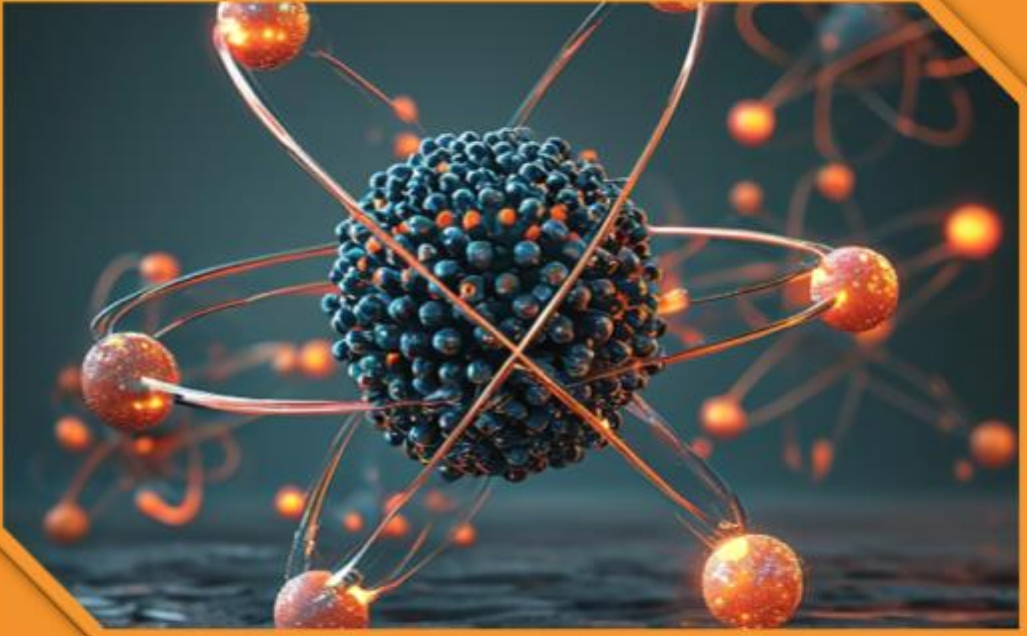




All Sciences Academy



DOĞA BİLİMLERİ VE MATEMATİKTE ÇAĞDAŞ ARAŞTIRMALAR



*DOĞA BİLİMLERİ
VE
MATEMATİKTE
ÇAĞDAŞ
ARAŞTIRMALAR*

Editor

Prof. Dr. Canan ÖZDEMİR

Doç. Dr. Ali ÖZDEMİR





Doğa Bilimleri ve Matematikte Çağdaş Araştırmalar

Editör: Prof. Dr. Canan ÖZDEMİR, Doç. Dr. Ali ÖZDEMİR

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Ağustos 2025

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-5794-08-6

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	5
Çinko Ftalosiyanın Yüklü MCM-41 Heterojen Katalizörü ile Çevre Dostu Koşullarda 1,4-Naftakinon Eldesi	
<i>Yaşar GÖK, Recep ERDEM</i>	
2. Bölüm	19
Yeşil Kimya İndeksleme Çalışmaları	
<i>Murat YILDIZ</i>	
3. Bölüm	46
Fen ve Mühendislik Fakültelerinde Fizik Dersinin Öğretiminde Karşılaşılan Zorluklar	
<i>Musa GÖGEBAKAN</i>	

Çinko Ftalosiyanın Yüklü MCM-41 Heterojen Katalizörü ile Çevre Dostu Koşullarda 1,4-Naftakinon Eldesi

Yaşar GÖK¹
Recep ERDEM²

- 1- Prof. Dr.; Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü.
yasargok@mehmetakif.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3134-7560
- 2- Yüksek Lisans Öğrenci; Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya
Anabilim Dalı. mail@mehmetakif.edu.tr

ÖZET

Organik sentez kimyasında, çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir tekniklerin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Özellikle seçici oksidasyon süreçlerinde, geleneksel oksitleyici maddeler yerine ışıkla aktive edilen moleküler oksijenin kullanılması, yeşil kimya prensipleriyle uyumlu yenilikçi yöntemler ortaya koymaktadır. Bu tür görünür ışık destekli foto-oksidasyon tepkimelerinde, metalloftalosiyeninler fotosensitizer olarak ön plana çıkmakta; yüksek ışık soğurma kapasiteleri, kimyasal dayanıklılıkları ve çevreye duyarlı yapıları sayesinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada, MCM-41 destekli çinko ftalosiyenin (ZnPc) içeren heterojen fotokatalizörün 1-naftolün fotooksidasyonu ile 1-naftakinonun elde edildiği model reaksiyondaki katalitik performansının incelenmesi sunulmaktadır. Heterojen katalizör, MCM-41'in 3-kloropropiltrietoksilan (CPTES) ile fonksiyonelleştirilmesiyle elde edilen MCM-41-Cl üzerinde ZnPc'nin hareketsizleştirilmesi ile hazırlanmıştır. Elde edilen MCM-41-ZnPc fotokatalizörünün fotokatalitik performansı, görünür ışık altında 1-naftolün 1,4-naftokinona seçici oksidasyonunda değerlendirilmiştir. Fotooksidasyon deneyleri laboratuvar tipi bir fotoreaktör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Işık kaynağı olarak ise ticari olarak temin edilebilen, 630–660 nm dalga boyuna sahip 200 W gücünde kırmızı LED ışık kullanılmıştır.

Heterojen fotokatalizör, oksidant olarak hava kullanıldığında, 15 dakikada %78 dönüşüm ve %99'dan fazla seçicilik sağlamıştır. Kontrol deneyleri, ışık, oksijen ve ftalosiyenin bileşiğinin 1-naftolün fotooksidasyonu için temel gereksinimler olduğunu göstermiştir. Katalizör, birden fazla kullanımda yüksek kararlılık ve sürdürülebilir özellik göstermektedir. Farklı tip çözücülerde iyi performans göstermesine karşın en yüksek aktivite asetonitril çözücüsünde elde edilmiştir. MCM-41'in destek olarak kullanılması, agregasyon sorunlarını etkili bir şekilde en aza indirmekte ve katalizör dispersiyonunu iyileştirerek fotokatalitik verimliliği artırmaktadır. Bu çalışma, yeşil kimyasal sentez için pratik ve ölçeklenebilir çözümler olarak özel fotoreaktörlerle birleştirilmiş düşük maliyetli heterojen sistemlerin potansiyelinin vurgulanmasında önemli bir yer tutmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Fotokatalizör, Ftalosiyenin, Organik Sentez, Fotoreaktör, Yükseltgenme.

GİRİŞ

Tarım, gıda ve sağlık gibi birçok alanda kullanılan işlevsel moleküllerin üretimi, organik sentetik kimyanın temel uygulama alanlarından birini oluşturmaktadır (Chojnacka, 2024:100898). Bu alanda önemli teknolojik ilerlemeler sağlanmış olmasına rağmen, hedef bileşiklerin

sentezi hâlâ zaman açısından oldukça maliyetli ve zahmetli bir süreçtir (Devanshi vd., 2024:246). Üstelik, uygulanan bazı sentetik yöntemler çevreye zarar verebilecek unsurlar barındırmaktadır (Dutta vd., 2024:120103). Bu nedenle hem doğayla uyumlu hem de insan sağlığına olumsuz etkisi olmayan alternatif üretim stratejilerinin geliştirilmesi gerekliliği gün geçtikçe daha da önem kazanmaktadır.

Fotokataliz, yeşil kimya kapsamında, ışık enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürebilme özelliğiyle öne çıkan etkili bir yöntemdir (Oh ve Stache, 2022:5745). Bu yaklaşım, organik tepkimelerin daha az enerji tüketen, daha hafif koşullarda ve çevresel etkileri en aza indirerek gerçekleşmesine imkân tanır. Özellikle görünür ışık altında yürütülen fotooksijenasyon reaksiyonları, organik bileşiklere oksijen kazandırarak, ilaç üretiminde değerlendirilebilecek önemli yapıların sentezine katkı sağlar. Bu yöntem, geleneksel olarak kullanılan hidrojen peroksit veya tert-butil hidroperoksit gibi oksitleyicilere ihtiyaç duymadan daha çevre dostu bir çözüm sunmaktadır (Yu vd., 2025:774).

Fotooksijenasyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için yalnızca moleküler oksijen ve görünür ışık spektrumunu soğurabilen bir katalizör yeterlidir. Ancak çoğu organik bileşik görünür ışığı doğrudan absorplayamaz; bu nedenle, bu tür dönüşümler için ışığı etkin biçimde yakalayabilen özel kimyasal yapılar gereklidir. Bu yapılar, "fotosensitizer" olarak adlandırılır (Nguyen vd., 2022:3324). Porfirinler (Akbar vd., 2023:114648), Rose Bengal (Body vd., 2023:114648), fullerener (Hou vd., 2022:13), Ru(II) kompleksleri (Ankathatti Munegowda vd., 2022:214712) ve metaloftalosiyeninler (Channabasavana Hundi Puttaningaiah ve Hur 2024:113491) yaygın olarak kullanılan fotosensitizer örnekleridir. Bu bileşikler, görünür ışığı emdikten sonra enerjiyi moleküler oksijene aktararak singlet oksijen üretimini sağlar ve bu da seçici ve çevreyle uyumlu oksidasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesine olanak tanır. Singlet oksijen, çevre dostu ve ekonomik organik sentez yöntemlerinin temel bileşenlerinden biridir. Bunun yanı sıra, su arıtımı (Nidheesh vd., 2025:195) ve fotodinamik kanser tedavisi (Cui vd., 2024:1274) gibi doğrudan insan yaşam kalitesine etki eden alanlarda da önemli bir rol oynamaktadır.

Metaloftalosiyeninler, görünür spektrumun kırmızı bölgesinde yüksek molar absorpsiyon katsayılarına sahip olmaları (Moreira vd., 2008:741; Gök, 2014:750; Gök vd., 2023:1887), Ru(II) komplekslerine (Ravelli vd., 2013:97) kıyasla çevreye duyarlı yapıları ve diğer organik boyalara göre üstün termal ve foto kararlı özellikleri sayesinde oldukça çekici fotosensitizerlerdir (Zheng vd., 2021:213548). Ancak, yaygın çözücülerde düşük çözünürlükleri ve çözeltide agregasyon eğilimleri, bu bileşiklerin pratik uygulamalarını sınırlayan temel sorunlar arasında yer almaktadır (Li vd., 2018:2098; Gök ve Gök, 2019:55). Homojen fotokataliz sistemlerinde bu sınırlayıcı özellikler; katalizörün geri kazanım zorluğu, yüksek konsantrasyonlarda ışık penetrasyonunun azalması ve foto kararlılığının

düşmesi gibi problemlere yol açmaktadır (Croxall vd., 2023:1463). Bu sorunlara çözüm olarak, son yıllarda heterojen fotokatalizörler büyük ilgi görmüştür. Geri dönüştürülebilirlikleri, artırılmış kararlılıkları ve endüstriyel uygulamalarda maliyet etkinlikleri nedeniyle heterojen sistemler tercih edilmektedir (Kou vd., 2017:1445).

Heterojen fotokatalizörler, katalitik olarak aktif türlerin uygun bir destek malzemesi üzerinde hareketsizleştirilmesi yoluyla hazırlanır. Günümüze kadar nanopartiküller (Schätz vd., 2010:8950), magnezyum oksit (Julkapli ve Bagheri 2016:1), titanyum dioksit (Bagheri vd., 2014:727496), grafen (Julkapli ve Bagheri 2015:948) ve mezogözenekli malzemeler (Pal 2015:24363) gibi çeşitli destek malzemeleri kullanılmıştır. Destek malzemesinin seçimi, hedef uygulamaya ve istenen özelliklere göre değişiklik göstermektedir. MCM-41 (Mobil Composition of Matter No. 41), düzenli mezogözenekli yapıya sahip silika bazlı bir malzemedir. 1992 yılında Mobil Oil Corporation araştırmacıları tarafından keşfedilmiş, gözenek boyutları 2 ila 10 nanometre arasında değişen, oldukça düzenli ve büyük yüzey alanına sahip bir malzemedir (Beck vd., 1992:10834). Yapısal olarak hekzagonal mezogözenek yapısı ile bilinir, bu da düzenli silindirik gözenekler anlamına gelir. MCM-41, kimyasal ve yapısal özellikleri sayesinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilecek esnek bir malzemedir. Yüksek yüzey alanı, düzenli mezogözenek yapısı ve kimyasal kararlılığı ile kataliz, ilaç taşıma, çevresel temizlik ve sensör teknolojileri gibi birçok alanda büyük bir potansiyele sahiptir. Literatür, heterojen fotokatalizörlerin zaman zaman homojen muadillerine kıyasla daha yüksek katalitik aktivite gösterebildiğini ortaya koymuştur (Ma vd., 2023:4285).

Bu bağlamda, çözünürlük ve agregasyon sorunları nedeniyle homojen sistemlerde düşük aktiviteye sahip ftalosiyanın bileşiklerinin uygun bir yüzeyde hareketsizleştirilmesi, fotokatalitik performanslarının artırılması açısından etkili bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Nitekim literatürde, farklı destek malzemeleri kullanılarak ftalosiyanın bazlı heterojen fotokatalizörlerin sentezine ve bu malzemelerin çeşitli organik dönüşüm reaksiyonlarındaki performansına dair birçok çalışma mevcuttur (Szymczak ve Kryjewski 2022:2532; Aralekallu ve Koodlur Sannegowda 2024: 2400088). Bu çalışmalardan bazıları, 1-naftolün fotooksidasyonu üzerine odaklanmıştır (Chen ve Ng 2022:3567; Gök vd., 2025: e202500207). Özellikle destek malzemesi olarak MCM-41'in bir ftalosiyanın bileşiği ile birleştirilmesiyle elde edilen bir heterojen fotokatalizörün, 1-naftolün fotooksidasyonu üzerindeki etkisi dikkate değer önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, MCM-41 destek malzemesine immobilize edilmiş bir heterojen fotokatalizör olan MCM-41-ZnPc'in fotokatalitik performansı sunulmaktadır. Katalizör, 1-naftolün görünür ışık altında gerçekleştirilen fotooksidasyonu için test edilmiştir. Tüm deneyler, 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilen ve kırmızı güç LED'i ile donatılmış, özel tasarlanmış düşük maliyetli bir fotoreaktörde gerçekleştirilmiştir.

Deneysel Çalışmalar

Materyal ve Metot

Çalışmada kullanılan MCM-41, daha önce grubumuz tarafından yapılan çalışma kapsamında sentezlenmiş bu çalışmada da kullanılmıştır (Gök ve Gök, 2024:e7359). MCM-41-ZnPc heterojen fotokatalizörü literatürde sunulan çalışma kapsamında sentezlenmiş olup (Gök vd., 2025:e00411), 1-naftolün fotooksidasyonundaki aktivitesi bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan ticari kimyasallar yurtdışı kimyasal tedarikçilerinden temin edilmiş olup, çözücüler Armarego'da verilen yöntemler takip edilerek saflaştırıldı veya kurutuldu (Armarego, 2022).

Çalışma kapsamında elde edilen malzemelerin FT-IR spektrumları, Shimadzu IR Affinity-1S cihazında KBr disk tekniği yardımı ile 400-4000 cm^{-1} aralığında kaydedilmiştir. Malzemelerin hazırlanmasında IKA RCT Basic marka ısıtıcılı manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Kurutma işlemleri, Memmert marka etüvde, yakma işlemleri ise Nükleon marka kül fırınında yapılmıştır. Çözücü uzaklaştırma işlemlerinde IKA RV8 model döner buharlaştırıcı kullanılmıştır. 1-naftolün 1,4-naftokinon'a dönüşümü, diyet dizisi dedektörü (DAD) ve YMC Amiloz-C kolonu ile donatılmış bir Shimadzu Prominence LC-20A yüksek performanslı sıvı kromatografi sistemi kullanılarak izlendi. Fotokatalitik çalışmalar için 200 W gücünde kırmızı güç LED'i kullanıldı.

1-naftolün MCM-41-ZnPc ile Fotooksijenasyonu

1-naftolün 1,4-naftokinona fotooksijenasyonu, heterojen katalizör MCM-41-ZnPc 'in fotokatalitik verimliliğini değerlendirmek için bir model reaksiyon olarak kullanılmıştır. Her deneyde, atmosferik oksijene maruz bırakılan açık tüplere MCM-41-ZnPc (8 mg), değişen miktarlarda 1-naftol (0,03-0,6 mmol) ve uygun bir reaksiyon çözücüsü eklenmiştir. Reaksiyon karışımları daha sonra ilgili tablolarda belirtilen süreler boyunca kırmızı LED ışıkla (640 nm) ışınlanmıştır. Reaksiyon tamamlandıktan sonra 0,1 mL numune alınmış, izopropil alkol ile 1 mL'ye seyreltilmiş ve bir şırınga filtresi kullanılarak filtrelenmiştir. Elde edilen çözeltiler, DAD detektörlü bir Shimadzu Prominence LC-20A HPLC sistemi veya Rxi-5 ms kolonu ile donatılmış bir Shimadzu GC-2010 gaz kromatografisi kullanılarak analiz edildi. Dönüşüm oranları ve ürün seçiciliği, ekteki tablolarda sunulduğu gibi, kromatografik pik alanlarının entegre edilmesiyle hesaplandı.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Önceki çalışmalar, çinko ftalosiyanın bileşiklerinin, uygun dalga boyundaki ışıkla ışınlığında bir enerji transfer mekanizması yoluyla temel haldeki moleküler oksijeninden singlet oksijen üretebildiğini göstermiştir (Wysocki vd., 2025:112751). MCM-41-ZnPc fotokatalizörünün 684 nm'de güçlü bir emilim bandı sergilediği göz önüne alındığında, uygun ışık ışınlımı altında aerobik oksidasyon reaksiyonlarında katalitik aktivite gösterebileceği düşünülebilir. Bunu test etmek için, 1-naftolün 1,4-naftokinon'a fotooksijenasyonu model bir reaksiyon olarak seçilmiştir. Başlangıçta, MCM-41-ZnPc 'nin fotokatalitik aktivitesi, asetonitril içinde 100:1'lik bir substrat-katalizör mol oranı kullanılarak açık havada değerlendirilmiştir (Tablo 1, 1–5. denemeler).

Tablo 1 Heterojen fotokatalizör MCM-41-ZnPc, MCM-41 varlığında ve katalizörsüz ortamda açık havada 1-naftolün fotokatalitik oksidasyonu^a

Deneme	Katalizör	Dönüşüm (%) ^b	1,4- naftakinon (%)	Seçicilik (%)
1	-	6,88	6,88	100
2	MCM-41	11	11	100
3	MCM-41-ZnPc	77,63	77,63	100
4	MCM-41-ZnPc ^c	13,46	13,46	100
5	MCM-41-ZnPc ^d	13,41	13,41	100

^aReasyon şartları: çözücü: asetonitril (1,25 mL), 1-naftol (0,03 mmol), katalizör (8 mg), substrat/katalizör oranı: 100/1, 200W LED 15 dakika için O₂ varlığında (hava).

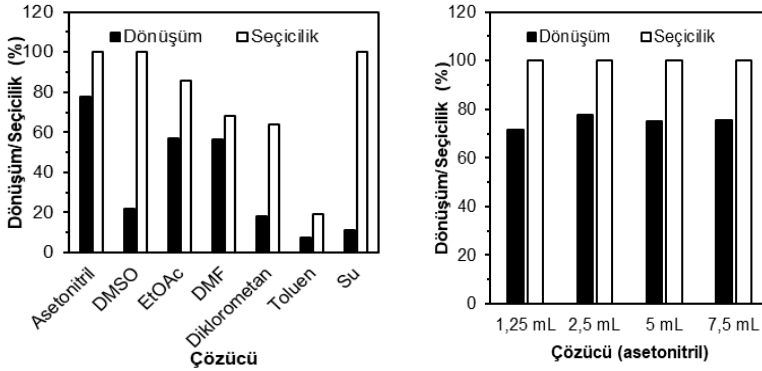
^bDönüşüm HPLC ile belirlendi. ^cFotoreaktör kullanılmadan ortam ışığında.

^dKaranlıkta

Sonuçlar, hem MCM-41-ZnPc katalizörünün varlığının hem de ışık ışınlımının verimli fotooksidasyon için gerekli olduğunu ortaya koymuştur. 15 dakikalık ışık maruziyeti altında sistem, %100 seçicilikle %77,63'lük yüksek bir dönüşüm değerine ulaşmıştır (Tablo 1, deneme 3). Buna karşılık, MCM-41-ZnPc, çıplak MCM-41 ile değiştirildiğinde (dönüşüm: %11) veya tamamen çıkarıldığında (dönüşüm: %6,88) dönüşümlerde büyük oranda düşüş kaydedilmiştir; bu da ZnPc kısmının fotoaktif merkez olarak önemli bir role sahip olduğunu göstermektedir (Tablo 1, deneme 1 ve 2). Karanlıkta veya ortam ışığında, herhangi bir dönüşüm elde edilememiştir (Tablo 1, deneme 4 ve 5), bu da reaksiyonun ışığa bağlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, ışık ışınlımının, havanın (oksijen kaynağı olarak) ve MCM-41-ZnPc

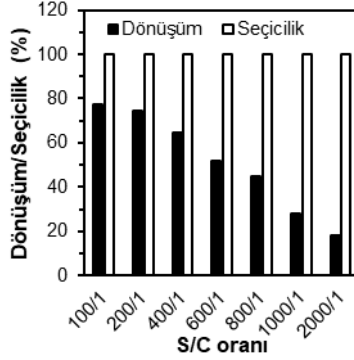
fotokatalizörünün varlığının, 1-naftolün etkili ve seçici fotooksidasyonu için gerekli olan parametreler olduğunu doğrulamaktadır.

İdeal çözücüü belirlemek için reaksiyon aynı koşullar altında farklı çözücüler içinde gerçekleştirildi (Şekil 1a). Ürün seçiciliğinin tüm durumlarda yüksek kaldığı gözlenirken, dönüşüm verimliliğinin önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir. En yüksek dönüşümün asetonitrilin çözücüsü içinde olduğu belirlenmiştir. Farklı hacimlerde asetonitril ile tekrarlanan reaksiyonlar, çözücü hacmindeki değişimin dönüşüm ve seçicilik değerlerini etkilemediğini göstermiştir (Şekil 1b).



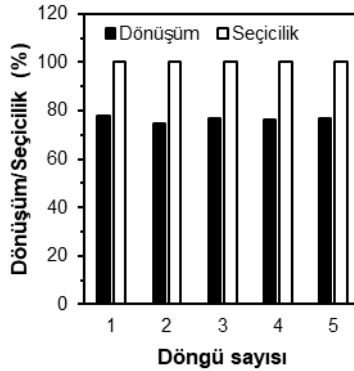
Şekil 1 a) Çözücü türünün ve b) asetonitril çözücü miktarının dönüşüm ve seçicilik üzerindeki etkisi.

Ayrıca, substrat konsantrasyonunun etkisi yine aynı şartlarda incelendi. 1-naftol miktarının artırılmasının, seçiciliği etkilemese de dönüşümde bir azalmaya neden olduğu gözlenmiştir (Şekil 2). 100:1'lik substrat-katalizör oranında, 15 dakikadaki en yüksek dönüşüm %77,63 olurken, 2000:1 gibi daha yüksek oranda, seçicilik aynı kalmasına karşın dönüşümün ciddi oranda düştüğü (%17,85) belirlenmiştir. Test edilen tüm koşullarda, ürün seçiciliği yüksek elde edilmiş fakat substrat oranının artırılmasıyla dönüşümün azaldığı belirlenmiştir.



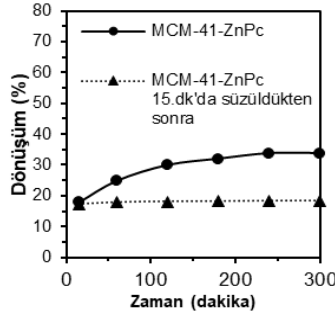
Şekil 2 Heterojen fotokatalizör MCM-41-ZnPc ile 1-naftolün fotokatalitik oksidasyonunda substrat/katalizör oranının dönüşüm seçicilik üzerine etkisi

Sürdürülebilir heterojen kataliz için temel gereklilik, katalizörün yeniden kullanılabilirliğidir. MCM-41-ZnPc'nin kararlılığını ve tekrar kullanılabilirliğini değerlendirmek için süzme ve yeniden kullanım testleri gerçekleştirildi. Fotokatalitik reaksiyon sonrası katalizör süzme işlemi ile geri kazanıldı ve beş ardışık fotokatalitik döngüde tekrar kullanıldı. Elde edilen sonuçlar, her döngü sonrası yüksek dönüşüm ve seçicilik değerlerinin korunduğunu ortaya koymuştur. Bu da katalizörün kararlılığını göstermektedir (Şekil 3).



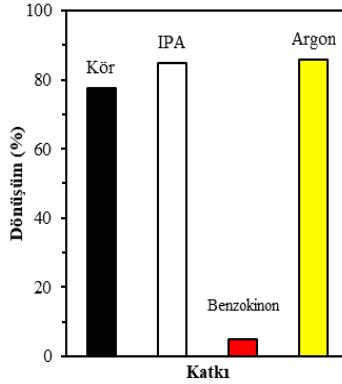
Şekil 3 MCM-41-ZnPc'nin yeniden kullanılabilirlik testi

Katalizörün heterojen yapısını bütünlüğünü görmek ve reaksiyonun ilerleyişi sırasında ortamdan uzaklaştırılması durumunda reaksiyon ilerleyişinin durup durmadığını belirlemek için sıcak süzme testi gerçekleştirildi. MCM-41-ZnPc reaksiyon karışımından 15 dakika sonunda süzülerek uzaklaştırılması durumunda, ürün oluşumunun durduğu görülmüştür (Şekil 4). Bu da aktif türlerin katı destek üzerinde hareketsiz olarak kaldığını ve heterojen bütünlüğün bozulmadığını göstermektedir.



Şekil 4 Heterojen katalizör MCM-41-ZnPc için sıcak filtrasyon testi

1-naftolün fotokatalitik oksidasyonundan sorumlu aktif türleri belirlemek için, radikal süpürücüler kullanılarak bir dizi kontrol deneyi yürütülmüştür. Işık ile uyarılma sonrası oluşan pozitif boşlukları (h^+), süperoksit radikallerini ($\bullet O_2^-$) ve hidroksil radikallerini ($\bullet OH$) söndürmek için sırasıyla etilendiamintetraasetik asit (EDTA), benzokinon ve izopropanol (IPA) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'de gösterilmektedir. EDTA ve IPA ilavesinin reaksiyon hızı üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olmuştur. Buna karşılık, benzokinon varlığı ürün oluşumunu önemli ölçüde engellemiş ve reaksiyonu neredeyse tamamen bastırmıştır. Bu sonuçlar, süperoksit radikallerinin ($\bullet O_2^-$) fotokatalitik süreci yönlendirmede baskın bir rol oynadığını açıkça göstermektedir.



Şekil 5 Heterojen katalizör MCM-41-ZnPc için radikal süpürme testi

SONUÇ

Bu çalışma, MCM-41 destekli ZnPc heterojen fotokatalizörünün görünür ışık altında, hava atmosferinde 1-naftolün yüksek verim ve seçicilikle 1,4-naftokinona dönüştürülmesinde oldukça etkili olduğunu ortaya koymuştur. Reaksiyon koşullarının optimize edilmesiyle sistemin katalitik etkinlik değerleri oldukça yüksek bulunmuş, ayrıca yeniden kullanılabilirlik açısından güçlü bir performans sergilemiştir.

Bu bulgular, çevre dostu, düşük maliyetli ve pratik olarak uygulanabilir fotokatalitik sistemlerin geliştirilmesine önemli bir katkı sağlamaktadır. Grubumuzun çalışmaları bu yönde devam etmektedir.

REFERANSLAR

- Akbar, A., Khan, S., Chatterjee, T., Ghosh, M. (2023). Unleashing the power of porphyrin photosensitizers: Illuminating breakthroughs in photodynamic therapy. *J. Photochem. Photobiol. B* 248, 112796.
- Ankathatti Munegowda, M., Manalac, A., Weersink, M., McFarland, S. A., Lilge, L. (2022). Ru (II) containing photosensitizers for photodynamic therapy: A critique on reporting and an attempt to compare efficacy. *Coord. Chem. Rev.* 470, 214712.
- Arakellu, K. P. C P, S., Koodlur Sannegowda, L. (2024). Efficacy of Phthalocyanine-Based Catalysts in Electrochemical Sensors: A Comprehensive Review. *Adv. Sens. Res.* 3, 2400088.
- Armarego, W. L. (2022). *Purification of laboratory chemicals: Part 2 inorganic chemicals, catalysts, biochemicals, physiologically active chemicals, nanomaterials*. Butterworth-Heinemann.
- Bagheri, S., Muhd Julkapli, N., Bee Abd Hamid, S. (2014). Titanium Dioxide as a Catalyst Support in Heterogeneous Catalysis. *Sci. World J.* 2014, 727496.
- Beck, J. S., Vartuli, J. C., Roth, W. J., Leonowicz, M. E., Kresge, C. T., Schmitt, K. D., Schlenger, J. (1992). A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates. *Journal of the American Chemical Society*, 114(27), 10834-10843.
- Body, N., Lefebvre, C., Eloy, P., Haynes, T., Hermans, S., Riant, O. (2023). Impact of silica nanoparticles architectures on the photosensitization of O₂ by immobilized Rose Bengal. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 440, 114648.

- Channabasavana Hundi Puttaningaiah, K. P., Hur, J. (2024). Opportunities and challenges of metal phthalocyanines composites in photodynamic therapy as photosensitizers: A comprehensive review. *Inorg. Chem. Commun.* 170, 113491.
- Chen, X.-F., Ng, D. K. P. (2021). β -Cyclodextrin-conjugated phthalocyanines as water-soluble and recyclable sensitizers for photocatalytic applications. *Chem. Commun.* 57, 3567-3570.
- Chojnacka, K. (2024). Sustainable chemistry in adaptive agriculture: A review. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 46, 100898.
- Croxall, M., Lawrence, R., Goh, C. (2023). Heterogeneous vs homogenous photocatalysis: what dominates in the degradation of methyl orange and methylene blue mixtures? *Photochem. Photobiol. Sci.* 22, 1463-1474.
- Cui, S., Guo, X., Wang, S., Wei, Z., Huang, D., Zhang, X., Zhu, T. C., Huang, Z. (2024). Singlet oxygen in photodynamic therapy. *Pharmaceuticals*, 17, 1274.
- Devanshi, M., Anju, S., Shruti, G., Reena, J., Soma Mondal, G., Yashna, D., Sumedha, S., Soni, R. (2024). Developments in synthesis strategies of spiro-barbiturate compounds: A classified study. *Mini Rev. Org. Chem.* 21, 246-270.
- Dutta, S., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Roy, D., Chatterjee, S., Chakraborty, A., Banerjee, D., Ganguly, A., Nanda, S., Rajak, P. (2024). Contamination of textile dyes in aquatic environment: Adverse impacts on aquatic ecosystem and human health, and its management using bioremediation. *J. Environ. Manage.* 353, 120103.
- Gök, H. Z., Dönmez, S., Gök, Y. (2025). Photodegradation of Methylene Blue Using Zinc Phthalocyanine Supported on MCM-41 Under Visible Light in Low-Cost 3D Printed Photoreactor. *ChemistrySelect*, 10, e00411.
- Gök, Y., & Gök, H. Z. (2024). Preparation of mesoporous silica and organosilica nanostructures functionalized with C2-symmetric diol and their catalytic performance in diethylzinc addition to aromatic aldehydes. *Applied Organometallic Chemistry*, 38(3), e7359.
- Gök, Y., Arlı, O. T., Gök, H. Z., & Türkaslan, T. (2023). Rational synthesis of pH-responsive mesoporous organosilica nanoparticles functionalized with 2-aminothiophenol for controlled release of curcumin. *Journal of Porous Materials*, 30(6), 1887-1896.
- Gök, Y., Dönmez, S., Erdem, R., Gök, H. Z. (2025) Green Photooxidation of 1-Naphthol Using a Zinc Phthalocyanine-Loaded MCM-41 Heterogeneous Catalyst. *ChemPlusChem*. e202500207.
- Gök, H. Z., & Gök, Y. (2019). Novel polymeric phthalocyanines bridged flexible 1, 5-pentanedithiol unit for metal ions extraction: synthesis, characterization and

- evaluation. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 94(1), 55-63.
- Gök, H. Z. (2015). Synthesis of metal-free and metallophthalocyanines containing 18-and 21-membered macrocycles with mixed donor atoms and their metal-ion binding properties. *Turkish Journal of Chemistry*, 39(4), 750-763.
- Hou, W., Shi, G., Wu, S., Mo, J., Shen, L., Zhang, X., Zhu, Y. (2022). Application of fullerenes as photosensitizers for antimicrobial photodynamic inactivation: a review. *Front. Microbiol.* 13, 2022.
- Julkapli, N. M., Bagheri, S. (2015). Graphene supported heterogeneous catalysts: An overview. *Int. J. Hydrogen Energy*, 40, 948-979.
- Julkapli, N. M., Bagheri, S. (2016). Magnesium oxide as a heterogeneous catalyst support. *Rev. Inorg. Chem.* 36, 1-8.
- Kou, J., Lu, C., Wang, J., Chen, Y., Xu, Z., Varma, R. S. (2017). Selectivity Enhancement in Heterogeneous Photocatalytic Transformations. *Chem. Rev.* 117, 1445-1514.
- Li, X., Peng, X.-H., Zheng, B.-D., Tang, J., Zhao, Y., Zheng, B.-Y., Ke, M.-R., Huang, J.-D. (2018). New application of phthalocyanine molecules: from photodynamic therapy to photothermal therapy by means of structural regulation rather than formation of aggregates. *Chem. Sci.* 9, 2098-2014.
- Ma, Z., Guan, B., Guo, J., Wu, X., Chen, Y., Zhang, J., Jiang, Bao, S., Chen, L., Shu, K., Dang, H., Guo, Z., Li, Z., Yao, S., Huang, Z. (2023). State of the art and perspectives of heterogeneous photocatalysts based on metal-organic frameworks (MOFs): design, modification strategies, and their applications and mechanisms in photodegradation, water splitting, and CO₂ reduction. *Catal. Sci. Technol.* 13, 4285-4347.
- Moreira, I. M., Vieira dos Santos, F., Lyon, J. P., Maftoun-Costa, M., Pacheco-Soares, C., Soares da Silva, N. (2008). Photodynamic therapy: porphyrins and phthalocyanines as photosensitizers. *Aust. J. Chem.* 61, 741.
- Nguyen, V.-N., Zhao, Z., Tang, B. Z., Yoon, J. (2022). Organic photosensitizers for antimicrobial phototherapy. *Chem. Soc. Rev.* 51, 332-33404.
- Nidheesh, P. V., Boczkaj, G., Ganiyu, S. O., Oladipo, A. A., Fedorov, K., Xiao, R., Dionysiou, D. D. (2025). Generation, properties, and applications of singlet oxygen for wastewater treatment: a review. *Environ. Chem. Lett.* 23, 195-240.
- Oh, S., Stache, E. E. (2022). Chemical Upcycling of Commercial Polystyrene via Catalyst-Controlled Photooxidation. *J. Am. Chem. Soc.* 144, 5745-5749.
- Pal, N., Bhaumik, A. (2015). Mesoporous materials: versatile supports in heterogeneous catalysis for liquid phase catalytic transformations. *Rsc Adv.* 5, 24363.

- Ravelli, D., Fagnoni, M., Albini, A. (2013). Photoorganocatalysis. what for? *Chem. Soc. Rev.* 42, 97-113.
- Schätz, A., Reiser, O., Stark, W. J. (2010). Nanoparticles as Semi-Heterogeneous Catalyst Supports. *Chem. Eur. J.* 16, 8950-8967.
- Szymczak, J., Kryjewski, M. (2022). Porphyrins and Phthalocyanines on Solid-State Mesoporous Matrices as Catalysts in Oxidation Reactions. *Materials*, 15, 2532.
- Wysocki, M., Ziental, D., Biyiklioglu, Z., Jozkowiak, M., Baş, H., Długaszewska, J., Kempisty, H. P., Güzel, E., Sobotta, L. (2025) Non-peripheral octasubstituted zinc (II) phthalocyanines bearing pyridinepropoxy substituents–Antibacterial, anticancer photodynamic and sonodynamic activity, *J. Inorg. Biochem.*, 262, 112751.
- Yu, Y., Cai, R., Lv, L., Dong, H., Xu, Y., Zhang, Q., Shen, R. (2025). Recent advances in the oxidative activation of the C2–C3 π bond of indoles and its applications. *Org. Biomol. Chem.* 23, 774-792.
- Zheng, B.-D., He, Q.-X., Li, X., Yoon, J., Huang, J.-D. (2021). Phthalocyanines as contrast agents for photothermal therapy. *Coord. Chem. Rev.* 426, 213548.

Yeşil Kimya İndeksleme Çalışmaları

Murat YILDIZ

Öğr. Gör.; Uşak Üniversitesi Ulubey Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü.
murat.yildiz@usak.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9577-9840

ÖZET

Yeşil kimya, kimyasal ürün ve süreçlerin çevresel etkilerini en aza indirmeyi amaçlayan bir bilim dalı olarak günümüzde sürdürülebilirlik politikalarının merkezinde yer almaktadır. Paul Anastas ve John Warner'ın ortaya koyduğu 12 temel prensip, atık oluşumunun önlenmesinden enerji verimliliğine, yenilenebilir hammadde kullanımından güvenli çözücülerin seçimine kadar geniş bir çerçeve sunmaktadır. Ancak bu prensipler kavramsal düzeyde kalmakta ve süreçlerin ne derece “yeşil” olduğunu nicel olarak değerlendirmek için çeşitli indeksleme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Son 20 yılda geliştirilen E-faktörü, atom ekonomisi, tepkime kütle verimi (RME) ve proses kütle yoğunluğu (PMI) gibi kütle ölçütleri, süreç verimliliği ve çevresel etkilerin hesaplanmasında ön plana çıkmıştır. Bunun yanında Curzons'un Yeşil Teknoloji Rehberi, Andraos'un sentez planı yaklaşımları, Roschangar'ın GAL ve iGAL metrikleri ile McElroy'un CHEM21 aracı, akademi ve endüstride kullanılan kapsamlı yöntemler arasında yer almaktadır. Ayrıca çözücülerin indekslenmesi, kimya endüstrisinde tüketimin büyük kısmını oluşturmaları nedeniyle ayrı bir önem taşımaktadır. Geliştirilen rehberler; sağlık, güvenlik ve çevresel etkiler açısından çözücülerini sınıflandırarak yeşil alternatiflerin belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu bölümde, yeşil kimya indeksleme çalışmalarının tarihsel gelişimi, temel kütle ve çözücü ölçütleri ile sektörel uygulamalar ayrıntılı şekilde ele alınmış, sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda indeksleme yaklaşımlarının önemi vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler – Yeşil kimya, İndeksleme, Yeşil çözücüler, Tehlikeli kimyasallar, Sürdürülebilirlik

1 GİRİŞ

İnsanoğlu binyıllardır doğa ile iç içe yaşamıştır. Üretim, kullanılan cihazların basitliğinden ve yoğun enerji gerektirmesinden dolayı sınırlı kalmıştır. Ancak endüstri devrimiyle birlikte ortaya çıkan vahşi kapitalizm daha ilk yıllarında doğaya önce atıkları ile zarar vermiştir. Özellikle 20. yy.'da insanların üstel artış hızı göstermesi ile atık krizinden sonra kaynak krizi de ortaya çıkmıştır. Bu durum 21. yy.'ın sürdürülebilirlik politikalarının temelini oluşturmuştur.

Endüstri Devrimi'nin getirdiği farklılıklarda birisi de kullanılan doğal kaynaklar yerini sentetik kaynaklara bırakmıştır. Bu durum da kimya biliminin endüstriyel anlamda öne çıkmasını sağlamıştır. Dolayısıyla sürdürülebilirlik politikalarının hedef aldığı temel çalışma noktalarından birisi de bu nedenle kimya bilimi olmuştur. İlk olarak Rachel Carson tarafından 1962'de yayımlanan *Silent Spring* (Sessiz Bahar) adlı kitapta DDT gibi sentetik tarım kimyasallarının çevre üzerindeki olumsuz etkilerini dile getirildi (Carson, 1962). İzleyen yıllarda NEPA (Ulusal Çevre Politikası Yasası, 1969) ile EPA (Çevre Koruma Ajansı, 1970) gibi çevreci kuruluşlar kuruldu. ABD'de ve diğer ülkelerde de çeşitli yasalar çıkarıldı: Su Kirliliğini Önleme ve Kontrol Yasası (1974), Hava Kirliliğini Önleme ve Kontrol Yasası (1981), Çevre Kirliliği Yasası ve Biyoçeşitlilik Yasası (2002). 1998'de Paul Anastas ve John C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice* adlı kitabı yazarak, sentetik organik kimyacılar çevre dostu sentez planlamaları için 12 temel ilke sundular ve ülkelerin bireysel çalışmaları için yol göstermiş oldular (Anastas ve Warner, 1998). Böylelikle “Yeşil Kimya” terimi ilk olarak literatüre girerek genel endüstriyel ve akademik çalışmaların odak noktasına geçmiştir. 1999'da Royal Society of Chemistry tarafından *Green Chemistry* dergisinin kurulmasıyla akademik alanda özel bir platform oluşmuştur (Anastas ve Allen, 2016). 2000'li yıllar boyunca uluslararası konferanslar, ağlar ve eğitim programları hızla çoğalmış; örneğin 2005 Nobel Kimya Ödülü Yves Chauvin'e çevreci bir anyış geliştirdiği için takdim edilirken “yeşil kimya için büyük bir adım” olarak övgüyle bahsedilmesi, bu alanın gördüğü küresel önemin göstergelerinden biri olmuştur (Anastas ve Allen, 2016).

12 prensip yeşil kimya için temel bir felsefe sunsa da, bunlar kavramsal düzeydedir ve nicel değerlendirme imkanı sınırlıdır. Yeşil kimya indeksleme çalışmaları, bir kimyasal süreç veya ürünün "ne derece yeşil" olduğunu belirlemek için ölçütler (metrikler) geliştirilmesi ve bu ölçütlerin sistematik olarak uygulanmasını içerir. Bu nedenle son 20 yılda, yeşil kimyanın prensiplerini sayısal olarak değerlendirebilmek amacıyla çok sayıda performans indikatörü ve indeks önerilmiştir (Curzons vd., 2001; McElroy, 2015). İyi bir yeşil kimya metriğinin *basit, ölçülebilir, açık, objektif ve net tanımlı* olması gerektiği belirtilir. Böylece, bir sürecin ne kadar "yeşil"

olduğunu ölçmeden onu iyileştirmek mümkün olmayacağından, bu metrikler yeşil kimya prensiplerinin pratikte yönetilebilmesini sağlar.

1.1 Yeşil Kimya İlkeleri

Yeşil kimya, kimyasal ürün ve süreçlerin tasarımında çevreye ve insan sağlığına zarar veren maddelerin kullanımını ve oluşumunu en aza indirmeyi veya tamamen ortadan kaldırmayı hedefleyen bir kimya disiplini. Paul Anastas ve John Warner tarafından belirlenen **Yeşil Kimya'nın 12 Prensibi** olarak bilinen kılavuz ilkeler; atık oluşumunun önlenmesi, atom ekonomisinin maksimize edilmesi, daha az tehlikeli kimyasal sentezlerin kullanılması, daha güvenli kimyasalların tasarımı, güvenli çözücü ve yardımcı maddelerin seçimi, enerji verimliliği, yenilenebilir hammadde kullanımı, gereksiz türevlerden kaçınma, katalizör kullanımı, ürünlerin doğada bozunabilirliğinin sağlanması, gerçek zamanlı analiz ile kirlilik önleme ve kazaların önlenmesi gibi geniş bir yelpazedeki konuları kapsar (de Marco vd. 2019). Bu prensipler, kimyagerlere ve sanayiye kimyasal süreçleri çevreci bir yaklaşımla yeniden düşünmenin yollarını göstermekte ve yeşil kimyanın temel protokolünü oluşturmaktadır (Martínez, 2022).

1.1.1 Atık oluşumunun önlenmesi

Kimya endüstrisinde uzun yıllar boyunca temel yaklaşım, süreç sonunda oluşan atıkları arıtmak veya bertaraf etmek üzerine kuruluydu. Ancak bu yöntem hem maliyetliydi hem de çevreye zararları çoğu zaman kalıcı oluyordu. Bu ilke, atık oluşumunu en başta engelleyerek “kirliletmemek, temizlemekten daha iyidir” anlayışını yerleştirmiştir. Süreçlerin hammaddeyi daha etkin kullanacak şekilde tasarlanmasıyla, gereksiz yan ürünlerin oluşması önlenir. Böylece çevresel yük azalır, enerji ve kaynak tasarrufu sağlanır. Ayrıca atık yönetimi için harcanan maliyetler düşer. Bu yaklaşım, sürdürülebilir sanayinin temelini oluşturur ve döngüsel ekonomiye geçişin ilk adımıdır.

1.1.2 Atom ekonomisi

Klasik organik sentezlerde, reaktanların büyük bir kısmı yan ürünlere dönüşür ve istenen ürün kütlece küçük bir pay oluşturur. Atom ekonomisi kavramı, reaksiyonlara giren atomların mümkün olduğunca tamamının nihai üründe yer almasını hedefler. Böylece verimsiz reaksiyon adımlarının azaltılması ve hammaddenin en üst düzeyde değerlendirilmesi sağlanır. Yüksek atom ekonomisine sahip reaksiyonlar daha çevreci, ekonomik ve güvenlidir. Bu yaklaşım aynı zamanda enerji tasarrufu getirir, çünkü yan ürünleri ayırma ve bertaraf etme işlemleri azalır. İlaç, tarım ve polimer endüstrilerinde bu ilkenin uygulanması hem üretim maliyetlerini düşürmüştür hem de çevre kirliliğini azaltmıştır.

1.1.3 Daha az tehlikeli kimyasal sentezler

Pek çok geleneksel sentez süreci, yüksek derecede toksik veya patlayıcı reaktiflerin kullanımını içeriyordu. Bu durum hem iş güvenliği hem de çevre açısından ciddi riskler yaratıyordu. Bu ilke, reaksiyonları mümkün olduğunca düşük toksisiteli, güvenli kimyasallar üzerinden gerçekleştirmeyi amaçlar. Daha güvenli reaktiflerin kullanımı, kazaların önlenmesine ve işçi sağlığının korunmasına katkı sağlar. Ayrıca reaksiyon sonunda oluşabilecek tehlikeli atık miktarı da azalır. Endüstriyel üretimlerin güvenlik seviyesinin yükselmesi ve toksik kimyasal kaynaklı hastalıkların minimize edilmesi hedeflenmektedir. Bu yaklaşım sayesinde ilaç ve tarım kimyasalları gibi alanlarda daha güvenli ürün geliştirilmiştir.

1.1.4 Daha güvenli ürünlerin tasarımı

Kimyasal ürünlerin yalnızca üretim süreci değil, kullanım ve bertaraf aşamalarındaki etkileri de önemlidir. Bu ilke, işlevini yerine getiren fakat insan ve çevreye en az zararı veren ürünlerin tasarlanmasını savunur. Örneğin biyobozunur polimerler veya toksik olmayan tarım ilaçları bu anlayışla geliştirilmiştir. Böylece ürün, kullanım ömrü boyunca güvenli olur ve doğada kalıcı kirlilik yaratmaz. Kimyasal ürünlerin yaşam döngüsü boyunca riskleri en aza indirerek sürdürülebilir tüketim sağlamak hedeflenmektedir. Bu yaklaşım tüketicilerin güvenliğini artırırken, endüstriyel süreçlerin de sorumluluk bilinciyle ilerlemesini teşvik eder.

1.1.5 Güvenli çözücü ve yardımcı maddelerin kullanımı

Kimyasal sentezlerde kullanılan çözücüler, genellikle reaksiyonun kendisinden daha büyük çevresel yük oluşturur. Benzen, kloroform gibi uçucu organik bileşikler hem kanserojen risk taşır hem de hava kirliliğine katkıda bulunur. Bu ilke, mümkün olduğunda çözücüsüz sistemleri veya su, süperkritik CO₂, iyonik sıvılar gibi güvenli çözücülerini kullanmayı önerir. Güvenli çözücü seçimiyle işçi sağlığı korunur, patlama ve yangın riskleri azalır. Ayrıca atık yönetimi daha kolay hale gelir. Özellikle ilaç ve boya endüstrilerinde çözücü kaynaklı tehlikeli atıkların ortadan kaldırılmalıdır. Böylece hem ekonomik hem de ekolojik fayda sağlanır.

1.1.6 Enerji verimliliği

Enerji tüketimi, kimyasal süreçlerin en büyük çevresel maliyetlerinden biridir. Geleneksel sentezlerde yüksek sıcaklık ve basınç gereksinimi hem enerji sarfiyatına hem de sera gazı salımına yol açar. Bu ilke, düşük sıcaklıkta, ortam basıncında veya yenilenebilir enerji kaynaklarıyla gerçekleştirilen reaksiyonların geliştirilmesini savunur. Katalizör kullanımı, mikrodalga ve ultrasonik teknikler bu yönde yaygın örneklerdir. Enerji verimliliği, hem üretim maliyetini düşürür hem de karbon ayak izini azaltır. Daha az enerji harcayan ama aynı veya daha yüksek verimle ürün sağlayan

sistemler hedeflenmektedir. Bu ilke, özellikle enerji yoğun sektörlerde (petrokimya, metal işleme vb.) kritik önemdedir.

1.1.7 Yenilenebilir hammadde kullanımı

Sanayi uzun yıllar boyunca fosil kaynaklara bağımlı olarak gelişmiştir. Ancak fosil yakıtların sınırlı oluşu ve çevresel zararları, alternatif kaynak arayışını zorunlu kılmıştır. Bu ilke, biyokütle, bitkisel yağlar, nişasta veya selüloz gibi yenilenebilir kaynakların kimyasal üretimde kullanılmasını teşvik eder. Böylece fosil kaynakların tükenmesi yavaşlar ve karbon döngüsü daha dengeli hale gelir. Ayrıca yenilenebilir hammaddeler genellikle biyolojik olarak parçalanabilir ürünlere dönüşür. Bu yaklaşım, hem enerji güvenliğini hem de çevre korumasını destekler.

1.1.8 Gereksiz türevlerden kaçınma

Birçok kimyasal sentezde koruyucu gruplar veya geçici türevler kullanılarak süreç daha karmaşık hale getirilir. Bu adımlar ekstra kimyasal, enerji ve zaman tüketimine yol açar. Bu ilke, mümkün olduğunda bu tür gereksiz türev adımlarının ortadan kaldırılmasını savunur. Böylece süreç daha kısa, daha verimli ve daha çevreci hale gelir. Aynı zamanda hammadde ve enerji israfı önlenir. Özellikle ilaç sentezlerinde adım sayısının azaltılması ve süreç verimliliğinin artırılmalıdır. Bu yaklaşım, hem maliyeti düşürür hem de çevre üzerindeki etkiyi azaltır.

1.1.9 Katalizör kullanımı

Stokiyometrik reaktifler büyük miktarda atığa yol açarken, katalizörler az miktarla birçok reaksiyonu gerçekleştirebilir. Bu nedenle katalizör kullanımı, kimyasal süreçlerin çevreci hale getirilmesinde kritik rol oynar. Metal katalizörler, enzimler veya nanokatalizörler bu kapsamda değerlidir. Katalizörler, daha düşük sıcaklık ve basınçta yüksek verim elde edilmesini sağlar. Böylece enerji tüketimi azalır ve yan ürün oluşumu en aza iner. Reaksiyonlar daha ekonomik, seçici ve sürdürülebilir hale gelmelidir. Özellikle ilaç ve polimer endüstrisinde katalizörlerin kullanımı büyük ilerlemeler sağlamıştır.

1.1.10 Bozunabilir ürün tasarımı

Kimyasal ürünlerin doğada kalıcı olması, ekosistemlerde uzun süreli zarar yaratır. Plastiklerin yüzlerce yıl doğada kalması bunun en çarpıcı örneğidir. Bu ilke, kullanım ömrü tamamlanan ürünlerin doğada güvenli bileşiklere (CO₂, su, biyokütle vb.) ayrışacak şekilde tasarlanmasını savunur. Böylece atık yükü azalır ve çevresel kirlilik önlenir. Ayrıca geri dönüşüm süreçleri daha kolay hale gelir. Özellikle plastik, tekstil ve ambalaj sektörlerinde kalıcı atıkların yerini biyobozunur ürünlerin almalıdır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir tüketim ve üretimin en önemli adımlarından biridir.

1.1.11 Gerçek zamanlı analizle kirliliğin önlenmesi

Geleneksel üretimlerde, süreç tamamlandıktan sonra analiz yapılır ve sorunlar ancak sonuç ortaya çıktıktan sonra fark edilir. Bu yaklaşım zaman, enerji ve hammadde kaybına yol açar. Bu ilke, süreç sırasında gerçek zamanlı analiz yaparak kirleticiler yan ürünlerin oluşmadan kontrol edilmesini hedefler. Sensörler, online analiz sistemleri ve otomasyon bu alanda önemli araçlardır. Bu sayede süreçler daha güvenli ve verimli olur. Bu yaklaşım özellikle ilaç, gıda ve enerji sektörlerinde kaliteyi artırır.

1.1.12 Kazaların önlenmesi için güvenli kimya

Kimyasal süreçler yangın, patlama veya toksik sızıntı gibi büyük riskler taşır. Bu ilke, reaksiyonlarda kullanılan maddelerin doğası gereği güvenli seçilmesini ve süreçlerin risk azaltıcı şekilde tasarlanmasını önerir. Uçucu, patlayıcı ve toksik kimyasallar yerine güvenli alternatiflerin tercih edilmesi, olası endüstriyel kazaların önüne geçer. Ayrıca proses tasarımı sırasında basınç, sıcaklık ve konsantrasyon gibi parametrelerin güvenli aralıkta tutulması sağlanır. İşçi sağlığı ve çevre güvenliğinin maksimum seviyeye çıkarılmalıdır. Bu ilke, kimya endüstrisinde güvenlik kültürünün temelini oluşturur.

2 Yeşil Kimya İndeksleme Çalışmaları

2.1 Kütle Ölçütleri

Yeşil Kimya Protokolü'nün (12 İlke) açıklanmasının ardından, bir sürecin ne kadar “yeşil” olduğunu değerlendirmek amacıyla çeşitli ölçütler geliştirilmiştir. Yeşil ölçütlerin rolü her zamankinden daha önemli hale gelmiş olup, kütle ölçütlerinin yalnızca kütle odaklı olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde kütle verimliliğinden toksisiteye kadar farklı boyutları kapsayan birçok yeşil kimya göstergesi tanımlanmıştır. En yaygın kullanılan metriklerden bazıları aşağıda belirtilmiştir:

- E-faktörü (E): Bir kimyasal süreçte oluşan toplam atık miktarının elde edilen ürün miktarına oranı olarak tanımlanır (Sheldon, 1992). E-faktörü, proseste ne kadar atık üretildiğini basitçe gösterir; düşük E-faktörü daha az atık anlamına gelir ve bu da daha temiz bir sürece işaret eder. Roger Sheldon'ın bu kavramı özellikle kimya endüstrisinde proses verimliliğini atık üzerinden değerlendirmek için yaygın kabul görmüştür (Sheldon, 2017).
- Atom ekonomisi (AE): Reaksiyona giren atomların ne kadarının hedef ürüne dönüştüğünü yüzde olarak ifade eder (Trost, 1991). Anastas ve Warner'ın vurguladığı bu ölçüt, reaktanlardaki atomların azami oranda ürüne dahil olmasını hedefleyerek atık yan ürün oluşumunu minimize etmeyi amaçlar. Yüksek atom ekonomisi, hammaddelerin verimli kullanıldığını ve yan ürün az çıktığını gösterir.
- Tepkime kütle verimi (Reaction Mass Efficiency, RME): İzole edilen ürün kütlesinin, reaksiyonda kullanılan tüm reaktiflerin kütlesine oranının

yüzde cinsinden ifadesidir (Curzons, 2001). Bu metrik, reaksiyon verimini (verilen ürün miktarı) ve atom ekonomisini birlikte dikkate alarak pratik süreç verimliliğine odaklanır. RME, bir süreçteki verimsizlik kaynaklarını (örneğin yan reaksiyonlar veya verim düşüklüğü) görünür kılarak iyileştirme fırsatlarını belirlemeye yardımcı olur.

- Proses kütle yoğunluğu (Process Mass Intensity, PMI): Üretilen birim ürün başına sürece giren toplam girdilerin (reaktifler, çözücüler, su vb. dahil) kütleleridir (Jiménez-González vd., 2011). $PMI = \text{Toplam girdi kütlesi} / \text{ürün kütlesi}$ şeklinde hesaplanır ve özellikle ilaç endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. PMI değeri ne kadar düşükse süreç o kadar çevreci kabul edilir, zira daha az hammadde ile aynı miktarda ürün elde edildiğini gösterir.

Bu temel ölçütler yıllar içerisinde gelişerek farklı ölçütlerin oluşmasını da sağlamıştır. Tablo 1’de özet şeklinde verilen bu ölçütlerin gelişimini şu şekilde sıralayabiliriz.

- i. Etkin Kütle Verimi (EMY) (Hudlicky vd., 1999) conduritol C ve conduritol F sentezi için önerilmiştir. Bu ölçüt, verimi tanımlarken ürüne dönüşen kütleyi sentezde kullanılan tüm tehlikeli maddelerin kütlelerine göre hesaplamayı amaçlar. Zararsız çözücülerin kütlesi bu hesaplamaya dahil edilmez.
- ii. Curzons’un Yeşil Teknoloji Rehberi (Curzons vd., 2001); Curzons ve arkadaşları 2001’de yeşil teknolojiye yönelik bir rehber yayınladı ve bu rehberde çeşitli metrikler önerildi: kütle yoğunluğu, enerji kirliliği ve toksisite. Yazarlar uzun vadede atom ekonomisini (AE), kısa vadede ise çözücü kullanımını önemli gördü. Rehber, reaksiyon sırasında ve işleme adımlarında çözücü kullanımına odaklanarak kütle yoğunluğu değerini artırmayı hedefledi. Ayrıca çözücülerin üretim, kullanım ve bertaraf süreçlerinde çevresel yaşam döngüsü etkileri de göz önünde bulunduruldu.
- iii. Kütle Üretkenliği (Constable vd.,2002); kütle yoğunluğunun (MI) tersi olarak tanımlanmıştır ve etkin kütle verimi ile atom ekonomisine benzer bir ölçüt sunar. Bu ölçüt ayrıca atom ekonomisi tanımını genişletmiş, reaksiyon sırasında oluşan ara ürünleri de kapsamıştır. Bununla birlikte sentez süreciyle ilişkili maliyet unsurlarını da dikkate alır.
- iv. Process Mass Intensity ((PMI, ACS Roundtable, 2005 sonrası); Endüstriyel ölçekte, Amerikan Kimya Derneği İlaç Yuvarlak Masası (Roundtable), E-faktörün yerine temel yeşil kütle ölçütü olarak proses kütle yoğunluğu (PMI) kavramını geliştirmiştir. PMI, su da dahil olmak üzere tüm girdileri dikkate alarak süreç verimliliğini vurgular. E-faktör ise suyu dışarıda bırakır. Bu nedenle PMI daha bütüncül ve gerçekçi bir gösterge olarak tercih edilmektedir.

- v. Andraos'un Dört Ölçütü (2005–2007) (Andraos; 2005, 2006, 2007, 2015); verim, atom ekonomisi (AE), stekiyometrik faktör (SF) ve geliştirilmiş reaksiyon kütle verimliliğini (gRME) bir arada değerlendiren bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşım deneysel ve teorik parametreleri birlikte ele almış, özellikle doğrusal ve yakınsayan sentezlerde ölçütler arasındaki bağımlılığı vurgulamıştır. Ayrıca Andraos, doğrusal ve yakınsayan sentezlerin verimliliğini değerlendirmek için sentez planı ağaçları geliştirmiştir. Öğrencilere yönelik görsel öğretim araçları olarak da beşgen ve pentagram modelleri geliştirilmiş, böylece maliyet, miktar ve çözücü/katalizör geri kazanımı gibi unsurların yeşil kimya bağlamında anlaşılması kolaylaştırılmıştır.
- vi. Augé'nin Yardımcı Maddeler Parametresi (Augé, 2008); 2008 yılında Augé, kütle yoğunluğu (MI) metriğine doğrusal, yakınsayan ve karma sentezlerde kullanılan tüm yardımcı maddelerin kütlesini dahil etmiştir. Bu metrik; atom ekonomisi, verim, fazla reaktan kullanımı ve yardımcı maddelerden etkilenmektedir. Bu da çevresel etkinin (E) büyük ölçüde yardımcı maddelerden kaynaklandığını göstermektedir.
- vii. AMVI (Analytical Method Volume Intensity, 2008); Hartman vd. (2011), HPLC analitik yöntemlerinde tüketilen çözücü hacmini (AMVI) ve üretilen atığı ölçmek için dikkat çekici bir metrik geliştirmiştir. Bu çalışmada, numune hazırlığı ve cihazın çalışması sırasında ortaya çıkan atık, analiz edilen örnek sayısı dikkate alınarak tüm aşamalarda değerlendirilmiştir.
- viii. Küresel Malzeme Ekonomisi (GME) (Augé, 2012), doğrusal, yakınsayan ve çoklu yakınsayan sentezler için bütünsel bir metrik olarak geliştirilmiştir. Bu ölçüt, ürünü elde etmek için gerekli tüm malzemelerin kütlesini dikkate alarak sentez rotasının verimliliğini değerlendirir.
- ix. Reaksiyon Kütle Yoğunluğu (RMI) Song vd. (2012) tanımladığı bu ölçüt, PMI'dan farklı olarak bu metrik, çözücülerini dışarıda bırakarak yalnızca reaksiyon rotasının etkinliğine odaklanır. Ürün kütlesine karşılık kullanılan toplam reaksiyon maddelerinin kütlesi ile ifade edilir.
- x. Hibrit Ölçütler (Machado, 2012) Üç iyi bilinen metriğin (AE, MI ve RME) birleşiminden iki yeni ölçüt geliştirilmiştir: Yeşil Atom Düzeyi ve Yeşil Kütle Düzeyi. Bu hibrit ölçütler, reaktiflerin ürüne katılımını, AE'den elde edilen teorik değerleri ve tüm reaksiyonun değerlendirilmesini içerir.
- xi. Yeşil Hedef Düzeyi (GAL™); Roschengar vd. (2015) bu ölçütü özellikle ilaç endüstrisi için geliştirmiştir. Bu ölçüt, modifiye edilmiş bir E-faktöre dayanır ve solvent ile su atık akışlarını, ayrıca ilaç sentezindeki ortalama basamak sayısını dikkate alır. GAL'ı tamamlayıcı olarak Göreceli Proses Yeşilliği (RPG) metriği

geliştirilmiştir. RPG, yeşil süreç iyileştirmesi (RPI) ve karmaşıklık iyileştirmesi (RCI) gibi parametrelerle sentez sürecinin yeşilliğini ölçer.

- xii. iGAL (Improved Green Aspiration Level, (Roschangar vd., 2018)); GAL metriğinin geliştirilmiş bir versiyonu olan iGAL tanıtılmıştır. Bu yaklaşım, sentez planlamasının etkisini ve süreç tasarımındaki yenilikleri vurgular. Flor grubu sayısı, halka sayısı ve kiral merkez sayısı gibi karmaşık parametreleri dikkate alır. Özellikle tuzsuz formdaki molekül ağırlığı (FMW), ilaç karmaşıklığı için en doğru gösterge kabul edilir. iGAL, ilaç endüstrisindeki süreçlerin yeşilliğini değerlendirmek için RPG parametresini hesaplamakta kullanılır.
- xiii. CHEM 21 Araç Seti (McElroy, 2015) ilaç endüstrisi için bütünsel bir yaklaşım olarak önerilmiştir. Gelişim sürecinin farklı aşamalarını kapsar ve üç yeni metrik sunar: optimum verimlilik (OE), yenilenebilirlik yüzdesi (RP) ve atık yüzdesi (WP). OE, atom ekonomisine (AE) dayalı teorik verimliliği, RME ise gözlenen değeri temsil eder. RP, kullanılan yenilenebilir kaynaklı malzeme oranını ölçerken, WP atığı PMI'a dayalı olarak değerlendirir. Bir bayrak sistemi geliştirilmiştir: yeşil tercih edilen, sarı kabul edilebilir ama sorunlu, kırmızı ise istenmeyen süreçleri gösterir. Ayrıca çözücüler, reaktif tehlikeleri, süreç türü (kesikli ya da sürekli) ve üretim adımları da dikkate alınır. Temel amacı, yeni keşiflerin karşılaştırılabilmesi için bir temel sağlamak, darboğazları belirlemek ve sürdürülebilirlikte sürekli gelişimi teşvik etmektir.
- xiv. Öğrenciye Yönelik Yeşil Kimya Etkinliği (Hudson vd., 2016); 2016'da lisans öğrencilerine yönelik yeşil kimya öğrenimini kolaylaştıran bir sınıf etkinliği bildirilmiştir. Bu etkinlik, dönüşüm, seçicilik, verim, AE, RME, CE, E ve EMY gibi çeşitli metrikleri bir arada öğretmeyi hedeflemiştir. Öğrenciler, birbirine geçen yapı taşlarını kullanarak molekülleri modellemiştir: her blok bir atomu, bağlantılar molekül ağırlığını ve tamamlanan model molekülü temsil etmiştir. Bu yöntem, genel kimya derslerinden ileri düzey yeşil kimya ve endüstriyel kimya derslerine kadar farklı seviyelerde öğrencilere uygun bulunmuştur.
- xv. Monoklonal Antikor Üretiminde PMI (Budzinski vd., 2019); 2019'da yapılan bir çalışmada, monoklonal antikor (mAb) üretiminde çevresel etkiyi değerlendirmek için proses kütle yoğunluğu (PMI) metriği uygulanmıştır. PMI girdileri dört kategoride toplanmıştır: üst akış (hücre kültürü ve biyoreaktör), hasat (santrifüj ve filtrasyon), alt akış (safılaştırma) ve ilaç maddesi hazırlığı. 1 kg API üretimi için PMI büyük ölçekte 3.000–24.000, küçük ölçekte ise 3.000–17.000 aralığında bulunmuştur. Çalışma, verimliliğin ölçekten bağımsız olduğunu, ancak kromatografi adımının su tüketiminin ve yüksek PMI değerlerinin başlıca nedeni olduğunu ortaya koymuştur.

- xvi. İlaç Endüstrisinde PMI Karşılaştırması (Monteith vd., 2020); 2020’de yapılan yeni bir araştırma, ilaç endüstrisindeki temel metrik olarak PMI’nın önemini yeniden vurgulamıştır. Çalışmada iki farklı sentez yolu karşılaştırılmıştır. Sadece AE veya E gibi kütle metriklerine dayanmaktansa, üç faktör öne çıkarılmıştır: verim, derişim ve reaktanların molekül ağırlığı farkı. Bu parametrelerin birbirine olabildiğince yakın olması, sürecin daha gerçekçi ve daha yeşil bir sonuç vermesini sağlamaktadır.
- xvii. Üretilen Kütle Yoğunluğu (MMI) (Benison ve Payne, 2022); Son yıllarda, PMI’nın genişletilmiş bir versiyonu olarak üretim kütle yoğunluğu (MMI) geliştirilmiştir. PMI’dan farklı olarak, MMI temizlik, ekipman hazırlığı, atık yönetimi, arıtım, fazla malzeme kullanımı, yeniden kullanım ve geri dönüşüm gibi kategorileri kapsar. Bu sayede ekipman hazırlığı için gereken kütleyi hesaplamaya, çözücü veya reaktanların ikamesi ile yeniden kullanım olanaklarını belirlemeye olanak tanır. Daha hassas kütle hesaplamalarıyla sürecin tekrar tekrar optimize edilmesi gereğini azaltır.

Tablo 1 Kütle ölçütleri özeti

Yeşil Kimya Prensibi	Kütle Ölçütü	Formül
1. Atık oluşumunun önlenmesi	E-faktörü (E)	Toplam atık /Ürün kütlesi
	Kütle Üretkenliği	Ürün kütlesi /Toplam kütle
	Genelleştirilmiş Reaksiyon Kütle Verimliliği (gRME)	Ürün kütlesi /Kullanılan toplam kütle
	Reaksiyon Kütle Verimliliği (RME)	İzole edilen ürün kütlesi / Reaktan kütlesi
	Proses Kütle Yoğunluğu (PMI)	Toplam kütle /Ürün kütlesi
	Küresel Malzeme Ekonomisi (GME)	Ürün kütlesi /Toplam kütle
	Reaksiyon Kütle Yoğunluğu (RMI)	Toplam kütle /Ürün kütlesi
	Ayırma Kütle Yoğunluğu (SMI)	Ayırma adımı kütlesi /Ürün kütlesi
	Çekirdek PMI (cPMI)	(Reaktan + Reaktif + Katkı) / Ürün kütlesi
	Kümülatif PMI (cPMI cumulative)	PMI değerleri çarpımı
	Atom Ekonomisi (AE)	(Ürün formül ağırlığı /
2. Atom		

ekonomisi		Reaktanların formül ağırlığı) × 100
	Kütle Yoğunluğu (MI)	Toplam kütle / Ürün kütlesi
	Karbon Etkinliği (CE)	(Üründeki karbon / Reaktant karbonu) × 100
	Tam Kütle Verimi (TAY)	(Gerçek ürün / Teorik ürün) × 100
	Kümülatif Reaksiyon Kütle Verimliliği (cRME)	RME değerleri çarpımı
	Reaktan Verimliliği	Ürün kütlesi / Reaktan kütlesi
3. Daha az tehlikeli sentezler	Etkin Kütle Verimi (EMY)	(Ürün kütlesi / Zararlı reaktan kütlesi) × 100
4. Daha güvenli ürün tasarımı	Safılık Verimliliği	Saf ürün / Toplam ürün
5. Güvenli çözücü kullanımı	Çözücü Verimliliği	Ürün kütlesi / Çözücü kütlesi
6. Enerji verimliliği	Enerji Kütle Verimliliği	Ürün kütlesi / Enerji tüketimi
8. Gereksiz türevlerden kaçınma	Stekiyometrik Faktör (SF)	Teorik stekiyometri / Gerçek kullanım
9. Katalizör kullanımı	Katalizör Verimliliği	Ürün kütlesi / Katalizör kütlesi
1–12. Tüm prensiplerle ilişkili	Yeşil Kütle Endeksi (Green Mass Index)	(AE × Verim × Karbon etkinliği) / PMI

2.2 Çözücülerin İndekslenmesi

Kimya endüstrisinde kullanılan çözücüler, toplam kimyasal tüketimin büyük bir kısmını oluşturur ve çoğu zaman proseslerin çevresel ayak izinin ana kaynağıdır. Bu nedenle yeşil kimya indeksleme çalışmalarında çözücüler özel bir öneme sahiptir. Bir çözücünün ne derece yeşil olduğunu belirlemek için çeşitli kurumlar rehberler yayınlamıştır. Bu rehberler çözücülerini sağlık, güvenlik ve çevre kriterlerine göre kategorilere ayırır.

Merck'in sürdürülebilirlik skoru sistemi veya *GE'nin Solvent Emniyet Faktörü hesaplaması* gibi yaklaşımlarda, bir çözücünün farklı özelliklerine 0-100 arası puanlar verilir ve ortalama alınır (Jiménez-González vd., 2011). Sağlık (toksisite), Güvenlik (parlama noktası, patlayıcılık) ve Çevre (küresel ısınma potansiyeli, ozon inceltme vb.) başlıklarında puanlar ayrı ayrı da değerlendirilebilir. Böylece, örneğin bir çözücü sağlık açısından iyi (yüksek

puan) ama çevre açısından kötü (düşük puan) ise kullanıcı bunu görebilir ve kararını risk önceliklerine göre verebilir.

AstraZeneca (AZ), Pfizer GSK(GlaxoSmithKline) (Tablo 3) gibi ilaç şirketleri çözümleri farklı parametrelerle sınıflandırırken GCI-PR (Green Chemistry Institute – Pharmaceutical Roundtable) ve Amerikan Kimya Topluluğu (ACS) İlaç Endüstrisi Yeşil Kimya Enstitüsü'nün iş birliği ile 2016'da yayımlanan CHEM21 Çözümlü Seçim Kılavuzu, daha önceki birçok rehberi karşılaştırarak çözümleri altı kategoriye ayırmıştır: "Önerilen", "Kabul edilebilir (veya bazı sorunlu yönleri olabilir)", "Sorunlu", "Sorunlu veya Tehlikeli", "Tehlikeli" ve "Son derece Tehlikeli" şeklinde kademelendirilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2 CHEM21 Çözümlü Seçim Kılavuzu

Kategori	Çözümler
Önerilen	Su, EtOH, i-PrOH, n-BuOH, EtOAc, i-PrOAc, n-BuOAc, anisol, sulfolan
Önerilen/problemlili	MeOH, t-BuOH, benzil alkol, etilen glikol, aseton, MEK, MIBK, sikloheksanon, MeOAc, AcOH, Ac ₂ O
Problemlili	Me-THF, heptan, Me-sikloheksan, toluen, ksilenler, klorobenzen, asetonitril, DMPU, DMSO
Problemlili/tehlikeli	MTBE, THF, sikloheksan, DCM, formik asit, piridin
Tehlikeli	Diizopropil eter, 1,4-dioksan, DME, pentan, hekzan, DMF, DMAc, NMP, metoksi-etanol, TEA
Yüksek derecede tehlikeli	Dietil eter, benzen, kloroform, CCl ₄ , DCE, nitrometan

- i. AstraZeneca (AZ) (Diorazio vd., 2016); AstraZeneca, çözümlü seçimi konusunda en kapsamlı indeksleme sistemlerinden birini geliştirmiştir. Rehberlerinde 46 çözümlü 10 farklı kriter ile değerlendirilir: iki güvenlik kriteri, bir sağlık kriteri ve yedi çevresel kriter (hava, VOC salımı, suya etkisi, biyolojik arıtma yükü, geri dönüşüm, yakma, yaşam döngüsü). Her parametreye 1–10 arasında puan verilir ve sonuçlar kırmızı-sarı-yeşil renk kodlamasıyla sınıflandırılır. Bu yaklaşım, çözümlerin sadece toksikolojik değil, aynı zamanda çevresel kaderini de ayrıntılı analiz eder. Yüksek puanlar daha fazla tehlikeyi ifade eder ve bu sistem, solventlerin yaşam döngüsü değerlendirmesiyle ilişkilendirilmesi bakımından öncüdür. AZ'nin yaklaşımı, proses tasarımıyla özellikle çevresel etkilerin ağırlıklı şekilde dikkate alınmasını sağlamış ve sektörde daha şeffaf bir solvent seçimi metodolojisinin önünü açmıştır.
- ii. GCI-PR (Tobiszewski vd., 2015); ACS'nin öncülüğünde kurulan GCI-PR, ilaç sektöründe yeşil çözümlerin teşviki için çok kullanılan bir rehber geliştirmiştir. Bu sistem sağlık (H), güvenlik (S) ve çevre (E) skorlarıyla çözümleri 1–10 arasında puanlar. Örneğin MTBE için hava, su ve atık

skorları ayrı ayrı verilmiş ve en yüksek riskli değer alınarak değerlendirilmiştir. Bu metodoloji, “en sıkı kriteri” esas almasıyla dikkat çeker. Böylece tek bir parametredeki ciddi risk bile çözücünün genel derecesini düşürür. GCI-PR’nin avantajı, özellikle endüstride sık kullanılan çözücülerin iş sağlığı ve çevre güvenliği bakımından dengeli bir bakış açısıyla değerlendirilmesidir. Bu rehber, aynı zamanda diğer indekslemelerle karşılaştırmaya en elverişli yapıda olduğundan, makalede de AZ ve GSK ile uyumlu karşılaştırma imkânı vermiştir.

- iii. GSK (Adams vd., 2013); GSK’nin rehberi, sağlık (H), güvenlik (iki kriter: yanıcılık/patlama, reaktivite/kararlılık) ve çevre (atık, çevreye etki, yaşam döngüsü) üzerinden çözücülerini değerlendirir. Skorlar 1–10 arasında olup burada yüksek skor daha güvenli anlamına gelir. Ayrıca EHS (çevre-sağlık-güvenlik) bayrak sistemi uygulanır; örneğin üreme toksikolojisi olan çözücülere -8 puan eklenerek otomatik olarak dezavantajlı hale getirilir. Bu ek bayraklama sistemi, özellikle DMF, DMAc ve NMP gibi aprotik polar çözücülerin reprotoksik özelliklerini vurgular. GSK rehberi, endüstriyel karar vericilere yalnızca sayısal skor değil, aynı zamanda düzenleyici kırmızı bayraklar da sağlayarak çok boyutlu bir risk yönetimi modeli sunmuştur.
- iv. Pfizer (Alfonsi vd., 2008); Pfizer’in rehberi, basitliğiyle ön plana çıkar. Çözücüler sadece üç kategoriye ayrılır: tercih edilen, kullanılabilir ve istenmeyen. Ayrıca “istenmeyen” çözücüler için alternatifler önerilir. Bu yaklaşım özellikle medisinal kimyacılar için pratik bir rehber olarak tasarlanmıştır; ayrıntılı sayısal puanlamadan ziyade hızlı karar almayı kolaylaştırır. Pfizer’in bu kılavuzu, daha sonra geliştirilen kapsamlı rehberlerin öncülü kabul edilir. Çünkü sistematik yaşam döngüsü analizi veya çok parametrelili indeksleme içermese de, laboratuvar ölçeğinde çalışan kimyagerlere hangi çözücülerin daha çevreci ve güvenli olduğunu hızlıca gösterecek sade bir şema sunar.
- v. Sanofi (Prat vd., 2013); Sanofi’nin çözücü rehberi, diğerlerinden farklı olarak dört basamaklı bir sıralama içerir: “önerilen”, “yerine geçmesi tavsiye edilen”, “yerine geçmesi istenen” ve “yasaklı”. Bu sistem doğrudan sağlık, güvenlik, çevre riskleri ile birlikte endüstriyel faktörleri de (örneğin proses verimliliği, erişilebilirlik) birleştirir. Ayrıca Sanofi, “yasaklı” çözücüler listesi yayımlayan az sayıdaki kurumdan biridir ve bu liste düzenleyici yükümlülüklerle uyumlu şekilde hazırlanmıştır. Karbon tetraklorür gibi ozon tabakasına zararlı çözücüler ve benzen gibi karsinogenler doğrudan en tehlikeli kategoride yer alır. Böylece Sanofi’nin sistemi, özellikle regülasyonlara uyum ve insan sağlığı risklerine öncelik veren bir yaklaşımı temsil eder.
- vi. CHEM21 Çözücü Seçim Kılavuzu (Prat vd. 2014); Avrupa Birliği destekli büyük ölçekli bir yeşil kimya girişiminin çıktılarından biri olarak geliştirilmiş ve özellikle ilaç endüstrisinde çevre dostu çözücü kullanımını yönlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Bu kılavuz, sağlık,

güvenlik ve çevresel parametreleri birlikte ele alarak çözümleri renk kodları (yeşil, sarı, kırmızı) ile sınıflandırır ve araştırmacılara kolay anlaşılır bir karar destek sistemi sunar. Özellikle geniş çözümlü yelpazesini kapsamı, hem yaygın kullanılan geleneksel çözümleri hem de alternatif “biyobazlı” çözümleri içermesi bakımından önceki rehberlerden daha kapsamlıdır. CHEM21, aynı zamanda çözümlerin toksikolojik ve çevresel etkilerinin yanı sıra işlenebilirlik ve erişilebilirlik gibi pratik faktörleri de dikkate alır. Makalede vurgulandığı üzere, bu yaklaşım sayesinde kılavuz sadece akademi için değil, endüstriyel süreç geliştirme aşamalarında da kullanılabilir hale gelmiştir. Böylelikle CHEM21 rehberi, farmasötik Ar-Ge ve üretim süreçlerinde daha güvenli, sürdürülebilir ve regülasyonlarla uyumlu çözümlü seçiminde önemli bir standart olarak kabul edilmektedir.

Tablo 3 farklı indekslerde çözümlerin özet indeksi

Çözümlü	AZ ¹	GCI-PR ²	GSK ³	Pfizer ⁴	Sanofi ⁵
Su	-	-	24	1	1
MeOH	19	14	14	1	1
EtOH	16	13	17	1	1
i-PrOH	16	16	17	1	1
n-BuOH	17	13	18	1	1
t-BuOH	20	15	15	1	2
Benzil alkol	-	11	20	-	2
Etilen glikol	-	13	21	2	2
Aseton	21	15	15	1	1
MEK	21	16	15	1	1
MIBK	22	17	15	-	1
Sikloheksanon	-	14	20	-	2

¹ **AZ (AstraZeneca):** Sağlık, güvenlik (2 kriter) ve çevre (7 kriter) üzerinden 1–10 arası puan verir. Yüksek skor = daha kötü (tehlikeli) etkiyi gösterir.

² **GCI-PR:** Sağlık (H), güvenlik (S), çevre (E) için ayrı ayrı 1–10 arasında skor verir. Yüksek skor = daha yüksek risk.

³ **GSK:** Sağlık, güvenlik (2 kriter: alevlenme/patlama, reaktivite/kararlılık), çevre (3 kriter: atık, çevresel etki, yaşam döngüsü) kriterlerini 1–10 puanlar. Ancak burada yüksek skor = **daha az tehlikeli** anlamına gelir (ters yönde).

⁴ **Pfizer:** Üç kategoriye ayırır: Tercih edilen=1, Kullanılabilir=2, İstenmeyen=3

⁵ **Sanofi:** Çözümleri dört sınıfta gruplar: Önerilen=1, değiştirilmesi tavsiye edilir=2, değiştirilmesi istenir=3, Yasaklı=4

Çözücü	AZ¹	GCI-PR²	GSK³	Pfizer⁴	Sanofi⁵
Metil asetat	-	14	14	-	2
Etil asetat	18	15	16	1	1
i-PrOAc	18	13	18	1	1
n-BuOAc	13	14	21	-	1
Dietil eter	27	21	3	3	4
Diizopropil eter	-	-	4	3	2
MTBE	24	21	4	2	2
THF	23	16	4	2	2
Me-THF	24	15	11	2	1
1,4-dioksan	28	21	11	3	3
Anisol	18	13	18	-	1
DME	21	23	2	3	3
Pentan	-	-	7	3	4
Hekzan	26	21	1	3	3
Heptan	21	17	14	2	2
Siklohekzan	25	18	14	2	2
Me-Siklohekzan	-	17	16	2	2
Benzen	-	21	1	3	4
Toluen	22	18	11	2	2
Ksilenler	19	15	13	2	2
DCM	20	18	5	3	2
Kloroform	-	18	4	3	4
CCl ₄	-	19	3	3	4
DCE (1,2-dikloroetan)	-	19	4	3	4
Klorobenzen	25	16	18	-	2
Asetonitril	24	14	14	-	2
DMF	20	17	7	3	3
DMAc	20	16	4	3	3
NMP	18	16	7	3	3
DMSO	8	15	14	-	1
Sulfolan	9	13	21	-	1

Çözücü	AZ ¹	GCI-PR ²	GSK ³	Pfizer ⁴	Sanofi ⁵
Metoksi-etanol	21	20	3	-	3
Formik asit	20	15	-	-	2
Asetik asit	17	15	17	-	2
Asetik anhidrit (Ac ₂ O)	20	16	15	-	3
Piridin	26	16	5	-	3
TEA (Trietilamin)	23	18	3	-	3

2.2.1 Yeşil Çözücüler

Geleneksel organik çözücülerin birçoğu (örneğin benzen, kloroform, dietil eter, toluen gibi) yüksek derecede uçucu, yanıcı ve/veya toksiktir. Bu çözücülerin buharlaşması hem iş güvenliği riskleri yaratır hem de atmosfere VOC salımıyla hava kirliliğine katkıda bulunur. Yeşil kimya prensipleri doğrultusunda, mümkün olan yerlerde çözgen olarak su kullanılması ideal görülür, zira su yanıcı değildir, toksik değildir ve atık sorunu minimumdur (de Marco vd., 2019). Nitekim birçok reaksiyon için su bazı çözücüler veya çözücü kullanmayan (solventsiz) sistemler geliştirilmiştir. Elbette suyun evrensel çözücü olamaması nedeniyle, suda çözünmeyen organik maddeler için alternatif çözücüler gerekir.

"Yeşil çözücüler", toksik olmayan, yenilenebilir kaynaklı, geri kazanılabilir veya çevrede kalıcı olmayan çözücüler olarak tanımlanabilir ve son yıllarda bu alanda kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu noktada, süperkritik karbondioksit scCO₂ önemli bir yeşil çözücü alternatifi olarak ortaya çıkmıştır (Munshi ve Bhaduri, 2009): CO₂ süperkritik koşullarda (31°C üzeri ve ~74 bar) iyi bir çözücülük özelliği kazanır ve işlem sonrası basınç düşürülerek neredeyse tamamen sistemden uzaklaştırılabilir. scCO₂, zehirli olmayan ve sera gazı dengesine net katkı yapmayan (zira genellikle endüstriyel yan ürün olarak elde edilen) bir akışkandır; bu nedenle organik çözücüler yerine kullanıldığında çevresel etki skorları çok düşük çıkar. Örneğin kafeinsiz kahve üretiminde artık yaygınlıkla süperkritik CO₂ kullanılması, bu teknolojinin pratiğe geçmiş başarılı bir örneğidir (de Marco, 2018).

Başka bir grup alternatif ise iyonik sıvılar ve derin ötektik çözücüler (DES) gibi yeni nesil çözücülerdir. İyonik sıvılar, belirli organik katyon ve anyonların oluşturduğu eriyik tuzlardır ve genelde oda sıcaklığında sıvıdırlar (Holbrey ve Seddon, 1999). Bu maddelerin buhar basıncı çok düşüktür (uçucu değildir), dolayısıyla atmosfere yayılmazlar; ayrıca sonsuz çeşitlilikte tasarlanabildikleri için hedef reaksiyon için özel olarak yapılandırılabilirler. Bazı iyonik sıvılar ve DES'ler biyobozunur ve toksik olmayan bileşenlerden üretilebilmektedir (Benvenuti, 2019). Ancak her

iyonik sıvı "yeşil" değildir; bu alanda da tasarım yoluyla güvenli çözücü geliştirme yaklaşımı benimsenmektedir. Yine de genel olarak, uçuculuklarının olmaması nedeniyle iyonik sıvılar hava kalitesi açısından avantajlı görülür ve atık çözücü envanterinde kaybolmadıkları için geri kazanımları mümkündür.

2.3 Tehlikeli Kimyasalların İndekslenmesi

Yeşil kimya açısından en önemli hedeflerden biri, tehlikeli kimyasalların kullanımını en aza indirmek veya daha güvenli alternatiflerle ikame etmektir. Bunu başarabilmek için öncelikle hangi kimyasalların ne derece tehlikeli olduğunun bilimsel bir sınıflandırması yapılmalıdır. Bu amaçla geliştirilen çeşitli tehlike indeksleme ve sınıflandırma sistemleri hem düzenleyici kurumlar hem de araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır.

Küresel Uyumlaştırılmış Sistem (GHS); Birleşmiş Milletler tarafından ilk kez 2003 yılında yayımlanan ve kimyasalların sınıflandırılması ile etiketlenmesinde ortak bir çerçeve sunan bir düzenlemedir (UN, *Purple Book*, 2002). GHS, fiziksel tehlikeler, sağlık tehlikeleri ve çevresel tehlikeler olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmıştır. Avrupa Birliği, ABD, Çin ve Japonya gibi pek çok ülke kendi mevzuatlarını GHS ile uyumlu hale getirmiştir. GHS'nin temel amacı, küresel ticarete kimyasal güvenliğini artırmak ve farklı ülkelerdeki sınıflandırma farklılıklarını ortadan kaldırmaktır. 2025 yılında yayımlanan 24. Revizyon (Garami vd., 2025) özellikle kanserojenlik ve üreme toksisitesi gibi sınıflandırma kriterlerini güncellemiştir. GHS aynı zamanda standart piktogramlar, işaretler, uyarı kelimeleri ve H/P ifadeleri ile uyumlu bir iletişim dili sağlar. OECD ve ILO gibi kuruluşlar bu sistemin yaygınlaşmasını desteklemişlerdir. Akademik literatürde GHS'nin kimya endüstrisinde risk iletişimini kolaylaştırdığı, ancak bazı ülkelerde uygulamanın hâlâ parça parça olduğu vurgulanmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde mevzuat uyumlaştırma süreçlerinin yavaş ilerlediği belirtilmektedir. Bununla birlikte, GHS'nin sağladığı standart terminoloji, küresel kimyasal güvenliğinde şeffaflık ve karşılaştırılabilirlik açısından kritik bir rol oynamaktadır.

GreenScreen for Safer Chemicals (Rossi vd., 2007); 2007 yılında Clean Production Action tarafından geliştirilmiş olup, endüstriyel ve akademik araştırmalarda kimyasalların tehlike temelli değerlendirilmesi için kullanılan önemli bir araçtır. GreenScreen, kimyasalları dört temel "benchmark" düzeyinde sınıflandırır: Benchmark 1 (Avoid – Very High Concern) ile Benchmark 4 (Preferred – Safer Chemical). Bu sınıflandırma; akut toksisite, genotoksisite, endokrin bozuculuk, çevresel kalıcılık ve biyobirikim gibi parametrelere dayalıdır. 2016 yılında yayımlanan Hazard Assessment Guidance v1.3 belgesi, akademik çevrelerde yaygın kullanılan referans metinlerden biridir (Wehage vd., 2016). GreenScreen aynı zamanda "Alternatives Assessment" yaklaşımının temelini oluşturmuş ve birçok eyalet (örneğin California Safer Consumer Products Program) tarafından

resmi olarak kabul edilmiştir (Smith vd., 2024). Akademik makalelerde GreenScreen'in özellikle yeşil kimya ve ürün tasarımı alanlarında önemli katkılar sunduğu rapor edilmiştir (Lam vd., 2018)). 2025 yılında yayımlanan bir "proof of concept" çalışması ise GreenScreen kriterlerine dayalı otomatik tehlike değerlendirmesi sisteminin uygulanabilirliğini göstermiştir. Bu da GreenScreen'in sadece politika aracı değil, aynı zamanda dijitalleşen kimyasal güvenlik yaklaşımlarına yön verdiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla GreenScreen, akademi ve endüstride güvenli kimyasalların seçimi için hem güncel hem de uygulanabilir bir sistem olarak önemini korumaktadır.

REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) yönetmeliği, 2006 yılında Avrupa Parlamentosu tarafından kabul edilmiş ve 2007'den itibaren uygulanmaya başlanmıştır. REACH kapsamında SVHC (Substances of Very High Concern) listesi, insan sağlığı ve çevre için yüksek risk taşıyan kimyasalların belirlenmesinde kullanılan en kritik araçlardan biridir (de Avila ve Sandberg, 2006). SVHC kriterleri arasında kanserojen, mutajen, üreme toksik (CMR) maddeler, kalıcı, biyobirikimli ve toksik (PBT) ya da çok kalıcı ve çok biyobirikimli (vPvB) maddeler yer alır (Basketter vd., 2015). Ayrıca eşdeğer düzeyde endişe yaratan endokrin bozucular da listeye dahil edilmektedir. Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA) düzenli aralıklarla SVHC aday listesini güncellemekte ve bu listeye alınan maddeler için üretici ve ithalatçılara bildirim yükümlülüğü getirmektedir. 2024 yılı itibarıyla listede 240'ın üzerinde madde bulunmaktadır (Roe vd., 2024).

Tehlikeli kimyasalların indekslenmesinde nitel sınıflandırmaların yanı sıra nicel risk puanlamaları da kullanılır. Özellikle iş sağlığı ve güvenliği alanında, bir proseste kullanılan kimyasalın uçuculuğu, izin verilen maruziyet sınırı (OEL değeri), parlama noktası gibi özelliklerini birleştirip sayısal bir risk puanı veren yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin bir laboratuvar ortamında kimyasal envanterindeki maddelere "sağlık tehlikesi skoru", "yanıcılık skoru" vb. atayan yazılımlar, riskli kimyasalları önceliklendirip yerine alternatif aramayı kolaylaştırır (Cardarelli, 2018).

Yeşil kimya bakış açısıyla, mümkün olan her durumda tehlikeli maddeyi kaynağında elimine etmek hedeflendiğinden, bu tür indeksleme araçları zararlı kimyasalların süreçlerden çıkarılacağı öncelik sıralamasını belirlemek için kullanılmaktadır. Örneğin bir üretim hattında 5 farklı solvent kullanılıyorsa ve bunlardan biri GreenScreen Benchmark-1 (çok tehlikeli) diğerleri Benchmark-2 veya 3 ise, öncelikle Benchmark-1 solventin yerine daha güvenli bir seçenek aranır (Sass vd. 2016). Benzer şekilde, bir ürün formülasyonunda SVHC listesinde yer alan bir bileşen varsa, o bileşeni çıkarmak Ar-Ge için öncelikli hedef olur. Bu kararlar, *indeksleme çalışmaları sayesinde bilimsel veriye dayalı olarak* verilir ve alternatif değerlendirme süreçleri şeffaf bir biçimde yürütülebilir.

Sonuç olarak, tehlikeli kimyasalların indekslenmesi; kimyasalların intrinsik tehlike özelliklerini sistematik biçimde sınıflandırarak yeşil kimya hedefleri doğrultusunda yönetim sağlamaktır. GHS gibi global sistemler, GreenScreen gibi bağımsız değerlendirmeler ve REACH gibi düzenleyici listeler bir arada düşünüldüğünde, günümüzde binlerce kimyasalın tehlike profili detaylıca ortaya konmuş durumdadır. Yeşil kimya uygulayıcıları bu bilgiler ışığında kimyasal seçimlerini yapabilir, yüksek riskli maddeleri süreçlerinden elimine ederek daha güvenli kimyaya doğru ilerleyebilirler. İlerleyen yıllarda, *Tasarım aşamasında güvenlik (inherently safer design)* ilkesiyle, yeni geliştirilen moleküllerin bile henüz piyasaya çıkmadan bu indekslere tabi tutularak değerlendirilmesi ve ancak güvenli ise ölçeklendirilmesi yönünde bir kültürün yerleşmesi beklenmektedir.

3 SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde "Yeşil Kimya İndeksleme Çalışmaları" başlığı altında son 20 yıldaki gelişmeler ışığında yeşil kimyanın tanımı ve ilkeleri, bu ilkelerin nicel değerlendirmesine yönelik metrikler, farklı sektörlerdeki uygulamaları, tehlikeli kimyasalların sınıflandırılması ve yeşil çözücülerin değerlendirilmesi derinlemesine incelenmiştir.

Yeşil kimya, ortaya konan 12 prensip sayesinde kimya dünyasında bir paradigma değişimi yaratmış; kirliliği reaksiyonun sonunda kontrol altına almaya odaklanan "arıtma" yaklaşımından, **kirliletmeyen süreçleri en baştan tasarlama** yaklaşımına geçilmesini sağlamıştır. Bu dönüşüm, ancak prensiplerin somut hedefler ve ölçütlerle desteklenmesiyle pratik hayata geçirilebilmiştir. Son 20 yılda geliştirilen sayısız **yeşillik metriği** ve endeks, kimyagerlere ve mühendislere süreçlerinin ne kadar çevreci olduğunu sayısal olarak değerlendirme imkanı sunmuştur. E-faktörü, atom ekonomisi, PMI gibi basit göstergelerden, birleşik hiyerarşik indekslere ve şirketlerin özel puanlama sistemlerine kadar geniş bir yelpazede araçlar ortaya çıkmıştır.

Özellikle ilaç, tarım, tekstil, kozmetik gibi sektörlerde yeşil kimya indeksleme çalışmaları somut kazanımlar getirmiştir: Birim ürün başına düşen atık ve emisyon miktarları azalmakta, tehlikeli maddeler yavaş yavaş süreçlerden çıkarılmakta (örneğin kurşunlu boyalar, kanserojen çözücüler büyük oranda terk edilmiştir), yenilenebilir kaynak kullanım oranları yükselmektedir. Örneğin ilaç sektöründe 1990'larda 100 kg atık/1 kg ürün tipik bir oran iken, şimdilerde pek çok süreçte bu değer 5-20 kg aralığına gerilemiştir (Aboagye vd. 2021). Tekstil boyama işlemlerinde su ve enerji tüketimleri yeni tekniklerle %50'den fazla azaltılabilmektedir (An vd., 2025). Bu iyileşmelerin takip ve teyit edilmesi, ancak indeksleme çalışmalarının disiplinli uygulanmasıyla mümkün olmuştur.

Tehlikeli kimyasalların indekslenmesi, hem iş güvenliği hem çevre politikaları açısından hayati önemdedir. GHS gibi uluslararası

sınıflandırmalar ve GreenScreen gibi değerlendirme sistemleri, binlerce kimyasalın "tehlike profillerini" ortaya koyarak kimya sektörüne bir risk haritası sunmuştur. Yeşil kimya, bu haritada kırmızı (yüksek riskli) görünen alanları yeşile çevirmeyi hedefler. Bu doğrultuda alternatiflerin geliştirilmesi (örneğin cıva katalizör yerine enzime dayalı kataliz (Wu vd., 2021), krom kaplama yerine alternatif kaplamalar (Vernhes vd., 2013) vb.) hız kazanmıştır.

Çözücüler konusunda, belki de yeşil kimyanın en somut başarılarından söz etmek mümkündür: Yeni geliştirilen reaksiyonların birçoğu ya daha güvenli çözücüler içinde gerçekleştirilmekte ya da hiç çözücü kullanmadan katı hal veya mikro-dalga gibi tekniklerle yürütülmektedir (Kharissova vd., 2019). Endüstri genelinde dioksan, benzen, kloroform gibi problemli çözücülerin kullanımı ciddi ölçüde gerilemiştir. Kurulan yeni tesislerde VOC yakalama ve geri dönüşüm sistemleri adeta standart hale gelmektedir (Winterton, 2021).

Tüm bu gelişmeler, **sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle** de örtüşmektedir. Nitekim Birleşmiş Milletler'in 2030 hedefleri arasında bulunan "Sorumlu Tüketim ve Üretim" maddesi (Hedef 12), atıkların kaynağında azaltılması ve temiz üretim teknolojilerinin yaygınlaştırılmasını vurgular. Yeşil kimya indeksleme çalışmaları tam da bu amaca hizmet eden pratik araçlar sunmuştur.

Elbette yeşil kimya yolculuğu henüz tamamlanmış değildir. İncelediğimiz literatür, pek çok başarı örneği yanında halen çözüm bekleyen zorluklara da işaret etmektedir. Örneğin, elektronik atıklardaki toksik malzemelerin yerine ne konacağı, havacılık gibi özel alanlarda yüksek performanslı ancak sürdürülemez malzemelere alternatif bulma gerekliliği, **sürdürülebilir kimyasallar tasarlama** sürecinin halen öngörülemez yanları olması gibi konular gündemdedir (Cenci vd., 2022). Ancak, geçmiş 20 yılın deneyimi gösteriyor ki "ölçmediğiniz şeyi yönetemezsiniz" prensibiyle hareket eden yeşil kimya topluluğu, hangi alanlara yoğunlaşması gerektiğini gayet iyi bilmektedir. Örneğin mikroplastik sorunu ortaya çıktığında hemen biyobozunur polimer araştırmalarına yatırım yapılmış (Wei vd., 2021), pestisit kirliliği fark edildiğinde EIQ gibi indekslerle sorunun boyutu ortaya konmuş ve biyolojik mücadele yöntemleri desteklenmiştir (Meys vd., 2024). Dolayısıyla, indekssel yaklaşım yeşil kimyanın **sürekli gelişim döngüsünün** ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

Gelecekte, yeşil kimya indekslerinin tıpkı kalite kontrol sistemleri gibi endüstrinin rutin bir parçası olması ve her Ar-Ge projesinin başında çevresel bir skrolama yapılması hedeflenmelidir. Böylece, kimya bilimi *insan ve çevre sağlığını merkeze alan* gerçekten sürdürülebilir bir üretim paradigmasını kalıcı kılacaktır.

KAYNAKÇA

- Aboagye, E. A., Chea, J. D., ve Yenkie, K. M. (2021). Systems level roadmap for solvent recovery and reuse in industries. *iScience*, 24(10).
- Adams, J. P., Alder, C. M., Andrews, I., Bullion, A. M., Campbell-Crawford, M., Darcy, M. G., Hayler, J. D., Henderson, R. K., Oare, C. A., Pendrak, I., Redman, A. M., Shuster, L. E., Sneddon, H. F., ve Walker, M. D. (2013). Development of GSK's reagent guides – embedding sustainability into reagent selection. *Green Chemistry*, 15, 1542.
- Alfonsi, K., Colberg, J., Dunn, P. J., Fevig, T., Jennings, S., Johnson, T. A., Kleine, P. H., Knight, C., Nagy, M. A., Perry, D. A., ve Stefaniak, M. (2008). Green chemistry tools to influence a medicinal chemistry and research chemistry based organisation. *Green Chemistry*, 10, 31-36.
- An, B., Dong, M., Zhou, X., Zhang, M., Zeng, B., Shu, Y., ... ve Wang, J. (2025). Water-Saving and Less-Salt Cotton Dyeing Process Using Deep Eutectic Solvents. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13(14), 5314-5322.
- Anastas, P. T., ve Allen, D. T. (2016). Twenty-five years of green chemistry and green engineering: The end of the beginning. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(11), 5820-5820.
- Anastas, P. T., ve Warner, J. C. (2000). *Green chemistry: theory and practice*. Oxford: Oxford University Press.
- Andraos, J. (2005). Unification of reaction metrics for green chemistry: Applications to reaction analysis. *Organic Process Research & Development*, 9, 149–163.
- Andraos, J. (2006). On using tree analysis to quantify the material, input energy, and cost throughput efficiencies of simple and complex synthesis plans and networks: Towards a blueprint for quantitative total synthesis and green chemistry. *Organic Process Research & Development*, 10, 212–240.
- Andraos, J. (2015). Simplified application of material efficiency green metrics to synthesis plans: Pedagogical case studies selected from organic syntheses. *Journal of Chemical Education*, 92, 1820–1830.
- Andraos, J., ve Sayed, M. (2007). On the use of “green” metrics in the undergraduate organic chemistry lecture and lab to assess the mass efficiency of organic reactions. *Journal of Chemical Education*, 84, 1004–1010.
- Augé, J. (2008). A new rationale of reactions metrics for green chemistry. Mathematical expression of the environmental impact factor of chemical processes. *Green Chemistry*, 10, 225–231.
- Augé, J., ve Scherrmann, M.-C. (2012). Determination of the global material economy (GME) of synthesis sequences—A green chemistry metric to evaluate the greenness of products. *New Journal of Chemistry*, 36, 1091–1098.
- Basketter, D., Ashikaga, T., Casati, S., Hubesch, B., Jaworska, J., de Knecht, J., ... ve Worth, A. (2015). Alternatives for skin sensitisation: Hazard identification and potency categorisation: Report from an EPAA/CEFIC LRI/Cosmetics Europe cross sector workshop, ECHA Helsinki, April 23rd and 24th 2015. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(2), 660-666.
- Benison, C. H., ve Payne, P. R. (2022). Manufacturing mass intensity: 15 years of process mass intensity and development of the metric into plant cleaning and beyond. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100229.

- Benvenuti, L., Zielinski, A. A. F., ve Ferreira, S. R. S. (2019). Which is the best food emerging solvent: IL, DES or NADES?. *Trends in Food Science & Technology*, 90, 133-146.
- Budzinski, K., Blewis, M., Dahlin, P., D'Aquila, D., Esparza, J., Gavin, J., Ho, S. V., Hutchens, C., Kahn, D., Koenig, S. G., ... ve diğeri. (2019). Introduction of a process mass intensity metric for biologics. *New Biotechnology*, 49, 37-42.
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Boston: Houghton Mifflin.
- Cardarelli, F. (2018). Materials Occupational Health and Safety. Editör F. Cardarelli, *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference* (ss. 2003-2040). Cham: Springer International Publishing.
- Cenci, M. P., Scarazzato, T., Munchen, D. D., Dartora, P. C., Veit, H. M., Bernardes, A. M., ve Dias, P. R. (2022). Eco-friendly electronics—a comprehensive review. *Advanced Materials Technologies*, 7(2), 2001263.
- Constable, D. J. C., Curzons, A. D., ve Cunningham, V. L. (2002). Metrics to green chemistry—which are the best?. *Green Chemistry*, 4, 521-527.
- Curzons, A. D., Constable, D. J. C., Mortimer, D. N., ve Cunningham, V. L. (2001). So you think your process is green, how do you know?—Using principles of sustainability to determine what is green: A corporate perspective. *Green Chemistry*, 3, 1-6.
- De Avila, C., ve Sandberg, E. C. (2006). REACH: better knowledge and better use of chemicals in the European Union. *Chimia*, 60(10), 645-645.
- De Marco, B. A., Rechelo, B. S., Tótolí, E. G., Kogawa, A. C., ve Salgado, H. R. N. (2019). Evolution of green chemistry and its multidimensional impacts: A review. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 27(1), 1-8.
- De Marco, I., Riemma, S., ve Iannone, R. (2018). Life cycle assessment of supercritical CO₂ extraction of caffeine from coffee beans. *The Journal of Supercritical Fluids*, 133, 393-400.
- Diorazio, L. J., Hose, D. R., ve Adlington, N. K. (2016). Toward a more holistic framework for solvent selection. *Organic Process Research & Development*, 20(4), 760-773.
- Garami, A., Agreiter, I., Woo, J., Hernandez, S., Boland, M., Brown, K., ... ve Kelly, C. (2025). Laboratory diagnostic pathway for viral haemorrhagic fevers in Ireland: a review of existing guidelines and gap analysis. *Discover Viruses*, 2(1), 1-11.
- Hargreaves, C. R., ve Manley, J. B. (2008). A solvent selection guide for the pharmaceutical industry. *Green Chemistry Institute Pharmaceutical Roundtable*.
- Hartman, R., Helmy, R., Al-Sayah, M., ve Welch, C. J. (2011). Analytical method volume intensity (AMVI): A green chemistry metric for HPLC methodology in the pharmaceutical industry. *Green Chemistry*, 13, 934-939.
- Holbrey, J. D., ve Seddon, K. R. (1999). Ionic liquids. *Clean Products and Processes*, 1(4), 223-236.
- Hudlicky, T., Frey, D. A., Koroniak, C. D., Claeboe, L., ve Brammer, L. E. (1999). Toward a reagent-free synthesis. *Green Chemistry*, 1, 57-59.
- Hudson, R., Leaman, D., Kawamura, K. E., Esdale, K. N., Glaisher, S., Bishop, A., ve Katz, J. L. (2016). Exploring green chemistry metrics with interlocking building block molecular models. *Journal of Chemical Education*, 93, 691-694.
- Jiménez-González, C., Ponder, C. S., Broxterman, Q. B., ve Manley, J. B. (2011). Using the right green yardstick: Why process mass intensity is used in the pharmaceutical industry to drive more sustainable processes. *Organic Process Research & Development*, 15, 912-917.

- Joseph, P. A., Alder, C. M., Andrews, I., Bullion, A. M., Campbell-Crawford, M., Darcy, M. G., Hayler, J. D., Henderson, R. K., Oare, C. A., Pendrak, I., Redman, A. M., Shuster, L. E., Sneddon, H. F., ve Walker, M. D. (2013). Development of GSK's reagent guides – embedding sustainability into reagent selection. *Green Chemistry*, 15, 1542.
- Kharissova, O. V., Kharisov, B. I., Oliva Gonzalez, C. M., Méndez, Y. P., ve López, I. (2019). Greener synthesis of chemical compounds and materials. *Royal Society Open Science*, 6(11), 191378.
- Lam, C. W., He, H., ve Schoenung, J. M. (2018). Hazardous materials characterization and assessment. Editör W. A. Rogers, *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (ss. 1-21). New York, NY: Springer.
- Machado, A. A. S. C. (2014). Bateria de métricas para avaliação da verdura material de reações de síntese. *Química Nova*, 37, 1094–1109.
- Martínez, J., Cortés, J. F., ve Miranda, R. (2022). Green chemistry metrics, a review. *Processes*, 10(7), 1274.
- McElroy, C. R., Constantinou, A., Jones, L. C., Summerton, L., ve Clark, J. H. (2015). Towards a holistic approach to metrics for the 21st century pharmaceutical industry. *Green Chemistry*, 17, 3111–3121.
- Meys, E. L., Mineau, P., Werts, P., Nelson, S. G., Larson, A., ve Hutchison, W. D. (2024). Assessment of insecticide risk quantification methods: Introducing the Pesticide Risk Tool and its improvements over the Environmental Impact Quotient. *Journal of Integrated Pest Management*, 15(1), 9.
- Monteith, E. R., Mampuy, P., Summerton, L., Clark, J. H., Maes, B. U. W., ve McElroy, C. R. (2020). Why they might be misusing process mass intensity (PMI) and a methodology to apply it effectively as a discovery level metric. *Green Chemistry*, 22, 123–135.
- Munshi, P., ve Bhaduri, S. (2009). Supercritical CO₂: A twenty-first century solvent for the chemical industry. *Current Science*, 97(1).
- Prat, D., Hayler, J., ve Wells, A. (2014). A survey of solvent selection guides. *Green Chemistry*, 16, 4546-4551.
- Prat, D., Pardigon, O., Flemming, H. W., Letestu, S., Ducandas, V., Isnard, P., Guntrum, E., Senac, T., Ruisseau, S., Cruciani, P., ve Hosek, P. (2013). Sanofi's Solvent Selection Guide: A step toward more sustainable processes. *Organic Process Research & Development*, 17, 1517-1525.
- Roe, H. M., Tsai, H. H. D., Ball, N., Wright, F. A., Chiu, W. A., ve Rusyn, I. (2024). A systematic analysis of read-across adaptations in testing proposal evaluations by the European Chemicals Agency. *ALTEX*, 42(1), 22.
- Roschangar, F., Sheldon, R. A., ve Senanayake, C. H. (2015). Overcoming barriers to green chemistry in the pharmaceutical industry—The green aspiration level™ concept. *Green Chemistry*, 17, 752–768.
- Roschangar, F., Zhou, Y., Constable, D. J. C., Colberg, J., Dickson, D. P., Dunn, P. J., Eastgate, M. D., Gallou, G., Hayler, J. D., Koenig, S. G., ... ve diğerleri. (2018). Inspiring process innovation via an improved green manufacturing metric: iGAL. *Green Chemistry*, 20, 2206–2211.
- Rossi, M., ve Heine, L. G. (2007). The Green Screen for Safer Chemicals: Evaluating flame retardants for TV enclosures. *Clean Production Action*.
- Sass, J., Heine, L., ve Hwang, N. (2016). Use of a modified GreenScreen tool to conduct a screening-level comparative hazard assessment of conventional silver and two forms of nanosilver. *Environmental Health*, 15(1), 105.

- Sheldon, R. A. (1992). Organic synthesis: Past, present and future. *Chemistry & Industry*, 23, 903–906.
- Sheldon, R. A. (2017). The E factor 25 years on: The rise of green chemistry and sustainability. *Green Chemistry*, 19, 18–43.
- Smith, M. N., Stump, S., van Bergen, S. K., Davies, H. G., Fanning, E., Eaton, R., ... ve Zarker, K. (2024). A hazard-based framework for identifying safer alternatives to classes of chemicals: A case study on phthalates in consumer products. *Environmental Health Perspectives*, 132(4), 045002.
- Song, J. J., Frutos, R. P., Tampone, T., ve Senanayake, C. H. (2012). Industrial applications of asymmetric synthesis: Asymmetric synthesis as an enabler of green chemistry. Editör E. M. Carreira ve H. Yamamoto, *Comprehensive Chirality: Industrial Applications of Asymmetric Synthesis* (Cilt 9, ss. 46–72). Amsterdam: Elsevier Science.
- Tobiszewski, M., Tsakovski, S., Simeonov, V., Namieśnik, J., ve Pena-Pereira, F. (2015). A solvent selection guide based on chemometrics and multicriteria decision analysis. *Green Chemistry*, 17(10), 4773–4785.
- Trost, B. M. (1991). The atom economy—a search for synthetic efficiency. *Science*, 254, 1471–1477.
- Vernhes, L., Azzi, M., ve Klemberg-Sapieha, J. E. (2013). Alternatives for hard chromium plating: Nanostructured coatings for severe-service valves. *Materials Chemistry and Physics*, 140(2-3), 522–528.
- Wei, X. F., Nilsson, F., Yin, H., ve Hedenqvist, M. S. (2021). Microplastics originating from polymer blends: an emerging threat?. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 4190–4193.
- Wehage, K., Chenhansa, P., ve Schoenung, J. M. (2016). An open framework for automated chemical hazard assessment based on GreenScreen for Safer Chemicals: A proof of concept. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(1), 167–176.
- Winterton, N. (2021). The green solvent: A critical perspective. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(9), 2499–2522.
- Wu, S., Snajdrova, R., Moore, J. C., Baldenius, K., ve Bornscheuer, U. T. (2021). Biocatalysis: Enzymatic synthesis for industrial applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 60(1), 88–119.
- CHEMICALS, L. O. (2002). *Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals (GHS)*.
- de Marco, I., Riemma, S., ve Iannone, R. (2018). Life cycle assessment of supercritical CO₂ extraction of caffeine from coffee beans. *The Journal of Supercritical Fluids*, 133, 393–400.
- Hargreaves, C. R., ve Manley, J. B. (2008). A solvent selection guide for the pharmaceutical industry. *Green Chemistry Institute Pharmaceutical Roundtable*.
- Joseph, P. A., Alder, C. M., Andrews, I., Bullion, A. M., Campbell-Crawford, M., Darcy, M. G., Hayler, J. D., Henderson, R. K., Oare, C. A., Pendrak, I., Redman, A. M., Shuster, L. E., Sneddon, H. F., ve Walker, M. D. (2013). Development of GSK's reagent guides – embedding sustainability into reagent selection. *Green Chemistry*, 15, 1542.
- Kharissova, O. V., Kharisov, B. I., Oliva Gonzalez, C. M., Méndez, Y. P., ve López, I. (2019). Greener synthesis of chemical compounds and materials. *Royal Society Open Science*, 6(11), 191378.

- Meys, E. L., Mineau, P., Werts, P., Nelson, S. G., Larson, A., ve Hutchison, W. D. (2024). Assessment of insecticide risk quantification methods: Introducing the Pesticide Risk Tool and its improvements over the Environmental Impact Quotient. *Journal of Integrated Pest Management*, 15(1), 9.
- Prat, D., Hayler, J., ve Wells, A. (2014). A survey of solvent selection guides. *Green Chemistry*, 16, 4546–4551.
- Roe, H. M., Tsai, H. H. D., Ball, N., Wright, F. A., Chiu, W. A., ve Rusyn, I. (2024). A systematic analysis of read-across adaptations in testing proposal evaluations by the European Chemicals Agency. *ALTEX*, 42(1), 22.
- Roschangar, F., Sheldon, R. A., ve Senanayake, C. H. (2015). Overcoming barriers to green chemistry in the pharmaceutical industry—The green aspiration level™ concept. *Green Chemistry*, 17, 752–768.
- Roschangar, F., Zhou, Y., Constable, D. J. C., Colberg, J., Dickson, D. P., Dunn, P. J., Eastgate, M. D., Gallou, G., Hayler, J. D., Koenig, S. G., ... ve diğerleri. (2018). Inspiring process innovation via an improved green manufacturing metric: iGAL. *Green Chemistry*, 20, 2206–2211.
- Rossi, M., ve Heine, L. G. (2007). The Green Screen for Safer Chemicals: Evaluating flame retardants for TV enclosures. *Clean Production Action*.
- Sass, J., Heine, L., ve Hwang, N. (2016). Use of a modified GreenScreen tool to conduct a screening-level comparative hazard assessment of conventional silver and two forms of nanosilver. *Environmental Health*, 15(1), 105.
- Smith, M. N., Stump, S., van Bergen, S. K., Davies, H. G., Fanning, E., Eaton, R., ... ve Zarker, K. (2024). A hazard-based framework for identifying safer alternatives to classes of chemicals: A case study on phthalates in consumer products. *Environmental Health Perspectives*, 132(4), 045002.
- Tobiszewski, M., Tsakovski, S., Simeonov, V., Namieśnik, J., ve Pena-Pereira, F. (2015). A solvent selection guide based on chemometrics and multicriteria decision analysis. *Green Chemistry*, 17(10), 4773–4785.
- Vernhes, L., Azzi, M., ve Klemberg-Sapieha, J. E. (2013). Alternatives for hard chromium plating: Nanostructured coatings for severe-service valves. *Materials Chemistry and Physics*, 140(2-3), 522-528.
- Wei, X. F., Nilsson, F., Yin, H., ve Hedenqvist, M. S. (2021). Microplastics originating from polymer blends: an emerging threat?. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 4190-4193.
- Wehage, K., Chenhansa, P., ve Schoenung, J. M. (2016). An open framework for automated chemical hazard assessment based on GreenScreen for Safer Chemicals: A proof of concept. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(1), 167-176.
- Winterton, N. (2021). The green solvent: A critical perspective. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(9), 2499-2522.
- Wu, S., Snajdrova, R., Moore, J. C., Baldenius, K., ve Bornscheuer, U. T. (2021). Biocatalysis: Enzymatic synthesis for industrial applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 60(1), 88-119.

Fen ve Mühendislik Fakültelerinde Fizik Dersinin Öğretiminde Karşılaşılan Zorluklar

Prof. Dr. Musa GÖGEBAKAN

- 1- Prof. Dr. Musa GÖGEBAKAN; Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü. gogebakan@ksu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5104-2874

ÖZET

Bu çalışmada, Üniversitelerin Fen ve Mühendislik Fakültelerinde, fizik dersinin öğretilmesi sürecinde karşılaşılan zorluklar, bu zorlukların nedenleri ve kaynakları analiz edilmiş ve bu zorlukların üstesinden gelmek için alınması gereken tedbirler ve bazı önerileri sunulmuştur. Bunun yanında fiziksel kavramların tanımlanmasında yapılan yanlışlıklar veya yanlış anlamalar/anlamlandırmalarla ilgili örnekler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler –Fiziksel kavramlar, Fizik öğrenimi, öğretim zorlukları, kavramsal yanlışlık, Eğitim.

GİRİŞ

Bilim ve teknolojiye üstünlüğü elinde bulunduran ülke ve uygarlıklar, yönetim ve karar alma süreci başta olmak üzere her alanda üstün ve etkin konumdadır (James, 2017; Schwab, 2016). Bunun için başta fizik olmak üzere tüm temel bilimlere gereken önemin verilmesi ve temel bilimlerle ilgili derslerin eğitim-öğretim sürecinin vazgeçilmez bir parçası olması gereklilikten ziyade bir zorunluluktur. Yenilikçi ve teknolojik gelişmelere ayak uydurmak ancak bu şekilde mümkün olabilir. Geçmişten günümüze temel bilimlerin önemini kavrayarak bu bilimlerin öğretimine gerekli önemi veren ülkeler tarih sahnesinde daha güçlü ve etkili bir şekilde varlığını ve etkinliğini sürdürmeyi başarmıştır. Tarihte bazı imparatorluklar bilim ve teknolojiye üstünlüğünü sürdüremediği için tarih sahnesinden silinmiştir. Büyük Britanya (İngiltere) gibi ülkeler bilim ve teknolojik gelişmelere önem vererek bu üstünlüğünü korumasını başarmakla kalmamış, bilim ve teknolojik gelişmelere öncülük ederek dünyadaki egemenliğini ve etkinliğini sürdürmeyi başarmıştır. Günümüzde teknolojik gelişmeler hızlı bir şekilde ilerlemekte, bilimin ve bilginin önemi her geçen gün biraz daha artmakta, fen ve teknolojik bilgilerin etkileri günlük yaşantımızın her alanında karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla, fen ve teknolojinin temel yapı taşı olan bilim dalları ile ilgili derslerin eğitim-öğretim müfredatında yeterli bir şekilde yer alması ve bu temel derslerin doğru bir şekilde öğretiminin toplumların teknolojik bakımdan gelişmesinde ve bu gelişimin devamlılığı açısından önemli bir yeri bulunmaktadır. Son yıllarda ön plana çıkarak günlük yaşantımızdaki her şeyi etkileyen ve hayatımızı kolaylaştıran teknolojik gelişmelerin hemen hepsinde fizik prensipleri kullanılmaktadır (Keten ve Amandeep, 2024). Örneğin, hayatımıza hızlı bir şekilde giren yapay zekânın teknolojik gelişmelerde ön planda olması ve her alanda yoğun bir şekilde kullanılması bilime ve bilim insanlarına verilmesi gerek önemin daha da armasına neden olmuştur. Hiç şüphesiz teknolojik gelişmeler önümüzdeki yıllarda da hızlı bir şekilde ilerlemeye devam edecektir. Bu gelişme ve ilerlemenin gerisinde kalmamak için başta fizik olmak üzere temel bilimlere gerekli önemin verilmesi, ilgili derslerin orta öğretimden

itibarın objektif, akılcı, bilimsel ve teknolojik araçlarla donatılmış modern bir şekilde öğretilmesi, bilimsel ve teknolojik ilerlemenin alt yapısını oluşturacaktır. Temel bir bilim dalı olan fizik prensipleri ve elde ettiği sonuçlar diğer bilim dallarını da önemli ölçüde etkilemekte ve bu özelliğinden dolayı pratikte geniş uygulama alanları bulmaktadır (Çengel vd. 2020; Young vd. 2016; Serway vd. 2004).

Fizik evrende bulunan büyük-küçük her şeyi kapsayan, enerji, madde, hareket ve bunlar arasındaki ilişkiyi araştıran, doğal olayları ve doğa kanunlarını anlamada ve anlatımında kullanılan, doğanın temel yasalarını araştıran ve bu yasaları matematiksel olarak ifade eden en önemli ve temel bir bilim dalıdır (Young vd. 2016; Serway ve [Beichner](#), 2004; Karaoğlu, 2012). Teknolojik gelişmelerde fizik kuralları önemli bir yer tutar. Başta sağlık sektörü olmak üzere diğer birçok alanda oldukça yoğun bir şekilde kullanılan X-ışınları (Röntgen) ve lazerlerin geliştirilmesinde, MR, tomografi cihazlarının geliştirmesinde, kanser hastalığının teşhis ve tedavisinde kullanılan cihazlar, haberleşmede kullanılan opto-elektronik cihazlar, işitme cihazları, havacılık ve özellikle savunma sanayinde kullanılan insansız hava araçlarının ve dronların yapımında ve kullanımında, uzay sanayinde ve özellikle gezegenlere ve gök cisimlerine gönderilen uzay araçlarında, teleskopların yapımında ve kullanımında fizik yasalarından yararlanılır. Fizik prensiplerinin başta mühendislik bilimleri olmak üzere astrofizik, kimya, tıp vb. birçok farklı bilim dallarıyla sıkı bir ilişkisi vardır. Fizik biliminin ve prensiplerinin birçok alanda kullanılması ve bu denli günlük yaşantımızın içinde olması bu bilime bir ders olarak gerekli önemim verilmesi ve eğitim-öğretim sürecinde yeteri kadar öğretilmesi bir gereklilik ve zorunluluktur. Dolayısıyla, fencilerin ve mühendislerin yeterli bir fizik öğretimi görmesi yadsınamaz bir gerçektir (Serway ve [Beichner](#), 2004; Karaoğlu, 2012).

Üniversitelerde farklı birimlerdeki fizik derslerini vermek amacıyla kurulan Fen Fakülteleri ve Fen Edebiyat Fakülteleri yükseköğretim sisteminin önemli yapı taşlarından biridir. Ülkemizde ilk Fen Fakültesi 1933 yılında İstanbul Üniversitesi bünyesinde kurulmuştur. 1943 de Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi kurulmuş. Sonraki yıllarda ve özellikle 1950’lerden itibaren Üniversitelerde Fen Fakülteleri yaygınlaşmaya başlamış ve birçok üniversite bünyesinde bu fakülteler eğitim öğretim hayatına başlamıştır. Bu fakültelerin bünyesinde kurulan Fizik Bölümleri zaman içinde hem fizikçi ve fizik öğretmeni ve hem de araştırma merkezleri kurarak bilimsel araştırmalar yapan, lisansüstü eğitim veren ve uluslararası bilimsel projelere katılarak proje üreten bölümler haline gelmiştir.

Sonraki yıllarda ve özellikle 1980 ‘li yıllardan sonra birçok üniversitede müstakil bir şekilde öğretim faaliyetini sürdüren Fen Fakülteleri ile Edebiyat Fakülteleri, yönetim kolaylığı sağlamak, kaynak israfını önleyerek sınırlı kaynakları daha verimli kullanmak, vb. nedenlerden dolayı Fen–Edebiyat

Fakülteleri adı altında birleştirilmiştir. Bu fakülteler günümüzde de birçok üniversitede hâlâ hem araştırma hem de eğitim öğretim faaliyetleri açısından oldukça önemli temel bir rol üstlenmektedir. Üniversitelerdeki fizik dersleri Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyeleri tarafından öğretilmektedir.

Fen Fakültelerin kuruluş amaçları;

- 1 Fizik ve Fen Bilimleri ile ilgili araştırmalar yaparak bilimsel ve teknolojik gelişmeyi desteklemek. Bu bağlamda bilimsel çalışmalar yaparak, bilimsel ve nitelikli yayınlar yapmak, ekonomik değeri olan ve teknolojik gelişmeye öncülük edecek projeler üretmek, uluslararası paydaşlarla iş birlikleri yaparak bilgi üretmek ve paylaşmak.
- 2 Temel fizik eğitimi vermek. Başta fizik bölümü olmak üzere, kimya, biyoloji, matematik ve mühendislik fakültelerindeki fizikle ilgili dersleri öğretmek, temel bilimlerde nitelikli eğitim sunmak ve bu alanlarda araştırmalara destek vermek.
- 3 Üniversitelerin ihtiyacı olan ve üniversitelerdeki eğitim-öğretim ve araştırma faaliyetlerini yürütecek ve bu faaliyetlerin devamlılığını sağlayacak akademik kadro sağlamak. Lisansüstü programlarla üniversitelerde çalışacak araştırma görevlisi, öğretim üyesi yetiştirmek. Nitelikli ve uluslararası saygınlığı olan fizikçi bilim insanı yetiştirmek
- 4 Öğretmen yetiştirmek. Özellikle ortaöğretimin ihtiyacı olan matematik, fizik kimya, biyoloji vb temel bilimlerde branş öğretmeni yetiştirmek.
- 5 Sanayinin ihtiyacı olan nitelikli fizikçi yetiştirmek. Sanayi kuruluşlarında başta AR-GE olmak üzere, ürün kalitesinin ve verimliliğinin iyileştirmesinde yardımcı olacak nitelikli teknik eleman yetiştirmek.

Üniversitelerde mühendislik ve fen fakültelerinde fizik derslerinin verilme amaçları oldukça geniş olmakla beraber bunu kısaca; her konuda karşılaşılan karmaşık problemleri anlama ve çözüm önerisi geliştirmek olarak ifade etmek mümkündür. Üniversitelerde fizik dersleri sadece dersle ilgili teorik bilgi ve tanımları öğretmek için değil, aynı zamanda uygulama, düşünme, kıyaslama, eleştir ve analiz becerisi kazandırmak için verilir. Fizik bilmeyen bir mühendisin, karşılaştığı karmaşık sistemleri veya problemleri doğru şekilde anlaması ve çözüm üretmesi oldukça zordur. Problemleri doğru bir şekilde anlayarak çözüm üretmek veya öneri sunmak için mutlaka fizik prensiplerinin bilinmesi lazımdır. Özetle fizik derslerinin öğretilme amaçlarını aşağıdaki gibi ana başlıklar altında sıralayabiliriz (Sarı, 2013; Ünal vd. 2004; Çepni vd. 1997; Ayvaci ve Bebek, 2018). Bunlar;

1. Öğrencilere analitik düşünme, anlama, kıyaslama ve sonuç çıkarma yeteneği kazandırmak.
2. Fizik ilkelerine dayanan mühendislik problemlerini anlayabilmek ve bu problemlerin nasıl çözülebileceği konusunda düşünce becerisi geliştirmek.
3. Karşılaştıkları ve fizik prensiplerine dayanan problemler için matematiksel modelleme becerisi geliştirmek ve bir problemi matematiksel modele dökerek doğru bir şekilde çözümleme becerisi kazandırmak.
4. Öğrencilere neden-sonuç ilişkisi kurma, hipotez geliştirme ve mantıksal düşünme yollarını öğrenmek.
5. Analitik ve eleştirel düşünmenin gelişimine öncülük etmek
6. Mühendislikte karşılaşılan karmaşık sorunlara sistematik yaklaşma alışkanlığı kazandırır.
7. Deneysel yöntemlerle tanışmak, deneysel test, ölçüm ve analiz yapmak, veri toplamak verileri analiz ederek sonuç çıkarma, sonuçları yorumlama ve karşılaştırma yapma becerisi kazandırmak.
8. Öğrenciyi multidisipliner çalışmalara hazırlamak. Bir mühendislik problemini, fizikçilerde, kimyacılar ve matematikçilerden yardım alarak nasıl çözülebileceğini öğretmek.

Tablo 1 de Üniversitelerin mühendislik ve fen fakültelerinde okutulan temel fizik dersleri verilmiştir.

Tablo 1. Mühendislik ve Fen Fakültelerinde okutulan temel fizik dersleri

Bölüm	Fizik Dersler
Kimya Bölümü	Genel Fizik, Mekanik, Elektrik ve Manyetizma
Matematik	Genel Fizik, Mekanik, Elektrik ve Manyetizma
Biyoloji Bölümü	Genel Fizik, Mekanik, Elektrik ve Manyetizma
Makine Mühendisliği	Genel Fizik, Mekanik, Elektrik ve Manyetizma, Biyofizik
Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Genel Fizik, Mekanik, Elektrik ve Manyetizma, Termodinamik, Akışkanlar
İnşaat Mühendisliği	Genel Fizik, Mekanik, Elektrik, Elektromanyetizma
Bilgisayar Mühendisliği	Genel Fizik, Mekanik Statik, Dinamik, Malzeme Mekaniği
Malzeme Mühendisliği	Genel Fizik, Mekanik, Elektriksel Devreler, Optoelektronik
Gıda Mühendisliği	Genel Fizik, Mekanik, Elektrik ve Manyetizma,
Çevre Mühendisliği	Katıhal Fiziği, Termodinamik,
Tekstil Mühendisliği	
Havacılık-Uzay Mühendisliği	

	Akışkanlar Genel Fizik, Mekanik, Elektrik ve Manyetizma Genel Fizik, Mekanik, Elektrik ve Manyetizma Genel Fizik, Mekanik, Elektrik ve Manyetizma Genel Fizik, Mekanik, Termodinamik, Elektromanyetizma
--	---

1. Yöntem

Bu çalışma, Üniversitelerin Fen ve Mühendislik fakültelerinde, fizik derslerinin öğretilmesi sürecinde karşılaşılan temel zorlukları belirlemek, bu zorlukların nedenlerini ve kaynaklarını araştırmak amacı ile yapılmıştır. Çalışmada, veri toplama aracı olarak, öğrencilerin sınav sonuçları, sınıf içi gözlemler ve öğrencilerle yüz yüze yapılan görüşme yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca fizik derslerini veren öğretim üyelerinin görüşlerine de başvurulmuştur. Bu yöntemle elde edilen veriler değerlendirilerek sebep sonuç ilişkisi kurulmuştur. Çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Fakültesi ve Mühendislik Fakültesinde 2015-2025 öğretim yılları arasında öğrenim gören toplam 302 öğrenciyi kapsamaktadır. Araştırma, Mühendislik Fakültesi; Makine Mühendisi (73 öğrenci), Elektrik elektronik Mühendisi (66 öğrenci) ve İnşaat Mühendisi (58 öğrenci) ve Fen Fakültesi; Kimya Bölümü (37 öğrenci) ve Matematik Bölümü (68 öğrenci) öğrencilerini kapsamaktadır. Bunun yanında fiziksel kavramlarının tanımlanmasında yapılan yanlışlıklar veya yanlış anlamalar/anlamlandırmalar belirlenmiştir. Araştırma sonucunda yanlış anlaşılan veya anlamlandırılan fiziksel kavramların ve tespit edilen zorlukların üstesinden gelmek için alınması gereken tedbirler ve bazı önerileri sunulmuştur.

2. Fizik Öğretiminde Karşılaşılan Zorluklar

Günlük hayatımızın her alanında karşımız çıkan ve teknolojik gelişmenin teme taşlarından biri olan fizik, mühendislik ve fen fakültelerinin öğrenciler tarafından genellikle zorlayıcı, sıkıcı ve çoğu zaman meslek hayatlarında işlerine yaramayacak bir ders olarak algılanmaktadır (Ayvacı ve Bebek, 2018). Bunun yanında fizik dersini, çalışarak ve öğrenerek geçmenin zor olduğu önyargısı nedeniyle öğrenciler bu derse gerekli önemi vermemektedir. Bu çalışmada, üniversitelerin Fen ve Mühendislik Fakültelerinde okutulan fizik derslerinin öğretiminde karşılaşılan temel sorunlar, zorluklar ve bu sorun ve zorlukların kaynakları araştırılmış, öğrencilerin fiziksel kavramları anlamada ve tanımlamada yaptıkları yanlışlıklar veya yanlış anlamalar/anlamlandırmalar ve öğretim metotlarının yetersizliği gibi birçok faktör ele alınmıştır.

Şekil 1 de Fizik dersinin öğretimi ve öğrenimi sürecinde karşılaşılan zorluklar şematik olarak verilmiştir. Şekil 1 de görüldüğü gibi üniversitelerde fizik dersinin öğretimi ve öğrenimi sürecinde karşılaşılan zorluklar ÖSYM’ den öğrenciye, öğrenciden öğreticiye (dersin hocası) ve yöntemle kadar birçok konu başlığı içermektedir. Bu konu başlıkları aşağıda kısa bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 1. Fizik dersinin öğretimi ve öğrenimi sürecinde karşılaşılan zorluklar.

ÖSYM: Her yıl düzenli olarak ÖSYM tarafından yapılan Üniversiteye giriş sınavında bazı fakülte be bölümleri kazanmak için taban puan uygulamasının olmaması veya bu puanların düşük olması. Başta fizik ve matematik dersleri olmak üzere fen dersleri mühendislik öğreniminin temelini oluşturmaktadır. Mühendislik ve fen fakültelerine girebilmek için belli sayıda fizik ve matematik sorusunu yapma zorunluluğu olmadığından, hiç veya az sayıda fizik veya matematik sorusu cevaplandırarak bu fakültelere girebilme olanağı veren mevcut ÖSYM sınav sistemi fizik gibi temel derslerin öğretilmesinde yaşanan zorlukların en önemli bir kaynağı olarak düşünülmektedir. Bunun için mutlaka taban puan uygulaman ve belli sayıda fizik ve matematik sorusu cevaplandırma şartı getirilmelidir.

Öğrenci: Fizik; mühendislik ve fen fakültelerinde problem çözme, modelleme ve analitik düşünme becerilerinin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak Türkiye’de ve dünyada birçok üniversitede fizik dersleri, öğrenciler tarafından anlaşılması zor, soyut kavramlar içeren,

meslek hayatlarında işlerine yaramayacak ve motivasyon kırıcı bir ders olarak algılanmaktadır. Bu durum öğrenciyi başarısızlığa götürmektedir. Diğer taraftan, mühendislik ve fen fakültelerine giren öğrenciler yeteri kadar matematik ve fizik bilgisine sahip olmadan bu fakültelere gelmektedir. Bu fakülte veya bölümleri, öğrenciler isteyerek veya ilgi duyarak değil de, çoğu zaman ailelerinin istemesi ve hatta zorlaması sonucu tercih etmektedir. Bu durum, öğrencinin öğrenim motivasyonunu düşüren önemli bir etkidir. Öğrencilerin, öğretim sürecinde derse plansız ve sadece sınav zamanında çalışmaları fizik dersinin öğrenilmesindeki temel problemlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Derse devam eden öğrenciler sınıfta dersi bir şekilde öğrenmeleri mümkündür. Ancak sınıfta öğrenilen bilgi ve kavramların kalıcılığını sağlaman ve bunu arttırmak adına ne bir konu tekrar ne de soru çözümü yapmamaları sınıfta öğrenilen konuların kalıcılığını sağlamamaktadır. Dolayısıyla böyle bir durum dersin anlamlı ve kalıcı olarak öğrenilmesini olumsuz yönde etkilemektedir. Öğrenciler kendi bilgileriyle günlük yaşamdaki fizik ilkeleri arasında bir bağlantı kurmaya çalışıp bu bilgilerin günlük yaşantımızla nasıl iç içe olduğunu anlamaya çalışmalıdırlar. Örneğin, kütle çekiminin veya sürtünme kuvvetinin olmadığı bir durumda günlük yaşantımızın nasıl olacağını hayal etmelidirler.

Öğretici: Fizik dersinin öğreniminde karşımıza çıkan diğer önemli bir sorun, öğreticinin veya daha açık bir ifadeyle dersin hocasının yetersizliğidir. Bir öğreticinin fizik dersini tam anlamıyla ve öğrencinin anlayabileceği bir şekilde anlatabilmesi için kendisinin bilgi olarak yeterli olması gereklidir. Öğretici kendisi dersle ilgili konuyu tam olarak bilmezken öğrenciye konuyu yeterli bir şekilde kavratması beklenemez. Böyle bir durumda öğretici ancak ezber ve yetersiz bilgi verebilir. Temel fizik bilgisine tam olarak hâkim olmayan öğreticiler fizikteki soyut kavramları öğrenciye aktarırken kavram yanlışlarına veya fiziksel kavramları yanlış anlamlandırmaya neden olabilmektedir. Dersin hocası sadece üniversitede öğrendiği bilgiyle kalmakta ve kendini farklı kaynaklar okuyarak geliştirmemektedir. Böyle bir durumda, öğrencilerin fizik dersine olan ilgisini tamamen ilgisizliğe dönüştürebilmektedir. Dersi veren hocaların, fizik dersini öğrenmek kadar, öğretiminin de zor olduğunun bilincinde olması gereklidir. Dersin öğreticisi farklı kaynaklardan yararlanarak ders notlarını güncellemeli ve derse donanımlı bir şekilde girerek, zor olarak algılanan fiziksel kavramların öğrenciler tarafında doğru bir şekilde anlaşılması ve öğrenilmesi için gayret saf etmelidir. Aksi takdirde bu dersin öğretilmesi oldukça zor olacaktır.

Önyargı: Öğrenci daha fizik dersine girmeden ve hatta dersin hocasıyla tanışmadan bu dersin zor olduğunu, çalışarak dersi geçmenin güç olduğunu düşünmekte ve derse bu önyargıya girmektedir. Bu ön yargısı belki de ortaöğretimde fizik dersini öğrenmekteki zorluklardan veya benzer bölümlerde okuyan öğrencilerin bu derse bakış açılarından ve söylemlerinden kaynaklanıyor olabilmektedir. Ders esnasında, dersin soyut

kavramlar ve formüller içerdiğini gören öğrencilerin ön yargısı daha da pekişmektedir. Dolayısıyla sınıf içinde derse gereken ilgiyi vermemekte, derse sadece sınav sürecinde çalışmakta, mantık kurma-analitik düşünme yerine ezberleme yoluyla dersi başarmayı düşünmektedir. Bu ise öğrenciyi başarısızlığa götürmektedir.

Yöntem: Fizik dersleri çoğunlukla klasik ders anlatımı ve problem çözümüne dayanmaktadır. Bu derslerin anlatımında konunun anlaşılması için deney ve gözlemlerin olmaması veya yetersiz olması düz anlatın yapılması bu dersin öğrenilmesini zorlaştıran diğer bir etkidir. Soyut kavramlar ve formüller içeren fizik dersinin öğrenciler tarafında doğru ve kalıcı bir şekilde öğrenilebilmesi için fiziksel kavram ve formüllerin güncel yaşantımızdaki olaylarla ilişkilendirilmesi ve formüllerin ezberlenmesi yerine, matematiksel ve mantıksal ilişkilerle formüllerin elde edilmesi öğretilmelidir. Araştırma gezisi, gözlem ve laboratuvar etkinliklerine daha fazla zaman ayırarak öğrencilerin fizikle ilgili somut bir şeyler görmesi sağlanmalıdır [8-9].

Ders içeriği ve Formatı: Üniversitelerin muhtelif fakültelerinde okutulan fizik derslerinin soyut kavramlar ve formül içermesi ders öğreniminde öğrencileri zorlayan diğer bir önemli etkidir. Verilen bir soruyu çözebilmek için hangi formülü kullanacağı veya hangi metodu takip edeceği konusunda tereddütler yaşanmaktadır. Fizik problemlerini çözmek için gerekli formülleri ezberlemek yerin, bu formüllerin nasıl elde edildiğin mantıksal ilişki kurarak öğretilmesi gereklidir. Aslında çok fazla gibi görülen formüller bir veya iki formülün ilişkilendirilmesi ile kolayca elde edilebileceği öğretilmelidir.

Program: Konu ağırlığı ve fizik dersine ayrılan zamanın yetersiz olması fizik derslerinin öğretilmesindeki diğer bir sorundur. . Genel fizik dersleri mühendislik ve fen fakültelerinin ilk yılında haftalık ders programında 3-5 saat arasında yer almaktadır. Bu yetersiz bir süredir. Kısıtlı bir süre zarfında fizik konularının detaylı bir şekilde anlatılması oldukça zordur. Bu derslere ayrılan zamanın artırılması ve birden fazla yıla yayılması gereklidir.

Ümitsizlik ve gelecek kaygısı: Fizik dersine önyargı ile bakan öğrenciler, bu dersi öğrenerek geçme konusunda bir ümitsizlik yaşamaktadır. Dahası öğrenim gördüğü fakülte ve bölümden mezun olduktan sonra kendi mesleği ile ilgili bir işe girmenin zor olduğunu düşünmekte ve bu durum başarısını zorlaştırmaktadır. Gelecekte yapacağı meslek için fizik derslerinin pek de önemli olmayacağını düşünmekte ve bu ders için fazla zahmete katlanmanın gereksiz olacağı ön yargısını taşıması dersi öğrenmedeki başarısını düşürmektedir.

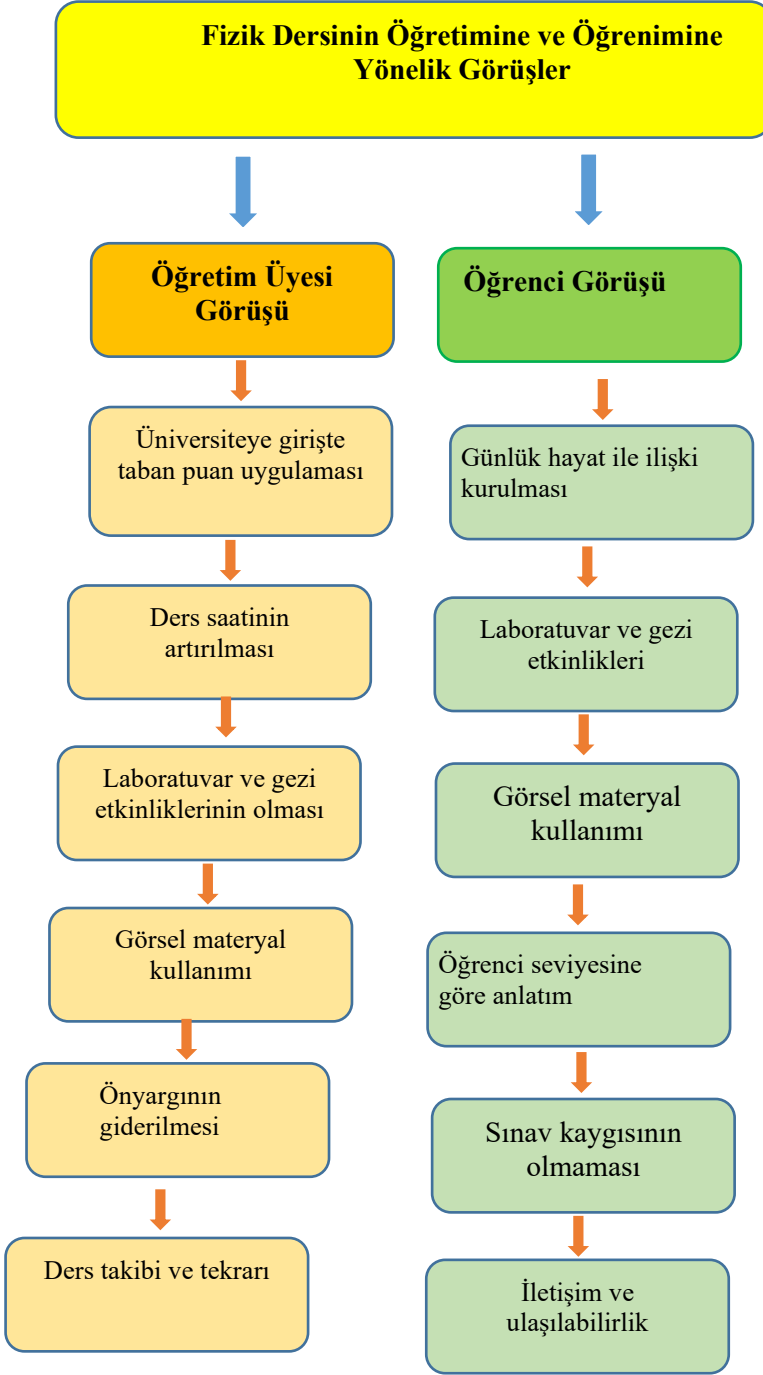
Üniversitelerde fizik derslerini öğrenmede karşılaşılan zorluklar; dersi öğreten öğretim üyelerinin ve öğrencilerin görüşleri doğrultusunda analiz edilmiş ve bu dersin daha doğru, kalıcı ve anlamlı bir şekilde öğretilmesi için hoca ve öğrenci görüşleri ana hatları ile Şekil 2 de verilmiştir.

3. Fiziksel Kavramların Tanımlanmasında Yapılan Yanlışlıklar

Fizik derslerinin öğretilmesi ve öğrenilmesinde yaşanan zorluklardan biri de, fiziksel kavramların tanımlanmasında yapılan yanlışlıklardır. Fiziksel kavramların tanımlanmasında sıkça yapılan bu yanlışlıklar, fizik öğretimi sürecinde öğrencilerin bu kavramları karıştırmalarına ve eksik öğrenmesine yol açmaktadır. Bu yanlışlıkların pek çoğu öğretim sırasında yapılan anlatım hatalarından iler gelmektedir. Bunun yanında, günlük dildeki hatalı kullanım ve öğretim sırasında bu kavramların yeterince açık veya somut anlatılmaması, öğrencilerin mantıksal ilişki kurma yerine ezberleyerek öğrenme yaklaşımları nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Laboratuvar ortamında görsel olarak somut bir şekilde anlatılan kavramlar öğrenciler tarafında doğru ve kalıcı bir şekilde öğrenilmektedir. Fizik öğretimi sırasında en sık karşılaşılan yanlışlıklardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- **Kütle-ağırlık:** Günlük yaşantımızda oldukça sık kullandığımız kütle ve ağırlık kavramları öğrencilerin en çok karıştırdığı fiziksel kavramlardan biridir. Bir cismin değişmez madde miktarıdır olan kütle skaler bir büyüklüktür ve birimi kg dır. Ağırlık ise cismin kütlesine yerçekimi uygulanarak elde edilen bir kuvvettir. Vektörel bir büyüklük olup birimi Newton dur. Yani; $Ağırlık = Kütle \times Yerçekimi \ İvmesi$ şeklinde ifade edilir. Bir cismin ağırlığı ile kütlesinin doğru orantılı olması nedeniyle bu karışıklık sık sık yapılmaktadır [6-7].

Kütle ve ağırlık kavramlarının öğrenciler tarafında nasıl tanımlandığını anlamak için yapılan sınavlarda bu kavramlarla ilgili sorular sorulmuştur. Bunun için; Makine Mühendisi (73 öğrenci), Elektrik Elektronik Mühendisi (66 öğrenci), İnşaat Mühendisi (58 öğrenci), Kimya Bölümü (37 öğrenci), ve Matematik Bölümü (68 öğrenci) öğrencilerine aşağıdaki iki soru sorulmuştur.



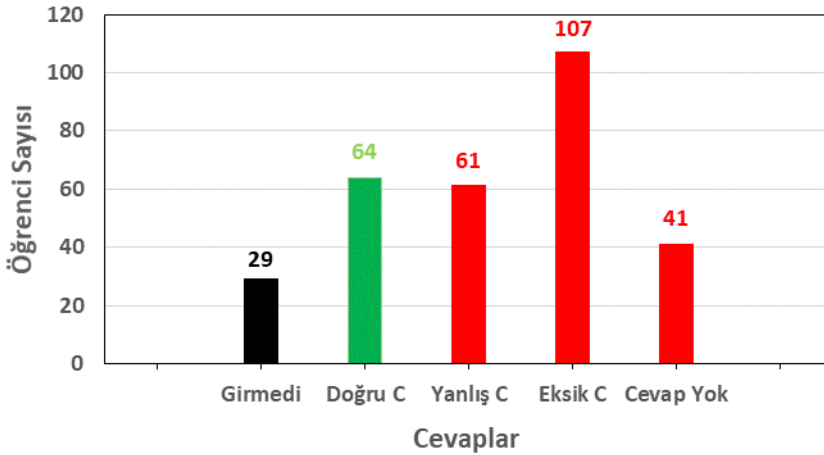
Şekil 2. Fizik dersinin öğretimine ve öğrenimine yönelik öğretici (hoca) ve öğrenci görüşleri.

Sınav sorusu 1: Kütle ve ağırlığı kavramlarını tanımlayın.

Şekil 2 de, bu soruya öğrencilerinin nasıl cevap verdiği, soruyu doğru cevaplandıran, yanlış cevaplandıran veya eksik cevaplandıran öğrenci sayıları grafiksel olarak gösterilmiştir. Toplam 302 öğrenciden, 29 öğrenci sınava girmemiş, 64 öğrenci soruyu doğru anlayarak tam cevap vermiş, 61 öğrenci soruya yanlış cevap vermiş, 107 öğrenci soruya eksik cevap vermiş ve 41 öğrenci soruyu cevaplandırmamıştır. Bu sonuçlar analiz edildiğinde sınava katılan 273 öğrenciden sadece 64' ü soruya doğru cevap vermiştir ve bu değer, sınava katılan öğrencilerin %23 karşılık gelmektedir. Soruya yanlış veya eksik cevap verenlerle, soruya cevap vermeyenlerin toplam oranı % 76' nin üzerindedir. Bu durum kütle ve ağırlık kavramlarının üniversite mühendislik ve fen fakültesi öğrencileri tarafından doğru olarak öğrenilemediğini açık bir şekilde göstermektedir.

Kütle ve ağırlık kavramlarının tanımında yapılan en dikkati çeken yanlış cevaplar aşağıda sıralanmıştır

- Ağırlık maddesin kütlesidir
- Kütle cismin ağırlığıdır
- Kütle bir maddenin uzayda kapladığı yerdir
- Kütle ve ağırlık aynı kavramlardır



Şekil 3. Kütle ve ağırlığı kavramlarını tanımına verile cevaplar ve bu cevapları veren öğrenci sayısı.

Sınav sorusu 2: 10 litrelik iki kabın birisi yoğunluğu 1gr/cm^3 olan A maddesi ile diğeri yoğunluğu 13.6 gr/cm^3 olan B maddesi ile tamamen

doldurulmuştur. Bu maddelerin kütle ve ağırlıklarını deniz seviyesinde (h_1) ve yerçekimi ivmesinin $g = 9.5 \text{ m/s}^2$ olduğu bir yükseklikte (h_2) de bulunuz. Deniz seviyesinde yerçekimi ivmesi $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ dir.

Bu soruda özkütleleri farklı, ancak hacimleri eşit olan iki maddenin ağırlıkları ve kütleleri sorulmaktadır. Sorunun doğru bir şekilde çözülebilmesi için, kütle, özkütle ve hacim arasındaki ilişkinin bilinmesi ve buradan iki farklı maddenin kütleleri ve ağırlıklarının hesaplanması gereklidir. Aynı şekilde, h_1 ve h_2 gibi iki farklı konumda yerçekimi ivmeleri farklı olduğu için, bu konumlarda kütle ve ağırlıkların değişip değişmediğinin bilinmesi gerekmektedir. **Kütle = yoğunluk $\times$ hacim** ve **ağırlık = kütle $\times$ yerçekimi** ivmesi şeklinde olan matematiksel ilişkilerin kullanılması gerekmektedir. Kütle değişmez madde miktarı olduğu için A maddesinin h_1 ve h_2 de kütlesi eşittir. B maddesinin de h_1 ve h_2 deki kütleleri eşittir. Ancak A ve B maddelerinin yoğunlukları farklı olduğu için, A maddelerinin h_1 deki kütlesi B maddesinin h_1 deki kütesinden farklıdır. Diğer taraftan maddelerin ağırlıkları ölçüldükleri coğrafi konuma bağlıdır ve o konumdaki yer çekimi ivmesi ile orantılıdır. Bu nedenle, A maddesinin h_1 deki ağırlığı h_2 deki ağırlığından yüksektir. Aynı durum B maddesi için de geçerlidir.

Toplam 302 öğrenciden 29 öğrenci sınava katılmamış, 45 öğrenci soruya tam cevap vermiş, 63 öğrenci soruya yanlış cevap vermiş, 108 öğrenci soruya eksik cevap vermiş ve 57 öğrenci soruyu cevaplandırmamıştır. Bu sonuçlar analiz edildiğinde, sınava katılan 261 öğrenciden 41 öğrenci soruyu anlayarak doğru bir şekilde cevaplandırmayı başarmıştır. Bu oran yaklaşık %16 gibi oldukça düşüktür. Soruya yanlış, eksik veya hiç cevap vermeyenlerin oranı ise %84 gibi oldukça yüksektir. Bu soruda öğrenciler tarafında yapılan en çok hata veya yanlış, A ve B maddelerinin hacimlerinin eşit olması ve kütle ile ağırlık kavramlarının karıştırmalarıdır.

Soruyu tam olarak anlayamayarak yanlış veya eksik cevap veren öğrencilerin yaptıkları hata verdikleri ilginç cevaplardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- A ve B maddelerinin h_1 deki kütle ve ağırlıkları eşittir
- A ve B maddelerinin h_1 deki kütle ve ağırlıkları eşittir ancak h_2 deki kütle ve ağırlıkları farklıdır.
- Hacimler eşit olduğu için kütleler de eşittir.
- Hacimler eşit olduğu için ağırlıklar eşittir.
- A maddesinin h_1 ve h_2 deki ağırlıkları eşit ancak kütleleri farklıdır.
- Maddelerin kütleleri her konumda eşittir.

Öğrencilerin bu soruya verdikleri cevaplar analiz edildiği zaman kütle ve ağırlık kavramlarının çok sık karıştırıldığı anlaşılmaktadır. Bunun yanında; kütle, hacim ve özkütle ilişkisinin bilinmediği anlaşılmaktadır.

- **Hız-sürat.** Üniversitelerde okutulan Fizik derslerinin ilk yılında hız, sürat, ivme, yer değiştirme gibi bir cismin hareketi ile ilgili kavramlar çok sık kullanılmaktadır. Özellikle tek (bir) boyutlu hareket konusu anlatılırken bu fiziksel kavramların doğru bir şekilde tanımının yapılması ve verilen problemlerden doğru bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Fizikte farklı anlamlara gelen hız ve sürat kavramları günlük dilde birbirinin yerine kullanılmakta ve dolaysıyla öğrenciler tarafında sanki her iki kavram aynı anlamı taşıyormuşçasına kullanılmaktadır. Genel olarak her iki kavram da bir cismin birim zamandaki konumundaki değişiklik ile ilgilidir ve birimleri m/sn dir. Skaler bir büyüklük olan sürat bir cismin birim zamanda aldığı yol miktarıdır. Cismin hareketinin hangi yönde olduğu hakkında bilgi vermez. Ancak vektörel bir büyüklük olan hız ise bir cismin birim zamanda yer değiştirme miktarıdır. Cismin ne kadar hızlı hareket ettiğinin yanında hangi yönde hareket ettiğini de belirtir.

Hız ve sürat kavramlarının öğrenciler tarafında nasıl tanımlandığını anlamak için Makine Mühendisi (73 öğrenci), Kimya (37 öğrenci), ve Matematik (68 öğrenci) bölümü öğrencilerine aşağıdaki soru sorulmuştur.

Sınav sorusu 3: Bir uçak A noktasında kalkarak, sabit bir hızla önce doğu yönünde 2 saat uçarak 480 km uzakta bulunan B noktasına ulaşıyor, sonra 60° kuzey-doğu yönünde 720 km uzakta bulunan C noktasına 3 saat sonra varıyor. Uçağın A-B ve B-C noktaları arasındaki hızını ve süratını karşılaştırın.

Bu soruda A-B ve B-C noktaları arasındaki uzaklıklar ve bu uzaklıkların ne kadar sürede alındığı verilmiştir. Ayrıca uçağın B noktasından sonra yönü değişmiştir. Gerekli işlemler doğru bir şekilde yapılması durumunda A-B ve B-C noktaları arasındaki uçağın süratının eşit olduğu fakat B noktasından sonra uçak yön değiştirdiği için hızının değiştiği görülecektir. 178 öğrencinin, 154 si sınava katılmış, 24 öğrenci sınava katılmamıştır. 38 öğrenci soruyu anlayarak tam doğru olarak cevaplandırmış, 48 öğrenci hız ve sürat kavramlarını karıştırmış ve soruya yanlış cevap vermiş, 59 öğrenci soruyu kısmen anlamış ancak eksik cevap vermiş ve 9 öğrenci soruyu cevaplandırmamıştır. Bu sonuçlar analiz edildiğinde, sınava katılan 154 öğrenciden 38 öğrenci soruyu anlayarak doğru bir şekilde cevaplandırmayı başarmıştır. Bu oran yaklaşık %25 dir. Soruya yanlış, eksik veya hiç cevap vermeyenlerin oranı ise %75 dir. Dolaysıyla soruya yanlış veya eksik

cevaplayanların oranı, doğru cevaplayanların yaklaşık 3 katıdır. Kolay ve cevaplandırması oldukça basit olan bu soruyu öğrencilerin yanlış cevaplandırması günlük yaşantımızda sık kullanılan ve bazen biri diğerinin yerine yanlış olarak kullanılan hız ve sürat kavramlarının karıştırılmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar fiziksek kavramların tam olarak öğrencilere öğretilemediğini göstermektedir. Eğer hız ve sürat kavramlar görsel olarak anlatılsaydı öğrenciler tarafında doğru ve kalıcı bir şekilde öğrenilmiş olacaktır.

Öğrenciler tarafın karıştırılan diğer bazı fiziksek kavramlar aşağıda verilmiştir.

- Isı-sıcaklık
- Güç-Kuvvet
- İş-Enerji
- Elektriksel Yük-Elektriksel Akım
- Işığın kırılması- Işığın kırınımı

Bu kavramlarla ilgili çalışmadan elde edilen sonuçlar ayrı bir yayın olarak hazırlanmaktadır.

4. Sonuç

- ÖSYM tarafından her yıl düzenli olarak yapılan üniversitelere giriş sınavında taban puan uygulanmasına geçilmeli, Mühendislik veya Fen Fakültelerine girecek öğrencilerden belli sayıda Fizik ve Matematik sorusu cevaplandırma şartı konulmalıdır.
- Fizik ders saat artırılmalı ve fizik dersi en az iki yıl boyunca okutulmalıdır.
- Başta laboratuvar olmak üzere görsel materyal kullanımı ve gezi gibi etkinliklere önem verilmelidir.
- Fizik dersinin zor olduğu şeklindeki ön yargıyı kırmak için dersi veren öğretim üyeleri özel gayret sarf etmelidir. Fizik dersinin önemi vurgulanmalıdır.
- Öğrencileri, öğretim üyelerine ulaşımı kolaylaştırılmalıdır.
- Fizik prensiplerinin günlük yaşantımız ilişkisi anlatılmalı ve fizik bilmenin önemi ve her meslek için gerekli olduğu bilinci yerleştirilmelidir.
- Fizikteki formüllerin ve kavramların anlatımı öğrenci seviyesine uygun bir şekilde yapılmalı, öğrenciyi ezberden kurtarmak için matematiksel ve mantıksal ilişkiler kurulması ve bir formülden diğer formüllerin nasıl elde edilebileceği öğretilmelidir.

KAYNAKLAR

- Ayvacı, H. Ş., ve Bebek, G. (2018). Fizik öğretimi sürecinde yaşanan sorunların değerlendirilmesine yönelik bir çalışma. *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 26(1), 1–12.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., ve Kanoğlu, M. (2020). *Thermodynamics: An engineering approach*. McGraw-Hill Education.
- Çepni, S., Ayas, A., Johnson, D., ve Turgut, M. F. (1997). *Fizik öğretimi*. YÖK/Dünya Bankası Milli Eğitimi Geliştirme Projesi, Hizmet Öncesi Öğretmen Eğitimi.
- James, K. (2017). *The physics of everyday things*. Crown Publishing Group.
- Karaoğlu, B. (2012). *Üniversiteler için fizik I ve II* (Cilt I-II). Seçkin Yayıncılık
- Keten, P., ve Amandeep, G. (2024). *Technology and innovation: Technology and the future*. Science Publishing.
- Sarı, M. (2013). Fizik konularının öğretiminde deneysel çalışmanın öğrenci başarısına etkisi ve öğretmenlerin karşılaştıkları zorlukların belirlenmesi. *Eğitim ve Öğretim Araştırmaları Dergisi*, 2(3), 18.
- Schwab, K. (2016). *The fourth industrial revolution*. World Economic Forum.
- Serway, R. A., & Beichner, R. J. (2004). *Fen ve mühendislik için fizik I ve II* (5. baskıdan çeviri, K. Çolakoğlu, Çev. Ed.). Palme Yayıncılık.
- Ünal, S., Coştu, B., & Karataş, F. Ö. (2004). Türkiye’de fen bilimleri eğitimi alanındaki çalışmalar: Genel bir bakış. *Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 14(2), 183–202.
- Young, H. D., ve Freedman, R. A. (2016). *Üniversite fiziği* (14. baskı, H. Ünlü, Çev. Ed.). Pearson Yayıncılık. (Orijinal çalışma yayımlanma tarihi belirtilmemiş)

