

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI



**ORTAK ÇÖKTÜRME YÖNTEMİ İLE FARKLI TİPTE ERBİYUM
BORAT BİLEŞİKLERİNİN SENTEZİ, KARAKTERİZASYONU VE
SİTOTOKSİSİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

ECEM ERDOĞAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Berna BÜLBÜL (Tez Danışmanı)
Dr. Öğr. Üyesi Derya BABACAN (Eş Danışman)
Prof. Dr. Halil GÜLER
Dr. Öğr. Üyesi Bihter ŞAHİN

BALIKESİR, NİSAN-2025

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Ortak Çöktürme Yöntemi ile Farklı Tipte Erbiyum Borat Bileşiklerinin Sentezi, Karakterizasyonu ve Sitotoksite Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ecem Erdoğan

ÖZET

**ORTAK ÇÖKTÜRME YÖNTEMİ İLE FARKLI TİPTE ERBIYUM BORAT
BİLEŞİKLERİNİN SENTEZİ, KARAKTERİZASYONU VE SİTOTOKSİSİTE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ECEM ERDOĞAR
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. BERNA BÜLBÜL)
(EŞ DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ DERYA BABACAN)
BALIKESİR, NİSAN - 2025**

Bu çalışma, ortak çöktürme yöntemi ile farklı tipte erbiyum borat bileşiklerinin sentezlenmesi, karakterizasyonu ve biyolojik etkilerinin incelenmesini amaçlamaktadır. Farklı boraks konsantrasyonları kullanılarak sentezlenen erbiyum borat bileşiklerinin hücresel etkileri, HUVEC (insan göbük damarı endotel hücreleri) ve MDA-MB-231 (triple negatif meme kanseri) hücre hatları üzerinde değerlendirilmiştir. Hücre kültürü deneyleri sonucunda, HUVEC hücrelerinde belirgin bir toksik etki gözlenmezken, MDA-MB-231 meme kanseri hücrelerinde hücre canlılığında belirgin bir azalma kaydedilmiştir. Özellikle 6 mmol boraks konsantrasyonunda MDA-MB-231 hücrelerinde apoptozun (programlanmış hücre ölümü) teşvik edildiği belirlenmiş, ancak bu etkinin HUVEC hücrelerinde de gözlenmesi nedeniyle spesifik bir antikanser etki olup olmadığı sorgulanmıştır. Deneysel bulgular, düşük dozlarda bile kanser hücreleri üzerinde öldürücü etkinin sürdüğünü göstermiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, sentezlenen erbiyum boratın hücre yenileyici özellik göstermediği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, reaksiyon parametrelerinin biyolojik etkiler üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ve farklı biyolojik etkinliklere sahip erbiyum borat türevlerinin elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, biyomedikal uygulamalarda kullanılabilecek yeni nesil bor içeren malzemelerin geliştirilmesi için ileri düzey araştırmaların gerekliliğini vurgulamaktadır. Çalışma kapsamında yapılan kimyasal karakterizasyon analizleri, sentezlenen bileşiklerin amorf yapıda olduğunu ve belirli koşullarda kristal yapı kazandığını göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Nanoteknoloji, erbiyum borat, biyolojik aktivite, HUVEC hücreleri, MDA-MB-231 hücreleri, biyomedikal uygulamalar.

ABSTRACT

SYNTHESES, CHARACTERIZATION, AND CYTOTOXICITY PROPERTIES INVESTIGATION OF DIFFERENT TYPES OF ERBIUM BORATE COMPOUNDS USING THE COMMON PRECIPITATION METHOD

PH.D THESIS

ECEM ERDOGAR

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CHEMISTRY

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. BERNA BULBUL)

(CO-SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. DERYA BABACAN)

BALIKESİR, APRIL - 2025

This study aims to synthesize, characterize, and investigate the biological effects of different types of erbium borate compounds using the co-precipitation method. The cellular effects of the synthesized erbium borate compounds, prepared with different borax concentrations, were evaluated on HUVEC (human umbilical vein endothelial cells) and MDA-MB-231 (triple-negative breast cancer) cell lines. Cell culture experiments revealed no significant toxic effects on HUVEC cells, whereas a noticeable decrease in cell viability was observed in MDA-MB-231 breast cancer cells. Particularly at a borax concentration of 6 mmol, apoptosis (programmed cell death) was induced in MDA-MB-231 cells. However, since this effect was also observed in HUVEC cells, its specificity for cancer cells remains questionable. Experimental findings demonstrated that the cytotoxic effect persisted even at low doses in cancer cells. Unlike previous studies in the literature, the synthesized erbium borate did not exhibit cell-regenerative properties. These results suggest that reaction parameters play a crucial role in the biological effects of erbium borate compounds, and different derivatives with distinct biological activities can be obtained. The obtained data emphasize the necessity of advanced research for developing new boron-based materials for biomedical applications. Chemical characterization analyses conducted within the study indicated that the synthesized compounds were amorphous in structure and could attain crystalline properties under certain conditions.

KEYWORDS: Nanotechnology, erbium borate, biological activity, HUVEC cells, MDA-MB-231 cells, biomedical applications.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Bor	1
1.1.1 Borun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	2
1.1.2 Borun Elementi Rezervleri.....	5
1.1.2.1 Bor'un Dünya Rezervleri	5
1.1.2.2 Bor'un Türkiye'deki Rezervleri	6
1.1.3 Bor Elementinin Kullanım Alanları	6
1.2 Boratlar	8
1.2.1 Borat Çeşitleri	9
1.2.2 Metal Boratların Sentez Yöntemleri	10
1.2.2.1 Hidrotermal/Solvotermal Sentez	10
1.2.2.2 Katı Hal Sentezi.....	10
1.2.2.3 Mikrodalga Yöntemi ile Sentez	10
1.2.2.4 Çöktürme Yöntemi ile Sentez	11
1.3 Lantanitler ve Özellikleri	12
1.3.1 Lantanitlerin Kullanım Alanları.....	13
1.4 Nanoboyutlu Bileşikler	14
1.4.1 Nanoboyutlu Nadir Toprak Boratlar	15
1.4.2 Nanomalzemelerin Üretim Yöntemleri	15
1.4.2.1 Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma Yöntemi	16
1.4.2.2 Hidrojen Redüksiyonu Yöntemi.....	16
1.4.2.3 Asal Gaz Yoğunlaştırma Yöntemi.....	16
1.4.2.4 Sol-Jel Yöntemi	16
1.4.2.5 Mikroheterojen Sistemlerden Nanopartikül Üretimi	16
1.4.2.6 Ultrasonik Sprey Piroliz Yöntemi	17
1.4.2.7 Alev Sentez Yöntemi.....	17
1.4.3 Amorf Lantanit Borat Nanoparçacıkların Biyomedikal Uygulamaları	17
1.5 Erbiyum Elementi ve Özellikleri	18
1.6 Erbiyum Borat.....	18
1.6.1 Erbiyum Borat Uygulamaları.....	19
1.6.2 Erbiyum Borat Sentez Yöntemleri	20
1.6.2.1 Katı Hal Reaksiyonları	20
1.6.2.2 Sol-Jel Yöntemi	20
1.6.2.3 Hidrotermal Yöntem	20
1.6.2.4 Kimyasal Buhar Biriktirme	21
1.6.2.5 Mikrodalga Destekli Yöntem	21

1.6.2.6 Çöktürme Yöntemi	21
1.7 Karakterizasyon Yöntemleri	21
1.7.1 Kimyasal Karakterizasyonu	21
1.7.2 Termal Karakterizasyon.....	22
1.7.3 Optik Karakterizasyon	23
1.7.4 Elektriksel Karakterizasyon	24
1.7.5 Manyetik Karakterizasyon	24
1.8 Erbiyum Boratın Sağlık Alanında Uygulamaları.....	24
2. DENEYSEL KISIM	28
2.1 Erbiyum Borat Bileşiklerinin Sentezi	28
2.2 Hücre Kültür Çalışmaları	32
2.2.1 Hücre Soyunun Seçimi, Hücre Soyunun Başlatılması ve Büyütülmesi	32
2.2.2 Büyütülen Hücrelerin Sayılması ve Toplam Canlılıklarının Belirlenmesi	33
2.2.3 Hücre Soylarının Deney Kaplarına Alınması ve Sitotoksosite (MTT) Deneyi.....	34
3. BULGULAR VE SONUÇLAR	36
3.1 Kimyasal Karakterizasyon	36
3.1.1 FT-IR Spektrum Analizi	36
3.1.1.1 Spektral Özellikler ve Piklerin Yorumu	37
3.1.1.2 Konsantrasyona Bağlı Yapısal Değişimler	38
3.2 Hücre Kültürü Deney Sonuçları	39
3.3 Genel Değerlendirme.....	42
4. KAYNAKLAR (IEEE)	44
ÖZGEÇMİŞ	47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: a)Bor, b)Bor'un kristal yapısı.	3
Şekil 1.2: Bor'un kullanım alanları.	7
Şekil 1.3: Bazı nadir toprak oksit tozları.	12
Şekil 1.4: Farklı konsantrasyonlarda sentezlenen Kurşun Borat bileşiklerinin kalsine edildikten sonraki görüntüleri.	26
Şekil 2.1: Deneysel kısım aşamaları.	28
Şekil 2.2: Kolloidal özellikteki Erbiyum Borat çözeltisi.	29
Şekil 2.3: Deney esnasında pH ölçümü.	30
Şekil 2.4: Santrifüj işlemi sonrasında süzüntü ve çökelti kısmı.	31
Şekil 2.5: Sitotoksisite için ayrılan süzüntü kısım.	32
Şekil 2.6: Ekim işlemi yapılan HUVEC hücreleri.	33
Şekil 2.7: MDA-MB-231 (meme kanseri) hücrelerinin mikroskop görüntüsü.	34
Şekil 2.8: HUVEC hücrelerinin mikroskop görüntüsü.	34
Şekil 3.1: Sentezlenen bileşikler için FT-IR ölçüm grafikleri.	37
Şekil 3.2: Farklı konsantrasyonlarda sentezlenen Erbiyum Borat bileşiklerinin HUVEC hücrelerine sitotoksisite etkisi [a)3 mmol b)6 mmol c)9 mmol d)12 mmol e)15 mmol)].	39
Şekil 3.3: Farklı konsantrasyonlarda sentezlenen Erbiyum Borat bileşiklerinin MDA-MB-231 hücrelerine sitotoksisite etkisi [a)3 mmol b)6 mmol c)9 mmol d)12 mmol e)15 mmol)].	40

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: En kararlı bor izotoplarının doğada bulunma olasılıkları.	2
Tablo 1.2: Bor elementinin fiziksel özellikleri.	3
Tablo 1.3: Bor elementinin kimyasal özellikleri.	4
Tablo 1.4: Bor elementinin atomik yapısı.	4
Tablo 1.5: Borun kristal şekilleri ve parametreleri.	4
Tablo 1.6: Dünya bor rezervlerinin dağılımı(2017).	5
Tablo 1.7: Türkiye'deki bor rezervlerinin dağılımı.	6
Tablo 1.8: Çöktürme yönteminin avantajları ve dezavantajları.	11
Tablo 1.9: Lantanit elementlerinin kullanım alanları.	14
Tablo 2.1: Farklı konsantrasyonlardaki boraks çözeltisinin ph değişimi.	29
Tablo 2.2: Farklı konsantrasyonlarda boraks kullanılarak sentezlenen bileşiklerin son pH değerleri.	30
Tablo 2.3: Çökelti ve süzüntü kısım ayrıldıktan sonra süzüntü kısım için son pH değerleri.	31

SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

Å	: Angstrom
Ar-Ge	: Araştırma geliştirme
AAS	: Atomik absorpsiyon spektroskopisi
amp-hr	: Amper-Saat
B	: Bor
B₂O₃	: Bor Oksit
Ca	: Kalsiyum
cc	: Santimetre Küp
cm	: Santimetre
COL3A1	: Tip-3 Kolajenin Alfa 1 Zinciri
CO	: Karbondioksit
CVC	: Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
DMEM	: Hücre kültürü çalışmalarında kullanılan bir besin ortamı
dk	: Dakika
DTA-TG	: Termal Gravimetrik Analiz
ErB	: Erbiyum Borat
Er₂O₃	: Erbiyum Oksit
ErB1	: 3 mmol Erbiyum Borat
ErB2	: 6 mmol Erbiyum Borat
ErB3	: 9 mmol Erbiyum Borat
ErBO₃	: Erbiyum Borat
ErCl₃	: Erbiyum Klorür
eV	: Elektrovolt
Er(NO₃)₃	: Erbiyum Nitrat
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
g	: Gram
GPa	: Gigapascal
H	: Hidrojen
H₃BO₃	: Borik Asit
HACAT	: İnsan derisinden elde edilen bir keratinosit hücre hattı
HCl	: Hidroklorik Asit
HUVEC	: İnsan Umbilikal Ven Endotelyal Hücre
IL-10	: Vücutta beyaz kan hücreleri ve diğer hücreler tarafından üretilen protein türü
K	: Kelvin
kJ	: Kilojoule
Li	: Lityum
M	: Molarite
MDA-MB-231	: Triple negatif meme kanseri
Mg	: Magnezyum
mol	: Madde Miktarı Birimi
mmol	: Bir mol'ün binde biri
mV	: Milivolt
Na	: Sodyum
nm	: Nanometre
Np	: Nanoparçacık

O	: Oksijen
PEG	: Polietilen Glikol
ppm	: Milyonda Bir
rpm	: Dakikadaki Devir Sayısı
sa	: Saat
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
T47D	: p53 Mutasyonu Taşıyan Meme Kanseri Hücreleri
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu
TGA	: Termal Gravimetrik Analiz
TGF-β3	: Dönüştürücü Büyüme Faktörü, Beta 3
UV	: Ultraviyole
VİS	: Görünür Bölge
VSM	: Titreşimli Numune Manyetometrisi
Zn	: Çinko
XPS	: X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
°C	: Santigrat (Celsius) Derece
°F	: Fahrenheit
μL	: Mikrolitre

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim, tez çalışmam, çalışma hayatım ve tanıdığım günden bugüne bana vermiş olduğu katkılardan, desteğinden, yol göstericiliğinden ve tüm yardımları için tez danışmanım Doç. Dr. Berna BÜLBÜL'e, tüm yol göstericiliği, deneysel çalışmalarım ve her türlü yardımlarından dolayı Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Susurluk Tarım ve Orman Meslek Yüksekokulu Veterinerlik Bölümü Laborant ve Veteriner Sağlık Programı Öğretim Üyesi Dr. Öğr. Üyesi Derya BABACAN'a ve üzerimde emeği geçen tüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Bu yaşıma kadar her konuda arkamda olan, eğitim-öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili annem Ayşe ALKAN ve babam Nahit ALKAN'a, bana hayatım boyunca yol göstericiliği, desteği ve bir kardeşten ötesi olan canım bildiğim abim Birkan ALKAN'a, hayatıma girdiği andan itibaren her konuda arkamda olan, yardımcı olan, beni destekleyen hayattaki en büyük şansım olan canım eşim Deniz ERDOĞAR'a çok teşekkür ederim.

Bu yüksek lisans tezimi henüz aramızda olmasa da tez yazma sürecimde hayatımıza dahil olan, içimde büyürken her anıma şahitlik eden, bu süreçteki en büyük güç kaynağım olan canım kızım Doğa ERDOĞAR'a ithaf ediyorum.

Balıkesir, 2025

Ecem Erdoğan

1. GİRİŞ

Günümüzde, biyomalzeme bilimi ve nanoteknoloji alanında yaşanan hızlı gelişmeler, yeni nesil biyomedikal uygulamaların geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Özellikle metal oksit nanoparçacıkların biyolojik sistemler üzerindeki etkileri, yara iyileşmesi gibi kritik süreçlerde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu bağlamda, erbiyum borat (ErB) bileşikleri hem kimyasal hem de biyolojik özellikleri ile dikkat çeken yenilikçi malzemeler arasında yer almaktadır. Erbiyum borat, nadir toprak elementlerinden biri olan erbiyum ile bor elementinin kimyasal birleşimi sonucu oluşan ve biyolojik sistemlerde çeşitli olumlu etkiler gösteren bir bileşiktir. Yapısal özellikleri ve yüksek reaktivitesi sayesinde, yara iyileşmesi ve doku rejenerasyonu süreçlerinde önemli bir potansiyele sahiptir. Erbiyum borat nanoparçacıkları, özellikle oksidatif stresi azaltma, hücrel proliferasyonu artırma ve anjiyogenezi destekleme gibi biyolojik süreçlerde etkili oldukları çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir. Yara iyileşmesi süreci, bir dizi karmaşık biyokimyasal ve hücrel olayın bir araya geldiği çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreçte, yaranın kapanmasını hızlandırmak ve yara izini en aza indirmek, klinik uygulamalarda en çok arzu edilen hedeflerden biridir. Ancak, geleneksel tedavi yöntemleri genellikle sınırlı etkiler sunmakta ve yara izi oluşumunu engellemede yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, erbiyum borat gibi yenilikçi malzemelerin yara iyileşmesindeki potansiyel etkilerinin araştırılması büyük önem taşımaktadır [1].

1.1 Bor

Hem endüstriyel uygulamalarda hem de biyolojik sistemlerde rol alan, ülkemiz için büyük öneme sahip elementlerin başında Bor gelmektedir. Bunun sebebi dünyada en fazla Bor rezervlerinin ülkemizde bulunmasıdır. Dünden bugüne Bor ve türevleri uzun yıllardır kullanılmaktadır. Borun kullanım geçmişine bakacak olursak ilk defa Tibette’te kullanılmıştır ve 4 bin sene öncesine kadar dayanmaktadır. Ayrıca mumyalama işleminde, kıymetli eşyaların ergitilmesinde, ilaç yapımı gibi şeylerde kullanılmıştır. İlk borik asit üretimi 1830 yılında İtalya’da, 1865 yılında da ülkemizde bir Fransız şirketine 20 senelik işletme olarak verilmiş ve böylece ülkemizde de üretimi başlamıştır. Bor dünyada yaygın olarak bulunan 51. elementtir. Doğada saf halde bulunmaz ve yaklaşık olarak 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Borun tane büyüklüğüne ve morfolojisine göre kimyasal özellikleri değişiklik göstermektedir. Buna bağlı olarak örneğin kristalin bor kolay reaksiyon vermez fakat amorf bor kolaylıkla veya bazı zamanlarda çok reaksiyona uğrayabilir [2].

Bor bitkiler için önemli bir elementtir. Bunun sebebi ise bitki hücre duvarı yapısını dış etkilerden korunmasına yardımcı olur [3]. Ayrıca bor insan vücudu için önemli bir yere sahiptir. Suda iyi çözünmesi sebebiyle, insan metabolizması için önemli elementlerden biridir. İnsan sağlığında yara önemli bir konudur. Uzun süre geçmeyen yaralar vücudun başka yerlerine sıçrama yaptığı gibi bundan daha önemli sağlık sorunları yaratabilir hatta ölüme yol açabilir [4]. Bu yaralar çok geniş bir konudur fakat cilt bütünlüğü bozulan bölgelerde tahrip olan cilt yerini skar izleri alır [5]. Bu sürecin sağlıktan sonra en düşünülen kısmı yara izleridir. Bu yara izleri psikolojik açıdan insanların önemseydiği bir konudur [4].

1.1.1 Borun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Bor, periyodik çizelgede atom numarası 5 olan, ‘‘B’’ simgesiyle gösterilen bir elementtir. Molekül ağırlığı 10,81’dir. Bir metal ile tepkimeye girerken ametal özelliği gösterip, ametal ile tepkimeye girerken bir metal özelliği göstermesi sebebiyle yarı metal sınıfındadır. Periyodik çizelgede 3A sınıfında yer alır, bu grubun en hafif elementidir. Bor elementinin elektron dizilimi $1s^2 2s^2 3s^1$ şeklindedir. Doğada genelde beyaz veya beyaza yakın bir renkte bulunur. Tarihsel geçmişe bakıldığında çok uzun yıllardır kullanılan bir element olmasına rağmen, günümüzde 400’den fazla endüstriyel alandan kullanılır ve bu kullanım alanları gün geçtikçe daha çok artmaktadır. Günümüzde 230 çeşit bor mineralinin olduğu bilinmektedir [2].

Elementel bor 5 farklı izotoptan oluşmaktadır. Bu izotoplar sırasıyla: ^8B , ^{10}B , ^{11}B , ^{12}B , ^{13}B şeklindedir. Bu izotopların en kararlı olanları ^{10}B ve ^{11}B izotoplarıdır. Doğada bulunma olasılıkları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

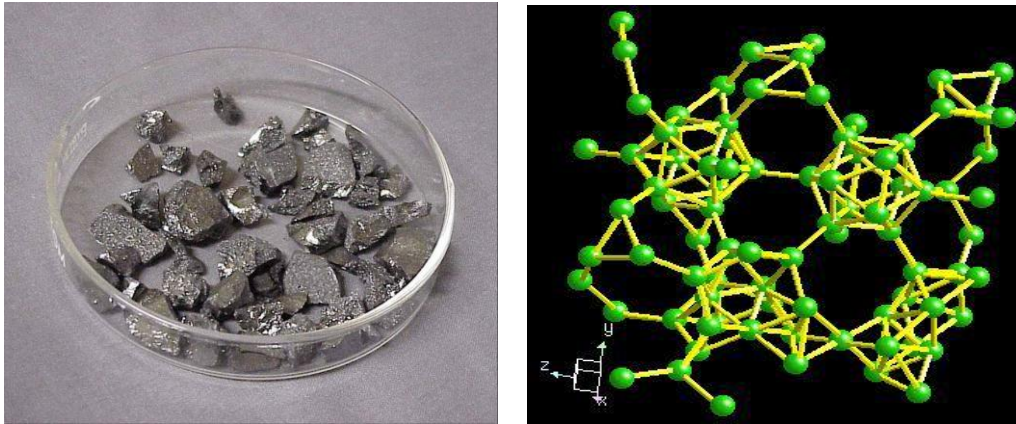
Tablo 1.1: En kararlı Bor izotoplarının doğada bulunma olasılıkları

İzotop	Doğada Bulunma Olasılığı
^{10}B	% 19,1 – 20,3
^{11}B	% 79,7 – 80,9

^{10}B izotopu, yüksek nötron tutma özelliğine sahiptir. Bu özelliği Nükleer konusunu yakında ilgilendirmektedir çünkü bu özelliği sebebiyle nükleer malzemelerde ve enerji santrallerinde kullanılabilir. Ülkemizde de ^{10}B izotopunun bulunma olasılığının yüksek olduğu bor cevher yatakları bulunmaktadır. Bu çeşitli izotopları sayesinde Bor, farklı özellikler göstererek, kullanım alanı çeşitliliğine yol açmaktadır. Hem metal hem ametal özellik gösteren bor, karbon elementi gibi elektriği iyi iletir. Kristalize bor ise elmasla büyük benzerlik gösterir. Bunun sebebi dış görünüş, optik özellikleri ve sert yapısından kaynaklanır [2].

Tablo 1.2: Bor Elementinin Fiziksel Özellikleri [2]

Fiziksel Özellikleri	
Atomik Kütle	10.811
Kaynama Noktası	4275 K – 4002°C – 7236 °F
Termal Genleşme Katsayısı	0.0000083 cm/cm/°C (0°C)
Yoğunluk	2,34 g/cc @ 300 K
Görünüş	Sarı-Kahverengi ametal kristal
Elastik Modülü	Bulk: 320/GPa
Sertlik	Mohs: 9.3
Ergime Noktası	2573 K – 2300 °C – 4172 °F



Şekil 1.1: a) Bor [6] b) Bor'un kristal yapısı [7]

Tablo 1.3: Bor Elementinin Kimyasal Özellikleri [2]

Kimyasal Özellikler	
Elektrokimyasal Eşdeğer	0,144 g/amp-hr
Elektronegativite (Pauling)	2,04
Füzyon Isısı	50,2 kJ/mol
İyonizasyon Potansiyeli	Birinci : 8.298 İkinci : 25.154 Üçüncü : 37.93
Valans Elektron Potansiyeli (-eV)	190

Tablo 1.4: Bor Elementinin Atomik Yapısı [2]

Atomik Özellikleri	
Atomik Çapı	1,17 Å
Atomik Hacmi	4,6 cm ³ / mol
Kristal Yapısı	Rombohedral
Elektron Konfigürasyonu	1s ² 2s ² 2p ¹
İyonik Çapı	0,23 Å
Elektron Sayısı (yüksüz)	5
Nötron Sayısı	6
Proton Sayısı	5
Valans Elektronları	2s ² p ¹

Tablo 1.5: Borun kristal şekilleri ve parametreleri [8]

Kristal Şekli	Kafes Parametresi (Å) a=b	Kafes Parametresi (Å)
Tetragonal	8,13	8,57
Hekzagonal	9,54	11,98

Bor doğada serbest olarak bulunmaz. Boru iki farklı yapıda elde etme imkânımız vardır. Bunlardan biri amorf bor, diğeri ise kristal yapıdaki bordur. Amorf borun yoğunluğu 2,34 gr/cm³'tür. Kristal borun yoğunluğu ise 2,33 gr/ cm³'tür. Borun kristal şekilleri tetragonal ve hegzagonal olmak üzere ikiye ayrılır (Tablo 1.5). Borun elektrik iletkenliği sıcaklığı arttıkça artar. Ergitildikten sonra soğutulduğunda sert ve kırılğan bir hal alır [8].

1.1.2 Bor Elementi Rezervleri

1.1.2.1 Bor'un Dünyadaki Rezervleri

Dünyadaki en önemli bor yatakları başta Türkiye olmak üzere, ABD ve Rusya'dadır. Bor, yeryüzünde suda, toprak ve kayalarda yaygın olarak bulunur.

Dünyadaki önemli bor rezervleri; Kuzey Amerika, Kaliforniya, Sırbistan, Güney Amerika, Arjantin, Şili, Çin, Asya ve Rusya bor yatakları olmak üzere örneklendirilebilir [9].

Tablo 1.6: Bor Rezervlerinin Dünyadaki Dağılımı (2017) [9]

ÜLKE	TOPLAM REZERV (Bin Ton B ₂ O ₃)	TOPLAM REZERV (% B ₂ O ₃)
Türkiye	948,712	73,4
Rusya	100,000	7,7
A.B.D	80,000	6,2
Şili	41,000	3,2
Çin	36,000	2,8
Peru	22,000	1,7
Sırbistan	21,000	1,6
Bolivya	19,000	1,5
Kazakistan	15,000	1,2
Arjantin	9,000	0,7
TOPLAM	1,310,000	100,0

Tablo 1.6’da 2017 yılına ait tabloda belirttiği gibi bor rezervlerinin %73.4’lük kısmı ile en çok Türkiye’de bulunmaktadır. Bu sonuç borun ülkemiz için önemini vurgulamaktadır.

1.1.2.2. Bor’un Türkiye’deki Rezervleri

Dünyadaki bor rezervlerinin %73,4’üne sahip olarak bor rezervleri en fazla Türkiye’de bulunmaktadır. Bu bor yatakları; Eskişehir – Kırka, Kütahya – Emet, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa – Kestelek’te bulunmaktadır. Türkiye rezervlerinde en çok bulunan bor mineral çeşidi Tinkal ve Kolemanit’tir. 2840 sayılı Kanun ile birlikte Türkiye’de bor ve bor ürünlerinin üretilmesi, işletilmesi ve pazarlanması faaliyetlerini gerçekleştirme görevi Eti Maden tarafından yürütülmektedir. Eti Maden tesislerinde ağırlıklı olarak Boraks Pentahidrat, Boraks Dekahidrat, Borik Asit, Etidot-67, Bor Oksit, Çinko Borat, Kalsine Tinkal, Susuz Boraks, Öğütülmüş Kolemanit ve Öğütülmüş Üleksit üretilir. Bu üretim sonucunda ithalat ve ihracatı yapılmaktadır. Bor ürünleri Türkiye’de; %36 cam, %31 seramik, %9 temizlik- deterjan, %7 tarım, %4 tutkal ve kalan %14’lük kısım ise diğer alanlarda kullanılmaktadır [10].

Tablo 1.7: Türkiye Bor Rezervlerinin Dağılımı (Mineral Bazında – 2017) [9]

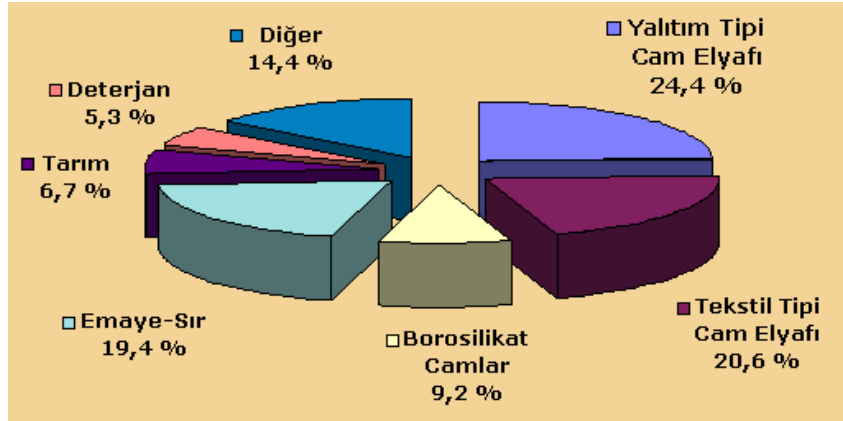
BÖLGE	CEVHER CİNSİ	TOPLAM (TON)
EMET	Kolemanit-Üleksit-Probertit	1.811.072.520
KIRKA	Tinkal	824.720.950
BİGADIÇ	Kolemanit-Üleksit	628.350.480
KESTELEK	Kolemanit	5.254.920
TOPLAM		3.269.398.870

1.1.3 Bor Elementinin Kullanım Alanları

Borun üretim yöntemleri ve kullanım alanlarına göre sınıflandırma yapılırsa:

- 1) Ham bor,
- 2) Rafine bor
- 3) Uç ürünleri

olmak üzere üçe üzere üçe ayrılır [11]. Bor mineralleri ve bileşikleri çok farklı alanlarında, farklı malzeme ve ürünlerin üretimleri için kullanılır [12]. Bor ürünleri deterjan sektörü, uzay ve havacılık, yakıtlar, askeri araçlar, metalurji, nükleer uygulamalar, tarım alanında, cam sanayi, seramik ve polimerik malzemelerde, enerji sektörü gibi 500'e yakın çalışma alanıyla geniş bir çalışma yelpazesine sahiptir [8].



Şekil 1.2: Bor'un kullanım alanları [13]

Borun başlıca kullanım alanları şunlardır:

1. Cam ve Seramik Endüstrisi: Bor, cam ve seramik üretiminde dayanıklılık ve ısıya dayanıklılık sağlamak için kullanılır. Borosilikat camlar, optik lifler, seramik sırları ve porselen boya bu alandaki örneklerdir.
2. Nükleer Sanayi: Bor, nükleer reaktörlerin kontrol çubuklarında ve atık depolama sistemlerinde kritik bir bileşendir.
3. Uzay ve Havacılık Sanayi: Roket yakıtlarında enerji verimliliği artırıcı ve ısıya dayanıklı malzemelerin üretiminde kullanılır.
4. Savunma ve Askeri Teknolojiler: Zırhlı araçlar ve askeri donanımlarda dayanıklılığı artırmak için bor türevlerinden faydalanılır.
5. Elektronik ve İletişim: Mikroçipler, fiber optik kablolar, kondansatörler ve iletişim cihazları gibi yüksek teknoloji ürünlerinde kullanılır.
6. İnşaat ve Çimento: Mukavemeti artırıcı ve izolasyon sağlayıcı özellikleri nedeniyle inşaat malzemelerinde tercih edilir.
7. Metalurji: Paslanmaz çelik, refrakterler ve döküm malzemelerinde katkı maddesi olarak kullanılır. Sürtünme ve aşınmaya dayanıklı malzemelerde yer alır.
8. Enerji Sektörü: Güneş enerjisi depolama sistemleri ve güneş panellerinde koruyucu madde olarak önemli bir rol oynar.

9. Otomotiv Sanayi: Hava yastıkları, antifriz, plastik ve metal aksamlar gibi bileşenlerde bor türevleri yer alır.
10. Tekstil: Yanmayı geciktirici, ısıya dayanıklı kumaşlar ve yalıtım malzemelerinde kullanılır.
11. İlaç ve Tıp: Antiseptikler, diş macunları gibi ürünlerde ve bazı hastalıkların tedavisinde yer alır.
12. Kimya Sanayi: Katalizörler, boyalar ve çeşitli kimyasal işlemlerde bor türevleri kullanılır.
13. Temizlik Ürünleri: Deterjan, beyazlatıcı ve parlaticı gibi ürünlerin formülasyonunda yer alır.
14. Tarım: Gübreler ve zararlı organizmalara karşı kullanılan maddelerde etkin bir bileşendir.
15. Kâğıt, Kauçuk ve Plastik: Beyazlatıcılar, naylon ve plastik malzemelerde bor türevleri kullanılır.
16. Diğer Kullanım Alanları: Fotoğrafçılık, zımpara, yapıştırıcı, spor malzemeleri, manyetik cihazlar, ahşap koruyucular ve hatta mumyalama tekniklerinde bor önemli bir yer tutar.

Bor, modern sanayinin birçok alanında vazgeçilmez bir malzemedir ve kullanım çeşitliliği sayesinde hem temel hem de ileri teknolojilerde kilit rol oynar bu sebeple bor elementinin dünya için önemi büyüktür ve en fazla rezerve sahip olan ülkemiz için ise önemi daha büyüktür. Yıllardır günümüze kadar borun çoğu endüstri alanında kullanımı olduğu gibi, üzerine çalışılmaya çok müsait bir elementtir, bu sebeple stratejik bir öneme sahiptir [14].

1.2 Boratlar

Boratlar, bor atomu ve oksijen atomunun birbirine bağlanmasıyla oluşurlar. Boratlar bu oksijen atomunu B-O şeklinde veya B-OH grupları şeklinde oluştururlar. Boratlar, bor elementinin oksijenle birleşiminden oluşan kimyasal bileşiklerdir. Endüstriyel, tarımsal ve günlük kullanım alanlarında önemli bir yer tutarlar. Boratlar genellikle doğadan elde edilen mineral formunda bulunur ve işlenerek çeşitli uygulamalar için kullanılabilir hale getirilir. Basit boratlar ve Polimerik boratlar olarak inceleyebiliriz. Basit boratlar, üç bağ yapacak olan bor atomu, üç oksijen atomu ile bağ yapar. Buna örnek H_3BO_3 verilebilir. Basit boratların yapılarında sadece trigonal BO_3^{-3} birimlerini içerir. Bu BO_3^{-3} yapı birimleri birleşerek çok çeşitli polimerik zincirler ve halka yapısı oluştururlar. Polimerik boratlar ise belirgin ve tekrarlanan polimerik

alt birimlerinden oluşur. Bu polimerik alt birimler, temel yapı blokları olarak adlandırılır. Polimerik alt birimlerden oluşan temel yapı blokları, bor atomunun 3 veya 4 koordinasyon sayısına göre sınıflandırılır [15].

1.2.1 Borat Çeşitleri

- Boraks (Sodyum Borat)

Formül: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

Kullanım Alanları: Cam ve seramik üretiminde, deterjan ve temizlik ürünlerinde bağlayıcı madde olarak, metalurjide lehimleme ajanı vb.

- Borik Asit

Formülü: H_3BO_3

Kullanım Alanları: Tarımda mantar ilacı, kozmetik ve ilaç sektöründe antiseptik, nükleer reaktörlerde nötron emici vb.

- Kalsiyum Borat (Kolemanit)

Formül: $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

Kullanım Alanları: Cam yünü üretimi, refrakter malzemelerde, gübre endüstrisinde mikro besin kaynağı vb.

- Sodyum Perborat

Formül: $\text{NaBO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Kullanım Alanları: Çamaşır deterjanlarında beyazlatıcı ajan, tekstil endüstrisinde leke çıkarıcı, su arıtma işlemlerinde oksitleyici ajan vb.

- Çinko Borat

Formül: $2 \text{ZnO} \cdot 3 \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$

Kullanım Alanları: Yangın geciktirici malzemelerde, plastik ve kauçuk ürünlerinde stabilizatör, antifungal kaplama maddesi vb.

- Magnezyum Borat

Formül: $\text{Mg}_3(\text{BO}_3)_2$

Kullanım Alanları: Isıya dayanıklı malzemelerde, plastiklerin güçlendirilmesinde, elektronik devrelerde izolasyon malzemesi vb.

- Lityum Borat

Formül: $\text{B}_4\text{Li}_2\text{O}_7$

Kullanım Alanları: Nükleer sanayide erimiş tuz reaktörlerinde, cam seramik üretimi, optik lenslerde şeffaflaştırıcı vb. [16]

1.2.2 Metal Boratların Sentez Yöntemleri

Boratların sentezleri, genellikle bor minerallerinin işlenmesi, asidik veya bazik reaksiyonlar, bazen de doğrudan bor bileşiklerinin kimyasal dönüşümüyle yapılır. Bu sentezler genellikle borik asit, bor oksit veya doğal bor mineralleri gibi ham maddelerin kimyasal reaksiyonları sonucunda oluşur. Bu sentez yöntemleri borat bileşiğinin türüne ve kullanım amacına göre şekil alır ve değişir [17].

1.2.2.1 Hidrotermal / Solvotermal Sentez

Bu malzemelerin çoğu organik yapı varlığında hidrotermal ya da yüksek sıcaklık ortamında katı hal reaksiyonu ile sentezlenir. Hidrotermal sentez yöntemi, oda koşullarında çözünmeyen malzemeleri tekrar kristallendirmek ve çözebilmek için, 100°C üzerinde bir sıcaklık, 1 atmosfer basıncı üzerindeki bir basınç ve sulu ortamda oluşan heterojen reaksiyondan oluşur. Bu hidrotermal şartlarda reaktiflere su veya iyi çözünebilir bir mineralleştirici eklenir. Be şekilde oluşan kristallendirmeyi oluşturan yüksek çözünürlükten düşük çözünürlüğe geçmesini sağlayan sıcaklık eğilimidir. Bu sentez yöntemi tek kristal bileşikleri için en uygun metottur [17].

1.2.2.2 Katı Hal Sentezi

Teknolojik olarak çok önemli bir sentez yöntemidir. Bu sentez yöntemi toz reaktifler arasında meydana gelir. Katı hal sentezi ekzotermik bir reaksiyondur. Sentez, kristal reaktifleri ve reaksiyon ürünleri arasında Gibbs Enerjisinin farkından ortaya çıkar. Bir veya her iki kristalin ısındığında bir bozunma gerçekleşir. Bu bozunma sonrasındaki etkileşim sonrasında gaz açığa çıkar ve ürün oluşur. Teknolojik önemi olan katı hal sentezinde tanecik boyutu yanı sıra yoğunluğu, gözenek ve tanecik büyüklüğünün dağılımı gibi özelliklerde büyük öneme sahiptir [17].

1.2.2.3 Mikrodalga Yöntemi ile Sentez

Çeşitli bileşiklerin kimyasal reaksiyonlarında ısıtma işlemi için kullanılan mikrodalga son yıllarda hızlı bir sentez yöntemi olduğu için kullanımını artmıştır. Fakat kötü bir tarafı vardır ki o da küçük ölçekli sentez yapılabilmesidir. Bazı durumlarda fabrikasyon boyutu yani büyük ölçekli sentezler gerekmektedir. Bu sebeple büyük ölçekli çalışma için bir eksiklik ortaya çıkmaktadır. Fakat bu geliştirilen metot sayesinde küçük ölçeklide olsa homojen bir yeni ürün elde edilir. Mikrodalğanın kullanılma sebebi, sıcaklığından faydalanmaktır. Bu sıcaklık yani ısıtma işlemi normal bir ısıtma işleminden farklıdır ve yüksek sıcaklıkta bir plazma oluşturur.

Böylelikle parçalanma ve yeniden bir araya gelme işlemi gerçekleşir. Normal ısıtma işlemi ile yapılan sentezlere göre, mikrodalga yöntemi daha çabuk ısı artışı sebebiyle daha hızlı sonuç verir. Mikrodalga, 0,3 – 300 GHz aralığındaki frekansıyla bir elektromanyetik radyasyondur. Bu sentez için kimyasal reaksiyonlarda ısınma işlemleri 28, 30, 60, 83 MHz mikrodalga frekansları kullanılmaktadır [17].

1.2.2.4 Çöktürme Yöntemi ile Sentez

Çöktürme yöntemi, boratların sentezlenmesinde sıkça kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, bir çözeltide bulunan bor bileşiklerinin, uygun bir reaktifle tepkimeye sokularak çözünmeyen bir borat formunda çöktürülmesi esasına dayanır. Bu yöntemle çeşitli borat bileşikleri, özellikle endüstriyel ve bilimsel uygulamalar için üretilir [18].

Çöktürme yönteminin temel prensiplerine dayanarak borat sentezi aşağıdaki gibi ilerler:

- 1. Reaktif Seçimi:** Çöktürme işlemi için bir bor kaynağı (örneğin, borik asit veya sodyum borat) ve bir çöktürücü reaktif (örneğin, kalsiyum, magnezyum veya çinko tuzları) seçilir.
- 2. Reaksiyon Ortamının Ayarlanması:** pH, sıcaklık ve çözeltinin konsantrasyonu kontrol edilir. Örneğin, borik asit çöktürme sırasında genellikle bazik bir ortam gerektirir.
- 3. Çöktürme İşlemi:** Seçilen çöktürücü ile bor kaynağı karıştırılır ve borat iyonları çözünmeyen bir bileşik oluşturacak şekilde tepkimeye girer.
- 4. Çökelti Ayırma ve Saflaştırma:** Oluşan borat çökeltileri filtrelenir, yıkanır ve kurutulur. Gerekirse ek saflaştırma işlemleri uygulanır [19-23].

Bu yöntemin avantajları ve dezavantajları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 1.8: Çöktürme Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları [19-23]

AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
Yüksek saflıkta borat bileşikleri elde edilebilir.	Çöktürme reaksiyonu sırasında optimum pH ve sıcaklık koşullarının sağlanması gereklidir.
Düşük maliyetli ve ölçeklenebilir bir yöntemdir.	Yan ürünlerin oluşumu ek saflaştırma gerektirebilir.
Çevre dostu kimyasal süreçler için uygundur.	

Çöktürme yöntemi sayesinde boratlar düşük maliyetli olarak sentezlenir. Özellikle endüstriyel uygulamaları ele alırsak, bu yöntem hem ekonomik hem de çevresel olarak sürdürülebilir bir sentez yöntemi diyebiliriz.

1.3 Lantanitler ve Özellikleri

Lantanitler, periyodik tablonun 3B grubu ve 6. periyodunda yer alan 15 elementten oluşan bir dizi elementtir. Bu elementler, kimyasal olarak nadir toprak elementleri olarak bilinir ve genellikle optik, manyetik ve elektronik cihazlarda kullanılırlar. Lantanitler, 57'den 71'e kadar atom numarasına sahip olan elementlerdir [24]. Lantanit elementleri aynı zamanda nadir toprak elementleri olarak bilinir. Bunun sebebi bu elementlerin çok bulunmamalarıdır. Bu elementler genellikle kayalarda, cevherlerde, mineral oksitler ve florürlerinde bulunur [25].



Şekil 1.3: Bazı Nadir Toprak Oksit Tozları [26]

Lantanit elementleri ve atom numaraları aşağıda verilmiştir.

1. **Lantan (La)**- Atom numarası: 57
2. **Seryum (Ce)**- Atom numarası: 58
3. **Prasedmiyum (Pr)**- Atom numarası: 59
4. **Neodimyum (Nd)**- Atom numarası: 60
5. **Prometyum (Pm)**- Atom numarası: 61 (doğada nadiren bulunur)
6. **Samaryum (Sm)**- Atom numarası: 62
7. **Evropiyum (Eu)**- Atom numarası: 63

8. **Gadolinium (Gd)**- Atom numarası: 64
9. **Terbiyum (Tb)**- Atom numarası: 65
10. **Disprosyum (Dy)**- Atom numarası: 66
11. **Holmiyum (Ho)**- Atom numarası: 67
12. **Erbium (Er)**- Atom numarası: 68
13. **Tulyum (Tm)**- Atom numarası: 69
14. **İterbiyum (Yb)**- Atom numarası: 70
15. **Lutesyum (Lu)**- Atom numarası: 71 [26]

1.3.1 Lantanitlerin Kullanım Alanları

Lantanitler, teknolojik gelişmelerin önemli bir parçası olarak, modern endüstride önemli bir yer tutar. Lantanitler, benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle teknoloji, tıp, enerji, çevre ve savunma gibi birçok alanda kritik öneme sahiptir. Özellikle temiz enerji, ileri teknoloji ve sağlık sektörlerinde lantanitlerle alakalı çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bu kullanım alanları ile alakalı örnekler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 1.9: Lantanit elementlerinin kullanım alanları [26]

Atom No	Element Adı	Sembolü	Kullanım Alanları
57	Lantan	La	Kamera lensleri, pil elektrotlar vb.
58	Seryum	Ce	Petrol rafineleri için akışkan katalitik çatlama katalizörü
59	Prasedmiyum	Pr	Mıknatıslar, lazerler, karbon ark aydınlatma
60	Neodimyum	Nd	Mıknatıslar, lazerler, seramik kapasitörler
61	Prometyum	Pm	Nükleer piller
62	Samaryum	Sm	Mıknatıslar, lazerler, nötron yakalama
63	Evropiyum	Eu	Forfor, lazerler, NMR rahatlama üniteleri
64	Gadolinyum	Gd	Bilgisayar hafızaları, mıknatıslar, lazerler
65	Terbiyum	Tb	Fosfor, lazerler, floresan lambalar
66	Disprosyum	Dy	Mıknatıslar, lazerler
67	Holmiyum	Ho	Lazerler
68	Erbiyum	Er	Lazerler, vanadyum çelik
69	Tulyum	Tm	Portatif X-ray makina
70	İterbiyum	Yb	Kızılötesi lazer, kimyasal indirgenler
71	Lutesyum	Lu	PET tarama dedektörleri, yüksek kırılma endeksli camlar

1.4 Nanoboyutlu Bileşikler

Nanoboyutlu bileşikler, atomlar veya moleküllerin belirli düzenlemelerle bir araya gelerek nano ölçekte yapı oluşturduğu bileşiklerdir. Bu bileşikler, organik, inorganik veya hibrit yapıdaki malzemelerden oluşabilir ve nanoteknolojinin temelini oluşturur. Genelde yüksek yüzey-hacim oranına, üstün mekanik dayanıklılığa, özgün optik ve elektriksel özelliklere sahiptir. Nanoboyutlu bileşikler, boyutları genellikle 1 ila 100 nanometre arasında değişen malzemelerdir. Bu boyutlarda, malzemelerin kimyasal, fiziksel ve biyolojik özellikleri, daha büyük ölçekteki özelliklerinden önemli ölçüde farklıdır. Özellikle yüzey alanının artması, yüzey enerjisindeki değişimler ve kuantum boyut etkileri, nanomalzemelerin benzersiz özelliklerini ortaya çıkarır. Nanomalzemelerin küçüklüğü nedeniyle yüzey alanları çok büyüktür. Bu, katalizörler gibi uygulamalarda yüksek reaktivite sağlar. Özellikle yarı iletken nanokristallerde, enerji seviyeleri nano boyutlarda kuantum etkilerine bağlı olarak değişir. Bu,

malzemelere özgün optik ve elektronik özellikler kazandırır. Nanomalzemeler küresel, çubuk, yaprak, tüp gibi farklı şekillerde olabilir. Şekil ve boyut, özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Nanomalzemeler, ışık ile farklı şekillerde etkileşime girer. Örneğin, altın nanoparçacıklar, boyutlarına bağlı olarak farklı renklerde görünebilir. Yarı iletken nanokristaller, elektronik devrelerde kullanılacak mükemmel iletkenlerdir. Demir oksit gibi manyetik nanoparçacıklar, biyomedikal görüntüleme ve hedefli ilaç taşımacılığında kullanılabilir. Nanoboyutta sentezlenen bileşikler ilaç taşıyıcı sistemler, kanser tedavileri, biyosensörler, güneş panelleri, yüksek verimli bataryalar, yakıt hücreleri, kirlilik kontrolü, su arıtma teknolojileri, mikroişlemciler, hafıza cihazları, sensörler gibi geniş çalışma sebebiyle araştırmacılar için önemli bir yere sahiptir [4,27].

1.4.1 Nanoboyutlu Nadir Toprak Boratlar

Nanoboyutlu nadir toprak boratlar, nadir toprak elementleri (Lantanit grubu elementleri) ile bor içerikli bileşiklerin oluşturduğu, boyutları nanometre mertebesinde olan malzemelerdir. Bu bileşikler, nanoteknolojinin ilerlemesiyle özellikle dikkat çekmektedir, çünkü fiziksel, kimyasal ve optik özellikleri, boyutları küçüldükçe farklılaşabilir ve bu durum onları özel uygulamalar için cazip hale getirir. Nadir toprak boratlar genelde kimyasal olarak kararlı ve dayanıklıdır. Yüksek şeffaflık, ışık Emilimi ve yayılımı gibi üstün optik özellikler sergilerler. Lantanit iyonlarının karakteristik emisyonları sayesinde, özellikle floresan ve fotoluminesans uygulamalarında tercih edilirler. Yüksek sıcaklıklarda stabil kalma eğilimindedirler. Bazı nadir toprak elementleri nedeniyle benzersiz manyetik ve elektriksel davranışlar gösterebilirler. Nadir toprak elementlerini nanoboyutta sentezlemek, nanomalzemelerde yüzey-hacim oranının artmasıyla reaktivite artmasına sebep olur, bu da onları katalizörler ve sensörler için daha uygun olmasını sağlar. Ayrıca boyut küçüldükçe kuantum etkileri belirgin hale gelerek malzemenin optik, elektronik ve mekanik özelliklerini değiştirmesine sebep olur. Bu gibi özellikler nadir toprak elementlerini nanoboyutta sentezlemenin avantajlarından [28].

1.4.2 Nano Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Boyutları 100 nanometrenin (nm) altında olan partiküller nanopartikül olarak adlandırılır. Hacimsel yapı malzemelerden çok daha farklı ve daha nicelikli malzemeler olarak özellik gösterirler. Hacimsel yapı malzemelere göre daha fazla özelliğe sahip bu nanopartiküllerin, kullanım alanı daha geniştir bunun sebebi ise daha uygulanabilir ve kullanılabilir özellikte olmalarıdır [28].

Nano yapıdaki ürünler hacimsel yapıları ürünlerle karşılaştırıldığında daha sağlam, daha kaliteli, daha uzun ömürlü, daha ucuz, daha küçük ve daha hafif olmalarıdır. Bu sebeple birçok çalışma alanına fayda sağlamaktadır [27].

1.4.2.1 Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma Yöntemi

Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma (CVC) yüksek miktarlarda nanopartikül üretimi için güzel bir yöntemdir. Bu yöntemde başlangıç için buhar fazına kolay geçebilen bileşikler kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak klorürler, hidrürler, karboniller verilebilir. Bu çeşitli başlangıç malzemesi kullanımı ticari açıdan çeşitliliğe açıktır ve bu sebeple kolay temin edilebilir olmasıdır. Bu yöntemde gaz fazındaki malzemenin ısı olarak parçalanma işlemi ile ürünün nanopartiküle dönüşmesi işlemidir [27].

1.4.2.2 Hidrojen Redüksiyonu Yöntemi

Metal oksitler hidrojen gazı ile indirgenir. Bu yöntem genellikle metal nanopartiküller üretmek için kullanılır ve yüksek saflıkta ürün elde edilmesini sağlar. Ancak, reaktif gazların kullanımı nedeniyle dikkatli işlem gerektirir [27].

1.4.2.3 Asal Gaz Yoğunlaştırma Yöntemi

Metaller asal gaz atmosferinde buharlaştırılır ve bu buhar, düşük sıcaklıkta yoğunlaştırılarak nanopartiküller oluşturulur. Yöntem, özellikle metal nanopartiküllerin üretiminde yaygındır [27].

1.4.2.4 Sol-Jel Yöntemi

Bu kimyasal yöntem, metal alkoksitlerin veya metal tuzlarının sıvı ortamda hidroliz ve polimerizasyon reaksiyonlarıyla bir jelleşme sürecinden geçirilmesini içerir. Jelin kurutulmasıyla nanopartiküller oluşturulur. Sol-jel yöntemi, nanopartikül morfolojisinin hassas kontrolünü sağlar [27].

1.4.2.5 Mikroheterojen Sistemlerden Nanopartikül Üretimi

Mikroemülsiyonlar veya ters misel sistemlerinde yapılan reaksiyonlarla partiküllerin boyut ve morfolojisi kontrol edilir. Bu yöntemde partiküller, kontrollü bir ortamda büyüyerek istenilen boyut ve şekle getirilir [27].

1.4.2.6 Ultrasonik Sprey Piroliz Yöntemi

Çözeltiler ultrasonik dalgalarla atomize edilerek mikro damlacıklar haline getirilir. Daha sonra bu damlacıklar yüksek sıcaklıkta piroliz işlemine tabi tutulur. Bu yöntem, homojen boyut dağılımı sağlar [27].

1.4.2.7 Alev Sentezi Yöntemi

Metal tuzlarının veya çözeltilerinin bir alev içinde buharlaştırılması ve ardından hızlı bir şekilde soğutulmasıyla nanopartiküller elde edilir. Özellikle oksit nanopartiküller üretiminde yaygındır [29].

1.4.2 Amorf Lantanit Borat Nanoparçacıkların Biyomedikal Uygulamaları

Nanoteknoloji, son yıllarda bilim ve mühendislik alanında büyük ilerlemeler kaydederek, biyomedikal ve optoelektronik uygulamalarda yenilikçi çözümler sunmaktadır. Özellikle amorf yapıya sahip nanomateryaller, benzersiz özellikleri ve geniş uygulama potansiyelleri nedeniyle yoğun bir şekilde araştırılmaktadır.

Nanoparçacıkların sentezi sırasında kullanılan PEG, biyouyumlu özellikleri sayesinde bu malzemelerin biyomedikal uygulamalarda güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Bu özellik, biyomedikal alanlarda, özellikle hücre hedefleme, ilaç taşıma ve yara iyileştirme gibi hassas uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Yapılan çalışmalarda optik ve manyetik analizler, nanoparçacıkların geniş bir bant aralığına (örneğin, 5.3 eV) ve güçlü paramanyetik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Bu özellikler, amorf nanoparçacıkların sadece biyomedikal görüntüleme ve biyobelirleme için değil, aynı zamanda optoelektronik cihazlar ve radyasyon koruma gibi teknolojik uygulamalar için de umut vaat ettiğini göstermektedir. Özellikle erbiyum borat nanoparçacıkları (ErB-Np), yara iyileşmesinde epitelizasyonu artırma, neovaskülarizasyonu destekleme ve oksidatif stresi azaltma gibi etkiler sergileyerek iz bırakmayan yara iyileşmesi için bu nanoparçacıkların önemini öne çıkarmıştır. Gen ekspresyon analizleri yapıldığında, fibromodulin, COL3A1 ve TGF- β 3 gibi yara iyileşmesini destekleyen genlerin yukarı regüle edildiği, inflamatuvar genlerin ise baskılandığı çalışmalarda kanıtlanmıştır. Kurşun borat nanoparçacıkları (LB-Np) ise kanser tedavisi alanında çığır açıcı bir potansiyele sahiptir. Yapılan araştırmalar, bu nanoparçacıkların P53 mutasyonu taşıyan meme kanseri hücrelerinde (T47D) seçici sitotoksik etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Sağlıklı hücrelere zarar vermeden mutasyona uğramış hücreleri hedef alan bu materyaller, özellikle apoptotik sinyalleme tetikleyen genlerin (örneğin, BAX ve CASP3) ifade

düzeylerini artırarak etkili bir terapötik ajan olarak dikkat çekmektedir. Sonuç olarak, amorf lantanit borat ve kurşun metaborat nanoparçacıkları, düşük maliyetli ve basit sentez yöntemleriyle üretilen, çok yönlü özelliklere sahip yenilikçi materyallerdir. Biyomedikal uygulamalardan optoelektronığe kadar geniş bir yelpazede kullanım potansiyeli taşıyan bu nanoparçacıklar, modern bilim ve teknolojiye önemli katkılar sunmaktadır. Bu makale, bu tür nanomateryallerin sentez yöntemlerinden uygulama alanlarına kadar olan süreci detaylandırarak, gelecekteki çalışmalar için bir yol haritası sunmayı amaçlamaktadır [1,30,31].

1.5 Erbiyum Elementi ve Özellikleri

Erbium (Er) elementi, periyodik tabloda lantanit (nadir toprak) serisinde yer alır ve atom numarası 68'dir. Bu element, özellikle kimyasal, optik, biyomedikal ve manyetik alanlardaki çeşitli uygulamalarda kullanılır. Erbiyum paramanyetik bir elementtir ve manyetik alan uygulandığında geçici olarak mıknatıslanabilir. Yüksek manyetik duyarlılığı ile manyetik rezonans görüntüleme gibi biyomedikal uygulamalar için önemli bir elementtir. Erbiyum elementinin bazı kimyasal özellikleri şöyle sıralanabilir:

- Erbiyum, lantanit ailesinin bir üyesidir ve tipik olarak +3 oksidasyon durumunda bulunur.
- Hafif reaktif bir elementtir, hava ile temas ettiğinde oksitlenerek ince bir oksit tabakası oluşturur.
- Yüksek sıcaklıklarda su ile reaksiyona girer ve hidrojen gazı açığa çıkarır.

Erbium elementinin fiziksel özellikleri ise şöyle sıralanabilir:

- Parlak gümüş bir renge sahiptir
- Yoğunluğu yaklaşık $9,066 \text{ g/cm}^3$ 'tür ve ağır bir metaldir.
- Erime noktası $1529 \text{ }^\circ\text{C}$, kaynama noktası ise $2868 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir [30].

1.6 Erbiyum Borat

Erbium Borat, ErBO_3 kimyasal formülüyle lantanit elementlerinden biri olan erbiyum, bor ve oksijen elementinden meydana gelen bir bileşiktir. Genellikle triklinik ya da ortorombik kristal yapıya sahiptir. Erbiyum borat kristal yapısı, yüksek termal kararlılığı ve optik saflığı ile dikkat çeker. Biyomedikal uygulamalarda, hücre hedefleme, ilaç taşıma ve biyogörüntüleme alanlarda kullanımı vardır. Yüksek termal stabilite, ultraviyole ışık geçirgenliği ve optik özellikleri sayesinde hem tıbbi hem malzeme biliminde önemli bir bileşiktir [30].

1.6.1 Erbiyum Borat Uygulamaları

Erbiyum boratın uygulama alanları oldukça geniştir ve hem tıbbi olarak hem de endüstriyel kullanımlar için uygulanabilir ve geliştirilebilir özelliklere sahiptir. Biyomedikal uygulamalar, optik ve lazer uygulamaları, endüstriyel uygulamalar ve manyetik uygulamalar olarak beş alt başlıklarda inceleyebiliriz [30].

✓ **Biyomedikal Uygulamalar**

Erbiyum Borat nanoparçacıkları, özellikle biyomedikal alanlarda çok çeşitli uygulamalara sahiptir. Bunlar:

- **Hedefli İlaç Taşıma:** Pozitif yüklü zeta potansiyeli (+41 mV), nanoparçacıkların kararlı bir şekilde çözünmesini ve biyomoleküllerle etkileşimlerini kolaylaştırır. Bu özellikler, özellikle hücre hedefleme ve ilaç taşıma sistemlerinde etkili bir kullanım sağlar.
- **Biyogörüntüleme:** Erbiyum iyonlarının yüksek optik özellikleri, biyolojik doku etiketleme ve görüntüleme için idealdir.
- **Yara İyileştirme:** Erbiyum borat nanoparçacıklarının hücre yenilenmesini desteklediği ve yara iyileşmesini hızlandırdığına dair bulgular bulunmaktadır [30].

✓ **Optik ve Lazer Uygulamaları**

Erbiyum boratın sahip olduğu optik özelliği sayesinde uygulama alanında kullanılabilirliği aşağıda örnek olarak verilmiştir.

- **Lazer Sistemleri:** Özellikle 2940 nm dalga boyundaki emisyonuyla, dermatoloji ve diş hekimliği gibi alanlarda kullanılan lazer cihazlarında tercih edilir.
- **Flüoresan Materyal:** Yüksek flüoresans verimi, çeşitli görüntüleme cihazlarında ve göstergelerde kullanılmasını sağlar [30].

✓ **Endüstriyel Uygulamalar**

- **Katalizörler:** Stabil koloidal çözeltileri sayesinde, endüstriyel kimyasal reaksiyonlarda katalizör olarak kullanılabilir.
- **Film Oluşturma:** Nanoparçacıkların düzgün ve homojen dağılımı, ince film malzemelerinin üretiminde avantaj sağlar.
- **Plazma Ekran Panelleri:** Vakum ultraviyole ışınlarını emme özellikleri, plazma ekran panelleri ve diğer görüntüleme teknolojilerinde kullanımını mümkün kılar [30].

✓ Manyetik Uygulamalar

- Paramanyetik Özellikler: Nanoparçacıkların manyetik özellikleri, manyetik rezonans görüntüleme kontrast ajanı olarak kullanılmalarını sağlar. Erbiyum borat nanoparçacıkları, özellikle biyomedikal cihazlarda manyetik algılama ve yönlendirme için uygundur [30].

1.6.2 Erbiyum Borat Sentez Yöntemleri

Erbiyum boratın sentez yöntemleri, istenilen malzemenin saflığı, boyutu ve kristal yapısının özelliklerine göre seçilmelidir. Erbiyum boratın sentez yöntemleri genellikle katı hal reaksiyonları, sol-gel yöntemi ve hidrotermal sentez gibi sentez yöntemleri ile sentezlenir. Örneğin, optik uygulamalar için sol-gel yöntemi daha iyi olabilirken, büyük miktarda malzeme üretimi için katı hal reaksiyonu tercih edilebilir.

1.6.2.1 Katı Hal Reaksiyonları

Bu yöntem, en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Bu reaksiyonlarda proste ilk olarak Erbiyum Oksit (Er_2O_3) ve Bor Oksit (B_2O_3) veya Borik Asit (H_3BO_3) gibi başlangıç malzemeleri seçilir ve uygun oranlarda karıştırılır. Karışım, genellikle bir öğütücü yardımıyla homojen hale getirilir. Bu elde edilen homojen karışım yüksek sıcaklıklarda ($800\text{ }^{\circ}C - 1200\text{ }^{\circ}C$ arasında) bir fırında kalsine edilir. Reaksiyon sonrası oluşan ürün, saflaştırılır ve karakterize edilir. Bu yöntemin uygulaması kolaydır çok fazla ekipman gerektirmez ve büyük ölçekli üretimler için uygun bir sentez yöntemidir [32].

1.6.2.2 Sol-Jel Yöntemi

Bu yöntemde Erbiyum Nitrat ($(ErNO_3)_3$) veya Erbiyum Klorür ($ErCl_3$) gibi çözülebilir tuzlar, bor kaynakları (Örneğin Borik Asit), alkol ve diğer organik çözücüler gerekir. Proste Erbiyum ve bor tuzları çözeltide karıştırılır. Sol karışım, kontrollü şekilde jelleştirilir. Bu jel kurutulur ve ardından düşük sıcaklıklarda ($500-800\text{ }^{\circ}C$ gibi) kalsine edilir. Bu prosesin uygulanabilir olma sebebi düşük sıcaklıklarda nano boyutta parçacık sentezlenebilir. Uzun işlem süresi ve çözücü kullanımı bu yöntemin bir dezavantajıdır [33].

1.6.2.3 Hidrotermal Yöntem

Bu yöntemde Erbiyum tuzları ((örneğin $Er(NO_3)_3$) ve bor bileşikleri belirli bir pH'ta su bazlı bir çözeltide hazırlanır. Bu hazırlanan çözelti, $120 - 150\text{ }^{\circ}C$ sıcaklık ve basınç altında

hidrotermal bir reaktörde oluşturulur. Ürün çökeltilir, yıkama işlemi yapılır ve kurutulur. Bu sentez yönteminde üretim miktarı sınırlıdır [34].

1.6.2.4 Kimyasal Buhar Biriktirme

İnce Erbiyum Borat filmleri üretmek amacıyla kullanılabilen bir yöntemdir. Bu yöntemde Erbiyum ve bor içeren gazlar kullanılır. Yüksek sıcaklıkta bir substrat yüzeyinde biriktirilir [35].

1.6.2.5 Mikrodalga Destekli Yöntem

Mikrodalga deney yöntemlerinde daha hızlı reaksiyon oluşturmak için sık kullanılan bir yöntemdir [34].

1.6.2.6 Çöktürme Yöntemi

Çöktürme yönteminin kullanıldığı bir çalışma, amorf ve nanoboyutlu ve pozitif yüklü erbiyum borat ($\text{ErBO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) nanopartiküllerinin üretimi, karakterizasyonu ve potansiyel biyomedikal uygulamaları üzerine odaklanmaktadır. Çalışmada, polietilen glikol (PEG) varlığında pH 9.2’de bir borik asit/sodyum hidroksit tampon çözeltisi kullanılarak tek aşamalı bir çöktürme yöntemi ile nanopartiküller sentezlenmiştir [30].

1.7 Karakterizasyon Yöntemleri

Metal borat bileşiklerinin karakterizasyonu, genellikle kimyasal, yapısal, termal, optik ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesini içerir. Aşağıda bu karakterizasyon için kullanılan başlıca yöntemler sıralanmıştır:

1.7.1 Kimyasal Karakterizasyon

➤ X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)

Bir maddenin yüzey kimyasını ve elektronik yapısını incelemek için kullanılan analitik bir tekniktir. XPS, malzeme yüzeyinden yayılan fotoelektronları analiz ederek elementel bileşimi, kimyasal durumları ve elektronik yapıyı belirler. XPS, yüzeye düşük enerjili X-ışınları göndererek çalışır. Bu X-ışınları, maddenin atomlarında bulunan elektronlara enerji verir ve bu elektronların yüzeyden serbest kalmasına neden olur. Bu elektronlara fotoelektronlar denir. Fotoelektronların enerjileri, gönderilen X-ışını enerjisi ile atomun iç yapısına bağlıdır.

➤ **Fourier Dönüşümlü Infrared Spektroskopisi (FTIR)**

Bir maddenin kimyasal bileşimini ve moleküler yapısını analiz etmek için kullanılan bir spektroskopi tekniğidir. Bu teknik, maddenin infrared (kızılötesi) ışığı soğurma veya iletme davranışını ölçerek moleküler düzeyde bilgi sağlar. FTIR spektroskopisi, Fourier dönüşümünü kullanarak geniş bir kızılötesi ışık spektrumundan alınan verileri analiz eder. Karakterizasyon işleminde ışık kaynağında geniş bir dalga boyu aralığında kızılötesi ışık üretilir. Bu ışık, analiz edilecek örnekten geçirilir veya örnek yüzeyine yansıtılır. Moleküller, belirli dalga boylarındaki enerjiyi soğurur. Her molekül türü, kendine özgü bir titreşim frekansına sahiptir, bu nedenle her biri farklı dalga boylarında ışığı emer. Bir interferometre yardımıyla girişim deseni oluşturulur. Bu desen, ışığın örnek tarafından nasıl etkilendiğini gösterir. Girişim deseni matematiksel olarak analiz edilerek frekans bileşenlerine ayrılır ve bir spektrum elde edilir.

➤ **Raman Spektroskopisi**

Raman spektroskopisi, moleküllerin kimyasal yapısı ve özellikleri hakkında bilgi sağlamak için kullanılan bir spektroskopi yöntemidir. Bu yöntem, bir örneğin lazer ışığı ile uyarılması sonucu saçılan ışığın dalga boyundaki değişimleri analiz ederek moleküler titreşim, döndürme ve diğer düşük frekans modları hakkında bilgi verir.

➤ **Atomik Absorpsiyon Spektroskopisi (AAS)**

Bir numunedeki metal ve yarı metal elementlerin konsantrasyonlarını ölçmek için kullanılan analitik bir tekniktir. Bu yöntem, atomların belirli dalga boylarındaki ışığı soğurma özelliklerine dayanır. AAS, özellikle çevre analizleri, metalurji, gıda güvenliği, biyokimya ve ilaç sanayi gibi alanlarda kullanılır. Bu yöntemde numunedeki elementler atom haline getirilir. Bu genellikle bir alev (alevli AAS) veya bir grafit fırın (grafit fırınlı AAS) kullanılarak yapılır. Her element, kendine özgü bir dalga boyunda ışık soğurur. Bu nedenle, analiz edilen elemente özgü bir ışık kaynağı (hollow katot lambası) kullanılır. Atomize edilmiş elementler, belirli dalga boyundaki ışığı soğurur. Soğurulan ışık miktarı, o elementin konsantrasyonuna doğrudan orantılıdır. Soğurma verisi, dedektörler aracılığıyla ölçülür ve bir bilgisayar yardımıyla analiz edilir.

1.7.2 Termal Karakterizasyon

➤ **Termal Gravimetrik Analiz (TGA)**

Bir malzemenin kütlesinin sıcaklık veya zamanla nasıl değiştiğini ölçen bir termal analiz yöntemidir. Bu teknik, genellikle malzeme özelliklerini, termal stabiliteyi, bozunma davranışını

ve malzeme bileşimini incelemek için kullanılır. TGA cihazı, bir numuneyi hassas bir teraziye yerleştirir ve kontrollü bir atmosferde (örneğin, azot, argon veya hava) ısıtır. Cihaz, ısıtma sırasında numunenin kütle kaybını veya kazancını sürekli olarak kaydeder. Bu ölçümler, malzemenin termal özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlar. TGA ile maddenin şu özellikleri incelenir:

- Malzemenin yüksek sıcaklıklarda kimyasal veya fiziksel bozulmaya karşı direnci.
- Malzemenin hangi sıcaklıkta parçalanmaya başladığı.
- Organik, inorganik ve nem içerikleri arasındaki ayrımlar.
- Malzemenin oksijenle nasıl reaksiyona girdiği.
- Malzemenin içindeki su veya diğer uçucu maddelerin miktarı.

➤ **Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)**

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC), bir malzemenin fiziksel ve kimyasal değişimlerini ısı akışına bağlı olarak incelemek için kullanılan bir termal analiz tekniğidir. Bu teknik, bir numunenin sıcaklığını kontrollü bir şekilde artırırken veya azaltırken meydana gelen ısı akış farklarını ölçer. DSC, malzemelerin termal özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılır. DSC cihazı, bir referans ve bir numune haznesine sahiptir. İncelenmek istenen malzeme yerleştirilir. Genellikle boş veya inert bir malzeme içerir. Bu iki hazne, aynı sıcaklık programına tabi tutulur. Sıcaklık değişimlerine bağlı olarak, numunenin termal davranışındaki ısı akışı farkları (örneğin, ekzotermik veya endotermik olaylar) ölçülür. DSC ile amorf veya yarı kristal malzemelerde görülen bir geçiş sıcaklığı, malzemenin kristal fazdan sıvı faza geçtiği sıcaklığı, malzemenin bozunma veya kimyasal değişim sıcaklıkları ve kimyasal reaksiyonlarda açığa çıkan veya soğurulan ısı miktarı ölçülür.

1.7.3 Optik Karakterizasyon

➤ **UV-Vis Spektroskopisi**

Erbiyum Boratın optik bant aralığını ve absorpsiyon özelliklerini analiz etmek için kullanılır.

➤ **Fotoluminesans (PL) Spektroskopisi**

Malzemenin ışık yayma özelliklerini belirler. Erbiyumun nadir toprak elementi olması sebebiyle malzemenin ışık yayan özellikleri önemlidir.

1.7.4 Elektriksel Karakterizasyon

➤ İletkenlik ve Dielektrik Ölçümleri

Malzemenin elektriksel özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Bu, genellikle AC veya DC iletkenlik ölçümleriyle yapılır. İletkenlik ölçümleri, malzemenin elektrik akımını iletme kapasitesini belirler. Dielektrik ölçümleri ise malzemenin yalıtkanlık ve polarizasyon özelliklerini analiz eder. Her iki ölçüm de elektrik ve elektronik sistemlerin tasarımı, güvenilirliği ve performansı açısından kritik önem taşır.

1.7.5 Manyetik Karakterizasyon

➤ Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM)

Bir malzemenin manyetik özelliklerini ölçmek için kullanılan bir cihazdır. VSM, bir numunenin manyetik momentini, numunenin bir manyetik alan içerisindeyken titreştirilmesi sırasında oluşan indüklenen elektrik sinyalini ölçerek belirler. Numune, güçlü bir elektromıknatıs tarafından oluşturulan sabit veya değişken bir manyetik alan içine yerleştirilir. Numune, genellikle piezoelektrik bir titreşim mekanizması ile, sinüzoidal bir hareketle titreştirilir. Numunenin manyetik momenti, titreşim hareketi sırasında çevresinde değişen bir manyetik alan oluşturur. Bu değişim, numunenin yakınında bulunan algılama bobinlerinde bir elektrik sinyali indükler. Algılanan sinyal, numunenin manyetik momenti ile doğru orantılıdır. Bu sinyal, elektronik bir veri toplama sistemi ile kaydedilir ve analiz edilir [17,30].

1.8 Erbiyum Boratın Sağlık Alanında Uygulamaları

Erbiyum borat bileşiğinin biyolojik uygulamaları ile ilgili yapılan çalışmada, erbiyum borat nanopartiküllerinin (ErB-Np) yara iyileşme süreci ve özellikle izsiz yara kapanmasındaki etkilerini araştırmaktadır. ErB-Np, PEG varlığında basit bir tampon çöktürme yöntemiyle sentezlenmiş ve ortalama 101.2 nm boyutunda, yüksek yüzey yükü (+41.9 mV) sayesinde stabilite göstermiştir. Hücre proliferasyonu, antioksidan özellikler, anjiyogenez ve yara kapanma süreçleri üzerindeki etkileri insan keratinositleri (HACAT) ve endotelial hücreler (HUVEC) kullanılarak incelenmiştir. Nanopartiküller, ROS seviyelerini düşürerek antioksidan aktivite göstermiş, hücre proliferasyonunu artırmış ve en düşük etkili dozda sitotoksositeye neden olmamıştır. Çizik testi ve RT-PCR analizleri, nanopartiküllerin yara kapanma hızını iki kat artırdığını ve izsiz yara iyileşmesiyle ilişkili genlerden TGF- β 3, fibromodulin, COL3A1 ve IL-10'un ekspresyon seviyelerini anlamlı derecede yükselttiğini göstermiştir. Ayrıca, anjiyogenez değerlendirmelerinde damar oluşumunda tüp sayısı ve toplam tüp uzunluğunda 2.5 kat artış gözlenmiştir. Bu bulgular, ErB-Np'nin yara iyileşme ve izsiz kapanma için umut verici





bir biyomalzeme olduğunu ortaya koymakta ve bu etkinin arkasındaki moleküler mekanizmaların daha fazla araştırılması gerektiğini vurgulamaktadır [1].

Yukarıdaki tüm bilgiler ışığında ve ilgili literatürün tümü ile incelendiğinde, daha önceki metal borat sentezlerinde (Lantanit Serisi Elementleri ve Kurşun) çöktürme yöntemi uygulandığı görülmektedir [36]. Bu çöktürme yönteminin basamakları incelendiğinde aşağıdaki gibi bir sıralama olduğu belirlendi.

- Metal nitratin sulu çözeltisinin hazırlanması.
- PEG-2000'in sulu çözeltisinin hazırlanması.
- 1:1.5 oranında metal nitrat ve PEG-2000 çözeltisinin karıştırılması.
- Aynı bir yerde 2:1 oranında borik asit ve sodyum hidroksit kullanılarak boraks çözeltisinin hazırlanması.
- Metal borat- PEG-2000 çözeltisi ile borat çözeltisinin karıştırılması ve sütümsü karışımın elde edilmesi.
- Elde edilen sütümsü karışımın santrifüj tekniği ile çöktürülüp yıkanması ve koloidal çözeltisinin hazırlanması.

Kullanılan yöntemde boraks çözeltisi elde etmek amacıyla ortama eklenen borik asit ve sodyum hidroksit konsantrasyonunun gerekenden fazla olduğu ve belirli bir süre sonra ortamda boraks çöktüğü tespit edildi. Bu nedenle ortamda boraks kaynağı olarak borik asit ve sodyum hidroksit kullanmak yerine direkt olarak boraks kullanımının daha sağlıklı olacağı düşünüldü. Daha sonra belirli bir metal seçilerek farklı borat konsantrasyonlarıyla metal boratlar çöktürüldü. Burada seçilen metal kurşundu. Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan kurşun borat çözeltileri karakterizasyon için belirli sıcaklıklarda kalsinasyona tabi tutuldu. Boraks konsantrasyonu değişikçe 600 derecede 3 saat süre ile kalsine edilen ürünlerin niteliğinde de farklılıklar ortaya çıktı. Bu sonuç bize boraks konsantrasyonu değişikçe farklı tiplerde kurşun boratların oluşabileceğini düşündürdü.

Aşağıdaki tabloda farklı konsantrasyonlarda elde edilen kurşun boratların görselleri bulunmaktadır.

Kullanılan boraks konsantrasyonu	Ürün görseli	Kullanılan boraks konsantrasyonu	Ürün görseli
0.021 Molar		0.038 Molar	
0.027 Molar		0.062 Molar	

Şekil 1.4: Farklı konsantrasyonlarda sentezlenen Kurşun Borat bileşiklerinin kalsine edildikten sonraki görüntüleri

Literatürde yara iyileştirme veya hücre yenilenmesi amacıyla sentezlenen amorf ve nano-boyutlu Erbiyum boratın elde edilmesinde kullanılan boraks çözeltisi önceki yöntem kullanılarak hazırlandı. Bu metoda göre erbiyum borat eldesi aşağıdaki işlem basamakları kullanılarak gerçekleştirildi:

- Erbiyum nitrat belirli bir miktar su içinde çözüldü.
- PEG-2000 belirli bir miktar su içinde çözüldü.
- Bu iki çözelti birbiriyle yarım saat süreyle karıştırıldı.
- Aynı bir yerde 2:1 oranında borik asit ve sodyum hidroksit maddeleri kullanılarak borat konsantrasyonu 0.225 Molar olacak şekilde borat çözeltisi hazırlandı.
- Borat çözeltisi ile metal nitrat – PEG-2000 çözeltisi 2000 rpm de yarım saat süre ile mekanik karıştırıcıda karıştırıldı. Elde edilen sütümsü bol su ile yıkandı. Elde edilen Erbiyum borat çözeltisinin su ortamındaki yüzey yükü ($+41.9 \pm 8.8$ mV) olarak belirlendi. Bu sonuç yüksek yüzey yüküne sahip amorf ve nanoyapılı metal boratın 1 ay süreyle su ortamında çökmeden kalabileceğini gösterdi.

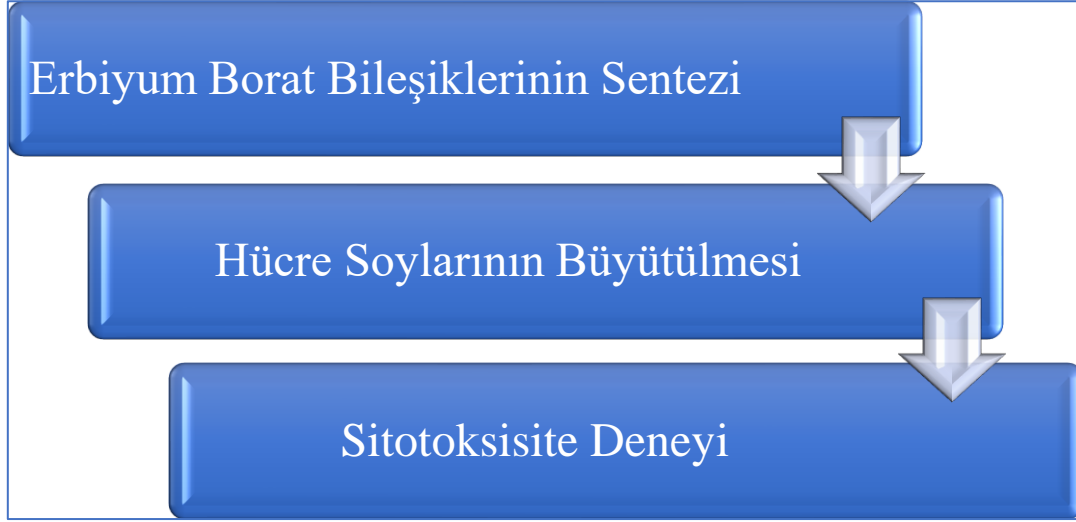
Boraksın 20 derecede 100 mL deki sudaki çözünürlüğü 4.94 gramdır. Bu değer 0.1295 Molar değerine karşılık gelmektedir. Ancak yöntem sırasında borik asit ve sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen çözeltideki boraks konsantrasyonu 0.225 Molar düzeyindedir. Bu yoğun konsantrasyon nedeniyle ortamda boraks çözeltisi hazırlanırken bir çökme olduğu

düşünülmektedir. Ayrıca yara iyileştirme veya hücre yenileyici erbiyum boratın önceki sentezinde ortamda yüzey aktif madde olarak PEG-2000 kullanıldı. Bu sentez yöntemi ile elde edilen amorf ve nano-boyutlu erbiyum boratın yüzeyi PEG-2000 molekülleriyle kaplıdır. Çıplak halde hiçbir yüzey aktif madde kullanılmadan sentezlenen erbiyum borat bileşiğinin yara iyileştirme veya hücre yenileme özelliği hakkında literatürde herhangi bir bilgi bulunmamaktadır.

Önceki teknikte ortaya çıkan boraks çözeltisindeki çökme sorunu ve kurşun boratın yeni yöntemle sentezinden elde edilen deneysel sonuçlardaki gözlemler nedeniyle yöntemde birtakım iyileştirmeler yapıldı. Maksimum çözünürlük sınırına kadar farklı konsantrasyonlarda boraks çözeltileri hazırlandı ve ardından erbiyum nitrat konsantrasyonu sabit tutularak farklı erbiyum borat bileşikleri sentezlendi. Güncellenmiş yöntemle elde edilen amorf ve nanoyapıya sahip erbiyum borat bileşiğinin kolloidal çözeltileri hazırlandı. Ardından farklı boraks konsantrasyonu kullanılarak hazırlanan erbiyum borat kolloidal çözeltilerinin yara iyileştirici veya hücre yenileyici özelliği belirlemek amacıyla HUVEC hücrelerinde çeşitli testler yapıldı. Daha sonra yüzey aktif madde içermeyen farklı boraks konsantrasyonlarında erbiyum borat kolloidal çözeltileri hazırlanarak meme kanseri (MDA-MB-231) hücrelerinde testler yenilendi.

2. DENEYSEL KISIM

Deneysel kısımda öncelikle farklı konsantrasyonlarda Erbiyum Borat bileşikler üretilmiştir. Aynı esnada hangi hücrelerde sitotoksosite inceleneceğine karar verilip, bu karar sonucunda bu hücre soyları büyütülmeye başlatılmıştır. Büyüyen bu hücrelere, farklı konsantrasyonlarda Erbiyum Borat bileşikler uygulanmıştır. Bu uygulama sonunda hücreler 24 saat, 48 saat, 72 saat sonlarında mikroskop altında sayım yapılarak Total Hücre Sayısı hesaplanmıştır.



Şekil 2.1: Deneysel Kısım Aşamaları

2.1 Erbiyum Borat Bileşiklerinin Sentezi

Tez çalışmasında kullanılan ve incelenmek istenen farklı konsantrasyonlardaki Erbiyum Borat bileşikler, Erbiyum iyonlarının farklı konsantrasyonlarda boraks çözeltileri ile birleştirilerek, kimyasal çöktürme prosesiyle sentezlenmiştir. Bu proses ısı gerektirmeyen, oda koşullarında gerçekleştirilen bir yöntemdir.

- ✓ Öncelikle beş farklı beherde beşi de aynı konsantrasyona sahip erbiyum nitrat çözeltileri hazırlanmıştır.
- ✓ Sonrasında beş farklı beherde beş farklı konsantrasyona sahip Boraks çözeltileri hazırlanmıştır.
- ✓ Hazırlanan boraks çözeltilerinin konsantrasyon değerleri aşağıdaki tabloda sırasıyla verilmiştir.

Tablo 2.1: Farklı konsantrasyonlardaki Boraks çözeltisinin pH değışimi

Boraks Konsantrasyonu	pH
0.025 M	9.28
0.050 M	9.32
0.075 M	9.37
0.1 M	9.50
0.125 M	9.56

- ✓ Konsantrasyon değeri sabit tutulan Erbiyum çözeltileri ile farklı konsantrasyonlara sahip boraks çözeltileri birbiri ile karıştırılmıştır. Sütümsü renkli kolloidal özellikteki Erbiyum Borat bileşikleri elde edilmiştir.



Şekil 2.2: Kolloidal özellikteki Erbiyum Borat çözeltisi

- ✓ Elde edilen kolloidal çözeltilere ait son pH değerleri aşağıdaki tabloda sırası ile verilmiştir.

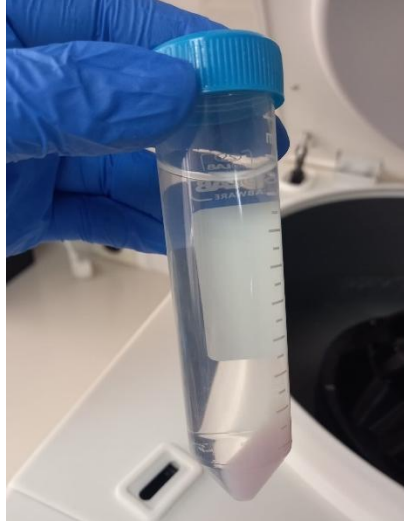
Tablo 2.2: Farklı konsantrasyonlarda boraks kullanılarak sentezlenen Erbiyum Borat bileşiklerinin son pH değerleri

Kolloidal Çözeltiler	Son pH değerleri
3 mmol	6.84
6 mmol	8.12
9 mmol	9.16
12 mmol	9.25
15 mmol	9.29



Şekil 2.3: Deney esnasında pH ölçümü

- ✓ Elde edilen sütümsü renkteki kolloidal çözeltiler santrifüj tüpüne alınıp 7000 rpm hızında 10 dakika santrifüjlenmiştir ve süzüntü kısmı dökülmüştür.

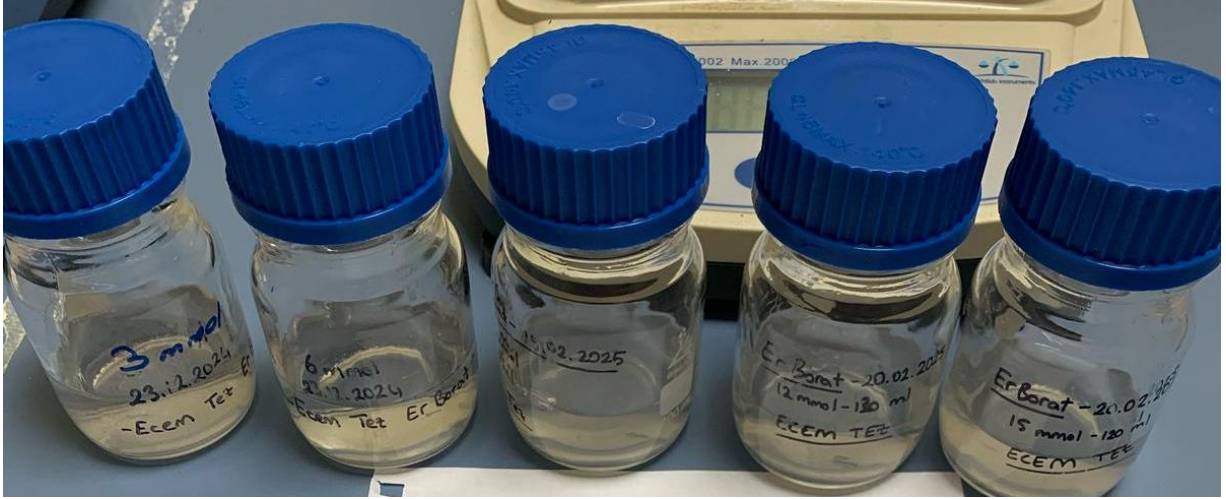


Şekil 2.4: Santrifüj işlemi sonrasında süzöntü ve çökelti kısmı

- ✓ 3 mmol için 2 defa, 6 mmol için 4 defa, 9 mmol için 5 defa, 12 mmol için 5 defa, 15 mmol için 5 defa çökelti kısmı saf su ile yıkanıp, vortekslendikten sonra her seferinde 7000 rpm hızında 10 dakika yıkama işlemleri yapılmıştır. Bu yıkama işlemleri sonrasında süzöntü kısmı toplanmıştır. Elde edilen 5 farklı kolloidal çözelti hücre kültürü çalışmalarında kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Yıkama işlemi sonunda süzöntüden kalan çökelek kısmı ise 70°C sıcaklıkta iki gün kurumaya bırakılmıştır. Bu kuru kısım FTIR ölçümleri için kullanılmıştır.

Tablo 2.3: Çökelti ve süzöntü kısım ayrıldıktan sonra süzöntü kısım için son pH değerleri

Kolloidal Çözeltiler	pH değerleri
3 mmol	8.76
6 mmol	8.55
9 mmol	8.00
12 mmol	8.24
15 mmol	8.16

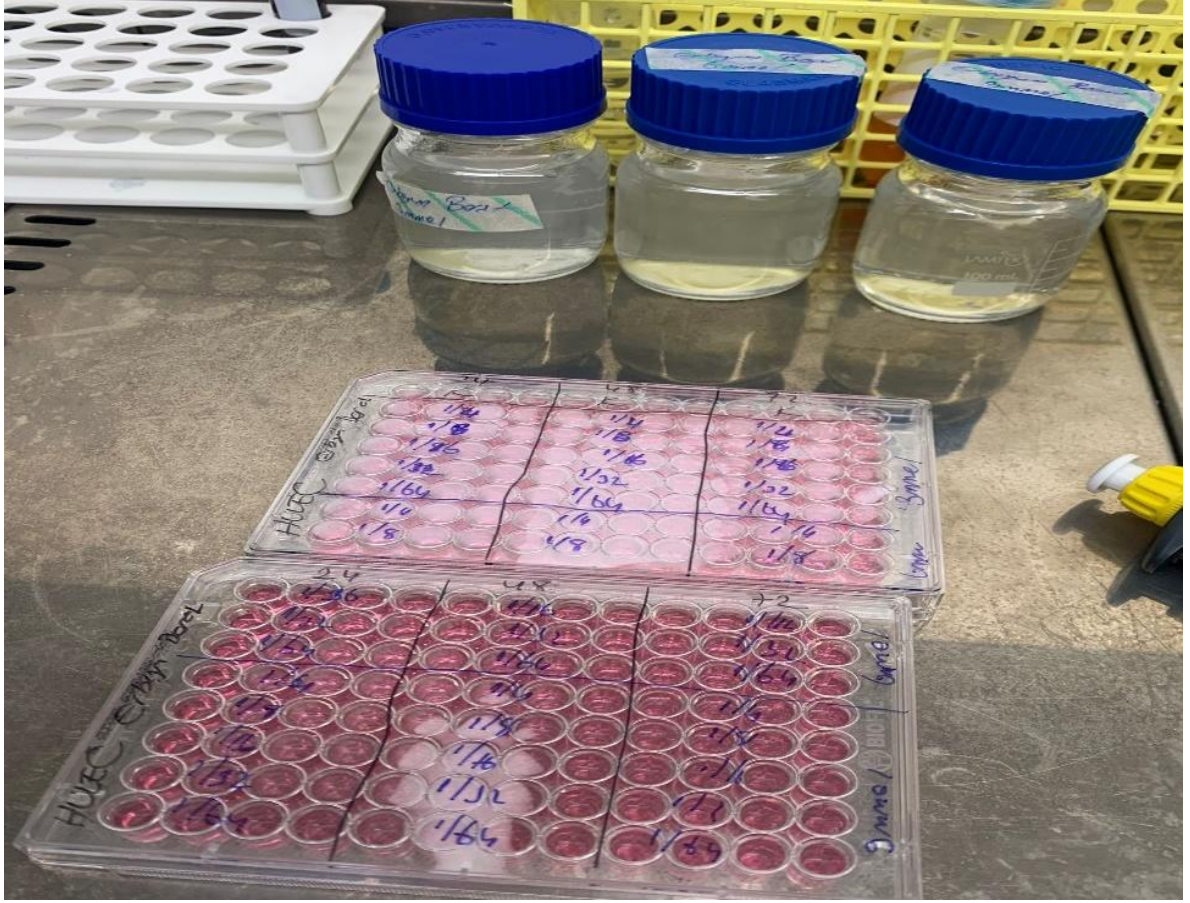


Şekil 2.5: Sitotoksosite için ayrılan süzöntü kısım

2.2 Hücre Kültür Çalışmaları

2.2.1 Hücre Soyunun Seçimi, Hücre Soyunun Başlatılması ve Büyütülmesi

Hücre kültürü çalışmalarında meme kanser modeli olan MDA-MB-231 ve insan göbek damarı endotel hücresi HUVEC hücreleri kullanılmıştır. Sıvı azotta donuk halde saklanan hücre hatları büyütölmek üzere su banyosunda (37⁰C) hızlıca çözöndürölerek taze hazırlanan ve içindeki FCS oranı %10 olan DMEM’de süspanse hale getirilmiştir. İstenmeyen içeriklerinden arındırılmak için 1500 rpm’de 5 dakika santrifüj edilerek hücre büyütme petrisine yayılmıştır. Son hacim 12 mL olacak şekilde son konsantrasyonu %10 FCS içerecek şekilde hazırlanan DMEM içerisinde ve 37⁰C, %5 CO₂ içeren inkübatörde büyütölmeye bırakılmıştır. Hücreler istenen yoğunluğa gelene kadar haftada 2 defa pasajlanmıştır. Pasajlama işleminde hücreleri yüzeyden kaldırmak için Tripsin-EDTA, tripsinizasyonu durdurmak için ise %10 FCS’li DMEM kullanılmıştır.

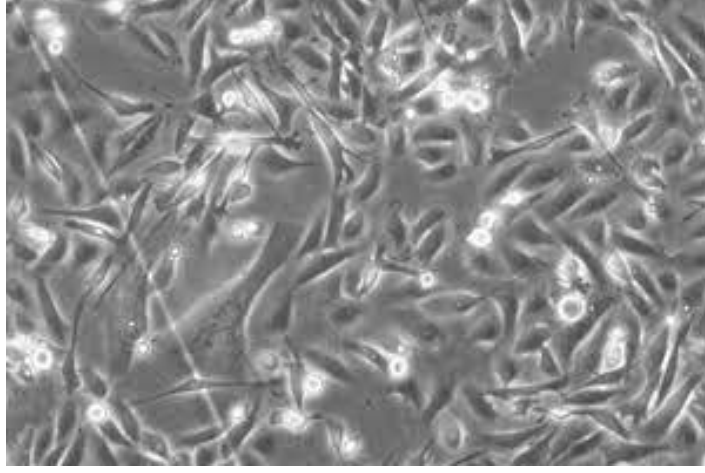


Şekil 2.6: Ekim işlemi yapılan HUVEC hücreleri

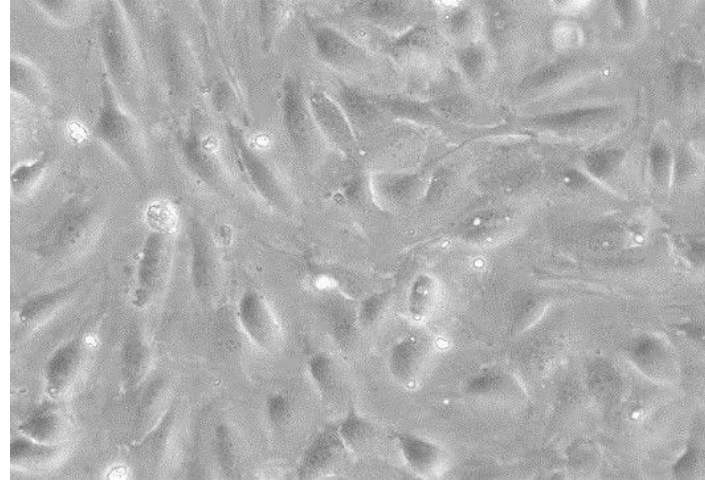
2.2.2 Büyütülen Hücrelerin Sayımı ve Toplam Canlılıklarının Belirlenmesi

Deney kurmak için toplam hücre sayısını belirleme amacıyla tripan blue boyama yöntemi kullanılmıştır. Hücre süspansiyonu 10 mL toplam hacimde hazırlanmış, içinden 1 mL ayrılarak sayım için kullanılmıştır. Ayrılan hücre süspansiyonundan temiz ependorf içine 10 µL eklenmiş ve üzerine 10 µL Tripan blue boyası (1:1 dilüsyon oranında) eklenerek karıştırılmıştır. Canlı hücrelerle ölü hücrelerin sağlıklı bir şekilde ayırımının yapılması için 5 dakika oda sıcaklığında beklenerek 10 µl boya+hücre karışımı Thoma Lamına yüklenerek mikroskopta sayım yapılmıştır. Hücre süspansiyonun 1 mL'indeki toplam canlı hücre sayısı aşağıdaki formülle bulunmuştur.

$$\text{Total hücre sayısı (canlı)/mL} = \text{Thoma Lamı sayım sonucu} \times 2 \times 10^4 \quad (2.1)$$



Şekil 2.7: MDA-MB-231 (meme kanseri) hücresinin mikroskop görüntüsü



Şekil 2.8: HUVEC hücresinin mikroskop görüntüsü

2.2.3 Hücre Soylarının Deney Kaplarına Alınması ve Sitotoksite (MTT) Deneyi

MTT (3-(4, 5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazolium bromür) testi, hücresel büyümeyi ölçmek için bir kolorimetrik testtir. Toksik maddelerin hücresel düzeyde değerlendirilmesi için kullanılır. Suda çözünerek hazırlanan MTT solüsyonu, canlı hücreler tarafından kolayca alınır ve canlı hücrelerin mitokondrilerindeki mitokondriyal süksinat dehidrogenazın etkisiyle mor renkli formazana indirgenen bir tetrazolyum tuzudur. MTT'nin indirgenmesi yalnızca metabolik olarak aktif hücrelerde meydana gelir, aktivite seviyesi hücrelerin canlılığının bir ölçüsüdür. Hücre sayımı yapılarak belirlenen hücre sayısı 96 kuyulu plakaların her kuyusunda 30.000-50.000 hücre olacak paylaştırılmıştır. Ekim sonrası 24 saat inkübasyona bırakılmıştır. Süre sonunda deney planı dahilinde farklı doz (%25, %12,5, %6,25, %3,125 ve %1,5) ve zaman değerlendirilmesi yapılmıştır. Zaman bağımlı değerlendirilme için inkübasyon süresini tamamlayan kontrol ve deney gruplarına 20µl MTT solüsyonu eklenmiş ve 3 saat sonrasında

kuyulardaki medyum çekilerek üzerine 0,008M HCl içeren 2-propanol eklenmiştir. 15 dakika oda sıcaklığında inkübasyona bırakılmış ve süre sonunda kuyulardaki formazan kristalleri pipetaj yardımıyla çözünmüştür. 96 kuyulu plakalar ELISA cihazında 493 nm'de okunmuştur.

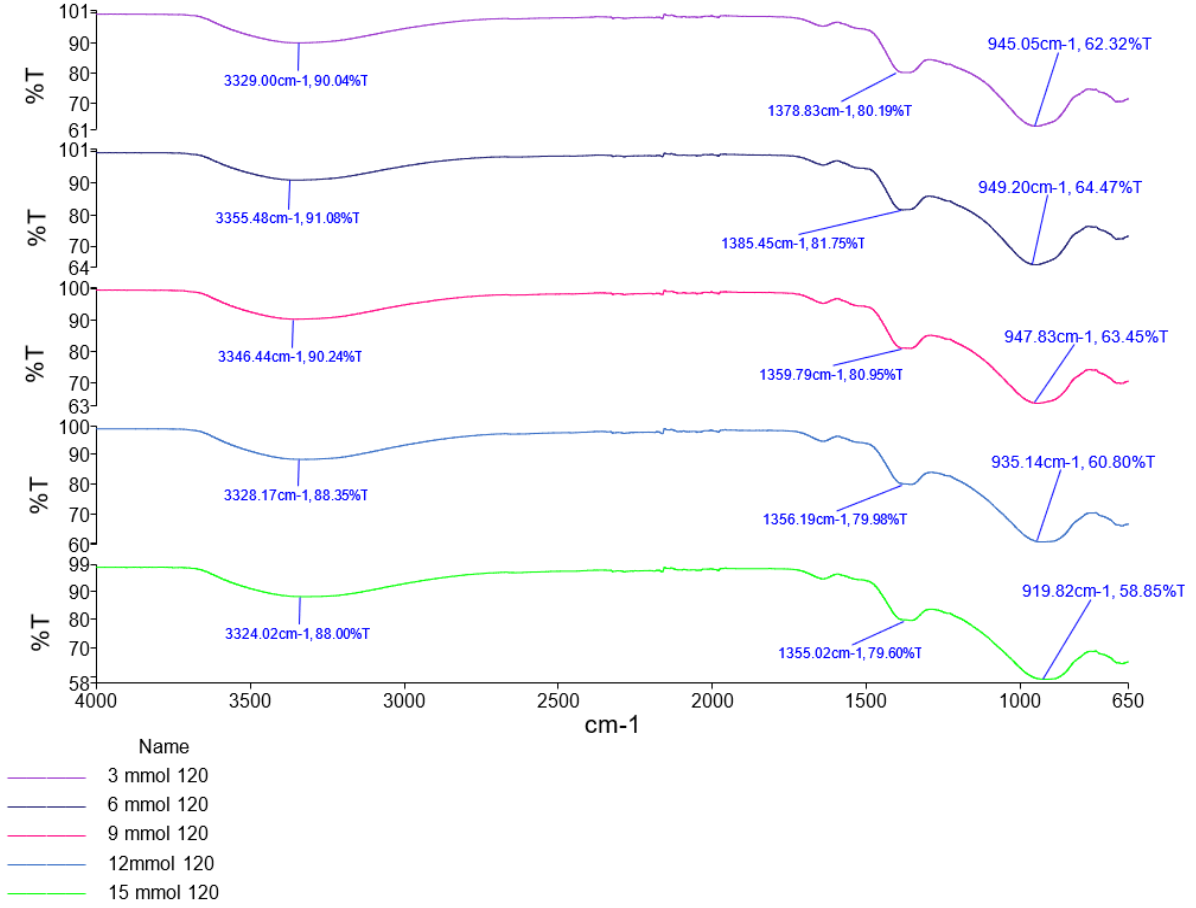
3. BULGULAR VE SONUÇLAR

3.1 Kimyasal Karakterizasyon:

Erbiyum boratın daha önceki sentezinde yapılan kimyasal karakterizasyonda, X-ışını kırınımı (XRD) analizi, ürünün amorf yapıda olduğunu ve yüksek sıcaklıklarda ısıtıldığında vaterit tipi erbiyum ortoborat kristal yapısına dönüştüğünü göstermiştir. FT-IR ve termogravimetrik analizler (TGA), ürünün kimyasal formülünü doğrulamış ve yapısında $[BO_3]$ düzlemsel üçgen gruplarının bulunduğunu ortaya koymuştur. TEM görüntüleri, nanopartiküllerin ortalama boyutunun 15 ± 6 nm olduğunu, dinamik ışık saçılımı (DLS) ise hidrodinamik çaplarının suda yaklaşık 100 nm olduğunu göstermiştir. Yüksek zeta potansiyeli (+41 mV), nanopartiküllerin sulu çözeltide uzun süre stabil kalmasını sağlamıştır. Manyetik analizler, ürünün güçlü paramanyetik özellikler sergilediğini ve Bohr magnetron sayısının 9.48 olduğunu ortaya koymuştur. Nanopartiküller, geniş bir optik bant aralığına (5.3 eV) sahip olup UV ışığını güçlü şekilde absorbe etmektedir. Bu özellikler, nanopartiküllerin biyomedikal uygulamalarda, özellikle hücre hedefleme, ilaç taşıma ve biyogörüntüleme gibi alanlarda kullanılabilceğini düşündürmektedir. Yüksek stabilite ve biyouyumluluk özellikleri, bu nanopartikülleri, yara iyileştirme gibi biyomedikal alanlarda umut vaat eden bir aday haline getirmektedir. Çalışma, ayrıca nanopartiküllerin toksik olmadığını ve belirgin yara iyileştirme özellikleri olduğunu vurgulamaktadır; bu durum, uluslararası patent başvurusuyla desteklenmiştir. Bu bulgular, erbiyum borat nanopartiküllerinin hem yapısal hem de işlevsel özelliklerini detaylı bir şekilde ele alarak geniş bir uygulama alanına işaret etmektedir.

3.1.1 FT-IR Spektrum Analizi

Bu bölümde, farklı molar konsantrasyonlarda sentezlenen Erbiyum Borat ($Er-BO_3$) bileşiklerine ait Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FT-IR) spektrumları incelenmiştir. Analizler, numunelerdeki fonksiyonel grupların belirlenmesi ve yapıdaki değişimlerin yorumlanması amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1: Sentezlenen bileşikler için FT-IR ölçüm grafikleri

3.1.1.1 Spektral Özellikler ve Piklerin Yorumu

FT-IR spektrumları incelendiğinde, tüm numunelerde belirli dalga boylarında karakteristik soğurma bantlarının bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu bantların belirli moleküler titreşimlere karşılık geldiği literatür çalışmalarıyla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

- 945-947 cm^{-1} (B-O titreşimi): Bu bölgedeki pikler, bor oksijen (B-O) bağlarının gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Erbiyum katkılı borat yapılarında bu tür titreşimler yaygın olarak gözlemlenmektedir. Numunelerde molar oran arttıkça bu bölgedeki piklerin yer değiştirdiği ve şiddetlerinde farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Bu değişim, borat matrisine entegre edilen Erbiyum iyonlarının yapısal etkilerinden kaynaklanmaktadır.
- 1355-1365 cm^{-1} (B-OH grupları): Borat bileşiklerinde yaygın olarak görülen bu bölgedeki pikler, B-OH gruplarının bükülme titreşimlerine işaret etmektedir. Spektrum incelendiğinde, molar oran arttıkça bu piklerde de değişimler meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, Erbiyum iyonlarının bağ yapısına olan etkisini ve koordinasyon değişimlerini desteklemektedir.

- 3300-3360 cm^{-1} (O-H streç titreşimi): Geniş bir bant olarak gözlemlenen bu bölge, hidroksil (-OH) gruplarına veya sistemde adsorbe olmuş suya işaret etmektedir. Numuneler arasında bu bölgedeki şiddet farklılıkları, hidrate yapının değişebileceğini ve Erbiyum konsantrasyonuna bağlı olarak su içeriğinde azalma meydana gelebileceğini göstermektedir.

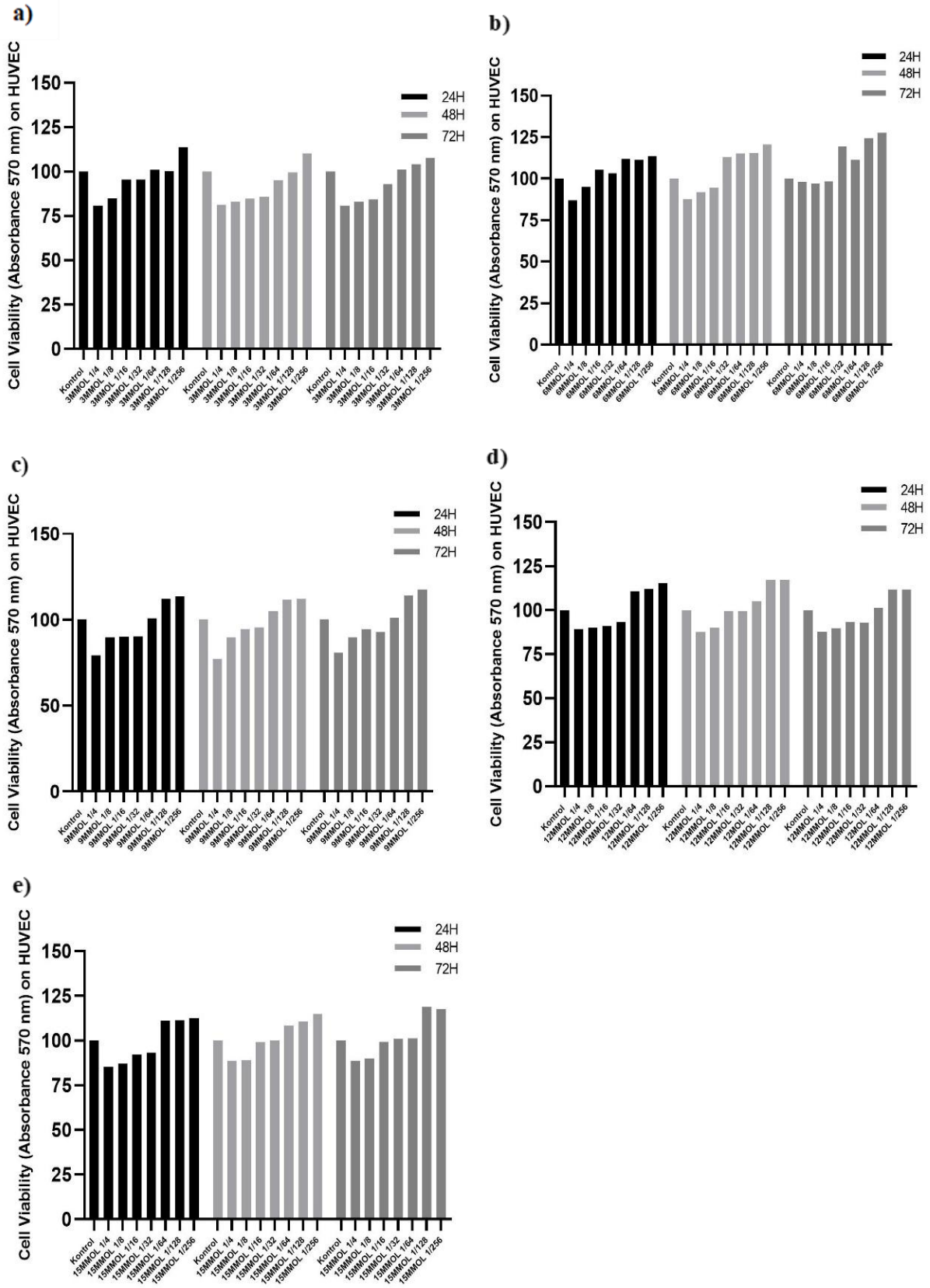
3.1.1.2 Konsantrasyona Bağlı Yapısal Değişimler

Çalışmada 3 mmol, 6 mmol, 9 mmol, 12 mmol ve 15 mmol Erbiyum içeren borat numuneleri analiz edilmiştir. Molar konsantrasyon arttıkça belirli dalga boylarında hafif kaymalar ve pik şiddetlerinde değişimler tespit edilmiştir. Özellikle B-O titreşimlerine ait piklerin konumlarının değişmesi, Erbiyum iyonlarının borat matrisine entegre olmasıyla yapısal bozulmaların meydana geldiğini düşündürmektedir.

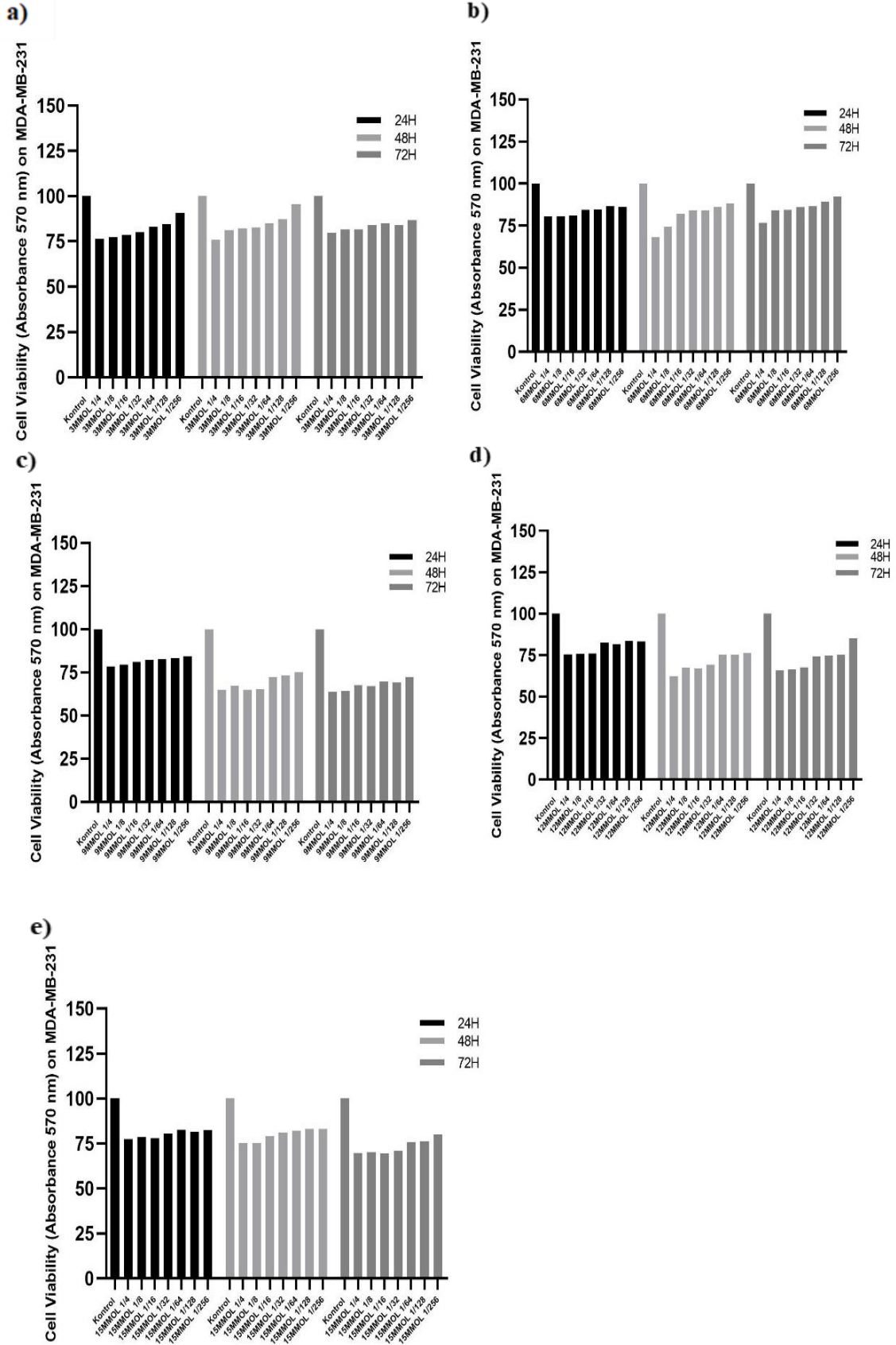
Hidroksil gruplarına ait bantların şiddet değişimi, konsantrasyonun artışıyla birlikte sistemde tutulan su miktarının azalabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, FT-IR sonuçları, Erbiyum katkılı borat sistemlerinde belirli oranlarda Erbiyum ilavesinin yapı üzerinde doğrudan etkili olduğunu doğrulamaktadır. Bu bulgular, Erbiyum Borat sentez süreçlerinde bileşiğin termal ve kimyasal kararlılığı açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

Sonuç olarak, FT-IR analizi, farklı molar konsantrasyonlarda sentezlenen Erbiyum Borat bileşiklerinin karakteristik kimyasal bağlarını ve fonksiyonel gruplarını başarılı bir şekilde ortaya koymuştur. Konsantrasyona bağlı olarak spektrumda gözlemlenen değişimler, Erbiyum iyonlarının borat matrisiyle etkileşimini ve yapı üzerindeki etkilerini destekler niteliktedir. Bu bulgular, Erbiyum katkılı boratların yapısal ve fonksiyonel özelliklerini daha iyi anlamaya yönelik önemli veriler sunmaktadır.

3.2 Hücre Kültür Deney Sonuçları



Şekil 3.2: Farklı konsantrasyonlarda sentezlenen Erbiyum Borat bileşiklerinin HUVEC hücrelerine sitotoksinite etkisi [a)3 mmol b)6 mmol c)9 mmol d)12 mmol e)15 mmol]



Şekil 3.3: Farklı konsantrasyonlarda sentezlenen Erbitan Borat bileşiklerinin MDA-MB-231 hücrelerine sitotoksikite etkisi [a)3 mmol b)6 mmol c)9 mmol d)12 mmol e)15 mmol]

Yeni sentezleme yöntemiyle hücelere uygulanan Erbiyum Borat bileşiklerinin doz ve zaman bağımlı olarak MDA-MB-231 ve HUVEC hücrelerindeki sitotoksik etkinlikler değerlendirilmiştir. Bu bağlamda kanser spesifik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla insan meme karsinom hücre modeli olan MDA-MB-231 hücre hattı kullanılmıştır. Epitelyal karakter gösteren bu adenokarsinom meme kanseri hücre hattı evre III kanser tipine sahiptir. İnvaziv özelliklerinden dolayı agresif bir kanser tipidir. Erbiyum Borat bileşiklerinin sağlıklı dokudaki özelliklerini değerlendirebilmek için ise insan göbek kordonu endotel hücre hattı olan HUVEC hücreleri kullanılmıştır. Özellikle anjiyogenez regülasyonu için tercih edilen bu hücre hattı uygulanan madde/molekülün hücre yenilenme ve damar oluşumu gibi önemli faaliyetlerini değerlendirmede tercih edilmektedir. Bu bağlamda 3 mmol, 6 mmol, 9 mmol, 12 mmol ve 15 mmol olmak üzere 5 farklı tipte Erbiyum Borat bileşikleri sentezlenmiştir. Sentezlenen çözeltilerin boraks konsantrasyonları 0.025 M, 0.050 M, 0.075 M, 0.1 M, 0.125 M şeklindedir. Burada amacımız Erbiyumun sağlık alanında uygulamaları da göz önüne alınarak, Bor konsantrasyonu değiştiğindeki hücelere etkisini aydınlatmaktır. Doz ve zamana bağlı çalışılan deney düzeneğinde 24, 48 ve 72 saat zaman dilimleri ve her madde için 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128 ve 1/256 dozlar çalışılmıştır. Bu bağlamda 3 mmol Erbiyum Borat için en öldürücü dozun her saat diliminde MDA-MB-231 hücreleri için 1/4 oranı olduğu ancak bu oranın HUVEC hücrelerinde de yüksek öldürücülük oranı göstermesin dolayı efektif doz olmadığı belirlenmiştir. 1/64 oranının ise bütün zaman dilimlerinde MDA-MB-231 hücre hattında hücrelerin ölümünü indüklerken HUVEC hücrelerinde hücre canlılığını etkilemediği ve hatta hücre yenilenmesini indüklediği belirlenmiştir. Aynı etki 72 ve 48 saat dilimlerinde daha dikkat çekici bir şekilde belirlenmiştir. 6 mmol Erbiyum Borat için ise maksimum dozda (1/4) hem MDA-MB-231 hem de HUVEC hücrelerinde hücreleri öldürdüğü ancak 1/64 ve 1/128 dozda her zaman dilimi için kanser hücrelerini öldürürken HUVEC hücrelerinin proliferatif karakterini arttırarak hücre yenileyici özellik gösterdiği belirlenmiştir. En etkin hücre yenilenme dozu HUVEC hücrelerinde 1/256'dır. 9 mmol ve 12 mmol'un antikanser özelliği oldukça dikkat çekicidir. 9 mmol'de MDA-MB-231 hücreleri en düşük doz olan 1/256'da bile yüksek hücre öldürücü yani antikanser özelliği göstermekte, aynı dozun HUVEC hücrelerinde ise maksimum hücre yenileme özelliğinden dolayı önem arz etmektedir. 12 mmol'de ise maksimum konsantrasyon olan 1/256 sadece 48 saatte maksimum antikanser özelliği göstermekte ve HUVEC hücrelerinde de bu dozun 48 saatte maksimum hücre yenilenme özelliğini gösterdiği belirlenmiştir. 15 mmol'de ise 1/64, 1/128 ve 1/256'da yüksek antikanser özelliği gösterdiği, HUVEC hücrelerinde ise erken zaman diliminde bu dozlarda hücre

yenilenmeyi teşvik etse de 48 ve 72 saat gibi geç zaman dilimlerinde özellikle 1/128 ve 1/256'ın daha aktif olduğu belirlenmiştir.

Bu sonuçlar bağlamında Erbiyum Borat'ın antikanser ve hücre yenileyici özellik gösterdiğini, içeriğindeki Erbiyum miktarı değiştiğinde bu özelliklerinin daha da dikkat çekici hale geldiği, özellikle düşük dozlarda hücresel yanıt oluşturduğu ve bu etkinin kalıcı olduğu belirlenmiştir.

3.3 Genel Değerlendirme

Bu çalışma, farklı molar konsantrasyonlarda sentezlenen erbiyum borat (Er-BO_3) nanopartiküllerinin kimyasal karakterizasyonu ve biyolojik etkinliklerinin detaylı analizini içermektedir. Yapılan karakterizasyon çalışmaları, sentezlenen nanopartiküllerin kimyasal ve yapısal özelliklerini doğrulamış ve biyomedikal alandaki potansiyel uygulamalarına ışık tutmuştur.

XRD analizleri, sentezlenen erbiyum boratın amorf yapıda olduğunu ve yüksek sıcaklıklarda kristalize olarak vaterit tipi erbiyum ortoborat formuna dönüştüğünü göstermiştir. FT-IR spektrum analizleri, numunelerde bulunan karakteristik fonksiyonel grupların belirlenmesini sağlamış ve Erbiyum katkısının borat yapısı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Özellikle B-O titreşimlerinin kayma göstermesi ve hidroksil gruplarına ait bantların değişim göstermesi, Erbiyum iyonlarının borat matrisiyle güçlü bir etkileşim içinde olduğunu desteklemektedir. Termogravimetrik analizler (TGA), bileşiğin ısıl kararlılığını ve kimyasal stabilitesini doğrularken, TEM ve DLS ölçümleri, sentezlenen nanopartiküllerin boyut dağılımını ve hidrodinamik çaplarını belirlemiştir. 15 ± 6 nm ortalama partikül boyutu ve yüksek zeta potansiyeli (+41 mV), nanopartiküllerin sulu çözeltide uzun süre stabil kaldığını göstermiştir. Manyetik analizler, güçlü paramanyetik özelliklerin varlığını doğrulamış ve Bohr magnetron sayısının 9.48 olduğunu ortaya koymuştur. Optik bant aralığı ölçümleri ise 5.3 eV olarak belirlenmiş ve nanopartiküllerin UV ışığını güçlü şekilde absorbe ettiği saptanmıştır. Bu özellikler, erbiyum borat nanopartiküllerinin biyomedikal uygulamalarda kullanım potansiyelini artırmaktadır.

Hücre kültürü deneyleri, sentezlenen erbiyum borat bileşiklerinin farklı konsantrasyonlarda MDA-MB-231 meme kanseri hücre hattı ve HUVEC sağlıklı endotel hücreleri üzerindeki sitotoksik etkisini değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda, düşük dozlarda (1/64, 1/128 ve 1/256 oranları) MDA-MB-231 kanser hücrelerinde yüksek hücre ölüm oranı gözlemlenirken,

aynı dozların HUVEC hücrelerinde proliferatif (hücre yenilenmesini teşvik edici) özellik gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle 9 mmol ve 12 mmol Erbiyum Borat bileşiklerinde, en düşük dozlarda bile kanser hücrelerinde belirgin öldürücü etki gözlenirken, HUVEC hücrelerinde maksimum hücre yenilenme potansiyeli tespit edilmiştir. 15 mmol konsantrasyonunda ise, erken saatlerde hücre yenilenmesini teşvik eden bir etki gözlenmiş ancak 48 ve 72 saatlik süreçlerde bu etkinin daha spesifik dozlarda (1/128 ve 1/256) devam ettiği belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular, erbiyum borat nanopartiküllerinin biyomedikal alanlarda, özellikle antikanser tedavi ve doku mühendisliği uygulamalarında umut vadeden bir aday olduğunu göstermektedir. Çalışma, Erbiyum Borat'ın hem antikanser etkisini hem de sağlıklı hücreler üzerinde hücre yenilenmesini teşvik edici etkisini ortaya koyarak, gelecekte yara iyileştirme, ilaç taşıma sistemleri ve biyogörüntüleme gibi alanlarda kullanımını için önemli bir temel oluşturmaktadır. Ayrıca, nanopartiküllerin düşük toksisite profiline sahip olması ve uzun süre stabil kalabilmesi, biyomedikal uygulamalar için büyük avantaj sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, Erbiyum Borat nanopartiküllerinin kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklerini detaylı bir şekilde analiz ederek, bu materyalin biyomedikal alandaki potansiyel kullanım alanlarını ortaya koymuştur. Gelecekte yapılacak çalışmalar, nanopartiküllerin in vivo etkilerinin araştırılması ve klinik uygulamalara yönelik ileri testlerin gerçekleştirilmesi ile daha geniş kapsamlı değerlendirmeler yapılmasına olanak sağlayacaktır.

4. KAYNAKLAR (IEEE)

- [1] O.K., Kırbas, B.T., Bozkurt, P.N., Tashlı, T.B., Hayal, İ., Ozkan, B., Bulbul, S., Beyaz, et al., “Effective Scarless Wound Healing Mediated by Erbium Borate Nanoparticles”, Journal of Biomedical Research, 199: 3262-3271, 2020, <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02458-4>
- [2] Boren Tenmak. “Bor Elementi”, [Online] erişim adresi: <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/bor-elementi>
- [3] B., Yeşilkaya, G., İbişoğlu, “Bor Karbür Ön Fizibilite Raporu”, ETİ HOLDİNG A.Ş. Genel Müdürlüğü, ANKARA, Mayıs 2003.
- [4] H., Ateş, “Nano Parçacıklar ve Nano Teller”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, s.437-438, 2015.
- [5] Eti Maden. “Bor Mineralleri” [online] erişim adresi: <https://www.etimaden.gov.tr/>
- [6] “dosya:boron r105” [online] erişim adresi: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/>
- [7] “bor-5b kristal yapılar” [online] erişim adresi: https://www.webelements.com/boron/crystal_structure
- [8] C., Çarboğa, “Düşük Karbonlu Çeliklere Bor İlavesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [9] Boren-Tenmak. “Bor Rezervleri” [online] erişim adresi: <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/rezervler>
- [10] Eti Maden. “Türkiyede Bor” [online] erişim adresi: <https://www.etimaden.gov.tr>
- [11] Prof. Dr.-carkan, N., “Bor Ürün Çeşitleri ve Kullanım Alanları”, [online] erişim adresi: http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/0ae4561193dbf6e_ek.pdf
- [12] A., Çalık, “Türkiye’nin Bor Madenleri ve Özellikleri”, Mühendis ve Makine Dergisi, Sayı 508, 2002.
- [13] “Bor”, [online] erişim adresi: <https://borteknolojileri.com>
- [14] N., Yenmez, “Stratejik Bir Maden Olarak Bor Minerallerinin Türkiye İçin Önemi”, İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi, Sayı 19, s: 59-94, 2009.
- [15] Z.G., Durğun, “Çeşitli Kalsiyum Boratların Sentezi, Karakterizasyonu ve Alev Geciktirici Etkinliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.

- [16] “Boratlar” [online] erişim adresi: <https://www.atamanchemicals.com/>
- [17] D., Durak, “Bazı Metal Boratların Sentezi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [18] B., Bulbul, “Amorf ve Nanoboyutlu HoBO₃. 2. 8 H₂O Bileşiğinin Sentezi ve Karakterizasyonu”, BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi, 21(2), 766-776, 2019.
- [19] M., Erfani, E., Saion, N., Soltani, & M., Hashim, “Facile synthesis of calcium borate nanoparticles and the annealing effect on their structure and size”, International Journal of Molecular Sciences, 2012.
- [20] T., Chen, J. C., Deng, L. S., Wang, & G., Feng, “Preparation and characterization of nano-zinc borate by a new method”, Journal of Materials Processing Technology, 2009.
- [21] J., Shim, C. V., Reddy, & G., Sarma, “Effect of Co²⁺ and Ni²⁺-doped zinc borate nano crystalline powders by co-precipitation method”, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2015.
- [22] S., Argun, F. T. S., Dumanli, A. S., Kipcak, & N., Tugrul, “Co-precipitation synthesis of lanthanum borates with different morphologies”, Glass Physics and Chemistry, 2023.
- [23] B., Zümreoglu-Karan, A., Temel, & L., Mafra, “Layered double hydroxides with interlayer borate anions: A critical evaluation of synthesis methodology”, Applied Clay Science, 2011.
- [24] G., Bulun, “ZnO ve katkılı ZnO bileşiklerinin mikro yapıları ve fiziksel özellikleri ile katı formdaki malzemelerin manyetik, yapısal özellikleri ve faz özellikleri”, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [25] R. D., Teo, J., Termini, & H. B., Gray, “Lanthanides: Applications in cancer diagnosis and therapy”, Journal of Medicinal Chemistry, 59(13), 6012–6024, 2016.
- [26] Makine Mühendisleri Odası. “Dünyada ve Türkiye’de nadir toprak elementleri”, Makine Mühendisleri Odası Enerji Çalışma Grubu, 2019. [online] Erişim adresi: <https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2019/05/>
- [27] H., Ates, E., Bahceci, “Nano Malzemeler için Üretim Yöntemleri”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3(2):483-499, 2015.
- [28] S., Gürmen, B., Ebin, “Nanopartiküller ve Üretim Yöntemleri-1”, Metalurji Dergisi, D150, s:31-38.
- [29] Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası, “Nanopartikül üretim yöntemleri” Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Dergisi, 150, 31-38, 2023.

- [30] B., Bulbul, S., Beyaz, M., Akar, "Preparation of water-soluble amorphous erbium borate ($\text{ErBO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) nanoparticles with positive charge", *Chemical Papers* 74:1009–1017, 2020.
- [31] T.B., Hayal, B., Bulbul, S., Beyaz, F., Sahin, "Use of Mutant P53 Gene Targeted Lead Borate Nanoparticles in Cancer Treatment and Production Method of These Nanoparticles", *International Symposium on Boron*, ISBN No: 978-605-9516-61-7.
- [32] M., Kaptan, "Bazı Metal Borat Bileşiklerinin Katı Hal Kimyasal Sentezleri ve Karakterizasyon Çalışmaları", *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [33] N.E., Sir, "Sol-Jel Yöntemiyle Metal Borat Üretimi ve Karakterizasyonu", *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [34] E.D., Baykal, "Hidrotermal ve Mikrodalga Enerjiyle Lityum İçeren Boratlı, Fosfatlı ve Borfosfatlı Bileşiklerin Sentezlenmesi, Kristal Yapı ve Termokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2003.
- [35] E., Özkan, "Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Borofen Üretimi ve Karakterizasyonu" *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 13(2), 120-130, 2023.
- [36] H.G., Giesber, J., Ballato, W.T., Pennigton, J.W., Kolis, "Synthesis and Characterization of Optically Nonlinear and Light Emitting Lanthanide Borates", *Information Sciences*, 149, 61-68, 2003.