



Bor katkılı pomza tuğla üretimi, fizikomekanik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi

Atila Gürhan Çelik^{1*}, Abdülkerim Yörükoğlu², Sedat Sürdem³, Argun Türker⁴, Yasin Erdoğan⁵

¹Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Güre Yerleşkesi, 28200 Giresun, Türkiye
ORCID ID orcid.org/0000-0002-0894-9961

²Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, Dumlupınar Bulvarı, No:166 Kat:10 06520 Ankara, Türkiye, ORCID ID orcid.org/0000-0003-3194-3901

³Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, Dumlupınar Bulvarı, No:166 Kat:10 06520 Ankara, Türkiye, ORCID ID orcid.org/0000-0001-8220-7934

⁴Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Ankara, Türkiye, ORCID ID orcid.org/0000-0002-5876-9512

⁵İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Merkez Kampüs, 31200, İskenderun, Türkiye,
ORCID ID orcid.org/0000-0002-2314-5216

MAKALE BİLGİSİ

Makale geçmişi:
İlk gönderi 17 Nisan 2018
Revize gönderi 21 Haziran 2019
Kabul 25 Haziran 2019
Online 30 Haziran 2019

Araştırma Makalesi

DOI: [10.30728/boron.415702](https://doi.org/10.30728/boron.415702)

Anahtar kelimeler:

Pomza,
Kolemanit,
Tincal,
Bor atığı,
Tuğla,
Sinterleme,
Karakterizasyon

ÖZET

Türkiye, pomza ve bor üretiminde dünya lideridir. Türkiye'de Emet (Kolemanit) ve Kırka (Boraks) minerali üretilmektedir. Ayrıca Türkiye'nin çeşitli yörelerinde zengin pomza yatakları bulunmaktadır. Bu çalışmada, bağlayıcı olarak çimento yerine kolemanit, tincal ve bor atığı kullanarak farklı reçetede üretilen pomza tuğlaların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenerek optimize edilmiştir. Nihai tuğla için çalışma sonunda, üretilen numunelerin (5x10x20 cm) içinden en iyi karışım oranı (basınç dayanımı, birim hacim ağırlık..vb) belirlenerek nihai ürün üretilmiştir. Deney sonuçlarına göre; (A2-2-A2-3) kodlu karışımlardan üretilen tuğlaların mukavemet değerleri en iyi sonuçları vermiştir (3,63-3,33 Mpa). Bununla birlikte ısı iletim katsayısı (0,1504-0,1739W/mK), su emme (%32) ve porozite (%37,1) değerlerine göre en iyi sonuçlar yine (A2-2-A2-3) reçeteli tuğlalardan elde edilmiştir. Elde edilen ürünlerin XRD, SEM, EDX, TGA-DTA analizleri yapılarak karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Boron added pumice brick production, determination of physicomechanical and chemical properties

ARTICLE INFO

Article history:
Received 17 April 2018
Revised form 21 June 2019
Accepted 25 June 2019
Available online 30 June 2019

Research Article

DOI: [10.30728/boron.415702](https://doi.org/10.30728/boron.415702)

Keywords:

Pumice,
Colemanite,
Tincal,
Boron waste,
Brick,
Sintering,
Characterization

ABSTRACT

Turkey is the world leader in the production of pumice and boron. Emet (Colemanite) and Kırka (Borax) minerals are produced in Turkey. There are also rich deposits of pumice in various regions of Turkey. In this study, chemical, physical and mechanical properties of pumice bricks produced in different recipes using colemanite, tincal and boron waste instead of cement as binders were determined and optimized. At the end of the study, the final product was formed by determining the best mix ratio from the produced samples (5x10x20 cm). According to the test results: the strength values of the bricks produced from (A2-2-A2-3) coded mixtures yielded the best results (3,63-3,33 Mpa). However, heat conduction coefficient (0,1504-0,1739W/mK), water absorption (32%) and porosity (37.1%) according to the best results again (A2-2-A2-3) was obtained from prescription bricks. XRD, SEM, EDX, TGA-DTA analyzes were performed to characterize the obtained products.

1. Giriş (Introduction)

Pomza, ağırlıklı olarak SiO₂'den oluşan amorf yapıda gözenekli volkanik bir kayadır. Kimyasal olarak %75'e varan silis içeriği bulunmaktadır. Sertliği 5–6 (Mohs)

ve özgül ağırlığı 1–2 g/cm³ olan pomza, makro ve mikro boyutta gözenekli bir yapıya sahiptir. Gözenekler arası, genellikle bağlantısız ve mesafeli olduğundan geçirgenliği düşük, ısı ve ses yalıtım özelliği ise oldukça yüksektir. Bu üstün fiziksel özellikleri ile pomza,

*Sorumlu yazar: atila.celik@giresun.edu.tr

günümüzde birçok endüstride geniş kullanım alanına sahiptir [1-2]. Türkiye'nin deprem kuşağında bulunması ve önlem amaçlı zorunlulukların artması ile birlikte hafif kaya malzemelerinin kullanımı giderek artmaktadır [3]. İnşaat sektöründe ana hammadde olarak değerlendirilmeye başlanmış olan hafif kayaçların kendilerine has bazı özellikleri dikkate alınarak inşaat sektöründe konfor amaçlı ana malzeme olarak sıkça kullanılmaya başlamıştır. Bu tür kayaçlar genellikle doğal gözenekli ve hafif kayaç oluşumları olduğu bilinmektedir [4-5]. Ayrıca Türkiye'nin çeşitli yörelerinde zengin pomza yatakları bulunmaktadır.

Türkiye'de bulunan bor tesislerinde Emet'te Ca boratlardan Kolemanit ve Üleksit, Kırka'da ise Na boratlarda Boraks(Tinkal) minerali üretilmektedir. Beton, hafif beton ve tuğla gibi yapı malzemelerinin üretiminde bor mineralleri kullanılarak çalışmalar yapılmış olup çoğunlukla olumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Yapılan çalışmaların ortak özelliği bor katkılı numunelerin kontrol numunelerine göre mukavemetinin %5-10 arttığı ve birim hacim ağırlığının %10-20 azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca, bor atıklarının % 5-30 arasında kil tuğlaya katılması ile numuneler üretilmiştir. Çalışmaların sonucunda %5-10 bor atığı katkısının mukavemet bakımından olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir [6,7-8]. Ancak, hafif yapı malzemesi üretiminde pomza ile birlikte bağlayıcı olarak çimento yerine bor atığı ve bor türevlerinin kullanıldığı bir araştırma ilk kez gerçekleştirilmiştir.

Aşağıda kaynak araştırması yapılan çalışmalarda, yapı malzemesi üretim yöntemleri, karışım oranları ve üretimde kullanılan hammadde ve bağlayıcı özellikleri hakkındaki bulgulara yer verilmiştir;

Pomza, perlit, kil ve %10 bor atığı kullanarak üretilen panellerin yüksek ısı yalıtımları ile hafif yapı malzemeleri olmaları yanında kuruma sırasında rötre ve yoğunluk artışı olmaması, yangına ve dona dayanımının yüksek oluşu, kolay üretilmesi gibi olumlu özelliklerinin olduğu belirtilmiştir [9]. Kırka boraks işletmesi tesislerinden oluşan kil atıklarının tuğla hammaddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması ile ilgili yapılan çalışmaların sonucunda, Kırka atık killeri ile tuğla yapımında kullanılan hammaddenin uygun oranda karışımlarının, tuğla yapımında kullanılabileceği belirlenmiştir [10].

Genleştirilmiş perlit ve pomza yalıtım ve yangına dayanım özellikleri ile yapılarda çeşitli biçimlerde kullanılmaktadır. Gevşek dolgu olarak döşemelerde, çift katmanlı dış duvarlarda, yalıtım betonu olarak zemin kat ve çatı döşemelerinde, sıva agregası olarak iç ve dış duvarlarda, tavan sıvasında, blok ve levha biçiminde duvar gövdesi olarak kullanılır. Yapı gereci olarak perlit, yapıya az yük vermesi, alan kazandırması ve yakıt tasarrufu sağlaması ile yapı maliyetini olumlu yönde etkilediği ifade edilmiştir [11]. Bor atığı genleştirilmiş perlit yüzeylerine homojen şekilde yayılarak mukavemet artışı sağlamaktadır. Perlit ve kil karışımından

tuğla üretilebilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada, düşük ağırlık ve yüksek mukavemet değerlerini veren oranın %85 perlit ve %15 kil olduğu belirlenmiştir. Denemelerde belirlenen en uygun karışım 418 g perlit, 381 g kil ve 950 g su kullanılan reçetedir. Deney sonuçlarında 1,881 dm³ yoğunluklu tuğlalar üretilmiştir [12].

Bir diğer araştırma kapsamında, Ankara İli İmrahor bölgesi killeri ile Isparta ili karakaya bölgesi pomzasının belirli oranlarda karıştırılmasıyla tuğla üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla üç farklı karışım; 1. gruba (a) %100 kil, 2. gruba (b) %75 kil+%25 1 mm pomza, 3. gruba (c) %75 kil+ %25 pomza 2 mm hazırlanmış ve basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak 1 mm pomza ilaveli tuğlanın basınç dayanımına yaklaşık %36 oranında artış sağladığı; 2 mm pomza ilaveli tuğlanın basınç dayanımının ise yaklaşık % 16 oranında düşürdüğü görülmüştür [13].

Perlit katkılı kil tuğla üretimi ile ilgili bir çalışmada; perlit, termal, hafif ve akustik izolasyon özellikleri mükemmel malzeme olup; tuğla üretiminde hafif agregalar olarak kullanılmıştır. Isı iletkenliği direnci yüksek kil tuğlalar perlit ilave edilerek üretilmiştir. Çalışmalarda Eskişehir bölgesi kil ve perlitleri kullanılmıştır. Perlit katkılı tuğla üretiminde bağlayıcı malzemeler olarak çimento, jips, kireç, bitüm ve kil kullanılmıştır. Araştırmalarda, en iyi ısı direnci ve basınç mukavemet değerlerinin %24-30 perlit içeren kombinasyonlarda olduğu görülmüştür. %30 perlit kullanıldığında ısı iletimi 0,185 kcal/mh°C (standart tuğlalarda 0,40 kcal/mh°C) ve basma mukavemet değeri 2,6 MPa (standart tuğlalarda 2,4 MPa) olduğu belirlenmiştir. Çalışmaların sonunda, üretilen kil tuğlalara katılan perlit miktarı arttıkça birim hacim ağırlığı ve ısı iletim özelliği iyileşmekte ancak basma dayanım değerleri standartlara göre kötüleşmektedir [14].

Perlit agregasının tuğla üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilirliği ile ilgili diğer bir çalışmada, İmrahor bölgesi tuğla fabrikalarından alınan tuğla kili, diatomit tesislerinden alınan diatomit hammaddesi ve Cumaovası perlit işletmesinden alınan genleştirilmiş perlit kullanılmıştır. Diatomit ve perlit agregalarında ayrı ayrı %0, %10, %20, %30 oranlarında karışım hamurları elde edilmiştir. Elde edilen deney numuneleri, 800, 900 ve 1000°C sıcaklıkta pişirilmiştir. Deneysel çalışmaların neticesinde, %20 diatomit katkılı ürünlerin 900°C'de pişirilmesi ile gerekli mekanik özellikleri sağlayan ürün elde edilebileceği görülmüştür [15].

Pomza agregalı hafif beton ve EPS (genleştirilmiş polistren köpük) kullanılarak üretilen izolasyon bloklarının üretimi için geliştirilen yeni bir yöntemin tanıtıldığı bir çalışma yapılmıştır. İzolasyon bloğu üretimi için ilk defa dairesel testereli blok kesme makinesi kullanılarak (20 cmx40 cmx20 cm) boyutlarında tek sıra boşluklu duvar hafif blok elemanı üretilmiştir. Bu amaçla, ilk aşamada hafif beton agregasında kullanılan tüvenan pomzanın

fiziksel, termal özellikleri belirlenmiş ve elek analizi yapılmıştır. Üretim sonrasında izolasyon blokların, kâgir birim olarak kullanılabilirliğini belirlemek için standartlara göre analizleri yapılmıştır. Kür süresi (28 gün) sonrası izolasyon bloğun düzlükten en büyük ortalama sapma değeri 0,15 mm, oturma yüzeylerinin düzlemsel paralellikten sapma miktarı 0,40 mm, kuru birim hacim kütlesi 562 kg/m³, basınç dayanımı 2,99 N/mm², kapiler su emmesi 20,63 g/m², kâgir birim ses yutuculuğu 60 dB, ısı iletkenlik katsayısı 0,088 W/mK ve sıva tutuculuk özelliği çok iyi olarak tespit edilmiştir [16].

Bor minerallerinin doğal bağlayıcı olarak kullanılabilir olduğuna dair literatürde çok fazla çalışmaya rastlanmamıştır. Bu amaçla yapılan araştırmalarda, Espey kolemanitini mineralojik, petrografik ve termal yollarla tanımlamak ve sıcaklık değişimi ile fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişimi (600 °C'ye kadar) araştırılmıştır. Gözenekli olmayan kristal yapıya sahip olan Kolemanitin % 35,8 B₂O₃ ve % 30,5 SiO₂'den oluştuğu bulunmuştur. Kolemanitin termal ayrışması; sıcaklık aralığı 300-600 °C olup kalsinasyonun kolemanitin fiziksel özelliklerini etkilediği görülmüştür. En yüksek yüzey alanı, 131.9 m²/g ve 500 °C'de elde edilmiştir [17-18].

Bir başka araştırmada, inşaat alanında kullanılan yüksek mukavemete sahip, ısı ve ses yalıtımı ve nötron tutma özellikleri iyi hafif tuğla üretimi amaçlanmıştır. Hafif tuğlaların genişlemiş perlit, CMC, kömür tozu, kolemanit ve su karışımından üretilebilir olduğu tespit edilmiştir. Tuğlalar, farklı sıcaklıklarda (200-400 °C) farklı miktarda kolemanit (ağırlıkça% 0-20) kullanılarak hazırlanmıştır. %10 kolemanit eklenen ve 400 °C ısı işleminden sonra üretilen tuğlanın optimum mukavemeti (3.5 MPa) elde edilmiştir [19].

Yapılan bir araştırmada, perlit agregasına Na-Borat ve K-Borat katkısı ile (5x10x10 cm) ebatlarında üretilen tuğlaların birim hacim ağırlık ve mukavemet değerleri belirlenmiş ve optimize edilmiştir. Çalışmaların sonunda üretilen tuğlaların içinde en düşük birim hacim ağırlık (522 kg/m³) ve en iyi basma dayanım değeri (23 kgf/cm²) olarak belirlenmiştir [20].

Bu çalışma kapsamında, bims tuğla üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun ürünü ağırlaştırdığı, fiziksel ve kimyasal özelliklerini (ses, ısı iletimi vb.) kötüleştirdiği belirlenmiştir. Bu amaçla, çimento yerine bağlayıcı olarak bor minerali (kolemanit, tinkal ve bor atığı) ile birlikte ana hammadde pomza kullanarak tuğla üretimi gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bor atık ve mineralleri pomza agregası bünyesine %6-12 oranlarında katılarak kullanılmıştır. Laboratuvar çalışmaları sonunda elde edilen farklı reçete (pomza, tinkal, kolemanit, bor atığı, kil, CMC) kullanmak suretiyle üretimler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar optimize edilerek nihai tuğlaya ulaşılmıştır. Ayrıca, elde edilen ürünlerin XRD, SEM, EDX, TGA-DTA analizleri yapılarak karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

2. Malzemeler ve yöntemler (Material and methods)

2.1. Malzemeler (Materials)

Tuğla üretiminde ana hammadde olarak pomza cevheri kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan pomza, Nevşehir ili Blokbims fabrikasından temin edilmiştir. Çalışmalarda tane iriliği 0-8 mm olan pomza agregası kullanılmıştır. Pomza cevherinin mineralojik-petrografik ve kimyasal analizi Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Nevşehir pomzasının mineralojik ve petrografik analizi (Mineralogical and petrographic analysis of Nevşehir pumice).

Mineralojik- Petrografik Analiz										
Vesiküler, tübüler, yer yer de lifsi doku gösteren volkanik cam parçalarından oluşmuştur.										
Kimyasal Analiz(%)										
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	A.Za.	
3,2	0,1	12,5	71,5	4,3	0,8	0,1	0,1	1,2	4,25	

Çalışmada, doğal bağlayıcı olarak kırka-bor atığının yanında atık olmayan cevherde (Espey-Kolemanit, kırka-tinkal) kullanılmıştır. Bor minerali olarak tane iriliği 75 mikrometreye kadar öğütülmüş kolemanit (2CaO.3B₂O₃.5H₂O) ve tinkal-bor atığı (Na₂B₄O₇.10H₂O) kırka Bor İşletme Müdürlüğünden temin edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan kolemanit, tinkal ve bor atığının kimyasal analizleri Çizelge 2, 3 ve 4'te verilmiştir. Atıkların bor tayini kimyasal metot ile Eti Maden'de gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2. Kolemanit minerali kimyasal analizi (Chemical analysis of colemanite mineral).

Kimyasal İçerik	
B ₂ O ₃	% 40,00 ± 0,50
CaO	% 27,00 ± 1
SiO ₂	% 4,00 - 6,50
SO ₄	% 0,60 max.
As	35 ppm max.
Fe ₂ O ₃	% 0,08 max.
Al ₂ O ₃	% 0,40 max.
MgO	% 3,00 max.
SrO	% 1,50 max.
Na ₂ O	% 0,35 max.
A.Za.	% 22,13

Çizelge 3. Tinkal minerali kimyasal analizi (Chemical analysis of tinkal mineral).

Kimyasal İçerik	
B ₂ O ₃	% 36,47 min
Na ₂ O	% 16,24 min
SO ₄	135 ppm max
Cl	70 ppm max
Fe	15 ppm max
A.Za.	% 46,77

Çalışmalarda ön bağlayıcı ve yoğunluk arttırıcı olarak ucuz ve doğal olması nedeniyle kil(simektit) minerali

Çizelge 4. Bor atığının kimyasal analizi (Chemical analysis of boron waste).

Kimyasal İçerik											
%	B ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	SrO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	A.Za.
Bor Atığı	%22,9	11,8	9,06	12,63	0,59	0,47	0,10	4,48	0,20	0,11	40,59

Çizelge 5. Kil mineralinin kimyasal analizi (Chemical analysis of clay mineral).

Kimyasal İçerik							
(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO+MgO	Diğer
İmrahor Kil	60,6	16,1	2,1	2,4	6,8	6,0	6,0

tercih edilmiş olup, tuğlaların mukavemetini arttırmak amacıyla kullanılmıştır. Ankara (İmrahor)'dan temin edilen kil mineralinin kimyasal analizi Çizelge 5'te verilmiştir. Ayrıca çalışmalarda ön bağlayıcı olarak kullanılan malzemelerden birisi de karboksimetilselüloz (CMC) dir. Hafif yapı malzemesi üretiminde CMC üretilen malzemenin pres sonrası ayakta durabilmesi amacıyla kullanılmış olup özellikleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Karboksimetilselüloz (CMC) analizi (Carboxymethylcellulose (CMC) analysis).

Kimyasal İçerik (Toz malzeme)		
Analizler	Min. Değer	Max. Değer
Nem, (%)	6	10
Aktif Madde Oranı, (%)	60	65
NaCl+Sodyum Silikat, (%)	35	40
Viskozite, %2, 25 °C	100 cP	200 cP
pH, %1'lik	7,5	10,5

2.2. Yöntemler (Methods)

Deneyler, Maden Tetkik Arama (MTA) teknoloji dairesi bünyesindeki araştırma laboratuvarında bulunan cihazlar kullanılarak yapılmıştır. Tuğla üretim çalışmaları (5x10x20cm) ebatta metal kalıplarda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde karışımın şekillendirilmesi için pres yöntemi kullanılmıştır. Reçete hazırlama çalışmalarında kuru pomza, tinkal, kolemanit ve bor atığı karışımları sulu CMC ile harmanlanarak laboratuvar şartlarında 10,14 ve 20 bar basınç uygulamak suretiyle oda sıcaklığında üretim yapılmıştır. Yapılan değerlendirmede en ideal pres basıncının 20 bar olduğu tespit edilmiş ve çalışmaların devamında bu değer kullanılmıştır. MTA bünyesinde bulunan pres makinesi ve kullanılan metal kalıp Şekil 1'de verilmiştir.

Çalışma kapsamında EN 933-1 [21] standardına uygun olarak yapılan elek analizleri neticesinde pomza numunelerinin elek analiz değerleri tespit edilmiş ve 8mm altında tane boyutundaki pomza kullanılmıştır. Tuğla hammaddesini homojen olarak karıştırmak için ayarlanabilir sabit hızla dönebilen Mortar ISSI-14 tipi mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Bu cihazda manuel ve otomatik karıştırma seçeneği vardır. Karıştırma hızı olarak 140 dev/dk seçilmiştir. Yapılan deneylerde farklı karışım reçetelerine bağlı olarak üretilen tuğla

**Şekil 1.** Pres makinesi ve metal kalıp (Press machine and metal mold).

örneklerinin pişme sıcaklığı ve süresini belirlemek amacıyla 1000 °C maksimum sıcaklığa çıkabilen dijital göstergeli proterm marka kameralı fırın kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kamara tipi fırın, üretilen tuğlaların sıcaklık değişimi ve süresini optimizasyonunun belirlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Çalışmalarda (16-2)mm elek serisi ve Utest elek sallama makinası UTG 0412 kullanılmıştır. Üretilen tuğlaların dayanım testleri, MTA'da seramik araştırma laboratuvarında bulunan dijital mekanik pres Utest UTC-4131 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Mekanik pres, 1500 kN yük kapasiteli, 1 kg hassasiyette, dijital göstergeli ve mekanik motorla çalışan bir cihazdır. Bu cihaz, numune sıkışmaya başladığında ve kırılma anındaki maksimum yük değerini ekranda tutabilmekte ve ölçümlerdeki hata payını oldukça düşürmektedir. Tuğla ısı iletim katsayısını belirlemek amacı ile 20 adet numune (5x10x20cm) İYTE (İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü)'ne köpüklere sarılarak karton kutu içinde gönderilmiş ve KEMQTM 500 ısı iletim katsayı belirleme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tuğla imalat çalışmalarında 23 farklı reçetede üretimler yapılmıştır. Karışımlar optimize edilen 20 bar basınç ile preslenerek şekillendirilmiştir. Üretilen tuğlalar pişme öncesinde bünye neminden kurtulması için etüvde 105°C ± 5°C sıcaklıkta 2-3 saat bekletilmiştir.

Çizelge 7. Tuğla karışım oranları (Brick mixing ratios).

Reçete Tipi	Pomza (%)	Tinkal (%)	Kolemanit (%)	Bor atığı (%)	Kil (%)	Su (%)	CMC (%)
K1	88	-	8	-	4	20	2
K2	90	-	6	-	4	20	1
K3	92	-	4	-	4	20	0,8
T1	92	8	-	-	-	20	1
T2	94	6	-	-	-	20	0,9
T3	96	4	-	-	-	20	0,7
A3-1	80	-	-	20	-	20	2
A3-2	82	-	-	18	-	20	1,5
A3-3	84	-	-	16	-	20	1
A2-1	86	-	-	10	4	20	0,9
A2-2	88	-	-	8	4	20	0,8
A2-3	90	-	-	6	4	20	0,7
A2-4	92	-	-	4	4	20	0,6
A1-1	94	-	-	2	4	20	0,5
A1-2	96	-	-	4	-	20	0,4
A1-3	98	-	-	2	-	20	0,3
A1-4	100	-	-	-	-	20	0,2
TK1	84	12	-	-	4	20	1
TK2	86	10	-	-	4	20	0,9
TK3	88	8	-	-	4	20	0,7
TK4	90	6	-	-	4	20	0,5
TK5	92	4	-	-	4	20	0,3
TK6	94	2	-	-	4	20	0,1

K: Kolemanit katkılı, A: Bor atık katkılı, T: Tinkal katkılı, TK: Tinkal+Kil katkılı

Etüvden çıkan tuğlalar kamaralı fırında pişme için belirlenen sıcaklık (750°C) 10 dakika pişirilmiştir. Pişirme işlemi sonunda Bor atığı ve Tinkal katkısı ile pişirilen tuğlalar yüksek üretim kapasitesi ile üretilirken, Kolemanit katkısı ile pişirilen tuğlalar düşük kapasitede üretilmiştir. Bu durum tinkal mineralinin sinterleme etkisinin daha iyi olduğunu göstermektedir. Çizelge 7’de farklı karışım oranları ve kullanılan yüzdeler verilmiştir.

Tuğla imalatında ana hammadde için 8 mm altı pomza kullanılmıştır. Ön çalışmalarda belirlenen reçetede ana hammadde pomza bağlayıcı olarak ise Tinkal (%35 B₂O₃), Kolemanit(%40 B₂O₃) ve Bor Atığı (%23 B₂O₃) kullanılmıştır. Buna göre yapılan çalışmalarda yüzde B₂O₃ oranı (2-4) civarında olacak şekilde hesaplanan Tinkalden %2-12, kolemanitten %4-8, bor atığından %2-20 olacak şekilde alınarak kuru karışım hazırlanmıştır. Optimum karışım her bir numune için 700 g kuru karışım olacak şekilde karıştırıcıda 15dk karıştırılmıştır. Kuru karışımın %20’si kadar su ve %0,9 kadar CMC (karboksimetilselüloz) katılarak preslemeye hazır karışımlar elde edilmiştir.

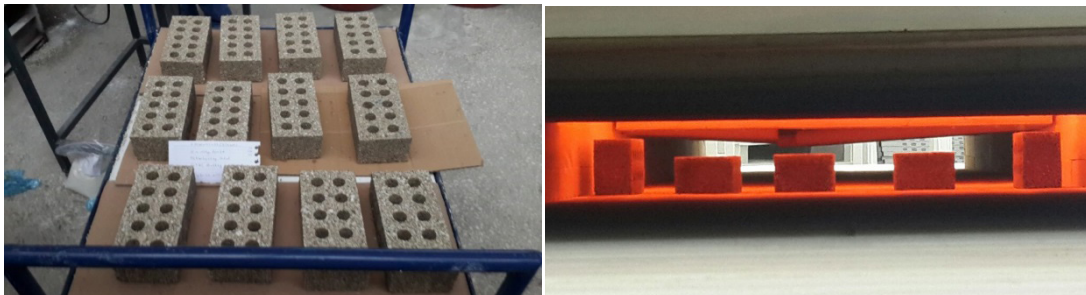
Presleme sonucu basılan tuğlalar 2-3 saat boyunca etüvde bekletilmiştir. Numuneler 750-800°C sıcaklıkta 10 dk süre ile pişirilerek üretilmiştir. Numuneler üzerinde mukavemet deneyleri yapılmıştır. Kolemanit katkılı ürünlerden istenilen mukavemet değerleri elde

edilememiştir. Ancak bor atık ve tinkal katkılı tuğlaların dayanım değerleri sektörel ürünlere kıyasla benzer bulunmuştur. Bu amaçla 23 adet farklı katkılı reçetelerden üretilen ürünler üzerinde yapılan dayanım deney sonuçlarına göre 6 adet reçete için çalışmaların devam edilmesine karar verilmiştir. Yapılan reçete belirleme deneyleri sonucunda, optimum değerleri veren(düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet) karışımlar (tinkal (TK3-TK4), kolemanit (K2-K3) ve bor atığı (A2-2- A2-3) belirlenmiş ve tuğla imalat çalışmaları 6 reçete üzerinde devam edilmiştir (Şekil 2).

3. Sonuçlar ve tartışma (Results and discussion)

3.1. Tuğlaların fizikomekanik analizleri (Physicomechanical analysis of bricks)

Çalışmalar kapsamında; kolemanit, tinkal ve bor atığı ile üretilen tuğlalarda fizikomekanik (basınç dayanımı, birimi hacim ağırlık, ısı iletkenlik katsayısı, porozite, su emme vb.) analizler yapmak suretiyle üretilen tuğlaların üzerinde teknik analizler yapılmıştır (Çizelge 8). Ayrıca, analizler ile doğal bağlayıcı olarak bor katkısının etkisi araştırılmıştır. Her bir deneyde 10 adet numune kullanılmış ve aritmetik ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Deneyler TS 1477 EN ISO 266 [22], TS 3529 [23], TS 825 [24] ve TSE EN 771-1 [25] standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

**Şekil 2.** Tuğla imalatı ve pişirilmesi (Brick manufacturing and firing).

Çizelge 8. Tuğla mekanik ve fiziksel özellikleri (farklı reçeteler) (Mechanical and physical properties of bricks (different recipes).

Numune Adı	Basınç Dayanımı (MPa)	BHA (kg/m ³)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Su Emme (%)	Porozite (%)
K2	2,78±0,04	650±0,01	0,2023±0,14	42,4±0,19	44,1±0,19
K3	2,86±0,01	690±0,05	0,2188±0,09	39,8±0,23	41,7±0,31
TK3	2,95±0,05	660±0,04	0,1835±0,11	33,1±0,33	37,9±0,15
TK4	2,85±0,07	630±0,02	0,1793±0,15	34,1±0,25	37,8±0,27
A2-2	3,33±0,01	700±0,03	0,1504±0,10	32,4±0,22	37,3±0,22
A2-3	3,63±0,03	730±0,01	0,1739±0,11	32,0±0,36	37,1±0,18

Deney sonuçlarına göre (A2-2-A2-3) karışımlardan üretilen tuğlaların basınç mukavemeti değerleri en iyi sonuçları vermiştir (3,63-3,33 Mpa). Bununla birlikte ısı iletim katsayısı, su emme ve porozite değerlerine göre en iyi sonuçlar yine (A2-2-A2-3) reçeteli tuğlalardan elde edilmiştir. Ancak, birim hacim ağırlık bakımından bu tuğlalar diğer tuğlalara göre daha ağır olduğu tespit edilmiştir. Isıl iletkenlik analizlerinde, her bir numune için 6 ölçüm yapılarak aritmetik ortalaması alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre tuğla pres basıncı arttıkça ısı iletkenlik değerinin kötüleştiği görülmüştür. Bu durum pres basıncının artması ile pomzanın gözenekli yapısının bozulduğu şeklinde değerlendirilebilir.

Isı iletkenlik katsayısı bakımından en düşük değer bor atık katkılı numunede (0,1504 W/mK) elde edilmiştir. Su emme deneyinde kolemanit katkılı tuğla, deney esnasında dağılmıştır. Diğer reçetelere kıyasla (A2-2-A2-3) reçeteli bor atık katkılı tuğla daha iyi dayanım özellikleri vermiştir. Diğer tuğlalar ise fiziksel özellikler bakımından daha iyi ancak mukavemet bakımından daha düşük değerler vermiştir.

3.2 Kimyasal analizler (Chemical analysis)

Proje kapsamında; kolemanit, tinkal ve bor atığı ile üretilen tuğlalarda kimyasal analizler, XRD, XRF, SEM, DTA, TG gibi teknolojik deneyler gerçekleştirilmiştir. Projede kullanılan bor minerali ve bor atığı ile üretilen tuğlalardaki bileşim oranları XRF analizi yöntemiyle gerçekleştirilmiş olup değerler Çizelge 9'da verilmiştir.

Kimyasal analizlerin sonucunda, tuğla yapımında taneler arası bağ oluşturarak mukavemet artışı sağlayan

Al₂O₃ (>10) varlığı görülmektedir. Ayrıca yapılan analizlerde tüm malzemelerde SiO₂ içeriğinin %60-72 arasında olduğu belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kolemanit mineralleri %40 B₂O₃, tinkal mineralleri %36 B₂O₃ ve bor atığı %22,9 B₂O₃ içermektedir.

3.3. Kalitatif mineralojik analiz (XRD) mineralogical analysis (XRD)

Tuğlalarda pişirme ile oluşan mineral yapıları görmek amacıyla örnekler üzerinde MTA teknoloji dairesi laboratuvarlarında Cu X-ışın tüplü Rigaku Geigerflex XRD cihazı kullanılarak mineralojik analizler yapılmıştır. Tuğlaların kalitatif mineralojik analiz sonuçları Çizelge 10'da ve Şekil(3,4,5)'te verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda her 3 farklı katkılı tuğlada da amorf bir yapı bulunmuştur. Bor atık katkılı tuğlada az miktarlarda kristobalit ve feldspat grubu mineraller belirlenmiştir. Tinkal katkılı tuğlada kristobalit ve feldspat grubu minerallerin yanında, kuvars ve kil grubu mineraller görülmüştür. Bulunan kil grubu simteit kil grubu mineralidir. Kolemanit katkılı tuğlada serpantin grubu ve mika grubu minerallerin yanı sıra kuvars oluşumu tespit edilmiştir.

3.4. SEM analizi (SEM analysis)

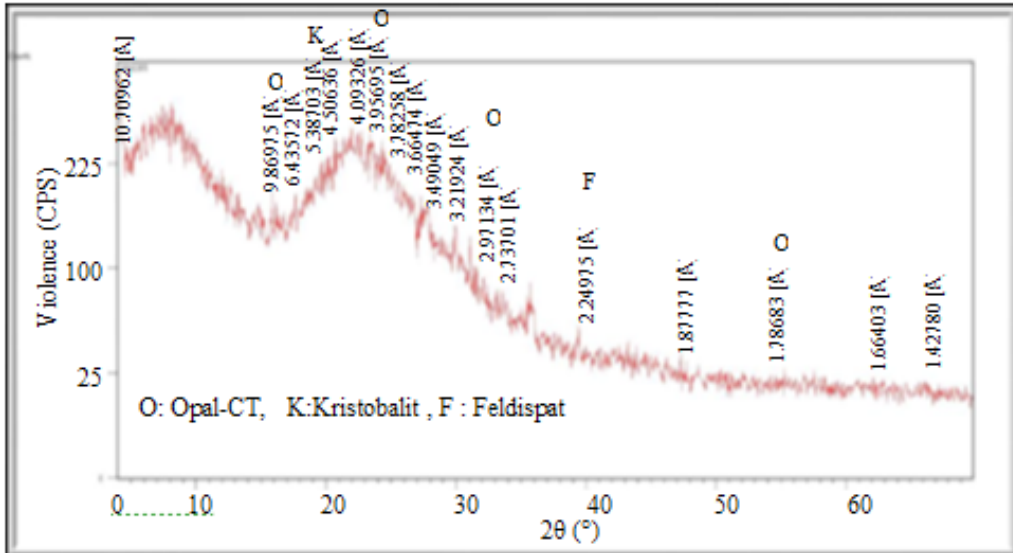
Tuğla üzerinde SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) analizleri yapılmıştır. SEM analizleri, numuneler gümüşle kaplandıktan sonra FEI Quanta 400 MK2 model taramalı elektron mikroskop altında toplam 11 adet ikincil elektron dedektör SE (görüntü analiz sistemi) ile incelenerek görüntüsü alınmıştır (Şekil 6, 7 ve 8).

Çizelge 9. Tuğla kimyasal analizi (Chemical analysis of bricks).

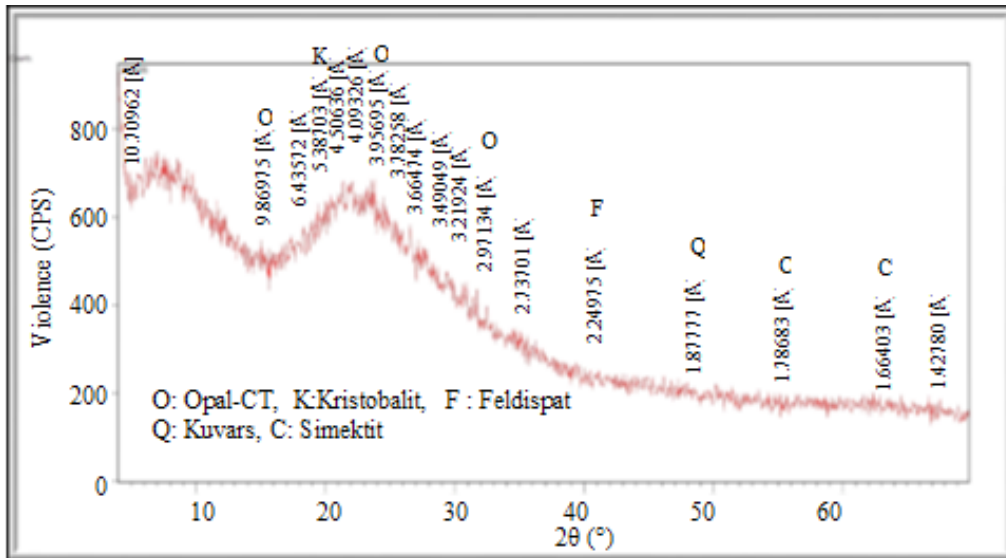
Numune	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	B ₂ O ₃ (%)	CaO+MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	A.Za (%)
Bor atık katkılı	69,6	12,8	2,80	2,7	1,5	4,3	< 0,1	4,8	0,75
Tinkal katkılı	66,7	12,5	3,70	3,2	1,6	4,3	< 0,1	5,1	2,10
Kolemanit katkılı	69,8	12,2	4,30	1,5	1,7	4,1	< 0,1	6,1	5,30

Çizelge 10. Tuğla kalitatif mineralojik analiz sonuçları (Bricks qualitative mineralogical analysis results).

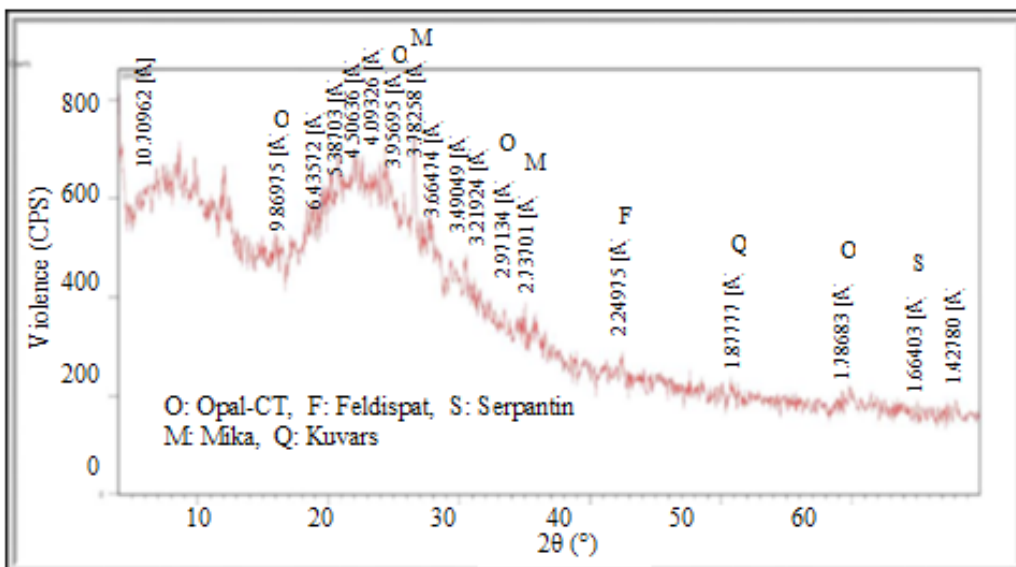
Numune Adı	Kalitatif Mineralojik Analiz
Bor atığı katkılı tuğla	Amorf malzeme, Kristobalit, Feldspat grubu mineraller
Tinkal katkılı tuğla	Amorf malzeme, Kristobalit, Kuvars, Feldspat grubu mineraller, Kil grubu mineraller
Kolemanit katkılı tuğla	Amorf malzeme, Feldspat grubu mineraller, Serpantin grubu mineraller, Mika grubu mineraller, Kuvars



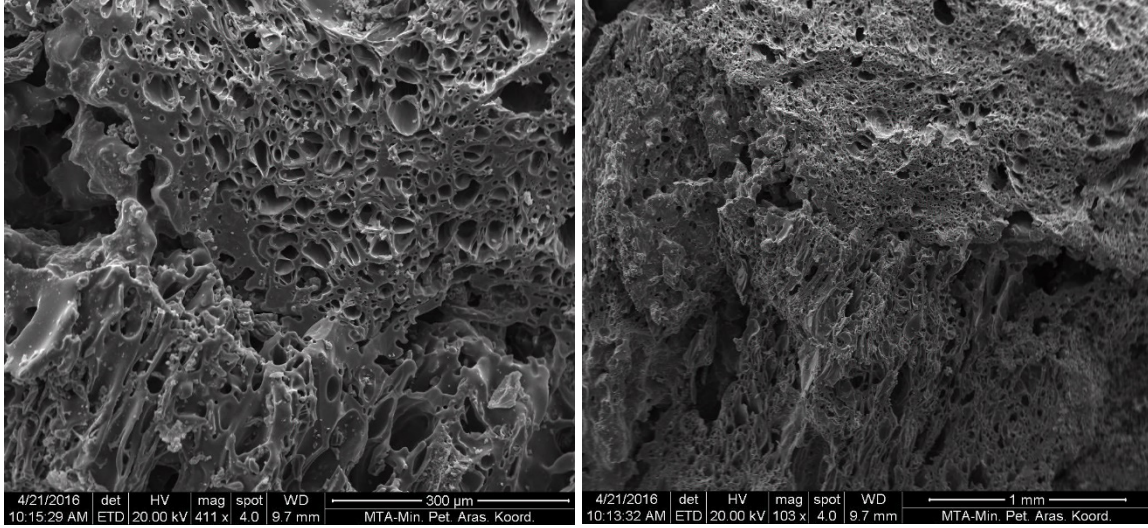
Şekil 3. Bor atık katkılı tuğlanın XRD grafiği (XRD graph of boron waste doped bricks).



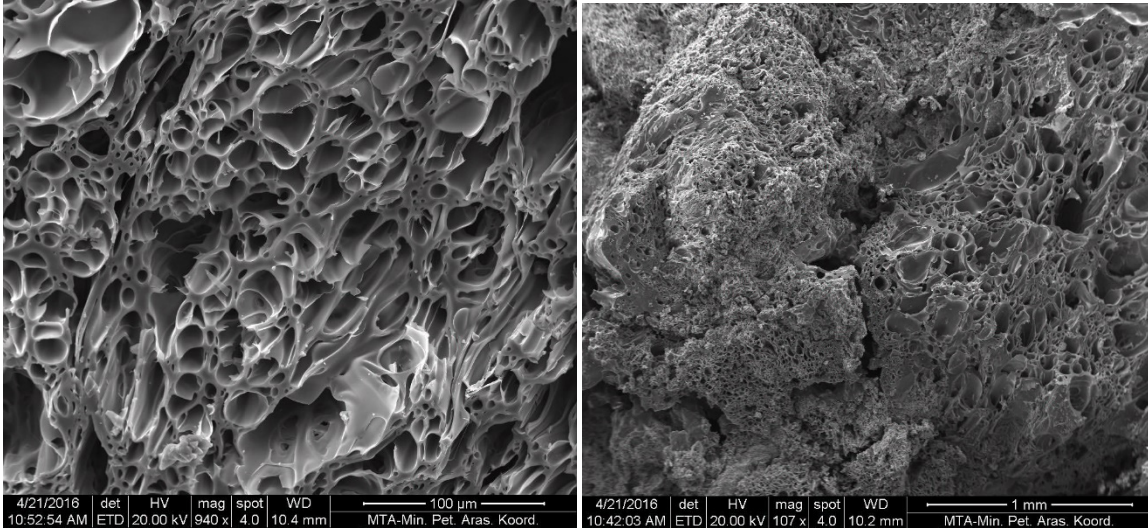
Şekil 4. Tincal katkılı tuğlanın XRD grafiği (XRD graph of tincal doped bricks).



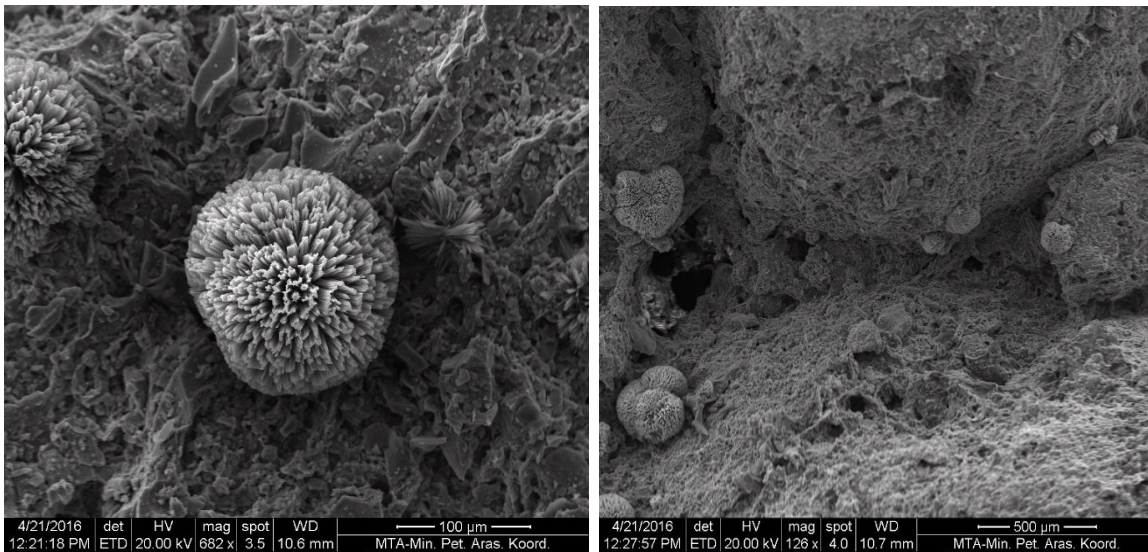
Şekil 5. Kolemanit katkılı tuğlanın XRD grafiği (XRD graph of colemanite doped bricks).



Şekil 6. Bor atık katkılu tuğlaların SEM görüntüsü (SEM image of boron waste doped bricks).



Şekil 7. Tincal katkılu tuğlaların SEM görüntüsü (SEM image of tincal doped bricks).



Şekil 8. Kolemanit katkılu tuğlaların SEM görüntüsü (SEM image of colemanite doped bricks).

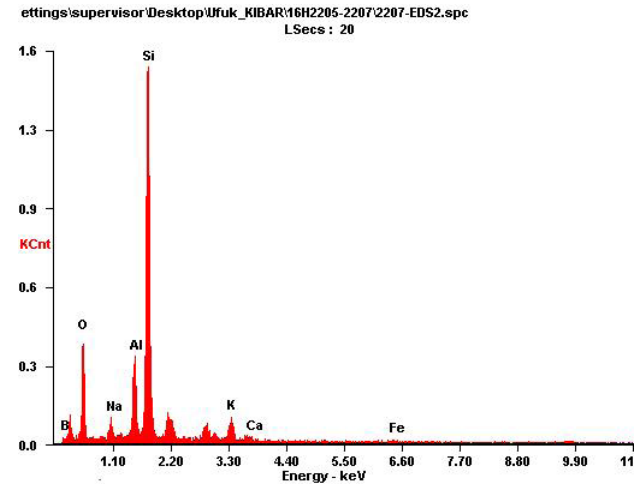
SEM görüntülerine göre; bor atığı katkılu üretilen tuğlalar en homojen yapıyı göstermektedir. Bu yapıya en

yakın görüntü tincal katkılu olarak üretilen tuğlalarda görülmektedir. Kalsiyumlu bor minerali olan kolemanit

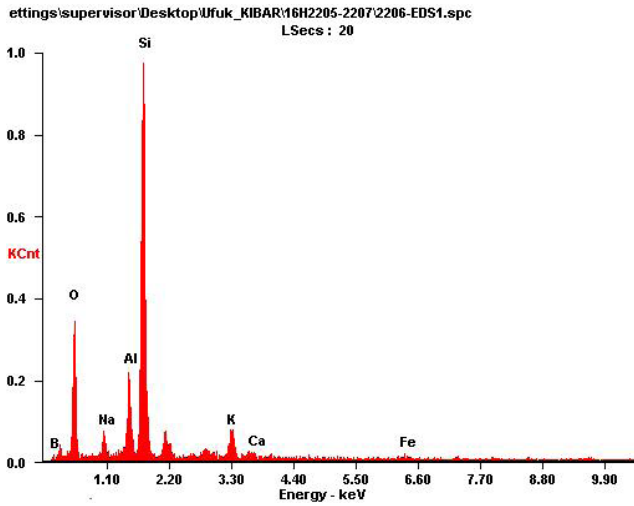
katkılı tuğlalarda homojen bir yapı görülmemiştir. Kolemanit dikenli top şeklinde görüntü vermiş ve taneler arası homojen olarak dağılamamıştır. Bu durum kolemanit katkılu tuğlaların dağılması ve mukavemet sonuçlarının oldukça kötü olduğu sonucunu da desteklemektedir.

3.5. EDS analizi (EDS analysis)

Deneylerde tuğlaların SEM görüntüleri ile beraber EDS (Enerji Dispersif Spektrometre) ile nokta (elementel) analizler yapılmış ve elementlerin dağılımı oransal olarak belirlenmiştir. EDS nokta analizleri EDAX Genesis XM 4i model dedektör kullanılarak yapılmıştır (Şekil 9, 10 ve 11). Deney sonuçları ise Çizelge 11’de verilmiştir.

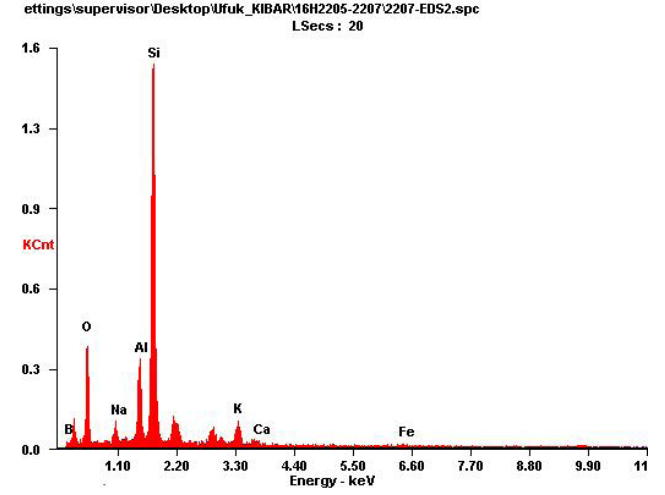


Şekil 9. Bor atık katkılu tuğla EDS grafiği (Boron waste doped brick EDS chart).



Şekil 10. Tinkal katkılu tuğla EDS grafiği (Tinkal doped brick EDS chart).

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda Si pikleri oldukça yüksek görülmektedir. Ayrıca bor oranı en fazla kolemanit katkılu tuğlada (%46,35) belirlenmiştir. Diğer numunelerde de majör element olarak Al, O ve K görülmüştür.



Şekil 11. Kolemanit katkılu tuğla EDS grafiği (Colemanite doped brick EDS graph).

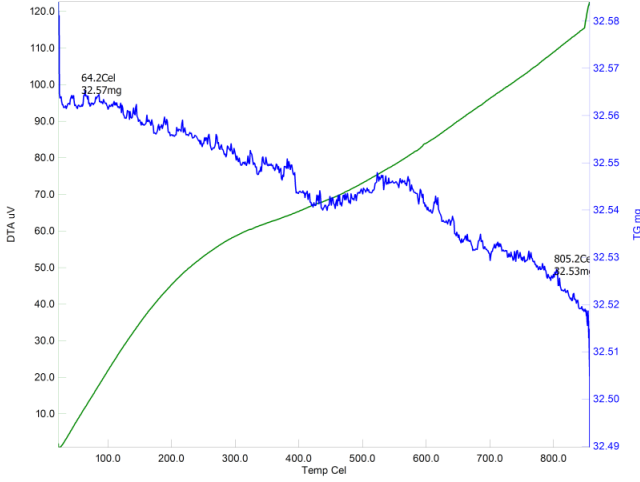
Analiz sonuçlarında görüldüğü gibi her bir tuğla örneği yaklaşık aynı değerleri vermiştir. Bu sonuçlar, Pomzanın farklı bor mineral katkısı ile ısıl işlemler sonucu sinterlenerek tuğla mukavemet değerlerine etki ettiği belirlenmiştir.

3.6. TG-DTA analizi (TG-DTA analysis)

Analizler S11 EXSTAR 6000 (TG/DTA 6300) cihazı ile yapılmıştır. Deneyler için hazırlanmış olan örneklerin (Bor atık, tinkal ve kolemanit katkılu tuğla) sıcaklık artışı ile birlikte kaybettiği ağırlık miktarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen TG-DTA (Thermo-Gravimetric/Differential Thermal Analyser) analizleri 10 °C/min ısıtma hızı ile 900 °C maksimum sıcaklığa çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Numune kabının yapıldığı malzeme platin krozedir; silindirik bir şekle sahip olan numune kabının çapı 6 mm, yüksekliği ise 10 mm’dir. Analiz için kullanılacak madde miktarı en fazla, numune kabı ile birlikte, 10 g olabilmekte ve duyarlık 0,001 mg’dir. TG cihazı çeşitli gaz atmosferlerinde çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Termal bozunmanın gerçekleştirildiği atmosferde silisin bulunması pik sıcaklıklarını ve DTG eğrilerinin şeklini önemli ölçüde etkilediği için deneyler hava atmosferinde gerçekleştirilmiştir. DTA grafikleri Şekil 12, 13 ve 14’te verilmiştir.

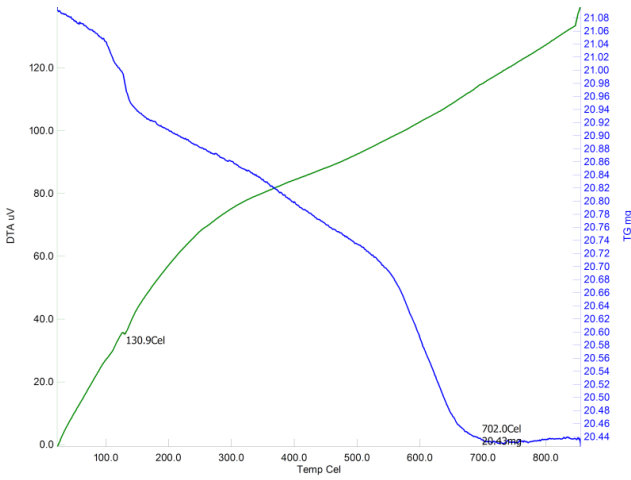
Çizelge 11. Tuğla elementel analiz değerleri (Elemental analysis values of brick).

Numune Adı	Elementel Analiz (%)									
	Si	O	C	Mg	Al	B	K	Ca	Fe	Na
Bor Atık katkılu	23,00	24,48	-	-	4,68	42,57	2,51	-	0,87	1,89
Tinkal katkılu	21,83	25,94	-	-	4,07	42,01	2,72	0,54	1,25	1,64
Kolemanit katkılu	23,20	17,50	-	-	4,09	46,35	3,93	0,61	3,02	1,29



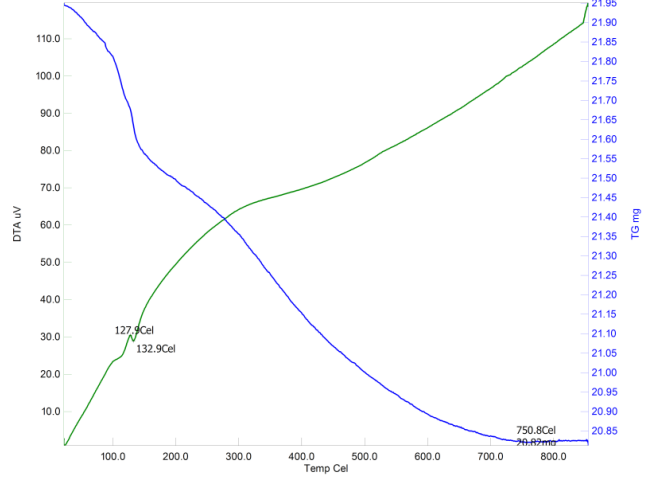
Şekil 12. Bor atık katkılu tuğlaların DTA/TG grafiği (DTA/ TG graph of boron waste doped bricks).

Şekil 12’de görüldüğü üzere Bor Atık katkılu numunelerde 60-100 °C’de tuğla üzerinde barındırdığı bünye nemini kaybetmiştir. 150 °C sıcaklıkta ağırlık kaybı başlamıştır, ancak bu yük kaybı sadece 0,04 mg’dır. Ayrıca, bor atık katkılu tuğlada faz değişimi 300-400 °C sıcaklıkta başladığı ve 800-900 °C sıcaklık civarında pişirilebileceği tespit edilmiştir.



Şekil 13. Tinkal katkılu tuğlaların DTA/TG grafiği (DTA/TG graph of tincal doped bricks).

Şekil 13’de görüldüğü üzere Tinkal katkılu tuğla 100-150 °C arasında barındırdığı bünye nemini kaybetmiştir. Bor atık katkılu tuğlada da olduğu gibi 150 °C’lerde başlayan yük kaybı sadece 0,64 mg’dır. Tinkal katkılu



Şekil 14. Kolemanit katkılu tuğlada DTA/TG grafiği (DTA/TG graph on colemanite doped brick).

tuğlada yapısal bozulmanın 200-300 °C sıcaklıkta başladığı belirlenmiştir.

Şekil 14’e göre Kolemanit katkılu tuğla bünyesindeki nemi 100-150 °C arasında bırakmıştır. Kütle kaybı 50 °C sıcaklıkta başlamış olup 700-800 °C sıcaklıkta sabitlenmiştir. Bu iki sıcaklık arasında ki kütle kaybı 1,1 mg’dır. Malzemenin yapısal bozulması 200-300 °C’de başladığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre kolemanit katkılu tuğla yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir malzemedir.

3.7. Yapı malzemelerinin karşılaştırmalı analizi (Comparative analysis of building materials)

Tuğla üretim çalışması sonunda Nevşehir bölgesi pomza cevheri kullanılarak elde edilen tuğlaların mühendislik özelliklerini ve kalitesini belirlemek amacıyla sektörde kullanılan diğer ürünlerle karşılaştırması yapılmıştır. Karşılaştırma analizinde, inşaat sektöründe örgü elemanı olarak sıklıkla kullanılan klasik tuğla (19x19x13,5 cm), sandviç tuğla (19x19x9 cm), gazbeton (25x60x20 cm), bimsblok (19x39x19 cm) ve üretilen perlit tuğlaların (5x10x20 cm) mühendislik özelliklerinin karşılaştırmalı analizi yapılmıştır (Çizelge 12).

Bor katkılu tuğlalar mühendislik özellikleri bakımından literatürde verilen sonuçlara benzer değerler sunduğu görülmüştür [23-24]. Yapılan bir araştırmada, perlit agregasına tinkal katkısı ile üretilen tuğlaların içinde en düşük ağırlık (522 kg/m³) ve en iyi basma dayanım değeri (23 kgf/cm²) olarak belirlenmiştir [24].

Çizelge 12. Farklı tuğla tiplerinin karşılaştırılması (Comparison of different types of bricks).

Özellikleri	Normal Tuğla (19 cm)	Gaz Beton (60 cm)	Bims Blok (39 cm)	Sandviç Tuğla (19 cm)	Borlu Tuğla (20 cm)
Isı Yalıtım Değeri (W/mK)	0,43-0,65	0,15-0,20	0,17-0,25	0,43-0,65	0,15-0,19
Ses Yalıtım (dB)	20-24	25-35	30-40	20-25	40-50
Su Emme (%)	20-30	45-55	40-45	25-35	40-45
Porozite (%)	15-25	25-35	30-35	15-20	35-40
Ultrasonik Geçiş Hızı (km/sn)	3,5-3,9	2,2-2,5	2,5-2,9	2,8-3,5	2,0-2,5
Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	900-1400	400-700	600-1000	1000-1500	400-700
Mekanik Mukavemet (kgf/cm ²)	40-50	35-50	30-40	40-50	30-40
Nokta Yük Dayanımı (kgf/cm ²)	20-30	10-15	5-15	15-25	5-10

4. Sonuçların değerlendirilmesi (Conclusions)

Bu çalışmada, doğal bağlayıcı olarak farklı tip ve oranlarda bor kullanılarak pomza tuğla üretilebilirliği araştırılmıştır. Belirlenen reçetelerde Bor Atığı, Tinkal ve Kolemanit kullanılmış bu sayede üretilen tuğlaların özellikleri belirlenmiş, en iyi mukavemet ve en düşük birim hacim ağırlık değerini veren reçeteler tespit edilmiştir. Tuğlaların fizikomekanik özellikleri değerlendirildiğinde; Bor Atık katkılı olarak (A2,2-A2,3) üretilen tuğlaların en yüksek mukavemet değerlerine (3,33-3,63MPa)sahip olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, bor atık katkılı tuğlaların birim hacim ağırlık değerleri oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte belirlenen reçetelerin arasında ısı iletim katsayısı, su emme ve porozite değerlerine göre karşılaştırma yapıldığında da yine en iyi sonuçlar A2,2-A2,3 reçeteli tuğlalardan elde edildiği belirlenmiştir. Isıl iletkenlik analiz sonuçlarına göre; Tuğlalara uygulanan pres basıncı arttıkça ısıl iletkenlik değerlerinin yükseldiği (kötüleştigi) görülmüştür. Isıl iletkenlik değeri bakımından en iyi değerler bor atık katkılı numuneden elde edilmiştir. Diğer katkılı tuğlalar (tinkal ve kolemanit) ise fiziksel özellikler bakımından daha iyi sonuçlar vermesine rağmen mukavemet bakımından daha düşük değerler vermiştir. SEM görüntülerine göre; Bor atığı katkısı ile üretilen tuğlalar en homojen yapıyı göstermiştir. Bu yapıya en yakın görüntü Tinkal katkılı olarak üretilen tuğlalarda görülmüştür. Kolemanit katkılı tuğlalarda homojen bir yapı görülmemiştir. TGA analizlerine göre; Bor Atık katkılı tuğlalar üzerinde barındırdığı bünye nemini 60-100 °C'de kaybetmiştir. 150 °C sıcaklıkta yük kaybı başlamış, ancak bu yük kaybı sadece 0,04 mg olmaktadır. Ayrıca, bor atık katkılı tuğlada faz değişiminin 300-400 °C sıcaklıkta başladığı ve 800-900 °C sıcaklık civarında pişirilebileceği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Nevşehir asidik pomzası ile bor katkılı olarak üretilen tuğlaların, yapı sektöründe kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Teşekkürler (Acknowledgment)

Bu çalışma, "Pilot Ölçekte Bor Katkılı Perlit/Pomza Tuğla Üretimi ve Fizikomekanik Özelliklerinin Belirlenmesi," isimli ve 2015-31-06-30-001 numaralı BOREN projesi tarafından desteklenmiştir. Tuğla İmalat çalışmalarında ve mekanik testlerin yapılmasında desteklerinden dolayı Kimya Mühendisi Rağıp Kızıldağ'a Malzeme Mühendisi Hüseyin Doyuran'a ve kimyasal analizlerin gerçekleştirilmesindeki destekleri için Kimyager Sezgin Özkasapoğlu'na teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

- [1] Erdoğlan Y., Asidik ve Bazik Pomzadan Üretilen Yapı Malzemelerinin Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 2007.
- [2] Gündüz L., Sarıışık A., Davraz M., Ugur İ., Çankıran O., Pomza Teknolojisi Cilt I (a), SDÜ Yayını, Isparta 1998.

- [3] Ayberk M., Perlitin Yapı Gereci Olarak Kullanımı ve Yapı Maliyetine Etkisi, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, 203-206 1995.
- [4] Çelik A. G., Bor Katkılı Perlit Karışımlardan Hafif Tuğla Üretimi ve Teknolojik Özelliklerinin Belirlenmesi, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi, 317 Adana 2010.
- [5] Temiz H., Hafif ağırlıklı bims betonun ateş direnci ile ısı ve ses yalıtım özelliklerinin araştırılması, KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12 (2), 8-17 2009.
- [6] Uslu T, Arol A. İ., Use of waste as an additive in red bricks, Waste Manage, 24:217-20 (6) 2004.
- [7] Yamık A., Uçar A., Demir U., Şahbaz, U., Bor Atığının Tuğla Sanayinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, 2. Uluslar Arası Bor Sempozyumu, Eskişehir, 419-421 2004.
- [8] Kavas T., Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick, Build. Environ., 41, 1779-1783 2006.
- [9] Çobanlı M. R., Isı Direnci Yüksek Hafif Yapı Malzemesi Üretimi Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, 1993.
- [10] Sönmez E., Yorulmaz, S., Kırka Boraks İşletmesi Artık Killerinin Tuğla Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, 163-168, 1995.
- [11] Ayberk M., Perlitin Yapı Gereci Olarak Kullanımı ve Yapı Maliyetine Etkisi, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, 203-206, 1995.
- [12] Ogle D., Making lightweight refractory ceramic from perlite and clay, Aprovecho Research Center, 2-7 2003.
- [13] Çelik M. H., Kanıt R., Orhan M., Isparta Bölgesi pomzasının tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, Politeknik Dergisi Cilt: 6 Sayı: 3 s. 597-604, 2003.
- [14] Topçu B., Işıldağ B., Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete, J. Mater. Process. Technol. 204, 34- 38 2008.
- [15] Bideci Ö., Bideci A., Perlit Hammaddesinin Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliği, 7. Uluslararası Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir-Kuşadası, 69-73. 2009.
- [16] Sarıışık A., Sarıışık G., Yeni üretim prosesi ile pomza agregalı hafif beton ve eps köpüklü izolasyon blok üretimi, standartlara uygunluğu diğer duvar yapı elemanları ile karşılaştırılması, Madencilik, Cilt 49, Sayı 2, Sayfa 27-39, 2010.
- [17] Çelik A. G., Çakal G. Ö., Kılıç A. M., Espey Kolemanitinin Termal ve Fiziksel Özelliklerine Sıcaklığın Etkisi, 8. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İstanbul, s;105-113. 2012.
- [18] Celik A. G., Cakal G. Ö., Characterization of Espey Colemanite and Variation of Its Physical Properties with Temperature, Physicochem. Probl. Miner. Process., 52 (1), 66-76 2016.
- [19] Celik A. G., Depci T., Kılıç A. M., New lightweight colemanite-added perlite brick and comparison of its

- physicomechanical properties with other commercial lightweight materials, Constr. Build. Mater., 62, 59-66, 2014.
- [20] Çelik A. G., Investigation on characteristic properties of potassium borate and sodium borate blended perlite bricks, J. Cleaner Prod., 102, 88-95, 2015.
- [21] TS EN933-1, Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu.
- [22] TS 1477 EN ISO 266, Akustik- Tercih Edilen Frekanslar, TSE, 2000.
- [23] TS 3529, Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, 1980.
- [24] TS 825, Binalarda ısı yalıtım kuralları, 2008.
- [25] TS EN 771-1, Kâgir birimler-Özellikler-Bölüm1:Kil kâgir birimler (tuğlalar), 2005.