlığının korunmasını hem de yerel toplulukların güçlendirilmesini hedeflemektedir (Takala ve ark., 2023).

- **Sürdürülebilir Tarım Uygulamaları:** Kooperatifler bünyesinde yetiştirilen doğal boya bitkileri, kimyasal gübre ve pestisit kullanımından kaçınılarak, organik tarım yöntemleri doğrultusunda üretim yapılmaktadır. Bu yaklaşım, toprak sağlığının korunmasına, biyolojik çeşitliliğin desteklenmesine ve ekosistem dengesinin sürdürülmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, organik üretim süreçleri, üreticilerin ve çalışanların kimyasal maruziyet risklerini önemli ölçüde azaltmaktadır.
- **Topluluk Temelli Üretim Modeli:** Doğal boya üretim süreçleri, yerel toplulukların aktif katılımıyla yürütülmekte olup, kooperatif yapısı bu katılımı kurumsallaştırmaktadır. Yerel halkın bilgi ve deneyimlerinden faydalanılırken, üretim süreçlerine dahil edilen eğitim programları ile beceri gelişimi desteklenmektedir. Bu model, üretimin sosyal sürdürülebilirliğini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda ekonomik kalkınmaya ve istihdam yaratmaya da olanak tanımaktadır.

- İSG Entegrasyonu: Kooperatiflerde iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları, hem geleneksel bilgi birikimi hem de modern İSG standartları çerçevesinde bütüncül olarak uygulanmaktadır. Üretim alanlarında çalışanların maruz kalabileceği riskler sistematik şekilde değerlendirilmekte, uygun kişisel koruyucu donanımların kullanımı ve ergonomik çalışma koşullarının sağlanması gibi önlemler alınmaktadır. Ayrıca, kooperatif üyelerine yönelik düzenli İSG eğitimleri ve bilinçlendirme çalışmaları gerçekleştirilmektedir.

Sonuç olarak, Gujarat eyaletindeki bu doğal boya kooperatifleri, sürdürülebilir üretim ve iş sağlığı-güvenliği entegrasyonunun somut ve başarılı bir uygulaması olarak öne çıkmaktadır. Bu model, hem çalışanların sağlığının korunmasına hem yerel ekonominin güçlendirilmesine hem de çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesine katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, kooperatif deneyimi, benzer üretim sistemleri için önemli bir örnek teşkil etmektedir.

8.2. Türkiye’de DOBAG Projesi

Türkiye’de doğal boya üretimi ve kültürel mirasın korunmasına yönelik önemli bir girişim olan *Doğal Boya Araştırma ve Geliştirme Projesi* (DOBAG), sürdürülebilir üretim uygulamaları ve iş sağlığı ve güvenliği (İSG) standartlarının entegrasyonu açısından dikkat çekici bir örnek oluşturmaktadır. Marmara Üniversitesi öncülüğünde başlatılan bu proje, Anadolu’nun zengin doğal boya geleneğini modern bilimsel yöntemlerle harmanlayarak sektöre değer katmayı hedeflemiştir (Yates, 2023).

- Geleneksel Bilginin Korunması ve Belgelendirilmesi: DOBAG Projesi’nin temel amaçlarından biri, Anadolu coğrafyasında yüzyıllardır aktarılmış olan doğal boya bilgisi ve tekniklerinin sistematik şekilde araştırılması, belgelenmesi ve gelecek nesillere aktarılmasıdır. Bu bağlamda, el dokuması tekstil ürünlerinde kullanılan doğal boyalarla ilgili uygulamalar kültürel miras kapsamında korunmuş ve yeniden canlandırılmıştır. Böylece, yerel bilgi birikimi ve uygulama kültürü yaşatılırken, sürdürülebilir üretim ilkelerine dayalı yeni bir ekonomik model geliştirilmiştir.
- Sürdürülebilir Doğal Boya Üretimi: Proje kapsamında doğal boya bitkilerinin yetiştirilmesi, toprak ve çevre dostu yöntemlerle gerçekleştirilmekte; kimyasal gübre ve zararlı kimyasal maddelerden uzak durulmaktadır. Ayrıca, boya üretim sürecinde çevresel etkilerin minimize edilmesi ve biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi ön planda tutulmuştur. Bu yaklaşım, doğal boya kullanımının çevresel

sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu şekilde geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

- Modern İSG Standartlarının Uygulanması: DOBAG Projesi, üretim süreçlerinde modern iş sağlığı ve güvenliği standartlarının titizlikle uygulanması ile de ön plana çıkmaktadır. Çalışanların kimyasal maruziyetlerinin en aza indirilmesi, ergonomik çalışma koşullarının sağlanması ve güvenli çalışma prosedürlerinin geliştirilmesi gibi alanlarda kapsamlı önlemler alınmıştır. Ayrıca, çalışanlara yönelik İSG eğitim programları düzenlenerek bilinçlendirme faaliyetleri yürütülmüştür.

Sonuç olarak, DOBAG Projesi, doğal boya üretiminde kültürel mirasın korunması ile sürdürülebilirlik ve modern iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının başarılı bir entegrasyonunu sağlamıştır. Bu model, Türkiye’de doğal boya üretiminin hem ekonomik hem de sosyal boyutlarda gelişimine önemli katkılar sunmakta ve benzer girişimler için yol gösterici nitelik taşımaktadır [60].

8.3. Japonya’da Yapay Zekâ Destekli Doğal Boya Üretimi

Japonya’da faaliyet gösteren önde gelen bir tekstil firması, doğal boya üretim süreçlerinde yapay zeka (YZ) teknolojilerinin entegre edilmesiyle iş sağlığı ve güvenliği (İSG) performansını kayda değer ölçüde iyileştirmiştir (Ahmad ve ark., 2017). Söz konusu uygulama, YZ’nin ileri düzey teknikleri ile geleneksel üretim metotlarını harmanlayarak, üretim alanında hem çalışanların güvenliğini artırmayı hem de operasyonel verimliliği yükseltmeyi hedeflemiştir.

- Dijital İkiz Teknolojisi: Projede üretim süreçlerinin dijital ikizi (*digital twin*) oluşturulmuştur. Bu teknoloji sayesinde, gerçek üretim ortamının sanal bir kopyası dijital platformlarda modellenmiş; böylece potansiyel İSG riskleri, fiziksel müdahaleye gerek kalmadan simülasyonlar yoluyla analiz edilmiştir. Bu sayede tehlike senaryoları önceden belirlenmiş ve risklerin ortaya çıkması öncesinde gerekli önlemler alınabilmektedir.
- Öngörücü Analitik ve Makine Öğrenimi: Firma, makine öğrenimi tabanlı algoritmalar kullanarak üretim sürecindeki potansiyel tehlikeleri önceden tahmin etme imkânı sağlamıştır. Toplanan sensör verileri ve geçmiş kaza kayıtları analiz edilerek risk faktörleri tespit edilmiş; böylelikle İSG yönetimi daha proaktif ve etkin bir hale getirilmiştir. Öngörücü analitik sayesinde hem kazaların hem de meslek hastalıklarının önlenmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir.

- Otomasyon ve Robotik Sistemler: Özellikle yüksek risk taşıyan iş adımları, insan müdahalesini en aza indirmek amacıyla robotik otomasyon sistemleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, tehlikeli işlemlerde çalışanların maruziyetini azaltırken, üretim sürecinin kesintisiz ve güvenli şekilde ilerlemesini sağlamıştır.

Yapay zeka destekli bu entegre İSG yönetim sistemi sayesinde, söz konusu tekstil firmasında iş kazası oranlarında %60, meslek hastalıklarında ise %40 oranında önemli azalma sağlanmıştır. Bu sonuçlar, YZ teknolojilerinin doğal boya üretiminde İSG performansını yükseltmek ve sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmak için etkin bir araç olduğunu göstermektedir. Japonya'daki bu örnek, teknolojik inovasyonların iş sağlığı ve güvenliği alanında uygulanabilirliğine dair değerli bir model sunmaktadır.

9. Gelecek Perspektifleri ve Araştırma Yönelimleri

Doğal boya üretimi alanında teknolojik gelişmelerin hızla ilerlemesi, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarının da evrilmesini beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, gelecekteki teknolojik yeniliklerin İSG üzerindeki potansiyel etkilerinin sistematik olarak incelenmesi, sürdürülebilir ve güvenli üretim süreçlerinin tasarlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

9.1. Teknolojik Yenilikler ve İSG Etkileri

Doğal boya üretiminde önümüzdeki dönemde öne çıkması beklenen teknolojik gelişmeler, İSG açısından çeşitli fırsatlar ve zorluklar ortaya koymaktadır (Allam ve Kumar, 2011; Ali, 2018; Alam ve ark., 2022). Bu yenilikler, üretim süreçlerinin daha verimli, güvenli ve çevre dostu hale getirilmesini desteklemektedir:

- Nanoteknoloji: Nanoboyutlu doğal pigmentlerin geliştirilmesi, boya kullanım miktarının önemli ölçüde azaltılmasını mümkün kılmaktadır. Bu durum, kimyasal madde maruziyetini minimize ederek çalışan sağlığını koruma açısından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, nanoteknolojik uygulamalar sayesinde pigmentlerin daha homojen ve kalıcı bir şekilde uygulanması sağlanmakta, böylece tekrar boya yenileme işlemlerinin azaltılması yoluyla üretim alanındaki riskler azaltılabilmektedir. Ancak, nanoölçekli materyallerin insan sağlığı ve çevre üzerindeki uzun vadeli etkileri henüz tam olarak anlaşılamamış olduğundan, bu alanda kapsamlı risk analizleri yapılması gerekmektedir.
- 3D Biyobasım Teknolojileri: Doğal boya üreten mikroorganizmaların ve biyolojik materyallerin üç boyutlu (3D) biyobasım teknolojileri

kullanılarak üretimi, süreçlerin daha kontrollü ve güvenli ortamda gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu teknolojiler, mikroorganizma tabanlı üretim süreçlerinde çevresel koşulların optimize edilmesini sağlayarak, potansiyel biyolojik risklerin ve üretim kaynaklı tehlikelerin minimize edilmesine katkıda bulunmaktadır. Aynı zamanda, bu yaklaşım üretimde sürdürülebilirliği ve tekrarlanabilirliği artırmaktadır.

- **Blok Zinciri Teknolojisi:** Doğal boya üretim ve tedarik zincirlerinde blok zinciri uygulamalarının kullanılması, ürünlerin kaynağından son kullanıcıya kadar tam bir izlenebilirlik sağlamaktadır. Bu sayede İSG standartlarına uyumun denetlenmesi kolaylaşmakta, üretim süreçlerinde şeffaflık ve hesap verebilirlik artmaktadır. Blok zinciri teknolojisi, özellikle kimyasal kullanımının kayıt altına alınması ve güvenlik sertifikalarının doğrulanması gibi kritik İSG uygulamalarında güvenilirlik sağlamaktadır. Böylelikle, risklerin erken tespiti ve müdahalesi mümkün hale gelmektedir.

Gelecekte doğal boya üretiminde bu ve benzeri teknolojik yeniliklerin İSG alanına entegrasyonu, sürdürülebilir üretim hedefleriyle uyumlu olarak iş kazalarının azaltılması, meslek hastalıklarının önlenmesi ve çalışanların genel sağlık durumlarının iyileştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır. Bununla birlikte, her yeni teknolojinin beraberinde getirebileceği yeni risklerin de titizlikle değerlendirilmesi ve yönetilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, multidisipliner araştırmaların ve yenilikçi İSG stratejilerinin geliştirilmesi öncelikli araştırma yönelimleri arasında yer almaktadır.

9.2. Politika Önerileri ve Yasal Çerçeve

Doğal boya üretiminde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarının geliştirilmesi, yalnızca teknolojik yeniliklerle değil, aynı zamanda sağlam bir politika altyapısı ve etkin yasal düzenlemelerle desteklenmelidir. Bu bağlamda, politika yapıcılar, düzenleyici kurumlar ve sektör paydaşları için kapsamlı ve çok boyutlu yaklaşımlar gerekmektedir (Amaya ve Nickell, 2015; Askar ve ark., 2015; Azman ve ark., 2022). Söz konusu politika önerileri ve yasal çerçeve unsurları şu şekilde sıralanabilir:

- **Entegre Politika Yaklaşımı:** İSG'nin etkin bir şekilde geliştirilmesi için çevre koruma, iş sağlığı ve iş güvenliği politikalarının entegre edilmesi gerekmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, doğal boya üretiminde çevresel sürdürülebilirlik ve çalışan sağlığı arasında uyum sağlamayı mümkün kılar. Örneğin, kimyasal kullanımına yönelik düzenlemeler yalnızca çevresel etkileri değil, aynı zamanda iş yerindeki maruziyet risklerini

de dikkate alacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu entegrasyon, sektördeki paydaşların koordinasyonunu artırarak politika uygulamalarının etkinliğini yükseltir.

- **Teşvik Mekanizmaları:** Sürdürülebilir ve güvenli doğal boya üretimini teşvik etmek amacıyla finansal destek ve vergi indirimleri gibi mekanizmaların geliştirilmesi kritik öneme sahiptir. Bu tür teşvikler, küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ) İSG yatırımlarını artırmasını destekleyerek sektör genelinde güvenlik standartlarının yükseltilmesine katkıda bulunur. Ayrıca, yeşil ve güvenli üretim yapan işletmeler için kamu destekli sertifikasyon programları oluşturularak pazar avantajları sağlanabilir.
- **Standartlaştırma:** Doğal boya üretimi ve kullanımına ilişkin iş sağlığı ve güvenliği standartlarının geliştirilmesi, uygulama birliğini ve mevzuata uyumu kolaylaştırır. Ulusal ve uluslararası standartların belirlenmesi, üretim süreçlerinde risklerin sistematik olarak yönetilmesini sağlar ve denetim mekanizmalarının etkinliğini artırır. Standartlar, kimyasal madde kullanımından kişisel koruyucu donanım (KKD) gereksinimlerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamalıdır. Ayrıca, bu standartların düzenli olarak güncellenmesi, teknolojik gelişmeler ve sektörel ihtiyaçlar doğrultusunda esnek ve dinamik bir yönetim yaklaşımı gerektirir.

Yukarıda belirtilen politika ve yasal düzenlemeler, doğal boya sektöründe İSG kültürünün yerleşmesine zemin hazırlamakta ve sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Bunun yanı sıra, bu çerçevenin başarılı olabilmesi için paydaşların katılımını sağlayacak şeffaflık, hesap verebilirlik ve etkin denetim mekanizmalarının oluşturulması gerekmektedir. Bu bağlamda, akademik araştırmalar, politika geliştiriciler ve uygulayıcılar arasında iş birliğinin artırılması da önem arz etmektedir.

9.3. Araştırma ve İnovasyon Öncelikleri

Doğal boya üretiminde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanının sürdürülebilir şekilde gelişebilmesi için, gelecekteki araştırma ve inovasyon faaliyetlerinin belirli önceliklere odaklanması gerekmektedir. Bu öncelikler, hem mevcut bilgi boşluklarının doldurulması hem de teknolojik ilerlemelerin İSG uygulamalarına entegrasyonunun sağlanması açısından kritik önem taşımaktadır (Bentes ve ark., 2015; Biswal ve ark., 2015; Bhargava ve ark., 2020). Söz konusu öncelikler aşağıdaki gibi detaylandırılabilir:

- **Biyogüvenlik Araştırmaları:** Doğal boya bileşenlerinin insan sağlığı üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkileri henüz tam anlamıyla

aydınlatılmış değildir. Bu nedenle, doğal boyaların maruziyet yolları, toksikolojik profilleri ve olası alerjik reaksiyonları gibi biyogüvenlik konuları üzerine kapsamlı ve multidisipliner araştırmaların yapılması gerekmektedir. Böylece, üretim sürecinde çalışanların ve nihai tüketicilerin sağlık riskleri minimize edilebilir. Ayrıca, biyogüvenlik alanında elde edilen bulgular, doğal boya formülasyonlarının daha güvenli hale getirilmesi için rehberlik sağlayacaktır.

- **Akıllı İSG Sistemleri:** Yapay zeka (YZ), makine öğrenimi ve Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin doğal boya üretim süreçlerine entegre edilmesiyle akıllı İSG sistemlerinin geliştirilmesi önemli bir inovasyon alanıdır. Bu sistemler, üretim alanındaki tehlikelerin gerçek zamanlı tespiti, risklerin dinamik yönetimi ve çalışan sağlık durumunun sürekli izlenmesi gibi kritik işlevleri yerine getirebilir. Gelecekte, bu teknolojilerin daha geniş ölçekte uygulanması, hem iş kazalarının azaltılmasını hem de İSG yönetiminde etkinlik artışını mümkün kılacaktır.
- **Sürdürülebilir Mordanlama Yöntemleri:** Doğal boya üretiminde renk sabitleyici (mordan) olarak kullanılan metal bazlı maddeler, hem çevresel hem de sağlık açısından riskler barındırabilmektedir. Bu bağlamda, metal mordanların yerine geçebilecek, sürdürülebilir, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilir alternatiflerin araştırılması ve geliştirilmesi gerekmektedir. Bu tür yenilikçi mordanlama yöntemleri, hem üretim sürecinde hem de nihai ürünlerde İSG risklerini azaltarak sektörde çevresel ve sosyal sürdürülebilirliğin güçlendirilmesine katkıda bulunacaktır.

Bu öncelikler doğrultusunda yapılacak araştırma ve inovasyon faaliyetleri, doğal boya üretiminde İSG kültürünün gelişmesini destekleyecek ve sektörde daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir üretim modellerinin ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Ayrıca, akademik çalışmalar ile endüstri uygulamaları arasındaki iş birliğinin artırılması, bu önceliklerin etkin bir şekilde hayata geçirilmesi açısından hayati önem taşımaktadır.

10. Sonuç

Doğal boyaların sürdürülebilir üretimi ve kullanımı, tekstil sektöründe çevresel etkilerin minimize edilmesi ve çalışanların sağlık ve güvenliğinin korunması açısından önemli bir potansiyel arz etmektedir. Bu çalışmada ele alındığı üzere, biyokimya alanındaki gelişmelerle yapay zekâ teknolojilerinin entegrasyonu, doğal boya üretim süreçlerinde verimliliğin artırılmasının yanı sıra iş sağlığı ve güvenliği (İSG) standartlarının yükseltilmesine de katkı

sağlamaktadır. Bu teknolojik yaklaşımlar, üretim hatlarında risklerin erken tespiti, çalışan sağlığının sürekli izlenmesi ve süreçlerin optimize edilmesi gibi alanlarda yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Yeşil dönüşüm politikalarının, özellikle Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı ve Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Karbon Emisyonu hedefi gibi stratejilerin, doğal boyaların yaygınlaştırılması ve sürdürülebilir üretim modellerinin benimsenmesinde itici güç olduğu görülmektedir. Ancak, bu dönüşüm sürecinde İSG'nin politika ve uygulamalara entegre edilmesi, dönüşümün hem çevresel hem de sosyal açıdan başarılı olabilmesi için kritik öneme sahiptir. Yeşil dönüşümün getirdiği yeni üretim biçimleri ve teknolojiler, yeni riskleri ve fırsatları beraberinde getirmekte; dolayısıyla kapsamlı bir İSG yaklaşımıyla yönetilmelidir.

Gelecek perspektifinde, nanoteknoloji, 3D biyobasım, blok zinciri gibi ileri teknolojiler, doğal boya üretiminde hem üretim verimliliğini hem de İSG performansını önemli ölçüde iyileştirme potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, bu teknolojik potansiyelin etkili ve sürdürülebilir bir şekilde kullanımı, entegre politika çerçeveleri, finansal ve yasal teşvik mekanizmaları ile sektörel standartların geliştirilmesine bağlıdır. Böylece, inovasyonların İSG kültürüyle uyumlu hale getirilmesi ve yaygınlaştırılması mümkün olacaktır.

Sonuç olarak, doğal boyalar aracılığıyla gerçekleştirilecek sürdürülebilir tekstil üretimi, biyokimya ve yapay zeka teknolojilerinin yanı sıra yeşil dönüşüm politikalarının iş sağlığı ve güvenliği ile bütüncül entegrasyonunu zorunlu kılmaktadır. Bu çok boyutlu entegrasyon, hem çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasını hem de çalışanların sağlık ve güvenliğinin en üst düzeyde korunmasını sağlayarak, tekstil endüstrisinin daha dirençli, yenilikçi ve sürdürülebilir bir geleceğe doğru evrilmesine katkıda bulunacaktır.

Kaynaklar

- Aggarwal, S. (2021). Indian dye-yielding plants: Efforts and opportunities. *Natural Resources Forum*, 45(1), 63–86.
- Ahmad, M. S., Pandey, A. K., & Abd Rahim, N. (2017). Advancements in the development of TiO₂ photoanodes and its fabrication methods for dye-sensitized solar cell (DSSC) applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 89–108.
- Alam, S. S., Ghosh, J., & Das, D. (2022). The coloration of cotton fabric with natural dye extracted from turmeric powder. *Journal of Textile Engineering and Fashion Technology*, 8(4), 134–138.
- Ali, N. F. (2018). Green strategy for the production of antimicrobial textiles. In *Fashion and Textiles: Breakthroughs in Research and Practice* (pp. 442–461). IGI Global.
- Alizadeh-Sani, M., Mohammadian, E., Rhim, J. W., & Jafari, S. (2020). pH-sensitive (halochromic) innovative packaging films based on natural food colourants for the monitoring of food quality and safety. *Trends in Food Science and Technology*, 105, 93–144.
- Allam, K., & Kumar, G. (2011). Colourants the cosmetics for the pharmaceutical dosage forms. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3(3), 13–21.
- Amaya, E., & Nickell, D. (2015). Using feed to enhance the colour quality of fish and crustaceans. In I. D. A. Davis (Ed.), *Feed and feeding practices in aquaculture* (pp. 269–298). Woodhead Publishing.
- Amogne, N., Ayele, D., & Tsigie, Y. (2020). Recent advances in anthocyanin dyes extracted from plants for dyeing. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 9(23), 1–16.
- Amorim, L., Mouro, C., Riool, M., & Gouvêa, I. (2022). Antimicrobial food packaging based on prodigiosin-incorporated double-layered bacterial cellulose and chitosan composites. *Polymers*, 14(2), 315. <https://doi.org/10.3390/polym14020315>
- Askar, K., Alsawad, Z., & Khalaf, M. (2015). Evaluation of rosella anthocyanin extracts' pH and thermal stabilities under solar light. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(3), 262–268.
- Avinash, G., Pachori, H., Sharma, A., & Mishra, S. (2025). Time series forecasting of bed occupancy in mental health facilities in India using machine learning. *Scientific Reports*, 15(1), 2686.
- Azman, N., Khairul, W., & Sarbon, N. (2022). A comprehensive review on biocompatible film sensor containing natural extract: Active/intelligent food packaging. *Food Control*, 141, 109189.

- Baig, G. A. (2011). Dyeing of polyester fabrics with indigo. *Research Journal of Textile and Apparel*, 15(4), 19–25.
- Benli, H., & Bahtiyari, M. İ. (2015). Combination of ozone and ultrasound in the pretreatment of cotton fabrics before natural dyeing. *Journal of Cleaner Production*, 89, 116–124.
- Bentes, A., de Souza, A. L., Amaya-Farfan, H., Lopes, J., & Faria, A. (2015). Influence of the composition of unripe genipap (*Genipa americana* L.) fruit on the formation of blue pigment. *Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 3919–3924.
- Bhargava, N., Sharanagat, V., Mor, R., & Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 385–401.
- Bin-Jumah, M., Alwakeel, S. S., Moga, M., Buvnariu, L., Bigiu, N., & Zia-Ul-Haq, M. (2021). Application of carotenoids in cosmetics. In *Carotenoids: Structure and Function in the Human Body* (pp. 747–756).
- Biswal, P., Mishar, M., Bhadouriya, A., & Yadav, V. (2015). An updated review on colorants as pharmaceutical excipients. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences*, 5(4), 1004–1017.
- Biswas, A., Severin, C. N., Smith, P. M., Steenstra, I. A., Robson, L. S., & Amick, B. C. (2018). Larger workplaces, people-oriented culture, and specific industry sectors are associated with co-occurring health protection and wellness activities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(12), 2739.
- Boranbayeva, T., Karadeniz, F., & Yılmaz, E. (2014). Effect of storage on anthocyanin degradation in black mulberry juice and concentrates. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 1894–1902.
- Borges, M., Tejera, R., Díaz, L., Esparza, P., & Ibáñez, E. (2012). Natural dyes extraction from cochineal (*Dactylopius coccus*): New extraction methods. *Food Chemistry*, 132(4), 1855–1860.
- Brauch, J., Zapata-Porras, S., Buchweitz, M., Aschoff, J., & Carle, R. (2016). Jagua blue derived from *Genipa americana* L. fruit: A natural alternative to commonly used blue food colorants? *Food Research International*, 89(1), 391–398.
- Brudzyńska, P., Sionkowska, A., & Grisel, M. (2021). Plant-derived colorants for food, cosmetic, and textile industries: A review. *Materials*, 14(13), 3484. <https://doi.org/10.3390/ma14133484>
- Bueno, A., Hoffmann, T., Souza, C., Carvalho, L., Bertoli, S., Barcellos, I., & Gonçalves, M. (2022). Optimal process conditions for recycled polyester dyeing using natural annatto dye. *Journal of Cleaner Production*, 370, Article 133419.

- Bujak, T., Zagórska-Dziok, M., Ziemlewska, A., Nizioł-Łukaszewska, Z., Lal, K., Wasilewski, T., & Hordyjewicz-Baran, Z. (2022). Flower extracts are multifunctional dyes in the cosmetics industry. *Molecules*, 27(3), 922. <https://doi.org/10.3390/molecules27030922>
- Cao, Z., Zhou, T., Miao, S., Wang, L., & Wang, Z. (2025). Exploring the economic occupational health, safety, and fatal accidents in high-risk industries. *BMC Public Health*, 25(1), 433.
- Chandru, P., & Praveena, R. (2021). Organic hybrid pigments from *Crotalaria globosa* for cotton dyeing – A sustainable approach. *Materials Today: Proceedings*, 47(9), 1773–1776.
- Chen, H.-Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C.-H. (2020). Novel pH-sensitive films containing curcumin and anthocyanins to monitor fish freshness. *Food Hydrocolloids*, 100, 105438.
- Chen, S., Wu, M., Lu, P., Gao, L., Yan, S., & Wang, S. (2020). Development of pH indicator and antimicrobial cellulose nanofibre packaging film based on purple sweet potato anthocyanin and oregano essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 149, 271–280.
- Das, S., & Maulik, S. R. (2024). Recent approaches and advancements in natural dyes. In S. S. Muthu (Ed.), *Natural dyes and sustainability* (pp. 63–78). Springer, Cham.
- El Bouchikhi, M., Weerts, S., & Clavien, C. (2024). Behind the good of digital tools for occupational safety and health: A scoping review of ethical issues surrounding the use of the internet of things. *Frontiers in Public Health*, 12, 1468646.
- El-Helaly, M. (2024). Artificial intelligence and occupational health and safety: Benefits and drawbacks. *Medicina del Lavoro*, 115(2), e2024014.
- European Agency for Safety and Health at Work. (2022a). *Corrective and preventive actions in OSH management systems*. EU-OSHA.
- European Agency for Safety and Health at Work. (2022b). *OSH in the textile sector*. EU-OSHA.
- European Agency for Safety and Health at Work. (2023). *Behaviour-based safety in the textile industry*. EU-OSHA.
- European Chemicals Agency. (2022). *REACH regulation*. ECHA.
- European Commission. (2019). *The European Green Deal* (COM(2019) 640 final).
- European Commission. (2020). *Circular Economy Action Plan* (COM(2020) 98 final).
- European Commission. (2021). *Fit for 55 package* (COM(2021) 550 final).
- Fazli, Z., Sadeghi, M., Vali, M., & Ahmadinejad, P. (2025). The role of artificial intelligence in occupational health in radiation exposure: A scoping review of the literature. *Environmental Health*, 24(1), 32.

- Fiegler-Rudol, J., Lau, K., Mroczek, A., & Kasperczyk, J. (2025). Exploring human-AI dynamics in enhancing workplace health and safety: A narrative review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(2), 199.
- Huber, J., Anzengruber-Tanase, B., Schobesberger, M., Haslgrübler, M., Fischer-Schwarz, R., & Ferscha, A. (2025). Evaluating user safety aspects of AI-based systems in industrial occupational safety: A critical review of research literature. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(5), 705.
- International Labour Organization. (2021). *Occupational Safety and Health in the Textiles, Clothing, Leather, and Footwear Sector*. ILO.
- International Labour Organization. (2022). *Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all*. ILO.
- International Labour Organization. (2022). *Key performance indicators for OSH in the textile industry*. ILO.
- International Labour Organization. (2023). *Safe work procedures in natural dye production*. ILO.
- Li, N., Wang, Q., Zhou, J., & Li, S. (2022). Insight into the progress on natural dyes: Sources, structural features, health effects, challenges, and potential. *Molecules*, 27(10), 3291. <https://doi.org/10.3390/molecules27103291>
- Matyga, A. W., Chelala, L., & Chung, J. H. (2023). Occupational lung diseases: Spectrum of common imaging manifestations. *Korean Journal of Radiology*, 24(8), 795–806.
- Nanda, G. (2022). *Natural dyes: Sources, chemistry, application, and sustainability issues* [Unpublished manuscript]. Academia.edu.
- Phys.org. (2022). Lab-grown pigments and food by-products: The future of natural textile dyes. *Phys.org*. (Erişim tarihi: 15.05.2025)
- Pishgar, M., Issa, S. F., Sietsma, M., Pratap, P., & Darabi, H. (2021). REDE-CA: A novel framework to review artificial intelligence and its occupational safety and health applications. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(13), 6705.
- Qi, X.-M., Luo, Y., Song, M.-Y., et al. (2021). Pneumoconiosis: Current status and future prospects. *Chinese Medical Journal*, 134(8), 898–907.
- Saha, J. (2025). Eco-friendly dyeing and finishing techniques. *Textile Learner*. <https://www.textilelearner.com/eco-friendly-dyeing-finishing>
- Sankari, M., Anjum, M. R., Sravya, B., Sowmika, S., Ilakkia, S., & Narasimha, G. (2024). Ecofriendly dyes: Extraction, characterization, and potential applications. *Journal of Advanced Zoology*, 45(1), 1067–1083.

- Shah, I. A., & Mishra, S. (2024). Artificial intelligence in advancing occupational health and safety: An encapsulation of developments. *Journal of Occupational Health*, 66(1), uia017.
- T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı. (2022). *Ulusal iş sağlığı ve güvenliği politika belgesi*.
- T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2021). *Tekstil sektöründe risk değerlendirme rehberi*.
- T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2022). *Doğal boya üretiminde İSG eğitim programı*.
- T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2022). *Yeşil dönüşüm sosyal diyalog platformu*.
- T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2023). *İSG yönetim sistemleri denetim rehberi*.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). *Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi*.
- T.C. İŞKUR. (2023). *Yeşil işler beceri geliştirme programı*.
- T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. (2022). *Yeşil dönüşüm ve İSG eğitim programı*.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2021). *Yeşil dönüşüm destek programı*.
- T.C. Sosyal Güvenlik Kurumu. (2023). *Yeşil dönüşüm sosyal koruma programı*.
- Takala, J., Hämäläinen, P., Sauni, R., Nygård, C. H., Gagliardi, D., & Neupane, S. (2023). Global-, regional- and country-level estimates of the work-related burden of diseases and accidents in 2019. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*.
- Textile Value Chain. (2024). *Textile industry innovations in dyeing and finishing processes: Minimizing environmental impact*.
- United Nations. (2022). *Sustainable Development Goals Report 2022*. United Nations Publications.
- Yates, D. H., Perret, J. L., Davidson, M., Miles, S. E., & Musk, A. W. (2023). Dust diseases in modern Australia: A discussion of the new T. *Journal of Occupational Health*.
- Yusuf, M., Shabbir, M., & Mohammad, F. (2017). Natural colorants: Historical, processing and sustainable prospects. *Natural Products and Bioprospecting*, 7(1), 123–145.