

169246

**BORUN NÜKLEER ÖZELLİKLERİ
VE
BOR İLE NÖTRON YAKALAMA TERAPİSİ**

Mehmet Selçuk ERDOĞAN

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA

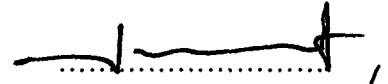
Haziran – 2005

KABUL VE ONAY SAYFASI

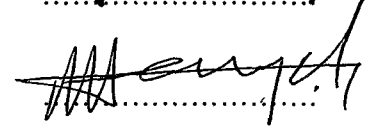
Mehmet Selçuk ERDOĞAN 'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “**Boron Nükleer Özellikleri ve Bor ile Nötron Yakalama Terapisi**” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir

.16.../08/2005

Üye : Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA (Danışman)



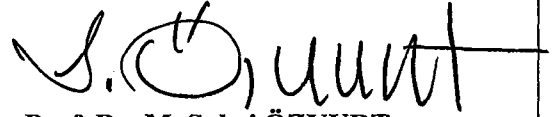
Üye : Prof. Dr. Mustafa ŞENYEL



Üye : Doç. Dr. Asım OLGUN



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .09..08..05 gün ve ..12..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. M. Sabri ÖZYURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BORUN NÜKLEER ÖZELLİKLERİ VE BOR İLE NÖTRON YAKALAMA TERAPİSİ

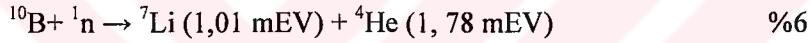
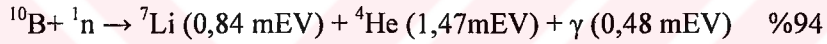
Mehmet Selçuk ERDOĞAN

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2005

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA

ÖZET

Kanserli hücrelerin yok edilmesinde kullanılan alışlagelmiş radyasyon tedavisine alternatif olan BNCT (Bor ile Nötron Yakalama Terapisi) yöntemi hakkında dünyada önemli aşamalar kaydedilmiş, başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere Japonya ve birçok Avrupa ülkesinde BNCT araştırma merkezleri kurulmuştur. ^{10}B izotopu içeren bazı bileşiklerin kanserli hücre çekirdeği içine gönderilerek nötronlar ile bombardıman edilmesi sonucu; aşağıdaki reaksiyon gerçekleşmektedir:



Bu reaksiyonda açığa çıkan yüksek enerjili parçacıklar (^7Li ve ^4He) sadece tümör hücrelerine zarar vermektedir. Çoğunlukla etraftaki normal hücreler zarar görmemektedir.

Bu çalışmada, dünyada BNCT hakkında yapılan araştırmalar incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bor, BNCT, Radyasyon

NUCLEAR PROPERTIES OF BORON AND BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY

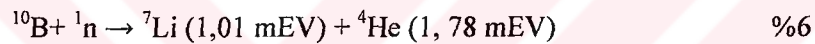
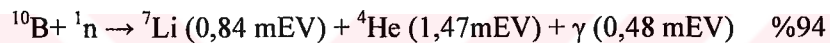
Mehmet Selçuk ERDOĞAN

Department of Physics, M. S. Thesis, 2005

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA

SUMMARY

Considerable experimental progresses about boron neutron capture therapy (BNCT) have been done as an alternative to common cancer treatment methods in worldwide. A number of boron neutron capture therapy centers were established in USA, Japan and several European countries. The following reaction results in as a result of interactions of neutrons and tumour seeking boron(^{10}B) labeled drugs.



Highly energetic particles resulted from these reactions are only lethal radiation dose to the tumour cells not for the other healthy cells.

In this study the experimental studies done on boron neutron capture therapy in worldwide were reviewed.

Key words: Boron, BNCT, Radiation

TEŐEKKÜR

Bu çalışmada ve akademik çalıőmalarımda bana yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof.Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA' ya, bölümümüz öğretim üyelerinden Sayın Yrd. Doç. Dr. Latife ŐAHİN'e ve her zaman yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Kimya Bölüm Başkanı Sayın Prof.Dr. Yunus ERDOĞAN'a ve mesai arkadaşlarıma teőekkür ederim.

Yaőamım boyunca hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan aileme ve beni her zaman destekleyen eőime sevgi ve saygılarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. BOR.....	3
2.1. Bor Nedir	3
2.2. Borun Tarihçesi.....	6
2.3. Tabiattaki Önemli Bor Kaynakları.....	8
2.4. Bor Mineralleri	9
2.4.1. Kristal su içeren boratlar	9
2.4.2. Bileşik boratlar	11
2.5. Dünya’da ve Türkiye’de Rezervleri ve Bulunuş Şekilleri	12
2.5.1. Dünya bor pazarının yapısı.....	12
2.6. Bor Üretimi	14
2.7. Türkiye’de Bor Üretim Yönetimi ve Teknolojisi	18
2.7.1. Dekapaj.....	18
2.7.2. Üretimler	18
2.7.2.1. Etibor A.Ş. Bor İşletmeleri faaliyetleri.....	18
Emet Bor İşletmesi	19
2.8. Bor Mineralleri ve Bileşiklerinin Kullanım Alanları.....	19
2.8.1. Cam sanayi	21
2.8.2. Seramik sanayi	22
2.8.3. Temizleme ve beyazlatma sanayi.....	23
2.8.4. Yanmayı önleyici maddeler.....	23
2.8.5. Tarım	23
2.8.6. Metalürji.....	24
2.8.7. Nükleer uygulamalar	24
2.8.8. Süper iletkenlikte bor uygulaması.....	24
2.8.9. Enerji taşımada yeni bir olanak: NaBH ₄	25
2.8.10. Diğer kullanım alanları.....	28

ÇİNDEKİLER (Devamı)

	<u>Sayfa</u>
3. RADYASYON.....	30
3.1. Radyoaktivite	30
3.2. Yarı Ömür	30
3.3. Radyoaktif Bozunmalar	31
3.4. Radyasyon.....	31
3.5. Radyasyon Çeşitleri	32
3.5.1. α radyasyonu	32
3.5.2. β radyasyonu.....	32
3.5.3. Elektromagnetik radyasyon (γ ışınları, X ışınları ve görünür ışık).....	33
3.6. Radyasyonun Madde İle Etkileşimi	34
3.7. Nötronların Madde İle Etkileşimi	37
3.8. Radyasyonun İnsan Vücuduna Etkisi	38
3.8.1. Radyasyonun somatik etkisi	38
3.8.2. Radyasyonun genetik etkisi.....	39
3.9. Radyasyondan Korunma.....	40
3.9.1. Nötronların zırhlanması.....	41
3.9.2. Zırh malzemeleri	41
4. BOR İLE NÖTRON YAKALAMA TERAPİSİ	43
4.1. ^{10}B İzotopu Ayırım Yöntemleri ve Kullanım Alanları	43
4.1.1. İzotop ayırım yöntemleri	43
4.1.2. Bor ve izotopları.....	44
4.2. ^{10}B İzotopunun Ayırımı	44
4.2.1. Yer değiştirme-damıtma ile ayırma.....	44
4.2.2. İyon değişimi İle ayırma.....	48
4.3. ^{10}B İzotopunun Analitik Olarak Belirlenmesi ve Kullanım Alanları	48
4.4. Bor ile Nötron Yakalama Terapisi (BNCT)	49
4.5. BNCT İçin Kullanılan Hızlandırıcılar	51
4.5.1. Dairesel hızlandırıcılar	51
4.5.2. Doğrusal hızlandırıcılar	52
4.5.2.1. Elektrostatik doğrusal hızlandırıcılar.....	52
4.5.2.2. RF doğrusal hızlandırıcılar	53
4.6. Türkiye'deki Çalışmalar	53
4.7. Dünyadaki Önemli BNCT Çalışmaları	55

İÇİNDEKİLER (Devamı)

	<u>Sayfa</u>
5. SONUÇ	63
6. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	64



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bor elementinin kristal yapısı.....	5
2.2. Türkiye'deki en önemli bor bileşiklerinin resimleri.....	9
2.3. Ülkemizde en önemli bor rezervlerinin bulunduğu bölgeler.....	14
2.4. Sodyum borhidrürün yakıt olarak kullanıldığı bir yakıt pili şeması.....	28
3.1. Alfa, Beta ve Gama radyasyonlarının birbirine göre giricilikleri	36
3.2. Nötron madde etkileşiminin sınıflandırılması.....	37
4.1. Bor tri florür-dimetil eter yerdeğiştirme damıtma ile izotoplarının ayırımı	46
4.2. Tümörlü hücreye nötron bombardımanı.....	50
4.3. Brookhaven Ulusal Laboratuvarının görünümü	55
4.4. L-BPA ve BSH'ın geometrik yapıları	57
4.5. Normal beyin ve tümörlü beynin görünümü	58
4.6. Brookhaven Tıbbi Araştırma Reaktörü	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bor elementinin özellikleri	4
2.2. Ticari değeri olan bor mineralleri.....	8
2.3. Kristal suyu içeren boratlar	9
2.4. Bileşik boratlar (hidroksil veya diğer tuzlar ile).....	11
2.5. Dünya’da ve Türkiye’de bor madeni rezervleri	13
2.6. Türkiye bor tuzu rezervi (x1000 ton)	13
2.7. Türkiye bor tuzu bazında rezervlerin havzalara dağılımı	14
2.8. Bor cevheri sektöründe kurulu kapasite durumu	15
2.9. Türkiye’deki bor cevheri ve bor konsantresi üretimi	15
2.10. Türkiye’de bor türleri üretimi yapan kuruluşlar ve kapasiteleri.....	16
2.11. Dünya bor cevheri üretimi (x1000 ton)	17
2.12. Emet bor işletmesi üretim miktarı	19
2.13. Bazı bor ürünlerinin kullanım alanları.....	20
3.1. Bilinen bozunma biçimleri	33
3.2. Radyoizotopların radyasyon tipleri ve enerji aralığı	35
3.3. Radyoizotopların farklı malzemelere göre maksimum menzili.....	35
3.4. Radyoizotopların farklı malzemelere göre HVT ve TVT değerleri	36
4.1. Bazı izotopların ısı nötron absorblama kesit alanları	44
4.2. ¹⁰ B ürünleri ve kullanım alanları	49
4.3. 1996 Eylül itibarıyla Amerika ve Japonya’daki klinik BNCT merkezleri	56
4.4. 1 No’lu hasta için BNCT ‘den 1-2 hafta önce hastaya 300mg/kg dozunda BPA uygulandıktan sonra farklı zamanlarda alınan doku ve kan örneklerindeki bor konsantrasyonu (ppm)	59
4.5. 2 No’lu hasta için BNCT’den 2,2 hafta önce hastaya 300mg/kg dozda BPA verildikten sonra farklı zamanlarda alınan kan ve doku örneklerindeki bor konsantrasyonu(ppm)	60
4.6. 2 No’lu hastaya 300mg/kg dozda BPA verilmesinden sonra farklı zamanlarda alınan kan ve doku örneklerindeki bor konsantrasyonu	60

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
B ₄ C	: Bor karbür
BCL	: Borax Consolidated Limited
NaBH ₄	: Sodyum bor hidrür
BNCT	: Boron Neutron Capture Therapy(Bor ile Nötron Yakalama Terapisi)
N	: Nötron sayısı
Z	: Proton sayısı
β ⁺	: Pozitron
β ⁻	: Negatron
p	: Proton
n	: Nötron
T _{1/2}	: Yarı ömür
EY	: Elektron yakalama
BSH	: Sodyum merkaptodidekahidrodedekaborat
BPA	: 4-dihidroksiborfenilalanin
rf	: Radyo frekansı
HVT	: Yarı değer kalınlığı
HVL	: Yarı değer tabakası
TVT	: Onda bir değer kalınlığı
ABNS	: Accelerator based neutron source(Hızlandırıcıya dayalı nötron kaynağı)
ABENS	: Accelerator based epitermal neutron source (Hızlandırıcıya dayalı epitermal nötron kaynağı)
BNL	: Brookhaven National Laboratory(Brookhaven Ulusal Laboratuvarı)

1.GİRİŞ

Bor yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Bor madenleri, borun oksijen ile bağlanmış bileşikleri olarak yeryüzünde mineral tuzlar şeklinde bulunmaktadır. Dünyadaki önemli bor yatakları Türkiye, ABD ve Rusya'da bulunmaktadır [1].

Türkiye dünyanın görünür bor rezervinin %73'üne sahiptir. Ticari açıdan önemli olan kolemanit, tinkal (doğal boraks) ve üleksit'in iyi kalitede ve büyük miktarlarda bulunması nedeniyle Türkiye bor cevheri piyasasında rakipsizdir [2].

Türkiye'de bor cevherleri Eskişehir-Kırka, Bursa-Kestelek, Balıkesir-Bigadiç ve Kütahya-Emet yörelerinde çıkarılmaktadır. Buralarda cevher zenginleştirme tesisleri (konsantratörler) bulunmaktadır. Ayrıca bor endüstrimiz Eskişehir-Kırka, Balıkesir-Bandırma ve Kütahya-Emet'te kurulan ilave tesislerle gelişme göstermektedir [3] .

21. yüzyılın malzemesi olmaya aday bor; camların yapımından, deterjan yapımına, nükleer reaktörlerde, metalürjide, tarımda, magnetlerde, ileri malzemelerin yapımında, kanser tedavisinde, eklem rahatsızlıklarının tedavisinde, tıpta bazı hastalıkların tedavisinde, radyasyon detektörlerinde, otomobil endüstrisinde ve daha birçok alanlarda kullanılır. Özellikle son yıllardaki çalışmalarda borun otomotiv endüstrisinde yakıt olarak kullanılması, bora stratejik bir önem kazandırmıştır [4] .

Radyasyon yaşamın doğal bir parçasıdır. Evrenin oluşumundan itibaren radyasyon vardır ve yaşadığımız evrenin ayrılmaz bir parçasıdır. Gerçekte bildiğimiz yaşam, radyasyonun varlığı ile gelişmiş ve yaşantımız ona bağımlı olmuştur. Radyasyonun faydalı olduğu kadar bazı durumlar karşısında zararlı etkiler gösteren birçok farklı çeşidi de vardır [5].

Bor elementine nükleer alanda önem kazandıran; ^{10}B izotopunun termal nötron yutma tesir kesitinin yüksek olmasının yanı sıra düşük enerjili gama ışını yayınlaması ve elementin radyoaktif hale geçmemesidir [6].

Nükleer reaksiyonlar sonucu meydana gelen nötronlar buldukları ortamda radyasyon sorunuyla birlikte zırlama problemini de beraberinde getirirler. Nötronlar elektrik yüklerine sahip olmadıklarından insan vücuduna ve çeşitli yoğunluktaki malzemelere kolaylıkla girerler.

İnsanoğlu alternatif enerji kaynaklarını kullanmaya başlamadıkça ve var olan enerji kaynaklarının sınırlı olduğu dikkate alındığında nükleer enerjinin kullanımı sürekli olarak gündeme gelecektir. Fakat nükleer enerjinin elde edilmesi esnasında açığa çıkan radyasyonların insan ve çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkisi, öte yandan nükleer tesislerin gerek işletme

gerek sökülme süreçleri ve sonrasında karşılaşılan radyoaktif atıklar nedeniyle radyasyon probleminin devam etmesi, nükleer enerji aleyhine kamuoyu oluşturmaktadır.

Nötron zırhlanmasında bu güne dek en çok kullanılan zırh malzemeleri su, çeşitli betonlar, çelik, hidrojen içeren organik bileşikler (hidrürler) ve bor içeren çeşitli plastiklerdir [6].

Doğada bulunan bor %19,8 oranında ^{10}B ve %80,2 oranında da ^{11}B izotoplarından oluşmaktadır. ^{10}B izotopu, çeşitli metotlarla ayrılarak borik asit, sodyum pentaborat, B-Al alaşımı, bor karbür, ferrobör, zirkonyum diborür, kristalin ^{10}B , bor oksit ve bor triflorür biçiminde ürünlere dönüştürülerek nükleer reaktörlerde nötron kalkanı (zırhı), nükleer yakıt depolama ve nakliyesi için borlu paslanmaz çelik yapımında katkı maddesi, nötron dozimetreleri, nötron terapisi gibi alanlarda kullanılmaktadır [7].

BNCT (Bor ile Nötron Yakalama Terapisi) tedavi yöntemi için epidermal nötron aralığındaki (0,4 keV veya 20 keV) nötronlar kullanılmaktadır. Günümüzde BNCT'nin klinik denemeleri nükleer reaktörlerde yapılmaktadır. Bununla birlikte, BNCT için yüksek kalitede, güvenli ve uygun maliyetli epidermal nötron kaynağı sağlamak için yüksek yoğunluklu hızlandırıcıların geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir. BNCT uygulamalarında doğrusal veya dairesel hızlandırıcılar kullanılabilir. Klinik BNCT uygulamalarında kullanılacak dairesel hızlandırıcı tipi siklotron'dur. Doğrusal hızlandırıcılar; elektrostatik doğrusal hızlandırıcılar veya radyo frekanslı (rf) doğrusal hızlandırıcılar olarak sınıflandırılabilirler. Elektrostatik doğrusal hızlandırıcılarda yüklü parçacık demeti elektrostatik alanla hızlandırılırken, rf hızlandırıcılarda zamanla değişen indirgenmiş elektrik alanı kullanılır [8].

Son yıllarda bazı borlu bileşikler kanser tedavisinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk deneme uygulamaları epidermal dokuda yapılmıştır. BNCT olarak tanımlanan ve ilk olarak 1950'li yıllarda Amerika Bileşik Devletlerinde denenmeye başlanan bu tedavide özellikle yüksek derecede malignan olduğu bilinen ve Amerika'da 12.500 kişinin öldüğü glioblastoma multiforme tip beyin tümörlerinde uygulanmaya başlanmıştır. Bu tip tedavide tümörlü dokuya, borun; dokuya uygun ilaç formu olan p-boronofenilalanin verilerek nötron bombardımanı yapılmaktadır. $^{10}\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He}$ fizyon reaksiyonu sonucu oluşan enerji hücrede geniş bir alana yayılmaktadır ve kanser hücrelerini yok ederken sağlıklı dokuya zarar vermemektedir. Tedavinin devamında kanserli hücrelerin tamamen yok edilmesi amaçlanmaktadır [6].

Bu çalışma, dünyanın en büyük bor rezervlerine ve ne yazık ki oldukça fazla kanserli hasta sayısına sahip olan ülkemizde, BNCT (Bor ile Nötron Yakalama Terapisi) uygulamalarına yardımcı olmak amacıyla yapılmıştır.

2. BOR

2.1. Bor Nedir?

Bor periyodik Çizelgede “B” simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 olan metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir elementtir. Bor tabiatta hiçbir zaman serbest halde bulunmaz. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir.

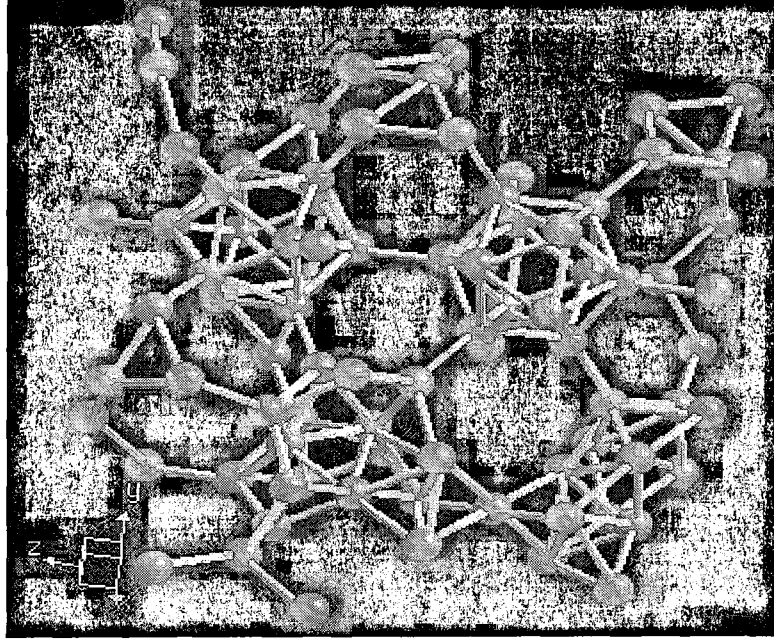
Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, endüstride birçok bor bileşiğinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor, bileşiklerinde ametal gibi davranır, ancak saf bor karbon gibi elektrikçe iletkenidir. Kristalize bor görünüm ve optik özellikler açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir [9].

Saf olarak elementel bor ilk kez 1808 yılında Fransız kimyager J.L.Gay-Lussac ve Baron L.J Thenard ile İngiliz kimyager H. Davy tarafından elde edilmiştir [9].



Çizelge 2.1 Bor Elementinin Özellikleri

Özellikler	Değeri
Atomik yapısı	
Atomik çapı	1,17 Å
Atomik hacmi	4,6 cm ³ /mol
Kristal yapısı	Rhombohedral
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 2p ¹
Kimyasal özellikler	
Elektrokimyasal eşdeğer	0,1344 g/amp-hr
Elektronegativite (Pauling)	2,04
Füzyon ısısı	50,2 kJ/mol
İyonizasyon potansiyeli:	
Birinci:	8,298
İkinci:	25,154
Üçüncü:	37,93
Valans elektron potansiyeli(-eV)	190
Fiziksel özellikler	
Atomik kütlesi	10,811
Kaynama noktası	4275K 4002 °C 7236 °F
Termal genişleme katsayısı	0,0000083 cm/cm ^o C(0°C)
Kondüktivite:	
Elektriksel:	1,0E ⁻¹² 10 ⁶ /cm
Termal:	0,274W/cmK
Yoğunluk	2,34 g/cc@300K
Görünüş	Sarı-kahverengi ametal kristal
Elastik modülü:	
Bulk:	320/GPa
Atomizasyon entalpisi	573,2 kJ/mole@ 25 °C
Füzyon entalpisi	22,18 kJ/mole
Buharlaşma entalpisi	480 kJ/mole
Sertlik:	
Mohs:	9,3
Vickers:	49000 MN m-2
Buharlaşma ısısı	489,7 kJ/mol
Ergime noktası	2573 K 2300 °C 4172 °F
Molar hacmi	4,68 cm ³ /mole
Fiziksel durumu	(20 °C & 1 atm) katı
Spesifik ısı	1,02 J/gK
Buharlaşma ısısı	0,348 Pa@2300 °C



Şekil 2.1. Bor elementinin kristal yapısı

Elektrik iletkenliği çok değişkendir. Oda sıcaklığında çok az iletkenidir. Sıcaklık arttıkça iletkenlik artar. Karbon, bor içinde çözüldüğünde iletkenliği etkiler ve % 0,1 oranında karbon eklenmesi, iletkenliği çok arttırmaktadır. %7-8 oranında karbon ilave edildiğinde saf karbon iletkenliğine yakın bir değer elde edilmektedir [9].

Bor elementinin iki kararlı izotopu ^{10}B ve ^{11}B izotoplarıdır. Bunlardan başka 3 tane de ^8B , ^{12}B ve ^{13}B kısa ömürlü suni radyoaktif izotopları vardır. Suni radyoaktif izotopların yarı ömürleri bir saniyeden daha azdır.

Kararlı iki izotopundan ^{11}B izotopu manyetik özelliklerinden dolayı, nükleer manyetik rezonans spektroskopisinde (NMR) kullanılmıştır. ^{11}B 'in nötron tutma kapasitesi ^{10}B 'a nazaran çok daha azdır. İki izotop nötron absorblaması bakımından mukayese edilirse ; ^{11}B 'nin etkin kesri 0,05 barn iken, ^{10}B 'unki 3,84 barn'dır. ^{10}B izotopu nükleer reaktörlerde nötron tutucusu olarak kullanılmaktadır [9].

Elektrikçe yüksüz, girginlik yeteneği fazla yüksek enerjili nötronlar ^{10}B izotopu tarafından absorbe edilerek, enerjisi, iyonizasyon sebebiyle kısa mesafede yok edilebilen, girginlik yeteneği çok az olan α taneciklerine dönüşür. Bor elementi diğer nötron tutuculara göre daha uygun bir nötron tutucudur. Çünkü diğer nötron tutucular genellikle sadece γ -ışını yayınlamaları, γ 'nin nüfuz kabiliyeti α 'ya nazaran çok daha fazla olduğundan, tutucu olarak ^{10}B izotopunun kullanılması daha uygundur. ^{10}B izotopu, bu özelliğinden dolayı, nükleer

reaktörlerde oluşan nükleer reaksiyonlarda açığa çıkan nötronlardan korunmada kullanılmaktadır [9].

Nötronlara karşı korunmada; (nötron bombası ve nükleer reaktörlerde) hidrojen zengin polimer maddelerin ^{10}B ile meydana getirdikleri bileşikler tavsiye edilmektedir. Çünkü nötron, enerjisini ancak atom numarası küçük olan elementlerle yapmış olduğu çarpışma sayesinde kaybetmektedir. ^{10}B izotopu da nötron absorblamak suretiyle yardımcı olmaktadır. İçerisinde B_4C (bor karbür) ihtiva eden ve ticari saflıktaki alüminyum ile kaplanmış olan boral adı verilen bir madde, termal nötronların absorblanmasında kullanılmaktadır. Bu şekilde hazırlanmış 6,4 mm'lik bir bor levhası 640 mm kalınlığındaki bir beton levhanın nötronlar için göstermiş olduğu absorblama kuvvetine sahiptir. Hafifliği dolayısıyla gemi ve diğer hareketli yerlerdeki reaktörlerde tercihen boral kullanılmaktadır. Nükleer reaktörler de ^{10}B 'lu çelik çubuklar, kontrol çubukları olarak nükleer reaksiyonu kontrol etme işinde kullanılmaktadır [10].

2.2.Borun Tarihçesi

1702 Borik asit ilk kez İtalya'da laboratuvar ölçeğinde üretildi.

1830 İtalya'da ilk borik asit endüstriyel olarak üretildi.

1852 Şili'de ilk ticari bor madeni işletmeciliği açıldı.

1861 İlk Osmanlı maden yasası çıkarıldı.

1864 Kaliforniya'da ilk ticari bor üretimi yapıldı.

1865 Aziziye/Susurluk bölgesindeki pandemit'in (kalsiyum borat) işletme hakkı Compaigne Industrielle Desmazures şirketine verildi. Böylece Türkiye'de ilk bor madenciliği başladı ve şirket Türkiye orijinli madeni kullanarak Fransa'da bir boraks rafineri tesisi kurdu.

1872 Nevada ve Kaliforniya'da ilk üleksit cevheri bulundu ve üretime başlandı.

1881 Death Valley Boraks rezervi bulundu.

1885 Borate/Kaliforniya bor rezervi bulundu.

1887 Aziziye rezervi işletme hakkı 50 yıllık süre ile Compaigne Industrielle des Mazures'e verildi.

1887 Sultançayır rezervi Charles Hanson & Co. Şirketi tarafından işletilmeye başlandı.

1887 İngiltere'de kurulan The Borax Company şirketi, Compaigne Industrielle des Mazures'ın Aziziye rezervindeki çoğunluk hissesini satın aldı.

1899 Borax Consolidated Limited (BCL) şirketi kuruldu.

1899 Des Mazures'e ait sahalar BCL tarafından satın alındı.

1913 Kramer bor yatakları bulundu. 1. Dünya savaşı yılları, ABD 110.000 ton/yıl boraks ile dünyanın en büyük üreticisi idi.

1935 Türkiye'de maden arama ve işletme faaliyetlerini yapmak üzere Etibank ve MTA kuruldu.

1951 Bigadiç Kolemanit rezervleri özel şirketler tarafından işletilmeye başlandı.

1954 BCL Türkiye'deki madencilik faaliyetlerini geliştirmek amacıyla Türk Boraks Madencilik A.Ş.'ni kurdu.

1954 Sultançayırı maden ocağının kapatıldı.

1958 Etibank tarafından Emet yataklarında ilk cevher üretimi yapıldı.

1959 Türkiye'nin ilk cevher ihracatı gerçekleşti.

1960 Türk Boraks Madencilik A.Ş. ve Türk ortakları tarafından Kırka Sodyum Borat yatakları bulundu.

1964 Etibank 20.000 ton/yıl boraks dekahidrat üretimi kapasiteli ilk tesisini işletmeye açtı.

1968 Bakanlar Kurulu kararı ile Türk Boraks Madencilik A.Ş.'nin tüm maden arama ve işletme hakları Etibank'a devredildi.

1975 Bandırma Sodyum Perborat Tesisi işletilmeye başlandı.

1978 2172 sayılı yasa ile Bor rezervlerinin tüm madencilik ve işletme hakları Etibank'a verildi.

1984 Kırka 1. Bor Türevleri Tesisi işletmeye alındı.

1987 Bandırma 2. Borik Asit Tesisi işletmeye alındı.

1996 Kırka 2. Boraks Pentahidrat Tesisi işletmeye alındı.

2001 Kırka 3. Boraks Pentahidrat Tesisi işletmeye alındı.

2004 Emet Borik Asit Tesisi üretime başladı [11].

2.3. Tabiattaki Önemli Bor Kaynakları

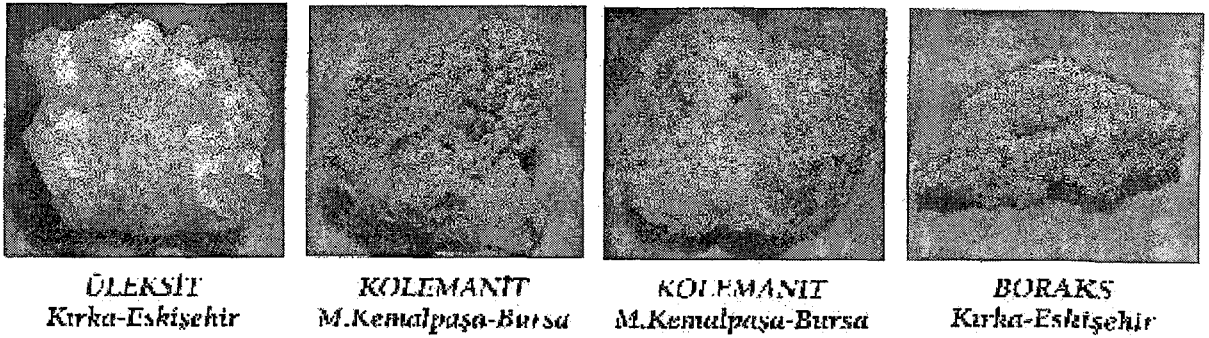
Doğada magnetik metamorfik kayalarda bor, borosilikat, tortul kayalarda ise daha çok boratlar halinde bulunur. 200'ün üzerinde çeşitli türde bor minerali vardır. Bunların büyük bir kısmı nadir olarak bulunur ve ticari önemleri yoktur. Ticari önemi olanların çoğu borun oksijenli ve toprak alkalileri ile bileşikleridir. Bu bor mineralleri, bileşimlerinde bulunan alkali ve toprak alkali elementlerin oranlarına, kristal yapılarına ve ihtiva ettikleri su miktarlarına göre değişik isimler alırlar. Ticari değeri olan bor minerallerinin isimleri, kimyasal formülleri, içerdikleri B, B₂O₃ ve H₂O oranları Çizelge 2.2'de verilmiştir [12].

Çizelge 2.2 Ticari değeri olan bor mineralleri

Adı	Kimyasal formülü	%B	%B ₂ O ₃	% H ₂ O
Tinkal (Boraks)	Na ₂ O.2B ₂ O ₃ .10H ₂ O	11,4	36,5	47,2
Kolemanit	2CaO.3B ₂ O ₃ .5H ₂ O	15,7	50,8	21,9
Üleksit	Na ₂ O.2CaO.5B ₂ O ₃ .16H ₂ O	13,3	42,9	35,6
Kernit(Razorit)	Na ₂ O.2B ₂ O.4H ₂ O	15,8	50,9	26,4
Pandermit	4CaO.5B ₂ O ₃ .7H ₂ O	15,4	49,8	18,1
Borasit	5MgO.MgCl ₂ .7B ₂ O ₃	19,3	62,2	-
Borik asit	B ₂ O ₃ .3H ₂ O	17,5	56,4	43,6

Kalsiyum borat hidrat yapısında olan kolemanit, ticari önemi büyük olan ve bol miktarda bulunan önemli bir bor mineralidir. Kristal sistemi monoklinikdir. Prizmatik kristaller halinde veya masif agregatlar halinde bulunur. Sertliği 4,5, yoğunluğu 2,42'dir ve parlaklığı camsıdır. Beyaz, sarımsı beyaz veya çamurlu beyaz renklindedir ve saydamdır [12].

Dünyanın bilinen bor kaynaklarının büyük çoğunluğu tinkal, kolemanit ve üleksittir. Ticari açıdan önemli olan bu cevherler Türkiye, ABD, BDT(eski SSCB), Arjantin ve Şili olmak üzere beş ülkede üretilmektedir. Rezerv açısından Türkiye birinci sırada olmasına karşın üretim açısından ABD birinci sırada yer almaktadır [13].



Şekil 2.2 Türkiye'deki en önemli bor bileşiklerinin resimleri.

2.4. Bor Mineralleri

2.4.1. Kristal suyu içeren boratlar

Çizelge 2.3. Kristal Suyu İçeren Boratlar

Adı	Formülü
Kernit(Razorit)	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Tinkalkonit	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Boraks(Tinkal)	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$
Sborgit	$\text{NaB}_5\text{O}_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Eakwrit	$\text{Na}_4\text{B}_{10}\text{O}_{17} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Probertit	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Üleksit	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Nobleit	$\text{CaB}_6\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Gowerit	$\text{CaB}_6\text{O}_{10} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Florovit	$\text{CaB}_2\text{O}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Kolemanit	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Meyerhofferit	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
İnyoit	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 13\text{H}_2\text{O}$
Preseit(Pandermit)	$\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{19} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Tecrit	$\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{19} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Ginorit	$\text{Ca}_2\text{B}_{14}\text{O}_{23} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Pinnoit	$\text{MB}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Kaliborit	$\text{HKMg}_2\text{B}_{12}\text{O}_{21} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
Kurnakovit	$\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
Predorashenskit	$\text{Mg}_3\text{B}_{10}\text{O}_{18} \cdot 4 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$
Hidroborasit	$\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
İnderborit	$\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
Larderellit	$(\text{NH}_4)_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Ammonioborit	$(\text{NH}_4)_3\text{B}_{15}\text{O}_{20} \cdot (\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Veatçit	$\text{SrB}_6\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
p-Veatçit	$(\text{Sr, Ca}) \text{B}_6\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Kernit, (Na₂B₄O₇.4H₂O)

Kristal sistemi monoklinikdir. Tabiatta renksiz, saydam uzunlamasına iğne şeklinde küme kristaller şeklinde bulunur. Sertlik 3, özgül ağırlığı 1,95 gr/cm³ ve B₂O₃ içeriği %51'dir. Soğuk suda az çözünür. Kırka'da Na-borat kütlelerinin alt seviyelerinde yer alır. Dünyada ise Arjantin ve ABD'de bulunur [14,15].

Boraks, (Tinkal), (Na₂B₄O₇.10H₂O)

Monoklinikdir. Tabiatta genellikle renksiz ve saydam olarak bulunur. Ancak içindeki bazı maddeler nedeniyle pembe, sarımsı, gri renklerde de bulunabilir. Sertliği 2-2,5, özgül ağırlığı 1,7 gr/cm³ B₂O₃ içeriği %36,6'dır. Tinkal suyunu kaybederek kolaylıkla tinkalkonite dönüşebilir. Kille ara katkılı tinkalkonit ve üleksit ile birlikte bulunur. Ülkemizde Eskişehir-Kırka yataklarında üretilmektedir [14,15].

Üleksit, (NaCaB₅O₉.8H₂O)

Trikilindir tabiatta masif karnabahar şeklinde, lifsi ve sütun şeklinde bulunur. Saf olanı, beyaz rengin tonlarındadır. İpek parlaklığında olanları da vardır. Genellikle kolemanit, hidroboraksit ve probertit ile birlikte teşekkül etmiştir. B₂O₃ içeriği % 43'tür. Ülkemizde Kırka, Bigadiç ve Emet yörelerinde, dünyada ise Arjantin'de bulunmaktadır [14,15].

Kolemanit, (Ca₂B₆O₁₁.5H₂O)

Monokilindir. Monoklinik sistemde kristalleşir. Sertliği 4-4,5 , özgül ağırlığı 2,42 gr/ml'dir. B₂O₃ içeriği % 58'dir. Suda yavaş, asitte (HCl) hızla çözünür. Bor bileşiklerinde en yaygın olanıdır. Türkiye'de Emet, Hisarcık, Bigadiç ve Kestelek'te dünyada ise ABD'de bilinen birçok yatak vardır [14,15].

Pandermit, (Ca₄B₁₀O₁₉.7H₂O)

Keskin olmamakla beraber trikilindir. Beyaz renkte ve masif olarak teşekkül etmiş olup kireç taşına benzer. Ülkemizde Sultan çayırı ve Bigadiç yataklarında pandermit gözlenmektedir. B₂O₃ içeriği %49,8'dir [14,15].

Probertit, (NaCaB₅O₉.5H₂O)

Monokilindir. Kirli beyaz, açık sarımsı renklerde olup ışınal ve lifsi şekilde kristaller halinde bulunur. Kristal boyutları 5 mm ile 5 cm arasında değişir. B₂O₃ içeriği %49,6'dır. Kestelek yataklarında üreksit ikinci mineral olarak gözlenir. Ancak Emet'te tek düze tabakalı birincil olarak ve Doğanlar, İğdeköy bölgesinde kalın tabakalı olarak oluşmuştur [14,15].

Hidroborasit, (CaMgB₆O₁₁.6H₂O)

Bir merkezden ışınsal ve iğne şeklindeki kristalleri rasgele yönlendirilmiş ve birbirini kesen kümeler halinde bulunur. Lifsi bir dokuya sahiptir. B₂O₃ içeriği %50,5'tir. Beyaz renkte, bazen sarı ve kırmızımsı renklerde (Arsenik içeriğine göre) kolemanit, üleksit, probertit, tunellit ile birlikte bulunur ülkemizde en çok Emet, Doğanlar ve İğdeköy yörelerinde ve Kestelekte oluşmuştur [14,15].

Tinkalkonit, (Na₃B₄O₇.5H₂O)

Hegzagonaldir. Sertliği bilinmemektedir. Yoğunluğu 1,88 gr/cm³'tür. Toz halde bulunur. Beyaz renkte, opak ve mattır. Diğer boratların hidrasyon ve dehidrasyon ürünüdür [14,15].

2.4.2. Bileşik boratlar (hidroksil ve /veya diğer tuzlar ile)

Borasit, (Mg₃B₇O₁₃Cl)

Ortorombiktir. Sertliği 7-7,5 , yoğunluğu 2,95 gr/cm³ tür. Kristalleri kübik, dodekahedral, tetrahedraldir. İnce taneli veya lifli yapıda bulunur. Renksiz, beyaz, gri, soluk yeşil ile koyu yeşil arası renklindedir [11].

Szaybelit, (MgBO₃H)

Ortorombiktir. Sertliği 3-3,5, yoğunluğu 2,6 gr/cm³ tür. Lifli veya yumrulu yapıda bulunur. Beyaz - saman sarısı arası renklindedir [11].

Çizelge 2.4. Bileşik Boratlar (hidroksil / veya diğer tuzlar ile)

Adı	Formülü
Teepleit	Na ₂ B(OH) ₄ Cl
Bandilit	CuB(OH) ₄ Cl
Hilgardit	Ca ₂ B ₅ O ₈ (OH) ₂ Cl
Borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl
Fluoborit	Mg ₃ F ₃ (BO ₃)
Hambergit	Be ₂ (OH, F) BO ₃
Suseksit	MnBO ₃ H
Szaybelit	MgBO ₃ H
Roveit	Ca ₂ Mn ₂₂ +((OH) ₄ (B ₄ O ₇ (OH) ₂))
Seamanit	Mn ₃₂ +(OH) (B(OH) ₄ (PO ₄))
Viserit	Mn ₄ B ₂ O ₅ (OH, Cl) ₄
Lüneburgit	Mg ₃ (PO ₄) ₂ B ₂ O ₃ .8H ₂ O
Kahnit	Ca ₂ Ba ₅ O ₄ (OH)

2.5. Dünyada ve Türkiye’de Bor Rezervleri ve Bulunuş Şekilleri

Yapılan araştırmaların sonuçlarına göre, ülkemizin dünya bor rezervlerindeki payı yüzde 63, dünyadaki en büyük üretici durumundaki US Borax'ın kontrolü altında işletilen bor rezervlerinin (ABD ve Arjantin'deki rezervler) payı ise yüzde 12 civarındadır. Bu veriler, Türkiye'nin dünyadaki en büyük bor kaynaklarına sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Büyüklüğü yanında önemli bütün ticari mineralleri de içermesi dolayısıyla bor rezerv kalitesinin yüksekliği, Türkiye'ye bu alanda önemli bir uluslararası karşılaştırmalı üstünlük sağlamaktadır.

Ülkemiz rezervleri ağırlıklı olarak kolemanitten oluşmaktadır. Ülkemizde 1,4 milyar ton dolaylarındaki kolemanit rezervine karşılık diğer ülkelerdeki toplam kolemanit rezerv miktarı 100 milyon ton civarındadır. Bu değerler, üretimde kolemanit kullanımının daha ekonomik ve/veya zorunlu olacağı tüm üretim alanlarında büyük avantajımızın ve potansiyel karşılaştırmalı üstünlüğümüzün varlığını da ortaya koymaktadır [16].

2.5.1. Dünya Bor Pazarının Yapısı

Dünya bor pazarı, sınırlı üretici olması ve ürün grubunun birbirlerini ikame edebilme özelliklerinin ürün çeşitlendirmesi gerektirmesi nedeniyle, diğer maden ve metal pazarlarından çok ayrı bir yapıya sahiptir. Dünya bor tüketiminde, cevherden rafine bor ürünlerine hızlı bir geçiş vardır. Bu durum, cevher üreticilerinin rafine ürün pazarına daha büyük oranda girmelerini ve rafine ürün kapasitelerini büyük yatırımlar yapmak suretiyle artırmalarının gereğini gündeme getirmektedir.

Tüm bu unsurlar da göstermektedir ki bor konusunda çok büyük yatırımlar, sürekli teknolojik yenilenme ve dünya çapında bir pazarlamayı içeren entegre bir işletmecilik zorunludur. Ancak, dünya bor pazarının yapısı nedeniyle bor ürünlerinin üretim teknolojileri, diğer birçok üründe olduğu gibi kolay ulaşılan teknolojiler değildir. Türkiye'nin rafine mamul üretimi alanındaki ilk yatırımları, Batı Avrupa'nın teknoloji transferindeki katı tavrı nedeniyle o zamanki Doğu Bloku ülkelerinin nispeten daha geri teknolojilerinin alınması ile gerçekleştirilebilmiştir.

Dünya bor pazarının diğer maden veya metal borsalarında, piyasa şartlarında oluşan fiyatlara göre alım-satım işlemlerinin gerçekleştirildiği bir pazar olarak değerlendirilmesi de büyük bir yanılığı olur. Bu piyasadaki fiyatlar, ürün ve pazar şartları dikkate alınarak belirlenen yapay denge fiyatlarıdır. Dolayısıyla bütün faktörleri bir arada değerlendirmeden alınacak kararların olumlu sonuç vermeyeceği aşıkardır [17,18].

Çizelge 2.5. Dünya'da ve Türkiye'de bor madeni rezervleri

Ülke	İşletilen	Rezerv İşletilen	Rezerv Bilinen	Rezerv	Rezerv %
	Miktarı	%	Miktarı	Bilinen	
Türkiye	320.000.000	66 %	803.000.000	63%	
ABD	60.000.000	12 %	209.000.000	16%	
Kazakistan	54.000.000	11 %	136.000.000	11%	
Çin	27.000.000	6 %	36.000.000	3%	
Güney Amerika	27.000.000	6 %	91.000.000	7%	
Toplam	488.000.000	100 %	1.275.000.000	100%	

Çizelge 2.6. Türkiye Bor Tuzu Rezervi (x 1000 ton)

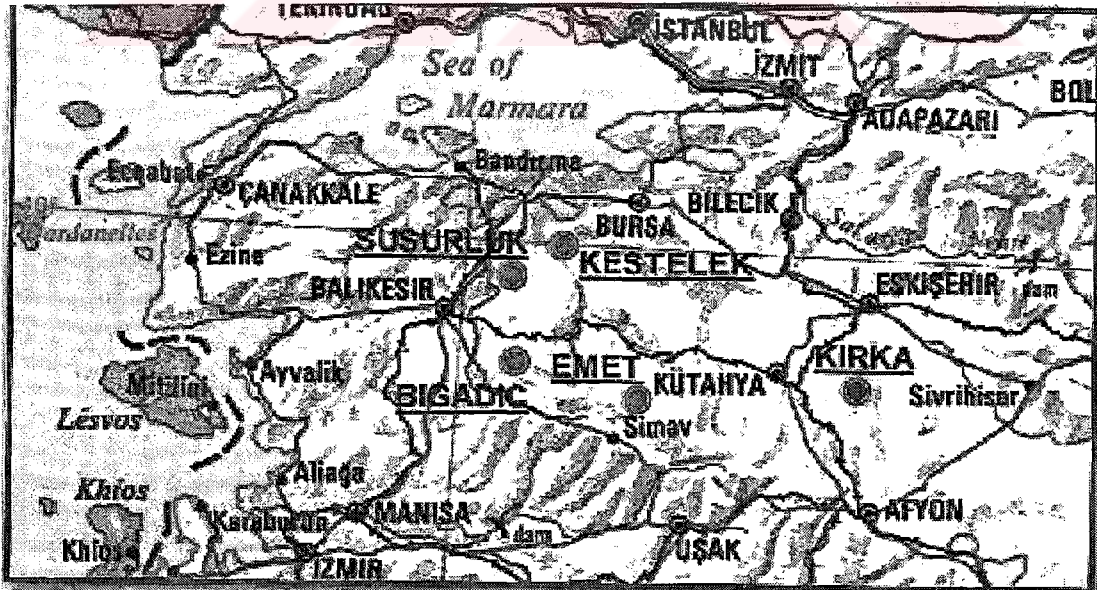
Yeri		Rezerv	%B ₂ O ₃	Cinsi
Emet KÜTAHYA	Hisarcık 1	29.107	27	Kolemanit
	Hisarcık 2	2.795	16	Kolemanit
	Espey	210.917	40	Kolemanit
	Doğanlar	643.924	40	Kolemanit
	İğdeköy Üleksit			
Bigadiç BALIKESİR	Üst Boratlı	95.128	35	Kolemanit
	Seviye Üleksit			
	Alt Boratlı	934.594	35	Kolemanit
	Seviye Üleksit			
BURSA	Kestelek	8.142	40	Kolemanit
ESKİŞEHİR	Kırka	518.535	25	Tinkal
TOPLAM		2.443.142		
REZEVR				

Çizelge 2.7. Türkiye Bor Tuzu ve Bazında Rezervlerin Havzalara Dağılımı

Yeri	Rezerv	Tenör %B ₂ O ₃	B ₂ O ₃ Bazında Rezerv	Toplam Rezervde % Oranı
EMET	886.743	35	310.360	38,64
BİGADIÇ	1.029.722	35	360.403	44,86
KESTELEK	8.142	35	2.850	0,36
KIRKA	518.535	25	129.634	16,14
TOPLAM	2.443.142		803.247	100

2.6. Bor Üretimi

Türkiye’de bor madenlerinin işletilmesi tamamen bir devlet kuruluşu olan Etibank tarafından gerçekleştirilmektedir. Etibank’ın bor madenleri işletmesi ya da müesseselerinden Kırka’da tıncal yatakları, Emet-Hisarçık’ta kolemanit ve üleksit yatakları açık işletme metotları ile işletilmektedir. Bigadiç kolemanit ve üleksit yatakları ile Kestelek’te bulunan kolemanit ve üleksit yatakları ise hem kapalı, hem de açık işletme yöntemleri uygulanmaktadır [7].



Şekil 2.3 Ülkemizde en önemli bor rezervlerinin bulunduğu bölgeler

Üretilen bu cevherin zenginleştirilmesi amacıyla kurulan konsantratör tesisleri, kapasiteleri ile birlikte aşağıdaki Çizelge 2.8.'de verilmiştir [7].

Çizelge 2.8. Bor cevheri sektöründe kurulu kapasite durumu

İşletme	Ürün Adı	Kapasite Birimi	Kapasite 1993
Emet Kolemanit İşle. Mües. Müdürlüğü	1.Kolemanit Cevheri	Ton/Yıl	1.080.000
	2.Kolemanit Konsantresi	Ton/Yıl	500.000
Bigadiç Madenleri İşle. Mües. Müdürlüğü	3.Kolemanit + Üleksit Cevher	Ton/Yıl	600.000
	4.Kolemanit + Üleksit Konsantresi		400.000
Kestelek Bor Madenleri İşle. Mües. Müdürlüğü	1.Kolemanit Cevheri	Ton/Yıl	90.000
	2.Kolemanit Parça+Konsantresi		54.000
Kırka Boraks İşle. Mües. Müdürlüğü	1.Tinkal Cevheri	Ton/Yıl	1.180.000
	2.Tinkal Konsantresi		800.000
TOPLAM		Ton/Yıl	2.950.000
			1.754.000

Dünyanın ikinci büyük bor üreticisi olan ülkemizde üretimleri, hammadde ve konsantre ürün ile bor türevleri olarak ikiye ayırabiliriz [7].

Türkiye'de Etibank tarafından 1990 yılında kadar olan bor cevheri ve konsantre ürünü üretimi aşağıda Çizelge 2.9.'de verilmiştir [17].

Çizelge 2.9. Türkiye'deki bor cevheri ve bor konsantresi üretimi

Ürün	Bor Cevheri					Bor Konsantresi (1000 Ton)				
	1986	1987	1988	1989	1990	1986	1987	1988	1989	1990
Kolemanit	360	313.7	424.4	1076	1096	111.7	135.5	147	570	588
Üleksit	14.5	-	-	175	180	130.3	108.8	188.3	119	125
Tinkal	-	-	-	732	800	278.6	300	298.3	485	535

Türkiye'de hammadde veya konsantre bor üretimi yanı sıra ara ürün de Etibank tarafından yapılmaktadır. Etibank Bandırma ve Kırka tesislerinde üretim miktarı aşağıdaki Çizelge 2.10.'de gösterilmektedir [17,18].

Çizelge 2.10. Türkiye’de bor türevleri üretimi yapan kuruluşlar ve kapasiteleri

Müesseseler	Tesis	Kuruluş Yılı	Ürün Cinsi	Kapasite(ton/yıl)
Etibank Bandırma	Boraks	1968	Boraksdekahidrat	55 000
Boraks ve Borik Asit Fabrikaları İşletmeleri	Borikasit	1968	Borikasit	35 000
	Na-perborat	1975	Sodyum perborat	20 000
Etibank Kırka Boraks İşletme Müdürlüğü	Bor Türevleri	1984	Boriksdekahidrat	17 000
			Borakspentahidrat	160 000
			Susuz Boraks	60 000

Dünyada bor mineralleri ve türevleri üreten ülkelerin başında ABD yer almaktadır. ABD’nin bor üretimi uzun yıllar iç pazarın olduğu kadar dış pazarın da büyük bir bölümünün ihtiyacını karşılamıştır. ABD’nin bor minerali rezervleri, bugünkü düzeyi ile uzun dönem üretimi için fazlasıyla yeterlidir. Ancak, dünya talebindeki artış, yeni kaynaklara yönelmeyi zorunlu kılmaktadır. Bor minerali bulunan bazı Asya ve Güney Amerika ülkelerinin de, daha az olmakla beraber, gelecekteki talebi karşılamak için üretimlerini arttırmaları beklenmektedir. Dünya bor cevheri üretim miktarları ve Pazar payları Çizelge 2.11.’gösterildiği şekilde gerçekleşmiştir [7].

Çizelge 2.11. Dünya bor cevheri üretimi(x1000 ton)

Ülkeler	1980 Üretimleri			1985 Üretimleri		
	Ham	B ₂ O ₃	%Payı	Ham	B ₂ O ₃	%Payı
ABD	1344	710	53.9	1151.0	571.0	47.4
Türkiye	777.6	310.6	31.2	980.4	392.2	37.6
SSCB	200	70	8.1	199.5	39.9	7.9
Arjantin	125	54.6	5.0	140.6	29.9	5.5
Çin	27	9.5	1.1	27.2	6.0	1.1
Peru	16	7.3	0.6	10.0	3.0	0.4
Şili	3.2	1.3	0.1	3.6	0.5	0.1
Finlandiya	2.4	-	-	-	-	-
Toplam:	2494.2	1163.3	100	2503.3		100

ABD'de borat üretiminin tümü Kaliforniya'da üç şirkete ait işletmelerde gerçekleştirilmektedir. 1980 yılında dünya üretiminin yaklaşık %54'ünü karşılayan ABD'nin bu payı 1985 yılında %47'ye düşmüştür. ABD'nin üretimindeki azalış, Türkiye tarafından karşılanmış ve 1980'de %31 olan payı 1985 yılında %38'e yükselmiştir.

Dünyanın en büyük bor ünitesi olan US Borax ve Cheminal Corp.'ın yaklaşık 500000 ton (B₂O₃ bazında) olan üretimi Kaliforniya'nın Kern bölgesindeki Kramer Borat havzasından sağlanmaktadır. Ana cevher tinkalden başka kernit, kolemanit ve üleksit de içeren Kramer bor yatağı yaklaşık 3.5 km uzunluğunda ve 1 km genişliğinde elips bir sahaya yayılmıştır. 100-300 m derinlikte bulunan yatağın kalınlığı 20-25 m arasında değişmektedir. Toplam rezervin 30 milyon ton B₂O₃ olarak tahmin edildiği Kramer yatağı için ekonomik ve teknik açıdan üretilmesi mümkün olmayan kısımları ve üretim kayıpları göz önüne alınarak 40 yıllık rezervi olduğu hesaplanmıştır [7].

Dünya bor üretiminde, sosyalist ülkeler dışındaki bölgelerde görünür üretim yıllık ortalama artış hızının %7 civarında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Dünya bor mineralleri üretimin yaklaşık %85'ini elinde tutan Türkiye ve ABD, dünya bor üretimi ve ticaretinin odak noktasını teşkil etmektedir ve bu konularının daha uzun yıllar devam edeceği göz önünde tutulduğunda üretimdeki artış hızının da aynen muhafaza edebileceği söylenebilir [19].

2.7. Türkiye’de Bor Üretim Yönetimi ve Teknolojisi

Özellikle açık ocak yönetimiyle yapılan üretimde öncelikle, örtü tabakasının kaldırılması gerekmektedir. Delme-patlatma ile gevşetilen örtü tabakası kaldırılarak cevher üretime geçilebilmektedir [20].

2.7.1. Dekapaj

Bor İşletmelerinin dördünde de açık ocak üretim yönetimi mevcuttur. İşletmelerde dekapaj müteahhit firmalara da yaptırılmaktadır. 1998 yılı sonu itibariyle en yüksek toplam dekapaj 5.790.683 m³ ile Emet’te gerçekleşmiştir [20].

2.7.2. Üretimler

Rapor konusu olan Bor bileşikleri doğal bor cevherlerinden elde edilebilir. Türkiye’de büyük rezervlere sahip olan iki ana cevherden, tinkal ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) ile kolemanitten ($2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) bor ve bor bileşikleri elde edilmektedir. Türkiye’de önemli tinkal yatakları Kırka’da, önemli kolemanit yatakları ise Emet ve Bigadiç civarında bulunmaktadır. Bor mineralleri, bileşikleri ve türevleri üretimi Eti Bor A.Ş.’ye bağlı 5 müessese tarafından yapılmakta olup, bu müesseselerde uygulanan maden işletme, zenginleştirme ve türev üretme yöntem ve teknolojileri aşağıda verilmiştir.

Diğer önemli bir bor minerali olan Üleksit ise Bigadiç’te açık ocak yöntemiyle üretilmektedir [20].

2.7.2.1. Eti Bor A.Ş. Bor İşletmeleri faaliyetleri

Emet Bor İşletmesi

Türkiye bor mineralleri açısından önemli bir rezervi olan Kütahya-Emet yatağı 1956 yılında MTA Jeologu Dr.Gawlik tarafından bulunmuştur. 12.08.1958 tarihinde bölgedeki bor sahaları MTA tarafından Etibank’a devredilmiştir. 1957’den 1979’a kadar bölgede özel sektör tarafından üretim yapılmıştır [20].

MTA tarafından Etibank’a devredilen sahalar; güneyde Hisarcık’a 4 km mesafedeki Hamam köyü ile kuzeyde Emet’e 3,5 km mesafedeki Espey bölgesini içine almaktadır [20].

Espey bölgesinde 1969 yılından itibaren üretim yapılan yeraltı ocağı; 1990 yılında açık işletmeye dönüştürülmüştür. 1973 yılında Hisarcık ve 1997 yılında ise Espey Konsantratörü devreye alınmıştır.

Hisarcık ve Espey Açık Ocaklarından üretilen cevher yine buralardaki konsantratörlerde zenginleştirilerek satışa hazır hale getirilmektedir. Hisarcık konsantratörü tüvanan cevher işleme

kapasitesi 9.000.000 ton/yıl ve konsantre cevher üretim kapasitesi ise 450.000 ton/yıl'dır. Espey konsantratörü cevher işleme kapasitesi 300.000 ton/yıl ve konsantre kolemanit elde etme kapasitesi ise 120.000 ton/yıl'dır.

Emet bölgesinde yapılan kolemanit üretimi iki adet açık işletmeden (Espey ve Hisarcık) yapılmaktadır. İşletmede basamak genişliği 12 m, basamak yüksekliği 10 m, genel şev açısı 45° ve basamak şev açısı 80° olarak seçilmiştir. Üretilen tüvanan cevheri zenginleştirmek amacı ile açık işletmenin bulunduğu Hisarcık bölgesine kurulan konsantratörde yapılan başlıca işlemler kırma, klasifikasyon ve yıkamadan oluşmaktadır. Hisarcıktaki açık işletmeden elde edilen tüvanan tenoru yaklaşık %29 B₂O₃ olup, konsantratör tesisi çıkış tenoru %42 dolayında gerçekleşmektedir [20].

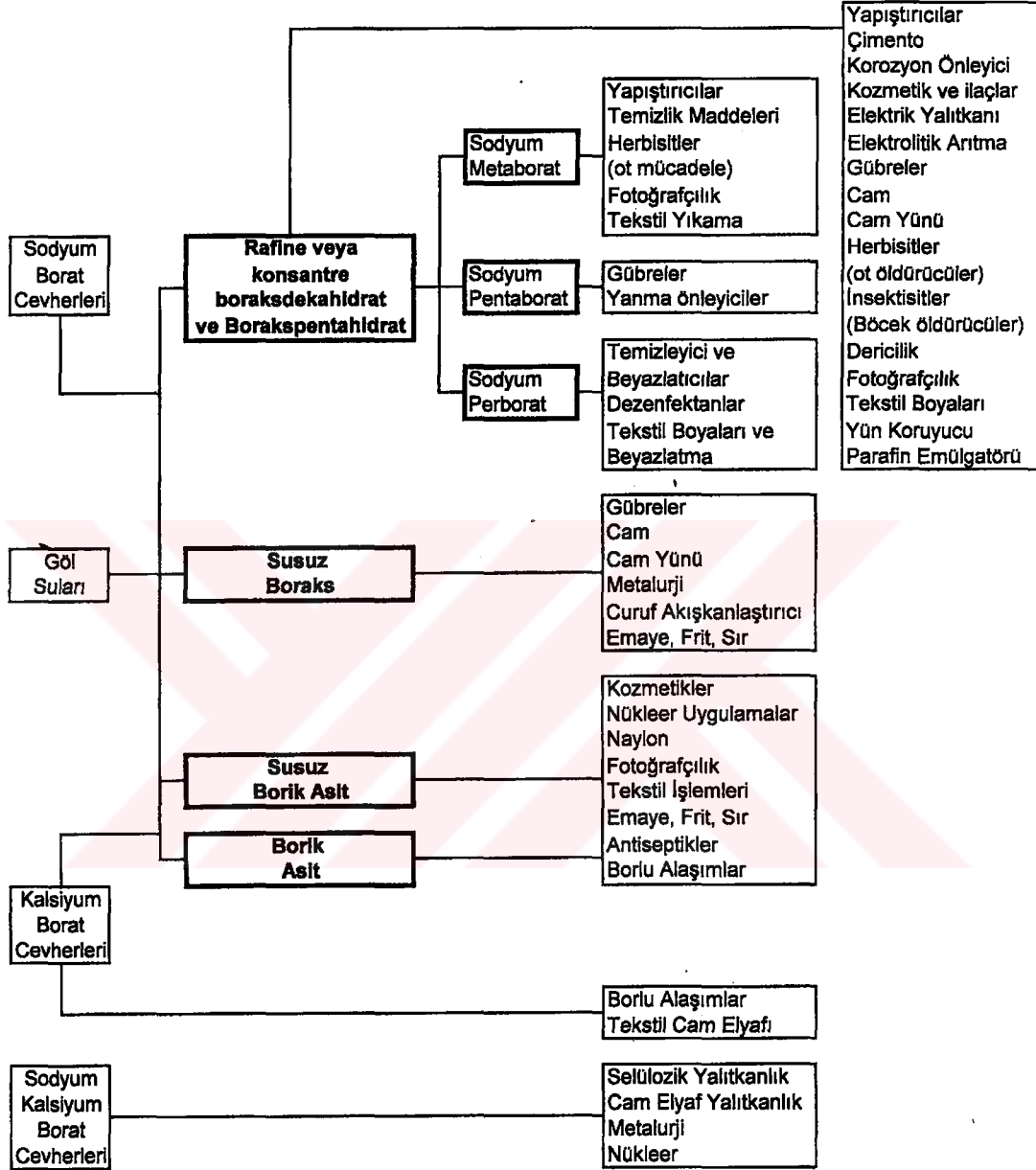
Çizelge.2.12. Emet Bor İşletmesi Üretim Miktarları

Adı	Yıllar (x1000 ton)				Yıllık artış(%)		
	1995	1996	1997	1998	1996	1997	1998
Hisarcık Tüv. Kolemanit	505	556	610	800	10,1	9,71	31,15
Espey Tüv. Kolemanit	150	180	172	183	20	-4,44	6,40
Hisarcık Tüv.Koleman	284	299	324	269	5,28	8,36	-16,98
Espey Tüv. Koleman	68	58	73	79	-14,71	25,86	8,22

2.8. Bor Mineralleri ve Bileşiklerinin Kullanım Alanları

Çok çeşitli sektörlerde kullanılan bor mineralleri ve ürünlerinin kullanımı giderek artmaktadır. Üretilen bor minerallerinin %10'a yakın bir bölümü doğrudan mineral olarak tüketilirken geriye kalan kısmı bor ürünleri elde etmek için kullanılmaktadır. Çizelge 2.1.'de bor mineral ve bileşiklerinin kullanım alanları verilmiştir [14].

Çizelge 2.13. Bazı Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları



- Cam sanayi
- Seramik sanayi
- Temizleme ve beyazlatma sanayi
- Yanmayı önleyici (geciktirici) maddeler

- İlaç ve Kimya Sanayi
- Tarım
- Metalürji
- Enerji depolama
- Arabalardaki hava yastıklarında
- Atık temizleme işlerinde
- Pigment ve kurutucu olarak
- Nükleer uygulamalar
- Diğer kullanım alanları

ABD, Batı Avrupa ve Japonya'da bor mineralleri ve ürünlerinin kullanım alanları farklıdır. ABD'de en çok tüketim fiberglas yalıtım sanayinde olmaktadır. Batı Avrupa'da ise sabun ve deterjan sanayi bor tüketiminde öndedir. Japonya'da en büyük bor tüketimi tekstil ve fiberglas sanayinde gerçekleşmektedir [14].

2.8.1. Cam sanayi

Bor; pencere camı, şişe camı vb. sanayilerde ender hallerde kullanılmaktadır. Özel camlarda ise borik asit vazgeçilemeyen bir unsur olup, rafine sulu/susuz boraks, borik asit veya kolemanit/boraks gibi doğal haliyle kullanılmaktadır. Çok özel durumlarda potasyum pentaborat ve bor oksitler kullanılmış haldeki cam ara mamulüne katıldığında onun viskozitesini artırıp, yüzey sertliğini ve dayanıklılığını arttırdığından ısıya karşı izolasyonunun gerekli görüldüğü cam mamullerine katılmaktadır. Dünyada borun %42'si, ABD'de ise %71'i cam endüstrisinde tüketilmektedir [14].

Cam elyafı: Kullanılan bor oksidin ABD'de %40'ı, Batı Avrupa'da %14'ü yalıtımlı cam elyafına harcanmaktadır. Ergimiş cama %7 borik oksit verecek şekilde boraks pentahidrat veya üleksit- probertit katılmaktadır. Maliyetine bağlı olarak sulu veya susuz tipleri kullanılmakta, bazı hallerde de borik asitten yararlanılmaktadır. Arzulanan yalıtım derecesine göre çeşitli spesifikasyonlar tanımlanır: R-1, R-7 vb. gibi. Roll, lift veya sünger halinde imal edilmektedir. Binalarda yalıtım amacıyla kullanılmaya başlanmıştır.

Hafifliği, fiyatının düşüklüğü, gerilmeye olan direnci ve kimyasal etkilere dayanıklılığı nedeniyle plastiklerde, sınav elyaf vb. de, lastik ve kağıtta yer edinmiş olan cam elyaf, kullanıldığı malzemelere dayanıklılık ve sertlik kazandırmaktadır. Böylece sertleşmiş plastikler

otomotiv, uçak sanayinde, çelik ve diğer metalleri ikame etmeye başlamıştır. Ayrıca spor malzemelerde de (kayaklar, tenis raketleri vb.) kullanılmaktadır. Yapılmakta olan araştırmalar yeni kullanım alanlarının da olacağını göstermektedir. Trafik işaretleri, karayolu onarımı birer örnek olarak verilebilir. Bu gibi mamullerde E tipi camı kullanıldığından, rafine kolemanit tercih edilmektedir. E tipi cam elyafı, en çok kullanılan tür olup %90 uygulamada tercih edilmektedir. İngiltere’de oto başına 75 kg cam yünü tüketilmektedir. Fransa’da Renault firması, üzerine polyester paneller monte edilen metal şasi imalatına girmiştir. B_2O_3 ’e olan toplam talebin ABD’de %13’ü, Batı Avrupa’da % 7’si bu tür elyaftan kaynaklanmaktadır. Otomobillerde borun kullanılması, arabaların ağırlığını azaltmakta ve dolayısıyla yakıt tüketimini azaltmaktadır. Ayrıca, araçlarda paslanmayı geciktirmektedir [14].

Optik cam elyafı: Işık fotonlarını etkin bir biçimde transferinin sağlamaktadır. İngiliz Felecon’un ürettiği yeni bir elyaf saniyede 140 milyon baytı 27 km. uzağa taşıyabilmektedir. Bu lifler %6 borik asit ihtiva etmektedir. Phillips’in Hollanda’daki fabrikasında bu lifler üretilmektedir [14].

Borosilikat camlar: Camın ısıya dayanmasını, cam imalatı sırasında çabuk ergimesini ve devitrifikasyonunun önlenmesini sağlayan bor; yansıtma, kırma, parlama gibi özelliklerini de arttırmaktadır. Bor, camı aside ve çizilmeye karşı korur. Cam tipine bağlı olarak; cam eriğinin %0,5 ile %0,23’ü bor oksitten oluşmaktadır. Örneğin Pyrex’de %13,5 B_2O_3 vardır. Genellikle cama boraks, kolemanit, borik asit halinde karma olarak ilave edilmektedir. Otolar, fırınlar, çamaşır makineleri, çanak/çömlek vb. de bu tür camlar tercih edilmektedir. ABD’de bu tür cam üreten 100’e yakın firma vardır. Biri de Corning Glass Works’dur. General Electric, Andron Hocking önemliler arasında yer almaktadır [14].

2.8.2. Seramik sanayi

Emayelerin viskozitesini ve doyumlaşma ısısını azaltan borik asit %20’ye kadar kullanılabilir. Özellikle emayeye katılan ham maddelerin %17-32’si borik asit olup, sulu boraks tercih edilir. Bazı hallerde borik asit ve sulu boraks da kullanılır. Metalle kaplanan emaye onun paslanmasını önler ve görünüşüne güzellik katar. Çelik, alüminyum, bakır, altın ve gümüş emaye ile kaplanabilir. Emaye aside karşı dayanıklılığı artırır. Mutfak aletlerinin çoğu emaye kaplamalıdır. Banyolar, kimya sanayi teçhizatı, su tankları, silahlar vb. de kaplanır. 1977 yılında Batı seramik endüstrisinin borat tüketimi 69.000 ton civarında gerçekleşmiştir. Seramiği çizilmeye dayanıklı kılan bor, %3-24 miktarında kolemanit halinde sırlara katılır [14].

2.8.3. Temizleme ve beyazlatma sanayi

Sabun ve deterjanlara mikrop öldürücü (jermisit) ve su yumuşatıcı etkisi nedeniyle %10 boraks dekahidrat ve beyazlatıcı etkisini arttırmak için toz deterjanlara %10-20 oranında sodyum perborat katılmaktadır.

Çamaşır yıkamada kullanılan deterjanlara katılan sodyum perborat ($\text{NaBO}_2\text{H}_2\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) aktif bir oksijen kaynağı olduğundan etkili bir ağartıcıdır. Perboratların çamaşır yıkamada klorlu temizleyicilerin yerini alması sıcak veya soğuk su kullanımına bağlıdır. Çünkü perboratlar ancak 55 °C'nin üstünde aktif hale geçerler. Ancak, ABD'de kullanılan aktivatör (tetraetylethylenediamine) kullanımı ile bu sorun giderilmeye çalışılmıştır.

1977 yılı deterjan sanayindeki bor tüketimi; Batı Avrupa'da 242.000 ton ve Kuzey Amerika'da ise 21.000 ton'dur. Batı Avrupa'da tüketilen borun %35'i, Doğu Avrupa'da ise %5'i deterjan sanayinde kullanılmaktadır. Dünya perborat talebinin %86'sı Batı Avrupa tarafından tüketilmektedir [14].

2.8.4. Yanmayı önleyici (geciktirici) maddeler

Borik asit ve boratlar selülozik maddelere, ateşe karşı dayanıklılık sağlar. Tutuşma sıcaklığına gelmeden selülozdaki su moleküllerini uzaklaştırırlar ve oluşan kömürün yüzeyini kaplayarak daha ileri bir yanmayı engellerler. Ateşe dayanıklı madde olarak selülozik yalıtım maddelerinin kullanımı borik asit tüketiminin artmasına yol açmıştır. ABD'de kullanılmakla birlikte, son yıllarda çok fazla yaygınlaşmamıştır.

Bor bileşikleri plastiklerde yanmayı önleyici olarak giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Bu amaç için kullanılan bor bileşiklerinin başında çinko borat, baryum, metaborat, borfosfatlar ve amonyum fluoborat gelir [14].

2.8.5. Tarım

Bor mineralleri bitki örtüsünün gelişmesini arttırmak veya önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bor, değişken ölçülerde, birçok bitkinin temel besin maddesidir. Bor eksikliği görülen bitkiler arasında yumru köklü bitkiler (özellikle şeker pancarı), kaba yoncalar, alfalar, meyve ağaçları, üzüm, zeytin, kahve, tütün ve pamuk sayılmaktadır. Bu gibi hallerde susuz boraks ve boraks pentahidrat içeren karışık bir gübre kullanılmaktadır. Bu da, suda çok eriyebilen sodyum pentaborat ($\text{NaB}_5\text{O}_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) veya disodyum oktaboratın ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}$) mahsulün üzerine püskürtülmesi suretiyle uygulanmaktadır.

Bor, sodyum klorat ve bromosol gibi maddelerle birlikte otların temizlenmesi veya toprağın sterilleştirilmesi gereken durumlarda da kullanılmaktadır [14].

2.8.6. Metalürji

Boratlar yüksek sıcaklıklarda düzgün, yapışkan, koruyucu ve temiz, çapaksız bir sıvı oluşturma özelliği nedeniyle demir dışı metal sanayinde koruyucu bir cüruf oluşturu ve ergimeyi hızlandırıcı madde olarak kullanılmaktadır. Bor bileşikleri, elektrolit kaplama sanayinde, elektrolit elde edilmesinde sarf edilmektedir. Borik asit nikel kaplama, fluoborlar ve fluoborik asitler ise; kalay, kurşun, bakır, nikel gibi demir dışı metaller için elektrolit olarak kullanılmaktadır. Alaşımlarda, özellikle çeliğin sertliğini arttırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu konuda ferrobora oldukça önem kazanmıştır. Çelik üretiminde 50 ppm bor ilavesi çeliğin sertleştirilebilme niteliğini geliştirmektedir.

ABD Fliokote Company'nin aldığı bir patente BOF yöntemi ile çelik üretiminde çelik ergimesinin çabuklaştırılması ve cüruf kontrolünde flor yerine bor kullanılmasının daha avantajlı olacağı tescil edilmiştir. Kanada, Batı Almanya, Japonya ve ülkemizde çelik üretiminde florit yerine kolemanit kullanılmaktadır [14].

2.8.7. Nükleer uygulamalar

Atom reaktörlerinde borlu çelikler, bor karbürler ve titanbor alaşımları kullanılır. Paslanmaz borlu çelik, nötron absorbanı olarak tercih edilmektedir. Yaklaşık her bir bor atomu bir nötron absorbe etmektedir.

Atom reaktörlerinin kontrol sistemleri ile soğutma havuzlarında ve reaktörün alarm ile kapatılmasında (^{10}B) bor kullanılır. Ayrıca, nükleer atıkların depolanması için kolemanit kullanılmaktadır [14].

2.8.8. Süper iletkenlikte bor uygulaması

Bir grup Japon bilim adamı, bir bor bileşiği olan magnezyum diborür'ün (MgB_2), 39 K gibi yüksek bir kritik sıcaklığa sahip olması nedeniyle, geleceğin süper iletken malzemesi olabileceğini keşfettiler. Süper iletkenlik, sıcaklığın belli bir noktanın (kritik sıcaklık) altına düşürülmesi ile her türlü elektriksel direncin kaybolması durumu; genel olarak $-273\text{ }^\circ\text{C}$ olan "mutlak sıfır" noktasına yakın sıcaklıklarda gerçekleşen bir olgudur. Bu derece düşük bir sıcaklığı oluşturabilmek oldukça pahalı malzeme ve teknoloji gerektirdiğinden, örneğin büyük fizik deneyleri için gerekli süper iletkenleri yüksek sıcaklıklarda üretmeye yönelik araştırmalar yürütülmektedir.

Süper iletkenler, çok yüksek akım yoğunluklarını (cm^2 başına 1 milyon amper gibi) hiçbir enerji kaybına neden olmadan taşıyabildikleri için santrallerden şehirlere verimli enerji iletimi, güçlü mıknatıs isteyen uygulamalar (manyetik rezonans, maglev trenler vs.), büyük

miktardaki enerjinin manyetik alan depolanması ya da mikro elektronikte istenmeyen ısının önlenmesi gibi birçok uygulama alanları vardır. Ne var ki bilinen süper iletkenlerin çok düşük olan kritik sıcaklıkları, bu tür uygulamaları gerçekleştirmeye engel oluyordu. Magnezyum diborür'ün bir süper iletken olarak keşfi, bu tür çalışmalara yeni ufuklar açacağını göstermektedir.

Japon araştırmacılar, yıllarca kullanıla gelen bakır oksit süper iletkenlerinin kritik sıcaklığının yükseltilmesi konusunda kaydedilen önemli araştırmaları göz önüne alarak, kritik sıcaklığının başka malzemelerde ne ölçüde yükseltilebileceğini merak etmişlerdi. Bakır oksit olmayan malzemelerdeki süper iletkenlik için o güne kadar saptanan en yüksek değer 33 K olmuştu. Oysa magnezyum diborür üzerinde yapılan izotop etkisi ölçümleri, çoğunlukla ^{11}B biçiminde bulunan bor atomları ^{10}B atomları ile değiştirildiği zaman kritik sıcaklığın 39 K'den 40 K'e çıktığını göstermiştir. Böylece araştırmacılar, bakır oksit olmayan bir süper iletkende saptanan en yüksek kritik sıcaklık olan 39 K değerini elde etmişlerdi. Bu derece yüksek bir kritik sıcaklık, magnezyum diborürün süper iletkenlik teknolojisi için çok uygun bir malzeme olduğunu gösterir.

Japon bilim adamları bu buluşu, süper iletkenlik ile uğraşan bilim dünyasına, evrendeki pek çok başka malzemenin keşfedilmeyi beklediği ve gelecekte büyük olasılıkla başka yeni süper iletken malzemelerin bulunabileceğini göstermiştir. Magnezyum diborürün bir süper iletken malzeme olarak kullanılmasındaki tek sorun, oldukça kırılğan yapıda bir ara metalik bileşik olması; çünkü süper iletkenler kablo biçiminde üretiliyor olmasıdır. Bu nedenle araştırmacılar, önümüzdeki yıllarda, süper iletken borürlerden dayanıklı kablolar geliştirme ve bunları düşük maliyetle üretme konusuna ağırlık verecekler. Malzemelerin gerçekten de sorunsuz ve kullanışlı olması halinde bu tür kabloların 5–10 yıl sonra pazara sürüleceği tahmin ediliyor [21].

2.8.9 Enerji taşımada yeni bir olanak: sodyum borhidrür

Günümüzdeki enerji gereksiniminin %80'i fosil yakıtlardan (petrol, doğal gaz ve kömür) karşıyor. Ancak fosil yakıtlarının giderek artan miktarlarda kullanımı yerel, bölgesel küresel ölçeklerde çevre kirliliğine neden oluyor. Fosil yakıtlar çıkarılmalarından taşınmalarına, işlenmelerine ve son kullanımlarına kadar geçen tüm süreçlerde pek çok olumsuz etkiye sahiptir. En önemli etkiyse yanma şeklinde olan son kullanım sırasında görülür. Bunlar yanma ürünü olan CO_2 , SO_2 , NO_2 , hidrokarbonlar, kül, katran vb. bileşiklerdir. Ayrıca atmosferik tepkimelerle fotokimyasal oksidanlar, asit aerosolleri gibi ikincil kirleticilerin de oluşumuna neden olurlar.

Fosil yakıtlarla ilgili bir diğer darboğaz da, gittikçe azalıyor olmalarıdır. Petrol ve doğal gazın bilinen rezervleri 8×10^{21} J ve bu günkü tüketim hızıyla 40 yıl sonra bitmesi bekleniyor. Kömür rezervleri daha çok (20×10^{21} J bilinen, 150×10^{21} J olası) ama bunların çevresel etkileri daha olumsuz. Bu nedenle bol bulunan ve çevreye olumsuz etkileri daha az olan yeni enerji kaynaklarına yönelmek zorunlu hale geliyor [21].

Yeni enerji kaynakları:

- Doğrudan güneş radyasyonu
- Dolaylı güneş radyasyonu (rüzgar, dalgalar, biyokütle, hidrojen, okyanusların ısı enerjisi)
- Jeotermal enerji
- Gelgit enerjisi

Gibi çok bulunan, yenilebilir ve “temiz” enerji kaynaklarıdır. Ancak bu kaynaklar son kullanım için uygun değildir. Bir ara enerji taşıyıcıya gereksinim vardır. Elektrik enerji taşıyıcı olarak bir seçenek ama kolayca depolanamadığı, çok uzaklara taşınması uygun olmadığı ve taşıtlarda olduğu gibi bazı durumlarda kullanılmadığı için her türlü kullanım alanı için uygun bir seçenek değildir. Diğer bir seçenek ise hidrojenidir. Taşıdığı özelliklerle tek olan hidrojen, ara enerji taşıyıcısı olarak kullanıldığında aşağıdaki avantajlara da sahiptir.

- Enerji üretimindeki son ürünün su olması
- Boru hattı veya tankerlerle çok uzak mesafelere taşınabilmesi
- Alevli yanma, katalitik yanma, elektrokimyasal dönüşüm ve hidrür oluşumu gibi pek çok yöntemle etkin bir şekilde enerji üretiminde kullanılabilmesi.
- Yenilebilir kaynaklardan üretildiğinde çevreye herhangi bir emisyonu olmayışı, çevre dostu olmasıdır.

Ancak bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen kullanımının henüz çözümlenmemiş sorunları da vardır:

- Pahalı oluşu
- Yaygın kullanım için yeterli üretim ve taşıma alt yapısının olmayışı.
- Taşıma, depolama ve kullanımda emniyet sorunları oluşudur.

Hidrojen, çelik tanklarda basınçlı gaz, kriyojenik koşullarda sıvı, ısıl bozunmayla hidrojen veren kimyasal bileşikler (metanol, hidrokarbonlar vb.) ve metal hidrürler halinde ya

da karbon nanotüplerde soğurulmuş halde depolanabilir ve taşınabilir. Ancak bu ortamlarda depolanabilen hidrojen, kullanılan malzemenin ağırlıkça en fazla %10'a kadar ve kullanılabilen hidrojen miktarını arttırmak için tüm dünyada yoğun araştırmalar devam etmektedir. Kuvvetli indirgen özelliğe sahip bir bor bileşiği olan sodyum borhidrür (NaBH_4) günümüzde kağıt hamurunun ağartılması, çözeltilerden değerli metallerin (altın, gümüş vb.) geri kazanılması, atık sulardan ağır metallerin (kadmiyum, civa vb.) giderilmesi, vitamin, antibiyotik vb. bazı organik kimyasalların üretilmesi gibi pek çok alanda ticari olarak kullanılıyor. Sodyum borhidrür, bir katalizör varlığında su ile tepkimeye girerek hidrojen gazı üretme özelliğine sahiptir.

Hidrojen üretiminde sodyum borhidrür kullanımının avantajları:

- Sodyum borhidrür ve sodyum metaborat çözeltilerin yanıcı olmaması,
- Tepkimenin kolayca kontrol edilebiliyor olması,
- Hidrojenin yarısının sodyum borhidrürden, diğer yarısının da sudan gelmesi,
- (100 g sodyum borhidrürden 21 g $\sim\text{H}_2$)
- Heterojen katalizörlerin pek çok kez kullanılabilir olması,
- Sodyum metaboratın yeniden sodyum borhidrür üretiminde kullanılabilmesi,
- Sodyum borhidrürde ağırlık/enerji oranının benzindeki orana yakın oluşu
- Mevcut benzin dağıtım alt yapısının sodyum borhidrür çözeltisi taşımada kullanılabilir ya da katı olarak kolayca taşınabilir oluşu,
- İçten yanmalı motorlarda yapılacak bazı ufak değişikliklerle bu şekilde üretilen hidrojen gazının araç yakıtı olarak kullanılabilmesi.

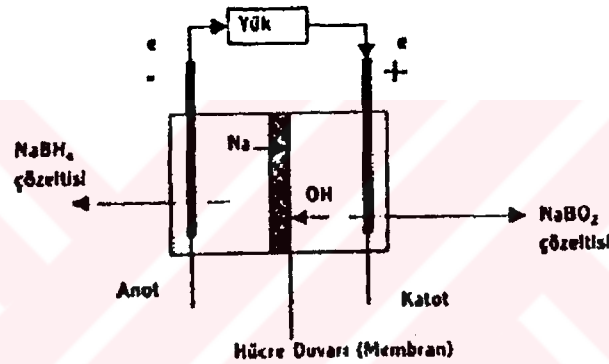
Millenium Cell şirketi, sodyum borhidrürün bu özelliğine dayanan taşınabilir hidrojen depolama sistemi geliştirmiştir (Hydrogen on Demand). Sodyum borhidrürün elektrokimyasal tepkimesiyle sodyum borata oksidasyonu, bir pil içinde gerçekleşebilir. Ancak pilin içindeki bor hidrür bitince enerji üretimi, yani pil de biter. Diğer taraftan bir yakıt pilinde sodyum bor hidrür beslemesi sürdükçe elektrik enerjisinin üretimi de sürer, çözeltide sodyum borhidrür bitse bile elektrolizör, oluşan sodyum metaborat boşaltılıp yeniden sodyum borhidrür çözeltisi doldurulup çalıştırılabilir [21].

Yakıt pilleri, elektrokimyasal enerjyi elektrik enerjisine çeviren düzeneklerdir. Güç üretim santrallerinden cep telefonlarına kadar çok değişik kapasitede geniş uygulama alanları ve farklı türleri vardır. Böyle bir yakıt pilinde sodyum borhidrürün %44'lük (ağırlıkça) çözeltisi kullanılırsa, 1 litre çözeltilerden 5,11 kw/saat enerji elde edilebilir ki bu değer 1 litre benzinden

teorik olarak elde edilecek enerjinin %56'sına eşittir. Ancak yakıt pili-elektrik motorundaki enerji dönüşüm verimi, içten yanmalı motorlara kıyasla 2,5-3 kat daha fazladır. Dolayısıyla mevcut yakıt tanklarıyla kat edilen yol sodyum borhidrür kullanımı içinde geçerlidir.

Sodyum borhidrürden üretilen hidrojen, içten yanmalı motorda yakılarak bir Ford Crown Victoria takside, akülü sistemde Ford Explorer'da yakıt pili olarak ise Ford Mercury Sable'da, prototip olarak uygulanmıştır. Millenium Cell aynı zamanda fotovoltaiik enerjiyle kullanılmış metaboratı elektrolizle borhidrüre çevrilen bir prototip de yapmıştır [21].

Türkiye, dünya bor cevheri rezervinin %65'ine sahiptir. Bor için çok yaygın bir kullanım olanağı açan sodyum borhidrürün hidrojen taşıyıcısı olarak kullanımı ülkemizin bu zenginliğini değerlendirmede yeni ufuklar açacaktır [22].



Şekil 2.4. Sodyum borhidrürün yakıt olarak kullanıldığı bir yakıt pili şeması

2.8.10. Diğer kullanım alanları

Enerji Depolama

Termal depolama pillerindeki, sodyum sülfat ve su ile yaklaşık %3 ağırlığındaki boraks dekahidratın kimyasal karışımı gündüzün güneş enerjisini depolayıp gece ısınma amacıyla kullanılabilir. Ayrıca, binalarda tavan malzemesine konulduğu takdirde güneş ışınlarını emerek, evlerin ısınmasını sağlayabilir. Ayrıca, bor, demir ve nadir toprak elementleri kombinasyonu (metglad) %70 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu güçlü manyetik ürün; bilgisayar disk sürücülerini, otomobillerde direkt akım-motorları ve ev eşyaları ile portatif güç aletlerinde kullanılmaktadır [21].

Otomobil hava yastıkları, antifriz

Bor hava yastıklarının hemen şişmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Çarpma anında, elementel bor ile potasyum nitrat toz karışımı elektronik sensör ile harekete geçirilir.

Sistemin harekete geçirilmesi ve hava yastıklarının harekete geçirilmesi için geçen toplam zaman 40 milisaniyedir. Ayrıca otomobillerde antifriz olarak hidrolik sistemlerde de kullanılmaktadır [21].

Atık Temizleme

Sodyum borohidrat, atık sulardaki civa, kurşun gümüş gibi ağır metallerin sulardan temizlenmesi amacıyla kullanılmaktadır [21].

Yakıt

Sodyum tetraborat, özel uygulamalarda yakıt katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Daha önce Amerikan donanması tarafından uçak yakıtı olarak kullanılmıştır. Karboranlar için Amerikan Deniz Araştırma Ofisi ve Amerikan Ordusu tarafından katı roket yakıtı olarak kullanılması için araştırmalar yapılmıştır. Şu anda Amerikan askeri ihtiyacı ise Callery Chemical Co. tarafından işletilmekte olan tesisten karşılanmaktadır. Diborür, B_2H_2 ve B_5H_9 gibi bor hidrürler; uçaklarda yüksek performanslı potansiyel yakıt olarak araştırılmışlardır. Boranlar hidrojenle karşılaştırıldığında daha yüksek performansla yanmaktadır. Fakat onlar, pahalı, toksik ve yakıldığında açığa çıkan bor oksit çevresel açıdan uygun değildir. Amerikan Hükümeti, 1950 sonlarında borlu yakıtlar için 300 milyon US \$ ayrılmıştır. Ancak program 1960 başlarında iptal edilmiştir [21].

Sağlık

BNCT (Bor ile nötron yakalama terapisi) kanser tedavisinde kullanılmaktadır. Özellikle; beyin kanserinin tedavisinde hasta hücrelerin seçilerek imha edilmesinde kullanılmakta ve sağlıklı hücrelere zararının minimum düzeyde olması nedeniyle tercih nedeni olabilmektedir. Ayrıca insan vücudunda normalde bulunan bor, bazı ülkelerde tabletler şeklinde üretilmeye başlanmıştır [21].

3. RADYASYON

3.1. Radyoaktivite

Nükleer fizikte önemli gelişmelere yol açan radyoaktivite 1896 yılında H. Becquerel'in uranyum tuzlarında bazı gözle görülmeyen fotoğraf filmine etki eden ışınların çıktığını fark etmesiyle ortaya çıkmıştır. Daha sonraları H. Becquerel'in, M.Cuire ve E. Rutherford tarafından yapılan çalışmalarda bu çeşit ışınların birçok izotoplarda da mevcut olduğu anlaşılmıştır. Radyoaktivite olarak isimlendirilen bu olayda ışın saçan kararsız elementlere radyoaktif element, ortaya çıkan radyasyonlar da alfa(α), beta (β) ve gamma (γ) olarak isimlendirilmiştir. Daha sonraları alfanın iki elektronunu kaybetmiş helyum atomu (${}^4_2\text{He}$), betanın elektron (${}_{-1}e^0$) ve gammanın yüksek enerjili elektromanyetik dalga olduğu anlaşılmıştır.

Çekirdekte bulunan nötronların protonlanma oranı (N/Z), periyodik cetvelin sonunda bulunan atomlarda artar. Bu oranın artması çekirdeklerin kararsızlığı hakkında bilgi verir. En ağır kararlı çekirdek ${}_{83}\text{Bi}^{207}$ 'dir ${}_{83}\text{Bi}^{207}$ 'den daha ağır çekirdekler, kararsız çekirdekler olarak adlandırılır. Kararsız çekirdekler, kararlı hale gelebilmek için kendiliğinden alfa (α) ve beta (β) yüklü parçacıkları ile gamma (γ) ışını yayarak bozunurlar. Bu olaya doğal radyoaktivite adı verilir. Kararlı çekirdekler, dışarıdan başka parçacıklarla uyarılarak yapay radyoaktif çekirdekler meydana getirebilir. Radyoaktif bozunmada madde bir bütün olarak değişim göstermez. Yalnız maddenin atom çekirdekleri başka çekirdeklere dönüşmektedir. Radyoaktiflik, basınç, sıcaklık ve magnetik alan gibi dış etkenlerden bağımsız bir olaydır.

Kararsız çekirdekler kararsızlıklarının nedeni olan üç grupta sınıflandırılır; 1) nötron fazlalığı, 2) Nötron azlığı (proton fazlalığı), 3) hem nötron hem proton fazlalığı olan nüklidler. Kararsız çekirdekler kararlılık alanına dönmek üzere gereken dönüşümlere uğrarlar.

Proton ve nötronlar (nükleonlar) bir çekirdek içinde sükunette bulunmazlar. Daima bir titreşim, dönme ve başka hareketler yaparlar. Nötron ve proton sayıları da kararlı bir sistem için gereken oranda değilse bu sürekli hareketlilik er geç çekirdeğin parçalanmasına sebep olur. Bu halde o çekirdek için radyoaktif denir. Parçalanma tamamlandıktan sonra geri kalan veya yeni oluşan çekirdek ekseriye daha kararlıdır [23].

3.2. Yarı Ömür

Bir aktif çekirdek için radyoaktif bozunum olayı zaman içinde rast gele oluşan bir olaydır. Yani bir elemente ait radyoaktif çekirdekler içinde göz önüne alınan herhangi bir aktif çekirdeğin ne zaman bozunacağı bilinemez. Ancak toplam aktif çekirdeklerin yarısının ne kadar bir sürede bozunacağı bilinir. Bu süre o radyoizotopun değişmez bir özelliğidir ve diğer tüm

radyoizotoplardan farklı bir değerdedir. Bu değere yarı ömür denir ve $T_{1/2}$ şeklinde gösterilir. Radyoaktif yapının fiziksel yarı ömrü binlerce yıl olabileceği gibi saniyenin on binde, yüz binde biri gibi çok kısa sürelerde de olabilir [23].

3.3. Radyoaktif Bozunmalar

Çizelge 3.1. Bilinen bozunma biçimleri aşağıdaki Çizelgede kısaca verilmiştir [23].

Bozunmanın İsmi	Açıklama
α Bozunması	Radyoaktif bir elementin çekirdeğinden alfa taneciği $1,6 \cdot 10^7$ m/s civarında bir hızla yayılır.
β Pozitif bozunma	β^+ parçacığı elektronla aynıdır. Atom çekirdeğinde elektronlar olmaması nedeniyle β^+ parçacığı çekirdekdeki nötronların birbirini protona dönüşmemesinden ortaya çıkar.
β negatif bozunması	β^- (pozitron) elektrik yükü hariç elektronla aynıdır. Çekirdeğin pozitif yükü ($p \rightarrow n + \beta^+$) reaksiyonu ile azalması nedeniyle elektronik yapısı dengede kalabilmesi için pozitron ortaya çıkması yörünge elektronlarında azalmaya neden olur.
Elektron yakalanması	Atomun çekirdeği yörünge elektronlarından birini yakalayarak proton ile elektronun nötrona dönüşmesidir. Bu olay yörüngeler arası elektron geçişlerine neden olarak atomun uyarılmasına sebep olur ve X ışını yayınlırlar.
γ ışını yayınlaması	Gama ışınları çekirdeklerin enerji fazlalığına sahip olması durumunda yayımlanan radyasyondur.
Nötron yayınlaması	Bazı radyoaktif atomların bozunması esnasında nötron yayınlırlar bunlardan bazıları $^{85}\text{Br}_{35}$ ve kaliforniyum-256'dur.

3.4. Radyasyon

Radyasyon yaşamın doğal bir parçasıdır. Zamanın başlangıcından itibaren radyasyon vardır ve yaşadığımız evrenin ayrılmaz bir parçasıdır. Gerçekte dünyada bildiğimiz yaşam, radyasyonun varlığı ile gelişmiş ve yaşantımız ona bağımlı kılınmıştır. Radyasyonun faydalı olduğu kadar bazı durumlar karşısında zararlı etkiler gösteren birçok farklı çeşidi vardır [5].

3.5. Radyasyon Çeşitleri

Çeşitli radyasyonların giricilikleri farklıdır. Fakat belli bir radyasyon türü için giricilik enerji ile ilgili bir özelliktir. Düşük enerjili ışınlar, görünür ışık girici değildir. Fakat X-ışını ve gamma ışını, özellikleri görünür ışıkla benzer olmakla beraber, giricilik yönüyle ondan ayrılırlar; zira enerjileri yüksek dalga boyları kısadır [23].

3.5.1. α radyasyonu

Kararsız ağır çekirdekler genellikle α parçacığı dediğimiz dört nükleondan oluşan (2 nötron + 2 proton) bir helyum atomu çekirdeği atmak suretiyle bozunurlar. Uyarma enerjisi α parçacığı atmaya yetecek düzeyde değilse, bozunum β bozunumu şeklinde gerçekleşecektir.

α bozunumu genellikle nükleon sayısı 190'dan büyük olan aktif çekirdeklerde görülür. Bu tip bozunma yapan en hafif aktif çekirdek nükleon sayısı 144 olan Neodinyum'dur. Radyoaktif bozunmalar içinde en büyük kütle ve enerji kaybı α bozunumu ile olur. 4 kütle birimi ve 2 pozitif elektriksel yük birimi ile helyum çekirdeği olan α parçacığının ana çekirdekten kopması onun fiziksel özelliğini, oluşan yeni çekirdekte A'nın değerini 4, Z'nin değerini 2 azaltacak şekilde değiştirir [24].

α bozunumu; genel olarak;



Örneğinde olduğu gibi bir aktif elementin kendisinden daha kararlı ve daha hafif başka elemente dönüşümüdür [24].

En az girgin olan α ışınması olup kâğıttan geçmez. α parçacıkları maddeyle çok kuvvetli etkileşir, madde tarafından yavaşlatılır. α parçacıkları maddeye çok nüfuz etmez; ama çok zarar verir. Çünkü maddeye çarpma anındaki enerjileri, molekülden atomları uzaklaştırır ve kristallerdeki iyonların yerlerini değiştirir. α tanecikleri doku içine girerse, şiddetle zarar verir ve ciddi hastalıklara, hatta ölümlere sebep olabilir. DNA zarar görürse, sonuçta kanser meydana gelebilir. α ışınması, çoğunlukla daha az zarar verebileceği ölü derinin yüzeyinde absorblanır. Solunum veya sindirim yoluyla alınırsa vücudumuzda ciddi tahribatlar oluşturabilir [25].

3.5.2. β radyasyonu

β bozunumu yapan aktif çekirdekler

1. β^- (Negatron) dönüşümü ile
2. β^+ (Pozitron) dönüşümü ile

3. Elektron yakalama (EY) ile yani yörüngeden elektron koparak bozunup kararlı hale gelirler [24].

Çekirdeğin kararlılığı; nötron-pozitron dengesi anlamına geldiğinden, dengenin gerektirdiğinden fazla sayıda nötron veya protona sahip olan bir kısım aktif çekirdekler fazla olanı karşı cinsle dönüştürmek suretiyle kararlı hale geçmeye çalışırlar. Genel olarak nötronca zengin olan aktif çekirdekler β^- ve EY dönüşümü yaparlar. Ancak dönüşme şekli yalnız nötron veya protonun fazlalığına bağlı değildir [24].

β^- (Negatron) dönüşümü

Bir aktif çekirdek β^- bozunumu yapıyor denildiğinde aksi söylenmediği sürece β^- dönüşümü yaptığı anlaşılır. Bu olay, aktif çekirdek içinde bir nötronun protona dönüşmesi olayıdır. Dönüşüm sonunda çekirdekte Z sayısı 1 artar. Ancak kütle numarası değişmez [24].

β^+ (Pozitron) dönüşümü

Bir radyoaktif çekirdeğin denge halinin gerektirdiğinden fazla protona sahip olması halidir ve pozitron dönüşümü aktif çekirdekte bir protonun nötrona dönüşmesi şeklinde tanımlanır [24].

Elektron yakalama (EY) dönüşümü

Temelde çekirdek içinde bir protonun nötrona dönüşmesi olayıdır. Bu nedenle, farklı karakterlerde olaylar olmakla birlikte, pozitron dönüşümüne benzer şekilde değerlendirilir.

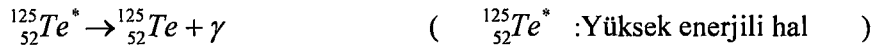
Elektron yakalama olayı, büyük olasılıkla K yörüngesinden (çekirdeğe en yakın yörünge) bir elektronun çekirdek tarafından kapılması ve bu elektronun bir protonla reaksiyona girmesi olayıdır.

β^- ışınları; ışımının artan nüfuz gücü bakımından, α ışınlarından sonra gelir. Bu ışınları oluşturan hızlı elektronlar, moleküllerin elektron ve çekirdekleriyle elektrostatik etkileşmeye girerek durduruluncaya kadar yüzeyden 1 cm içeriye kadar nüfuz edebilirler [24].

3.5.3. Elektromagnetik radyasyon (γ ışınları, X ışınları ve görünür ışık)

Gama radyasyonları tıbbi amaçla kullanılan X ışınlarından daha büyük enerjili elektromagnetik dalgalardır. Bazı radyoaktif maddeler bozunduğu zaman atomların çekirdeğinden gama radyasyonu yayılır. X-ışınları gibi gama ışınları da yüksek girici güce sahiptir ve insan vücudunun bir tarafından diğer tarafına geçirilebilir. Kanser tedavisinde tümör hücrelerinin öldürülmesinde gama ışınları kullanılır. Gama ışınlarının şiddetinin azaltılması için kalın beton engeller veya kurşun kullanılır [26].

Nükleer reaksiyonların birçoğunda olduğu gibi hemen hemen bütün α ve β bozunmaları ürün çekirdeği uyarılmış durumda bırakır. Bu uyarılmış durumlar kısa bir süre içinde bir veya daha fazla γ ışını yayınlarak taban duruma bozunurlar. Bu surette çekirdek fazla enerjisini elektromagnetik dalga halinde dışarı verir.



γ ve X ışınlarının dalga boyu yaklaşık 1nm ile 0,001 nm arasındadır. Bu dalga boyları genellikle karşılaştığımız diğer elektromagnetik radyasyon türlerinininkinden çok daha kısadır. Bu yüzden giricilikleri de çok daha fazladır. X ışınları daha ziyade bu aralığın uzun dalga boyu kısmını, γ ışınları ise kısa dalga boyu kısmını kapsar. Örneğin görünür ışık, γ ışınlarından 10^6 kat daha uzun dalga boyuna sahiptir ve 10 MeV enerjili γ ışınlarını durdurabilmek için 11 cm kalınlığında alüminyum levha gereklidir. X ışınları elektron enerji seviyesi, γ ışınları ise çekirdek enerji seviyesi değişmesi sonucu ortaya çıkan elektromagnetik radyasyonlardır. γ ışınları kütle ve yük değişimi meydana getirmez. γ ışınları, X ışınları ve görünür ışık, elektromagnetik radyasyon fotonlarıdır. γ ışınlarının enerjileri tipik olarak 0,1-10 MeV arasındadır. [23,27].

3.6. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Radyasyon madde içinden geçerken, maddeyi oluşturan atom ve moleküller ile çarpışır ve etkileşir. Tek bir çarpışma ya da etkileşimde radyasyon, genellikle enerjinin çok küçük bir kısmını atom ya da moleküllere aktaracaktır. Atom ya da molekül etkileşme sonunda bir iyon dönüşebilir. İyonlaştırıcı radyasyon, iyonlaştırılmış atom ya da molekül yığınının ayrılır ve farklı yönde hareket edebilir.

Bir α parçacığı bir seri çarpışmadan sonra kısa, yoğun bir iyon yığını yaratarak tüm enerjisini kaybeder ve durur. Bu olay havada birkaç santimetrede, bir parça kağıt kalınlığında, kumaş veya deri tabakasında olur. Sonuç olarak α parçacığı yayan radyo izotoplar dış hasara neden olmazlar. Bir diğer anlatımla, α yayıcısı vücut dışında ise hasar vermez anlamındadır. Fakat besinler veya solunum yolu ile vücuda alınan α yayıcıları ciddi iç hasara neden olur.

Enerjilerine bağlı olmak üzere, beta parçacıkları havada birkaç metre, madde içerisinde ise (örneğin doku ve plastik) birkaç santimetre yol katedebilirler. Sonuç olarak beta parçacıkları enerjilerini kayb ettikleri zaman hemen yavaşlarlar ve ortam tarafından soğurlurlar. Beta yayıcı radyo izotoplar iç hasara neden olurlar. Ancak yüksek enerjili beta yayıcıları ise dış hasar verirler [28].

Çizelge 3.2. Radyoizotopların radyasyon tipleri ve enerji aralığı

Radyoizotop	Radyasyon tipi	Enerji aralığı (MeV)
Amerikyum-241	Alfa	5.5-0.37
	Gama	0.03-0.37
Hidrojen-3	Beta	0.018(maksimum)
Fosfor-32	Beta	1.7(maksimum)
İyot-131	Beta	0.61(maksimum)
	Gama	0.08-0.7;0.36
Teknesyum-99m	Gama	0.14
Sezyum-137	Beta	0.51(maksimum)
(Baryum-137m)	Gama	0.66
İridyum-192	Beta	0.67(maksimum)
	Gama	0.2 -1.4
Kobalt-60	Beta	0.314(maksimum)
	Gama	1.17-1.33
Amerisyum-241/	Nötron	4-5
Berilyum	Gama	0.06
Stronsiyum-90/	Beta	2.27
(İtriyum-90)	Beta	2.26
Prometyum-147	Beta	0.23
Talyum-204	Beta	0.77
Altın-198	Beta	0.96
	Gama	0.41
İyot-125	X ışını	0.028

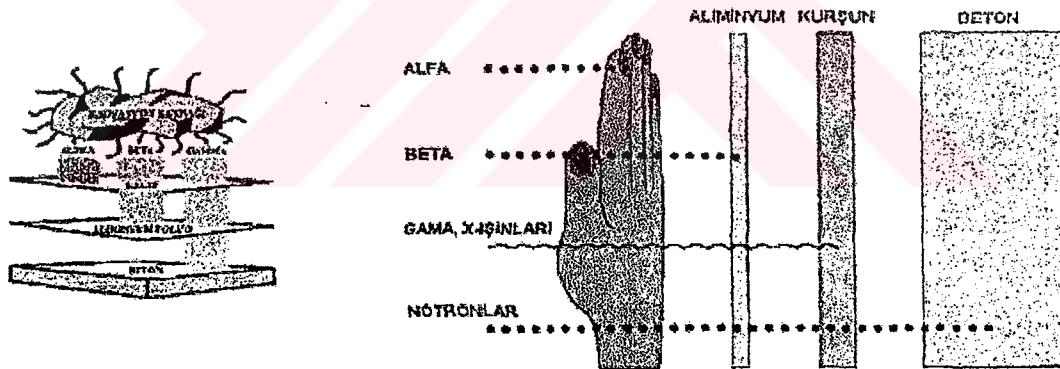
Çizelge 3.3. Radyoizotopların farklı malzemelere göre maksimum menzili

Radyoizotop	Maksimum Beta Parçacığı Enerjisi(MeV)	Maksimum Menzil			
		Hava(mm)	Plastik(mm)	Ağaç(mm)	Aluminyum (mm)
Prometyum-147	0.23	400	0.6	0.7	0.26
Talyum-204	0.77	2400	3.3	4.0	1.5
Fosfor-32	1.71	7100			
Stronsiyum-90/itriyum-90	2.26	8500	11.7	14.0	5.2

Gamma ve x-ışınları çok gircidirler. Fakat iyonlaşmaya neden oldukları gibi, ışın demetinden çıkarılabilir veya enerjilerini kaybederler. Böylelikle, maddeye gircilik özellikleri azalır ve ciddi bir dış hasara neden olmayacak şekilde sayıca azaltılırlar, yani zayıflatılırlar [28].

Çizelge 3.4. Radyoizotopların farklı malzemelere göre HVT ve TVT değerleri

Radyoizotop	Farklı malzemelerin HVT ve TVT değerleri (cm)					
	Kurşun		Demir		Beton	
	HVT	TVT	HVT	TVT	HVT	TVT
Teknesyum-99m	0.02					
İyot-131	0.72	2.4			4.7	15.7
Sezyum-137	0.65	2.2	1.6	5.4	4.9	16.3
İridyum-192	0.55	1.9	1.3	4.3	4.3	14.0
Kobalt-60	1.1	4.0	2.0	6.7	6.3	20.3
100kVpX-ışını	0.026	0.087			1.65	5.42
200kVpX-ışını	0.043	0.142			2.59	8.55



Şekil 3.1 .Alfa,beta ve gama radyasyonlarının birbirine göre giricilikleri

Şekil 3.1 alfa, beta ve gama radyasyonlarının birbirine göre giricilik gücünü göstermektedir. Alfa parçacıkları derinin ilk tabakası tarafından tutulur. Beta parçacıkları parçacığın enerjisine bağlı olarak insan derisinin 1-2cm derinliğinde durdurulur. Gama radyasyonları çok girici olduklarından, elden tamamen geçer [5].

Gamma ve x ışınlarının giricilik gücünü ya da kalitesini ifade etmek aynı zamanda zırhlama malzemelerinin yaklaşık olarak kalınlıklarını tahmin etmede bazı kolaylıklar sağlar. Yarı-değer kalınlığına (HVT) ya da yarı değer tabakası (HVL) olarak verilen kalınlıklar radyasyonun başlangıçtaki değerini yarisına indiren malzeme kalınlıklarıdır. Onda bir-değer

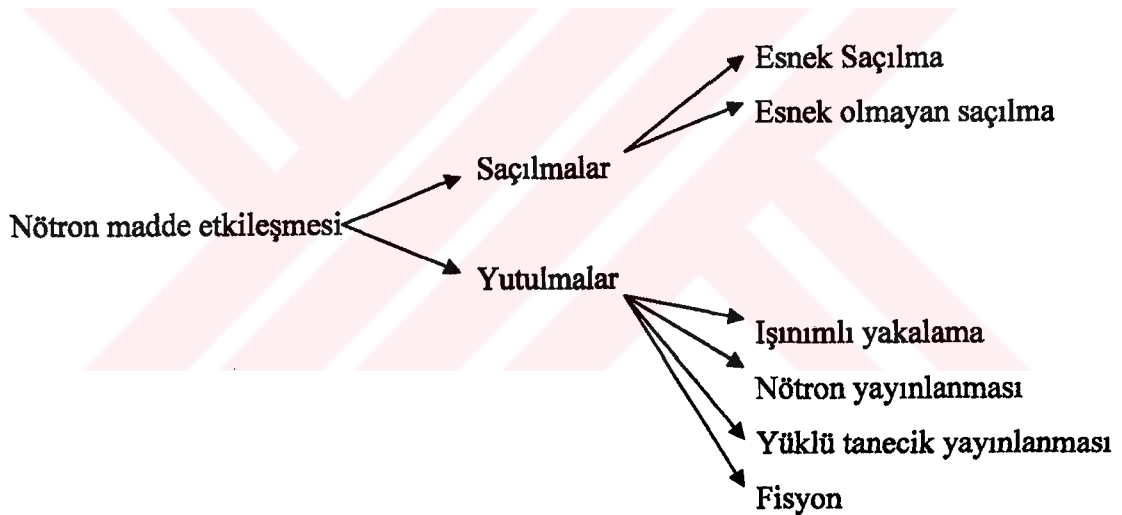
kalınlığında (TVT) benzer olarak radyasyonu ilk değerinin onda birine indiren malzeme kalınlığıdır.

Çelik ve kurşun gibi ağır atomları ve molekülleri olan malzemeler, gamma ve X-ışını radyasyonu için en etkin (en ince kalınlıkta) zıhlamayı sağlar [28].

3.7. Nötronların Madde ile Etkileşmesi

Atom çekirdeğini meydana getiren asal elemanlarından biri olan nötronlar 1,008665 akb'lik kütleyle sahip ve elektrik yükleri olmayan nötr parçacıklardır. Nötronların kütlelerinin olması onları partiküler radyasyon grubuna dahil eder.

Nötronlar herhangi bir malzeme içinden geçerken, atomdaki çekirdeklerle etkileşmeleri çok farklı şekillerde gerçekleşir. Nötronların durgun hedef çekirdekleriyle yaptığı etkileşmeler, “saçılmalar” ve “yutulmalar” olarak iki grupta toplanarak Şekil 3.2.’deki gibi gösterilebilir [29].



Şekil 3.2. Nötron-madde etkileşmesinin sınıflandırılması

Bu etkileşmelerde birinci derecede önemli olan, nötronların sahip olduğu enerji seviyesidir. Nötronların enerji seviyelerine göre sınıflandırılması aşağıdaki gibi yapılır.

- Termal nötronlar $E = 0,025 \text{ eV}$
- Epitermal nötronlar $E = 0,0025 \text{ eV} - 1 \text{ eV}$
- Yavaş nötronlar $E = 1 \text{ eV} - 10 \text{ eV}$
- Rezonans nötronları $E = 10 \text{ eV} - 300 \text{ eV}$

- Ara Nötronları $E = 300 \text{ eV} - 1 \text{ MeV}$
- Hızlı Nötronlar $E = 1 \text{ MeV} - 20 \text{ MeV}$

Nötronun madde ile etkileşmesinde, nötronun bu etkileşmeleri yapması ancak belli olasılıkla mümkündür. İşte bu olasılık değerine “tesir kesiti” denilmektedir. Yukarıdaki nötron sınıflandırması içinde en büyük tesir kesitine termal nötronlar sahiptir. Bu nedenle nükleer tekniklerde çoğu kez termal nötronlar tercih edilir [29].

3.8. Radyasyonun İnsan Vücuduna Etkisi

Radyasyondan ileri gelen biyolojik etki; biyolojik ortama radyasyon tarafından bir enerji aktarılması ve bu enerjinin ortalama fiziksel ve kimyasal değişikliklere neden olması şeklindedir.

Canlı doku üzerinde, alınan doza bağlı olarak, radyasyonların bazı genetik ve somatik etkileri olduğu bilinmektedir [30].

3.8.1. Radyasyonun somatik etkisi

Radyasyonun hücresel düzeydeki etkileri, ışınlanan bireyde gözlenebilen somatik (bedeni) etkiler ile sonuçlandırılabilirdiği gibi ışınlanan bireylerde bu tür etkiler meydana gelmediği halde onların soyundan gelenlerde ortaya çıkan genetik etkilere neden olabilir.

Radyasyon alan bireyin yaşam süresi içinde ortaya çıkan somatik etkilerin niteliği ve derecesi, alınan radyasyon dozuna, dozu alma süresine, ışınlanan vücut parçasının büyüklüğüne, dozun dokularda dağılımına, ışınlanan dokunun radyosensivitesine bağlıdır.

Somatik etkiler, akut ve kronik olmak üzere iki şekilde oluşabilir. Bir defada ve kısa bir süre (birkaç dakika, birkaç saate kadar) içinde alınan radyasyon dozu sonucu görülen biyolojik etkilere akut radyasyon etkileri denir. Genellikle gün ve hafta gibi kısa bir sürede ortaya çıkar. Bu etki temel olarak dış (external) radyasyon alanlarında görülür.

Nükleer bombardımanlar; radyoterapi hastaları, radyasyon kazazedelerinden elde edilen bilgiler sonucunda; tüm vücudun zırhlanmasından sonra meydana gelen olaylar zinciri; başlangıç dönemi, latent dönemi, ağır hastalık dönemi, iyileşme dönemine ayrılabilir.

Ufak radyasyon dozlarının sürekli veya kısa aralıklarla uzun zaman içinde alınması sonucu meydana gelen kronik radyasyon sendromu, en az birkaç yıl içinde ortaya çıkabilir. Maruz kalınan radyasyonun dozu ve vücut kısmına bağlı olarak bu süre 20-30 yıl kadar da uzun olabilir. Rutin mesleki çalışmalar bu gruba girer. Bu etki genelde iç (internal) ışınlamadan sonra görülür [23].

3.8.2. Radyasyonun genetik etkileri

Radyasyonların genetik etkilerine ilişkin kesin veriler henüz elde edilememiştir. Genetik risklerin hasarlanması laboratuvar ve hayvan deneylerine dayanmaktadır. Hiroşima ve Nagazaki bombardımanından hayatta kalanların dikkatlice incelenmesine rağmen bu konuda çok az bilgi edinilebilmiştir. Başlıca genetik etkiler; anomaliler ve kısırlıktır.

1. Anomaliler

a) Germ hücrelerinin kromozom yapısı bozulup mutasyonlar oluşabilir ve yeni kuşaklara kalıtımla geçen anomaliler görülebilir (doğumsal anomaliler).

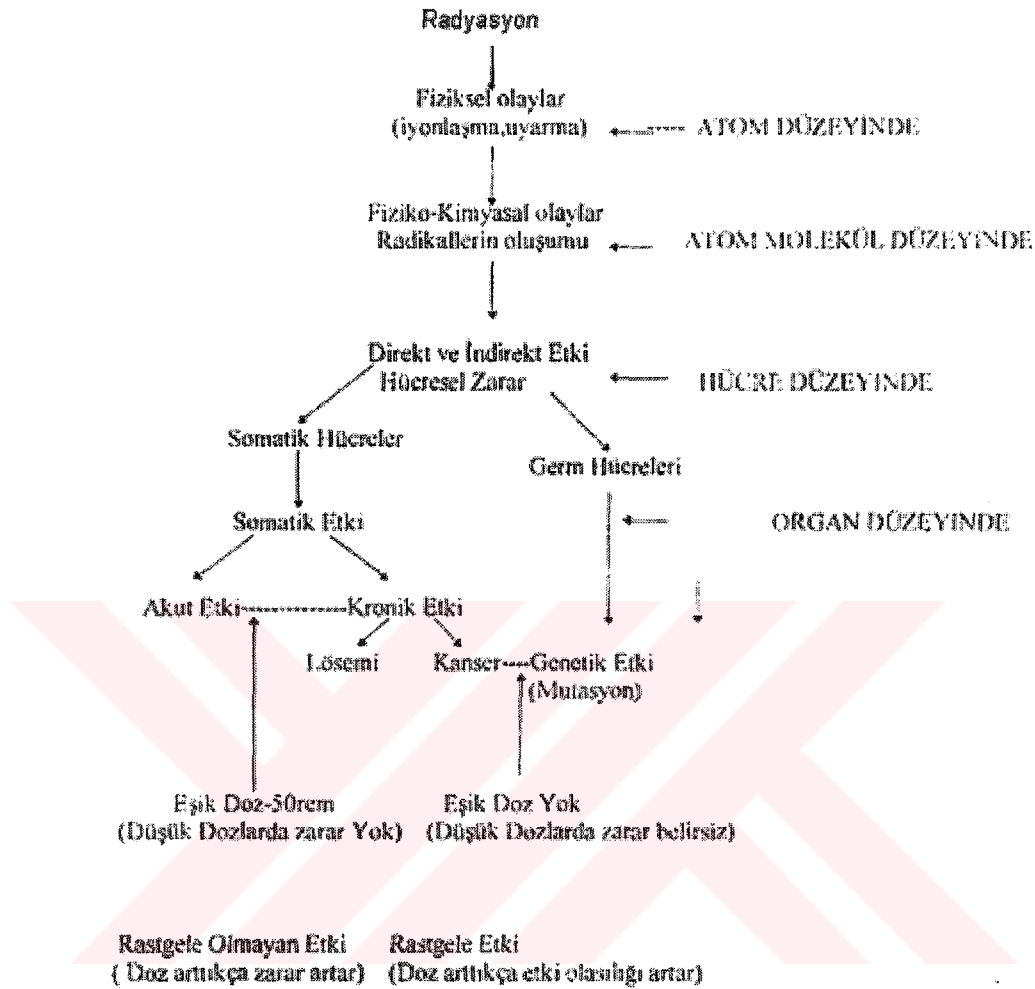
b) Somatik hücrelerindeki mutasyonlar tümörlere neden olabilir. Hücreye devamlı ve kontrolsüz bir bölünme ve çoğalma yeteneği verir. Böylece büyüyen ve vücuda yayılan bir ur oluşturur (kanser ve sarkam).

2. Kısırlık

Ovaryum ve testisteki germ hücrelerinin ışınlama ile bir kısmının ya da tümünün ortadan kalkmasıyla geçici ya da sürekli kısırlık oluşur. 500 rem üzeri sürekli kısırlık yapar.

Mutasyonla hücre ölebilir veya çoğalma yeteneğini kaybedebilir. Bu mutasyon yeni hücre kuşaklarına iletilmeyeceği için, o hücrenin hayatıyla birlikte son bulur. Mutasyonla meydana gelmiş bir karakter o canlının ana ve babasında veya daha eski atalarında bulunmayan bir karakterdir. Radyasyon herhangi bir değerinde (eşik bir değer yoktur) mutasyona neden olabilir. Mutasyondan sonra gende nadiren eski haline dönme görülebilir ve genetik materyalde zarar kalıcıdır [23].

Çizelge 3.1. Radyasyonun biyolojik etkileri



3.9. Radyasyondan Korunma

İnsan dokusunda, radyasyonun neden olduğu hasarlar, dokuda depo edilen enerjinin bir fonksiyonu olup, kullanılan radyasyon türüne ve enerjisine bağlıdır. Bu nedenle, farklı tip radyoizotoplarla çalışırken, yayılan radyasyonun türüne ve enerjisine bağlı olarak önlem alınması gerekir [28].

Dış radyasyonun muhtemel tehlikelerinden korunmak için üç temel faktör göz önüne alınır.

- Radyasyon kaynağından uzaklaşmak
- Radyasyon alanında çalışma süresini kısaltmak
- Zırhlama [24]

3.9.1. Nötronların zırhlanması

Nötronlar madde içinde yol alırken karmaşık bir şekilde hareket ederler. Hızlı nötronlar, büyük atom ve moleküllerde çok fazla enerji kaybetmeksizin saçılmaya uğrarlar. Fakat küçük bir atom ya da molekülle olan çarpışmada, nötronların enerjilerinin bir kısmı soğurulur. En küçük atom olan hidrojen atomu, nötronların enerjilerinde en fazla azalmaya neden olur [28].

Zırh tasarımının en zor problemi hızlı nötronlardır. Yüksek enerjilerde yutulma tesir kesitlerinin küçük olması nedeniyle, hızlı nötron yutulması, bunların termal enerjiyle yavaşlatılmasıyla mümkündür. Nötronların esnek olmayan çarpışma ve yutulmalarda açığa çıkan ikincil γ 'lar zırh dış yüzeyinde biyolojik dozu ve zırh içerisindeki ısıtmayı artırarak zırh tasarımında ek sorunlar oluşturur [31].

3.9.2. Zırh malzemeleri

Hidrojen atomu, nötronların enerjilerinde en fazla azalmaya neden olduğu için; su, yağ, balmumu ve polietilen gibi hidrojen içeren maddeler, nötron zırhlaması için en uygun malzemelerdir. Nötronlar hemen hemen tüm enerjilerini kaybettikleri zaman, “yakalanabilirler”, yani bir atom tarafından tamamen soğurulabilirler. Bu ise atomun yeni bir şekil kazanması ve genellikle oldukça yüksek enerjili gama ışınları yayan yeni bir radyoizotopa dönüşmesiyle sonuçlanır. Özel olarak yapılmış nötron soğurucu hidrojenli zırhlar, nötronları soğurmaya yardımcı olan bir miktar bor içerirler [28].

Kurşun gibi atom ağırlığı büyük olan elementler, her bir etkileşimde beta parçacıklarının enerjilerinin büyük bir kısmını soğururlar. Fakat sonuçta, atomlar “bremsstrahlung” olarak isimlendirilen X-ışınlarını üretirler. Böylelikle zırhlama malzemesi bir X-ışını yayıcısına dönüşür ve ilave zırhlamayı gerektirirler. Bu nedenle küçük atom ağırlıklı (düşük yoğunluktaki) malzemeler daha kalın malzeme kalınlığı gerektirmelerine karşı en etkin beta radyasyonu zırhlayıcılardır [28].

Nötron zırhlamasında % 0,5 içeriği etkin bir yavaşlatma için yeterli olmaktadır. Su nötron zırhlaması için çok uygun ve maliyetinin düşük olmasına rağmen γ 'ların zırhlanması için yetersizdir. Çünkü düşük kaynama noktası, basınç ve radyasyonla bozunabilme eğilimi, reaktör zırhlamasında likit su kullanımında karşılaşılan sorunlardır [32].

Masonit ve sıkıştırılmış tahta ürünler ağırlıkça % 6 hidrojen içerir. Bunun yanında çevredeki nem ve sıcaklığa göre boyutlarının değişmesi radyasyon hasarına karşı dayanıksız olması uzun süreli zırhlamalarda tavsiye edilmez. Ancak hareketli veya hafif nötron zırhının gerekli olduğu durumlarda bor ilaveli polimer reçine ile doymuş tahta lambrileri kullanılır [33].

Nötron zıhlaması için en yaygın kullanılan malzeme betondur. Dayanıklısıdır, ucuzdur, farklı atom numaralı agregolar ve hidrojen içerir. Hem yapı hem de zırh malzemesi olarak kullanılır [10].



4. BOR İLE NÖTRON YAKALAMA TERAPİSİ

4.1. ^{10}B İzotopu Ayırım Yöntemleri ve Kullanım Alanları

4.1.1 İzotop ayırım yöntemleri

Çekirdek içerisindeki nötron sayılarının farklı olması nedeniyle element özelliklerinde oluşan değişikliklere "izotop etkisi" denilmektedir. İzotop ayırımında bu etkiden yararlanılmaktadır. Bu etki, genelde fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Fiziksel etkiler kütleli nükleer etkilerden oluşmakta, kimyasal etkiler ise denge, kinetik ve bağ yapma gibi etkileri kapsamaktadır. İzotop ayırma işlemlerinde en çok yararlanan etkiler fiziksel farklılıklar olup kimyasal etkilere dayalı ayırımlar üzerinde halen çalışmalar yapılmaktadır. Genel olarak izotop ayırma yöntemleri aşağıdaki gibidir.

- Damıtma ile ayırım
- Gaz santrifüjlemesi ile ayırım
- Elektromanyetik ayırım
- Fotokimyasal yöntemle ayırım
- Difüzyon (ısısal, gaz fazında vb.) ile ayırım
- Nozzle prosesi ile ayırım
- Elektroliz ile ayırım
- Yer değiştirme (kimyasal, iyon değişimi) ile ayırım
- Diğer yöntemler (vakum ark santrifüjlemesi, lazerli yöntemler vb.) ile ayırım

Yukarıdaki ayırma işlemlerini, laboratuvar ve endüstriyel ölçekli olarak ikiye ayırmak gerekmektedir. Burada bahsedilen yöntemlerden sadece kimyasal yer değiştirme, damıtma ve gaz fazında difüzyon ekonomik olarak endüstriyel ölçekli uygulamalarda kullanılmakta, diğer yöntemler laboratuvar ölçekli çalışmalarda kullanım alanı bulabilmektedir.

Endüstriyel ölçekte ve en fazla miktarda ayırımı yapılan izotoplar ^{235}U ve ^2H 'dir. Bunun dışında yan endüstriyel ölçekte ise ^{10}B izotopunun ayırımı gerçekleştirilmektedir. Bu üç izotopa kıyasla çok daha az miktarlarda biyokimyasal, jeokimyasal vb. gibi çalışmalarda ayırımı sıkça yapılan izotoplar ^{13}C , ^{15}N , ^{18}O , ^{34}S ve ^7L 'dir [8].

4.1.2 Bor ve izotopları

Doğal olarak oluşmuş borun ısıl nötronları absorblama kesit alanı 752 barn iken, saf ^{10}B ve saf ^{11}B 'in nötron absorblama kesit alanları ise sırasıyla 3837 barn ve 0,005 barn'dır (1 barn = 10^{-24} cm²). Buna göre, izotopik olarak saflaştırılmış ^{10}B doğal bora göre yaklaşık 5 kat daha iyi nötron kalkanı olmaktadır. Bu nedenle, saf ^{10}B ürünlerinin nükleer endüstride kullanımı endüstriyel ölçekte izotop ayırımı yapılan uranyum ve döteryum ile birlikte (Çizelge 4.1) çok önemli olmaktadır.

Çizelge 4.1. Bazı izotopların ısıl nötron absorblama kesit alanları

İzotop	Doğada Bulunan %'si	Kesit Alanı(barn)
^1H	99,99	0,33
^2H	0,015	0,0005
^{10}B	19,8	3837
^{11}B	80,2	0,005
^{14}N	99,6	1,8
^{15}N	0,37	0,00002
^{235}U	0,7	580
^{238}U	99,3	2,8

Nötron kalkanı olarak ^{10}B izotopu kullanıldığında oluşan nükleer tepkime, $^{10}\text{B} + \text{nötron} \rightarrow ^7\text{Li} + ^4\text{He}$ (α tanecikleri; 2,31 Me V) + gamma ışını (478 keV) gibidir. Büyük nötron absorblama kesit alanından dolayı çok iyi bir nötron tutucusu olan ^{10}B yanında, ^{11}B ise çok iyi bir nötron reflektörü olup bazı uygulamalarda kullanılmaktadır [8].

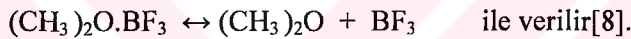
4.2. ^{10}B İzotopunun Ayırımı

4.2.1 Yer değiştirme-damıtma ile ayırım

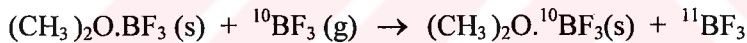
Endüstriyel ölçekte yapılabilecek ^{10}B izotopu ayırım işleminin ilk adımları, 2. Dünya Savaşı sırasında, 1943 yılında, Manhattan Proje'si kapsamında olan özel bir program ile Columbia Üniversitesi'nde başlatılmıştır. Bu program çerçevesinde; bor triflorürün ısıl difüzyonu ve damıtması, metil borat damıtması, bor triflorür-dimetil eter $[(\text{CH}_3)_2\text{O}.\text{BF}_3]$, bor triflorür-dietil eter $[(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}.\text{BF}_3]$, etil borat-bor triflorür $[(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_2\text{B}.\text{BF}_3]$ komplekslerinin damıtılması gibi çeşitli izotop ayırım işlemleri denenmiş ve $(\text{CH}_3)_2\text{O}.\text{BF}_3$ damıtması ile ^{10}B ayırımını en verimli yöntem olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu neticeden faydalanılarak Standard Oil Company (Indiana) tarafından dizayn edilip işletmeye alınan tesis ilk olarak

endüstriyel ölçekte bor izotopu ayırımı yapan tesis olmuştur. 1944 yılında sürekli olarak üretime başlayan ve %95 oranında ^{10}B içeren ürün elde eden bu tesis 1948 yılında devre dışı bırakılmıştır. İkinci en büyük tesis ise Hooker Electrochemical Corp. tarafından Model City, NY'de kurulmuş ve 1953 yılında üretime geçerek % 90-95 oranında ^{10}B içeren metalik bor üretimini aynı izotop ayırma yöntemi ile 1958 yılına kadar gerçekleştirmişlerdir.

Bor triflorür-dimetil eter kompleksi kullanılarak yapılan izotop ayırımına ilişkin genel akım şeması Şekil 4.2'de verilmektedir. İzotop ayırımı Şekil 4.2 'de gösterilen ve sayısı değişebilen ayırma kolonlarında gerçekleştirilmektedir. Metil eter ve bor triflorür ayrı ayrı birleştirme tankına bor triflorür-dimetil eter sıvı kompleksinin elde edilmesi için beslenirler. Elde edilen kompleks, birinci ve ikinci kolonlara beslenmekte ve burada ısıtma ile gaz fazına geçirilmektedir. Kolon içindeki gaz kolon boyunca yükselerek kolonun üst bölgesine gelmekte ve buradaki yoğunlaştırıcıda tekrar sıvı hale döndürülmektedir. Sıvı kompleksin gaz-sıvı faz ayrışması,

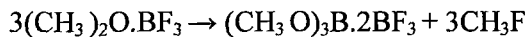


Buradan anlaşılacağı gibi kolon içerisinde sıvı haldeki kompleks, gaz haldeki kompleks, gaz haldeki eter ve gaz haldeki bor triflorür aynı anda bulunmaktadır. ^{10}B , ^{11}B 'ye oranla sıvı kompleks içinde bulunmayı tercih ettiğinden, sıvı kompleks gaz haline geçtiğinde



eşitliği uyarınca izotopik ayırım gerçekleşmekte ve sıvı kompleks içinde ^{10}B zenginleşmektedir. Aşağıdaki eşitliğin denge sabiti 90°C sıcaklık için 1,017 olarak belirlenmiştir.

Burada ayrıca bilinmesi gereken nokta bu ayırım işleminin düşük basınç ve maksimum 105°C sıcaklık altında gerçekleştirilme zorunluluğudur. Çünkü bor triflorür-dimetil eter kompleksi yüksek sıcaklıkta,

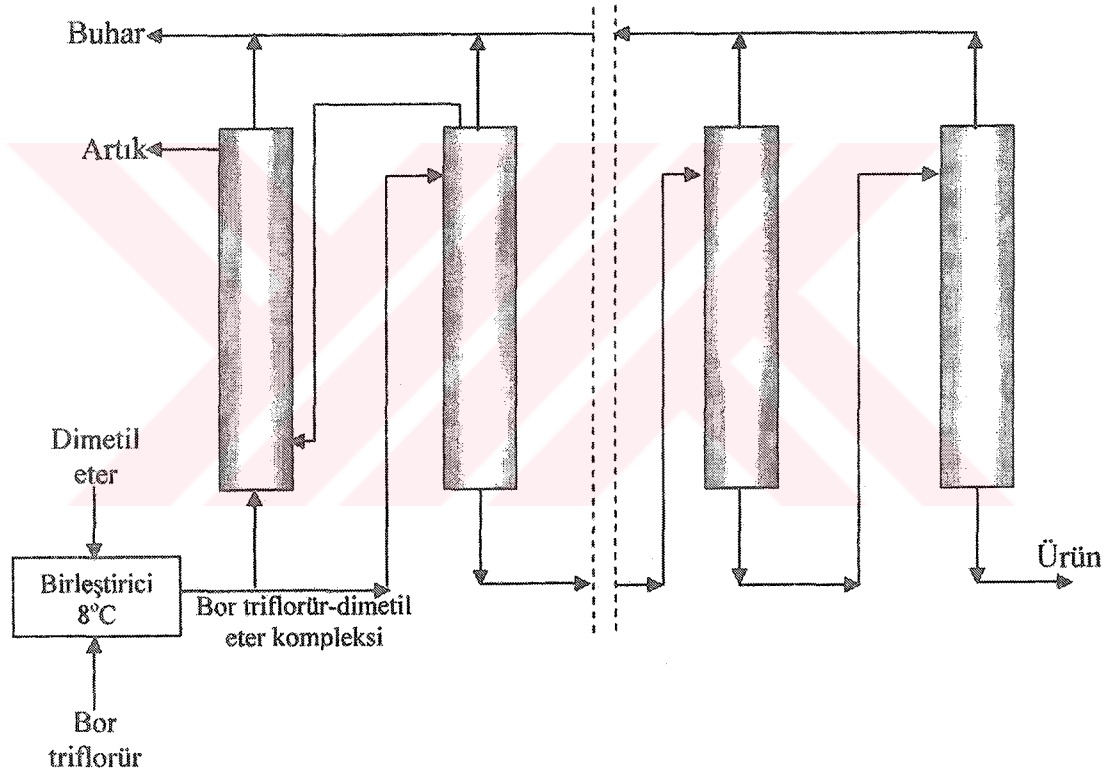


eşitliğine göre bozularak metil florür ve metil borat-bor triflorür kompleksine dönüşmekte ve verimi azaltmaktadır. Eşitlikteki tepkime ürünlerinden metil borat-bor triflorür kompleksinin yoğunlaştıktan sonra kolon içerisinde birikmemesi için ise oldukça az miktarda yoğunlaşmış kısım kolon üzerinde bulunan açıklıktan çekilerek dışarı alınır. Yoğunlaşmış malzemenin çok büyük bir kısmı ise tekrar kolona geri dönmektedir. Eşitliğe göre kolon içerisinde oluşan ve yoğunlaşmayan metil florür ise kolonun üzerinden havalandırma kanalı ile buhar olarak kolon dışına alınır.

İzotop ayırımı esnasında oluşan buhar kaçakları ve atmosferik su nedeniyle bor triflorür-dimetil eter kompleksi,



eşitliğine göre hidrolize olmakta ve oluşan bor triflorür dihidrat kendiliğinden hidroflorik asit, floroborik asit, borik asit ve farklı bileşimlerde hidroksifloroborik asitlere dönüşmekte ve bu asitlerden bazıları çelik yapılar için oldukça korozif olmaktadır. Bu nedenle kolonlardaki ve diğer tüm bağlantı noktaları uygun sağlamlıkta yapılmalı ve önemli bazı parçalar için Monel kullanılmalıdır[8].

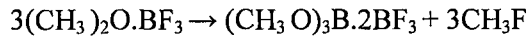


Şekil 4.1. Bor triflorür-dimetil eter yer değiştirme-damıtma ile izotoplarının ayırımı

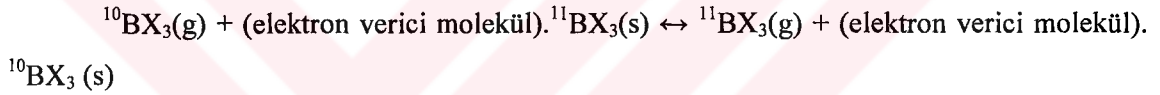
İlk kolondaki yoğunlaşmış sıvı kompleks, kolonun alt kısmından ikinci kolonunun üst kısmına beslenmektedir. Burada da ısıtma ile kompleks aynı biçimde gaz haline döndürülmektedir. Burada ikinci kolonunun alt kısmındaki kompleksin ^{10}B içeriği ilk kolondakine göre daha zengindir. Takip eden kolonlarda da izotop ayırma işlemi aynı biçimde devam etmektedir.

^{10}B içeriği olarak en zengin olan son alt akım ürün olarak alınmakta ve soğutularak ürün tanklarında depolanmaktadır. İstenildiğinde oldukça saf $^{10}\text{BF}_3$ ürünü, elde edilen sıvı kompleksin susuz kalsiyum florürle ilk olarak düşük sıcaklıkta eterin uzaklaştırılması ve ikinci olarak ise oluşan $\text{CaF}_2 \cdot \text{BF}_3$ 'ün yüksek sıcaklıkta bozundurulmasını takiben elde edilebilmektedir [8].

Bor triflorür-dimetil eter kompleksi Manhattan Projesi kapsamında yapılan çalışmalarda en uygun yöntem olarak belirlenmişse de bu kompleksin denge koşullarında yalnızca %60'ı bileşenleri olan bor triflorür ve dimetil etere ayrılmaktadır. Bu durum ise yapılacak olan toplam kademe sayısını artırmakta ya da tek bir adımın izotopik ayırma faktörünün değerini azaltmakta, sonuç olarak ise anapara ve birim maliyeti artırmaktadır. Bununla birlikte,



eşitliğinde verilen geri dönüşümsüz bozunma da işlem verimini azaltmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, daha sonraki yıllarda yapılan detaylı araştırmalar sonucunda,



eşitliğinde gösterilen tipteki izotopik ayırma işlemi için,

- K_{denge} değeri olabildiğince büyük olmalıdır (en az adım sayısı için).
- Dengeye çok kısa bir sürede ulaşılmalıdır.
- BX_3 kompleksten kolaylıkla ayrılabilmelidir (ısı olarak kompleks oluşumu geri dönebilir olmalıdır).
- Kompleks duyarlı ve istenmeyen yan türlere dönüşmemelidir.

$$K_{\text{denge}} = \frac{[^{11}\text{BX}_{3(\text{g})}] \cdot [(\text{elektron verici molekül}) \cdot ^{10}\text{BX}_{3(\text{s})}]}{[^{10}\text{BX}_{3(\text{g})}] \cdot [(\text{elektron verici molekül}) \cdot ^{11}\text{BX}_{3(\text{s})}]} = \frac{[\frac{^{10}\text{B}}{^{11}\text{B}}]_{(\text{s})}}{[\frac{^{10}\text{B}}{^{11}\text{B}}]_{(\text{g})}}$$

Burada; X, H, CH_3 veya bir halojen ve (elektron verici molekül). BX_3 ise Lewis baz Lewis asit kompleksidir.

Elektron alma kapasitesi ve (a) maddesi dikkate alındığında X için en uygun element F olmaktadır. BF_3 'e elektron verebilecek uygun elementler ise H, N, O, S, F, P, Cl, Se ve Te olup bu elementlerde ise O, N ve S elementlerinin dimetil eter, nitrobenzen, nitrometan vb. gibi çeşitli bileşikleri "elektron verici molekül" olarak kullanılabilir. Tarafından, BF_3 ile

kompleks oluşturabilen benzer moleküllerdeki elektron verici elementlere göre kompleks duyarlılığının $N > O > S > Se > Te$ sırasında azaldığı belirtilmektedir [8].

4.2.2 İyon değişimi ile ayırım

İlk iyon değişimi ile izotop ayırımı çalışmasında, sulu veya su+gliserol içeren seyreltik H_3BO_3 çözeltileri 75-150 mikronluk Amberlit CG-400-1 (dördüncül amin, kuvvetli bazik) OH değiştirici reçine içeren kolonlardan geçirilmiş ve belli aralıklarla kolondan çıkan malzemeden örnekler alınmıştır. Orijinal ^{10}B içeriği %19,7 olan borik asit çözeltisindeki ^{10}B miktarı, reçineden geçirildikten sonra sadece sulu çözelti için % 17,3'e ve su+gliserol için %14,5'e inmekte ve dolayısıyla tercihli bir iyon değişimi olarak reçinede ^{10}B zenginleşmesi gerçekleşmektedir.

Daha sonraki çalışmalarda, 6,2 meg/g kuru reçine iyon değişim kapasitesi ve 21 mikron çapa sahip OH tipi zayıf bazik anyon değiştirici fiber şekilli reçine ile doldurulmuş kolondan 0,412 M sulu borik asit çözeltisi geçirilmiştir. Kolon çıkış derişimi başlangıç derişimine ulaştığında besleme durdurulup saf su ile sıyırma işlemine başlanmış ve sıyırma işlemi sırasında kolon altından 5 defa aralıklarla numune alınarak ^{10}B analizi yapılmıştır. Başlangıç ^{10}B miktarına göre alınan 5 numunenin ^{10}B değerleri sırasıyla orijinal miktarın 1,187, 1,214, 1,234, 1,269 ve 1,325 katı daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Anyon değiştirici reçineler kullanılarak bor izotoplarının ayrılmasında,



temel eşitlik olarak verilir. Bu eşitliğe göre ^{11}B 'nin üçlü ve ^{10}B 'nin dörtlü koordinasyonda bulunma isteği daha fazla olup ^{10}B yani $^{10}B(OH)_4^-$ reçinede zenginleşecektir.

Bu iki önemli yöntem dışında $HCIC=CHBCl_2$ 'nin lazerle bozundurulması ile bor izotoplarının ayrılabilceği ve BCl_3 'ün multifoton bozundurma işlemi ile 1,5 katlık bir izotop seçimliliği sağlanabileceği belirtilmektedir [8].

4.3. ^{10}B İzotopunun Analitik Olarak Belirlenmesi ve Kullanım Alanları

^{10}B izotop analizi, bor izotop dağılımının yer kabuğunda oldukça farklı olması ve sıkça ayırımı yapılan bir izotop olması nedeniyle önemlidir. Bor analizi için spektrofotometrik (kolorimetrik, florometrik), iyonometrik, atomik spektrometrik iyon kromatografisi ve nötron aktivasyon analizi yöntemleri kullanılabilmele birlikte bor izotop oranlarının analitik olarak belirlenmesinde atomik absorpsiyon kütle spektroskopik yöntemler ve nötron absorpsiyonuna dayalı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler içerisinde en sık kullanılanları nötron

aktivasyonu ve kütle spektrometrik yöntemler olmakla birlikte son yıllarda üzerinde çokça kullanılan yöntemler pozitif veya negatif ısısal iyonlaşmalı veya ikincil iyon kütle spektrometrik yöntemlerdir.

^{10}B içeren ürünler genellikle, ^{10}B 'un yüksek nötron absorblama kesit alanına sahip olması nedeniyle, nükleer güç tesislerinde nötron kalkanı ve nükleer tepkimelerin hızının kontrolü için kullanılmaktadır. Günümüzde pazarlanan önemli ^{10}B içeren ürünler ve kullanım alanları Çizelge 4.2'de verilmektedir. Bu ürünlerdeki ^{10}B zenginleşmesi genelde minimum %95'tir. Basınçlı su reaktörlerinin soğutma suyunda katkı olarak kullanılan bor miktarı yaklaşık %0,25 ^{10}B 'dur.

Çizelge 4.2 ^{10}B ürünleri ve kullanım alanları

Ürün	Kullanım Yerleri
^{10}B Borik asit	Basınçlı su reaktörlerinde birincil soğutma suyu katkısı
Sodyum penta ^{10}B Borat	Kaynayan su reaktörlerinde standby kontrol suyu katkısı
^{10}B Borlu Al alaşımları (%0,2-4,5 ^{10}B içerir)	Nükleer yakıt depolama ve nakliyesinde
^{10}B Bor karbür	Nükleer güç tesisi kontrol çubuklarında
Ferro ^{10}B Bor (%17-19 ^{10}B)	Borlu paslanmaz çelik yapımında katkı
Zirkonyum di ^{10}B Borid	Nükleer güç tesislerinde yanıcı zehir olarak
Kristalin ^{10}B , ^{10}B Bor oksit, $^{10}\text{BF}_3$	Bilimsel araştırmalarda

Nükleer güç tesislerinde kullanımı dışında, sodyum ve disprosyum takviyesi yapılmış ^{10}B içeren magnezyum borat nötron dozimetrelerinde kullanılmaktadır. Yine nötron dedektörlerinde kullanılacak özellikte olan $\text{Ce}^{3+}:\text{Li}_6\text{R}(\text{BO}_3)_3$ ($\text{R}=\text{Gd},\text{Y}$) bileşiği ısı olarak 2001 yılında sentezlenmiştir. Bunlarla birlikte, ^{10}B , biyolojik çalışmalarda nötron terapisi işlemlerinde kullanılmaktadır [8].

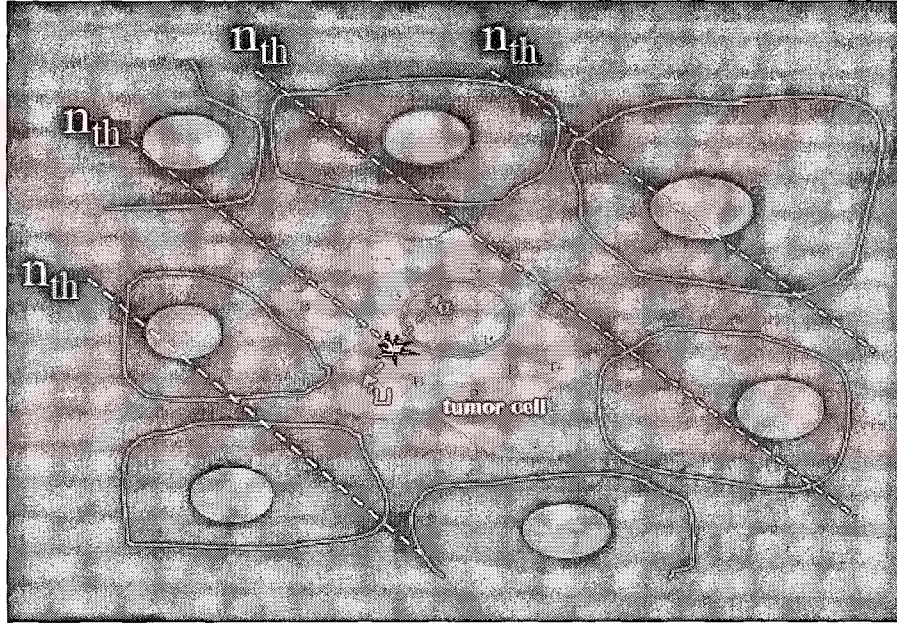
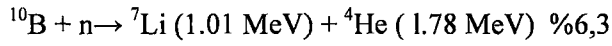
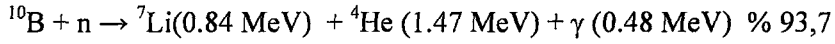
4.4 Bor ile Nötron Yakalama Terapisi (BNCT)

Bor ile nötron yakalama terapisi (BNCT), çeşitli tümörlerin özellikle glioblastoma ve melanoma beyin tümörlerinin tedavisinde kullanılan iki bileşenli radyasyon tedavi yöntemidir. Birinci bileşeni tümör hücrelerinde toplanan kararlı bor izotopudur (^{10}B), ikinci bileşeni ise düşük enerjili nötron kaynağıdır.

BNCT'nin fiziksel temeli basittir. Nükleer reaksiyon temelinde iki bileşenli bir sistemdir. Kararlı bor izotopuna (^{10}B), düşük enerjili termal nötronlar ışınıldığında Helyum-4 (^4He) (yani α parçacığı) ve Lityum-7 (^7Li) çekirdekleri meydana gelir. Bu yüksek enerjili

parçacıklar çok uzağa hareket edemezler ve tümör hücresine tüm enerjilerini bırakırlar, böylece doğrudan DNA'ya zarar vererek hücrelerin yeniden üremesine engel olurlar. ^{10}B ışınlaması sonucu oluşan bu ürünler yüksek doğrusal enerji aktarım (lineer energy transfer) karakteristiklerine sahiptirler (He partikül yaklaşık $150 \text{ keV}\mu\text{m}^{-1}$; Li ise yaklaşık $175 \text{ keV}\mu\text{m}^{-1}$). Bu ürünlerin yol uzunluğu $4,5\text{--}10\mu\text{m}$ arasındadır ve bu uzunluk da yaklaşık bir hücrenin çapı kadardır [34].

BNCT' nin temel reaksiyonu aşağıda gösterildiği gibidir:



Şekil 4.2. Tümörlü hücreye nötron bombardmanı

Şekilde ve yukarıdaki denklemlerde görüldüğü gibi lityum ve helyum hücrede çok kısa bir süre kalmakta ve bu sırada geniş bir alana enerji yaymaktadırlar. Bu parçacıklar da kanser hücrelerini yok ederken sağlıklı dokuya zarar vermemektedirler. Kanserli dokuya ulaşan bor nötron bombardmanı sonrası kanserli hücreleri yok etmekte ve aynı dokudaki sağlıklı hücelere zarar vermemektedir. Tedavinin devamında kanserli hücrelerin tamamen yok edilmesi amaçlanmaktadır [34].

1950 yılların başlarından beri BNCT' de klinik olarak kullanılan bileşiklerde istenilen özellikler düşük toksiteye, yüksek tümör: beyin bor oranına ve $20\text{--}35\mu\text{g bor/g } ^{10}\text{B}$

konsantrasyonuna sahip olmasıdır. BNCT'de kullanılan bor içeren bileşikler sodyum merkaptodekahidrodedekaborat. ($\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$, BSH) ve 4-dihidroksiborilfenilalanin (BPA) bileşikleri ve türevleridir. Son yıllarda seçici tümör hedeflemenin ön plana çıkması ile daha önce tasarlanan ve sentezlenen yapılardan farklı olarak tümör hücresi seçiciliğini sağlayacak (folik asit gibi) daha çok biyokimyasal ve fizyolojik esaslara (lipozomlar, lipidler, DNA bağlayıcıları, hormonlar) sahip bileşikler sentezlenmektedir [35].

BNCT'nin önemli diğer bileşeni ise nötron kaynağıdır. BNCT'nin başarılı olması için tavsiye edilen termal nötron akısı $30 \mu\text{g/g } ^{10}\text{B}$ konsantrasyonlu tümör hücresine dağıtılan yaklaşık 10^{12} n/cm^2 'dir. Derinde olan tümör hücreleri için epitermal nötronlar kullanılmaktadır. Bu nötronlar yaklaşık 1 eV ile 10 keV arasında enerjiye sahiptirler. Epitermal nötronlar nükleer reaktörlerden veya yüklü parçacık hızlandırıcılarından sağlanır. MIT-Cambridge, Bariloche-Arjantin, Rez- Çek Cumhuriyeti, Petten-Hollanda, Studswik-İsveç, Helsinki-Finlandiya, Pavia-İtalya, Kyoto ve JAERI-Japonya, Daejeon-G. Kore ve İnşas-Mısır'da klinik BNCT uygulamaları için kullanılan nükleer reaktörler vardır [34].

BNCT'nin başarısı kanıtlandığı ve klinik olarak yaygın olarak kullanıldığı zaman farklı tipteki nötron, kaynaklarına ihtiyaç olacaktır. Genelde, hastane yakınında deneysel nükleer reaktörlerin olması uygun değildir. BNCT amaçlı yeni küçük ölçekli reaktörlerin inşa edilmesi fikri yüksek yatırım maliyetleri ve hastane çevresindeki kabul edilebilirliğinin düşük olması yüzünden cazip kalmamaktadır. Makul maliyetli, küçük ölçekli, kolay bakım ve yüksek kabul edilebilirlik gereksinimlerini karşılayan nötron kaynakları hızlandırıcıya dayalı nötron kaynaklarıdır (ABNS) [34].

4.5 BNCT İçin Kullanılan Hızlandırıcılar

Genelde, hızlandırıcılar dairesel veya doğrusal olarak sınıflandırılırlar.

4.5.1 Dairesel hızlandırıcılar

Dairesel hızlandırıcılar oldukça küçük, verimli ve yüksek maliyet etkinliğine sahiptirler. Çünkü parçacık aynı hızlandırıcı yapısıyla birçok kez hızlandırılır ve istenilen enerjiye ulaşana kadar kazanılan enerji kademeli olarak artar. Genellikle, dairesel hızlandırıcıların doğrusal hızlandırıcılardan daha düşük akıyla kısıtlanması gibi dezavantajları vardır. Dairesel hareket için gerekli olan mıknatıs sistemleri büyük ve pahalıdır. Ayrıca, güç tüketimi ve parçacık ekstraksiyonu işlemi daha zor olabilmektedir.

BNCT uygulamaları için hastanede kullanılacak fiziksel büyüklükteki dairesel hızlandırıcı siklotrondur. Günümüzde siklotronlar, hastanelerde pozitron yayıcıların üretiminde

ve hızlı nötron radyasyon tedavilerinde (FNT) kullanılmaktadır. Her iki uygulamada BNCT kullanılacak hızlandırıcıya dayalı nötron kaynağı için en uygun olacağı düşünülen ışın demetinden daha yüksek enerjili fakat daha düşük akımla yüklenmiş parçacık ışın demetleri gereklidir. Genelde, BNCT için gerekli hızlandırılmış parçacık enerjisi (birkaç megaelektrovolt) ve akımı (~10 mA), siklotron için olan geleneksel işletme rejiminden farklıdır. Siklotronların, BNCT'de hızlandırıcı olarak kullanılması ihtimali çok uzak gibi görünse de hızlı nötron terapisi için kullanılan siklotronlar modifiye edilmeden BNCT-zenginleştirilmiş FNT' de kullanılabilir. Sadece hızlandırıcı hedefinin modifiye edilmesi gerekir [34].

4.5.2 Doğrusal hızlandırıcılar

Doğrusal hızlandırıcılar elektrostatik doğrusal hızlandırıcılar veya radyo frekanslı (rf) doğrusal hızlandırıcılar olarak sınıflandırılırlar. Adından anlaşılacağı gibi elektrostatik doğrusal hızlandırıcılarda yüklü parçacık ışın demeti elektrostatik alanla hızlandırılırken, rf doğrusal hızlandırıcıda parçacıklar zamanla değişen indirgenmiş elektrik alanıyla hızlandırılırlar [34].

4.5.2.1 Elektrostatik doğrusal hızlandırıcılar

Genelde, elektrostatik doğrusal hızlandırıcılar çeşitli düşük enerjili yüklü parçacıkların fiziksel araştırmaları için uygundur. Çünkü elektrostatik doğrusal hızlandırıcılar farklı yükteki parçacıkların ve farklı enerjili kütlelerin hızlandırılmasında kullanılabilirler. Elektrostatik doğrusal hızlandırıcı tipine örnek olan Van de Graff hızlandırıcısı birçok ülkede kullanılmaktadır. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü(MIT)'ündeki hızlandırıcı demeti uygulamaları laboratuvarında (LABA) BNCT araştırmaları için elektrostatik hızlandırıcı kurulmuştur. LABA hızlandırıcısının, farklı yük enerjilerindeki BNCT araştırmaları için farklı yüklü parçacık hedef reaksiyonlarının kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde çok iyi bir cihaz olduğu kanıtlanmıştır. Tandem şeklinde dizayn edilmiştir. Lawrence Berkeley Laboratuvar (LBL)' ındaki elektrostatik kuadropol (dörtlü kutuplayıcı) hızlandırıcısının (ESQ) tasarımıyla klinik BNCT uygulamaları yeniden canlanmıştır. Bu hızlandırıcı Tandem şeklinde inşa edilmemiştir. 2.5 MeV protonların 50 mA kadar hızlandırma yeteneğine sahip olacağı tahmin edilmektedir. Ancak, boyutları büyüktürler. 2.5 m çapa ve 6,1 m uzunluğa sahip tank içerisine yerleştirilmiştir. BNCT için inşa edilen 2,5 MeV 'luk proton ESQ hızlandırıcısı oldukça küçüktür ve 2-3 m çap ve 3 m uzunluktaki tank boyutuna sahiptir. Fakat sadece 1 m çap ve 3 m uzunluktaki tanka sahip LABA hızlandırıcısıyla karşılaştırıldığında büyük kalmaktadır.

Birmingham Üniversitesi'nde işletmede 1.25 mA akım ve 2,8 MeV enerji gücüne sahip Dynamitron doğrusal elektrostatik hızlandırıcısı vardır. Bu hızlandırıcının klinik BNCT uygulamaları için kullanılması planlanmaktadır [34].

4.5.2.2 Rf doğrusal hızlandırıcılar

Rf hızlandırıcısında yüklü parçacıklar, yer ve zamanla değişen indirgenmiş elektrik alanı ile hızlandırılır. Rf doğrusal hızlandırıcılar LABA'da yapılanlar gibi BNCT için farklı yüklü parçacık hedef reaksiyonları için uygun değildir. Ancak, klinik BNCT araştırmaları için rf doğrusal hızlandırıcılar, uygun yüklü parçacık ve yüklü parçacık enerjisi tanımlandığında uygun olmaktadır. Genelde, aynı parçacık enerjisi ve pik akımında rf hızlandırıcısı, elektrostatik hızlandırıcıdan daha küçük boyutta olmaktadır. Ancak, rf doğrusal hızlandırıcılarının işletim masrafı, elektrostatik hızlandırıcılarının işletim masrafından fazladır. Çünkü rf doğrusal hızlandırıcıların güç tüketimi oldukça yüksektir.

Özellikle BNCT için tasarlanan rf hızlandırıcısının inşası ve deneme çalışmaları devam etmektedir. Hastanedeki BNCT uygulamalarında hızlandırıcıya dayalı nötron kaynağı için parçacık enerjisi ve akımı gereksinimlerini karşılayabilecek olarak ilk kez tanımlanan proton linak, radyo frekanslı kuadropol (RFQ)'dur.

BNCT gereksinimlerini karşılamak için küçük ve pahalı olmayan rf hızlandırıcısı gereklidir. Hızlandırıcıya dayalı epitermal nötron kaynağı (ABENS) olarak adlandırılan rf hızlandırıcısı, Linak Sistemi kapsamında geliştirilmektedir. Rf kuadropol ile seriler halinde RFQ linak yapısını birleştiren ABENS hızlandırıcısı, rf sürücü tüplü linak (RFD) yapısındadır. RFD linak yapısı özellikle hızlandırıcı verimini artıracak şekilde tasarlanmıştır. Böylece, birkaç MeV aralığındaki linak sistemleri için rf yatırım ve işletim maliyeti azalmaktadır. Yaklaşık 1,5 M\$ maliyetli ABENS hızlandırıcısı 0,6 m çap, 3m uzunluk ve yaklaşık 1500 kg ağırlığa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır ve 2,5 MeV 'luk protonların 10 mA üreteceği tahmin edilmektedir [34].

4.6. Türkiye'deki Çalışmalar

1950'li yıllardan beri BNCT'de kullanılmak üzere bor içeren çeşitli bileşikler sentezlenmiştir. Son yıllarda kanser tedavisinde kullanılacak yeni ajanların tümör hücresine seçici olarak birikebilecek biyokimyasal ve fizyolojik esaslara sahip olması istenir. Bu gelişmeler dikkate alınarak dünyada yapılan BNCT araştırmalarına hedefleyici farklı polimerik bazlı bor taşıyıcı ajanların sentezlenmesiyle katkıda bulunmak amacıyla "Bor nötron yakalama terapisi için sıcaklık ve pH'a duyarlı polimerik taşıyıcı tasarımı ve hücre kültüründe kullanımları" adlı doktora tezi çalışması; Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde başlatılmış ve çalışmanın son aşamasına gelinmiştir.

Bu çalışmada bor içeren vinilfenil boronik asit (VFBA) monomeri ile maleik anhidrit (MAH) radikal kopolimerleşme yöntemiyle azot atmosferinde, 65°C silikon banyosunda ve cam

reaktörlerde sentezlenmiştir. Sentezlenen (VFBA-ko-MAH) kopolimerine biyo uyumluluğu artırmak için % 0.043 mol oranında polietilenglikol (PEG) modifiye edilmiştir. PEG modifiye VFBA-MAH kopolimerine suda çözünmesini kolaylaştıracak ve hücre içerisine girişi sağlayacak polietilenimin (PEI) bağlanmıştır.

Elde edilen bu polimerlerin karakterizasyonu FTIR, DSC, DTG ve ¹H-NMR analizleriyle yapılmıştır.

Folik asitin bir B vitamini ve vücutta yeni kan hücresi yapımında, aminoasit yapımında ve hücrelerin yenilenmesinde önemli görevler üstlendiği bilinmektedir. Folatlar da folik asite büyük moleküllerin bağlanmasıyla folik asitten türetilen bileşiklerdir. Kanser hücreleri normal hücrelerden daha etkili olarak folatı yakalamak için mekanizma geliştirdikleri literatür bilgisi dikkate alınarak sentezlenen bu bileşiğe tümör hücrelerine seçici olarak yönelimi sağlayacak folik asit bağlanmıştır.

Sentezlenen poli(VFBA-ko-MAH)-g-PEG/PEI makro kompleksi ve folik asit takılan poli(VFBA-ko-MAH)-g-PEG/PEI kompleksinin HELA hücre kültüründeki deneyleri devam etmektedir. Bu deneyler iki bileşiğin hücre içerisine girip girmediğini ve toksitesini öğrenmek amacıyla yapılmaktadır. İlk denemeler bu iki kompleksin hücre içerisine alındığını göstermektedir. Daha kesin sonuçlar almak, folik asitle tümör hücrelerine yönelimin sağlandığını göstermek ve fotoğraflarla kanıtlamak için hücre kültürü deneyleri devam etmektedir [34].

Yapılan çalışmalarda, dünyanın en büyük bor rezervlerine ve ne yazık ki oldukça fazla kanserli hasta sayısına sahip olan ülkemizde, farklı farklı akademik disiplinlerden pek çok araştırmacıyı bir araya getirebilecek bir çekirdek proje olma potansiyeline sahip BNCT yönetimi kısaca tanıtılmakta ve ulusal bir BNCT merkezinin kurulabilmesi için, bir ön araştırma projesinin önemi vurgulanmaktadır [35].

4.7.Dünyadaki Önemli BNCT Çalışmaları



Şekil 4.3. Brookhaven ulusal laboratuvarının görünümü

BNCT ilk olarak Amerika da Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda 1950'lerde klinik olarak kullanıldı. BNCT kullanımının erken sonuçları ümit vericiydi. Ama geleneksel tedavilere göre fazla avantaj sağlamadı. Aynı zamanda, Amerika'daki Massachusetts Teknoloji Enstitüsü buna benzer denemeler yaptı; ancak yapılan bu çalışmalar, kangren ve akut ödemleri gibi uygun olmayan sonuçlar yüzünden durduruldu. Bunlar ilacın iyi nüfuz etmemesi ve yetersiz olmasından kaynaklanır. Bir termik ışın, tümör yüzeyinde iyileştirici etki yaparken diğer taraftan bir epitermik ışın, 3 cm derinlikte tedavi edici ilerleme yapıyordu. Japonya'da 1960'ların sonunda, epidermik ışınlar kullanılarak beyin tümörlerini tedavi edecek teknikler bulmak için deneyler yapıldı. 1972'ye kadar 120 hasta BSH bileşiklerini kullanarak tedavi edildi. Bu tedaviler diğer sonuçlara göre III. ve IV. derece gliomas'a sahip olan hastalar için çok ümit vericiydi.

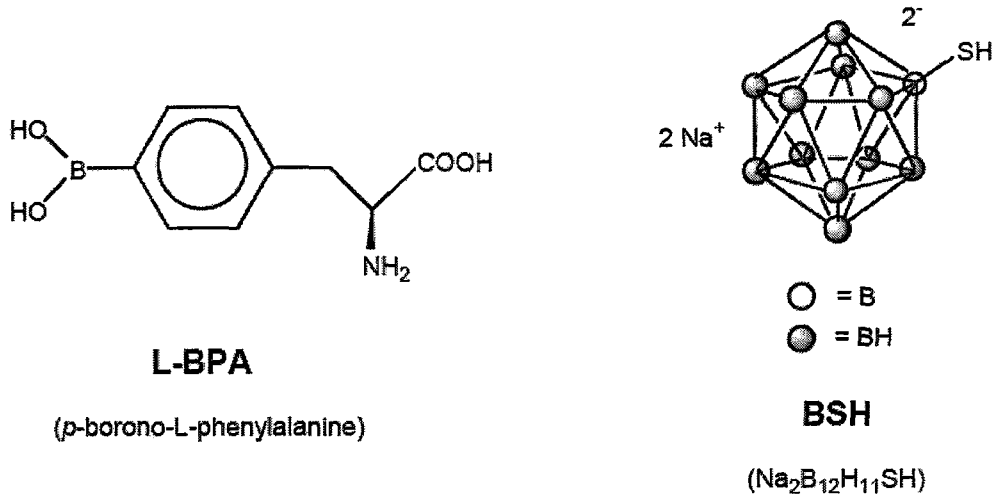
BCNT metodunu kullanarak tümörleri tedavi eden radyasyon merkezleri aşağıdaki Çizelge 4.3'te verilmiştir [36].

Çizelge 4.3. 1996 Eylül itibarıyla Amerika ve Japonya'daki klinik BNCT merkezleri

Şehir ve Enstitü	Hastalık tipi	Tedavi Edilen Hasta Sayısı
Japonya Kagawa	Gliomas	152
Japonya JAERI	Gliomas	2
Japonya Kyoto	Gliomas	44
USA BNL	Glioblastoma	20
USA MIT	Gliomas	2
USA MIT	Melanoma	4

Hollanda'daki Petten High Flux Reactor'deki III. ve IV. derece Gliomas'ün tedavisinde bir BSH kullanılarak BNCT deneyleri yapıldı. İngiltere Birmingham Üniversitesi, kraliçe Elizabeth hastanesiyle işbirliği yaparak yeni bir tedavi merkezi geliştirme konusunda bir öneri sundu. Bu öneri; bir reaktör odaklı sisteme karşı, hızlandırıcı odaklı sistem geliştirilecek ve 2.8 MeV enerjili protonlardan faydalanılarak ve Lityum hedef [${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$] kullanılarak 1.1 MeV'lik düşük enerjili nötronların elde edilmesidir. Ancak çalışmalar esnasında lityum hedef üzerine gönderilen protonların etkileşimi, önemli bir problem olarak ortaya çıkar. Bu problem, hedefe vuran protonların küçük bir hacimde birkaç kilovatlık ısı üretmesiyle, ışınlama sırasında buharlaşmanın önlenmesi için ortamın yeterli derecede soğutulmamasıdır. Hızlandırıcı odaklı sistemin avantajları; yönetim masraflarının daha ucuz olması, nötron ışınının düşük ortalama bir enerjiye sahip olması nedeniyle daha az süzme gerektirmesi ve gama fotonlarıyla reaktör ışınından daha az kirliliğe sebep olmasıdır [36].

BNCT'ye maruz kalan hastalar için, ışınlamadan önce borlu bir ilacın ışınlanacak bölgeye verilmesi gerekir. Şu anda, kullanılan iki ana ilaç vardır. Sodyum merkaptodekahidrododekaborat (BSH) ve bor fenil alanin (BPA). BSH'nin ışınlamadan 12–18 saat, BPA'nın ise sadece 1–2 saat önce verilmesi gerekir. Hastalar tümör tipine ve ilacın tipine göre tedavi edilir. Nötron reaksiyonları vücudun farklı elementleriyle nötron ışının etkileşiminden sonuçlanan alfa parçaları ve protonlar üretir [36].



Şekil 4.4. L-BPA ve BSH'nin geometrik yapıları

J.A. Coderre ve arkadaşları, normal insan beyninin bor nötron yakalama terapisi ile etkileşimi hakkında araştırmalar yapmıştır. Bu araştırmaların sonuçlarına göre;

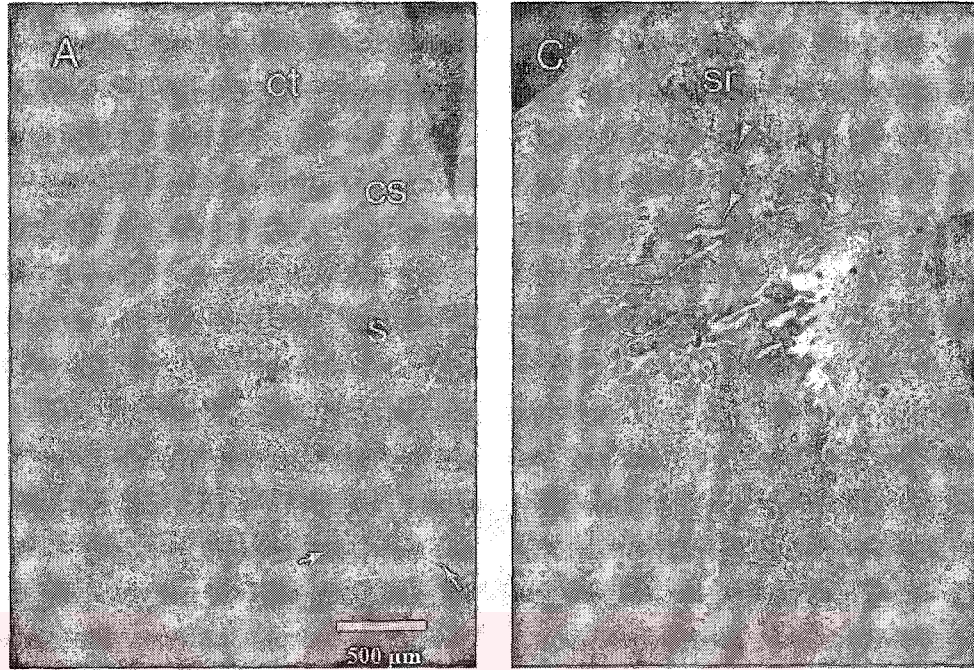
1994–1999 yılları arasında yapılan Harward, MIT(Massachusetts Institute of Technology) ve BNL(Brookhaven National Laboratory)'de yapılan araştırmalar analiz edilerek değerlendirilmiştir. Bu araştırma sonuçlarına göre insan beyni için nötron gönderilecek bölgeye enjekte edilecek en uygun borlu bileşiğin BPA(*p*-borono-L-fenilalanin) olduğu tespit edilmiştir. Bu klinik deneyler I ve II. Seviyedeki tümörler için en uygun ilaç dozajının tespit etmek amacıyla yapılmıştır [37].

1994–1999 yılları arasında BNL' de, 53 hasta üzerinde uygun radyasyon dozunu tespit etmek amacıyla araştırmalar yapılmıştır. Hastaların hepsine fruktozda çözülmüş (BPA-F) ve 2 saat bekletilmiş BPA kullanılmıştır. Uygulanan BNCT'den sonra kandaki ^{10}B konsantrasyonu artmış ve 12–16 mg/g'a yükselmiştir. En uygun radyasyon ve borlu kimyasal madde dozu tespit edilmeye çalışılmıştır.

Harward ve MIT araştırmacıları yukarıda bahsedilen çalışmaya benzer klinik çalışmaları, glioblastoma, deri altı melanoma ve beyinde metaztaz yapabilen tümörlere sahip hastalar üzerinde BPA dozu ve radyasyon süresi ile ilgili olarak gerçekleştirmişlerdir. Bütün bu araştırmalar sonucunda BNCT'nin tümör hücrelerini öldürmede etkili olduğu görülmüştür. Bu tedavinin, nörolojik zehirlenme ve baygınlık gibi yan etkileri de gözlenmiştir.

Normal beyin

Tümörlü beyin



Şekil 4.5. Normal beyin ve tümörlü beyin görünümü

Sonuçta tarif edilen iki klinik çalışma da BNCT'nin beyin tümörlü hastalarda uygulanabileceğini göstermiştir [37].

A.E. Hawk, T.E. Blue, J.E. Woollard Ohio Devlet Üniversitesi'nde Nükleer Mühendislik Bölümü'nde BNCT'de hızlandırıcı tabanlı nötron kaynakları (ABNS) için zırhlama tasarımı üzerine çalışma yapmışlardır. BNCT kullanımı için yüksek kalitede bir nötron sahası elde etmeye odaklanılmıştır. BNCT için ABNS bir proton hızlandırıcısından, yüksek enerjili lazer taşıma sisteminden, ^7Li hedefinden, bir hedef ısısını yok etme sisteminden, bir moderatör birleştiricisinden ve tedavi odasından oluşur. Bu çalışmada tedavi odasının dışında bulunan radyasyon gören personelin yeterince korunması için yayınlanan nötronlardan zarar görmemesi için gerekli zırhlama yapılmıştır [38].

Monica Rao ve arkadaşları kediler üzerinde BNCT kullanımı ile ilgili araştırma yapmışlardır. Bu araştırmayı şu şekilde anlatabiliriz:

SCC sıradan bir tümördür ve deriyle alakalıdır. Kedilerde görülen tümör tiplerinin yaklaşık %15 ini içerir. SCC genellikle renksiz ya da açık renkli cilt bölgelerinde görülür. Kedilerdeki en yaygın görülen yerler, burun çevresindeki seyrek kıllı bölgeler, göz kapaklarıdır [39].

Burada gerçekleştirilen mevcut çalışmanın amacı, SCC odaklı düşük toplam radyasyon dozajında BPA ve BPA-BNCT'nin biyodağılım çalışmalarının kafa ve boyun tümörüne sahip neredeyse ölümcül kedi hastalarına uygulanmasıdır. Çalışmada baş ve boyun kanseri olan kediler vardır.

Hasta 1: Dişi, yetişkin, yaşı bilinmiyor. Son derece agresif, lokal aşındırıcı tümör göz kapağı bölgesinde ve değerlendirme süresi yaklaşık 2 yıldır. Tekrar tekrar çıkınca tümör 3 kez cerrahi işlemle alındı. Bir yıl önceden gözlerden biri alınmıştı. Tümör tekrar etti ve standart terapi artık geçerli bir opsiyon değildir.

Hasta 2: Dişi, 13 yaşında, Burun bölgesinde ülseratif, kanamalı, lokal aşındırıcı tümör var. Teşhis = SCC. Değerlendirme süresi yaklaşık 1,5 yıl, hayvanda güç kaybı var. Nefes alma gücünü çekiyor ve iştahsızlık mevcuttur. Lokal tümör aşınması, koku almayı engelliyor ve körlüğe yol açmış. Kedi daha önce hiç tedavi olmamış.

Hasta 3: Dişi, 12 yaşında. Burun bölgesinde lokal aşındırıcı tümör ülseratif ve kanamalı. Teşhis= ayırt edilemeyen SCC. Değerlendirme süresi = yaranın ilk belirlenmesine göre yaklaşık 5 yıl. Kedi 9 ay önce 2 kez kemoterapi olmuş. Tümör kontrolü çok az yapılmış.

Daha sonra bu hastalara (%98 ¹⁰B katılmış) L-BPA-fruktozun 0,14 M solüsyonu damar yoluyla yaklaşık 15-20 dk. 300 mg/kg vücut ağırlığı dozunda uygulandı. Aşağıdaki çizelgelerde yer alan numuneler, aşılardan önce, aşılama sonrası ve ışık (hafif) ketamin-xylozin anestezisi altında aşılama yapıldıktan sonraki 30 dk. 1. , 2. ve 3. saatlerde hastalardan alındı (Biyodağılım çalışması) [39].

Çizelge 4.4. 1 nolu hasta için BNCT 'den 1-2 hafta önce hastaya 300mg/kg dozunda BPA uygulandıktan sonra farklı zamanlarda alınan doku ve kan örneklerindeki bor konsantrasyonu (ppm)

Saat olarak süre	Kan	Tümör	Tümör üstündeki devri	Yüz cildi	İdrar	Tükrük
0	32.2					
0.5	16.4				182.5	
1	16.6					
1.5	11.0					
2	12.8					
3	7.9	21.6±3.0 (n=12)	18.3	13.3	368.8	0

Çizelge 4.5. 2 nolu hasta için BNCT'den 2,2 hafta önce hastaya 300mg/kg dozda BPA verildikten sonra farklı zamanlarda alınan kan ve doku örneklerindeki bor konsantrasyonu (ppm)

Saat olarak süre	Kan	Tümör	Tümörün sızdığı Pinna
1	20.4	-	-
2	-	-	-
3	9.2	39.2	35.4

Çizelge 4.6. 2 nolu hastaya 300mg/kg dozda BPA verilmesinden sonra farklı zamanlarda alınan kan ve doku örneklerindeki bor konsantrasyonu(ppm)

Saat olarak süre	Kan	Tümör	Dudak mukozası	Sırt derisi
(A) İlk BNCT'den 2 hafta önce				
0	40.3			
0.5	19.5			
1	14.1			
2	11.1			
3	7.9	18.2±0.4	12.4	11.2
(B) İlk BNCT günü				
2	9.7±0.4			
2.5				18.1
3.5	12.6±1.0			15.5±4.7
(C) İkinci BNCT'den 2 hafta önce				
0	55.4			
0.5	20.2			
1	13.6			
2	9.5			
3	9.2	24.0±2.8	17.3	14.6

Biyodağılım çalışmalarından yaklaşık 2 hafta sonra BNCT uygulanarak, işlemlere devam edildi. Radyasyon verme işlemi veya 1 reaktörünün termal ışınlarıyla tümörlü bölgeye yaklaşık olarak 3×10^8 n/cm² akış verilmesiyle gerçekleştirildi ve yaklaşık 10 dk. sürdü. BNCT

sonrası tümörlü alanın biyopsisi alındı ve ötenazi gerçekleştirilerek 3 kedinin otopsi yapıldı. Radyoaktif etkiler şu klinik işaretlere göre değerlendirildi; kasılmalar, kas kontrolü kaybetme ve koordinasyon eksikliği gibi nörolojik tepkiler davranış bozuklukları, tüy dökülmesi sinirlerin kümelenmesi, gastrik ve intestinal ülserleşme, karın boşluğunda anormal derecede sıvı birikmesi, karaciğerde yağ tortulaşması ve akciğer ödemi gibi radyasyondan kaynaklanan toksiditeye uygun otopsideki bulgulardır [39].

Sonuç olarak;

Hasta 1: ölçülebilir tümör kütlesi mevcuttu ve BNCT sonrası 20 günde, tümör hacminde önce %12'lik bir küçülme görülmüş, sonra tümör büyümesi durmuştur. BNCT den 5 ay sonra, hayvan ötenazi edildi ve otopsi sonucunda, radyasyondan kaynaklanmış herhangi bir yaraya rastlanmamıştır.

Hasta 2: BNCT ten 24 saat sonra, tümör bölgesinde bir yara kabuğu görüldü. BNCT den sonraki ilk haftada kedinin klinik durumu, hareket, iştah ve nefes alma bakımından ilerleme gösterdi. BNCT ten önce yara, nefes alma ve iştahı engellenmişti. BNCT sonrası 17 günde, tümör kontrolü, tümör bölgesinde sağlıklı epitellerin oluşmasına izin verdi. BNCT sonrası 2.5 ayda kedi ötenazi edildi ve otopside radyasyondan kaynaklanan herhangi bir yaraya rastlanmadı.

Hasta 3: BNCT sonrası ilk ayda, tümör büyümesinde durma ve kısmi tümör kontrolü gözlemlendi. BNCT sonrası 3 ayda, hareket, iştah ve rahatlık bakımından klinik olarak iyi durumdaydı. Ne var ki, daha fazla tümör kontrolü gözlenmedi. O anda kemoterapi uygulandı. Ancak tümör buna tepki vermedi. Tekrar biyodağılım çalışmaları ve 2. bir BNCT tedavisi gerçekleştirildi. Bu tedaviden 2 gün sonra, hayvan klinik bir düşüş sergiledi. Steroidler kullanıldı. BNCT sonrası 4 gün, kedi hareket ve iştah kazandı. BNCT ten 20 gün sonra, kedi ağaca tırmanmaya başladı. Radyasyondan kaynaklanan tek değişiklik; tümör çevresinde tüy dökülmesiydi. BNCT de 2. tedaviden 2 ay sonra, boyun lenf damarlarında gözle görülür tümör istilasısı klinik olarak belirlendi [39].

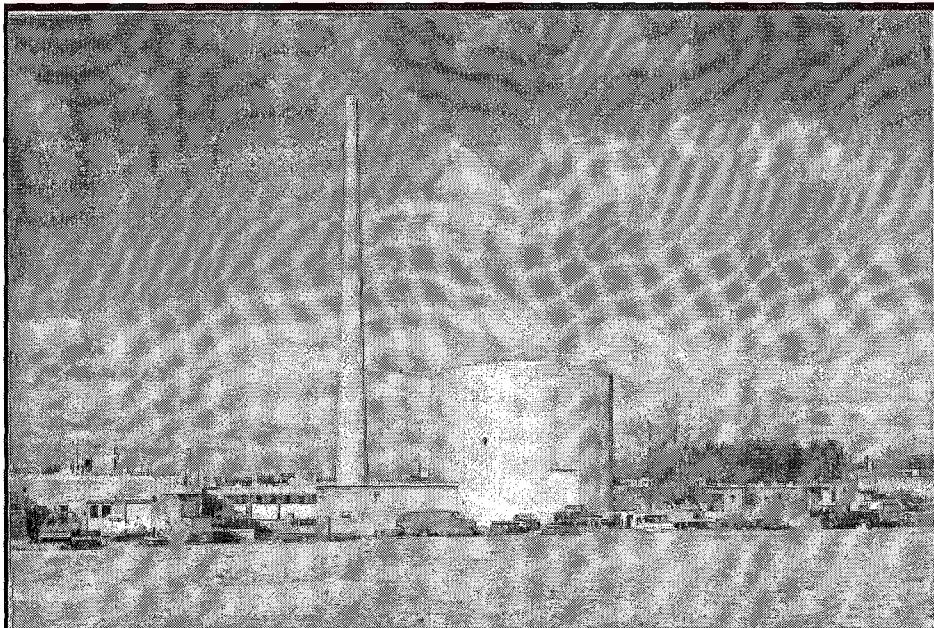
Yapılan bu çalışmaların sonucunda, normal dokulara hiçbir belirgin zarar vermeden, terapatik etkiyi başararak veya RA-1 reaktörünün termal ışını BNCT ile birlikte, felin hastalarındaki kendiliğinden oluşan baş ve boyun kanseri tedavisinde faydalı olduğu görüldü. Bu dünya çapında, kendiliğinden oluşan felin kanserinde ilk BNCT çalışmasıdır [39].

Amerika'da Cristopher R. Gibson, Alfred E. Staubys ve diğerleri yaptıkları çalışmalarda, undekahidromerkapto-kloso-dodekaboratın ($\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$), sodyum bor yakalanması ile ilgili bir ilaç olduğunu kanıtlamaktadırlar. Bu ilaç klinik olarak BNCT tedavisi

ile beyin tümörleri için, 1967'den beri Japonya'da, 1978'den beri Avrupa'da kullanılmaktadır [40].

Veronica A. Trivillin, Elisa M. Heber ve arkadaşları, hamster çene kesesi tümörleri için, GB-10'lu BNCT tedavisini uygulamışlardır. Bu çalışmanın amacı, ilk kez Bariloche Atom merkezinde RA-6 reaktörünün termalize epitermal ışınını kullanarak, GB-10'lu ve BPA işbirliği ile BNCT ve sadece GB-10'lu BNCT'ye, hamster çene kesesi tümörleri kanser öncesi, dokuları ve normal dokuların tepkisini ölçmektir. GB-10, %75,5 tümör kontrolü sağlamıştır. Bunu yaparken tümörlü dokunun çevresindeki dokulara hiç zarar vermemiştir. Böylece her ne kadar ağız tümörü dokusu tarafından seçilerek alınmasa da bu modelde, GB-10'un terapötik olarak etkili bir bor maddesi olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca GB-10, tümörlü kan damarları üzerinde seçici bir etki yaparak, normal dokuya çok az bir etki yapıp önemli ölçüde tümör kontrolü sağlamıştır. GB-10 ve BPA destekli BNCT, normal doku mukavemetini aşmaksızın, normal dokuya az etkisi olup, asıl tümörlü dokuya odaklanmayı başarmıştır [39].

Tek başına GB-10, ağız kanserinde BNCT için faydalı bir bor maddesidir. Bor dağılımı esnasında tümör hücreleri seçici olmamıştır, ama şaşırtıcı bir biçimde test esnasında, normal dokuya zarar vermeden tümörü yok edebilmiştir. Bunu yaparken de tümör damarlarında seçiciliği de başarmıştır. GB-10 + BPA'lı BNCT, normal dokuya, dozun azalmasıyla sonuçlanmış ve böylece normal dokunun direncini kırmadan, tümörlü dokuya önemli ölçüde daha fazla dozun uygulanmasını sağlamıştır [39].



Şekil 4.6. Brookhaven Tıbbi Araştırma Reaktörü

5. SONUÇ

Dünyanın çeşitli yerlerinde BNCT üzerindeki araştırmalar ve klinik denemeleri uzun süredir devam etmektedir. 350'den fazla hasta bu yolla tedavi edilmiştir.

BNCT ile ilgili araştırmalar devam etmektedir. Bundan dolayı bu tedavi yönteminin kesinleşmesi biraz zaman alacaktır. şimdiye kadar tedavisi imkânsız görölen melonoma ve glioblastoma gibi bazı beyin tümörlerinin BNCT yöntemiyle tedavi edilebileceği görölmüştür. Yüzeysel deri tümörleri ile jinekolojik deri tümörlerinin de bu yolla tedavisi mümkün görölmektedir. Bu tedavide iki kimyasal bileşik temel madde olarak kullanılmaktadır. Bunlar BPA (p-boronofenilalanin) ve BSH (Sodyum merkaptodetakaborat) tır.

BNCT diğer tedavi yöntemleriyle birlikte kullanıldığında daha etkili sonuçlar verebilir. BNCT tedavi yönteminin başarısı klinik uygulamaların yaygınlaştırılması, nötron kaynaklarının ve hastane koşullarına uygun hızlandırıcıların geliştirilmesi ile artacaktır.

¹⁰B içeren kimyasal bileşiklerle yapılan BNCT tedavisinin avantajlarından en önemlisi tümörlü dokunun yok edilmesi için yapılan çok tehlikeli ve riskli olduğunu bildiğimiz ameliyatların riskini ortadan kaldırarak bıçak izi olmadan hastayı tedavi etmektir. BNCT beyin kanserleri tedavisinde en modern ve en etkili metot olmasına rağmen kanserli hücrelerin tamamen yok edilmesinin mümkün olmadığı durumlarda kanser yenilenmektedir. Bu konuda başarı sağlamak için bütün dünyada yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Dünyadaki BNCT ile ilgili araştırmalardaki gelişmeler göz önüne alındığında Türkiye'de de bu tür tedavi amaçlı nükleer merkezlerin kurularak bu teknolojiye hazırlamak amacıyla araştırmaların yapılması ve alt yapı oluşturulması gerekmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Saraçbaşı, A., Sivrikaya, H., Bor madeninin ahşap koruma endüstrisi için önemi, İç Anadolu Orm. Araş. Müd. Ankara, ZKÜ Bartın Orman Fak. Orman End. Müh. Böl. Zonguldak
- [2] Yılmaz, F., 1996, Türkiye’de bulunan hidrate bor minerallerinin nötron zırhlanma etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul
- [3] Erdoğan, Y., Olgun, A., Kalfa, O. M., Atar, N., 2004, Bor endüstri atıklarının değerlendirilmesi, II. Bor Çalıştayı, Zonguldak, 19
- [4] Atalay, T., Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Zonguldak, 67100
- [5] <http://www.rsgd.taek.gov.tr>
- [6] Yarar, Y., 1987, Türk kolemanitlerinin nötronlara karşı taşınabilir beton zırhlanma bloklarında kullanımı, Yüksek lisans tezi, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul
- [7] DPT, 1994, VII. beş yıllık özel kalkınma planı özel ihtisas alt komisyonu endüstriyel hammaddeler raporu-bor mineralleri
- [8] Obut, A., Girgin, İ., 2005, 1. Ulusal Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı, Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06532, Beytepe, Ankara, 391-399
- [9] Altun, F., 2005, Bor, Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 80 s.
- [10] Aytekin, Y. ve Polaf, M., Bor madenciliğinin Türkiye için önemi, Etibank bülteni, No:96-97, Ankara
- [11] <http://www.boren.gov.tr/tarihce.htm>
- [12] Polat, M, 1987, Türkiye ve Dünyada Bor ve Bor Teknolojisi Uygulamalarının Araştırılması, No: FB/MAD/87. ARD37, İzmir
- [13] Kirk and Othmer, 1987, Encyclopedia of Chemical Technology, Boron Compounds, Third Ed, Newyork
- [14] DPT, 2001, Kimya Sanayi Hammaddeleri, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Raporu, Ankara
- [15] Garret, D.E., 1998, Borates Hand Book of Deposits, Processing, And Use, Academic Press, California
- [16] Tunç, Z., 2003 Bor Endüstri atıklarının tuğla ve kiremit üzerinde kullanılması, Yüksek lisans tezi, Tez no:45082, 40 s.
- [17] DPT, 1998, Bor Madenleri, Ö.İ.K. Raporu
- [18] Etibank, 1990, 1990 Yılı Program Değerleri
- [19] T.C. Başbakanlık DPT Müsteşarlık Araştırma Grubu Bşk., 1999, Kimyasal Madde Araştırması, Bor Bileşikleri
- [20] <http://www.mta.gov.tr>
- [21] Bilim Teknik Dergisi, 2001, Her Derde Deva Hazinemiz Bor, Sayı: 401

KAYNAKLAR DİZİNİ(Devamı)

- [22] Kavas, T., Olgun, A., Erdogan, Y., 2005, Settin and hardening of borogypsum-portland cement clinker-fly ash blends studies on effects of molasses on properties of mortar containing borogypsum, Cement and Concrete Research, vol. 35, 711-718
- [23] Çerezci, O. ve Şeker, Ş. S., 1997, Çevremizdeki Radyasyon ve Korunma Yöntemleri, B.Ü. Yayınları No: 607, İstanbul, Mart
- [24] Algüneş, Ç., 2002, Radyasyon Biyofiziği”, Trakya Üniversitesi Rektörlüğü Yayınları No: 51, Edirne 135 s.
- [25] Atkins, P., Jones, L., 1999, Temel Kimya, 2. Cilt, Bilim Yayıncılık, Ankara, 841s.
- [26] Krane, K. S., 2001, Nükleer Fizik, (Çev. B. Şarer), Palme Yayıncılık, Ankara, 404 s.
- [27] Özcan M.,1999, Modern temel kimya II, VİPAŞ, 2. baskı, Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı yayın no:141, 510 s.
- [28] Nükleer Enerji Ajans Veri Bankası
- [29] Erel, Ş., 1989, Türkiye’de bulunan bor minerallerinin nötron zırhlımasında kullanımı, Nükleer Teknoloji Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi
- [30] Göksel, A.S., 1973, Radyasyonların biyolojik etkileri ve radyasyon korunması, İTÜ N.E.E. Genel Yayınları, No: 9
- [31] Price, B.T., Horton, C.C., Spinney, K.T., 1957, Radiation shielding, Pergamon Pres, London-Newyork
- [32] Knoll, G.F., 1989, Radiation dedection and measurement, Jahn Wiley & Sons, New York
- [33] Özden, N., 1997, Radyoaktivite ve radyasyonlar, İTÜ, N.E.E. Genel Yayınlar No: 14, İTÜ Matbaası, Gümüşsuyu
- [34] Kahraman, G., Bor nötron yakalama tedavisinde kullanılan hızlandırıcıya dayalı nötron kaynakları, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Teknoloji Dairesi, 06530, Ankara, 4 s.
- [35] Kürkçüoğlu, M.E., AYTEKİN, M., Bor ile nötron yakalama terapisi
- [36] Walker, S.J., 1998, Boron neutron capture therapy: principles and prospects, School of Radiography, University of Central England, 211-219
- [37] Coderre, J.A., Hopowell, J.W., Turcotte, J.C., Riley, K.J., Binns, P.J., Kigerll, W.S., Harling, O.K., 2004, Applied radiation and isotopes 61, 1083-1087
- [38] Hawk, A.E., Blue, T.E., Woollard, J.E., 2004, A shielding desing for an accelerator-based neutron source for boron neutron capture therapy, Applied radition and isotopes, 61, 1027-1031
- [39] Rao, M., Trivilin, V.A., Heber, E.M., Cantarelli, M., Hoiz, M.E., Nigg, D.W., Rebaglioti,R.J., Batistani, D., Schwint, A.E., 2004, Applied radition and isotopes, 61, 947-952
- [40] Gibson, C.R., Staubus, A.E., Barth, R.F., Yang, W., Kleimmolz, M.M., Jones, R.B., Green-Church, K., Tjarks, W., Soloway, H.A., 2001, Boron neutron capture therapy of brain tumors: investigation of urinary metabolits Ionizotta mass spectrometry, vol 29, issue 12, 1588-1598