

Saygın Kaynaklardan YZ Destekli Güncel Bilim ve Teknoloji Yazıları

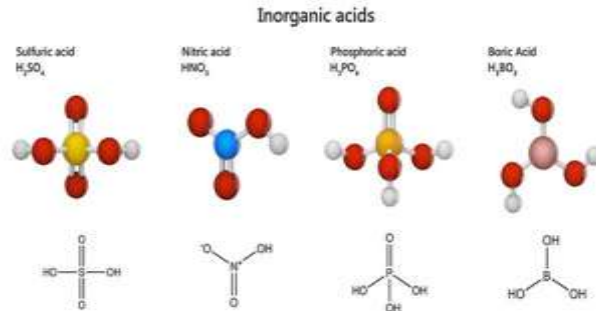
BORMADENİ

DÜNYA VE TÜRKİYE REZERVLERİ, PIYASA FİYATLARI VE NÜKLEER ENERJİDEKİ KULLANIMI

Hazırlayan: Yüksel Atakan , ybatakan4@gmail.com, 27.08.2026

1. Giriş

Bor (B), periyodik tablonun 13. grubunda yer alan, doğada serbest hâlde bulunmayan ancak bileşikleri (borat mineralleri) hâlinde yer kabuğunda yaygın olarak bulunan yarı metalik bir elementtir. Cam-seramik sanayii, tarımsal gübreler, deterjanlar, alevlendirmezler (yanmaz maddeler), nükleer teknoloji, savunma sanayii, enerji depolama (bor bazlı hidrojen depolama) ve son yıllarda ileri teknoloji malzemeleri (bor nitrür, bor karbür, bor fiber) gibi 300'ün üzerinde alanda kullanılmaktadır. Türkiye, bilinen dünya bor rezervlerinin büyük bir kısmına sahip olması nedeniyle bu alanda stratejik bir konuma sahiptir. Bu rapor; dünya ve Türkiye'deki bor rezervlerini, cevherdeki saflık (B_2O_3) oranlarını, ham cevher ve işlenmiş bor kimyasallarının (borik asit, boraks vb.) dünya piyasa fiyatlarını, Eti Maden A.Ş. üretim/ihracat rakamlarını ve bor'un nükleer reaktörlerdeki kullanım alanları ile reaktör sınıfı bor fiyatlarını derli toplu biçimde sunmayı amaçlamaktadır.



2. Dünya ve Türkiye Bor Rezervleri

Bor rezervleri uluslararası literatürde genellikle kütlece B_2O_3 (bor trioksit) eşdeğeri cinsinden ifade edilir, çünkü ham cevherin B_2O_3 içeriği maden yatağına ve mineral türüne göre değişiklik gösterir. Aşağıdaki tablo, USGS (Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Kurumu) yıllık "Mineral Commodity Summaries" yayınlarında sıklıkla atıfta bulunulan mertebeleri; Türkiye tarafında ise Eti Maden ve MTA (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü) kaynaklı rakamları yansıtmaktadır.

Ülke / Bölge	Tahmini Rezerv (milyon ton, B_2O_3 eşdeğeri)	Dünya Payı (%)
Türkiye	~ 900 – 1.000 (bazı kaynaklarda B_2O_3 bazında 270–370)	~ %65 – 73

Ülke / Bölge	Tahmini Rezerv (milyon ton, B ₂ O ₃ eşdeğeri)	Dünya Payı (%)
ABD (Kaliforniya)	~ 40 – 80	~ %5 – 8
Rusya	~ 40 – 60	~ %4 – 6
Şili	~ 40 – 50	~ %4 – 5
Çin	~ 30 – 40	~ %3 – 4
Diğer (Peru, Bolivya, Arjantin, Kazakistan vb.)	~ 40 – 60	~ %5 – 8
DÜNYA TOPLAM (yaklaşık)	~ 1.100 – 1.300 (ham cevher) / ~ 410 – 470 (B ₂ O ₃ eşdeğeri)	%100

Kaynak: USGS Mineral Commodity Summaries (Boron, yıllık baskılar); Eti Maden A.Ş. Faaliyet Raporları; MTA. Kaynaklar arasında rezerv tanımı (ham cevher / B₂O₃ eşdeğeri) farklılık gösterdiğinden rakamlar aralık olarak verilmiştir — güncel yıl için USGS ve Eti Maden'in son yayınları kontrol edilmelidir.

Türkiye'deki başlıca bor yatakları; Eskişehir-Kırka (tinkal), Balıkesir-Bigadiç (kolemanit ve üleksit), Kütahya-Emet (kolemanit) ve Bursa-Kestelek (kolemanit) sahalarıdır. Bu dört saha, Eti Maden tarafından işletilmekte olup dünya bor üretiminin önemli bir bölümü buradan karşılanmaktadır.

3. Doğal Bor Cevherleri ve Saflık (B₂O₃) Oranları

Bor, doğada saf element hâlinde bulunmaz; borat mineralleri (tuzları) şeklinde bulunur. Mineral türüne göre B₂O₃ içeriği (saflık oranı) değişir:

Mineral	Kimyasal Formül	Ortalama B ₂ O ₃ İçeriği (%)	Başlıca Yatak
Tinkal (Boraks cevheri)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	~ %30 – 48 (satılabilir konsantre ~%40–48)	Kırka, Eskişehir
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	~ %40 – 50	Bigadiç, Emet, Kestelek
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	~ %35 – 43	Bigadiç
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O	~ %50 – 53	ABD (Boron, Kaliforniya)
Pandermit	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ ·7H ₂ O	~ %46 – 49	Türkiye (sınırlı)

Kaynak: Eti Maden ürün teknik veri sayfaları; MTA maden yatakları envanteri; genel maden mühendisliği literatürü. Ticari konsantre ürünlerde B₂O₃ oranı zenginleştirme (yıkama, flotasyon, kalsinasyon) sonrası daha yüksektir.

Ham cevher, ocaktan çıktıktan sonra kırma-öğütme, yıkama ve zenginleştirme (bazı hatlarda kalsinasyon) işlemlerinden geçirilerek satışa hazır "konsantre cevher" hâline getirilir; bu konsantrelerin B₂O₃ tenörü genellikle %40'ın üzerine çıkarılır.

4. Ham / Konsantre Bor Cevheri Fiyatları

Ham veya az işlenmiş bor cevheri (konsantre tinkal, kolemanit, üleksit) uluslararası piyasada doğrudan çok sık alınıp satılan bir emtia değildir; asıl ticaret büyük ölçüde işlenmiş bor kimyasalları (boraks, borik

asit) üzerinden yürür. Yine de, sektör raporlarında (Roskill, S&P Global, Industrial Minerals) atıfta bulunulan yaklaşık FOB fiyat mertebeleri aşağıdaki gibidir:

Ürün (konsantre cevher)	Tipik B2O3 İçeriği	Yaklaşık Dünya Fiyat Aralığı (USD/ton, FOB)
Konsantre Tinkal	%40 – 48	150 – 300
Konsantre Kolemanit	%38 – 42	120 – 250
Konsantre Üleksit	%40 – 43	130 – 260

Kaynak: Industrial Minerals / Roskill bor piyasası bültenleri; sektör tahminleri — cevher fiyatları düşük katma değerli oldukları için işlenmiş ürünlere göre çok daha oynak ve kaynağa göre değişkendir; güncel FOB kotasyonları için S&P Global Commodity Insights veya Argus Media takip edilmelidir.

5. İşlenmiş Bor Kimyasalları — Dünya Piyasa Fiyatları

Bor cevherinin katma değeri, kimyasal işlemle geçirilip rafine ürünlere (borik asit, boraks türevleri, sodyum perborat, bor karbür vb.) dönüştürülmesiyle önemli ölçüde artar. Bu ürünler cam elyafı, seramik sırları, deterjan/ağartıcı, tarım gübresi, alevlendirmez katkı ve yüksek teknoloji malzemeleri sektörlerinde kullanılır.

Ürün	Kimyasal Formül / Tanım	Yaklaşık Dünya Fiyatı (USD/ton, FOB)	Ana Kullanım Alanı
Borik Asit (teknik/gübre sınıfı)	H ₃ BO ₃	700 – 1.100	Cam elyafı, seramik, tarım, alevlendirmez
Susuz Boraks (Anhydrous Borax)	Na ₂ B ₄ O ₇	600 – 950	Cam, metalurji (kaynak tozu)
Boraks Dekahidrat (Borax 10 mol)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	350 – 550	Deterjan, cam, tekstil
Boraks Pentahidrat (Borax 5 mol)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·5H ₂ O	400 – 650	Gübre, cam elyafı
Sodyum Perborat	NaBO ₃ ·nH ₂ O	700 – 1.000	Ağartıcı (deterjan sanayii)
Bor Karbür (teknik sınıf, doğal izotop bileşimi)	B ₄ C	40.000 – 90.000 (toz/teknik seramik sınıfı)	Zırh, aşındırıcı, nötron soğurucu

Kaynak: S&P Global Commodity Insights (eski adıyla IHS Markit), Argus Media Bor Piyasası Raporları, Eti Maden ürün fiyat listeleri, ICIS kimyasal fiyat endeksleri. Fiyatlar arz-talep, enerji maliyeti ve döviz kuruna bağlı olarak yıl içinde ±%20-30 dalgalanabilir; kesin güncel fiyat için ilgili endeks sağlayıcısına (S&P Global, Argus, ICIS) veya Eti Maden'in resmî fiyat listesine başvurulmalıdır.

6. Eti Maden A.Ş. Üretim ve Ticaret Rakamları

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Türkiye'deki bor madenciliği ve işlenmiş bor ürünleri üretimini yürüten kamu kuruluşudur ve dünya bor pazarının önemli bir bölümünü elinde bulundurmaktadır. Aşağıdaki rakamlar Eti Maden'in kamuya açık faaliyet raporlarında yer alan mertebeleri yansıtmaktadır (yıllar arası dalgalanma gösterebilir):

Gösterge	Yaklaşık Değer (yakın dönem, mertebe)
Yıllık bor cevheri üretim kapasitesi	~ 3 – 3,5 milyon ton (B2O3 eşdeğeri bazında)
Yıllık rafine bor ürünleri üretimi (boraks, borik asit vb.)	~ 2,5 – 3 milyon ton
Dünya rafine bor pazarındaki payı	~ %35 – 45 (ABD merkezli Rio Tinto/U.S. Borax ile birlikte pazarın büyük kısmını oluşturur)
İhracat yapılan ülke sayısı	100'ün üzerinde ülke
Yıllık ihracat geliri	~ 1 – 1,5 milyar USD mertebesinde (yıla göre değişir)
Ana işletme sahaları	Kırka (Eskişehir), Bigadiç ve Emet (Balıkesir/Kütahya), Kestelek (Bursa)

Kaynak: Eti Maden A.Ş. yıllık faaliyet raporları ve kurumsal web sitesi duyuruları (etimaden.gov.tr) — güncel yıl verileri için doğrudan Eti Maden'in resmî faaliyet raporuna bakılması önerilir; yukarıdaki rakamlar yıllar arası farklılık gösterebilecek mertebe (order-of-magnitude) değerleridir.

6.1. Türkiye'nin İşlediği Bor Ürünleri — Satış Fiyatı, Maliyet ve Kârlılık

Eti Maden, ham bor cevherini (tinkal, kolemanit, üleksit) işleyerek başlıca şu rafine ürünlere dönüştürüp satmaktadır: boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, susuz (anhidrit) boraks, borik asit, sodyum perborat ve bor oksit. ÖNEMLİ: Eti Maden, kurumsal faaliyet raporlarında ürün bazında (ton başına) üretim maliyeti veya ürün bazında kâr marjı yayımlamamaktadır — bu, ticari sır kapsamında değerlendirilen bir bilgidir. Aşağıdaki tabloda satış fiyatı sütunu piyasa/ihracat fiyat mertebelerini yansıtırken, "tahmini maliyet" ve "tahmini brüt marj" sütunları resmî Eti Maden verisi DEĞİL, uluslararası borat sektöründeki emsal üreticilerin (ör. Rio Tinto Borax/U.S. Borax) genel maliyet yapısından hareketle yapılan kaba sektörel tahminlerdir.

Ürün	Yaklaşık Satış/İhracat Fiyatı (USD/ton)	Tahmini Üretim Maliyeti (USD/ton) — SEKTÖR TAHMİNİ	Tahmini Brüt Marj (%) — SEKTÖR TAHMİNİ
Boraks Dekahidrat	350 – 550	150 – 250	~ %40 – 55
Boraks Pentahidrat	400 – 650	180 – 300	~ %40 – 55
Susuz Boraks	600 – 950	250 – 400	~ %45 – 60
Borik Asit	700 – 1.100	300 – 500	~ %45 – 60
Sodyum Perborat	700 – 1.000	350 – 550	~ %35 – 50
Konsantre Ham Cevher (doğrudan satış)	120 – 300	40 – 90	~ %55 – 70 (düşük işlem maliyeti, düşük katma değer)

Kaynak: Satış fiyatı sütunu: S&P Global Commodity Insights, Argus Media, ICIS piyasa bültenleri. Maliyet ve marj sütunları: RESMÎ ETİ MADEN VERİSİ DEĞİLDİR — uluslararası borat madenciliği/kimya sektöründeki kamuya açık emsal şirket (Rio Tinto Borates, Compass Minerals vb.) marj aralıklarından hareketle yapılmış kaba sektörel tahminlerdir. Devlete ait bir işletme olarak Eti Maden'in enerji, işçilik ve amortisman maliyet yapısı özel sektör emsallerinden farklı olabileceğinden bu sütunlar sadece fikir vermek amaçlıdır.

Kurumsal Düzeyde Toplam Satış Hacmi ve Kârlılık

Ürün bazında resmî veri bulunmadığından, Eti Maden'in kamuya açık faaliyet raporlarında yer alan TOPLAM (tüm ürünler birleşik) mertebeler aşağıda verilmiştir:

Gösterge	Yaklaşık Değer (yakın dönem, mertebe)
Yıllık toplam rafine + konsantre bor ürünü satış hacmi	~ 2,5 – 3,5 milyon ton/yıl
Yıllık toplam ihracat geliri (döviz bazlı)	~ 1 – 1,5 milyar USD
Yıllık toplam net kâr (kurumsal, TL bazlı raporlanır)	Yıldan yıla enflasyon/kur etkisiyle büyük dalgalanma gösterir; kesin TL/USD rakamı için güncel faaliyet raporuna bakılmalıdır
Ürün bazında maliyet/kâr açıklaması	Kamuya açık DEĞİL (Eti Maden ürün bazında maliyet muhasebesi verisi yayımlamaz)

Kaynak: Eti Maden A.Ş. yıllık faaliyet raporu ve Hazine ve Maliye Bakanlığı Kamu İktisadi Teşebbüsleri (KİT) raporları — kesin TL/USD net kâr rakamı için ilgili yılın resmî raporuna doğrudan başvurulması gerekir; bu rapor canlı veri erişimi olmadan hazırlandığından güncel yıl kâr rakamı verilmemiştir.

7. Bor'un Nükleer Reaktörlerde Kullanımı

7.1. Nötron Soğurma Özelliği

Doğal bor, iki kararlı izotoptan oluşur: Bor-10 (B-10, doğal bolluk ~%19,9) ve Bor-11 (B-11, doğal bolluk ~%80,1). B-10 izotopu, termal nötronlar için çok yüksek bir soğurma tesir kesitine (yaklaşık 3.840 barn) sahiptir; bu özellik bor bileşiklerini nükleer reaktörlerde vazgeçilmez bir "nötron zehiri" (neutron poison / neutron absorber) malzemesi hâline getirir.

7.2. Başlıca Kullanım Alanları

- Kimyasal Şim (Chemical Shim) — Basınçlı Su Reaktörleri (PWR): Reaktör soğutma suyuna borik asit (H_3BO_3) çözünmüş hâlde eklenerek reaktivite kontrolü sağlanır. Yakıt çevrimi başında bor konsantrasyonu ~1.000–2.000 ppm bor civarındayken, yakıt tükendikçe bu oran kademeli olarak azaltılır.
- Kontrol Çubukları: Bazı reaktör tiplerinde (özellikle BWR ve bazı araştırma reaktörlerinde) bor karbür (B₄C) içeren kontrol çubukları, zincirleme reaksiyonu hızlıca durdurmak veya yavaşlatmak için kullanılır.
- Acil Durdurma Sistemleri: CANDU tipi reaktörlerde borik asit veya gadolinyum nitrat enjeksiyonu, ikincil (yedek) durdurma sistemi olarak kullanılır.
- Yakıtlanmış Yakıt Havuzları ve Taşıma Kapları: Kullanılmış yakıtın depolandığı havuzlarda ve nakliye/depolama kaplarında kritiklik güvenliği için borlu paslanmaz çelik veya bor karbür levhalar kullanılır.
- Radyasyon Kalkanlama: Bor katkılı polietilen ve bor karbür, hem nötron soğurma hem zırlama amacıyla kullanılır.
- İleri Reaktör Kavramları / Bor Nötron Yakalama Terapisi (BNCT): Doğrudan güç reaktörü olmasa da B-10 izotopu, tıpta kanser tedavisinde (BNCT) ve bazı araştırma reaktörü uygulamalarında kullanılmaktadır.

Zenginleştirilmiş B-10 (doğal orandan daha yüksek B-10 içeriğine sahip) malzemeler, soğurma verimliliğinin kritik olduğu uygulamalarda (bazı kontrol çubuğu tasarımları, kritiklik güvenliği

bileşenleri, BNCT) tercih edilir; bu, doğal borun izotopik ayrıştırmasını (enrichment) gerektirdiğinden maliyeti önemli ölçüde artırır.

7.3. Tipik Bir Reaktörde Kullanılan Bor Miktarı

Bir basınçlı su reaktöründe (tipik 1.000 MWe sınıfı PWR) birincil soğutma devresindeki su hacmi yaklaşık 250.000–350.000 litre mertebesindedir. Yakıt çevrimi başında ~1.000–2.000 ppm bor konsantrasyonu hedeflendiğinde, devre içinde bulunan çözünmüş bor kütlesi yaklaşık birkaç yüz kilogramdan 1 tona kadar (element bor bazında) değişebilir; bu miktar, yakıt tükenimine bağlı olarak çevrim boyunca kademeli olarak azaltılıp seyreltme/borikasyon işlemleriyle sürekli ayarlanır, dolayısıyla yıllık "tüketilen" toplam borik asit miktarı santral işletme kayıtlarına ve su kimyası yönetimine göre değişkenlik gösterir. Kontrol çubuklarında kullanılan bor karbürün kütlesi ise reaktör tasarımına göre (BWR'lerde tipik olarak) çubuk başına birkaç on kilogram mertebesindedir ve reaktör ömrü boyunca nadiren değiştirilir.

Not: Bu bölümdeki miktarlar, kamuya açık nükleer mühendislik literatüründeki (IAEA, OECD-NEA, EPRI yayınları) genel mertebeleri yansıtan yaklaşık değerlerdir; belirli bir reaktör tipi/üreticisi için kesin miktarlar, o santralin teknik özellik dokümanlarından (Final Safety Analysis Report – FSAR) doğrulanmalıdır.

8. Reaktör Sınıfı (Nükleer Sınıf) Bor Fiyatları

Reaktörlerde kullanılan bor ürünleri iki ayrı fiyat kategorisine ayrılır: (i) doğal izotopik bileşime sahip nükleer saflıkta bor bileşikleri (borik asit, bor karbür) ve (ii) B-10 izotopuna zenginleştirilmiş özel ürünler. İkincisi, izotop ayrıştırma maliyeti nedeniyle doğal üründen kat kat daha pahalıdır.

Ürün	İzotopik Bileşim	Yaklaşık Fiyat	Açıklama
Nükleer sınıf Borik Asit (H ₃ BO ₃)	Doğal (%19,9 B-10)	~ 3.000 – 8.000 USD/ton	Endüstriyel/tarımsal sınıfa göre daha sıkı safsızlık (özellikle metalik iz element) spesifikasyonları nedeniyle daha pahalıdır
Nükleer sınıf Bor Karbür (B ₄ C), toz/sinterlenmiş	Doğal (%19,9 B-10)	~ 100 – 300 USD/kg	Kontrol çubuğu ve kritiklik güvenliği uygulamaları için
B-10 Zenginleştirilmiş Bor Karbür (%90+ B-10)	Zenginleştirilmiş	~ 3.000 – 15.000+ USD/kg (zenginleştirme oranına göre değişir)	İzotop ayrıştırma (örn. kolon değişim yöntemi) maliyeti baskındır
Saf B-10 izotopu (araştırma/BNCT sınıfı, yüksek zenginlik)	%95+ B-10	10.000 – 50.000+ USD/kg (küçük hacimli özel siparişlerde çok daha yüksek olabilir)	Sınırlı sayıda tedarikçi (ör. Rusya, ABD, Çin kaynaklı izotop üreticileri); fiyat hacme ve saflığa göre çok değişkendir

Kaynak: IAEA-TECDOC serisi ve OECD-NEA yakıt çevrimi maliyet raporları; izotop tedarikçisi fiyat listeleri (ör. Trace Sciences International, ISO FLEX, Chemetall GmbH türü özel izotop üreticileri — kamuya açık liste fiyatları sınırlıdır ve genellikle teklif usulüyle belirlenir). Zenginleştirilmiş B-10 fiyatları, sınırlı üretici sayısı ve talebe bağlı teklif usulü fiyatlandırma nedeniyle bu rapordaki diğer tablolara göre çok daha büyük belirsizlik taşımaktadır; kesin fiyat için doğrudan izotop tedarikçilerinden teklif alınması gerekir.

9. Sonuç ve Değerlendirme

Türkiye, dünya bor rezervlerinin yaklaşık üçte ikisinden fazlasına sahip olması nedeniyle bu stratejik hammadde açısından benzersiz bir konumdadır. Ancak katma değerin büyük kısmı ham cevherden ziyade işlenmiş kimyasal ürünlerde (borik asit, boraks türevleri) ve daha da ileri düzeyde özel/nükleer sınıf ürünlerde (bor karbür, izotopik zenginleştirilmiş B-10) oluşmaktadır. Nükleer enerji sektöründe bor, hem reaktivite kontrolünde (kimyasal şim, kontrol çubukları) hem de kritiklik güvenliği ve radyasyon kalkanlamasında vazgeçilmez bir malzeme olmaya devam etmektedir; bu alandaki talep, gelecekte küçük modüler reaktörlerin (SMR) yaygınlaşmasıyla birlikte artabilir. Türkiye'nin sahip olduğu hammadde avantajının, yüksek katma değerli nükleer sınıf ve izotopik zenginleştirilmiş bor ürünlerine yönelik Ar-Ge ve üretim kapasitesine dönüştürülmesi, sektörel literatürde sıklıkla vurgulanan bir fırsat alanı olarak öne çıkmaktadır.

Kaynaklar (Doğrulama İçin Önerilen Birincil Kaynaklar)

- U.S. Geological Survey (USGS) — Mineral Commodity Summaries, "Boron" bölümü (yıllık, en güncel baskı).
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü — Yıllık Faaliyet Raporu ve Sürdürülebilirlik Raporu (etimaden.gov.tr).
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) — Bor mineralleri envanteri.
- S&P Global Commodity Insights / Argus Media — Bor ve endüstriyel mineraller piyasa fiyat bültenleri.
- Roskill (şimdi S&P Global bünyesinde) — Boron: Global Industry, Markets & Outlook raporları.
- IAEA (Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı) — Nükleer reaktör güvenlik ve yakıt çevrimi teknik dokümanları (TECDOC serisi).
- OECD Nuclear Energy Agency (NEA) — Nükleer yakıt çevrimi maliyet ve malzeme raporları.
- World Nuclear Association — reaktör tipi teknik özet dokümanları (PWR, BWR, CANDU su kimyası).