

Makale Gönderim Tarihi: 19.03.2022

Yayına Kabul Tarihi: 12.05.2022

Saipler Kilinin Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi ve Seramik Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması

*Determination of Soil Properties of Saipler Clay and Investigation of Usability in Ceramic Industry*Mehmet KURUOĞLU^{1*}, Nurcihan TAŞKIN², İlker ÖZKAN³¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, 35390, İzmir/Türkiye² Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu, Geoteknik Programı, 35860, İzmir/Türkiye³ Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu, Endüstriyel Cam ve Seramik Programı, 35860, İzmir/Türkiye

*Sorumlu Yazar, e-mail: mehmet.kuruoglu@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6680-5408

Özet

Bu çalışmanın amacı, Saipler kilinin zemin özelliklerini belirlemek ve çeşitli sıcaklıklarda pişirilen kil numuneler kullanılarak seramik özelliklerini karakterize etmektir. Bu amaçla, kil numuneleri önce kimyasal analiz ve X-ışını kırınımı (XRD) ile karakterize edilmiştir. Saipler kilinin mineralojik bileşimine kuvars, kaolin, illit, smektit, dolomit, kalsit, hematit ve ortoklas hakimdir. Saipler kilinin indeks ve mühendislik özellikleri; elek analizi, hidrometre analizi, kıvam limitleri, özgül ağırlık, kompaksiyon, kesme kutusu, serbest basınç ve konsolidasyon deneyleri ile belirlenmiştir. Kil zeminin kıvam limitleri deneylerinden elde edilen veriler, Saipler kilinin yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girdiğini göstermiştir. Pişirim davranışlarını değerlendirmek için, preslenmiş kil numuneleri 900 ile 1150°C arasındaki sıcaklıklarda ayrı ayrı pişirilmiştir. Pişmiş numuneler su emme, lineer büzülme, kütle yoğunluğu, eğilme mukavemeti, X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile değerlendirilmiştir. 1050°C'nin üzerinde su emmede azalma ile birlikte lineer büzülme ve eğilme mukavemetinde artış gibi önemli değişiklikler gözlenmiştir. Saipler kilinin zemin özellikleri ve seramik karakteristiklerine dayanılarak, tuğla ve kiremit üretiminde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Saipler kili, zemin özellikleri, kil mineralojisi, seramik özellikleri, karakterizasyon.

Abstract

The aim of this study is to determine the geotechnical properties of Saipler clay and to characterize the ceramic properties using clay specimens fired at various temperatures. For this purpose, the clay specimens were characterized by chemical analysis and X-ray diffraction (XRD), firstly. The mineralogical composition of Saipler clay is dominated by quartz, kaolin, illite, smectite, dolomite, calcite, hematite and orthoclase. Index and engineering properties of Saipler clay were determined by sieve analysis, hydrometer analysis, consistency limits, compaction test, specific gravity determination, direct shear test, unconfined compression test, and consolidation test. Data obtained from consistency limits tests showed that Saipler clay can be classified as high plasticity clay (CH). In order to evaluate their firing behavior, pressed clay samples were fired separately at temperatures between 900 and 1150°C. The fired samples were

evaluated by water absorption, linear shrinkage, bulk density, flexural strength, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). Above 1050°C, significant changes such as linear shrinkage and increase in flexural strength were observed with a decrease in water absorption. Based on the soil properties and ceramic characteristics, Saipler clay can be used in the production of brick and tiles.

Keywords: *Saipler clay, soil properties, clay mineralogy, ceramic properties, characterization.*

1. Giriş

Kil mineralleri, fizikokimyasal özellikleri, doğada bol miktarda bulunmaları ve nispeten düşük maliyetleri nedeniyle birçok endüstriyel alanda hammadde olarak kullanılmaktadır. Dünya çapında, geleneksel seramik üretiminde temel hammadde killi malzemelerdir. Kil minerallerinin uygulamaları; bileşimlerine, yapılarına ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Killer, pişirim sırasında ağırlıklı olarak seramik özelliklerini belirleyen birçok fiziksel ve kimyasal değişime uğrarlar. Kil minerallerinin pişme sıcaklığı ile değişen fiziksel ve kimyasal özellikleri, endüstriyel seramik hammadde olarak kullanımlarını belirler. Ekonomik nedenlerle, seramik endüstrisi yakındaki yataklardan killi malzemelerin kullanılması tercih edilmektedir. Sonuç olarak, kil minerallerinin karakterizasyonu ve seramik özellikleri, seramik sektöründeki kullanım performansları için önemlidir (Baccour vd., 2009; Bakr, 2011; Carretero vd., 2002; Lahcen vd., 2014; Murray, 1999; Ngun vd., 2011; Pardo vd., 2011; Pialy vd., 2008).

Türkiye'nin Ege bölgesinde bulunan kil yatakları demir oksit içeriklerinden dolayı pişirildiklerinde kırmızı renk almaktadırlar. Bu killer şu anda geleneksel çömlek ve tuğla-kiremit üretimi amaçlı kullanılmaktadır. Torbalı bölgesi ve civarında tuğla kiremit üretiminde kırmızı renkli pişen plastik killer kullanılmaktadır. Bu nedenle Saipler bölgesi killeri, bu fabrikalar için önemli bir hammadde kaynağıdır.

Literatürde Saipler kilinin zemin özellikleri üzerine çok sınırlı çalışmalar yapılmış olmasına rağmen (Taşkın, 2011), Saipler kilinin seramik özellikleri henüz çalışılmamıştır. Literatürdeki bu boşluğu doldurabilmek için bu çalışma (a) kilin zemin özelliklerini belirlemek ve (b) seramik özelliklerini incelemek amacıyla yapılmıştır. Bu veriler, çeşitli seramik uygulamalarında hammadde olarak potansiyel uygunluklarını değerlendirmek için çok önemlidir.

2. Materyal ve Yöntem

İzmir ili, Torbalı ilçesi, Saipler bölgesinden alınan kil numuneleri etüvde değişmez kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutulmuş numuneler kullanılarak yıkamalı elek analizi, hidrometre analizi ve kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Yıkamalı elek analizi uygulanırken, numune önce kurutulmuş, başlangıç kuru ağırlığı tartıldıktan sonra No. 200 (0.076 mm) elek kullanılarak yıkanmıştır (ASTM D 2217). Yıkama sonrası elek üzerinde kalan numune, yeniden etüvde kurutulmuştur. Kurutulmuş numune, ASTM D 422 standardına uygun elek serisi oluşturularak, elek analizi yapılmıştır.

Hidrometre analizi, ASTM D 422 standardına uygun olarak ince daneli zeminlerin dane çapı dağılımının belirlenmesi amacıyla, hidrometre adı verilen cam balon kullanılarak çökme prensibine göre yapılmıştır. No. 200 (0.076 mm) elekten geçen 50 g kil zemin, 125 ml sodyum heksametafosfat (40g/l) çözeltisinde 16 saat bekletilerek zemin danelerinin birbirlerinden ayrılmaları sağlanmıştır. Deneye başlamadan önce, zemin-su süspansiyonu 10 dakika süreyle karıştırıldıktan sonra, 1000 ml hacimli ölçekli silindirik kap (mezür) içerisine boşaltılmıştır. Mezürün 1000 ml hacim ölçek çizgisine kadar su ilave edildikten sonra, ağzı lastik tapa ile kapatılarak bir dakika süre ile çalkalanmış ve düz bir yüzeye yerleştirildikten sonra kronometre tutularak belirli zamanlarda hidrometre okumaları alınmıştır.

Kıvam limitleri deneylerinde ise; kil zeminin likit limit, plastik limit ve rötre limiti değerleri belirlenmiştir. Likit limit deneyi düşen koni yöntemiyle TSE 17892-6 standardına uygun olarak yapılmıştır. Plastik limit deneyi ASTM D 4318, rötre limiti deneyi ASTM D 427 standardına

uygun olarak yapılmıştır. Kilin plastik davranış gösterdiği su içeriği aralığı olan plastisite indeksi değeri belirlenmiştir.

Numunelerin zgl ağırlıkları hava alma (vakum) metodu uygulanarak ve piknometre yöntemi (ASTM D 854) ile belirlenmiştir. Standard Proctor Kompaksiyon deneyi (ASTM D 698) ile, zeminin kompaksiyon değerleri adı verilen, optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık parametreleri belirlenmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak yapılan düşen seviyeli permeabilite deneyi sonucunda, zeminin geçirimliliğini temsil eden permeabilite katsayısı belirlenmiştir.

Zeminin kayma dayanımı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla direkt kesme (kesme kutusu) ve serbest basınç dayanımı (q_u) ile drenajsız kayma dayanımının (c_u) saptanması amacıyla serbest basınç deneyi yapılmıştır. Direkt kesme deneyi, ASTM D 3080 standardına uygun olarak, No. 4 elekten geçen numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler öncelikle optimum su içeriğinde sıkıştırılmış ve boyutları 60 x 60 mm olan kesme kutusu kalıbına yerleştirilerek 12 kg, 24 kg ve 36 kg düşey yük altında 0.75 mm/s kesme hızı uygulanarak kayma göçmesine kadar yüklenmiştir. Deformasyona bağlı yük okumaları, zeminde kayma göçmesi oluşuncaya kadar düzenli olarak alınmıştır. Göçme anındaki kayma gerilmeleri ve kayma dayanımı parametreleri (c ve ϕ) hesaplanmıştır.

Serbest basınç deneyi (ASTM D 2166), serbest basınç dayanımı ve drenajsız kayma dayanımı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Numuneler boy/çap oranı 2 olacak şekilde optimum su içeriğinde sıkıştırılarak, silindirik kalıplar içinde hazırlanmıştır. Eksenel yükleme hızı 0.75 mm/s olarak uygulanmış ve yükleme, eksenel deformasyonun azalmaya başlamasına kadar devam etmiştir. Deney sonucunda, serbest basınç dayanımı (q_u), drenajsız kayma dayanımının (c_u) ve sekant elastisite modülü (E_s) değerleri hesaplanmıştır.

Konsolidasyon deneyi ile Saipler kilinin sıkışma parametreleri belirlenmiştir. Bu deneyde örnekler optimum su içeriğinde sıkıştırılarak, çapı 5 cm, yüksekliği 2 cm olan halka (ring) içerisinde hazırlanmıştır. Zemin rneklerinin alt ve st yüzeyine fitre kağıdı ve poröz taş konularak, konsolidasyon hücresine yerleştirilmiştir. Zemin rnekleri üzerine; 0.25, 0.50, 1, 2, 4, ve 8 kg/cm² efektif gerilme uygulanacak şekilde yükleme, daha sonra boşaltma ve yeniden yükleme yapılarak sıkışma parametreleri (ASTM D 2435) belirlenmiştir.

Numunenin kimyasal analizi yapılarak, bünyesindeki oksit içerikleri belirlenmiştir. Numune içerisindeki mineraller XRD analizi ile, numunenin mikroyapısı ise SEM analizi tespit edilmiştir.

Saipler kilinin seramik özelliklerini belirlemek için kil numuneleri tablet haline getirilmiştir. Tablet halindeki numuneleri üretmek için kil numunesi kurutulmuş ve gtlmştir. gtlmş kil daha sonra ağırlıkça %6 suya kadar nemlendirilmiştir. Nemli tozlar 150 kg/cm² basınç altında preslenerek 100×50×8 mm prizmatik numuneler elde edilmiştir. şekillendirilen numuneler 110°C'de 24 saat kurutulmuş ve yüksek sıcaklık fırını (Nabertherm LH 15/14) kullanılarak 900-1150°C'de pişirilmiştir. Farklı sıcaklıklarda pişirilen numuneler kullanılarak, numunelerin fiziksel zellikleri TS EN ISO 10545-3 standardına uygun olarak belirlenmiştir.

XRD ve SEM karakterizasyon çalışmaları için pişirilen numunelerden 0.5×0.5×0.5 mm boyutlarında kübik numuneler kesilerek, yüzeyleri önce 400, 800 ve 1200 dereceli zımpara kağıtları, ardından ultrasonik olarak aseton ile temizlenmiştir. Artan sıcaklıkla faz değişimleri X-ışını kırınımı (XRD) ile incelenmiştir. Fırınlanan numunelerin mikro yapıları, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak analiz edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda pişirilen numunelerin renk ölçümleri (L, a, b renk değerleri) 3NH marka NH-310 model renk ölçüm cihazı ile belirlenmiştir.

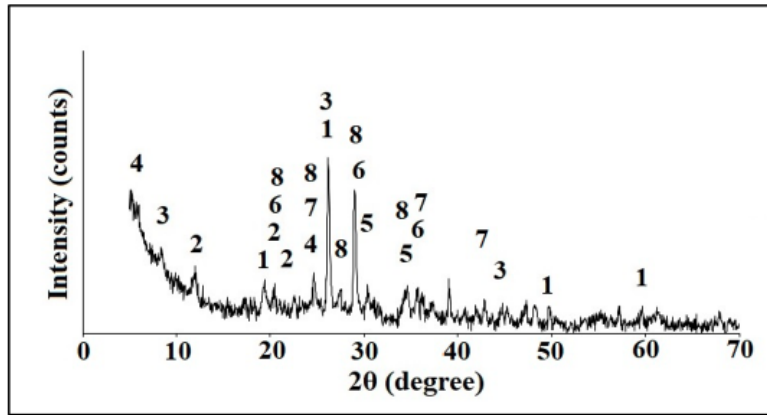
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kimyasal Analiz Bulguları ve Mineralojik Özellikler

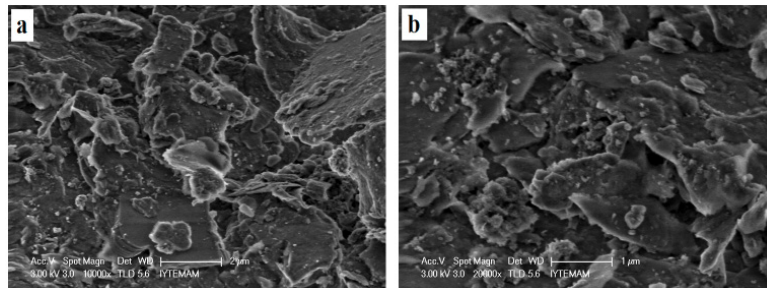
Saipler kiline ait kimyasal analiz bulguları Tablo 1'de verilmektedir. Saipler kilinin kimyasal analizinde, oksitlerin %55.75'ine karşılık gelen kısmı SiO₂ ve Al₂O₃'dir. Ayrıca, %10.68 oranında CaO da mevcuttur. Bu oksitlerin miktarı, numune içerisinde kil mineralleri ve kuvars varlığını işaret etmektedir. Ayrıca tipik Ege bölgesi killeri gibi, önemli miktarda demir oksit ihtiva etmektedir ki, bu oksit pişirme sonrası kile kırmızı rengini vermektedir. Saipler kili numunesinin XRD analizi sonucu, Şekil 1'de gösterilmektedir. Buna göre Saipler kili, kuvars, kaolin, illit, smektit, dolomit, kalsit, hematit ve ortoklas minerallerinden oluşmaktadır. Şekil 2'de kil numunesine ait SEM görüntüleri verilmektedir. Mikroyapı incelendiğinde levhalar halinde kaolinit mineralleri görülmektedir.

Tablo 1. Saipler kilinin kimyasal analiz sonuçları (Taşkın, 2011).

Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO
Saipler Kilindeki Oranları (%)	40.38	15.37	6.35	3.49	10.68	0.50	3.20	0.84	0.09



Şekil 1. Saipler kilinin toplam kayaç XRD grafiği (1-Kuvars, 2-Kaolin, 3-İllit, 4-Smektit, 5-Dolomit, 6-Kalsit, 7-Hematit, 8-Ortoklas).



Şekil 2. İşlem görmemiş Saipler kilinin SEM görüntüleri.

3.2. Saipler Kilinin Geoteknik Özellikleri

Saipler kiline ait geoteknik parametreler ayrıntılı bir deneysel çalışma ile belirlenmiş ve elde edilen bulgular Tablo 2'de verilmektedir.

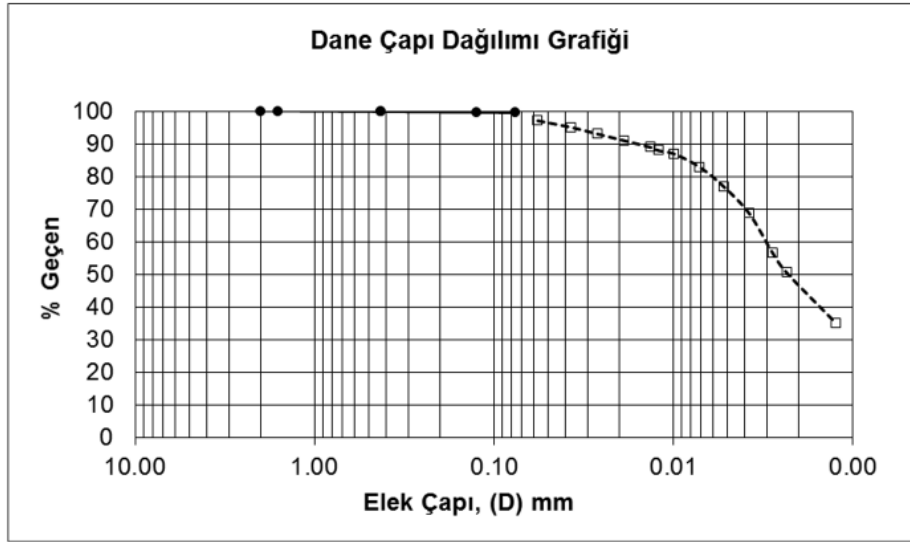
Öncelikle, Saipler kilinin dane çapı dağılımı belirlenmeye çalışılmıştır. Elek analizi sonuçları irdelendiğinde, kil örneğinin tamamının No. 10 (2 mm) elekten geçtiği, No. 40 (0.425 mm) elekten %99.7'sinin geçtiği ve No. 200 (0.076 mm) elekten de %99.4'ünün geçtiği bulgulanmıştır. Buradan, Saipler kilindeki silt ve kil dane boyutundaki danelerin, zeminin %99.4'ünü oluşturduğu görölmektedir. İnce kum boyutundaki daneler ise, %0.6 oranındadır. Hidrometre analizi uygulanarak, silt ve kil oranları belirlenmiştir. Buna göre, 0.002 mm'den küçük dane çaplı kil boyutundaki danelerin oranı (kil yüzdesi), %48 olarak saptanmıştır. Saipler kilinin elek analizi ve hidrometre analizinden elde edilen Dane Çapı Dağılım Grafiği, Şekil 3'de gösterilmiştir.

Plastisite, kil bazlı ürünlerin üretiminde en önemli parametrelerden biridir. Kıvam limitleri deney bulgularına göre, Saipler kilinin likit limit (ωL), plastik limit (ωP), ve plastisite indeksi (IP) değerleri sırasıyla %52, %26 ve %26 olarak belirlenmiştir. Saipler kilinin rötne limiti, (ωS) değeri de %17 olarak saptanmıştır.

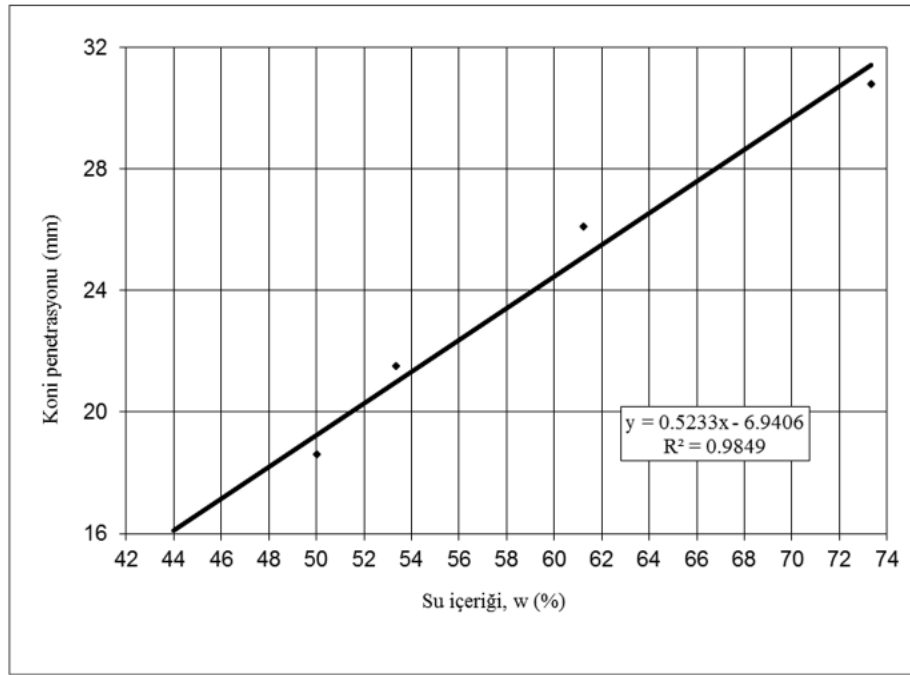
Tablo 2. Saipler kili geoteknik parametreleri (Taşkın, 2011)

ZEMİN ÖZELLİKLERİ		Saipler Kili
ELEK ANALİZİ	-No. 10 (2 mm), (%)	100.0
	-No. 40 (0.425 mm), (%)	99.7
	-No. 200 (0.076 mm), (%)	99.4
KİL YÜZDESİ	<0,002 mm, (%)	48
KIVAM LİMİTLERİ	Likit Limit, ωL (%)	52
	Plastik Limit, ωP (%)	26
	Plastisite İndeksi, IP (%)	26
	Rötre Limiti, ωS (%)	17
AKTİVİTE	A	0.55
ÖZGÜL AĞIRLIK	G_s	2.63
Standard Proctor Kompaksiyon Değerleri	$\gamma_{d,max}$ (t/m ³)	1.67
	ω_{opt} (%)	17.0
Permeabilite Katsayısı	k (cm/sn)	1.1×10^{-8}
Kesme Kutusu Deneyi: Kayma Dayanımı Parametreleri	ϕ (°)	35
	c (kN/m ²)	90
Serbest Basınç Dayanımı	q_u (kN/m ²)	260
Drenajsız Kayma Dayanımı	c_u (kN/m ²)	130
Elastisite Modülü	E_s (kN/m ²)	15000
Konsolidasyon Deneyi	C_c , e_0 , σ'_c (kg/cm ²)	0.2,0.6, 0.9
ZEMİN SINIFI	USCS sınıflandırma sistemine göre	CH

Likit limit değeri, düşen koni yöntemi (TSE 17892-6, 2007) ile belirlenmiştir. Şekil 4'de verilen su içeriği (%) - koni penetrasyonu (mm) grafiğinde, 20 mm penetrasyon değerine karşılık gelen su içeriği, zeminin likit limitini vermektedir. Buna göre, Saipler kilinin likit limit (ωL) değeri, %52 olarak saptanmıştır.



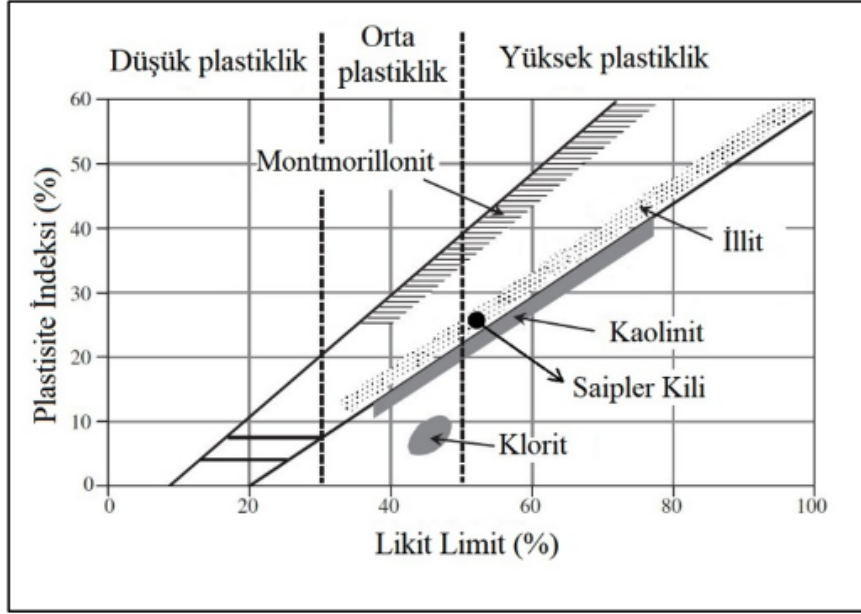
Şekil 3. Saipler kili dane çapı dağılım grafiği (Taşkın, 2011)



Şekil 4. Saipler kili likit limit değerinin düşen koni yöntemi ile belirlenmesi (Taşkın, 2011)

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre, No. 200 (0.076 mm) elekten geçen danelerin oranının %50'den fazla olması durumunda, zemin "ince daneli" olarak nitelendirilir ve grup sembolü belirlenirken plastisite kartı kullanılır. Saipler kil numunesinin dane çapı dağılımı incelendiğinde, zeminin %50'den fazlası No. 200 elekten geçmektedir.

Saipler kiline ait likit limit (%) ve plastisite indeksi (%) değerleri, plastisite kartı (Holtz ve Kovacs, 2002) üzerinde işaretlendiğinde, Saipler kilinin yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girdiği görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Saipler kiline ait ω_L - I_p değer çiftinin plastisite kartındaki konumu.

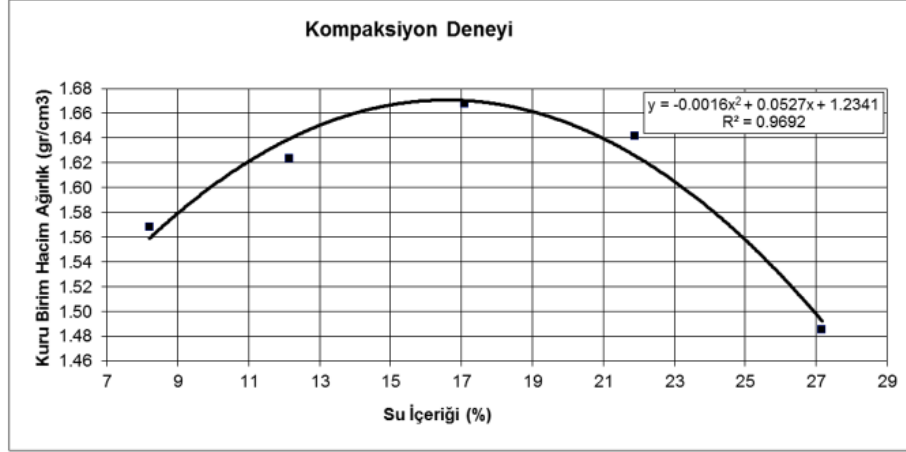
Pratik açıdan %10'dan düşük plastisite indeksi değerleri, ekstrüzyon işlemi sırasında çatlama riskinden dolayı seramik üretimi için uygun değildir. Bu nedenle, üretimde kullanılacak kilin plastisite indeksi %10'un üzerinde olmalıdır ve Saipler kili %26 plastisite indeksi ile, bu değeri karşılamaktadır (Zghal vd., 2012). Saipler kilinin rötre limiti, %17 değerinde saptanmıştır. Rötre limiti değeri, kurutulduğunda minimum hacme ulaştığında zemin suya doymun durumdayken sahip olacağı su içeriğini temsil etmektedir. Saipler kili numunelerinde hacim değişimi olmadan bünyesine su alabilme kapasitesinin yüksekliği, numunenin stabilitesini koruma kapasitesinin yüksek olduğunu ve sabit hacimde boşluklarında yeterli miktarda su tutabildiğini ifade etmektedir.

Saipler kili için, Plastisite indeksinin kil içeriğine (C) oranı olarak hesaplanan aktivite (A) değeri, 0.55 olarak bulunmuştur. Bir zemin, $A < 0.75$ ise aktivitesiz olarak nitelenir (Craig, 2004). Kaolin ve Montmorillonit (bentonit kilinin temel kil minerali) türü kil minerallerinin aktiviteleri sırasıyla 0.38 ve 7.2'dir. Saipler kili de, önemli oranda kaolin minerali içerdiğinden, aktivite değeri düşük olup, kıvam limitleri kaolin türü killerde belirlenen değerlerle uyumludur. Kil içeriğinin artması ile birlikte plastisite de çok yüksek değerlere ulaşabilmekte ve bentonit kilinde %400'lere ulaşan ve hatta bu değeri geçen likit limit değerleri belirlenebilmektedir (Mollins vd., 1996; Sun vd., 2013).

Saipler kili örneği kaolin grubu minerallerden (dane birim hacim ağırlığı $2.61-2.68 \text{ g/cm}^3$) olduğundan, özgül ağırlığı killerin genel aralığına göre ($2.70-2.75$) biraz düşük olarak, 2.63 değerinde belirlenmiştir.

Permeabilite katsayısı, zeminin geçirimliliğinin göstergesidir. Saipler kilinin permeabilite katsayısı, düşen seviyeli permeabilite deneyinden $1.1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ olarak bulunmuştur. Zeminlerin permeabilite katsayısına bağlı olarak sınıflandırılması (Craig, 2004) esas alındığında, Saipler kili geçirimsiz zeminler sınıfına girmektedir.

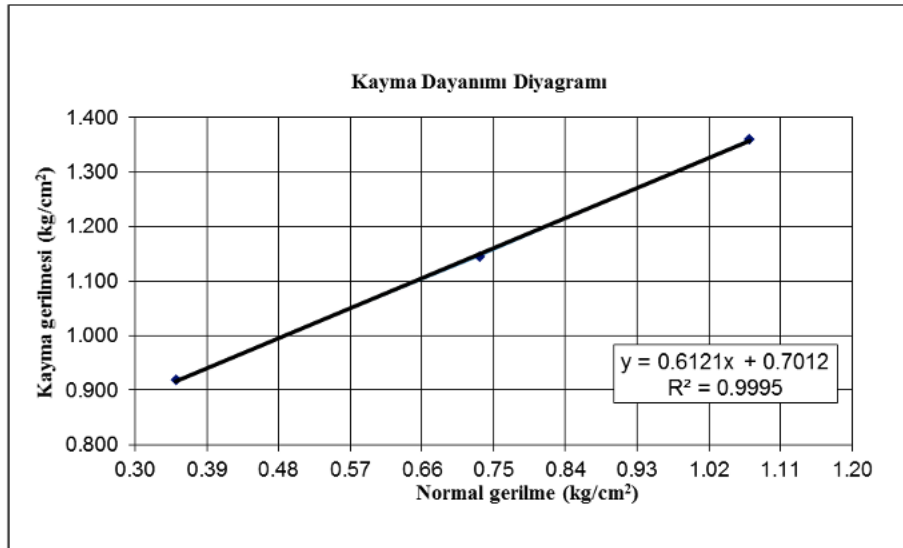
Standard Proctor kompaksiyon deneyi yapılarak, Saipler kilinin kompaksiyon değerleri, maksimum kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{d,max} = 1.67 \text{ t/m}^3$ ve optimum su içeriği, $\omega_{opt} = \%17$ olarak belirlenmiştir. Saipler kili için yapılan kompaksiyon deneyinden elde edilen sıkıştırma diyagramı Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Saipler kili için elde edilen sıkıştırma diyagramı (Taştın, 2011)

Zeminin indeks özelliklerinin belirlenmesi ve sınıflandırılmasının ardından, mühendislik özelliklerinin saptanmasına geçilmiştir. Saipler kilinin kayma dayanımı parametreleri serbest basınç deneyi ve direkt kesme (kesme kutusu) deneyi yapılarak elde edilmiştir. Serbest basınç deneyinde (ASTM D 2166), kil zemin aksenal yük altında kayma göçmesine kadar yüklenmiş, deney sonucunda serbest basınç dayanımı (q_u) değerinin yaklaşık 260 kN/m^2 , drenajsız kayma dayanımının (c_u) ise, 130 kN/m^2 değerinde olduğu saptanmıştır. Deneyden elde edilen sekant elastisite modülü, $E_s = 15000 \text{ kN/m}^2$ değerindedir. Bu değerler, kaolin minerali içeren killerden elde edilen değerlerle uyumludur (Holtz ve Kovacs, 2002). ASTM D 3080 standardına uygun olarak, Saipler kili üzerinde direkt kesme (kesme kutusu) deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyden elde edilen kayma dayanımı diyagramı Şekil 7'de verilmektedir. Deney sonucunda, kayma dayanımı parametreleri olarak, $c \approx 90 \text{ kN/m}^2$, $\phi \approx 35^\circ$ değerleri elde edilmiştir.

Saipler kilinin sıkışma parametrelerini belirlemek üzere konsolidasyon deneyleri, ASTM D 2435'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 2.0 cm yüksekliğinde halka içerisinde hazırlanan zemin örnekleri üzerine; 0.25, 0.50, 1, 2, 4, ve 8 kg/cm^2 efektif gerilmeler 24'er saat uygulanarak yükleme yapılmış, daha sonra efektif gerilmeler kademeli olarak azaltılmış ve boşaltma yapılmış, yeniden yükleme yapılarak sıkışma eğrisinin takibi sağlanmıştır. Konsolidasyon deneyinin değerlendirilmesi sonucunda, sıkışma indeksi, $C_c = 0.2$ değerinde, başlangıç (doğal) boşluk oranı $e_0 = 0.6$ değerinde, önyüklemeye basıncı $\sigma'_c = 0.9 \text{ kg/cm}^2$ değerinde hesaplanmıştır. Zemin, normal konsolide (NC) kil özelliğindedir. Sıkışma indeksi çok yüksek değerde değildir, bunun nedeni Saipler kilinin Torbalı bölgesinden temin edilen karasal kökenli bir kil olmasıdır. Denizel kökenli, kalın alüvyon çökellerinde yer alan organik içerikli killerde (örneğin İzmir Körfezi kıyı zeminlerinde 8.0-15.0 m derinlik aralığında yaygın olarak rastlanan killerde) sıkışma indeksi değerleri 0.45-0.5 değerlerinde, doğal boşluk oranı ise 1.2-1.5 değerlerinde belirlenebilmiştir. Sıkışma parametreleri irdelendiğinde, İzmir Körfezi kıyı zeminleri yüksek oturma potansiyeline sahipken, Saipler kili düşük oturma potansiyeli göstermektedir.



Şekil 7. Saipler kili için kesme kutusu deneyinden elde edilen kayma dayanımı diyagramı (Taşkın, 2011)

3.3. Saipler Kilinin Seramik Özellikleri

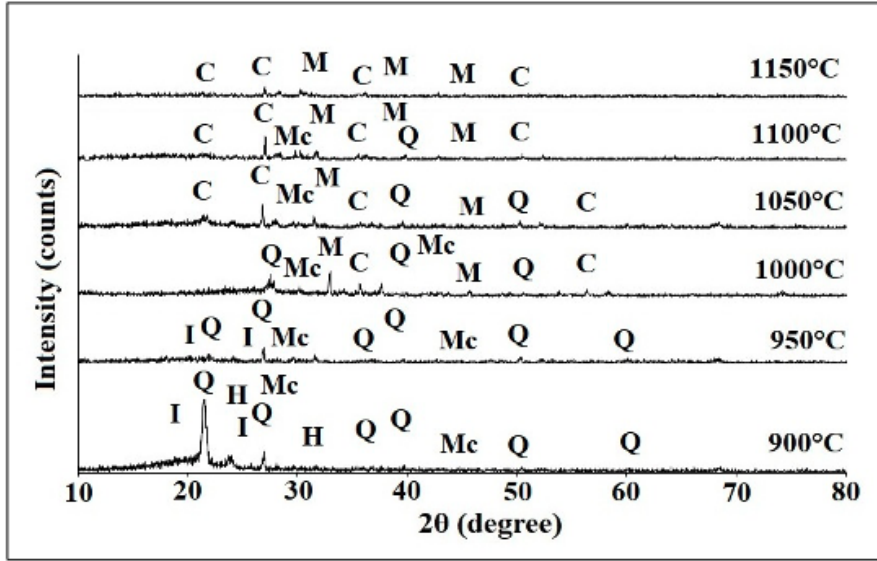
Saipler kilinin seramik özellikleri incelenirken, öncelikle farklı sıcaklıklarda pişirilen kilin fiziksel özelliklerindeki değişim araştırılmıştır. Tablo 3'de, farklı sıcaklıklarda pişirilen kil örneklerinin su emme, lineer büzülme, birim hacim ağırlık ve nisbi gözeneklilik değerleri verilmektedir. Sonuçlar, 900 ila 1100°C arasında çok büyük bir değişiklik olmadığını göstermektedir. Pişirme sıcaklığı arttıkça, açık gözeneklerin içine girerek hacmini azaltan bir sıvı faz oluşumu meydana gelir. Açık gözeneklerin hacmi, su emme değerlerini etkiler. Su emme değeri, numunelerin yoğunluğunun artması ile yakından ilişkilidir (Baccour vd., 2009).

Tablo 3. Farklı sıcaklıklarda pişirilen Saipler kilinin fiziksel özellikleri.

Sıcaklık (°C)	Su emme (%)	Lineer büzülme (%)	Birim hacim ağırlık (t/m³)	Nisbi gözeneklilik (%)
900	20.26	0.20	1.80	35.77
950	20.05	0.23	1.81	35.12
1000	19.48	0.35	1.84	43.06
1050	19.45	0.38	1.86	33.72
1100	18.63	0.45	1.90	32.40
1150	15.48	0.72	1.99	27.43

Kil numunelerinin artan sıcaklık ile yoğunluklarının artma davranışı, kilin içerdiği ergitici oksit içeriğinden (K_2O ve Fe_2O_3) kaynaklanmaktadır. Saipler kili düşük miktarda ergitici alkali oksitlere sahip olmasına rağmen (Tablo 1), yüksek miktardaki demir oksidin yoğunluk artışında anahtar rol oynadığı düşünülmektedir. Bu durum, camı faz oluşumunu destekler niteliktedir (Milheiro vd., 2005). Sonuç olarak, artan sıcaklıkla su emme değerleri azalma, lineer büzülme değerleri artma, birim hacim ağırlık değerleri artma, gözeneklilik değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Bu eğilim, 1100°C'nin üzerinde çok daha belirgin hale gelmektedir.

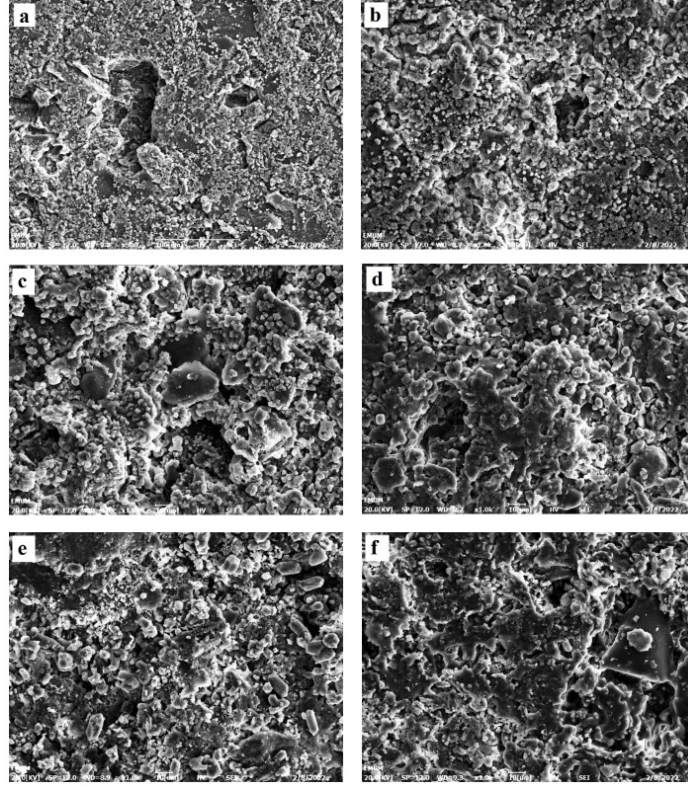
900°C ile 1150°C arasındaki farklı sıcaklıklarda pişirilmiş kil örneklerinin x-ışını kırınım grafikleri Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Farklı sıcaklıklarda pişirilen Saipier kilinin XRD grafiği (Q: kuvars, I: illit, H: hematit, M: müllit, C: kristobalit, Mc: mikroklin)

Killerin pişirilmeleri sırasında bozunma ve faz dönüşüm süreçleri gerçekleşir (Baccour vd., 2009). Saipier kilinde 900°C ve üzerinde kaolin piklerinin olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni, yüksek sıcaklıklarda kaolinitin metakaolene dönüşmesidir. Kuvars, hematit ve illit pikleri halen görülmektedir. 1000°C’de illit piklerinin kaybolduğu ve 1050°C’de kristobalit ve müllit fazlarının gelişmeye başladığı görülmektedir. 1150°C’de ise, sadece kristobalit ve müllit fazları tespit edilmiştir.

Farklı sıcaklıklarda pişirilen kil örneklerinin mikroyapıları Şekil 9 (a-f)’de verilmektedir. Artan pişirme sıcaklıklarında alınan SEM görüntüleri, sıcaklık artışıyla birlikte tipik olarak artan yoğunlaşmayı göstermektedir. 900 ile 1050°C arasında, numune yüzeylerinde benzer boyutta mikroskobik gözeneklerin ve boşlukların mevcut olduğu ve mikroyapısal özelliklerin çok değişmediği görülmektedir. 1050°C’nin üzerinde kil mineral danelerinin birleşmeye başladığı ve gözenekliliğin azalmaya başladığı gözlemlenmiştir. 1100°C’de numune yüzeyindeki gözeneklerin boyutlarının küçüldüğü ve sayıca azaldığı belirlenmiştir, bu durum kil daneleri arasında sinterleşme ile birlikte sıvı faz oluşumunun başlaması ile açıklanabilir. 1150°C’de ise sıvı faz oluşumlarından dolayı yapı çok yoğundur, buna rağmen gözeneklerin küçük boyutta da olsa hala mevcut olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 9. Farklı sıcaklıklarda pişirilen Saipler kili numunelerinin mikro yapıları: (a) 900°C, (b) 950°C, (c) 1000°C, (d) 1050°C, (e) 1100°C, (f) 1150°C.

Pişmiş kil numunelerin renkleri L, a, ve b değerleri ölçülerek karşılaştırılmıştır (Tablo 4). Burada 'L' değeri renk açıklığı ölçeğini ifade etmektedir ve 0 değeri siyah, 100 değeri beyaz rengi belirtir. 'a' değeri kırmızı-yeşil ölçeğini ifade etmektedir. Negatif değerler yeşil, 0 nötr ve pozitif değerler kırmızılığı belirtir. 'b' değeri ise mavi-sarı ölçeğini ifade etmektedir. Burada pozitif değerler sarı, negatif değerler mavi ve 0 ise nötr durumu belirtmektedir. Pişirme sıcaklığı arttıkça numunelerin L değerlerinde artış gözlenmiştir. Kilin yapısında bulunan CaO içeriğinin bu artışa neden olduğu düşünülmektedir. Ancak, 1100°C'nin üzerinde, kilin gözenek boyutlarının küçülmesi, kil daneleri arasında sinterleşme ve sıvı faz oluşumuna bağlı olarak L değerinde bir miktar azalma meydana gelmiştir. Pişme sonrası kırmızı renk oluşumuna neden olan Fe₂O₃ içeriği nedeniyle 'a' değerlerinin pozitif değerde olduğu, 950-1100°C arasında azalma eğilimi gösterdiği, özellikle 1100°C ve üzerinde 'a' değerlerinin 10'un altına indiği görülmektedir. Benzer şekilde, 'b' değerlerinin sarı renk oluşumunu gösteren pozitif değerlerde olduğu, 950-1100°C arasında azalma eğilimi taşıdığı, ancak 1100°C'nin üzerinde önemli miktarda artış gösterdiği saptanmıştır.

Tablo 4. Farklı sıcaklıklarda pişirilen kil numunelerinin renk değerleri.

Sıcaklık (°C)	L	a	b
900	61.72	13.70	23.71
950	61.97	13.89	26.54
1000	63.82	12.88	24.89
1050	64.17	11.79	23.73
1100	67.14	9.58	22.77
1150	63.41	9.72	28.83

L: Siyah-beyaz renk açıklığı ölçeği (0: siyah, 100: beyaz)

a: Kırmızı-yeşil ölçeği (Pozitif değerler kırmızı, negatif değerler yeşil, 0: nötr)

b: Mavi-sarı ölçeği (Pozitif değerler sarı, negatif değerler mavi, 0: nötr)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Torbalı bölgesinden temin edilen Saipler kilinin zemin özellikleri belirlenmiş ve seramik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle, Saipler kilinin kimyasal analizi ve X-ışını kırınımı (XRD) analizi yapılarak kilin bünyesinde baskın olan oksitler belirlenmiştir. Saipler kilinin kimyasal analizinde baskın oksitler SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 'tür. XRD analizi, Saipler kili içerisinde kuvars, kaolin, illit, smektit, dolomit, kalsit, hematit ve ortoklas bulunduğunu göstermiştir. Daha sonra, Saipler kilinin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Saipler kilinin indeks özellikleri; elek analizi, hidrometre analizi, kıvam limitleri, özgül ağırlık ve kompaksiyon deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)'ne göre, Saipler kili yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girmektedir. Saipler kilinin mühendislik özellikleri; direkt kesme (kesme kutusu), serbest basınç ve konsolidasyon deneyleri ile belirlenmiştir. Mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerden, kilin kayma dayanımı ve sıkışma parametreleri elde edilmiştir. Saipler kilinin seramik özellikleri su emme, lineer büzülme, birim hacim ağırlık, nisbi gözeneklilik, X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile değerlendirilmiştir. Kilin fiziksel özelliklerinde 1100°C'ye kadar önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. 1100°C'de birim hacim ağırlık ve lineer büzülmede artış gözlenirken, su emme değerlerinde azalma olmuştur. Kil numunelerinin artan sıcaklıklarda pişirilmesi sonucunda (>1100°C) içerdiği fazlarda dönüşüm meydana gelmiş ve nihai fazlar kristobalit ve müllit olmuştur. Artan pişirme sıcaklıklarında alınan SEM görüntüleri, sıcaklığın artmasıyla gözenekliliğin azaldığını ve birim hacim ağırlığın arttığını göstermiştir.

Bu değerlendirmeler ışığında, Saipler kilinin tuğla ve kiremit üretimi için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın, Saipler kili hakkında deneysel araştırmaya dayalı bilgi birikiminin artmasına ve kil yatağının doğru değerlendirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

Kaynaklar

ASTM D 2166, 2008. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. United States.

ASTM D 2217-85, 1998. Standard Practice for Wet Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. United States.

ASTM D 2435-96, 1996. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils. United States.

ASTM D 3080-04, 2004. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. United States.

ASTM D 422-63, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. United States.

ASTM D 427-04, 2004. Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method. United States.

ASTM D 4318-10, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. United States.

ASTM D 698-07e1 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. United States.

ASTM D 854-02, 2010. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. United States.

Baccour, H., Medhioub, M., Jamoussi, F., Mhiri, T., 2009. Influence of firing temperature on the ceramic properties of Triassic clays from Tunisia. *Journal of Materials Processing Technology*. 209, 2812-2817.

Bakr, I.M., 2011. Densification behavior, phase transformations, microstructure and mechanical properties of fired Egyptian kaolins. *Applied Clay Science*. 52, 333-337.

Carretero, M.I., Dondi, M., Fabbri, B., Raimondo, M., 2002. The influence of shaping and firing technology on ceramic properties of calcareous and non-calcareous illitic-chloritic clays. *Applied Clay Science*, 20, 301-306.

Craig, R.F., 2004. *Craig's Soil Mechanics*. Spon Press, Taylor & Francis Group, 7th Edt. London, England, 447 p.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 2002. *Geoteknik Mühendisliğine Giriş*. Çeviri: Kamil Kayabalı, Gazi Kitabevi, Ankara, 636 s.

Lahcen, D., Hicham, E.E., Latifa, S., Abderrahmane, A., Jamal, B., Mohamed, W., Meriam, E., Nathalie, F., 2014. Characteristics and ceramic properties of clayey materials from Amezmitz region (Western High Atlas, Morocco). *Applied Clay Science*. 102, 139-147.

Milheiro, F.A.C., Freire, M.N., da Silva, A.G.P., Holanda, J., 2005. Densification behaviour of a red firing Brazilian kaolinitic clay. *Ceramics International*. 31(5), 757-763.

Mollins, L.H., Stewart, D.I., Cousens, T.W., 1996. Predicting the properties of bentonite-sand mixtures. *Clay Minerals*. 31, 243-252.

- Murray, H. H. 1999. Applied clay mineralogy: today and tomorrow. *Clay Minerals*, 34, 39-49.
- Ngun, B.K., Mohamad, H., Sulaiman, S.K., Okada K., Ahmad, Z.A., 2011. Some ceramic properties of clays from central Cambodia. *Applied Clay Science*. 53, 33-41.
- Pardo, F., Meseguer, S., Jordán, M.M., Sanfeliu, T., González, I., 2011. Firing transformations of Chilean clays for the manufacture of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science*. 51, 147-150.
- Pialy,P., Nkoumbou,C., Villie' Ras, F., Razafitianamaharavo, A., Barres, O., Pelletier, M., Ollivier,G., Bihannic, I., Njopwouo, D., Yvon J., Bonnet, J. P., 2008. Characterization for industrial applications of clays from Lembo deposit, Mount Bana (Cameroon). *Clay Minerals*, 43, 415-435.
- Sun, D.A., Zhang, J.Y., Zhang, J.R., Zhang, L., 2013. Swelling characteristics of GMZ bentonite and its mixtures with sand. *Applied Clay Science*. 83, 224-230.
- Taşkın, N., 2011. İzmir Yöresine ait dört zemin örneğinin malzeme özellikleri ve katı atık alanlarında bariyer zemin olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, İzmir, Yüksek Lisans Tezi, 164 s (yayınlanmamış).
- TS EN ISO 10545-3, 2000. Ceramic Tiles - Part 3: Determination of Water Absorption, Apparent Porosity, Apparent Relative Density and Bulk Density. Ankara.
- TSE 17892-6, 2007. Geoteknik Etüt ve Deneyler -Zemin Laboratuvar Deneyleri- Düşen Koni Deneyi, Ankara.
- Zghal, H.B., Medhioub, M., Mhiri, T., 2012. Characteristics of Triassic clays and properties of building ceramics. *Journal of Ceramic Processing Research*. 13(3), 202-209.