

## Bor Mineralleri ve Atıkları İle Üretilen Betonarme Yapılarda Yangına Dayanıklılığın Araştırılması

Hasan SÖYLEMEZ<sup>1+</sup>, Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü/Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Yüksek Lisans, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi/İnşaat Mühendisliği, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, Türkiye

\*Corresponding author: [obayraktar@kastamonu.edu.tr](mailto:obayraktar@kastamonu.edu.tr)

<sup>+</sup>Speaker: [hasansoylez89@gmail.com](mailto:hasansoylez89@gmail.com)

Presentation/Paper Type: Full Paper

**Özet** – Dünya toplam bor rezervi sıralamasında Türkiye % 72’lik pay ile ilk sıradadır. Bor elementinin; ilaç ve kozmetik sanayi, inşaat ve çimento yapımı, cam sanayi, kimya sanayi, ahşap malzemelerinde koruyucu, makine sanayi, nükleer sanayi, tarım sektörü ve otomobil sanayi gibi pek çok kullanım alanı vardır. Bor elementinin bu kadar yaygın olarak kullanılmasının ve araştırmaların yapılmasının en önemli nedeni rezervlerin büyük bölümünün ülkemizde bulunmasıdır. Bu kadar kullanışlı bir malzemenin, kullanıldığı elemanlara ekstra neler kazandırdığının araştırılması gerekmektedir. Bu araştırmada, bor mineralleri ve atıkları ile üretilen betonarme yapılarda yangına karşı dayanıklılığın belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Sonuç olarak literatür araştırmasında; bor minerallerinin ve bor atıklarının katkı malzemesi olarak kullanıldığı beton ve betonarme elemanlara dayanım, dayanıklılık, yangına direnç ve radyoaktif geçirimsizlik kazandırdığı görülmüştür. Yangın, betonarme elemanların aderans dayanımına zarar vermektedir. Araştırmada, bor minerallerinin betonarme yapılarda aderansa katkı sağlayıp sağlamadığını deneylerle belirleyip, yangın dayanımına daha fazla katkı sağlanabilirliğinin araştırılabileceğini göstermiştir.

*Anahtar Kelimeler – Bor, Bor Mineralleri, Bor Atığı, Betonarme, Yangın*

### GİRİŞ

Birçok endüstri dalında yaygın bir kullanım alanı bulunan bor minerallerinin ve türevlerinin, 21. yüzyılın petrolü olarak adlandırılmakta ve yaşam standartlarının yükseltilmesindeki önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bir bor ürünü bazı durumlarda başka bir ürünün yerini tutabilmesine rağmen, günümüz koşullarında bor ürünlerinin yerini aynı kalite ve ucuzlukta tutabilecek başka bir mineralin bulunmayışı ve stratejik anlamda da değerli olması bor minerallerine özel bir konum kazandırır. Bu stratejik önemden dolayı bor üretimi dünya çapında çok büyük bir yere sahiptir. Türkiye bor mineralleri üretiminde dünyada birinci sırada yer almaktadır. Buna rağmen bor atıkları değerlendirilememektedir. Bu atıklar ekonomik kayıplara ve çevre kirliliğine neden olmaktadır [1-3].

Çağımızın gereği olan hızlı üretim ve tüketim artışı beraberinde birçok sorun getirmiştir. Bu nedenle mevcut hammadde kaynaklarına alternatif olabilecek ikincil hammadde kaynağı olarak görülen atıkların değerlendirilmesine yönelik çalışmalar gündeme gelmiştir [4]. Ayrıca hammaddeden arta kalan atıkların oluşturduğu çevre kirliliği, stok sahasının yetersizliği, ekonomiklik gibi etkenlerle hammadde atıklarının geri dönüşüm yollarının araştırılması artmıştır. Bu sebeplerden ötürü bor madeni atıklarını değerlendirmek ve temiz bir çevre için bor mineralleri ile birlikte bor atıkları da beton yapımında ve

onunla beraber betonun kullanıldığı tüm yapılarda kullanılmaya başlanılmıştır.

Yapılarda durabilite problemlerine yol açan başlıca fiziksel etkilerden biri de yüksek sıcaklıktır. Bu etki yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir [5].

Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının betona ve betonarme yapılara etkisi 1922’den günümüze kadar araştırılmıştır [6]. Yapılan araştırmalarda yangın sırasında ve sonrasında malzemenin karmaşık davranışı, yapısal güvenlik ve yapının bütünlüğü anlaşılmasına çalışılmıştır [7]. 10 yıl öncesine kadarki çalışmalarda yüksek sıcaklığın normal dayanımlı betona etkileri üzerinde odaklanılmıştır [8]. Ancak günümüzde modern yapılarda, endüstri yapılarında, tünellerde veya özel hizmet amaçlı inşa edilen yapılarda kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu betonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı iyi bilinmelidir [6]. Betonların boşluk oranı düşük, yapısı daha yoğun olduğu için yüksek sıcaklık etkisinde performansı normal dayanımlı betona göre daha düşüktür [9].

Yangın katı, sıvı veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması ile meydana gelen bir olaydır. Kontrol altına alınamayan yangının çoğu zaman önemli can ve mal kayıplarına neden olan bir felaket olduğu görülür. Bu durum yangından korunmada aktif önlemlerin önemini ortaya

çıkarmıştır. Beton birçok yapı malzemesiyle karşılaştırıldığında yüksek sıcaklık ve yangın etkisi bakımından daha dayanıklı bir malzeme olduğu görülür. Beton belirli bir süre için önemli derecede zarar görmemesi ve ayrıca zehirli duman çıkarmaması ile yangın direnci yüksek bir malzeme sınıfında değerlendirilir. Ancak bu dayanıklılık belirli süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir. Örneğin silis esaslı agrega ile üretilen normal dayanımlı betonda 600°C’de dayanım kaybı yaklaşık %50’dir. Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımı kaybına neden olan olayların açıklanmasında çimento hamuru ile agrega arasındaki termal uyumsuzluk, agrega çimento ara yüzündeki bağlantı, yüksek sıcaklık etkisinde buharlaşan suyun basıncı, çimento hamuru ve agregadaki kimyasal yapı değişikliği gibi olaylar esas alınarak incelenmektedir [10-12].

Gelişmiş ülkelerin yapı mevzuatlarında, yangın güvenlik önlemlerine ilişkin hükümler, geniş yer bulmaktadır. Her ülkenin yerel standart ve yönetmelikleri, yangın risklerini minimuma indirmeyi amaçlayan tasarımcıya, uygun ve etkin önlemleri hangi koşullarda sağlamaları gerektiği konusunda yol göstermektedir [13].

Bu çalışmamızda; bor mineralleri ve atıkları ile üretilen beton ve betonarme yapılara yönelik çalışmaların incelenmesiyle, bor mineralleri ve atıkları ile üretilen betonların ve bu betonların kullanıldığı yapıların yangına dayanımının incelenmesi amaçlanmıştır.

## 1. BOR MİNERALLERİNİN ÖZELLİKLERİ VE ÜLKEMİZDEKİ YERİ

Bor elementi, çok az miktarlarda olmak üzere yer kabuğunda, dolayısıyla bitki, hayvan ve insanların yaşadığı ortamlarda bulunan, metal olmayan bir elementtir. Doğal koşullarda serbest element olarak bulunmayan bor, oksijenle birleşik halde (bor oksit olarak) bulunur. Dünyada en çok bulunan bor mineralleri boratlardır. Dünyada yaklaşık 230’dan fazla bor minerali mevcut olup ticari öneme sahip bor mineralleri; tinkal, kolemanit, kernit, üleksit, pandemit, borasit, szaybelit ve hidroborasittir [14].

Dünya toplam bor rezervi sıralamasında Türkiye % 72’lik pay ile ilk sıradadır. Türkiye’de kolemanit, üleksit ve boraks mineralleri ve borik asit, boraks dehidrat, boraks pentahidrat, sodyumperboratmonohidrat ve susuz boraks ticari olarak üretilmekte ve üretimin büyük bir bölümü ihraç edilmektedir.

Türkiye’de bor konsantresi üretimi; Eti Holding Eti Bor A. Ş.’ye ait Kütahya-Emet, Eskişehir-Kırka, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kestelek işletmelerinde gerçekleştirilmektedir. Bu tesislerde konsantre bor üretimi yıkama işlemi sonunda dağıtma ve sınıflandırma sonucunda killi malzemenin uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır.



Resim 1. Eskişehir-Kırka İşletmesi Gölet-1



Resim 2. Eskişehir-Kırka İşletmesi Gölet-2

Resimlerde görüldüğü gibi yıkama işlemleriyle beraber göletlerde killi atık malzeme birikmeye başlamış ve hatta Gölet-2’yi doluluk oranına getirmiştir.

## 2. ÇİMENTO, BETON VE BETONARME YAPILARDA BOR MİNERALLERİ VE ATIĞININ KULLANILMASI

Çimento üretiminde bor kullanılması çok sayıda araştırmacı tarafından düşünülmüş ve çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Endüstriyel çapta çimento üretimi ise Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB)’nin ortaklaşa yürüttüğü çalışmalar ile Denizli ve Göltaş çimento fabrikalarında gerçekleştirilmiştir [15].

Çimento üretiminde bor ( $B_2O_3$ )’un kullanılması yeni değildir. Araştırmacılar saf  $B_2O_3$  kullanarak ürettikleri çimentonun özelliklerinde önemli sayılabilecek iyileşmeler sağladığını tespit etmişlerdir. Bu zamana kadar yapılmış çalışmalar incelendiğinde,  $B_2O_3$  yüzdesi aynı bor atıkları, çimento içerisine ağırlıkça farklı oranlarda katılmış ve hazırlanan katkılı çimentolara dayanım ve dayanıklılık deneylerinin yapıldığı görülmüştür. Ülkemizde ve dünyada bu tür çalışmalar başlatılmış; kolemanit gibi minerallerin ve bor atıklarının çimento üretimi için uygun olabileceği belirlenmiştir [16]. Yapısında çimento özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecek herhangi zararlı bir birleşenin olmaması bor atıklarının çimento üretiminde kullanımı açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır [4]. Bor atıklarının değerlendirilmesi sonucu üretilen yeni ürünler ülke ekonomisine ek kazanç sağlayacaktır [17].

Borlu çimentonun yüksek dayanıma sahip olmasından dolayı beton yollarda; düşük hidrasyon ısı nedeniyle baraj gibi

kütle betonlarda ve tüp geçitlerde kullanıldığı yapılan bazı çalışmalarda vurgulanmaktadır [18]. Hidratasyon ısısının düşük olması özellikle kütle betonlarında soğutma ihtiyacını önemli oranda azaltmaktadır. Kalsiyum boratlar, çimento üretimi esnasında döner fırın içindeki eriyiğin viskozitesini ve yüzey gerilimini düşürdükleri için oldukça faydalı akışkanlaştırıcı maddelerdir [19]. Ayrıca borlu çimentodan üretilen betonun uzun yaşlarda normal betona kıyasla kırılması veya deforme olması daha zordur, bu sayede yüksek binaların inşası için çok uygundur [20].

Yine bor atıkları üzerine yapılan bir çalışmada bor konsantrötör tesislerinden çıkan kil içerikli atıkların, inşaat sektöründe çimento ve betona katkı malzemesi olarak, yol, baraj ve köprü yapımında da dolgu malzemesi olarak değerlendirilebileceğini belirtmiştir [21].

### 3. YANGININ BETON VE BETONARME YAPILARINA ETKİSİ BORLU BETONUN VEYA BETONARMENİN YANGINA DAVRANIŞI

Betonun diğer yapı malzemelerine göre en önemli bazı avantajları sıralandığında istenilen şekil ve boyutlarda üretilmesi, yüksek basınç dayanımına sahip olması, çelik donatı ile iyi aderansa sahip olması, diğer taşıyıcı malzemelere kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine daha dayanıklı bir malzeme olması gibi özellikleri söylenebilir [22]. Beton, yanmayan madde oluşu, belirli bir süre için önemli bir zarar görmemesi ve zehirli duman çıkarmaması ile yangın direnci yüksek bir malzemedir [23]. Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir [24].

Yüksek sıcaklık etkisinde oluşan parça atmalar, yapı elemanının yük taşıma kapasitesini ve bütünlüğünü kaybetmesine neden olur. Parça atmalar sonucu donatılar yüksek sıcaklığa maruz kalırlar [16].

Çelik ve beton yanıcılık açısından A1 sınıfı yani “hiç yanmaz” grubuna girerler. Ancak bu malzemelerin yangın hasarı malzeme kaybı olarak değil, akma sınırı ve elastisite modülündeki azalmalar ve içyapı değişiklikleri olarak ortaya çıkar [25].

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonarme yapının göçmesinde en etkin faktör kolonlardaki ve düğüm noktalarındaki çeliğin hasar görmesidir. Yapılan deneysel çalışmalar, yüksek sıcaklığa maruz kalan betonarme elemanların aderans dayanımının azaldığını ve betonarme yapıların yüksek sıcaklığa karşı davranışını belirlemedeki temel değişkenin aderans dayanımı olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü kritik beton sıcaklıkları, her zaman kritik aderans sıcaklığından daha büyük olmaktadır [16]. Çeliğin düz veya nervürlü olması da aderansa etki etmektedir [26-27].

Bor bileşiklerinin çimento ve beton üretiminde katkı maddesi olarak yaygın kullanımı çimentolu kompozitlere ilave yangın dayanımı, radyasyon geçirimsizliği gibi teknolojik özellikler kazandırmaktadır [28].

Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN), borlu aktif belit (BAB) çimentosunun portland çimentosuna göre %20 oranında daha fazla nötron tutma kapasitesine sahip olduğunu

belirtmektedir [29]. Ayrıca yapılan diğer bir araştırmaya göre, %20 civarında B(OH)<sub>3</sub>ya da boraks katkılı selüloz içerikli yalıtım malzemelerinin yangına dayanımlarının %57 oranında arttığı, mikroorganizma ve haşerelere karşı %99.8 oranında öldürme oranına sahip olduğunu ifade etmiştir [30].

Yapılan araştırmaya göre, uygun gradasyonda bor bileşikleri kullanılan beton ve çimento bağlayıcı diğer kompozitlerinrötre ve yangına direnç gibi bazı özellikleri iyileştirirken, radyoaktif geçirimsizlik ve antibakteriyellik gibi yeni nitelikler de kazanabileceklerdir [28].

### 4. SONUÇ

Bor atıklarının değerlendirilmesine yönelik ülkemizde yapılan araştırmalar, bor atıkları için en uygun değerlendirme şeklinin atıktaki borun tekrar kazanılarak geriye kalan malzemenin uygun sektörlerde kullanılabilir hale getirilmesi olduğunu göstermiştir. Borlu atık malzemenin yapısında önemli miktarda kil ve boroksit içermesi sebebiyle bor atıklarının özellikle seramik sektöründe ve inşaat sektöründe ekonomik olarak değerlendirilmesi mümkündür.

Bor bileşikleri çevre dostu, yüksek sıcaklığa ve aleve dayanıklı, sinerjistik ve fonksiyonel olma özellikleri sebebiyle kullanım oranlarının atması gerektiğini gözlemlemekteyiz. Bor bileşikleri, kullanım alanlarından biri olan alev geciktiriciler içinde oldukça güçlü bir yere sahipler ve yapılan çalışmalar ışığında gün geçtikçe inşaat sektöründeki kullanımının yaygınlaşmasının sağlayabileceği faydalar gözlemlenmiştir.

### 5. KAYNAKÇA

1. Sönmez, E., Yorulmaz, S., 1995. Kırka Boraks İşletmesi Atık Killerinin Tuğla Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Köse ve Kızıl (ed), İzmir, 163-168.
2. Erdoğan, Y., Zeybek, M.S., Demirbaş, A., 1998. Cement Mixes Containing Colemanit from Concentrator Wastes, Cem. Concr. Res.
3. Aşkın, S., Olgun, A. ve Erdoğan, Y., 2002. Bor Atıklarının Tuğla Üretiminde Kullanım Olanaklarının Araştırılması, Fen Bilimleri Dergisi 10. Yıl Özel Sayısı, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Sayı 3, 44-49.
4. Eyyüboğlu, S., (2013), Kolemanit Konsantrötör Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, 130s.
5. Aydın, S., Baradan, B., (2003). Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Betonların Geliştirilmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, s451-460, İstanbul.
6. Mahsanlar, N. (2006). Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton Davranışı, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

7. Khoury, G.A., (2000). Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures, Progress in Structural Engineering and Materials, sayı 2, s. 429-447.
8. Khoury, G.A., (2003). Fire & Assessment, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine, Italy.
9. Schrefler, B.A., Gawin, D., Khoury, G.A. and Majorana, C.E., (2003). Physical, Mathematical & Numerical Modelling, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine, Italy.
10. Baradan B., Yazıcı H., Ün H. (2010), Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.
11. Neville A.M. (2000), Properties of Concrete, Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York, USA.
12. Cülük M.S. (2001), "Deterioration of Bond Between Cement Paste and Aggregate at High Temperatures" Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
13. Demirel, F., Altındaş, S., 2005. Yapı Elemanlarının Yangına Dayanım Performanslarının Avrupa Birliği Direktiflerine Göre Sınıflandırılması ve Konunun Türkiye-Avrupa Genelinde İrdelenmesi, Politeknik Dergisi, Cilt 8, Sayı 4, s.381-395,2005.
14. Yılmaz, A.,(2004), Enerji Tasarrufunda Bor ve Perlit, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü.
15. Şahin, M. ve Yıldırım, M.K., (2016), Borlu Çimento, Cemen Türk Dergisi.
16. Bahar, D. ve Sema, N., (2017), Bor Mineralleri ve Atıklarının Çimentoda Kullanılma Stratejileri, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi.
17. Oruç, F., Sabah, E., Erkan, Z. E., (2004). Türkiye'de Bor Atıklarının Sektörel Bazda Değerlendirilme Stratejileri, 2. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir.
18. Yenialaca, Ç., (2009). Bor ve Kullanım Alanları, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, s. 130.
19. Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, BOREN. Bor ve Kullanım Alanları, <http://www.boren.gov.tr/tr>
20. Ünal, F., (2016). Yapı Sektöründe Geleceğin Stratejik Ürünü: Borlu Çimento, [http://ticaretgazetesi.com.tr/index.php?I=I&sayfa\\_id=66&id=367794](http://ticaretgazetesi.com.tr/index.php?I=I&sayfa_id=66&id=367794).
21. Bentli, T., Özdemir, O., Çeük, M.S., Ediz, N., (2002). Bor Atıkları ve Değerlendirilme Stratejileri, The First International Boron Symposium, Kütahya.
22. Erdoğan, T.Y., (2003). Beton, ODTÜ Geliştirilmiş Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
23. Neville, A.M., (2000). Properties of Concrete, Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York, USA.
24. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., (2002). Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No 298, İzmir.
25. Akman, M.S., (1992). Betonarme Yapılarda Hasarı ve Yangın Sonunda Taşıyıcılığının Belirlenmesi, Yapıda Yangından Korunma Sempozyumu, İstanbul.
26. Chiang, C., Tsai, C., (2003). Time-Temperature Analysis of Bond Strength of a Rebar after Fire Exposure, Cement and Concrete Research, sayı 33, s. 1651-1654.
27. Diederichs, U., Schneider, U., (1981). Bond Strength at High Temperatures, Magazine of Concrete Research, sayı 33, s. 75-84.
28. Pehlivanoglu, H. E., Davraz, M., Kılıncarslan, Ş., (2013). Bor Bileşiklerinin Çimento Priz Süresine Etkisi ve Denetlenebilirliği, SDU International Technologic Science, Vol.5, No 3, pp. 39-48.
29. BOREN. Bor ve Çimento. [http://www.eie.gov.tr/duyurular/EV/EV\\_etkinlik/2008\\_bildiriler/04-OTURUM\\_veve\\_AR-GE/0403.pdf](http://www.eie.gov.tr/duyurular/EV/EV_etkinlik/2008_bildiriler/04-OTURUM_veve_AR-GE/0403.pdf).
30. Çelik, A.G., (2008). Selülozik İzolasyon Malzemesi ve Uygulama Alanları, 27. Enerji Verimliliği Haftası Konferansı ve Fuarı, Ankara.