



**ATIK BASKI DEVRE KARTLARINDAN
SUBKRİTİK SU OKSİDASYONU İLE
POLİMERLERİN GİDERİMİ VE SÜPERKRİTİK
CO₂-GLİSİN İLE BAKIR EKSTRAKSİYONU**

Gamze GÜVEN KAYA

Danışman: Prof. Dr. Ayşe Vildan BEŞE

Doktora Tezi

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

2026

(Her hakkı saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ATIK BASKI DEVRE KARTLARINDAN SUBKRİTİK SU OKSİDASYONU İLE
POLİMERLERİN GİDERİMİ VE SÜPERKRİTİK CO₂-GLİSİN İLE BAKIR
EKSTRAKSİYONU**

(Removal of Polymers from Waste Printed Circuit Boards by Subcritical Water Oxidation
and Copper Extraction by Supercritical CO₂-Glycine)

DOKTORA TEZİ

Gamze GÜVEN KAYA

Danışman: Prof. Dr. Ayşe Vildan BEŞE

Erzurum
Şubat, 2026

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Gamze GÜVEN KAYA tarafından hazırlanan “Atık Baskı Devre Kartlarından Subkritik Su Oksidasyonu İle Polimerlerin Giderimi Ve Süperkritik CO₂-Glisin İle Bakır Ekstraksiyonu” başlıklı çalışması 06 / 02 / 2026 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kimyasal Teknolojiler Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof.Dr. Beyhan KOCADAĞISTAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Ayşe Vildan BEŞE <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof.Dr.Soner KUŞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof.Dr.Melek YILGIN <i>Fırat Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç.Dr.Özkan AYDIN <i>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FBA-2024-14523

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Ayşe Vildan BEŞE danışmanlığında sunulan “Atık Baskı Devre Kartlarından Subkritik Su Oksidasyonu İle Polimerlerin Giderimi Ve Süperkritik CO₂-Glisin İle Bakır Ekstraksiyonu” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	9	30
Kuramsal Temeller	8	30
Materyal ve Yöntem	3	35
Bulgular ve Tartışma	2	20
Sonuç	0	20
Tezin Geneli	2	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Gamze GÜVEN KAYA	Prof. Dr. Ayşe Vildan BEŞE
6.2.2026	6.2.2026

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgisini, tecrübesini, ilgisini ve desteğini esirgemeyen, kendime her anlamda örnek aldığım, öğrencisi olmaktan her zaman onur duyduğum değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ayşe Vildan BEŞE'ye kıymetli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Doktora tezimin her aşamasında desteklerini, tecrübelerini benimle paylaşan, deneysel çalışmalarım süresince yardım ve desteğini esirgemeyen Sayın Dr.Öğr.Üyesi Serdar ARAL'a ve süperkritik-CO₂ deneylerimi yapabilmem adına deney düzeneğini kullanmama izin veren Sayın Prof.Dr.Ayşe BAYRAKÇEKEN'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu süreçte manevi desteklerini esirgemeyen Sayın Doç.Dr.Hakan KIZILTAŞ'a, Sayın Doç.Dr.Kader DAĞCI KIRANŞAN'a, sevgili arkadaşlarımlarım Elif ÜSTE ve Derya BİRHAN'a çok teşekkür ederim. Kimya Mühendisliği Bölümü bünyesinde, bana gösterdikleri ilgi ve manevi desteğinden dolayı başta kıymetli hocalarım Prof.Dr.Saliha ERENTÜRK ve Doç.Dr. Hatice BAYRAKÇEKEN olmak üzere tüm öğretim üyesi hocalarıma, araştırma görevlilerine ve diğer çalışanlara çok teşekkür ederim.

ICP-MS, GC-MS, SEM-EDS, XRD ve FTIR analizlerinin yapıldığı Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM)'ne ve çalışmaya FBA-2024-14523 numaralı projeye mali destek sağlayan Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen kıymetli kurum müdürüm Sayın Hatice ÖZULUS'a ve iş arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Eğitim ve öğrenim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini hiç esirgemeyen, sonsuz özveri ve sabır gösteren annem Zuhal GÜVEN'e, yokluğunu her an kalbimde hissettiğim rahmetli babam İsrail GÜVEN'e, abim Mustafa Eren GÜVEN'e ve ablam Kübra GÜVEN VURAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte sabır ve özveri ile yükümü paylaşan, manevi desteğini her an yanımda hissettiğim sevgili eşim Mutlu KAYA'ya,canım oğullarım Mustafa Talha KAYA ve Musab Emir KAYA' ya çok teşekkür ederim.

Gamze GÜVEN KAYA

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ATIK BASKI DEVRE KARTLARINDAN SUBKRİTİK SU OKSİDASYONU İLE POLİMERLERİN GİDERİMİ VE SÜPERKRİTİK CO₂-GLİSİN İLE BAKIR EKSTRAKSİYONU

Gamze GÜVEN KAYA

Danışman: Prof. Dr. Ayşe Vildan BEŞE

Amaç: Bu çalışmanın amacı, ilk aşamada atıl durumdaki masaüstü bilgisayar anakartlarının baskı devrelerinde (ABDK) bulunan bromlu epoksi reçinenin(BER) subkritik su ekstraksiyonu ile uzaklaştırılarak daha sonra bakır kazanımı için ön zenginleştirme yapmaktır.İkinci aşamada ise birinci aşamada elde edilen ABDK’lardan, çevreci bir rota olan süperkritik CO₂ ile birlikte co-solvent olarak glisin kullanılarak Cu metalinin geri kazanılması hedeflenmektedir.

Yöntem: İki aşamadan oluşan bu çalışmanın birinci aşamasında, baskılı devre ana kartlarının kırma, öğütme ile boyut küçültme işlemleri yapılmış, morfolojik özelliği ve bileşiminin belirlenmesi ile karakterizasyon analizleri gerçekleştirilerek subkritik su oksidasyonu ile RSM-BBD optimizasyonu kullanılarak debromizasyon ve ön zenginleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise süperkritik CO₂ ve glisin ile RSM-CCD optimizasyonu kullanılarak bakır geri kazanımı sağlanmıştır.

Bulgular: ICP-MS, SEM-EDS ,GC-MS, XRD,TG/DTA ve FTIR cihazları kullanılarak ABDK’ların morfolijik özellikleri ve bileşimleri belirlenmiştir. ABDK’ların bileşiminin belirlenmesi sonrasında subkritik su oksidasyonu ile debromizasyon ve ön zenginleştirme işlemi yapılmıştır. Bromlu epoksi reçinenin (BER) uzaklaştırılması amacıyla, sıcaklık (240-320°C), katı sıvı oranı (0,15-0,45 g/L) ve deney süresi (60-180 dk) parametre olarak seçilmiştir. Varyans analizi temelinde lineer bir denklem türetilmiş ve en etkili parametre olarak sıcaklık belirlenmiştir.Polimer uzaklaştırma işleminde yaklaşık %100 OBV için optimum değerler 320°C, 0,45 g/L katı sıvı oranı ve 130 dk olarak belirlenmiştir. Debromizasyon sonunda ABDK’da bulunan bakır içeriği %26.6’dan %33.5 değerine zenginleşmiştir. Ardından SK-CO₂&-Glisin-H₂O₂ ile ABDK’lardan Cu ekstraksiyonu için optimize edilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) temelinde, bakır verimliliğini tahmin etmek için ikinci dereceden bir denklem türetilmiş ve H₂O₂ (%)’sinin ekstraksiyon sürecindeki en etkili parametre olduğu belirlenmiştir. ABDK’ların Cu metali ekstraksiyonu için optimizasyon bulgularına dayanarak Glisin konsantrasyonu, H₂O₂ (%), katı/sıvı oranı ve zaman için optimum koşullar sırasıyla 0,83 M, %11,76, 14,09 g/mL ve 11,43 saat olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında bakır için maksimum ekstraksiyon verimi %93,94 olarak belirlenmiştir.

Sonuç: Bu çalışmada, elektronik atık anakartların metal geri kazanımına uygun hale getirilmesi amacıyla çevreci ve iki aşamalı bir proses başarıyla uygulanmıştır. Subkritik su ortamında gerçekleştirilen ön işlem, brom içeren polimerik yapının etkili biçimde parçalanmasını sağlayarak metal fazının erişilebilirliğini artırmıştır. Bu yapısal iyileşme, süperkritik CO₂ ortamında glisin destekli ekstraksiyonun etkinliğini yükseltmiş ve bakırın seçici olarak geri kazanılmasına olanak tanımıştır. Elde edilen sonuçlar, yeşil çözücüler ve biyobazlı kompleksleyicilerin birlikte kullanımının, elektronik atıklardan metal geri kazanımında sürdürülebilir ve bütüncül bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: baskılı devre kartları, yanıt yüzey metodu, basınç liçi, yeşil kimya, süperkritik akışkan,süperkritik karbondioksit ve glisin

Şubat 2026, 118 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

REMOVAL OF POLYMERS FROM WASTE PRINTED CIRCUIT BOARDS BY SUBCRITICAL WATER OXIDATION AND COPPER EXTRACTION BY SUPERCRITICAL CO₂-GLYCINE

Gamze GÜVEN KAYA

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe Vildan BEŞE

Purpose: The aim of this study is, in the first stage, to remove brominated epoxy resin (BER) found in the printed circuit boards (PCBs) of discarded desktop computer motherboards through subcritical water extraction and then pre-enrich for copper recovery. In the second stage, the goal is to recover Cu metal from the PCBs obtained in the first stage using glycine as a co-solvent along with supercritical CO₂, which is an environmentally friendly route.

Method: In the first stage of this two-stage study, the printed circuit boards were subjected to size reduction by crushing and grinding, their morphological properties and composition were determined, characterization analyses were performed, and debromization and pre-enrichment were carried out using subcritical water oxidation and RSM-BBD optimization. In the second stage, copper recovery was achieved using supercritical CO₂ and glycine with RSM-CCD optimization.

Findings: Morphological properties and compositions of brominated epoxy resins (BPRs) were determined using ICP-MS, SEM-EDS, GC-MS, XRD, TG/DTA, and FTIR instruments. Following the determination of the BER composition, subcritical water oxidation, debromization, and pre-enrichment were performed. Temperature (240-320°C), solid-liquid ratio (0.15-0.45 g/L), and experimental time (60-180 min) were selected as parameters for removing brominated epoxy resin (BER). A linear equation was derived based on variance analysis, and temperature was determined as the most effective parameter. For approximately 100% BER in the polymer removal process, optimum values were determined as 320°C, 0.45 g/L solid-liquid ratio, and 130 min. After debromization, the copper content in the BPR increased from 26.6% to 33.5%. Subsequently, the extraction of Cu from ABDKs was optimized using SK-CO₂ & Glycine-H₂O₂. Based on analysis of variance (ANOVA), a second-order equation was derived to predict copper yield, and H₂O₂ (%) was determined to be the most effective parameter in the extraction process. Based on the optimization findings for Cu metal extraction from ABDKs, the optimum conditions for Glycine concentration, H₂O₂ (%), solid/liquid ratio, and time were determined as 0.83 M, 11.76%, 14.09 g/mL, and 11.43 hours, respectively. Under these conditions, the maximum extraction yield for copper was determined to be 93.94%.

Results: In this study, an environmentally friendly, two-stage process was successfully applied to make electronic waste motherboards suitable for metal recovery. Pretreatment in a subcritical water environment effectively degraded the bromine-containing polymeric structure, increasing the accessibility of the metal phase. This structural improvement enhanced the efficiency of glycine-assisted extraction in a supercritical CO₂ environment, enabling selective copper recovery. The results demonstrate that the combined use of green solvents and bio-based complexing agents offers a sustainable and holistic alternative for metal recovery from electronic waste.

Keywords: printed circuit boards, response surface method, pressure leaching, green chemistry, supercritical fluid, supercritical carbon dioxide and glycine

February 2026, 118 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	6
Baskılı Devre Kartı	6
BDK yapısal özellikleri.....	6
Baskılı Devre Kartlarının kimyasal bileşimi.....	8
E-atıkların zararları	10
E-atıkların geri dönüştürülmesinin avantajları.....	15
Baskılı Devre Kartlarının Geri Kazanım Yöntemleri	16
Fiziksel ayırma yöntemleri.....	17
Pirometalurjik yöntemler	19
Hidrometalurjik yöntemler.....	19
Biyoliç yöntemleri.....	21
Süperkritik akışkan teknolojisi.....	22
MATERYAL ve YÖNTEM	29
Baskılı Devre Kartlarının Temini ve Hazırlanması	29
Kullanılan Reaktifler ve Genel Özellikleri	31
Glisin.....	31
Hidrojen peroksit.....	32
Etanol	34
Karbondioksit (CO ₂)	35
Analiz Yöntemleri ve Kullanılan Cihazlar	36
ICP-MS (Endüktif eşleşmiş plazma- kütle spektroskopisi).....	37
TG/ DTA (Termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz cihazı)	37
GC-MS (Gaz kromatografisi–Kütle spektrometresi)	38
SEM-EDS (Taramalı elektron mikroskobu)	38
FT-IR (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi).....	39

CHNS (Elemntel analiz)	39
Deneyisel Çalışma	40
Deney sistemi	41
İstatistiksel analiz	47
BULGULAR VE TARTIŞMA.....	52
Materyallerin Fiziksel ve Kimyasal Analiz Sonuçları	52
TG analiz sonuçları	52
Ham ABDK'nın kimyasal bileşimi.....	54
Subkritik Su Oksidasyonu	55
Yüzey yanıt yönteminde Box–Behnken deney tasarımı istatistiksel analizi	55
GC-MS analiz sonuçları.....	64
Subkritik su oksidasyonundan sonra kalan katının karakterizasyonu.....	77
Süperkritik CO ₂ -Glisin-H ₂ O ₂ ekstraksiyonu	81
Yüzey yanıt yönteminde merkezi kompozit deney tasarımı istatistiksel analizi	82
SONUÇLAR.....	91
KAYNAKÇA	93
ÖZGEÇMİŞ.....	103

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Atık Baskılı Devre Kartlarının Ve Tipik Bir Cevherin Kimyasal Bileşimi	4
Tablo 2. Baskılı Devre Kartları Katmanlarına ve Mekanik Yapısına Göre Sınıflandırılması..	7
Tablo 3. BDK'ları İçinde Bulunan Bileşenlerin Oransal Dağılımı.....	8
Tablo 4. Farklı Cihazların BDK'nın Metal İçerikler	9
Tablo 5. Elektronik Atıklarda Yer Alan Çevreye Toksik Etkileri Olan Organik ve İnorganik Maddeler ve İlişkili Bileşen Yapıları.....	11
Tablo 6. Fiziksel Ayırma Yöntemleri	18
Tablo 7. Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Süperkritik Akışkanlar ve Kritik Sıcaklık-Basınç Değerleri	22
Tablo 8. E-atıklardan Organik Yapıların Arındırılması ve Metal Kazanımına Dair Süperkritik Akışkanların Uygulamaları	23
Tablo 9. E-atıklardan Metallerin Kazanım Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	26
Tablo 10. Box–Behnken Deney Tasarımında Kullanılan Faktörler ve Seviyeleri	42
Tablo 11. Box–Behnken Deney Tasarımı.....	43
Tablo 12. Central Composite Design Deneylerinde Kullanılan Faktörler ve Seviyeleri.....	45
Tablo 13. Central Composite Deney Tasarımı	45
Tablo 14. Elementel Analiz Deney Sonuçları.....	52
Tablo 15. Ham Numune Kül Tayini	52
Tablo 16. Atık Baskılı Devre Kartların Ham Örneğinin Kimyasal Bileşimleri.....	54
Tablo 17. Box–Behnken Deney Tasarımı ve Deneysel Sonuçlar	55
Tablo 18. OBV (%) İçin Varyans Analizi Sonuçları	56
Tablo 19. Faktörlerin OBV (%) Üzerindeki Etkileri	57
Tablo 20. Çoklu Yanıt Tahmini	63
Tablo 21. Deney No:1 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	64
Tablo 22. Deney No:2 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	65
Tablo 23. Deney No:3 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	66
Tablo 24. Deney No:4 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	67
Tablo 25. Deney No:5 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	68
Tablo 26. Deney NO:6 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	69
Tablo 27. Deney No:7 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	70
Tablo 28. Deney No:8 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	71
Tablo 29. Deney No:9 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	72
Tablo 30. Deney No:10 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	73

Tablo 31. Deney No:11 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	74
Tablo 32. Deney No:12 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	75
Tablo 33. Deney No:13 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu	76
Tablo 34. Elementel Analiz Sonuçları	78
Tablo 35. Atık Baskı Devre Kartlarının Subkritik Oksidasyon Sonrası Metal Bileşimleri	81
Tablo 36. Merkezi Kompozit Deney Tasarımı ve Deneysel Sonuçlar	82
Tablo 37. Cu (%) İçin Varyans Analizi Sonuçları	84
Tablo 38. Faktörlerin Cu (%) Geri Kazanımı Üzerindeki Etkileri	85
Tablo 39. Süperkritik CO ₂ -Glisin ile Cu Ekstraksiyonunun Optimum Şartları	89



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Dünya genelinde e-atık miktarının yıllara göre değişimi.....	1
Şekil 2. Türkiye genelinde e-atık miktarının yıllara göre değişimi.....	2
Şekil 3. AEEE Bileşimi	2
Şekil 4. E-atıklar üzerine 2014-2024 yılları arasında yayımlanmış makale sayısının yıllara göre değişimi	5
Şekil 5. (a) Video işleme sistemlerinde kullanılan tek katmanlı BDK, (b) Masaüstü bilgisayarlarda kullanılan çok katmanlı BDK	6
Şekil 6. Tipik bir BDK'nın bileşimi	8
Şekil 7. ABDK'nın genel bileşimi	10
Şekil 8. İkincil kaynaklardan elde edilen metallerin enerji tasarrufu.....	16
Şekil 9. Beş ana elektronik atık geri dönüşüm teknolojisi	17
Şekil 10. (a) Bilgisayar kasalarından sökülmüş atık baskılı devre kartları, (b) atık baskılı devre kartlarının bileşenlerine ayrılmış hali, (c) atık baskılı devre kartlarının küçük parçalara kesilmiş ve ayrılan diğer plastik kısımlar.....	29
Şekil 11. Döner bıçak mekanizmalı kırıcı	30
Şekil 12. Transversal öğütme değirmeni (Restch SK100)	30
Şekil 13. Deneylerde kullanılan -2 mm boyutundaki ABDK	31
Şekil 14. Döner ve gezegen hareketli yüksek enerjili bilyeli değirmen	31
Şekil 15. Deneysel çalışma adımlarının şematik gösterimi.....	41
Şekil 16. Deneysel aşamalarda kullanılan otoklav	41
Şekil 17. Deneylerde kullanılan otoklavın iç yapısı.....	42
Şekil 18. Subkritik işlem sonunda süzme işlemi ve kalan katının dijital fotoğrafları.....	44
Şekil 19. a) Ham atık baskı devre kartları, b) subkritik su ekstraksiyonunun optimum koşullarında elde edilmiş katının dijital fotoğrafları	44
Şekil 20. Süperkritik şartları sağlamak için kullanılan şırınga sistemi	46
Şekil 21. Box-Behnken tasarımı geometrik görünümü	49
Şekil 22. ABDK'nın ham örneğinin TG-DTG grafiği	53
Şekil 24. Standartlaştırılmış Etkilerin Pareto Grafiği.....	57
Şekil 25. OBV için ana etkiler grafiği	58
Şekil 26. OBV için etkileşim grafiği	61
Şekil 27. Üç boyutlu yanıt yüzeyi grafikleri	62
Şekil 28. İki boyutlu kontur diyagramları	62
Şekil 29. Optimizasyon grafiği.....	63

Şekil 30. Deney no:1 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	64
Şekil 31. Deney no:2 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	65
Şekil 32. Deney no:3 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	66
Şekil 33. Deney no:4 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	67
Şekil 34. Deney no:5 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	68
Şekil 35. Deney no:6 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	69
Şekil 36. Deney no:7 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	70
Şekil 37. Deney no:8 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	71
Şekil 38. Deney no:9 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	72
Şekil 39. Deney no:10 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	73
Şekil 40. Deney no:11 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	74
Şekil 41. Deney no:12 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	75
Şekil 42. Deney no:13 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri	76
Şekil 43. Subkritic-Su Oksidasyonu sonucu optimum koşullarda üretilen numunenin TG-DTG grafiği	78
Şekil 44. a) Ham örneğin b) Subkritic Su Oksidasyonu sonucu SEM analizleri.....	79
Şekil 45. a) Ham örneğin b) Subkritic Su Oksidasyonu sonucu EDS analizleri.....	80
Şekil 46. ABDK ham örneğin ve Subkritic Su Oksidasyonu sonucu optimum deneyin FT-IR grafiği	81
Şekil 47. Standartlaştırılmış Etkilerin Pareto Grafiği.....	86
Şekil 48. % Cu ana etki grafiği	86
Şekil 49. Cu (%) için Etkileşim Grafiği	87
Şekil 50. Üç boyutlu yanıt yüzeyi grafikleri	88
Şekil 51. İki boyutlu kontur diyagramları	89
Şekil 52. Optimizasyon grafiği.....	90

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

AEEE	Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlar
ABDK	Atık Baskılı Devre Kartları
EEE	Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlar
AB	Avrupa Birliği
BAG	Bromlu Alev Geciktiriciler
PCB	Poliklorürlübifnil
PVC	Polivinilklorür
PBDE	Polibromlu Difenil Eterler
PBB	Polibromlu Bifeniller
CFC	Kloroflorokarbon
BADGE	Bisfenol A diglisidil eter
TBBPA	Tetrabromobisfenol-A
HBCD	Heksabromosiklodekan
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
TCLP	Tehlikeli Atık Belirleme Testi
BER	Bromlu Epoksi Reçineler
BFR	Bromlu Alev Geciktiriciler
SCF	Süperkritik Sistem
EPA	Çevre Koruma Ajansı
SKA	Süperkritik Akışkan
SKE	Süperkritik Ekstraksiyon
SKSO	Subkritik Su Oksidasyon
SKSD	Süperkritik Su Depolimerizasyonu
SKS	Süperkritik Su
YYM	Yüzey Yanıt Yöntemi
ICP-MS	Endüktif Eşleşmiş Plazma- Kütle Spektroskopisi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopisi
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
GC-MS	Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi
TG/DTA	Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz Cihazı
XRF	X-Işını Floresans
XRD	X-Işınları Difraksiyonu

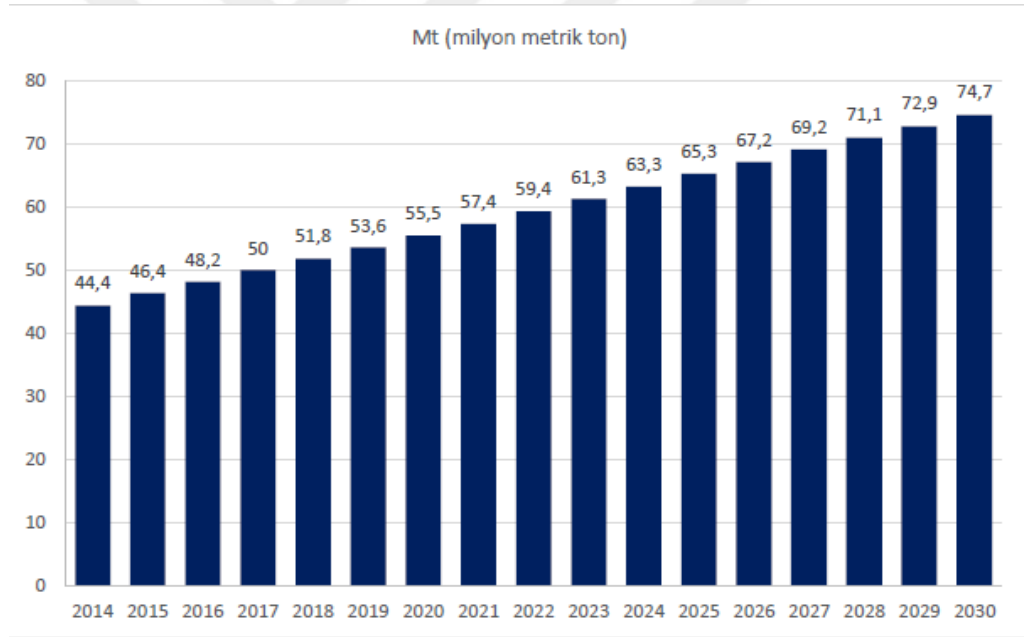
MKD	Merkezi Kompozit Tasarımı
BBD	Box-Benhken Deneysel Tasarım
ODE	Organik Bozunma Verimi

Simgeler

g	Gram
kg	Kilogram
μm	Mikrometre
K	Kelvin
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
cm^3	Santimetreküp
v/v	Hacim/hacim
w/w	Ağırlık/ağırlık
L	Litre
mL	Mililitre
rpm	Dakikadaki devir sayısı
M	Molarite
dk	Dakika
kj	Kilojul
Mt	Milyon metrik ton

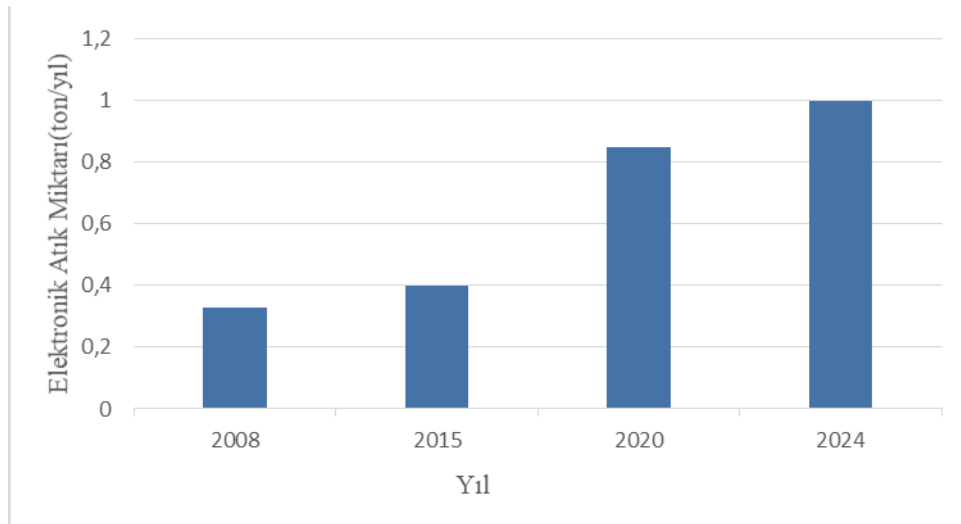
GİRİŞ

Kullanım ömrünü tamamlayan elektrikli ve elektronik eşyalar, atık elektrik ve elektronik eşya (AEEE) veya e-atık olarak tanımlanır. Teknolojinin hızlı ilerlemesi, elektrik ve elektronik sektöründeki pazar payının genişlemesi, kullanıcı taleplerindeki artış ve ürünlerin kullanım ömürlerinin kısalması, büyük miktarda atık elektrik ve elektronik eşyanın (AEEE) ortaya çıkmasına neden olmaktadır. 2021 yılında 57.4 Mt olarak kaydedilen e-atık miktarının 2030 yılında 74.7 Mt seviyesine ulaşacağı tahmin edilmektedir (Jha et al. 2025). Birleşmiş Milletler Dördüncü Küresel Elektronik Atık İzleme Raporu'na göre bu dramatik artışın temel nedeni, üretilen e-atık miktarının geri dönüştürülen e-atık miktarından beş kat daha fazla olmasıdır ((UNITAR) 2024). Dünya genelinde e-atık miktarının yıllara göre değişimi Şekil 1'de verilmiştir.



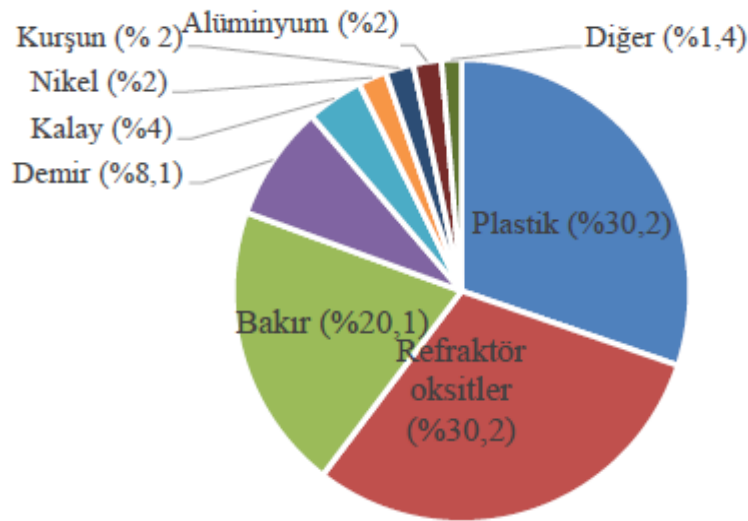
Şekil 1. Dünya genelinde e-atık miktarının yıllara göre değişimi (Forti et al. 2020)

Türkiyedeki e-atık miktarının yıllara göre değişimi Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2’den de görüldüğü üzere e-atık oluşum hızındaki keskin artış endişe verici düzeydedir.



Şekil 2. Türkiye genelinde e-atık miktarının yıllara göre değişimi

Atıl elektrikli ve elektronik malzemeler metaller, değerli metaller, nadir toprak elementler, polimerler, cam elyafı gibi bileşenlerden oluşan kompleks yapılardır. Kullanılan metaller ve miktarları, kullanıldığı malzemenin özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Tipik bir AEEE bileşimi Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. AEEE Bileşimi (Yang et al. 2013)

E- atıkların küresel düzeyde ciddi bir çevre ve ekonomik sorun haline gelmesindeki en büyük etken içeriğidir. E-atıkların polimerik kısımları bromlu alev geciktiriciler, tetrabromobisphenol-A, polibromlu difenil eterler ve polibromlu bifeniller gibi son derece toksik, kararlı ve birikibilen yapıları barındırmaktadır (Khanna et al. 2020). E-atıklar metalik kısımları ise yüksek ekonomik değere sahip bakır, altın, gümüş gibi metallerin yanı sıra kurşun, cıva gibi ağır metalleri de içermektedir. E-atıkların bilinen bu tehlikelerine karşın pek çok ülkenin e-atıkların toplanması, depolanması, geri dönüştürülmesi ve bertaraf edilmesi

konusunda yasal düzenlemeleri yoktur veya kısıtlıdır (Aral and Beşe 2024). Dünya genelinde e- atıklar konusunda yapılan uygulama, kontrolsüz bir şekilde depolama, gayri resmi sektör tarafından parçaların elle sökülmesi, açık yakma ve eritme gibi çevreci ve sürdürülebilir olmayan bir yaklaşımlardır. Bu yaklaşım çevre için tehdit oluşturmasının yanında, gerekli donanım ve eğitime sahip olmayan çalışanlar için de iş güvenliği ve sağlıkları açısından ciddi problemler oluşturmaktadır (Mir and Dhawan 2022).

E-atıklar metal kazanım potansiyeli açısından, bir atıktan ziyade çok dikkat çekici önemli bir ikincil kaynaklardır. E-atık içeriğinde bulunan metallerin miktarı ve saflığı doğal cevherde bulunan miktardan onlarca kat daha fazladır. Tipik bir örnek Tablo 1’de verilmiştir.



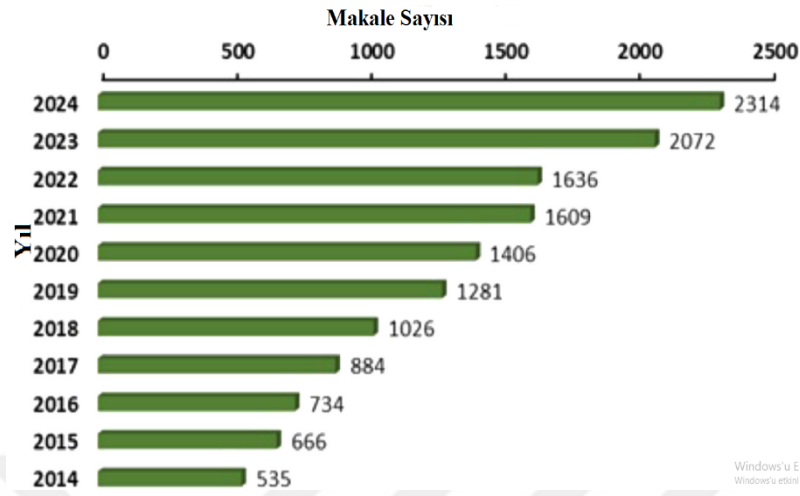
Tablo 1. Atık Baskılı Devre Kartlarının Ve Tipik Bir Cevherin Kimyasal Bileşimi (De Souza et al. 2022)

Organikler Seramik Metal			Atık baskılı devre kartları			Referans
			Elementler			
			Cu (%)	Au (g t ⁻¹)	Ag (g t ⁻¹)	
ağırlık%						
~66		~34.0	23.1	14,4	217	(Xiang et al. 2010)
~45	~27	~28.0	20.2	0,13	0,16	(Yamane et al. 2011)
~74		~26.0	25.5	632	306	(Flandinet et al. 2012)
31.2	46.32	22.4	19.6	–	34	(Xing and Zhang 2013)
29.5	51.0	19.4	6.3	–	–	(Li et al. 2014)
69.8		30.2	18.3	110	180	(Fogarasi et al. 2015)
43.1	45.2	11.7	7.8	–	–	(Liu and Zhang 2016)
50.5	28.4	21.1	–	–	–	(Zhang et al. 2017)
40.8	44.6	14.9	8.8	–	–	(Xia et al. 2018)
32.7	48.4	18.9	13.8	690	530	(Caldas et al. 2019)
43.5	~23.7	~32.8	24.6	–	–	(Golzary and Abdoli 2020)
60.9		39.0	17.8	100	–	(Yao et al. 2021)
22.4	58.2	19.6	16.4	490	530	(Souza et al. 2022)
Doğal yataklar						
						(Calvo et al. 2016)
						(Swinkels et al. 2021)
–	–	–	<0,6	<16,4	<4,9	(Swinkels et al. 2021)b
						(İlyas et al. 2021)

Doğal cevherlerden metal elde edilmesi, yüksek enerji tüketimi gerektiren ve ciddi karbon salınımına neden olan bir süreçtir. E-atıklardan bakır, altın, gümüş ve paladyum gibi yüksek ekonomik değere sahip metallerin geri kazanımı, geleneksel madencilik faaliyetlerine kıyasla daha düşük enerji tüketimi ve karbon salınımı ile gerçekleştirilebilmektedir (Cui and Forssberg 2003; Wang and Gaustad 2012; Akcil et al. 2015). Metallerin geri kazanılması, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlarken, e- atıkları bir sorun olmaktan çıkarıp ekonomik bir fırsata dönüştürülmesine olanak tanır (D'Adamo et al. 2019; Grigorescu et al. 2020).

Yaşanılabilir bir dünya için e-atıkların uygun yöntemlerle geri dönüştürülmesi; çevresel kirliliğin önlenmesi, insan sağlığının korunması, stratejik metallerin geri kazanılması ve

sürdürülebilir kaynak yönetimi açısından hayati önem taşır. Bu farkındalıkla, son 10 yılda e-atıklar üzerine yapılan çalışmalar ciddi anlamda artmıştır. Şekil 4, 2014-2024 yılları arasında yapılan bilimsel makalelerin sayısının yıllara göre değişimini göstermektedir.



Şekil 4. E-atıklar üzerine 2014-2024 yılları arasında yayımlanmış makale sayısının yıllara göre değişimi (Smith and Behdad 2025)

E-atıklardan genellikle metal ve değerli metallerin kazanımı üzerine yapılan bu bilimsel çalışmalarda piroliz, hidrometalurji, biyometalurji ve süperkritik akışkan yöntemi kullanılmıştır. Uygulama kolaylığı ve reaktif seçim çeşitliliğinden dolayı çalışmaların büyük kısmı hidrometalurjik yöntem üzerinedir. Piroliz kısmi enerji geri kazanımı sağlamakla birlikte kirlетici emisyonları nedeniyle, biyometalürji ise ortam koşullarının sağlanmasındaki zorluk ve sınırlı ölçeklendirilebilirlik nedeniyle daha kısıtlı kullanılmıştır. Süperkritik akışkan teknolojisi konusunda çalışmalar son yıllarda popüler hale gelmiş olmakla birlikte henüz çok yaygın değildir. Ancak süperkritik akışkan teknolojisi yüksek teknik potansiyele sahip olduğu için gelecek vaat etmektedir (Smith and Behdad 2025).

Bu çalışmanın amacı; çevreci bir rota ile sub ve süperkritik akışkan teknolojisini kullanarak atık baskılı devre kartlarından organik kısmın uzaklaştırması ve bakırın kazanılmasının optimum koşullarının belirlenmesidir. Optimizasyon yöntemi olarak yüzey yanıt yöntemi seçilmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında, herhangi bir katkı maddesi kullanmadan subkritik su oksidasyonu ile organik kısım başarılı bir şekilde uzaklaştırılmıştır. İkinci aşamada, organik kısmı arındırılmış baskılı devre kartlarının bakır içeriği daha önceki çalışmalarda uygulanmış süperkritik CO₂-glisin-H₂O₂ ortamında kazanılmıştır.

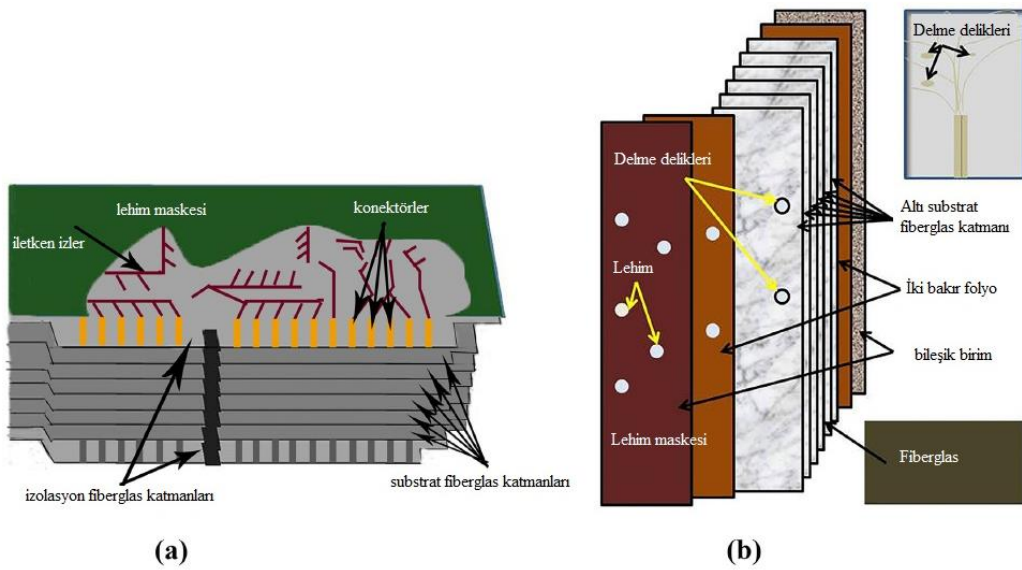
KURAMSAL TEMELLER

Baskılı Devre Kartı

Baskılı devre kartları (BDK), elektrik ve elektronik cihazların yapısal olarak en temel bileşenidir ve e- atıkların yaklaşık olarak %13-18'lik kısmını oluşturur. BDK, yalıtkan bir taban malzemesi üzerine yerleştirilmiş bakır iletken yolları olan ve üzerine direnç, kondansatör, transistör ve entegre devre gibi elektronik bileşenlerin yüzeye montaj edilmesiyle oluşan kompleks ve heterojen yapılardır. Baskılı devre kartlarının temel görevi, üzerinde bulundurduğu bileşenler arasında elektrik iletkenliği sağlamak ve mekanik destek oluşturmaktır (Kumari and Samadder 2025).

BDK yapısal özellikleri

Baskılı devre kartları (BDK), cihazların işlevselliği ve elektriksel performans gereksinimlerine bağlı olarak ekipmanlara özgü olarak tasarlanmaktadır. Modern elektronik cihazlarda, BDK boyutlarının küçülmesi ve birim alan başına düşen çip sayısının artması nedeniyle genellikle çok katmanlı BDK yapıları tercih edilirken, video oynatıcı gibi cihazlarda tek katmanlı bakır folyo ile üretilen BDK'lar tercih edilmektedir. Bu yapıların tasarımı, cihazların işlevselliğini artırırken, aynı zamanda üretim maliyetlerini ve atık yönetimi süreçlerini doğrudan etkilemektedir (Verma et al. 2017; Yousef et al. 2018). Tek ve çok katmanlı BDK'ların şematik görselleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. (a) Video işleme sistemlerinde kullanılan tek katmanlı BDK, (b) Masaüstü bilgisayarlarda kullanılan çok katmanlı BDK (Li and Xu 2015)

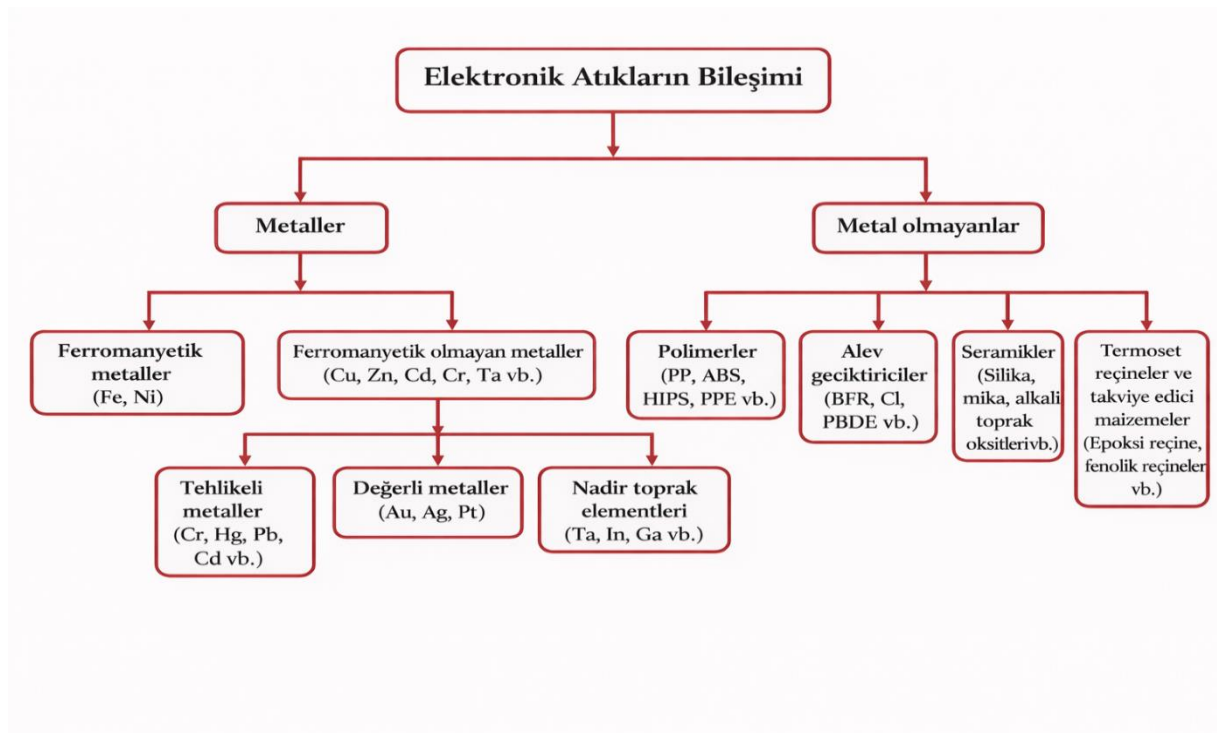
Tablo 2’de BDK’ların katmanlarına ve mekanik özelliklerine göre sınıflandırılmaları özetlenmiştir.

Tablo 2. Baskılı Devre Kartları Katmanlarına ve Mekanik Yapısına Göre Sınıflandırılması

Baskılı Devre Kartı türü	Özellikleri	Uygulama Alanı
Tabakaya göre sınıflandırma		
Bir katmanlı	Yüzeyi kalın olmayan metalik tabakasıyla kaplanmış olan bu yapılar, genellikle tek yüzeyden elektriksel iletkenlik sağlayacak biçimde tasarlanmakta olup; üretim süreçleri bakımından hem ekonomik hem de uygulama açısından kolay entegre edilebilir özelliklere sahiptir.	Televizyonlar ve evlerde kullanılan çeşitli küçük aletler
İki katmanlı	Yalıtkan alt tabakanın her iki yüzeyi, elektriksel iletkenliği sağlayacak şekilde ince metal tabakalarla kaplanmaktadır. Bu tür çok katmanlı yapılar, delik içi bağlantı teknolojileri (through-hole) veya yüzey montaj teknolojileri (SMT) kullanılarak bileşen entegrasyonuna olanak tanır.	Bilgisayar sistemleri ve ışık yayan diyot aydınlatmalar
Fazla taraflı	Çok katmanlı baskılı devre kartları, çift taraflı BDK’lerin daha gelişmiş bir versiyonu olarak tanımlanabilir. Katman sayısı, yapının işlevsel gereksinimlerine göre belirlenir ve delikler, farklı katmanlar arasında elektriksel bağlantı sağlamak amacıyla kullanılır..	Medikal Ekipman ve uydu teknolojilerine benzer yüksek düzeyde kompleks sistemler
Mekanik Dayanıma göre sınıflandırma		
Sert	Sert ve esnek olmayan yapıdaki baskılı devre kartlarında, kartın mekanik dayanımını artırmak ve bükülmesini önlemek amacıyla genellikle cam elyaf takviyeli alt tabaka malzemelerden oluşmaktadır.	Yapısal gereksinimlere bağlı olarak tek, çift ya da çok katmanlı biçimlerde üretilmektedirler.
Esnek	Genellikle tek, çift veya çok katmanlı olacak şekilde tasarlanan bu yapılar, esnek plastik esaslı substrat malzemeler kullanılarak üretilmektedir..	Belirli uygulama gereksinimlerine bağlı olarak, tek, çift ya da çok katmanlı yapılar şeklinde tasarlanarak kullanılabilir.
Esnek-Sert	Genel kart boyutunu ve ağırlığını minimize etmeye yönelik modern tasarımlar için uygun bir çözüm sunmaktadır.	Sınırlı alan ve düşük ağırlığın öncelikli tasarım kriterleri olduğu cep telefonları ve dijital kameralar gibi taşınabilir elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Baskılı Devre Kartlarının kimyasal bileşimi

Baskılı devre kartları (BDK), farklı fonksiyonlara sahip bileşenlerden oluşmakta olup bu bileşenler arasında çipler, konektörler, kondansatörler ve diğer elektronik elemanlar yer almaktadır. Bu bileşenlerin her biri farklı malzemelerden üretildiği için BDK'ların malzeme kompozisyonu oldukça karmaşık bir yapı sergilemektedir. Bu yapısal özellikler, geri dönüşüm süreçlerinde malzeme ayrıştırma ve geri kazanım yöntemlerinin etkinliğini doğrudan etkilemektedir (Marques et al. 2013). BDK'ların temel temel bileşenleri metaller ve metal dışı yapılar olarak iki bölüme ayrılır. Metal kısmını baz metaller, değerli metaller ve ağır metaller oluşturur. Metal dışı yapılar polimerler, alev geciktiriciler, cam elyafı ve silika temelli malzemelerden oluşur. Tipik bir ABDK'nın temel bileşenleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Tipik bir BDK'nın bileşimi (Kumari and Samadder 2022)

Atık baskı devre kartlarının içeriğinde bulunan bileşenlerin oransal dağılımı Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. BDK'ları İçinde Bulunan Bileşenlerin Oransal Dağılımı

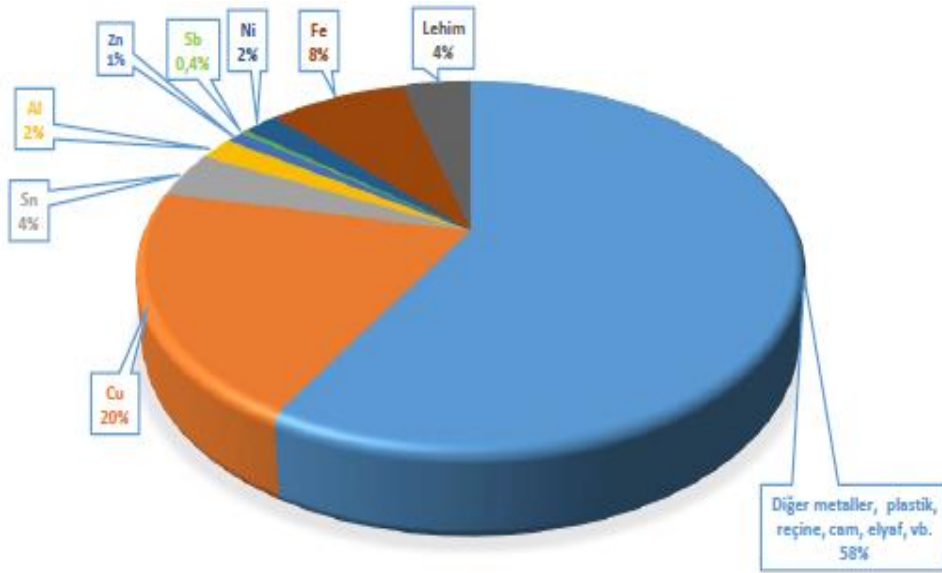
Metaller (%40)	Organik (%30)	Seraamikler (%30)
Temel metaller (Cu, Fe, Al, Zn, Ni)	Plastik türevli bileşikler	Silisyum oksit,
Zehirli metaller (Cr, Cd, As, Hg, Pb)	Cam bazlı lif yapısı,	Alüminyum oksit
Yüksek değerli metaller (Au, Ag, Pt, Pd)	Alev geciktirici maddeler (zararlı)	Toprak alkali metal oksitleri

Değişik elektronik cihazların atık baskılı devre kartlarının (ABDK) metal bileşimlerine ilişkin dağılım Tablo 4'te sunulmaktadır. Kişisel elektronik cihazlardan elde edilen e-atıkların, diğer elektronik cihazlara kıyasla daha yüksek oranda değerli metal içerdiği belirlenmiştir. Bu durum, geri dönüşüm süreçlerinde kişisel elektronik cihazlardan elde edilen ABDK'lerin ekonomik açıdan daha değerli bir geri kazanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Kumari and Samadder 2022).

Tablo 4. Farklı Cihazların BDK'nın Metal İçerikler (Kumari and Samadder 2022)

Elektronik atık türleri	Metal içeriği (% ağırlıkça) dağılımı (%)											Referans
	Cu	Fe	Si	Sn	Al	Çinko	Kurşun	Mn	Ni	Ag	A _u	
Kablolu bilgisayar devre kartları	36.14	0,53	4.19	2.14	5,96	2.06	1.45	0,03	0,09	0,03	—	(Arshadi et al. 2018)
Cep telefonu	57.47	25.23	8.8	3,49	0,77	4.29	0,85	0,24	5.10	0.15	0.1	(Fontana et al. 2019)
Televizyon PCB'leri	14.4	5.00	2.15	3.61	4.14	2.06	2.18	0,06	0,24	0,04	—	(Arshadi et al. 2018)
Atık DVD	17.8	5.51	3.79	2.57	10.10	1,99	3.33	0,24	0,36	—	—	(Kumar et al. 2013)
İşlemci	30.51	9.44	9.56	1.80	5.10	0,26	0,82	0,06	3.61	0,13	—	(Arshadi et al. 2018)
Faks makinesi	21.03	6.56	8.82	3.04	6.14	1.26	1.77	0,51	0,57	0.14	—	(Arshadi et al. 2018)
Buzdolabı	3.4	50	—	—	1.1	—	—	—	—	—	—	(Zhang and Xu 2016)

Metallerin oransal dağılımı kullanıldığı cihazın yapısına bağlı olarak değişmekle beraber, tipik bir ABDK'nın bileşim dağılımı Şekil 7'te verilmiştir.



Şekil 7. ABDK'nın genel bileşimi (Zhang et al. 2018)

Ortalama olarak baskılı devre kartlarının metalik kısmı yaklaşık olarak %20 bakır, %4 kalay (Sn), %1 kurşun (Pb), %2 alüminyum (Al), %1 çinko (Zn) ve %0,4 antimon (Sb)'dan oluşmaktadır. Ayrıca kart yapısında yaklaşık %5 oranında lehim alaşımları ile %8 demir ve %2 nikel yer almaktadır. Değerli metaller açısından değerlendirildiğinde ise, ABDK'lerin ton başına ortalama 500 g altın, 1000 g gümüş ve 50 g paladyum içerdiği bildirilmektedir (Zhang et al. 2018).

E-atıkların zararları

E-atıkların içermiş oldukları potansiyel zararlar çevresel, sosyal ve ekonomik olarak üç başlık altında incelenebilir.

Elektronik atıkların çevresel zararları

Bu atıkların içeriğinde bulunan doğaya tehlikeli doğal kaynaklı bileşikler (örneğin klorlu ve bromlu alev geciktiriciler) ve organik olmayan bileşikler (civa, kurşun gibi ağır metaller) içermektedir. Bu bileşenler ve kullanıldıkları yerler Tablo 5'te özetlenmiştir.

Tablo 5. Elektronik Atıklarda Yer Alan Çevreye Toksik Etkileri Olan Organik ve İnorganik Maddeler ve İlişkili Bileşen Yapıları (Yazici et al. 2011)

Tehlikeli Madde	Dahil olduğu eleman
Organik Maddeler (Halojen bileşikler)	
Poliklorür bifenil(PCB) Bromlu alev geciktiriciler* Klorofloro karbon (CFC) Polivinil klorür (PVC)	Kondansatör ve transformatörler Baskılı devre kartları, entegre devreler (IC, kabloların koruyucu lastikleri) Soğutma ünitesi, yalıtım köpüğü Yalıtımlı kablolar
İnorganik Maddeler (Metaller)	
Antimon(Sb) Arsenik(As) Baryum(Ba) Berilyum(Be) Civa(Hg)* Çinko Sülfür(ZnS) Galyum(Ga) Kadmiyum(Cd) Kalay(Sn) Krom Kurşun (Pb) Lityum(Li) Nadir Topraj Elementleri Nikel(Ni) Selenyum(Se)	Alev Geciktiriciler Diyotlar (LED) ve mikrodalga entegre devreler Televizyon (katot ışın) tüpleri (CRT) Güç kaynakları, konnektörler Floresan lambalar, piller, ağ anahtarları CRT ekranlarında nadir toprak elementleri ile Diyotlar (LED) Toner, plastikler, Ni-Cd piller LCD, baskılı devre kartları (lehim) Disketler, çeşitli kaplamalar CRT , piller, baskılı devre kartları (lehim) Lityum piller CRT Ni-Cd piller, Ni-MH piller, elektron tabancaları Doğrultucular, eski nesil fotokopi cihazları

E-atıkların yol açtığı çevresel ve sağlık riskleri, birincil, ikincil ve üçüncül kirleticiler olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Birincil kirleticiler, doğrudan e-atığın içeriğinden kaynaklanan zararlı maddeleri ifade etmektedir. Bu kirleticiler arasında, baskılı devre kartları ve diğer elektronik bileşenlerde bulunan ağır metaller ile yangın geciktirici kimyasallarla modifiye edilmiş plastikler yer almaktadır (Schluep et al. 2009). İkincil tehlikeli bileşenler, genellikle e-atıkların resmi olmayan geri dönüşüm methodlarından kaynaklanmaktadır. Bu bileşenler, kirli atık su deşarjları ve yanma işlemlerinin sonucunda salınan toksik gazlar şeklinde ortaya çıkabilir. Asidik özellikleri bulunan ve küçük miktarda ağır metal barındıran atık su deşarjları, yer altı su kaynakları ve akarsularda kirliliğe yol açarak çevreyi tehdit edebilir (Nnorom and Osibanjo 2008). E-atıklardan kaynaklanan üçüncül kirleticiler, genellikle geri dönüşüm süreçlerinde kullanılan pirometalurji, hidrometalurji, biyo-metalurji veya mekanik

işleme gibi teknolojilerin yan ürünleri olarak ortaya çıkar. Bu kirleticiler, özellikle büyük ölçekli pirometalurjik işlemler sırasında yayılan gazlar nedeniyle çevreye salınmaktadır. Bu gazlar, geri dönüşüm süreçlerinin istenmeyen ve zararlı yan etkileri olarak kabul edilmektedir.

Yapılan çalışmalar, kentsel atık sahalarında tespit edilen ağır metal kirliliğinin önemli bir kısmının e-atıklardan kaynaklandığını göstermektedir. Örneğin, ABD’de atık sahalarındaki cıva (Hg) ve kadmiyumun (Cd) %70’inin, kurşunun (Pb) ise %40’ının elektrik-elektronik ekipmanlardan geldiği düşünülmektedir (Widmera et al. 2005). E-atıkların içerdiği toksik maddeler ve bu maddelerin çevresel etkileri üzerine yapılan analizler, bu atıkların belirli sınır değerleri aştığını ortaya koymuştur. (Li et al. 2007) ile (Yazıcı et al. 2010) tarafından gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmalarında, e-atıklardan kaynaklanan ağır metal (Pb, Cd, Cu) salınımının uluslararası belirlenen maksimum değerleri aştığı saptanmıştır. Örneğin, baskılı bilgisayar devre kartları üzerine yapılan bir araştırmada, kurşun emisyonunun ABD Çevre Koruma Ajansı (USA-EPA) tarafından belirlenen Tehlikeli Atık Belirleme Testi (TCLP) sınır değerlerinden 41 kez daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Yazıcı et al. 2010).

Ayrıca, baskılı devre kartlarının yakılması, içeriğindeki klorlu ve bromlu alev geciktiricilerin parçalanarak dioksinler ve furanlar gibi toksik poliklorlu organik bileşiklere dönüşmesine neden olabilmektedir (Robinson 2009; Vittal et al. 2012). Bu bileşikler, çevresel kalıcılığı yüksek olan ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri bulunan maddeler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, e-atıkların uygun yöntemlerle yönetilmesi ve geri dönüştürülmesi, hem çevresel hem de insan sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır.

E-atıkların içerdiği zararlı bileşenler nedeniyle, birçok ülkede bu atıkların toplanması ve geri dönüşümü yasal düzenlemelerle zorunlu hale getirilmiştir (Widmera et al. 2005; Kaya and Sözeri 2007; Nnorom and Osibanjo 2008; Yazıcı et al. 2011; Tuncuk et al. 2012). Avrupa Komisyonu, 2002/95/EC sayılı "Certain Hazardous Substances Restrictions (RoHS)" (Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılması) yönergesi ile elektrik ve elektronik ekipmanların imalatında kurşun, kadmiyum, krom, cıva ve bromlu alev geciktiricilerinin kullanılmasını sınırlamıştır. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP), e-atıklar dahil olmak üzere zararlı atıkların üretiminin azaltılması, gelişmiş ülkelere gelişmekte olan ülkelere sevk edilmelerinin yasaklanması ve atıkların yerinde geri dönüşüm ve kazanıma tabi tutulması gerektiğini vurgulayan bir anlaşma hazırlamıştır. Bu anlaşma, 1989 yılında Basel Sözleşmesi (Basel Convention) olarak kabul edilmiş ve 1992 yılından itibaren uygulanmaya başlamıştır; ülkemiz de dahil olmak üzere 170 ülke tarafından da kabul edilmiştir (Industries) 2019). E-atık yönetimi konusunda Avrupa Komisyonu, 2002/96/EC sayılı "Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)" (Atık Elektrik ve Elektronik Ekipmanları) talimatını yayımlamıştır (UE

2003). Bu düzenleme kapsamında, üreticilerin elektronik ekipmanları çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda tasarımları ve geri dönüştürülmüş hammadde kullanımına öncelik vermeleri hedeflenmektedir.

Bu talimat çerçevesinde, Elektrik ve Elektronik Ekipman (EEE) üreticilerine bir dizi sorumluluk yüklenmiştir (UE 2003). Bu sorumluluklar şu şekildedir:

Belediyeler, elektronik atıkların evsel atıklarla karışmasını önlemekle yükümlüdür.

Üreticiler, piyasaya sundukları ürünleri, kendi tesislerinde veya lisanslı diğer tesislerde geri dönüşüme tabi tutmak zorundadır.

Üreticiler, elektronik atıkların geri dönüşümünü ve kazanımını sağlamak amacıyla araştırmalar yapmalı veya yaptırmalıdır, ayrıca bu süreçlerin daha verimli hale getirilmesi için çaba sarf etmelidirler.

Buna benzer resmi uygulamalar, Avrupa Birliği (AB) üyesi olmayan Japonya, Norveç, İsviçre ve ABD gibi çoğu ülkede de uygulanmaktadır (Yazici et al. 2011). Türkiye'de ise, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yürütülen araştırmalar sonucunda, "Elektrik ve Elektronik Eşyalarla İlgili Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik" 2008 yılında yayımlanmış olup, "Atık Elektrik ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği" hazırlık aşamasındadır. Bu mevzuat düzenlemeleri doğrultusunda, Türkiye'de elektronik atıkların kontrol altına alınarak yönetilmesi, yakın gelecekte yasal bir yükümlülük haline gelecektir.

Elektronik atıkların sosyal çevre üzerine zararları

Elektronik atıkların insan sağlığı üzerindeki etkileri, özellikle gelişmekte olan ülkelerde yaygın olarak görülen kayıt dışı geri dönüşüm faaliyetleri nedeniyle daha belirgin hale gelmektedir. Koruyucu ekipman kullanılmadan yapılan söküm, yakma veya asitle liç işlemleri sırasında açığa çıkan toksik maddeler, çalışanların doğrudan ağır metal ve zehirli gazlara maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu maruziyet; solunum yolu hastalıkları, sinir sistemi bozuklukları, böbrek hasarı ve bazı kanser türleri ile ilişkilendirilmektedir. Çocuklar ve hamile bireyler, elektronik atıklardan kaynaklanan toksik maddelere karşı daha hassas gruplar arasında yer almaktadır. Söz konusu ağır metaller ve organik bileşenlere maruz kalan kişilerde yaşanabilecek olası sorunlar aşağıdaki gibidir:

- Kurşun (Pb): BDK'lerde lehim bileşenlerinde bulunur. Kurşuna uzun süreli maruz kalmak sinir sistemi hasarı, böbrek fonksiyon bozukluğu ve öğrenme güçlükleri gibi sağlık sorunlarına yol açabilir (Puckett et al. 2002).

- Cıva (Hg): Düşük miktarda bulunmasına rağmen, çevrede metil cıvaya dönüşerek biyoakümülyasyona yol açabilir ve nörolojik hasara neden olabilir (Tsydenova and Bengtsson 2011).
- Kadmiyum (Cd): Bazı kaplamalar ve dirençlerde bulunur. Kanserojen bir madde olup böbrek hasarına ve kemik erimesine neden olabilir (Frazzoli et al. 2010).
- Nikel (Ni): Korozyona dayanıklı kaplamalarda bulunur ve alerjik reaksiyonlara, solunum sistemi hastalıklarına neden olabilir (Sepúlveda et al. 2010).
- Polibromlu Bifeniller (PBB'ler) ve Polibromlu Difenil Eterler (PBDE'ler): Hormon sistemini bozabilir ve nörolojik gelişim üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (Darnerud 2003).
- Hekzabromosiklododekan (HBCD): Uzun süre doğada kalabilen ve canlı dokularında birikebilen bir maddedir, toksik etkileri nedeniyle yasaklanmıştır (de Wit 2002).
- Dioksinler ve Furanlar: Yanma sırasında ortaya çıkabilen bu bileşikler kanserojen olup bağışıklık sistemini ve hormon dengesini bozabilir (Huang et al. 2011).
- Ftalatlar ve diğer plastik katkı maddeleri: Endokrin bozucu etkileri bulunur ve üreme sistemi sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir (Halden 2010).

Bu durum, elektronik atık yönetiminin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda önemli bir halk sağlığı sorunu olduğunu da ortaya koymaktadır.

Elektronik atıkların ekonomik zararları

Elektronik atıkların kontrolsüz şekilde bertaraf edilmesi, önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu atıklar, altın (Au), gümüş (Ag), bakır (Cu) ve nadir toprak elementleri gibi yüksek ekonomik değere sahip metaller içermesine rağmen, etkin geri kazanım sistemlerinin yetersizliği nedeniyle büyük ölçüde israf edilmektedir. Bu durum, hem hammadde kaynaklarının gereksiz tüketilmesine hem de ülkelerin dışa bağımlılığının artmasına yol açmaktadır.

Ayrıca elektronik atıklardan kaynaklanan çevresel kirlilik ve sağlık sorunları, dolaylı ekonomik yükler oluşturmaktadır. Artan sağlık harcamaları, çevresel iyileştirme maliyetleri ve verimlilik kayıpları, kamu bütçeleri üzerinde ciddi baskılar yaratmaktadır. Etkin bir elektronik atık yönetim sisteminin kurulmamış olması, kısa vadede düşük maliyetli bir çözüm gibi görünse de uzun vadede sürdürülemez ekonomik sonuçlar doğurmaktadır.

E-atıkların geri dönüştürülmesinin avantajları

Çevresel avantajlar

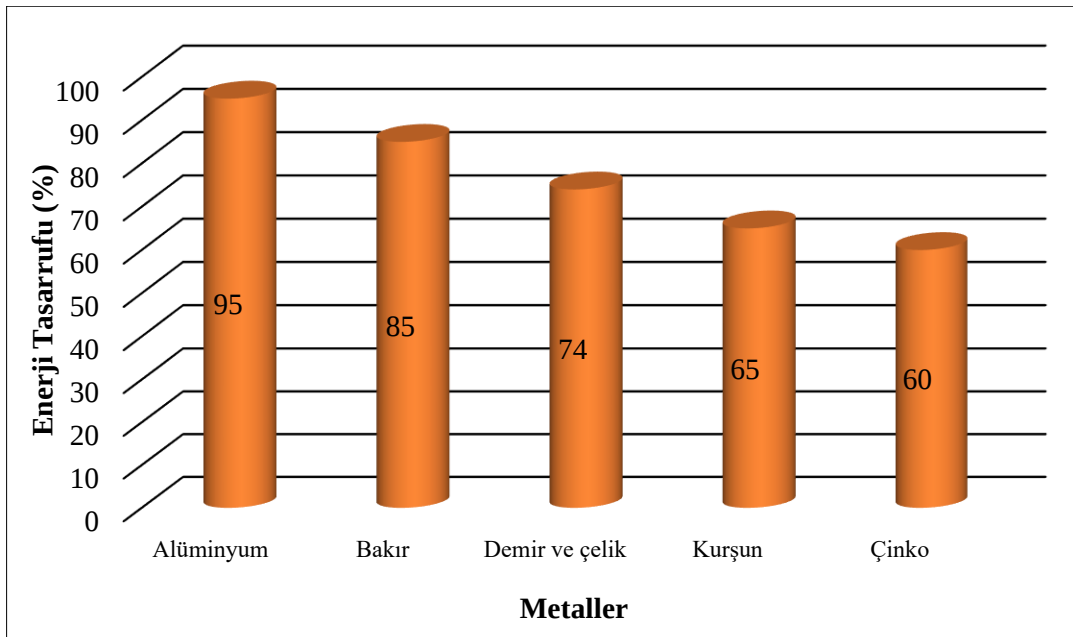
Metallerin geri dönüşümü, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlarken sera gazı emisyonlarını ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Metal madenciliği ve rafinasyon süreçleri büyük miktarda enerji gerektirdiğinden, e-atıklardan geri kazanılan metallerin kullanımı, enerji tasarrufu sağlamak ve karbon ayak izini düşürmektedir (Oguchi et al. 2011). Aynı zamanda uygun geri dönüşüm yöntemleri ile toksik maddelerin doğaya salınımı engellenerek ekosistem üzerindeki olumsuz etkiler minimize edilebilmektedir (Widmera et al. 2005).

Sosyal avantajları

E-atıkların geri kazanımı ekosistemi koruduğu için halk sağlığı da bundan olumlu yönde etkilenecektir. Böylece hükümetler üzerindeki sağlık harcamaları düşecektir.

Ekonomik avantajları

E-atıklardan değerli metallerin geri kazanımı, madencilik faaliyetlerine kıyasla daha düşük maliyetli ve daha verimli bir süreçtir. Örneğin, altın, gümüş, bakır, platin ve paladyum gibi değerli metaller, doğal cevherlerden elde edilmek yerine e-atıklardan daha yüksek konsantrasyonlarla geri kazanılabilir (Tansel 2017). Geleneksel madencilik yöntemleriyle karşılaştırıldığında, e-atıklardan metal geri kazanımı, işlenmiş ton başına daha fazla değerli metal içeriği sağlayarak, ekonomik kazancı artırmaktadır (Chancerel et al. 2009). Ayrıca, e-atıkların geri dönüştürülmesiyle istihdam alanları oluşturulmakta ve döngüsel ekonomi desteklenmektedir (Song and Li 2014). Bilgisayarlarda kullanılan baskılı devre kartları (BDK), kütle bazında hemen hemen %20-30 oranında bakır (Cu) ve 250 g/t seviyesinde altın (Au) içermektedir. Bu içerik, doğal cevher ve konsantrelerindeki bakır miktarına kıyasla 13 ila 26 kat, altın miktarına kıyasla ise 35 ila 50 kat daha yüksek olup BDK'leri metallerin geri kazanımı açısından önemli bir ikincil kaynak haline getirmektedir (Cui and Zhang 2008). Bu bağlamda, geri dönüşüm süreçleri aracılığıyla kazanılan metaller, enerji verimliliği açısından da büyük bir avantaj sunmaktadır (Zhang et al. 1997; Hagelüken 2006; Cui and Zhang 2008). Şekil 8, ikincil kaynaklardan geri dönüşümle kazanılan metallerin enerji tasarrufu açısından ekonomik kazancını göstermektedir.



Şekil 8. İkincil kaynaklardan elde edilen metallerin enerji tasarrufu (Cui and Forssberg 2003; Wang and Gaustad 2012).

Sonuç olarak, e-atıklardan metal geri kazanımı çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Doğal kaynakların korunması, çevresel kirliliğin önlenmesi ve ekonomik değer yaratılması açısından sürdürülebilir geri dönüşüm uygulamalarının yaygınlaştırılması önemli bir sorumluluktur (Akçil et al. 2015).

Baskılı Devre Kartlarının Geri Kazanım Yöntemleri

Atık baskılı devre kartlarının geri dönüşümü, otuz yılı aşkın süredir bilimsel araştırmalara konu olmaktadır. Bu süreçte, yüksek ekonomik değere sahip metallerin geri kazanımı için çeşitli teknolojik yöntemler geliştirilmiştir. Kullanılan başlıca yöntemler Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Beş ana elektronik atık geri dönüşüm teknolojisi (Smith and Behdad 2025)

Fiziksel ayırma yöntemleri

ABDK'lardan metallerin geri kazanımı sürecinde fiziksel ön işlemler önemli bir rol oynamaktadır. Bu süreç, aşamalı olarak ayrıştırma, boyut küçültme ve metal ile metalik olmayan bileşenlerin birbirinden ayrılmasını içeren çeşitli adımlardan oluşmaktadır. Kompleks yapıdaki farklı malzemelerin etkin şekilde ayrılması için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu prosesler arasında manyetik olarak ayıklama, eddy current ayıklama, elektrostatik ayıklama, yoğunluk farkı baz alınarak ayıklama, hava siklonları ve elek kullanımı gibi çeşitli teknikler yer almaktadır (Zhang et al. 1997; Cui and Forssberg 2003; Goosey and Kellner 2003; Li et al. 2004; Kang and Schoenung 2005; Veit et al. 2006). Tablo 6'da fiziksel ayırma yöntemleri verilmiştir (Cui and Forssberg 2003).

Tablo 6. Fiziksel Ayırma Yöntemleri (Cui and Forssberg 2003)

Yöntem	Ayırma Kriteri	Ayırmanın Temelleri	Malzeme Türü	Ayırma Boyutu
Manyetik ayırma	Manyetik duyarlılık	Farklı manyetik özelliğe sahip malzemeler manyetik alan içinde farklı kuvvetlerden etkilenir	Demir/alaşım, Ferromanyetik ile Diyamanyetik ayırmada	<5 mm
Elektrostatik ayırma (Korona)	Elektrik İletkenliği	Elektrik alanın etkisiyle taneler farklı yükler kazanarak farklı kuvvetlerden etkilenir	Metal-metal dışı ayırmada	0,1-5 mm
Elektrostatik ayırma (Triboelektrik)	Dielektrik sabiti	Farklı malzemelerin birbirleriyle temas etmeleri ile (+) ve (-) yüklenerek farklı kuvvetlere maruz kalırlar	Plastik-plastik ayırmada	<5-10 mm
Eddy Akımı Ayırma	Elektrik iletkenliği ve yoğunluğu	İletken taneler sürekli değişen manyetik alana girdiklerinde oluşan eddy akımlarının sonucunda zıt yönde itici bir manyetik alan oluşur	Demir dışı metal-metal dışı ayırmada	>5 mm
Yoğunluğa Dayalı ayırma	Özgül ağırlık farkı	Malzemeler hafif ve ağır olarak özgül ağırlık farkına dayalı olarak ayrılır	Metal-Metal dışı ayırmada	<2 m

Fiziksel ayırma teknikleri, uygulama kolaylığı ve maliyet etkinliği bakımından tercih edilse de, bu yöntemlerde gözlemlenen metal kayıpları geri dönüşüm süreçlerinin toplam verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Hagelüken 2006). Baskılı devre kartları, soketler ve bağlantı elemanlarında bulunan birkaç mikron kalınlığındaki değerli metal kaplamaların, boyut küçültme işlemleri sırasında aşınma sonucu ince fraksiyonlara geçtiği belirtilmektedir (Programme 2009). Bununla birlikte, -100 μ m tane boyutunda gerçekleştirilen elektrostatik ayırma işlemlerinin verimliliğinin düşük olması, değerli metal kayıplarını artırmakta ve sürecin ekonomik faydaların azalmasına yol açmaktadır. Bunun yanı sıra, ince taneli öğütülmüş baskılı devre kartlarında gerçekleştirilen ayırma işlemlerinin düşük verimlilik göstermesi, fiziksel

ayırma tekniklerinin başlıca sınırlamalarından biri olarak kabul edilmektedir (Ogunniyi et al. 2009).

Pirometalurjik yöntemler

Pirometalurjik teknikler, Noranda, Boliden Rönnskar ve Umicore gibi prosesler başta olmak üzere, elektronik atıklardan metallerin geri kazanımında genel şekilde tercih edilmektedir. Pirometalurjik yöntemlerde, metal alaşımları elde etmek amacıyla yüksek sıcaklıklarda fırınlar yakma yöntemini kullanır. Gerekli enerjiyi elde etmek için fosil yakıtlar tercih edilir. E-atık beslemesinde bulunan halojenli plastikler (PVC'deki klor gibi) ve bromlu alev geciktirici maddelerle işlenmiş plastikler, uygun önlemler ve özel kurulumlar bulunmadığı takdirde, yakma işlemleri sırasında klorlu ve brominatlı dibenzofuranlar ile dioksinlerin oluşmasına sebep olabilir. Bu nedenle, pirometalurjik yöntemlerin etkinliği, işlem koşullarına, kullanılan materyallere ve çevresel yönetim önlemlerine bağlı olarak değişmektedir. Yüksek sıcaklık ve enerji ihtiyacı göz önüne alındığında, bu yöntem konsantrasyonu yüksek metallerin geri kazanımında ekonomik olur. Sultana ve arkadaşları (2025) tarafından yürütülen çalışmada, atık baskılı devre kartlarına (BDK) uygulanan pirometalurjik işlemler sonucunda 35,25 g yanmış BDK kalıntısı elde edilirken; piroliz prosesi ile 32,5 g katı faz, 3,15 g sıvı yakıt ve 14,85 g gaz yakıt üretildiği rapor edilmiştir. 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda uzun süreli ısıl ön işlemin bakır ekstraksiyonunu önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, nitrik asit ortamında gerçekleştirilen liç işlemi ile %97,9 oranında bakır geri kazanımı sağlanırken, pirolizlenmiş BDK'ların sülfürik asit ortamında işlenmesi sonucunda bakır geri kazanım veriminin %50,78 seviyesinde kaldığı ifade edilmiştir (Sultana et al. 2025). Ayrıca Amrita Preetam ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada depolimerizasyon mekanizması, reaksiyon süresinin 30–240 dakika aralığında değiştirildiği ve katı–sıvı oranının 1:10–1:30 g/mL arasında ayarlandığı koşullarda, azot atmosferi altında çalışan bir kesikli reaktörde incelenmiştir. Süperkritik metanol işlemi sonrasında elde edilen sıvı ürünler, hem atık rastgele erişim belleği (WRAM) hem de atık baskılı devre kartları (ABDK) için piroliz kaynaklı yağ/sıvı ürünlerle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, süperkritik metanol işlemi sonrasında bakır, nikel, gümüş, çinko ve altın gibi metallerin konsantrasyonlarının %90'ın üzerinde olduğunu ortaya koymuştur (Preetam et al. 2022).

Hidrometalurjik yöntemler

Son yirmi yılda, elektronik atıklardan metallerin geri kazanılmasına yönelik araştırmalarda en çok kullanılan yöntem hidrometalurjidir (Singh et al. 2026). Elektronik atıklardan metallerin hidrometalurjik olarak geri kazanımı asidik veya bazik bir çözücü ile

metal ve değerli metallerin çözeltilmeye alınması ve ardından çözelti içindeki metallerin ekstraksiyon, elektroliz, iyon değişimi gibi yöntemlerle kazanılmasıdır. Basınç liç teknolojisi, hidrometalurji alanında önemli ve etkili teknolojilerden biridir. Bu yöntemin yüksek metal geri kazanılabilirliği, düşük oksijen tüketimi ve kısa işlem süreleri gibi avantajlara sahiptir. Tran ve arkadaşları (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, atık baskılı devre kartlarının (ABDK) geri kazanımına yönelik tiyosülfat esaslı bir hidrometalurjik proses önerilmiş ve yıllık 1200 ton işleme kapasitesine sahip bir geri dönüşüm tesisine ilişkin teknik ve ekonomik fizibilite değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen bulgular, geliştirilen prosesin bakır ve altın için sırasıyla %96,5 ve %92,5 oranlarında geri kazanım verimliliği sağladığını ortaya koymuş; bu sonuçlar, söz konusu yaklaşımın ABDK'lardan metal geri kazanımı açısından uygulanabilir bir alternatif sunduğunu göstermiştir (Tran et al. 2025).

Singh ve arkadaşları (2026) tarafından yürütülen çalışmada, kullanılmış baskılı devre kartlarından (BDK) bakır ve nikel geri kazanımına yönelik bir hidrometalurjik prosesin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda elde edilen metal konsantrasi, bakır (Cu^{2+}) ve nikelin (Ni^{2+}) maksimum düzeyde çözünmesini sağlamak amacıyla, katı-sıvı oranı 50 g/L olacak şekilde ayarlanmış ve %10 H_2SO_4 ile %10 H_2O_2 içeren bir liç çözeltisinde 75 °C sıcaklıkta 120 dakika süreyle işleme tabi tutulmuştur. Liç işlemi sonrasında, hurda demir çubuklar kullanılarak gerçekleştirilen çimentolama yöntemi ile bakırın %99,9 oranında başarıyla geri kazanıldığı rapor edilmiştir (Singh et al. 2026). Ayrıca Rao ve arkadaşları (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, atık baskılı devre kartlarından (ABDK) bakırın geri kazanımına yönelik hidrometalurjik bir yaklaşım kapsamında, ön işlem ve liçleme aşamalarında etkili olan işletme parametrelerinin optimizasyonu ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, 50 g/L katı sıvı oranı, 500 rpm karıştırma hızı ve 3 M nitrik asit kullanılarak 2 saat sürede gerçekleştirilen liç koşullarında bakırın yüksek verimle (%99,9) çözelti fazına alındığını ortaya koymuştur. Ayrıca, söz konusu koşullar altında liç çözeltisinde altının çözünmediği tespit edilmiştir (Rao et al. 2021). Ek olarak S.Aral ve A.V.Beşe (2024) tarafından yürütülen çalışmada, kullanım ömrünü tamamlamış masaüstü bilgisayarlara ait anakart baskılı devre kartlarından baz ve değerli metallerin maksimum düzeyde geri kazanılmasına yönelik optimum proses koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. İki aşamalı olarak tasarlanan çalışmanın ilk aşamasında, yüksek basınçlı liç koşulları altında atık baskılı devre kartlarındaki baz metallerin (bakır ve çinko) çözünme davranışı incelenmiştir. Optimum liç koşulları; 20 bar basınç, 130 °C sıcaklık, 2 M H_2SO_4 , %35 H_2O_2 , 60 dakikalık işlem süresi ve 1/40 g/mL katı/sıvı oranı olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında bakır ve çinkonun sırasıyla %99,62 ve %98,76 oranlarında geri kazanıldığı, buna karşın altının çözelti fazına geçmediği rapor edilmiştir (Aral and Beşe 2024).

Biyoliç yöntemleri

Çevresel sürdürülebilirliği önceleyen geri dönüşüm yaklaşımları kapsamında biyoliç, elektronik atıklardan metal geri kazanımında dikkat çeken bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Bu süreçte bakteri ve arkeler başta olmak üzere çeşitli mikroorganizmalar, metal bileşiklerinin oksidasyonunu gerçekleştirerek metallerin çözelti fazına geçmesini sağlamaktadır. Mikroorganizmalar aracılığıyla gerçekleşen bu oksidatif dönüşüm, biyolojik liç mekanizmasının temel basamağını oluşturmakta ve konvansiyonel kimyasal ya da fiziksel yöntemlerle geri kazanımı güç olan değerli metallerin etkin biçimde kazanılmasına olanak tanımaktadır (Brown et al. 2023).

Geleneksel metal geri kazanım yöntemleriyle kıyaslandığında, biyolojik temelli geri kazanım yaklaşımları daha düşük enerji gereksinimi ve çevresel etkileriyle öne çıkmaktadır. Bu özellikleri sayesinde biyolojik geri kazanım süreçleri, elektronik atıklardan metal kazanımında sürdürülebilirliği destekleyen ve çevreyle uyumlu bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Uygun işletme koşulları altında, mikroorganizmalar atık baskılı devre kartlarına (ABDK) fizyolojik ve metabolik adaptasyon sürecinden geçerek liçleme performanslarını artırabilmektedir (Rene et al., 2021; Hong ve Valix, 2014).

Bu adaptasyon yeteneği, farklı mikroorganizma gruplarının çeşitli biyoliçleme yaklaşımlarıyla etkin biçimde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Güncel uygulamalarda biyoliçleme süreçleri; tek aşamalı biyoliçleme, iki aşamalı biyoliçleme ve kullanılmış ortam (spent medium) biyoliçleme olmak üzere üç temel yöntem altında sınıflandırılmaktadır (Dong et al., 2023a). Bununla birlikte, metal biyoliçleme süreçleri; kompleksoliz, asidoliz ve redoksoliz gibi farklı etkileşim mekanizmalarının bir arada veya tekil olarak rol oynadığı çok bileşenli bir yapıya sahiptir (Brandl et al. 2001; Glombitza and Reichel 2014). Literatürde bildirilen çalışmalarda, *Penicillium simplicissimum* kullanılarak gerçekleştirilen biyolojik liç deneylerinde, 10 g/L elektronik atık hamur konsantrasyonunda bakır ve nikel için sırasıyla yaklaşık %90 ve %89 oranlarında biyolojik çözünme verimlerine ulaşıldığı rapor edilmiştir (Xia et al. 2018; Arshadi et al. 2019). *Penicillium simplicissimum*'un saf kültürünün kullanıldığı bir çalışmada, karbon kaynağı olarak melasın tercih edildiği kabarcık kolon reaktöründe gerçekleştirilen biyoliç deneyleri sonucunda bakır ve nikel için sırasıyla yaklaşık %96 ve %71 oranlarında biyoliçleme verimlerine ulaşıldığı bildirilmiştir (Arshadi et al. 2020; Nili et al. 2022). Ayrıca *Aspergillus niger* kullanılarak atık baskılı devre kartları üzerinde gerçekleştirilen tek aşamalı ve iki aşamalı mantar biyoliçleme uygulamalarında, ortam pH'sının 2–8 aralığında ve katı sıvı oranı 2–10 g/L arasında değiştiği koşullar altında bakır ve nikel için sırasıyla %97 ve %74 düzeylerinde metal ekstraksiyon verimlerine ulaşıldığı rapor edilmiştir (Arshadi et al. 2020; Nili et al. 2022).

Süperkritik akışkan teknolojisi

Metallerin geri kazanımına yönelik çevreyle uyumlu ve ekonomik açıdan sürdürülebilir süreçlerin geliştirilmesi amacıyla son yıllarda çeşitli yenilikçi teknolojiler önerilmiştir (Zhou and Xu 2012). Bu yaklaşımlar arasında yer alan süperkritik akışkan (SKA) teknolojisi, özellikle yeşil kimya prensipleriyle uyumlu olması nedeniyle dikkat çekmektedir. Süperkritik akışkanlar (özellikle H₂O ve CO₂) termodinamik olarak kararlı, kanserojen olmayan, mutajenik olmayan, çevre dostu ve yanıcı olmayan çözücüler olarak kabul edilir (Fazari et al. 2024). Yeşil çözücüler olarak süperkritik akışkanların kullanılması dünya çapında sürdürülebilir ve yeşil teknolojiler ile ilgilenen araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Süperkritik ve subkritik su (SKS) uygulamaları, e-atıklardan toksik olan organik maddeleri uzaklaştırmak ve metalleri geri kazanmak için yeşil kimya ortamı sağlamaktadır (Gong et al. 2016).

Süperkritik akışkan teknolojisinin temel prensibi, bir maddenin faz diyagramında sıcaklık ve basıncın artırılmasıyla kritik noktaya ulaşılması esasına dayanmaktadır. Kritik noktada gaz ve sıvı fazlar arasındaki sınır ortadan kalkmakta ve akışkan tek fazlı bir davranış sergilemektedir. Kritik noktanın üzerindeki bu durum, süperkritik faz olarak tanımlanmaktadır. Süperkritik koşullar altında akışkanın yoğunluğu gaz fazına kıyasla daha yüksek, sıvı faza göre ise daha düşüktür. Bu özgün fizikokimyasal özellikler sayesinde süperkritik akışkanlar; düşük viskozite, yüksek difüzyon katsayısı ve artan reaktivite gibi avantajlar sunarak ekstraksiyon ve oksidasyon gibi işlemlerde üstün kütle transfer özellikleri sağlamaktadır (Skouta 2009). Literatürde yaygın olarak kullanılan bazı süperkritik akışkanların kritik sıcaklık ve basınç değerleri Tablo 7’de özetlenmiştir (Wagner and Pruss 2002).

Tablo 7. Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Süperkritik Akışkanlar ve Kritik Sıcaklık-Basınç Değerleri (Wagner and Pruss 2002)

Sınıflandırma	Madde	Kritik sıcaklık (K)	Kritik basınç (MPa)	Kritik yoğunluk (kg/m ³)
Polar çözücüler	Su	647,5	22,12	315
	Amonyak	405,5	11,35	235
	Metanol	512,6	8,20	272
	Etanol	513,9	6,22	276
Polar olmayan çözücüler	Karbon dioksit	304,3	7,38	469
	Etan	305,4	4,88	203
	Etilen	282,4	5,04	215
	Propan	369,8	4,25	217
	Propilen	364,9	4,6	232
	Sikloheksan	553,5	4,12	273
	Benzen	562,2	4,96	302

Süperkritik akışkan yöntemi, hızlı olması ve yüksek işlem verimi sağlaması gibi önemli kazanımlarının yanında hem metal kazanımı hem de zararlı organik ürünleri parçalayarak

dönüşümünü sağlama avantajına sahiptir. Süperkritik akışkan teknolojisi kullanarak organik bileşenlerin bozundurulmasına ve kazanılan metallere ilişkin bazı çalışmalar Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. E-atıklardan Organik Yapıların Arındırılması ve Metal Kazanımına Dair Süperkritik Akışkanların Uygulamaları

E-atık	SKA	Ayrıştırma konusu	Reaksiyon sıcaklığı (°C)	Ürün	Referanslar
Atık Baskı Devre Kartları	Su		350–550		(Chien et al. 2000)
	Aseton	Bromlu epoksi reçine	220–300	Fenolik bileşikler, HBr,	(Xing and Zhang 2014)
	Metanol		300–420	Metal (Cu)	(Xiu and Zhang 2010)
	CO ₂		220–280		(Liu et al. 2008)
Atık LCD	Su	Polarize film	250–400	Asetik asit, metal (In)	(Wang et al. 2015)
	CO ₂		30-60		(Zhu et al. 2012)
Atık Bellek modülü	Su	Bromlu epoksi reçine	400–500	Fenolik bileşikler, HBr, Metal (Cu, Au)	(Li and Xu 2015)
Atık TV	Su	Kalıp reçinesi	400–425	Fenolik bileşikler, metal (Ta)	(Niu et al. 2017)
Plastik atıklar	Su	Bromlu alev geciktiriciler	300–420	Fenolik bileşikler	(Wang and Zhang 2012)

Süperkritik su teknolojisi

Süperkritik su (SKS) prosesi, atık baskılı devre kartlarından (BDK) metal geri kazanımında kullanılan ayrıştırma temelli bir yöntem olup metal kazanım verimini artırma potansiyelinin yanı sıra yan ürün olarak yenilenebilir hidrojen üretimine olanak sağlaması nedeniyle atık geri dönüşümünde çevresel açıdan daha temiz ve ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Chen et al. 2022). Su, süperkritik koşullara ulaştığında; hidrojen bağlanması, yoğunluk, viskozite, dielektrik sabiti, çözünürlük ve difüzyon katsayısı gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerinde ani ve belirgin değişimler meydana gelmektedir (Wagner and Pruss 2002). Bu değişimlerin sağladığı önemli avantajlardan biri, SKS ortamında suyun dielektrik sabitinin azalmasıyla birlikte atık BDK’lar, plastikler ve diğer hammaddelerin çözünürlüğünün artmasıdır. Ayrıca, kütle transferine yönelik sınırlamaların azalması ve SKS’nin nispeten yüksek iyonlaşma sabiti, sistem içerisinde yüksek derecede reaktif bir reaksiyon ortamı oluşmasına katkı sağlamaktadır (Peterson et al. 2008).

Süperkritik su teknolojisinin, pirometalurji ve hidrometalurji gibi geleneksel metal geri kazanım yöntemlerine kıyasla çeşitli üstünlükler sunduğu bildirilmektedir. Bu avantajlar

arasında, sıvı ürünlerin yeniden kullanılabilmesi, daha düşük emisyon ve atık oluşumu, nispeten düşük girdi maliyetleri ve sistemin yüksek kimyasal kararlılığı öne çıkmaktadır (Li et al. 2019).

Kang ve arkadaşları (2025) atık baskılı devre kartlarından bakır geri kazanımına yönelik olarak süperkritik su destekli asit liçleme sürecini kapsamlı biçimde incelemiştir. Çalışmada, epoksi reçine ve epoksi monomerinin subkritik su ortamındaki bozunma davranışları sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Hidrotermal işlem parametrelerinin organik bileşenlerin bozunması üzerindeki etkileri, yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılarak değerlendirilmiş ve bu analizler doğrultusunda optimum çalışma koşulları öngörülmüştür. Ayrıca, bisfenol A diglisidil eter (BADGE) ile epoksi reçinenin bozunma yollarının karşılaştırılması yoluyla, epoksi reçinenin süperkritik su ortamındaki bozunma mekanizması ayrıntılı olarak açıklığa kavuşturulmuştur. Süperkritik su ön işlemini takiben katı kalıntılara uygulanan $H_2SO_4-H_2O_2$ liç aşaması, ön işlem ve asit liç basamaklarının entegrasyonunun, epoksi reçinenin hızlı ve etkin bir şekilde parçalanmasının yanı sıra, yüksek verim ve saflıkta bakır geri kazanımı sağladığını ortaya koymuştur (Kang et al. 2025).

Süperkritik koşullar altında plastik ve diğer organik bileşenler tamamen çözünebilmektedir ve bu bileşenler daha sonra katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülebilmektedir. Özellikle bromlu epoksi reçinelerin, SKS ortamında toksik olmayan uzun zincirli hidrokarbonlara dönüştürülebildiği ve brom elementinin büyük ölçüde hidrojen bromür (HBr) formuna geçerek sulu fazda yoğunlaştığı rapor edilmiştir (Xing and Zhang 2013).

SKS işleminin ardından cam elyafı, bakır folyo, alüminyum ve çelik gibi inorganik bileşenler etkin bir şekilde geri kazanılabilmekte; geride kalan katı kalıntı ise metal geri kazanım verimlerinin artırılması amacıyla ilave proseslere yönlendirilmektedir (Xing and Zhang 2013). Uygun işlem koşullarında, cam elyafı bünyesinde bulunan SiO_2 'nin, termal yalıtım ve asit direnci özellikleri ile bilinen anortit ve albit fazlarına dönüştürülebileceği belirtilmektedir (Liu et al. 2016). Ayrıca, SKS prosesi sonrasında BDK'dan elde edilen cam elyaflarının, mekanik dayanımın iyileştirilmesi amacıyla plastik kompozitlerde katkı malzemesi olarak değerlendirilebileceği ifade edilmektedir. Song ve çalışma arkadaşları (2014) subkritik suyun (SKS), reaksiyon ortamında yüksek miktarda H^+ ve OH^- iyonu sağlayabilmesi sayesinde organik bileşiklerin parçalanmasında etkin bir katalitik ortam oluşturduğunu bildirmiştir (Song and Li 2014). Guo ve arkadaşları (2025) süperkritik su alüminyum klorür sisteminin, eş zamanlı reçine bozunumu ve debrominasyon işlemleri için etkili ve umut vadeden bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada, 250 °C işlem sıcaklığı, 60 dakikalık sabit sıcaklık süresi ve %40 (kütlece) alüminyum klorür derişimi optimum proses koşulları

olarak belirlenmiş olup, bu koşullar altında %99,71 oranında reçine bozunumu ve %99,53 oranında debrominasyon verimliliği elde edildiği rapor edilmiştir (Guo et al. 2025).

Li ve Xu (2015), herhangi bir katalizör ilavesine gerek duyulmaksızın uygulanan süperkritik su (SKS) yönteminin, atık baskılı devre kartlarının (ABDK) işlenmesinde kullanılan geleneksel yaklaşımlara kıyasla daha yüksek verimlilik ve pratiklik sunduğunu raporlamıştır. Söz konusu çalışmada deneysel veriler, sıcaklık, basınç ve reaksiyon süresini bağımsız değişkenler olarak içeren ampirik ikinci dereceden bir polinom model kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, SKS işlemi sonrasında oluşan kalıntı miktarının azaltılmasında sıcaklık ve reaksiyon süresinin, basınç parametresine kıyasla daha belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur (Li and Xu 2015).

Süperkritik CO₂

CO₂, yanıcı olmaması, düşük kritik sıcaklık (31.1 °C) ve basınç (7.38 MPa) değerlerine sahip olması ve ekonomik olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilen süper kritik akışkandır (Sanyal et al. 2013; Fazari et al. 2024). Baskılı devre kartlarını ayırma amacıyla su -süperkritik CO₂ ile bakır, cam elyafı ve polimerin başarılı bir şekilde ayrıştırılabildiğini göstermiştir. Calgaro ve arkadaşları (2015) ise süperkritik CO₂ ortamında çözücü olarak H₂SO₄ ve H₂O₂ kullanarak atık baskılı devre kartlarından bakır geri kazanımını incelemişlerdir. Elde edilen veriler, süperkritik ekstraksiyonun hızlı bir yöntem olduğunu ve yüksek bakır kazanım verimine ulaşıldığını rapor etmiştir (Calgaro et al. 2015)

Calgaro ve arkadaşları (2015) süperkritik karbondioksit (SkCO₂) kullanımıyla lityum iyon pillerden kobaltın (Co) %95'in üzerinde bir uzaklaştırma verimiyle geri kazanılabildiğini raporlamıştır. Süperkritik CO₂ kullanarak süperkritik su (SKS) prosesi sonrasında elde edilen kalıntılardan gümüşün (Ag) ekstraksiyonunu incelemiş ve 400 °C sıcaklıkta bir saatlik bekleme süresinin ardından katı fazdaki gümüş dağılımında belirgin bir azalma gözlemlemiştir. Bu bulgu, başlangıçta çözünmeyen bazı gümüş türlerinin işlem koşulları altında çözünür hale geldiğini ve daha yüksek sıcaklıklarda sulu faza transfer edildiğini göstermektedir (Calgaro et al. 2015). Elektronik atıklardan metal kazanım yöntemlerinin karşılaştırılması Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. E-atıklardan Metallerin Kazanım Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Zhang et al. 2000)

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Fiziksel Yöntemler	-Tüm e-atık çeşitleri için uygundur. -Zararlı gaz çıkışı yoktur. -Basit proseslerdir.	-Metal/değerli metal kaybı olur. -Elde edilen ürünün ekstraktif metalurjik yöntemlere (liç,ergitme vb) tabi tutulması gereklidir. -Toz problemi olabilir.
Pirometalurjik Yöntemler	-Çoğu e-atık türü için uygundur. -Bazı e- atık türleri için boyut küçültme aşaması gerekli değildir. -Plastikle ergitme sırasında enerji kaynağı olarak görev yapar.	-Sadece değerli metal içeriği yüksek atıklar için ekonomiktir. -e-atık içindeki seramik ve cam malzemeler cüruf miktarını artırır ve bu da metal/değerli metal kaybını yükseltir. -Al ve Zn kazanımı mümkün olmayan kısımların kazanımı kolay değildir. -Pahalı ve enerji yoğun işlemdir. -Zararlı gaz çıkışı vardır.(dioksinler ve furanlar)
Hidrometalurjik Yöntemler	-Küçük ölçekte uygulanabilir. -Daha esnektir. -Metal kazanma verimi yüksektir. -Yüksek saflıkta metal eldesi vardır. -Çevresel etkisi düşüktür. -Zararlı gaz çıkışı yoktur. -Toz problemi yoktur.	-Ön hazırlık işlemi gerektirir. -Atık çözeltinin artırılması gereklidir. -Yan ürün eldesi zordur.
Biyohidrometalurjik Yöntemler	-Çevresel etkisi düşüktür. -Zararlı gaz çıkışı yoktur. -Toz problemi yoktur.	-Liç süresi uzundur. -Metallerin toksik etkisi liç işlemini olumsuz etkiler. -Liç için katı oranı nispeten düşüktür.(<%20)
Süperkritik Akışkan Yöntemi	-Çevre dostu bir yöntemdir. -Metal ve organik fazların birlikte işlenmesine olanak tanır. -Yüksek seçicilik ve verimlilik sağlar	-Enerji gereksinimi yüksektir. -Endüstriyel ölçekleme sınırlamaları sıkıntı oluşturabilir. -Yüksek basınç gerektirdiğinden yüksek ilk yatırım maliyeti gerektirir.

Debromizasyon (subkritik su oksidasyonu)

Atık baskılı devre kartları çevrese ve sağlık açısından son derece zararlı olan bromlu epoksi reçineler (BER'ler) ile bromlu alev geciktiriciler (BAR'ler) gibi toksik bileşenleri bünyesinde barındırmaktadır. Bu zararlı bileşiklerin yüksek düzeyde toksik ve potansiyel olarak

kanserojen özelliklere sahip olmaları, ABDK'ların çevreye duyarlı biçimde geri dönüştürülmesi sürecinde etkili bertaraflarını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, son yıllarda katalitik piroliz yöntemi, ABDK'lardan brom içeren bileşiklerin uzaklaştırılması ve geri kazanılması açısından etkili ve umut vadeden bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Kullanılan katalizör türü ile piroliz koşulları (örneğin sıcaklık, süre ve atmosfer) arasındaki etkileşim, debrominasyon sürecinin verimliliğini, elde edilen ürünlerin türünü ve dönüşüm mekanizmalarını doğrudan etkilemektedir (Xiu et al. 2025).

Bu bileşikler çevreye salındıklarında yüksek kimyasal kararlılıkları nedeniyle kolaylıkla bozunmamakta ve biyolojik olarak parçalanmaları sınırlı olmaktadır. Yüksek brom içeriği, bu maddelerin çevresel ortamlarda ikincil kirlilik riskini artırmasına neden olmaktadır. Özellikle yakma gibi geleneksel bertaraf yöntemleri uygulandığında, BAG'lerin polibromlu dibenzofuranlar ve tetrabromobisfenol gibi toksik ve kalıcı yan ürünlere dönüşebildiği literatürde bildirilmektedir.

Bu sorunların giderilmesine yönelik olarak, son yıllarda bromlu alev geciktiricilerin süperkritik akışkan (SKA) teknolojileri kullanılarak debrominasyonuna ilişkin çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalardan birinde, elektronik atıklardan bromlu epoksi reçinenin (BER) ayrıştırılması amacıyla subkritik su (SKS) ortamı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, bromlu epoksi reçinenin SKS koşulları altında kısa sürede ve yüksek verimle ayrışabildiğini ortaya koymuştur (Xing and Zhang 2013).

Polimer bozunmasının temel olarak serbest radikal mekanizmasıyla gerçekleştiği kabul edilmektedir. Bağ enerjisi yaklaşımına göre, sistem tarafından sağlanan enerji, reçine moleküllerindeki bağların ayrışma enerjisini aştığında serbest radikaller oluşmaktadır. İlk bozunma adımı, $C_6H_5O-CH_2$ (263 kJ/mol) gibi nispeten düşük bağ enerjisine sahip bağların kırılmasıyla monomerik türlerin meydana gelmesiyle başlamaktadır. Enerji seviyesinin artmasıyla birlikte C-C (332 kJ/mol), C_6H_5-Br (336,8 kJ/mol) ve C_6H_5-O (358 kJ/mol) gibi daha yüksek bağ enerjilerine sahip bağların da ayrışabildiği bildirilmektedir. Oluşan serbest radikaller, konjugasyon ve katalitik etkileşimler yoluyla yeni ara ve son ürünlere dönüşebilmektedir. Bu süreç sonucunda fenol, 4-(1-metiletil)fenol, 2-metilfenol, 4-metilfenol, 4-etilfenol, 4-fenilfenol ve hidrojen bromür (HBr) gibi bileşiklerin başlıca bozunma ürünleri olarak olduğu rapor edilmiştir (Li and Xu 2015).

Liu ve çalışma arkadaşları (2016), bromlu alev geciktiricilerin debrominasyon verimini artırmaya yönelik olarak subkritik su (SKS) temelli bir oksidasyon sistemi geliştirmiştir (Liu et al. 2016). Geliştirilen sistemde NaOH ve H_2O_2 ilavesiyle debrominasyon veriminin %95,14 seviyesine ulaştığı rapor edilmiştir. Deneysel bulgular, özellikle NaOH varlığında uygulanan

yüksek sıcaklık koşullarının, atık baskılı devre kartları bünyesindeki bromlu epoksi reçinelerin (BER) debrominasyonunu önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu aşamada BER yapılarının uzun zincirli hidrokarbonlara parçalandığı ifade edilmiştir.

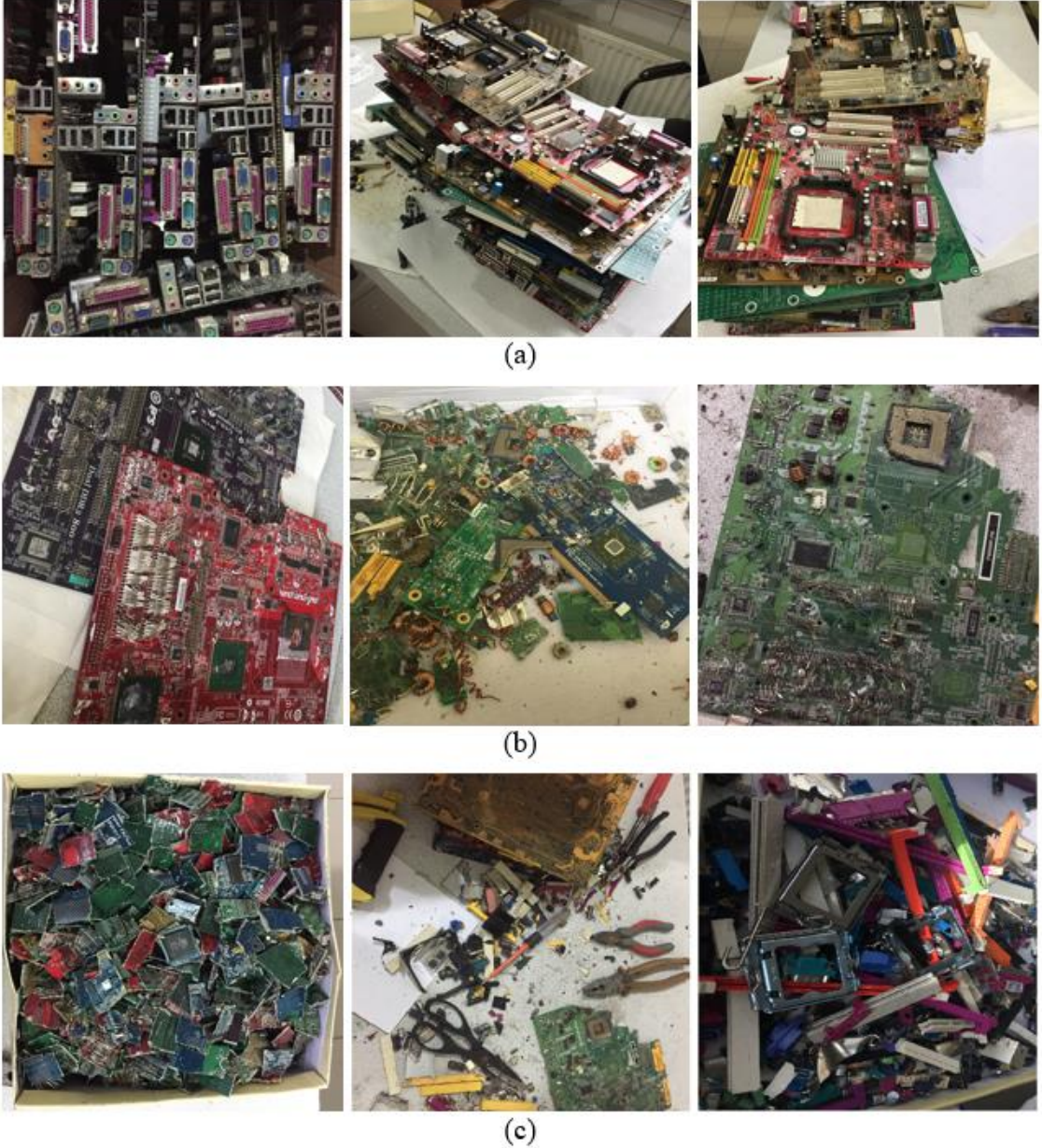
Kumari ve Samadder (2025) atık baskılı devre kartlarından (ABDK) elde edilen organik reçinelerin bozunmasını süperkritik metanol teknolojisi kullanarak incelemiş ve temel operasyonel parametrelerin etkilerini yanıt yüzey metodolojisine dayalı Box–Behnken deneysel tasarımı (BBD) ile değerlendirmiştir. Süperkritik koşullar altında metanolün fizikokimyasal özelliklerinde meydana gelen belirgin değişimlerin, ABDK’larda bulunan tehlikeli organik bileşiklerin bozunma hızını önemli ölçüde artırdığı rapor edilmiştir. Belirlenen optimum işlem koşulları altında, organik bozunma veriminin (ODV) yaklaşık %96 seviyesine ulaştığı ve bu sayede metallerin organik polimer matrisinden etkin bir biçimde serbest bırakıldığı ortaya konulmuştur (Kumari and Samadder 2025).

Geleneksel debrominasyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında, süperkritik akışkan temelli yaklaşımların, bromlu alev geciktiricilerin elektronik atıklardan çevreyle uyumlu biçimde uzaklaştırılması ve eş zamanlı olarak kaynak geri kazanımının sağlanması açısından önemli avantajlar sunduğu vurgulanmaktadır. Bu yönüyle SKA teknolojisi, elektronik atıkların etkin ve sürdürülebilir şekilde bertaraf edilmesinde güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Liu and Zhang 2016). Ayrıca Fu-Rong Xiu , Jiali Wang tarafından yapılan bir çalışmada, atık bakır esaslı bir katalizör (WCC) ile entegre edilen alt kritik su–amonyak (SKA) prosesi kullanılarak TBBPAER bileşiğinin yüksek seçicilikle düşük molekül ağırlıklı sıvı ürünlere dönüştürüldüğü gösterilmiştir (Xiu et al. 2025). 300 °C’de 15 ve 60 dakika sürelerle gerçekleştirilen işlemler sonucunda, metil pirimidin ve fenoller gibi yüksek katma değerli ürünlerin oluşum verimleri sırasıyla %63,46 ve %73,66 olarak belirlenmiştir. WCC bünyesinde bulunan farklı değerlik durumlarındaki bakır türleri arasındaki elektron transferi, $\text{OH}\cdot$, $\text{O}_2^{\cdot-}$, $\text{NH}_2\cdot$ ve $:\text{NH}$ gibi reaktif serbest radikallerin oluşumunu teşvik etmiş; bu durum TBBPAER’in etkin biçimde dönüştürülmesini sağlayarak %99,29 düzeyinde bir debrominasyon oranının elde edilmesine katkıda bulunmuştur (Xiu et al. 2025). Chen et al (2021) tarafından yürütülen çalışmada, bromlu epoksi reçinelerin (BER) etkin debrominasyonunu sağlamak amacıyla alkali katkılı geliştirilmiş bir altkritik su (SKS) prosesi önerilmiş ve alkali ilavesinin brom giderme mekanizması ayrıntılı olarak incelenmiştir. Belirlenen optimum işletme koşulları altında bromun %95,11’inden fazlasının sistemden uzaklaştırıldığı rapor edilmiştir. Ayrıca, fiberglas yapının hızlandırılmış şekilde parçalanması ile BER’lerin bozunmasının, debrominasyon verimliliğinin artmasında birlikte rol oynadığı ortaya konulmuştur (Chen et al. 2021).

MATERYAL ve YÖNTEM

Baskılı Devre Kartlarının Temini ve Hazırlanması

Bu çalışmada değerlendirilen atık baskılı devre kartları (ABDK), kullanım ömürlerini tamamlamış masaüstü bilgisayarlardan sökülen anakartlar üzerinden elde edilmiştir. (Şekil 10)



Şekil 10. (a) Bilgisayar kasalarından sökülmüş atık baskılı devre kartları, (b) atık baskılı devre kartlarının bileşenlerine ayrılmış hali, (c) atık baskılı devre kartlarının küçük parçalara kesilmiş ve ayrılan diğer plastik kısımlar

İlk aşamada, atık baskılı devre kartlarının (ABDK) üzerinde bulunan kondansatör, direnç, metal ısı dağıtıcı plaka ve elektrik kablosu gibi kolayca çıkarılabilir elektronik bileşenler

pense, tornavida, keski ve benzeri el aletleri ile dikkatli ve sistematik bir şekilde sökölerek ayrıştırılmıştır. Bileşenlerinden arındırılan atık baskı devre kartları, paslanmaz çelikten imal edilmiş bir sac kesme makası ile yaklaşık 3 cm x 3 cm boyutlarında küçük parçalara ayrılmıştır. Ardından, iki aşamadan oluşan mekanik kırma ve öğütme işlemine tabi tutulmuştur. İlk aşamada Brook Crompton Series 2000 model döner kesici kırıcı (Şekil 11), ikinci aşamada ise Retsch SK 100 model çapraz darbeli öğütücü (Şekil 12) kullanılarak parçalar daha küçük boyutlara indirilmiştir. Öğütme işlemi sonrasında elde edilen materyal 2 mm açıklığa sahip elekten geçirilmiş ve deneylerde Şekil 13'te gösterilen -2 mm'lik örnekler kullanılmıştır.



Şekil 11. Döner bıçak mekanizmalı kırıcı (Brook Crompton Series 2000)



Şekil 12. Transversal öğütme değirmeni (Restch SK100)



Şekil 13. Deneylerde kullanılan -2 mm boyutundaki ABDK

Karakterizasyon analizleri için, -2 mm boyutundaki örnekler Restch PM 400/2 model döner ve gezegen hareketli yüksek enerjili bilyeli değirmen (Şekil 14) yardımıyla yaklaşık -250 µm boyutuna kadar küçültülmüştür.



Şekil 14. Döner ve gezegen hareketli yüksek enerjili bilyeli değirmen

Kullanılan Reaktifler ve Genel Özellikleri

Glisin

Glisin ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$), en küçük ve en basit yapıdaki amino asit olup, hem amino hem de karboksil fonksiyonel gruplarına sahip olması nedeniyle amfoterik karakter gösterir. Bu özellik, glisinin asidik ve bazik ortamlarda iyonik dengesini değiştirme yeteneğini sağlar.

Glisin, fizyolojik pH (~7.4) civarında zwitteriyonik formda, yani amino grubunun protonlanmış ($-\text{NH}_3^+$) ve karboksil grubunun deprotonlanmış ($-\text{COO}^-$) haliyle bulunur.

Moleküler yapısı ve formülü

- Moleküler formül: $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$
- Moleküler ağırlık: 75.07 g/mol

Asit-Baz davranışı

Glisin, amfoterik bir bileşik olup su ortamında hem proton alabilir hem de verebilir. pKa değerleri sırasıyla:

- $\text{pK}_{\text{a}1}$ ($-\text{COOH}$ grubu): ~2.34
- $\text{pK}_{\text{a}2}$ ($-\text{NH}_3^+$ grubu): ~9.60

Bu pKa değerleri, glisinin düşük pH'ta katyonik, yüksek pH'ta anyonik ve izoelektrik noktada ($\text{pI} \approx 6.0$) net yükü sıfır olan bir molekül haline gelmesine neden olur.

Çözünürlük ve fiziksel özellikler

- Su içinde oldukça yüksek çözünürlüğe sahiptir: 0 °C: 160–170 g/L; 25 °C'de: 250 g/L
- Kristal yapıda, beyaz renkte katı formdadır.
- Organik çözücülerde (etanol, eter vb.) çözünürlüğü düşüktür.
- Glisin (%98.5, AFG Bioscience) süperkritik CO_2 ile bakırın çözündürülmesi deneylerinde co-solvent olarak kullanılmıştır.

Hidrojen peroksit

Hidrojen peroksit (H_2O_2), oksijen ve hidrojen elementlerinden oluşan, oldukça reaktif ve güçlü oksitleyici özellik gösteren inorganik bir bileşiktir. Molekül, iki hidrojen atomunun iki oksijen atomuna bağlanmasıyla oluşur ve yapısında O–O bağının bulunması nedeniyle, hem kimyasal kararsızlık hem de yüksek oksidasyon potansiyeli taşır.

Moleküler yapı ve genel özellikler

- Moleküler formül: H_2O_2
- Moleküler ağırlık: 34.01 g/mol
- Yapısı: Eğik bir geometriye sahiptir; O–O bağı molekülün kimyasal reaktivitesinde kilit rol oynar.

- Görünüm: Renksiz, viskoz yapılı sıvı; seyreltilmiş çözeltileri tatsız ve kokusuz iken, derişik halleri hafif keskin bir kokuya sahiptir.

Asit-Baz davranışı

Hidrojen peroksit amfiprotik karakter gösterir; yani hem asit hem baz gibi davranabilir. Sulu çözeltilerde zayıf bir asit gibi davranarak proton verebilir ($pK_a \approx 11.75$). Aynı zamanda bazik ortamda proton kabul edebilir. Bu yönüyle hem asidik hem de bazik ortamlarda tepkimeye girebilir.

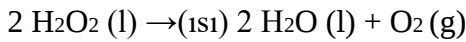
Oksidatif ve redüktif özellikleri

H_2O_2 , kimyasal reaktivitesi açısından çift yönlü davranış sergiler:

- Oksitleyici ajan: O–O bağının zayıf olması, H_2O_2 'nin kolayca parçalanarak atomik oksijen açığa çıkarmasına neden olur. Bu da onu güçlü bir oksidant yapar.
- İndirgen özellik: Daha güçlü oksitleyicilerle karşılaştığında elektron vererek indirgenebilir. Bu redoks çift yönlülüğü, onu çeşitli endüstriyel ve laboratuvar süreçlerinde çok yönlü bir bileşik haline getirir.

Termal kararlılık ve parçalanma

Hidrojen peroksit termodinamik olarak kararsız bir bileşiktir. Uygun katalizörlerin (örneğin metal iyonları) varlığında veya ısı etkisiyle su ve oksijene parçalanabilir:



Bu ayrışma ekzotermik olup, kontrollü koşullarda gerçekleştirilmezse tehlikeli olabilir.

Çözünürlük ve polarite

- Su ile her oranda karışabilir, çünkü polar yapısı ve hidrojen bağları kurma yeteneği yüksektir.
- Organik çözücülerle sınırlı çözünürlüğe sahiptir.
- Yüksek polariteye sahip olduğu için çoğunlukla sulu çözelti olarak kullanılır.

Fiziksel özellikleri

Aiağıdaki verilen özellikler saf H_2O_2 içindir.

- Kaynama noktası: $150.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (parçalanmadan önce)
- Donma noktası: $-0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Yoğunluk: $\sim 1.45\text{ g/cm}^3$ (saf formu)
- Parlama noktası: Uygulanamaz (kendiliğinden bozunabilir)

Hidrojen peroksit (H_2O_2), süperkritik CO_2 -glisin deneylerinde bakır çözündürülmesinde yükseltgen madde olarak (%50, İsolab) kullanılmıştır.

Etanol

Etanol (C_2H_5OH), hidroksil ($-OH$) fonksiyonel grubuna sahip, düşük moleküler ağırlıklı bir alifatik alkoldür. Renksiz, uçucu ve yanıcı bir sıvı olan etanol, yaygın olarak çözücü, dezenfektan ve biyoyakıt gibi çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Kimyasal yapısı gereği hem kutuplu hem de hidrofobik özellikler sergileyebilir, bu da çözünürlük ve reaksiyon kabiliyeti açısından çok yönlü bir bileşik olmasını sağlar.

Moleküler yapısı ve formülü

- Moleküler formül: C_2H_6O veya CH_3CH_2OH
- Moleküler ağırlık: 46.07 g/mol
- Yapısı: İki karbon atomu arasında tekli bağ bulunur; bir uçta hidroksil ($-OH$) grubu yer alırken, diğer uçta metil ($-CH_3$) grubu bulunur.

Asit-Baz özellikleri

Etanol, zayıf bir asit olarak davranabilir ve hidroksil grubundan proton verebilir. Bununla birlikte, sudaki çözeltisinde çok düşük derecede iyonlaşır ($pK_a \approx 15.9$), bu da onun çok zayıf bir asit olduğunu gösterir. Aynı zamanda, bazik ortamlarda proton kabul etme eğilimi göstermez, dolayısıyla nötr karakterli bir bileşiktir.

Polarite ve çözünürlük

Etanol, hidroksil grubunun varlığı sayesinde polar bir moleküldür ve hidrojen bağları oluşturabilir. Bu nedenle:

- Suda yüksek çözünürlüğe sahiptir.
- Bazı organik çözücülerle de karışabilir (örneğin: eter, kloroform).
- Apolar çözücülerde (örneğin heksan) çözünürlüğü sınırlıdır.

Kimyasal reaktivite

Etanol, hidroksil grubunun reaktifliği sayesinde çeşitli kimyasal tepkimelere girebilir:

- Esterleşme: Karboksilik asitlerle tepkimeye girerek ester oluşturur.
- Oksidasyon: Hafif oksidatif koşullarda asetaldehite, daha güçlü koşullarda ise asetik aside dönüşebilir.
- Dehidrasyon: Asit katalizörlüğünde ısıtıldığında, etilen gibi alkenlere dönüşebilir.

Fiziksel özellikler (25°C'de):

- Kaynama noktası: 78.37 °C
- Donma noktası: -114.1 °C
- Yoğunluk: ~0.789 g/cm³
- Uçuculuk: Yüksek
- Yanıcılık: Yüksek (parlama noktası: ~13 °C)

Etanol (İsolab,%99,9) subkritik su ekstraksiyonu sonunda elde edilen katı üzerine yapışmış o yapıların uzaklaştırılmasında yıkama çözeltisi olarak kullanılmıştır.

Karbondioksit (CO₂)

Karbondioksit (CO₂), bir karbon atomunun iki oksijen atomu ile kovalent bağ yapması sonucu oluşan, düşük moleküler ağırlıklı, doğrusal yapılı bir inorganik bileşiktir. Oda koşullarında renksiz, kokusuz ve yanıcı olmayan bir gazdır. Kimyasal kararlılığı ve inertliğe yakın davranışı nedeniyle laboratuvar, endüstriyel ve çevresel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Moleküler yapısındaki oksijen atomlarının varlığına rağmen simetrik geometrisi nedeniyle kalıcı dipol momentini bulunmamakta, ancak kızılötesi ışıını soğurabilen titreşim modları sayesinde atmosfer kimyasında önemli bir role sahip olmaktadır.

Moleküler yapısı ve formülü

- Moleküler formül: CO₂
- Moleküler ağırlık: 44.01 g/mol
- Yapısal özellikler: Molekül, karbon atomunun iki oksijen atomu ile çift bağ yapması sonucu oluşan doğrusal (lineer) bir geometriye sahiptir.

Asit-Baz özellikleri

Karbondioksit, doğrudan asidik veya bazik özellik göstermeyen bir bileşik olmakla birlikte, suda çözündüğünde zayıf bir asit olan karbonik asidi (H₂CO₃) oluşturur. Bu nedenle sulu ortamlarda pH değerinin düşmesine neden olabilir ve zayıf asidik karakter sergiler. Bazik çözeltilerle tepkimeye girerek bikarbonat ve karbonat iyonları oluşturabilir.

Polarite ve çözünürlük

CO₂ molekülü simetrik yapısı nedeniyle apolar karakterlidir. Ancak:

- Suda sınırlı düzeyde çözünür ve çözünme sırasında karbonik asit oluşur.
- Organik çözücülerde, özellikle düşük polariteli çözücülerde sınırlı çözünürlük gösterir.

- Yüksek basınç altında çözünürlüğü belirgin şekilde artar.

Kimyasal reaktivite

Karbondiyoksit, normal koşullar altında kimyasal olarak oldukça kararlı bir bileşiktir. Bununla birlikte:

- Bazlarla reaksiyona girerek karbonat ve bikarbonat tuzlarını oluşturur.
- Yüksek sıcaklık, basınç veya katalitik koşullar altında indirgenerek farklı karbon bileşiklerine dönüştürülebilir.
- Fotosentez sürecinde biyolojik sistemler tarafından karbon kaynağı olarak kullanılır.

Fiziksel özellikler (25 °C)

- Fiziksel hâl: Gaz
- Yoğunluk: Yaklaşık 1,84 kg/m³ (1 atm)
- Süblimleşme noktası: -78,5 °C
- Yanıcılık: Yanıcı değildir, yanmayı desteklemez
- Difüzyon özelliği: Havadan daha ağırdır

Bu çalışmada Süperkritik CO₂, yüksek kritik yoğunluğu sebebiyle çözücü olarak kullanılmıştır.

Analiz Yöntemleri ve Kullanılan Cihazlar

Çalışmalarda kullanılan ham baskılı devre kartlarının ve deney sürecinde işlem görmüş örneklerin bileşimleri ve diğer karakteristik özellikleri ileri analitik cihazlar kullanılarak belirlenmiştir.

Temel girdi olan ham baskılı devre kartlarının ve subkritik su ekstraksiyonundan sonra geriye kalan katı kısmın metalik bileşimini belirlemek için örnekler kral suyunda (HCl/HNO₃:3/1) çözündürüldükten sonra ve süperkritik CO₂-glisin deneyinden sonra elde edilen çözeltideki bakır analizi ICP-MS cihazı ile yapılmıştır. Baskılı devre kartlarının termal davranışı TG cihazı ile yapılmıştır. Subkritik su oksidasyonundan sonra elde edilen organik çözeltinin bileşenlerinin analizi GC-MS cihazı ile yapılmıştır. Ham atık baskılı devre kartlarının ve subkritik su oksidasyonundan sonra katının morfolojik analizi SEM cihazı ile aydınlatılmıştır. Ham örneğin ve subkritik su oksidasyonundan sonra kalan katının fonksiyonel grupları FTIR cihazı ile elementel analizi CHNS cihazı ile yapılmıştır.

ICP-MS (Endüktif eşleşmiş plazma- kütle spektroskopisi)

ICP-MS yöntemi, minerallerin elementel analizinde yaygın olarak tercih edilen standart tekniklerden biridir. ICP-MS, elementel analizde yüksek hassasiyet ve düşük tayin sınırı sağlayan gelişmiş bir kütle spektrometresi tekniğidir. Bu yöntemde, örnek öncelikle sıvı fazda çözündürülerek nebulizatör aracılığıyla ince bir aerosol haline getirilir ve argon gazı kullanılarak oluşturulan plazma ortamında iyonlaştırılır. Oluşan iyonlar daha sonra kütle analizörüne yönlendirilerek, kütle/yük (m/z) oranlarına göre ayrıştırılır ve dedektörde sayılarak elementel derişim bilgisi elde edilir. ICP-MS, ppb (milyarda bir) ve hatta ppt (trilyonda bir) seviyesinde element tespiti yapabilmesi sayesinde, çevresel analizler, biyolojik örnekler, gıda güvenliği ve metalurji gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca izotop oranlarının belirlenmesi gibi özel uygulamalara da olanak tanır. Bu çalışmada gerçekleştirilen ICP-MS analizleri, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde, Agilent 7800 model endüktif olarak bağlanmış plazma-kütle spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

TG/ DTA (Termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz cihazı)

TG/DTA, bir malzemenin sıcaklık artışı karşısında gösterdiği kütle değişimleri ile ısı olayların eş zamanlı olarak izlenmesine olanak sağlayan bir termo-analitik tekniktir. Bu sistem, numunenin kontrollü bir sıcaklık programı altında ısıtılması sırasında meydana gelen fiziksel ve kimyasal dönüşümlerin bütüncül şekilde değerlendirilmesini mümkün kılar. TG/DTA analizleri, özellikle karmaşık yapıya sahip malzemelerin termal kararlılığının ve bileşimsel özelliklerinin ortaya konulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Termogravimetrik analiz (TG) bölümü, numunenin sıcaklık veya zaman fonksiyonu olarak kütlede meydana gelen değişimleri kaydeder. Bu sayede nem kaybı, uçucu bileşenlerin uzaklaşması, bozunma basamakları ve oksidasyon gibi süreçler nicel olarak değerlendirilebilir. Diferansiyel termal analiz (DTA) kısmı ise, numune ile referans madde arasında oluşan sıcaklık farklarını ölçerek endotermik ve ekzotermik olayların belirlenmesini sağlar. Bu iki tekniğin birlikte kullanılması, kütle değişimi ile ısı olayları arasındaki ilişkinin daha net biçimde yorumlanmasına olanak tanır.

TG/DTA cihazı, polimerler, kompozitler, mineraller, biyokütle ve elektronik atıklar gibi çok bileşenli sistemlerin incelenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle organik ve inorganik bileşenlerin birlikte bulunduğu malzemelerde, farklı bozunma adımlarının sıcaklık aralıklarının belirlenmesi ve bu adımların karakterize edilmesi açısından etkili bir analiz yöntemidir. Ayrıca ön işlem, geri kazanım veya termal prosesler öncesi ve sonrası malzeme

davranışlarının karşılaştırılmasında da yaygın olarak tercih edilmektedir. TG/DTA analizinden elde edilen veriler, malzemenin ısıl stabilitesi, bozunma mekanizmaları ve faz dönüşümleri hakkında nitel ve nicel bilgi sağlar. Bu yönüyle TG/DTA, diğer karakterizasyon teknikleri ile birlikte kullanıldığında, malzemenin yapısal ve termal özelliklerinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkıda bulunan tamamlayıcı bir analiz yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada TG/DTA analizleri, Yıldız Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde Netzsch, DSC 3500 Sirius cihazı kullanılarak yapılmıştır.

GC-MS (Gaz kromatografisi–Kütle spektrometresi)

GC-MS, uçucu ve yarı uçucu organik bileşiklerin kalitatif ve kantitatif analizinde yaygın olarak kullanılan, güçlü ve hassas bir analitik tekniktir. Bu sistem, bileşenlerin ayrıştırılmasını sağlayan gaz kromatografisi (GC) ünitesi ve tanımlanmasını gerçekleştiren kütle spektrometresi (MS) modülü olmak üzere iki temel bileşenden oluşur.

GC ünitesinde, sıvı ya da gaz hâlindeki numune bir enjektör yardımıyla sistem içerisine alınır ve inert bir taşıyıcı gaz (genellikle helyum) eşliğinde kolona yönlendirilir. Kolon içerisinde, bileşenler uçuculuklarına ve kolonla olan etkileşimlerine göre ayrışır. Kolondan çıkan ayrılmış bileşikler, MS detektörüne ulaştığında iyonlaştırılarak parçalanır ve her bileşiğe özgü kütle/yük (m/z) oranları belirlenir. Ortaya çıkan kütle spektrumları, bileşiklerin tanımlanmasında referans kütle spektral kütüphaneleriyle karşılaştırılarak kullanılır. GC-MS tekniği; çevresel analizler, adli bilimler, gıda güvenliği, farmasötik ürünler ve biyolojik örneklerdeki iz bileşiklerin tespiti gibi alanlarda yüksek duyarlılığı ve seçiciliği sayesinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen GC-MS analizleri, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde, Shimadzu QP2010 ULTRA model gaz-kütle spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

SEM-EDS (Taramalı elektron mikroskobu)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizlerinde, temel parametrelerden biri elektron demetinin numune içerisinde etkileşimde bulunduğu üç boyutlu hacim, yani etkileşim hacmidir. Bu hacim, elektron ışınının numune atomlarıyla çarpışması sonucu oluşur ve görüntü kalitesi üzerinde doğrudan etkilidir. SEM'de elde edilen farklı sinyallerin emisyon derinliği; ışının enerji düzeyine, numunenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, ayrıca hazırlık yöntemlerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Uygulanan hızlandırma voltajı yükseldikçe, etkileşim hacmi de artmaktadır. SEM görüntülemesi genellikle ikincil elektronlar (topografik yapı hakkında bilgi verir) ve geri saçılan elektronlar (atom numarası kontrastı sağlar) aracılığıyla gerçekleştirilir. Ayrıca, analiz sırasında üretilen karakteristik X-ışınları sayesinde

numunenin hem kalitatif hem de kantitatif kimyasal bileşimi değerlendirilebilir. Bu yönüyle SEM, numunelerin yüzey morfolojisi, topografyası, bileşimi ve kristal yapısı hakkında kapsamlı bilgi sunan güçlü bir karakterizasyon tekniğidir. Bu çalışmada gerçekleştirilen SEM-EDS analizleri, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde, Zeiss Sigma 300 model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

FT-IR (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi)

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, bileşiklerin kimyasal yapılarının ve fonksiyonel gruplarının belirlenmesinde kullanılan temel analitik tekniklerden biridir. Günümüzde FTIR, sağladığı hızlı, tekrarlanabilir ve güvenilir sonuçlar sayesinde modern laboratuvarlarda en yaygın karakterizasyon yöntemleri arasında yer almaktadır. Kızılötesi spektroskopinin farklı endüstriyel alanlarda yaygın biçimde kullanılması, analiz edilen materyalin kısa sürede tanımlanmasına olanak tanımasının yanı sıra, bilinmeyen veya yabancı bileşenlerin tespit edilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. FTIR analizinde, numune üzerine belirli bir dalga sayısı aralığında kızılötesi ışın gönderilmekte ve numune tarafından soğurulan veya saçılan ışığın spektral dağılımı hassas dedektörler aracılığıyla kaydedilmektedir. Elde edilen spektrum, moleküllerdeki bağların titreşim ve dönme hareketlerine karşılık gelen karakteristik absorpsiyon bantlarını içermektedir. Bu bantlar, örnek bünyesindeki farklı fonksiyonel grupların tanımlanmasına ve moleküler yapı hakkında bilgi edinilmesine imkân sağlamaktadır. Analiz sırasında numune, uygun bir optik yüzey üzerine yerleştirilmekte ve kızılötesi ışık kaynağı ile etkileşime sokulmaktadır. Numune tarafından soğurulmayan ışık dedektör tarafından algılanarak, örneğe özgü kızılötesi spektrum elde edilmektedir. Bu yönüyle FTIR spektroskopisi, maddelerin kimyasal bileşimini ve yapısal özelliklerini incelemek amacıyla kullanılan etkili bir analiz yöntemidir. Bu çalışmada gerçekleştirilen FT-IR analizleri, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde, Bruker VERTEX 70v model kızılötesi spektroskopisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

CHNS (Elementel analiz)

CHNS elementel analiz yöntemi, numunelerin kimyasal bileşimini oluşturan karbon (C), hidrojen (H), azot (N) ve kükürt (S) elementlerinin nicel olarak belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. CHNS analizi, özellikle organik ve yarı-organik yapıya sahip karmaşık malzemelerde, bileşenlerin genel yapısal karakterinin ortaya konulmasında temel analitik yaklaşımlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Atık baskılı devre kartları gibi heterojen yapılı numunelerde, metal ve metalik olmayan fraksiyonların birlikte bulunması, malzemenin geri kazanım potansiyelinin değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda CHNS analizi, numunelerdeki organik içerik düzeyinin dolaylı olarak belirlenmesine olanak sağlayarak; reçine, polimer ve katkı maddelerinin varlığı hakkında bütüncül bilgi sunmaktadır. Elde edilen karbon ve hidrojen içerikleri, organik fazın miktarına ve dağılımına ilişkin önemli göstergeler olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen CHNS analizleri, ODTÜ Merkez Laboratuvar Arge Eğitim ve Ölçme Merkezi bünyesinde, LECO TruSpec Micro Elemental Analiz cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu analizlere ilave olarak baskılı devre kartlarındaki organik kısmın TG cihazında elde edilen organik madde miktarını teyit etmek amacıyla TS ISO 3451-1 standardına göre kül tayini kül fırınında yapılmıştır. Kül tayini, numunenin kontrollü sıcaklık koşullarında yakılması ve ardından geride kalan inorganik artıkların (kül) tartılması esasına dayanır. Bu yöntem, özellikle malzemenin organik kısmı ile inorganik kısmının ayrımının yapılabilmesi açısından önemlidir.

$$\% \text{ Kül} = (\text{Dara} + \text{Kül}) - \text{Dara} / (\text{Dara} + \text{Örnek}) - \text{Dara} \times 100 \quad (1)$$

$$\% \text{Organik} = 100 - \% \text{Kül} \quad (2)$$

Deneysel Çalışma

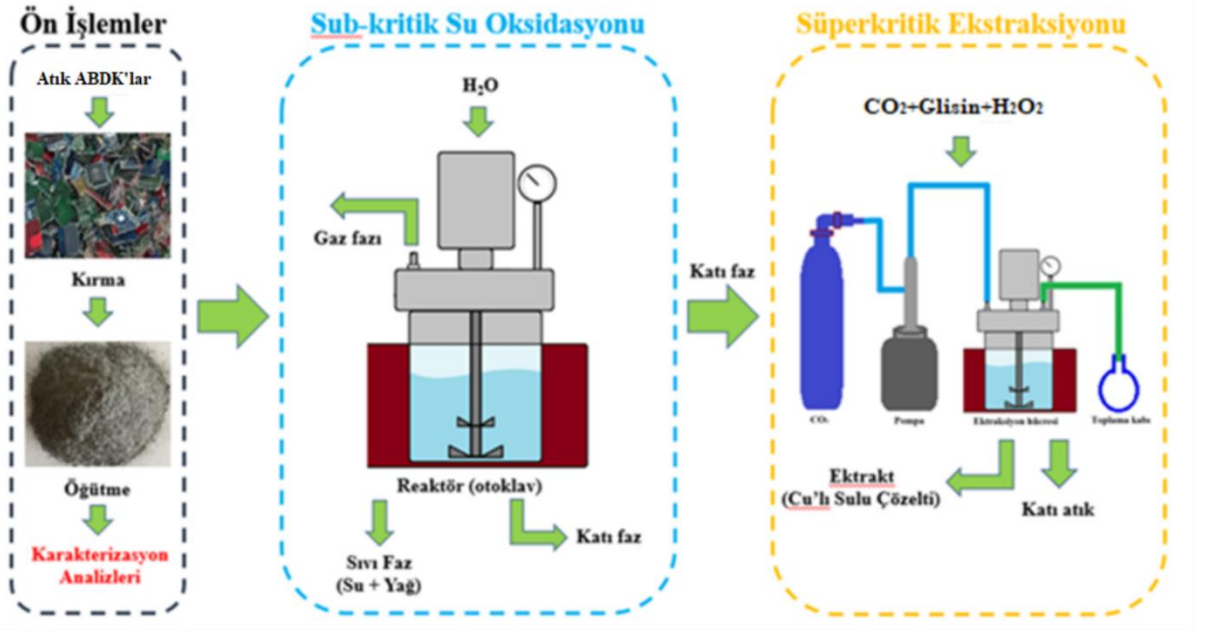
Çevreci bir rota izlenerek iki aşamada gerçekleştirilen bu çalışmanın temel adımları;

Birinci aşama: Atık baskılı devre kartlarının bromlu epoksi reçine kısmının subkritik su oksidasyonu ile uzaklaştırılmasının optimizasyonu,

İkinci Aşama: Subkritik su oksidasyonu sonucu polimerik yapıdan arındırılmış katı kısımdan bakırın süperkritik CO₂-glisin ekstraksiyonu ile Cu metalinin geri kazanılmasının optimizasyonudur.

Optimizasyon için Yüzey Yanıt Yöntemi kullanılmıştır.

Deneysel çalışmanın şematik gösterimi Şekil 15'te sunulmuştur.



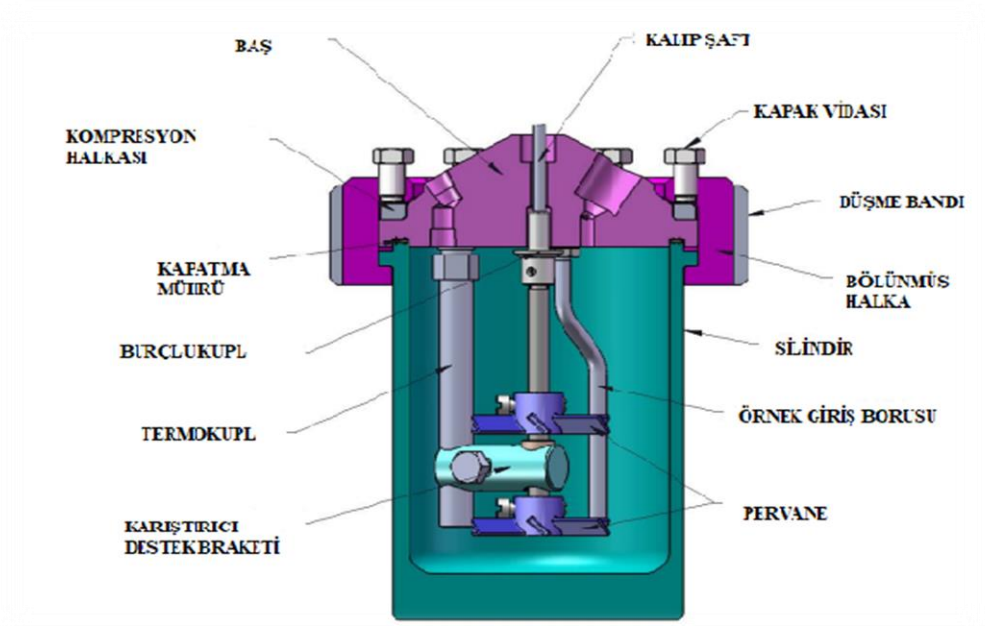
Şekil 15. Deneysel çalışma adımlarının şematik gösterimi

Deney sistemi

Subkritik su oksidasyonu ve süperkritik CO₂-glisin deneyleri sıcaklık, basınç ve karıştırma hızı gibi kritik parametrelerin ayarlanabildiği ve deneysel şartların hassas kontrolünü sağlayabildiği, 1 litrelik kapasiteye sahip ve 200 bar basınca dayanıklı paslanmaz çelikten üretilmiş bir otoklavda (Parr, Model 4828) gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapıldığı otoklavın resmi Şekil 16 ve otoklavın iç yapısı Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 16. Deneysel aşamalarda kullanılan otoklav



Şekil 17. Deneylerde kullanılan otoklavın iç yapısı

Birinci aşama: Subkritik su oksidasyonu

Çalışmamızın birinci aşaması olan bu kısmında bromlu epoksi reçinesinin subkritik su şartlarında uzaklaştırılması gerçekleştirilmiştir. Deneyin bağımsız parametreleri olarak sıcaklık, katı/sıvı oranı ve süre seçilmiştir. Daha önceki çalışmalarda (Scandelai et al. 2018; Souza et al. 2022) basıncın etkili olmadığı belirlendiği için basınç 120 Bar da sabit tutulmuştur. Deney parametreleri ve seviyeleri Tablo 10’da, optimizasyon deney çalışma planı Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 10. Box–Behnken Deney Tasarımında Kullanılan Faktörler ve Seviyeleri

	Faktör	Düşük	Orta	Yüksek
A	Sıcaklık (°C)	240	280	320
B	Katı/Sıvı Oranı (g/mL)	0,15	0,30	0,45
C	Zaman (dk)	60	120	180

Tablo 11. Box–Behnken Deney Tasarımı

Standart Sıra	Çalışma Sırası	A	B	C	Sıcaklık (°C)	Katı/Sıvı Oranı (g/mL)	Zaman (dk)
10	1	0	1	-1	280	0,45	60
8	2	1	0	1	320	0,3	180
3	3	-1	1	0	240	0,45	120
13	4	0	0	0	280	0,3	120
5	5	-1	0	-1	240	0,3	60
1	6	-1	-1	0	240	0,15	120
4	7	1	1	0	320	0,45	120
6	8	1	0	-1	320	0,3	60
12	9	0	1	1	280	0,45	180
7	10	-1	0	1	240	0,3	180
11	11	0	-1	1	280	0,15	180
9	12	0	-1	-1	280	0,15	60
2	13	1	-1	0	320	0,15	120

Tüm deneyler için reaktöre eklenen su miktarı 300 mL olarak sabit alınmıştır. Otoklava 300 mL su ilave edildikten sonra belirlenen katı sıvı oranında tartılan ham örnek ilave edilerek otoklav kapatılarak belirlenmiş sıcaklığa ulaşması beklenmiştir. İstenilen sıcaklığa ulaşılınca karıştırıcı çalıştırılmış (300 rpm) ve belirlenen süreye kadar deney devam ettirilmiştir. Süre sonunda otoklav hızlıca soğutulurak iç basınç güvenli bir şekilde tahliye edilmiş ve otoklavın kapağı açılmıştır. Reaktör içeriği katı ve sıvı fazların ayrılması amacıyla vakum altında mavi bant süzgeç kağıdı kullanılarak süzme işlemi gerçekleştirilmiştir. Süzüntüler GC-MS analizleri için kapaklı steril numune kaplarında saklanmıştır. Katı kısım, üzerine yapışmış organik kısımdan arındırılmak için birkaç kez etanol ve daha sonrada saf su ile yıkanarak 105 °C’de sabit tartıma gelene kadar kurutularak tartılmıştır. Bağımlı değişkenlerin yanıtı olarak “organik bozunma verimi (OBV)” alınmış ve aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır.

$$\%OBV = \frac{m_b - m_s}{m_b \times r} \times 100 \quad (3)$$

Burada *OBV*, organik bozunma oranını, m_b başlangıçta alınan ham örneğin miktarını (g), m_s subkritik ekstraksiyondan sonra kalan katı miktarını (g), r ham örnek içindeki organik madde oranını (%) göstermektedir.

Süzme işlemi ve subkritik su oksidasyonu sonucu kalan katının dijital fotoğrafları Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. Subkritik işlem sonunda süzme işlemi ve kalan katının dijital fotoğrafları

İkinci Aşama: Süperkritik CO₂- Glisin ekstraksiyonu ile bakırın çözündürülmesi

Bu aşamada subkritik su ekstraksiyonunun optimum koşullarında elde edilmiş katı kısımdan süperkritik CO₂-glisin ekstraksiyonu ile bakırın kazanımının optimum koşulları incelenmiştir. Şekil 19’da ham atık baskı devre kartlarının ve subkritik su ekstraksiyonunun optimum koşullarında elde edilmiş katının dijital fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 19. a) Ham atık baskı devre kartları, b) subkritik su ekstraksiyonunun optimum koşullarında elde edilmiş katının dijital fotoğrafları

Bu çalışmada Cu (%) geri kazanımını maksimize etmek amacıyla dört bağımsız değişkenin (A: Glisin konsantrasyonu, B: H₂O₂ yüzdesi, C: Katı/Sıvı oranı, D: Zaman) etkileri Central Composite Design (CCD) kullanılarak incelenmiştir. Faktörler beş seviyede ($-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$) tanımlanmış ve toplam 25 deney yürütülmüştür. Deney parametreleri ve seviyeleri Tablo 12’de, optimizasyon deney çalışma planı Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 12. Central Composite Design Deneylerinde Kullanılan Faktörler ve Seviyeleri

Faktor			$-\alpha$	Düşük	Orta	Yüksek	$+\alpha$
			-2	-1	0	1	+2
A	Glisin Konsantrasyonu (M)		0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
B	H ₂ O ₂ (%)		5	7,5	10	12,5	15
C	Katı/Sıvı Oranı (g/mL)		5	10	15	20	25
D	Zaman (saat)		4	8	12	16	20

Tablo 13. Central Composite Deney Tasarımı

Standart Sıra	Çalışma Sırası	A	B	C	D	Glisin Kons. (M)	H ₂ O ₂ (%)	Katı/Sıvı Oranı (g/mL)	Zaman (saat)
22	1	0	0	2	0	0,75	10	25	12
23	2	0	0	0	-2	0,75	10	15	4
18	3	2	0	0	0	1,25	10	15	12
9	4	-1	-1	-1	1	0,5	7,5	10	16
1	5	-1	-1	-1	-1	0,5	7,5	10	8
3	6	-1	1	-1	-1	0,5	12,5	10	8
24	7	0	0	0	2	0,75	10	15	20
12	8	1	1	-1	1	1	12,5	10	16
20	9	0	2	0	0	0,75	15	15	12
5	10	-1	-1	1	-1	0,5	7,5	20	8
21	11	0	0	-2	0	0,75	10	5	12
14	12	1	-1	1	1	1	7,5	20	16
7	13	-1	1	1	-1	0,5	12,5	20	8
13	14	-1	-1	1	1	0,5	7,5	20	16
4	15	1	1	-1	-1	1	12,5	10	8
10	16	1	-1	-1	1	1	7,5	10	16
6	17	1	-1	1	-1	1	7,5	20	8
16	18	1	1	1	1	1	12,5	20	16
8	19	1	1	1	-1	1	12,5	20	8
25	20	0	0	0	0	0,75	10	15	12
17	21	-2	0	0	0	0,25	10	15	12
2	22	1	-1	-1	-1	1	7,5	10	8
19	23	0	-2	0	0	0,75	5	15	12
15	24	-1	1	1	1	0,5	12,5	20	16
11	25	-1	1	-1	1	0,5	12,5	10	16

Otaklava çalışma plan tablosunda belirlenen konsantrasyonunda 300 mL glisin-H₂O₂ ilave edildikten sonra belirlenen katı/sıvı oranında örnek tartılarak ilave edilmiş ve otaklavin kapağı kapatılmıştır. Süperkritik şartları sağlamak için Şekil 20’de görülen şırınga sistemi kullanılmıştır. %99,5 saflıktaki CO₂ gazı önce bir ısı eşanjöründen geçirilerek yaklaşık 5°C’ye kadar soğutulduktan sonra otaklava basılmış ve deney süresi başlatılmış ve otaklav içeriği 300 rpm hızda karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Belirlenen süre sonunda iç basınç güvenli bir şekilde tahliye edilmiş ve otoklavın kapağı açılmıştır. Reaktör içeriği katı ve sıvı fazların ayrılması amacıyla vakum altında mavi bant süzgeç kağıdı kullanılarak süzme işlemi

gerçekleştirilmiştir. Süzüntüler ICP-MS analizleri için kapaklı steril numune kaplarında saklanmıştır. Bağımlı değişkenlerin yanıtı olarak “bakırın çözünme yüzdesi” alınmış ve aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

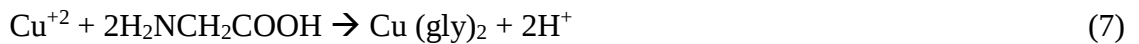
$$\%Cu = \frac{m_{\xi}}{m_b} \quad (4)$$

Burada m_ξ çözeltiye geçmiş bakır miktarını, m_b başlangıçta numunede bulunan bakır miktarını temsil etmektedir.



Şekil 20. Süperkritik şartları sağlamak için kullanılan şırınga sistemi

Bakırın H₂O₂ kullanılarak gerçekleşen ekstraksiyonu sırasında aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşmektedir:



H₂O₂'nin bozunma reaksiyonu da aşağıda verilmiştir:



İstatistiksel analiz

Yüzey Yanıt Yöntemi (Response Surface Method)

Yüzey Yanıt Yöntemi , çok sayıda değişkenin bir sistem üzerindeki etkisini eşzamanlı olarak değerlendirme olanağı sunan istatistiksel bir tekniktir. Bu yöntem, deney sayısını en aza indirerek, bir sürecin işlem parametrelerine karşılık verdiği tepkileri en iyi şekilde modelleme ve analiz etme imkânı sağlar. İlk olarak 1951 yılında Box ve Wilson tarafından geliştirilmiş olup, "optimum koşullara ulaşmayı hedefleyen deneysel yaklaşımlar" olarak tanımlanmıştır. Başlangıçta kimya sanayisinde uygulama alanı bulan bu yöntem, günümüzde mühendislik, biyoteknoloji ve gıda sanayi gibi pek çok farklı disiplinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yüzey Yanıt Yöntemi; ürün ve proses geliştirme, belirsizlik analizleri, kalite iyileştirme çalışmaları ile tasarım ve optimizasyon süreçlerinde önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. Özellikle gıda bilimi ve teknolojisi alanında fırınlama, kurutma, kavurma, pastörizasyon, ekstrüzyon, ekstraksiyon, biyoteknolojik işlemler, fermantasyon ve enzim üretimi gibi uygulamalarda; proses koşullarının ve formülasyon bileşenlerinin optimize edilmesi amacıyla birçok araştırmacı tarafından etkin şekilde kullanılmaktadır (Eren and Kaymak-Ertekin 2007; Gao et al. 2007; Mundra et al. 2007).

Deneysel araştırmalarda, genellikle sistem performansı üzerindeki etkileri belirlemek amacıyla değişkenlerin etkileşimleri incelenirken, diğer tüm parametreler sabit tutulmaktadır. Ancak bu geleneksel yaklaşım, tüm değişken düzeylerinin detaylı olarak analiz edilmesine olanak tanımamaktadır. Bu nedenle, deney süresini kısaltmak, maliyetleri düşürmek, deney sayısını azaltmak ve süreç verimliliğini artırmak amacıyla daha etkin ve sistematik deney tasarım modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yüzey Yanıt Yöntemi deneysel süreçlerin iyileştirilmesi ve optimum koşulların belirlenmesi amacıyla istatistiksel ve matematiksel analizlerin birlikte kullanıldığı sistematik bir yaklaşımdır (Jensen 2017)

Yüzey Yanıt Yöntemi , süreçte yer alan bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilerin yanı sıra bu değişkenlerin çıktılar üzerindeki etkilerini analiz etmeye yönelik istatistiksel bir modelleme tekniğidir (Mason et al. 2003).

Yüzey Yanıt Yöntemi, üç temel aşamadan oluşan sistematik bir yaklaşımla yürütülmektedir:

- Deneysel tasarımın oluşturulması,
- Uygun modelin seçimi ve geliştirilmesi,
- Ardından modelin istatistiksel olarak doğrulanarak optimizasyonun gerçekleştirilmesi.

Sürecin ilk aşaması olan eleme deneyleri, esas deneylerin daha sınırlı sayıda ve yüksek verimle yürütülmesine imkân tanır. Bu aşamada, genellikle bağımsız değişkenlerin minimum ve maksimum düzeyleri belirlenir.

İkinci aşamada, eleme denemeleri sonucunda seçilen değişkenlerin, sistemin yanıt fonksiyonu üzerinde optimum noktalara yakın etkiler oluşturup oluşturmadığı değerlendirilir.

Üçüncü aşama ise sistemin optimum yanıt değerlerine yaklaştığı noktada devreye girer. Bu noktada yanıt fonksiyonu genellikle eğrisel bir yapı sergilemeye başlar ve bu eğriliğin doğru biçimde tahmin edilmesi amacıyla ikinci dereceden polinom modellerin yanı sıra üstel, doğrusal olmayan veya eksponansiyel modellerden yararlanılır.

Uygun model belirlendikten sonra, bu model aracılığıyla optimum koşulların belirlenmesine yönelik analizler gerçekleştirilir (Koç and Kaymak-Ertekin 2010).

Yanıt fonksiyonunun optimum noktaya yaklaştığı bölgede ortaya çıkan eğriliklerin tahmin edilebilmesi amacıyla çeşitli matematiksel modellerden yararlanılmaktadır. Bu kapsamda, genellikle doğrusal olmayan yapılar sergileyen sistemler için polinomiyal, üstel, eksponansiyel ya da diğer lineer olmayan modeller tercih edilmektedir.

Yanıt ile bağımsız değişkenler arasında güçlü bir doğrusal ilişki bulunduğu, sistem birinci dereceden polinomiyal bir modelle temsil edilebilmektedir. Ancak, yanıt yüzeyinde eğrilik söz konusu olduğunda, bu tür modeller yetersiz kalmakta ve ikinci dereceden polinomiyal modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Birinci dereceden modeller, sistemi tam anlamıyla açıklamakta eksik kalabildiğinden, daha esnek bir yapıya sahip olan ikinci dereceden polinomiyal modeller tercih edilmektedir. Bu modeller, yanıt fonksiyonlarının daha doğru bir şekilde tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır. Optimum noktaların belirlenmesi sürecinde, model katsayıları genellikle en küçük kareler yöntemiyle tahmin edilir. Ayrıca, ikinci dereceden modellerin tekil bölgesel minimum ya da maksimum noktaları tanımlayabilmesi, analiz ve optimizasyon süreçlerinde önemli ölçüde kolaylık sağlamaktadır.

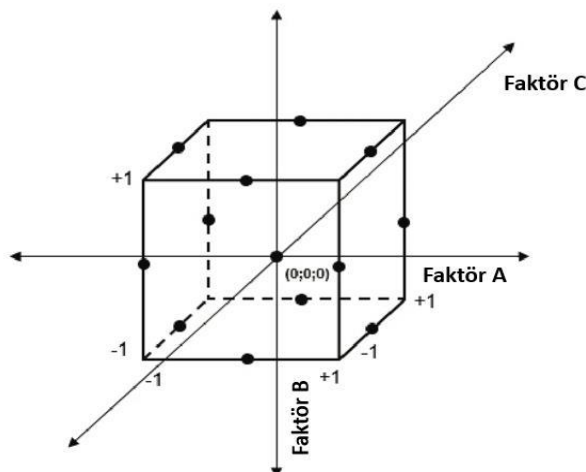
Yanıt Yüzey Yöntemi'nde , fonksiyonel modelin oluşturulmasında çeşitli deney tasarım yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu bağlamda, tam faktöriyel tasarım, kısmi faktöriyel tasarım ve merkezi bileşik tasarım (central composite design) en yaygın kullanılan planlama yöntemleri arasında yer almaktadır. Söz konusu tasarımlar, deneysel çalışmalarda değişkenlerin etkilerinin sistematik bir biçimde incelenmesini mümkün kılmakta ve böylece sistem yanıtının modellenmesinde güvenilir ve geçerli sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır.

Box-Bachen Tasarımı (BBD)

Yanıt yüzey metodolojisi kapsamında yer alan Box–Behnken deney tasarımı, diğer istatistiksel tasarım yaklaşımlarına kıyasla daha sınırlı sayıda deney koşulu ile güvenilir modeller oluşturulmasına olanak tanıyarak deneysel sürecin etkin biçimde yürütülmesini sağlamaktadır (Ahmadi et al. 2017; Mohadesi et al. 2019). Bu yöntem, özellikle yanıt değişkenlerini etkileyen faktör sayısının görece az olduğu durumlarda tercih edilmekte ve sistem davranışının matematiksel olarak modellenmesi ya da süreç koşullarının eniyilenmesi amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Box–Behnken tasarımı, ikinci dereceden polinom modellerin geliştirilmesine uygun bir yapı sunmakta olup deney noktaları tasarım uzayının köşeleri yerine kübik deney bölgesinin kenarları ve kenar orta noktalarında konumlandırılmaktadır (Köksoy 2001). Bu kübik tasarım alanı, her bir bağımsız değişken için belirlenen alt ve üst sınırları temsil etmektedir. Tasarımın oluşturulmasında, bağımsız değişkenlerin seçilen referans değeri merkez nokta olarak tanımlanmakta ve bu nokta kodlanmış düzende “0” seviyesi ile ifade edilmektedir. Merkez noktaya eşit uzaklıkta yer alan deney koşulları ise düşük ve yüksek seviyeleri temsil edecek şekilde “-1” ve “+1” kodlarıyla gösterilmektedir.(Şekil 21)

Box–Behnken tasarımında merkez noktasında gerçekleştirilen tekrar deneyleri, deneysel hatanın ve modelin tekrarlanabilirliğinin değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Tasarımın döndürülebilir özellik göstermesi nedeniyle merkez nokta deneyleri genellikle üç veya beş tekrar halinde uygulanmaktadır. Bu yaklaşım, modelin istatistiksel güvenilirliğini artırmakta ve elde edilen sonuçların yorumlanmasını güçlendirmektedir (Vittal et al. 2012)



Şekil 21. Box-Behnken tasarımı geometrik görünümü

Box–Behnken deney tasarımının başlangıç aşamasında, çalışmada ele alınan üç bağımsız değişken için deneysel olarak incelenecek uygun bölge belirlenmekte ve bu bölge

içerisinde yer alan merkez nokta referans değeri olarak seçilmektedir (Zidan et al. 2007). Deney aralıklarının genişliği ve sınırları, incelenen sistemin özellikleri ile araştırmacının deneysel yaklaşımına bağlı olarak tanımlanmaktadır. Bağımsız değişken sayısının artmasıyla birlikte, tasarım kapsamında gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı da buna paralel olarak yükselmektedir.

Bu tasarım yaklaşımında, tüm faktörlerin aynı anda alt ve üst sınır değerlerinde yer almaması önemli bir avantaj sağlamaktadır. Böylece uç koşullarda ortaya çıkabilecek ve deneysel açıdan güvenilir olmayan sonuçların önüne geçilmekte, daha dengeli ve kontrollü bir deney alanı oluşturulmaktadır. Bu özellik, Box–Behnken tasarımını özellikle hassas veya riskli proseslerin incelenmesinde uygun bir yöntem hâline getirmektedir (Ferreira et al. 2007)

Box–Behnken tasarımı; biyoloji ve biyoteknolojiden kimya ve kimya mühendisliğine, çevre mühendisliğinden gıda teknolojilerine, imalat süreçlerinden eczacılık uygulamalarına kadar geniş bir disiplin yelpazesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak bu yöntem, ikinci dereceden matematiksel modellerin güvenilir biçimde tahmin edilmesi, ardışık deneysel tasarımların oluşturulması ve geliştirilen modelin uygunluğunun istatistiksel olarak değerlendirilmesi amacıyla tercih edilen etkili bir yanıt yüzey metodolojisi yaklaşımıdır (Prvan and Street 2002).

Merkezi Kompozit Tasarım (MKD)

Merkezi kompozit tasarım (MKD), çok faktörlü deneysel tasarımlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu tasarımda, faktöriyel noktalar ve ek olarak eklenen eksenel noktalar ile merkezi noktalar bulunur.

Faktöriyel noktalar, her bir bağımsız değişkenin iki seviyesinin belirli olduğu noktalardır ve genellikle +1 ve -1 düzeylerinden oluşur. Bu noktalar, bağımsız değişkenlerin yüksek ve düşük seviyelerini temsil eder.

Eksenel noktalar ise, faktöriyel noktalardan daha uzak olan ve genellikle $\pm\alpha$ düzeyinde bulunan noktalardır. Bu noktalar, tasarımın etki alanını genişletmek ve modelin doğruluğunu artırmak amacıyla kullanılır. α parametresi, eksenel noktaların merkezden ne kadar uzak olacağını belirleyen bir faktördür.

Merkezi noktalar, bağımsız değişkenlerin orta seviyelerine denk gelen noktalardır ve genellikle +1 ve -1 düzeylerinden oluşur. Bu noktalar, deneysel hataların tahmin edilmesi ve modelin daha iyi doğrulanması için önemlidir. Merkezi noktaların tekrar edilmesi, deneysel hataların değerlendirilmesinde ve modelin güvenilirliğinin artırılmasında kullanılır.

Özetle, merkezi kompozit tasarımda kullanılan eksenel ve merkezi noktalar, deneyin doğruluğunu artırmaya yönelik olarak belirlenen özel noktalardır ve bu tasarım, karmaşık deneysel analizlerde yüksek verim elde etmek için tercih edilen bir yaklaşımdır.

Merkezi Kompozit Tasarımda aşağıdaki formül kullanılarak sonuçlar elde edilir:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (9)$$

Eşitlikte belirtilen Y, tahmin edilen değer olarak ifade edilmektedir. Burada β_0 , modelin sabit terimini temsil eden bir katsayıdır. β_i , her bir bağımsız değişkenin etkisini belirleyen lineer katsayılarıdır. β_{ij} , ise i ve j bağımsız değişkenleri arasındaki etkileşimi tanımlayan katsayıdır. k, faktör sayısını ifade eder. Bu katsayılar, çok faktörlü deneysel tasarımlarda, özellikle merkezi kompozit tasarımında, bağımsız değişkenlerin ve bunlar arasındaki etkileşimlerin etkilerini değerlendirmek için kullanılır (Liu et al. 2011; Khor and Abdullah 2012).

Varyans Analizi (ANOVA)

Deneysel çalışmalarda, her bir bağımsız değişkenin sonuçlar üzerindeki etkisinin nicel olarak ortaya konulması varyans analizi (ANOVA) ile gerçekleştirilmektedir. ANOVA, faktörlerin toplam değişkenliğe olan katkı oranlarının belirlenmesine olanak tanıyarak, hangi parametrelerin kontrol edilmesi gerektiğinin tespitinde önemli bir rol oynamaktadır. Bir deney için oluşturulan varyans çizelgesi, sürecin istatistiksel olarak izlenmesi ve değerlendirilmesi açısından temel bir araç niteliğindedir.

Deneysel süreçte en uygun çalışma koşulları belirlendikten sonra, elde edilen bu koşulların geçerliliğini doğrulamak amacıyla ek bir doğrulama deneyi yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte, doğrudan deneysel olarak incelenmeyen koşullar için de optimum parametre seviyelerinin tahmin edilebilmesi önem taşımaktadır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Materyallerin Fiziksel ve Kimyasal Analiz Sonuçları

Çalışmalarda kullanılan atık baskı devre kartlarının organik içeriğinin belirlenmesi amacıyla elementel analiz ve kül tayini yapılmıştır. Elementel analiz sonucu Tablo 14'te sunulmuştur.

Tablo 14. Elementel Analiz Deney Sonuçları

Numune	%C	%H	%N	%S
ABDK ham numune	20,61	2,45	0,35	-

Elementel analiz sonucuna göre numunenin %20.61 karbon, %2.45 hidrojen ve %0,32 azot içerdiği ve yapıda kükürt olmadığı belirlenmiştir.

Kül tayini TS ISO 3451-1 standartları baz alınarak dört paralel çalışma yapılmış ve sonuçlar Tablo 15'te sunulmuştur. Kül analiz sonuçlarına göre çalışılan numune %20.50±0,82 organik içeriğe, %79,5 ±0,82 inorganik (metaller, cam elyafı, seramik) içeriğe sahip olduğu belirlenmiştir.

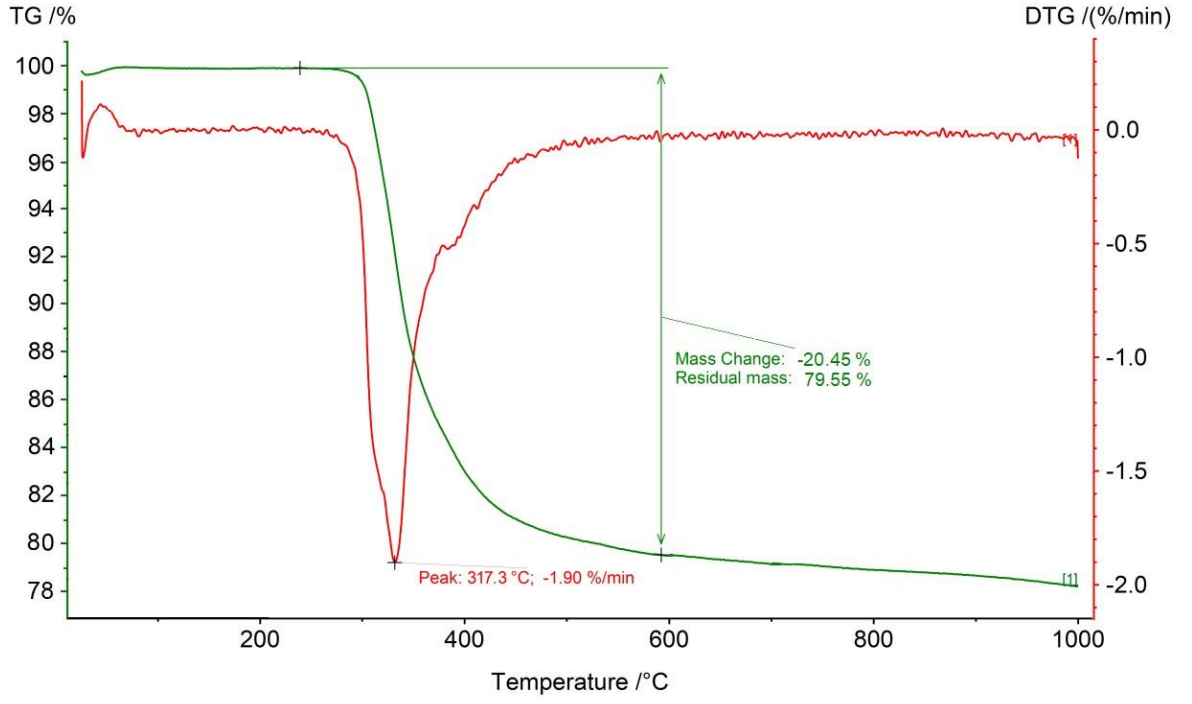
Tablo 15. Ham Numune Kül Tayini

Sıra No	Organik (%)	Kül (İnorganik) (%)
1	20,84	79,16
2	20,84	79,16
3	19,27	80,73
4	21,03	78,97
Ortalama ± SD	20,50 ± 0,82	79,50 ± 0,82

Atık baskılı devre kartlarının karbon, hidrojen ve kül içerikleri Chen ve arkadaşları (2021) tarafından %22,71 C, %2.11 H ve %67.14; Kumari and Samadder (2025) tarafından %22,17 C ve %2,16 H ve %64,18 olarak rapor edilmiştir (Chen et al. 2021; Kumari and Samadder 2025). Bulunan sonuçlar literatür değerleriyle uyumludur.

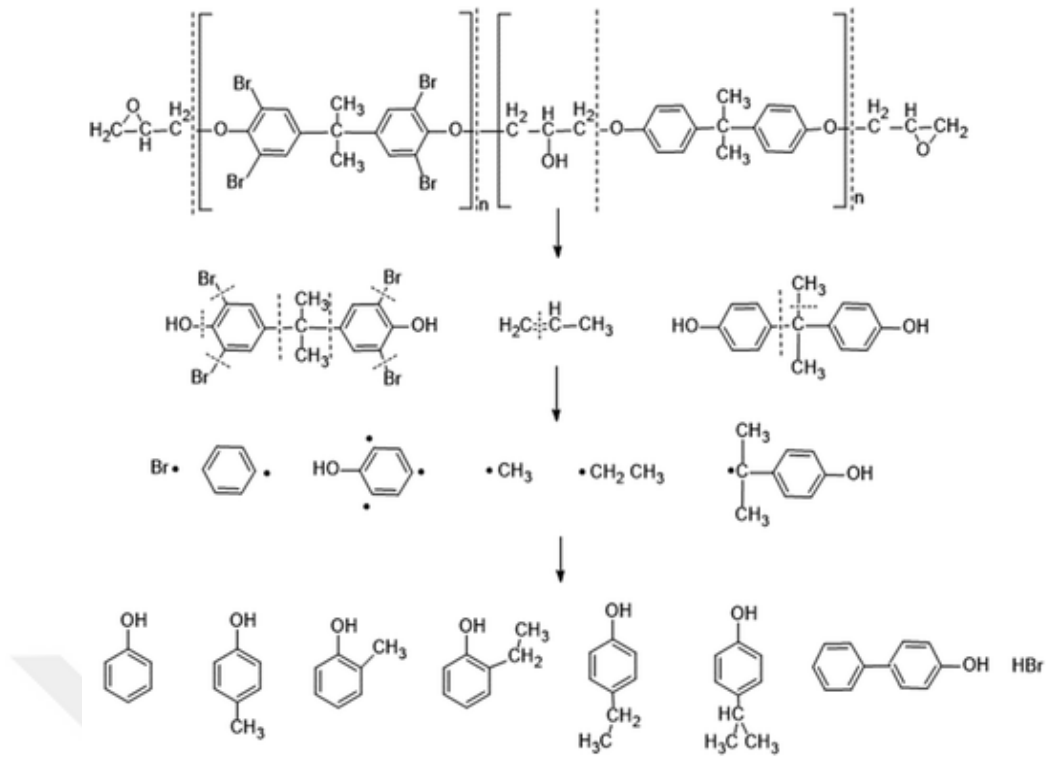
TG analiz sonuçları

Çalışılan örneğin termal bozunma karakterini aydınlatmak ve maksimum bozunma sıcaklığını belirlemek amacıyla TG-DTG analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 22'de gösterilmiştir.



Şekil 22. ABDK'nın ham örneğinin TG-DTG grafiği

TGA analizi, ağırlık kaybının büyük oranda 310-600°C aralığında gerçekleştiğini tek basamaklı bir bozunma reaksiyonu olduğunu göstermektedir. Bu aralıkta ağırlık kaybı %20,45 olarak belirlenmiştir. 600°C sıcaklıktan sonra bozunma hızı çok yavaşlayarak 1000°C'de 78,4'ye ulaşmıştır. Atık baskılı devre kartlarındaki polimerik yapının ve katkı maddelerinin termal parçalanma mekanizması Şekil 23'te verilmiştir. Ağırlık kaybı, serbest radikal bağların kırılması ve fenolik ve aromatik yapıların ayrışmasına ve buharlaşmasına atfedilebilir (Kumari and Samadder 2025).



Şekil 23. ABDK’larda bulunan polimerik yapı ve katkı maddelerinin ayrışma mekanizması (Li and Xu 2015)

TG analizi sonucu bulunan organik madde yüzdesi, kül analiziyle bulunan sonuçları teyit etmiştir. Bu nedenle oksidasyon bozunma verimi hesaplanırken TG’den elde edilen bu değer kullanılmıştır. DTG analizi, en yüksek parçalanma sıcaklığının 317,3°C’ta olduğunu göstermektedir. Bu değer baskılı devre kartlarında bulunan organik bileşenlerin parçalanmasına ait tipik 300°C sıcaklık civarındadır (Shen et al. 2018; Chen et al. 2021).

Ham ABDK’nın kimyasal bileşimi

ABDK’ların ham örneğine ait kimyasal bileşimi Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. Atık Baskı Devre Kartların Ham Örneğinin Kimyasal Bileşimleri

	Metaller(%)					Organik (%)	İnorganik(%)
	33,18					20,5	46,32
	Al	Ni	Cu	Zn	Pb		
ABDK	%						
ham							
örnekleri	0,76	0,26	26,62	4,86	0,68		

Subkritik Su Oksidasyonu

Yüzey yanıt yönteminde Box–Behnken deney tasarımı istatistiksel analizi

Bu çalışmada, baskı devre kartlarından subkritik su oksidasyonu ile organik bozunma veriminin (OBV, %) optimize edilmesi amacıyla Yüzey Yanıt Yöntemi (RSM) kapsamında Box–Behnken deney tasarımı uygulanmıştır. Bağımsız değişkenler olarak sıcaklık (240–320 °C), katı/sıvı oranı (0,15–0,45 g/mL) ve reaksiyon süresi (60–180 dk) seçilmiştir. Toplamda 13 deney koşulu gerçekleştirilmiş ve OBV %8,12 ile %98,49 arasında Tablo 17’de geniş bir aralıkta değişim göstermiştir.

Tablo 17. Box–Behnken Deney Tasarımı ve Deneysel Sonuçlar

Standart Sıra	Çalıştırma Sırası	Sıcaklık (°C)	Katı/Sıvı Oranı (g/mL)	Zaman (dk)	OBV (%)
10	1	280	0,45	60	65,72
8	2	320	0,30	180	94,24
3	3	240	0,45	120	16,77
13	4	280	0,30	120	57,60
5	5	240	0,30	60	13,65
1	6	240	0,15	120	8,12
4	7	320	0,45	120	98,49
6	8	320	0,30	60	87,23
12	9	280	0,45	180	71,25
7	10	240	0,30	180	14,49
11	11	280	0,15	180	54,83
9	12	280	0,15	60	47,90
2	13	320	0,15	120	91,93

Deney sonuçları incelendiğinde, düşük sıcaklıklarda (240°C) organik bozunmanın oldukça sınırlı kaldığı, sıcaklığın 320°C seviyesine yükseltilmesiyle birlikte OBV’nin %90’ın üzerine çıktığı görülmektedir. Sıcaklığın OBV üzerinde en baskın parametre olduğu ve toplam varyansın %95,73’ünü açıkladığı belirlenmiştir. Bu durum, subkritik su koşullarında sıcaklığın organik matrislerin hidrolizi ve oksidatif parçalanması üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Katı/sıvı oranı ikincil derecede etkili bulunurken, reaksiyon süresinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, subkritik ve süperkritik su prosesleri üzerine yapılan literatür çalışmalarıyla büyük ölçüde uyumludur (Preetam et al. 2022; Haghighi et al. 2025).

Varyans analizi (ANOVA)

OBV (%) ve deney parametreleri arasındaki ilişkiyi en iyi açıklayan modeli belirlemek için Minitab 18 yazılım programı kullanılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Yazılım tarafından oluşturulan model kullanılarak optimize edildi. Doğrusal model, OBV (%)

ile proses değişkenleri arasındaki ilişkiyi en iyi açıklayan model olarak bulunmuştur. OBV (%) için geliştirilen doğrusal modele ait ANOVA sonuçları Tablo 18’de sunulmuştur.

Tablo 18. OBV (%) İçin Varyans Analizi Sonuçları

Kaynak	DF	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	9	13209,5	99,50	13209,5	1467,7	66,18	0,003
Lineer Terimler	3	13066,2	98,42	13066,2	4355,4	196,40	0,001
Sıcaklık	1	12709,0	95,73	12709,0	12709,0	573,09	0,000
Katı/Sıvı Oranı	1	305,7	2,30	305,7	305,7	13,78	0,034
Zaman	1	51,6	0,39	51,6	51,6	2,33	0,225
Kare Terimler	3	132,3	1,00	132,3	44,1	1,99	0,293
Sıcaklık*Sıcaklık	1	123,9	0,93	72,9	72,9	3,29	0,167
Katı/Sıvı Oranı*Katı/Sıvı Oranı	1	7,9	0,06	8,0	8,0	0,36	0,590
Zaman*Zaman	1	0,5	0,00	0,5	0,5	0,02	0,894
Etkileşim Terimleri	3	11,1	0,08	11,1	3,7	0,17	0,912
Sıcaklık*Katı/Sıvı Oranı	1	1,1	0,01	1,1	1,1	0,05	0,839
Sıcaklık*Zaman	1	9,5	0,07	9,5	9,5	0,43	0,559
Katı/Sıvı Oranı *Zaman	1	0,5	0,00	0,5	0,5	0,02	0,891
Hata	3	66,5	0,50	66,5	22,2		
Toplam	12	13276,1	100,00				

OBV için gerçekleştirilen varyans analizi (ANOVA) sonuçları, kurulan ikinci dereceden regresyon modelinin istatistiksel olarak yüksek derecede anlamlı olduğunu göstermektedir (F = 66,18; p = 0,003). Model, toplam varyansın %99,50’sini açıklamaktadır. Bu durum, deneysel veriler ile model tahminleri arasında oldukça güçlü bir uyum olduğunu göstermektedir. OBV ile parametreler arasındaki regresyon modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$OBV (\%) = - 493 + 2,92 A + 20 B - 0,156 C - 0,00353 A^2 + 83 B^2 + 0,000125 C^2 - 0,087 AB + 0,000643 AC - 0,039 BC$$

Sonuçlar, yanıt üzerinde lineer terimlerin baskın etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Kare ve ikili etkileşim terimleri istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır (p > 0,05).

Faktörlerin OBV (%) üzerindeki etkileri

Regresyon katsayıları incelendiğinde, sıcaklık değişkeninin pozitif ve yüksek katsayıya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, sıcaklıktaki artışın OBV’yi doğrudan ve güçlü bir şekilde artırdığını teyit etmektedir. Katı/sıvı oranının pozitif katsayısı, bu parametrenin ikincil

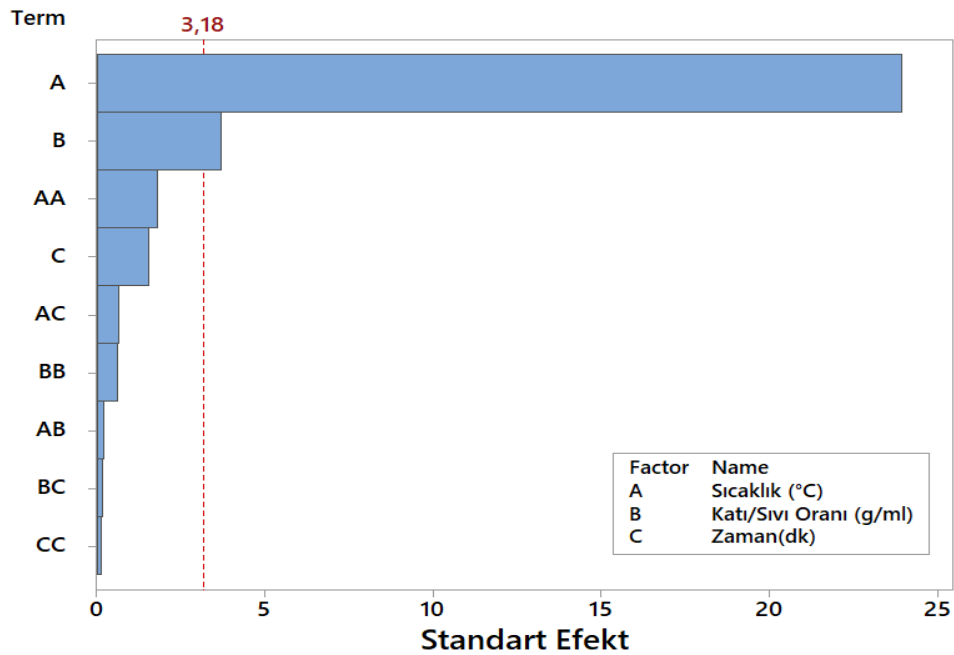
ancak anlamlı bir katkı sunduğunu ortaya koyarken, zaman değişkeninin düşük ve istatistiksel olarak anlamsız katsayısı, reaksiyon süresinin sınırlı etkisini desteklemektedir.

VIF değerlerinin 1–1,35 aralığında olması, modelde çoklu doğrusal bağlantı problemi bulunmadığını ve regresyon katsayılarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Faktörlerin %OBV üzerindeki etkileri Tablo 19’da gösterilmiştir.

Tablo 19. Faktörlerin OBV (%) Üzerindeki Etkileri

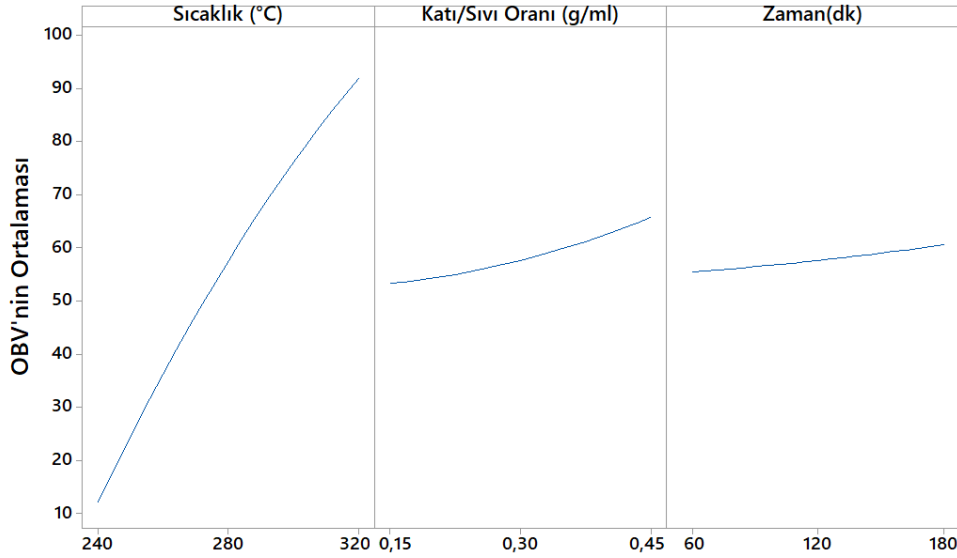
Terim	Regresyon Katsayısı	Katsayının Standart Hatası	95% Güven Aralığı	T-Değeri	P-Değeri	VIF Değeri
Sabit	57,60	4,71	(42,61; 72,59)	12,23	0,001	
Sıcaklık	39,86	1,66	(34,56; 45,16)	23,94	0,000	1,00
Katı/Sıvı Oranı	6,18	1,66	(0,88; 11,48)	3,71	0,034	1,00
Zaman	2,54	1,66	(-2,76; 7,84)	1,52	0,225	1,00
Sıcaklık*Sıcaklık	-5,65	3,11	(-15,56; 4,27)	-1,81	0,167	1,35
Katı/Sıvı Oranı*Katı/Sıvı Oranı	1,87	3,11	(-8,04; 11,79)	0,60	0,590	1,35
Zaman*Zaman	0,45	3,11	(-9,46; 10,36)	0,14	0,894	1,35
Sıcaklık*Katı/Sıvı Oranı	-0,52	2,35	(-8,02; 6,97)	-0,22	0,839	1,00
Sıcaklık*Zaman	1,54	2,35	(-5,95; 9,04)	0,66	0,559	1,00
Katı/Sıvı Oranı*Zaman	-0,35	2,35	(-7,84; 7,14)	-0,15	0,891	1,00

Model denkleme dayanılarak elde edilen etkilerin Pareto grafiği Şekil 24’te, ana etki grafikleri Şekil 25’te sunulmuştur.



Şekil 24. Standartlaştırılmış Etkilerin Pareto Grafiği

Standartlaştırılmış etkilerin Pareto grafiği incelendiğinde, sıcaklığın kritik etki çizgisini açık ara geçtiği görülmektedir. Katı/sıvı oranı sınır değere yakın bir etki sergilerken, zaman ve etkileşim terimleri önemsiz bölgede kalmıştır. Bu grafik, ANOVA sonuçlarıyla tam uyum içerisindedir.



Şekil 25. OBV için ana etkiler grafiği

Ana etki grafiklerinde, sıcaklık arttıkça OBV'nin keskin bir şekilde yükseldiği, katı/sıvı oranının ise daha sınırlı fakat pozitif bir eğilim sergilediği görülmektedir. Zaman faktöründe ise OBV'de belirgin bir değişim gözlenmemiştir.

Sıcaklığın organik bozunma üzerindeki baskın rolü

Şekil 24 ve Şekil 25'te görüldüğü üzere elde edilen bulgular, subkritik su ile gerçekleştirilen ekstraksiyon ve dönüşüm proseslerinde sıcaklığın en baskın proses parametresi olduğunu göstermiştir. Literatürde, subkritik ve süperkritik su koşullarında gerçekleştirilen BDK ve benzeri kompleks organik matrislerin bozunmasına yönelik çalışmalarda, sıcaklığın en kritik parametre olduğu yaygın olarak rapor edilmektedir (Kritzer 2004).

Yüzey yanıt yöntemi sonuçlarına göre, OBV (%) yanıtı üzerindeki varyansın %95,73'ü yalnızca sıcaklık değişkeni tarafından açıklanmıştır. Bu sonuç, subkritik suyun fizikokimyasal özelliklerindeki değişime dayanan literatür bilgileri ile yüksek düzeyde uyumludur. Subkritik koşullarda (100–374°C, yüksek basınç), suyun dielektrik sabiti düşmekte, iyon çarpımı artmakta, viskozitesi ve yüzey gerilimi azalmaktadır. Bu durum, suyun polar olmayan veya orta polar bileşikler için de su organik çözücü benzeri bir davranış sergileyerek epoksi ve fenolik reçinelerin hidrolitik parçalanmasını hızlandırmaktadır. Souza et.al (2023) sıcaklığın artmasıyla

birlikte suyun organik çözücülere benzer bir davranış sergilediğini ve ekstraksiyon verimini önemli ölçüde yükselttiğini rapor etmiştir (Botelho Meireles de Souza et al. 2023).

Özellikle 300°C'nin üzerindeki subkritik koşullarda, BDK'lerde bulunan polimerik bağlayıcıların büyük ölçüde bozunduğu ve organik giderim verimlerinin %85–95 seviyelerine ulaştığı bildirilmektedir (Zhao et al. 2019; Guo et al. 2025). Bu durum, mevcut çalışmada 320°C'de elde edilen %98,49'a varan OBV değerleriyle doğrudan örtüşmektedir ve sıcaklığın %95,73'lük katkı payını ($p < 0,001$) açıklamaktadır.

Katı/Sıvı oranının ikincil etkisi

Bu çalışmada katı/sıvı oranı, OBV üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ancak sınırlı ($p = 0,034$) bir etki göstermiştir. Literatürde, subkritik su ile BDK bozunmasında katı/sıvı oranının, reaksiyon ortamındaki kütle transferi, difüzyon direnci ve aktif temas alanı ile doğrudan ilişkili olduğu vurgulanmaktadır (Luling et al. 2015).

Bazı çalışmalarda, 0,3–0,5 g/mL aralığındaki katı/sıvı oranlarının optimum bozunma verimi sağladığı, daha düşük oranlarda organik fazın seyrelmesi, daha yüksek oranlarda ise heterojenliğin artması nedeniyle verimin sınırlanabildiği rapor edilmiştir (Chien et al. 2000). Bu bağlamda, mevcut çalışmada optimum katı/sıvı oranının 0,45 g/mL olarak belirlenmesi, literatürle uyumlu bir sonuç sunmaktadır.

Subkritik su oksidasyonu proseslerinde katı/sıvı oranı, organik bozunma verimini etkileyen kritik parametrelerden biri olmakla birlikte, etkisi sıcaklık kadar belirgin ve tek yönlü değildir. Katı/sıvı oranının artışı, reaktör ortamındaki su miktarının azalmasına neden olmakta ve bu durum teorik olarak hidrolitik reaksiyon kapasitesinin sınırlanması gibi ters etkiler doğurabilmektedir. Bununla birlikte, literatürde katı/sıvı oranının etkisinin incelenen sıcaklık aralığına ve sistemin reaksiyon mekanizmasına bağlı olarak değiştiği bildirilmektedir.

Düşük sıcaklıklarda ve yüksek su içerikli ortamlarda subkritik su, ağırlıklı olarak hidrolitik bir reaktan gibi davranmakta ve organik bozunma büyük ölçüde suyun iyonlaşma kapasitesine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu koşullarda su miktarındaki azalma, hidroksil ve proton üretimini sınırlayarak bozunma kinetiğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Kritzer 2004). Ancak sıcaklığın artmasıyla birlikte, özellikle 280–320 °C aralığında, subkritik suyun fizikokimyasal özellikleri belirgin şekilde değişmekte; dielektrik sabitinin azalmasıyla su, polar karakterini büyük ölçüde kaybederek organik çözücü benzeri bir davranış sergilemektedir. Bu durumda organik bozunma mekanizması hidrolizden ziyade termal ve oksidatif parçalanma süreçleri tarafından kontrol edilmektedir (Savage 1999).

Katı/sıvı oranının artışı, bu yüksek sıcaklık koşullarında birim hacimdeki organik madde konsantrasyonunu artırarak reaksiyon kinetiğini destekleyebilmektedir. Literatürde, subkritik su ortamında BDK ve benzeri polimer esaslı e-atıkların bozunmasında, belirli bir katı/sıvı oranına kadar organik yoğunluğun artmasının bozunma verimini olumlu yönde etkilediği rapor edilmiştir (Chien et al. 2000). Bu durum, su miktarındaki azalmaya rağmen organik bozunma veriminde ters bir etki gözlenmemesinin temel nedenlerinden biridir.

Bununla birlikte, katı/sıvı oranının aşırı yükselmesi durumunda sistemde kütle transferi ve difüzyon kısıtlarının ortaya çıkabildiği, partiküller arası temasın artmasıyla organik bozunma ürünlerinin ortamdan uzaklaştırılmasının zorlaştığı bildirilmektedir. Bu tür koşullarda organik bozunma verimi plato yapmakta veya düşüş gösterebilmektedir (Chen et al. 1999; Chien et al. 2000; Luling et al. 2015). Ancak bu çalışmada incelenen 0,15–0,45 g/mL katı/sıvı oranı aralığı, literatürde tanımlanan bu sınırlayıcı bölgeye ulaşmamış, aksine hidroliz kapasitesinin tamamen kaybolmadığı ve organik yoğunluğun bozunmayı desteklediği optimum çalışma aralığında kalmıştır.

Bu nedenle, katı/sıvı oranının artışı subkritik su oksidasyonu açısından teorik olarak ters etki oluşturma potansiyeline sahip olmasına rağmen, bu çalışmada kullanılan yüksek sıcaklık koşullarında suyun reaktif çözücü karakterinin baskın hale gelmesi sayesinde söz konusu ters etki gözlenmemiştir. Katı/sıvı oranı, organik bozunma verimi üzerinde sıcaklığa kıyasla daha sınırlı ancak istatistiksel olarak anlamlı bir katkı sağlamış ve ikincil bir parametre olarak değerlendirilmiştir.

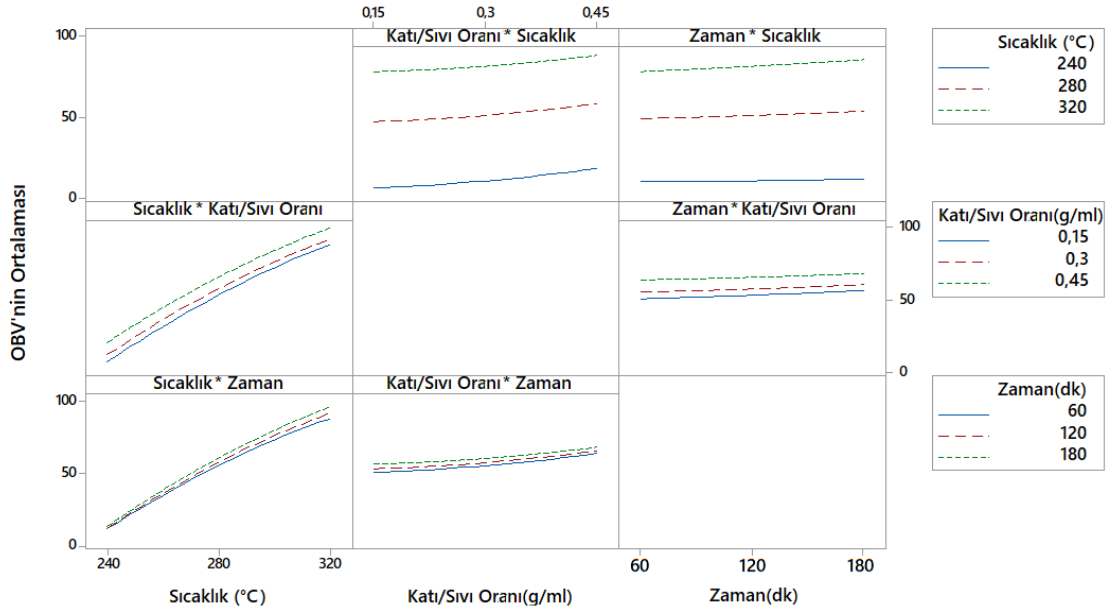
Reaksiyon süresinin sınırlı rolü

Zaman faktörünün istatistiksel olarak anlamlı bulunmaması ($p > 0,05$), yüksek sıcaklıklarda ekstraksiyon kinetiğinin çok kısa sürede dengeye ulaşmasıyla açıklanabilir. Teo ve ark. (2010), subkritik su ile yapılan ekstraksiyonlarda hedef bileşiklerin büyük kısmının ilk 20–40 dakika içinde çözüldüğünü, daha uzun sürelerin verim üzerinde sınırlı etkiye sahip olduğunu bildirmiştir. Bu bulgu, bu çalışmada 60–180 dakika aralığında zamanın etkisiz bulunmasını desteklemektedir (Marrone 2013).

Benzer şekilde, BDK ve plastik esaslı e-atıkların subkritik su oksidasyonunda ilk 60–120 dakika içerisinde organik fazın büyük ölçüde uzaklaştırıldığı, daha uzun sürelerin yalnızca sınırlı ek katkı sağladığı bildirilmiştir (Chen et al. 1999). Bu durum, mevcut çalışmada zaman faktörünün önemsiz bulunmasını desteklemektedir.

Kare ve etkileşim terimleri

Etkileşim grafikleri Şekil 26’da gösterilmiştir. Grafiklerden etkileşimlerin önemli olmadığı görülmektedir. Kare ve etkileşim terimlerinin anlamsız çıkması, sistemin büyük ölçüde doğrusal davranış sergilediğini göstermektedir. Mustafa ve Turner (2011) de benzer şekilde, yüksek sıcaklık bölgesinde ekstraksiyon veriminin sıcaklıkla yaklaşık doğrusal arttığını ve ikinci dereceden etkilerin zayıf kaldığını rapor etmiştir (Mustafa and Turner 2011).

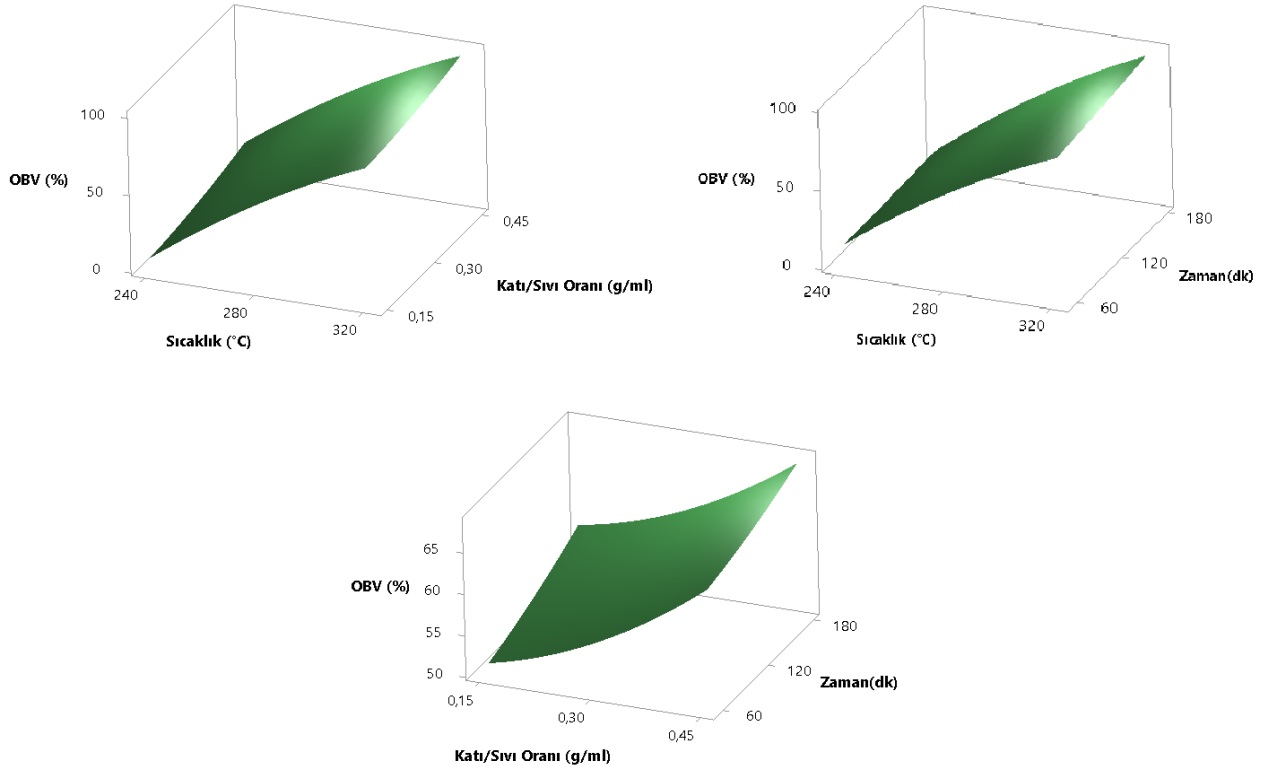


Şekil 26. OBV için etkileşim grafiği

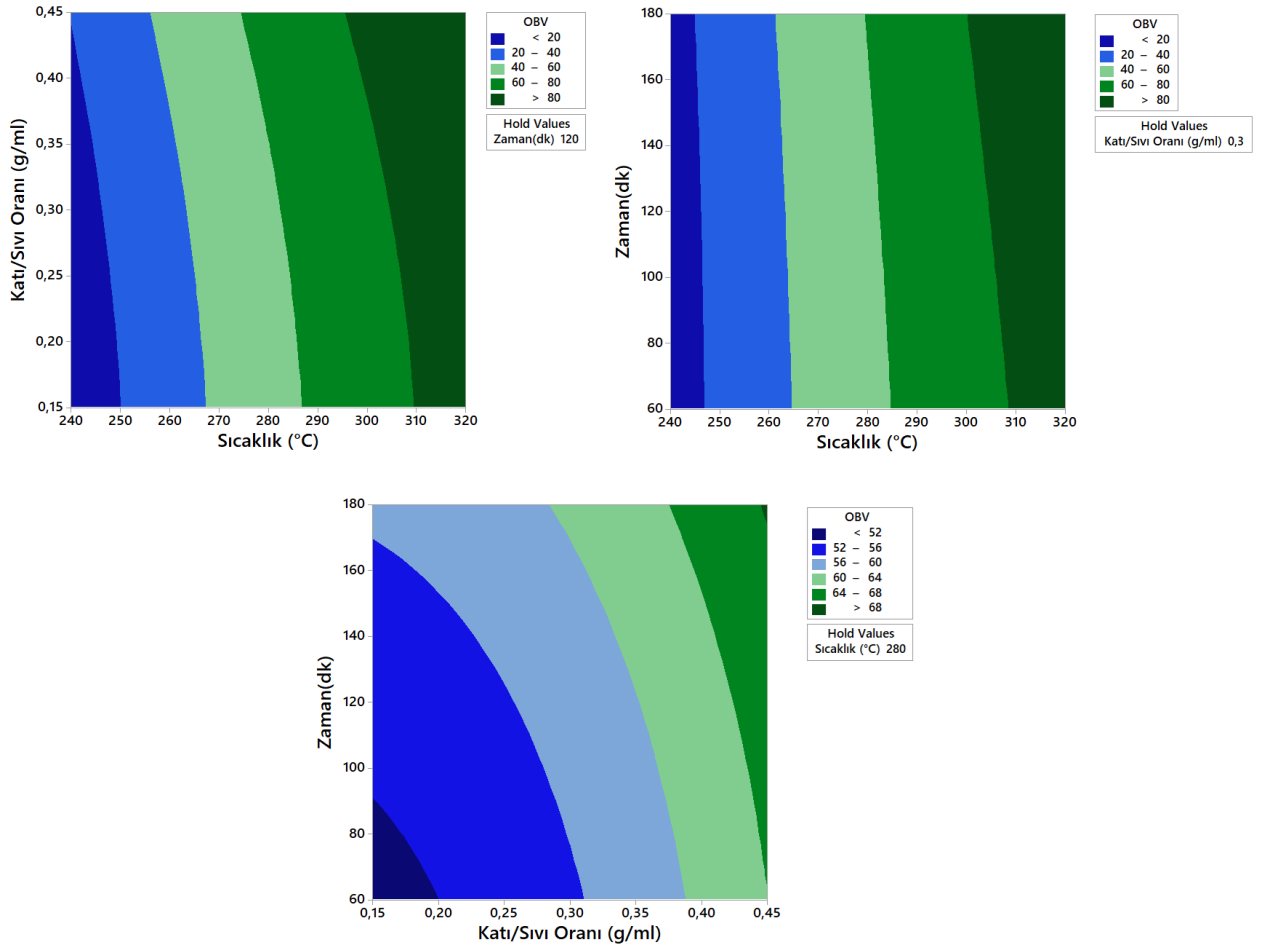
Etkileşim grafiklerinde faktörler arasında belirgin bir kesişme veya sinerjik etki gözlenmemiştir. Bu durum, parametrelerin büyük ölçüde bağımsız davrandığını ve OBV’nin esas olarak sıcaklık tarafından kontrol edildiğini göstermektedir.

Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri

OBV (%) için oluşturulan üç boyutlu yanıt yüzeyi grafikleri Şekil 27’de ve iki boyutlu kontur diyagramları Şekil 28’de verilmiştir. Grafikler, sıcaklık ve katı/sıvı oranının birlikte artırılmasıyla OBV’nin belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. Zaman faktörünün eğriler üzerindeki etkisi ise oldukça sınırlıdır.



Şekil 27. Üç boyutlu yanıt yüzeyi grafikleri



Şekil 28. İki boyutlu kontur diyagramları

Üç boyutlu yanıt yüzeyi ve iki boyutlu kontur diyagramları, sıcaklık arttıkça OBV'nin maksimum değerlere ulaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Katı/sıvı oranının yüksek olduğu bölgelerde sıcaklığın etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Zaman değişkeninin ise yüzey eğriliği üzerinde sınırlı bir rol oynadığı görülmektedir. Bu grafikler, optimum çalışma koşullarının yüksek sıcaklık ve yüksek katı/sıvı oranı bölgesinde yoğunlaştığını göstermektedir.

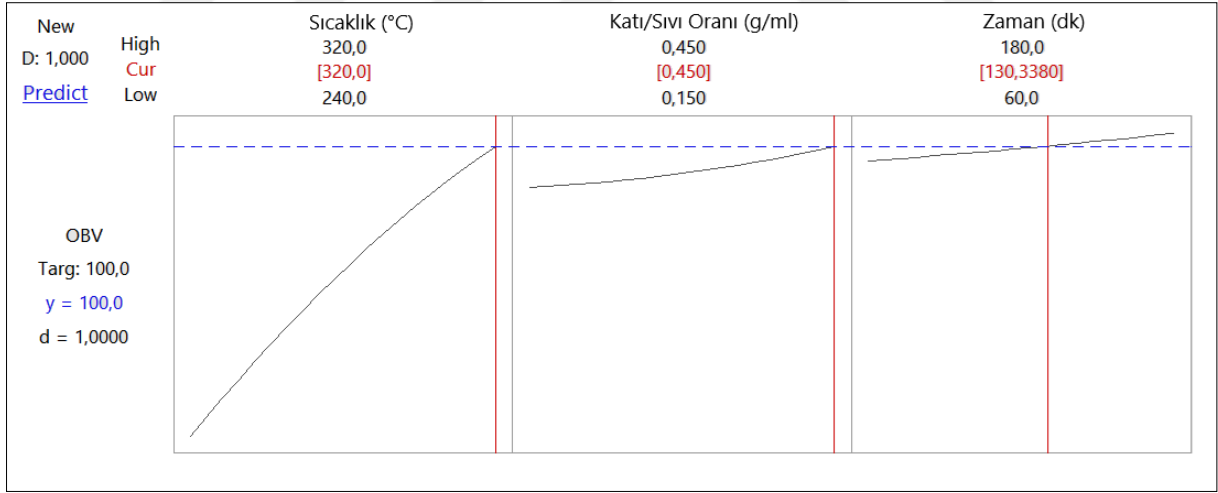
Optimizasyon sonuçları

Optimizasyon sonucuna göre OBV (%) yanıtının maksimum %(100) değerine ulaşması için belirlenen çalışma koşulları Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 20. Çoklu Yanıt Tahmini

Parametre		Optimum değer
Sıcaklık (°C)	A	320
Katı/Sıvı Oranı (g/ml)	B	0,45
Zaman (dk)	C	130,3380

Bu koşullarda tahmin edilen OBV değeri %100 olup bileşik uygunluk (desirability) değeri 1,00'dır. Model tahminine ait güven aralığı Şekil 29'da optimizasyon grafiği üzerinde gösterilmiştir.



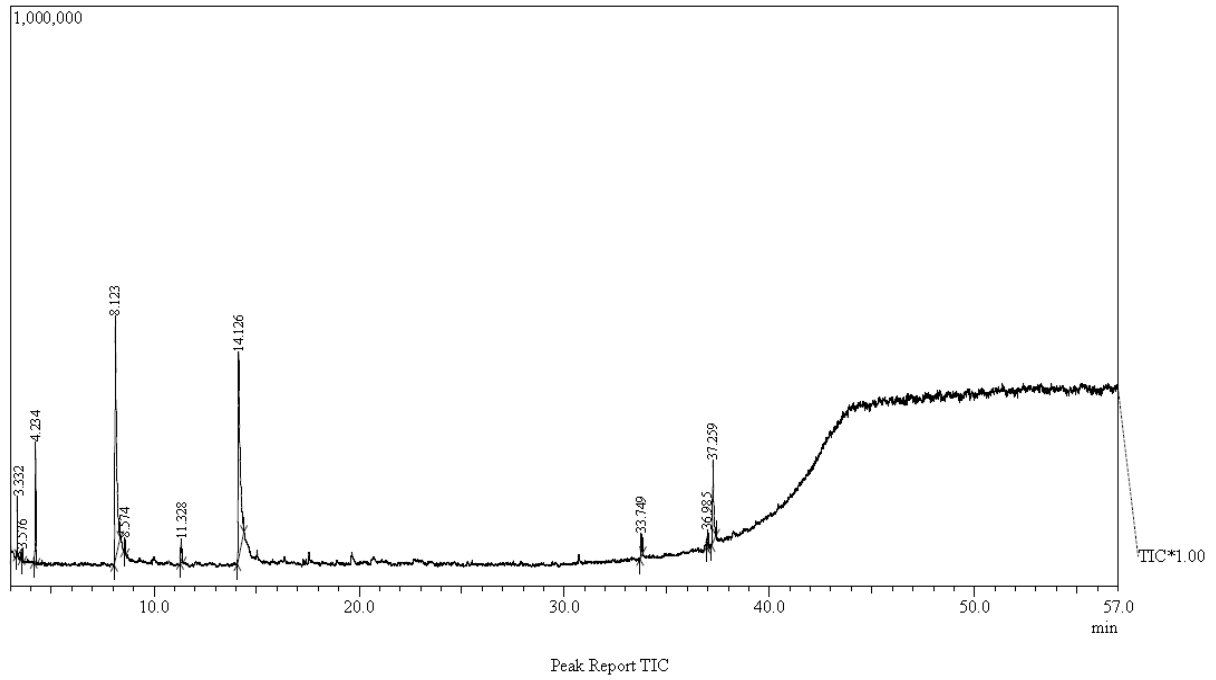
Şekil 29. Optimizasyon grafiği

Bu çalışmada Şekil 29 ve Tablo 18'de görüldüğü üzere, belirlenen optimum koşullar (320 °C, 0,45 g/mL, 130 dk), literatürde bildirilen subkritik su aralıkları ile uyumludur. Xu ve ark. (2017), 300–330 °C sıcaklık aralığında maksimum organik madde çözünürlüğünün sağlandığını ve bu sıcaklıkların subkritik su için kritik eşik oluşturduğunu bildirmiştir. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar hem teorik hem de deneysel literatürle tutarlıdır.

Optimum deney için belirlenen şartlar deney tasarımında 7 nolu deneyin şartlarına (320°C, 0,45 g/mL, 120 dk) çok yakın çıkmıştır. İkinci aşama için yapılacak deneylerde bu şartlardan elde edilen numuneler kullanılmıştır.

GC-MS analiz sonuçları

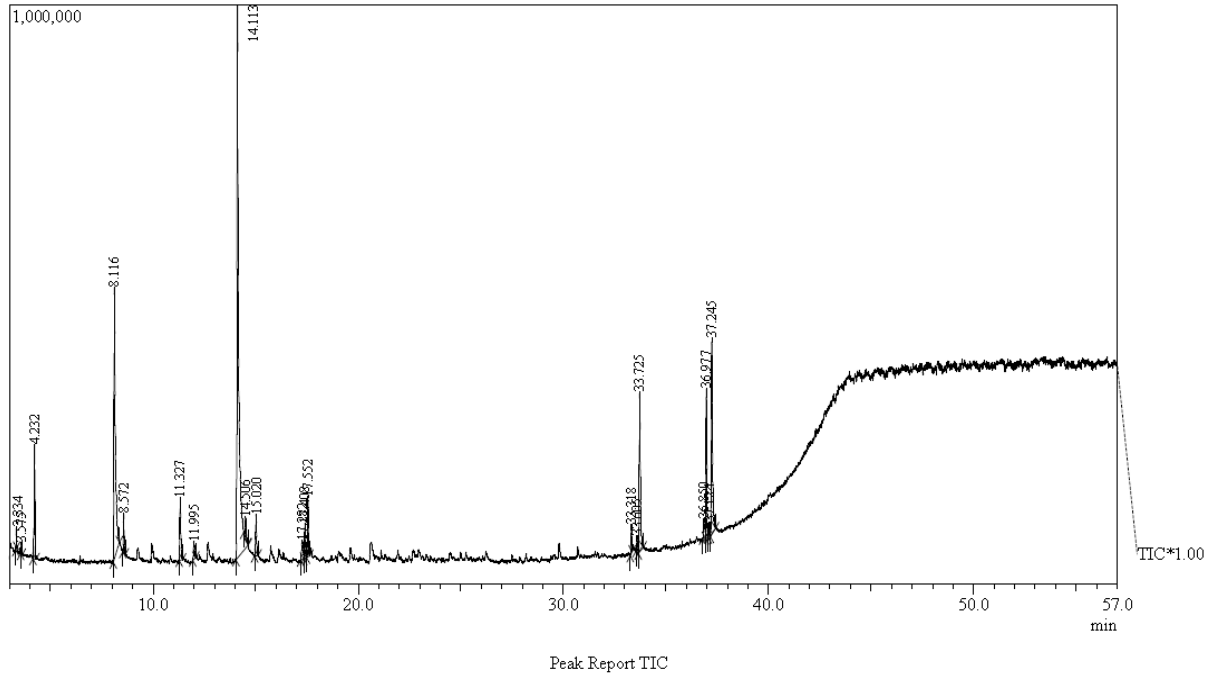
Her bir çalışma adımında elde edilen organik süzütünün GS-MS analizleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 30-Şekil 42 ve Tablo 21-Tablo 33'te özetlenmiştir.



Şekil 30. Deney no:1 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 21.Deney No:1 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

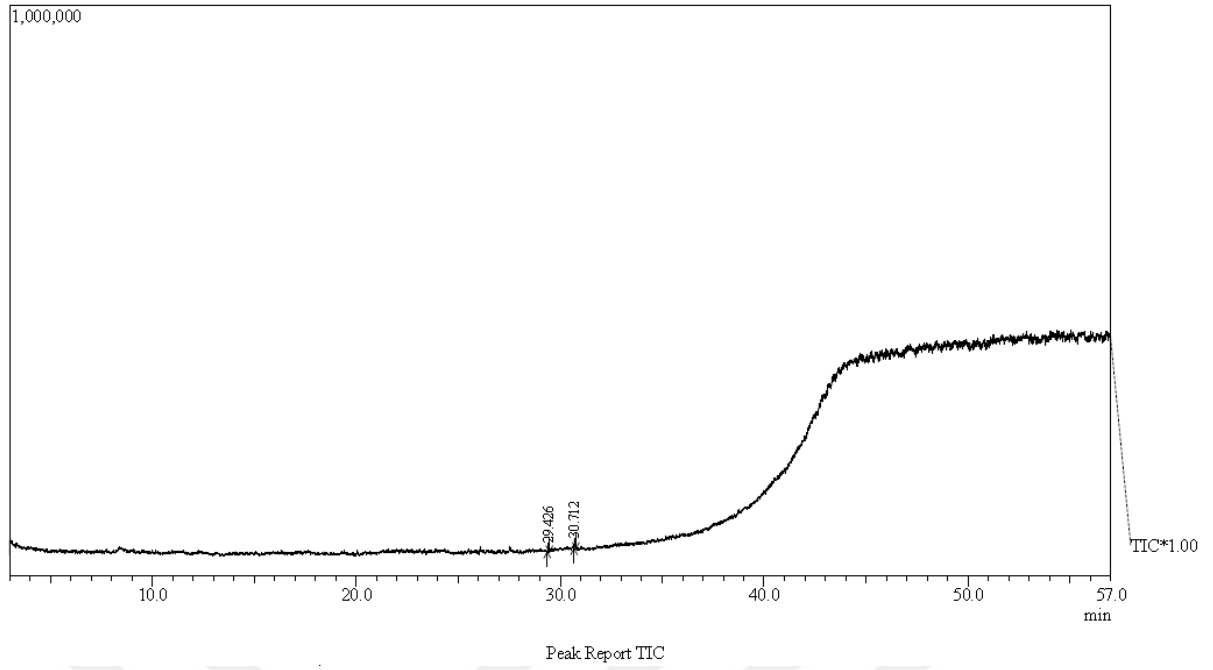
No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	3.332	2,28	Diethylacetal
2	3.576	0,58	3,6,9,12-Tetraoxatetradecan-1-ol
3	4.234	6,40	Triethylborate
4	8.123	36,81	Phenylalcohol
5	8.574	0,92	Benzofuran(CAS)
6	11.328	2,05	Benzofuran,2-methyl-
7	14.126	37,72	Phenol<4-isopropyl->
8	33.749	2,25	Phenol,4-(1-methylpropyl)-
9	36.985	1,39	Tricyclo[6.3.0.0(1,5)]undec-2-en-4-one,5,9-dimethyl-
10	37.259	9,60	1,2,5,5,6,7-Hexamethylbicyclo[4.1.0]hept-2-en-4-one
		100.00	



Şekil 31. Deney no:2 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 22. Deney No:2 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

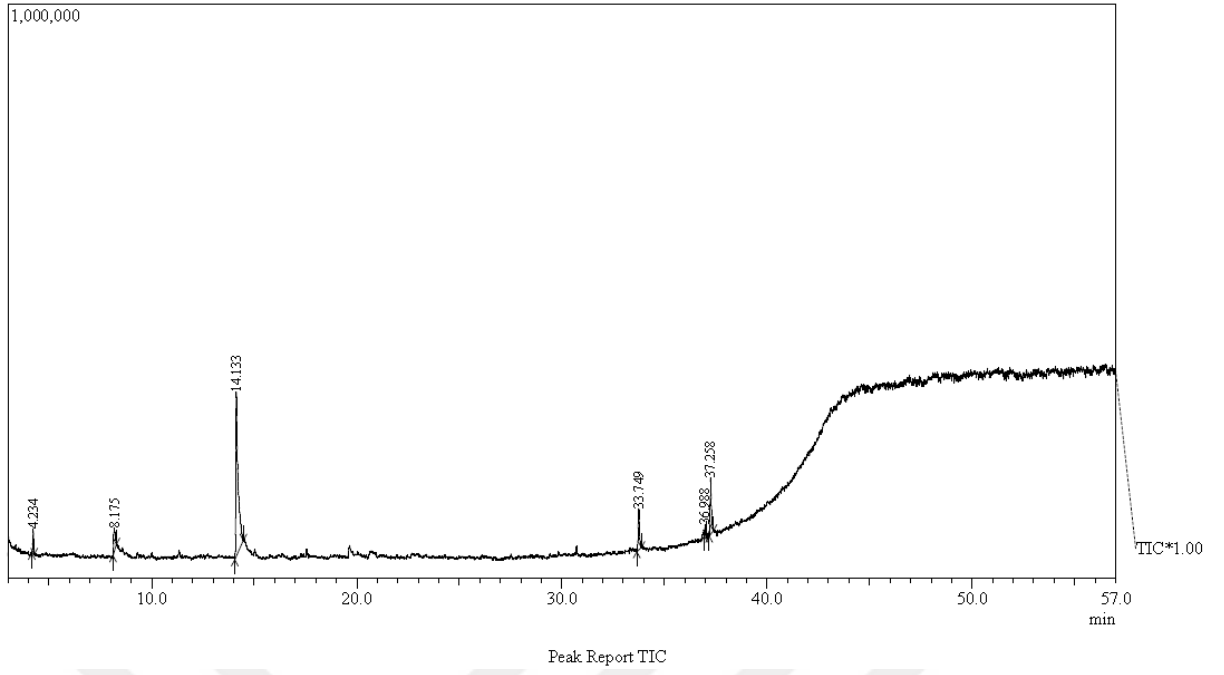
No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	3.334	0.38	Diethylacetal
2	3.575	0.23	3,6,9,12-Tetraoxatetradecan-1-ol
3	4.232	3,18	Triethylborate
4	8.116	16.89	Phenylalcohol
5	8.572	1,31	Benzofuran(CAS)
6	11.327	2,59	Benzofuran,2-methyl-
7	11.995	0.88	Benzene<ethyl-,
8	14.113	41.41	Phenol<4-isopropyl->
9	14.506	1,03	Quinoline
10	15.020	1,78	Ethanone,1-(2,3-dihydro-1H-inden-5-yl)-
11	17.282	1,13	Benzofuran,2,3-dihydro-2,2,4,6-tetramethyl-
12	17.408	1,34	5',6',7',8'-Tetrahydro-2'-acetophenone
13	17.552	2,21	5',6',7',8'-Tetrahydro-2'-acetophenone
14	33.318	0.90	Iron,(.eta.-5-cyclohepta-1,4-dien-3-yl)(.eta.-5-pentamethylcyclopentadienyl)-
15	33.605	0.56	Phenol,4,4'-methylenbis[2,3,5-trimethyl-
16	33.725	7,44	Phenol,4-(1-methylpropyl)-
17	36.850	1,14	3-Buten-2-one,4-(2,6,6-trimethyl-2-cyclohexen-1-yl)-
18	36.977	5,30	Pregnan-20-one,3-(acetyloxy)-5-hydroxy-6,16-dimethyl-,
19	37.124	0.59	Pregn-5-en-20-one,3-(acetyloxy)-6,16-dimethyl-,
20	37.245	9,72	1,2,5,5,6,7-Hexamethylbicyclo[4.1.0]hept-2-en-4-one
		100.00	



Şekil 32. Deney no:3 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 23. Deney No:3 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

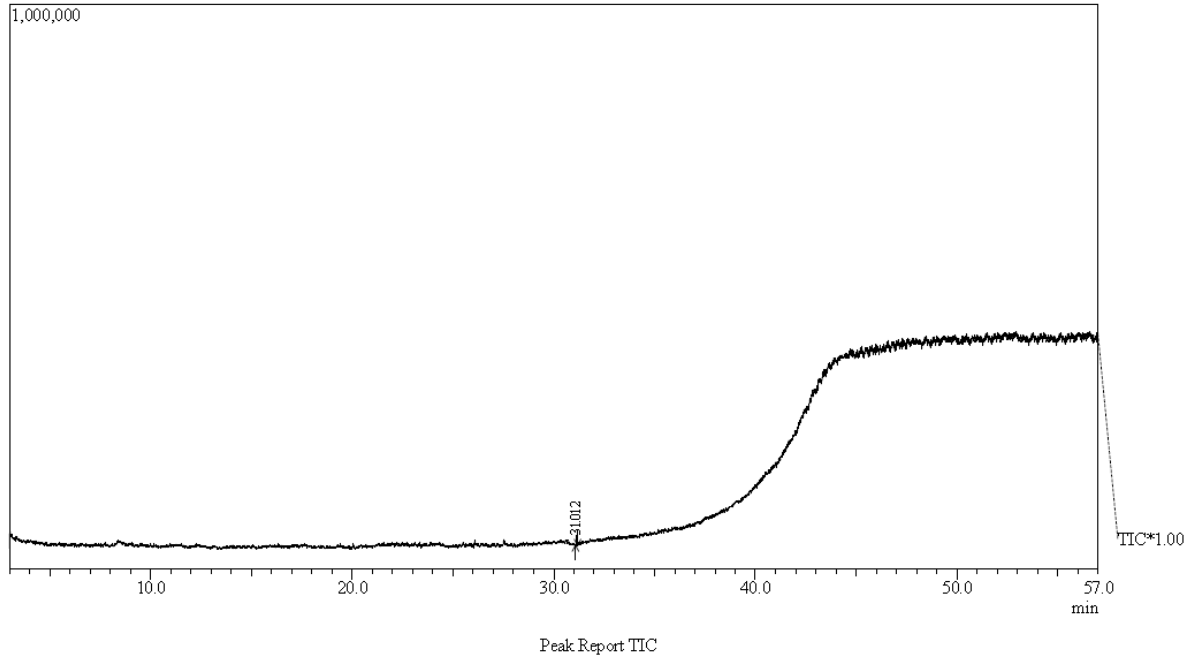
No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	29.426	47.88	Pentadecanal-
2	30.712	52.12	2-Pentadecanone
		100.00	



Şekil 33. Deney no:4 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 24. Deney No:4 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

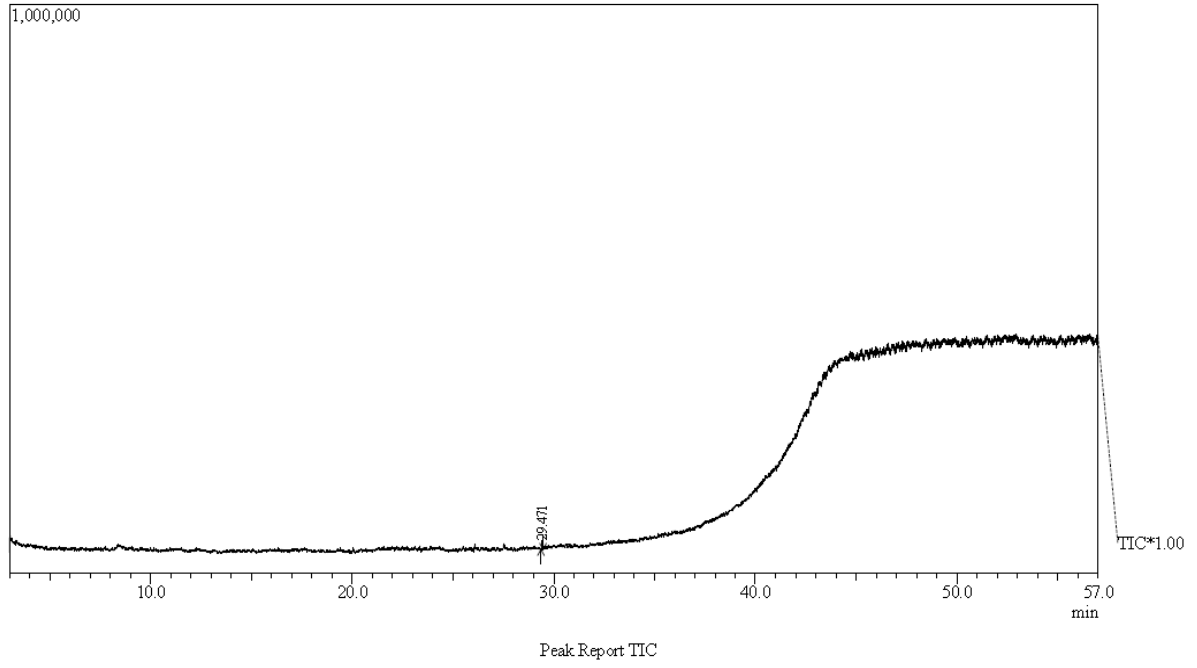
No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	4.234	3,14	Triethylborate
2	8.175	6,19	Phenylalcohol
3	14.133	66,05	Phenol<4-isopropyl->
4	33.749	9,73	Oxalicacid,
5	36.988	1,56	2H-2,4a-Methanonaphthalene,1,3,4,5,6,7-hexahydro-1,1,5,5-tetramethyl-,
6	37.258	12,61	1,2,5,5,6,7-Hexamethylbicyclo[4.1.0]hept-2-en-4-one
		100.00	



Şekil 34. Deney no:5 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 25. Deney No:5 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

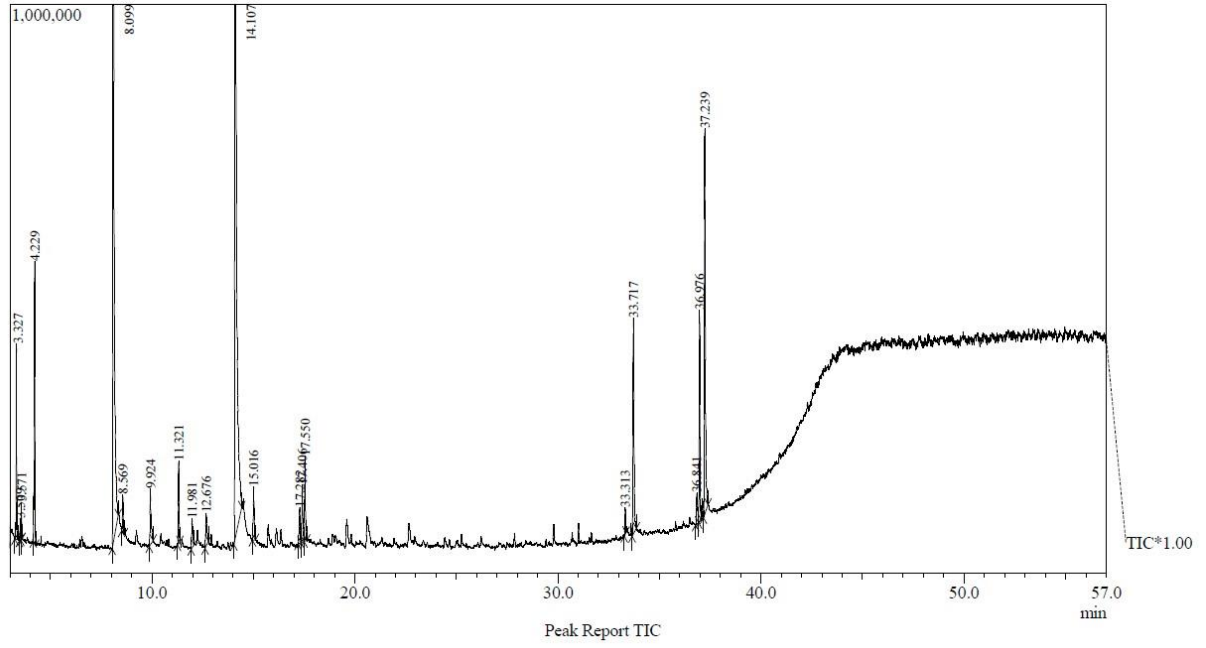
No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	31.012	100.00	2-Pentadecanone
		100.00	



Şekil 35. Deney no:6 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 26. Deney NO:6 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

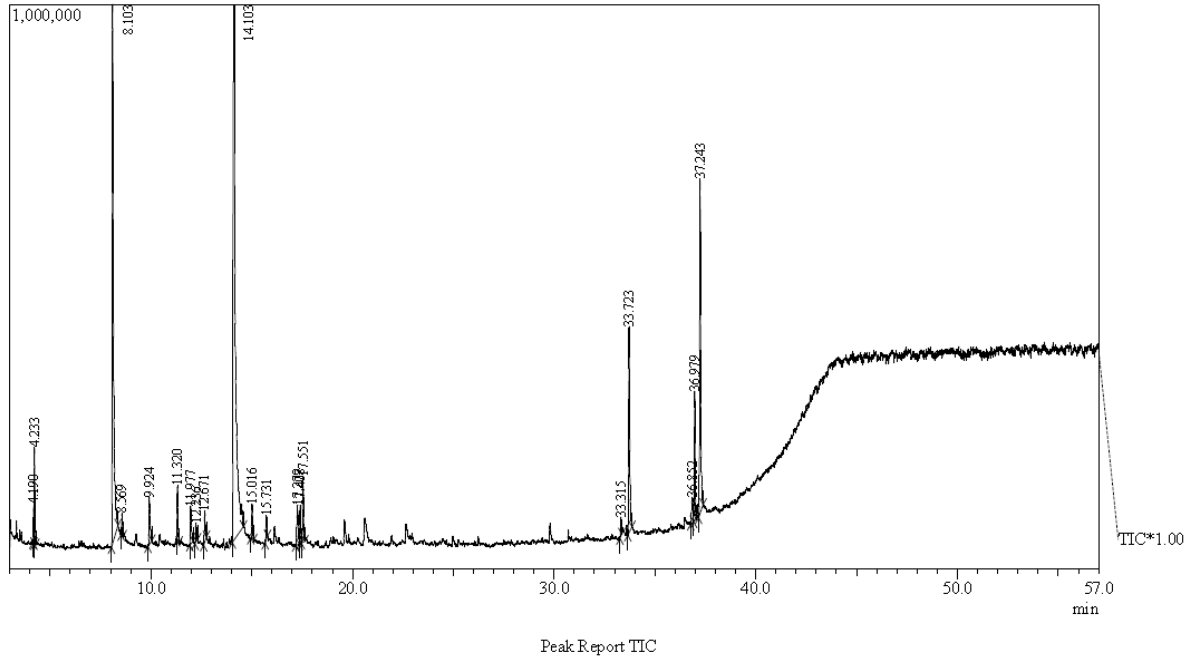
No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	29.471	100.00	Pentadecanal-
		100.00	



Şekil 36. Deney no:7 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 27. Deney No:7 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

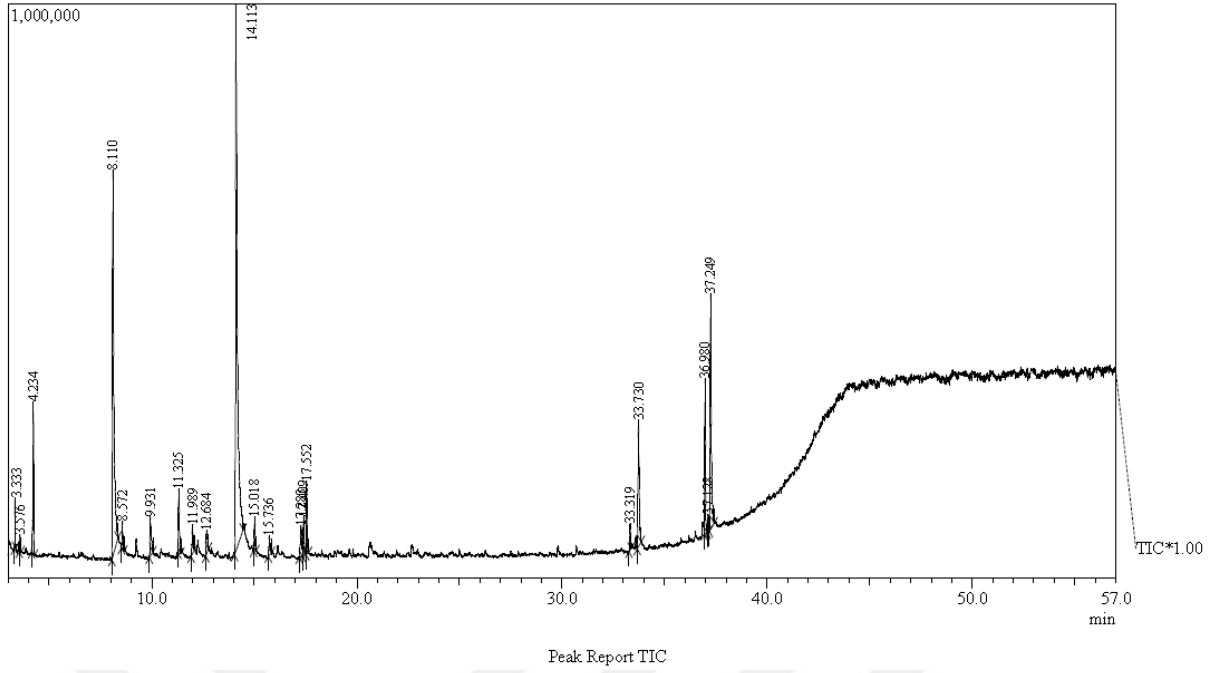
No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	3.327	2,19	Diethyl acetal
2	3.509	0,25	Tiglic aldehyde
3	3.571	0,39	3,6,9,12-Tetraoxatetradecan-1-ol
4	4.229	3,60	Triethyl borate
5	8.099	25,61	Phenyl alcohol
6	8.569	0,64	Benzofuran (CAS)
7	9.924	1,51	Phenol, 2-methyl-
8	11.321	1,53	Benzofuran, 2-methyl-
9	11.981	0,73	Benzene <ethyl-, 2-hydroxy->
10	12.676	0,93	Phenol, 4-ethyl-
11	14.107	39,45	Phenol <4-isopropyl->
12	15.016	1,03	1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro-3,3-dimethyl- (CAS)
13	17.282	0,87	Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl-5-(1-methylethyl)-
14	17.406	1,14	6-Acetyltetralin
15	17.550	1,54	5',6',7',8'-Tetrahydro-2'-acetonephthone
16	33.313	0,44	chavicol
17	33.717	4,95	Phenol, 4-(1-methylpropyl)-
18	36.841	0,91	3-Buten-2-one, 4-(2,6,6-trimethyl-2-cyclohexen-1-yl)-
19	36.976	3,72	Pregnan-20-one, 3-(acetyloxy)-5-hydroxy-6,16-dimethyl-, 3.beta., 5.alpha., 6.beta., 16.alpha.)-
20	37.239	8,58	1,2,5,5,6,7-Hexamethylbicyclo[4.1.0]hept-2-en-4-one
		100	



Şekil 37. Deney no:8 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 28. Deney No:8 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

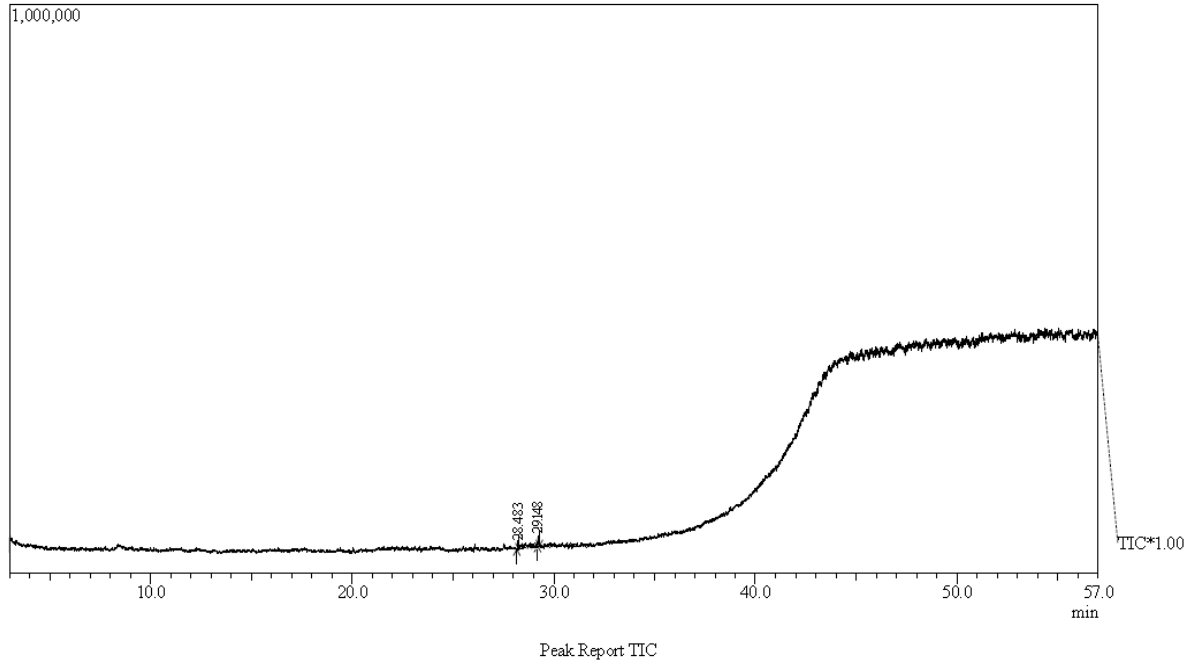
No	Pik	Alan %	Kimyasal Adı
1	4.190	0,60	Adipicketone
2	4.233	1,33	Triethylborate
3	8.103	19,10	Phenylalcohol
4	8.569	0,45	Benzofuran
5	9.924	1,56	Phenol,2-methyl-
6	11.320	1,30	Benzofuran,2-methyl-
7	11.977	1,23	Benzene<ethyl-,
8	12.236	0,55	Xylenol<2,4->
9	12.671	0,94	Phenol,4-ethyl-
10	14.103	47,63	Phenol<4-isopropyl->
11	15.016	0,88	Ethanone,1-(2,3-dihydro-1H-inden-5-yl)-
12	15.731	0,60	Phenol,2-methyl-5-(1-methylethyl)-
13	17.279	1,48	5-t-Butyl-1,2,3-trimethylbenzene
14	17.408	0,94	5',6',7',8'-Tetrahydro-2'-acetone
15	17.551	1,57	5',6',7',8'-Tetrahydro-2'-acetone
16	33.315	0,36	5-Pregnene-3-acetoxy-
17	33.723	5,89	3-Oxabicyclo[3.3.1]non-6-ene,6,8,9-trimethyl-4-(1-propenyl)-
18	36.852	0,99	.alpha.-Ionone
19	36.979	2,92	Tricyclo[6.3.0.0(1,5)]undec-2-en-4-one,5,9-dimethyl-
20	37.243	9,68	1,2,5,5,6,7-Hexamethylbicyclo[4.1.0]hept-2-en-4-one
		100.00	



Şekil 38. Deney no:9 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 29. Deney No:9 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

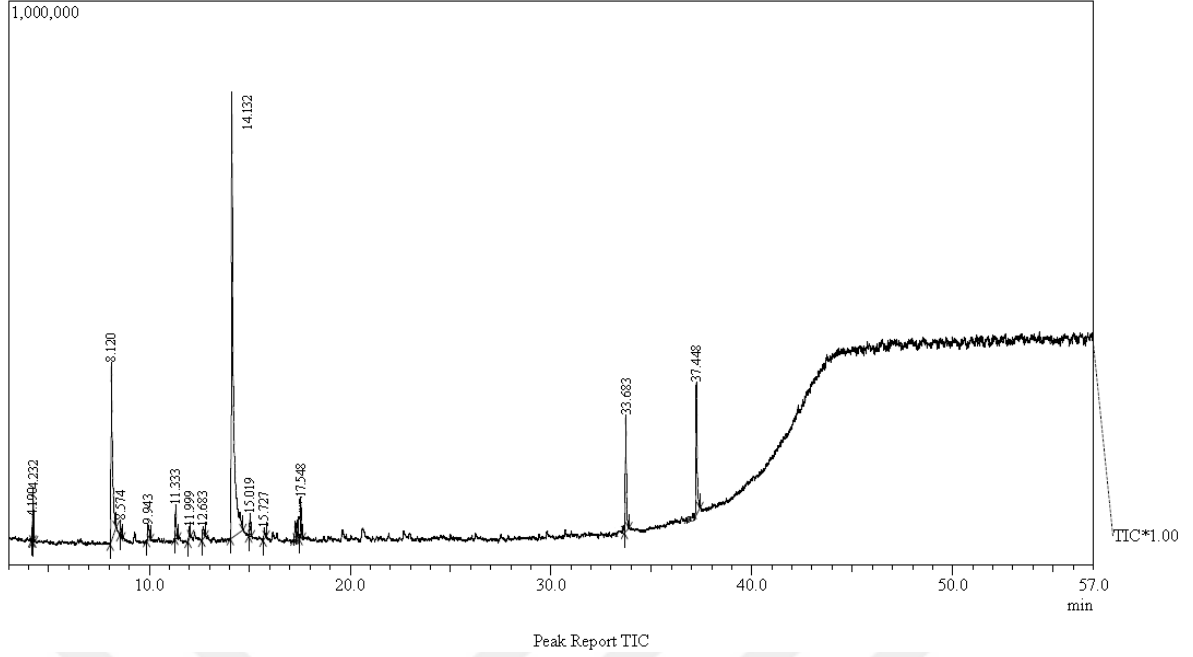
No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	3.333	0.78	Diethylacetal
2	3.576	0.31	2-(2-(2-(2-Methoxyethoxy)ethoxy)ethoxy)aceticacid
3	4.234	3,33	Triethylborate
4	8.110	19,96	Phenylalcohol
5	8.572	0,90	Benzofuran
6	9.931	1,92	Phenol,2-methyl-
7	11.325	2,08	Benzofuran,2-methyl-
8	11.989	1,25	Benzene<ethyl-,
9	12.684	1,03	Phenol,4-ethyl-
10	14.113	39.80	Phenol<4-isopropyl->
11	15.018	1,11	Ethanone,1-(2,3-dihydro-1H-inden-5-yl)-
12	15.736	0.89	Phenol,2-methyl-5-(1-methylethyl)-
13	17.283	1,54	Benzofuran,2,3-dihydro-2,2,4,6-tetramethyl-
14	17.409	1,39	6-Acetyltetralin
15	17.552	2,19	5',6',7',8'-Tetrahydro-2'-acetoneaphthone
16	33.319	0.71	Mesitol,.alpha.4-(4-hydroxy-2,3,5,6-tetramethylphenyl)-
17	33.730	5,25	Phenol,4-(1-methylpropyl)-
18	36.980	4,75	Pregnan-20-one,3-(acetyloxy)-5-hydroxy-6,16-dimethyl-,
19	37.128	0.53	Pregna-4,16-diene-3,20-dione,16-methyl-
20	37.249	10,29	1,2,5,5,6,7-Hexamethylbicyclo[4.1.0]hept-2-en-4-one
		100.00	



Şekil 39. Deney no:10 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 30. Deney No:10 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

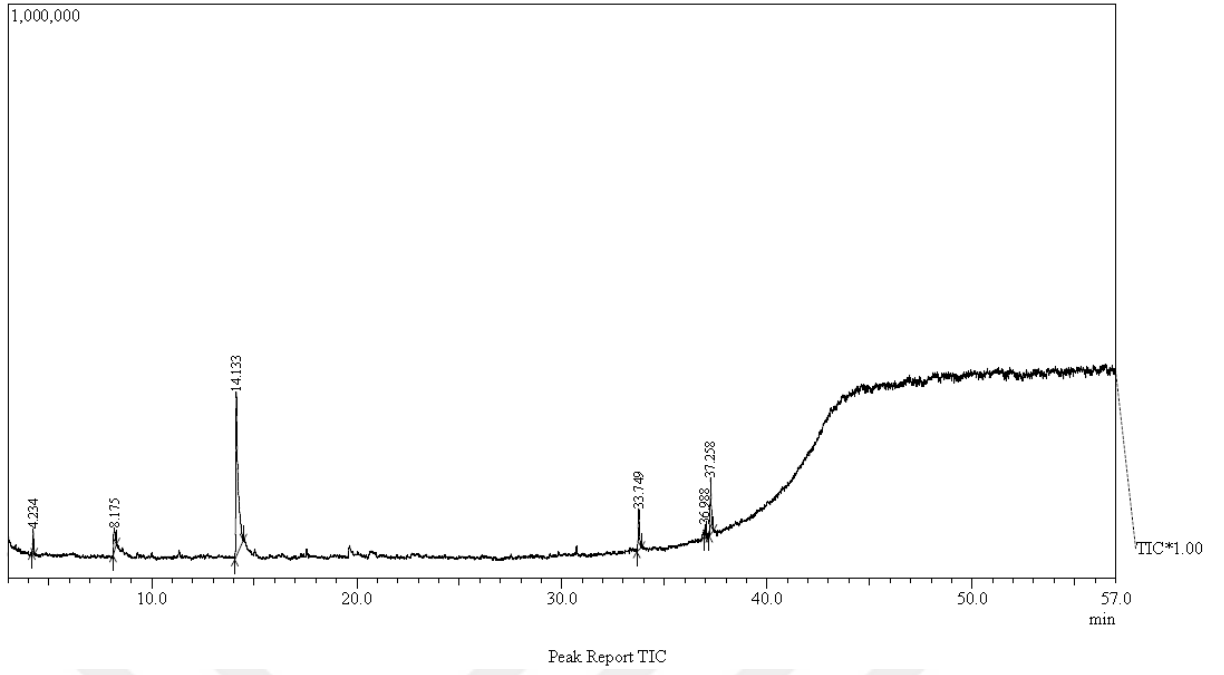
No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	28.483	67.74	Pentadecanal-
2	29.148	33.26	2-Pentadecanone
		100.00	



Şekil 40. Deney no:11 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 31. Deney No:11 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

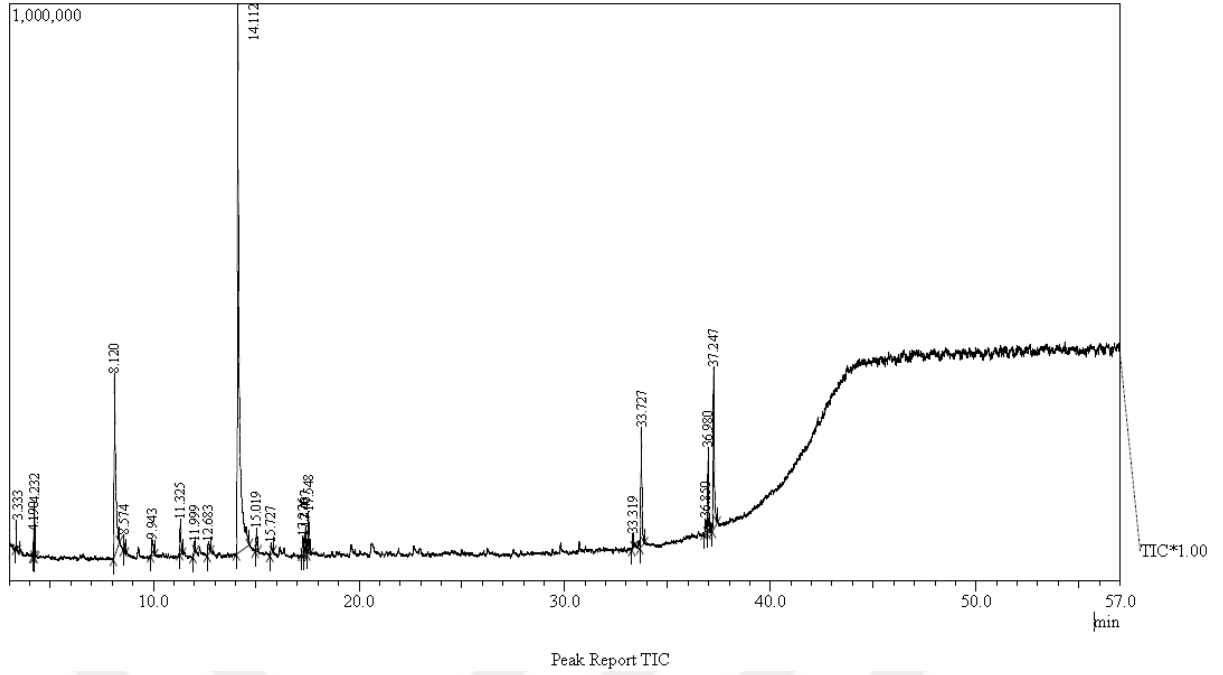
No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	4.190	0,74	Cyclopentanone(CAS)
2	4.232	1,37	Triethylborate
3	8.120	16,19	Phenylalcohol
4	8.574	0,72	Benzofuran
5	9.943	1,46	Phenol,2-methyl- (CAS)
6	11.120	1,64	Benzofuran,2-methyl-
7	11.999	0,70	Benzene <ethyl-, 2-hydroxy->
8	12.683	0,89	Phenol,4-ethyl-
9	14.132	47,82	Phenol<4-isopropyl->
10	15.019	1,19	Ethanone,1-(2,3-dihydro-1H-inden-5-yl)-
11	15.727	0,66	Thymol
12	17.276	1,24	Benzofuran,2,3-dihydro-2,2,4,6-tetramethyl-
13	17.548	3,26	5',6',7',8'-Tetrahydro-2'-acetophenone
14	33.683	6,62	Phenol,4-(1-methylpropyl)-
15	37.448	15,50	1,2,5,5,6,7-Hexamethylbicyclo[4.1.0]hept-2-en-4-one
		100,00	



Şekil 41. Deney no:12 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 32. Deney No:12 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	4.234	1,51	Triethylborate
2	8.175	17,84	Phenylalcohol
3	14.133	52,69	Phenol<4-isopropyl->
4	33.749	3,59	Phenol,4-(1-methylpropyl)-
5	36.988	7,29	Pregnan-20-one,3-(acetyloxy)-5-hydroxy-6,16-dimethyl-,
6	37.258	17,08	1,2,5,5,6,7-Hexamethylbicyclo[4.1.0]hept-2-en-4-one
		100,00	



Şekil 42. Deney no:13 şartlarında elde edilen GC analiz pikleri

Tablo 33. Deney No:13 Şartlarında Elde Edilen GC Analiz Raporu

No	Pik	Alan%	Kimyasal Adı
1	3.333	0,64	Ethane,1,1-diethoxy-
2	4.190	0,74	Cyclopentanone(CAS)
3	4.232	1,37	Triethylborate
4	8.120	14,59	Phenylalcohol
5	8.574	0,67	Benzofuran
6	9.943	1,46	Phenol,2-methyl- (CAS)
7	11.333	1,64	Benzofuran,2-methyl-
8	11.999	0,70	Benzene <ethyl-, 2-hydroxy->
9	12.683	0,89	Phenol,4-ethyl-
10	14.212	49,52	Phenol<4-isopropyl->
11	15.019	1,19	Ethanone,1-(2,3-dihydro-1H-inden-5-yl)-
12	15.727	0,66	Thymol
13	17.276	1,24	Benzofuran,2,3-dihydro-2,2,4,6-tetramethyl-
14	17.407	1,28	5',6',7',8'-Tetrahydro-2'-acetoneaphthone
15	17.548	1,98	5',6',7',8'-Tetrahydro-2'-acetoneaphthone
16	33.319	0,61	Mesitol,.alpha.4-(4-hydroxy-2,3,5,6-tetramethylphenyl)-
17	33.727	6,62	Phenol,4-(1-methylpropyl)-
18	36.850	0,98	Ionone
19	36.980	3,65	Tricyclo[6.3.0.0(1,5)]undec-2-en-4-one,5,9-dimethyl-
20	37.247	9,58	1,2,5,5,6,7-Hexamethylbicyclo[4.1.0]hept-2-en-4-one
100,00			

GC-MS analizleri, subkritik su oksidasyonu işlemi sonrası organik fraksiyonun kimyasal bileşiminde önemli değişimler meydana geldiğini göstermektedir. Düşük OBV elde edilen deneylerde (örneğin Deney no: 3, 5 ve 6), kromatogramlarda yüksek molekül ağırlıklı alifatik aldehit ve ketonların (pentadecanal, 2-pentadecanone) baskın olduğu belirlenmiştir. Bu

bileşikler, BDK’lerde bulunan epoksi reçinelerin ve katkı maddelerinin kısmi bozunma ürünleri olarak değerlendirilmektedir

Buna karşılık, yüksek OBV elde edilen deneylerde (Deney no: 2, 7, 8 ve 13), GC-MS kromatogramlarında:

- Fenol ve fenolik türevlerin (özellikle 4-izopropilfenol) yüksek oranda tespit edildiği,
- Benzofuran ve alkilfenol türevlerinin azaldığı,
- Daha düşük molekül ağırlıklı oksijenli ara ürünlerin oluştuğu

gözlenmiştir. Bu sonuçlar, subkritik su oksidasyonu altında aromatik yapıların parçalanarak daha reaktif ve oksitlenebilir ara ürünlere dönüştüğünü göstermektedir (Yabalak et al. 2023; Švarc-Gajić et al. 2024).

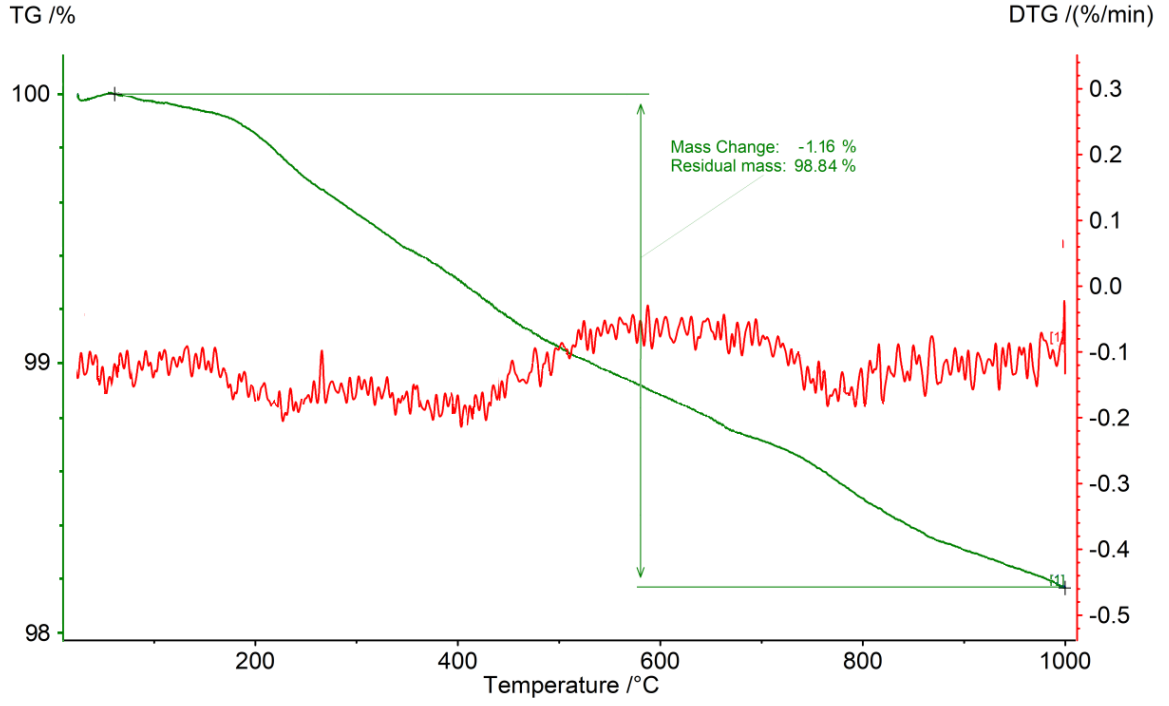
Özellikle Deney no:7’de (320 °C, 0,45 g/mL, 120 dk) elde edilen %98,49 OBV değeri, GC-MS analizlerinde kompleks aromatik bileşiklerin büyük ölçüde parçalandığını ve daha basit fenolik yapılarla sınırlı kaldığını ortaya koymuştur. Tablo 27’den sıvı ürünün önemli oranda fenol, pentilalkol ve hegzametil grubundan oluştuğu görülmektedir. Tablo 27 incelendiğinde sıvı üründe bromlu bileşiğe rastlanmamıştır. Bu durum debromizasyonun başarı ile gerçekleştiğini de göstermiştir. Benzer sonuçlar süperkritik metanol oksidasyonu ile baskılı devre kartlarından organik kısmın uzaklaştırılması çalışmasında rapor edilmiştir (Kumari and Samadder 2025).

Subkritik su oksidasyonundan sonra kalan katının karakterizasyonu

Subkritik su oksidasyonundan sonra kalan katının çeşitli yöntemler kullanılarak karakterizasyonu yapılarak işlem başarısı teyit edilmeye çalışılmıştır.

TG-DTG analizi

Subkritik su oksidasyonundan sonra kalan katının TG-DTG grafiği Şekil 43’te gösterilmiştir. 25°C-1000 °C aralığında katının ağırlık kaybı %1,16 olarak belirlenmiştir. DTG grafiği yalnızca gürültü piklerinden ibarettir ve burada bir bozunma pikine rastlanmamıştır. Bu durum, polimerik yapının subkritik su oksidasyonu sonucu tamamen uzaklaştığını, ancak oksidasyondan sonra yıkama aşamasında katının üzerinde bir miktar çözünmüş organik kalıntının kaldığı şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 43. Subkritic-Su Oksidasyonu sonucu optimum koşullarda üretilen numunenin TG-DTG grafiği

Elementel analiz sonuçları

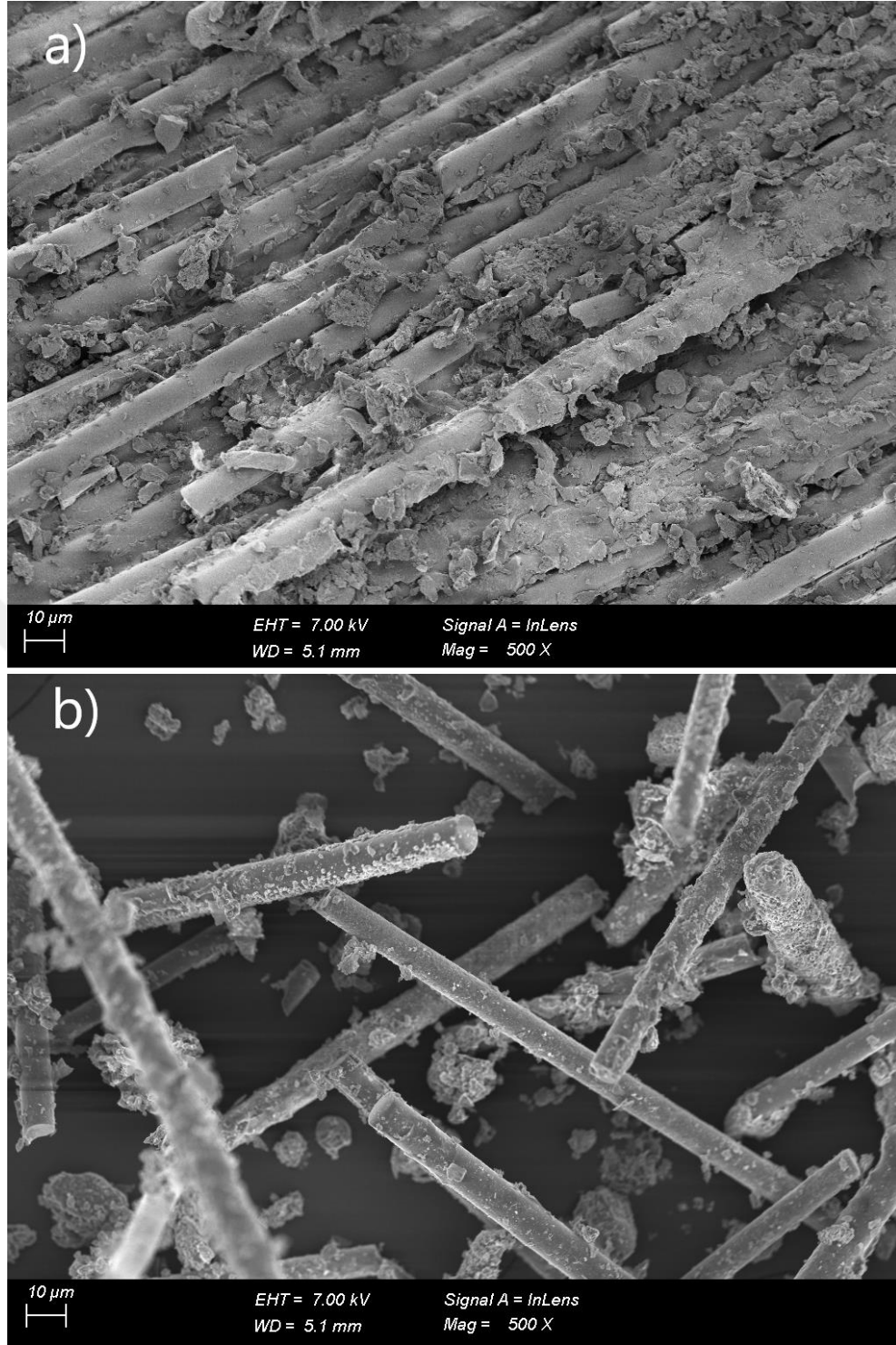
Subkritic Su Oksidasyonu sonucu optimum koşullarda üretilen numunenin elementel analiz sonucu Tablo 34’te verilmiştir. Ürünün karbon içeriği %1,5 değerine düşmüştür. Bu değer TG sonucuyla uyumludur.

Tablo 34. Elementel Analiz Sonuçları

Numune	%C	%H	%N	%S
Subkritic sonrası optimum numune	1,51	0,78	-	-

SEM analizi

ABDK bileşenlerine uygulanan subkritic su ile oksidasyon işleminin öncesindeki ham numunenin ve sonrasında kalan katı maddenin yapısal ve morfolojik özellikleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiş ve sonuçlar Şekil 44’te verilmiştir.



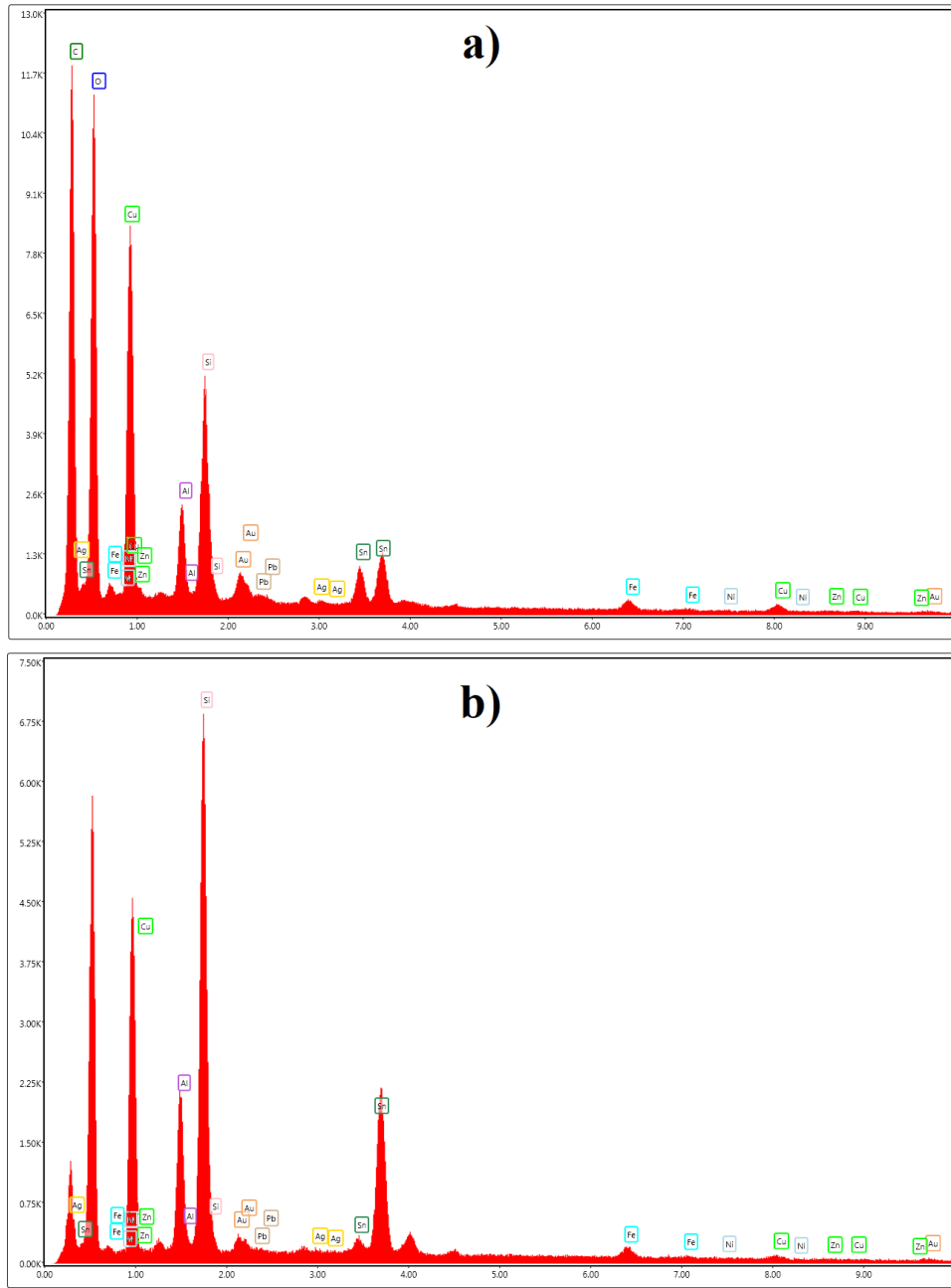
Şekil 44. a) Ham örneğin b) Subkritik Su Oksidasyonu sonucu SEM analizleri

Şekil 44.a’da ham ABDK’nın organik maddelerle sarılı olduğu görülmektedir.Şekil 44.b ‘de ise subkritik sonrası kalan katının organik maddelerin uzaklaştığı ve metallerin açığa çıktığı net bir şekilde görülmektedir.

EDS analizi

Ham numune ve oksidasyon işlemi sonucu kalan katının EDS analizleri sırasıyla Şekil 45 a ve Şekil 45 b’de verilmiştir. Ham örneğin EDS grafiğinde belirgin bir karbon piki

mevcutken oksidasyon işlemi sonunda kalan katının EDS grafiğinde karbona ait bir pike rastlanmamıştır. Bu da subkritik su oksidasyonu ile polimerik yapının başarılı bir şekilde uzaklaştırıldığının göstergesidir.

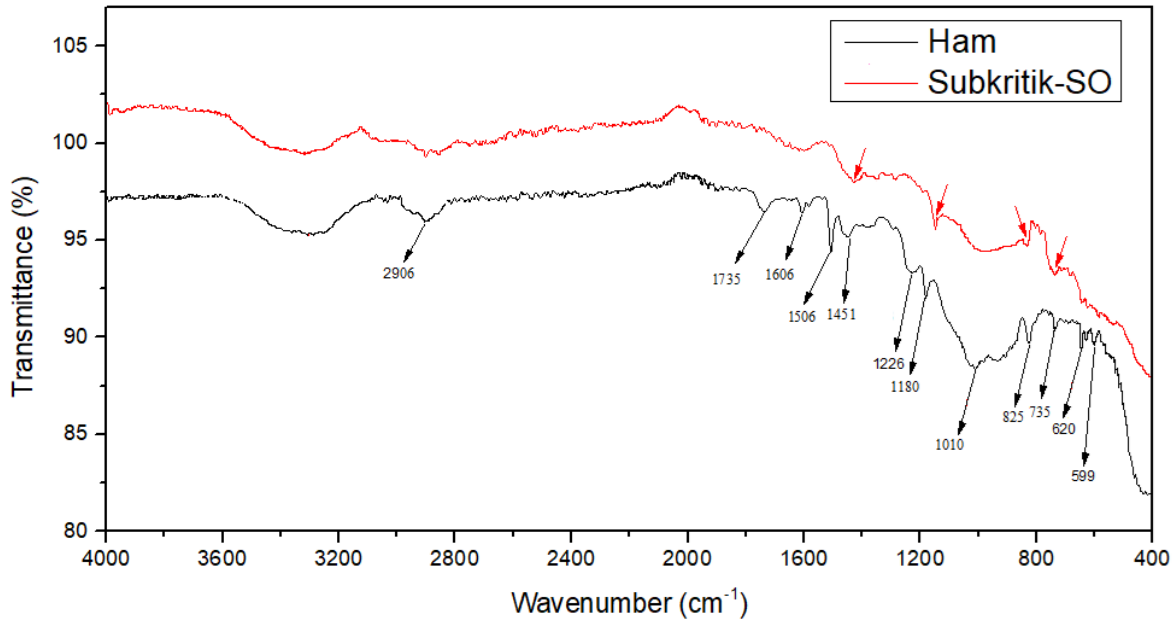


Şekil 45. a) Ham örneğin b) Subkritik Su Oksidasyonu sonucu EDS analizleri

FT-IR analiz sonuçları

Ham ve işlem görmüş atık baskılı devre kartlarının FT-IR analizi Şekil 46’da verilmiştir. Atık baskılı devre kartlarının organik fonksiyonel grupları esas olarak O-H, C-H, C=C, C-O ve C-Br ‘dan oluşmaktadır (Shen et al. 2018). Şekilden görüldüğü gibi ham örnekte pikler 1735 cm^{-1} - 550 cm^{-1} aralığında yoğunlaşmıştır. Tipik pikler 2906 , 1745 , 1606 , 1506 , 1451 , 1383 , 1226 , 1180 , 1010 , 825 , 735 , 620 ve 599 cm^{-1} dalga boylarında elde edilmiştir. İşlem görmüş

örnekte termal işlem sonucu pekçok pik kaybolmuştur. Bu örneğe ait karakteristik pikler 1506, 1180, 825 ve 735 cm^{-1} dalga boylarında elde edilmiştir. 2906 cm^{-1} 'deki pik alifatik C-H gerilmelerini (Stuart 2004), 1745 cm^{-1} 'deki pik C=O gerilmelerini (Stuart 2004), 1606 cm^{-1} 'deki ve 1506 cm^{-1} 'deki pikler epoksi reçinedeki benzen halkasındaki C=C gerilmelerini (Kumari and Samadder 2025), 1451 cm^{-1} 'deki pik aramatik halkadaki C=C gerilimlerini (Jadhao et al. 2020), 1226-735 cm^{-1} bant aralığındaki pikler C-H gerilmelerini, 620-599 cm^{-1} aralığındaki pikler aromatik C-Br gerilmelerini ifade etmektedir (Stuart 2004; Kumari and Samadder 2025). Ham ve işlem görmüş örneklerin FTIR spektrumları karşılaştırıldığında; işlem görmüş örneğin kimyasal yapısının önemli ölçüde değiştiği ve 620- 550 cm^{-1} aralığındaki piklerin kaybolması ile bromlu yapının uzaklaştığı görülmektedir. Bu sonuçla, yapılan işlemin amacına ulaştığı söylenebilir.



Şekil 46. ABDK ham örneğin ve Subkritik Su Oksidasyonu sonucu optimum deneyin FT-IR grafiği

Süperkritik CO₂-Glisin-H₂O₂ ekstraksiyonu

Subkritik su oksidasyonu sonrasında kalan katının metal bileşimi Tablo 35'te gösterilmiştir.

Tablo 35. Atık Baskı Devre Kartlarının Subkritik Oksidasyon Sonrası Metal Bileşimleri

Metaller	Al	Ni	Cu	Zn	Pb
	%				
ABDK Subkritik sonrası	1,06	0,27	33,50	1,15	0,90

Yüzey yanıt yönteminde merkezi kompozit deney tasarımı istatistiksel analizi

Bu çalışmada, atık baskılı devre kartlarından (ABDK) bakır (Cu) geri kazanımını etkileyen proses parametrelerinin optimize edilmesi amacıyla merkezi kompozit tasarımı (Central Composite Design (CCD)) tabanlı Yüzey Yanıt Yöntemi (RSM) kullanılmıştır. Tablo 36'da deney tasarımı ve deneysel sonuçlar gösterilmiştir. CCD yaklaşımı, bağımsız değişkenlerin doğrusal, karesel ve etkileşimsel etkilerini eş zamanlı olarak değerlendirme imkânı sağlayarak, deney sayısını minimize ederken modelin öngörü gücünü artırmıştır. Geliştirilen ikinci dereceden polinom model, Cu geri kazanım verimini tanımlamakta başarılı olmuş ve deneysel verilerle model tahminleri arasında iyi bir uyum gözlenmiştir.

Tablo 36. Merkezi Kompozit Deney Tasarımı ve Deneysel Sonuçlar

Standart Sıra	Çalıştırma Sırası	Glisin Kons. (M)	H ₂ O ₂ (%)	Katı/Sıvı Oranı (g/mL)	Zaman (saat)	Cu (%)
22	1	0,75	10	25	12	59,32
23	2	0,75	10	15	4	59,50
18	3	1,25	10	15	12	74,25
9	4	0,5	7,5	10	16	62,09
1	5	0,5	7,5	10	8	52,35
3	6	0,5	12,5	10	8	79,85
24	7	0,75	10	15	20	68,32
12	8	1	12,5	10	16	76,15
20	9	0,75	15	15	12	78,38
5	10	0,5	7,5	20	8	43,23
21	11	0,75	10	5	12	67,73
14	12	1	7,5	20	16	50,35
7	13	0,5	12,5	20	8	72,38
13	14	0,5	7,5	20	16	61,22
4	15	1	12,5	10	8	87,63
10	16	1	7,5	10	16	76,93
6	17	1	7,5	20	8	65,26
16	18	1	12,5	20	16	80,78
8	19	1	12,5	20	8	75,59
25	20	0,75	10	15	12	90,39
17	21	0,25	10	15	12	56,92
2	22	1	7,5	10	8	65,95
19	23	0,75	5	15	12	58,37
15	24	0,5	12,5	20	16	69,67
11	25	0,5	12,5	10	16	70,17

Tablo 36'da verilen sonuçlara göre Cu geri kazanım verimi %43,23 ile %90,39 arasında değişmiş; bu geniş aralık sistemin faktörlere oldukça duyarlı olduğunu göstermiştir. En yüksek deneysel verim merkez noktasında (%90,39) elde edilmiştir. Bu durum, yanıt yüzeyinin doğrusal değil, eğrisel bir yapıya sahip olduğunu ve optimum noktanın deney alanı içinde bulunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada kullanılan Yüzey yanıt yöntemi ve merkez kompozit tasarımı (CCD) yaklaşımı, çok değişkenli süreçlerin optimizasyonunda geniş kabul görmüş istatistiksel araçlardır. RSM, faktörler arasındaki etkileşimleri ortaya koyarak tek değişkenli optimizasyona göre daha etkili ve daha az deneysel maliyetle optimum çalışma koşullarının belirlenmesini sağlar. Örneğin, ağır metal iyonlarının uzaklaştırılmasında RSM-CCD kullanılarak yapılan bir çalışmada, Cu^{2+} , Cd^{2+} ve Pb^{2+} için geliştirilen kuadratik modellerin yüksek R^2 değerleri ile deneysel verileri başarıyla öngördüğü bildirilmiştir. Bu çalışmada da modelin genel olarak anlamlı bulunması, bağımsız değişkenlerin Cu geri kazanımına etkilerinin RSM tarafından iyi temsil edildiğini göstermektedir (Sasidharan and Kumar 2022).

Bu bağlamda bizim bulgularımız da literatürdeki diğer çalışmalara uyumlu olarak kuadratik regresyon modellerinin (second-order models) birçok kimyasal ve metal geri kazanım sisteminde başarıyla uygulanabildiğini göstermektedir. Benzer şekilde başka çalışmalar da CCD ile geliştirilen modellerin deneysel verilerle yakın uyum sağladığını rapor etmektedir (Yasin et al. 2014).

Varyans Analizi (ANOVA)

Cu (%) geri kazanımı için geliştirilen regresyon modeline ait ANOVA sonuçları Tablo 37’de sunulmuştur.

Tablo 37. Cu (%) İçin Varyans Analizi Sonuçları

Kaynak	DF	Sıralı Kare Alanı	Katkı (%)	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	14	2690,81	84,27	2690,81	192,20	3,83	0,019
Lineer Terimler	4	1933,01	60,53	1933,01	483,25	9,62	0,002
Glisin Kons.	1	436,39	13,67	436,39	436,39	8,69	0,015
H ₂ O ₂	1	1274,00	39,90	1274,00	1274,00	25,36	0,001
Katı/Sıvı Oranı	1	201,03	6,30	201,03	201,03	4,00	0,073
Zaman	1	21,58	0,68	21,58	21,58	0,43	0,527
Kare Terimler	4	546,25	17,11	546,25	136,56	2,72	0,091
Glisin Kons.*Glisin Kons.	1	16,65	0,52	372,47	372,47	7,41	0,021
H ₂ O ₂ *H ₂ O ₂	1	0,63	0,02	287,48	287,48	5,72	0,038
Katı/Sıvı Oranı*Katı/Sıvı Oranı	1	100,19	3,14	442,27	442,27	8,80	0,014
Zaman*Zaman	1	428,77	13,43	428,77	428,77	8,53	0,015
Etkileşim Terimleri	6	211,55	6,63	211,55	35,26	0,70	0,655
Glisin Kons.*H ₂ O ₂	1	8,29	0,26	8,29	8,29	0,17	0,693
Glisin Kons.*Katı/Sıvı Oranı	1	17,47	0,55	17,47	17,47	0,35	0,568
Glisin Kons.*Zaman	1	40,83	1,28	40,83	40,83	0,81	0,389
H ₂ O ₂ *Katı/Sıvı Oranı	1	29,92	0,94	29,92	29,92	0,60	0,458
H ₂ O ₂ *Zaman	1	112,78	3,53	112,78	112,78	2,24	0,165
Katı/Sıvı Oranı*Zaman	1	2,25	0,07	2,25	2,25	0,04	0,837
Hata	10	502,42	15,73	502,42	50,24		
Toplam	24	3193,23	100,00				

Tablo 37’den Lineer Etkilerde H₂O₂, Cu oksidasyonunu artırarak metal çözünürlüğünü yükseltmiş ve en baskın faktör olmuştur. Kare Terimlerde, tüm kare terimlerin p<0,05 olması, aşırı değerlerde verimin düştüğünü, yani sistemin optimum bir çalışma bölgesine sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 37’de verilen ANOVA sonuçlarına göre geliştirilen ikinci dereceden regresyon modeli istatistiksel olarak anlamlıdır (F = 3,83; p = 0,019).

Bu çalışmada elde edilen ANOVA sonuçları, model katkı oranı %84,27 olup Cu geri kazanımındaki varyasyonun büyük bir kısmının açıklanabildiğini göstermektedir. Ancak düzeltilmiş R² değerinin göreceli olarak sınırlı olması (≈0.62) bazı parametrelerin katkısının daha düşük olabileceğini göstermektedir. Literatürde benzer optimizasyon çalışmalarında, yüksek R² değerleriyle (0.90’ın üzerinde) elde edilen modeller de raporlanmış olup bu farklılık, incelenen sistemin kimyasal dinamiklerinin karmaşıklığından veya kullanılan faktörlerin aralığının genişliğinden kaynaklanıyor olabilir (Bai et al. 2018).

Tüm ikili etkileşimler istatistiksel olarak anlamsızdır (p>0,05). Bu durum, sistemin baskın olarak bireysel faktör etkileri ile kontrol edildiğini göstermektedir.

Faktörlerin Cu (%) geri kazanımı üzerindeki etkileri

Deneysel çalışmada incelenen proses parametrelerinin bakır geri kazanım verimi üzerindeki bireysel ve göreceli etkileri Tablo 38’de gösterilmiş olup bu tablo Cu (%) geri kazanımını belirleyen baskın faktörlerin ve etkileşimlerin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

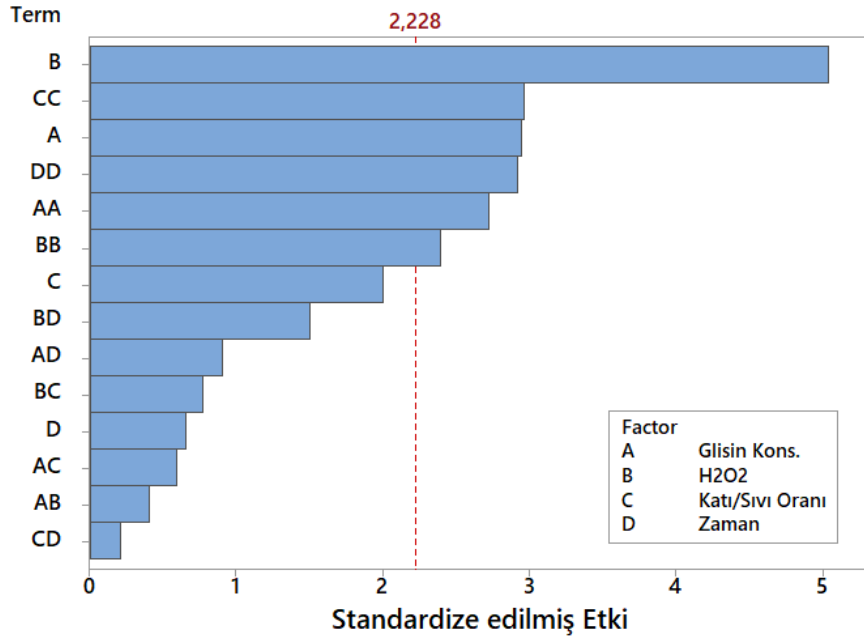
Tablo 38. Faktörlerin Cu (%) Geri Kazanımı Üzerindeki Etkileri

Terim	Katsayı	Standart Hata Katsayısı	95% Güven Aralığı	T-Değeri	P-Değeri	VIF Değeri
Sabit	90,39	7,09	(74,60; 106,18)	12,75	0,000	
Glisin Kons.	8,53	2,89	(2,08; 14,98)	2,95	0,015	1,00
H ₂ O ₂	14,57	2,89	(8,12; 21,02)	5,04	0,001	1,00
Katı/Sıvı Oranı	-5,79	2,89	(-12,24; 0,66)	-2,00	0,073	1,00
Zaman	1,90	2,89	(-4,55; 8,34)	0,66	0,527	1,00
Glisin Kons.*Glisin Kons.	-22,97	8,44	(-41,77; -4,17)	-2,72	0,021	2,21
H ₂ O ₂ *H ₂ O ₂	-20,18	8,44	(-38,98; -1,38)	-2,39	0,038	2,21
Katı/Sıvı Oranı*Katı/Sıvı Oranı	-25,03	8,44	(-43,83; -6,23)	-2,97	0,014	2,21
Zaman*Zaman	-24,65	8,44	(-43,44; -5,85)	-2,92	0,015	2,21
Glisin Kons.*H ₂ O ₂	-2,88	7,09	(-18,67; 12,91)	-0,41	0,693	1,00
Glisin Kons.*Katı/Sıvı Oranı	-4,18	7,09	(-19,97; 11,61)	-0,59	0,568	1,00
Glisin Kons.*Zaman	-6,39	7,09	(-22,18; 9,40)	-0,90	0,389	1,00
H ₂ O ₂ *Katı/Sıvı Oranı	5,47	7,09	(-10,32; 21,26)	0,77	0,458	1,00
H ₂ O ₂ *Zaman	-10,62	7,09	(-26,41; 5,17)	-1,50	0,165	1,00
Katı/Sıvı Oranı*Zaman	1,50	7,09	(-14,29; 17,29)	0,21	0,837	1,00

Regresyon Modeli, gerçek birimler cinsinden elde edilen regresyon modeli aşağıda verilmiştir:

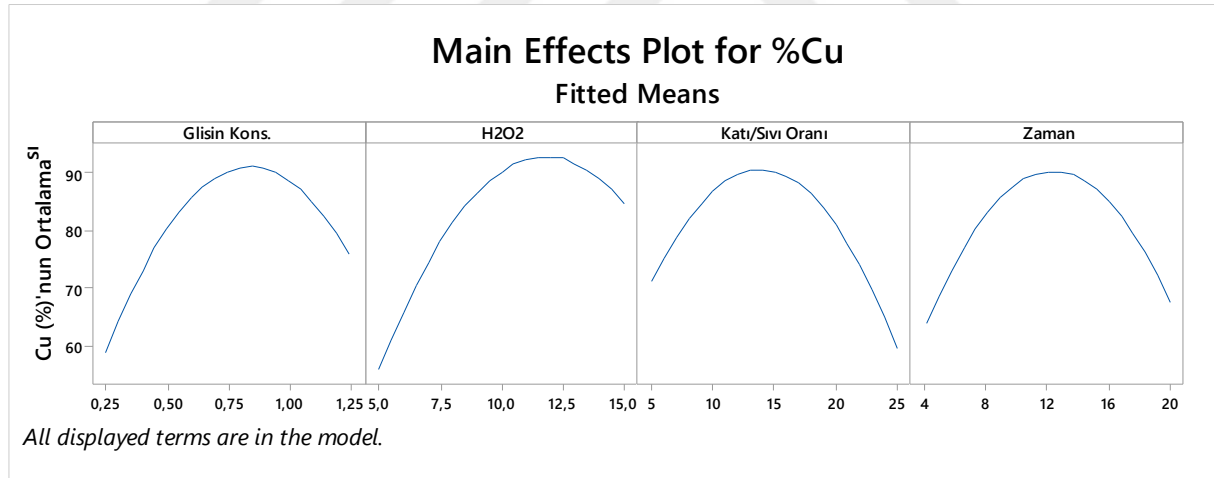
$$\begin{aligned} \text{Cu (\%)} = & -234,4 + 198,1 A + 21,47 B + 6,24 C + 13,05 D - 91,9 A^2 - 0,807 B^2 \\ & - 0,2503 C^2 - 0,385 D^2 - 1,15 A*B - 0,84 A*C - 1,60 A*D + 0,109 B*C - 0,266 B*D \\ & + 0,0188 C*D \end{aligned}$$

Pozitif lineer katsayılar, başlangıçta Cu geri kazanımının arttığını; negatif kare terimler ise belirli bir noktadan sonra verimin azaldığını göstermektedir. Bu, sistemin optimum koşullara sahip olduğunu doğrular. Şekil 47’de Cu kazanımı üzerinde parametre etkileri gösterilmiştir.



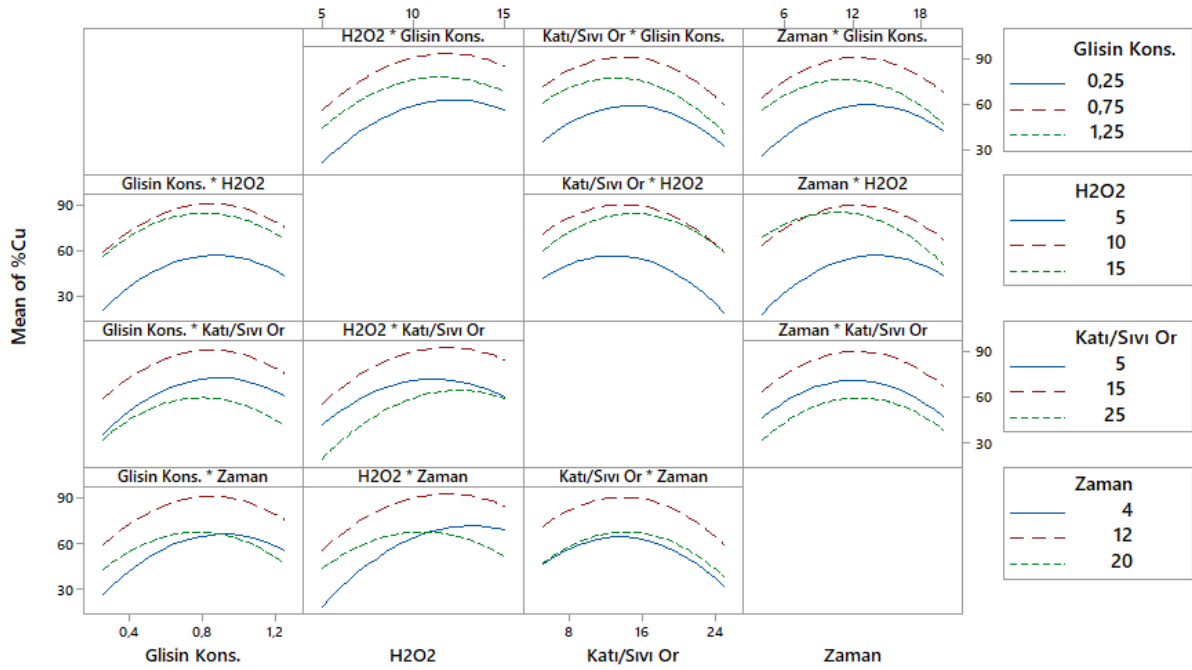
Şekil 47. Standartlaştırılmış Etkilerin Pareto Grafiği

Pareto grafiği (Şekil 47), Cu geri kazanımı üzerinde en güçlü etkiye sahip faktörün H_2O_2 , ardından glisin konsantrasyonu olduğunu göstermektedir. Şekil 48’de parametlerin Cu geri kazanımını artırıcı veya azaltıcı etkileri gösterilmiştir.



Şekil 48. % Cu ana etki grafiği

Ana etki grafikleri (Şekil 48) incelendiğinde, glisin konsantrasyonu ile H_2O_2 derişiminin artması, Cu geri kazanım verimini belirgin şekilde artırmaktadır. Buna karşılık, katı/sıvı oranındaki artışın Cu geri kazanımı üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğu ve geri kazanım veriminin azaldığı görülmektedir. Zaman değişkeninin ise incelenen aralıkta Cu geri kazanımı üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu ve diğer parametrelere kıyasla daha düşük düzeyde kaldığı tespit edilmiştir. Şekil 49’da Cu kazanımı için etkileşim grafiği verilmiştir.



Şekil 49. Cu (%) için Etkileşim Grafiği

Etkileşim grafikleri (Şekil 49), faktörler arasında belirgin bir sinerjik veya antagonistik ilişki olmadığını doğrulamaktadır.

Hidrojen peroksit (H_2O_2) ve glisin etkisi

Bu çalışmada en etkili parametre olarak H_2O_2 yüzdesi ortaya çıkmıştır. Bu, özellikle Cu oksidasyon veya kompleksleşme reaksiyonlarının hızlanmasını sağlayarak çözünürlüğü artırdığı için beklenen bir sonuçtur. Literatürde ağır metal iyonlarının çözünmesinin H_2O_2 gibi oksidantların varlığında arttığına yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır; bu çalışmalar H_2O_2 konsantrasyonunun yükselmesinin metal iyonlarının çözünürlüğünü artırdığını göstermiştir (Sasidharan and Kumar 2022).

Glisin, metal-ligand kompleksi oluşturması açısından kritik bir rol oynamıştır. Bu tür kompleksleştiricilerin metal iyonlarını çözeltide stabilize ederek metal geri kazanımını iyileştirdiğine dair raporlar mevcuttur. Çalışmalar, özellikle amino asit bazlı ligantların metal çözünürlüğünü artırma eğiliminde olduğunu bildirmektedir (Trawczynska and Kwiatkowska-Marks 2023).

Katı/Sıvı oranı ve zaman

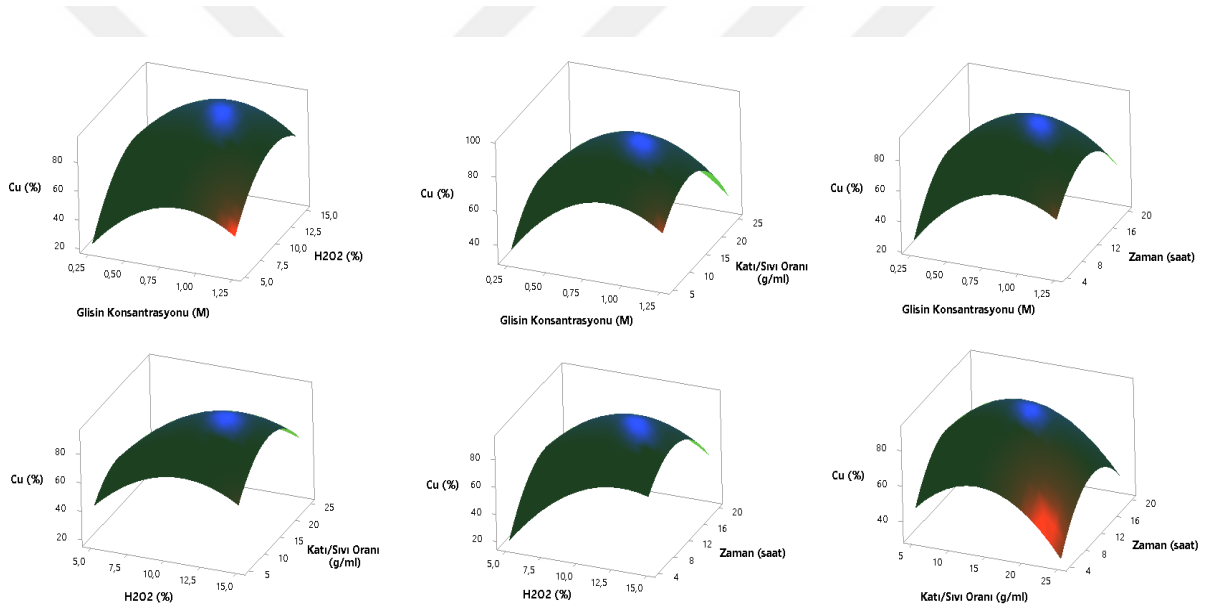
Katı/sıvı oranı bu çalışmada Cu geri kazanımı üzerinde ters etki göstermiştir; bu, daha yüksek katı konsantrasyonlarının çözünme kinetiğini sınırlayabildiğini düşündürmektedir. Bu literatürde de benzer şekilde, adsorpsiyon veya leaching çalışmalarında aşırı yüksek katı

yükünün etkin yüzey alanını efektif kullanmayı zorlaştırdığı çalışmalarla örtüşmektedir (Yasin et al. 2014).

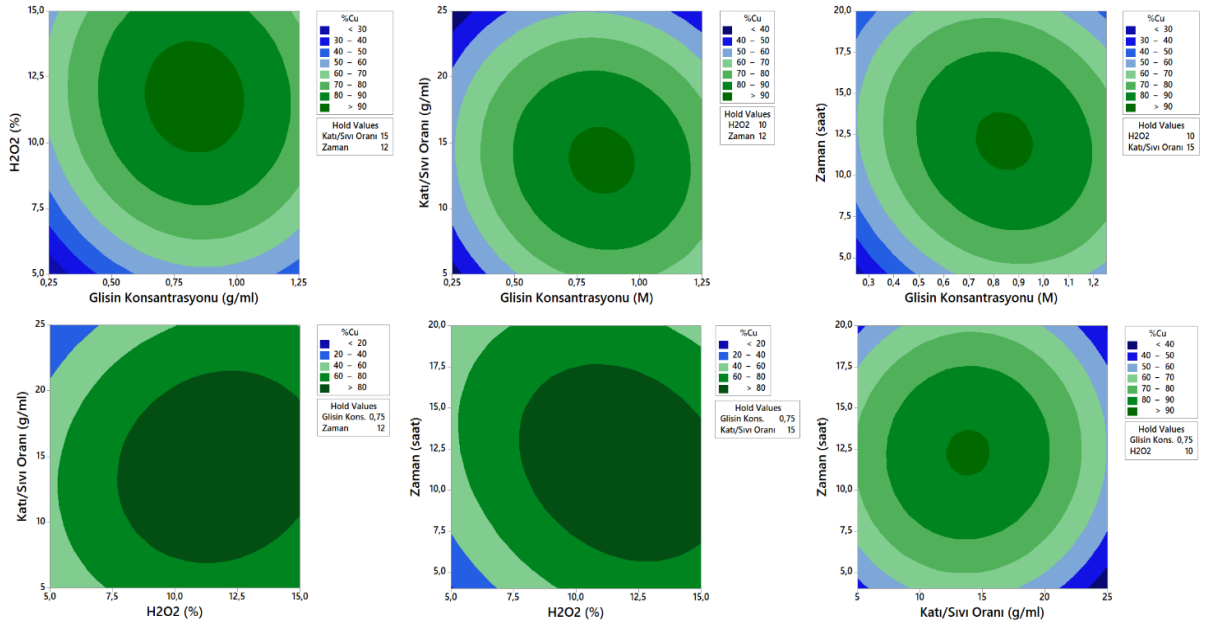
Zamanın etkisinin sınırlı olması, sistemin kinetik olarak belirli bir dengeye ulaşmasının hızlı olduğunu veya süre artırmanın verim üzerinde anlamlı bir fark yaratmadığını gösterebilir. Bu da RSM-CCD çalışmalarında sıkça gözlemlenmiş bir sonuçtur; zira bazı sistemlerde belirli bir kritik süre sonrası yanıt üzerinde anlamlı artış gözlenmeyebilir (Sasidharan and Kumar 2022).

Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri

Cu (%) için oluşturulan üç boyutlu yanıt yüzeyi grafikleri Şekil 50’de ve iki boyutlu kontur diyagramları Şekil 51’de verilmiştir.



Şekil 50. Üç boyutlu yanıt yüzeyi grafikleri



Şekil 51. İki boyutlu kontur diyagramları

Şekil 50 ve Şekil 51’de verilen grafiklerde,

- Orta seviyelerde Glisin ve H₂O₂’nin maksimum Cu çözünürlüğü sağladığını,
- Aşırı kimyasal kullanımının ise kompleksleşme veya aşırı oksidasyon nedeniyle verimi düşürdüğünü göstermektedir.

Şekil 50 ve Şekil 51’de sunulan etkileşim grafikleri incelendiğinde, glisin ve H₂O₂’nin orta seviyelerde kullanılması durumunda maksimum Cu çözünürlüğünün elde edildiği görülmektedir. Buna karşılık, her iki kimyasalın da yüksek konsantrasyonlarda kullanılması, sistemde aşırı kompleksleşme ve/veya aşırı oksidasyon gibi yan etkilere yol açarak Cu çözünürlüğünde azalmaya neden olmaktadır. Bu durum, kimyasal reaktiflerin optimum seviyelerde kullanımının Cu geri kazanım verimi açısından kritik olduğunu göstermektedir.

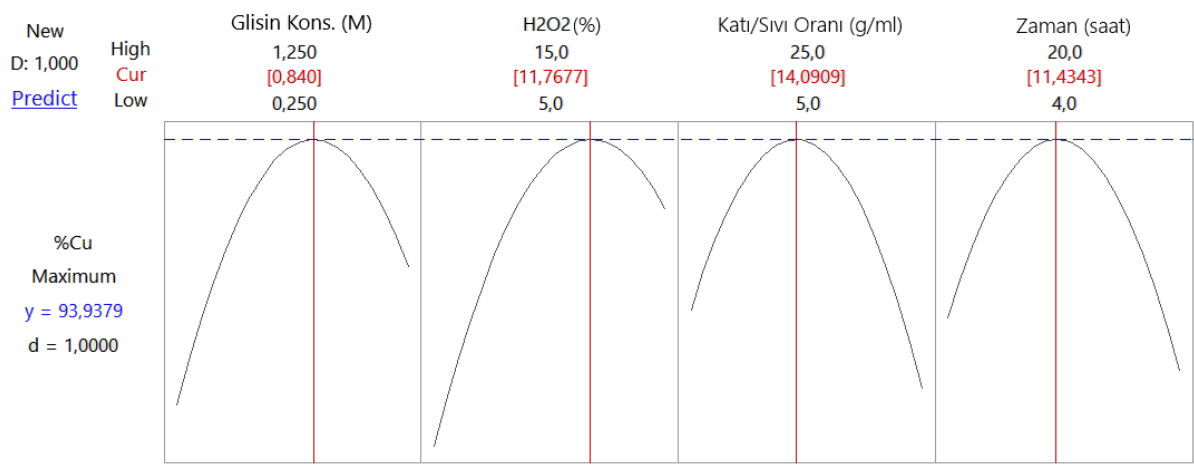
Optimizasyon Sonuçları

Cu (%) yanıtının maksimum değerine ulaşması hedeflenerek yapılan optimizasyon sonucunda yapılan çoklu optimizasyonda Tablo 39’daki koşullar belirlenmiştir:

Tablo 39. Süperkritik CO₂-Glisin ile Cu Ekstraksiyonunun Optimum Şartları

Parametre		Optimum değer
Glisin Konsantrasyonu (M)	A	0,835859
H ₂ O ₂ (%)	B	11,7677
Katı/Sıvı Oranı (g/ml)	C	14,0909
Zaman (saat)	D	11,4343

Bu koşullarda tahmini Cu geri kazanımı %93,94 olarak bulunmuştur. Bu değer deneysel maksimum değerden daha yuğektir ve modelin yuğsek tahmin gucune sahip olduğunu gostermektedir. şekil 52’de optimizasyon grafiği verilmiştir.



şekil 52. Optimizasyon grafiği

Bu alışma kapsamında, Cu geri kazanımı için RSM-CCD optimizasyonunun sadece proses değişkenlerinin etkilerini değerlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda kimyasal komplekse etkileşimlerini de analiz eden kapsamlı bir model sunduğunu gostermektedir. Çoğu literatürde bu yaklaşım daha çok adsorpsiyon veya klasik leaching sistemlerine odaklanırken, bu çalışma benzer optimizasyon yaklaşımını özellikle kimyasal oksidasyon + kompleksleşme sistemine uygulamıştır, bu açıdan özgün katkı sağlamaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, yüksek toksisiteye sahip asidik çözücüler ve çevresel açıdan olumsuz etkilere yol açabilen reaktifler kullanmadan, sürdürülebilir ve çevre dostu bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu kapsamda, çözücü sistem olarak subkritik su ve süperkritik karbondioksit (SK-CO₂) esas alınmış; süperkritik akışkan teknolojisi, biyouyumlu bir yardımcı çözücü (co-solvent) olan glisin ile desteklenmiştir. Geliştirilen proses aracılığıyla, atık baskılı devre kartlarının (ABDK) yapısında bulunan bromlu epoksi reçineler, fenolik bileşikler ve HBr gibi zararlı organik bileşenlerin etkin bir şekilde uzaklaştırılması hedeflenmiş; ardından e-atık bünyesinde yüksek oranlarda bulunan bakır (Cu) metalinin büyük ölçüde geri kazanılması amaçlanmıştır. Bu yönüyle çalışma, elektronik atıkların çevreyle uyumlu yöntemlerle değerlendirilmesine yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunarak, yeşil kimya ilkeleri doğrultusunda literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır.

Çalışmanın ilk aşamasında, basınç altında çalışan bir reaktör sisteminde, atık baskılı devre kartlarının (ABDK) yapısında bulunan ve çevresel açıdan risk oluşturan epoksi reçine esaslı organik faz, subkritik su kullanılarak etkin bir biçimde uzaklaştırılmıştır. Bu kapsamda, çevre dostu bir çözücü olarak öne çıkan subkritik su oksidasyonu (SKSO) yöntemiyle hem brom içeren bileşiklerin hem de organik matriksin giderilmesi sağlanmış; böylece metalik faz açısından önemli bir ön zenginleştirme gerçekleştirilmiştir. Uygulanan arıtım işlemi sonucunda, ABDK bünyesindeki bakır içeriğinin %26,6 seviyesinden %33,5'e yükseldiği belirlenmiş olup söz konusu artış geliştirilen ön işlem yaklaşımının metal geri kazanımı açısından etkinliğini açıkça ortaya koymuştur. Elde edilen deneysel bulgular, TG/DTA, CHNS, SEM-EDS, FT-IR, ve GC-MS analizleri ile detaylı biçimde incelenmiştir. GC-MS bulguları ile Box–Behnken deney sonuçları arasında güçlü bir uyum bulunmakta; OBV (%) artışı, kromatogramlarda gözlenen organik bileşik çeşitliliği ve pik alanlarındaki azalma ile doğrudan desteklenmektedir. Söz konusu karakterizasyon sonuçlarının tamamı geliştirilen yöntemin etkinliğini ve deneysel sonuçların doğruluğunu destekler niteliktedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, subkritik su oksidasyonu (SKSO) işlemi sonrasında oluşan katı atık fazı, glisin ile modifiye edilmiş süperkritik karbondioksit (SK-CO₂) ekstraksiyonu yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş ve bu süreç kapsamında bakır (Cu) metalinin etkin bir şekilde geri kazanımı gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgular, ICP-MS analizleri ile detaylı biçimde incelenmiştir. Belirlenen optimum işletme koşulları altında, bakır geri kazanım veriminin %93,94 gibi yüksek bir değere ulaştığı tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, elektronik atıkların geri kazanımında sürdürülebilir ve çevreyle uyumlu yaklaşımların uygulanabilirliğini ortaya koymakta olup döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda yapılacak ileri çalışmalara önemli bir referans niteliği taşımaktadır. Bu konuda literatürde de detaylı bir optimizasyon çalışması bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçların, literatürde sınırlı sayıda ele alınan proses parametrelerinin bütüncül olarak değerlendirilmesine katkı sağlayarak mevcut bilgi boşluğunu önemli ölçüde dolduracağı öngörülmektedir. Ayrıca, geliştirilen yöntem ve elde edilen optimum koşulların, laboratuvar ölçeğinden pilot ölçeğe taşınarak uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi mümkün olup bu yönüyle çalışmanın yalnızca akademik değil, aynı zamanda endüstriyel uygulamalara da temel oluşturabilecek nitelikte olduğu düşünülmektedir.



KAYNAKÇA

- (UNITAR), U.N.I.f.T.a.R., 2024. The global e-waste monitor 2024. geneva(United Nations Institute for Training and Research (UNITAR)).
- Ahmadi, M., Rahmani, K., Rahmani, A. and Rahmani, H., 2017. Removal of benzotriazole by photo-fenton like process using nano zero-valent iron: Response surface methodology with a box-behnken design. *Polish Journal of Chemical Technology*, 19(1), 104-112.
- Akcil, A., Erust, C., Gahan, C.S., Ozgun, M., Sahin, M. and Tuncuk, A., 2015. Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants—a review. *Waste Management*, 45, 258-271.
- Akcil, A., Erust, C., Gahan, C.S., Ozgun, M., Sahin, M. and Tuncuk, A.J.W.m., 2015. Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants—a review. 45, 258-271.
- Aral, S. and Beşe, A.V.J.J.o.S.M., 2024. Multi-objective optimization of the recovery of base and precious metals from waste printed circuit boards by two-stage hydrometallurgical process using taguchi-based grey relationship analysis. 10(3), 1250-1266.
- Arshadi, M., Esmaeili, A. and Yaghmaei, S., 2020. Investigating critical parameters for bioremoval of heavy metals from computer printed circuit boards using the fungus. *Hydrometallurgy*, 197.
- Arshadi, M., Nili, S. and Yaghmaei, S., 2019. Ni and cu recovery by bioleaching from the printed circuit boards of mobile phones in non-conventional medium. *Journal of Environmental Management*, 250.
- Arshadi, M., Yaghmaei, S. and Mousavi, S.M., 2018. Content evaluation of different waste pcbs to enhance basic metals recycling. *Resources Conservation and Recycling*, 139, 298-306.
- Bai, X., Wen, S.M., Liu, J. and Lin, Y.L., 2018. Response surface methodology for optimization of copper leaching from refractory flotation tailings. *Minerals*, 8(4).
- Botelho Meireles de Souza, G., Bisinotto Pereira, M., Clementino Mourão, L., Gonçalves Alonso, C., Jegatheesan, V. and Cardozo-Filho, L., 2023. Valorization of e-waste via supercritical water technology: An approach for obsolete mobile phones. *Chemosphere*, 337, 139343.
- Brandl, H., Bosshard, R. and Wegmann, M., 2001. Computer-munching microbes: Metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. *Hydrometallurgy*, 59(2-3), 319-326.
- Brown, R.M., Mirkouei, A., Reed, D. and Thompson, V., 2023. Current nature-based biological practices for rare earth elements extraction and recovery: Bioleaching and biosorption. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 173.
- Caldas, M.P.K., de Carvalho, M.A., de Moraes, V.T., Tenório, J.A.S. and Espinosa, D.C.R.J.T.e.M., *Materiais e Mineração*, 2019. Chemical and physical characterization of memory boards from obsolete computers through optical emission spectrometry and scanning electron microscopy. 16(2), 212-221.
- Calgaro, C.O., Schlemmer, D.F., da Silva, M.D.C.R., Maziero, E.V., Tanabe, E.H. and Bertuol, D.A., 2015. Fast copper extraction from printed circuit boards using supercritical carbon dioxide. *Waste Management*, 45, 289-297.

- Calvo, G., Mudd, G., Valero, A. and Valero, A.J.R., 2016. Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality? , 5(4), 36.
- Chancerel, P., Meskers, C.E., Hagelüken, C. and Rotter, V.S.J.J.o.i.e., 2009. Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. Vera Susanne %J Journal of industrial ecology, 13(5), 791-810.
- Chen, J.W., Meng, T., Leng, E.W. and Jiaqiang, E., 2022. Review on metal dissolution characteristics and harmful metals recovery from electronic wastes by supercritical water. Journal of Hazardous Materials, 424.
- Chen, K.S., Chen, H.C., Wu, C.H. and Chou, Y.M., 1999. Kinetics of thermal and oxidative decomposition of printed circuit boards. Journal of Environmental Engineering-Asce, 125(3), 277-283.
- Chen, W.F., Chen, Y.J., Shu, Y.K., He, Y.A. and Wei, J.B., 2021. Characterization of solid, liquid and gaseous products from waste printed circuit board pyrolysis. Journal of Cleaner Production, 313.
- Chen, Y., Yang, J.K., Liang, S., Hu, J.P., Hou, H.J., Liu, B.C., Xiao, K.K., Yu, W.B. and Deng, H.L., 2021. New insights into the debromination mechanism of non-metallic fractions of waste printed circuit boards via alkaline-enhanced subcritical water route. Resources Conservation and Recycling, 165.
- Chien, Y.C., Wang, H.P., Lin, K.S. and Yang, Y.W., 2000. Oxidation of printed circuit board wastes in supercritical water. Water Research, 34(17), 4279-4283.
- Cui, J. and Forssberg, E., 2003. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: A review. Journal of Hazardous materials, 99(3), 243-263.
- Cui, J.R. and Forssberg, E., 2003. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: A review. Journal of Hazardous Materials, 99(3), 243-263.
- Cui, J.R. and Zhang, L.F., 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. Journal of Hazardous Materials, 158(2-3), 228-256.
- D'Adamo, I., Ferella, F., Gastaldi, M., Maggiore, F., Rosa, P. and Terzi, S., 2019. Towards sustainable recycling processes: Wasted printed circuit boards as a source of economic opportunities. Resources Conservation and Recycling, 149, 455-467.
- Darnerud, P.O., 2003. Toxic effects of brominated flame retardants in man and in wildlife. Environment International, 29(6), 841-853.
- De Souza, G.B.M., Pereira, M.B., Mourao, L.C., Dos Santos, M.P., De Oliveira, J.A., Garde, I.A.A., Alonso, C.G., Jegatheesan, V., Cardozo-Filho, L.J.R.i.E.S. and Bio/Technology, 2022. Supercritical water technology: An emerging treatment process for contaminated wastewaters and sludge. 21(1), 75-104.
- de Wit, C.A., 2002. An overview of brominated flame retardants in the environment. Chemosphere, 46(5), 583-624.
- Eren, I. and Kaymak-Ertekin, F., 2007. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. Journal of Food Engineering, 79(1), 344-352.
- Fazari, J., Hossain, M.Z. and Charpentier, P., 2024. A review on metal extraction from waste printed circuit boards (wpcbs). Journal of Materials Science, 59(27), 12257-12284.
- Ferreira, S.L.C., Bruns, R.E., Ferreira, H.S., Matos, G.D., David, J.M., Brandao, G.C., da Silva, E.G.P., Portugal, L.A., Reis, P.S., Souza, A.S. and dos Santos, W.N.L., 2007. Box-behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. Analytica Chimica Acta, 597(2), 179-186.

- Flandinet, L., Tedjar, F., Ghetta, V. and Fouletier, J., 2012. Metals recovering from waste printed circuit boards (wpcbs) using molten salts. *Journal of Hazardous Materials*, 213-214, 485-490.
- Fogarasi, S., Imre-Lucaci, F., Egedy, A., Imre-Lucaci, Á. and Ilea, P., 2015. Eco-friendly copper recovery process from waste printed circuit boards using Fe^{3+}/Fe^{2+} redox system. *Waste Management*, 40, 136-143.
- Fontana, D., Pietrantonio, M., Pucciarmati, S., Rao, C. and Forte, F., 2019. A comprehensive characterization of end-of-life mobile phones for secondary material resources identification. *Waste Management*, 99, 22-30.
- Forti, V., Balde, C.P., Kuehr, R. and Bel, G., 2020. The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential.
- Frazzoli, C., Orisakwe, O.E., Dragone, R. and Mantovani, A., 2010. Diagnostic health risk assessment of electronic waste on the general population in developing countries' scenarios. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(6), 388-399.
- Gao, Y.-L., Ju, X.-R., Qiu, W.-F. and Jiang, H.-H., 2007. Investigation of the effects of food constituents on *Bacillus subtilis* reduction during high pressure and moderate temperature. *Food Control*, 18(10), 1250-1257.
- Glombitza, F. and Reichel, S., 2014. Metal-containing residues from industry and in the environment: Geobiotechnological urban mining. *Geobiotechnology I: Metal-Related Issues*, 141, 49-107.
- Golzary, A. and Abdoli, M.A., 2020. Recycling of copper from waste printed circuit boards by modified supercritical carbon dioxide combined with supercritical water pre-treatment. *Journal of CO2 Utilization*, 41, 101265.
- Gong, Y.M., Guo, Y., Wang, S.Z. and Song, W.H., 2016. Supercritical water oxidation of quinazoline: Effects of conversion parameters and reaction mechanism. *Water Research*, 100, 116-125.
- Goosey, M. and Kellner, R.J.C.w., 2003. Recycling technologies for the treatment of end of life printed circuit boards (pcbs). 29(3), 33-37.
- Grigorescu, R.M., Ghioca, P., Iancu, L., David, M.E., Andrei, E.R., Filipescu, M.I., Ion, R.M., Vuluga, Z., Anghel, I., Sofran, I.E., Nicolae, C.A., Gabor, A.R., Gheboianu, A. and Bucurica, I.A., 2020. Development of thermoplastic composites based on recycled polypropylene and waste printed circuit boards. *Waste Management*, 118, 391-401.
- Guo, X.J., Jin, X., Chen, Z.Y. and Zhuang, L., 2025. Low energy consumption decomposition of waste printed circuit boards using subcritical water modified with aluminum chloride. *Process Safety and Environmental Protection*, 200.
- Hagelüken, C.J.A.M.S., 2006. Recycling of electronic scrap at umicore precious metals refining. 12(2006), 111-120.
- Haghighi, H.F., Khorshidi, J., Zarei, T. and Bakhshan, Y., 2025. Silver recovery from e-waste: Optimization of hybrid supercritical water oxidation and supercritical co extraction process. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(7), 6049-6070.
- Halden, R.U.J.A.r.o.p.h., 2010. Plastics and health risks. 31(1), 179-194.
- Huang, H.L., Zhang, S.Z. and Christie, P., 2011. Plant uptake and dissipation of pbdes in the soils of electronic waste recycling sites. *Environmental Pollution*, 159(1), 238-243.

- Ilyas, S., Srivastava, R.R., Kim, H., Das, S. and Singh, V.K., 2021. Circular bioeconomy and environmental benignness through microbial recycling of e-waste: A case study on copper and gold restoration. *Waste Management*, 121, 175-185.
- Industries), I.I.o.S.R., 2019. Scrap specifications circular: Guidelines for nonferrous scrap, ferrous scrap, glass cullet, paper stock, plastic scrap. Washington, DC: pp: 80.
- Jadhao, P.R., Ahmad, E., Pant, K.K. and Nigam, K.D.P., 2020. Environmentally friendly approach for the recovery of metallic fraction from waste printed circuit boards using pyrolysis and ultrasonication. *Waste Management*, 118, 150-160.
- Jensen, W.A., 2017. Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments 4th edition. *Journal of Quality Technology*, 49(2), 186-187.
- Jha, R., Agrawal, M., Jena, A., Mishra, G., Verma, H.R., Meshram, A. and Singh, K.K., 2025. A review on existing pre-treatment techniques of waste printed circuit boards. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 64(1), 336-352.
- Kang, H.Y. and Schoenung, J.M., 2005. Electronic waste recycling: A review of us infrastructure and technology options. *Resources Conservation and Recycling*, 45(4), 368-400.
- Kang, S.Y., Yang, Y.W., Chen, J.W. and Jiaqiang, E., 2025. Supercritical water-assisted acid leaching for efficient copper recovery from waste circuit boards: Mechanisms, optimization, and sustainable metal extraction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(6).
- Kaya, M. and Sözeri, A.J.A.S.T.d.K.A.Y.v.Ç.S.S., 2007. Elektronik atık (e-atık) geri dönüşümü/kazanımı.
- Khanna, R., Saini, R., Park, M., Ellamparuthy, G., Biswal, S. and Mukherjee, P.J.W.m., 2020. Factors influencing the release of potentially toxic elements (ptes) during thermal processing of electronic waste. 105, 414-424.
- Khor, C.Y. and Abdullah, M.Z., 2012. Optimization of ic encapsulation considering fluid/structure interaction using response surface methodology. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 29, 109-122.
- Koç, B. and Kaymak-Ertekin, F.J.G., 2010. Yanıt yüzey yöntemi ve gıda İşleme uygulamaları. 35(1), 1-8.
- Köksoy, O.J.H.Ü., 2001. Taguchi ve cevap yüzeyi felsefelerinin birleştirilmesi: Problem ve çözüm teknikleri.
- Kritzer, P., 2004. Corrosion in high-temperature and supercritical water and aqueous solutions: A review. *Journal of Supercritical Fluids*, 29(1-2), 1-29.
- Kumar, V., Lee, J.-c., Jeong, J., Jha, M.K., Kim, B.-s., Singh, R.J.S. and Technology, P., 2013. Novel physical separation process for eco-friendly recycling of rare and valuable metals from end-of-life dvd-pcbs. 111, 145-154.
- Kumari, R. and Samadder, S.R., 2022. A critical review of the pre-processing and metals recovery methods from e-wastes. *Journal of Environmental Management*, 320.
- Kumari, R. and Samadder, S.R., 2025. Statistical modeling and process optimization for valorization of waste printed circuit boards using supercritical methanol. *Journal of Environmental Management*, 389.
- Kumari, R. and Samadder, S.R.J.J.o.E.M., 2025. Statistical modeling and process optimization for valorization of waste printed circuit boards using supercritical methanol. 389, 126243.

- Li, J., Lu, H., Guo, J., Xu, Z. and Zhou, K., 2007. Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards. *Yaohe %J Environmental science technology*, 41(6), 1995-2000.
- Li, J.Z., Shrivastava, P., Gao, Z. and Zhang, H.C., 2004. Printed circuit board recycling: A state-of-the-art survey. *Ieee Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 27(1), 33-42.
- Li, K. and Xu, Z.M., 2015. Application of supercritical water to decompose brominated epoxy resin and environmental friendly recovery of metals from waste memory module. *Environmental Science & Technology*, 49(3), 1761-1767.
- Li, K., Zhang, L.G. and Xu, Z.M., 2019. Decomposition behavior and mechanism of epoxy resin from waste integrated circuits under supercritical water condition. *Journal of Hazardous Materials*, 374, 356-364.
- Li, N., Lu, X. and Zhang, S., 2014. A novel reuse method for waste printed circuit boards as catalyst for wastewater bearing pyridine degradation. *Chemical Engineering Journal*, 257, 253-261.
- Liu, J., Wen, S.M., Liu, D., Lv, M.Y. and Liu, L.J., 2011. Response surface methodology for optimization of copper leaching from a low-grade flotation middling. *Minerals & Metallurgical Processing*, 28(3), 139-145.
- Liu, K. and Zhang, F.-S., 2016. Innovative leaching of cobalt and lithium from spent lithium-ion batteries and simultaneous dechlorination of polyvinyl chloride in subcritical water. *Journal of Hazardous Materials*, 316, 19-25.
- Liu, K. and Zhang, F.S., 2016. Innovative leaching of cobalt and lithium from spent lithium-ion batteries and simultaneous dechlorination of polyvinyl chloride in subcritical water. *Journal of Hazardous Materials*, 316, 19-25.
- Liu, K., Zhang, Z.Y. and Zhang, F.S., 2016. Advanced degradation of brominated epoxy resin and simultaneous transformation of glass fiber from waste printed circuit boards by improved supercritical water oxidation processes. *Waste Management*, 56, 423-430.
- Liu, Z., Zhang, B., Hu, Z. and Zhang, H., 2008. Recycling waste printed circuit board with supercritical co₂ fluid. *Environmental Science Technology*, 31(1), 83-86.
- Luling, Y., Wenzhi, H. and Guangming, L., 2015. Processes and mechanisms in hydrothermal degradation of waste electric and electronic equipment. *Reactions and mechanisms in thermal analysis of advanced materials*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA: pp: 411-435.
- Marques, A.C., Marrero, J.M.C. and Malfatti, C.D., 2013. A review of the recycling of non-metallic fractions of printed circuit boards. *Springerplus*, 2.
- Marrone, P.A., 2013. Supercritical water oxidation-current status of full-scale commercial activity for waste destruction. *Journal of Supercritical Fluids*, 79, 283-288.
- Mason, R.L., Gunst, R.F. and Hess, J.L., 2003. Statistical design and analysis of experiments: With applications to engineering and science. John Wiley & Sons,pp.
- Mir, S. and Dhawan, N., 2022. A comprehensive review on the recycling of discarded printed circuit boards for resource recovery. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106027.
- Mohadesi, M., Shokri, A.J.I.J.o.E.S. and Technology, 2019. Treatment of oil refinery wastewater by photo-fenton process using box-behnken design method: Kinetic study and energy consumption. 16(11), 7349-7356.

- Mundra, P., Desai, K. and Lele, S.J.B.T., 2007. Application of response surface methodology to cell immobilization for the production of palatinose. 98(15), 2892-2896.
- Mustafa, A. and Turner, C., 2011. Pressurized liquid extraction as a green approach in food and herbal plants extraction: A review. *Analytica Chimica Acta*, 703(1), 8-18.
- Nili, S., Arshadi, M. and Yaghmaei, S., 2022. Fungal bioleaching of e-waste utilizing molasses as the carbon source in a bubble column bioreactor. *Journal of Environmental Management*, 307.
- Niu, B., Chen, Z.Y. and Xu, Z.M., 2017. Recovery of tantalum from waste tantalum capacitors by supercritical water treatment. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(5), 4421-4428.
- Nnorom, I.C. and Osibanjo, O., 2008. Electronic waste (e-waste): Material flows and management practices in nigeria. *Waste Management*, 28(8), 1472-1479.
- Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A. and Kameya, T., 2011. A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *Waste Management*, 31(9-10), 2150-2160.
- Ogunniyi, I.O., Vermaak, M.K.G. and Groot, D.R., 2009. Chemical composition and liberation characterization of printed circuit board comminution fines for beneficiation investigations. *Waste Management*, 29(7), 2140-2146.
- Peterson, A.A., Vogel, F., Lachance, R.P., Fröling, M., Antal, M. and Tester, J.W., 2008. Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: A review of sub- and supercritical water technologies. *Energy & Environmental Science*, 1(1), 32-65.
- Preetam, A., Mishra, S., Naik, S.N., Pant, K.K. and Kumar, V., 2022. A sustainable approach for material and metal recovery from e-waste using subcritical to supercritical methanol. *Waste Management*, 145, 29-37.
- Programme, U.N.E., 2009. Recycling – from e-waste to resources. Nairobi.
- Prvan, T. and Street, D.J., 2002. An annotated bibliography of application papers using certain classes of fractional factorial and related designs. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 106(1-2), 245-269.
- Puckett, L.J., Cowdery, T.K., McMahon, P.B., Tornes, L.H. and Stoner, J.D.J.W.R.R., 2002. Using chemical, hydrologic, and age dating analysis to delineate redox processes and flow paths in the riparian zone of a glacial outwash aquifer-stream system. *Jeffrey D %J Water Resources Research*, 38(8), 9-1-9-20.
- Rao, M.D., Shahin, C. and Jha, R.J.M.T.P., 2021. Optimization of leaching of copper to enhance the recovery of gold from liberated metallic layers of wpcbs. 46, 1515-1518.
- Robinson, B.H., 2009. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment*, 408(2), 183-191.
- Sanyal, S., Ke, Q.D., Zhang, Y., Ngo, T., Carrell, J., Zhang, H.C. and Dai, L.L., 2013. Understanding and optimizing delamination/recycling of printed circuit boards using a supercritical carbon dioxide process. *Journal of Cleaner Production*, 41, 174-178.
- Sasidharan, R. and Kumar, A., 2022. Response surface methodology for optimization of heavy metal removal by magnetic biosorbent made from anaerobic sludge. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(9).
- Savage, P.E., 1999. Organic chemical reactions in supercritical water. 99.

- Scandelai, A.P.J., Cardozo, L., Martins, D.C.C., Freitas, T.K.F.D., Garcia, J.C. and Tavares, C.R.G., 2018. Combined processes of ozonation and supercritical water oxidation for landfill leachate degradation. *Waste Management*, 77, 466-476.
- Schluep, M., Hagelüken, C., Meskers, C., Magalini, F., Wang, F., Müller, E., Kuehr, R., Maurer, C. and Sonnemann, G., 2009. Market potential of innovative e-waste recycling technologies in developing countries. In *R'09 World Congress*, Davos, Switzerland.
- Sepúlveda, A., Schluep, M., Renaud, F.G., Streicher, M., Kuehr, R., Hagelüken, C. and Gerecke, A.C.J.E.i.a.r., 2010. A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: Examples from china and india. 30(1), 28-41.
- Shen, Y.F., Chen, X.M., Ge, X.L. and Chen, M.D., 2018. Thermochemical treatment of non-metallic residues from waste printed circuit board: Pyrolysis vs. Combustion. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1045-1053.
- Singh, N., Ambili, S., Pasupuleti, K.S., Kang, H.N. and Lee, J.Y., 2026. Sustainable separation of copper and nickel from spent printed circuit boards; case study: Density separation, sequential leaching, cementation, and oxidative precipitation. *Minerals Engineering*, 236.
- Skouta, R., 2009. Selective chemical reactions in supercritical carbon dioxide, water, and ionic liquids. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2(3), 121-156.
- Smith, R.L. and Behdad, S., 2025. From present to future: A review of e-waste recycling processes. *Waste Management*, 204.
- Song, Q.B. and Li, J.H., 2014. A systematic review of the human body burden of e-waste exposure in china. *Environment International*, 68, 82-93.
- Souza, G.B.M.D., Pereira, M.B., Santos, L.F.D., Alonso, C.G., Jegatheesan, V. and Cardozo, L., 2022. Management of waste printed circuit boards via supercritical water technology. *Journal of Cleaner Production*, 368.
- Stuart, B.H., 2004. *Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, pp.
- Sultana, N., Al-Amin, K., Alahi, F., Jahan, N., Ferdous, J. and Gafur, M.A., 2025. Extraction of copper from printed circuit board (pcb) in nitric and sulphuric acid media through pyrolysis and incineration. *Next Sustainability*, 6.
- Švarc-Gajić, J., Brezo-Borjan, T., Jakšić, S., Despotović, V., Finčur, N., Bognár, S., Jovanović, D. and Šojić Merkulov, D., 2024. Decomposition of organic pollutants in subcritical water under moderate conditions. In *Processes*. pp: 1293.
- Swinkels, L.J., Burisch, M., Rossberg, C.M., Oelze, M., Gutzmer, J. and Frenzel, M.J.M.E., 2021. Gold and silver deportment in sulfide ores—a case study of the freiberg epithermal ag-pb-zn district, germany. 174, 107235.
- Swinkels, L.J., Schulz-Isenbeck, J., Frenzel, M., Gutzmer, J. and Burisch, M.J.E.G., 2021. Spatial and temporal evolution of the freiberg epithermal ag-pb-zn district, germany. 116(7), 1649-1667.
- Tansel, B., 2017. From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges. *Environment International*, 98, 35-45.
- Tran, D.T., Tran, N.T.T., Pham, T.P.T. and Yun, Y.S., 2025. Process development and techno-economic feasibility of thiosulfate-based hydrometallurgical recycling for waste printed circuit boards. *Journal of Cleaner Production*, 520.

- Trawczynska, I. and Kwiatkowska-Marks, S., 2023. Application of response surface methodology for optimization of the biosorption process from copper-containing wastewater. *Molecules*, 28(1).
- Tsydenova, O. and Bengtsson, M., 2011. Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. *Waste Management*, 31(1), 45-58.
- Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E.Y. and Deveci, H., 2012. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, 25(1), 28-37.
- UE, E.J.E.U.B., Belgium, 2003. Directive 2002/96/eu of the european parliament and of the council on waste electrical and electronic equipment (weee).
- Veit, H.M., Bernardes, A.M., Ferreira, J.Z., Tenório, J.A.S. and Malfatti, C.D., 2006. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. *Journal of Hazardous Materials*, 137(3), 1704-1709.
- Verma, H.R., Singh, K.K. and Mankhand, T.R., 2017. Delamination mechanism study of large size waste printed circuit boards by using dimethylacetamide. *Waste Management*, 65, 139-146.
- Vittal, G.V., Deveswaran, R., Bharath, S., Basavaraj, B. and Madhavan, V.J.I.j.o.p.i., 2012. Formulation and characterization of ketoprofen liquisolid compacts by box-behnken design. 2(3), 150.
- Wagner, W. and Pruss, A., 2002. The iapws formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 31(2), 387-535.
- Wang, R.X., Chen, Y. and Xu, Z.M., 2015. Recycling acetic acid from polarizing film of waste liquid crystal display panels by sub/supercritical water treatments. *Environmental Science & Technology*, 49(10), 5999-6008.
- Wang, X. and Gaustad, G., 2012. Prioritizing material recovery for end-of-life printed circuit boards. *Waste Management*, 32(10), 1903-1913.
- Wang, Y.M. and Zhang, F.S., 2012. Degradation of brominated flame retardant in computer housing plastic by supercritical fluids. *Journal of Hazardous Materials*, 205, 156-163.
- Widmera, R., Oswald-Krapf, H. and Sinha-Khetriwal, D.J.v., 2005. Global perspectives on e-waste environmental impact assessment review. 25, 436-458.
- Xia, M.-C., Bao, P., Liu, A.J., Zhang, S.-S., Peng, T.-J., Shen, L., Yu, R.-L., Wu, X.-L., Li, J.-K., Liu, Y.-D., Chen, M., Qiu, G.-Z. and Zeng, W.-M., 2018. Isolation and identification of penicillium chrysogenum strain y5 and its copper extraction characterization from waste printed circuit boards. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126(1), 78-87.
- Xia, M.C., Bao, P., Liu, A.J., Wang, M.W., Shen, L., Yu, R.L., Liu, Y.D., Chen, M., Li, J.K., Wu, X.L., Qiu, G.Z. and Zeng, W.M., 2018. Bioleaching of low-grade waste printed circuit boards by mixed fungal culture and its community structure analysis. *Resources Conservation and Recycling*, 136, 267-275.
- Xiang, Y., Wu, P., Zhu, N., Zhang, T., Liu, W., Wu, J. and Li, P., 2010. Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacterial consortium enriched from acid mine drainage. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1), 812-818.
- Xing, M. and Zhang, F.-S., 2013. Degradation of brominated epoxy resin and metal recovery from waste printed circuit boards through batch sub/supercritical water treatments. *Chemical Engineering Journal*, 219, 131-136.

- Xing, M. and Zhang, F.-S.J.c.e.j., 2013. Degradation of brominated epoxy resin and metal recovery from waste printed circuit boards through batch sub/supercritical water treatments. 219, 131-136.
- Xing, M. and Zhang, F., 2014. Decomposition of brominated epoxy resins and in waste printed circuit boards by supercritical acetone. Chinese Journal of Environmental Engineering, 8(1), 317-323.
- Xing, M.F. and Zhang, F.S., 2013. Degradation of brominated epoxy resin and metal recovery from waste printed circuit boards through batch sub/supercritical water treatments. Chemical Engineering Journal, 219, 131-136.
- Xiu, F.R., Wang, J.L. and Qi, Y.Y., 2025. Selective upcycling of brominated epoxy resin by subcritical water ammonia process with waste copper-based catalyst: Production of high purity methyl pyrimidine/phenols and copper recovery. Separation and Purification Technology, 356.
- Xiu, F.R. and Zhang, F.S., 2010. Materials recovery from waste printed circuit boards by supercritical methanol. Journal of Hazardous Materials, 178(1-3), 628-634.
- Yabalak, E., Akay, S., Kayan, B., Gizir, A.M. and Yang, Y., 2023. Solubility and decomposition of organic compounds in subcritical water. In Molecules. pp: 1000.
- Yamane, L.H., de Moraes, V.T., Espinosa, D.C.R. and Tenório, J.A.S.J.W.m., 2011. Recycling of weee: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. 31(12), 2553-2558.
- Yang, X., Sun, L., Xiang, J., Hu, S. and Su, S., 2013. Pyrolysis and dehalogenation of plastics from waste electrical and electronic equipment (weee): A review. Waste Management, 33(2), 462-473.
- Yao, Y., Zhou, K., He, J., Zhu, L., Zhao, Y. and Bai, Q., 2021. Efficient recovery of valuable metals in the disposal of waste printed circuit boards via reverse flotation. Journal of Cleaner Production, 284, 124805.
- Yasin, Y., Rahman, M.N.A., Hamzah, Z. and Saat, A., 2014. Application of response surface methodology for optimization of copper removal from aqueous solution using magnesium aluminium hydrogenphosphate layered double hydroxides. Advanced Materials Research, 832, 622-627.
- Yazıcı, E., Deveci, H., Alp, I., Akcil, A. and Yazıcı, R., 2010. Characterisation of computer printed circuit boards for hazardous properties and beneficiation studies. In XXV INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS (IMPC). BRISBANE, QLD AUSTRALIA: pp: 4009-4015.
- Yazici, E.Y., Deveci, H., Yazici, R., Greenway, R. and Akcil, A., 2011. Recovery of copper from scrap tv boards by eddy current separation. In Proceedings of the 15th Conference on Environment and Mineral Processing, Part I. VSB Tech. University of Ostrava, Czech Republic. pp: 27-33.
- Yousef, S., Tatariants, M., Tichonovas, M., Bendikiene, R. and Denafas, G., 2018. Recycling of bare waste printed circuit boards as received using an organic solvent technique at a low temperature. Journal of Cleaner Production, 187, 780-788.
- Zhang, D.J., Dong, L., Li, Y.T., Wu, Y.F., Ma, Y.X. and Yang, B., 2018. Copper leaching from waste printed circuit boards using typical acidic ionic liquids recovery of e-wastes' surplus value. Waste Management, 78, 191-197.

- Zhang, G., Zhang, S., Wang, L., Liu, R., Zeng, Y., Xia, X., Liu, Y. and Luo, S., 2017. Facile synthesis of bird's nest-like TiO_2 microstructure with exposed (001) facets for photocatalytic degradation of methylene blue. *Applied Surface Science*, 391, 228-235.
- Zhang, L.G. and Xu, Z.M., 2016. A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production*, 127, 19-36.
- Zhang, S., Forssberg, E.J.R., conservation and recycling, 1997. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. 21(4), 247-269.
- Zhang, S.L., Forssberg, E., van Houwelingen, J., Rem, P. and Wei, L.Y., 2000. End-of-life electric and electronic equipment management towards the 21st century. *Waste Management & Research*, 18(1), 73-85.
- Zhao, X.Y., Xia, Y.H., Zhan, L., Xie, B., Gao, B. and Wang, J.L., 2019. Hydrothermal treatment of e-waste plastics for tertiary recycling: Product slate and decomposition mechanisms. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(1), 1464-1473.
- Zhou, L. and Xu, Z.M., 2012. Response to waste electrical and electronic equipments in china: Legislation, recycling system, and advanced integrated process. *Environmental Science & Technology*, 46(9), 4713-4724.
- Zhu, H.B., Wang, Y.L. and Liu, G.F., 2012. Study on method of recycling liquid crystal from waste lcd based on supercritical CO_2 fluid technology. *Advanced Mechanical Design*, Pts 1-3, 479-481, 2165-2170.
- Zidan, A.S., Sammour, O.A., Hammad, M.A., Megrab, N.A., Habib, M.J. and Khan, M.A., 2007. Quality by design: Understanding the formulation variables of a cyclosporine a self-nanoemulsified drug delivery systems by box-behnken design and desirability function. *International Journal of Pharmaceutics*, 332(1-2), 55-63.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Gamze GÜVEN KAYA
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Aşkale Süper Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
Subkritik Su Ekstraksiyonu İle Atık Baskılı Devre Kartlarından Bromlu Epoksi Reçinesinin Uzaklaştırılması", Erzurum 2nd International Conference On Applied Sciences, 2025, Erzurum, Türkiye (Kasım,2025)	