

T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



UÇUCU KÜL VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU
ESASLI GEOPOLİMER KULLANILARAK
KİLLİ ZEMİNLERİN MEKANİK
ÖZELİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ELNOUR AHMED ABDALLAH HAMED

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Elnour Ahmed Abdallah HAMED tarafından hazırlanan “**Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Kullanılarak Killi Zeminlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması**” adlı tez çalışması 04-07-2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi. Atila DEMİRÖZ

Üye

Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
LEE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Elnour Ahmed Abdallah Hamed
04-07-2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

UÇUCU KÜL VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER KULLANILARAK KİLLİ ZEMİNLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ELNOUR AHMED ABDALLAH HAMED

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

2023, 147 Sayfa

Jüri

Danışman Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN

Son yıllarda hızlı nüfus artışı sebebiyle altyapı ve üstyapı projelerinde gözle görülür bir artış meydana gelmektedir. Killi zeminler, problemlı zeminler olarak bilinir ve zayıf mühendislik özelliklerine sahiptir. Bu sebeple, altyapı ve inşaat sektöründeki büyümeye ayak uydurabilmek adına bu zayıf özelliklerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Günümüzde en yaygın kullanılan zemin stabilizasyon yöntemlerinden biri, çeşitli katkı maddeleri ekleyerek zeminin özelliklerini iyileştirmektir. Zemin iyileştirmesinde kullanılan Portland çimentosu ve kireç olumsuz çevresel etkileri nedeniyle son yıllarda çevre dostu geopolimerlerle yer değiştirmektedir.

Bu tez çalışmasında, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerin, geopolimerizasyon yoluyla yüksek plastisiteli kil zeminlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, Taguchi Yöntemi kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. F sınıfı uçucu kül (%12, %16, %20 ve %24), yüksek fırın cürufu (%8, %10, %12 ve %14) ve Alkali hidroksit çözeltisi NaOH konsantrasyonları (6, 8, 10 ve 12) M değişken olduğu Taguchi L₁₆ ortogonal dizini kullanılmıştır. Optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluk değerlerinde hazırlanan geopolimer zemin numuneleri üzerinde 7 ve 28 günlük kür sürelerinde serbest basınç dayanımı (SBD) ve California taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Ayrıca 28 gün kür süresi sonunda permeabilite deneyleri yapılmıştır. S/N ve varyans analizleri yapılarak değişkenlerin deney sonuçları üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Dayanım deneylerinde molarite, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeriği arttıkça dayanımların arttığı görülmüştür. 7-28 günlük kür sürelerinin sonunda, serbest basınç deneylerinde en düşük dayanım ve en yüksek dayanım değerleri sırasıyla 3.32 MPa - 3.92MPa, 6.34 MPa - 7.96 MPa olarak bulunmuştur. Kür süresi arttıkça dayanım değerlerinde artış meydana gelmiştir. Dayanım üzerinde en etkili parametreler sırasıyla sodyum hidroksit (NaOH), yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeriği olarak belirlenmiştir. Permeabilite deney sonuçlarına göre geopolimer zeminin geçirgenliği ile katkı maddelerinin yüzdesi (UK ve YFC) ve sodyum hidroksit çözeltisi konsantrasyonu arasında ters bir ilişki olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca oluşturulan geopolimer numunelerin mukavemeti arttıkça geçirgenlik azalmıştır. Geopolimer zemin numunelerin mikroyapısal analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve (ESD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM analizlerinde elde edilen görüntüler zeminin dayanımı ile ilişkilendirilmiştir. Bu sonuçlar, geopolimerlerin üretimini teşvik etmede ve bunların çimento yerine çevre dostu zemin stabilizasyonunda kullanımlarını teşvik etmede faydalıdır.

Anahtar Kelimeler: Dayanım, Geçirgenlik, Geopolimer, Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu, Zemin stabilizasyonu,

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CLAYEY SOILS USING FLY ASH AND BLAST FURNACE SLAG BASED GEOPOLYMER

ELNOUR AHMED ABDALLAH HAMED

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
KONYA TECHNICAL UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN CIVIL ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ

2023, 147 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ

Assoc Prof. Ali Sinan SOĞANCI

Asst. Prof. Dr. İbrahim Hakkı ERKAN

In recent years, there has been a noticeable increase in infrastructure and superstructure projects due to rapid population growth. Clayey soils are regarded as problematic soils because of their poor engineering characteristics. Therefore, in order to keep up with the growth of the infrastructure and construction sectors, these weak characteristics must be improved. One of the most widely used soil stabilization methods today is to improve the properties of the soil by adding various additives. Due to the negative environmental effects of Portland cement and lime used in soil improvement, they have been replaced in recent years by environmentally friendly geopolymers.

In this study, the effects of fly ash and blast furnace slag based geopolymer on the mechanical properties of high plasticity clay soils through geopolymerization were investigated. For this purpose, experimental studies were carried out using the Taguchi Method. The Taguchi L_{16} orthogonal array was used with various amounts of class F fly ash (12%, 16%, 20%, and 24%), blast furnace slag (8%, 10%, 12%, and 14%), and alkaline hydroxide solution NaOH molarity (6, 8, 10, and 12). Unconfined compressive strength (UCS) and California bearing ratio (CBR) tests were carried out on geopolymer soil samples prepared at optimum moisture content and maximum dry density after 7 and 28 days of curing. Additionally, permeability tests were performed after 28 days of curing. The effects of the variables on the experimental results were determined using S/N and variance analyses. In the strength tests, it was observed that the strengths increased as the molarity, blast furnace slag and fly ash content increased. At the end of the 7-28 days curing period, the lowest and highest strength values were found as 3.32 MPa - 3.92 MPa, 6.34 MPa - 7.96 MPa, respectively, in the unconfined compressive tests. As the curing time increased, the strength values increased. The most effective parameters on the strength were determined as sodium hydroxide (NaOH), blast furnace slag and fly ash content, respectively. According to the permeability test results, there is an inverse relationship between the permeability of the geopolymer soil and the percentage of additives (fly ash and blast furnace slag) as well as sodium hydroxide solution concentration. Furthermore, as the strength of the created geopolymer samples increased, the permeability decreased.

Microstructural analysis of geopolymer soil samples was carried out using scanning electron microscopy (SEM) and (EDS). These findings are useful in promoting the production of geopolymers and encouraging their use in soil stabilization as an environmentally friendly alternative to cement.

Keywords: Strength, Permeability, Geopolymer, Fly ash, Blast furnace slag, Soil stabilization,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmamda benden yardımlarını esirgemeyen, hayatım boyunca mühendislik çalışmalarını örnek alacağım saygı değer hocam Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Beni yönlendiren, bilgilerini paylaşan, yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Murat OLGUN ve Dr. Öğr. Üyesi İ. Hakkı ERKAN hocalarıma teşekkür ederim. Tez çalışmam içerisinde yer alan laboratuvar deneyleri ve analizlerinde yardım ve katkıda bulunan deneylerimi gerçekleştirebilmek için bana imkân sunan Arş. Gör. Onur SARAN, Öğr. Gör. Alican ŞENKAYA, Arş. Gör. Ekrem Burak TOKA ve Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne desteklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen **AİLEME** teşekkürlerimi sunarım.

Elnour Ahmed Abdallah HAMED
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Kıl	5
2.1.2. Kılın mineral ve yapısı.....	5
2.1.3. Kıl sınıflandırılması	7
2.1.4. Kıl zeminin stabilizasyonu.....	7
2.2. Geopolimer	8
2.2.1 Geopolimerlerin kimyasal yapısı ve geopolimerizasyon.....	10
2.2.2 Geopolimerin özelliklerini etkileyen faktörler	13
2.3. Uçucu Kül	19
2.3.1. Uçucu külün sınıflandırması.....	21
2.3.2. Uçucu külün kullanım alanları.....	23
2.4. Yüksek Fırın Cürufu	24
2.4.1.YFC özellikleri	26
2.5. Alkali Aktivatör	26
2.5.1. NaOH geopolimerde kullanımı.....	27
2.6. Literatür Araştırması.....	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	38
3.1.1. Uçucu kül	38
3.1.2.Yüksek fırın cürufu.....	39
3.1.3. Aktifleştirici malzeme Sodyum Hidroksit (NaOH).....	39
3.1.4. Zemin fiziksel ve endeks özellikleri	41
3.3.4.1. Elek Analizi	42
3.3.4.2. Kıvam limitleri.....	43
3.3.4.3. Standart Proktor deneyi	44
3.3.4.4. Serbest basınç deneyi.....	47
3.3.4.5 CBR deneyi.....	49
3.3.4.6. Permeabilite deneyleri	50
3.4. İstatiksel Deney Tasarım Yöntemi	52
3.4.1. Taguchi deney tasarımı	53
3.4.2. Geopolimer malzemesinin deney tasarım tablosunun oluşturulması	55
3.4.3. Çalışmadaki değişkenler alt ve üst karışım oranları belirlenmesi	55

3.5. SEM-EDS, XRD Analizlerinin Yapılması	56
3.5.1. SEM analizi.....	56
3.5.2. EDS analizi	57
3.5.3. XRD analizi	58
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	60
4.1. Standart Proktor Deneyi.....	60
4.2. Serbest Basınç Deneylerinin Sonuçları.....	60
4.3. CBR Deneylerinin Sonuçları	70
4.4. Permeabilite deneylerin sonuçları.....	76
4.5. SEM, EDS ve XRD ANALİZİ	79
4.5.1. SEM analizi.....	79
4.5.2. EDS analizi sonuçları.....	86
4.5.3. XRD analizi	89
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
5.1. Sonuçlar	92
5.2. Öneriler	95
KAYNAKLAR	97
EKLER	108

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°	Derece
A ₀	İlk en kesit değeri
A _f	Uygulama sonrası en kesit değeri
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
C	Santigrat
CaO	Kalsiyum Oksit
cm	Santimetre
D	Çap
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
G _s	Özgül ağırlık
H ₀	İlk boy
i	Hidrolik eğim
k	Permeabilite katsayısı
kJ	Kilojoule
kN	Kilonewton
kPa	Kilopaskal
L	Boy
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
MgO	Magnezyum Oksit
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
P _{max}	Maksimum yük
Q	Debi
S/N	Sinyal/Gürültü oranı
SiO ₂	Silisyum Dioksit
sn	Saniye
t	Zaman
w	Doğal su muhtevası
γ _k	Kuru birim hacim ağırlık
ΔH	Boy kısalma miktarı
ε	Birim deformasyon
ε (%)	Eksenel Birim deformasyon
ρ _s	Tane yoğunluğu

Kısaltmalar

AA	: Alkali Aktivatör
ANOVA	: Varyans Analizi
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme
C-S-H	: Kalsiyum-Silikat-Hidrat Jeli
D	: Çap
EDS	: Enerji Dağılım Spektroskopisi
FTIR	: Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi
GPC	: Geopolimer Beton
H	: Yükseklik
İDY	: İnce Tane Yüzdesi
KK	: Kızdırma Kaybı
KTUN	: Konya Teknik Üniversitesi
MK	: Metakaolin
MG	: Mekanokimyasal Geopolimer
NaOH	: Sodyum Hidroksit
N-A-S-H	: Sodyum Alüminyum Silikat Hidrat
NPÇ	: Katkısız (Normal) Portland Çimentosu
ÖYFC	: Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
PÇ	: Portland Çimentosu
RF	: Geri Dönüştürülmüş Lif
RGFC	: Güçlendirilmiş Geopolimer Beton
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
SBD	: Serbest Basınç Dayanımı
SD	: Silis Dumanı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UK	: Uçucu Kül
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılması
XRD	: X-Işını Kırınımı
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

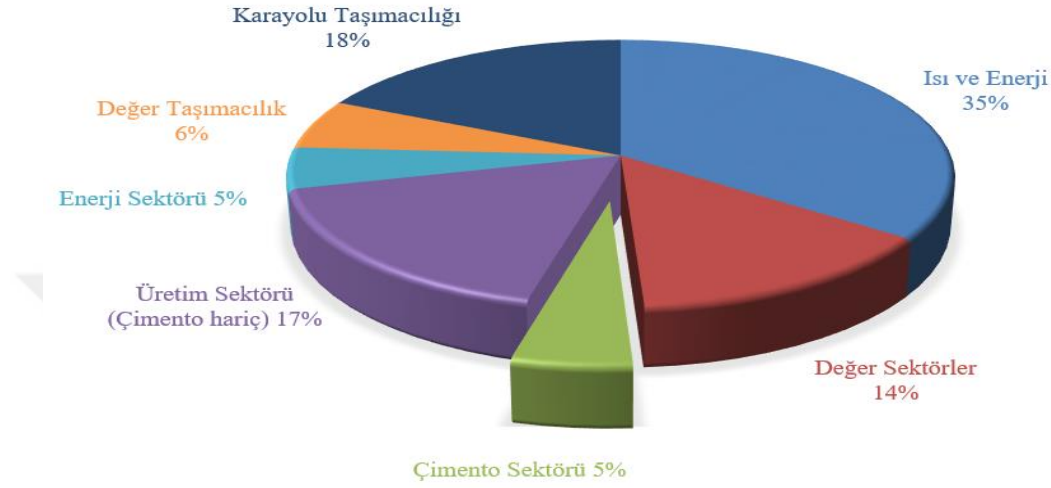
1. GİRİŞ

Son yıllarda hızla artan nüfustan dolayı, inşaat alanlarında taleplerin arttığı açıkça görülmektedir. Bu artış ve istekler doğrultusunda daha güvenli ve ekonomik yapıların oluşturulması hedeflenmektedir. Bundan dolayı inşa edilecek olan baraj, yol, köprü, bina gibi yapıların sağlamlığı, kalitesi, kullanım fonksiyonları önem kazanmaktadır. İnşaat alanlarında zemin özelliklerini iyileştirmek için zemin stabilizasyon yöntemleri kullanılmaktadır, böylece istenilen özelliklere sahip kullanıma uygun zeminler elde edilmektedir. Killi zeminler, nem varlığında iyi performans göstermedikleri için problemlili zeminler olarak kabul edilmektedir. Bu tip zeminlerde, su içeriğindeki küçük bir değişiklik; şişme, büzülme, oturma ve araç trafiği nedeniyle uygulanan tekerlek yükü altında bozulma ile ilişkili kayma mukavemetinde azalmaya neden olabilir. Yüksek plastisiteye sahip ince taneli zeminler, mühendislik özellikleri önemli ölçüde iyileştirilmedikçe inşaat mühendisliği alanlarında kullanım için kabul edilemezdir (Yılmaz, 2015). Zayıf kayma mukavemeti ve yüksek sıkıştırılabilirlik gibi zemin özellikleri bu tür zeminlerin uygun bir stabilizasyon yöntemi ile iyileştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Günümüzde en çok kullanılan zemin stabilizasyon yöntemlerinden biri zemine çeşitli katkı maddeleri ilave ederek zemin özelliklerinin iyileştirilmesidir. Zemine ilave edilen yaygın katkı maddeleri; kireç, çimento, bitüm, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, cam-mermer tozu, metakaolin, pirinç kabuğu külü ve silis dumanı şeklinde sıralanabilir. Katkı maddeleri ile stabilizasyon daha çok yüzey stabilizasyonu veya yol yapımında tercih edilmektedir. Bu katkı maddeleri zemine çeşitli kimyasal reaksiyonlar oluşturduğundan zeminin özellikleri değişmektedir. Bu nedenle bu gibi katkı maddelerinin eklenmesiyle yapılan zemin stabilizasyonu kimyasal stabilizasyon olarak bilinmektedir. Katkı maddeleri tek başına veya farklı kombinasyonlarda karıştırılarak kullanılabilir. Özellikle tek başına bağlama özelliği göstermeyen maddeler kireç, çimento, alkali aktivatör çözeltileri ile birleşerek bağlama özelliği kazandırılabilir (Miraki ve ark., 2021).

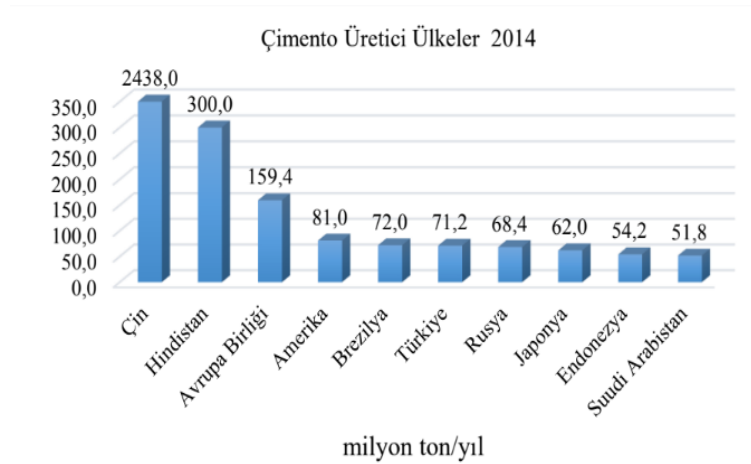
Yıllık çimento üretim hızı hızla artmaktadır. 2015 yılında çimento üreticileri dünya çapında 4.6 milyar ton üretmiştir. 2030 yılında bu miktarın 4.83 milyar tona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu miktardaki üretim çevre sorunlarına neden olmaktadır. Çimentonun ana maddesi olan cüruf üretimi, karbondioksit salınımının en

fazla gerçekleştiği süreçtir. Küresel çimento üretimi, 2016 yılında toplam emisyonlarının yüzde 8'ini oluşturan 2.2 milyar ton karbondioksit emisyonuna neden olmuştur. "Yakma" işlemi sırasında bu miktarın yarısından fazlası açığa çıkmıştır. Küresel ısınmanın %65'inden tek başına CO₂ sorumludur ve çimento endüstrisinin %6'nı oluşturur (Kaya, 2016).



Şekil 1.1. Sektörler göre dünyadaki karbondioksit salınım grafiği (Kaya, 2016).

Davidovits'in geopolimer teknolojisi, Portland çimentosuna alternatif bir bağlayıcı olarak beton endüstrisinde kullanım için büyük bir potansiyele sahiptir. Küresel ısınmayı en aza indirme açısından, geopolimer teknolojisi, çimento endüstrisinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını %80'e kadar azaltma potansiyeline sahiptir (Davidovits, 1994). Çimento üretimi, her bir ton çimento başına yaklaşık 1.5 ton kalker ve kil tüketimi ile sonuçlanarak doğal kaynakların tükenmesini hızlandırmaktadır (Kaya, 2016).



Şekil 1.2. Ülkelere göre dünyadaki karbondioksit salınım grafiği (Kaya, 2016).

Portland çimentosunun çevresel sorunların yanı sıra, su kaybı nedeniyle düşük mekanik mukavemet, erken aşamalarda eksik hidrasyon ve yüksek plastik büzülme gibi geoteknik mühendisliği uygulamaları için özellikle bazı dezavantajları vardır. Bu nedenle, alüminosilikat endüstriyel yan ürünlerinin (uçucu kül, cüruf, cam atıkları vb.) atık malzemelerinin, mümkün olan çevre dostu ve düşük enerjili alternatif bağlayıcılar olarak, alkali ile aktifleştirilmiş yoluyla yararlı geri dönüşümü/yönlendirilmesine önem verilmiştir.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, yüksek oranda plastik killi zeminlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (Y.F.C) atığı esaslı geopolimerin kullanımının araştırılmasıdır. Tez çalışması, farklı oranlarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu atıklarının zeminle karıştırılarak hazırlanan geopolimer zemin numunelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışma sırasında ulaşılan temel amaçlar şu şekilde sıralanabilir:

- UK ve YFC esaslı geopolimer kullanarak killi zeminin mekanik ve dayanım özelliklerinin değerlendirilmesi,
- UK ve YFC oranlarının değiştirilmesinin oluşan geopolimerin özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek,
- Alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit çözeltisinin molaritesinin değiştirilmesinin geopolimer zemin üzerindeki etkisini incelemek.

Bu tez araştırması beş bölümden oluşmaktadır:

1. Çalışmasının amacı ve kapsamı hakkında bilgiler verilmiştir.
2. Kil ve kilin yapısı, yüksek fırın cürufu ve F tipi uçucu külün özellikleri ve sınıflandırması ile birlikte geopolimerlerin kimyasal yapısı, geopolimerizasyon süreci ve geopolimerlerde etkileyen faktörler ele alınmıştır. Ayrıca literatürdeki uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve geopolimerlerle ilgili önceki çalışmaların incelenmesine yer verilmiştir.
3. Deneysel çalışmada kullanılan zemin ve geopolimer zemin karışımlarında kullanılan malzemeler hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Bu bölümün devamında gerçekleştirilen deneyler, SEM-EDS ve XRD analizleri verilmiştir. Bununla birlikte, deneysel sonuçların analizinde kullanılan Taguchi yöntemi de detaylı bir şekilde ele alınarak anlatılmıştır.

4. Dördüncü bölümde laboratuvar deney sonuçları, SEM ve XRD analizleri yorumlanmıştır.
5. Beşinci bölümde deney sonuçları ve öneriler maddeler halinde verilmiştir.



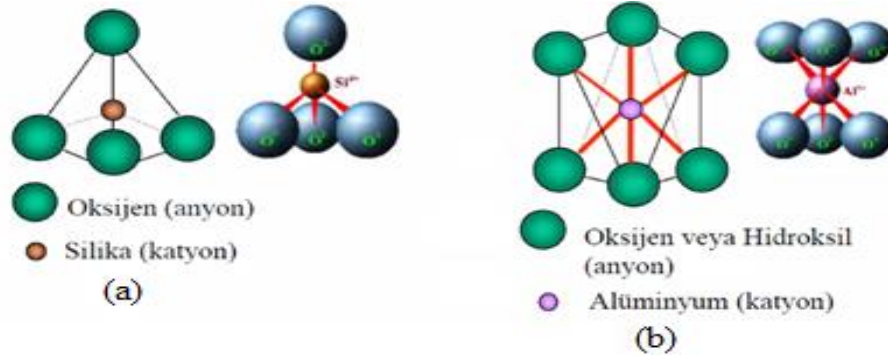
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kil

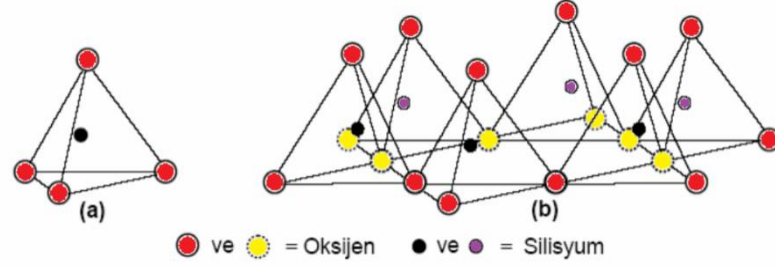
Kil, esas olarak farklı bileşenlerle birleştirilmiş hidratlı alüminyum silikattan oluşan, nano parçacık boyutunda çok ince taneli bir zemindir. Büyük boyutları 2 mm'den küçük olan küçük boyutlu fillosilikatlar, tane boyutu genellikle 0,002 mm'den küçük olan parçacıklar içeren yumuşak ve kırılğan bir malzemedir. Kuruyunca büzülen, ıslandığında şişen ve sıkıştırıldığında suyu boşaltan plastik kohezyonlu bir zemindir. Kil, mineraloglar tarafından Si, O, OH, H₂O bazlı sulu fillosilikatlar olan ve Al, Mg, Fe, K, Ca ve Mg gibi elementlerin katılabileceği ince taneli bir agregasyon veya mineral kombinasyonu olarak tanımlanmaktadır (Murali ve ark., 2018). Killi zeminler Türkiye ve dünyanın birçok yerinde bulunmaktadır. Nem içeriğindeki değişikliklere tepki verme eğilimleri nedeniyle killi zeminler, üzerlerinde inşa edilen yapılara zarar verebilmektedir. Kil hacmindeki değişiklikten kaynaklanan alttan kaldırma basıncı, temelin çökmesine ve yapıların üst elemanlarının hasar görmesine neden olmaktadır. Kilin büzülmesi ve şişmesi, beton temel üzerinde tekrarlanan gerilime yol açmaktadır. Kilin hacim değişiklikleri, beton temellere ve döşemelere ve bunların üzerindeki odalara önemli ölçüde zarar verebilmektedir. Bu nedenle, herhangi bir inşaat faaliyeti gerçekleştirilmeden önce killi zeminin özelliklerinin belirlenmesi önemlidir.

2.1.2. Kilin mineral ve yapısı

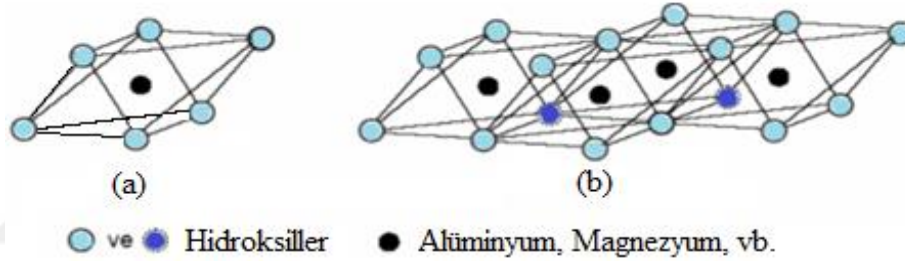
Kil mineralleri, Son derece küçük boyutları ve parçacıklarının pul pul görünümü nedeniyle sadece elektronik mikroskop kullanılarak görülebilirler. Pauling 1930 yılında X-ışınları kırınımını kullanarak belirlenmiştir. Kilin yapısı tetrahedron ve oktahedron olmak üzere iki ayrı yapı taşından oluşmaktadır (Şekil 2.1) (Brindley ve Brown 1980). Tetrahedronlar, merkezde silikon atomu ve köşelerde dört oksijen atomu bulunan atom gruplarından oluşur (Şekil 2.2). Oktahedronların merkezinde 1 adet alüminyum atomu ve köşelerinde 6 adet oksijen atomu/hidroksil bulunmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.1 a. Tetrahedron yapıtaşı, b. Oktahedron yapıtaşı (Brindley ve Brown 1980)

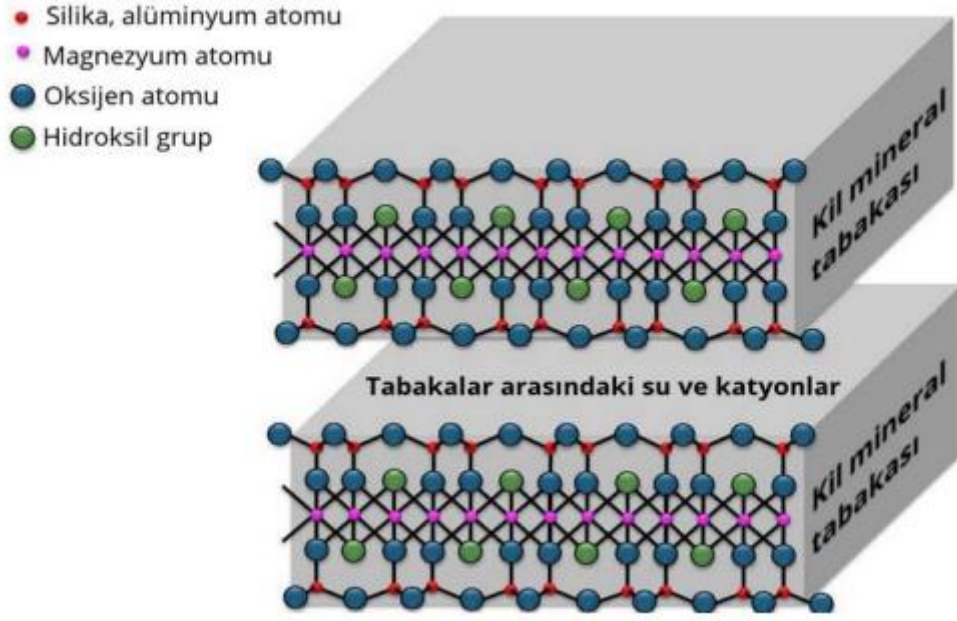


Şekil 2.2. a. Tetrahedron yapıtaşı, b. Tetrahedronların heksagonal yapısı (Grim 1968)



Şekil 2.3. a. Oktahedron yapıtaşı b. Oktahedron tabakası (Grim 1968)

Yapılarında tetrahedron ve oktahedron tabaka bulunmasına göre sınıflandırılan farklı kil mineralleri bulunmaktadır. Kaolinit (1:1 tetrahedral ve oktahedral tabakalar), smektit grubu kil mineralleri (2:1 tetrahedron ve oktahedron tabakalar) ve klorit (2:1:1 tetrahedron, oktahedron ve oktahedron tabakalar). Küçük boyutları ve ayırt edici kristal yapıları, yüksek kation değişim kapasitesi, şişme davranışı, özgül yüzey alanı, adsorpsiyon yeteneği gibi benzersiz özellikleriyle kil minerallerini çok özel kılmaktadır. Kil mineralleri, ayırt edici özelliklerinden dolayı çeşitli endüstrilerde ilgi görmektedir. Kil mineralleri katmanlardan oluşmaktadır. Bu katmanlar arasında su ve kasyonlar (pozitif yüklü iyonlar) stoklanabilir. Şekil (2.4) kil minerallerinin katmanları oluşturan en küçük birimlerin atomik yapısını ve katmanlar arası alanını şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.4 Kil mineralinin yapısı (Salihoğlu, 2019)

2.1.3. Kil sınıflandırılması

Kil minerallerinin karmaşık bir mineral diziliminde olmaları, bileşimlerinde yabancı maddelerin bulunması, oluştukları yerlere göre killeri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir (Malayoğlu ve Akar 1995).

Çizelge 2.1. Kil sınıflandırma

Sınıflandırma	Kil sınıfı
Mineralojik karakteristiklerine	Kaolinit, Simektit, Mika Klorit, İllit, Atapulgit
Yapılarına göre	Amorf ve Kristal
Kimyasal kompozisyon	Alüminyum içerikli Boksit ve Demir içerikli Silikat, Kalsit ve Karbonat içerikli
Fiziksel	Renk ve Refrakter özelliği Plastik özelliği, Partikül boyutu
Kullanım alanlarına göre	Kaolinler, Bağlama, Halloysit, Şamot

2.1.4. Kil zeminin stabilizasyonu

Killi zeminler, mühendislik binalarında hasara yol açabilecek potansiyel bir doğal tehlike olarak görülmektedir. Kil zeminler üzerine inşa edilen yapılarda kil zeminin istenmeyen özellikleri sebebiyle ciddi hasarlar almıştır. Bu gibi durumlarda, zemin mukavemetini artırmak, geçirgenliğini azaltmak ve geoteknik özellikler özelliklerini iyileştirmek için yöntem veya yöntemler grubu benimsenmektedir (Demiröz ve Karaduman, 2009).

Zemin stabilizasyonunda en popüler ve yaygın yöntem, öncelikle gevşek zemini kaldırmaktır. Zayıf zeminin kaldırılmasının maliyeti nispeten yüksek olduğundan dolayı, birçok araştırmacı tarafından bu sorunu çözmek için alternatif yöntem olarak geopolimerler bulunmuştur (Bahadori ve ark., 2019). Bir veya daha fazla zemin özelliğinin mekanik ve kimyasal stabilizasyonla iyileştirilmesi, zemin stabilizasyonu olarak adlandırılmıştır. Çoğu araştırmacı tarafından, zemin mühendislik özelliklerini ASTM D 4609 standardına göre basınç dayanımının 0.8 MPa'dan büyük olacak şekilde artırarak iyileştirme çalışmaları yapılmıştır (Geliga ve ark., 2010). Basınç dayanımını, şişme potansiyelini ve hacim değiştirme özelliklerini iyileştirmek için YFC ve UK gibi kimyasal stabilizasyon işlemleri veya bu malzemelerin karışımları kullanılmaktadır (Miraki ve ark., 2021), (Neeladharan, 2019). Kimyasal katkı maddeleri kullanarak zeminlerin stabilizasyonu, yol yapımı ve temel alt yapı gibi mühendislik alanlarında bu tekniğin faydalılığını ortaya koymaktadır.

Çimento ve kireç gibi geleneksel zemin stabilizasyon malzemelerinin üretimi, önemli miktarda CO₂ ve enerji salınımına neden olmaktadır. Bu nedenle, inşaat mühendisliği firmaları, zemin stabilizasyon malzemesi olarak çimento yerine kullanılabilecek düşük karbon salınımına sahip, sürdürülebilir bir madde arayışı içindedir (Murmu ve Patel, 2020). Geopolimer, bozulmuş zeminleri güçlendirmek için Portland çimentosuna alternatif olarak kullanılabilecek bir seçenek olduğu gösterilmiştir. Geopolimerler, artan dayanıklılık ve geliştirilmiş zemin yapışması gibi olağanüstü mühendislik özelliklerine sahiptir (Amulya ve ark., 2020). Geopolimerler, yeşil çimento olarak da bilinen, katı atık, doğal mineraller, sentetik bileşikler ve silis ve alüminyumca zengin diğer malzemelerin aktivasyon reaksiyonuyla oluşan çimento benzeri çevre dostu malzemelerdir (Luhar ve ark., 2021).

2.2. Geopolimer

"Geopolimer" terimi, her ikisi de yer kabuğunda yüksek oranda bulunan Al ve Si içeriğine atıfta bulunarak Yunanca "zemin" anlamına gelen "geo" ön ekinin bir bileşimidir. "Polymer" referansı, çeşitli Al ve Si monomerlerinden oluşan yapısına karşılık gelmektedir (Davidovits, 2008). Davidovits'e göre, geopolimerler, polimer olarak sayılır çünkü düşük sıcaklıkta dönüşürler, polimerleşirler ve sertleşirler. Bununla birlikte, geopolimerler aynı zamanda inorganik malzemelerdir, inorganik oldukları için yüksek sıcaklıkta sert, kararlı ve ayrıca yanmaz bir malzemedir (Torgal ve ark., 2008).

Geopolimer, bir alüminosilikat kaynağı ile bir alkalın reaktif arasındaki polimerizasyon reaksiyonu yoluyla oluşan yarı kristalli amorf bir malzemedir.

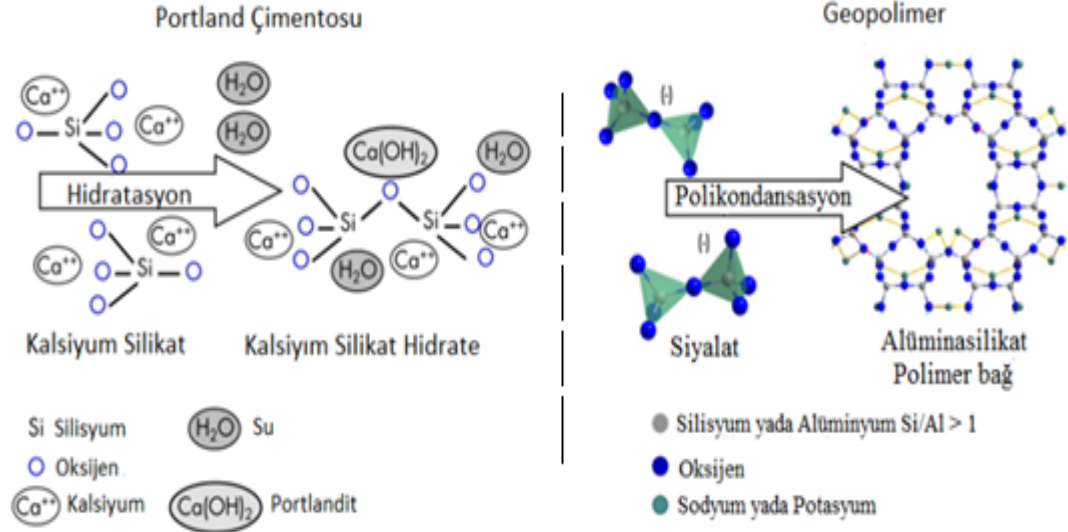
Polimerizasyon işlemi, ısı uygulamasıyla indüklenebilir ve/veya katalize edilebilir (Castillo ve ark., 2021). Alümino silikatlar, doğal veya ısı işlem sonucunda amorf yapıya sahip malzemelerdir (Gök, 2020). Hem doğal hem de yan ürün formlarındaki geopolimer öncü malzemelerinin alümina (Al_2O_3) ve silis (SiO_2) açısından zengin olması gerekir çünkü bu bileşiklerde bulunan elementler, geopolimerlerin sertleşmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü birlikte diğer elementlerle malzemenin karakteristik mukavemetini sağlamaktan sorumlu olan N-A-S-H jelini oluşturur (Castillo ve ark., 2021).

Davidovits geopolimeri 1978'de ilk olarak açıklamış ve sınıflandırmıştır. Birçok çalışmaların 1978 yılından sonra yapılmıştır. Davidovits'in geopolimer ismini uygun görmesinin en önemli nedeni ise geopolimer oluşumu sırasında meydana gelen reaksiyonun termoset polimerlerin kondanzasyonu yani polikondenzasyon reaksiyonuna yüksek benzerlik göstermesidir (Torgal ve ark., 2008).

Geopolimer doğal kayaç yapısı benzeri özellik göstermektedir. İçerik olarak Al_2O_3 ve SiO_2 bileşiklerini içinde bulunduran doğal mineraller kullanılmasıyla, alkali bir ortam oluşturulmaktadır. Böylelikle kayaç benzeri yapısal malzemeler üretilmiştir. GP üretimi için, temelde amorf kil ve benzeri malzemelerin kullanılmasıyla alüminosilikat içerikli bileşiklerin yüksek alkali ortamda sentezlenmesine dayalı bir sistem kullanılmaktadır (Bakırdöven, 2021)

Davidovits ise, geopolimeri üç boyutlu alümina-silikat temelli bir bağlayıcı olarak da tanımlamıştır. Geopolimerler katı formdaki alümina-silikat ile yüksek konsantrasyondaki sıvı alkali hidroksit veya silikat çözeltisinin birlikte reaksiyonu sonucu oluşmaktadır, aynı tip geopolimer malzemeler için farklı farklı isimler kullanmışlardır (Xu ve Deventer, 2000).

Davidovits, Portland çimentosunu alkali ile aktifleştirilmiş kalsiyum silikatlar olarak adlandırmıştır (Davidovits, 1994). Ca içeriği yüksek hammaddelerle üretilen alkali aktifleştirilmiş alüminosilikat malzemeler (C-A-S-H) jeli oluşmakta ve bu yapı, çimento hidratasyon ürünü tobermorit C-S-H jeline benzemektedir. Fakat Portland çimentosu hidratasyon ürününden daha düşük bir CaO/SiO_2 oranına sahiptir.



Şekil 2.5. Portland çimentosunun hidratasyon ve geopolimerlerin polikondansasyon aşamaları (Geopolymer Institute, 2014)

Geopolimerler, düşük Ca içeriğine sahip hammaddeler kullanılarak sentezlenir (Gök, 2020). Doğada bulunan ve atık olarak oluşan birçok alüminosilikat malzeme mevcuttur (Abdullah ve ark., 2019). Çevreye olumsuz etkileri nedeniyle inşaat sektöründe bu malzemelerin bağlayıcı olarak kullanımı önem kazanmaktadır.

2.2.1 Geopolimerlerin kimyasal yapısı ve geopolimerizasyon

Geopolimer iki ana bileşeni kuru tozlar (UK, YFC gib) ve alkali aktivatörlerdir. Bu malzemeler uygun oranlarda karıştırılmalıdır. Kullanılacak temel hammaddenin mineral bileşimi ve incelik modülü, geopolimer ürünlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir. Poli(siyalat), silikon-alüminatlar esaslı geopolimerler için kimyasal bir tanım olarak önerilmiştir. İstenilen kombinasyon elde edildikten sonra oda sıcaklığında başlayan geopolimer reaksiyonu, polimerizasyon işlemine devam etmek için bir fırın veya buhar odasında 40-100 °C'ye kadar ısıtılabilir. Böyle bir durumlarda üretilmek istenilen geopolimer malzemenin özellikleri de iyileştirilmiş olmaktadır.

Sürdürülebilir altyapı çabası arttıkça, geopolimerler ilgi odağı haline geldi. 1970'lerin başında, bir Fransız malzeme bilimcisi olan Davidovits, geopolimeri inorganik bir alüminosilikat malzeme olarak geliştirdi ve çimentoya alternatif olarak projelendirildi. Geopolimer oluşumu, tüm oksijen atomlarını paylaşarak dönüşümlü olarak bağlanan tetrahedral silika (SiO₄) ve alüminanın (AlO₄) polikondensasyonu yoluyla gerçekleşir (Davidovits, 1994, Zhang ve ark., 2013). Zhang ve arkadaşlarına

göre (Zhang ve ark., 2013) geopolimerin kimyasal yapısı genel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$M_n \{-(SiO_2)_z - AlO_n -\} n, \quad (2.1)$$

Burada

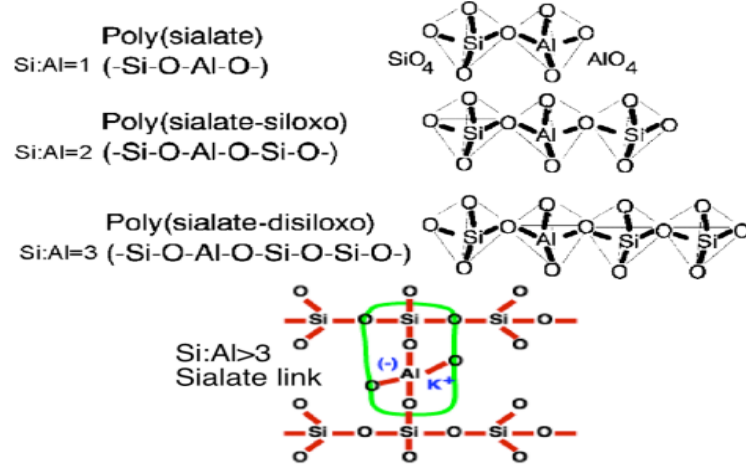
M: Al için negatif yükü dengeleyen potasyum (K^+) veya sodyum (Na^+) gibi bir alkali katyondur.

n: polikondensasyon derecesi veya polimerizasyon derecesi

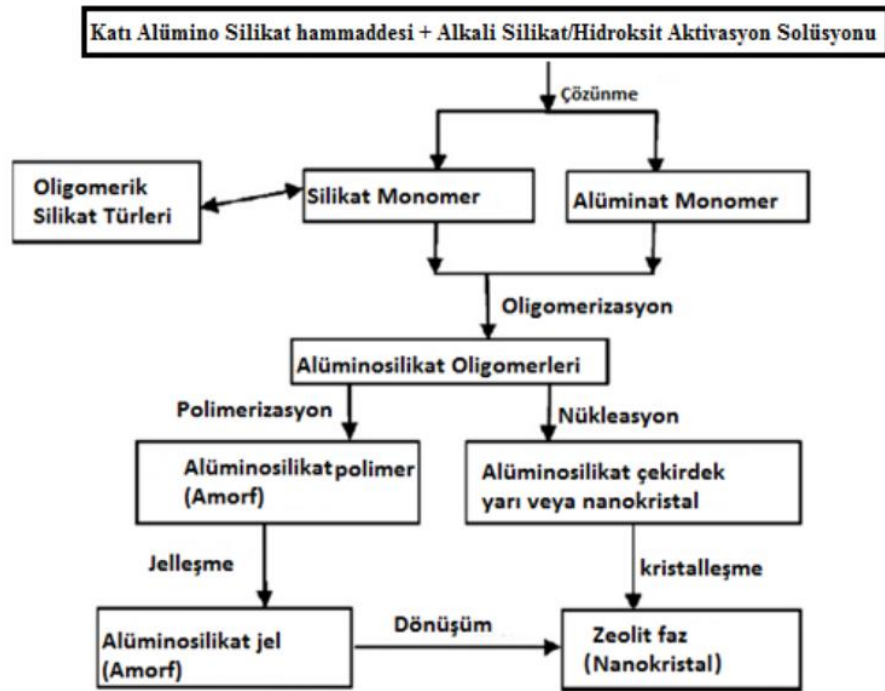
z: 1 ila 15 arasında değişen Si/Al molar oranıdır, ve 300'e kadar çıkabilir (Disu ve Kolay, 2021).

Denklem 2.1'deki z değerine bağlı olarak geopolimerler birkaç temel sistemden birini alabilir (Davidovits, 2008). $z > 3$, doğrusal bağlı iki boyutlu bir ağıncı kauçuksu bir geopolimerini üretir ve $z < 3$, zemin stabilizasyonu için uygun, çapraz bağlı üç boyutlu bir ağıncı kırılğan, çimentolu bir ürününü üretir.

Geopolimerler, değişen Si/Al molar oranları ile farklı fizikokimyasal özellikler sergiler (MacKenzie ve ark., 2006) Si/Al=1 ise tuğla-seramik ve yangından korunma ürünleri elde edilir. Si/Al=2 olduğunda geopolimer çimento ve beton sentezlenmekte ve biraz daha gelişmiş bir teknoloji ile radyoaktif atıkların istiflenmesi için gerekli yapıları oluşturmak mümkündür. Si/Al=3 olduğunda akışkan polimerik karakter bir miktar iyileşir ve fırın kaplamaları, cam elyafı yangın koruma kaplamaları ve ileri teknolojiler için 1000 °C 'ye dayanabilen malzemeler üretilebilmektedir. Si/Al<3 ise sert ve kırılğan özelliklere sahip üç boyutlu ve çapraz bağlı ağlarla sonuçlanır ve dolayısıyla çimentolu ve seramik malzemeler olarak kullanılabilir. Si/Al> 3'ü geçtiğinde dolgu malzemesi olarak kullanılabilen köpükler üretilebilir, yapışkan ve kauçuksu özelliklere sahip iki boyutlu ve doğrusal olarak bağlı ağlarla sonuçlanır. Si/Al>15 iken 2 boyutlu moleküler ağ yapısında geopolimer macun oluşmaktadır. Bu geopolimer yapı, güçlü ateşe ve ısıya dayanıklı nanokompozit malzemelerin üretiminde için kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da geopolimerin zincir yapısı gösterilmiştir.



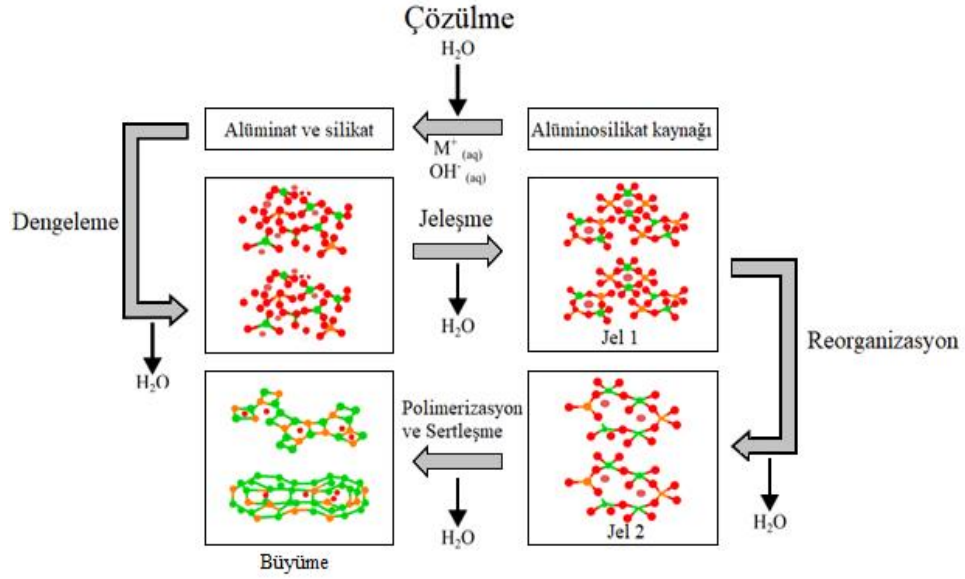
Şekil 2.6. Farklı Si/Al mol zincir yapısı (Davidovits, 2008)



Şekil 2.7. Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları (Torgal ve ark., 2008)

Geopolimerizasyon süreci (Şekil 2.8) ifade edilmektedir.

1. Reaktif alüminat ve silikat monomerleri serbest bırakmak için ham maddeler, NaOH ve KOH gibi alkali çözeltilerde çözülmemektedir.
2. Alümino silikat oligomerler, geopolimer jeller oluşturmak için alkali ortamda polimerize olmaktadır.
3. $\text{Si}^{(4+)}$ ve $\text{Al}^{(3+)}$ arasındaki yük farkı nedeniyle, iyonik dengeye ulaşmak için Al için daha fazla yüke ihtiyaç vardır (Al varlığını dengelemek için Na^+ veya K^+ katyonlarına ihtiyaç vardır).
4. Hammaddelerin çözünmesi sırasında su tüketilir ve polimerizasyon işlemlerinde salınır.



Şekil 2.8. Geopolimerizasyon işlemi (Abdila ve ark., 2022)

2.2.2 Geopolimerin özelliklerini etkileyen faktörler

Geopolimerlerin özelliklerini etkileyen ana faktörler hakkında birçok görüş vardır. Geopolimerlerin özelliklerini etkileyen faktörler konusunda yapılan araştırmalar gözden geçirilmiştir. Geopolimerin iyi bir tasarım ve formülasyon karışımı elde edilmesine katkıda bulunan birkaç önemli faktör bulunmaktadır. Bu faktörler arasında kür sıcaklığı, kür süresi, alkali konsantrasyonu, pH, katı-sıvı oranı, silikat ve alüminyum oranı, alüminyum kaynağı ve kalsinasyon gibi etkenler yer almaktadır. Bu faktörler geopolimerin özelliklerini etkileyerek istenilen performansı sağlamaktadır (Aziz ve ark., 2017; Zaliha ve ark., 2015).

Kür sıcaklığı: Puzolanik reaksiyonlar, sıcaklık artışıyla hızlanmaktadır. Uçucu külün reaksiyon hızı, ortam sıcaklığıyla doğrudan ilişkilidir. Normal ortam sıcaklığında, reaksiyon hızı oldukça düşüktür ve zaman alıcı bir süreç gerektirir. Bunun nedeni, uçucu külün hidratasyon reaksiyonlarının yavaş gerçekleşmesidir (Puertas ve ark., 2000).

Brooks, (2002), Tip I çimento ve uçucu küllü beton için, puzolanik reaksiyonların sıcaklığın 6 °C'den 80°C'ye yükseltilmesi durumunda priz süresinin 6 kat azaldığı bildirmiştir. Kür sıcaklığının (30 °C ile 90 °C aralığında) artmasıyla basınç dayanımı arttırmıştır (Brooks, 2002).

Kirschner ve Harmuth (2004), ortam sıcaklığında işlemenin, sertleşmenin gecikmesine neden olduğu açıklanmıştır. Ancak, ısı işlem kullanılarak bu sorunun önüne geçilebileceğini ve 75°C'de 4 saatlik bir kür işlemi sonunda geopolimerizasyon sürecinin büyük bir kısmını tamamladığı bildirmişlerdir. Bu nedenle, ikinci bir işlem gerekmeksizin bu kürleme işlemi yeterli olmaktadır.

Jaarsveld ve ark., (2002), yüksek sıcaklıkta (30°C ile 90°C aralığında) kürleme işleminin etkili olduğu ve geopolimerik reaksiyonlara daha önemli katkı sağladığı sonucuna varılabilir. Yüksek sıcaklıkta uzun süreli kürleme, geopolimer karışımının granüler yapısını bozduğundan, daha uzun süre yüksek sıcaklıkta kürlemede basınç dayanımı azalır. Bu, daha yarı kristal bir forma dönüşmeden jelin büzülmesinden dolayı dehidrasyon ve aşırı büzülme ile sonuçlanır. Geopolimerin kristal kısmı daha uzun kür süresinden etkilenmez.

Yeni bir inorganik geopolimer beton (GPC) gelecek vaat eden bir yapı malzemesi olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda yangına karşı direncinin anlaşılması, uzun süreli dayanıklılığını sağlamak için gerekli kabul edilmektedir.

Amran ve ark., (2022) çalışmada, geri dönüştürülmüş liflerle (RF) üretilmiş geopolimerin yangına karşı olan dayanımı araştırılmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra ve yangınlar sırasında GPC'deki çatlama, parçalanma, kırılma ve mukavemet kaybı derecesinin fiziksel incelemeleri, bu tür koşullara karşı dayanıklılıklarının bir göstergesidir. GPC'ye geri dönüştürülmüş liflerin (RF'ler) eklenmesi, bu sınırlamaların üstesinden gelmek ve betonun mikro yapısının bozulmasını önlemek için bir strateji olarak bildirilmiştir. Bu nedenle, yangına direnmek için RF ile güçlendirilmiş GPC'nin (RF-RGPC) geliştirilmesi araştırma zorunluluğu haline geldi. Endüstriyel atıklardan elde edilen RF'lerin kullanımı, atık azaltma, kaynak koruma, işlenmemiş liflere kıyasla düşük işleme maliyetleri ve atık depolama alanlarında atık bertarafının ortadan kaldırılması gibi ek faydalar sağlar. Dahası, RF-RGPC, yapısal güvenilirliğini artıran RF'ler içeren reaktif alüminosilikat malzemelerin alkali aktivasyonu yoluyla yapılan inorganik bir polimer bağlayıcıdır. Bu bağlamda, yüksek sıcaklıklara maruz kalan ve yangınlar sırasında RF-RGPC'nin yangın performansı ile ilgili güncel güncellemelerin eleştirel bir literatür taramasının yapılması acilen gereklidir. Bu çalışma, RF'lerin tipi, parçalanma mekanizması, fiziksel muayene ve RF-RGPC'lerin özellikleri hakkında kritik incelemeler sunmaktadır. YFC ile hazırlanan

geopolimerlerin yangın dayanımının %100 Portland çimentosuna göre hazırlanan numunelerin iyi yangın dayanımına sahip olduğunu ve cüruf içerisindeki K_2O arttıkça dayanımın arttığı belirtilmiştir. $800^{\circ}C$ - $1000^{\circ}C$ arasında Portland çimentosu numunesinde parçalanma, geri dönüştürülmüş lif katkılı geopolimerlerde parçalanmanın olmadığı görülmüştür. Ayrıca, yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra yangının RF-RGPC'nin özellikleri üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde gösterdi. Bu çalışmanın ana bulgularının, bu benzersiz, son teknoloji ürünü, erişilebilir ve çevre dostu RF-RGPC'yi umut verici,

Yüksek sıcaklık etkisinde metakaolin esaslı geopolimerler gözeneksiz yapısı sayesinde kararlı davranış göstermektedirler (Aygörmez, 2018). Sıcaklık artışı gözenek yapısının büyümesine, eğilme dayanımını düşmektedir. Yüksek sıcaklık geopolimerin mikro yapısında çatlaklar oluşturduğu için basınç dayanımı da azalmaktadır.

Geopolimerler yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldığında, yüksek sıcaklıkların etkisinin ($680^{\circ}C$ 'ye kadar) geopolimerlerin sıcak mukavemetini (sıcak durumda test edilmiştir) arttırdığı bulunmuştur (Pan ve Sanjayan, 2012).

Uçucu kül ve cüruf arasındaki endotermik reaksiyonu aktive etmesinin ihtiyacı nedeniyle sıcaklığın geopolimerizasyon sürecinde önemli bir rol oynamaktadır, bu nedenle işleme sıcaklığının çok önemli olduğunu açıklanmıştır (Jiang ve Roy, 1992).

Kürleme sıcaklığı başarılı olduğu zaman ve UK ve YFC esaslı geopolimer betonun tepkisini hızlandırdığını ve mekanik mukavemetin gelişimi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişler. Ayrıca, kür süresi için $70^{\circ}C$ 'lik sıcaklığın, basınç dayanımı ve çekme dayanımında artışa yol açan optimum sıcaklık olduğunu bulmuştur (Palomo ve ark., 1999).

Kür süresi: Kür süresi, geopolimerin içerdiği alkali çözeltinin reaksiyona girmesi ve polimerizasyonun gerçekleşmesi için yeterli zamanın sağlanması açısından önemlidir. İstenilen dayanıklılığa ulaşmak için yeterli kür süresi sağlanmalıdır. $65^{\circ}C$ 'de kürleme yapıldığında bir günlük basınç dayanımının daha yüksek olduğu ve geri kalan yaşta $25^{\circ}C$ 'de kürlenmiş pastanın $65^{\circ}C$ 'de işlem gören macunlardan daha yüksek basınç dayanımı geliştirdiği gözlenmiştir (Puertas ve ark, 2000).

Geopolimerler Portland çimentosuna göre daha hızlı kürlenmektedir. (Tok, 2021). Dayanımlarının %92-96'sını 3 ila 7 gün içerisinde kazandıkları ve bundan sonra mukavemet kazancının çok yavaş/ihtimal edilebilir olduğu belirtilmiştir (Rehman ve ark., 2020; Joseph ve Mathew, 2012).

Pan ve ark., 2018, kür sıcaklığının 600°C'de uçucu külün çözünmesi reaksiyonunda sonuçların en iyi olduğu bildirilmiştir. 300°C-600°C'deki yüksek sıcaklıklarda çeşitli alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcıların sıkıştırma mukavemeti ve mikro yapısının sonuçlarını bildirmektedir. Bağlayıcılar, ağırlıkça %100/0, 50/50, 10/90 ve 0/100 oranlarında alkali ile aktifleştirilmiş düşük kalsiyumlu uçucu kül/öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile hazırlandı. Yükleme yapılmayan numuneler, numuneler sabit bir duruma ulaşana kadar fırın sıcaklığı sabit tutularak önceden sabit bir sıcaklığa kadar ısıtıldı. Daha sonra numune sıcakken kırılma noktasına kadar yüklenmiştir. Termal maruz kalma sonrası mikroyapısal değişiklikleri araştırmak için XRD, SEM ve FTIR teknikleri kullanılmıştır. Uçucu kül esaslı numunede, 600 °C'de mukavemette bir artış, cüruf bazlı numunede ise Portland çimento bağlayıcısı ile karşılaştırıldığında, özellikle 300 °C'lik bir sıcaklıkta en kötü performans elde edilmiştir. Bağlayıcılardaki bu zıt davranış, yüksek sıcaklıklarda çeşitli faz dönüşümlerine yol açan farklı bağlayıcı formülasyonlarından kaynaklanmaktadır. Bu dönüşümlerin basınç dayanımı üzerindeki etkileri deneysel sonuçlar temelinde tartışılmıştır.

Alkali aktivatörler tek olarak kullanıldığında ısıal kürün mukavemeti artırdığı, oda sıcaklığında hazırlanan numunelerde ise mukavemet artışı sağlanmadığı görülmüştür. Isıl kür ile reaksiyon derecesinin artırılmasıyla daha yoğun ve sıkı bir iç yapı elde edildiği bildirilmiştir (Tuyan, 2017).

Geopolimerlerin geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha hızlı kürlendiği görülmüştür (Tok, 2021). Mukavemetlerinin 3-7 gün içerisinde %92-96'ya ulaştığını ve %96'dan sonra mukavemetin yavaşladığını belirtilmiştir (Rehman ve ark., 2020, Joseph ve Mathew, 2012).

Silikat ve hidroksit oranı: sodyum silikatın sodyum hidroksite oranı, basınç dayanımının gelişiminde önemli bir rol oynar. Alkali (Na, K metalik iyonları) konsantrasyonunun artması veya eklenen silikat SiO₂ miktarının azalması, basınç dayanımında bir artış beklenmektedir. Bunun nedeni, fazla sodyum silikatın suyun

buharlaşmasını ve yapı oluşumunu engellemesidir. Potasyum silikat/potasyum hidroksit ile aktive edilmiş matris, sodyum silikat/sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş matrisler daha güçlü ve yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. (K^+ bazik olduğu için, daha yüksek oranda çözünmüş polimerik iyonlaşma ve çözünmeye izin verir ve daha fazla genel ağ oluşumu ve matrisin sıkıştırma mukavemetinde bir artış sağlayan yoğun çoklu yoğunlaşma reaksiyonuna yol açar. Büyük boyutlu K, daha fazla polikonsevanzasyon derecesini destekleyebilir (Cioffi ve ark., 2003). İnorganik polimer üretiminde, polimerdeki OH^- iyonu miktarı alkali çözelti Si^{4+} ve Al^{3+} 'nın uçucu külden çözünme aşamasına katkıda bulunurken, Na^+ iyonu zeolitlerin kristalleşmesine katkıda bulunur (Rahier ve ark., 1997).

Alkali konsantrasyonu: Alkali konsantrasyonu, geopolimerizasyon için en önemli faktördür. Alüminosilikatın çözünürlüğü, artan hidroksit iyon konsantrasyonu ile artar. Daha yüksek NaOH konsantrasyonu, yüksek dayanım verir. K_2O/Na_2O içeriği önemli bir etkiye sahiptir; alkali konsantrasyonu arttıkça priz süresi uzar ve aynı zamanda mukavemet ve yangına dayanıklılık özellikleri geliştirilebilir. K_2O 'nun eklenmesinin basınç dayanımına katkı sağladığı ve aynı zamanda çatlak oluşumunu azalttığı gözlemlenmiştir (Jaarsveld ve ark., 2002).

Swanepoel ve Strydom, 2002., yapmış olduğu çalışmada uçucu kül kullanılarak, %2 ve %5 NaOH içeren karışımlar incelenmiştir. Çalışma, %5 NaOH ilavesinin erken dönemde (7 gün altında) bağlayıcının mukavemetini artırma eğiliminde olduğunu, ancak daha sonraki yaşlarda mukavemetin azaldığını göstermiştir. Bu azalmanın sebebi olarak, macunlardaki aşırı NaOH'nun istenmeyen morfoloji ve düzensizliklere neden olması ve böylece bağlayıcı gücünü azaltması gösterilmiştir.

Alkali hidroksit konsantrasyonu 5 M'den 10 M'ye yükseltildiğinde, az miktarda C-S-H jeli ile baskın ürün olarak şekilsiz bir alkalin alümino silikat (geopolimer) oluşur. C-S-H jelinin geopolimerik bağlayıcı içindeki boşlukları ve gözenekleri doldurduğu varsayılmıştır. Bu, farklı hidratlı fazlar ve reaksiyona girmemiş partiküller arasındaki boşlukları kapatmaya yardımcı olur, böylece dayanımda artışa neden olur. Sodyum hidroksit miktarı sistemde arttıkça, silikat ve alüminyumla reaksiyona girecek kalsiyum miktarı azalacak ve kalsiyum hidrat olarak çökerek C-S-H jelinin oluşumuna neden olur. C-S-H jelinin Ca/Si oranı, normal Portland çimentosunun hidrasyonu ile oluşan C-S-H'den önemli ölçüde daha düşük olur (Yip ve Deventer 2003). NaOH'un yüksek

miktarda ilavesi kimyasal çözünmeyi hızlandırdığı, ancak bağlayıcı hidrasyonu sırasında etrenjit ve CH (kalsiyum hidrat) oluşumunu azalttığı bulunmuştur (Poon ve ark., 2003). Bu durum, CH içeriğindeki azalmanın, üstün güç ve dayanıklılık performansı ile sonuçlandığı anlamına gelir.

pH etkisi: basınç dayanımını kontrol eden en önemli faktör pH'dır. Aktive edici çözeltinin pH'ı arttıkça çimentonun sertleşme süresi azalır. Daha düşük pH değerlerinde, geopolimerik karışım viskoz kalır ve çimento gibi davranır, ancak daha yüksek pH değerlerinde karışım daha akışkan bir jel kompozisyonuna sahip olur ve daha az viskoziteye sahip olup daha işlenebilir hale gelir. Çözeltinin daha düşük pH değeri, daha düşük monomer konsantrasyonuna yol açar. pH değeri 13-14 aralığı, daha yüksek mekanik dayanıma sahip geopolimerlerin oluşumu için en uygun olanıdır (Khale ve Chaudhary, 2007).

Silikat ve alüminyum oranı: zemin parçacıkları arasında sağlam bir bağlantı ve geopolimerlerin fiziksel dayanıklılığını sağlamak için, alümino-silikat jelinin sentezlenmesi için yüksek çözünürlüklü bir silikat dozajı gerekmektedir. Yüksek miktarda silika içeriği, fazla miktarda alkali alumino-silikat jel oluşumuna, bu da malzemenin mekanik dayanıklılığının gelişmesine neden olur. Yüksek sodyum silikat konsantrasyonunun, Metakaolin/kum karışımının jeopolimerizasyonuna faydalı olduğu bulunmuştur (Feng ve ark, 2004).

Alüminyum kaynağı: kaolin-metakaolin kil içeren geopolimerler, basınç dayanımı testinde en yüksek dayanıma sahipken, uçucu kül tek başına yüksek dayanım artırılmasında önemli bir rol oynamaz. Az miktarda kil içeriği, jeopolimerizasyon reaksiyonunda tamamen sindirilebilirken, daha büyük miktarlarda kil kısmen reaktif bir dolgu maddesi haline gelir ve yapıyı zayıflatma işlevi görmektedir (Khale ve Chaudhary, 2007). İkincil bir Al-Si kaynağı olarak metakolin, uçucu külün jeopolimerizasyonunu artırır. Bu, metakolinin uçucu külden daha fazla çözünür olma eğiliminde olması gerçeğiyle açıklanmaktadır.

Sıvı/katı oranı: Suyun geopolimer katıya oranı kütlece arttıkça mukavemet azalır. Portland çimentosu için minimum su/çimento oranı ağırlıkça yaklaşık 0,4'tür, oysa taze geopolimerik malzeme düşük sıvı/katı oranında bile kolayca işlenebilir.

Alonso ve Palomo (2001); tarafından yapılan önceki bir çalışmaya göre başlangıçta katı içeriğin geopolimer oluşum hızını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Katı-sıvı oranının artmasıyla birlikte daha fazla çökelti gözlemlendiği açıktır. Bu durum, çözünen reaktif bileşiklerin yüksek olmasına bağlanmaktadır. Katı-sıvı oranı yükseldikçe, geopolimer numunesi daha az homojen hale gelmektedir.

Abdullah ve ark. (2019); yapmış olduğu çalışmalarında, uçucu kül temelli geopolimer kullanarak katı-sıvı (2.0, 2.5 ve 3.0) oranının zemin stabilizasyonuna etkisini incelenmiş ve bağlayıcı oluşumunun daha düşük olduğunu gözlemlenmiştir. Bu durum, katı-sıvı oranının 2.5'ten yüksek olduğu uçucu kül esaslı geopolimer numunesi üretmek için alüminosilikat fazının yüksek derecede doygun olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, daha az bağlantılı bir geopolimer yapısının oluşmasına neden olmaktadır.

2.3. Uçucu Kül

Uçucu kül, kömürle çalışan termik santrallerde baca gazları ile kazandan dışarı atılan ince partiküllerden oluşan katı artıklardan biridir. Baca gazları bacalara ulaşmadan önce elektrostatik çökticiler, partikül filtrasyon ekipmanları tarafından tutulur (Ahmaruzzaman, 2010). Yakılan kömürün kaynağına bağlı olarak, uçucu külün bileşenleri önemli ölçüde değişir. Genel olarak, uçucu külün bileşenleri tipik olarak SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 'ü içerir., şekilsiz ve kristal oksitler veya çeşitli mineraller şeklinde bulunur.

UK, elektrik enerjisi elde etmek için yakıt olarak öğütülmüş kömürün kullanıldığı termik santrallerde, demir, çelik vb. metallerin üretimlerinde olduğu gibi elde edilen esas ürünün yanı sıra atık ürün olarak ortaya çıkar (Demiröz, 2009). Atık malzeme olan uçucu külün depolanması, termik santrallerden uzaklaştırılması ve atılması ekonomik değildir. Bununla birlikte güçlükler ortaya çıkmakta ve çevre kirliliği sorunları, işletme, enerji üretim kaybı gibi teknik sorunlara neden olmaktadır. Bu atık olan ürünlerin değerlendirilmesi önemlidir. Böylelikle doğal malzemelerin kullanımını azaltmış ve doğanın tahrip edilmesi önlemektedir. Uçucu küller atık malzeme olarak geri kazanılmaya elverişli bir malzemedir. Bu atık malzemelerin değerlendirilmesi durumunda çevresel sorunlar azalmakta, enerji tasarrufu ve ekonomi sağlanmaktadır (Demiröz, 2009).

Türkiye’de yılda 55 milyon/ton linyit kömür santrallerde yakılmakta ve 13 milyon ton uçucu kül üretilmektedir. Böyle bir atığın depolanmaması veya değerlendirilmemesi önemli derecede ekonomik ve çevresel problemleri de beraberinde getirecektir. (Demiröz, 1992). Termik santrallerde 1 kWh’lik enerji üretiminde 110-140 g uçucu kül atık malzeme olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW’lık bir santralden yılda 650000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Dünyadaki üretimi ise yılda 450 milyon tondur. UK miktarının %6-8’i çimento ve puzolan olarak kullanılmaktadır (Görhan ve ark., 2009, Tokyay ve ark., 2009).

Santralin tipi, işletim ve yanma biçimi, yakılan kömürün cinsi uçucu külün üretimini etkilemektedir. %10-20 taş ve %20-50 linyit kömürünün yakılmasıyla atık malzeme (UK) olarak açığa çıkmaktadır. %85 atık külün yanması sonucunda oluşan baca gazları kazandan çıkar ve elektro filtrelerle tutularak atmosfere çıkışı önlenen ince tane (mikron) boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Atık malzeme elde edilen bu küllere uçucu kül olarak tanımlanırlar (Morrison, 1970).

Zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için uçucu kül kullanımı iyi bilinir ve yaygın olarak yapılmaktadır. Stabilizasyon, basınç dayanımını ve taşıma gücü özelliklerini arttırırken zemin plastisitesi azaltır. Zemin plastisitesi, uçucu külün cinsi, miktarı, karıştırma ve sıkıştırma prosedürleri, kür koşulları, zemin gradasyonu gibi birçok faktör olarak, stabilize edilmiş zeminin performansını etkilediği birçok araştırmacı tarafından tartışılmıştır (Nalbantoglu, 2004, Kumar ve Sharma 2004, Aydılek ve Arora, 2004, Kate, 2005, Buhler ve Cerato, 2007, Göktepe ve ark., 2008).

Uçucu külün kimyasal bileşimi Portland çimentosuna benzemektedir. UK’lerin hızlı soğuması amorf fazı oluştururken çimentonun yavaş yavaş soğuması kristal fazları oluşturmaktadır. Uçucu kül ve çimento arasındaki temel fark, farklı bileşiklerin her birinin miktarlarındaki ilişkidir. Uçucu kül, çimento yerine beton karışımlarında ve zemin stabilizasyonunda kullanımı giderek yaygınlaşan bir malzemedir. (Afrin, 2017, Sihag ve ark., 2021).

Portland çimentosu kireç (CaO) fazla iken, uçucu külde daha azdır. Portland çimentosu az miktarda reaktif silikat, uçucu kül ise yüksek miktarda reaktif silikat içermektedir (Güçlüer, 2011). Dünyada yıllık çıkan uçucu kül miktarı 800 milyon tondur. Çizelge 2.2’de uçucu kül üretim ve kullanım oranları verilmiştir.

Çizelge 2.2. Dünyadaki UK üretimi (Güçlüer, 2011).

Ülke	Kül üretimi (Milyon Ton)	Kül kullanımı (Milyon Ton)	Kullanım oranı (%)
Kanada	6.8	2.3	33.8
Avustralya	13.1	6	45.8
Çin	295	265	67.1
AB	52.6	47.80	90.9
Hindistan	105	14.50	13.8
Japonya	11.1	10.70	96.4
Orta Doğu /Afrika	32.2	3.40	10.6
Amerika	118	49.70	42.1
Asya	16.7	11.10	66.5
Türkiye	24	2.40	10
Rusya	26.6	5.00	18.8
Toplam	800.1	417.90	52.2

Türkiye'de faaliyet gösteren kömüre dayalı termik santrallerden yıllık ortalama uçucu kül üretimi 20-30 milyon tondan fazladır. Bu miktarların gelecekte artması beklenmektedir. Çizelge 2.3'de Türkiye'de termik santrallerde üretilen uçucu külün kimyasal özelliklerini göstermektedir (Kaya, 2016).

Çizelge 2.3. Termik santrallerde üretilen uçucu küllerin kimyasal özellikleri

Termik Santral	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	ASTM	TSE
Afşin Elbistan A	18.27	9.16	3.26	53.44	1.75	0.38	11.42	0.19	C	W
Çatalağzı	58.75	25.24	5.76	1.46	2.22	4.05	0.08	0.6	F	V
Çayırhan	49.13	15.14	8.25	13.2	4.76	1.76	3.84	2.2	F	V
Kangal	34.29	14.94	4.25	30.82	2.08	0.97	7.02	0.61	C	W
Kemerköy	25.2	12.58	5.98	38.49	1.27	1.18	13.88	0.41	C	W
Orhaneli	48.53	24.61	7.59	9.48	2.28	2.51	2.48	0.35	F	V
Seyitömer	54.49	20.58	9.27	4.26	4.48	2.01	0.52	0.65	F	V
Soma	42.82	20.82	4.57	23.45	1.74	1.31	1.47	0.32	C	W
Sugözü	18.69	5.61	2.52	62.68	2.63	0.77	2.73	0.13	F	W
Tunçbilek	59.06	17.27	12.44	1.68	4.54	1.15	0.6	0.3	F	V
Yatağan	51.5	23.08	6.07	10.53	2.42	2.54	1.32	0.77	F	W

2.3.1. Uçucu külün sınıflandırması

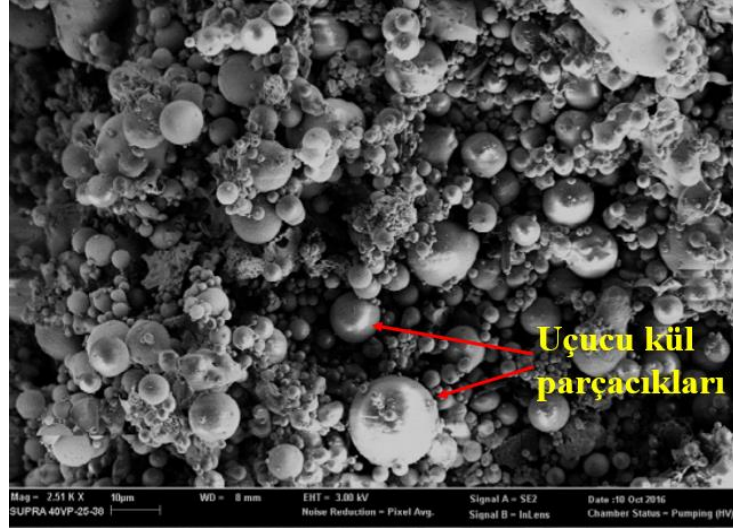
ASTM C618-12a, 2012, göre uçucu kül, kalsiyum oksit içeriklerine göre C ve F olarak sınıflandırılabilir. C sınıfı uçucu kül, yüksek kalsiyum içeriğine sahiptir ve esas olarak linyit kömürü kaynaklarının yakılmasından üretilir. C sınıfı uçucu kül, ağırlıkça %50 ile %70 arasında toplam SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içeriğine ve ağırlıkça %20'den fazla CaO içeriğine sahiptir. F Sınıfı uçucu kül, düşük kalsiyum içeriğine sahiptir ve antrasit veya bitümlü kömür F sınıfı uçucu külün toplam SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içeriği ağırlıkça %70'in üzerinde ve CaO içeriği %10'un altındadır (Bankowski ve ark., 2004, Antiohos

ve Tsimas, 2007). Si, Al, Fe ve Ca'ya ek olarak, Hg, Cr, Mn, Co, As, Sr, Ti, Mo, Pb, V ve Hg gibi metal elementleri de içerir. Uçucu küldeki toksik eser elementlerin konsantrasyonları, kömürdekinden 4-10 kat daha yüksek olabilir (Neupane ve Donahoe, 2013, Nyale ve ark., 2014, Yao ve ark., 2015). Ayrıca küçük konsantrasyonlarda dioksinler ve polisiklik aromatik hidrokarbon bileşikleri içerebilir (Shibayama ve ark., 2005, Nomura ve ark., 2010). Bu nedenle uçucu kül tehlikeli bir madde olarak kabul edilmekte ve uçucu külün uygun olmayan şekilde bertaraf edilmesi sadece arazi işgalini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda çevre ve ekolojii de bozacaktır. Son birkaç on yılda, özellikle verimli ve yeşil bir şekilde uçucu külün kullanımına yönelik artan çabalar sarf edilmiştir. Uçucu kül, en önemli sınıflandırma sistemi ASTM C618 ve TS EN 197-1'dir (Türker ve ark., 2009). Çizelge 2.4'de uçucu kül sınıfları verilmiştir.

Çizelge 2.4. Uçucu küllerin sınıflandırılması

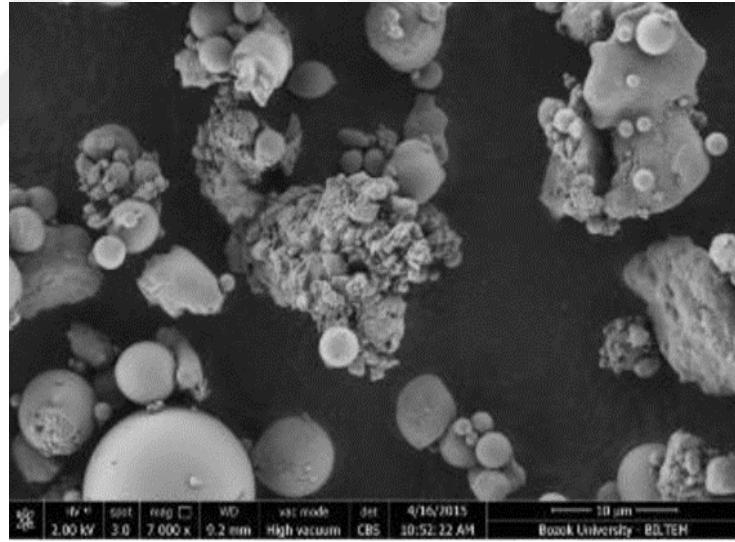
ASTM C 618'e göre	Tanımı
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$ bitümlü veya antrasit (parlak kömürden elde edilen uçucu küller), CaO içeriği $< \%10$ 'dan azdır. Puzolanik özellik gösterirler.
C	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$ linyit kömüründen elde edilir. (CaO içeriği $> \%10$ 'dan fazladır. (Yüksek Kireçli Uçucu Kül). Puzolanik ve bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahiptir.
TS EN 197-1'e göre	Tanımı
V	Çoğunlukla puzolanik özelliklere sahip küresel tanelerden oluşur. Esas olarak reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'ten gelen ince bir tozdur. Reaktif kireç oranı $\%10$ 'dan azdır. Reaktif silika miktarı ise $\%25$ 'ten fazla olması istenmektedir.
W	Hidrolik ve/veya puzolanik özelliklere sahip olan ince bir tozdur; Temel olarak reaktif kireç, reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'ten oluşur. W tipi UK içinde, $\%10$ 'dan fazla reaktif kireç (CaO) içeriği, reaktif silika miktarı $\%25$ 'ten fazla de olmalıdır.

UK'ün başlıca bileşenleri $\%1-15 \text{ Fe}_2\text{O}_3$, $\%10-30 \text{ Al}_2\text{O}_3$, $\%25-60 \text{ SiO}_2$, ve CaO $\%1-40$ arasındadır. SO_3 , MgO ve alkali oksitler diğer bileşenleridir. UK'de $0.5-200 \mu\text{m}$ arasında camsı, küresel ve düzensiz şekilli tanecikleri ve UK'ün türüne göre parçacıkların şekil ve boyutlarında farklılıklar oluşmaktadır. F tipi UK, camsı, boşluksuz küresel parçacıklar içermekte ve homojen bir mikro yapıya sahiptir. (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. F sınıfı uçucu külün SEM görüntüsü (Yaghoubi ve ark, 2018)

C (yüksek içerikli kireç) sınıfı UK'lerin, mikroyapısında küresel, köşeli, düzensiz şekilli parçacıklarından oluşmaktadır. Homojen olmayan şekil dağılımı ve küresel parçacıkların yüzeyi düzgün değildir (Şekil 2.10)



Şekil 2.10. C sınıfı uçucu külün SEM görüntüsü

2.3.2. Uçucu külün kullanım alanları

Diğer endüstriyel atıklar gibi uçucu külün kullanımı da araştırılmıştır. Aşağıda uçucu külün kullanım alanları:

- Zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde ve yol stabilizasyonunda
- Hafif beton ve tuğla üretiminde, beton ve katkılı çimento üretiminde (maliyeti düşürmek, özelliklerini iyileştirmek amacıyla) yardımcı ve katkı malzemesi,

- Donatılı zemin ve istinat duvarlarında arka dolgusu olarak, (Eftelioğlu ve Bowders, 1992)
- Katı atık depolama alanlarında yeraltı suyunun kirlenmesini önlemek amacıyla,
- Düşey geçirimsiz perde duvarlarda,
- Çimento-bentonit, bentonit-zemin karışımlarında katkı malzemesi olarak,
- Taşıma gücünü arttırmak, oturmayı azaltmak ve zeminde geçirimsizliği sağlamak amacıyla
- Maden ocaklarında filler ve baraj dolgularında katkı malzemesi olarak,
- Dolgu, yalıtım, temel alt dolgu malzemesi,

2.4. Yüksek Fırın Cürufu

YFC, silika, kalsiyum alümina silika, bazik bileşikleri içeren ve fırınlarda demir üretimi sırasında erimiş halde elde edilen atık bir üründür. YFC'da silisyum dioksit, sodyum, alüminyum, magnezyum, demir oksitler bulunur. 1400-1600 °C sıcaklıkta oluşur. Yavaş soğutulduğunda kristal bir yapı kazanır ve bazalt benzeri özellikler gösterir. Beton üretiminde agrega olarak kullanılabilir.

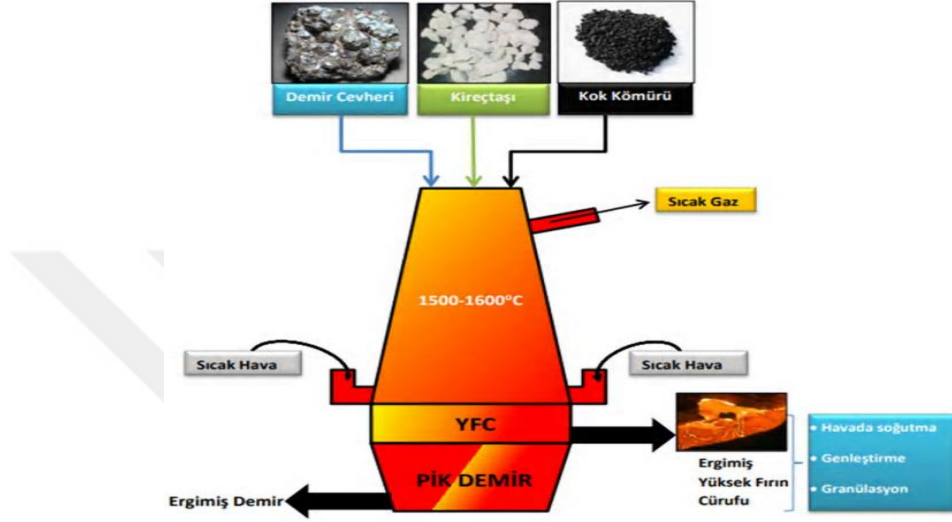
Yüksek fırın cürufunun çimentoya benzer bir malzeme olarak kullanımı, 19. yüzyılın ikinci yarısına kadar uzanmaktadır. Dünya genelinde yaklaşık olarak 100 milyon tondan fazla cüruf üretilirken, fakat çok küçük bir kısmı kullanılmaktadır.

Puzolanik malzemeler tek başına kullanıldığı zaman hidrolik bağlayıcı özelliği yoktur. Öğütüldüğü zaman nemli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterir.

Yüksek fırın cürufu yaygın bir şekilde Portlant çimentosu, asfalt betonu, yol yatağı malzemesi ve inşaat agregası olarak kullanılan bir hammaddedir. Üretilen her 1 ton çimento ile yaklaşık 0.90 ton CO₂ açığa çıkmaktadır (Akbulut ve ark., 2021).

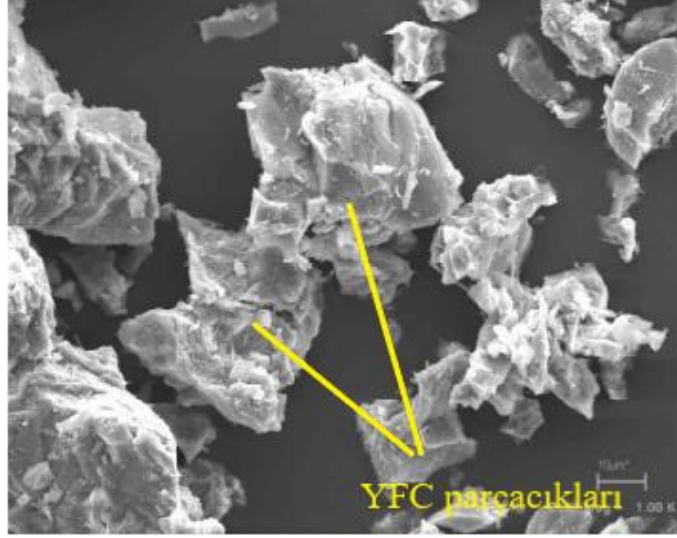
YFC, yüksek dereceli fırınlarda demir üretimi sırasında açığa çıkan atık bir malzemedir. Demir cevheri demir oksit ile birlikte alüminyum, kükürt ve silis maddeler içermektedir. Bu maddeler yüksek fırında 1600 °C'de yanmasından sonra ayrışır. Ayrışmada yardımcı etken madde kireçtaşıdır. Kok kömürün görevi ise gerekli enerji sağlamaktadır. Erimiş haldeki malzemeler hafif olması sebebiyle üste cüruf, altta demir

fırının üst kısımlarında toplanmaktadır. Burada erimiş cüruf ve pik demir tahliye edilir. YFC'nin tahliyesinden sonra soğutma işlemi uygulanır (Şekil 2.11). (Engin, 2015), Eritilmiş cürufun sıvı haldeyken soğutma yöntemine bağlı olarak farklı cüruf ürünleri elde edilir. Bu ürünler arasında hava soğutmalı yüksek fırın cürufu (HSYFC), genişletilmiş veya köpüklü cüruf, peltelenmiş cüruf ve granülür yüksek fırın cürufu bulunmaktadır.



Şekil 2.11. Yüksek fırın cürufunun üretim süreci (Engin 2015)

Yüksek kalsiyum (CaO) içermesinden dolayı killi zeminin kısa sürede sertleşmesine ve basınç dayanımının gelişimine katkıda bulunur. YFC, kararlı bir yapıya sahip jeller oluşturmak için alkali aktivatörle oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kimyasal olarak reaksiyona girebilir. YFC ve alkali aktivatör çözeltisi arasındaki reaksiyon, geopolimer matris içinde C-A-S-H (kalsiyum-aluminat-silikat-hidrat) adı verilen bir jel oluşturur. Şekil 2.12'de Yüksek fırın cürufunun SEM görüntüsü göstermektedir.



Şekil 2.12. Yüksek fırın cürufu'nun SEM görüntüsü (Yılmaz, 2008)

2.4.1.YFC özellikleri

- YFC, beton ve geopolimer malzemelerin dayanıklılığını artırır ve yapıların uzun ömürlü olmasını sağlar.
- YFC, çatlak oluşumunu azaltır ve yapıların yüksek yükler altında daha iyi performans sergilemesini sağlar.
- YFC, alkalilere, asitlere ve diğer kimyasallara karşı kimyasal direnci artırarak yapısal dayanıklılığı artırır.
- Termal İzolasyon: Isı transferini azaltarak enerji tasarrufu sağlar.
- Sürdürülebilirlik, YFC'nin en önemli özelliklerinden biridir. Bu özelliği, çevresel etkileri azaltması ve demir-çelik endüstrisi yan ürünlerinin geri dönüşüm sürecine katkı sağlamasıyla ortaya çıkar.

2.5. Alkali Aktivatör

Son yıllarda çimento kullanmadan bağlayıcı üretmek için UK, SD ve YFC gibi endüstriyel atıklar, çeşitli alkalilerle aktivite edilerek kullanılmaktadır. Bir araştırmada YFC, UK, SD, kaolin, metakaolin, metakaolin-uçucu kül, UK-cüruf, metakaolin-cüruf, cüruf-kırmızı çamur karışımları ve zeolit maddeler/maddelerin karışımları kullanılmıştır. Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların mekanik dayanımı, alüminosilikat malzemelerin yapısına bağlıdır (Lee ve ark., 2020).

Silikat, alüminatlar, alüminosilikatlar, güçlü ve zayıf asitli tuzlar, kostikler alkali aktivatörlerdir. Uygulamada ve araştırma çalışmalarında en çok kullanılan sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat ($n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$) potasyum hidroksit (KOH), ve

potasyum silikat ($n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$) aktivatörlerdir. Tez çalışmasında sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır.

2.5.1. NaOH geopolimerde kullanımı

Sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinin konsantrasyonu, geopolimerin özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Geopolimer üretiminde en çok kullanılan alkali aktivatörlerden biridir. (Eberwein ve ark., 2015, Amulya ve ark., 2020, Zhang ve ark., 2013, Aziz, 2019). NaOH çözeltisinin molaritesinin nihai ürünün işlenebilirliğini, geopolimerizasyon reaksiyonunu ve dayanım gelişimini önemli ölçüde etkilediği bildirilmiştir. 4.5M-15M aralığının, dayanım gelişimi açısından sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonu için kabul edilebilir bir aralık olduğu bildirilmiştir (Nematollahi ve Sanjayan, 2014, Rios ve ark., 2017). Rios ve ark., (2017), yapmış oldukları çalışmada en verimli dayanımın 8M-12M arasında olduğunu bildirmiştir.

Geopolimer sentezinde sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinin muhtevası, mukavemet gelişimi ve uygun işlenebilirlik açısından yüksek su içerikli killerin stabilizasyonu için optimum su içeriği olarak bildirmişlerdir (Lorenzo ve Bergado, 2004, Cristelo ve ark., 2011, Phetchuay ve ark., 2016).

Palomo ve ark., (1999) atık malzemelerin alkali aktivasyonu birçok laboratuvar çalışmalarında araştırma konusu olmuştur. Bu malzemeler ucuz ve ekolojik olarak sağlam çimento benzeri inşaat malzemelerinin sentezlenmesinde kullanmak mümkündür.

Çalışmada yüksek alkali çözeltilerle aktivasyon mekanizması açıklanmaktadır. NaOH, KOH, cam suyu vb. ile yapılan bu solüsyonların ortak özelliği çok yüksek bir OH^- konsantrasyonu içermesidir. Geopolimer reaksiyonun ürünü, zeolitik öncülere benzer bir yapıya sahip amorf bir alüminosilikat jeldir. Çözelti/uçucu kül oranı ile birlikte numunelerin kürlenme sıcaklığı ve süresi üzerinde çalışılan değişkenlerden bazılarıdır. Bu değişkenlerin, nihai ürünün mekanik mukavemetinin gelişimini önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Geopolimer sentezinde NaOH çözeltisi kullanmanın dezavantajı, kullanılan molaritenin çok yüksek veya çok düşük olması durumunda düşük mukavemet elde edilmektedir (Tigue ve ark, 2018, Zaliha ve ark, 2015, Wazien, 2016).

2.6. Literatür Araştırması

Öksüz (2006), yaptığı çalışma, uçucu kül ile kumlu zeminlerin stabilizasyonu ve değişik stabilizasyon yöntemleri araştırılmıştır. Uçucu kül %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında, Farklı kür (7-14-28 ve 56 gün) sürelerinde dayanım etkileri incelenmiştir. Pozolanik aktivitenin 28 günden sonra oluştuğunu, zemine uçucu kül ilavesi edilmesi ve kür süresindeki artışla dayanımın arttığını bildirmiştir.

Swanpoel ve Strydom (2002), 60 °C'lik yüksek bir sıcaklıkta kaolinit ve alkali aktivatör olarak NaOH, Na_2SiO_3 ile pozolan olarak uçucu kül kullanmışlardır. Numuneler 6, 24, 48 ve 72 saatte 40, 50, 60 ve 70 °C'de kürlenmiştir. Optimum koşul, 48 saatlik bir süre için 60 °C'de bulunmuştur. 28 gün sonra 8 MPa'lık bir maksimum dayanım elde edilmiştir. Numunelerin kızılötesi spektroskopik ölçümleri 7 ve 28 günde yapılmıştır.

Guo ve ark. (2010), 75 °C'lik kürleme sıcaklıklarında 8 saat ve ardından ortam sıcaklığında (23 °C) 28 gün boyunca C Sınıfı uçucu kül geopolimer macunun basınç dayanımını ve mikro yapı özelliklerini inceledi. Kullanılan alkali öncü, 1.5 oranında bir NaOH ve Na_2SiO_3 karışımıdır. 28 günlük serbest basınç dayanımı 63.40 MPa olarak ölçülmüştür. XRD testinde geopolimerik jel ve kalsiyum silikat hidratın (C-S-H) bir arada var olduğu gözlenmiştir.

Kumar ve ark. (2009), Granüle yüksek fırın cürufunun (GBFS) uçucu kül bazlı geopolimerin reaksiyonu, yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisini araştırılmıştır. 27 °C'deki reaksiyona GBFS aktivasyonunun hâkim olduğu, fakat 60 °C'deki reaksiyonun UK ve GBFS'nin birleşik etkileşiminden kaynaklandığı gözlenmiştir.

Somna ve ark. (2011), oda sıcaklığında kürlenmiş sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilmiş öğütülmüş uçucu kül geopolimerin özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, alkali aktivatör olarak 4.5-16.5 Molar (M) NaOH konsantrasyonlarını kullanılmıştır. Deneylerin sonucunda öğütülmüş uçucu kül ile, orijinal uçucu kül karşılaştırıldığında öğütülmüş uçucu külden daha yüksek mukavemetli geopolimerlerin elde edildiği bulunmuştur. NaOH konsantrasyonunun 4.5M'den 14 M'ye artışı ile öğütülmüş geopolimerin dayanımında artış göstermiştir. NaOH konsantrasyonunun bu noktadan sonraki artışıyla geopolimer karışımın mukavemetinde bir azalma olduğu tespit edilmiştir.

Sani (2014), yapmış olduğu çalışmada, alttemel tabakasında dolgu malzemesi uçucu kül (F tipi) kullanılması ve alttemel tabakasının mühendislik özellikleri 2 grup olacak şekilde araştırılmıştır. 1 Grup: dolgu malzemesi olarak %5 çimento oranı sabit tutulurken, %0, %5, %10, %15, %20 uçucu kül, 2. Grup: dolgu malzeme olarak %15 uçucu kül oranı %15 sabit, %0, %5, %7.5, %10, %12.5 çimento oranları kullanılmıştır. Her iki grupta CBR ve serbest basınç testlerinde maksimum dayanımın optimum oranın, %15 uçucu kül + %5 çimento oranı olduğu belirtilmiştir.

Arıöz (2015), farklı konsantrasyonlardaki AA ile hazırladığı UK esaslı geopolimer harçlara ısıtma işlemleri uygulanmış ve geopolimerin mikro yapısı incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda uzun kür süresi sonunda mukavemetin azaldığını ve bunun nedeni olarak numunelerin yüksek sıcaklıktan ortam sıcaklığına çıkarılmasıyla çatlamalardan dolayı olduğu belirtilmiştir. Fakat alkali aktivatörün artmasıyla mukavemetin artırdığı, 6, 15 ve 24 saat sürelerde ısıtma işlemde sürenin artması ile numunelerde geopolimer jeli oluşumunun arttığı ve gözeneklerin sayısı artış olduğu gözlenmiştir. Gözeneklerin yüksek sıcaklıkta suyun fazla buharlaşmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. (Arıöz ve ark., 2020).

Sharma ve Sivapullaiah. (2016), yaptığı çalışmada, UK ve YFC içeren bir bağlayıcı kullanılarak şişen zeminlerin stabilizasyonu incelemiştir. Şişen zemin, uçucu külün %70'i ve GGBFS'nin %30'u oranında farklı karışım oranlarında hazırlanıp 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde hazırlanmıştır. SBD sonuçlarına göre, en yüksek dayanım değeri 28 günlük kür süresinin sonunda elde edilmiş ve 0.45 MPa olarak belirlenmiştir.

Mohammadinia ve ark. (2016), yapmış olduğu çalışmada inşaat ve yıkım malzemelerinin geopolimer ile iyileştirildiğinde meydana gelen değişimleri incelenmiştir. Bağlayıcı malzeme, UK (%2-%4) ve öğütülmüş YFC (%2-%4) puzolanik malzeme olarak kullanılmıştır. Farklı oranlarda kullanılan alkali aktivatör konsantrasyonlarının bağlayıcı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu işlemler, temel/alt temel uygulamaları için değerlendirilmiştir. Farklı karışımların elastik modülü, basınç dayanımı ve esneklik modülü test edilmiştir. Geopolimerlerle yapılan iyileştirme sonucunda inşaat ve yıkım malzemelerinin elastik modül ve basınç dayanımlarının arttığı bulunmuştur. Cüruf esaslı geopolimer daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

Singhi ve ark. (2016), UK, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve bunların kaynak malzeme olarak harmanlanmasıyla birleşen zemin-geopolimer üzerinde deneysel araştırma yapılmıştır. Çalışmada kullanılan killi zemin, düşük plastisiteli kil (CL), UK (C tipi) ve ÖGYFC kullanılmıştır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Zemin numuneleri, katkı malzemelerinin (cüruf/uçucu kül veya her ikisinin bir kombinasyonu) zemine çeşitli oranları kullanılarak hazırlanmış olup, oranlar ağırlıkça %4, 8, 12, 16 ve %20'dir. Aktivasyon için kullanılan sodyum hidroksit çözeltilerinin molar konsantrasyonu 12M ve 14.5M karışımı için kullanılmıştır. Katkı malzeme içeriği ile zemin-geopolimer sisteminin serbest basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, serbest basınç dayanımı; yüksek fırın cüruf içeriğinin artmasıyla istikrarlı bir şekilde artmıştır. Geopolimer stabilizasyonu için katkı malzeme olarak uçucu kül kullanıldığında, serbest basınç dayanımı, cüruf bazlı geopolimer stabilize zeminin SBM'ne kıyasla çok daha az gözlemlenmiştir.

Dayalan (2016), yaptığı çalışmada, zemin stabilizasyonunu yüksek fırın cürufu (YFC) ile incelenmiştir. Kil içeren zemin stabilize etmek için zeminin kuru ağırlığına göre %5-%25 arasında farklı GGBFS yüzdelikleri kullanılmıştır. Mukavemet performans testine dayanarak, optimum GGBFS miktarı %20 olarak belirlenmiştir.

Abdullah ve Ahmad (2017), uçucu kül esaslı geopolimerlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2 ve UK/AA oranı 2.5 olduğundaki basınç dayanımları araştırılmıştır. 7 günlük kür süresinde basınç dayanımları 0.395 MPa ve 0.215 MPa, 28 günlük kür süresinde ise 0.645 MPa ve 0.337 MPa basınç dayanımı göstermiştir. Kür süresindeki artış ile basınç dayanımında artış olduğu belirtilmiştir.

Türkmen ve ark. (2018), geopolimer macunun mekanik özelliklerini araştırmak için uçucu kül ve Elâzığ cürufu kullanmışlardır. NaOH, 8, 10, 12, 14 ve 16 M'lik çeşitli molaritelerde alkali aktivatör olarak kullanıldı ve 50 °C, 100 °C ve 150 °C'de 72 saat kürlenmiştir. Sonuçlar, 28 günde 82.5 MPa'lık yüksek bir basınç dayanımı elde edilmiştir.

Mujtaba ve ark. (2018), tarafından yapılan çalışmada, yüksek fırın cürufunun (YFC) eklenmesiyle şişen zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi araştırılmıştır. YFC'nin zemin stabilizasyonunda etkisi, farklı YFC miktarlarının (%0 ila %55) zemin numunelerine eklenerek araştırılmıştır. Sonuçlara göre, %30 GGBFS

ilavesiyle 28 günlük kür süresinde numunenin dayanımı yaklaşık %35 artmıştır. Bununla birlikte, zeminin basınç dayanımı ASTM D 4609 standardını karşılamış olsa da, optimum dayanım değerine ulaşması için daha uzun bir kür süresinin gerekli olduğu bildirilmiştir.

Neeladharan ve ark. (2019), UK ve YFC içeren bir bağlayıcı kullanarak şişen zeminlerin stabilizasyonu araştırılmıştır. Killi zeminin kuru ağırlığına göre %5–25 UK ve %2,5–10 YFC farklı oranlarda karıştırılmıştır. SBD'yi sonuçlarına göre, optimum olarak %20'lik bir bağlayıcı yüzdesi önerilmiştir.

Totiç ve ark. (2019), Bartın Üniversitesi Kutlubey-Yazıcılar yerleşkesinde bulunan zayıf olan killi bir zemin ve bu zeminin taşıma gücü üzerinde stabilizasyon yapmak için uygun uçucu kül oranını tespit etmeye çalışmıştır. Birinci olarak zemine %5-25 arasında değişen oranlarda uçucu kül ilave edilmiş ve kıvam limitlerinde meydana gelen değişim gözlemlenmiştir. Test numuneleri Proctor sonuçlarına göre hazırlanmış ve 1, 8, 16 ve 32 günlük kürleme sürelerinin ardından CBR ve serbest basınç testlerine tabi tutulmuştur. Test sonuçlarına göre (basınç dayanımı) %10 uçucu kül katkısında ve 32 günlük kür süresi sonunda elde edilen numunelerden elde edilmiştir.

Alnuaimi (2019), yaptığı deneysel çalışmada zemin stabilizasyon yöntemlerinde (derin karıştırma ve jet grout) malzeme olarak kireçtaşı tozu ve taban külü, alkalin aktivatör olarak NaOH, Na_2SiO_3 kullanılmıştır.

Sukpraser ve ark. (2019), çalışmalarında, kampüs alanındaki 3 m derinlikten alınan killi bir zemin (SC) kullanılmıştır. Uçucu kül (UK), Tayland'daki Mae Moh elektrik santralinden ve yüksek kalsiyum sınıfı C olarak sınıflandırılmıştır. Uçucu kül esaslı geopolimer ve yüksek fırın cürufu (YFC) ile zemin stabilize edilmiştir. Sodyum hidroksit (NaOH) alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Zeminin mekanik ve mikro yapısal özelliklerini belirlemek için birçok geoteknik laboratuvar deneyleri yapılmış ve ayrıca mikro yapı analizleri yapılmıştır. Çökebilir killi zemin FA-geopolimer stabilizasyonunun mukavemetini artırmak için yüksek fırın cürufu kullanma olasılığı üzerine ön araştırmadır. İncelenmiş etki faktörleri NaOH konsantrasyonu, UK: YFC oranı ve kür koşullarıdır. 5, 10 ve 15 M sodyum hidroksit kullanılmıştır. Killi zemin içeriği toplam karışımın %70'inde sabitlenirken, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu

içerikleri 30:0, 20:10, 10:20 ve 0:30 FA: BFS oranlarıyla değiştirilmiştir. Çeşitli sıcaklıklarda (25, 50 ve 80°C) kürlenmiştir. Kompaksiyon testi, serbest basınç deneyi ve Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, Optimum FA: BFS oranı 20/10 olarak bulunmuştur. Yükseltilmiş bir sertleştirme sıcaklığı, geopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmış ve daha yüksek sıcaklıkta daha yüksek SBM'ne yol açmıştır.

Canakcı ve ark. (2019), Derin karıştırma yönteminde, düşük plastisiteli killi (CL) zeminlerde uçucu kül, pirinç kabuğu-taban külü, silis dumanı, cam- mermer tozu, cüruf ve metakaolin esaslı geopolimer numuneler ile Portland çimentosu ile hazırlanmış numuneler kıyaslanmıştır. Geopolimer ve Portland çimentosu numunelerde kür süresinin artmasıyla dayanımın arttığı belirtilmiştir. Geopolimer numunelerde basınç dayanımının yüksek olduğu bildirilmiştir. Çalışma sonunda;

- Uçucu kül (F) esaslı geopolimerlerde kireç içeriğinin düşük olması, jel oluşumunun yetersiz olduğunu,
- Uçucu kül (C) esaslı olan geopolimerlerde kireç içeriğinin yüksek olması hidrasyonu olumlu etkilediğini ve dayanımın arttığını,
- Cüruf esaslı geopolimerlerde alkali aktivitesi oranının artışı dayanımı arttığını, cürufa içerisine metakaolin, taban, pirinç kabuğu, külü eklenmesi ile dayanımın düştüğünü.
- Cam tozunda düşük alümina ve kalsiyum içeriği kısa dönemde düşük dayanımın elde edildiğini, alkali aktivatör oranının ve silikanın artışıyla dayanımda artış olduğunu.
- Metakaolin esaslı numunelerde işlenebilirliğin düşük olması sebebiyle dayanımın düştüğü bildirilmiştir.
- Maksimum dayanımın cüruf ve SD+cüruf esaslı geopolimerlerde olduğu belirtilmiştir.

Görhan (2020), çalışmasında kaolin kilini farklı sıcaklıklarda metakaoline dönüştürerek metakaolin esaslı geopolimer harç numuneler hazırlanmıştır. Kalsinasyon sıcaklığının metakaolin iç yapısında viskoziteyi etkilediğini, geopolimerin yapısında değişim olmadığını belirtmiştir. Kalsinasyon sıcaklığı 700°C'de iken dayanımların yüksek olduğunu, 700°C'den daha fazla sıcaklıklarda basınç ve eğilme dayanımlarının düştüğünü belirtmiştir.

Aygörmez (2018), metakaolin, silis dumanı ve kolemanit malzemelerden elde edilen geopolimerlerin mekanik ve durabilite, dayanıklılık özellikleri açısından incelenmiştir. İkame edilen malzemelerin faydalı olduğunu, dayanımlar açısından önemli bir iyileşme sağladığı belirtilmiştir. %100 metakaolin esaslı geopolimer numuneler ile %10 kolemanit ve %20 silis dumanı katkılı numuneler (28 günlük) karşılaştırıldığında basınç dayanımında sırasıyla %2. ve %11.5 'lik bir artış, eğilme dayanımında da %14.7 ve %29 artışın olduğu görülmüştür. Polipropilen lif takviyeli numunelerde, eğilme dayanımında artış, basınç dayanımında bir artış elde edilmemiştir. Polipropilen liflerin eklenmesi, numunelerin eğilme dayanımının ve aşınma direncinin artmasına neden olmuştur. SEM, XRD ve mikroyapısal analizleri incelendiğinde iyi bir geopolimerizasyon bağı oluşturduğu ifade edilmiştir.

Geçkil ve ark. (2020), YFC ile stabilize edilerek güçlendirilmiş bir yol taban zeminin esnek yol üstyapısının tabaka kalınlıklarına ve maliyetlerine etkisini araştırma yapmışlar. Çalışmada kapsamında kil zemine ağırlıkça, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında YFC ilavesiyle stabilize zemin numuneleri hazırlanılmıştır. Deney numuneleri serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutulduktan sonra elde edilen en yüksek dayanımı veren YFC oranı %20 olarak belirlenmiştir. AASHTO 1993 yöntemine göre saf killi zemin ve %20 YFC ile stabilize edilmiş zeminin tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır. Sonuç olarak %20 YFC ile stabilize edilen zeminin tabaka kalınlığının saf killi zemine göre %26,67 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Yalghuz (2020), yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, ham ve genleştirilmiş perlit, metakaolin, malzemeler, NaOH, KOH ve Na₂SiO₃ alkali çözeltileriyle ısıtılı kürlü-ısıtılı kürsüz hazırlanmış geopolimerlerin dayanımları araştırılmıştır. Isıtılı kür ile üretilen geopolimerlerin dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Fakat ikiden fazla malzeme karışımında bağların zayıflaması sonucunda dayanımın düştüğünü, metakaolin esaslı geopolimerlerde gözeneklerin küçük olması nedeniyle dayanımın yüksek olduğu belirtilmiştir. Boşluk oranının fazla olan perlit geopolimerlerde, dayanımın düşük, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı katkılı geopolimerlerde ise jelin daha iyi oluşmasıyla dayanımların yüksek olduğu belirtilmiştir.

Abdila ve ark. (2021), yapmış olduğu çalışmada, zemin granüllü yüksek cüruf ve uçucu kül (C sınıfı) bazlı geopolimer prosesleri kullanılarak killi zemin

stabilizasyonunun daha fazla araştırılması için çalışma yapılmıştır. Sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikatın (Na_2SiO_3) molaritesi 10 molar olarak sabitlenmiş ve sodyum silikatın (Na_2SiO_3) sodyum hidroksite (NaOH) oranı 2 olarak belirlenmiştir. Fırın cürufunun etkilerini ve 1 ve 7 gün boyunca kürlen 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 ve 3:1'lik uçucu kül (katı)/alkali aktivatör (sıvı) oranlarını araştıran bir çalışma olmuştur. Zemin stabilizasyonuna dayalı geopolimer prosesinin mekanik özellikleri, serbest basınç deneyi kullanılarak test edilmiştir. Zemin stabilizasyonunun karakterizasyonu ise plastik limit testi, likit limit testi, SEM, XRD ve FTI analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak, 7 günlük kür süresinde elde edilen en yüksek mukavemetin, 1.5 GGBS/alkali aktivatör oranı ve 2.0 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ile 3.15 MPa olduğunu göstermiştir.

Suksiripattanapong ve ark. (2021), Bangkok'ta mevcut kili iyileştirmek için yüksek kalsiyumlu uçucu kül ve polivinil alkol esaslı geopolimer uygulamaları değerlendirmişler. Numuneler uçucu kül (C) sınıfı %10, %20, %30, %40 ve %50 ve alkali çözelti kombinasyonu ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$) olmak üzere çeşitli oranlarda hazırlanmıştır. Elde ettikleri sonuçlarda da belirtildiği gibi 7 ve 28 günlük kur süresi sonunda karışımdaki uçucu kül oranını artırarak basınç dayanımını artırmıştır. Basınç dayanımındaki bu artış, geopolimerizasyon reaksiyonunun amorf fazındaki silika ve alümina oksitlerdeki artıştan kaynaklanmaktadır. Basınç dayanımı, uçucu kül içeriği arttıkça %40'a ulaşana kadar artmıştır, ardından, su ve alkali içeriği yüksek uçucu kül içeriği ile reaksiyona girmek için yetersiz kaldığı için, uçucu kül içeriği arttıkça basınç dayanımı azalmıştır.

Abed ve ark. (2022), zemin iyileştirmelerinde fazla miktarda beton dökümü gerçekleştiğini, beton dökümleri sırasında pratikte işlenebilirliğin sağlanamamasından dolayı ve de geopolimerlerin üretiminde alkali aktivatörlerin sorun olduğu için tercih edilmediğini ve bunun önüne geçmek için mekanokimyasal aktive edilmiş geopolimer önerilmiştir. Mekanokimyasal aktivasyon, moleküler yoğun, reaktif ve amorf kümelenmiş kompozit partikülleri gerçekleştirmek için küçük partiküllü katı maddeyi birlikte öğütme veya sarma işlemidir. Farklı cüruf/uçucu kül oranları ve farklı NaOH molariteleri ile 24 farklı mekanokimyasal geopolimer (MG) hazırlanarak geleneksel geopolimer ile karşılaştırılmıştır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde geopolimerler için alkali aktivatör oranı, molarite, kür, kür süresi, sıcaklık, malzeme oranı ve bağlayıcı içeriği Çizelge 2.5’de verilmiştir.



Çizelge 2.5. Literatürde yapılmış olan önceki geopolimer çalışmaları (Abdila ve ark., 2022, Çınar ve Erbaşı, 2022)

Yazar	Bağlayıcı Malzeme	Molarite (M)	Katkı oranı	Kür Süresi (gün) Sıcaklık	Malzeme oranı (s/b)	Alkali Aktivatör oranı
Arıöz, 2015	UK	4M, 8M, 12M	-	6, 15 ve 24 saat Isıl kürlü, (40,80 ve 120 °C)	0.35-0.50	KOH, NaOH, Na ₂ SiO ₃
Abdullah ve Ahmed, 2017	UK	10M	UK %8	7 ve 28, Oda sıcaklığında	-	NaOH, Na ₂ SiO ₃
Phummiphan ve ark., 2017	UK, YFC	5M	UK %30, YFC %10, %20 ve %30	7, 28 ve 60, Oda sıcaklığında	-	
Li ve ark., 2017	Metakaolin (MK)	-	-	30,60 ve 90 gün Isıl kürsüz	1	Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2
Tuyan, 2017	UK	-	-	5 gün, Isıl kürlü, 70°C	0.46	Özel karışım
Anne ve ark., 2018	UK	Na/Al=2.05 Si/Al=2.64 Na/Si:0.78	UK %10 ve %25	7, 14 ve 28, Oda sıcaklığında	-	NaOH, Na ₂ SiO ₃
Tigue ve ark., 2018	UK, volkanik kül	-	-	28 gün, Isıl kürsüz	0.80	NaAlO ₂ , NaOH, Na ₂ SiO ₃
Parhi ve ark., 2018	UK	10M, 12.5M, 15 M	UK %20, %30 ve %40	3 ve 7 Oda sıcaklığında	-	NaOH, Na ₂ SiO ₃
Pen ve ar., 2018	UK, YFC	8M	-	1 gün, Isıl kürlü, 60°C	1:3	Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5
Leong ve ark., 2018	UK	8M	UK/Zemin: 0.3, 0.6, 0.8 ve 0.9	1 gün, 100 °C	-	NaOH, Na ₂ SiO ₃
Shihab ve ark., 2018	UK	10M, 12M ve 14M	UK %8, %10, %12 ve %14	1 gün, 70 °C	-	NaOH, Na ₂ SiO ₃
Thomas ve ark., 2018	YFC	1M	YFC % (6, 9, 12, 15, 20 ve 30)	7 ve 28, Oda sıcaklığında	-	NaOH, Na ₂ SiO ₃
Aygörmez, 2018	MK, SD, Kolemanit	12M	-	2-24-72 saat Isıl kürlü, (40, 60 ve 80 °C)	1	NaOH, Na ₂ SiO ₃
Alnuaimi, 2019	Kireçtaşı tozu ve taban külü	-	-	7-28 gün, Oda sıcaklığında	0.75-1.50	Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5

Çizelge 2.5. Literatürde yapılmış olan önceki geopolimer çalışmaları (Abdila ve ark., 2022, Çınar ve Erbaş, 2022)

Yazar	Bağlayıcı Malzeme	Molarite (M)	Katkı oranı	Kür Süresi (gün) Sıcaklık	Malzeme oranı (s/b)	Alkali Aktivatör oranı
Güllü ve ark., 2019	UK	10M	-	Isıl kürsüz	0.75-1	Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5
Çanakçı ve ark., 2019	UK, MK, Pirinç kabuğu, cüruf, SD, Mermer tozu, Cam tozu, taban külü	8M-16M	-	7-365 gün, Isıl kürsüz	0.85-1.25	Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5
Sukprasert ve ark., 2019	UK, YFC	5-10-15M	-	7 gün, Isıl kürü, (25, 50 ve 80 °C)	-	NaOH
Yalghuz, 2020	UK, YFC, UK, SD ve Ham-Genleştirilmiş Perlit	8M	-	12-24 saat, Isıl kürü, (100 °C)	0.30-0.50	KOH, NaOH, Na ₂ SiO ₃
Görhan, 2020	Metakaolin	9M	-	24 saat, Isıl kürü	-	NaOH
Güllü ve Agha, 2020	Metakaolin, Cüruf	12M	-	7 ve 28, Oda sıcaklığında	1	Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5
Abdila ve ar., 2021	YFC (İnce öğütülmüş)	10M	-	1-7 gün, Isıl kürsüz	-	Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2
Tok, 2021	Cüruf, Bentonit ve %8 SA	6M-8M	-	48 saat, Isıl kürü 60 °C	1	NaOH, Na ₂ SiO ₃
Phetchuay ve ark., 2016	Kalsiyum karbür atığı (CaC ₂), UK	3M-18M	-	3-7-14-28 gün, Isıl kürü 40 °C	1, 1.5, 2	Na ₂ SiO ₃ /NaOH=6/4 Na ₂ SiO ₃ /NaOH=7/3 Na ₂ SiO ₃ /NaOH=8/2 Na ₂ SiO ₃ /NaOH=9/1
Mutlu, 2021	YFC, MK	8M	-	7-28 gün, Oda sıcaklığında	0.45	KOH, Na ₂ SiO ₃
Al Qaysı, 2021	Cüruf, UK	6M-8M	-	7 gün	1	NaOH, Na ₂ SiO ₃
Yetim, 2021	UK, nano silika	10M	-	28 gün, Oda sıcaklığında	0.50-1.50	Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5
Abed ve ark., 2022	Cüruf, UK	1.25, 2.5, 3.75M	-	7-28 gün, Isıl kürsüz	0.60	NaOH
Wang ve ark., 2022	YFC, Çelik cürufu, Alkali kalıntısı	-	-	1, 3, 5 ve 7 gün, Isıl kürsüz	ASTM'ye göre	Alkali Kalıntısı

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan materyallerin kimyasal ve fiziksel özellikleri açıklanmıştır. Kil zemini tanımlamak amacıyla elek-ıslak analiz, kıvam limitleri, standart kompaksiyon, serbest basınç, CBR ve permeabilite deneyleri ilgili standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada birden fazla öncül kullanıldığı için Taguchi yöntemi ile deney tasarımıyla faydalanılmıştır.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.1.1. Uçucu kül

Kütahya Seyitömer termik santralden getirilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Şekil 3.1’de uçucu kül ve uçucu külün kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’te verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan uçucu kül (F sınıfı)

Çizelge 3.1. Uçucu kül kimyasal bileşimi (Türker ve ark., 2009,)

Oksit (%)	Uçucu Kül	ASTM C 618	
		F	C
SiO ₂	54.49		
Al ₂ O ₃	20.58		
Fe ₂ O ₃	9.27		
Si+Al+Fe	84.34	>70.00	>50.00
CaO	4.26	<10.00	>10.00
MgO	4.48		
SO ₃	0.52	<5.00	<5.00
K ₂ O	2.01		
Na ₂ O	0.65		
KK	3.01	<6.00	<6.00
Cl-	0.006		
Serbest CaO	0.26		
Reaktif SiO ₂	39.01		
Reaktif CaO	2.49		

3.1.2.Yüksek fırın cürufu

YFC, Karabük ilinden Kardemir Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret LTD öğütülmüş olarak temin edilmiştir (Şekil 3.2). Özgül ağırlığı 2.86 g/cm^3 tür. Çizelge 3.2’de YFC’nin kimyasal içeriği verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi

Kimyasal içerik	Bileşimi %
SiO ₂	35.84
Al ₂ O ₃	12.71
Fe ₂ O ₃	1.85
CaO	34.66
MgO	6.04
SO ₃	1.84
K ₂ O	0.96
Cl	0.02
TiO ₂	2.03
Cr ₂ O ₃	0.03
Toplam	95.92
Nem	7.14



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan yüksek fırın cürufu

3.1.3. Aktifleştirici malzeme Sodyum Hidroksit (NaOH)

Çalışmada kullanılan aktifleştirici olarak sodyum hidroksit (NaOH) (kostik soda veya sud kostik de denir), bir inorganik bileşiktir. Sodyum katyonları Na^+ ve hidroksit anyonları OH^- içeren beyaz renkte nem çekme özelliğine sahip katı bir iyonik bileşiktir. Birçok endüstride ve kimyada kullanılan temel bileşiği sodyum, hidrojen ve oksijen elementlerinden elde edilir. Nasıl ortaya çıktığı bilinmemekle beraber kostik maddesi (NaOH) ilk defa 1807 yılında Humphrey Day tarafından keşfedilmiştir. Kokusuz, suda çözünür, yumuşak ve kaygan bir çözeltiye dönüşür. Sıvı veya katı halde olabilir. Katı hali pırıltılı, küçük pullu ve boncuk şeklinde, sıvı hali ise sulu ve kaygan bir çözelti şeklindedir. Çıplak el ile dokunulduğunda kaşıncı ve yanma bir etkisi vardır.

Üretimi kolay olan kostik, doğal olarak meydana gelmez. Kostik soda, su çözeltisi içinde sodyum klorürün elektrolizinin bir sonucu olarak veya sodyum karbonat ve kalsiyum hidroksit arasında iki yönlü bir yer değiştirme reaksiyonu ile elde edilir. Ardından, klor gazı kaçar. NaOH'ı katı olarak elde etmek için çözelti içerisindeki suyun buharlaştırılması gerekir. Hidroksitte molarite 40 gr/mol'dür.

Çalışmada UK ve YFC esaslı geopolimer karışımları aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılmıştır. Çizelge 3.3'de alkali aktivatörün fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Sodyum hidroksitin (NaOH) özellikleri

Moleküler formülü	NaOH
Molekül kütlesi (g/mol)	40
Renk	Beyaz
Ph	13-14
Yoğunluk (g/cm ³)	2.13

Numunelerin hazırlanmasında kullanılan sodyum hidroksit çözeltisi 4 farklı konsantrasyonlarında hazırlanmıştır. Çizelge 3.4'de sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisini hazırlamak için gereken katı parçacıkların ağırlığı verilmiştir.

Çizelge 3.4. Sodyum hidroksit çözeltisinin konsantrasyonları

Molarite (Mol/L)	Sodyum hidroksit (g)
6	240
8	320
10	400
12	480

6, 8, 10 ve 12 mol/l farklı konsantrasyonlarda sodyum hidroksit çözeltisi elde etmek için, şebeke suyu ile katı NaOH birlikte karıştırılarak çözeltiler hazırlanmıştır. Katı granüllerin çözünmesini sağlamak için iyice karıştırılmıştır. Yüksek konsantrasyonlarda sodyum hidroksit çözeltileri hazırlanırken, yüksek reaksiyon sıcaklığının bir sonucu olarak kırılmalarını önlemek cam kaplar kullanılmıştır. Reaksiyonun bitmesini ve nihai konsantrasyona ulaşmasını sağlamak için solüsyon kullanımdan 24 saat önce hazırlanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanması

3.1.4. Zemin fiziksel ve endeks özellikleri

Deneysel çalışmalar zemin mekaniği laboratuvarındaki deney ekipmanları ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Konya İli, Selçuklu İlçesi, Organize Sanayi bölgesinden getirilen malzeme (kil) kurutulmuş ve zemin mekaniği deneyleri (elek analizi (ASTM D 6913-04, 2009) hidrometre (ASTM D422-63, 2007), piknometre (ASTM D 854, 2010, 2010), birim hacim ağırlık deneyleri, Atterberg limit deneyleri (ASTM D4318 2017)) yapılarak zemin sınıfı belirlenmiştir (Şekil 3.4). Kil zeminde tespit edilmiştir. Standart Proktor, serbest basınç, CBR ve permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler kullanılan ekipmanlar ve deneylerin yapıldığı yöntemleri detaylıca açıklanmıştır.



Şekil 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan zeminin coğrafi konumu

3.3.4.1. Elek Analizi

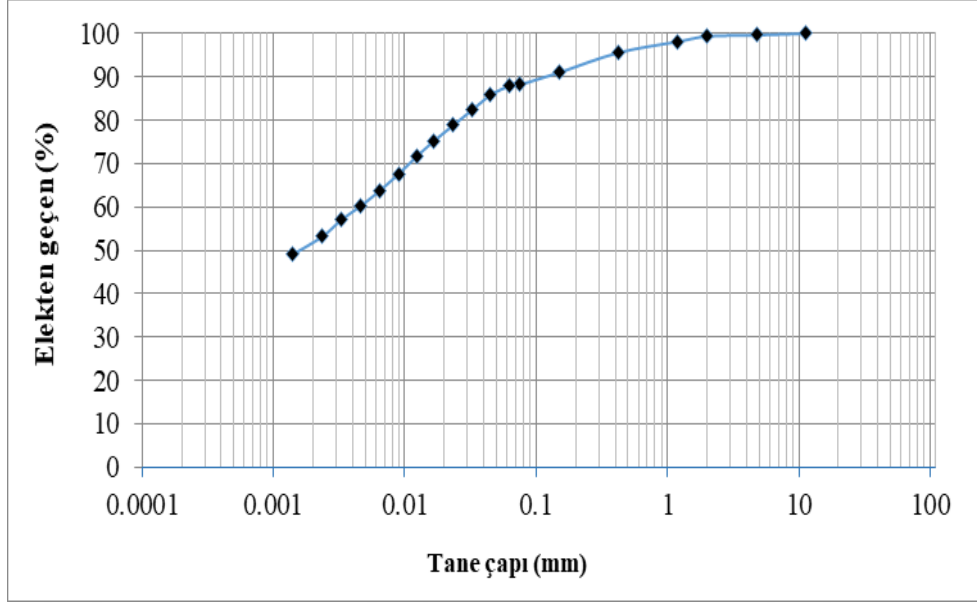
Zemin sınıflandırması, zemin malzemelerinin plastik davranışını anlamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada, ASTM standardına göre elek analizi ile dane boyut dağılımı belirlenmiştir. Elemelerde taneler, belirli büyüklükteki deliklerden veya açıklıklardan geçmelerine bağlı olarak büyüklüklerine göre sınıflandırılır. Farklı büyüklükteki partiküllerden oluşan zemin veya öğütülmüş materyalin "dane boyutu dağılımını" belirlemek için eleme veya elek analizi yapılır. Tane boyutu dağılımı, bir numunedeki parçacıkların sayısı ile boyut arasındaki ilişkidir. Elek analizi, bu numunenin içerdiği boyuttaki malzeme miktarını gösterir. Bir malzemenin parçacık boyutu dağılımını bilmenin birçok avantajı vardır.

Geopolimer karışımında kullanılacak kil numunesi etüvde gün bir süre ile kurutulduktan iri taneli kısımları Maden Mühendisliği Cevher hazırlama laboratuvarında çeneli kırıcı ile kırılarak belirli büyüklüğe kadar kırılmıştır. Daha sonra Zemin Mekaniği laboratuvarında öğütme makinesi ile öğütülmüştür (Şekil 3.5). Öğütülmüş zemini nemden arındırmak amacıyla 24 saat etüvde bekletilmiştir



Şekil 3.5. Zemin öğütme ve hazırlama işlemleri

Zemin numunesinin 200 nolu elekten geçen kısmı %50'den fazla olduğu için ASTM D2487, 2017 standardına göre birleşik zemin sınıflandırma sistemi (UCSC) göre yüksek plastisiteli kildir (CH). Tane çap dağılımı eğrisi Şekil 3.6'da elek ve ıslak analizi deneyi sonuçları Çizelge 3.5'de verilmiştir.



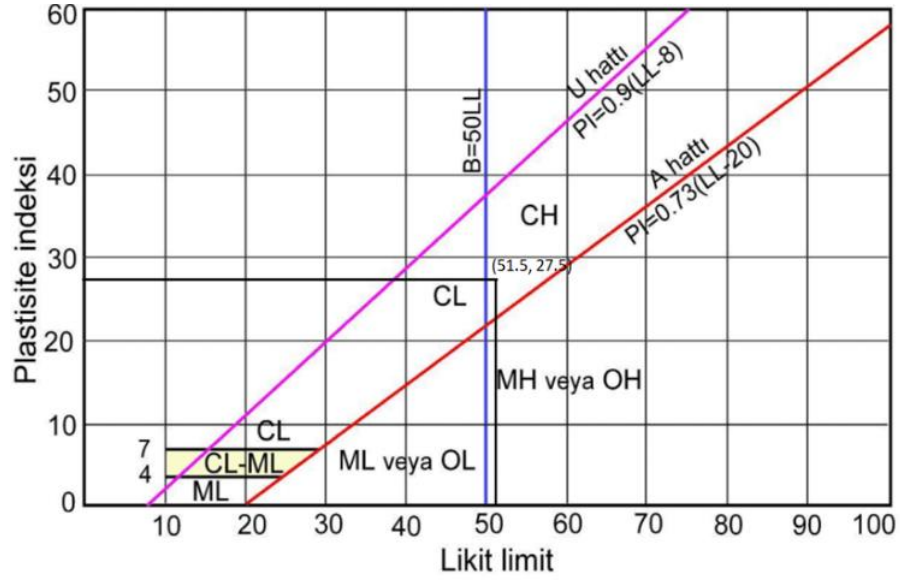
Şekil 3.6. Kilin tane çap dağılımı grafiği

Çizelge 3.5. Elek ve ıslak analiz sonuçları

Tane Çapı	Bileşenler	%
4.75>	Çakıl	0.34
4.75-0.075	Kum	11.43
0.075-0.002	Silt	36.58
<0.002	Kil	51.65

3.3.4.2. Kıvam limitleri

İnce taneli zemini tanımlayan en önemli parametre kıvam limiti ile elde edilir. Atterberg 1911’de zemin-su karışımının kıvamındaki bu değişikliği tanımlamak için bir alt sınır ve bir üst sınır olmak üzere en az iki parametre kullanmıştır. Kilin plastisitesini kaybettiği limiti plastik limit, viskoz akışın alt limitini ise likit limit olarak adlandırmıştır. Başka bir deyişle zeminin su oranının fazla olmasıyla zemin akışkan olması ve kayma direnci yok olur. Kuru oldukları zaman kayma dayanımı artmaktadır. Büzülme limiti yarı katı halden katı duruma, plastik limit (PL) plastik durumdan yarı katı hale, likit limit (LL) ise zeminin sıvı (vizkoz) durumdan plastik duruma geçtiği sınır su muhtevası değerleridir. Bu sınır değerler zeminin mekanik özellikleri ile ilgili bilgi vermektedir. (Şekil 3.7) Çizelge 3.6’da kilin fiziksel özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.7. Zeminin plastisite indeksinin tayini

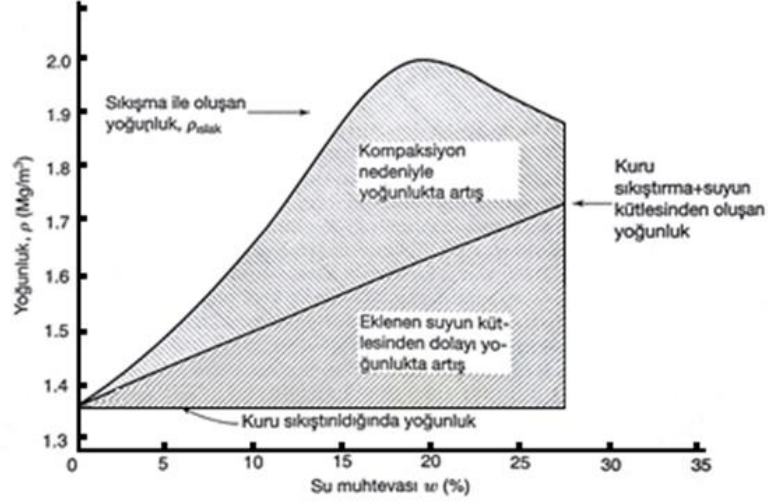
Çizelge 3.6. Deneylerde kullanılan killi zemin özellikleri

Özgül ağırlık	2.68
Optimum su muhtevası %	22
Maksimum kuru yoğunluk (g/cm ³)	1.61
Likit limiti	51.5
Plastik limiti	24
Plastisite indeksi	27.5
Zemin sınıfı (USCS)	CH

3.3.4.3. Standart Proktor deneyi

Tabaka halinde serilen zemin titreşimli silindirler ve tokmaktama gibi işlemlerle zeminini boşluk oranının azaltılması ve zemin tanelerin daha sıkı bir yapı almasını sağlayan mekanik işlemlerdir. (Önalp ve Arel, 2014).

Zemin taneleri ve taneler arasındaki su sıkışmaz, sıkışma boşluklardaki havanın sıkışması veya dışarı çıkması sonucu kısa sürede gerçekleşir (Uzuner, 2014). Mekanik enerji uygulanarak zeminin yoğunluğunun artırıldığı zemin iyileştirme tekniğidir (Şekil 3.8). Zemin stabilizasyonu mekanik, kimyasal, termal veya elektriksel olarak yapılmaktadır (Erken, 2015). Amaç, zeminin sıkıştırılması sonucunda maksimum kuru yoğunluğu veren su içeriğinin elde edilmesidir (Aytekin, 2004).



Şekil 3.8. Su içeriği-kuru birim ağırlık ilişkisi (Erken, 2015)

Deney, 956 cm³ iç hacmindeki ve standart kalıp içerisine üç tabaka halinde zemin serilerek her bir tabaka 2.5 kg ağırlığındaki tokmağın 30.5 cm yükseklikten serbest düşüşü ile yatayda homojen şekilde dağıtılan 25 vuruş ile sıkıştırılır. İki tabaka arasındaki aderansı sağlamak için her tabaka serilip, 25 defa serbest düşme hareketine maruz bırakıldıktan sonra sivri uçlu bir delici ile tabaka üzerine çizikler veya delikler açılır. En üsteki tabakanın sıkıştırılması için silindirik kabın yakası takılarak son tabaka sıkıştırılır ve sonra yaka çıkarılır. Üst kısımdaki fazla zemin ıspatula ile düzeltilir. Sıkıştırılmış zeminin ağırlığı kalıpla birlikte tartılır.

Ağırlığı ve hacmi belli olan kalıp içindeki malzemenin doğal birim hacim ağırlığı bağıntı 3.1'den hesaplanır. Kalıptan çıkarılan numunenin farklı kısımlarından örnekler alınarak su muhtevası ortalaması hesaplanır.

Bağıntı 3.2'den kuru birim hacim ağırlık belirlenir. $\gamma_{k,max-w}$ (kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası) grafiği çizilirken her bir karışım için deneyler, farklı su içeriklerinde tekrarlanır.

$$\gamma_n = \frac{W_{yaş}}{V_{kalıp}} \quad (3.1)$$

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1 + w} \quad (3.2)$$

Burada;

$W_{yaş}$: Zeminin doğal (tabii) ağırlığı (kN, g)

$V_{kalıp}$: Kalıp hacmi (cm³, m³)

w: Su içeriği (%)

γ_n : Doğal birim hacim ağırlığı (g/cm³, kN/m³)

γ_k : Kuru birim hacim ağırlığı (g/cm³, kN/m³)

Taguchi yöntemi kullanılarak deney tablosu oluşturulduktan sonra standart Proctor deneyi yapılmıştır. Kompaksiyon deneyleri ASTM D698 12e2 (2012), standardına göre yapılmıştır. Bu test sayesinde kompaksiyon parametreleri (ω - ρ_{kmak}) belirlenmiştir. Deney kapsamında ve seçilen tasarımlara göre killi zemine belirli oranlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve su ilave edilerek karışım iyice karıştırılmıştır. Hazırlanan bu karışım çelik silindir kalıba 3 tabaka olacak şekilde tokmak yardımıyla 25 kez sıkıştırılmıştır (Şekil 3.9).

Kompaksiyon işlemi sonunda numunelerin yoğunlukları hesaplanmıştır. Su içeriğini belirlemek için kalıbın alt-orta-üst kısımlarından alınan numuneler hassas terazide tartılarak 105°C sıcaklıkta etüvde kurutulmuştur (Şekil 3.10).



Şekil 3.9. Kompaksiyon deneyin yapılması



Şekil 3.10. Numunelerin etüvde kurutulması

3.3.4.4. Serbest basınç deneyi

Dayanım testi, zemin numunelerinin kırılma ve deformasyona karşı direncinin belirlenmesi ve kontrol edilmesi için en önemli testlerden biridir. Basınç dayanım deneyleri zemin mekaniği laboratuvarındaki beton pres deney aleti yapılmıştır. Aşağı yönde hareket eden ve iki plaka arasına yerleştirilen numunelerde basınç yükü altındaki malzemelerin davranışları belirlenmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Serbest basınç deney aleti

Deneyler ASTM D1633-17 (2017), standardına göre yapılmıştır. Deney numunesi basınç deney plakasının merkezine yerleştirilmiştir. Deney aleti çalıştırılarak numunenin üst plakaya temas etmesi sağlanmıştır. Aletin hareket hızı 1.5 mm/dk seçilmiştir. Numune yüklendikten sonra, belli deformasyon değerlerine karşılık gelen yük okumaları bilgisayara aktararak numunenin yük-deformasyon değerleri kaydedilmiştir. Numunenin kırılması ile deney sonlandırılmıştır. Eğer numunede kırılma veya çatlamlar görünmüyor ise numunenin gözle görülebilir bir kırılma düzlemi oluşuncaya kadar yüklemelere devam edilmiştir.

Çalışma kapsamında için oluşturulan test numuneleri 95 mm yüksekliğinde ve 47.50 mm çapında ($H=2D$) silindirik numunelerdir. Numuneler plastik kalıplara yerleştirilip plastik torbalarda kür süresince (7 ve 28) gün beklenmiştir Şekil (3.12) ve (3.13). Test numuneleri kalıptan çıkarılmış ve üst ve alt plakaların ortasında dik yönde basınç cihazına yerleştirilerek test uygulanılmıştır. Hesaplamalar aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır;

Basınç dayanımı:

$$\sigma_B = P_{\max} / A_f \quad (3.3)$$

$$A_f = A_0 / (1 - \epsilon) \quad (3.4)$$

Buradaki:

σ_B : Serbest basınç mukavemeti

$P_{\max}$: Numunenin maksimum kırılma yükü

A_f : Kırılma anındaki en kesit alanı

A_0 : Başlangıç en kesit alanı

ϵ : Birim boy değiştirme



Şekil 3.12. Serbest basınç numunelerinin hazırlanmasının görünümü



Şekil 3.13. Serbest basınç numunelerinin plastik torbalarda saklanması

3.3.4.5 CBR deneyi

CBR deneyi, genelde yol dolgusu, temel ve alt temel malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin mukavemetini değerlendirmek için yapılan bir deneydir. Belirli bir su içeriği ve yoğunluğu olan zeminlerin taşıma kapasitesini belirlemek için yapılmaktadır. 2.5 ve 5.0 mm'lik penetrasyondaki taşıma oranı değerleri hesaplanır. Elde edilen iki değerden yüksek olanı zeminin taşıma oranı değeridir. Ayrıca havaalanı kaplamalarının, limanlar ve demiryolu dolgularının taşıma oranını belirlemek içinde kullanılmaktadır. Çizelge (3.9), CBR değerleri belirlenen zeminlerin sınıflandırma sistemine göre kullanım alanlarını göstermektedir. Denklem 3.5 kullanarak CBR değerleri hesaplanmıştır:

Çizelge 3.7. CBR değerlerine göre sınıflandırma (Bowles, 1988)

(%)	Değerlendirme	Kullanım Alanı
0-3	Çok zayıf	Doğal zemin
3-7	Zayıf	Doğal zemin
7-20	Orta	Alt temel
20-50	İyi	Temel veya alt temel
>50	Çok iyi	Temel

$$\text{CBR} = (P/P_s) \times 100 \quad (3.5)$$

Burada;

P: 2.50 ve 5.00 mm'ye karşılık gelen yük değerleri,

P_s: standart yük [(2.5, 5 mm) penetrasyon için sırasıyla (13.24 kN, 20.012 kN)].

CBR deney numuneleri için kür süresi (7, 28 günlük) tamamlandıktan sonra numuneler, zemin mekaniği laboratuvarında bulunan basınç deney makinesinde kalıptan çıkarılmadan yerleştirilmiş ve yüklere tabi tutulmuştur. Test için hazırlanan numunelere ait bazı görüntüler Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. CBR numunelerinin hazırlanmasının görünümü

3.3.4.6. Permeabilite deneyleri

Zeminin içinde geçen sıvı miktarını belirleyen en önemli faktörlerden biri zeminin geçirgenliğidir. Genelde geçirgenlik, bir zemin kütlelerinin belirli bir periyotta birbirine bağlı boşluklardan geçen su miktarı ile temsil edilmektedir. Hem arazi hem de laboratuvar deneyleri ile belirlenebilir. Zemin geçirgenlik katsayısının belirlenmesinin

çok önemli olduğu, yapılması zor, zaman alıcı ve pahalı olduğu kabul edilmektedir (Sinha ve Wang, 2008). Geoteknik açıdan, zemin geçirimsizliği, zemin su muhtevası, boşluk oranı, zemin yoğunluğu, mineraloji, zemin yapısı ve diğer özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır (Pham ve ark, 2021). Zemin geçirgenliği, geçirgenlik katsayısı (cm/s-m/sn) ile ifade edilir ve “k” sembolü olarak gösterilmektedir (Das, 2006).

Permeabilite (geçirimsizlik) deneyleri tasarıma göre hazırlanan geopolimer numunelere uygulanmıştır. Permeabilite deneyi, ASTM D5084-16a standardına göre üç eksenli deney düzeneğinde yapılmıştır. Numunelerde geçirimsizlik deneyleri 28 günlük kür süresi sonunda yapılmıştır. Geopolimer numunelerde geçirimsizliğin küçük olacağı öngörülerek düşen ve sabit seviyeli deney düzenekleri kullanılmamıştır. Karışımlar hazırlandıktan sonra karışım 30 mm yüksekliğinde ve 47.5 mm çapında plastik kalıplara yerleştirilmiştir. Burada numunelerin 30 mm yüksekliğinde hazırlanmasının nedeni suyun drenaj yolunu kısaltmak içindir (Deng ve ark., 2015).

Numune plastik kalıptan çıkarıldıktan sonra test süresini kısaltmak için 24 saat suda bekletilmiştir. Suyu doygun hale gelen numune kalıptan çıkartılıp, kalınlığı 0.30 mm olan lastik membran kılıf içiresine yerleştirilmiştir. Numune üç eksenli basınç deney düzeneğinde konularak, yük başlığı numune üzerine yerleştirilip sızmayı engellemek amacıyla numunenin alt ve üst kısmına o-ring ve filtre kâğıdı yerleştirilmiştir. Su geçiş borusu bağlandıktan sonra üç eksenli aletin şeffaf haznesi yerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.15 ve 3.16).

Hücre basıncı 400 kPa ve geopolimer numunelerden geçecek olan su basıncı 300 kPa ayarlanıp numuneden su çıkışına izin verilmeye başlanmıştır. Su çıkışında sabit bir hıza ulaşılan kadar beklenmiştir. Kararlı bir akış elde edildikten sonra deney sonlandırılmıştır. Çıkış hızının sabitlendiği görüldükten sonra belirli bir t (sn) süresi için numuneden geçen su miktarı belirlenmiştir. Geçirimsizlik katsayısı Darcy, (1856) yasasına göre Denklem 3.6’dan hesaplanmıştır.

$$k = QL/(A \times \Delta h) \quad (3.6)$$

Burada

k: geçirimsizlik (permeabilite) katsayısı (m/s)

Q: su akış hızı (m³/s)

L: suyun akış yolu boyu (m)

A: akış kesiti alanı (m²)

Δh : basınç gradyanı (m/m)



Şekil 3.15. Permeabilite deneyine ait görüntüler



Şekil 3.16. Üç eksenli deney aletinde geçirimsizlik

3.4. İstatiksel Deney Tasarım Yöntemi

Deneyin istatistiksel analizi, farklı değişkenler arasındaki ilişkiyi anlamak ve bu değişkenlerin potansiyel etkilerini değerlendirmek ve incelemek için yapılan deneyden toplanan verileri istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır (Montgomery, 1999). İstatistiksel analiz sonuçlarını temel alarak, değişkenler arasındaki ilişkiler açıklanır ve elde edilen sonuçlar üzerinde önemli etkisi olan faktörler belirlenmektedir. Genellikle

deneyin istatistiksel analizinin, değişkenler arasındaki ilişkilerin anlaşılmasına, kalite ve verimliliğin artırılmasına, belirlenen hedeflere daha doğru ve etkili bir şekilde ulaşılmasına yardımcı olduğu söylenebilmektedir.

3.4.1. Taguchi deney tasarımı

Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi, Japon mühendis Dr. Genichi Taguchi tarafından 1950'lerde geliştirilmiş bir deneysel tasarım yöntemidir. Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi, otomotiv, elektronik, tıp, gıda ve birçok çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. (Taguchi, 1987) Endüstriyel ürün ve süreçlerin tasarımında yaygın olarak kullanılan deneysel bir istatistiksel tasarım yöntemidir (Taguchi, Elsayed ve Hsiang, 1989). Bu yöntemde, minimum deney sayıda ile minimum maliyetle maksimum kaliteyi elde etmek için tasarım parametrelerini optimize etmeye odaklanabilmektedir. Bir tasarımın doğru olup olmadığını belirlemek için çok küçük ölçekli deneyin yapılması yerine, daha az sayıda büyük ölçekli deney yapı yapı sonuçların güvenli ve daha doğru olmasını sağlamaktadır.

Taguchi Deneysel Tasarım yönteminde, her tasarım parametresini ayrı olarak değil, diğer parametrelerle birlikte optimize etmektedir. Bir tasarım parametresindeki değişikliklerin diğer parametreler üzerindeki etkileri böylece dikkate alınmaktadır (Karna ve Sahai, 2012).

Taguchi, varyasyonu azaltmak veya ortadan kaldırmak için ürün tasarımı ve üretim sürecinde kullanılabilecek bir kalite mühendisliği stratejisi geliştirmiştir. Strateji üç aşamadan oluşmaktadır.

- Sistem Tasarım aşaması: Bu aşamadaki, tasarımda kavramsal düzeyde daha yüksek düşünme, yaratıcılık ve yenilikçiliği içermektedir. Tasarım özelliklerini geliştirmek için başlangıç noktasıdır.
- Parametre Tasarımı aşaması: Bu aşamada ürün veya proses özelliklerini kontrol eden faktörler (parametreler) belirlenmektedir.
- Tolerans Tasarım aşaması: Başarıyla tamamlanan parametre tasarımı ve farklı parametrelerin performans üzerindeki etkisinin anlaşılması sayesinde, varyans azaltmayı kontrol etmek için kaynakları en düşük ve en kritik seviyelerde odaklamak mümkündür.

Taguchi tasarım yönteminde bir süreci optimize etmek için kullanılan 8 adım şu şekilde sıralanabilir (Karna ve Sahai, 2012):

- 1. Adım: Problemin tanımlanması
- 2. Adım: Test koşulları ve özelliklerin seçimi
- 3. Adım: Deney tasarımı (opt. edilecek amaç fonksiyonunu tanımlanması)
- 4. Adım: Kontrol faktörleri ve seviyeleri tanımlanması
- 5. Adım: Ortogonal dizi matris deneyini seçmesi
- 6. Adım: Matris deneyi gerçekleştirilmesi
- 7. Adım: Verilerin analiz edilip, optimum seviyelerin belirlenmesi ve performansın tahmin edilmesi
- 8. Adım: Doğrulama deneyi ve uzun vadeli planlama eylemi yürütmesi

Taguchi yöntemi kullanılarak, çalışmadan elde edilen ölçüm sonuçları Sinyal/Gürültü (S/N) oranına dönüştürülür. S/N oranı, sistemden istenen gerçek değer (ortalama), deney planlanırken dikkate alınmayan ancak test sonucuna etkisi olan bir faktöre (standart sapma) oranıdır. Sinyal faktörü S ile gürültü faktörü ise N ile gösterilir. S/N oranı arttıkça nihai ürünün kalitesi artar. Bu nedenle gürültü değeri düşürken sinyal değerini artırmayı amaçlar. Analizlerde kullanılan S/N oranı Denklem 3.7 ile belirlenmektedir.

$$S/N = -10 \log_{10} [MSD] \quad 3.7$$

MSD değeri (ortalama karesel sapma), hedef değer en büyük, en küçük ve belirli bir değer olması durumları için belirlenebilmektedir. Hedef değeri en büyük, en küçük ve istenen değer olması durumları için MSD değerleri sırasıyla Denklem 3.8, 3.9 ve 3.10'daki eşitliklerden hesaplanmaktadır.

$$MSD_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad 3.8$$

$$MSD_{\min} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad 3.9$$

$$y_{\text{beklenen}} = \sqrt{\frac{1}{MSD_{\text{ort}}}} \quad 3.10$$

y_i = deney (analiz) sonuçları,

n = bir deneydeki tekrar sayısıdır.

Her deneysel parametrenin çıktı sonucunu etkileme derecesini belirlemek için bu prosedürde varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilir. Her terimin F değeri, varyans analizi tablosunda listelenir. F değeri, terimin sonuçla ilişkili olup olmadığını incelemek için kullanılan bir test istatistiğidir. Minitab, kavramların istatistiksel önemine ilişkin bir karar vermek için F-değerine dayalı olarak bir olasılık değeri (p-değeri) hesaplar. Yeterince büyük bir F değeri, terim veya modelin anlamlı olduğunu belirlemektedir.

3.4.2. Geopolimer malzemesinin deney tasarım tablosunun oluşturulması

Bu çalışmada ‘Minitab V17 programı kullanılarak Taguchi deney tasarım yöntemine göre deney tasarım tablosunun oluşturulmuştur. Bu tasarım yöntemi ile kompaksiyon, serbest basınç dayanım, Kaliforniya taşıma oranı ve geçirgenlik deneyleri için bir tasarım tablosu oluşturulmuştur.

3.4.3. Çalışmadaki değişkenler alt ve üst karışım oranları belirlenmesi

Tez çalışmasında bu yöntemle deneysel tasarım tablosu hazırlanırken karışımın değişkenleri ve değişim oranları belirlenmiştir. Bu tasarım yönteminde 3 farklı faktörler ve 4 seviyesinde seçilmiştir. Bu faktörler ve sevişeler oranları yapıldığı önceki deneysel çalışmalara göre seçilmiştir. Çalışmadaki faktörler uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve alkali aktivatör konsantrasyonudur.

Çizelge 3.8. Taguchi tasarımı için L₁₆ ortogonal deney tasarımı

Tasarım No	Uçucu kül U.K (%)	Yüksek Fırın Cürufu Y.F.C (%)	Aktifleştirici NaOH (M)
1	12	8	6
2	12	10	8
3	12	12	10
4	12	14	12
5	16	8	8
6	16	10	6
7	16	12	12
8	16	14	10
9	20	8	10
10	20	10	12
11	20	12	6
12	20	14	8
13	24	8	12
14	24	10	10
15	24	12	8
16	24	14	6

3.5. SEM-EDS, XRD Analizlerinin Yapılması

3.5.1. SEM analizi

Elektron mikroskobu, odaklanmış bir elektron demeti kullanarak numune yüzeyini tarayarak görüntü elde etmek için kullanılan bir tür mikroskoptur. Yüzeyi taramak için elektron demeti, raster tarama tekniği kullanılır ve demetin konumu, tarama sırasında algılanan sinyallerle eşleştirilerek bir görüntü oluşturulur. Elektron ışınlarının katı bir cisim üzerine gönderilerek, cisimden yansıyan elektronlarla cismin iç yapısını gösteren bir cihaza taramalı elektron mikroskop denir. Elektronlar, katı bir cisimle etkileşime girdiğinde ya yansıma yapar ya da emilir. Yansıyan elektronlar çeşitli sinyaller üretebilir. Bu sinyaller, numunenin yüzeyiyle etkileşime gelen elektron demetinin sonucunda ortaya çıkan ikincil elektronlar (SE), geri yansıyan elektronlar (BSE), Auger elektronları (AE) ve diğer yansıyan elektron sinyallerini ifade etmektedir. Her bir sinyal, numunenin yüzey özellikleri, bileşimi ve kristal yapısı hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu teknikler, taramalı elektron mikroskoplarında yüzey ve arayüz analizlerinde kullanılır. SEM analizinde, yapı malzemelerinin bileşimini görüntülemek için genellikle 0.2 ila 30 kV arasında bir voltaj seçilebilir. Ancak, çimento ve beton örnekleri üzerinde çalışırken, 15 ila 20 kV arasında bir voltaj seçimi daha uygun olabilir. Özellikle yüksek hacimli mineralojik ikameler veya katkı maddeleri (silis dumanı, mermer tozu, yüksek fırın cürufu, uçucu kül vb.) içeren numunelerde, en uygun voltaj genellikle 15 kV olarak belirlenir.

SEM, 1 nanometreden daha yüksek bir çözünürlük elde edebilen bir mikroskop türüdür. Çizelge 3.7 ve 3.8'de verilen Taguchi deney tablolarında bulunan 3 tasarım numunesi (en yüksek T_4 , en düşük T_1 ve ortalama dayanım T_{13} numuneleri) için SEM analizleri yapılarak geopolimer zeminlerin mikro yapıları, serbest basınç ve CBR deney sonuçlarıyla ilişkilendirilmiştir (Şekil 3.17). SEM analizleri Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan cihazlarda gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.18).



Şekil 3.17. SEM analizi için seçilen numuneler



Şekil 3.18. SEM analizi gerçekleştirilmesi

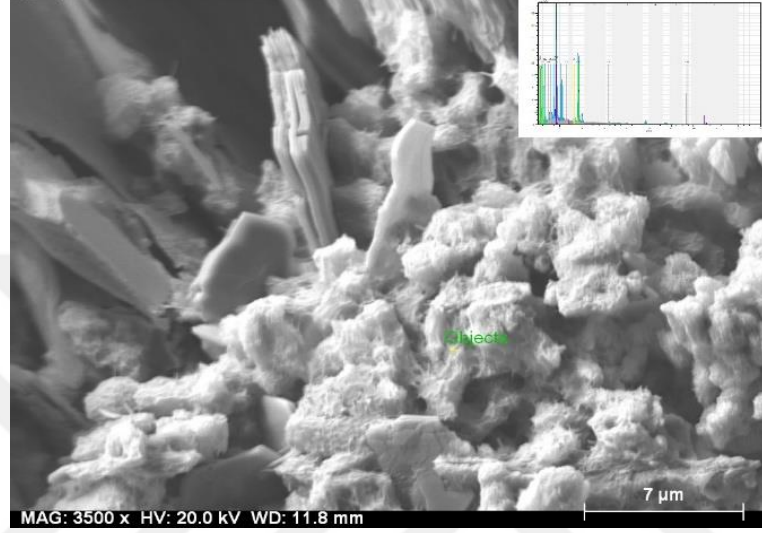
3.5.2. EDS analizi

Yapı numunelerine yüksek enerjili elektron tanecikleri çarptığında, X ışınları oluşur. Bu X ışınları, numunede bulunan elementlerin karakteristik enerji seviyelerini temsil eden keskin zirvelerle birlikte sürekli bir enerji spektrumu oluşturur. Karakteristik enerji seviyelerinin belirlenmesi, X ışınlarının ölçülmesi yoluyla numunenin elementel nitelikleri ve miktarları hakkında bilgi sağlar.

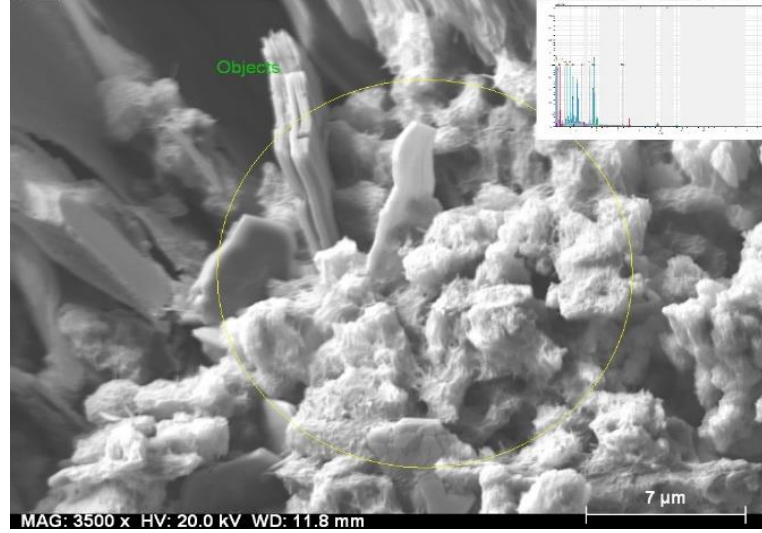
Enerji Dağılımı Spektroskopisi (EDS) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) bir arada kullanılarak, numunenin elementel analizleri gerçekleştirilebilir. EDS, nokta

ve alan analizi şeklinde uygulanabilir ve numunenin belirli bölgelerinde veya genel olarak elementel bileşimini değerlendirmek için kullanılabilir.

- **Nokta analizi:** bir numunenin morfolojik yapısında belirli bir noktanın element yüzdesini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir (Şekil 3.19).
- **Alan analizi:** numunenin belirli bir alanının kütle bileşenini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir (Şekil 3.20).



Şekil 3.19. EDS’de nokta analizi

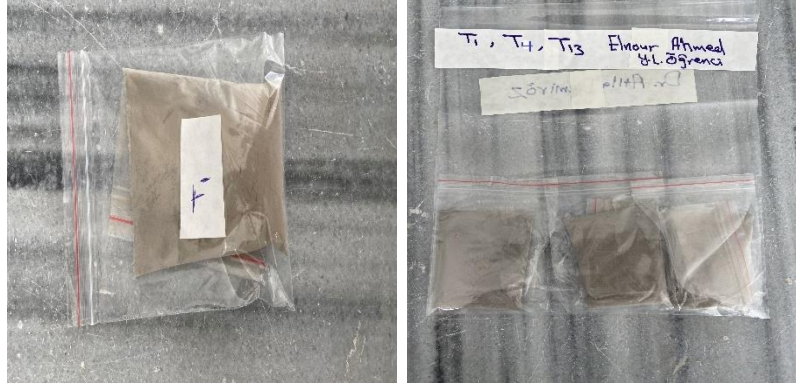


Şekil 3.20. EDS’de alan analizi

3.5.3. XRD analizi

Geopolimer zemin numunelerinin mikro yapılarını gözlemlemek ve yorumlayabilmek amacıyla XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç deneyinden sonra bir miktar zemin alınarak etüvde 24 saat süresinde kurutulmuştur. Böylece zemin numunesi içerisindeki reaksiyonların devam etmesi engellenmiştir. XRD

analizleri için kurutulan numunelerden 10-20 gr alınarak toz haline getirilmiştir. KTUN Merkezi laboratuvarında bulunan XRD cihazında 3 numune için gerekli analizler yapılmıştır (Şekil 3.21 ve 3.22).



Şekil 3.21. XRD analizine ait numuneler



Şekil 3.22. XRD cihazı ve analize ait görüntüler.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Standart Proktor Deneyi

Taguchi yöntemi kullanılarak karışım (KİL+UK+YFC) tablosu oluşturulduktan sonra ilgili standartta göre Proktor deneyi yapılmıştır. Deneye ait sonuçlar çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Standart Proktor deneyi sonuçları

Tasarım No	Uçucu kül U.K (%)	Yüksek fırın cürufu Y.F.C (%)	Opt. su muhtevası w %	Maksimum kuru yoğunluk (g/cm ³)
1	12	8	24.25	1.512
2	12	10	24.35	1.525
3	12	12	24.40	1.516
4	12	14	24.55	1.539
5	16	8	24.60	1.492
6	16	10	24.70	1.501
7	16	12	24.90	1.502
8	16	14	25.00	1.488
9	20	8	24.70	1.520
10	20	10	25.35	1.492
11	20	12	25.35	1.479
12	20	14	25.25	1.475
13	24	8	25.00	1.428
14	24	10	25.00	1.440
15	24	12	25.60	1.444
16	24	14	25.75	1.446

Geopolimer zemin karışımlarının hazırlanmasında, standart Proktor testinden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Deney numuneleri hazırlanırken her tasarıma optimum su içeriği değerinde alkali sodyum hidroksit çözeltisi eklenmiştir.

4.2. Serbest Basınç Deneylerinin Sonuçları

Taguchi yöntemine göre hazırlanan deney tablosundaki (Bölüm 3: Çizelge 3.8) 16 farklı karışım için 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda serbest basınç deneyi yapılarak Çizelge 4.2'deki sonuçlar elde edilmiştir. Deney tablosundaki parametrelerin (UK%, YFC% ve NaOH) ve parametre seviyelerinin serbest basınç dayanımına etkisi belirlenmiştir. Tezin bu bölümünde; elde edilen sonuçlar, geopolimer oluşturularak killi zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak tartışılmıştır. Katkı maddelerinin değişimi sonucunda geopolimer zeminin mekanik özelliklerinin değişmesinin sebepleri ve bu katkı maddelerinin karışımdaki oranları her bir kür periyodunda ayrı ayrı ve ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Çizelge 4.2. Serbest basınç deney sonuçları

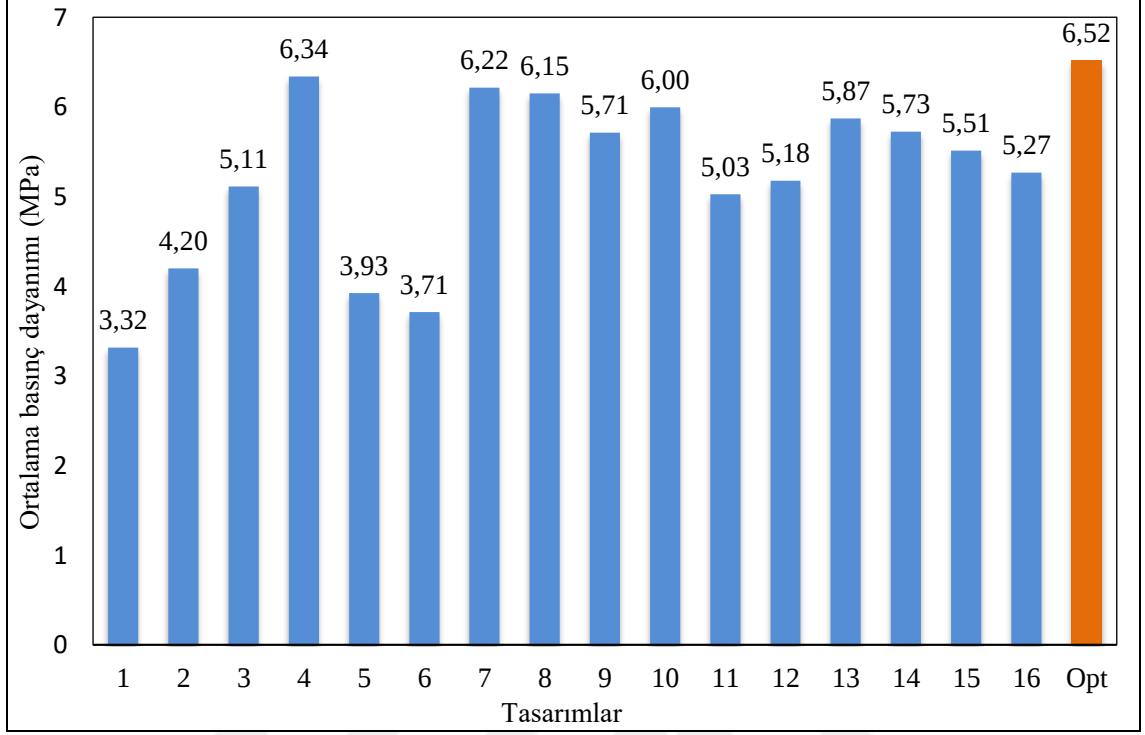
Tasarım No	7 günlük basınç dayanımı			Ortalama $q_{u\text{ ort 7 gün}}$ MPa	28 günlük basınç dayanımı			Ortalama $q_{u\text{ ort 28 gün}}$ MPa
	q_{u-1} MPa	q_{u-2} MPa	q_{u-3} MPa		q_{u-4} MPa	q_{u-5} MPa	q_{u-6} MPa	
1	3.51	3.15	3.29	3.32	3.67	4.13	4.08	3.96
2	4.52	3.95	4.13	4.20	5.22	5.07	5.37	5.22
3	5.46	4.79	5.09	5.11	6.48	6.90	6.62	6.66
4	6.44	6.22	6.36	6.34	8.05	7.98	7.84	7.96
5	3.92	3.96	3.89	3.93	4.94	4.79	5.12	4.95
6	3.60	3.74	3.80	3.71	4.64	4.90	4.74	4.76
7	6.20	6.19	6.26	6.22	7.76	7.89	7.95	7.87
8	6.03	6.24	6.18	6.15	7.40	7.73	7.41	7.51
9	5.55	5.69	5.90	5.71	7.34	7.11	7.21	7.22
10	5.97	5.85	6.16	6.00	7.49	7.40	7.30	7.40
11	4.99	5.09	5.00	5.03	6.26	6.59	6.03	6.29
12	5.14	5.14	5.25	5.18	6.55	6.37	6.60	6.50
13	5.75	6.02	5.85	5.87	7.19	7.49	7.14	7.27
14	5.74	5.64	5.80	5.73	7.11	6.91	7.08	7.03
15	5.70	5.40	5.44	5.51	6.88	6.65	6.91	6.81
16	5.31	5.10	5.39	5.27	6.42	6.55	6.84	6.60

Hazırlanan geopolimer numuneler üzerinde 7 günlük kür süresi sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçlarına göre, Tasarım 1 (T_1) ait ortalama 3.32 MPa'lık basınç dayanımı ile en düşük dayanıklılığa sahip olduğunu bulunmuştur. 7 gün sonunda elde edilen tüm serbest basınç dayanımları Şekil 4.1'de verilmiştir. Burada, geopolimerin kırılmaya karşı en düşük basınç dayanımı 3 MPa'lık sınırı aşmıştır, bu da zeminin özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Diğer tasarımlarla karşılaştırıldığında T_1 (UK %12, YFC %8 (zemin kuru ağırlığına göre)) ile en az katkı maddesi içermekte ve aynı zamanda 6M konsantrasyon ile sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinin en düşük molar konsantrasyonuna sahiptir.

T_4 ise 6.34 MPa değeriyle en yüksek basınç dayanımına sahiptir. Karışımda en düşük uçucu kül yüzdesini (%12) içermesine rağmen, en yüksek serbest basınç dayanım elde edilmiştir. Bunun nedeni diğer tasarımlara göre eklenen yüksek fırın cürufu (%14) ve alkali aktivatör NaOH (12M) katkılarının en yüksek oranlarda olmasıdır. Dayanım artışının en büyük nedenlerinden biri yüksek fırın cürufunun, daha yüksek miktarda CaO içermesi ve geopolimerizasyon reaksiyonuna girmesidir.

Tasarım 7, 8 ve 10'da UK yüzdesi arttığında, kısmen OH^- iyonunun bağlayıcılarla reaksiyona girmesi ve daha fazla miktarda polimerik jel üretilmesinden dolayı dayanımda az bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Uçucu kül yüzdesi arttıkça, dayanımda sürekli bir artış meydana gelmemiştir. Tasarım 5 ve 6'da uçucu kül yüzdesi %12'den %16'ya çıktığında dayanımların diğer tasarımlardaki dayanımlardan daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, düşük YFC yüzdesi ve düşük NaOH molarite

olmasından kaynaklanmaktadır. Bu tasarımlarda sırasıyla 3.93 MPa ve 3.71 MPa dayanım elde edilmiştir.



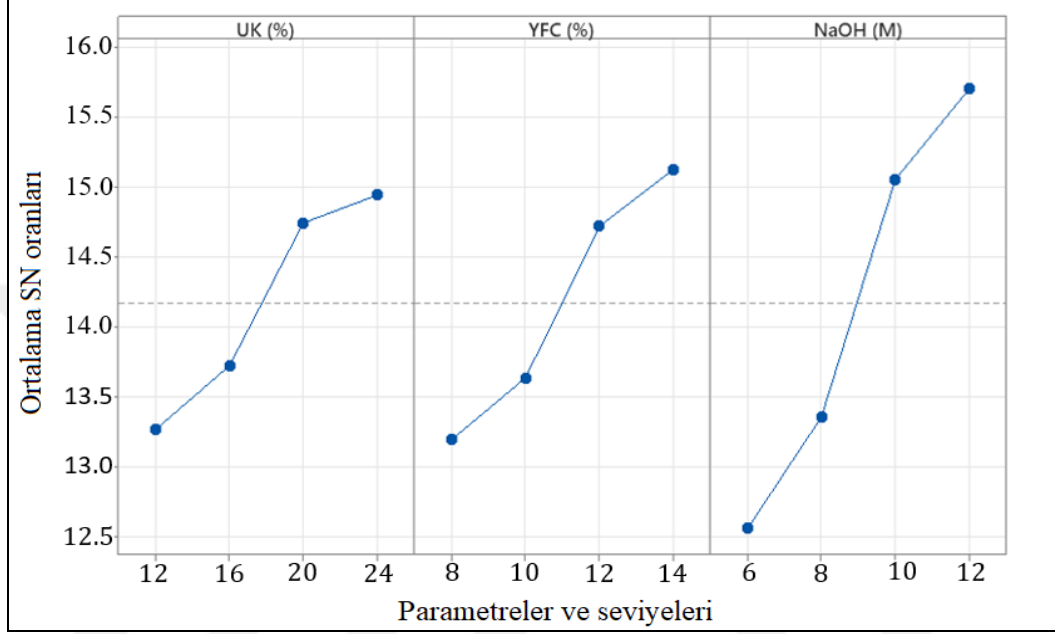
Şekil 4.1. 7 günlük serbest basınç dayanımları

Taguchi yöntemine göre S/N analizi yapılırken ‘en yüksek en iyi’ durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Araştırılan parametrelerin, 7 günlük kür süresinin sonunda geopolimer numunelerin dayanımı üzerindeki etki derecesi sırasıyla NaOH Molaritesi, %YFC oranı ve %UK oranı şeklinde bulunmuştur. Sonuçlar üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametre NaOH Molaritesidir (Çizelge 4.3) ve (Şekil 4.2).

Varyans analizi sonuçları incelendiğinde dayanım üzerinde en etkili parametre, F değeri 31.2 olan NaOH’ ikinci etkili olan parametre, F değeri 11.79 değeri ile YFC’dir. Üçüncü etkili olan parametre ise F değeri 9.48 ile UK’ün etkisidir (Çizelge 4.4). Bütün değişkenlerin deney sonucu üzerinde etkisinin olduğu anlaşılmıştır. Varyans analizi sonucunda, SBD dayanımı ile tasarım parametreleri arasında oluşturulan modelde, R-kare değeri %96.34 ve R-kare (düzeltilmiş) değeri %90.85 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. SBD sonuçları üzerinde her bir parametre ve seviyesinin etki derecesi

Seviye	7 günlük kür süresi		
	UK (%)	YFC (%)	NaOH (M)
1	13.27	13.20	12.57
2	13.73	13.64	13.36
3	14.75	14.72	15.06
4	14.95	15.13	15.71
Delta	1.68	1.93	3.15
Etki sıralaması	3	2	1

**Şekil 4.2.** 7 günlük serbest basınç mukavemeti S/N grafiği

Tasarımlardaki ilişkinin anlamlı veya anlamsız olduğunu anlamak ve modeli yorumlamak için p anlamlılık düzeyi hesaplanmıştır. P değeri (p-value), verilerin null hipoteze uygunluğunu ölçen bir istatistiksel ölçüdür. P değerinin sıfıra eşit veya sıfıra yakın olması terim ile cevap arasında bir ilişki olduğu anlamına gelmektedir. Genel olarak, 0.05'lik bir anlamlılık düzeyi (α), gerçek bir ilişkinin yokluğunda, bir ilişkinin var olduğu sonucuna varılma riskinin %5 olduğunu göstermektedir.

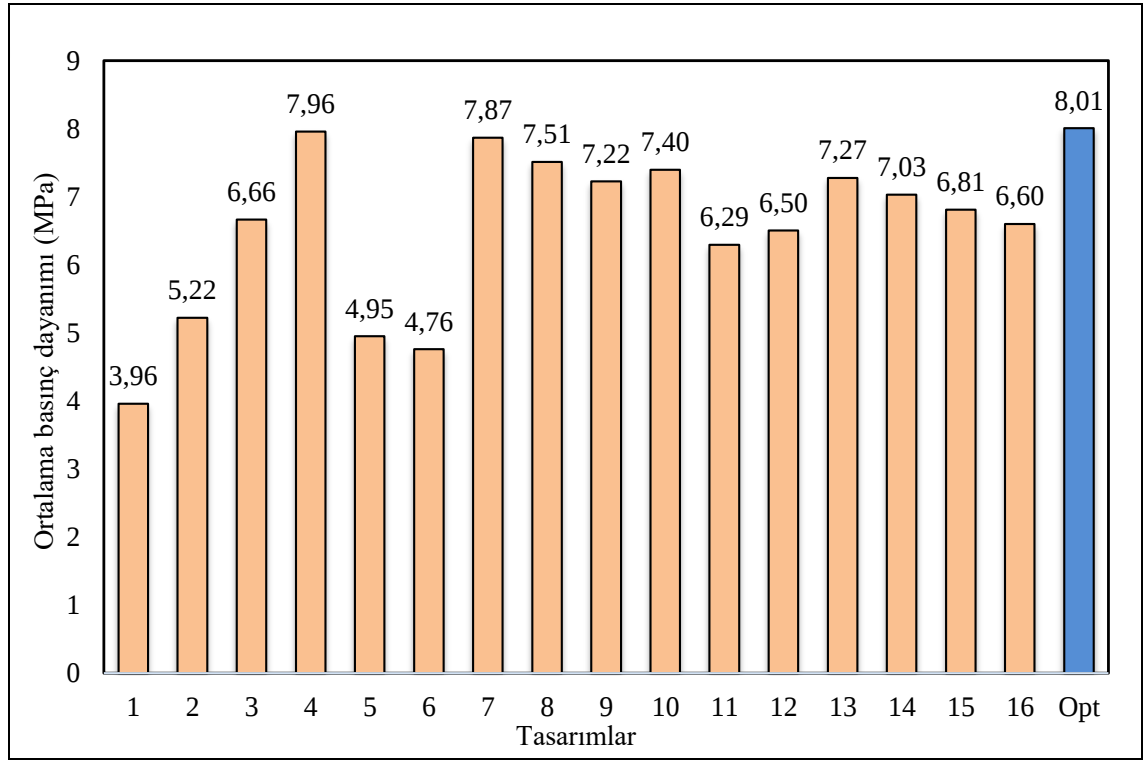
- P değeri $\leq \alpha$; istatistiksel olarak ilişki anlamlıdır.
- P değeri $> \alpha$; istatistiksel olarak ilişki anlamlı değildir.

Çizelge 4.4. 7 günlük serbest basınç mukavemeti için varyans analizi sonuçları (ANOVA)

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F- değeri	P- değeri
Model	9	43.090	96.34%	43.090	4.7878	17.55	0.001
UK (%)	3	7.761	17.35%	7.761	2.5871	9.48	0.011
YFC (%)	3	9.795	21.90%	9.795	3.2650	11.97	0.006
NaOH (M)	3	25.533	57.09%	25.533	8.5111	31.20	0.000
Hata	6	1.637	3.66%	1.637	0.2728		
Toplam	15	44.726	100.00%				

Çizelge 4.3 incelendiğinde NaOH (M), YFC% ve UK %'nın dayanım üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu anlaşılmaktadır. Benzer sonuçlar; Singhi ve ark. (2015), Saha ve Rajasekaran (2017), Yaghoubi ve ark. (2018) ve Shihab ve ark., (2018) tarafından bulunmuştur.

Hazırlanan geopolimer numuneler üzerinde 28 günlük kür süresi sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçlarına göre, Tasarım 1'in 3.96 MPa'lık basınç dayanımı ile en düşük, Tasarım 4, 7.96 MPa değeriyle en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. 28 günlük serbest basınç dayanımları Şekil 4.3'te verilmiştir

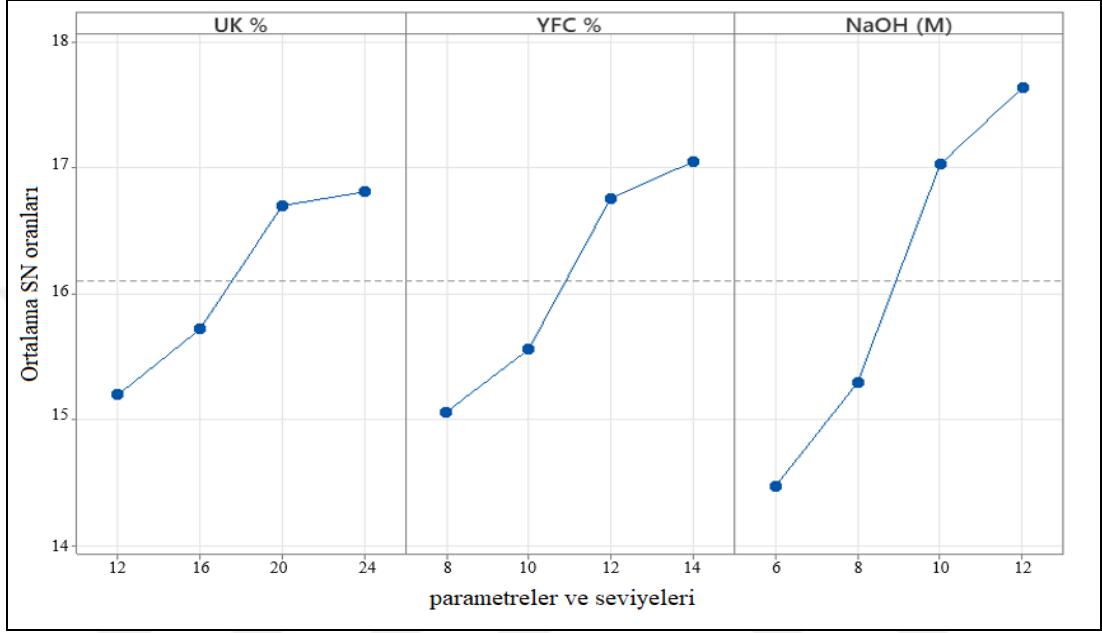


Şekil 4.3. 28 günlük serbest basınç dayanımları

28 günlük kür süresinin sonunda geopolimer zemin numunelerinin dayanımı üzerindeki etki sırası şu şekildedir: NaOH molaritesi, %YFC oranı ve %UK oranıdır. Sonuçlar üzerinde en büyük etkiye sahip parametre NaOH molaritesidir (Şekil 4.4) ve Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. SBD sonuçları üzerinde her bir parametre ve seviyesinin etki derecesi

Seviye	28 günlük kür süresi		
	UK (%)	YFC (%)	NaOH (M)
1	15.20	15.06	14.47
2	15.72	15.56	15.29
3	16.70	16.76	17.03
4	16.81	17.05	17.64
Delta	1.61	1.98	3.17
Etki sıralaması	3	2	1

**Şekil 4.4.** 28 günlük serbest basınç mukavemeti S/N grafiği

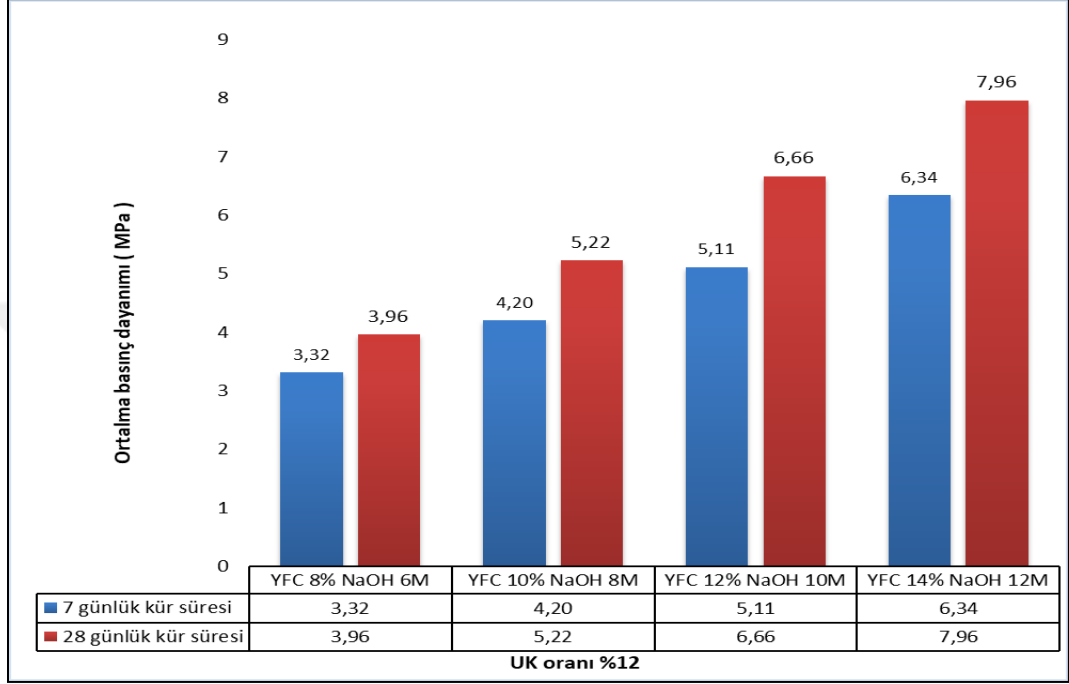
Varyans analizi sonuçlarında görüldüğü üzere dayanım üzerinde birinci etkili değişken F değeri 29.34 olan NaOH'tir (Çizelge 4.6). Dayanımlarda ikinci etkili olan değişken F değeri 12.13 ile YFC içeriği, üçüncü etkili olan ise F değeri 8.17 ile UK içeriğidir. Varyans analizi sonuçlarına göre bütün değişkenlerin deney sonucu üzerindeki etkisinin anlamlı olduğu belirlenmiştir ($P \leq 0.05$).

Çizelge 4.6. 28 günlük serbest basınç mukavemeti için varyans analizi sonuçları (ANOVA)

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F- değeri	P- değeri
Model	9	44.176	96.14%	44.176	4.9085	16.59	0.001
UK (%)	3	7.246	15.77%	7.246	2.4153	8.16	0.015
YFC (%)	3	10.784	23.47%	10.784	3.5945	12.15	0.006
NaOH (M)	3	26.147	56.90%	26.147	8.7155	29.45	0.001
Hata	6	1.775	3.86%	1.775	0.2959		
Toplam	15	45.952	100.00%				

Varyans analizi sonucunda, SBD (28 günlük) dayanımı ile tasarım parametreleri arasında oluşturulan modelde, $R^2 = 96.14\%$ ve R^2 (düzeltilmiş) $= 90.34\%$ olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.6'da NaOH molaritesi, YFC% ve UK %'nin dayanım üzerindeki

etkisinin istatistiksel 28 günlük serbest basınç mukavemet değerleri için geliştirilen bu modelde tüm p değerlerinin $p < 0.05$ olup bu değer 0.05'ten küçük olması, model terimlerinin anlamlı olduğunu göstermektedir. Benzer sonuçlar; Singhi ve ark., (2015), Saha ve Rajasekaran (2017), Yaghoubi ve ark., (2018) ve Shihab ve ark., (2018) tarafından bulunmuştur.



Şekil 4.5. NaOH (M) ve YFC'deki değişikliklerin dayanım üzerindeki etkisi

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi yüksek oranda YFC ve molariteye sahip olan 4 numaralı karışımda önemli bir mukavemet artışı meydana gelmiştir. NaOH, malzemelerdeki alüminayı ve silikayı çözerek, geopolimerizasyonu hızlandırmış ve bu da daha yüksek dayanımın nedenidir (Phoongernkham ve ark., 2015).

Saha ve Rajasekaran (2017), NaOH konsantrasyonun geopolimer zeminin dayanımına etkisi inceledikleri çalışmada, 6M ila 16M konsantrasyon arasında alkali aktivatör NaOH kullanılmış Alkali aktivatör NaOH çözeltisinin konsantrasyonun arttıkça dayanım seviyesinin arttığını gözlemlenmiştir. En yüksek dayanımın 16M konsantrasyonda elde edilmiştir.

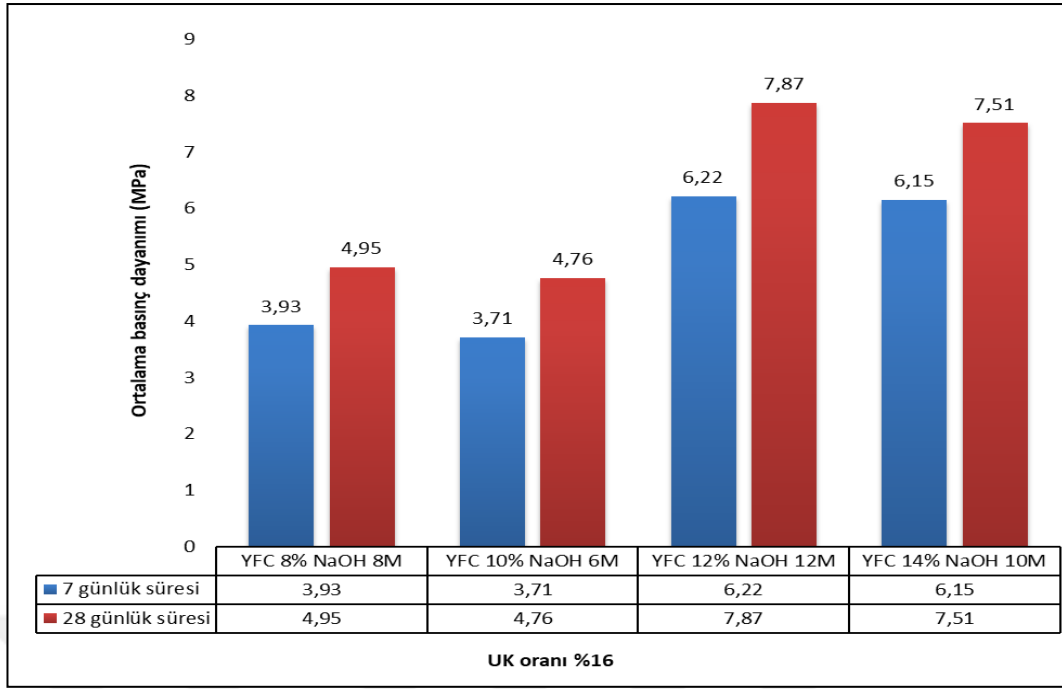
Yüksek fırın cürufu oranının artmasıyla dayanımın da arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek kalsiyum (Ca) içeriğinden dolayı YFC eklenmesi erken kür sürelerinde dahi yüksek dayanım değerlerine neden olmuştur. Bu önemli gelişmenin nedeni, sisteme kalsiyum açısından zengin YFC maddesini dahil etmekle birlikte, kalsiyum silikat hidrat

(C-S-H) jel oluşumunun başlamasıdır. Ayrıca, kalsiyum geopolimerik jellerde Na ile yer değiştirebileceği, sodyum alüminosilikat hidrat (N-A-S-H) oluşturarak kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) jellerinin oluşumuna neden olmasıdır (Xu ve Van Deventer, 2000; Yip ve ark., 2005; Kumar ve ark., 2010; Yang ve ark., 2012; İsmail ve ark., 2014; Phetchuay ve ark., 2016).

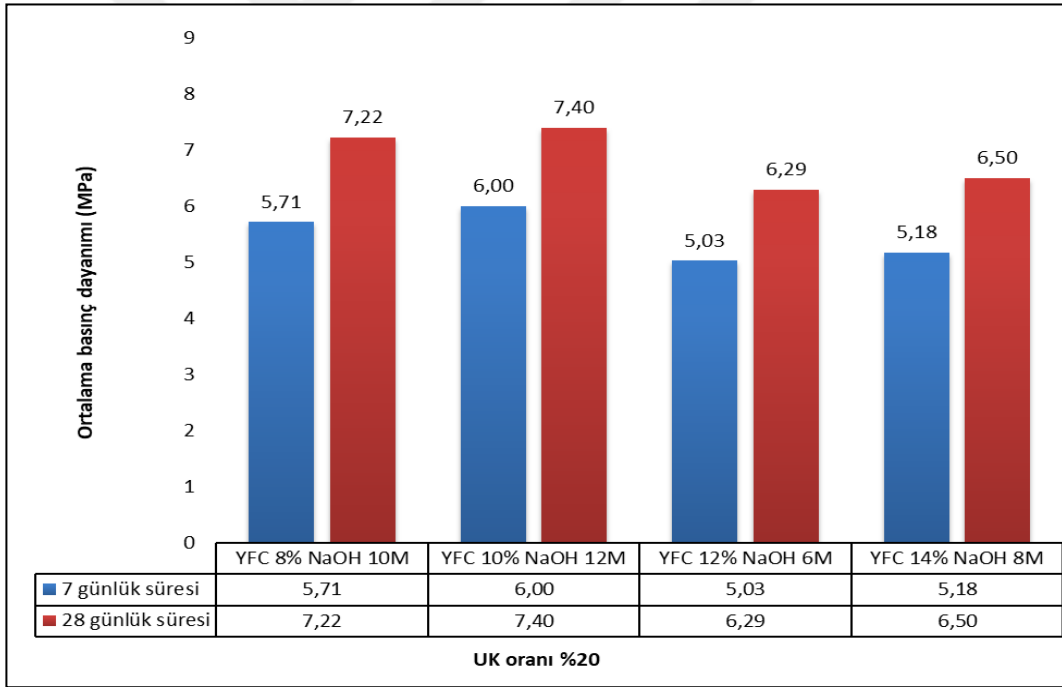
Saha ve Rajasekaran (2017), yapmış oldukları çalışmada YFC içeriği arttıkça geopolimer harcında daha yüksek basınç dayanımı sağladığı gözlenmiştir. Çalışmalarında, 16M sodyum hidroksit çözeltisi ve %50 granuler YFC içeren harç karışımında en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

Yaghoubi ve ark., 2018 yapmış olduğu araştırma çalışmasında, endüstriyel yan ürün bazlı geopolimerlerin yumuşak zeminin dayanıklılığını artırma üzerine etkisi incelenmiştir. UK ve YFC için farklı karışım oranları kullanılmıştır. YFC eklemenin etkisinin, uçucu kül eklemeye göre sabit bir mol konsantrasyonu ve sabit bir su içeriğinde daha yüksek olduğu bulunmuştur.

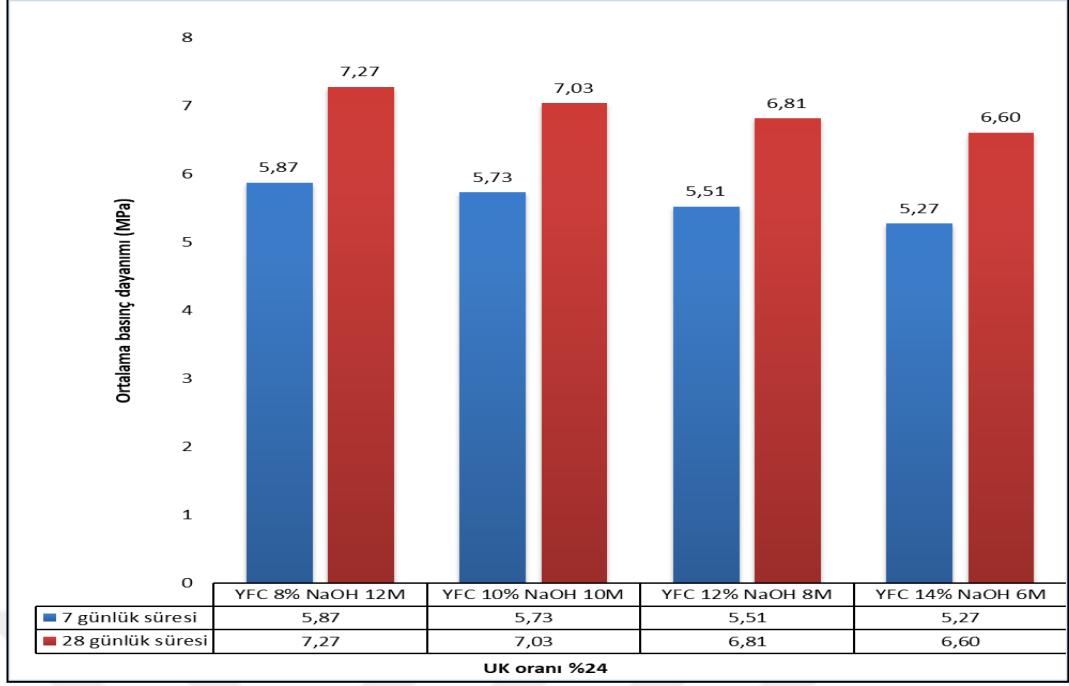
Uçucu kül, içeriğindeki CaO miktarının yetersiz olması nedeniyle tüm puzolanik bileşiklerle reaksiyona girecek kadar yeterli değildir. Puzolanik aktivite (puzolanik madde ve çimento malzemeleri) çoğunlukla YFC ile birlikte kullanıldığında ortaya çıkar. Bu nedenle, UK'ün yalnız başına kullanıldığında dayanımda düşük artışların olduğu gözlenmiştir. (Puppala ve ark, 2008). Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'de sabit bir uçucu kül oranında sodyum hidroksit molaritesi ve yüksek fırın cürufu oranındaki değişikliklerin dayanıklılığa etkisini göstermektedir.



Şekil 4.6. NaOH (M) ve YFC'deki değişikliklerin dayanım üzerindeki etkisi



Şekil 4.7. NaOH (M) ve YFC'deki değişikliklerin dayanım üzerindeki etkisi



Şekil 4.8. NaOH (M) ve YFC'deki değişikliklerin dayanım üzerindeki etkisi

Tasarımların doğruluğunu kontrol etmek için Taguchi tasarım yöntemi kullanılarak optimum değerlerde (UK %24, YFC %14 ve NaOH 12M) numuneler hazırlanmıştır (Şekil 4.9). Hazırlanan bu numuneler, 7 ve 28 günlük kür süresinde bekletildikten sonra basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneye ait sonuçlar Çizelge 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.9. Optimum tasarım numuneleri

Çizelge 4.7 SBD tasarım sonuçları ve doğruluk yüzdeleri

Tasarım İçeriği	Analiz sonucu (MPa)	Deneyin sonucu (MPa)	Doğruluk yüzdesi (%)
Topt 7 günlük	7.03	6.52	92.60
Topt 28 günlük	8.70	8.01	92.10

Analizlerde optimum deney tasarımına göre 7 günlük 7.03 MPa, 28 günlük 8.70 MPa basınç dayanımı hesaplanmıştır (Çizelge 4.7). Laboratuvar gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre 7 günlük 6.52 MPa, 28 günlük 8.01 MPa, tasarımın doğruluk yüzdesi 7-28 günlük numuneler için sırasıyla %92.60, %92.10 hesaplanmıştır.

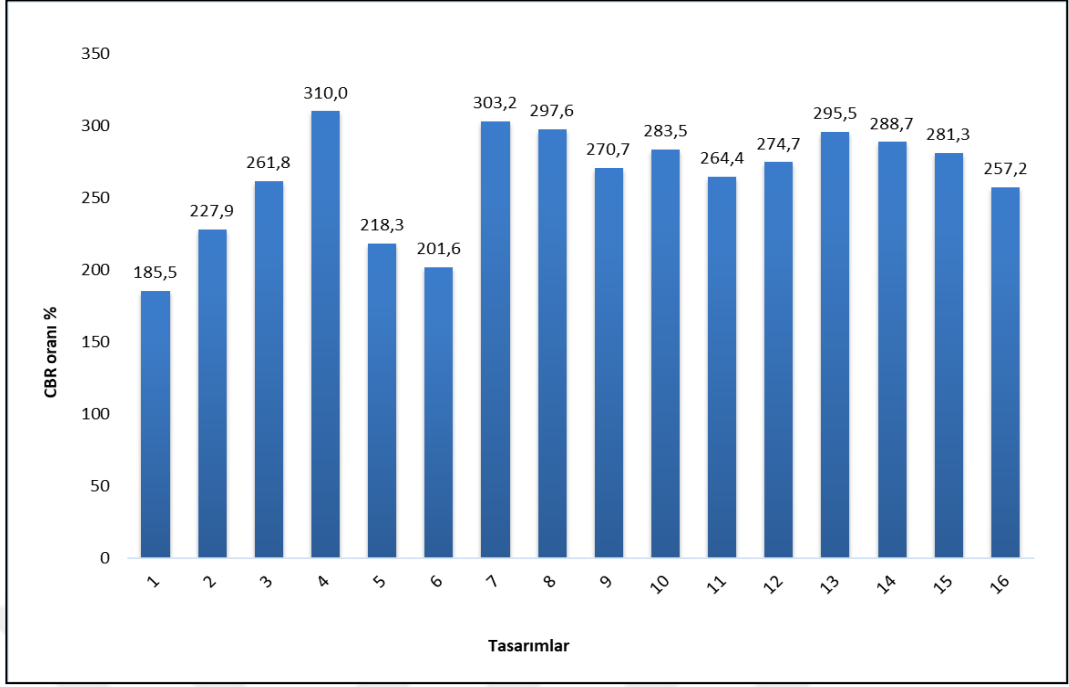
4.3. CBR Deneylerinin Sonuçları

Taguchi yöntemine göre hazırlanan deney tablosundaki 16 farklı karışım için 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda CBR (Kaliforniya taşıma oranı) deneyi yapılmıştır. Deney tablosundaki parametrelerin (UK%, YFC% ve NaOH (M)) ve parametre seviyelerinin CBR oranına olan etkisi belirlenmiştir. 7 günlük kür süresi ait sonuçlar Çizelge 4.8’de, tasarımlara ait CBR deneyi sonuçları ve grafikleri Ek 3’te verilmiştir.

Çizelge 4.8. CBR deney sonuçları

Tasarım No	7 günlük CBR %	
	(2.5 mm)	(5 mm)
1	185.54	152.71
2	227.93	178.12
3	261.78	212.11
4	310.02	242.27
5	218.28	178.12
6	201.63	179.21
7	303.20	277.33
8	297.62	240.20
9	270.71	221.34
10	283.48	247.44
11	264.38	216.09
12	274.67	219.91
13	295.50	253.45
14	288.69	247.44
15	281.25	212.11
16	257.19	242.27

Çizelge 4.8’deki deney sonuçlarına göre, Tasarım 1’de ortalama 185.54 oranıyla en düşük, en yüksek CBR oranı ise, tasarım 4’de ortalama 310.02 hesaplanmıştır. Diğer tasarımlarda CBR oranı 200 ile 300 arasında değiştiği görülmüştür (Şekil 4.10).

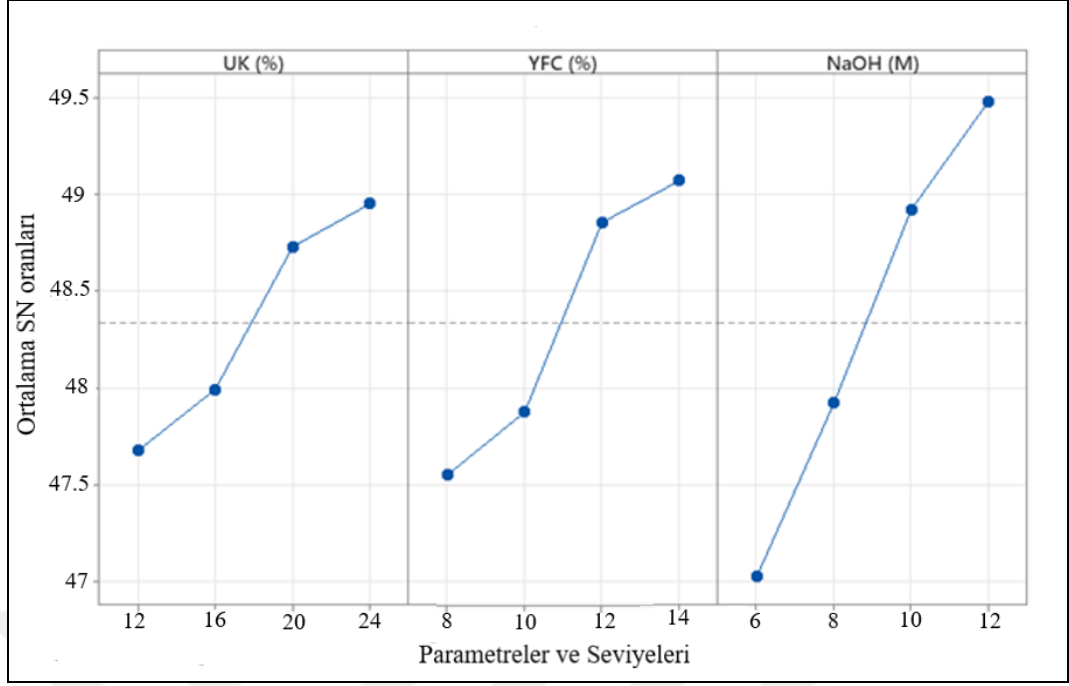


Şekil 4.10. 7 günlük CBR dayanımları

Taguchi deney tasarımına göre F sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu eklenmesi ve sodyum hidroksit çözeltisinin konsantrasyonunun artırılmasıyla etki seviyesini incelemek amacıyla analiz gerçekleştirilmiş ve Çizelge 4.9'da verilmiştir. Taguchi yöntemine göre S/N analizi yapılırken, optimum parametre seviyeleri 'en yüksek en iyi' durumuna göre belirlenmiştir. 7 günlük kür süresinin sonunda geopolimer numunelerinin CBR oranı üzerindeki etki sırası; NaOH molaritesi, %YFC ve %UK oranı şeklindedir. En büyük etkiye sahip parametre NaOH molaritesidir (Şekil 4.11). Deneye ait etki derecesi Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.9 CBR deneyin sonuçları üzerinde her bir parametre ve seviyesinin etki derecesi

Seviye	UK (%)	YFC (%)	NaOH (M)
1	47.68	47.55	47.03
2	47.99	47.88	47.92
3	48.73	48.85	48.92
4	48.95	49.07	49.48
Delta	1.27	1.52	2.45
Etki sıralaması	3	2	1



Şekil 4.11. 7 günlük CBR S/N grafiği

Varyans analizi sonucunda, CBR (7 günlük) dayanımı ile tasarım parametreleri arasında oluşturulan modelde, R-kare değeri %96.13 ve R-kare (düzeltilmiş) değeri %90.34 olarak elde edilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre, 7 günlük CBR deneyindeki en etkili değişkenin NaOH olduğu, F değeri 28.13 bulunmuştur. İkinci en etkili değişken ise YFC içeriği olup, F değeri 12.99'dur. En az etkili değişken ise UK içeriği olup, F değeri 8.62'dir (Çizelge 4.10). Varyans analizi sonuçlarına göre, tüm değişkenlerin deney sonucu üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu belirlenmiştir ($P \leq 0.05$).

Çizelge 4.10. 7 günlük CBR için varyans analizi sonuçları (ANOVA)

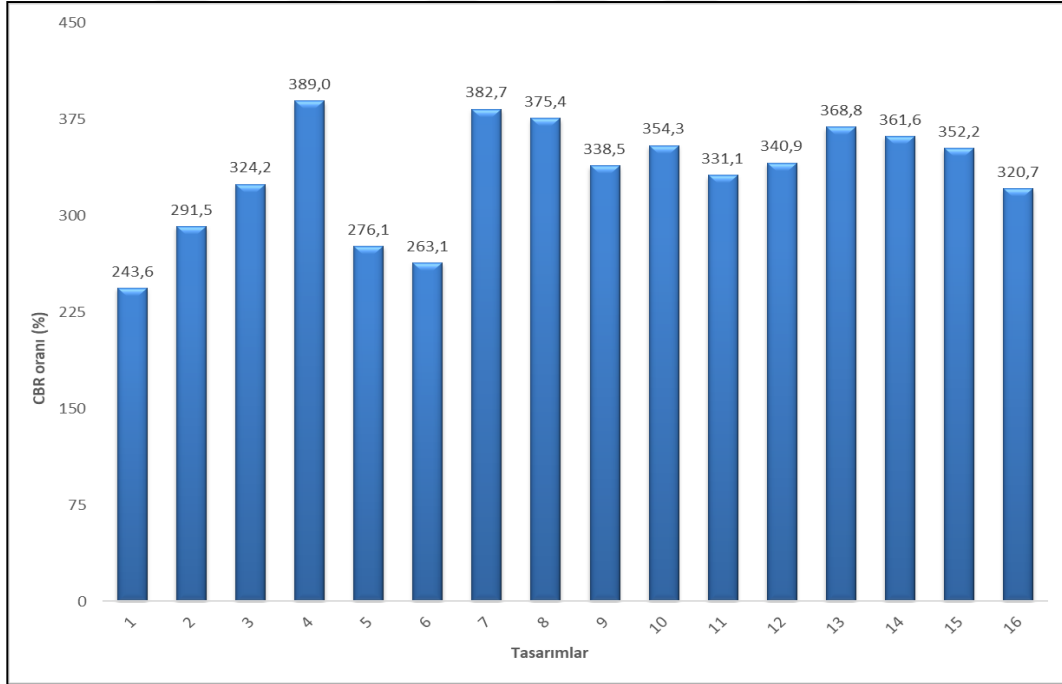
Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F- değeri	P- değeri
Model	9	25.022	96.13%	25.022	2.7803	16.58	0.001
UK (%)	3	4.337	16.66%	4.337	1.4455	8.62	0.014
YFC (%)	3	6.535	25.11%	6.535	2.1783	12.99	0.005
NaOH (M)	3	14.151	54.37%	14.151	4.7170	28.13	0.001
Hata	6	1.006	3.87%	1.006	0.1677		
Toplam	15	26.029	100.00%				

Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen CBR deneyinde, 16 farklı karışımın 28 günlük kür süresi sonunda deneyi yapılmıştır. 28 günlük kür süresi sonrasında elde edilen sonuçlar, Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. CBR deney sonuçları

Tasarım No	28 günlük CBR %	
	(2.5 mm)	(5 mm)
1	243.55	207.13
2	291.54	255.07
3	324.16	262.21
4	389.01	326.72
5	276.12	238.84
6	263.14	223.83
7	382.69	264.12
8	375.37	307.64
9	338.54	274.34
10	354.29	293.12
11	331.10	312.24
12	340.90	275.67
13	368.80	304.92
14	361.61	318.96
15	352.18	284.48
16	320.68	267.86

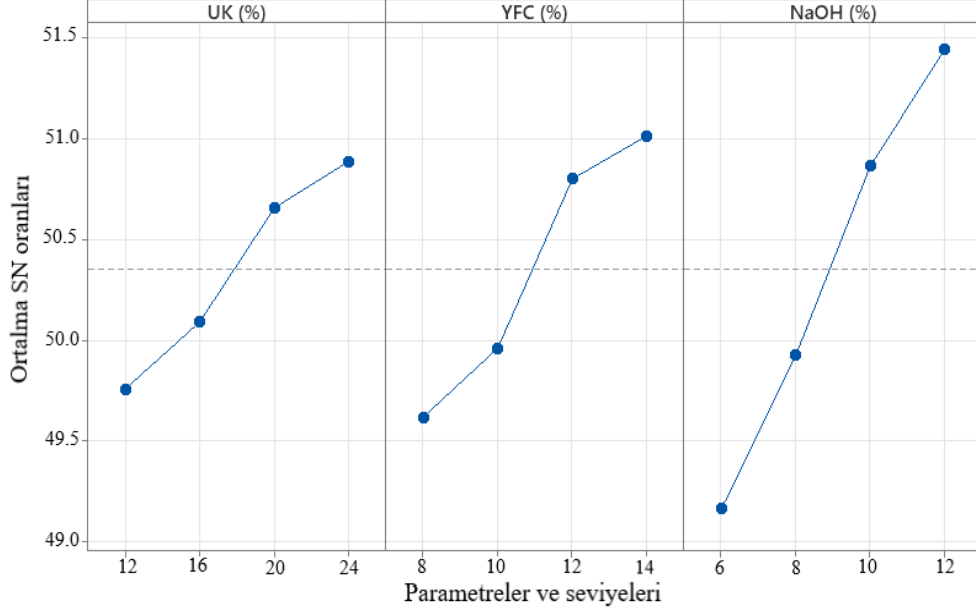
Geopolimer numunelerinin 28 günlük kür süresi sonrasında gerçekleştirilen CBR deneyi sonuçlarına göre, Tasarım 1 en düşük CBR oranına sahiptir ve ortalama CBR oranı 243.55 olarak belirlenmiştir. Diğer yandan, Tasarım 4 en yüksek CBR oranına sahiptir ve ortalama CBR oranı 389 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.12).

**Şekil 4.12.** 28 günlük CBR dayanımları

Geopolimer numunelerinin 28 günlük kür süresi sonrasında gerçekleştirilen CBR deneyi sonuçları üzerinde her bir parametre ve seviyesinin etki derecesini belirlemek için Taguchi analizi kullanılmıştır (Çizelge 4.12) ve (Şekil 4.13).

Çizelge 4.12. CBR oranları sonuçları üzerinde her bir parametre ve seviyesinin etki derecesi

Seviye	UK (%)	YFC (%)	NaOH (M)
1	49.76	49.62	49.16
2	50.09	49.96	49.93
3	50.66	50.80	50.87
4	50.89	51.02	51.44
Delta	1.13	1.40	2.28
Etki sıralaması	3	2	1

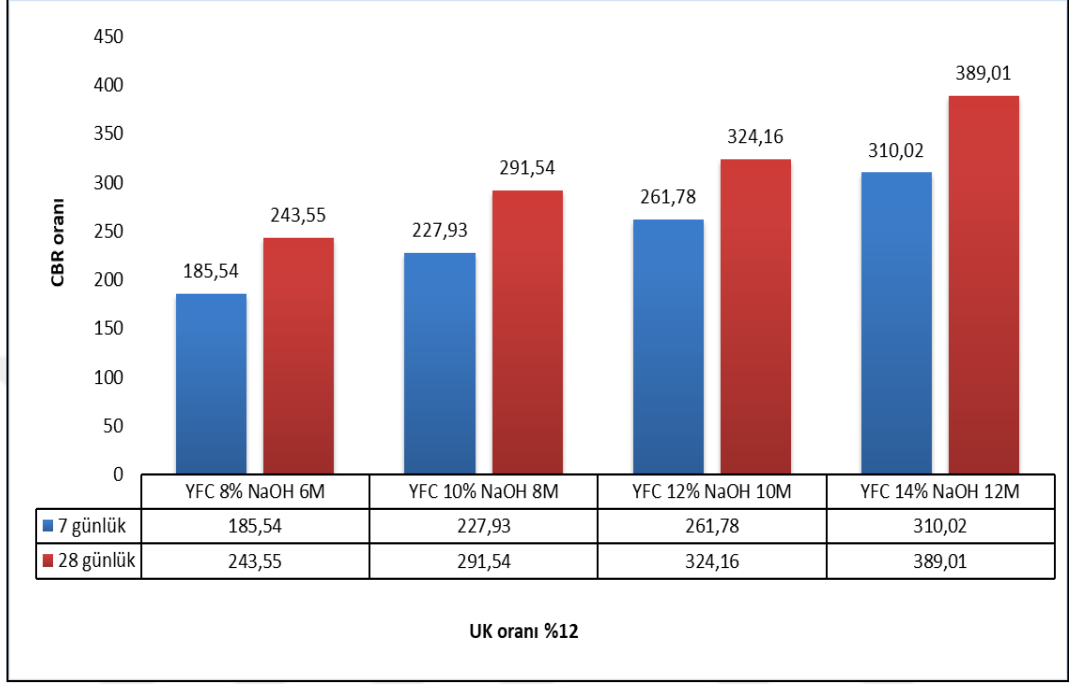
**Şekil 4.13.** 28 günlük CBR S/N grafiği

Varyans analizi sonucunda, CBR (28 günlük) dayanımı ile tasarım parametreleri arasında oluşturulan modelde, R-kare değeri %95.01 ve R-kare (düzeltilmiş) değeri %87.53 olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.13'deki varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, 28 günlük numunelerde CBR oranı üzerinde en az etkiye sahip olan değişken UK içeriği, etki değeri 5.88 bulunmuştur. İkinci en etkili olan değişken ise YFC içeriği olup, F değeri 9.78 olarak tespit edilmiştir. En etkili değişken ise NaOH molaritesidir ve F değeri 22.43 olarak hesaplanmıştır. Varyans analizi sonuçlarına göre, bütün değişkenlerin deney sonuçları üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

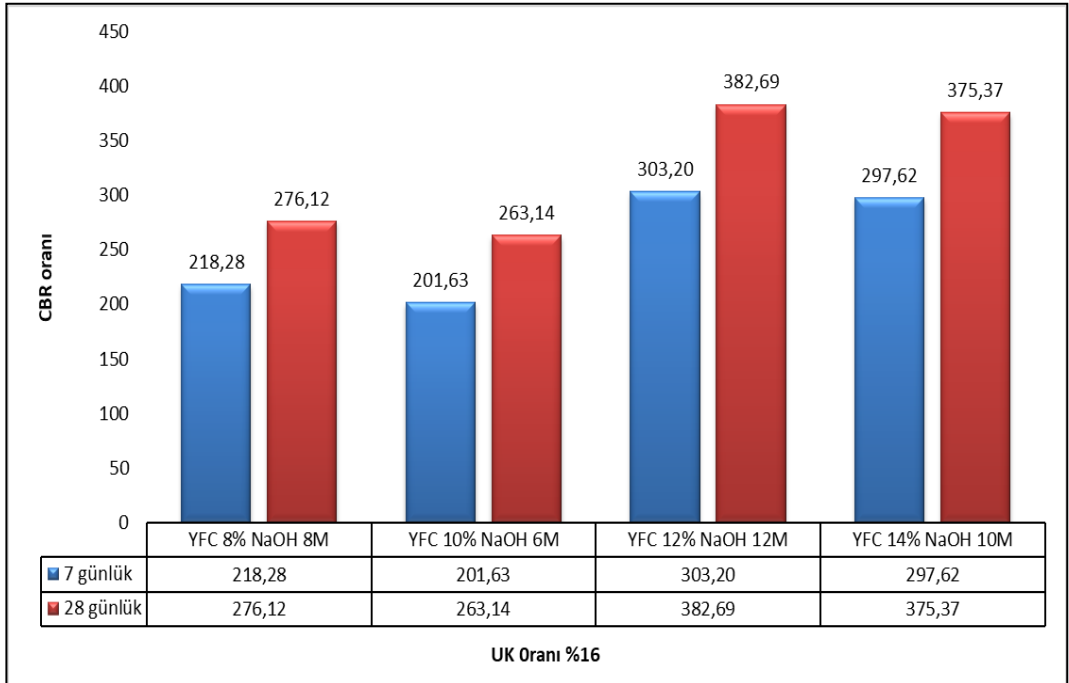
Çizelge 4.13. 28 günlük CBR için varyans analizi sonuçları (ANOVA)

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F- değeri	P- değeri
Model	9	20.719	95.01%	20.719	2.3021	12.70	0.003
UK (%)	3	3.199	14.67%	3.199	1.0663	5.88	0.032
YFC (%)	3	5.318	24.39%	5.318	1.7727	9.78	0.010
NaOH (M)	3	12.202	55.96%	12.202	4.0673	22.44	0.001
Hata	6	1.088	4.99%	1.088	0.1813		
Toplam	15	21.807	100.00%				

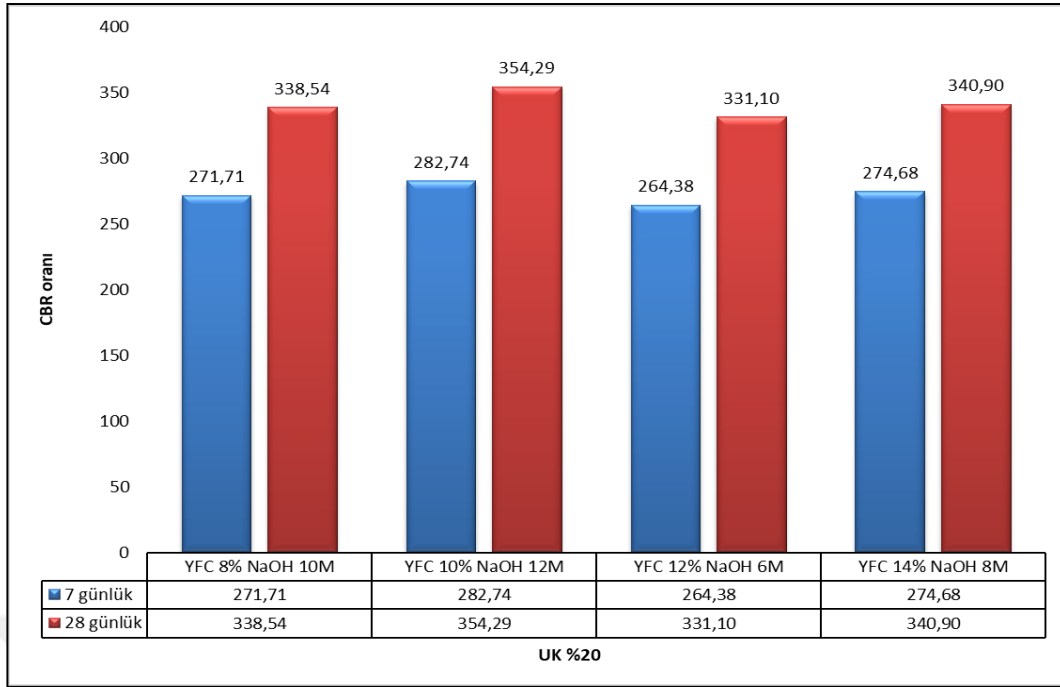
Şekil 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17'de, sabit bir uçucu kül oranına sahipken sodyum hidroksit çözeltisinin konsantrasyonunun ve fırın cüruf oranının değişiminin etkilerini gösterilmiştir. Benzer sonuçlar; Ayibiowu ve ark., (2022), Teerawattanasuk ve Voottipruex., (2019) tarafından bulunmuştur.



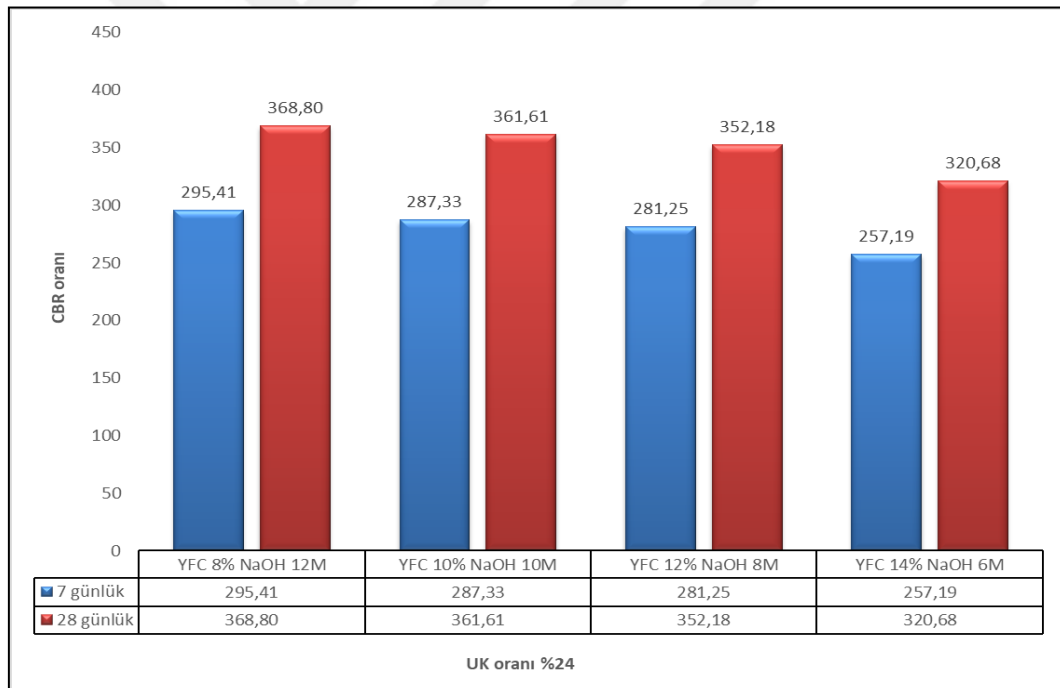
Şekil 4.14. NaOH (M) ve YFC deki değişikliklerin CBR oranının üzerindeki etkisi



Şekil 4.15. NaOH (M) ve YFC deki değişikliklerin CBR oranının üzerindeki etkisi



Şekil 4.16. NaOH (M) ve YFC deki değişikliklerin CBR oranının üzerindeki etkisi



Şekil 4.17. NaOH (M) ve YFC deki değişikliklerin CBR oranının üzerindeki etkisi

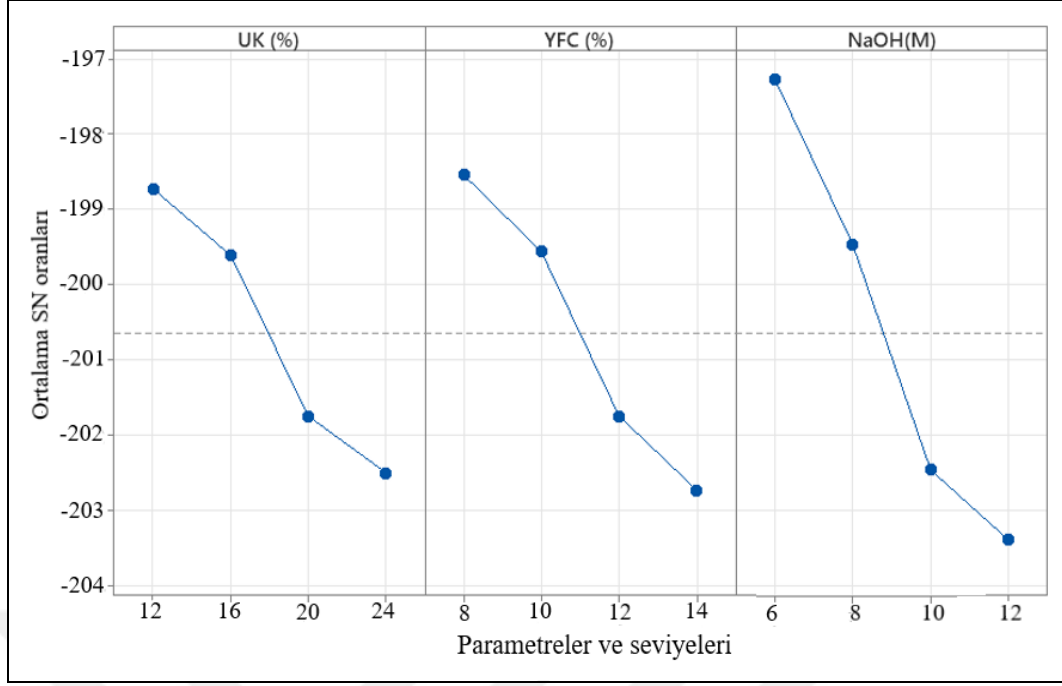
4.4. Permeabilite deneylerin sonuçları

Permeabilite deneyi yapılarak, 28 günlük kür süresi sonunda 16 farklı tasarım için Taguchi yöntemine göre hazırlanan deney tablosundaki deney sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki Çizelge 4.14'te sunulmuştur. Tasarım deney tablosundaki parametrelerin (UK %, YFC% ve NaOH (M)) ve parametre seviyelerinin geçirimsizlik üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Çizelge 4.14. 28 günlük permeabilite deney sonuçları

Tasarım no	Geçirimsizlik katsayısı (k) (m/sn.)			Ort. geçirimsizlik katsayısı (k) (m/sn.) 28 Günlük
	k ₁	k ₂	k ₃	
1	2.40596E ⁻¹⁰	2.52681E ⁻¹⁰	2.3349E ⁻¹⁰	2.42256E ⁻¹⁰
2	1.34969E ⁻¹⁰	1.39388E ⁻¹⁰	1.3207E ⁻¹⁰	1.35476E ⁻¹⁰
3	8.51341E ⁻¹¹	8.29643E ⁻¹¹	8.74205E ⁻¹¹	8.51730E ⁻¹¹
4	6.43456E ⁻¹¹	6.54878E ⁻¹¹	6.33874E ⁻¹¹	6.44069E ⁻¹¹
5	1.58106E ⁻¹⁰	1.47566E ⁻¹⁰	1.41166E ⁻¹⁰	1.48946E ⁻¹⁰
6	1.91478E ⁻¹⁰	1.65186E ⁻¹⁰	1.78507E ⁻¹⁰	1.78390E ⁻¹⁰
7	6.60348E ⁻¹¹	6.44956E ⁻¹¹	6.77322E ⁻¹¹	6.60875E ⁻¹¹
8	6.82333E ⁻¹¹	6.65911E ⁻¹¹	6.98702E ⁻¹¹	6.82315E ⁻¹¹
9	7.63272E ⁻¹¹	7.80496E ⁻¹¹	7.48812E ⁻¹¹	7.64193E ⁻¹¹
10	7.21476E ⁻¹¹	6.96065E ⁻¹¹	6.71568E ⁻¹¹	6.9637E ⁻¹¹
11	1.09579E ⁻¹⁰	1.02098E ⁻¹⁰	9.69128E ⁻¹¹	1.02863E ⁻¹⁰
12	8.37174E ⁻¹¹	8.1981E ⁻¹¹	8.01988E ⁻¹¹	8.19658E ⁻¹¹
13	7.20536E ⁻¹¹	7.00471E ⁻¹¹	7.08543E ⁻¹¹	7.0985E ⁻¹¹
14	7.38814E ⁻¹¹	7.2621E ⁻¹¹	7.17733E ⁻¹¹	7.27586E ⁻¹¹
15	7.61172E ⁻¹¹	7.89404E ⁻¹¹	7.76118E ⁻¹¹	7.75564E ⁻¹¹
16	8.01988E ⁻¹¹	7.82704E ⁻¹¹	7.92796E ⁻¹¹	7.92496E ⁻¹¹

Taguchi yöntemine göre S/N analizi yapılırken ‘en yüksek en iyi’ durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Araştırılan parametrelerin, 28 günlük kür süresinin sonunda geopolimer numunelerinin geçirimsizlik üzerindeki etki derecesi sırasıyla NaOH molaritesi, %YFC oranı ve %UK oranı olarak belirlenmiştir. Sonuçlar üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametre NaOH molaritesidir (Şekil 4.19).



Şekil 4.18. 28 günlük permeabilite SN grafiği

Varyans analizi sonuçlarında görüldüğü üzere geçirgenlik üzerinde en etkili parametre, F değeri 40 olan NaOH'tur. Geçirgenlikte ikinci etkili olan parametre, F değeri 19.4 değeri ile YFC'dir. Varyans analizi sonuçlarına göre üçüncü etkili olan parametre ise F değeri 16.07 ile UK'ün etkisidir. Varyans analizi sonucunda, geçirimsizlik katsayısı (28 günlük) ile tasarım parametreleri arasında oluşturulan modelde, R-kare değeri %97.42 ve R-kare (düzeltilmiş) değeri %93.55 olarak elde edilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre bütün değişkenlerin deney sonucu üzerinde etkisinin olduğu anlaşılmıştır (Çizelge 4.15).

Çizelge 4.15. 28 günlük geçirgenlik katsayıları için SN oranlarının varyans analizi

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F- değeri	P- değeri
Model	9	176.375	97.42%	176.375	19.5972	25.18	0.000
UK (%)	3	37.519	20.72%	37.519	12.5064	16.07	0.003
YFC (%)	3	44.446	24.55%	44.446	14.8155	19.04	0.002
NaOH (M)	3	94.409	52.15%	94.409	31.4696	40.44	0.000
Hata	6	4.669	2.58%	4.669	0.7782		
Toplam	15	181.044	100.00%				

Geopolimer zeminin uçucu kül ve cüruf içeriği artırıldığında geçirgenlik azalmıştır. UK ve YFC'de bulunan alümina ve silika bolluğu, hızlı ve yüksek oranda alüminosilikat oluşumunu ve geopolimerik ağın büyümesini tetiklemiştir. Oluşan geopolimerik jel ürünler boşlukları doldurarak geçirgenliği azaltmıştır (Yaghoubi ve ark, 2020). Hazırlanan geopolimer zemin numunelerinde su geçirgenliği katsayıları,

dayanımın artmasıyla azalmıştır. Benzer sonuçlar, (Sanawong ve Chalee, 2010), (Yaghoubi ve ark, 2020).

4.5. SEM, EDS ve XRD ANALİZİ

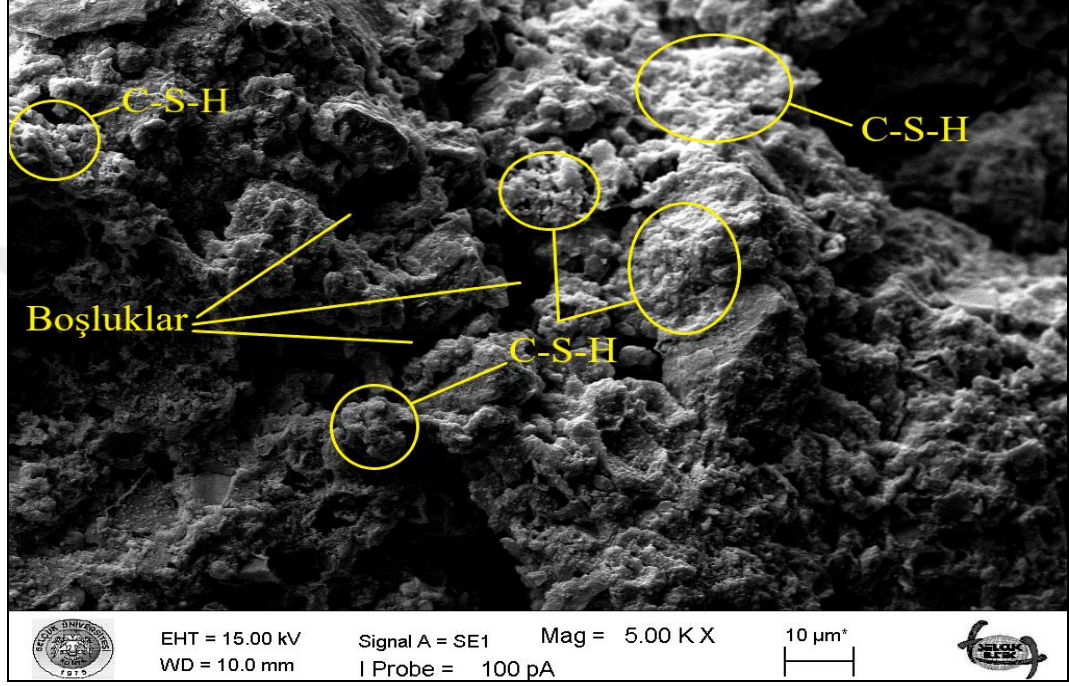
4.5.1. SEM analizi

Geopolimer zeminlerin hidrasyon ürünlerinin morfolojisi, mikroskopik morfolojisi ve gözenek yapısı SEM analiz ile gözlemlenmiştir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, alkali aktivatörün varlığında hızla hidratlaşma sonucunda killi zeminin parçacıklarını birbirine bağlayan çok sayıda tek biçimli dağılmış jelatinimsi ürünler ortaya çıkmıştır. SEM görüntülerinde, geopolimer zemin ana reaksiyon ürünleri olarak geopolimer jel, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve (N-A-S-H) jelleri bulunduğu gözlemlenmiştir. N-A-S-H jel, temel olarak alkali ve uçucu kül sisteminde bulunan aktif maddelerin, özellikle Si ve Al'in "çözünme-polimerizasyon" reaksiyonuyla oluşur. Ayrıca, Zemin parçacıklarına yapışık çok sayıda beyaz iğne benzeri ve yumaksı çimentolaşma ürünleri görülebilir (Palomo ve ark, 1999).

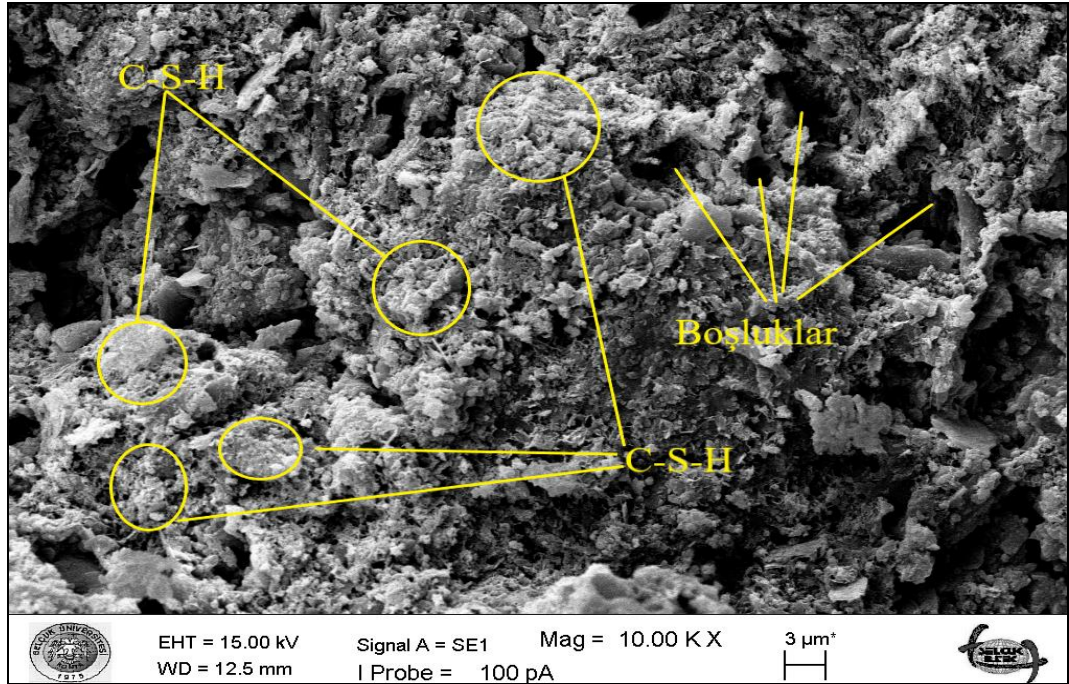
Topaklaşan beyaz jelleşme ürünleri esas olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufundaki SiO_2 ve Al_2O_3 'ten bileşik aktivatör ile reaksiyonlar yoluyla üretilen C-S-H ve N-A-S-H jelleştirici maddelerdir (Palomo ve ark., 1999; Wu ve ark., 2021). Daha fazla reaksiyona girmemiş cüruf partikülleri, bu da geopolimer-zemin partiküllerinin daha yakından bağlandığını ve artan cüruf içeriği ile gözenek alanının kademeli olarak azaldığını gösterir. Bunun nedeni, cürufun, daha fazla C-S-H ve N-A-S-H üreten geopolimerizasyon reaksiyonuna katılmak için daha fazla Ca^{2+} sağlaması, cürufun hidrasyon reaksiyonundaki ekzotermimin ise geopolimerizasyon reaksiyonunu desteklemesidir (Yi ve ark, 2015).

SEM görüntüsünde hiç küresel uçucu kül partikülü görülmemiştir. Bunun nedeni, uçucu külün aktivitesinin, alkali NaOH çözeltisi tarafından üretilen alkali ortamda aktive edildiğini gösterilmiştir (Chen ve ark 2021). (Wu ve ark, 2021). SEM görüntülerinin, serbest basınç dayanım deneyi sonuçlarıyla ilişkili olduğu durumlarda, geopolimer yapıda yüksek basınç dayanımı sağlayan birçok reaktif ürün olduğu kanıtlanmış ve sıkı bir matris oluşturduğunu belirtmişlerdir. SEM analizleri incelendiğinde geopolimer zemin harcının yoğun yapısının yüksek basınç dayanımına katkıda bulunduğu söylenebilir.

Tez çalışmasında kullanılan F sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve alkali aktivatör (NaOH) ile oda sıcaklığında aktive edildiğinde yüksek bir basınç dayanımı elde edilmiştir. T₄ tasarımının maksimum basınç dayanımı 7.96 MPa'dır. Geopolimerin, zeminin yapısını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve parçacıkların daha sıkı bir şekilde birbirine bağlı ve daha az gözenekli hale geldiği görülmüştür Şekil (4.19) ve Şekil (4.20) .

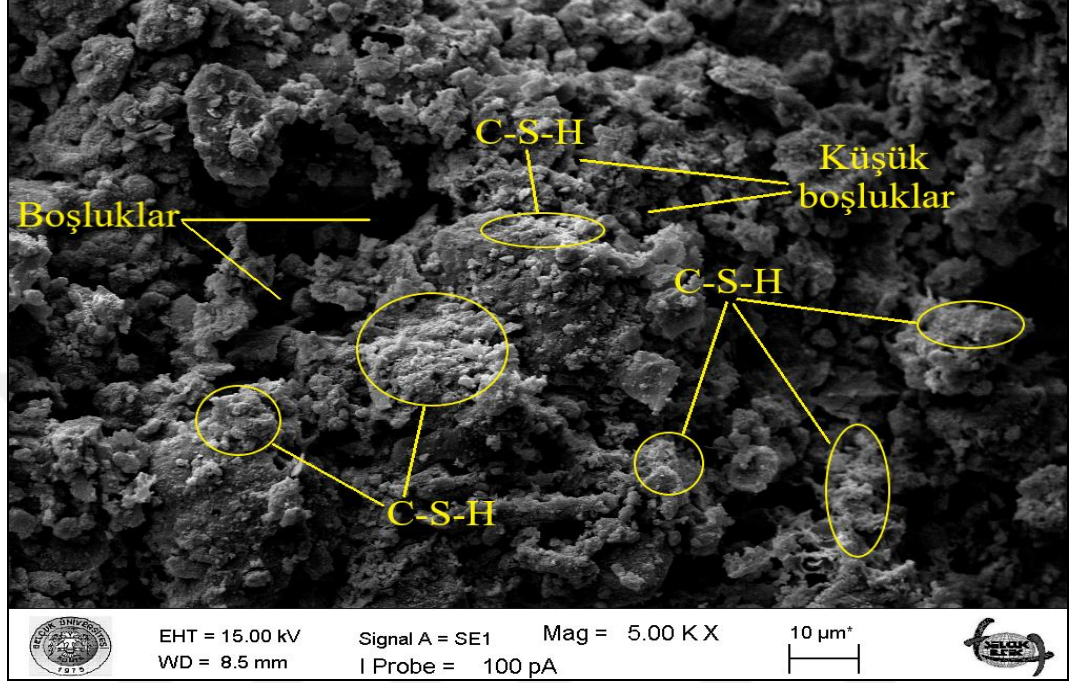


Şekil 4.19. T₄ nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 5.00 KX)

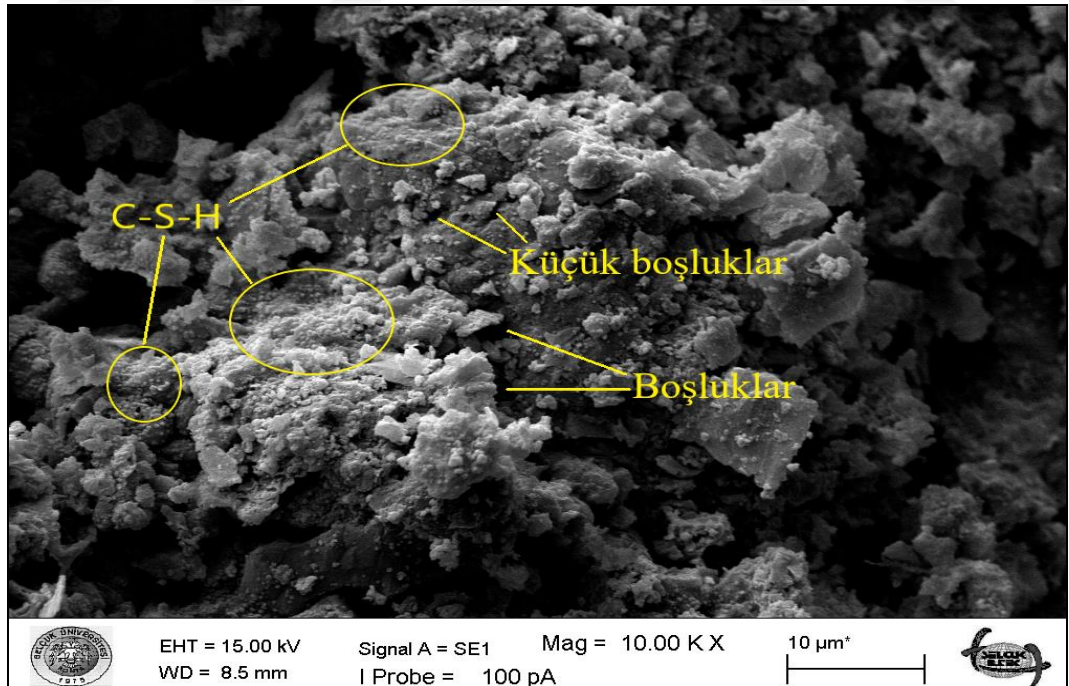


Şekil 4.20. T₄ Nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 10.00 KX)

13 numaralı tasarımda da parçacıklar arasında bir miktar bağlanma gözlemlendi, ancak 4 numaralı tasarıma kıyasla biraz daha azdı. Bu durum, 4 numaralı tasarımın daha yüksek dayanıklılığa sahip olmasının sebebi olarak açıklanabilir (Şekil 4.21) ve (Şekil 4.22).

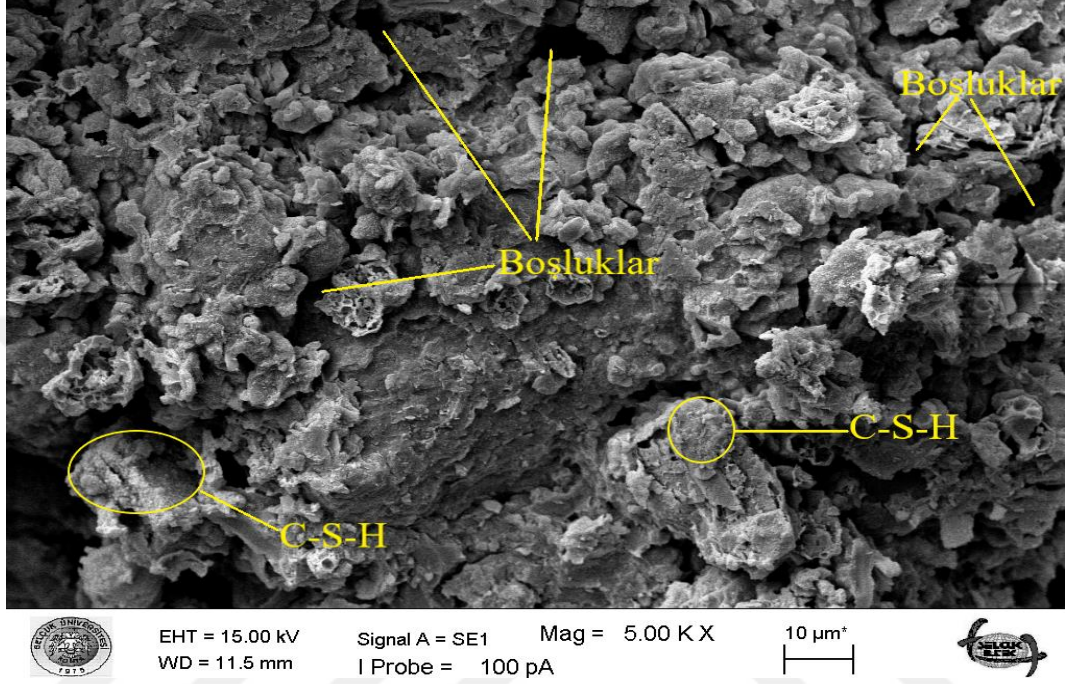


Şekil 4.21. T₁₃ nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 5.00 KX)

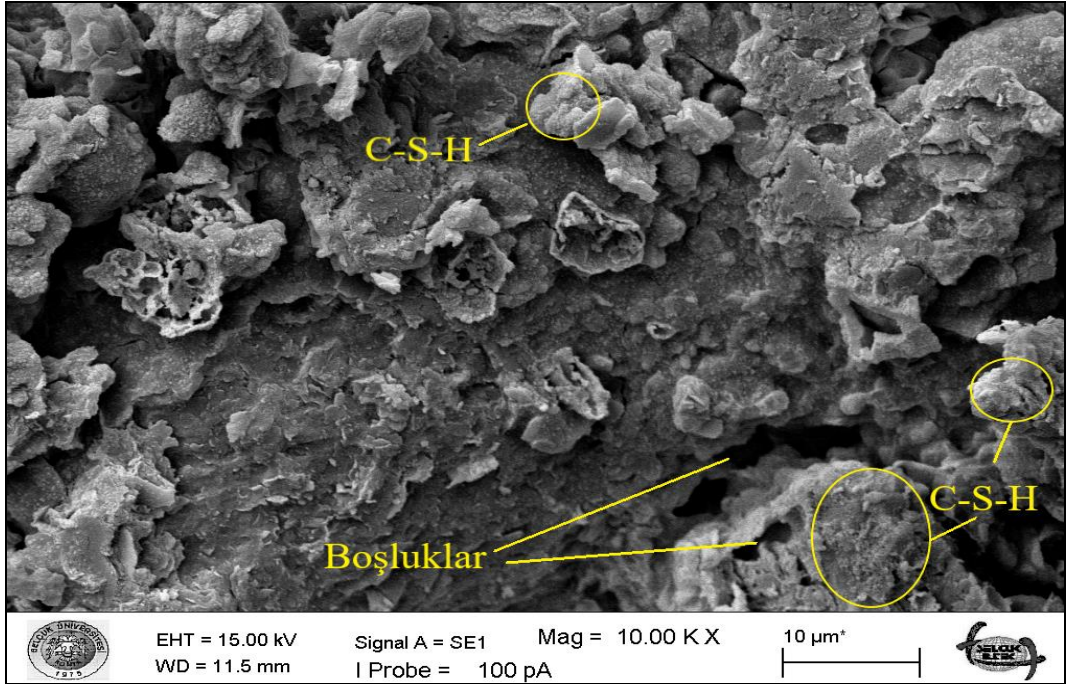


Şekil 4.22. T₁₃ Nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 10.00 KX)

Tasarım 1'de de parçacıklar arasında bazı bağlantılar gözlenmiştir, ancak belirli bölgelerde büyük boşluklar tespit edilmiştir. Bu durum, jel polimerlerin oluşumu için gereken silikat ve kalsiyum oksit miktarının diğer tasarımlara göre daha az olduğu şeklinde yorumlanabilir (Şekil 4.23 ve 4.24). Sonuç olarak, tasarım 1'in 3.96 MPa daha düşük bir dayanıklılığa sahip olduğu belirlenmiştir.

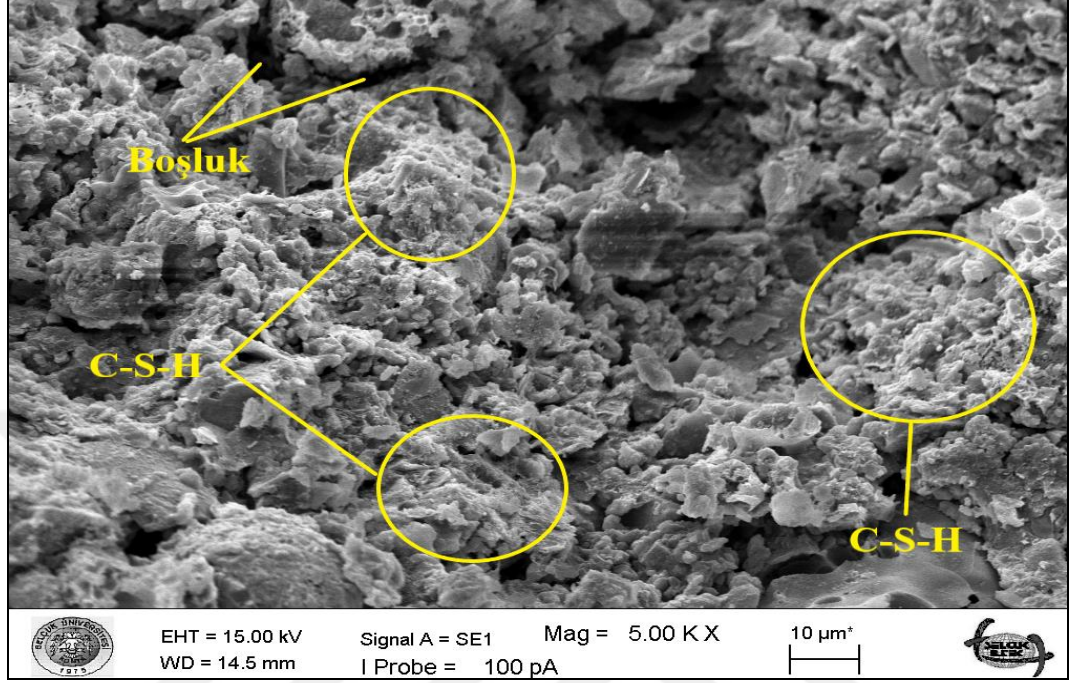


Şekil 4.23. T₁ nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 5.00 KX)

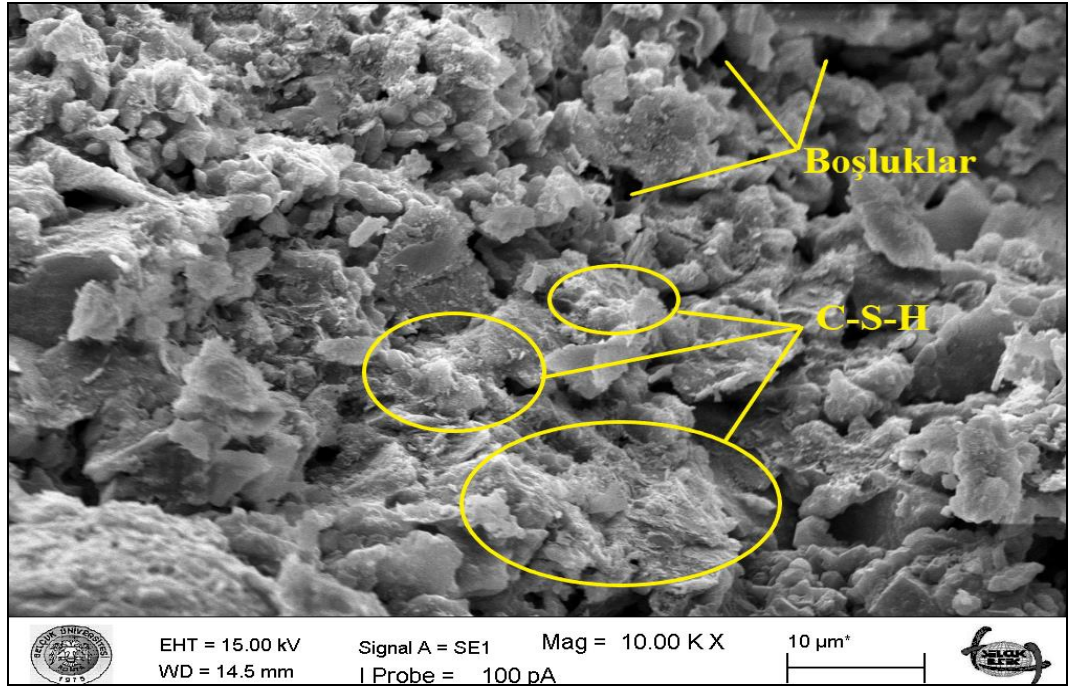


Şekil 4.24. T₁ nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 10.00 KX)

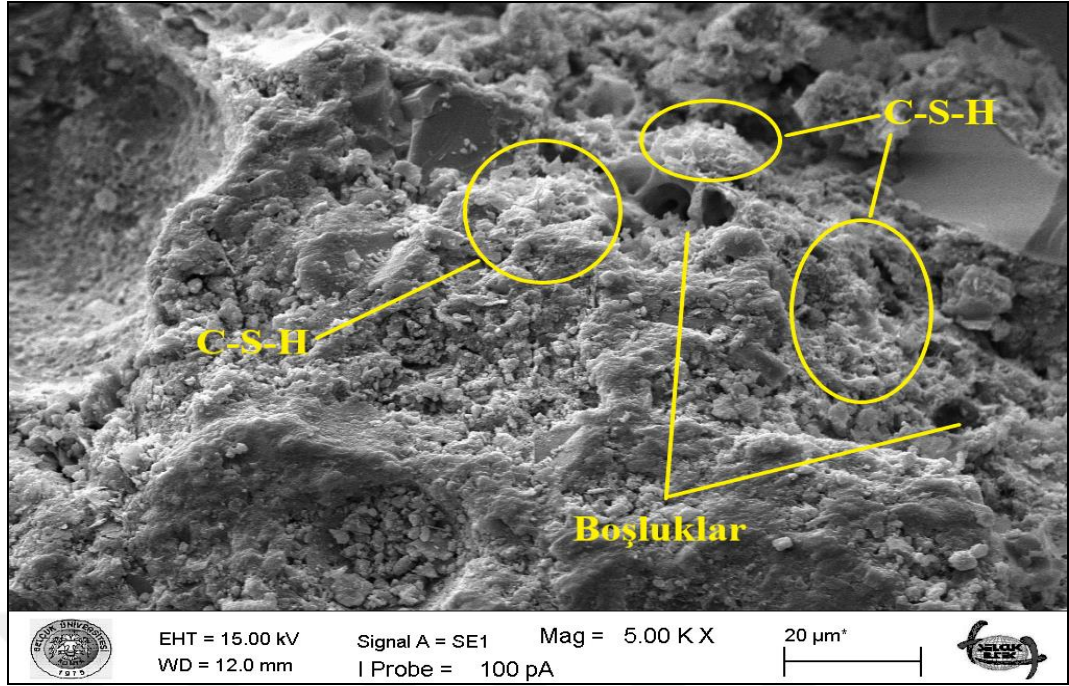
SEM analizi, geçirgenlik testinin ardından (3 cm uzunluğundaki numuneler) aynı tasarımlar (1, 4 ve 13) için de yapılmıştır. Sonuçlar, daha az boşluk ve daha fazla C-S-H jel zinciri gösterilmiştir (Şekil 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 ve 4.30).



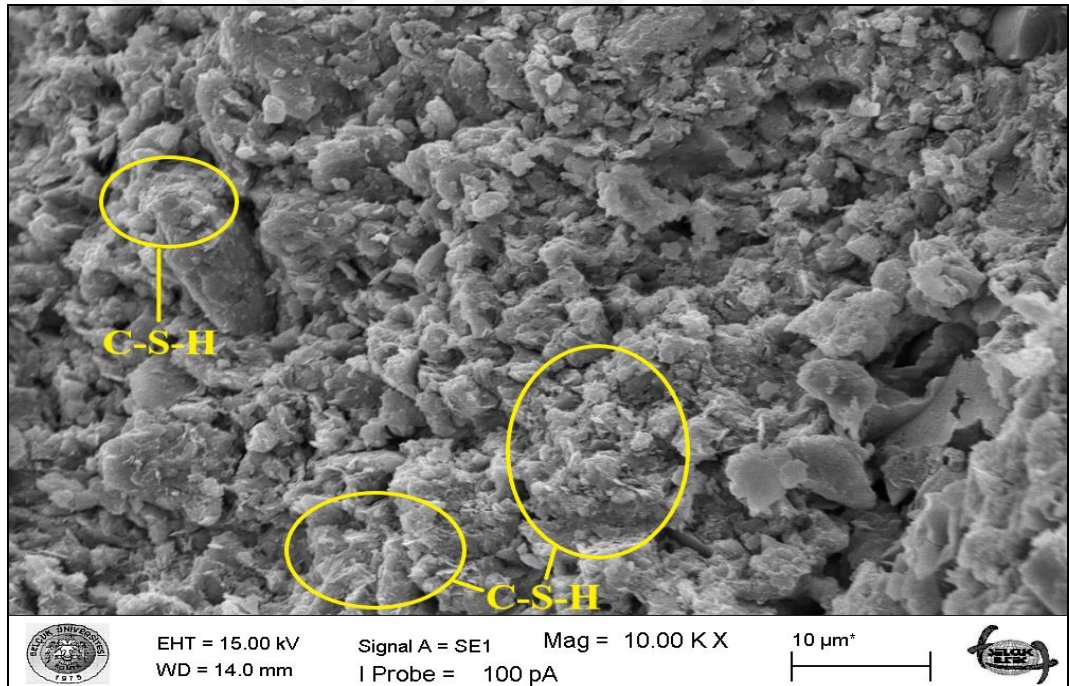
Şekil 4.25. T₁ nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 5.00 KX)



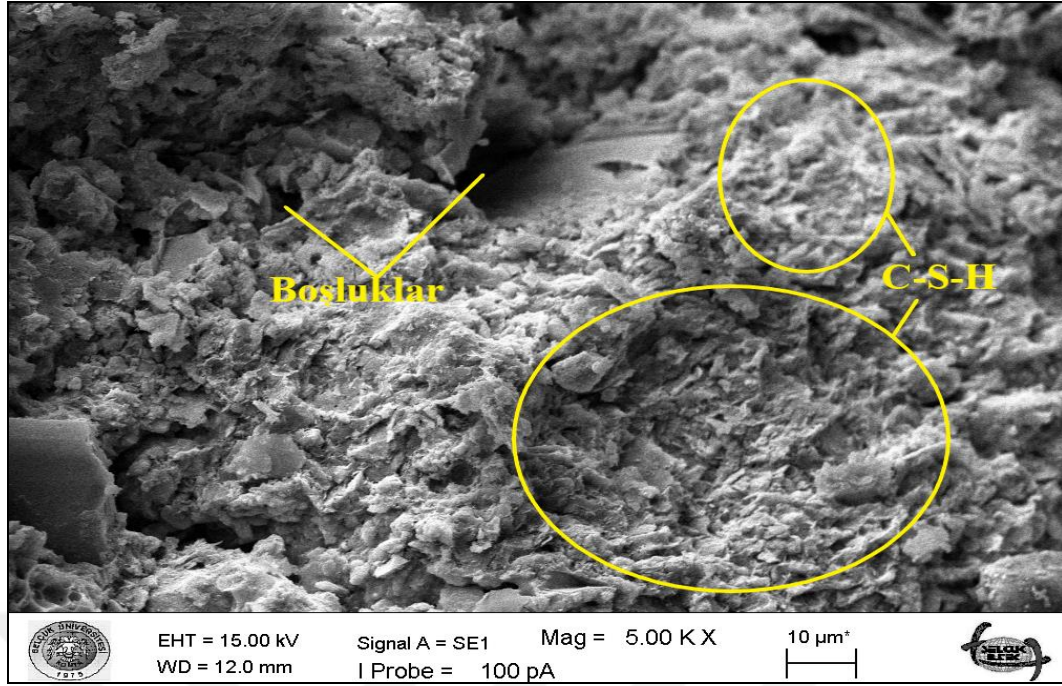
Şekil 4.26. T₁ nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 10.00 KX)



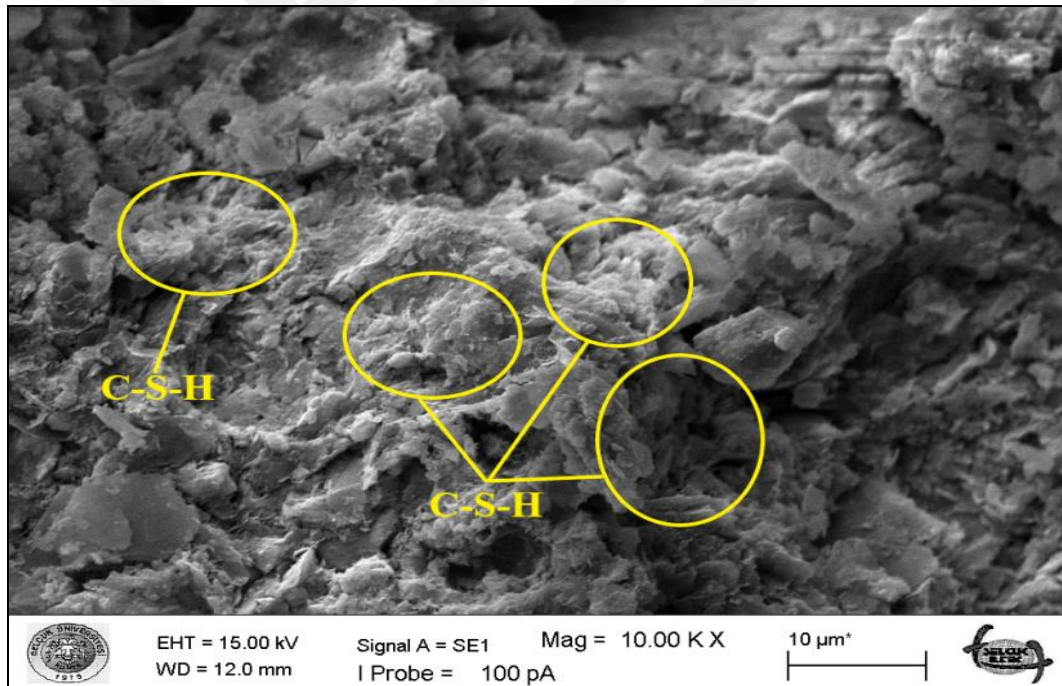
Şekil 4.27. T₄ nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 5.00 KX)



Şekil 4.28. T₄ nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 10.00 KX)



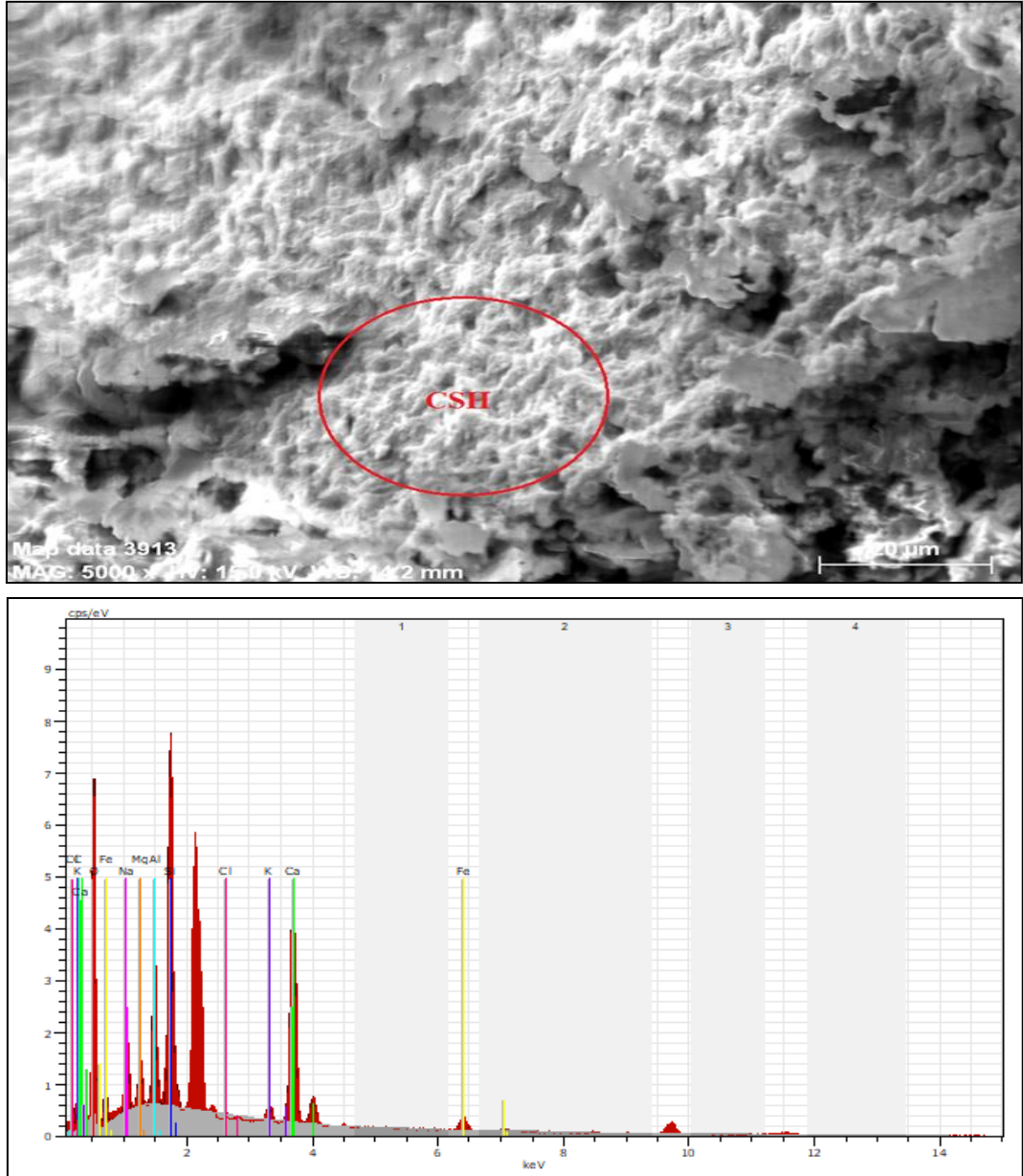
Şekil 4.29. T₁₃ nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 5.00 KX)



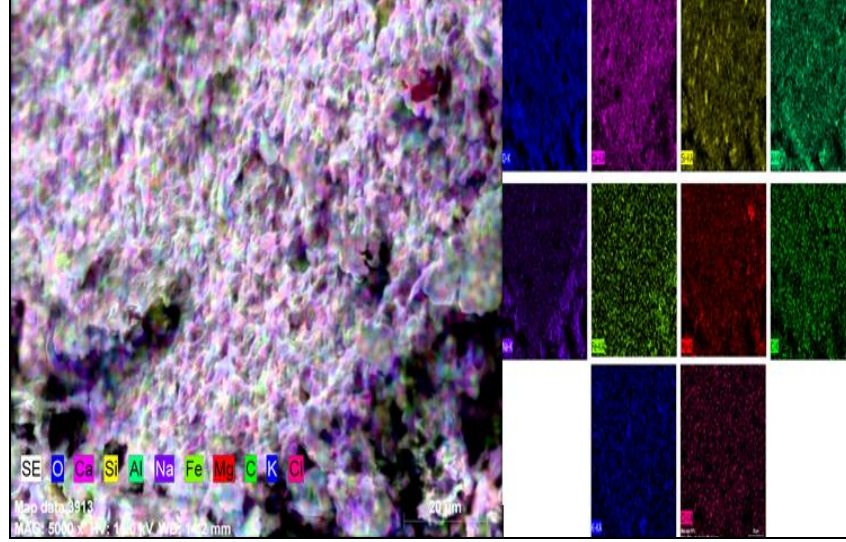
Şekil 4.30. T₁₃ nolu tasarım SEM analizi (Büyütme 10.00 KX)

4.5.2. EDS analizi sonuçları

Tasarım 1, %20 geopolimer içeren ve tasarım 4 ise %26 geopolimer içeren ESD analizi için seçilmiştir. Şekil 4.31'de, UK %12 + YFC %8, NaOH 6M içeren T₁ geopolimer numunesinden elde edilen SEM görüntüsü üzerinde C-S-H jelini içeren bir alan yöntemiyle EDS analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen elementel yüzdesi Çizelge 4.16'da verilmiştir. Şekil 4.32, Geopolimer numunesi Tasarım No. 1 içindeki kimyasal elementlerin dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.31. T1 nolu tasarım EDS analizi



Şekil 4.32. Tasarım 1'in geopolimer numunesi içindeki kimyasal elementlerin dağılım

Çizelge 4.16. T₁ ait numunesinin EDS analizi ve elementel yüzdesi

Elementler	Elementel Yüzdesi (%)
Kalsiyum	2.75
Oksijen	82.83
Silisyum	2.76
Alüminyum	1.08
Sodyum	1.31
Magnezyum	0.52
Potasyum	0.12
Demir	1.04
Karbon	8.26

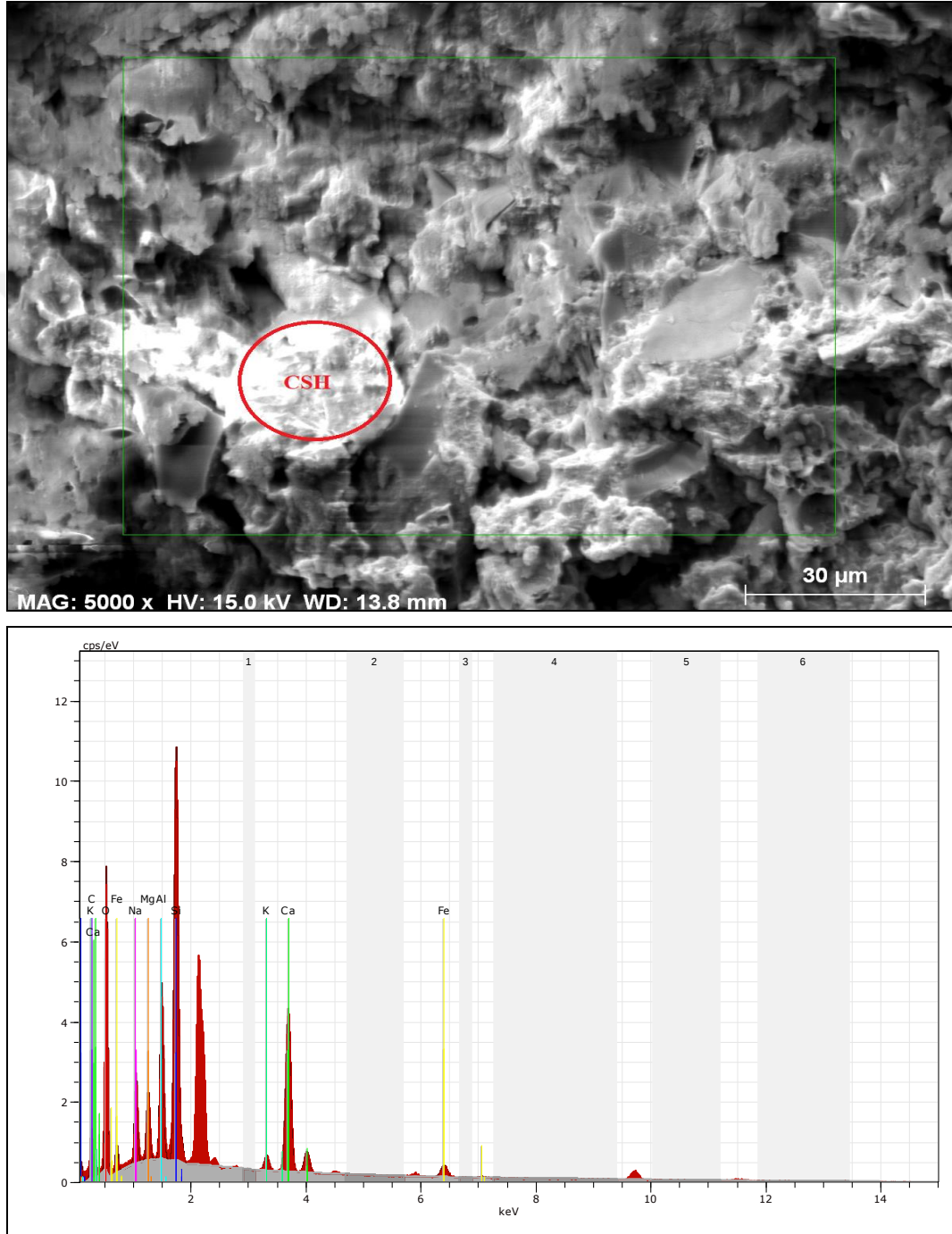
T₁ numunesi, yüksek oksijen (%82.83) ve karbon (%8.26) içeriğiyle dikkat çeken bir geopolimerdir. T₁ numunesinin mineral ve inorganik bileşenleri arasında kalsiyum, silisyum, alüminyum, sodyum, magnezyum, potasyum ve demir bulunmuştur. Bu elementlerin birleşimi, numunenin dayanımını etkilenmiştir.

Şekil 4.34'te, T₄ geopolimer numunesinden elde edilen SEM görüntüsü üzerinde C-S-H jelini içeren bir alan yöntemiyle EDS analizi yapılmıştır. Numune, UK %12 + %14 YFC ve NaOH 12M içermektedir. Analiz sonucunda elde edilen elementel yüzdesi Çizelge 4.17'de verilmiştir.

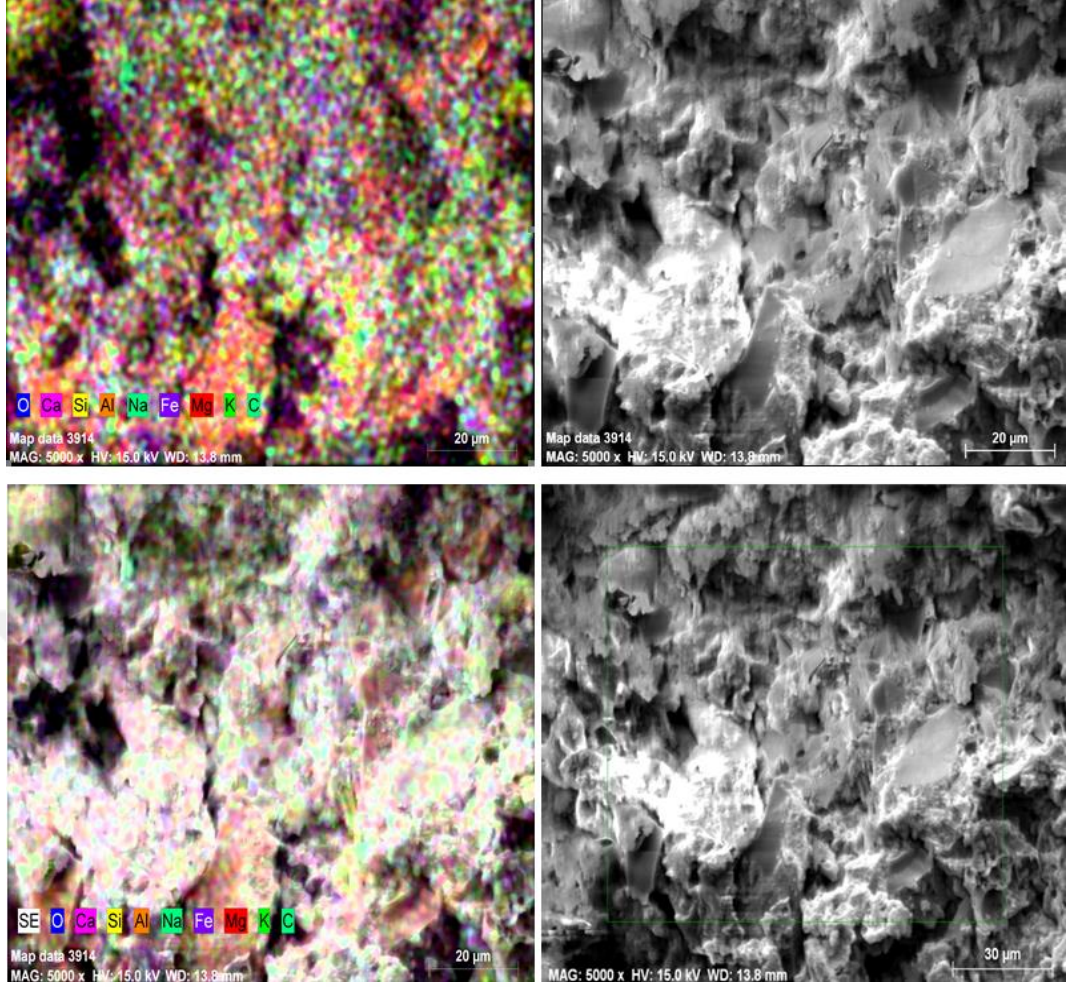
Çizelge 4.17. T₄ ait numunesinin EDS analizi ve elementel yüzdesi

Elementler	Elementel Yüzdesi (%)
Kalsiyum	6.63
Oksijen	69.86
Silisyum	10.11
Alüminyum	4.15
Sodyum	3.49
Magnezyum	1.97
Potasyum	0.5
Demir	1.04
Karbon	2.24

T₄ numunesinin elementel yüzde dağılımına bakıldığında yüksek oranda oksijen (%69.86), silikon (%10,11), kalsiyum (%6.63) ve alüminyum (%4.15) içeriği görülmüştür. Şekil 4.35, Geopolimer numunesi Tasarım No. 4 içindeki kimyasal elementlerin dağılımını göstermektedir. Bu numune, geopolimerin ana bileşenleri olan kalsiyum silikatların ve alüminosilikatların varlığını göstermiştir.



Şekil 4.34. T₄ nolu tasarım EDS analizi



Şekil 4.35. Tasarım 4'ün geopolimer numunesi içindeki kimyasal elementlerin dağılımı

T_1 ve T_4 numunelerinin elementel yüzdelere dayanarak, T_4 numunesinin daha yüksek dayanıma sahip olduğu bulunmuştur. T_4 numunesindeki kalsiyum, silisyum, alüminyum ve magnezyum oranları T_1 numunesine göre daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar, serbest basınç ve yükleme oranı ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçları desteklemektedir.

4.5.3. XRD analizi

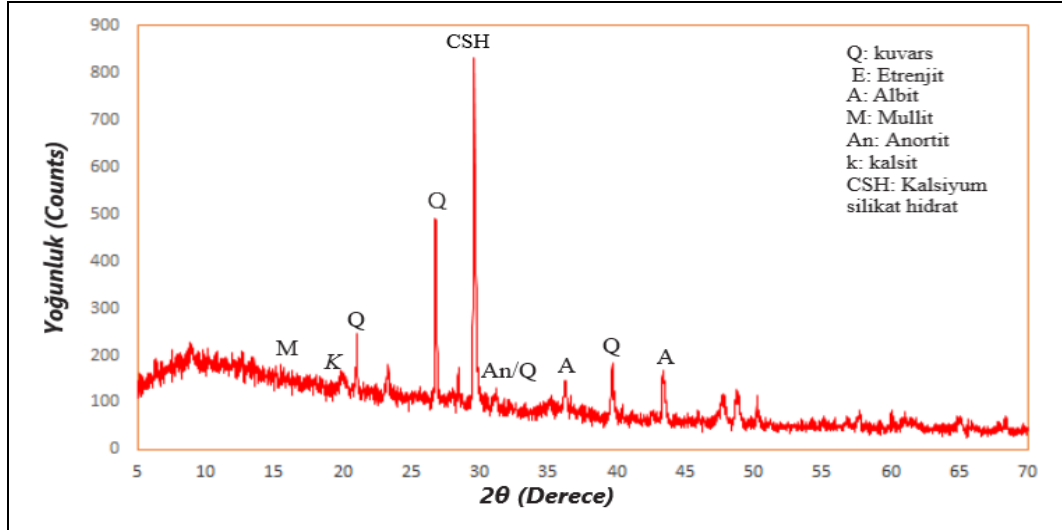
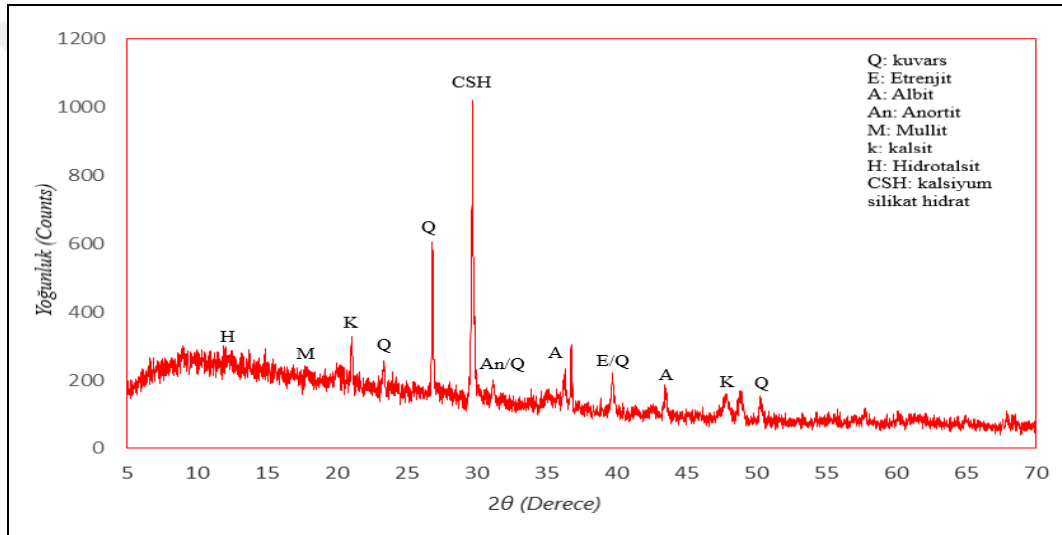
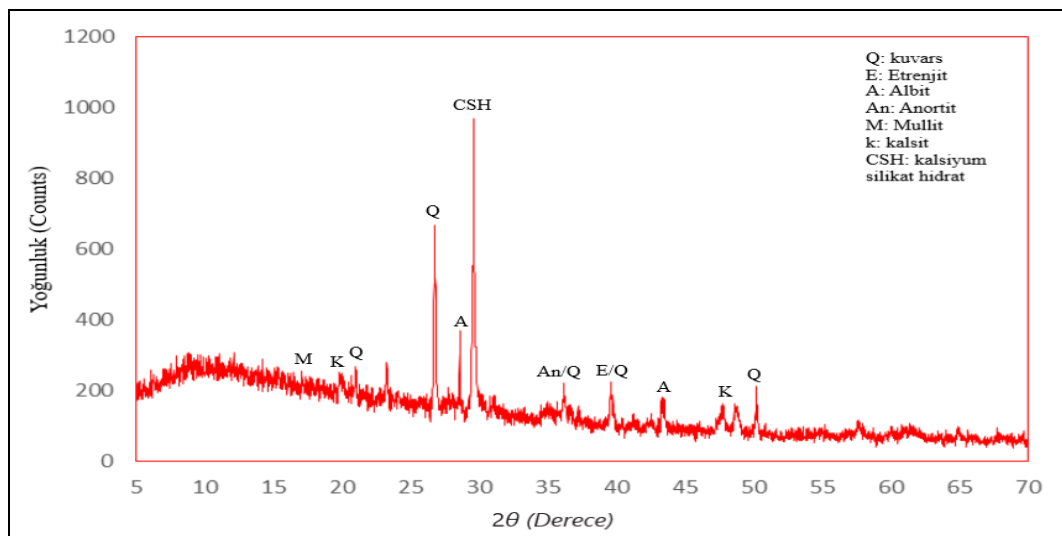
Geopolimer zemin numunelerinin mekanik performansını incelendikten sonra, mikroyapısında meydana gelen değişiklikleri yorumlamak için X-ışını kırınımı (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın kapsamında üretilen geopolimer zemin numunelerinden farklı 3 tasarımdan XRD analizleri KTUN merkez laboratuvarında XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir. XRD desenleri, 5° - 70° (2θ tarama açısı) arasında dakikada bir derece tarama hızıyla elde edilmiştir.

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu temel olarak cam fazları ve kuvars, mullit ve kalsit gibi kristal fazların küçük bir kısmından oluşmaktadır (Chao ve ark, 2010). Üretim süreçlerindeki bazı farklılıklardan dolayı, bu iki cam fazı çeşidinin bileşimi ve yapısı farklılık gösterir. Genellikle kabul edilen bir görüşe göre, uçucu külün bileşimi temel olarak alüminosilikat yapılardan oluşurken, YFC'nun bileşimi ise esas olarak kalsiyum alüminosilikat yapılardan oluşmaktadır (Chao ve ark, 2010). Puzolanik reaksiyon sonucunda kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat silikat hidrat (N-A-S-H) ürünleri oluşmuştur.

F sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve NaOH alkali aktivatörü kullanılarak, geopolimer zemin 23°C'de kürlendikten sonra deneylere tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, 1, 4 ve 13 tasarım numunelerinden yaklaşık olarak 15 gram alınarak toz haline getirilmiş ve XRD kırınım desenleri elde edilmiştir.

Geopolimer zeminde UK ve YFC içeren numunelerin 28 günlük yaşlardaki XRD analizleri incelendiğinde, C-S-H yoğunluğu ise en düşük T₁, en yüksek T₄ numunesinde meydana gelmiştir Şekil (4.36 ve 4.37). XRD analizleri incelendiğinde reaksiyona katılan YFC, UK% oranı ve NaOH molaritesi arttıkça, C-S-H miktarında artış meydana gelmiştir. Analizde T₁₃, orta dayanımlı numunelerden seçilmiştir (Şekil 4.38).

XRD kırınım desenleri üzerinden, gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda oluşan bileşiklerde kalsiyumun (Ca) önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. XRD kırınım desenlerinde molarite arttıkça Quartz (SiO₂) ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) bileşenlerinin tepe nokta değerleri önemli ölçüde artmıştır. Karışımlarda molaritenin artmasıyla birlikte kuvars tepesinin yoğunluğunda bir artış gözlenmiştir.

Şekil 4.36. T₁ Nolu tasarım için XRD kırınım grafiğiŞekil 4.37. T₄ Nolu tasarım için XRD kırınım grafiğiŞekil 4.38. T₁₃ Nolu tasarım için XRD kırınım grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Geopolimerlerin kullanımı ile çimento üretimi sırasında dezavantaj olan düşük karbon emisyonu (CO_2) ve yüksek enerji tüketiminin en aza indirgeyerek avantajlı ve arzu edilebilmektedir. Daha düşük çevresel zararlı yeşil yöntemlere yönelik mevcut artan talep karşısında geopolimerleri çimento ve kireç stabilizasyonunun önüne çıkarmaktadır.

Çalışmalarda Al-Si açısından zengin endüstriyel atıkların (UK, YFC, SD, mermer tozu vb.) aktivasyonu, sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) karışımları ile gerçekleştirilmiş ve geopolimerizasyon için en çok kullanılan çözüm olduğu bulunmuştur. Alkali aktivatörün molaritesi ve aktivatörün geopolimer öncü içeriğine oranı, stabilize edilmiş killerin mukavemetini belirleyen önemli faktörlerdir.

Geopolimerle stabilize edilmiş zeminlerin yüksek oranda kürlenmesi, işlenmiş zeminlerin reaksiyon hızını ve dayanımı artırsa da mevcut araştırmalar aynı zamanda bu tekniğin yol kaplaması, levhalar ve temel elemanları için alt temel ve alt temel malzemeleri gibi pratik uygulamalarda umut verici bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Bununla birlikte, geopolimerin zemin stabilizasyonunda bir bağlayıcı olarak kullanımı hızla gelişmektedir.

Killi zeminler, mühendislik açısından sorunlu bir zemindir ve iyi olmayan mühendislik özelliklerine sahiptir. Su içeriğinde az bir değişiklik olsa bile şişme ve büzülme nedeniyle tekerlek yükü uygulandığında kayma direncinin azalmasına yol açar. Yüksek plastisiteye sahip ince taneli zeminler, üzerine mühendislik projelerinin inşa edilmesi için uygun değildir, bu nedenle farklı stabilizasyon yöntemleriyle iyileştirilmeleri gerekmektedir.

Geopolimerin kil zeminin özelliklerini iyileştirmek için kullanılmasının büyük faydaları olduğu ve aynı zamanda çevresel avantajları olduğu göz önüne alındığında, geopolimerin çimento yerine nihai bir alternatif olarak kullanılması için ekonomik bir değerlendirme yapılabilir. Bu değerlendirme, geopolimerin ve çimentonun her ikisinin de faydalarını ve çevresel etkilerini dikkate alabilmektedir.

Bu tez çalışması, yüksek plastisiteli kil (CH) zeminle farklı oranlarda UK ve YFC atıklarının karıştırılarak hazırlanan geopolimer zemin numunelerinin mekanik özelliklerini (dayanım) belirlemeyi amaçlamaktadır. Sodyum hidroksit (NaOH), yüksek pH değerine sahip bir çözelti olduğu için, kullanıldığında ortamın pH seviyesini yükseltir ve alkali bir ortam oluşturur. Bu özellik, geopolimer oluşumu için kullanıldığında önemli bir rol oynamıştır.

7 günlük kür süresinde hazırlanan geopolimer zemin numunelerinin en düşük serbest basınç dayanımı 3.32 MPa, en yüksek 6.34 MPa olarak bulunmuştur. 28 günlük kür süresine sahip olan zeminlerde ise en düşük serbest basınç dayanımı 3.96 MPa, en yüksek 7.96 MPa olarak bulunmuştur. En düşük basınç dayanımı 3 MPa'lık sınırı aşmıştır, bu da zeminin özelliklerinin iyileştirilmesi anlamında çok iyi bir sonuç elde edildiğini göstermiştir.

Dayanıklılık, NaOH molaritesi, %YFC oranı ve %UK oranının artmasıyla birlikte artmıştır. NaOH, artan molaritesi, %YFC oranı ve %UK oranı sayesinde malzemelerdeki alüminayı ve silikayı çözerek, geopolimerizasyon sürecini hızlandırmıştır. Bu hızlanma, daha yüksek dayanımın elde edilmesinin sebebidir. Kür süresi arttıkça serbest basınç dayanımları artmıştır. 28 günlük kür süresinden sonra, tüm tasarımlarda dayanımın arttığı gözlemlenmiştir. 28 günlük ortalama dayanımların, 7 günlük kür süresiyle karşılaştırıldığında, dayanımın %20'nin üzerinde artış olduğunu göstermiştir.

Geopolimer zemin numunelerinin CBR değerlerinin yüksek taşıma gücü oranlarına sahip olduğu belirlenmiştir. CBR testi için, her tasarım için 6 adet (toplamda 96 numune) geopolimer numunesi hazırlanmıştır. 7-28 günlük kür süreleri için en düşük ve en yüksek CBR oranları sırasıyla (%186, %310), (%244 %389) olarak belirlenmiştir. Bu artışın nedeni NaOH molaritesi, %YFC ve %UK oranının arttırılmasıdır.

Geopolimerizasyon süreci sonucunda, (C-S-H) (kalsiyum silikat hidrat) ve (N-A-S-H) (sodyum alüminosilikat hidrat) jellerinin oluşumu gerçekleşmiştir. Bu jellerin oluşumuyla birlikte artan direnç, serbest basınç dayanımı ve CBR oranının artmasına yol açmıştır.

Geopolimer zemin numunelerinde UK, YFC ve NaOH molaritesi arttıkça (yüksektildiğinde) geopolimer numunelerde geçirimsizliğin azaldığı görülmüştür. UK ve

YFC içindeki yüksek Al^{+} ve Si^{+} içeriği, hızlı ve yoğun alüminosilikat oluşumunu ve geopolimerik ağın büyümesini neden olmuştur. Oluşan geopolimerik jelin boşlukları doldurarak geçirgenliği azaltmıştır. En düşük geçirimsilik, 4. tasarımda, 6.45×10^{-11} m/sn, 1. tasarımda en yüksek geçirimsiliğin olduğu ve geçirgenlik katsayısı 2.43×10^{-10} m/sn olarak ölçülmüştür.

Varyans analizleri (ANOVA) yapılarak parametrelerin deney sonuçları üzerindeki etki dereceleri belirlenmiştir. Araştırılan parametrelerin, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda geopolimer numunelerin serbest basınç dayanımı, CBR oranı ve geçirimsilik üzerindeki etkileri, sırasıyla NaOH Molaritesi, %YFC oranı ve %UK oranı şeklinde bulunmuştur. NaOH Molaritesi, %YFC ve %UK 'nın dayanım üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu anlaşılmaktadır.

SEM görüntülerinde, geopolimer zemin ana reaksiyon ürünleri olarak geopolimer jel, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve (N-A-S-H) jelleri bulunduğu gözlemlenmiştir. Zemin parçacıklarına yapışık çok sayıda beyaz iğne benzeri ve yumaksı çimentolaşma ürünleri görülmüştür. (C-S-H) ve (N-A-S-H) jelleri, SEM analizi yapılan geopolimer numunelerde, büyütme oranı arttıkça daha net bir şekilde gözlenmiştir. Geopolimerin, zeminin yapısını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve parçacıkların daha sıkı bir şekilde birbirine bağlı ve daha az gözenekli hale geldiği görülmüştür. Geopolimer zemin, zemin parçacıklarını sıkı bir şekilde bağlayan bir alkalın aktivatörün mevcudiyetinde hızla çok sayıda düzgün dağılmış jelatinimsi ürünler elde edilmiştir. EDS sonuçları, jelatinimsi ürünlerin C-S-H jeli ve sodyum bazlı alüminosilikattan (N-A-S-H) oluştuğunu göstermektedir.

XRD analiz sonuçlarına göre geopolimer zemin numunelerinde, puzolanik reaksiyon sonucunda kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) ve sodyum alüminat silikat hidrat (N-A-S-H) ürünleri oluşmuştur. YFC ve UK içeriği ve NaOH molaritesi arttıkça, C-S-H miktarında artış meydana gelmiştir.

5.2. Öneriler

Stabilize killerin saha koşullarındaki performansını değerlendirmek için pratikte arazi uygulaması gerektirir. Geopolimerlerle stabilize edilmiş killerin, karayolu alt zemin malzemesi üzerindeki fiili davranışı temsil eden tekrarlı yükleme koşulları altındaki performansı henüz yeterince araştırılmamıştır. Geopolimerler, problemlili killerin geoteknik özelliklerinin geliştirilmesinde, çimento ve kireç kullanımını içeren geleneksel stabilizasyon yöntemleriyle karşılaştırılabilir. Güvenilir bir şekilde sonuçlar elde edilebilir.

Farklı kür sıcaklarında zemin bazlı geopolimerler üzerindeki etkilerinin daha fazla araştırılması gerekmektedir.

Zemin iyileştirme çalışmalarında geopolimerlerin karışım tasarım, mekanik ve fiziksel özelliklerinin tanımlanmasında önemlidir. Bu sebeple AA (optimum katı-sıvı oranı) oranı, sodyum-potasyum hidroksit (NaOH, KOH) ve sodyum silikat oranları, molaritesinin SBD, CBR ve kıvam limitleri deneyi gibi zeminin stabilize edici gereklilikleri ilgili olarak daha fazla araştırmaların yapılması gerekir. Araştırma kapsamını genişletmek için potasyum hidroksit gibi diğer alkalik çözeltilerin kullanımıyla karşılaştırma yapılabilir. Ayrıca, optimum su muhtevassından farklı oranlarda alkali kullanılması zemin özelliklerine etkisi incelenebilir.

Literatür çalışmaları ve araştırmalar incelendiğinde UK, YFC esaslı geopolimerlerle yapılan stabilizasyonun zayıf killi zeminlerin dayanımının arttığını belirtilmiştir. Gelecek çalışmalarda zemini stabilize edecek malzemelerin (bağlayıcı özelliği olan) geopolimerlerin kullanılması önerilmektedir.

Geopolimer, alüminat ve silikat arasındaki kimyasal reaksiyon sonucunda, alkali çözeltiler gibi katalizörler kullanılarak oluşmaktadır. Bu kimyasal reaksiyon sırasında, monomer birimleri arasında kimyasal bağlar oluşup uzun polimer zincirlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Bu polimer zincirleri birbirine dolanır ve çapraz bağlar oluşturarak üç boyutlu bağlantılı yapılar oluşturmaktadır. Bu çapraz bağlı yapılar, geopolimerin mekanik özelliklerini artırmaya katkıda bulunur. Geopolimer diğer endüstriyel atıklar (C sınıfı uçucu kül, silis dumanı ve volkanik kül gibi uçucu kül ve fırın cürufu yerine kullanılabilir. Yeterki, bu atıklar yeterli miktarda silikatlar, alüminosilikatlar ve kalsiyum oksit içermesi durumunda geopolimer oluşumuna katkıda

bulunabilir. Bu nedenle, geopolimerlerin oluşturulmasında çeşitli endüstriyel atıkların kullanımı olasıdır.

Sıcaklık, özellikle CaO oranı düşük olan atıkların geopolimer oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, sıcaklığın geopolimer oluşumuna etkisi incelenerek araştırma genişletilebilir.



KAYNAKLAR

- Abdila, S. R., Abdullah, M. M., Al B., Ahmad, R., Nergis, D. D. B., Abd Rahim, S. Z., Omar, M. F., Sandu, A. V., Vizureanu, P. and Syafwandi, 2022, Potential of soil stabilization using ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and fly ash via geopolymerization method: A review, *Materials*, 15, 375.
- Abdila, S. R., Abdullah, M., Ahmad. R., Abd Rahim. S., Rychta, M., Wnuk, Ī., Nabiałek, M., Muskalski. K., Tahir. M., Syafwandi., Isradi, M. and Gucwa, M., 2021, Evaluation on the mechanical properties of ground granulated blast slag (GGBS) and fly ash stabilized soil via geopolymer process, *Materials*, 2-19.
- Abdullah, H., Shahin, M. and Walske, M., 2019, Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag, Science Direct, *Soils and Foundations*, 59, 1906-1920.
- Abdullah, S. and Ahmad, F., 2017, Effect of alkaline activator to fly ash ratio for geopolymer stabilized soil. *Mathematic web of conferences*, 97.
- Abed, M. H., Abbas, I. S., Hamed, M. and Canakci, H., 2022, Rheological, fresh, and mechanical properties of mechanochemically activated geopolymer grout: A comparative study with conventionally activated geopolymer grout, *Construction and Building Materials*, 322, 126338.
- Afrin, H., 2017, A review on different types soil stabilization techniques. *International Journal of transportation engineering and technology*, 3(2), 19-24.
- Ahmaruzzaman, M., 2010, A review on the utilization of fly ash. *Progress in energy and combustion science*, 36(3), 327-363.
- Akbulut, F., Polat, R. ve Karagöl, F., 2021, Erzurum Pasinler Bölgesi Perlitinin Geopolimer Üretiminde Kullanımının Araştırılması, *Türk ve Doğa Fen Dergisi*, 10 (1), 37-45.
- Alnuaimi, M.D.A. 2019, Investigation of Using Geopolymer Utilized Limestone Dust and Bottom Ash for Grouting and Deep Mixing. Yüksek Lisans Tezi *Gaziantep üniversitesi, fen bilimleri enstitüsü*, Gaziantep, 69.
- Alonso, S. and Palomo, A., 2001, Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide-metakaolin solid mixtures. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 25-30.
- Amran, M., Huang, S.S., Debbarma, S. and Rashid, R. (2022) Fire resistance of geopolymer concrete: A critical review. *Construction And Building Materials* 324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126722>
- Amulya, S., Ravi Shankar, U. and Praveen, M., 2020, Stabilization of lithomarge clay using alkali activated fly ash and ground granulated blast furnace slag, *International Journal of Pavement Engineering*, 21(1), 1-8.
- Antiohos, S. K., & Tsimas, S., 2007, A novel way to upgrade the coarse part of a high calcium fly ash for reuse into cement systems. *Waste management*, 27(5), 675-683.
- Arıöz, E. 2015, Geopolimer elde edilmesi ve katyon, pH ve ısıtıl işlemin geopolimer üzerine etkisi, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı*, Eskişehir, 236.

- Arioz, E., Arioz, O., and Kockar, M., 2020 Geopolymer synthesis with low sodium hydroxide concentration, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Eng.*, 44 (1), 525-533.
- ASTM 4609, 2017, Standard guide for evaluating effectiveness of admixtures for soil stabilization; *ASTM International*: West Conshohocken, 5PA, USA, Vol. 4, p. 5.
- ASTM C618, 2015, Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *ASTM*, Pennsylvania, 1-5.
- ASTM C618, A., 2019, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. *ASTM international*.
- ASTM D 2487, 2017, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System); *ASTM International*: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D1633-17, 2017, Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders. *ASTM International*, West Conshohocken PA, USA
- ASTM D2166, 2016, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, *ASTM*, Pennsylvania, 1-7.
- ASTM D2434, 2006, Standard test method for permeability of granular soils, *ASTM International*: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D4254, 2006, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density, *ASTM*, Pennsylvania, 1-8.
- ASTM D4318, 2008, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, *ASTM*, USA.
- ASTM D5084 – 16a, 2016, Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, 9-11, *ASTM*, USA.
- ASTM D6913-04, Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis, *ASTM*, Pennsylvania, 1-38, 2009.
- ASTM D698-12e2, 2012, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D854, 2010, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, *ASTM*, Pennsylvania, 1-15.
- Aydilek, H. and Arora, S., 2004, Fly ash amended soils as highway base materials, *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, 1032-1041.
- Aygörmez, Y., 2018 Kulemanit atığı ve silis dumanı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer harcın mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi *Yıldız teknik üniversitesi, fen bilimleri enstitüsü*, İstanbul s.195
- Aytekin, M., 2004, Deneysel Zemin Mekaniği, *Akademi Yayınevi*,
- Aziz, H., 2019, Behavior changes of ground granulated blast furnace slag geopolymers at high temperature, *Advances in Cement Research*, 32 (10), 465-475.

- Aziz, H., Zulkifly, K., Sakkas, K., Panias, D., Tsaousi, M., Bakri, A. and Yong, C., 2017, The characterization of steel slag by alkali activation, *Open Access Library Journal*, 4, 1-13.
- Bakırdöven, A., 2021, Endüstriyel atıkların geopolimerler eldesinde kullanılabilirliği ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü üniversitesi fen bilimleri enstitüsü*, 154.
- Bankowski, P., Zou, L. and Hodges, R. 2004, Reduction of metal leaching in brown coal fly ash using geopolymers. *Journal of hazardous materials*, 114(1-3), 59-67.
- Bowles, J. E. 1979, Physical and geotechnical properties of soils, New York, United States.
- Brindley, W. and Brown, G., 1980. Crystal structure of clay minerals and their Xray identification. *Mineralogical society*, London.
- Brooks, J., 2002, Prediction of Setting Time of Fly Ash Concrete, *Materials journal*, 99, 591-597.
- Buhler, L. and Cerato, B., 2007. Stabilization of oklahoma expansive soils using lime and class C fly ash. *Geotechnical special publication*, 162, 1-10.
- Canakci, H., Güllü, H. and Alhashemy, A., 2019, Performances of using geopolymers made with various stabilizers for deep mixing, *Materials*, 12(16), 2542.
- Castillo, H., Collado, H., Droguett, T., Vesely, M., Garrido, P. and Sergio, P., 2021, State of the art of geopolymers: A review: *e-Polymers* 2022, 22, 108-124.
- Chao, L., Henghu, S. and Longtu, A., 2010, Review: the comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements, *Cement and concrete research*; 40, 1341-1349
- Chen, K., Wu, D., Zhang, Z., Pan, C., Shen, X., Xia, L. and Zang, J., 2021, Modeling and Optimization of Fly Ash-Slag-Based Geopolymer Using Response Surface Method and Its Application in Soft Soil Stabilization, *Construction building materials*, 315 (S1), 125723.
- Cioffi, L., Maffucci, L. and Santoro B., 2003, Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue, *Resources, Conservation and Recycling*, 40 (1), 27-38.
- Cristelo. N., Glendinning. S, Farnandes. L, and Pinto. A.T., 2011, Effect of calcium content on soil stabilization with alkaline activation, *Construction Building Materials*, 29, 167-174.
- Çınar, M., ve Erbaşı, B., 2022, Geoteknik uygulamalarda geopolimerlerin kullanılabilirliğinin incelenmesi: literatür çalışması, KSU, *Mühendislik bilimleri dergisi*, 25 (4).
- Darcy, H., 1856, *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Dalmont, Paris, 674.
- Das, B. M., 2006, *Principles of Geotechnical Engineering*. Sixth Edition, Nelson Press, Thompson Canada Limited, 200-322.
- Davidovits, J and Sawyer. L, 1985, Early high strength mineral polymer. US Patent no.4509985.
- Davidovits, J., 1994, Properties of geopolymer cements, In Kiev (Ed.), *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 1, 131-149.

- Davidovits, J., 2008, Geopolymers – chemistry and application, San Quintin, *Institute geopolymers*, 1-22.
- Dayalan, J., 2016, Comparative study on stabilization of soil with ground granulated blast furnace slag (GGBS) and fly ash, *International Journal of Engineering Research and Technology*. 3, 2198-2204.
- Demiröz, A. ve Karaduman, M., 2009, Zemin iyileştirme metotları, *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergisi*, 8(3), 1-17
- Demiröz, A., 1992, Zemin İyileştirme Metotları, Yüksek lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Demiröz, A., 2009, Uçucu Küllerin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu *Teknik-Online Dergisi*, 8 (3), 212-221.
- Deng, Y., Yue, X., Liu, S., Chen, Y. ve Zhang, D. 2015, Hydraulic conductivity of cement-stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution, *Engineering geology*, 193, 146–152.
- Eberwein, R., Oikawa, Y., Allsman, A. and Jenerette, D., 2015, Carbon availability regulates soil respiration response to nitrogen and temperature, *Soil biology and biochemistry*, 88, 158-164.
- Eftelioğlu, M. and Bowders, J., 1992, Permeability testing of fly ash/grout specimens, *Environmental geotechnology*, Rotterdam, 495-501.
- Engin, Y., 2015, Yüksek fırın cürufu & Yüksek Fırınlı Çimento Üretimi Özellikleri Etkileri, 21.
- Erken, A., 2015, Geoteknik mühendisliğine giriş, *Nobel Yayınevi*, Ankara
- Feng, D., Tan, H. and Deventer, J., 2004, Ultrasound enhanced geopolymerization, *Journal of Materials Science*, 39, 571-580.
- Geçkil T., Tanyıldız, M. ve Yıldırım, S., 2020, Yüksek fırın cürufu ile stabilize edilmiş killi bir zeminin yol esnek üstyapı tabaka kalınlıklarına ve maliyetine etkiler, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(2), 509-520.
- Geliga, E. A., & Ismail, D. S. A., 2010, Geotechnical properties of fly ash and its application on soft soil stabilization. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 1(2), 1-6.
- Gök, S., 2020, Alkali ile aktive edilmiş harç ve atık çelik tel donatılı betonların (sıfcon) fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin araştırılması, Doktora tezi, *İstanbul teknik üniversitesi, fen bilimleri enstitüsü*, İstanbul.
- Göktepe, B., Sezer, A., Sezer, I., and Ramyar, K., 2008. Classification of time-dependent unconfined strength of fly ash treated clay, *Construction and building materials*, 22 (4), 675–683.
- Görhan ve ark., 2009, Uçucu kül Bölüm II: Kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt 5, No:2, s.33-42.
- Görhan, G., 2020, Geopolimer Harç Özelliklerine Metakaolin Kalsinasyon Sıcaklığının Etkisi, Afyon Kocatepe University, *Journal of Science and Engineering* 20.
- Grim, R. E., 1968, Clay Minerology: 2, *McGraw-Hill Book Company*, New York,

- Guo, X., Shi, H. and Dick, W. A., 2010, Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and concrete composites*, 32(2), 142-147.
- Güçlüer, K., 2011, Uçucu külden üretilen silis dumanı katkılı gaz beton örnekleri üzerine kür etkisinin araştırılması Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Güllü, H. and Agha, A.A., 2020, The rheological, fresh and strength effects of cold-bonded geopolymer made with metakaolin and slag for grouting, *Construction and building materials* 274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122091>
- Huayang, Y. E., Weifeng, Z. H. A. N. G. and Wei, W. E. I., 2019, Experimental study on the curing of soft soil with activator-geopolymer. *Journal of Basic Science and Engineering*, 27(4), 906-917.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Hamdan, S., and van Deventer, J. S., 2014, Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash, *Cement and Concrete Composites*, 45, 125-135.
- Jaarsveld, J., Deventer, V., and Lukey, G., 2002, The effect of composition and temperature on the properties of fly ash-and kaolinite-based geopolymers, *Chemical Engineering Journal*, 89, S 63-73
- Jaarsveld, V., Deventer, V. and Lorenzen, L., 1998, *Metal Mater Trans B* 29:283
- Jiang, W., & Roy, D. M., 1992, Hydrothermal processing of new fly ash cement, *American Ceramic Society Bulletin;(United States)*, 71(4).
- Joseph, G., Mathew, G., 2012, Influence of aggregate content on the behaviour of fly ash based geopolymer concrete, *Scientia Iranica* 19-5
- Kantarcı, F., 2013, Elâzığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü üniversitesi, fen bilimleri enstitüsü*, Malatya.
- Karna, K. and Sahai, R., 2012, An overview on Taguchi method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, 1, 1-7.
- Kate, M., 2005, Strength and volume change behavior of expansive soils treated with fly ash, *Geotechnical Special Publication*. ASCE, 1851-1865.
- Kaya, M., 2016, farklı tür uçucu küller kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Khale, D. and Chaudhary, R., 2007, Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review, *Journal of Materials Science*, 42, 729-746.
- Kirschner, A. and Harmuth, H., 2004, Investigation of geopolymer binders with respect to their application for building materials, *journal Ceramics-Silicate*, 48, 117-120.
- Kumar, P. and Sharma, S., 2004, Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 130 (7), 764-767.
- Kumar, S., Kumar, R. and Mehrotra, S. P., 2010, Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer, *Journal of materials science*, 45, 607-615.

- Lee, W., Lin, K., Chang, T., Ding, W. and Cheng, T., 2020, Sustainable Development and Performance Evaluation of Marble-Waste-Based Geopolymer Concrete, *Polymers* 2020, 12, 1924.
- Lloyd, R., Provis, J. and Deventer, J., 2009, Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements. 1: remnant fly ash particles, *Journal of Materials Science*, 44, S 608-619.
- Lorenzo, A., Bergado, T., Bunthai, W., Hormdee, D. and Phothiraksanon, P., 2004, Innovations and performances of PVD and dual function geosynthetic applications, *Geotextiles and Geomembranes*, 22(1-2), 75-99.
- Luhar, I., Luhar, S., Abdullah, M. M. A. B., Nabiałek, M., Sandu, A. V., Szmidla, J., Jurczyńska, A., Abdul Razak, R., Aziz, I., Jamil, N. and Deraman, L. M., 2021, Assessment of the suitability of ceramic waste in geopolymer composites: An appraisal, *Materials*, 14(12), 3279.
- MacKenzie, K. J., Brew, D., Fletcher, R., Nicholson, C., Vagana, R. and Schmücker, M., 2006, Advances in understanding the synthesis mechanisms of new geopolymeric materials, Novel Processing of Ceramics and Composites, *Ceramic Transactions Series*, 195, 185-199.
- Malayoğlu, U. ve Akar, A., 1995, Killerin Sınıflandırılmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranılan Kriterlerin İrdelenmesi, *1. Endüstriyel hammaddeler sempozyumu*, Köse ve Kızıl, Ed., İzmir, 125-133.
- Michel, B. and Sakulich, A., 2008, Composition and methods for generating concrete compounds. Patent no. WO 2008/048617A2.
- Miraki, H., Shariatmadari, N., Ghadir, P., Jahandari, S., Tao, Z. and Siddique, R., 2021, Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics*, 2-6.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M., Bo, W. and Darmawan, S., 2016, Stabilization of demolition materials for pavement base/subbase applications using fly ash and slag geopolymers: Laboratory investigation, *Journal of materials in civil engineering*, 28.
- Montgomery, D. C., 1999, Experimental design for product and process design and development. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 48(2), 159-177.
- Morrison, R., E., 1970, A Review of Ash Specifications, *Symposium on fly ash utilization*, Pittsburgh, 24-31.
- Mozumder, R. and Laskar, A., 2015, Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil using Artificial Neural Network, *Computers and Geotechnics*, 69, 291-300.
- Mujtaba, H., Aziz, T., Farooq, K., Sivakugan, N. and Das, M., 2018, Improvement in Engineering Properties of Expansive Soils using Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of the Geological Society of India*, 92 (3), 357-362.
- Murali, K., Sambath, K. and Hashir, S., 2018, A Review on clay and its engineering significance, *International journal of scientific and research publications*, 8(2).

- Murmu, A. and Patel, A., 2020, Studies on the properties of fly ash–rice husk ash-based geopolymer for use in black cotton soils, *International journal of geosynthetics and ground engineering*, 6(38), 2-14.
- Nalbantoglu, Z., 2004, Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer *Construction and Building Materials*, 18 (6), 377-381.
- Neeladharan, C., Muralidharan, A., Mohan, K., Mohamed, A., Arshad, V., Mohammed, V. and Yasir Arafath, A., 2019, Stabilization of soil using Fly ash with ground granulated blast furnace slag (GGBS) as binder, *Suraj Punj Journal For Multidisciplinary Research*, 9(4), 23-29.
- Nematollahi, B. and Sanjayan, J., 2014, Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. *Mater. Des*, 57, S 667-672.
- Neupane, G. and Donahoe, R. J., 2013, Leachability of elements in alkaline and acidic coal fly ash samples during batch and column leaching tests. *Fuel*, 104, 758-770.
- Nomura, Y., Fujiwara, K., Terada, A., Nakai, S. and Hosomi, M., 2010, Prevention of lead leaching from fly ashes by mechanochemical treatment. *Waste management*, 30(7), 1290-1295.
- Nyale, S. M., Eze, C. P., Akinyeye, R. O., Gitari, W. M., Akinyemi, S. A., Fatoba, O. O. and Petrik, L. F., 2014, The leaching behaviour and geochemical fractionation of trace elements in hydraulically disposed weathered coal fly ash. *Journal of environmental science and health, Part A*, 49(2), 233-242.
- Oluyemi-Ayibiowu, B. D., Agashua, L. O., Igibah, E. C., Amu, O. O., Adetayo, A. O., Aderinola, O. S., and Ernest, T., 2022, Impact of sodium silicate with normal pH on mechanical strength of rice husk blend geopolymer and its performance at various percentages. *World Journal of Advanced Science and Technology*, 1(02), 001–010.
- Öksüz, K., 2006, Afşin–Elbistan termik santralı uçucu külünün zemin stabilizasyonunda kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Önalp, A. ve Arel, E., 2014, Geoteknik Bilgisi 1 Zeminler ve Mekaniği Çözümlü Problemlerle, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- Özbayoğlu, F., 1993, Uçucu küllerin, bentonit, kireç ve çimento katkılarıyla kumlu zeminlerin stabilizasyonunda kullanımı, *Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu*, Ankara: 103-118.
- Palomo, A., Grutzeck, M. and Blanco, M., 1999, Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future, *Cement and concrete research*, 8, 1323-1329.
- Pan, Z., Sanjayan, J., G, 2012, Factors influencing softening temperature and hot-strength of geopolymers, *Cement and Concrete Composites*, 34, 261-264.
- Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y. F., Wuhner, R. and Murphy, T. 2018, Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature, *Cement and concrete composites*, 86, 9-18.
- Parhi, S., Garanayak, L., Mahamaya, M. and Das, K., 2018, Stabilization of an expansive soil using alkali activated fly ash based geopolymer. *Sustainable civil infrastructures* 1, 36-50.

- Pham, B., Nguyen, M., Al-Ansari, N., Tran, Q., Ho, L., Le, H. and Prakash, I., 2021, A comparative study of soft computing models for prediction of permeability coefficient of soil, *Mathematical problems in engineering*, Article ID 7631493, 11.
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., & Udomchai, A., 2016, Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and Calcium Carbide Residue Based Geopolymer. *Applied Clay Science*, 127, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.005>
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A. and Disfani, M., 2014, Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay-fly ash geopolymer, *Construction and building materials*, 69, 285-294.
- Phoongernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S. and Chindaprasirt, P., 2015, Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer, *Construction and building materials*, 91, 1-8.
- Poon, C., Azhar, S., Anson, M. and Wong, y., 2003, Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 25, 83-89.
- Puertas, F., Martinez, S., Alonso, S. and Vazquez, T., 2000, Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behavior and hydration products, *Cement and Concrete Research*, Vol 30, S 1625-1632.
- Puppala, A. J., Madhyannapu, R. S., & Nazarian, S. (2008). *Special specification for deep soil mixing* (No. 0-5179-P1). University of Texas at Arlington.
- Rahier, H., Simons, W. and Biesemans, M., 1997, Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses: Part III Influence of the composition of the silicate solution on production, structure and properties, *Journal of Materials Science*, 32, 2237-2247.
- Rehman, M. U., Rashid, K., Haq, E. U., Hussain, M. and Shehzad, N., 2020, Physico-mechanical performance and durability of artificial lightweight aggregates synthesized by cementing and geopolymerization, *Construction and Building Materials*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117290>
- Rios, S., Ramos, C., Viana, A., Cruz, N. and Rodrigues, C., 2017, Mechanical and durability properties of a soil stabilized with an alkali activated cement. *Eurasian Journal Environmental Civil Engineering*, 1-23.
- Saha, S. and Rajasekaran, C., 2017, Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag, *Construction and Building Materials*, 146, 615-620
- Salihoğlu, G., 2019, Tehlikeli Atık Yönetimi, *Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu*, 510 s, Ankara. ISBN: 978-605-312-330-9.
- Sani, A., 2014, The effect of fly-ash stabilized sub-base on cost of the flexible pavement, Yüksek Lisans Tezi, Fatih University, The Graduate School of Sciences and Engineering, Istanbul.
- Sharma, A. Sivapullaiah, V., 2016, Ground granulated blast furnace slag amended fly ash as an expansive soil stabilizer, *Soils and Foundations*, 56 (2), 205-212.

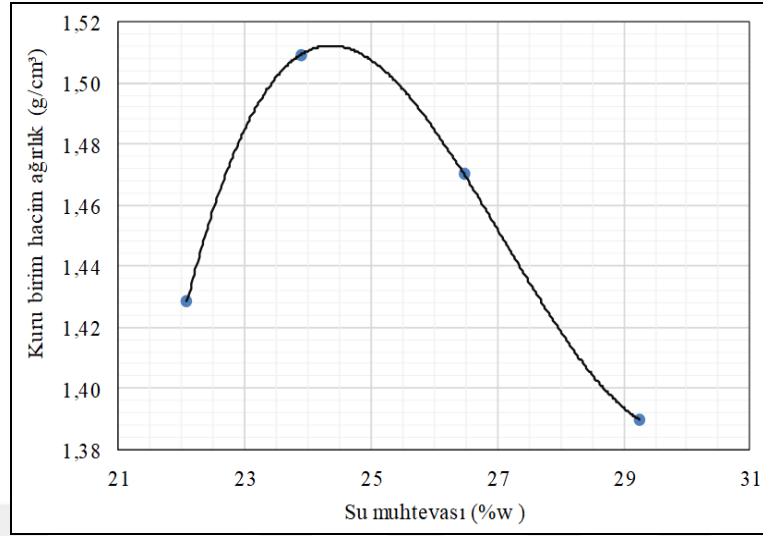
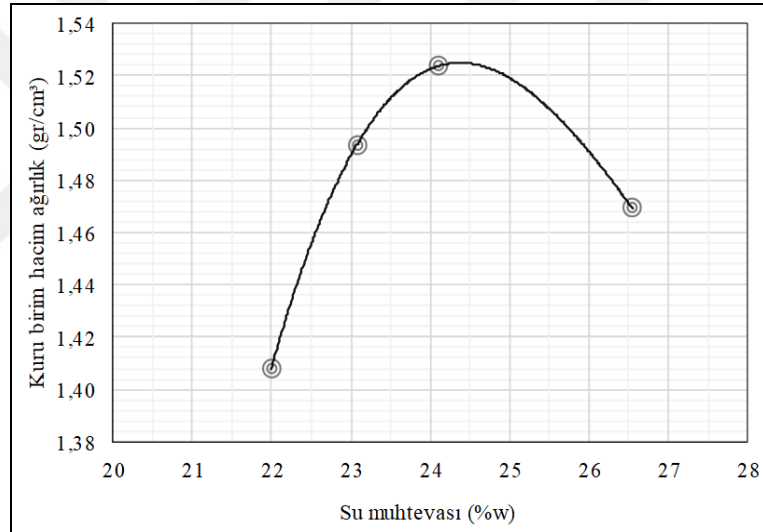
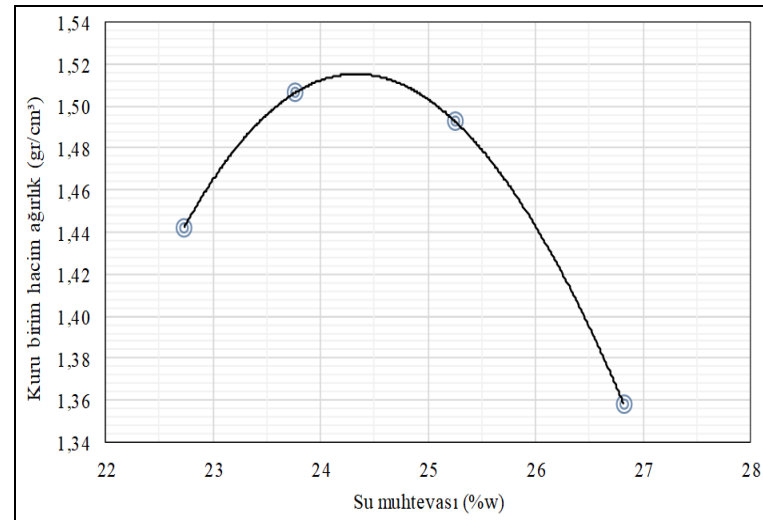
- Shi, C. and Jimenez, A., 2006, Alkali-activated slag cements: Part I. Binders made of slag and alkali activator, *Journal of Materials Science*, 41(14), 4147-4156.
- Shibayama, A., Kim, Y., Harjanto, S., Sugai, Y., Okada, K., and Fujita, T., 2005, Remediation of contaminated soil by fly ash containing dioxins from incineration by using flotation. *Materials transactions*, 46(5), 990-995.
- Shihab, A., Abbas, J. and Ibrahim, A., 2018, Effect of NaOH molar concentration to soft clay soil stabilized by fly ash based geopolymer mechanical strength subjected to initial heating, *International journal engineering research & Sci. & Tech*, 7(3).
- Sihag, P., Suthar, M. and Mohanty, S., 2021, Estimation of UCS-FT of dispersive soil stabilized with fly ash, cement clinker and GGBS by artificial intelligence, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, 901-912.
- Singhi, B., Laskar, A. I., and Ahmed, M. A., 2016, Investigation on soil-geopolymer with slag, fly ash and their blending. *Arabian Journal for science and engineering*, 41, 393-400.
- Sinha, S. and Wang, M., 2008, Artificial neural network prediction models for soil compaction and permeability, *Geotechnical & Geological Engineering*, 26(1), 47-64.
- Somna K., Jaturapitakkul C., Kajitvichyanukul, P. and Chindaprasit P., 2011, NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature, *Fuel*, 90 (6), 2118-2124.
- Sukprasert, S., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Rashid, A. and Nazir, R., 2019, Fly ash based geopolymer stabilization of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications, *Road Materials and Pavement Design*.
- Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Yeanyong, C., and Arulrajah, A., 2021, Evaluation of polyvinyl alcohol and high calcium fly ash based geopolymer for the improvement of soft Bangkok clay. *Transportation Geotechnics*, 27, 100476.
- Swanepoel, J. C., and Strydom, C. A., 2002, Utilization of fly ash in a geopolymeric material. *Applied geochemistry*, 17(8), 1143-1148.
- Taguchi, G. J. Q. R., 1987, Taguchi techniques for quality engineering, *Quality Resources*, New York.
- Taguchi, G., Elsayed, A. E. and Hsiang, C., 1989, *Quality engineering in production systems*. New York: McGraw-Hill College.
- Taş, M., 2020, Uçucu kül, Bayburt taşı ve mermer tozu endüstriyel atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek lisans tezi, *Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bayburt.
- Teerawattanasuka, C. and Voottipruexb, P., 2019, Comparison between cement and fly ash geopolymer for stabilized marginal lateritic soil as road material, *International journal of pavement engineering*, 20(11), 1264-1274.
- Tigue, S., Malenab, J., Dungca, R., Yu, C. and Promentilla, M.A.B, 2018, Chemical stability and leaching behavior of one-part geopolymer from soil and coal fly ash mixtures. *Minerals*, 8, 411.

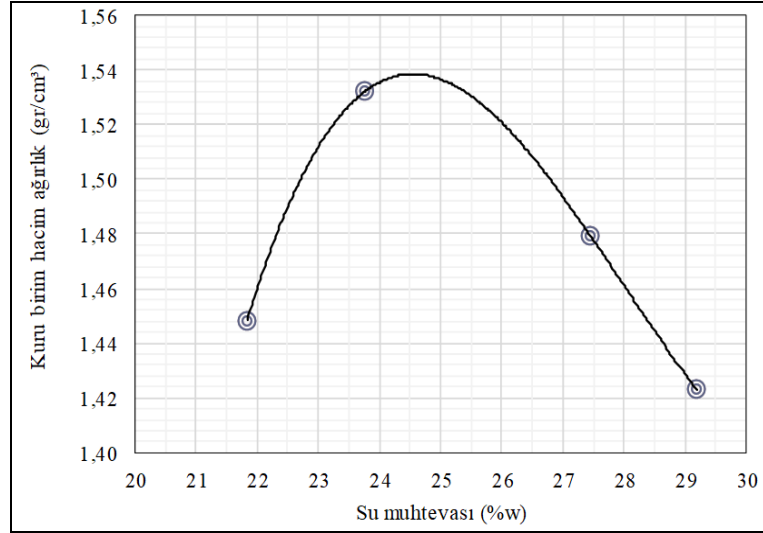
- Tok L. V., 2021, Yüksek Fırın Cürufu ve Bentonit Tabanlı Geopolimer Harçların Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. YL Tezi, *Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, 59.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, O., 2009, Cüruflar ve Cürüflu Çimentolar, *Türkiye Çimento Müstahsiller Birliği*, Ankara.
- Torgal, F., Gomes, J. and Jalali S., 2008, Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Construction and Building Materials*, 22(7), 1305-1314.
- Totiç, E., Göktepe, F., Yaşar, M., 2019, Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, vol. 2, s. 769-778
- TS EN 197-1, 2002, Çimento–Bölüm 1: Genel çimentolar–bileşim, özellikler ve uygunluk kriteri, TSE
- Turkmen, I., Karakoc, M. B., Kantarci, F., and Ekinci, E. 2018. Effect of NaOH concentrations and curing temperatures on mechanical properties of geopolymer pastes produced from fly ash and Elâziğ ferrochrome slag. *Int J Mech Prod Eng*, 5, 12.
- Tuyan, M., 2017 Doğal ve atık malzemelerle geopolimer harç ve beton geliştirilmesi. Doktora Tezi *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, İzmir, 259.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., 2009, Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, *TÇMB*, Ankara.
- Uysal, F., Yılmaz, V., ve Topçu, H. M., 2020, Farklı Atık Malzemeler ile Stabilize Edilmiş İnce Daneli Zeminin Mühendislik Özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 19-26.
- Uzuner, B. A., 2014, Temel Zemin Mekaniği, *Derya Yayınevi*, Trabzon, s.734.
- Verdolotti, L., Iannace, S., Lavorgna, M., and Lamanna, R., 2008, Geopolymerization reaction to consolidate incoherent pozzolanic soil. *Journal of materials science*, 43, 865-873.
- Wazien, W., 2016, Strength and density of geopolymer mortar cured at ambient temperature for use as repair material strength and density of geopolymer mortar cured at ambient temperature for use as repair material, *Material and science engineering*, 133, 012042.
- Wiles, CC., 1988, Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal. *McGraw Hills*, New York, 7-85
- Wu, J., Zheng, X., Yang, A. and Li, Y., 2021, Experimental Study on the Compressive Strength of Muddy Clay Solidified by the One-Par Slag–Fly Ash Based Geopolymer. *Rock Soil Mechanics*, 42, 647-655.
- Xiong, J., Ban, H., Pei, X. and Fang Z., 2004, International workshop on sustainable development and concrete technology. Beijing, 299.
- Xu, H. and Deventer, V., 2000, The geopolymerization of Alamino-Silicate minerals, *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266

- Yaghoubi, M., Arulrajah A, Disfani, M., Horpibulsuk, S. and Leong, M., 2020, Compressibility and strength development of geopolymer stabilized columns cured under stress, *ScienceDirect Soils and Foundations*, 60, 1241-1250.
- Yaghoubi, M., Arulrajah, A, Disfani, M., Horpibulsuk, S., Bo, M. and Darmawan, S., 2018, Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil, *Soils and Foundations*, 58, 716-728.
- Yalghuz, M.R., 2020, Farklı Tip Malzemeler Kullanılarak Geopolimer Harç Üretimi ve Dayanıklılığın İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir 64 s.
- Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S. and Xi, Y. Q., 2015, A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-science reviews*, 141, 105-121.
- Yılmaz, A. ve Süttaş, İ., 2008, Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı, *İMO teknik dergi*, 294, 4455-4470, Ankara.
- Yılmaz, Y., 2015, Compaction and strength characteristics of fly ash and fiber amended clayey soil, *Engineering geology*, 188, 168 -177.
- Yi, Y., Li, C. and Liu, S., 2015, Alkali-activated ground-granulated blast furnace slag for stabilization of marine soft clay. *Journal of materials in civil engineering*, 27(4), 04014146.
- Yip, K. and Deventer, J., 2003, Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder, *Journal of Materials Science*, vol 38, S 3851–3860
- Zaliha, S., Zuber, S., Mustafa, M., Bakri, A., Hussin, K., Ahmad, F. and Binhussain, M., 2015, The influence of geopolymerization process on Liquid and plastic limits of soils, *Applied mechanics and materials*, 754, 886-891.
- Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G. and Tao, M., 2013, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and building materials*, 47, 1468-1478.

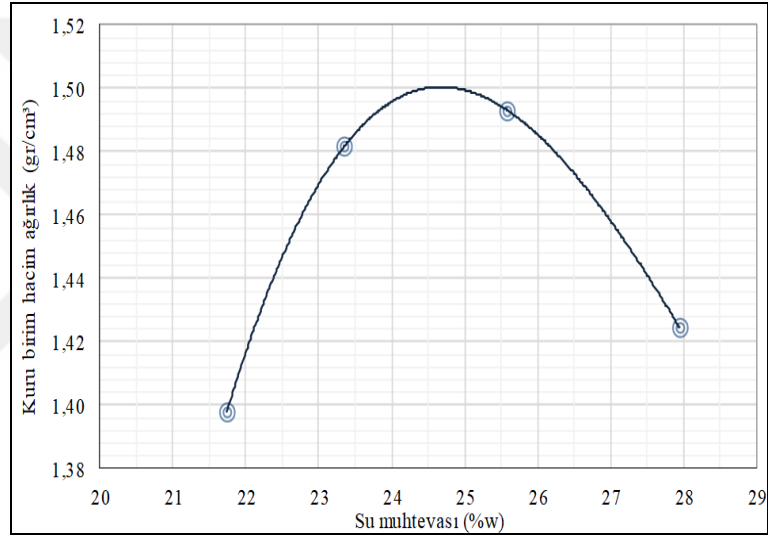
EKLER

Ek-1 Kompaksiyon deneylerine ait grafikler

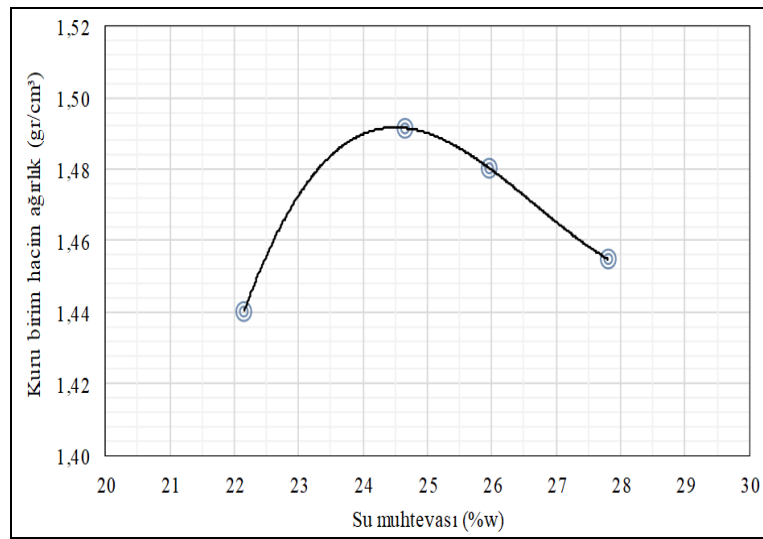
Şekil Ek 1.1. T₁ tasarımı için SP deneyine ait grafikŞekil Ek 1.2. T₂ tasarımı için SP deneyine ait grafikŞekil Ek 1.3. T₃ tasarımı için SP deneyine ait grafik



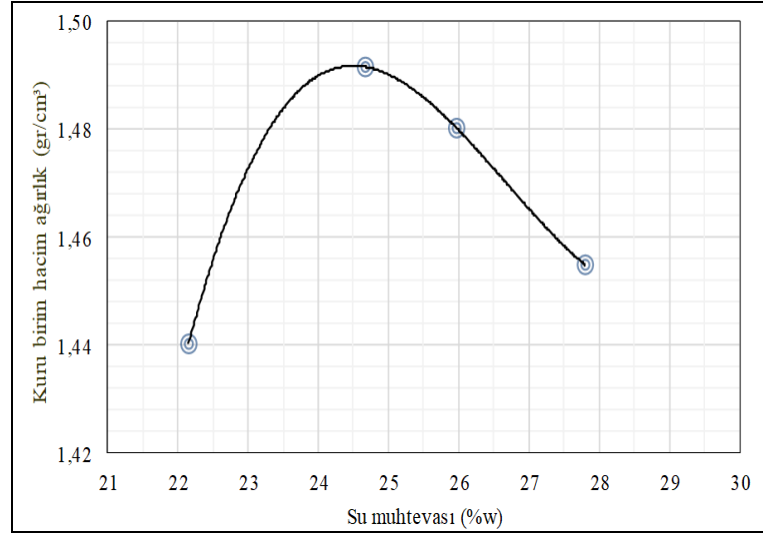
Şekil Ek 1.4. T₄ tasarımı için SP deneyine ait grafik



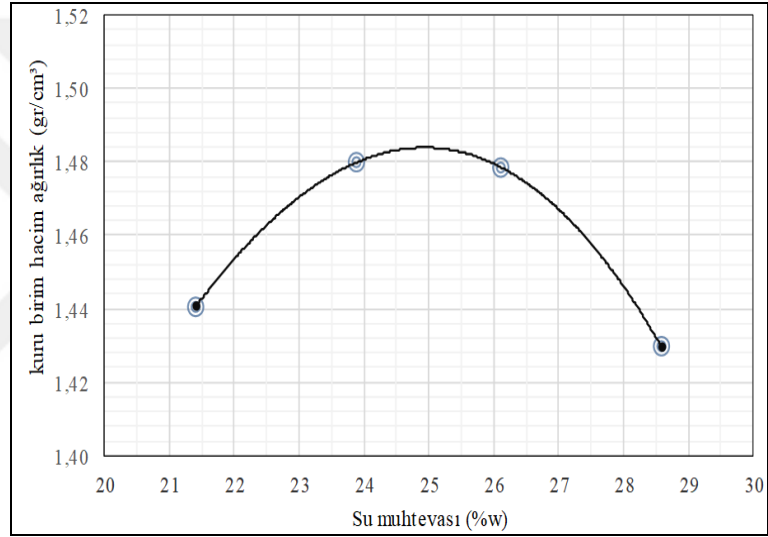
Şekil Ek 1.5. T₅ tasarımı için SP deneyine ait grafik



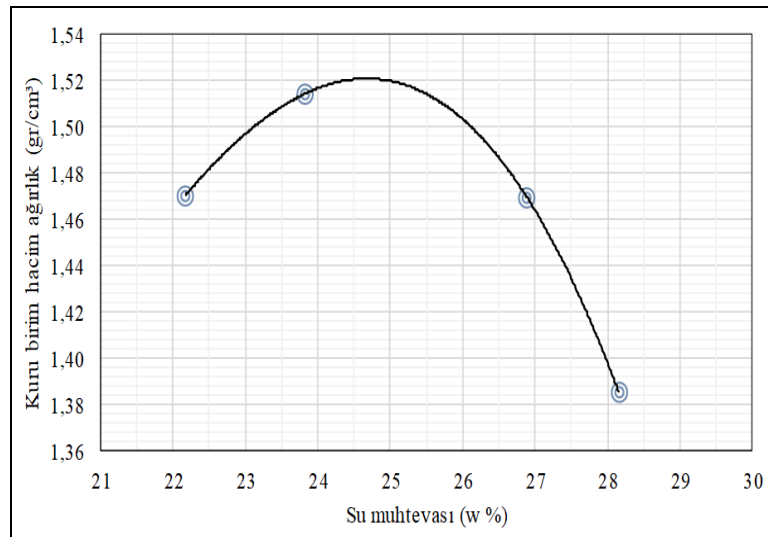
Şekil Ek 1.6. T₆ tasarımı için SP deneyine ait grafik



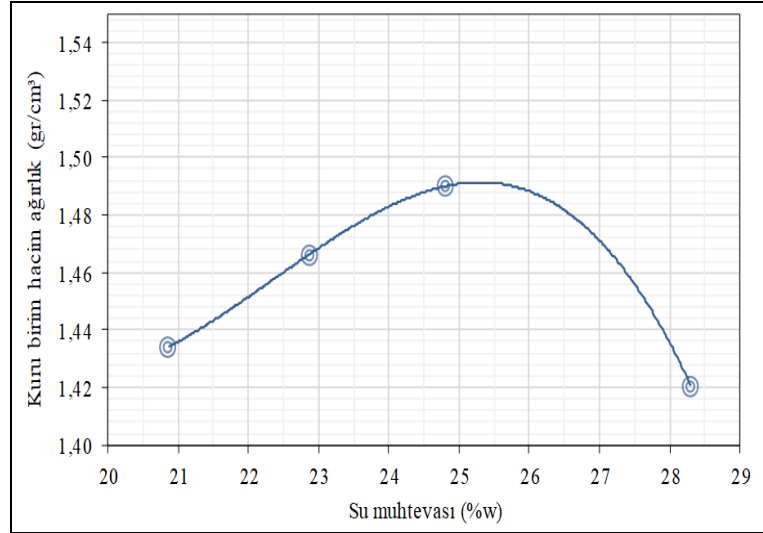
Şekil Ek 1.7. T₇ tasarımı için SP deneyine ait grafik



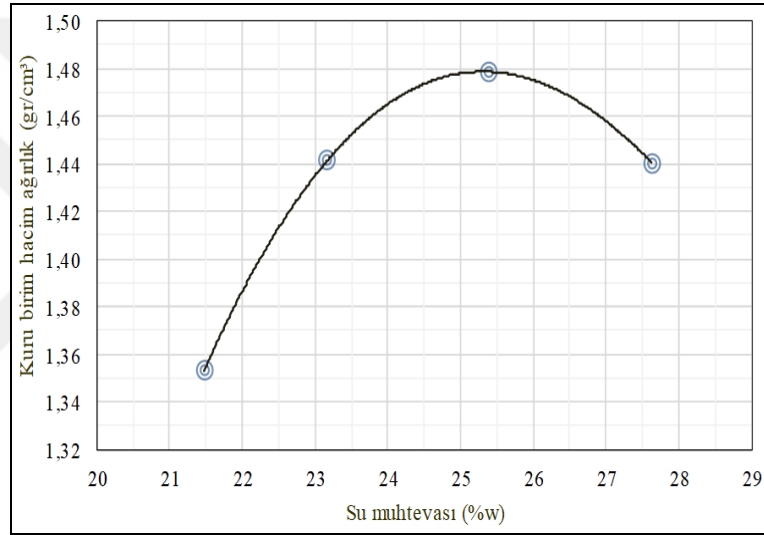
Şekil Ek 1.8. T₈ tasarımı için SP deneyine ait grafik



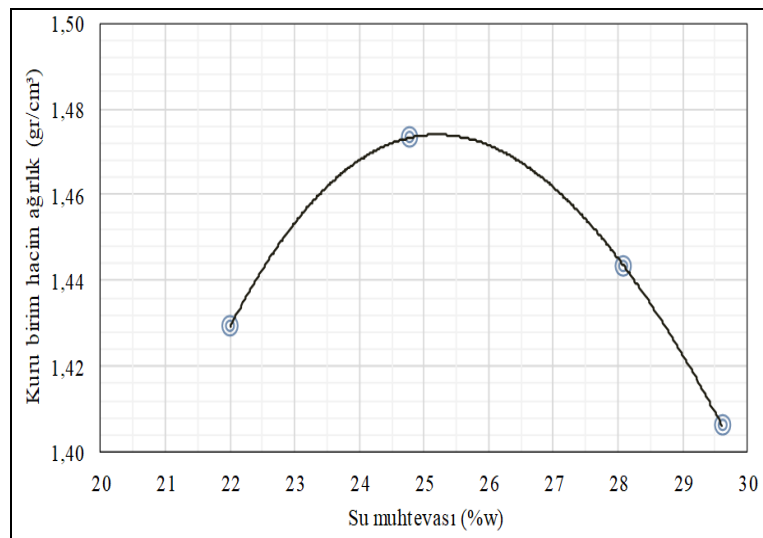
Şekil Ek 1.9. T₉ tasarımı için SP deneyine ait grafik



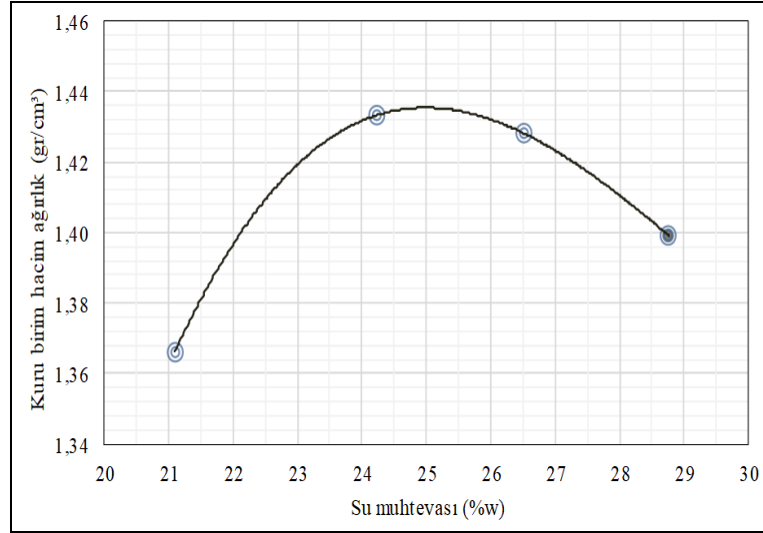
Şekil Ek 1.10. T_{10} tasarımı için SP deneyine ait grafik



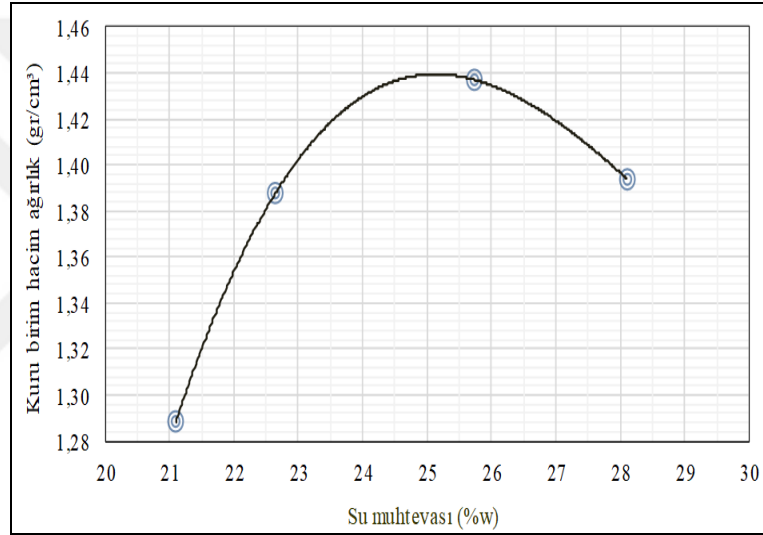
Şekil Ek 1.11. T_{11} tasarımı için SP deneyine ait grafik



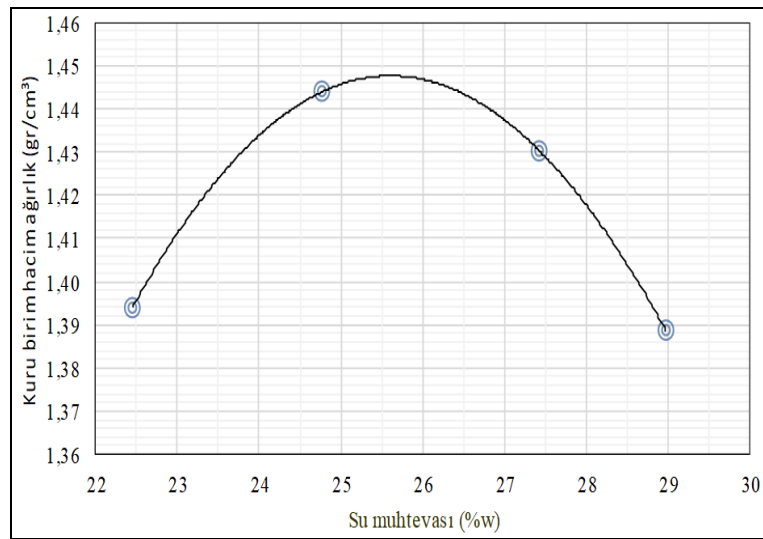
Şekil Ek 1.12. T_{12} tasarımı için SP deneyine ait grafik



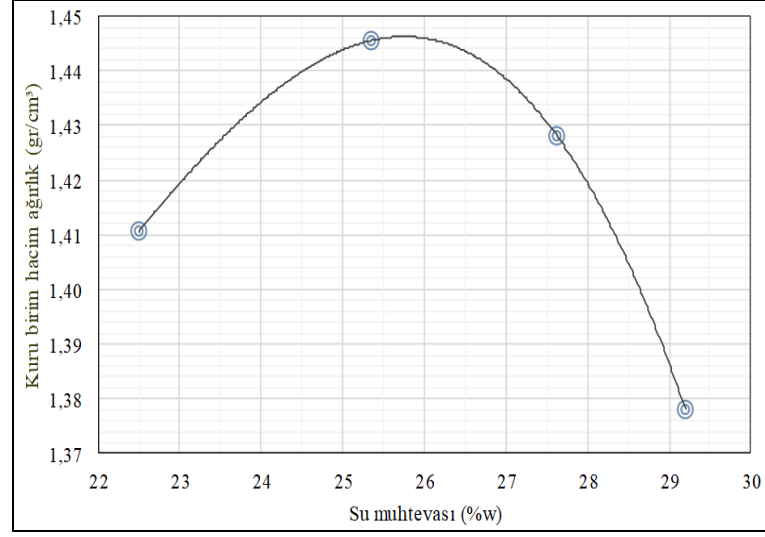
Şekil Ek 1.13. T_{13} tasarımı için SP deneyine ait grafik



Şekil Ek 1.14. T_{14} tasarımı için SP deneyine ait grafik

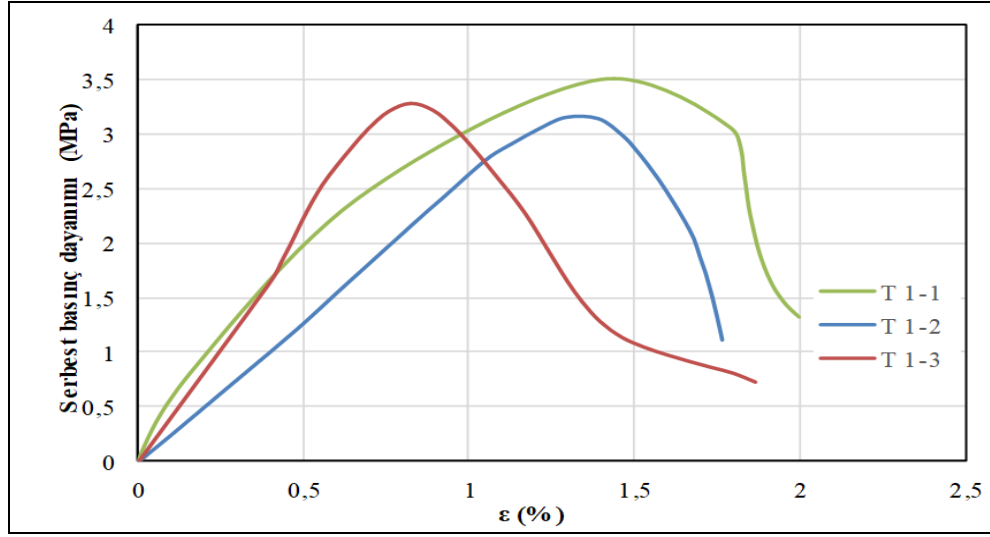


Şekil Ek 1.15. T_{15} tasarımı için SP deneyine ait grafik

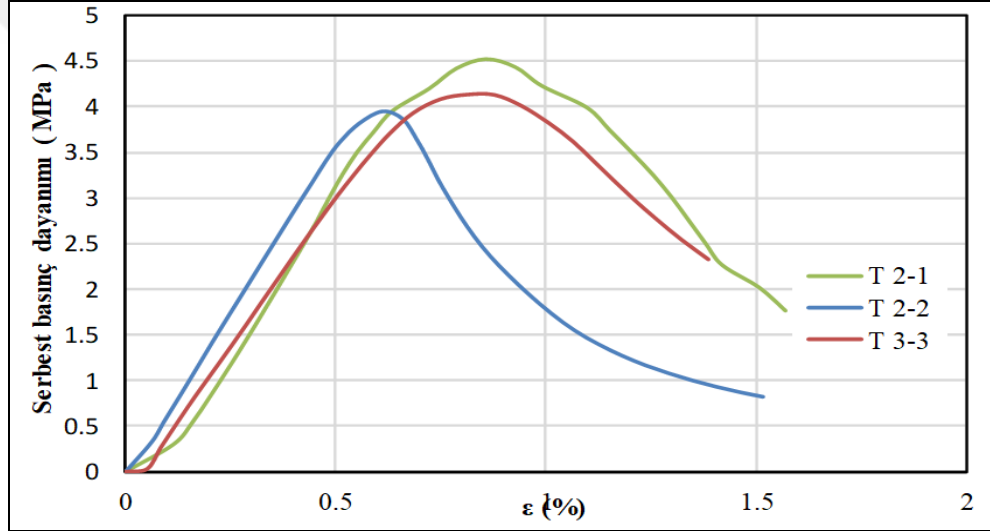


Şekil Ek 1.16. T₁₆ tasarımı için SP deneyine ait grafik

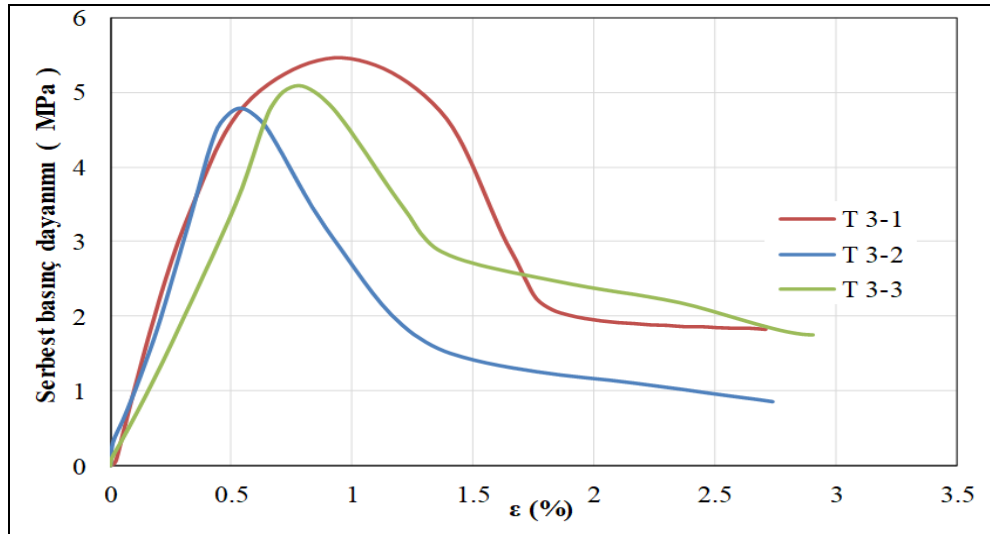
EK-2 SBD - Eksenel Birim Deformasyon Grafikleri (7 günlük)



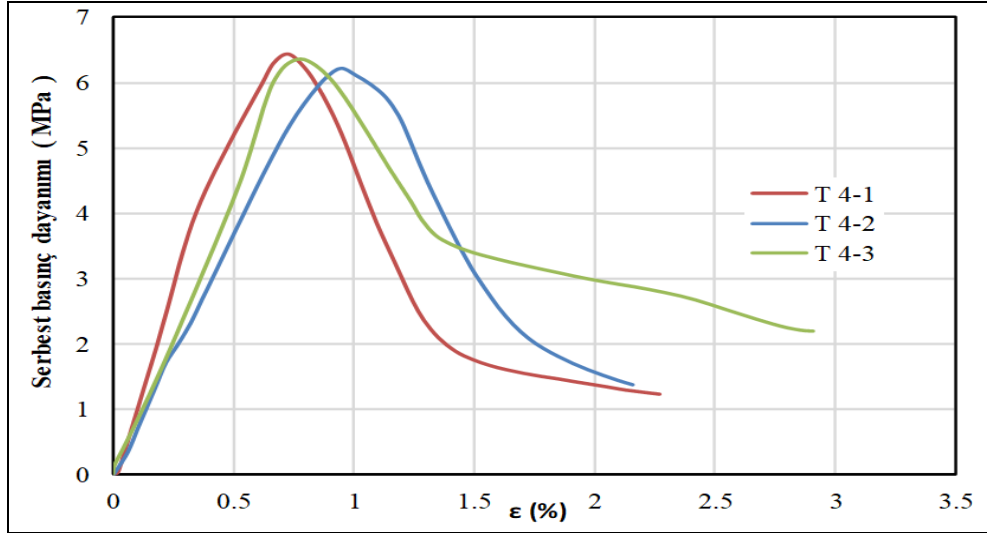
Şekil Ek 2.1. T₁ tasarımı ait normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği



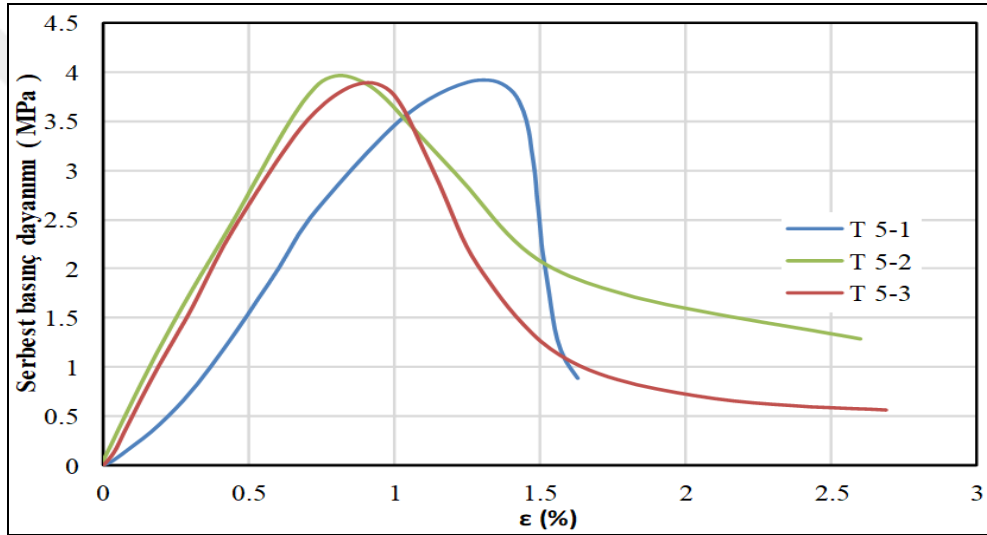
Şekil Ek 2.2. T₂ tasarımı ait normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği



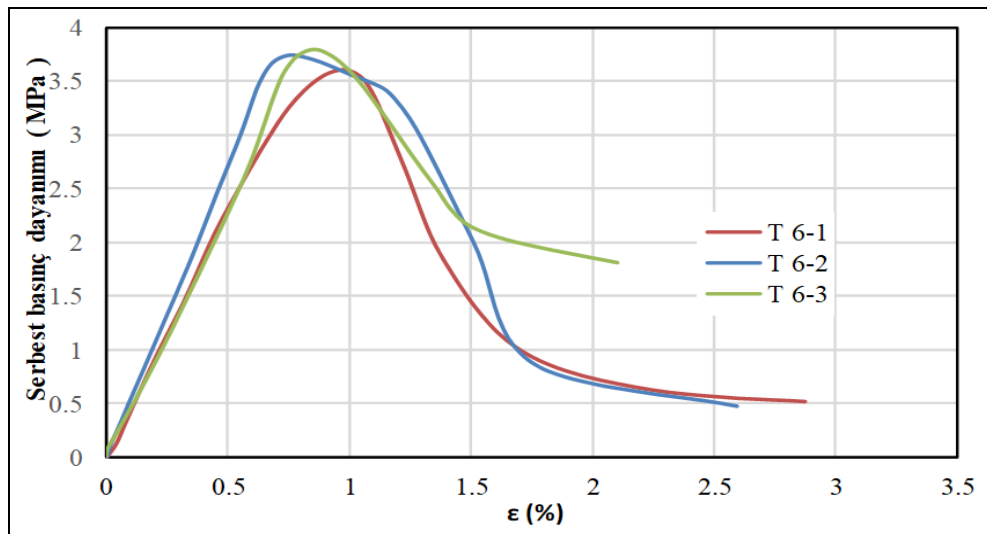
Şekil Ek 2.3. T₃ tasarımı ait normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği



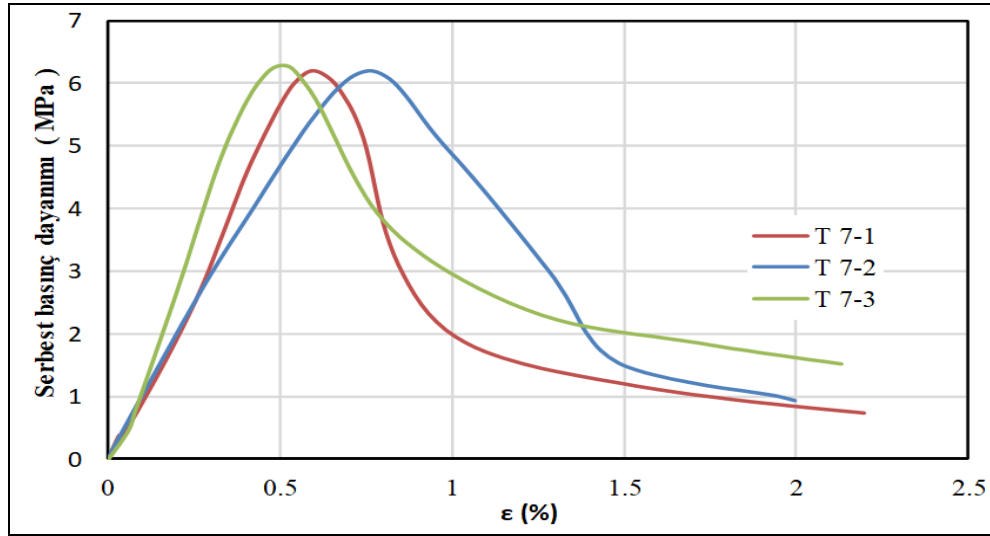
Şekil Ek 2.4. T₄ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



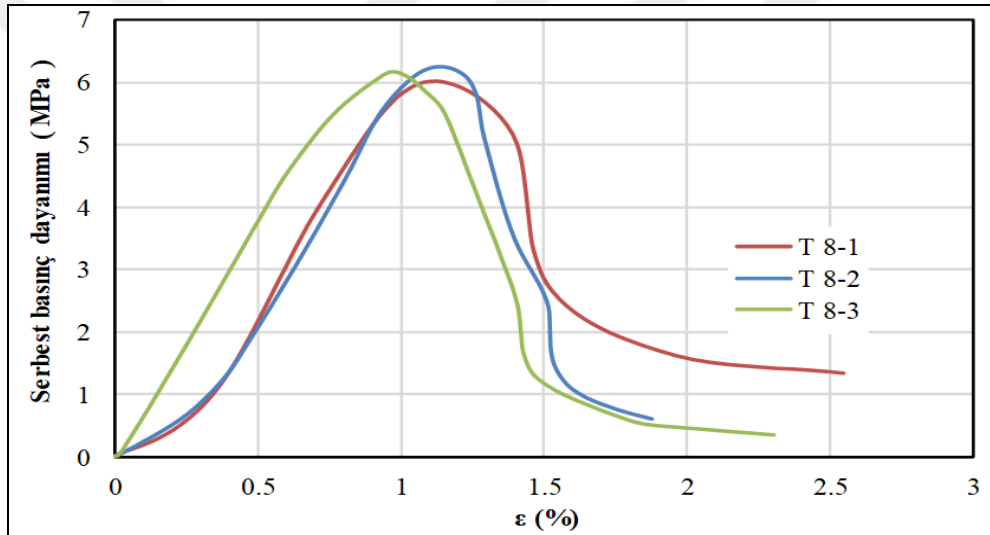
Şekil Ek 2.5. T₅ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



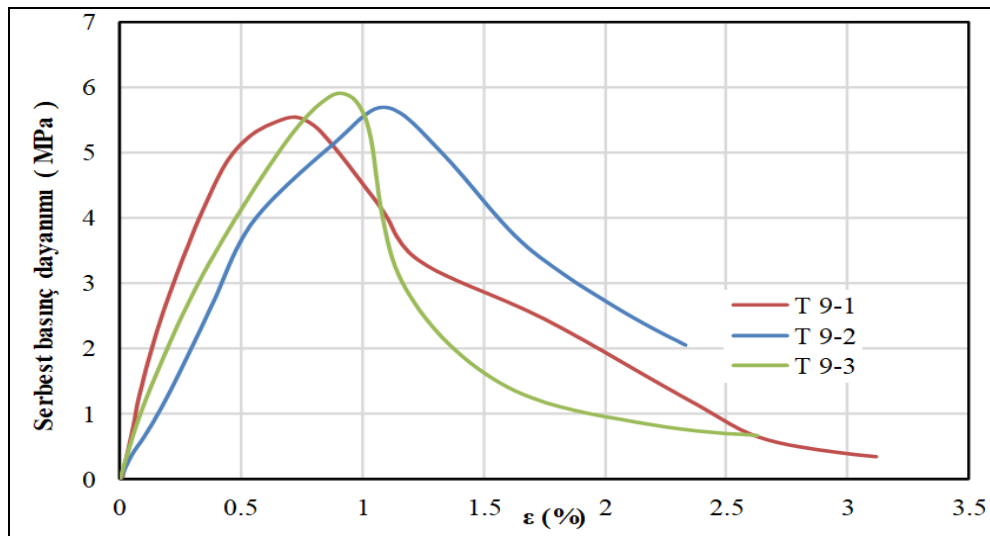
Şekil Ek 2.6. T₆ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



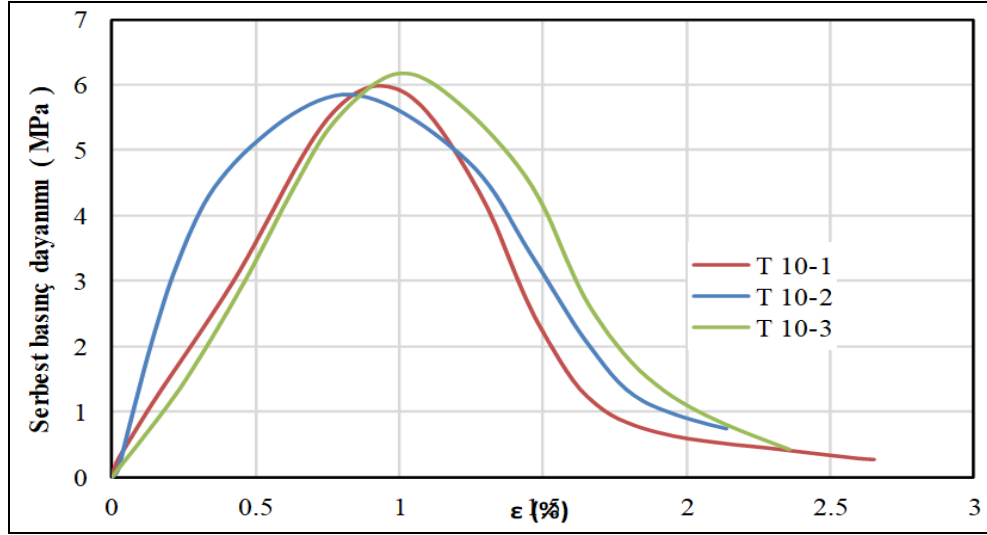
Şekil Ek 2.7. T₇ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



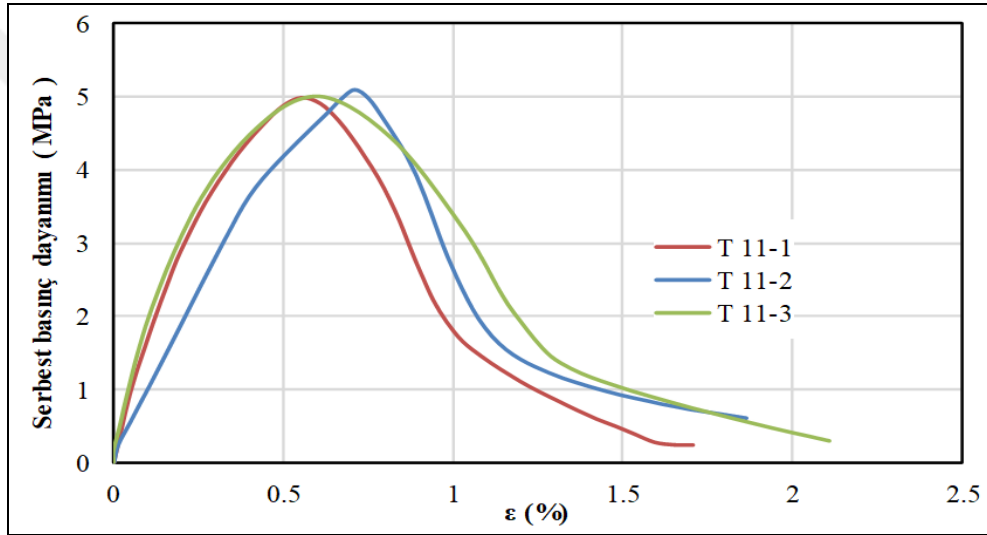
Şekil Ek 2.8. T₈ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



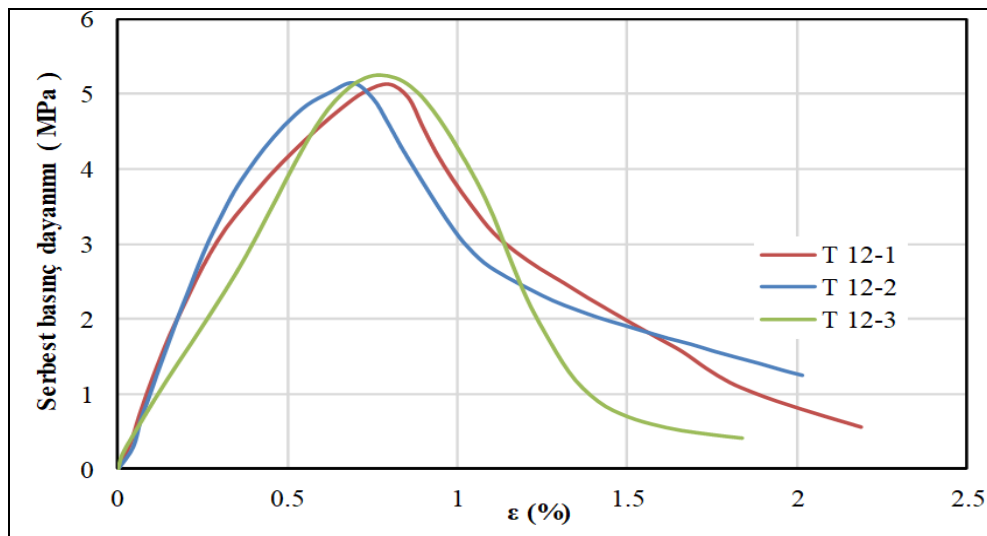
Şekil Ek 2.9. T₉ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



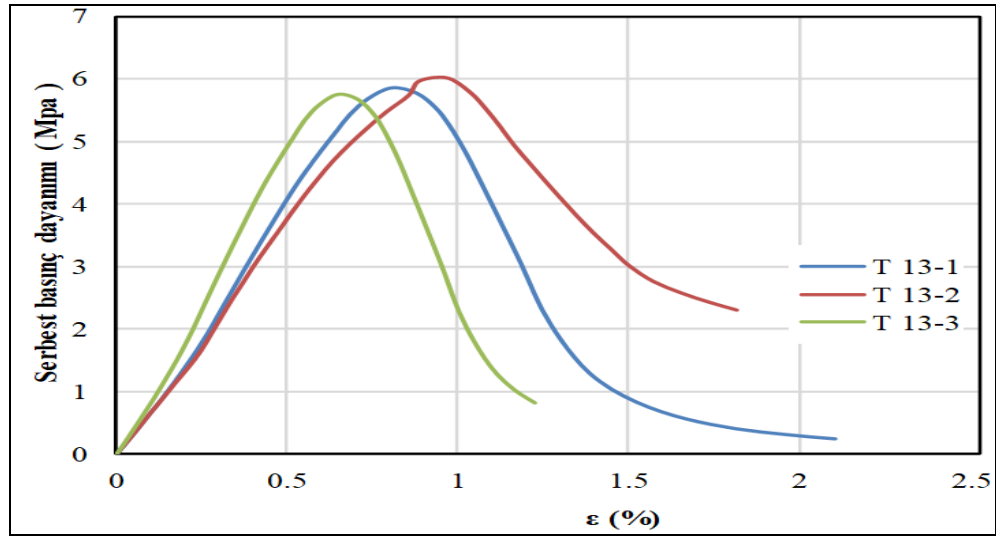
Şekil Ek 2.10. T₁₀ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



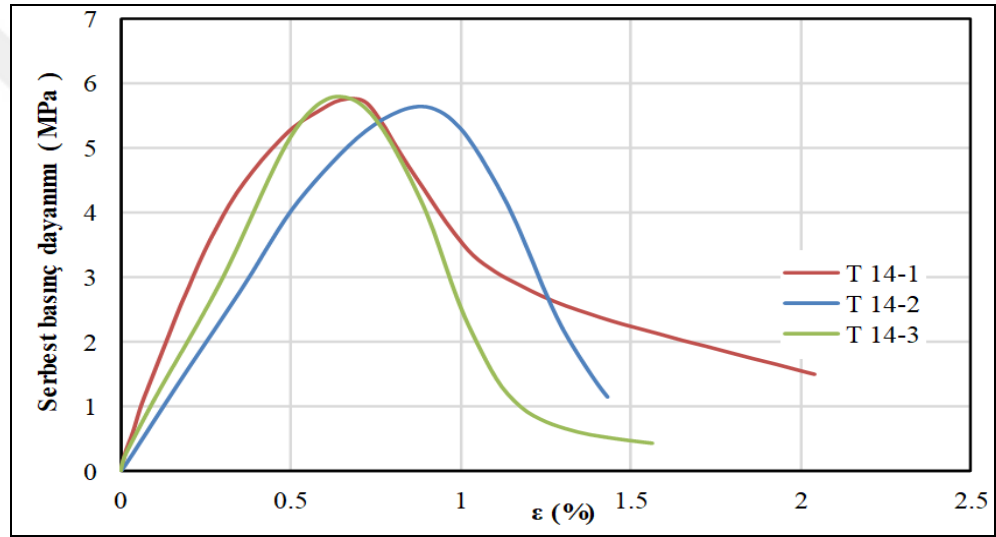
Şekil Ek 2.11. T₁₁ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



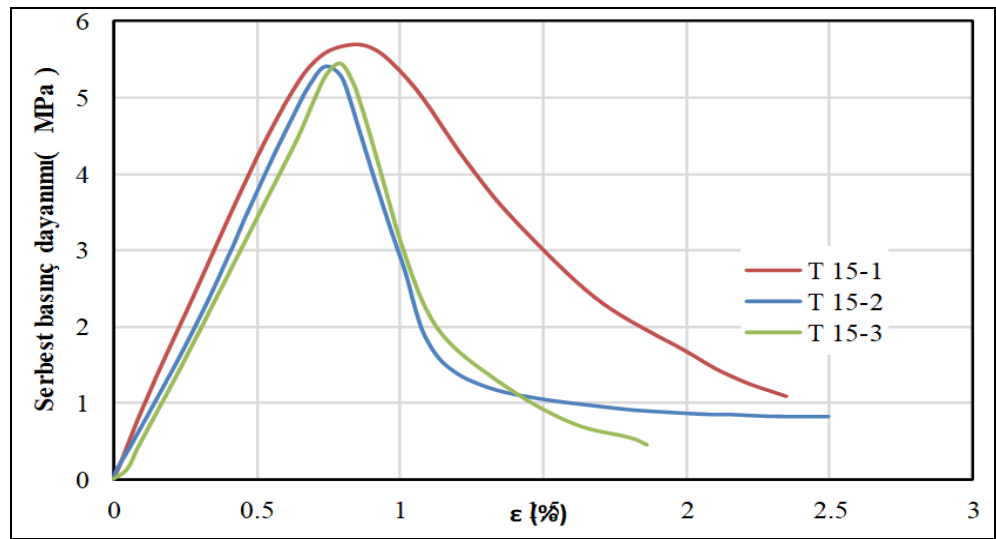
Şekil Ek 2.12. T₁₂ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



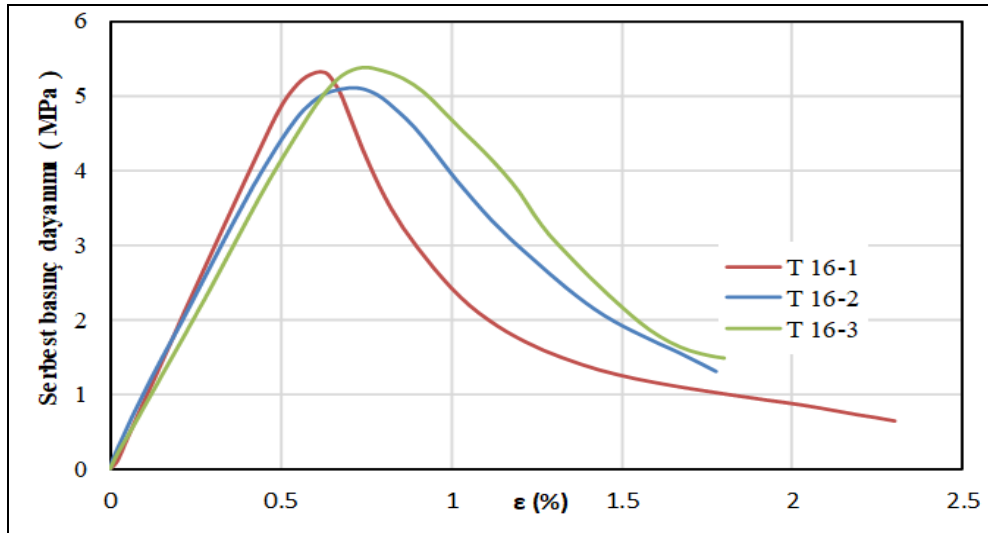
Şekil Ek 2.13. T₁₃ tasarıma ait normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



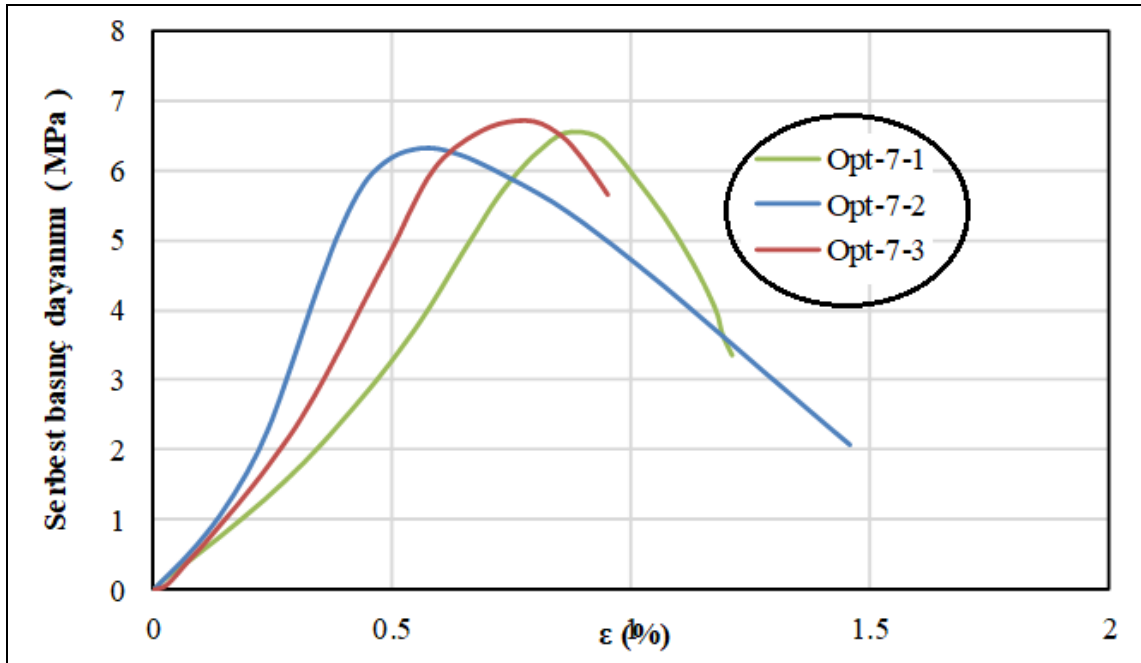
Şekil Ek 2.14. T₁₄ tasarıma ait normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



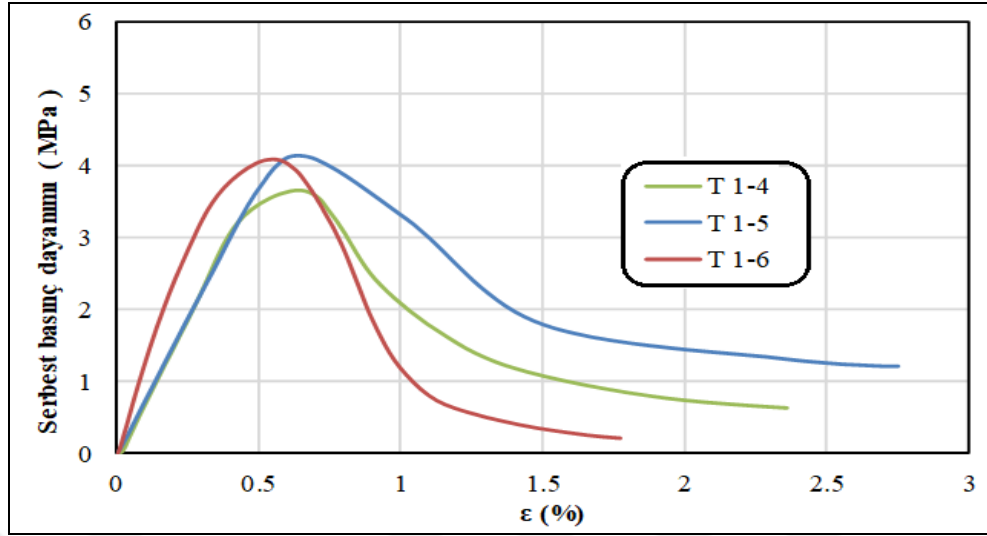
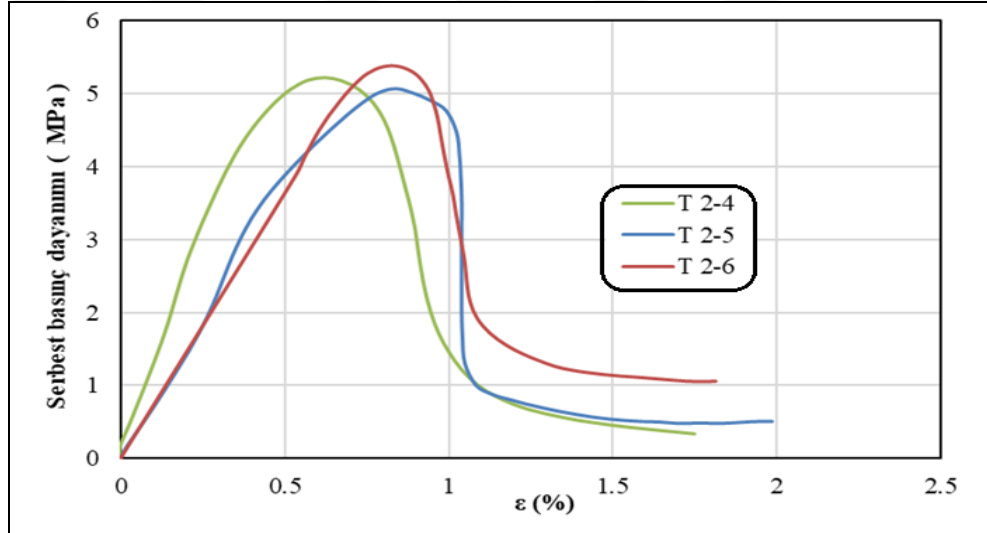
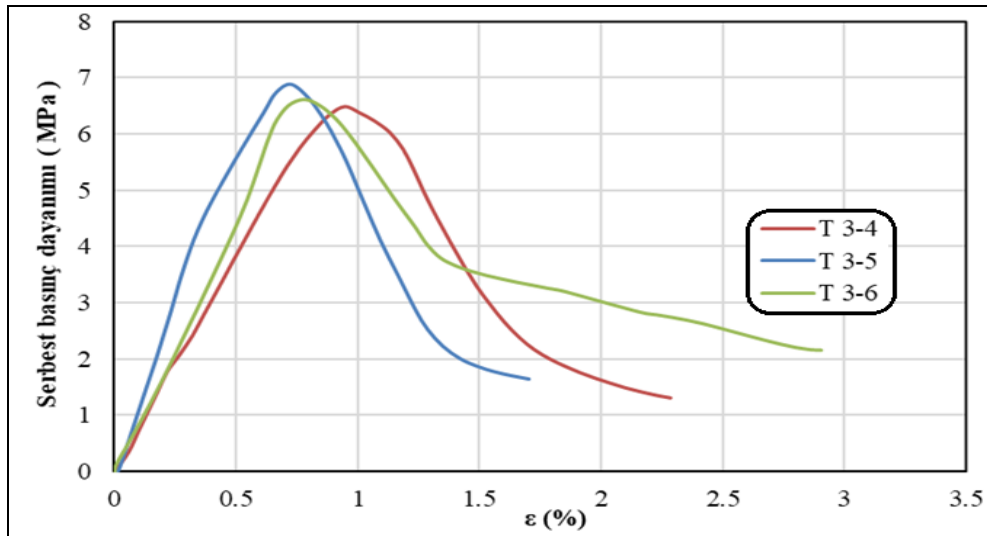
Şekil Ek 2.15. T₁₅ tasarıma ait normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği

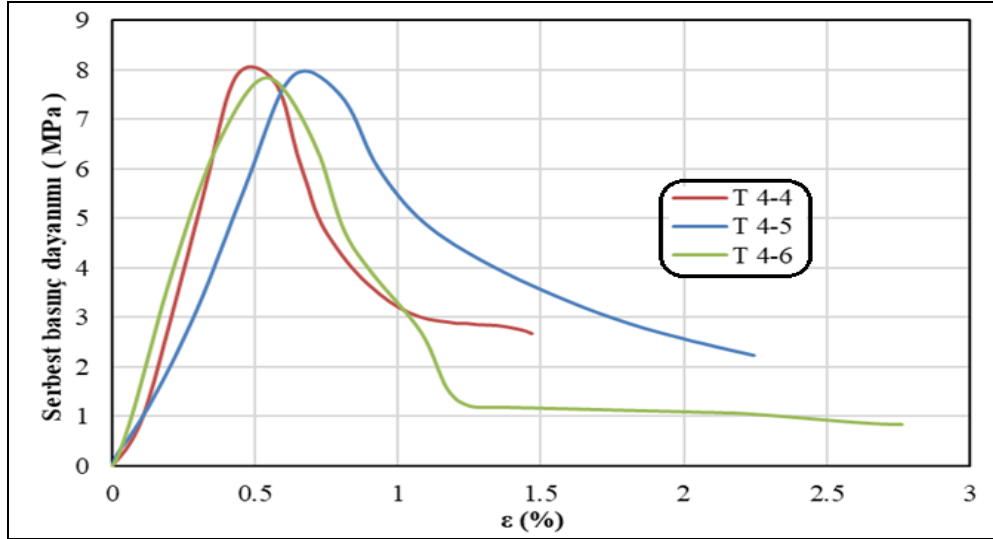


Şekil Ek 2.16. T1₆ tasarıma ait normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği

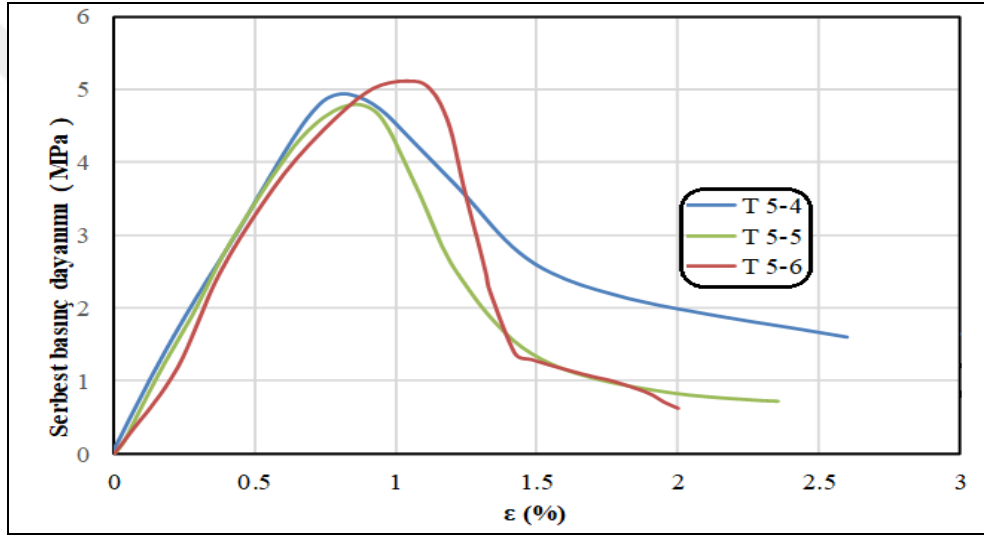


Şekil Ek 2.17. 7 günlük optimum tasarıma ait normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği

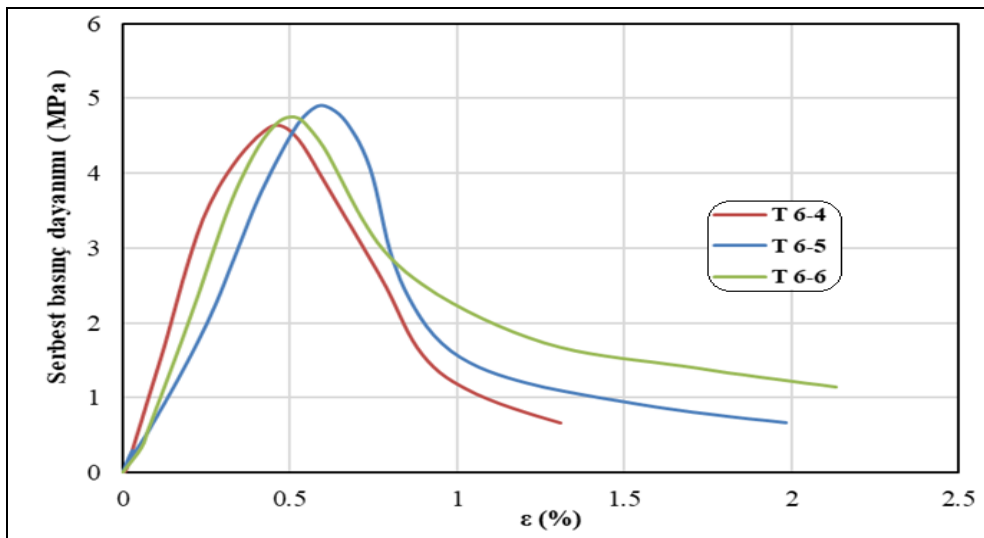
EK-3 SBD-normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafikleri (28 günlük)

 Şekil Ek 3.1. T₁ tasarımı ait normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği

 Şekil Ek 3.2. T₂ tasarımı ait normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği

 Şekil Ek 3.3. T₃ tasarımı ait normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği



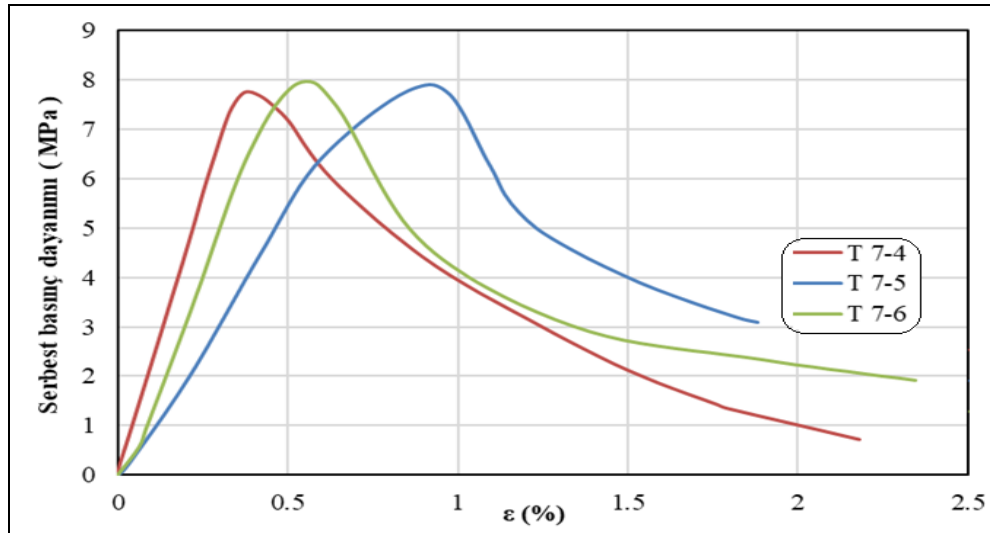
Şekil Ek 3.4. T₄ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



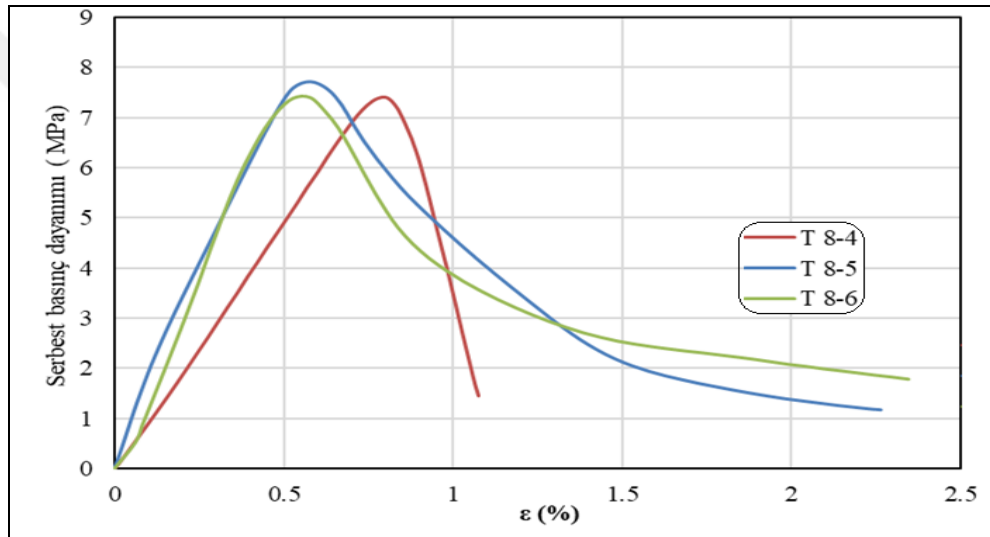
Şekil Ek 3.5. T₅ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



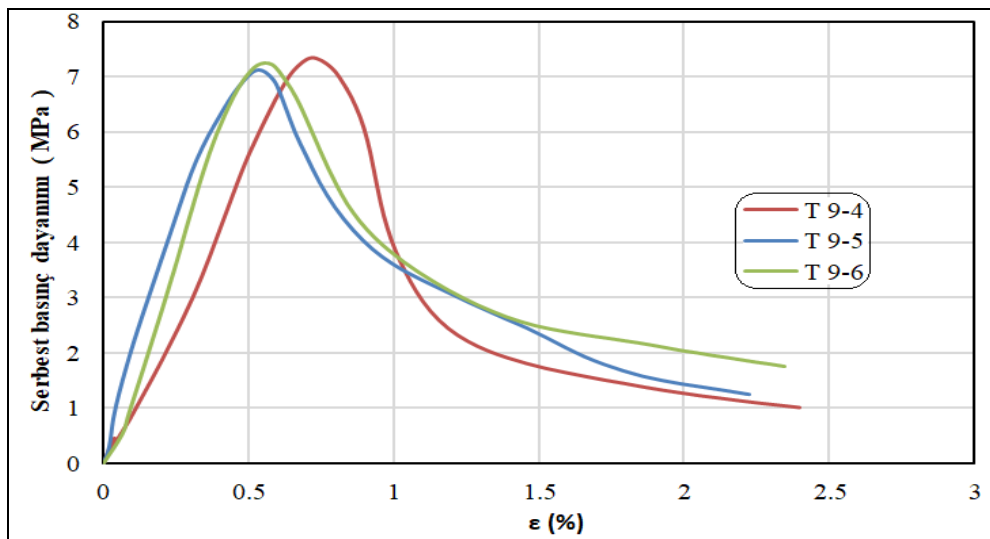
Şekil Ek 3.6. T₆ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



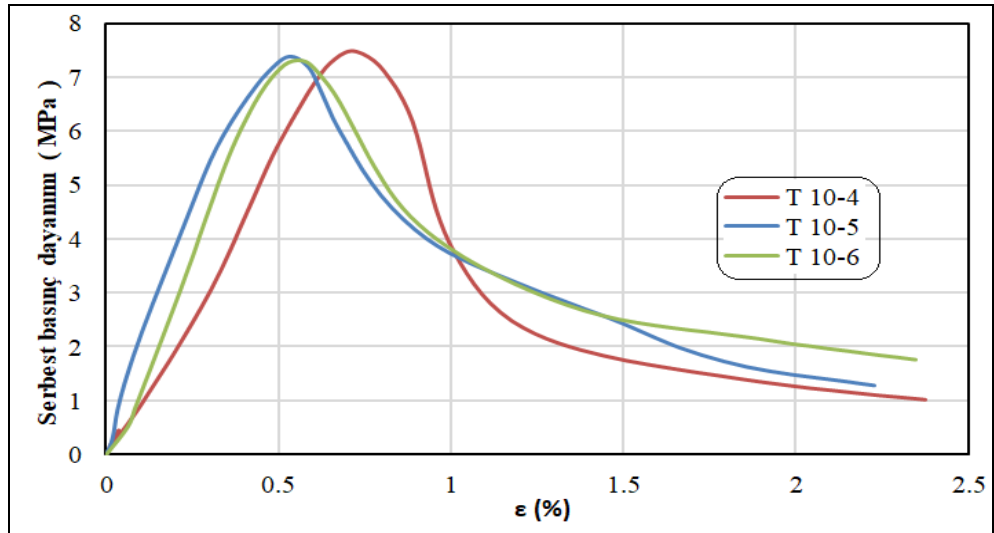
Şekil Ek 3.7. T₇ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



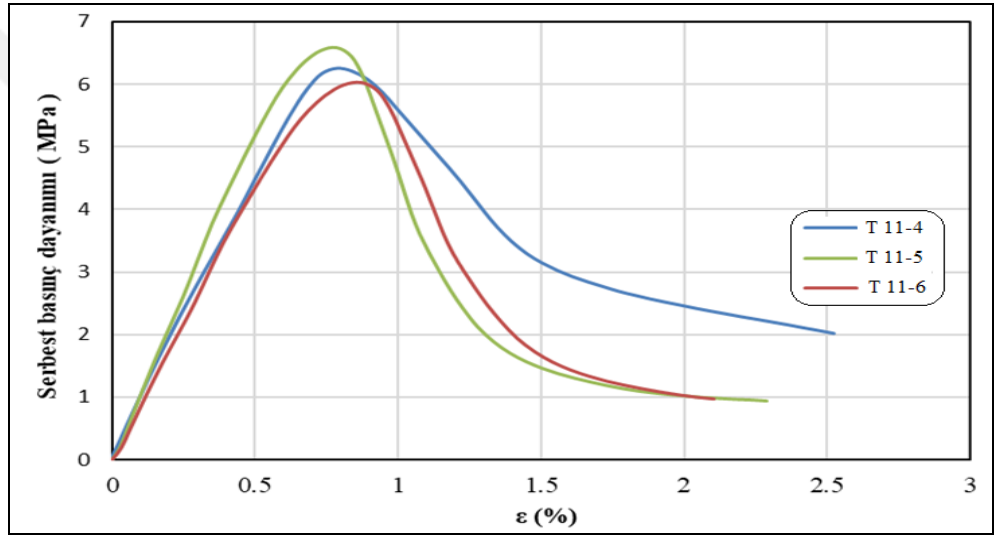
Şekil Ek 3.8. T₈ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



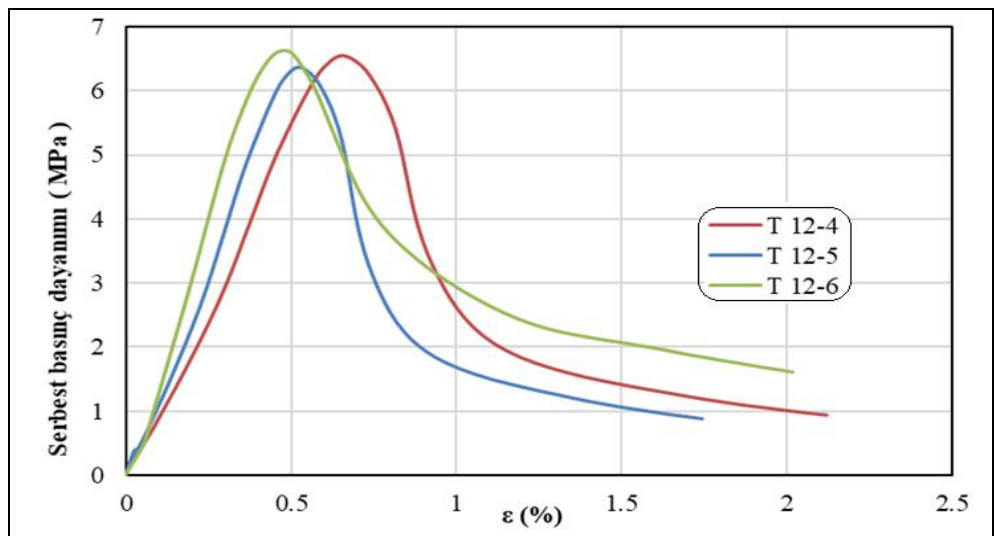
Şekil Ek 3.9. T₉ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



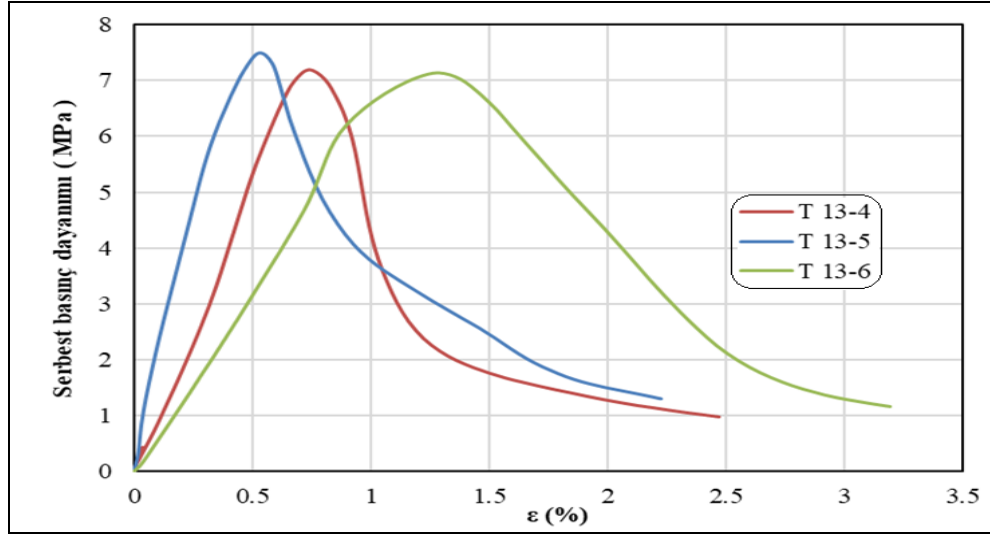
Şekil Ek 3.10. T₁₀ tasarıma ait normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



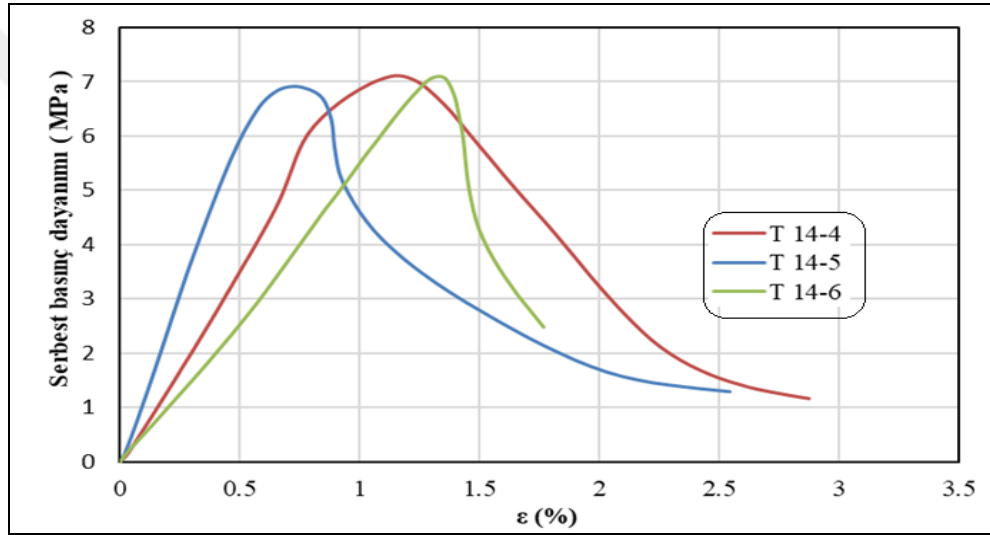
Şekil Ek 3.11. T₁₁ tasarıma ait normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



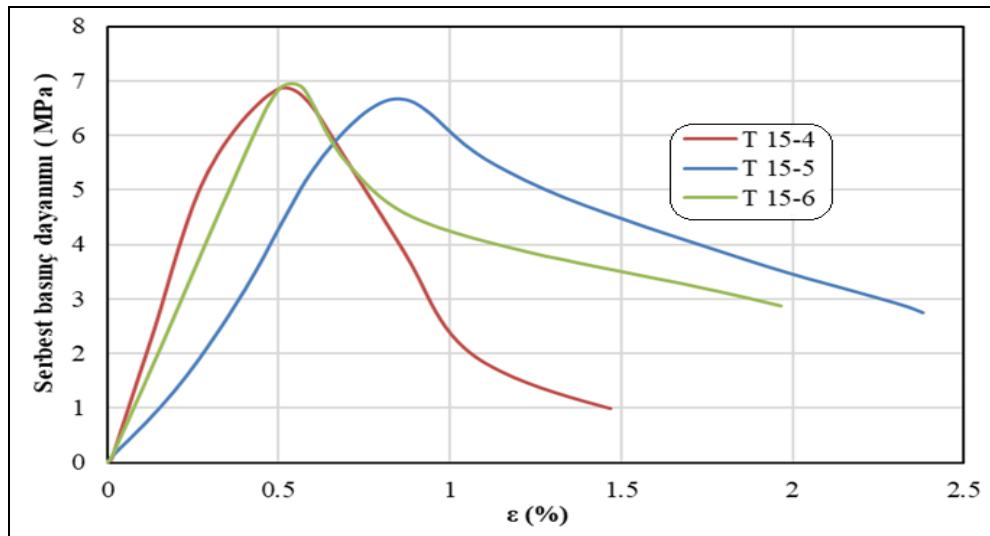
Şekil Ek 3.12. T₁₂ tasarıma ait normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



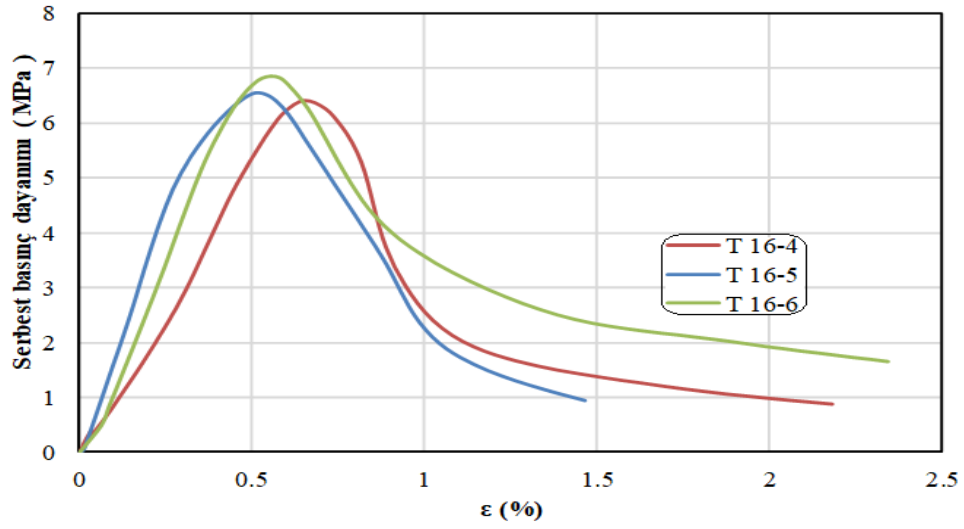
Şekil Ek 3.13. T₁₃ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



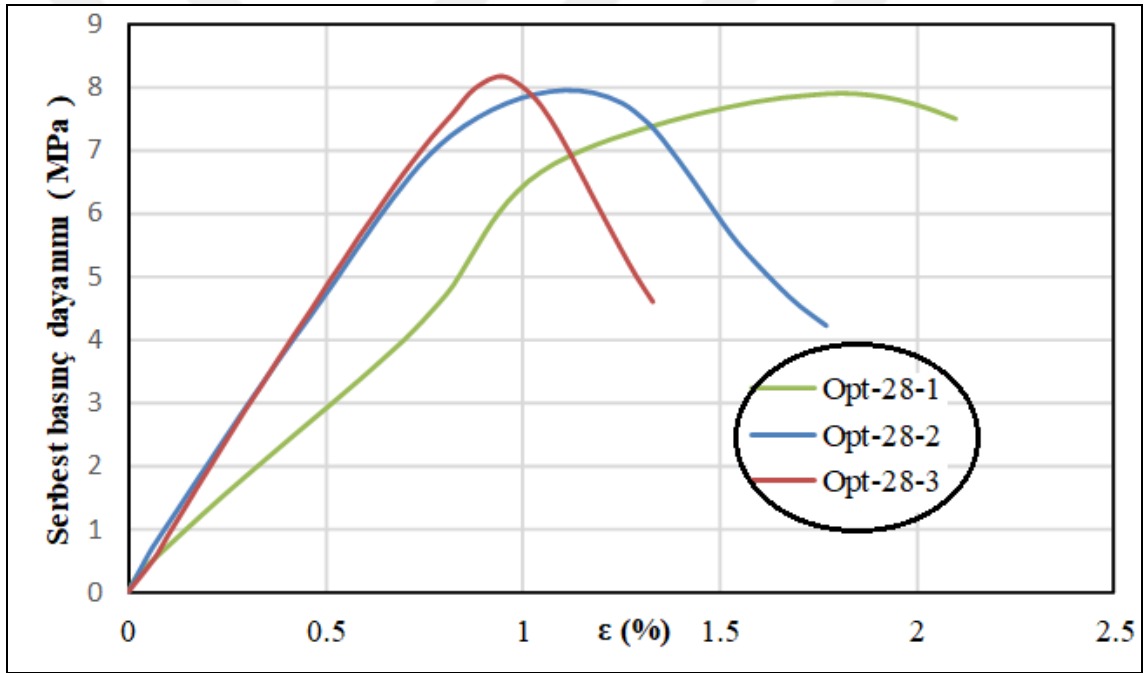
Şekil Ek 3.14. T₁₄ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



Şekil Ek 3.15. T₁₅ tasarıma ait normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği

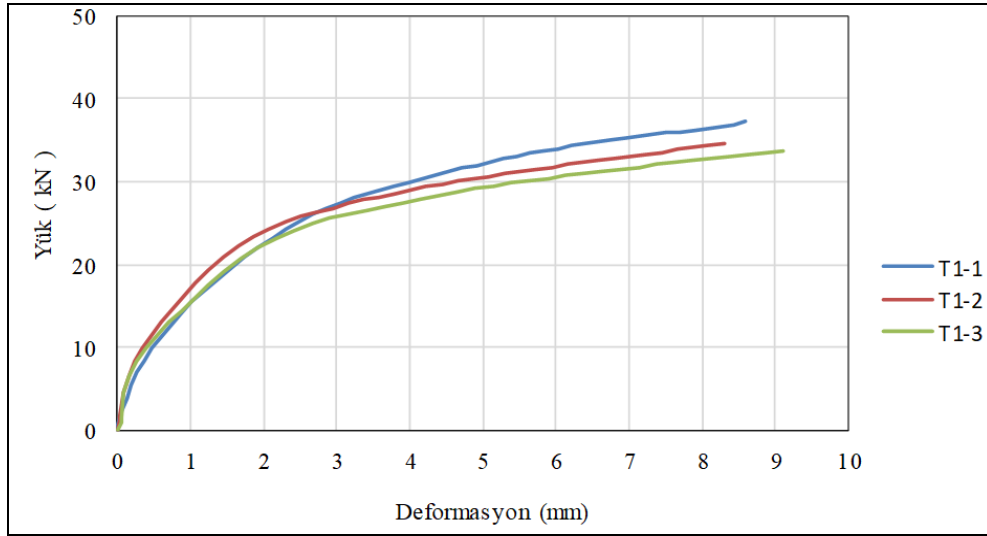


Şekil Ek 3.16. T₁₆ tasarıma ait normal gerilme- aksenel birim deformasyon grafiği

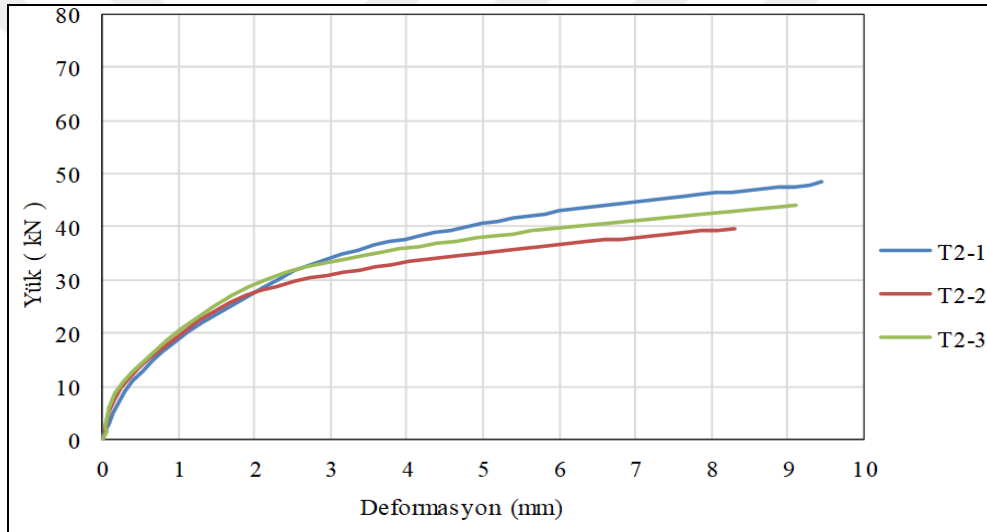


Şekil Ek 2.17. 28 günlük optimum tasarıma ait normal gerilme- aksenel birim deformasyon grafiği

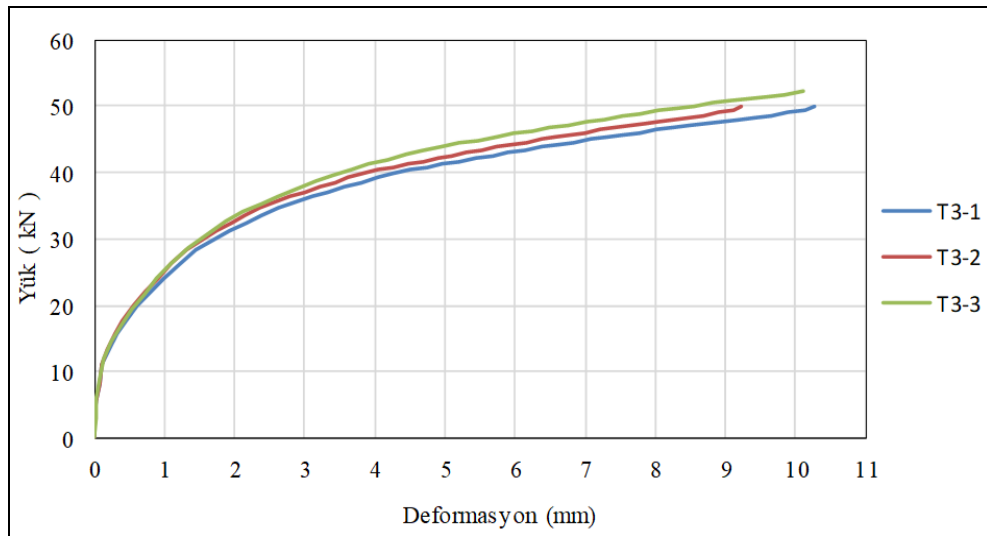
EK-4 CBR grafikleri (7 günlük)



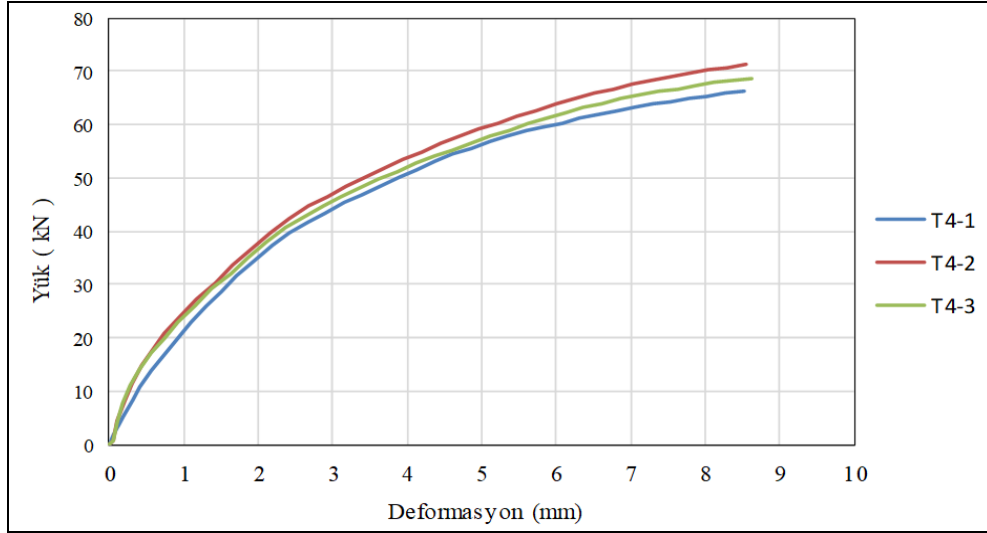
Şekil Ek 4.1. T₁ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



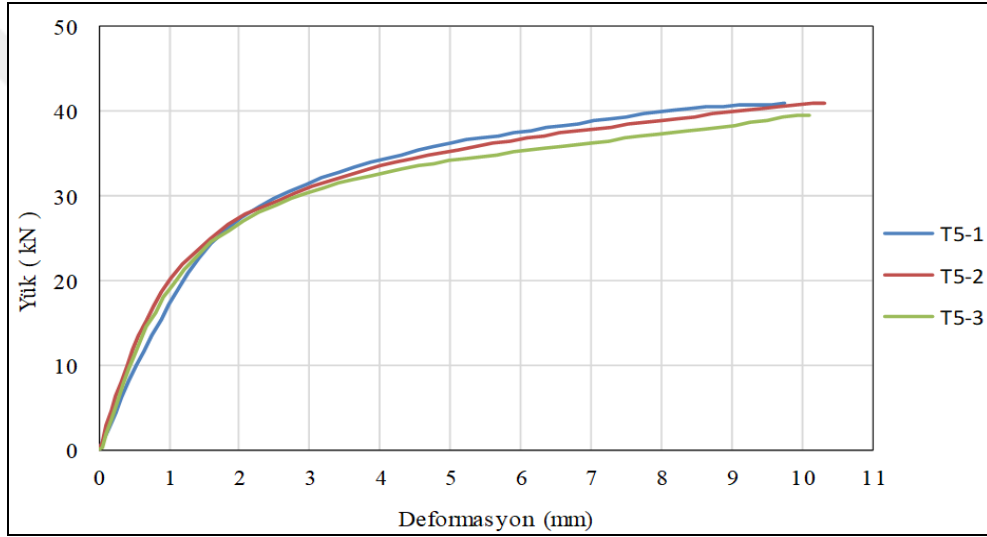
Şekil Ek 4.1. T₂ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



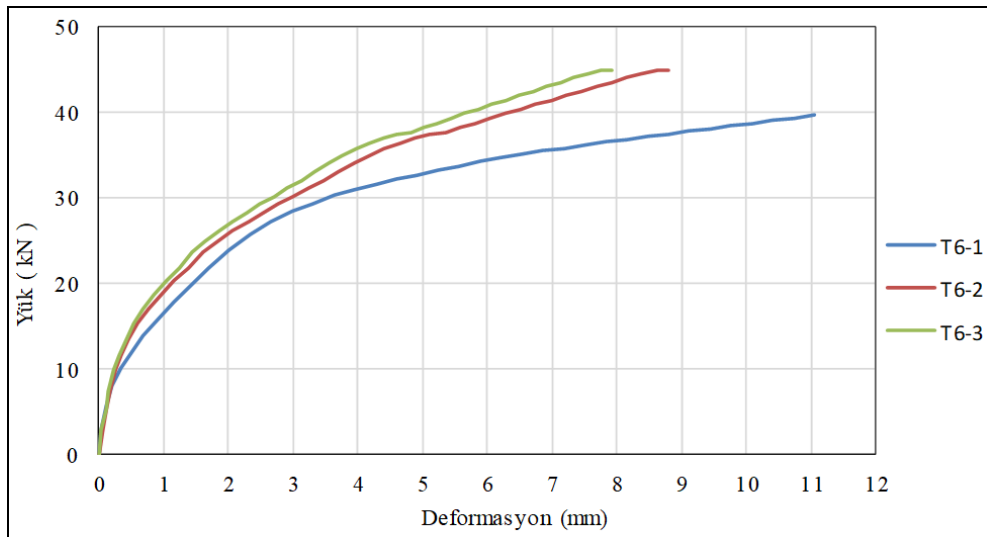
Şekil Ek 4.3. T₃ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



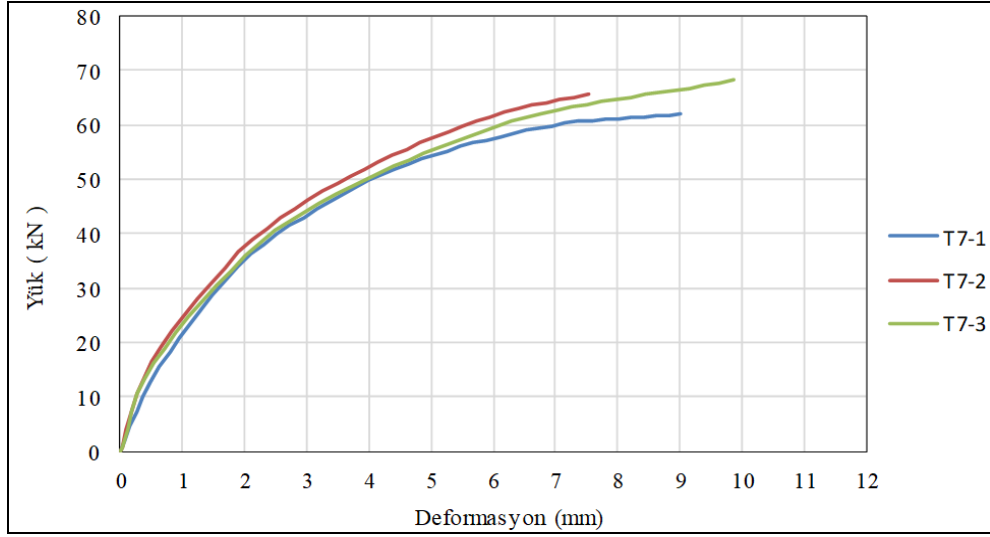
Şekil Ek 4.4. T₄ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



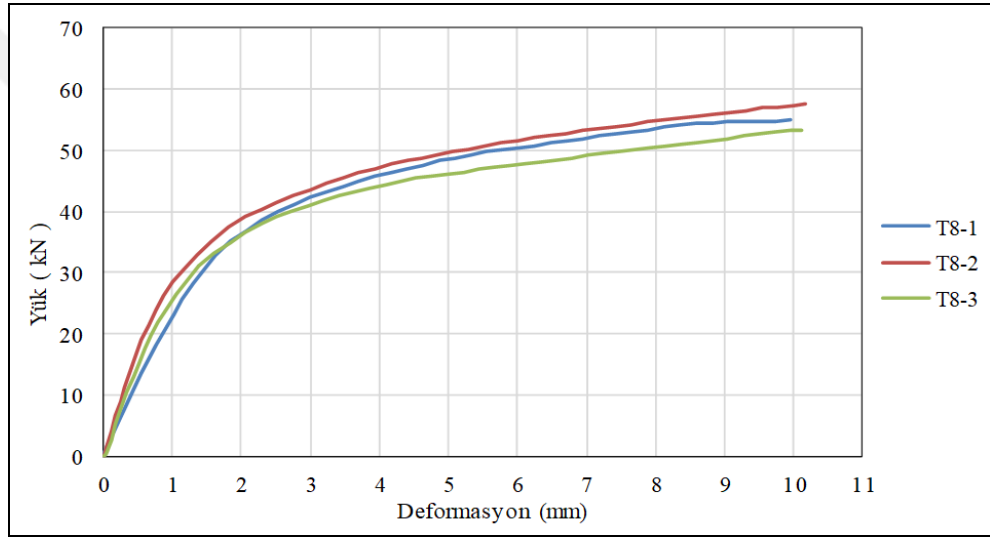
Şekil Ek 4.5. T₅ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



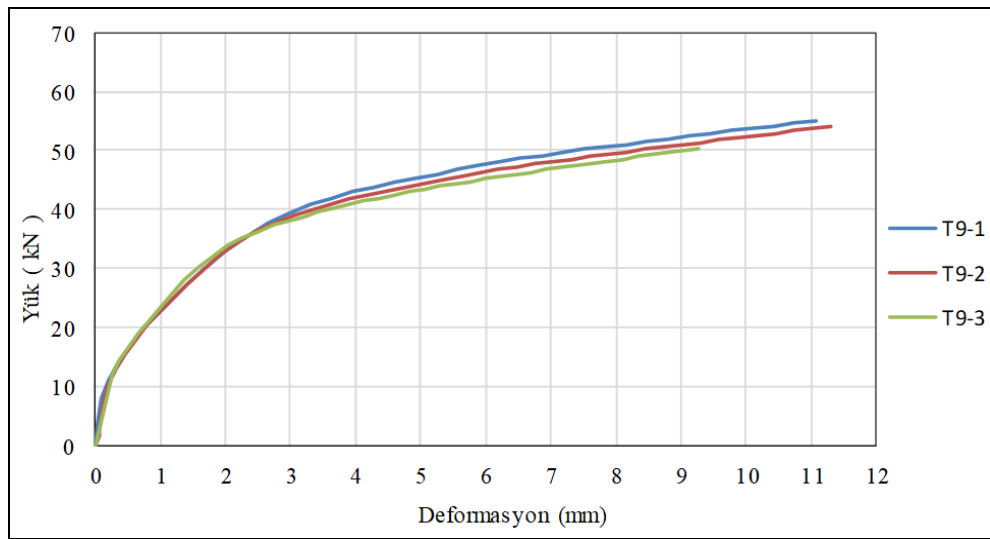
Şekil Ek 4.6. T₆ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



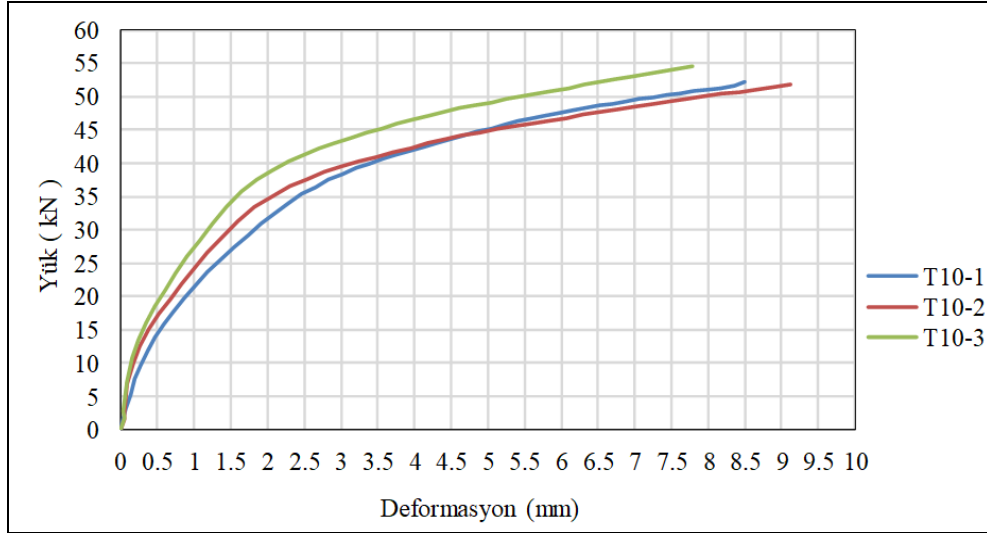
Şekil Ek 4.7. T₇ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



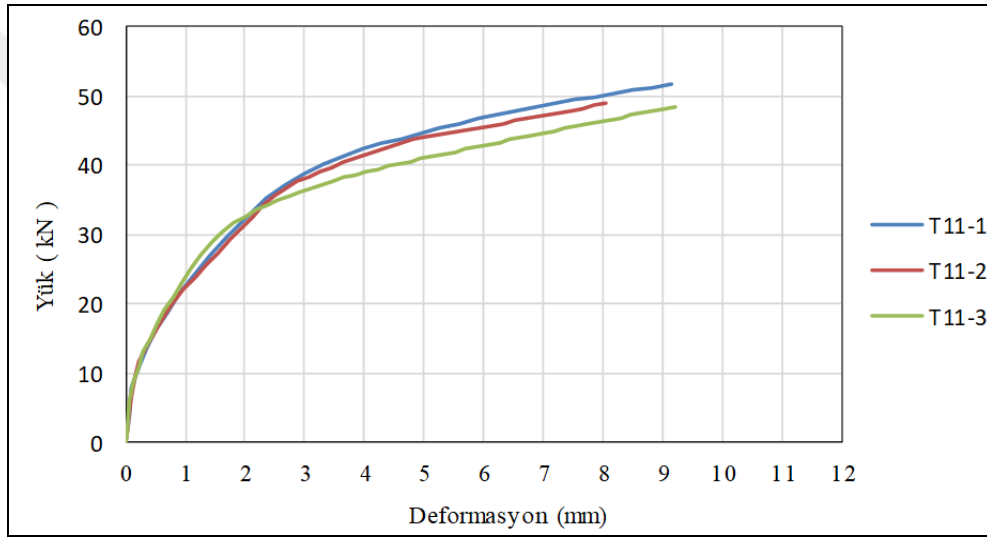
Şekil Ek 4.8. T₈ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



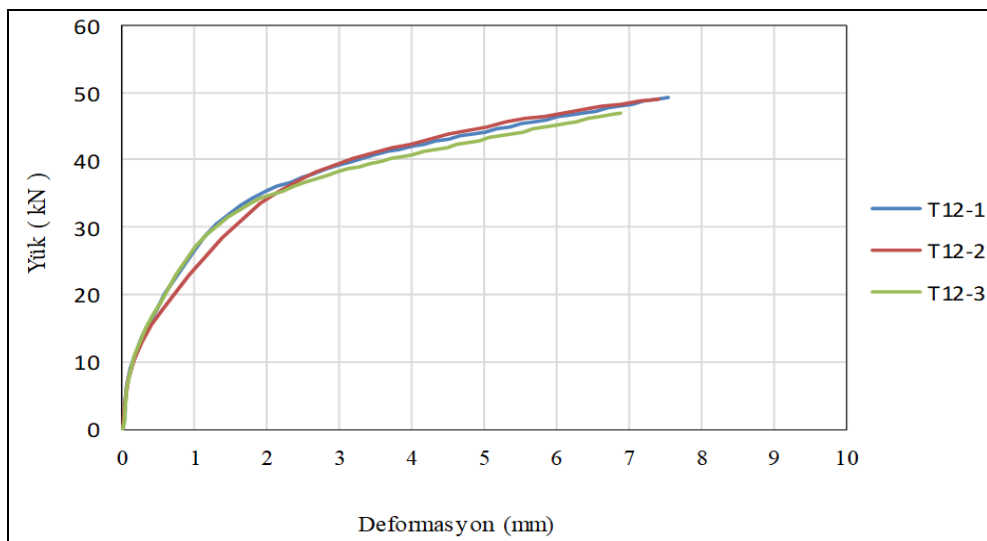
Şekil Ek 4.9. T₉ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



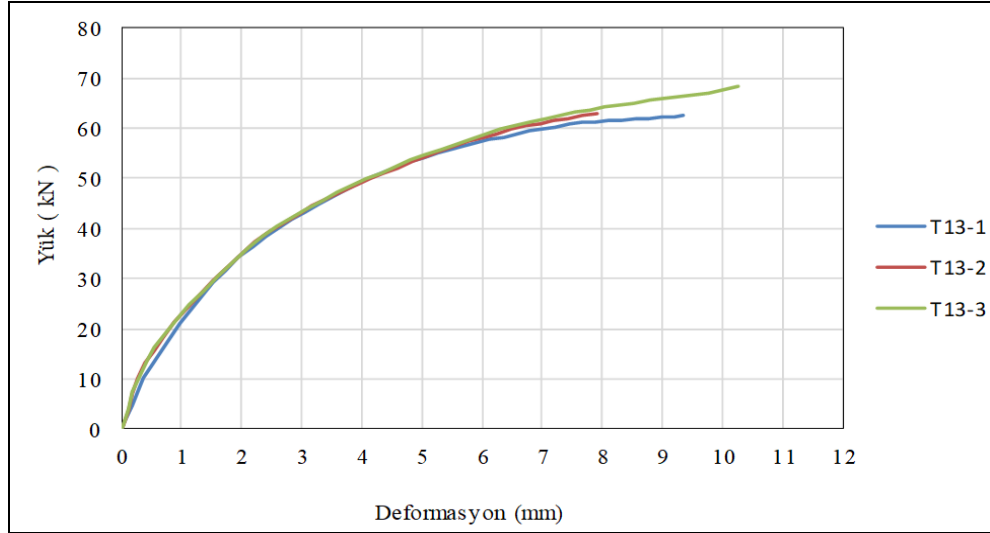
Şekil Ek 4.10. T_{10} tasarımı için CBR deneyine ait grafik



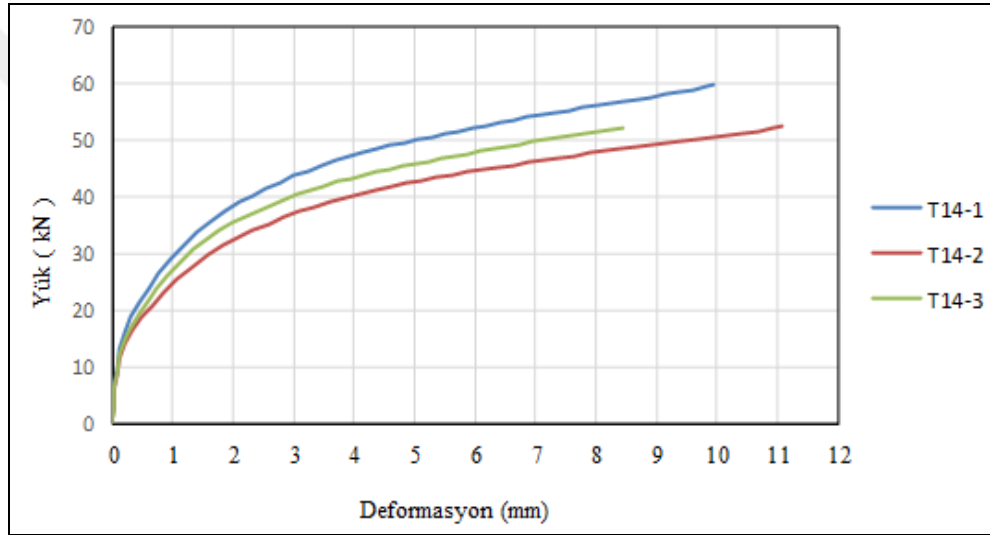
Şekil Ek 4.11. T_{11} tasarımı için CBR deneyine ait grafik



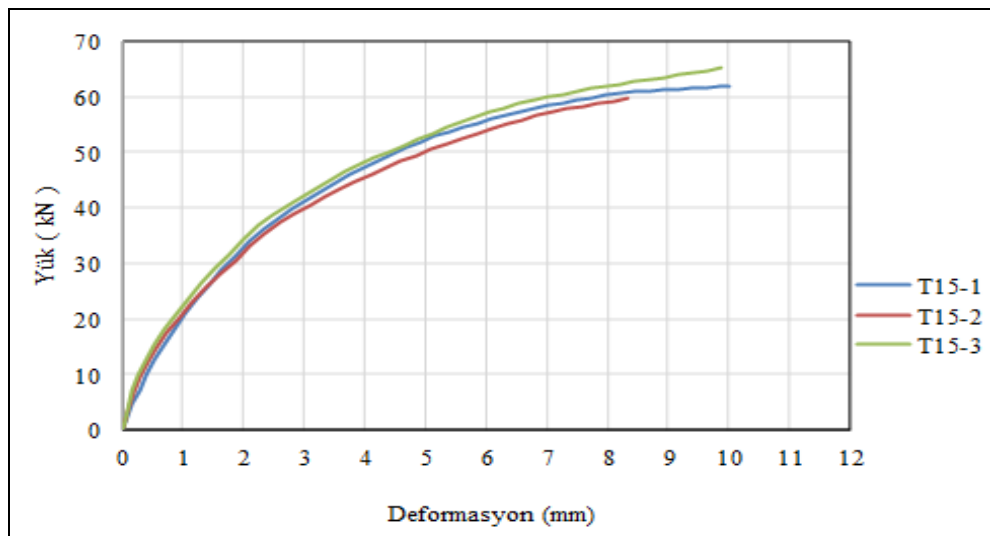
Şekil Ek 4.12. T_{12} tasarımı için CBR deneyine ait grafik



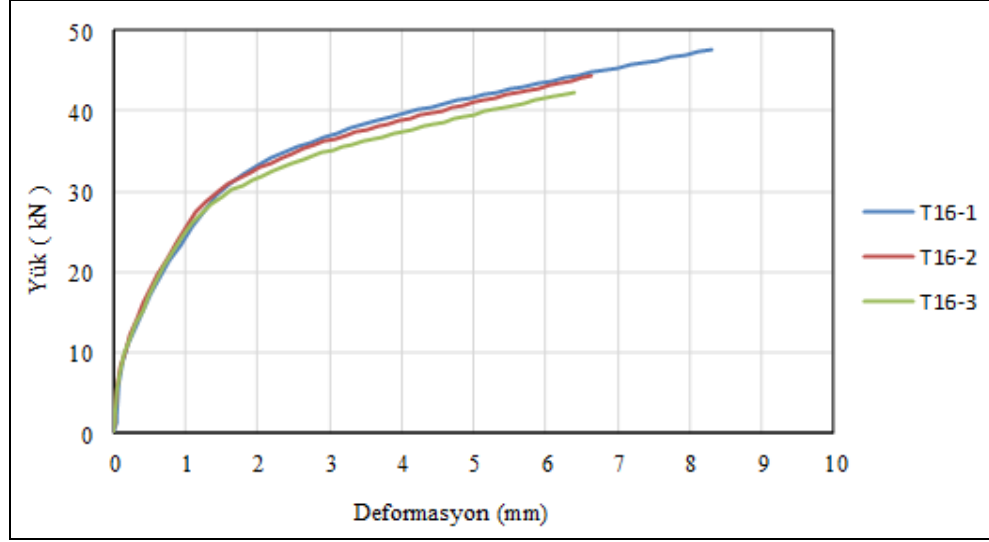
Şekil Ek 4.12. T₁₃ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



Şekil Ek 4.14. T₁₄ tasarımı için CBR deneyine ait grafik

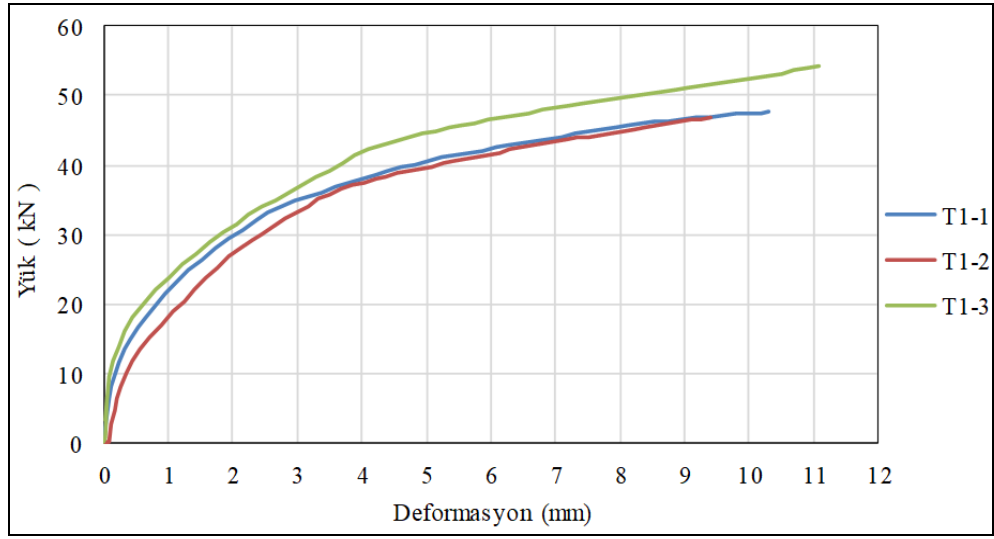


Şekil Ek 4.15. T₁₅ tasarımı için CBR deneyine ait grafik

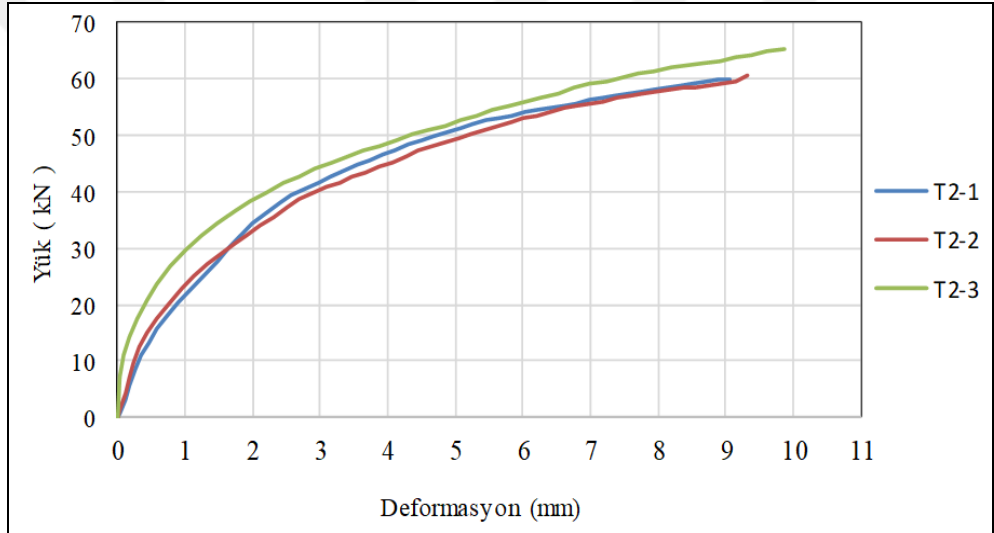


Şekil Ek 4.16. T₁₆ tasarımı için CBR deneyine ait grafik

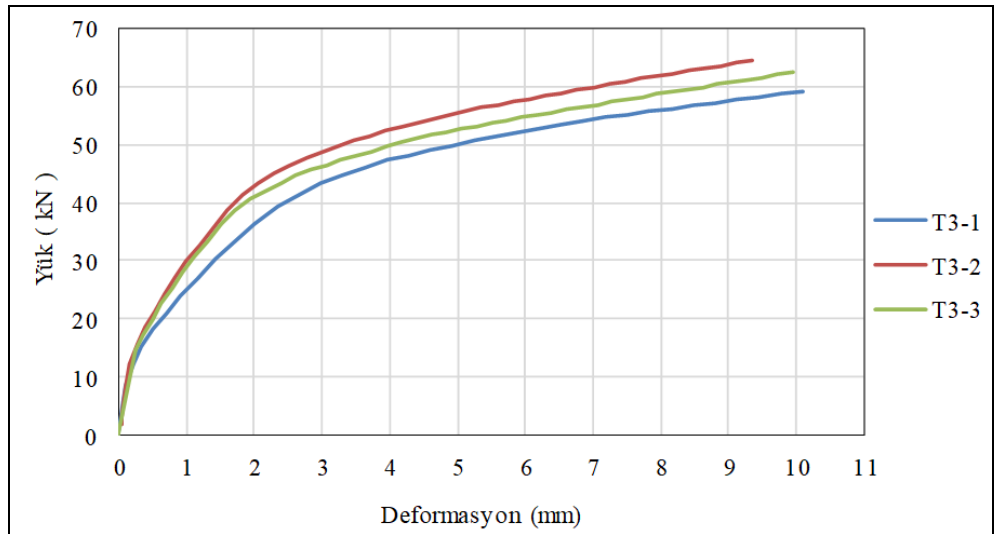
EK-5 CBR deneyine ait grafikler (28 günlük)



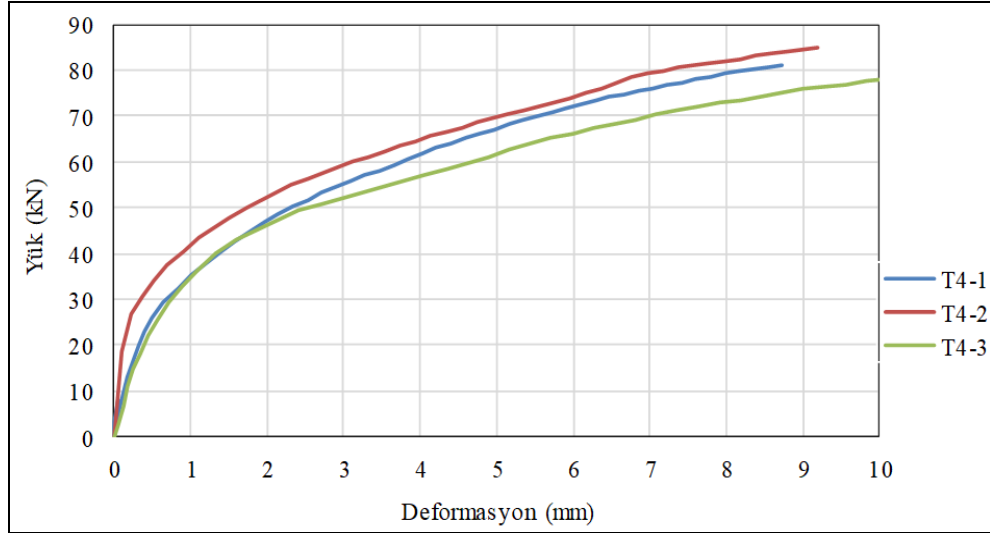
Şekil Ek 5.1. T₁ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



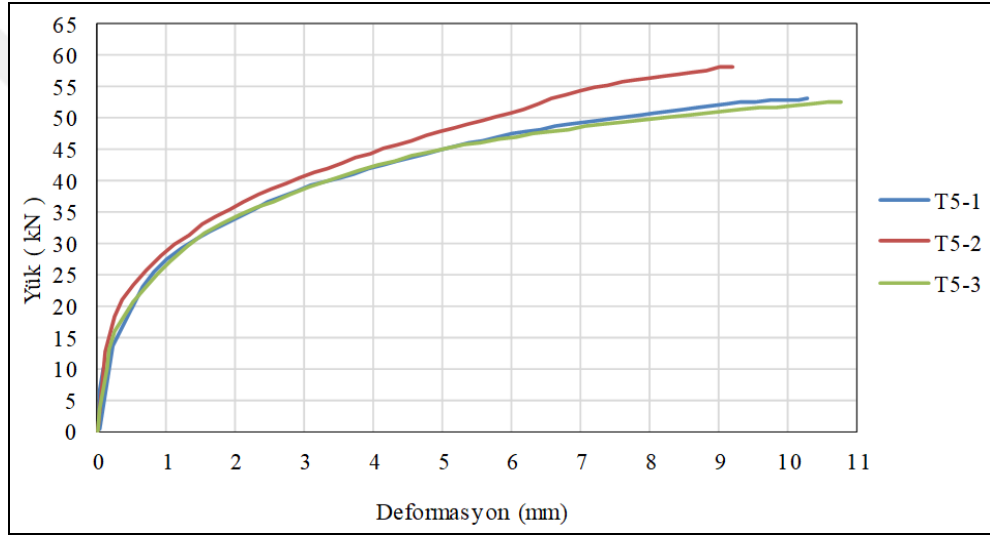
Şekil Ek 5.2. T₂ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



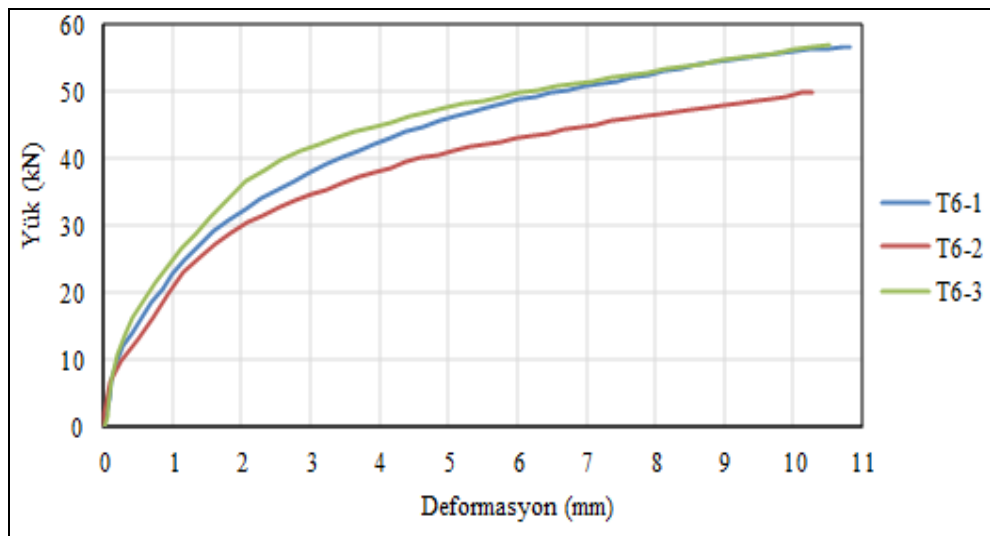
Şekil Ek 5.3. T₃ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



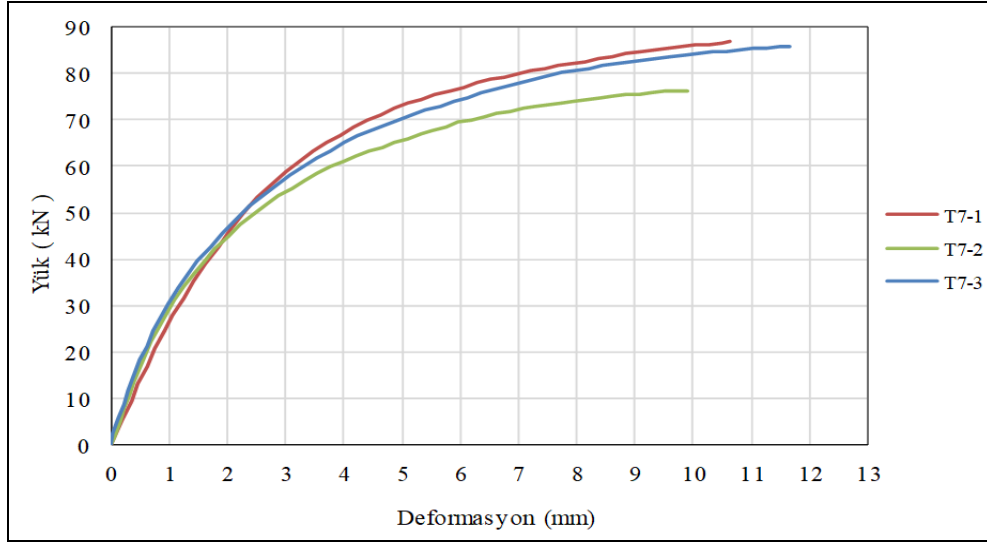
Şekil Ek 5.4. T₄ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



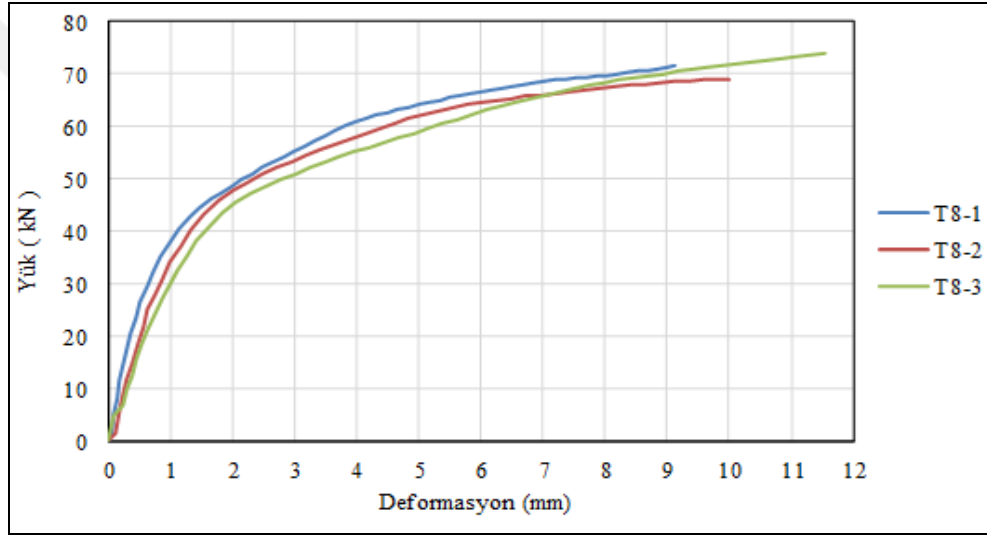
Şekil Ek 5.5. T₅ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



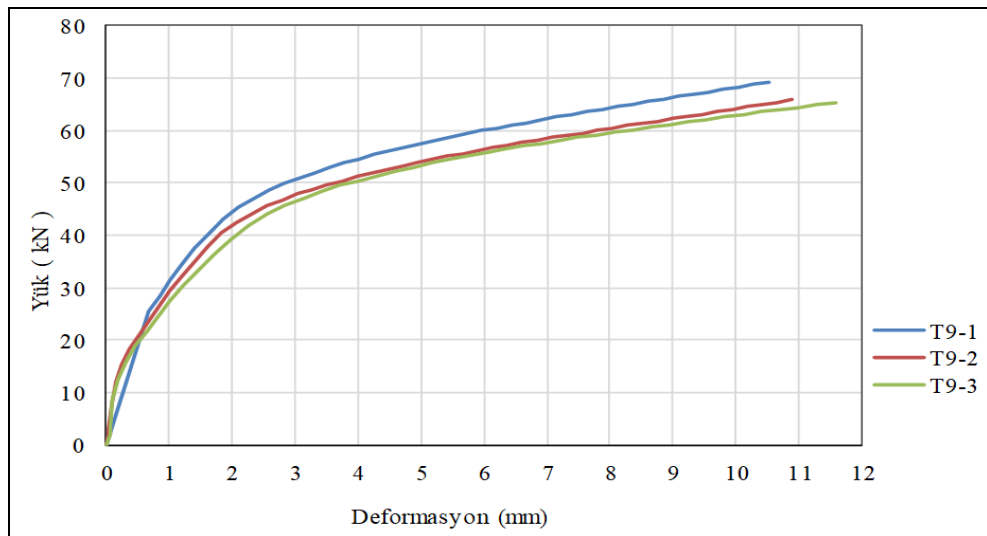
Şekil Ek 5.6. T₆ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



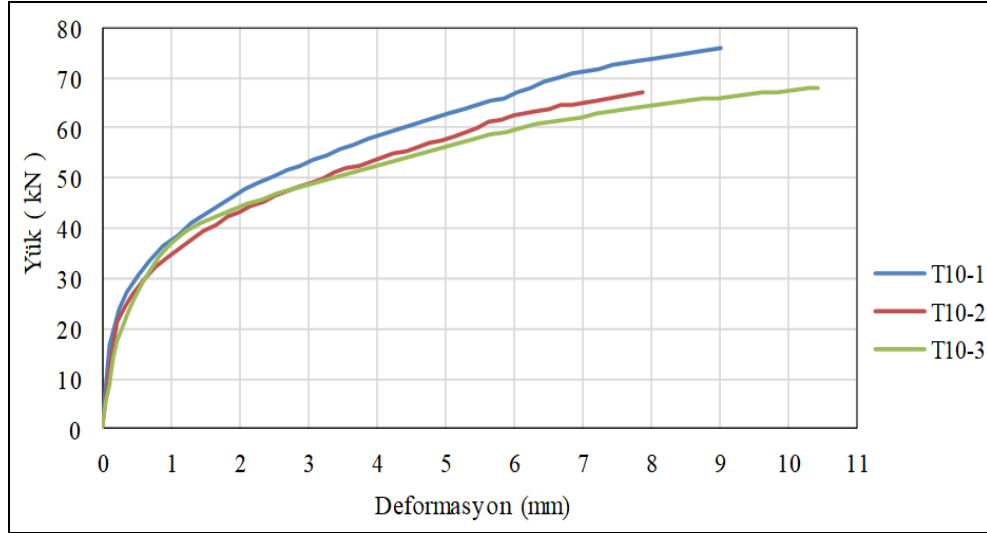
Şekil Ek 5.7. T₇ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



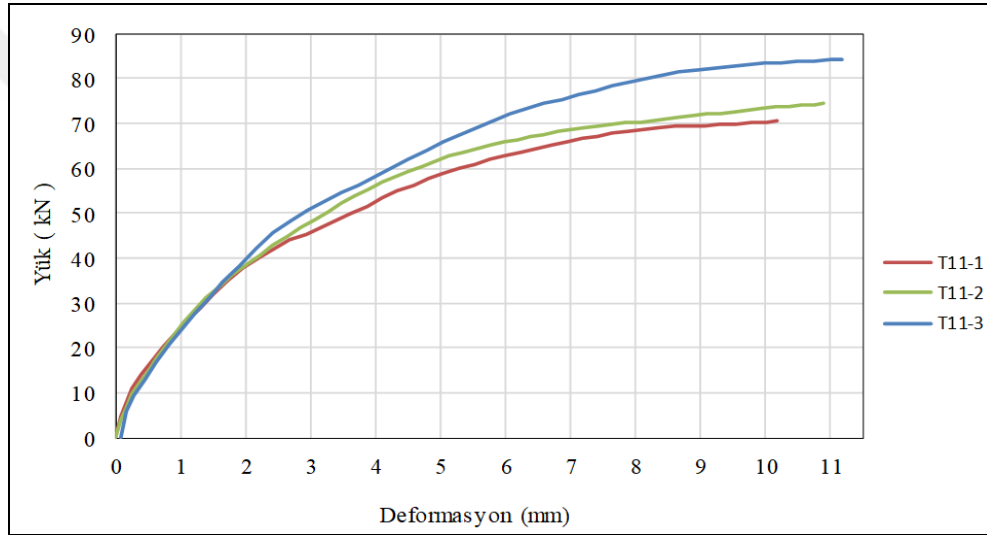
Şekil Ek 5.8. T₈ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



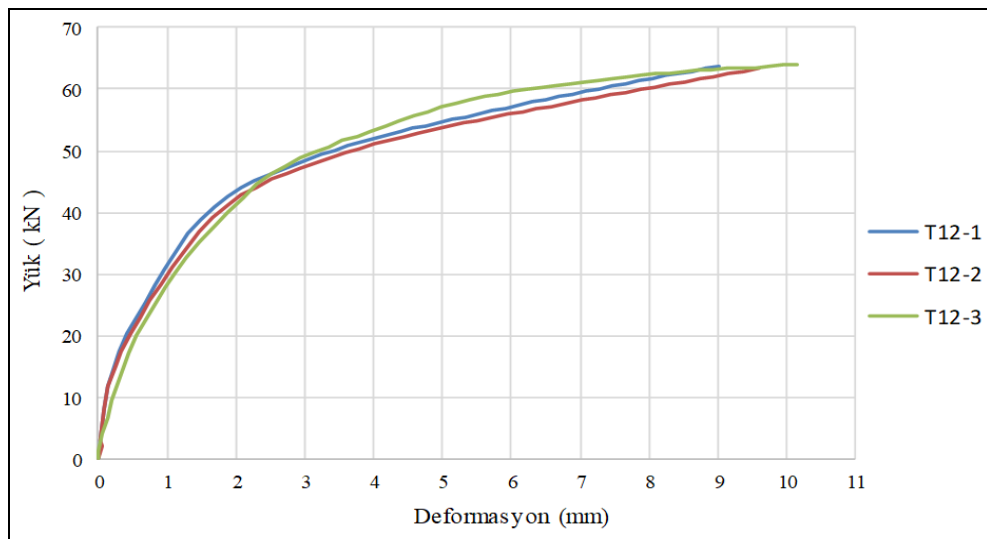
Şekil Ek 5.9. T₉ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



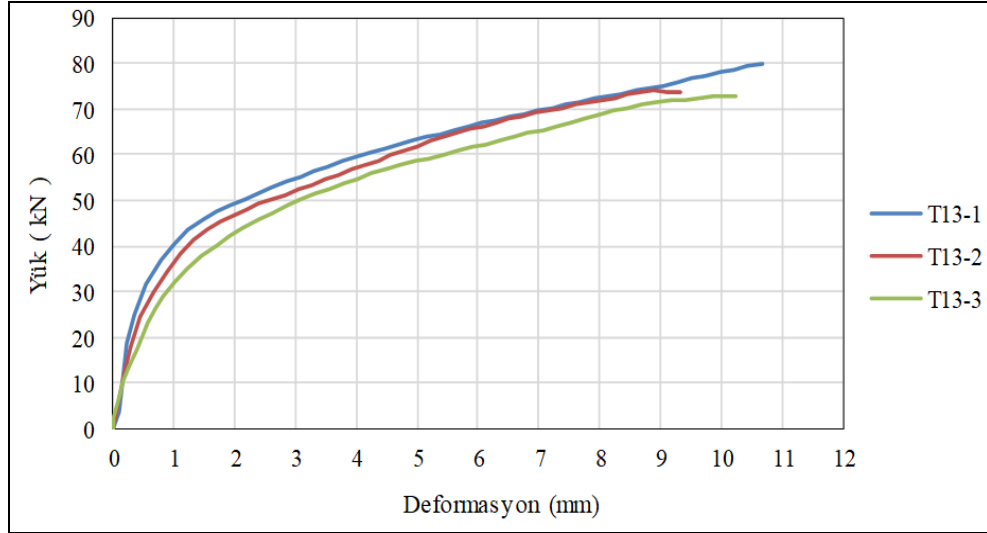
Şekil Ek 5.10. T₁₀ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



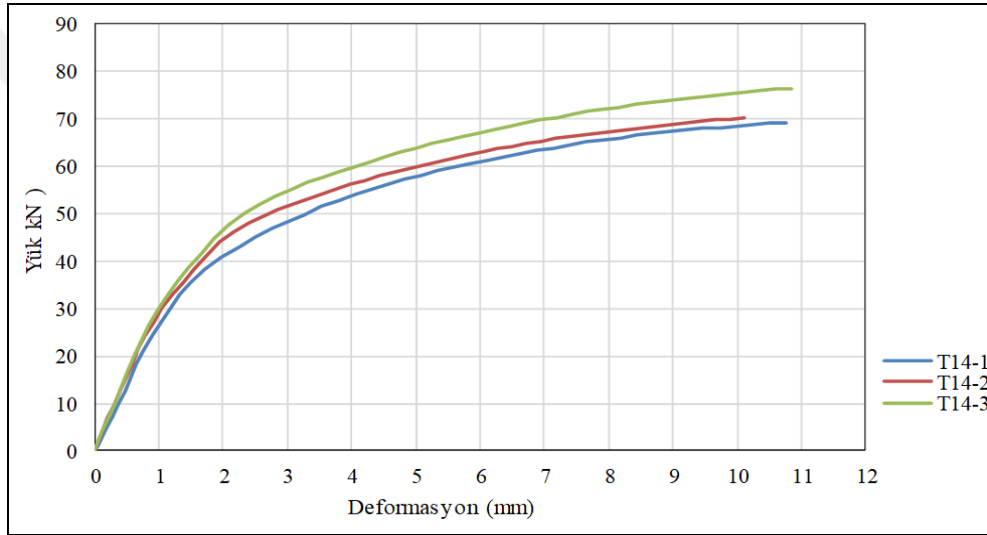
Şekil Ek 5.11. T₁₁ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



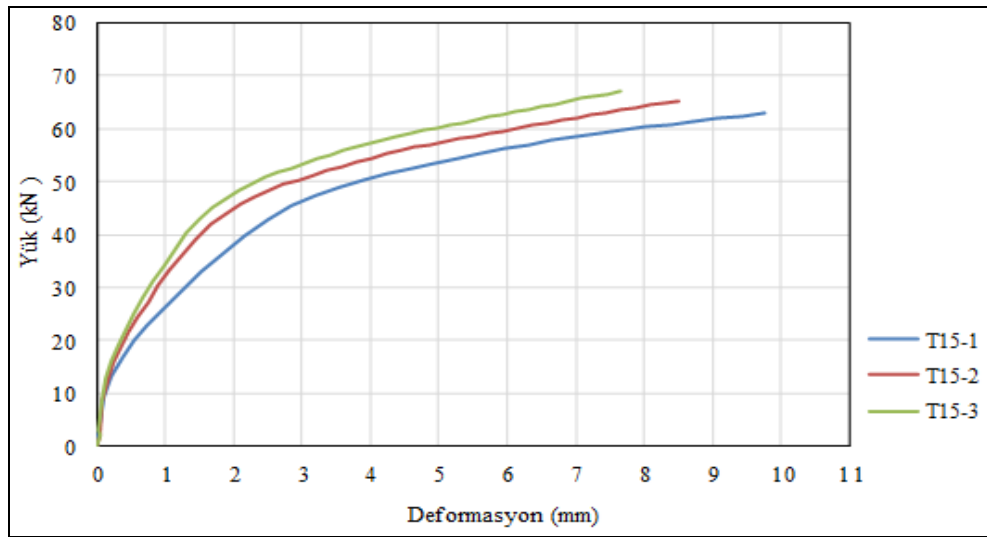
Şekil Ek 5.12. T₁₂ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



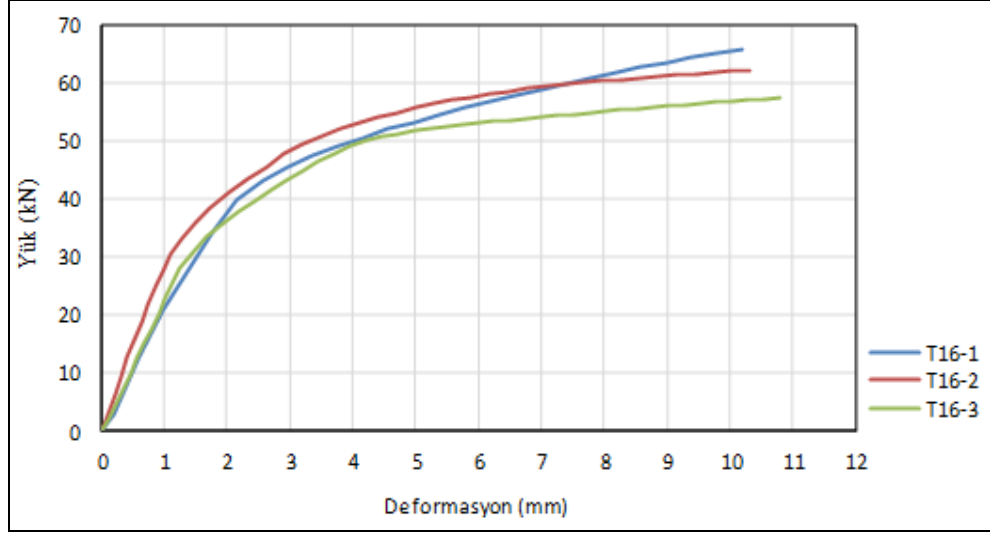
Şekil Ek 5.13. T₁₃ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



Şekil Ek 5.14. T₁₄ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



Şekil Ek 5.15. T₁₅ tasarımı için CBR deneyine ait grafik



Şekil Ek 5.16. T₁₆ tasarımı için CBR deneyine ait grafik