



**PORSELEN KAROLARIN KİMYASAL  
KOMPOZİSYONU İLE SİNERLEME VE  
TEKNİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ  
İLİŞKİNİN İSTATİSTİKSEL  
MODELLENMESİ**

**Doktora Tezi**

**Mohsen ZAMANI**

**Eskişehir 2023**

**PORSELEN KAROLARIN KİMYASAL KOMPOZİSYONU İLE SİNERLEME  
VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İSTATİSTİKSEL  
MODELLENMESİ**

**Mohsen ZAMANI**

**Doktora Tezi**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Alpagut KARA**

**İkinci Danışman: Prof. Dr. Cem SEVİK**

**Eskişehir**

**Eskişehir Teknik Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Aralık 2023**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mohsen ZAMANI'nin PORSELEN KAROLARIN KİMYASAL KOMPOZİSYONU İLE SİNERLEME VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İSTATİSTİKSEL MODELLENMESİ başlıklı çalışması 04/12/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### Unvan Adı Soyadı

### İmza

Üye : Prof. Dr. Alpagut KARA

Üye : Doç. Dr. Haluk YAPICIOĞLU

Üye : Prof. Dr. Ferhat KARA

Üye : Doç. Dr. Meryem ULUSKAN

Üye : Prof. Dr. Tanju GÜREL

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## DANIŞMAN ONAYI

DaniŐmanlıđını yürüttüğüm Doktora ğrencisi Mohsen ZAMANI, PORSELEN KAROLARIN KİMYASAL KOMPOZİSYONU İLE SİNERLEME VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İSTATİSTİKSEL MODELLENMESİ başlıklı tez çalıŐmasını tamamlamıŐtır. HazırlamıŐ olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez DaniŐmanı

Prof. Dr. Alpagut KARA

## ÖZET

# PORSELEN KAROLARIN KİMYASAL KOMPOZİSYONU İLE SİNTERLEME VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İSTATİSTİKSEL MODELLENMESİ

Mohsen ZAMANI

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Aralık 2023

Danışman: Prof. Dr. Alpagut KARA

İkinci Danışman: Prof. Dr. Cem SEVİK

Bu çalışma, porselen karoların özellikleri üzerinde etkili olan faktörlerin sistematik olarak incelenmesi amacıyla tam faktöriyel deney tasarımı yaklaşımı kullanmıştır. Deney tasarımı, seramik üretim sürecinin optimize edilmesi ve geliştirilmesi için bağımsız değişkenlerin sistemli bir şekilde değiştirilmesini ve buna bağlı olarak bağımlı değişkenlerin ölçülmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}/\text{CaO}$  Seger oranları ve pişme sıcaklığı gibi dört ana faktör  $2^4$  tam faktöriyel tasarım yöntemiyle incelenmiştir.

Tez kapsamında, porselen malzemelerin kimyasal bileşimi ve Seger değerleri üzerinde durulmuş ve oksit oranlarının aralıkları hesaplanmıştır. İstatistiksel hipotez analiziyle tip I ve tip II hatalar minimize edilmiştir. Ayrıca, hammadde miktarlarının sınırlanması, oksit oranlarının dengesinin korunması ve tane boyutunun etkilerinin minimize edilmesi için ek kriterler belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, bağımsız değişkenlerin porselen karoların özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiş ve optimal ayarları belirlemeye yardımcı olmuştur. İstatistiksel analiz, Seger oranlarının yoğunluk, su emme, pişme küçülmesi, termal genleşme katsayısı ve mukavemet gibi önemli özellikler üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

Varyans analizi ve Pareto grafiği, en büyük etkiye sahip faktörleri belirlemek için kullanılmıştır.  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{MgO}/\text{CaO}$  faktörlerinin incelenen özellikler üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Çalışma sonucu elde edilen regresyon modelleri yüksek uyum ölçütleri göstermiş ve güçlü tahmin yeteneklerini kanıtlamıştır.

Bu çalışma, porselen karoların üretim sürecinin optimize edilmesi ve kalitesinin iyileştirilmesi için değerli bilgiler sunmaktadır. Önerilen modeller, üretimde ekonomik etkileri olan maliyet optimizasyonu, kaynak tahsisi, üretim verimliliği ve karlılık gibi konularda üreticilere avantaj sağlayabilir.

**Anahtar Sözcükler:** Tam faktöriyel tasarım, Porselen karo, Seger formülü, Nihai özellikler, Kompozisyon optimizasyonu.

## ABSTRACT

### STATISTICAL MODELING OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE CHEMICAL COMPOSITION, SINTERING, AND TECHNICAL PROPERTIES OF PORCELAIN TILES

Mohsen ZAMANI

Department of Material Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, December 2023

Supervisor: Prof. Dr. Alpagut KARA

Co-Supervisor: Prof. Dr. Cem SEVİK

This study utilized a full factorial experimental design technique to systematically investigate the factors influencing the final properties of porcelain tiles. The experimental design allowed for the systematic alteration of independent variables and the measurement of dependent variables, aiming to optimize and improve the ceramic production process. The study focused on four main factors: Seger ratios of  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}/\text{CaO}$ , and firing temperature, employing a  $2^4$  full factorial method.

The composition of porcelain tiles and Seger values were specifically addressed in the study, with the calculation of oxide ratio ranges. Statistical hypothesis analysis was employed to minimize Type I and Type II errors. Furthermore, additional criteria were established to restrict the amount of typical raw material in the formulation, ensure that the balance of various oxide components is not distorted and minimize the particle size effects. The experimental results evaluated the effects of independent variables on the properties of porcelain tiles and assisted in determining optimal settings. The statistical analysis demonstrated the significant influence of Seger ratios on important properties such as density, water absorption, firing shrinkage, thermal expansion coefficient, and strength.

Variance analysis and Pareto charts were employed to identify the most impactful factors on each property.  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{MgO}/\text{CaO}$  were found to have the most significant effects on the examined properties. The regression models derived from the study exhibited high goodness-of-fit measures and demonstrated strong predictive capabilities.

This study provides valuable insights for optimizing the production process and enhancing the quality of porcelain tiles. The proposed models offer advantages to manufacturers in terms of cost optimization, resource allocation, production efficiency, and profitability.

**Keywords:** Full factorial design, Porcelain tiles, Seger formula, final properties, composition optimization.

## TEŞEKKÜR

Saygıdeğer danışmanlarım Prof. Dr. Alpagut Kara ve Prof. Dr. Cem Sevik'e, bu süreçte sergiledikleri kararlı destek için derin bir minnet borçluyum. Bu vesile ile sayın hocalarıma tüm destekleri için teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmalarımın yönlendirilmesi ve değerlendirilmesinde bana yol gösteren değerli tez izleme komitesi üyesi Doç. Dr. Haluk Yapıcıoğlu'na, cömert yorumları ve çalışmam üzerindeki değerli geri bildirimleri için içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Tez savunma jürisinin değerli üyeleri, Prof. Dr. Ferhat Kara, Prof. Dr. Tanju Gürel ve Doç. Dr. Meryem ULUSKAN'a, zamanlarını ve fikirlerini cömertçe paylaştıkları ve olumlu görüşlerini ifade ettikleri için teşekkür ederim.

Seramik Araştırma Merkezi A.Ş. ailesine ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'ın 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamındaki değerli katkıları için şükranlarımı sunarım. Özellikle proje yürütücümüz Prof. Dr. Servet Turan ve endüstriyel danışmanım Pervin Dağ Gençoğlu'na, bu süreçteki destekleri, özverileri, işbirlikleri ve sağladıkları fırsatlar için içten teşekkür ederim.

Son olarak, sevgili aileme ve arkadaşlarıma, bu yolculuk boyunca gösterdikleri sınırsız destek için sonsuz teşekkürlerimi bildirmek isterim.

Mohsen ZAMANI

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Mohsen ZAMANI

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI .....	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI .....	III
ÖZET .....	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR .....	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER .....	VIII
TABLolar DİZİNİ .....	XIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XVII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XXIV
1. GİRİŞ .....	1
2. SERAMİK KAPLAMA MALZEMELERİ .....	4
2.1. Seramik Hammaddeleri .....	4
2.1.1. Kil ve kaolenler .....	4
2.1.2. Ergiticiler .....	5
2.1.3. Dolgu hammaddeleri .....	6
2.2. Kaplama Malzemeleri Üretim Süreci.....	6
2.2.1. Çamur hazırlama (öğütme) .....	6
2.2.2. Granül hazırlama .....	7
2.2.3. Şekillendirme .....	8
2.2.4. Kurutma .....	9
2.2.5. Pişirme (sinterleme) .....	9
2.2.6. Kalite kontrol.....	10
2.3. Seger Formülasyonu ve Seger Oranlarının Sinterleme Üzerine Etkisi .....	11
2.3.1. SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> oranının sinterleme üzerine etkisi .....	11
2.3.2. Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O oranının sinterleme üzerine etkisi.....	12

2.3.3. MgO/CaO oranının sinterleme üzerine etkisi.....	13
2.4. Seramik Kaplama Malzemelerinin Modelleme Geçmişi.....	14
2.4.1. Termokinetik simülasyon yaklaşımı ile sinterleme sürecinin modellenmesi.....	15
2.4.2. Sayısal ve matematiksel modellemeler .....	15
2.4.3. Sonlu elemanlar analizi.....	17
2.4.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Simülasyonu.....	18
2.4.5. Veri tabanlı yaklaşımlar ve yapay sinir ağı (ANN) modellemesi.....	19
2.4.6. İstatistiksel yaklaşımlar .....	22
3. DENEY TASARIMI.....	24
3.1. Deney Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar .....	24
3.2. Hipotez Testleri .....	25
3.3. Faktör Etkilerinin Hesaplanması .....	26
4. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR.....	29
4.1. Faktörlerin Seviyelerinin Belirlenmesi .....	29
4.2. Tam Faktörlü Deney Tasarımı .....	31
4.3. Kullanılan Hammaddeler ve Hammadde Analizi.....	32
4.3.1. X-ışını floresans spektrometresi (XRF) kimyasal analizi .....	32
4.3.2. X-ışını kırınımı spektrometresi (XRD) mineralojik analizi .....	33
4.3.3. Kullanılan hammaddelerin ısı davranışlarının incelenmesi.....	36
4.4. Porselen Karosu Reçete Kıstasları .....	43
4.4.1. Tipik hammadde kıstasları.....	43
4.4.1.1. <i>Kil ve kaolen</i> .....	43
4.4.1.2. <i>Flaks veya akışkanlar</i> .....	44
4.4.1.3. <i>Dolgu malzemesi</i> .....	44
4.4.1.4. <i>Ağırlıkça oksit miktarları kıstasları</i> .....	45
4.4.1.5. <i>Seğer formülü kıstasları</i> .....	45
4.4.2. Deney tasarımında $\alpha$ ve $\beta$ risklerini en düşüğe çekmek amaçlı sabit tutulan oran .....	45
4.5. Belirlenen Reçeteler .....	46
4.6.1. Kaolen mineralinin termal davranışı .....	50
4.6.1.1. <i>Kaolen (kaolen-<math>T_c</math>) –<math>Al_2Si_2O_5(OH)_4</math></i> .....	50

4.6.1.2. Dikit (kaolen-2M) – $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ .....	51
4.6.1.3. Fireclay (kaolen-1M <sub>d</sub> ) – $Al_2Si_2O_5(OH)_4.nH_2O$ ( $n<2$ ).....	52
4.6.2. Karbonat minerallerinin termal davranışı .....	53
4.6.2.1. Manyezit ( $MgCO_3$ ) .....	53
4.6.2.2. Dolomit $MgCa(CO_3)_2$ .....	54
4.7. Porselen Karo Bünyelerinin Hazırlanması.....	55
4.8. Hazırlanan Reçetelerin Tane Boyutu Dağılımı .....	56
<b>5. STANDART TEST VE KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>58</b>
5.1. Yoğunluk Ölçümü .....	58
5.2. Su Emme .....	58
5.3. Boyut Değişiminin Ölçülmesi.....	58
5.4. Mukavemet Ölçümleri.....	59
5.5. Ultrasonik Muayene ve Elastisite Modülleri .....	59
5.6. Deformasyon Davranışının Belirlenmesi .....	61
5.7. Doğrusal Isıl Genleşme Katsayısı Tayini .....	61
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI .....</b>	<b>62</b>
6.1. Fiziksel ve Termal Özellikler .....	62
6.2. Elastisite Modülleri .....	63
6.3. Deformasyon Özellikleri.....	63
6.4. Faz Analizi .....	64
6.5. Mikroyapı Analizi .....	68
6.5.1. Tespit edilen fazların mikroyapısal ve kimyasal analizleri .....	68
6.5.2. Numunelerin SEM görüntüleri .....	70
<b>7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>79</b>
7.1. Bağımlı Değişkenlerin Değerlendirmesi.....	79
7.1.1. Popülasyon testi .....	79
7.1.2. Aykırı değer tespiti.....	84
7.2. Varyans Analizi (ANOVA) ve Regresyon Modelleri .....	90
7.2.1. Yoğunluk için deney tasarımı sonuçları.....	93
7.2.1.1. Yoğunluk için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi .....	94

7.2.1.2. Yoğunluk için varyans analizi.....	94
7.2.1.3. Yoğunluk için ana etki ve etkileşim grafikleri.....	98
7.2.1.4. Yoğunluk için optimize yanıt sonucu.....	100
7.2.2. Su emme için deney tasarımı sonuçları.....	100
7.2.2.1. Su emme için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi .....	101
7.2.2.2. Su emme için varyans analizi.....	101
7.2.2.3. Su emme için ana etki ve etkileşim grafikleri.....	104
7.2.2.4. Su emme için optimize yanıt sonucu.....	106
7.2.3. Pişme mukavemet için deney tasarımı sonuçları.....	107
7.2.3.1. Pişme mukavemet için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi.....	107
7.2.3.2. Pişme mukavemeti için varyans analizi.....	108
7.2.3.3. Pişme mukavemet için ana etki ve etkileşim grafikleri.....	110
7.2.3.4. Pişme mukavemet için optimize yanıt.....	112
7.2.4. Poisson oranı için deney tasarımı sonuçları.....	113
7.2.4.1. Poisson oranı için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi.....	113
7.2.4.2. Poisson oranı için varyans analizi.....	114
7.2.4.3. Poisson oranı için ana etki ve etkileşim grafikleri.....	116
7.2.4.4. Poisson oranı için optimize yanıt.....	118
7.2.5. Young modülü için deney tasarımı sonuçları.....	119
7.2.5.1. Young modülü için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi.....	119
7.2.5.2. Young modülü için varyans analizi.....	119
7.2.5.3. Young modülü için ana etki ve etkileşim grafikleri.....	122
7.2.5.4. Young modülü için optimize yanıt.....	124
7.2.6. Pişme küçülmesi için deney tasarımı sonuçları.....	124
7.2.6.1. Pişme küçülmesi için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi.....	125
7.2.6.2. Pişme küçülmesi için varyans analizi.....	125
7.2.6.3. Pişme küçülmesi için ana etki ve etkileşim grafikleri.....	128
7.2.6.4. Pişme küçülmesi için optimize yanıt.....	129

7.2.7. Isıl genleşme katsayısı için deney tasarımı sonuçları.....	130
7.2.7.1. <i>Isıl genleşme katsayısı için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi</i> .....	130
7.2.7.2. <i>Isıl genleşme katsayısı için varyans analizi</i> .....	131
7.2.7.3. <i>Isıl genleşme katsayısı için ana etki ve etkileşim grafikleri</i> .....	134
7.2.7.4. <i>Isıl genleşme katsayısı için optimize yanıt</i> .....	135
7.2.8. Pyroplastik indeksi için deney tasarımı sonuçları.....	136
7.2.8.1. <i>PI için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi</i> .....	136
7.2.8.2. <i>Pyroplastik indeksi için varyans analizi</i> .....	136
7.2.8.3. <i>PI için ana etki ve etkileşim grafikleri</i> .....	139
7.2.8.4. <i>PI için optimize yanıt</i> .....	140
7.2.9. Camsı faz viskozitesi için deney tasarımı sonuçları .....	141
7.2.9.1. <i>Camsı faz viskozitesi için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi</i> .....	141
7.2.9.2. <i>Camsı faz viskozitesi için varyans analizi</i> .....	141
7.2.9.3. <i>Camsı faz viskozitesi için ana etki ve etkileşim grafikleri</i> .....	144
7.2.9.4. <i>Camsı faz viskozitesi için optimize yanıt</i> .....	145
7.3. Deney Tasarımı Dışında Kalan Bağımsız Değişkenlerin Analizi.....	146
7.4. Doğrulama Çalışmaları .....	164
7.4.1. Doğrulama reçetelerin sonuçları.....	165
7.5. Özellik-Özellik İlişkilerin Tespiti .....	168
7.6. Optimize Yanıt .....	177
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>180</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>182</b>
<b>EKLER</b>	
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1.</b> İki faktörlü deney için ANOVA tablosu [67] .....	28
<b>Tablo 4.1.</b> Üç sınıf porselen bünyesinin ortalama kimyasal bileşimi ve Seger değer aralığı .....	29
<b>Tablo 4.2.</b> Tam faktörlü deney tasarımı için incelenen faktörler ve seviyeleri.....	31
<b>Tablo 4.3.</b> Tam faktörlü deney tasarım tablo özeti .....	32
<b>Tablo 4.4.</b> Tez kapsamında kullanılan hammaddelerin % ağırlıkça kimyasal analizleri.....	33
<b>Tablo 4.5.</b> Hammaddelerin mineralojik analiz özeti .....	36
<b>Tablo 4.6.</b> Hammaddelerin ısı analiz sonuçlarının özeti.....	41
<b>Tablo 4.7.</b> Ticari Seramik kaplama üretiminde kullanılan birincil hammaddeler .....	43
<b>Tablo 4.8.</b> Tip I ve II hataları en aza indirmek için uygulanan bir dizi karar kuralları ve açıklamaları .....	46
<b>Tablo 4.9.</b> Faktörler ve seviyelerine göre numune kodları .....	46
<b>Tablo 4.10.</b> Seger hesaplama tablosuna göre istenen Seger oranlarının sağlandığı reçete içeriği.....	47
<b>Tablo 4.11.</b> Hazırlanan reçetelerin oksit değerleri .....	48
<b>Tablo 4.12.</b> Hazırlanan reçetelerin seger değerleri .....	49
<b>Tablo 4.13.</b> Numunelerin TG-DTA eğrisine göre hesaplanan kaolen, manyezit ve dolomit miktarı.....	55
<b>Tablo 4.14.</b> Reçetelerin lazer difraksiyon tekniği ile ölçülen tane boyut analiz sonuçları (%hacimce).....	57
<b>Tablo 6.1.</b> Deney tasarımı için hazırlanan numunelerin fiziksel ve termal özellik test sonuçları .....	62
<b>Tablo 6.2.</b> Deney tasarımı için hazırlanan numunelerin elastisite modülleri test sonuçları .....	63
<b>Tablo 6.3.</b> Numunelere ait 1200°C deki Pyroplastik indeks ve camsı faz viskozite değerleri .....	64
<b>Tablo 6.4.</b> Reçetelerin kantitatif faz analiz sonuçları.....	66
<b>Tablo 7.1.</b> Popülasyon test sonuçları.....	83
<b>Tablo 7.2.</b> Sıcaklığa bağlı iki tekrarlı özelliklerin aykırı değer tespit testi sonucu.....	85

<b>Tablo 7.3.</b> Sıcaklıktan bağımsız iki tekrarlı özelliklerin aykırı değer tespit testi sonucu .....	86
<b>Tablo 7.4.</b> Sıcaklığa bağlı özelliklerin aykırı değer tespiti ve ayıklama sonrası elde edilen nihai değerler .....	89
<b>Tablo 7.5.</b> Sıcaklıktan bağımsız özelliğin aykırı değer tespiti ve ayıklama sonrası elde edilen nihai değerler .....	90
<b>Tablo 7.6.</b> Yoğunluk özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu .....	94
<b>Tablo 7.7.</b> Yoğunluk için Anova tablosu .....	95
<b>Tablo 7.8.</b> Yoğunluk için elde edilen matematiksel model özeti .....	97
<b>Tablo 7.9.</b> Optimum yoğunluk için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı .....	100
<b>Tablo 7.10.</b> Su emme özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu .....	101
<b>Tablo 7.11.</b> Su emme için Anova tablosu .....	102
<b>Tablo 7.12.</b> Su emme için elde edilen matematiksel modelin özeti .....	104
<b>Tablo 7.13.</b> Optimum su emme için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı .....	107
<b>Tablo 7.14.</b> Mukavemet özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu .....	107
<b>Tablo 7.15.</b> Pişme mukavemeti için Anova tablosu .....	108
<b>Tablo 7.16.</b> Pişme mukavemeti için elde edilen matematiksel model özeti .....	110
<b>Tablo 7.17.</b> Optimum pişme mukavemeti için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı .....	113
<b>Tablo 7.18.</b> Poisson oranının bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu .....	113
<b>Tablo 7.19.</b> Poisson oranı için Anova tablosu .....	114
<b>Tablo 7.20.</b> Poisson oranı için elde edilen matematiksel model özeti .....	116
<b>Tablo 7.21.</b> Optimum Poisson oranı için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı .....	119
<b>Tablo 7.22.</b> Young modülü özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu .....	119
<b>Tablo 7.23.</b> Young modülü için Anova tablosu .....	120
<b>Tablo 7.24.</b> Young modülü için elde edilen matematiksel model özeti .....	122
<b>Tablo 7.25.</b> Optimum Young modülü için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı .....	124

<b>Tablo 7.26.</b> Pişme küçülmesi özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu .....	125
<b>Tablo 7.27.</b> Pişme küçülmesi için Anova tablosu .....	126
<b>Tablo 7.28.</b> Pişme küçülmesi için elde edilen matematiksel model özeti.....	128
<b>Tablo 7.29.</b> Optimum pişme küçülmesi için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı...	130
<b>Tablo 7.30.</b> Pişme küçülmesi özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu .....	131
<b>Tablo 7.31.</b> Isıl genleşme için Anova tablosu .....	132
<b>Tablo 7.32.</b> Isıl genleşme katsayısı için elde edilen matematiksel model özeti.....	134
<b>Tablo 7.33.</b> Pyroplastik indeksinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu .....	136
<b>Tablo 7.34.</b> PI için Anova tablosu.....	137
<b>Tablo 7.35.</b> PI için elde edilen matematiksel model özeti .....	139
<b>Tablo 7.36.</b> Optimum PI için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı .....	141
<b>Tablo 7.37.</b> Camsı faz viskozitesinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu .....	141
<b>Tablo 7.38.</b> Camsı faz viskozitesi için Anova tablosu .....	142
<b>Tablo 7.39.</b> Camsı faz viskozitesi için elde edilen matematiksel model özeti.....	144
<b>Tablo 7.40.</b> Optimum camsı faz viskozitesi için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı .....	146
<b>Tablo 7.41.</b> Doğrulama reçetelerin içeriği .....	165
<b>Tablo 7.42.</b> Doğrulama reçetelerin oksit oranları .....	165
<b>Tablo 7.43.</b> Doğrulama setinin teknik özellikler için deneysel sonuçları ve regresyon modellerinden elde edilen %95 güven düzeyindeki aralık tahminleri .....	166
<b>Tablo 7.44.</b> Doğrulama setinin elastik modülleri için deneysel sonuçları ve regresyon modellerinden elde edilen %95 güven düzeyindeki aralık tahminleri .....	167
<b>Tablo 7.45.</b> Doğrulama setinin fleksimetre sonuçları için deneysel sonuçları ve regresyon modellerinden elde edilen %95 güven düzeyindeki aralık tahminleri .....	167
<b>Tablo 7.46.</b> Yoğunluk-Su emme denklemine ait varyans analizi .....	169
<b>Tablo 7.47.</b> Yoğunluk-Mukavemet denklemine ait varyans analizi .....	170

<b>Tablo 7.48.</b> Yoğunluk-Young modülü denklemine ait varyans analizi .....	171
<b>Tablo 7.49.</b> Su emme-Mukavemet denklemine ait varyans analizi .....	172
<b>Tablo 7.50.</b> Su emme-Young modülü denklemine ait uygunluk değerleri .....	173
<b>Tablo 7.51.</b> Su emme-Young modülü denklemine ait varyans analizi .....	174
<b>Tablo 7.52.</b> Mukavemet-Young modülü denklemine ait varyans analizi .....	175
<b>Tablo 7.53.</b> E-PI denklemine ait varyans analizi .....	176



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 4.1. SiO <sub>2</sub> -Na-Feldispat-K-Feldispat sistemine ait denge diyagramı [75] .....	30
Şekil 4.2. Kil numunelerine ait mineralojik analiz sonucu.....	33
Şekil 4.3. Kaolen numunesine ait mineralojik analiz sonucu.....	34
Şekil 4.4. Sodyum-Feldispat numunelerine ait mineralojik analiz sonucu .....	34
Şekil 4.5. Potasyum-Feldispat numunesine ait mineralojik analiz sonucu.....	35
Şekil 4.6. Silis kumu numunesine ait mineralojik analiz sonucu .....	35
Şekil 4.7. Manyezit numunesine ait mineralojik analiz sonucu .....	36
Şekil 4.8. İstanbul kiline ait TG-DTA analiz sonucu .....	37
Şekil 4.9. Ukrayna kiline ait TG-DTA analiz sonucu .....	37
Şekil 4.10. Afyon kiline ait TG-DTA analiz sonucu.....	37
Şekil 4.11. Kaolen numunesine ait TG-DTA analiz sonucu .....	38
Şekil 4.12. Na-feldispat numunesine ait TG-DTA analiz sonucu .....	38
Şekil 4.13. Flote numunesine ait TG-DTA analiz sonucu.....	38
Şekil 4.14. K-feldispat numunesine ait TG-DTA analiz sonucu.....	39
Şekil 4.15. Silis numunesine ait TG-DTA analiz sonucu.....	39
Şekil 4.16. Manyezit numunesine ait TG-DTA analiz sonucu.....	39
Şekil 4.17. Kaolen'in termogravimetrik eğrileri .....	50
Şekil 4.18. Dikit'in termogravimetrik eğrileri.....	51
Şekil 4.19. Fireclay'in termogravimetrik eğrileri.....	52
Şekil 4.20. Manyezitin termogravimetrik eğrileri .....	53
Şekil 4.21. Dolomitin termogravimetrik eğrileri .....	54
Şekil 4.22. Çalışmalarda kullanılan fırın (ısıtma ve soğutma) rejimi.....	56
Şekil 4.23. Hazırlanan reçetelerin tane boyut dağılımı .....	56
Şekil 6.1. a)A-1 ve b) A-2 kodlu reçetelere ait XRD desenleri .....	64
Şekil 6.2. a)A-3 ve b) A-4 kodlu reçetelere ait XRD desenleri .....	65
Şekil 6.3. a)A-5 ve b) A-6 kodlu reçetelere ait XRD desenleri .....	65
Şekil 6.4. a)A-7 ve b) A-8 kodlu reçetelere ait XRD desenleri .....	65
Şekil 6.5. Kuvars tanesinin şematik görünümü ve EDX analizi .....	68
Şekil 6.6. Albit mineralinin şematik görünümü ve EDX analizi.....	69
Şekil 6.7. Anortit fazının şematik görünümü ve EDX analizi.....	69
Şekil 6.8. Müllit fazının şematik görünümü ve alan EDX analizi.....	69

<b>Şekil 6.9.</b> Müllit fazının şematik görünümü ve nokta EDX analizi .....	70
<b>Şekil 6.10.</b> A1-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	71
<b>Şekil 6.11.</b> A1-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	71
<b>Şekil 6.12.</b> A2-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	72
<b>Şekil 6.13.</b> A2-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	72
<b>Şekil 6.14.</b> A3-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	73
<b>Şekil 6.15.</b> A3-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	73
<b>Şekil 6.16.</b> A4-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	74
<b>Şekil 6.17.</b> A4-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	74
<b>Şekil 6.18.</b> A5-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	75
<b>Şekil 6.19.</b> A5-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	75
<b>Şekil 6.20.</b> A6-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	76
<b>Şekil 6.21.</b> A6-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	76
<b>Şekil 6.22.</b> A7-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	77
<b>Şekil 6.23.</b> A7-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	77
<b>Şekil 6.24.</b> A8-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	78
<b>Şekil 6.25.</b> A8-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) <b>a)</b> 1 KX, <b>b)</b> 2 KX, c)5 KX ve <b>d)</b> 8 KX görüntüleri.....	78

<b>Şekil 7.1.</b> Yoğunluğa ait <b>a)</b> toplam veri seti <b>b)</b> kategorik değişkenli normallik testi.....	80
<b>Şekil 7.2.</b> Su emmeye ait <b>a)</b> toplam veri seti <b>b)</b> kategorik değişkenli normallik testi .....	80
<b>Şekil 7.3.</b> Pişme mukavemetine ait <b>a)</b> toplam veri seti <b>b)</b> kategorik değişkenli normallik testi .....	80
<b>Şekil 7.4.</b> Toplam pişme küçülmesine ait <b>a)</b> toplam veri seti <b>b)</b> kategorik değişkenli normallik testi.....	81
<b>Şekil 7.5.</b> Poisson oranına ait <b>a)</b> toplam veri seti <b>b)</b> kategorik değişkenli normallik testi.....	81
<b>Şekil 7.6.</b> Young modülüne ait <b>a)</b> toplam veri seti <b>b)</b> kategorik değişkenli normallik testi .....	81
<b>Şekil 7.7.</b> 500 °C'deki ısı genleşme katsayısına ait <b>a)</b> toplam veri seti <b>b)</b> kategorik değişkenli normallik testi.....	82
<b>Şekil 7.8.</b> Fleximetre sonuçlarına ait <b>a)</b> Pyroplastik deformasyon indeksi <b>b)</b> camsı faz viskozite normallik testi .....	82
<b>Şekil 7.9.</b> Yoğunluk özelliğinde aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi.....	87
<b>Şekil 7.10</b> Su emme özelliğinde aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi.....	87
<b>Şekil 7.11</b> Pişme küçülmesi özelliğinde aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi.....	87
<b>Şekil 7.12</b> Poisson oranında aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi .....	88
<b>Şekil 7.13</b> Young modülü özelliğinde aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi.....	88
<b>Şekil 7.14</b> Pyroplastik indeksinde aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi.....	88
<b>Şekil 7.15.</b> Yoğunluk için pasta grafiği .....	95
<b>Şekil 7.16.</b> Yoğunluk için artık değerlerin <b>a)</b> normal, <b>b)</b> uygun değer, <b>c)</b> histogram ve <b>d)</b> gözlem sırası grafikleri .....	96
<b>Şekil 7.17.</b> Yoğunluk için <b>a)</b> etkilerin standartlaştırılmış normal grafiği ve <b>b)</b> Pareto grafiği.....	97
<b>Şekil 7.18.</b> Deney sonuçlarına göre, yoğunluk için ana faktörlerin etki grafikleri.....	98

<b>Şekil 7.19.</b> Deney sonuçlarına göre, yoğunluk için etkileşim grafikleri .....	99
<b>Şekil 7.20.</b> Maksimum yoğunluk için optimum tahmin grafiği .....	100
<b>Şekil 7.21.</b> Su emme için pasta grafiği .....	102
<b>Şekil 7.22.</b> Su emme için artık değer <b>a)</b> normal, <b>b)</b> uygun değer, <b>c)</b> histogram ve <b>d)</b> gözlem sırası grafikleri .....	103
<b>Şekil 7.23.</b> Su emme için <b>a)</b> etkilerin standartlaştırılmış normal grafiği ve <b>b)</b> Pareto grafiği.....	104
<b>Şekil 7.24.</b> Deney sonuçlarına göre, su emme için ana faktörlerin etki grafikleri .....	105
<b>Şekil 7.25.</b> Deney sonuçlarına göre, su emme için etkileşim grafikleri .....	106
<b>Şekil 7.26.</b> Minimum su emme için optimum tahmin grafiği .....	106
<b>Şekil 7.27.</b> Pişme mukavemeti için pasta grafiği.....	109
<b>Şekil 7.28.</b> Pişme mukavemeti için artık değer <b>a)</b> normal, <b>b)</b> uygun değer, <b>c)</b> histogram ve <b>d)</b> gözlem sırası grafikler .....	109
<b>Şekil 7.29.</b> Pişme mukavemeti için <b>a)</b> etkilerin standartlaştırılmış normal grafiği ve <b>b)</b> Pareto grafiği .....	110
<b>Şekil 7.30.</b> Deney sonuçlarına göre, pişme mukavemeti için ana faktörlerin etki grafikleri.....	111
<b>Şekil 7.31.</b> Deney sonuçlarına göre, pişme mukavemeti için etkileşim grafikleri .....	112
<b>Şekil 7.32.</b> Maksimum mukavemet için optimum tahmin grafiği .....	112
<b>Şekil 7.33.</b> Poisson oranı için pasta grafiği .....	115
<b>Şekil 7.34.</b> Poisson oranı için artık değer <b>a)</b> normal, <b>b)</b> uygun değer, <b>c)</b> histogram ve <b>d)</b> gözlem sırası grafikleri .....	115
<b>Şekil 7.35.</b> Poisson oranı için <b>a)</b> Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve <b>b)</b> Pareto grafiği.....	116
<b>Şekil 7.36.</b> Deney sonuçlarına göre, Poisson oranı için ana etki grafikleri .....	117
<b>Şekil 7.37.</b> Deney sonuçlarına göre, Poisson oranı için etkileşim grafikleri.....	118
<b>Şekil 7.38.</b> Maksimum Poisson oranı için optimum tahmin grafiği.....	118
<b>Şekil 7.39.</b> Young modülü için pasta grafiği .....	121
<b>Şekil 7.40.</b> Young modülü için artık değer <b>a)</b> normal, <b>b)</b> uygun değer, <b>c)</b> histogram ve <b>d)</b> gözlem sırası grafikleri .....	121
<b>Şekil 7.41.</b> Young modülü için <b>a)</b> Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve <b>b)</b> Pareto grafiği.....	122
<b>Şekil 7.42.</b> Deney sonuçlarına göre, Young modülü için ana etki grafikleri .....	123

<b>Şekil 7.43.</b> Deney sonuçlarına göre, Young modülü için etkileşim grafikleri .....	123
<b>Şekil 7.44.</b> Maksimum Young modülü için optimum tahmin grafiği .....	124
<b>Şekil 7.45.</b> Pişme küçülmesi için pasta grafiği .....	126
<b>Şekil 7.46.</b> Pişme küçülmesi için artık değer <b>a)</b> normal, <b>b)</b> uygun değer, <b>c)</b> histogram ve <b>d)</b> gözlem sırası grafikleri .....	127
<b>Şekil 7.47.</b> Pişme küçülmesi için <b>a)</b> Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve <b>b)</b> Pareto grafiği .....	127
<b>Şekil 7.48.</b> Deney sonuçlarına göre, pişme küçülmesi için ana etki grafikleri.....	128
<b>Şekil 7.49.</b> Deney sonuçlarına göre, pişme küçülmesi için etkileşim grafikleri .....	129
<b>Şekil 7.50.</b> Minimum pişme küçülmesi için çoklu yanıt tahmini ve model tahmin aralığı .....	130
<b>Şekil 7.51.</b> Pişme küçülmesi için pasta grafiği .....	132
<b>Şekil 7.52.</b> Isıl genişleme katsayısı için artık değer <b>a)</b> normal, <b>b)</b> uygun değer, <b>c)</b> histogram ve <b>d)</b> gözlem sırası grafikleri .....	133
<b>Şekil 7.53.</b> Isıl genişleme katsayısı için <b>a)</b> Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve <b>b)</b> Pareto grafiği.....	133
<b>Şekil 7.54.</b> Deney sonuçlarına göre, ısıl genişleme katsayısı için ana etki grafikleri....	134
<b>Şekil 7.55.</b> Deney sonuçlarına göre, ısıl genişleme katsayısı için etkileşim grafikleri.....	135
<b>Şekil 7.56.</b> PI için Pasta grafiği .....	137
<b>Şekil 7.57.</b> PI için artık değer <b>a)</b> normal, <b>b)</b> uygun değer, <b>c)</b> histogram ve <b>d)</b> gözlem sırası grafikleri .....	138
<b>Şekil 7.58.</b> PI için <b>a)</b> Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve <b>b)</b> Pareto grafiği.....	138
<b>Şekil 7.59.</b> Deney sonuçlarına göre, PI için ana etki grafikleri .....	139
<b>Şekil 7.60.</b> Deney sonuçlarına göre, PI için etkileşim grafikleri .....	140
<b>Şekil 7.61.</b> Minimum pyroplastik deformasyon için optimum tahmin grafiği.....	140
<b>Şekil 7.62.</b> Camsı faz viskozitesi için pasta grafiği .....	142
<b>Şekil 7.63.</b> Camsı faz viskozitesi için artık değer <b>a)</b> normal, <b>b)</b> uygun değer, <b>c)</b> histogram ve <b>d)</b> gözlem sırası grafikleri .....	143
<b>Şekil 7.64.</b> Camsı faz viskozitesi için <b>a)</b> Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve <b>b)</b> Pareto grafiği.....	143
<b>Şekil 7.65.</b> Deney sonuçlarına göre, camsı faz viskozitesi için ana etki grafikleri .....	144

<b>Şekil 7.66.</b> Deney sonuçlarına göre, camsı faz viskozitesi için etkileşim grafikleri ....	145
<b>Şekil 7.67.</b> Maksimum camsı faz viskozitesi için optimum tahmin grafiği .....	146
<b>Şekil 7.68.</b> Sürekli değişkenlere karşı yoğunluğun .....	147
<b>Şekil 7.69.</b> Yoğunluk için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği.....	148
<b>Şekil 7.70.</b> Sürekli değişkenlere karşı su emme özelliğinin normallik testi.....	149
<b>Şekil 7.71.</b> Su emme için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği.....	150
<b>Şekil 7.72.</b> Sürekli değişkenlere karşı pişme mukavemetin normallik testi.....	151
<b>Şekil 7.73.</b> Pişme mukavemeti için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği .....	152
<b>Şekil 7.74.</b> Sürekli değişkenlere karşı Poisson oranının normallik testi .....	153
<b>Şekil 7.75.</b> Poisson oranı için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği.....	154
<b>Şekil 7.76.</b> Sürekli değişkenlere karşı Young modülünün normallik testi .....	155
<b>Şekil 7.77.</b> Young modülü için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği .....	156
<b>Şekil 7.78.</b> Sürekli değişkenlere karşı pişme küçülmesi özelliğinin normallik testi ....	157
<b>Şekil 7.79.</b> Pişme küçülmesi için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği .....	158
<b>Şekil 7.80.</b> Sürekli değişkenlere karşı ısıl genleşme katsayısının normallik testi .....	159
<b>Şekil 7.81.</b> Isıl genleşme katsayısı için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği .....	160
<b>Şekil 7.82.</b> Sürekli değişkenlere karşı Pyroplastik deformasyon indeksinin normallik testi .....	161
<b>Şekil 7.83.</b> Pyroplastik deformasyon indeksi için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği .....	162
<b>Şekil 7.84.</b> Sürekli değişkenlere karşı camsı faz viskozite değerinin normallik testi ..	163
<b>Şekil 7.85.</b> Camsı faz viskozite değeri için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği .....	164
<b>Şekil 7.86.</b> Yoğunluk ile su emme arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu .....	169

<b>Şekil 7.87</b> Yoğunluk ile Mukavemet arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu.....	170
<b>Şekil 7.88.</b> Yoğunluk ile Young modülü arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu.....	171
<b>Şekil 7.89.</b> Su emme ile Mukavemet arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu.....	172
<b>Şekil 7.90.</b> Su emme ile Young modülü arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu.....	173
<b>Şekil 7.91.</b> Su emme ile Pişme küçülmesi arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu .....	174
<b>Şekil 7.92.</b> Mukavemet ile Young modülü arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu .....	175
<b>Şekil 7.93.</b> Camsı faz viskozitesi (E) ile Pyroplastik deformasyon indeksi (PI) arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu .....	176
<b>Şekil 7.94.</b> Porselen karoların seçilen yanıtlarında kontrol edilen değişkenlerin optimum durumu.....	178
<b>Şekil 7.95.</b> Porselen karoların seçilen yanıtlarında kontrol edilen değişkenlerin target değerleri ile optimum durumu .....	179

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\alpha$	: Alpha (Isıl genleşme katsayısı, Hipotez testlerinde I. Tür hata)
$\beta$	: Beta (Hipotez testlerinde II. Tür hata)
XRF	: X-ray Fluorescence (X-ışını Floresansı)
XRD	: X-ray Diffraction (X-ışını Kırınımı)
DTA	: Differential Thermal Analysis (Diferansiyel Termal Analizi)
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDX	: Energy Dispersive X-ray (Enerji Dağılım X-ışını)
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
DOE	: Design of Experiments (Deney Tasarımı)
D	: Composite Desirability (Bileşik İstenirliği)
PI	: Pyroplastik (deformasyon) İndeksi
E	: Camı Faz Viskozitesi
$H_0$	: Null Hypothesis (Sıfır Hipotezi)
$H_1$	: Alternative Hypothesis (alternatif Hipotez)

## 1. GİRİŞ

Seramik kaplama malzemeleri ve özellikle porselen karolar, yüksek eğilme dayanıklılığı, yüksek aşınma direnci, son derece düşük gözeneklilik, yüksek mekanik dayanıklılık ve neredeyse sıfır (<0,5%) açık gözeneklilik gibi olağanüstü özelliklere sahip seramik yapı malzemeleridir [1-3]. Bu özellikler sayesinde porselen karolar teknik ve estetik açıdan üstün özellikleri taşımaktadır. Bu üstün özellikler nedeniyle son on yılda bu ürünün küresel üretiminde diğer seramik kaplama malzemeleri türlerine göre büyüme oranı artmıştır. Günümüzde porselen karoların dikkate değer özellikleri ve performansları nedeniyle kullanımı sadece kaplama malzemeleri ile sınırlı kalmayıp, elektrik elektronik endüstrisi, dekoratif malzemeler, tıp ve dişçilik alanlarında geleneksel kullanımlarının çok ötesine geçmektedir [4-6].

Porselenler genellikle kil (kaolinit, montmorillonit, illit, klorit), feldspat (alkali ve plajiyoklaz feldspatlar) ve kuvars mineralleri ile birlikte kompozisyonu ayarlaması açısından karbonatlar bileşenlerden oluşur. Isıl işlem sonrası, son mikroyapı olarak camsı (esas olarak feldspat içeren bileşenlerden oluşur) ve kristalin fazlar (mullit, kuvars ve feldspatın artık fazları olarak) karışımını oluştururlar [1], [7-9]. Seramik kaplama malzemelerinde farklı hammaddeler farklı amaçlara hizmet etmektedir: kil mineralleri ham bünyeye plastisite ve mekanik dayanıklılık sağlar ve mullit oluşumunu destekler. Feldspat mineralleri cam fazı oluşumunu geliştirerek sinterleme sürecine yardımcı olur, bu da nihai porozite oranlarının düşmesine ve yoğunlaşmanın artmasına yol açar. En iri parçacık boyutuna sahip olan kuvars mineralleri ise pişirme sırasında bir iskelet ağı oluşturur ve termal ve boyutsal stabiliteyi korur [2-3], [7]. Seramik kaplama malzemelerinin sinterleme döngüsü genellikle çok kısa (hızlı pişirme) olup ürünlerin boyutlarına (boyut ve kalınlık) bağlı olarak 1180-1220 °C'de 40-70 dakika aralığında değişir [2-3], [10].

Geleneksel seramik (silikat tabanlı) endüstrisinde ürünün özellikleri ve kalitesi birçok giriş değişkenine bağlıdır. Hammadde, süreç ve ısıl işlem parametreleri arasında ayırım yapılırsa, bu özellikleri etkileyen en önemli parametreler ham bünye kompozisyonu, parçacık boyutu ve/veya parçacık boyutu dağılımı, granül nem içeriği (oranı), presleme yöntemi ve presleme parametreleri ve sinterleme döngüsü (maksimum sıcaklık, ısınma ve soğutma hızları vb.) olarak özetlenebilir Porselen karoların farklı özellikleri ve kalitesi üzerinde bu parametrelerin etkilerini inceleyen çok zengin bir

literatür bulunmaktadır, ancak farklı parametrelerin etkilerini porselen karoların son özellikleri üzerine modelleme konusunda yapılan çalışmalar nispeten kısıtlıdır [8-22]. Bunun temel nedeni ise farklı parametreler arasındaki karmaşık etkileşimdir.

Hammadde yataklarındaki değişimler ve farklı tedarikçilerden sağlanan hammaddelerin özelliklerinin değişimleri üretim süreçlerini doğrudan etkilemekte ve seramik ürün kompozisyonlarında sürekli bir yenilik gerektirmektedir. Firmalarda hali hazırda kendi girdi ve çıktılarını kontrol etmek amacıyla geliştirilmiş rasyonel analiz gibi programlar bulunmaktadır. Ancak bu tür programlar üretim düzeni oturmuş firmalarda, kendi ürünlerine has ve girdi kontrolü bazlı çalışır. Özellikle yeni kurulan küçük firmalarda ve/veya yeni formülasyonlara sahip yeni ürünler geliştirmek isteyen firmalar için kullanabilecekleri herhangi efektif bir model bulunmamaktadır.

Yeni hammadde kompozisyonları ile istenen özellikleri kısa sürede sağlamak sektörde rekabet yaratmaktadır. Bu rekabette önde olmak üretim parametrelerinin kontrolü ile sağlanmaktadır. Seramik süreçleri iyileştirme çalışmaları mevcut süreçlerde bulunan parametrelerin fazlalığı nedeniyle çoğu zaman anlaşılabilir değildir. Deneme yanılma ile yapılan iyileştirme süreçleri bugün rekabetçiliğin önündeki en büyük engel olarak gözükmektedir. Her bir deneme işgücü, doğal kaynaklar ve zaman kaybı olarak işletmelere geri dönmektedir. Geleneksel yöntemler ile istenilen özelliklerde ürün elde etmek uzun süreler gerektirmektedir. Zamanın ruhunu yakalamak için teknolojinin ve bilişsel dillerin kullanılarak hâlihazırda sektörde eksik olan programların hazırlanması verimlilik açısından zorunlu hale gelmektedir. Seramik ürünlerin farklı yönlerini temsil etmek için farklı yöntemler ve yaklaşımlar ele alınmıştır. Bunlar, termokinetik simülasyonla sinterleme süreci [19], [20], sayısal/matematiksel yaklaşımlar [21]–[27], sonlu eleman analizi [28], [29], istatistiksel yaklaşımlar [12], [30], Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Simülasyonu [31] ve veriye dayalı yaklaşımlar veya yapay sinir ağı (ANN) modellemesi [32]–[36] olarak sıralanabilir. Ancak çoğu araştırmada ham maddeler ve son özellikler arasındaki ilişkiyi belirlemek için yapılan simülasyon/modelleme yaklaşımlarında, tipik hammadde ve/veya mineralojik oranları bünye formülasyonunda ele alınırken kimyasal (oksit) içeriğin etkisini göz ardı edilmiştir.

Bu çalışmada, porselen karolar için Seger formülasyonundan yola çıkarak ve tam faktöriyel tasarım yöntemi kullanılarak ham madde, sinterleme sıcaklığı ve nihai özellikler arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Seramik kaplama malzemeleri

bağlamında sadece tipik ham maddelere dayalı bir model geliştirmenin yanıltıcı olabileceği kabul edilmelidir. Çünkü bu tip malzemeler çeşitli ham maddelerden oluşur ve bileşimleri ham maddenin doğasına ve özel ocağa bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, tipik ham maddelere dayalı bir model oluşturmak, nihai ürünü doğru bir şekilde temsil etmeyebilir ve nihai özellikler ve ürün performansı ile ilgili yanlış varsayımlara yol açabilir. Seger formülasyonunu kullanarak ve yalnızca tipik ham maddelere değil, ana değişkenlere odaklanan deneysel bir model oluşturarak, nihai ürünün özellikleri ve performansı hakkında daha kapsamlı bir anlayış elde edilebilir. Bu yaklaşım, üretim veya araştırma süreçlerinde daha kesin ve optimize edilmiş sonuçlara olanak sağlar. Ayrıca, ana değişkenlere vurgu yaparak, gereksiz veya yabancı faktörlerin test edilmesiyle değerli zaman, enerji ve kaynaklar korunabilir.

Bu çalışmanın temel amacı, seramik bünyelerin formülasyonunda Seger formülasyonunun kullanılmasının geçerliliğini ve gerekliliğini ortaya koymaktır. Ayrıca, bu çalışma her faktörün (değişkenlerin) ve etkileşimlerinin çeşitli özellikler üzerindeki ana etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Başka bir hedef, belirlenen ana değişkenlere dayalı olarak her özellik için deneysel modeller önermektir. Sonuç olarak, bu çalışma, porselen karoların istenen özelliklerini elde etmek için kontrol edilen değişkenlerin optimal koşullarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu hedeflere ulaşarak, formülasyon faktörleri, özellikler ve optimal koşullar arasındaki ilişkilerin daha kapsamlı bir anlayışı elde edilebilir ve bu da yüksek kaliteli seramik kaplama malzemelerinin üretimini kolaylaştırır.

Belirtilen hedeflere ulaşmak için, dört ana faktörden ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}/\text{CaO}$  ve sıcaklık) yola çıkarak kapsamlı bir tam faktöriyel tasarım hazırlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda bu faktörlerin belirlenen özellikler üzerinde etkileri regresyon modelleri eşliğinde belirlenmiş ve literatüre kazandırılmıştır.

## **2. SERAMİK KAPLAMA MALZEMELERİ**

Seramik kaplama malzemeleri, genel olarak duvar karoları, yer karoları ve porselen karolar olmak üzere üç farklı ürün sınıfına ayrılmaktadır. Duvar karoları, 1120-1150°C arasında yüksek poroziteye ve %10-20 arasında su emme değerine sahip seramik karolardır. Yer karoları ise daha yüksek sıcaklık olan 1180-1190°C'de 30-45 dakika boyunca pişirilir. Yer karolarının su emme değeri %3'ün altındadır. Porselen karolar, düşük su emme ve yüksek mukavemet değerleri ile diğer kaplama malzemelerinden ayrılır. Porselen karoların su emme değeri %0,5'in altında olup, sırlı veya sırsız olarak yüzey dekorasyonu yapılabilir. Aynı zamanda beyaz veya başlangıç kompozisyonlarına renk pigmentleri eklenerek renkli porselen karolar da üretilebilir. Düşük su emme ve yüksek vitrifiye yapısı nedeniyle porselen karolar, yer karolarına kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda (1180-1220°C) ve daha uzun sürelerde (40-70 dakika) üretilir. Porselen karolar, düşük poroziteli kaplama malzemeleri olarak mükemmel mekanik, kimyasal ve dona dayanım özelliklerine sahiptir. Porselen karoların teknik özelliklerine ek olarak estetik görünümünde yapılan geliştirmeler, seramik karo sektöründe porselen karoların önemli bir rol oynamasını sağlamıştır [37].

### **2.1. Seramik Hammaddeleri**

Seramik hammaddeleri iki grupta sınıflandırılır: özlü (plastik) ve özsüz (plastik olmayan) seramik hammaddeler.

Özlü seramik hammaddeler su ile yoğrulabilir ve kolaylıkla şekillendirilebilir. Kurduklarında verilen şekli koruyabilirler. Plastik seramik hammaddelerin plastisite veya plastiklik özelliği, içerdikleri kil mineralleri ve kil olmayan maddelerin miktarına, kil minerallerinin türüne, kil minerallerinin tane boyutuna ve kristallenme derecesine, iyon değiştirme kapasitesine, değişebilir iyonların cinsine, tuz ve organik madde miktarına bağlı olarak değişir [38].

Özsüz seramik hammaddeler ise su ile karıştırıldıklarında kolayca şekil verilemezler. Şekil verilse bile dış etkilerle şekillerini kaybedip dağılırlar. Bu grupta yer alan hammaddeler arasında kuvars, feldispatlar, kireçtaşı, magnezit ve dolomit gibi maddeler bulunur [38].

#### **2.1.1. Kil ve kaolenler**

Killer, seramik üretiminde plastisite kazandırmak ve nemi kontrol etmek amacıyla kullanılır. Kil mineralleri, pismiş seramik ürünün rengine ve özelliklerine katkıda

bulunur. Kaolen, beyaz bir kil mineralidir ve doğal olarak saf ve beyaz renge sahiptir. Kil kristallerinden daha büyük olan kaolen kristalleri, killerden daha az plastiktir ve daha yüksek kuru mukavemet sağlar. Kaolenin saflığı ve kristal büyüklüğü, yüksek sıcaklık dayanıklılığını artırırken, killeri daha hızlı sinterleşir. Kil minerallerinin tabakalı yapısı, diğer seramik tozlarından farklılık gösterir. Bu tabakalı yapı, kil-su sistemlerinin plastisitesini sağlar. Killerin plastisitesi, su miktarıyla belirlenir ve su kaybedildikçe sertleşir ve kırılganlık artar. Kil, ince taneli bir ikincil mineraldir ve genellikle 2µ'den daha küçük boyutlarda bulunur. Kil, feldispatların parçalanması ve ayrışmasıyla oluşur. Bu kompleks alümina silikatlar, aşınma ve hidroliz süreciyle değişime uğrarlar. Kilin plastik ve koloidal özelliği seramik kaplama malzemeleri için aşağıdaki avantajları beraberine getirir [37-38]:

- Yapıya (Özellikle ham bünyeye) dayanıklılık sağlar
- Şekil verme kolaylığı sağlar
- Verilen şeklin korunmasını sağlar
- Özellikle sırlama işlemi sırasında bünyenin su emme özelliği kazandırır.

### **2.1.2. Ergiticiler**

Feldispatlar, seramik üretim sektöründe kil minerallerinden sonra en önemli hammadde olarak kullanılır. Ergitme özellikleri sayesinde sinterleme sıcaklığını düşüren feldispatlar, farklı seramik bileşimlerinde farklı oranlarda kullanılır. Bünyenin sinterlenme derecesini kontrol etmek için kullanılan feldispatın türü ve miktarı önemlidir. Seramik reçetelerinde ergitme maddeleri, sıvı faz oluşumunu sağlayarak sıcaklığın düşürülmesine yardımcı olur. Kil, feldispat ve kuvars içeren tipik seramik reçetesinde feldispat, sıvılaşıp camsı bir faz oluşturur. Kil ve kuvarsı ıslatarak taneleri birleştirir ve bünyenin sinterlenmesini sağlar. Feldispatların ergitme özelliğini etkileyen faktörler arasında bileşim, silika içeriği, alkali oksitlerin oranı bulunur. Sodyum feldispat (Na-feldispat) ve potasyum feldispat (K-feldispat) en yaygın kullanılan feldispat türleridir. K-feldispatın ergitme özelliği daha düşüktür, ancak vitrifikasyon aralığını genişletmesi nedeniyle tercih edilir. Feldispatların sinterlenme sıcaklığı, feldispat türüne bağlı olarak ötektik veya peritektik sıcaklıkta oluşur. Pegmatitler, potasyum feldispatı sahip olan kuvars-feldispat karışımlarıdır ve seramik endüstrisi için uygun hammadde kaynağıdır. Nefelin syenit ise silis açısından fakir bir magmatik kayadır ve seramik endüstrisi için yüksek ergime gücüne ve dar ergime aralığına sahip bir alternatiftir [37].

### 2.1.3. Dolgu hammaddeleri

Seramik bünyelerde, plastik ve ergitici özelliklere sahip hammaddelerin yanı sıra bünyenin yüksek sıcaklıklarda stabil kalmasını sağlayacak plastik olmayan dolgu maddesine ihtiyaç duyulur. Bu iskelet görevini kuvars, bünyede doğrudan eklenen veya kil ve feldispattan gelen bir bileşen olarak üstlenir. Kuvars, bünyenin en büyük partikül boyutlu kısmını oluşturur. Geniş tane boyutu, kurutma sürecinde çatlaklara karşı direnç sağlar, pyroplastik deformasyonu engelleyerek iskelet yapısı oluşturur ve sinterlenme sırasında deformasyon olmadan gaz çıkışına izin verir. Aynı zamanda plastisiteyi düzenlemeye yardımcı olur, bünyenin kuru çekme özelliklerini azaltarak ısıl genişlemesini kontrol eder ve eriyiğin yüksek sıcaklıklarda viskozitesini düzenler. Kuvarsın kararsız formu olan  $\beta$ -kuvars, oda sıcaklığında bulunur. 573 °C'ye kadar ısıtıldığında  $\alpha$ -kuvars oluşur. Bu dönüşüm geri dönüşümlüdür ve kuvars hacimce büyür. Yavaş bir şekilde soğutma yapıldığında,  $\alpha$ -kuvars sırasıyla  $\alpha$ -tridimit ve  $\alpha$ -kristobalite dönüşür. Bu dönüşüm serisi 1713 °C'de erimeyle son bulur.

Bünyenin oluşumunda kuvarsın tane boyutu büyük önem taşımaktadır. Sinterlenme sürecinde kuvarsın bir kısmı camsı faz içinde çözünürken, bazı kuvars partikülleri çözünmeden (kalıntı kuvars olarak) bünyede kalır. Soğutma aşamasında  $\alpha \rightarrow \beta$  kuvars dönüşümünden kaynaklanan çatlakların sebebi, kalıntı kuvarsın varlığıdır. Soğutma sürecinde kuvars dönüşümünde, kuvars partiküllerinin hacmi %1,6 oranında azalır. Bu durum, kuvars taneleri ile camsı matris arasında yeterli gerilmelerin oluşmasına ve çevresel çatlakların ortaya çıkmasına yol açabilir. Çatlak yoğunluğu, kuvars partikül boyutu ve soğutma hızıyla belirlenir [37-38].

## 2.2. Kaplama Malzemeleri Üretim Süreci

Kaplama malzemelerinde bünye üretimi, çamur hazırlama, granül hazırlama, şekillendirme, kurutma, pişirme ve kalite kontrol aşamalarını içermektedir.

### 2.2.1. Çamur hazırlama (öğütme)

Hammaddelerin tane boyutunu azaltmak için yapılan işleme öğütme denir. Öğütme, yüzey alanını artırarak homojenlik sağlar ve pişirme sırasında daha hızlı reaksiyon gerçekleştirilmesini sağlar. Değirmeler, hammaddeleri öğütmek için kullanılan silindirik yapıya sahip cihazlardır. Bilyalı değirmenlerde, hammaddeler ve öğütücü ortam olan bilyeler arasında öğütme gerçekleşir. Değirmenin iç kısmı, öğütme bölgesine ayrılan

plakalar veya spirallerle düzenlenmiştir ve aşınmaya dayanıklı kauçuk ile kaplanmıştır [39-40].

Öğütme işlemi tamamlandıktan sonra, renklendirme için bazı bünyelerde yüksek konsantrasyonlu pigment içeren süspansiyonlar hazırlanır. Değirmen çıkışında çamur elenir ve daha ince elek serisi ile malzeme sınıflandırılır. Öğütme işlemi, çamurun reolojisi, üretim davranışı, sinterleme davranışı ve mikroyapı gelişimi üzerinde önemli etkiye sahiptir [39].

Harman hazırlama sürecinde, yaş ve kuru yöntem olmak üzere iki farklı metot kullanılabilir. Yaş yöntem, harman hazırlamak için daha yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, porselen karosunun bünyesini hazırlamak için reçeteye uygun olarak hammaddeler, %36-40 su ve %0,2-0,6 elektrolitler yardımıyla bilyalı değirmenlerde farklı öğütme süreleriyle hazırlanan çamur öğütülür [38].

Değirmen hızı, öğütme verimliliği için önemli bir parametredir. En uygun değer, bilyelerin yatayla yaptığı açının 45 ile 60 derece arasında olmasıdır. Bilye boyutu ve yoğunluğu da öğütme verimliliğini etkilemektedir. Değirmenin yüklenmesi, öğütme süresini belirler ve genellikle değirmenin yarısı dolana kadar öğütme süresi azalır. Su içeriği ve yoğunluk parametresi de değirmenin verimliliğini etkileyen önemli diğer faktörlerdir [37],[39].

Özetle, öğütme işlemi hammaddelerin tane boyutunu azaltmak, homojenlik sağlamak ve pişme sürecini hızlandırmak amacıyla kullanılır. Bilyalı değirmenler bu işlemde sıkça kullanılan araçlardır ve değirmenin hızı, yüklenme miktarı, su içeriği ve bilye boyutu gibi faktörler verimlilik üzerinde etkili faktörlerdir.

### **2.2.2. Granül hazırlama**

Öğütme sonucu elde edilen çamur, püskürtmeli kurutucu kullanılarak granül haline getirilir. Püskürtmeli kurutucu, kapalı bir koni şeklinde tasarlanmış ve bünye çamuru ile sıcak hava arasında hızlı bir ısı alışverişi sağlar. Karışık akışlı püskürtmeli kurutucu, seramik sektöründe en yaygın olarak kullanılan tiptir. Bu kurutucularda, ısıtılmış hava üst taraftan aşağı doğru verilirken çamur alt taraftan nozullar yardımıyla yukarı doğru püskürtülür. Bu tasarım, çamurun daha homojen bir şekilde kurumasını sağlar [40-41].

Çamur, yüksek basınçla kurutma odasına püskürtülerek 500-600 °C sıcaklıktaki havayla temas eder. Damlacıkların yüksek yüzey alanı, türbülanslı hareket ve çamur ile

hava arasındaki sıcaklık farkı, suyun hızla buharlaşmasına neden olur. Sonuç olarak, presleme için uygun nem miktarı (%5-6,5) ve tane boyut dağılımına sahip yuvarlak granüller oluşur. Bu işlem sırasında Damlacık boyutu arttıkça içerdiği su miktarı da artar. Bu durum, granüllerin fazla nemli olmasına yol açar. Granül büyüklüğü, nem oranının artmasıyla artarken kurutma sıcaklığının artmasıyla azalır [40-41].

Püskürtmeli kurutucularla üretilen yoğun ve yuvarlak granüller, çamurun yüksek katı yüzdesine sahip olması beklenir. Granüllerin homojenliği ve akış kabiliyeti için küre şeklinde olmaları tercih edilir, ancak tam küre şeklinde tanelerin oluşma olasılığı düşüktür ve çoğu zaman granüllerin üzerinde gözenekler bulunabilir [39].

Kurutma sıcaklığı, kurutucu tasarımı ve ürün fiziksel ve ısıl özellikleri ile ilişkilidir. Hızlı kurutma, buhar kabarcıklarının oluşmasına ve aglomerelerin büyümesine neden olabilir. Damlacık fazla nemliyken duvarlara temas etmesi durumunda kabuk oluşturabilir, bu da kurutucunun verimini düşürebilir. Son olarak, püskürtmeli kurutucudan çıkan granüller silolarda dinlendirilir. Bu işlem sonucu granüllerin nem oranı ve sıcaklığı daha homojen hale getirilir [39-41].

### **2.2.3. Şekillendirme**

Hidrolik preslerle kuru presleme, seramik karo şekillendirme sürecinde en yaygın kullanılan yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemde, granüller kalıp içinde mekanik olarak sıkıştırılarak düzgün geometriye seramikler üretilir. Presleme işlemi, pişirme sırasında ortaya çıkabilecek "siyah leke" veya gaz çıkışı gibi sorunlarla uyumlu bir şekilde en yüksek yoğunluğa ulaşmayı hedefler. Uygulanan basınç genellikle 350-450 kg/cm<sup>2</sup> arasında olup, bu basınç karodaki organik maddelerin yanmasına ve gaz çıkışının homojen bir şekilde sağlanmasına olanak tanımak için karo kalınlığının dikkate alınması gerekliliğiyle ilişkilidir. Standart presleme basınçlarıyla elde edilen preslenmiş karo yoğunluğu genellikle 1.95-2.00 g/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir [37-40]. Daha büyük karo boyutları için, kütleli yoğunluk farklarını telafi etmek amacıyla daha yüksek basınçlar gerekebilir.

Pres kalıbına yüklenen tozların homojenliği ise diğer önemli bir faktördür. Optimum dolun sağlanabilmesi için pres kalıplarında sürgü ızgara kullanılmakta olup, bu cihazlar kalıp boşluğunu doldurma değişimlerini sınırlayarak yüzey hatalarını azaltmayı ve boyutsal değişimleri kontrol altında tutmayı sağlamaktadır [40-41].

Tozların iyi bir şekilde paketlenmesi ve sıkıştırılması, yüksek yoğunluklu karo yapısını elde etmek ve küçülme ile gözenekliliği azaltmak açısından önem taşımaktadır [40-41]. Araştırmalar, bu süreçte izostatik kalıpların kullanılmasının geometrik hataları azaltmada etkili olduğunu göstermiştir [37-41].

#### **2.2.4. Kurutma**

Seramik üretiminde kurutma işlemi, pişirme öncesinde büyük bir öneme sahiptir. Kurutma, şekillendirme sırasında malzemeden suyun uzaklaştırılıp kurutulması sürecini ifade eder. Su, çamurdan uzaklaşırken kuruma sürecinde ters bir yol izler. İlk olarak yüzeyde kuruma başlar ve gözeneklerden gelen su buharlaşarak uzaklaşır. Ancak hızlı bir kuruma, içerideki suyun geçişini engelleyerek gerilim ve deformasyona neden olabilir. Kurutma sürecinde, çevredeki ısı enerjisi seramik karo üzerine geçerken, su ise çevreye doğru hareket eder. Isı enerjisi, konveksiyon, radyasyon ve temas yoluyla iletilir, ancak en etkili olanı konveksiyonla sıcak hava transferidir. Kurutma hızı, suyun kapiler difüzyonuyla karonun içinden yüzeye doğru hareketine bağlıdır. Kurutma sıcaklığı genellikle 110-120 °C arasında tutulur ve kurutma sonrası nem içeriği %0,5'in altında olmalıdır. Seramik endüstrisinde kullanılan kurutucular genellikle sıcak gazlar aracılığıyla konveksiyon veya gazlar ve kurutucu duvarları aracılığıyla radyasyonla ısı transferi sağlar. Kurutma süresi ve yöntemi, karo boyutu ve kalınlığına bağlı olarak değişebilir ve dikey veya yatay kurutucular tercih edilebilir [37-38].

#### **2.2.5. Pişirme (sinterleme)**

Seramik karoların üretiminde hızlı pişirme yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, karolar kısa süreli yüksek sıcaklıkta (~1200 °C) hızlı bir şekilde sinterlenir, ardından hızlı soğutma ve kısa süreli bekleme işlemleri uygulanır. Karoların mikroyapısı, müllit, kuvars ve feldispat gibi bileşenlerden oluşur. Feldispat, sıvı faz kaynağı olarak işlev görerek kil ve kuvars ile reaksiyona girer ve oluşan camsı faz, sinterleme hızını kontrol eden bir akışkanlık sağlar. Pişirme sürecinde, porselen bünyede kimyasal reaksiyonlar meydana gelir ve bu reaksiyonlar, kullanılan hammaddelerin türü, mineral konsantrasyonu ve sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır [38].

Pişirme sürecinde, kil bileşenlerinin reaktivitesi, feldspatlardan oluşan camsı fazın kompozisyonu ve camsı faz miktarı, porselen karoların optimum sinterleme koşullarını belirler. Pişirme sürecinde, kilin yapısı, camsı akışla başlayan ve yoğun yapıya kadar devam eden karmaşık bozunma reaksiyonunu kontrol etmek için kullanılan ısı enerjisiyle

yönetilir. Bu reaksiyonlar, porselen karoların hammaddelerinin türü, mineral konsantrasyonu, sıcaklık ve diğer faktörlere bağlı olarak gerçekleşir. Kilin yapısal dönüşümü, sinterleme sürecindeki porselen karoların mikroyapısını ve mekanik özelliklerini belirleyen önemli bir faktördür. Diğer faktörler arasında çamurun öğütülmesi, preslenmiş karo yoğunluğu ve pişirme sıcaklığı ve süresi de yer alır [37].

Günümüzde, porselen karoların hızlı pişirme fırınlarında üretimi yaygınlaşmıştır. Bu fırınlar, farklı bölgelere ayrılmaktadır. Ön bölge, kurutma işlemini gerçekleştirir ve fazla suyun uzaklaştırılmasını sağlar. Ön ısıtma bölgesi, sıran ergime sürecinin başladığı ve gazın atıldığı bir bölümdür. Ateş bölgesinde ise karo sinterlenir ve sır vitrifikasyonu tamamlanır. Hızlı soğutma bölgesi, karonun hızlı bir şekilde soğutulduğu kritik bir bölgedir. Yavaş soğutma bölgesinde ise kuvarsın hassas hal dönüşümü gerçekleşir [37].

Sonuç olarak, porselen karoların üretimi için hızlı pişirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde, sıcaklık, sinterleme süresi, soğutma hızı ve bekleme süreleri gibi faktörler dikkate alınarak karoların kalitesi ve boyutsal kararlılığı sağlanır. Gelişmiş fırın teknolojileri, üreticilere daha iyi kontrol imkânı sunar ve pişirim sürecini optimize eder.

#### **2.2.6. Kalite kontrol**

Karolarda kalite kontrol veya kalite ayırımı, üretim sürecinde elde edilen karoların belirli bir kalite standardına göre sınıflandırılması ve gruplara ayrılmasıdır. Kalite ayırımı genellikle aşağıdaki faktörlere dayanarak yapılır:

- *Boyut ve Geometri:* Karoların düzgünlüğü, kenar kesimi, kalınlık ve boyut tutarlılığı gibi geometrik özellikleri değerlendirilir.
- *Renk ve Desen:* Karoların renk tutarlılığı, desenin düzgünlüğü ve homojenliği gibi estetik özellikleri değerlendirilir.
- *Yüzey Kalitesi:* Karoların pürüzsüzlüğü, çizilmelere dayanıklılık, parlaklık gibi yüzey özellikleri değerlendirilir.
- *Dayanıklılık ve Mukavemet:* Karoların fiziksel dayanıklılığı, aşınma direnci, kırılmaya karşı dayanıklılık gibi mekanik özellikleri değerlendirilir.

Kalite ayırımı genellikle görsel inceleme ve kalite kontrol testleri ile yapılır. Bu süreçte, belirlenen kalite standartlarına göre karolar değerlendirilir ve uygun gruplara ayrılır. Bu şekilde, müşterilere kalite açısından farklı seçenekler sunulur ve şirketin kalite imajı korunur.

### 2.3. Seger Formülasyonu ve Seger Oranlarının Sinterleme Üzerine Etkisi

Geleneksel seramik malzemelerinde, camsı faz kompozisyonlarının karşılaştırılması için UMF (Unity-Molecular Formula) ve Seger formül yaklaşımları kullanılmaktadır. UMF yaklaşımı, cam bileşenlerinin ( $R_2O$ ,  $RO$ ,  $R_2O_3$ ,  $RO_2$ ) konsantrasyonlarını belirli standartlarla ifade etmektedir.  $R_2O$  ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Li_2O$ ) ve  $RO$  ( $MgO$ ,  $CaO$ ,  $SrO$ ,  $BaO$ ,  $ZnO$ ,  $PbO$ ) bileşenleri ergitici olarak kabul edilmekte,  $R_2O_3$   $Al_2O_3$ 'ü,  $RO_2$  ise  $SiO_2$ 'yi temsil etmektedir.  $TiO_2$  ve  $Fe_2O_3$  gibi bileşenler genellikle düşük konsantrasyonlarından dolayı ihmal edilmektedir. UMF yaklaşımı, tüm bileşenleri molar olarak dönüştürerek, ergiticileri ( $R_2O$  ve  $RO$ ) toplayarak ve harman ergitici molarlarına çevirerek kullanılmaktadır. Bu nedenle  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$  seviyeleri, ergiticiye olan mol oranına bağlı olarak ifade edilmektedir [42].

#### 2.3.1. $SiO_2/Al_2O_3$ oranının sinterleme üzerine etkisi

Alümina ( $Al_2O_3$ ) miktarının artması,  $SiO_2$  miktarının artışına bağlı olarak camların yumuşama sıcaklığını ve akışkanlığını artırır. Silikat ve alüminasilikat camların akışkanlığı, bağ yapısıyla yakından ilişkilidir ve bu bağ yapısı, özellikle tetrahedral koordinasyonlu katyonların varlığından etkilenir. Silikat yapılarında Si-O bağ uzunluğu yaklaşık olarak 1.60 Å iken, alüminasilikat yapılarında  $AlO_4$  tetrahedralarındaki Al-O bağ uzunluğu yaklaşık olarak 1.71 Å'dir [43].

$Al^{+3}$  iyonlarının miktarının artması, bağ uzunluklarının artmasına ve bağ kuvvetinin azalmasına neden olur. Bu durum, camın akışkanlığını artırır.  $Al^{+3}$  ve  $Si^{+4}$  iyonlarının yer değiştirmesiyle ortaya çıkan yük dengesizliği, alkali veya toprak alkali iyonlarla denge sağlanır. Ayrıca, bu iyonlar, köprü oluşturmeyen oksijenlerle bağ kurarak silika yapısında kırılmalar oluşturur ve camın akışkanlığını azaltır [44].

$Al_2O_3$  miktarının artması, camdaki ağ düzenleyici iyonların yük dengesini sağlamak için kullanılmasını gerektirir. Ağ düzenleyici iyon sayısının azalması, camın akışkanlığını artırır. Ancak  $Al_2O_3$  miktarı belirli bir noktadan sonra daha fazla artarsa, ağ düzenleyici iyonların etkisi azalır.  $Al_2O_3$  miktarının meta-alümina veya peralkalin yapıda olduğu durumlarda, cam sistemine farklı etkiler yapar. Meta-alümina sistemlerinde, sabit alkali miktarında artan  $Al/(Al+Si)$  oranıyla aktivasyon enerjisinin azaldığı gözlenir. Bu durum,  $Al^{+3}$  miktarının artmasıyla viskoz akışın kolaylaşmasına yol açar. Meta-alümina yapılarında,  $Al^{+3}$  ve  $Si^{+4}$  iyonlarının yük dengesini dengeleyebilecek kadar iyon bulunduğu için  $Al_2O_3$  miktarının artması veya azalması bağ kuvvetini etkiler [45-46].

Peralkalin sistemlerinde ise durum farklıdır. Al/(Al+Si) oranının artması parabolik bir etki gösterir, önce aktivasyon entalpisi düşer, daha sonra belirli bir seviyeden sonra tekrar artar. Bu düşüş, bağ kuvvetinin azalmasıyla ilişkilidir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının daha da artması durumunda, fazla katyonlar AlO<sub>4</sub> tetrahedralarına bağlanarak ağ düzenleyici etkileri azaltır, bu da aktivasyon enerjisi ve akışkanlığın artmasına neden olur [47-48].

Sabit alkali miktarı için bu değişiklikler gözlemlenirken, alkali miktarının değişimi meta-alüminadan peralkaliye veya per-alüminaya geçişi sağlayabilir. Toplam SiO<sub>2</sub> miktarı sabit olduğunda, alumina miktarının arttığı gözlenir. Meta-alümina bölgesinde, yüksek SiO<sub>2</sub> miktarına sahip camların akışkanlığı, düşük SiO<sub>2</sub> miktarına göre daha yüksektir. Meta-alümina kompozisyonundan per-alüminaya doğru ilerledikçe, akışkanlık hızla azalır [47-48].

### **2.3.2. Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O oranının sinterleme üzerine etkisi**

Geleneksel seramik matrislerinin mikroyapısı genellikle %65-80 cam, %1-25 müllit, %5-25 kuvars ve %6-8 gözeneklilik içerir. Bu seramikler, yüksek miktarda amorf faz içerdikleri için viskoz akış mekanizmasıyla sinterlenirler. Camlar genellikle düzenli bir kristal yapısına sahip olmadığından amorf olarak tanımlanır [49].

Viskoz akış sinterlemesinde sinterleme hızı, amorf fazın akışkansızlığına ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Shen ve Gren [50], tarafından yapılan bir çalışmada, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O oranının camsı fazın fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, K<sub>2</sub>O ilavesiyle cam geçiş sıcaklık değeri (T<sub>g</sub>) azalmaya başlar. En düşük T<sub>g</sub> değeri, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O mol oranının 2,52 olduğu durumda elde edilir. Farklı Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O oranlarıyla yapılan çalışmalarda da cam fazın oluşmaya başladığı sıcaklık değerlerinin değiştiği gözlenmiştir.

Seramik karolarda oluşan camsı faz, silikat yapısına sahiptir. Silikatlar iyonik karakterli yapılar olup, oksijenin farklı boyutlarda ve yükteki katyonlarla bağ yapmasıyla oluşurlar. Oksijen, silikat yapılarının temel bileşenidir. Katyonların oksijen iyonları arasındaki boşluklara yerleşmesi, silikat yapılarının tanımlanmasında önemli bir faktördür. Daha küçük atom yarıçapına sahip katyonlar, oksijenle daha kolay bağ oluştururlar. Silika yapısında, Si<sup>+4</sup> iyonu oksijenle tetrahedral yapıda bağ yapar. Düşük basınç altında, 1,60 Å olan SiO<sub>4</sub> tetrahedraları optimum koordinasyona ulaşırken, yüksek basınç altında SiO<sub>6</sub> oktahedraları oluşur [44].

Silikat yapılarının bağlanma şekilleri, bileşime bağlıdır. Alkali oksitler (örneğin  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ), köprü oluşturmeyen oksijenlerle bağ kurarak silika yapısında kırılmalar oluştururlar. Bu durum, silikat yapının akışkansızlığında bir düşüşe neden olur. Alkali oksitlerin varlığı, bağ kuvvetlerini etkileyerek silikat camların akış özelliklerini değiştirir.  $\text{Na}_2\text{O}$  içeren silikat sistemlerin akışkansızlığı,  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  sisteminden daha düşüktür [43-44].

Sonuç olarak, silikat camların viskoz akışını etkileyen faktörler arasında cam geçiş sıcaklığı, alkali oksitlerin miktarı ve bileşimdeki bağlanma şekilleri yer almaktadır.

### **2.3.3. MgO/CaO oranının sinterleme üzerine etkisi**

Toprak alkali oksitler ve alkali oksitler, ağ düzenleyici rolü üstlenir ve bağ kurmak için köprü oluşturmeyen oksijen ile etkileşime girerler. Bu özellikleri nedeniyle, toprak alkali oksitler cam oluşumunda önemli bir rol oynarlar. Ancak alkali oksitlerle karşılaştırıldığında, toprak alkali oksitlerin akışkansızlık üzerindeki etkileri daha az belirgindir [43,51].

Akışkansızlığı azaltma etkileri sıralandığında,  $\text{MgO} < \text{CaO} < \text{K}_2\text{O} < \text{Na}_2\text{O} < \text{Li}_2\text{O}$  şeklinde bir sıralama yapılabilir. Atomik kütlesi daha yüksek olan toprak alkali oksitler, genel olarak akışkansızlığı daha fazla azaltır. Bu durum, cam kompozisyonuna bağlı olarak değişebilir, ancak genel olarak geçerlidir [47,52].

Kil içerikli seramik bünyelerde, alkali ve toprak alkali oksitlerin davranışları farklılık gösterebilir. Alkali oksitler genellikle 1000 °C civarında sıvı faz oluşumunu tetiklerken, toprak alkali oksitler daha yüksek sıcaklıklarda yeni bileşikler oluşturma eğilimindedir. Bu nedenle, toprak alkali oksitlerin cam oluşumunu sınırlayabileceği gözlemlenmiştir [53-54].

$\text{CaO}$ , geniş bir kompozisyon aralığında cam oluşumunu destekleyebilir ve kararlı birçok bileşik oluşturma yeteneğine sahiptir. Öte yandan,  $\text{MgO}$  daha düşük akışkansızlıkta daha fazla miktarda sıvı faz oluşturarak yoğunlaşma sıcaklıklarını düşürebilir [54].

Toprak alkali oksitler, yapıyı genişleterek akışkansızlığı azaltırlar.  $\text{MgO}$  veya  $\text{CaO}$  oksitinin fazla olduğu kompozisyonlarda, ilk sıvı oluşum sıcaklıkları daha düşüktür. Ancak karışık alkali ve toprak alkali etkisi gözlemlendiğinde, toprak alkali oksitlerin artışı yapıdaki kırılmaları artırır, ilk sıvı oluşum sıcaklığını ve akışkansızlığı düşürür. Bununla birlikte, toprak alkali oksitlerin daha fazla artması (alkali oksitlerin azalması),

daha güçlü bağlar oluşturan toprak alkali oksitlerin alkali oksitlerin yerini almasına ve bağ mukavemeti artan ağ yapısının akışkansızlığının artmasına neden olabilir [44].

Aktivasyon enerjisi, akışkansızlığı etkileyen önemli bir parametredir. CaO içeren sistemler, MgO içeren sistemlere göre daha düşük akışkansızlık sergiler. Alkali oksitler, toprak alkali oksitlere göre daha yüksek aktivasyon enerjilerine ve düşük enerjili durumlarına sahiptir [44].

Son olarak, CaO'nun bünye üzerinde olumsuz bir etkisi olabilir ve yoğunlaşma davranışlarını etkileyebilir. Bu nedenle, CaO içeren sistemlerde dikkatli bir şekilde kompozisyon ayarlaması yapılması önemlidir [37].

#### **2.4. Seramik Kaplama Malzemelerinin Modelleme Geçmişi**

Sektörde rekabet avantajı elde etmek için istenen özellikleri hızla sağlamak, yeni hammadde kompozisyonlarının kullanılmasını gerektirir. Üretim parametrelerinin kontrolü ile bu rekabet avantajı elde edilir. Bununla birlikte, seramik süreçlerinin iyileştirme çalışmaları, mevcut süreçlerde bulunan parametrelerin karmaşıklığı nedeniyle genellikle anlaşılmaz hale gelir. Deneme yanılma yöntemleriyle yapılan iyileştirme süreçleri, günümüzde rekabetin önündeki en büyük engel olarak kabul edilir. Her deneme, işgücü, doğal kaynaklar ve zaman kaybı şeklinde işletmelere geri dönmektedir. Geleneksel yöntemlerle istenen özelliklere sahip ürünlerin elde edilmesi uzun zaman alır. Bu nedenle, eksik olan programların hazırlanması için teknoloji ve bilişsel dillerin kullanılması, sektörde verimlilik açısından zorunlu hale gelmiştir. Bu anlamda seramik ürünlerin farklı yönlerini temsil etmek için çeşitli yöntemler ve yaklaşımlar benimsenmiştir. Bu yöntemler arasında termokinetik simülasyonla sinterleme süreci [19–20], sayısal/matematiksel yaklaşımlar [21–27], sonlu eleman analizi [28-29], istatistiksel yaklaşımlar [12], [30], Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Simülasyonu [31] ve veri tabanlı yaklaşımlar ve yapay sinir ağı (ANN) modellemesi [32–36] bulunmaktadır. Bununla birlikte, ham maddelerin ve son özelliklerin ilişkisini belirlemek için yapılan simülasyon/modelleme yaklaşımlarının çoğunda, bünye formülasyonunda tipik hammadde ve/veya mineralojik oranlara dikkat edilirken, kimyasal (oksit) içeriğin etkisi göz ardı edilmektedir.

#### **2.4.1. Termokinetik simülasyon yaklaşımı ile sinterleme sürecinin modellenmesi**

Seramik kaplama malzemelerinin sinterleme sürecinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlara dayalı olarak sadece teorik bir kinetik modelin geliştirilmesinin mümkün olmadığı farklı çalışmalar ile ortaya konulmuştur [19].

Bununla birlikte, saf kaolinitin ayrışmasıyla mullit oluşumunun kinetiğiyle ilgili bazı modeller mevcuttur. Gualtieri ve ekibi [55], yüksek sıcaklıklarda ve izotermal koşullarda kaolinit-müllit dönüşümündeki farklı reaksiyonları, termal analiz verilerini ve enerji dağıtıcı (toz) kırınım (EDD) yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Bu çalışmada, mullit çekirdeklenme ve büyüme kinetiği gibi konulara odaklanarak, bu reaksiyonlar için gereken aktivasyon enerjisi gibi kinetik yaklaşımlarla açıklamalar sunmuşlardır.

Katı fazın kısmen sıvı fazla reaksiyona girdiği durumlar için ise çok az sayıda model geliştirilmiştir. Bu modeller, genel olarak, gözenek boyutu ve büzülme varyasyonlarını dikkate alınmıştır. Bu modellerde kil bünyesinin toplam mikroyapısını modellemek için bazı geometrik varsayımlar ele alınmıştır. Bu nedenle, bu kinetik denklemlerin sonuçları, sinterleme hızı üzerinde sıcaklık ve bekletme süresi gibi kinetik parametrelerin etkisi açısından yaklaşık bir geçerlilik taşımaktadır [56-58].

Jazayeri ve ark. [19] tarafından yürütülen çalışmada, seramik kaplama malzemelerinin bekletme süresine bağlı olarak gözeneklilikte meydana gelen değişiklikleri açıklamak amacıyla Navier-Stokes denklemi kullanılarak bir kinetik model geliştirilmiştir. Bu model, malzemenin kompozisyonuna özgü sabit değerlerle desteklenmiş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Önceden belirtildiği gibi, seramik kaplama malzemelerinin süreç parametreleri karmaşık ve son özellikleri birçok değişkene bağlıdır. Bu nedenle, termokinetik yaklaşımlar genellikle bu süreçleri veya özellikleri genel bir model olarak değil, belirli bir özelliği temsil eden bir şekilde ele almaktadır ve bu yaklaşımların sonuçları genelde yaklaşık bir geçerlilik taşımaktadır.

#### **2.4.2. Sayısal ve matematiksel modellemeler**

Seramik kaplama malzemelerinin akademik çalışmaları genellikle üç farklı kategori altında incelenebilir. Bu kategoriler süreç parametrelerinin modellenmesi, malzeme davranışının sayısal analizi ve enerji verimliliği analizi modelleri şeklinde sıralanabilir.

- i. *Süreç Parametrelerinin Modellenmesi:* Bu çalışma kategorisi, seramik kaplama malzemelerinin süreçlerinde kullanılan parametrelerin matematiksel ve sayısal

modellerle analiz edilmesini içerir. Bu modeller, ısı işlem süreçleri, granülasyon ve şekillendirme parametreleri gibi farklı süreç parametrelerini içerebilir. Bu tür modeller, süreç parametrelerinin optimize edilmesi, ürün kalitesinin artırılmasına ve süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Süreç parametreleri çalışmaları kapsamında Cargnin ve ark. [21] lineer küçülme özelliği üzerinde sinterleme eğrisinin etkisini araştırarak bu ilişkili temsil edecek bir model geliştirmişler. Bir diğer çalışmada ise Cantore ve ark. [22], bir seramik fırınının 0D/1D modeli geliştirerek, fırın içindeki ısı transferi fenomenlerini tahmin etmeye odaklanmışlar. Elde edilen model, gaz türbininden çıkan ısının fırının ön-ısıtma bölümünde ısı alışverişini iyileştirmek gibi enerji verimliliğini artırma stratejilerini araştırmak için kullanılmıştır. Barbosa ve ark. [24] ise yaptıkları çalışmada, ara süreç değişkenleri (nem oranı, maksimum basınç ve pişirme sıcaklığı) ile ana süreç değişkenleri (ham yoğunluk, nihai yoğunluk, boyut ve kalınlık) arasındaki etkileri gösteren bir model önermişlerdir.

- ii. *Malzeme Davranışının Sayısal Analizi*: Bu çalışma kategorisi, genel olarak seramik kaplama malzemelerinin mekanik davranışının sayısal analizlerini içerir. Bu analizler, malzemenin dayanıklılığı, termal şok direnci, termal genleşme katsayısı, pyroplastik deformasyonu gibi faktörlerin değerlendirilmesini sağlar. Bu tür analizler, malzeme seçiminde, tasarım optimizasyonunda ve performans tahminlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmalar kapsamında Sanchez ve ark. [23], farklı parametrelerin porselen karolardaki kalıntı gerilme üzerindeki etkilerini inceleyerek, bünyedeki kalıntı gerilmeyi minimize etmek adına bir model önerisinde bulunmuşlar. Jiang ve ark. [25] yüksek gerilme hızlarında seramik malzemelerdeki basınçlı başarısızlık mekanizmalarını simüle etmek için üç boyutlu mikromekanik bir hesaplamalı çerçeve sunulmuştur. Optimal Taşıma Meshfree (OTM) ve Eigen-kırılma yöntemleri kullanılarak istatistiksel olarak eşdeğer bir polikristal yapı oluşturulmuştur. Hasarlı kristal elastisite modeli ile polikristal yapının dinamik tepkisi tahmin edilmiş, çatlak-mikroyapı etkileşimi ve mikro özellikler analiz edilmiştir. Hesaplamalı model, deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Mikroyapının basınçlı başarısızlık mekanizmaları üzerindeki etkisi ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiş ve sonuç olarak bir hesaplamalı model önerilmiştir.

iii. *Enerji Verimliliği Analizi Modelleri*: Bu alan, seramik kaplama süreçlerinin enerji tüketimi ve enerji verimliliği açısından değerlendirilmesini içerir. Bu modeller, üretim süreçlerinde kullanılan enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılmasını, enerji tasarrufu sağlayacak yöntemlerin belirlenmesini ve çevresel etkilerin azaltılmasını hedefler. Bu tür analizler, sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol almaktadır ve enerji verimliliği artırılarak kaynakların daha etkili kullanılmasını sağlamaktadır. Milani ve ark. [27], yaptıkları çalışmada sanayi tipi seramik karo üretiminde kullanılan bir endüstriyel döner fırının termal ve akışkan dinamik davranışının sayısal analizi gerçekleştirilmiş ve son nihai üründe oluşan mekanik gerilmelerin modellemiştir. Geliştirilen termomekanik model, farklı parametreleri ele alarak (enerji verimliliği, yakıt tüketimi, kirletici emisyonlar ve nihai ürünün kalitesi), fırın çıkışındaki ürünün deformasyon ve kalıntı gerilme özelliklerini tahmin etmeyi amaçlamıştır.

Bu çalışma kategorileri, seramik kaplama malzemeleriyle ilgili araştırmaların farklı yönlerini kapsamaktadır ve bu karmaşık yapıyı daha iyi anlaşılması ve bu malzemelerin daha verimli kullanılmasına yardımcı olmaktadır.

#### **2.4.3. Sonlu elemanlar analizi**

Sonlu elemanlar analizi, karmaşık yapıların veya sistemlerin davranışını matematiksel bir yöntemle incelemek ve öngörmek amacıyla kullanılan bir yapısal analiz yöntemidir. Bu yöntemde, yapı veya sistem belirli bir problem alanına sonlu sayıda elemana bölünür ve her bir elemanın davranışı ayrı ayrı matematiksel olarak modellenir. Her eleman için geçerli olan matematiksel denklemler oluşturulur ve bu denklemler bir araya getirilerek genel sistem denklemleri elde edilir. Bu denklemler, sayısal çözüm yöntemleri kullanılarak çözümlenerek, yapı veya sistemdeki deformasyon, gerilme, akışkan akışı gibi çeşitli özellikler belirlenebilir. Sonlu elemanlar analizi, mühendislik, malzeme bilimi, fizik ve diğer birçok akademik ve endüstriyel alanda kullanılan etkin bir analiz aracıdır.

Fragassa [28], yaptığı bir çalışmada seramik malzemelerin viskoelastik davranışını sonlu elemanlar analizi yöntemi ile modellemeyi amaçlamıştır. Bu çalışma ayrıca, sonlu elemanlar analizi yönteminin seramik malzemelerin viskoelastik davranışını modellemek için ne kadar etkili olduğu da değerlendirilmektedir. Bu yöntemin sağladığı analiz araçları ve özellikler, malzemenin viskoelastik davranışının doğru bir şekilde modellenmesi ve

anlaşılması için önemli bir rol oynadığını da vurgulamaktadır. Çalışmanın bir sonucu olarak, seramik malzemelerin viskoelastik davranışının modellenmesi için sonlu elemanlar analizinin etkinliğini ve kullanımını incelerken, sonlu elemanlar analizi aracılığı ile geliştirilen modellerin önemini vurgulamaktadır.

Sarbandi [29], ise başka bir çalışmada seramik malzemelerin sinterleme sürecindeki deformasyonunu sonlu elemanlar analizi ile incelemeyi amaçlamıştır. Çalışmada, seramiklerin sinterleme sırasında meydana gelen termal genleşme, yoğunlaşma ve şekil değiştirme gibi fenomenlerin etki kaynakları araştırılmıştır. Daha sonra, seramiklerin sinterleme sürecindeki davranışını anlamak için sonlu elemanlar analizini kullanarak yapılan simülasyonlar ve modellemeler tartışılmıştır. Bu çalışma bu tartışmaların bir sonucu olarak, sonlu elemanlar analizlerde, malzeme özelliklerinin yanı sıra sıcaklık profilleri (sinterleme rejimi, tepe sıcaklığı, ısıtma ve soğutma hızı vb.), deformasyon mekanizmaları ve yoğunluk profilleri gibi çeşitli parametreler dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu çalışmada, seramik malzemelerin sinterleme sürecindeki deformasyonunun nedenleri ve mekanizmaları incelenmekte ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bu deformasyonun nasıl tahmin edilebileceği üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, seramik malzemelerin sinterleme sürecindeki deformasyon davranışını anlamak, tasarım sürecini iyileştirmek ve nihai ürünün kalitesini artırmak için kullanılabilecek önemli bilgiler sunmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, seramik malzemelerin sinterleme sürecindeki deformasyonunu sonlu elemanlar analizi inceleyerek, sinterleme sürecinin kontrol edilmesi ve seramik ürünlerin şekil değiştirme davranışının öngörülmesi konusunda literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

#### **2.4.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Simülasyonu**

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonu, akışkanların (sıvılar, gazlar) hareketini matematiksel yöntemler kullanarak analiz etmek için bilgisayar tabanlı bir simülasyon tekniğidir. Bu yöntem, akışkanların hızı, basıncı, sıcaklığı ve diğer akış özelliklerini belirlemek için denklemlerin sayısal çözümünü kullanır.

CFD simülasyonu, karmaşık akışkan davranışlarını ve etkileşimlerini anlamak için kullanılır. Bir tasarım veya sürecin optimize edilmesi, performans tahmini, akışkan akışının görselleştirilmesi ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi gibi birçok alanda uygulanabilir. Bu simülasyon tekniği, bir akışkan alanını tanımlayan bir geometri modeli,

akışkanın fiziksel özelliklerini tanımlayan başlangıç ve sınır koşulları ve akışın etkileşimlerini tanımlayan denklem setleri kullanır. Bu denklemler, sürekli madde denklemi, hareket denklemi ve enerji denklemleri gibi akışkanların davranışını temsil eder. Bilgisayar algoritmaları, bu denklemleri sayısal olarak çözerek akışkanın davranışını zamana bağlı olarak simüle eder.

CFD simülasyonları, akışkanların hareketi, ısı transferi, karışma, dağılım, akışkan-yüzey etkileşimleri gibi birçok akışkan dinamiği olayını analiz edebilir. Sonuçlar, hız profilleri, basınç dağılımları, sıcaklık dağılımları, türbülans yapıları gibi akışkan özelliklerini görselleştirmek için kullanılabilir. CFD simülasyonu, mühendislik, havacılık, otomotiv, enerji, inşaat, çevre ve diğer birçok endüstriyel alanlarda kullanılan güçlü bir araçtır. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, daha karmaşık akışkan davranışlarının ve etkileşimlerinin modellenmesi mümkün hale gelmiştir. Bu sayede, tasarımların optimize edilmesi, performansın iyileştirilmesi ve maliyetlerin azaltılması gibi avantajlar elde edilebilir.

Liu ve ark. [31], yaptıkları bir çalışmada, seramiklerin sinterleme sürecinde simülasyon teknolojisinin kullanımını ele almaktadır. Bu çalışmada, sinterleme sürecinin analiz edilmesi ve optimize edilmesi için simülasyon tekniklerinin kullanılmasının önemi vurgulanmaktadır. Ayrıca gerçekleşen çalışmada farklı malzeme özellikleri, boyutlar, geometriler ve işlem parametrelerinin sinterleme sürecine etkilerini incelemek için yapılan simülasyon çalışmalarına da değinilmektedir. Bu çalışmalar, sinterleme sürecinin optimize edilmesi ve kalite kontrolünün sağlanması açısından önemli bilgiler sunar. Bu çalışma, simülasyon teknolojisinin seramik sinterleme sürecindeki potansiyel faydalarını vurgulamakta ve bu tekniklerin seramik endüstrisinde kullanımının önemini savunmaktadır.

#### **2.4.5. Veri tabanlı yaklaşımlar ve yapay sinir ağı (ANN) modellemesi**

Son yıllarda, seramik kaplama malzemelerinin modellemesinde veri tabanlı yaklaşımlar, yapay sinir ağları ve fuzzy algoritması gibi yöntemlerin kullanımı önemli bir popülerlik kazanmıştır. Bu teknikler, geniş veri tabanlarından yararlanarak malzeme özelliklerini ve performansını tahmin etme yetenekleriyle dikkat çekmektedir. Bu gelişmeler, seramik kaplama malzemelerinin tasarımı, üretimi ve kalite kontrolü gibi alanlarda daha etkili ve optimize edilmiş çözümler sunma potansiyeline sahiptir.

Veri tabanlı yaklaşımlar, mevcut veri setlerine dayalı olarak matematiksel modellerin oluşturulmasını sağlar. Bu yaklaşım, büyük miktarda veri kullanarak kompleks ilişkileri analiz etme yeteneğine sahiptir. Seramik kaplama malzemelerinin modellenmesinde, veri tabanlı yaklaşımlar, malzeme özelliklerini, boyutları, geometrileri ve işlem parametrelerini içeren geniş bir veri tabanı kullanarak karo davranışını tahmin edebilme kabiliyetine sahiptir. Bu, üretim süreçlerinin optimize edilmesi ve kalite kontrolünün sağlanması açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Yapay sinir ağları (ANNs), beyindeki sinir hücrelerinin çalışma prensiplerini taklit eden matematiksel modellerdir. ANNs, karmaşık veri setlerini analiz etme, örüntü tanıma ve tahminleme yetenekleriyle bilinir. Seramik karo modellenmesinde, ANNs, malzeme özelliklerini, işlem parametrelerini ve ürün performansını tahmin etmek için kullanılabilir. ANNs, karmaşık ilişkileri yakalama yetenekleri ve öğrenme kapasiteleri nedeniyle modelleme doğruluğunu artırabilir.

Fuzzy algoritması, belirsizlik içeren verilerle çalışmada etkili olan bir matematiksel yöntemdir. Fuzzy algoritması, karo modellenmesinde kullanıldığında, belirsizliklerle başa çıkabilme ve karar verme süreçlerinde kullanılabilir. Bu yaklaşım, özellikle karmaşık ve çok faktörlü karar verme süreçlerinde avantaj kazandırır. Seramik kaplama malzemeleri modellenmesinde fuzzy algoritması, malzeme seçimi, tasarım optimizasyonu ve kalite kontrolü gibi alanlarda kullanılabilir.

Ancak, veri tabanlı yaklaşımların dezavantajı, geniş ve temsilci bir veri tabanına ihtiyaç duymaları ve veri eksikliği veya yanlış veri durumunda doğruluklarının azalmasıdır. Yapay sinir ağları, eğitim sürecinin zaman alması ve aşırı uyum (overfitting) riski gibi dezavantajlara sahip olabilir. Fuzzy algoritması, hedeflenen performansın belirlenmesi ve bulanık kümelerin tanımlanması gibi zorluklarla karşılaşabilir.

Sonuç olarak, veri tabanlı yaklaşımlar, yapay sinir ağları ve fuzzy algoritması, seramik kaplama malzemeleri modellenmesinde kullanılan farklı tekniklerdir. Her biri avantajları ve dezavantajları olan bu teknikler, doğru veri setleri ve uygun parametre ayarlarıyla kullanıldığında, seramik malzemelerinin üretiminde kalite kontrolü, tasarım optimizasyonu ve süreç verimliliği gibi alanlarda önemli katkılar sağlayabilir.

Literatür araştırmasında bu kapsamda yapılan çalışmalarda, seramik endüstrisiyle ilgili çeşitli uygulamalarda yapay sinir ağı ve diğer ilgili tekniklerin kullanımını incelediği görülmektedir. Her bir çalışma, farklı bir odak noktasıyla, seramik üretim sürecinde

verimlilik, kalite kontrol, kusur tahmini ve malzeme optimizasyonu gibi önemli konuları ele almaktadır. Bu çalışmalar, seramik sektöründe yenilikçi çözümler sunmak ve süreçleri iyileştirmek için veri tabanlı ve yapay zeka tabanlı tekniklerin potansiyelini göstermektedir.

Andrade ve Eduardo [32], yaptıkları çalışmada, termal görüntüler ve yapay sinir ağı kullanarak pişmiş seramik fayansların iç kusurlarının otomatik olarak tespit edilmesi için bir metodoloji geliştirmeyi amaçlamışlardır. İncelemelerde, termal görüntüleme teknikleri ve yapay sinir ağları arasındaki ilişki incelenerek, seramik karolardaki iç hataların doğru bir şekilde tanımlanması için bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Sonuçlar, geliştirilen yöntemin seramik karo üretim sürecinde iç hataların otomatik olarak tespiti için etkili bir araç olduğunu göstermektedir.

Vieira ve ark. [33] ise, yapay sinir ağları ve nöro-fuzzy sistemlerin gerçek sistemlerin modellenmesi ve kontrolü için kullanılabilirlikleri karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışma, yapay sinir ağları ve nöro-fuzzy sistemlerin matematiksel modelleme ve gerçek zamanlı kontroldeki avantajlarını ve dezavantajlarını araştırmaktadır. Farklı uygulama alanlarından örneklerle, her iki yöntemin de gerçek sistemlerin modellenmesi ve kontrol edilmesinde etkili olduğu ve performans açısından farklı avantajlara sahip olduğu gösterilmektedir.

Kumru [34], yaptığı araştırma, seramik endüstrisinde kalıplama işlemi sırasında minimum hatalı üretimi sağlamak için yapay sinir ağları ve arama yöntemlerinin kullanılmasını ele almıştır. Çalışmada, yapay sinir ağlarını kalıp tasarımı ve süreç parametrelerinin optimize edilmesi için kullanmıştır. Elde edilen sonuçlar, yapay sinir ağlarının seramik endüstrisinde kalıplama işleminde hatasız üretim hedefine ulaşmak için etkili bir araç olduğunu göstermektedir.

Benzer bir çalışmada Muhammed [35], seramik karo üretiminde yapay sinir ağı kullanarak hata tahmininin uygulanmasını ele almıştır. Araştırmada, yapay sinir ağı modeli, üretim sürecindeki farklı parametrelerin ve girdilerin kullanılarak seramik fayanslardaki kusurların tahmin edilmesi için eğitilmiştir. Sonuçlar, yapay sinir ağı modelinin seramik fayans üretiminde kusur tahmininde başarılı olduğunu ve kalite kontrol sürecinde önemli bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Elevado ve ark. [36] yaptıkları çalışmada, atık seramik karoları ve uçucu külün betonla karıştırılması için yapay sinir ağı modellemesini ele almıştır. Yapay sinir ağı

modeli, betonda kullanılan malzemelerin oranlarının ve özelliklerinin yanı sıra betonun mukavemet özelliklerini tahmin etmek için eğitilmiştir. Araştırma, atık seramik karolarının ve uçucu külün kullanımının çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlı olduğunu ve yapay sinir ağı modellemesinin bu tür beton karışımlarının optimize edilmesine yardımcı olabileceğini göstermektedir.

#### **2.4.6. İstatistiksel yaklaşımlar**

İstatistiksel deneysel tasarım, veri madenciliği alanında güçlü bir araç olarak kabul edilir ve çeşitli araştırma alanlarında potansiyel uygulamalara sahiptir. Bu yöntem, uygun verilerin toplanması ve istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek geçerli ve objektif sonuçlara ulaşılmasını sağlayan bir simülasyonun siyah kutusu olarak nitelendirilebilir. İstatistiksel deneysel tasarım genellikle matematiksel denklemlere veya modellere dayanır ve incelenen faktörlerin sonuçlarına odaklanır.

Tam Faktöriyel Tasarım, Kısmi Faktöriyel Tasarım, Genel Tam Faktöriyel Tasarım, Karışım Tasarımı, Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM) ve Taguchi Tasarımı gibi yaygın olarak kullanılan çeşitli deney tasarımı yöntemleri bulunmaktadır. Doğru deneysel tasarımın seçimi, araştırmanın hedeflerine ve deneysel verilerin elde edilebilirliğine, incelenen faktörlerin veya değişkenlerin ve hedeflenen çıktılarının veya yanıtlarının belirlenmesine bağlıdır.

Her bir deneysel tasarım, model uygunluğu kontrolü, varyans analizi (ANOVA), ana etki ve etkileşim grafikleri, regresyon analizi, kontur ve yüzey grafikleri ve tasarım optimizasyonu gibi tipik istatistiksel yöntemleri içerir. Bu yöntemler, elde edilen verilerin analizini sağlar ve deneysel sonuçların değerlendirilmesine ve yorumlanmasına yardımcı olur.

Bu alanda yapılan çalışmalar, seramik kaplama malzemelerinin üretim süreçlerinin iyileştirilmesi, malzeme optimizasyonu, renklendirme sorunlarının analizi ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi gibi konularda istatistiksel analizlerin önemini vurgulamaktadır.

Montorsi ve ark. [59], yaptıkları çalışmada seramik karoların mürekkep püskürtmeli baskı teknolojisinde renk kalitesinin iyileştirilmesi ve hataların azaltılması üzerine bir Deneysel Tasarım çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, farklı faktörlerin (mürekkep formülasyonu, baskı hızı, baskı kalınlığı vb.) karoların renk kalitesi ve hatalar üzerindeki etkisi istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Correia ve ark. [60], kurutulmuş üç eksenli seramik kaplama malzemelerin eğilme dayanımını modellemek için istatistiksel teknikler kullanılmıştır. Bu çalışmada, farklı malzeme bileşenlerinin (kil, feldispat, kuvars vb.) eğilme dayanımı üzerindeki etkisi istatistiksel olarak analiz edilmiş ve bir model geliştirilmiştir.



### 3. DENEY TASARIMI

Bu çalışmada porselen karosu için  $2^4$  tam faktörlü deney tasarımı yöntemi ile 4 (3 oksit oranı ve sıcaklık) ana faktör etkisi ve faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimleri iki tekrar yapılacak şekilde tasarlanmıştır.

$2^4$  tam faktöriyel deney tasarımı, dört faktörün her birinin iki düzeyde incelendiği bir deney tasarımı yöntemidir. Bu tasarım, faktörlerin etkilerini ayrı ayrı değerlendirmek ve faktörler arasındaki etkileşimleri analiz etmek amacıyla kullanılır [67].

$2^4$  tam faktöriyel deney tasarımında, her bir faktör 2 düzeyde değerlendirildiğinde, toplamda 16 deney kombinasyonu elde edilir. Bu tasarım, her faktörün etkisi ve faktörler arasındaki etkileşimlerin analiz edilmesi için tüm kombinasyonlarda deneylerin gerçekleştirilmesini gerektirir [67,68].

$2^4$  tam faktöriyel deney tasarımının avantajları arasında faktörlerin etkilerinin ayrı ayrı ve etkileşimlerinin değerlendirilebilmesi, düşük deney sayısı ve maliyeti, kolay ve hızlı analiz yapılabilmesi, elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güvenilir ve geçerli olması sayılabilir [69].

Ancak, bu tasarımın bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle faktörlerin daha fazla düzeyinin olduğu durumlarda uygulanabilirlik sınırlı olabilir. Ayrıca, etkileşimlerin tam olarak anlaşılması ve yorumlanması zor olabilir. Bunun yanı sıra, deneysel faktörlerin gerçek hayattaki karmaşıklığı tam olarak yansıtamama riski bulunmaktadır [69].

Sonuç olarak,  $2^4$  tam faktöriyel deney tasarımı, faktörlerin etkilerinin ve etkileşimlerinin analiz edilmesi için kullanışlı bir yöntemdir. Ancak, uygulanabilirlik ve yorumlama zorlukları gibi bazı sınırlamaları da dikkate alınmalıdır.

#### 3.1. Deney Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Bir deneyin tasarımı ve analizinde istatistiksel yaklaşımı kullanabilmek için, deneye katılan herkesin, deneyin amacının ve içeriğinin tam olarak ne olduğunu anlaması ve sonuçların nasıl toplandığını bilmeleri gerekmektedir. Ayrıca, en azından sonuçların nasıl analiz edileceği konusunda nitel bir anlayışa sahip olmaları da önemlidir.

Deney tasarımında dikkat edilmesi hususlar ve adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir [67-69]:

- i. *Problemin durumu ve fark edilmesi:* Problemin net bir şekilde tanımlanması ve fark edilmesi önemlidir. Deney hakkında fikirlerin olgunlaştırılması ve ilgili bilgilerin toplanması gereklidir.
- ii. *Faktörlerin, düzeylerin ve aralıkların seçilmesi:* Deneyi etkileyebilecek faktörlerin belirlenmesi ve bunların düzeylerinin ve aralıklarının seçilmesi önemlidir.
- iii. *Yanıt değişkeninin seçilmesi:* İncelenen süreç hakkında gerekli bilgiyi sağlayacak bir yanıt değişkeninin seçilmesi gerekmektedir.
- iv. *Deney tasarımının seçilmesi:* Deney tasarımının doğru şekilde seçilmesi, örnek büyüklüğünün belirlenmesi, deneylerin sırasının planlanması gibi adımları içermektedir.
- v. *Deneylerin yapılması:* Deneyin gerçekleştirilmesi sürecinde rassallaştırma, ölçüm doğruluğu ve değişmez deney koşullarının sağlanması önemlidir.
- vi. *Verilerin istatistiksel analizi:* Elde edilen verilerin istatistiksel metotlarla analiz edilmesi gerekmektedir. Bu analizler, hipotez testleri, güven aralığı tahminleri ve deney tasarımından elde edilen verilerin ilişkilerini gösteren eşitlikler gibi yöntemleri içermektedir.
- vii. *Sonuçlar ve öneriler:* Verilerin analiz edilmesi sonucunda elde edilen bulgulara dayanarak sonuçlar çıkarılmalı ve önerilerde bulunulmalıdır.

Ayrıca, hipotez testleri kullanılarak örneklenen kitle hakkında varsayımlarda bulunulabilir ve faktöriyel tasarım gibi çok faktörlü deneyler etkili bir şekilde kullanılabilir. Faktöriyel tasarımlar, faktörlerin bütün kombinasyonlarının araştırıldığı deneylerdir ve faktörler arasındaki etkileşimleri incelemeye olanak sağlar.

### **3.2. Hipotez Testleri**

Hipotez testleri, istatistiksel analizde kullanılan bir yöntem olarak bilinir ve örneklem verileriyle bir hipotez hakkında çıkarımlar yapmayı hedefler. Bu testler, bir hipotezin istatistiksel olarak doğruluğunu veya yanlışlığını değerlendirerek sonuçlar elde etmeyi sağlar.

Hipotez testlerinin genellikle izlediği adımlar şunlardır [68]:

- i. *Hipotezlerin formülasyonu:* İlk aşamada, araştırmacılar bir hipotez belirler. Bu hipotez genellikle bir iddia veya varsayıma dayanır ve test edilmek

istenen bir durumu ifade eder. İki temel hipotez türü vardır: "nul hipotez veya sıfır hipotezi" ( $H_0$ ) ve "alternatif hipotez" ( $H_1$  veya  $H_a$ ).

- ii. *Test istatistiğinin seçimi:* Hipotez testinin doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için uygun bir test istatistiği seçilmelidir. Bu, veri türüne, hipotezin doğasına ve diğer faktörlere bağlı olabilir.
- iii. *Anlamlılık düzeyinin belirlenmesi:* Anlamlılık düzeyi (alfa düzeyi), kabul edilebilir bir hata düzeyini ifade eder. Genellikle yaygın olarak kullanılan anlamlılık düzeyleri 0,05 (5%) veya 0,01 (1%) olarak kabul edilir. Bu düzey, kabul edilebilir bir hata yapma olasılığını temsil eder.
- iv. *Test istatistiğinin hesaplanması:* Örneklem verileri kullanılarak test istatistiği hesaplanır. Bu, örneklem verilerinin kullanılarak hipotezle ilgili bir istatistiksel değerin elde edilmesini içerir.
- v. *Kritik bölgenin belirlenmesi:* Kritik bölge, hipotezin reddedileceği bölgeleri ifade eder. Kritik bölge, anlamlılık düzeyine ve hipotezin doğasına bağlı olarak belirlenir.
- vi. *Karar verme:* Eğer test istatistiği kritik bölgede bulunuyorsa,  $H_0$  hipotezi reddedilir ve alternatif hipotez olan  $H_1$  kabul edilir. Test istatistiği kabul bölgesindeyse,  $H_0$  hipotezi kabul edilir.
- vii. *Sonuçların yorumlanması:* Hipotez testinin sonuçları yorumlanır ve ilgili çıkarımlar yapılır. Bu çıkarımlar, hipotezin doğrulanması veya reddedilmesi hakkında bilgi sağlar.

Hipotez testleri, araştırmacılara veri analizinde yol gösterici olarak istatistiksel çıkarımlar yapma imkanı sağlar. Bu testler, bilimsel çalışmalarda, pazar araştırmalarında, tıp alanında ve birçok diğer alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

### **3.3. Faktör Etkilerinin Hesaplanması**

Tam faktöriyel yöntem, faktörlerin tüm seviyelerinin incelendiği bir deney tasarımıdır. Bu yöntemde faktör etkileri, faktörlerin seviyelerindeki değişikliklerin yanıt değişkeninde oluşturduğu farklar üzerinden hesaplanır [67].

Faktör etkileri hesaplanırken genellikle ANOVA (Varyans Analizi) kullanılır. ANOVA, faktörler arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. ANOVA tablosu, faktörlerin etkilerini gösteren istatistiksel ölçütleri sağlar.

Faktör etkileri hesaplanırken aşağıdaki adımlar izlenir [67]:

- i. *Veri toplama:* Deneyde yer alan faktörlerin seviyelerine göre yanıt değişkeninin ölçümleri toplanır. Her bir faktör seviyesine karşılık gelen veriler kaydedilir.
- ii. *Verilerin analizi:* Toplanan veriler, ANOVA yöntemiyle analiz edilir. Bu analizde faktörlerin etkileri, toplam varyansın ne kadarını açıkladığını belirleyen kareler toplamı (sum of squares) değerleri kullanılarak hesaplanır.
- iii. *Kareler toplamı hesaplama:* ANOVA tablosunda yer alan kareler toplamı değerleri, faktörlerin etkilerini gösterir. Toplam kareler toplamı (SST), faktörlerin etkisi ve hata (error) toplamının toplam varyansı temsil eder.
- iv. *Serbestlik derecesi hesaplama:* Her bir kareler toplamının serbestlik derecesi hesaplanır. Serbestlik derecesi, verilerin analizinde kullanılan bağımsız bilgi sayısını temsil eder.
- v. *Ortalama kareler hesaplama:* Kareler toplamının serbestlik derecesine bölünmesiyle ortalama kareler (mean squares) değerleri elde edilir. Bu değerler, faktör etkilerinin büyüklüğünü ve istatistiksel anlamlılığını belirler.
- vi. *F-istatistiği hesaplama:* Ortalama karelerin oranıyla F-istatistiği hesaplanır. F-istatistiği, faktörlerin etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için kullanılır.
- vii. *Anlamlılık testi:* F-istatistiği, belirlenen anlamlılık düzeyiyle karşılaştırılır. Anlamlılık düzeyi, kabul edilebilir hata düzeyini ifade eder. Eğer F-istatistiği, anlamlılık düzeyinden küçük bir değere karşılık geliyorsa, faktör etkileri istatistiksel olarak anlamlıdır.
- viii. *Sonuçların yorumlanması:* Faktör etkileri istatistiksel olarak anlamlıysa, bu etkilerin büyüklüğü ve yönü dikkate alınarak sonuçlar yorumlanır. Örneğin, bir faktörün etkisi diğer faktörlerden daha büyükse, bu faktörün yanıt değişkeni üzerinde daha belirleyici bir etkisi olduğu söylenebilir.

Tam faktöriyel yöntemde faktör etkilerinin hesaplanması, istatistiksel analizlerle yanıt değişkeni arasındaki ilişkiyi anlamak ve faktörlerin katkısını değerlendirmek için

önemlidir. Tüm bu adımlar ANOVA Tablosunda özetlenir. Tablo 3.1’de iki faktörlü deney için ANOVA tablosu verilmiştir.

**Tablo 3.1.** İki faktörlü deney için ANOVA tablosu [67]

Faktörler	Serbestlik derecesi (DF)	Hata kareler toplamı (Seq SS)	Hata kareler ortalaması (MS)	F <sub>0</sub> , F değeri
A	a-1	SS <sub>A</sub>	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	b-1	SS <sub>B</sub>	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Etkileşim (A*B)	(a-1)(b-1)	SS <sub>AB</sub>	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Hata	ab(n-1)	SS <sub>E</sub>	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Toplam	abn-1	SS <sub>T</sub>		

Burada  $n$ : tekrar sayısı,  $a$ : A ve  $b$ : B faktörlerinin seviyesidir.

Hata kareler toplamı (Seq SS), faktörlerin etkisi dışındaki rastgele hataların toplam varyansını temsil eder. Bu değer, faktörlerin açıklayamadığı varyansı ifade eder ve modelin veriye ne kadar iyi uyduğunu belirler [67].

Hata kareler toplamı,  $Seq\ SS = \sum(y_i - \hat{y}_i)^2$ , formülü ile hesaplanır. Burada, Seq SS: hata kareler toplamını,  $y_i$ : gözlemlenen değeri ve  $\hat{y}_i$ , modelin tahmin ettiği değeri temsil eder. Hata kareler toplamı, her gözlem değerinin gerçek değeri ile modelin tahmin ettiği değeri arasındaki farkın karesinin toplamıdır. Bu farklar, faktörlerin etkisi dışındaki rastgele hataları temsil eder [67].

Seq SS değeri, ANOVA tablosunda yer alan "hata" veya "kalıntı değerler" başlığı altında bulunur. Seq SS'in büyüklüğü, modelin veriye ne kadar iyi uyduğunu gösterir. Daha düşük bir Seq SS değeri, modelin daha iyi bir uyum sağladığını ve veriyi daha iyi açıkladığını gösterir [67].

Hata kareler toplamı, faktör etkilerinin toplam varyansı ve hata varyansının toplamını ifade eden toplam kareler toplamından (SST) çıkarılarak elde edilir:

$$Seq\ SS = SST - Sf\ SS$$

Burada, SST, toplam kareler toplamını temsil eder. Sf SS, faktörlerin etkilerinin kareler toplamını temsil eder.

Hata kareler toplamı (Seq SS), faktörlerin etkisi dışındaki rastgele hataların varyansını hesaplayarak modelin veriye ne kadar iyi uyduğunu belirler.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Faktörlerin Seviyelerinin Belirlenmesi

Seramik kaplama malzemelerinin bünyelerinde sinterleme kinetiklerinin artırılması üzerine yapılan çalışmalar, alkali ve toprak alkali dengesinin sağlanmasıyla ilgilenmiştir. Bu konuda birçok araştırma mevcuttur [37,38,45,70-74]. Bu çalışmalarda özellikle alkali ve toprak alkali dengesi üzerinde durulmuş ve 3 ana oksit oranı olan  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $Na_2O/K_2O$  ve  $MgO/CaO$  dikkat çekmiştir. Yoğunlaşma hızı, çeşitli etkenlerden etkilenir ve özellikle farklı alkali ve toprak alkali miktarları ve oranları bu hızı etkileyebilir. Ayrıca, sistemde oluşan amorf fazın kompozisyonu ve akışkanlığı da çeşitli feldispatlar ve dolayısıyla bu oranlardan etkilenebilir. Çeşitli fiziksel özellikler açısından ise özellikle  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$  oranlarının bünyelerde etkili olduğu bilinen farklı bir gerçektir [1-3,7,14,15]. Bu nedenle, deney tasarımı yöntemiyle hazırlanan numunelerde, faktörler olarak  $Na_2O/K_2O$ ,  $MgO/CaO$  ve  $SiO_2/Al_2O_3$  oranları belirlenmiştir.

Dondi ve ark. [17] yapmış olduğu araştırmaya göre, üç farklı sınıfa ayrılan (yüksek silikatlı, orta silikatlı ve düşük silikatlı) porselen malzemelerinin kimyasal bileşim (oksit miktarı) ve Seger formülü aralığı Tablo 4.1 'de verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Üç sınıf porselen bünyesinin ortalama kimyasal bileşimi ve Seger değer aralığı

Oksitler	% ağırlık	Seger değeri
$SiO_2$	66,6 – 75,9	7,0 – 10
$TiO_2$	<1	<0,1
$Al_2O_3$	15,0 – 22,5	1,2 – 1,8
$Fe_2O_3$	<2	<0,2
$MgO$	0,2 – 3,5	0,08 – 0,3
$CaO$	<2	0,09– 0,2
$Na_2O$	2,5 – 9,0	0,6 – 0,9
$K_2O$	1,0 – 4,0	0,1 – 0,4
$ZrO_2$	<2	<0,4

Bu bilgilerden yolda çıkarak oksit oran aralığı aşağıdaki hesaplamalardan elde edilmiştir:

$$\frac{7}{1,8} = 3,9 < \frac{SiO_2}{Al_2O_3} < \frac{10}{1,2} = 8,3 \quad (4.1)$$

$$\frac{0,6}{0,4} = 1,5 < \frac{Na_2O}{K_2O} < \frac{0,9}{0,1} = 9,0 \quad (4.2)$$

$$\frac{0,08}{0,2} = 0,4 < \frac{MgO}{CaO} < \frac{0,4}{0,09} = 3,3 \quad (4.3)$$

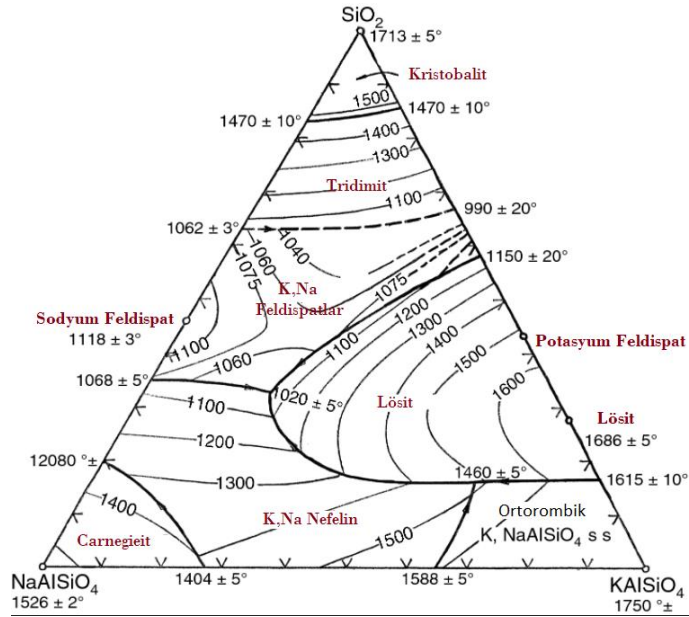
Bu hesaplamalara istinaden, Seger formülüne dayanarak bir porselen karo bünyesinde  $SiO_2/Al_2O_3$  oranı (3,9-8,3),  $Na_2O/K_2O$  oranı (1,5-9,0) ve son olarak  $MgO/CaO$  oranı ise (0,4-3,3) olmalıdır.

Deney tasarımı için yukarıda belirlenen seger formülüne (1-3) dayalı oksit oran aralığı aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir:

- $SiO_2/Al_2O_3$  oranı [5,2-8,2]
- $Na_2O/K_2O$  oranı [1,5-8,0]
- $MgO/CaO$  oranı [0,8-3,0]

Bu değişimim nedeni ise daha dar, seramik porselen karo sektöründeki reçetelere daha yakın ve kullanılan hammaddelere elverişli reçeteler hazırlamak olmuştur.

Sinterleme sürecinde camsı faz, feldispatik bileşenin yoğun olduğu başlangıç bileşiminden başlayarak bünyenin tamamına doğru ilerler. Bu süreç sıcaklıkla ilişkilidir ve  $SiO_2$ 'nin ergime sıcaklığına kadar basit bir yol izler (Şekil 1.1). Bu davranış, 1100-1200 °C sıcaklık aralığında, en belirgin fenomenin kuvarsın aşamalı olarak erimesi olduğunu gösterir.



Şekil 4.1.  $SiO_2$ -Na-Feldispat-K-Feldispat sistemine ait denge diyagramı [75]

Müllitin düşük sıcaklıklarda, 1000°C'ye kadar gözlemlenmesi önerilse de oluşan fazın alümina-silikat spinel fazı olduğu düşünülmektedir. Diferansiyel termal analiz (DTA) sonuçları, daha hızlı ısıtma hızlarının, 3 ila 20 K·dk<sup>-1</sup> arasındaki ısıtma hızlarından daha yüksek olan hızların, kaolinitik kil minerallerinden müllit oluşumunda artışa neden olabileceğini göstermektedir. Ancak bu artışın miktarlardan bağımsız olduğu belirlenmiştir [76].

Diğer yandan, müllit seviyesinin 1400°C'nin üzerinde sabit olduğu tespit edilmiştir. Porselenlerde müllit seviyesinin sıcaklıktan, bekleme süresinden ve 1150°C'nin üzerindeki ısıtma hızından bağımsız olduğu, kuvars çözünmesinin ise hem sıcaklıktan hem de 1200°C'nin üzerindeki bekleme süresinden bağımsız olduğu gösterilmiştir. Diğer çalışmalar da müllit seviyesinin 1200-1400°C arasında sabit olduğunu ortaya koymaktadır. Bazı çalışmalar ise müllit oranının ısıtma süresiyle arttığını ve 1200°C'de 30-40 dakikalık bir bekleme süresiyle az miktarda arttığını rapor etmiştir, ancak bu sonuçlar diğer çalışmalarla uyumsuzdur [76]. Yüksek alkali/toprak alkali oksit oranına sahip porselen karolarda deformasyon değerlerinin yüksek olması dikkate alındığında, bu çalışmada pyroplastik deformasyondan kaçınmak için sıcaklık aralığı 1180-1200 °C ile sınırlandırılmıştır.

#### 4.2. Tam Faktörlü Deney Tasarımı

Bu çalışmada daha önce de vurgulandığı gibi porselen karosu için 2<sup>4</sup> tam faktörlü deney tasarımı (full factorial design) yöntemi ile 4 (3 oksit oranı ve sıcaklık) ana faktör etkisi ve faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimleri iki tekrar yapılacak şekilde tasarlanmıştır. İncelenen faktörler ve seviyeleri Tablo 4.2'de tam faktörlü deney tasarım tablosu ise EK 1'de verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Tam faktörlü deney tasarımı için incelenen faktörler ve seviyeleri

Ana Faktörler	Seviyeler	
	<i>I</i>	<i>II</i>
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2	8,2
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1,5	8,0
MgO/CaO	0,8	3,0
Sıcaklık	1180	1200

Tam faktörlü deney tasarım tablosunun özeti Tablo 4.3 'te verilmiştir.

**Tablo 4.3.** Tam faktörlü deney tasarım tablo özeti

<b>Faktörler:</b>	4	<b>Temel Tasarım:</b>	4; 16
<b>Çalıştırma:</b>	32	<b>Tekrarlama:</b>	2
<b>Bloklar:</b>	1	<b>Merkez noktalar (toplam):</b>	0

### 4.3. Kullanılan Hammaddeler ve Hammadde Analizi

Deneysel çalışmalarda kullanılan hammaddeler seramik araştırma merkezi A.Ş. tarafından tedarik edilmiştir. Porselen karosu bünye reçete geliştirme çalışmalarında kullanılmak amaçlı Ukrayna kili, Afyon kili, İstanbul kili, kaolen, Na- feldispat, K- feldispat, Flote, Manyezit ve silis kumu temin edilmiştir.

Kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri Bruker marka Tayger S8 model cihazı kullanarak X-ışınları spektrometresi (XRF) ile yapılmıştır. Hammaddelerin mineralojik yapıları, bir X-ışını difraktometresi (XRD Rigaku-MiniFlex 600) ile karakterize edilmiştir. Diferansiyel ısıl analiz yöntemleri kullanılarak hammaddelere uygulanan ısıl işlem sırasında meydana gelen reaksiyonlar tespit edilmiştir. 10°C/dak ısıtma hızı kullanılarak 20°C ile 1200°C arasında TG-DTA analizi Netazch STA 449 F3 model cihaz kullanarak yapılmıştır.

#### 4.3.1. X-ışını floresans spektrometresi (XRF) kimyasal analizi

XRF sistemleri ile farklı formlardaki numunelerde bor-uranyum aralığındaki elementlerin analizleri numune matrisine bağlı olarak, ppt-% konsantrasyon mertebesinde, tahribatsız, hızlı ve güvenilir bir şekilde yapılmaktadır. Kaba olarak gelen numune tungsten halkalı öğütücü ile ~63µm altına gelecek şekilde öğütülmektedir. Daha sonra numune ~105±5°C etüvde 4 saat kurutulmak üzere bekletilmektedir. Ham numunelerin, ~1000°C'de kızdırma kaybına bakılmaktadır. Hammaddelerin Kimyasal analizi Tablo 4.4'te verilmiştir.

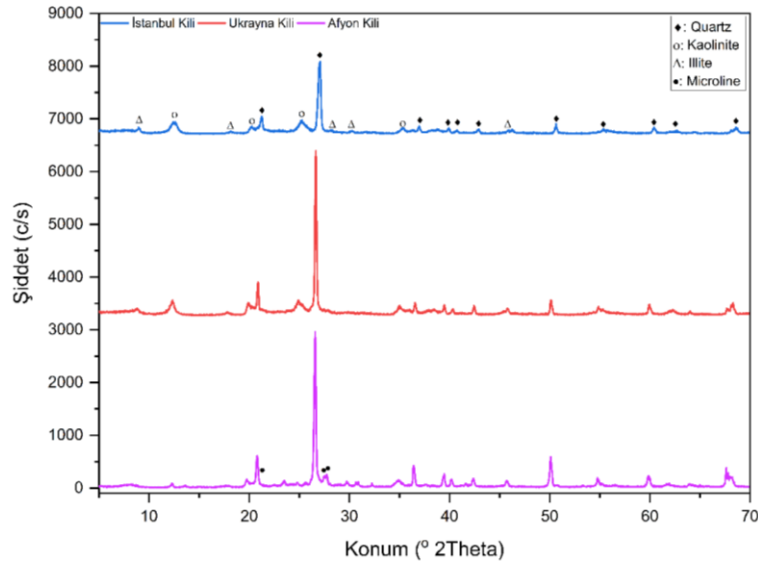
**Tablo 4.4.** Tez kapsamında kullanılan hammaddelerin % ağırlıkça kimyasal analizleri

Hammadde	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Diğer	A.Z.*
İstanbul Kili	61,48	22,84	1,28	2,93	0,22	0,48	2,15	0,00	0,07	8,53
Ukrayna Kili	61,27	24,85	1,37	0,88	0,56	0,46	1,89	0,43	0,06	8,22
Afyon Kili	77,40	13,56	0,06	0,96	0,25	0,23	3,60	0,49	0,00	3,43
Kaolen	70,67	20,45	0,58	0,35	0,16	0,00	0,21	0,00	0,31	7,27
Na-Feldispat	71,48	16,15	0,30	0,12	0,62	0,00	0,21	10,31	0,24	0,52
Flote	66,53	20,22	0,09	0,11	1,14	0,00	0,30	11,14	0,00	0,47
K-Feldispat	66,91	17,64	0,00	0,11	0,30	0,00	11,19	3,19	0,00	0,65
Silis Kumu	84,80	9,22	0,20	0,26	0,52	0,25	0,41	2,83	0,00	1,51
Manyezit	5,02	0,98	0,00	0,42	3,38	53,72	0,06	0,00	0,06	36,36

\*A.Z.: Ateş Zayıyatı (veya Kızdırma Kaybı)

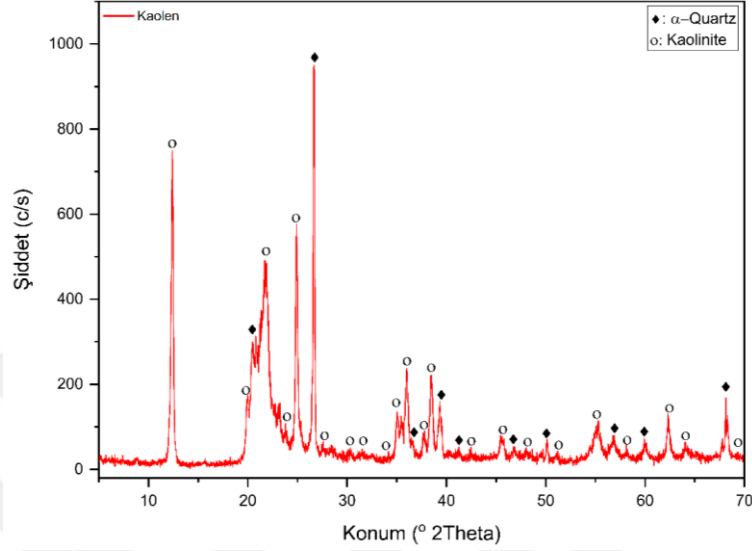
#### 4.3.2. X-ışını kırınımı spektrometresi (XRD) mineralojik analizi

Mineralojik yapılar, 2 derece/dakikalık bir tarama hızında 5° 'den 70° 'ye kadar Cu-K $\alpha$  radyasyon taraması kullanan bir X-ışını difraktometresi (XRD Rigaku-MiniFlex 600) ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.2-4.7'de verilmiştir.



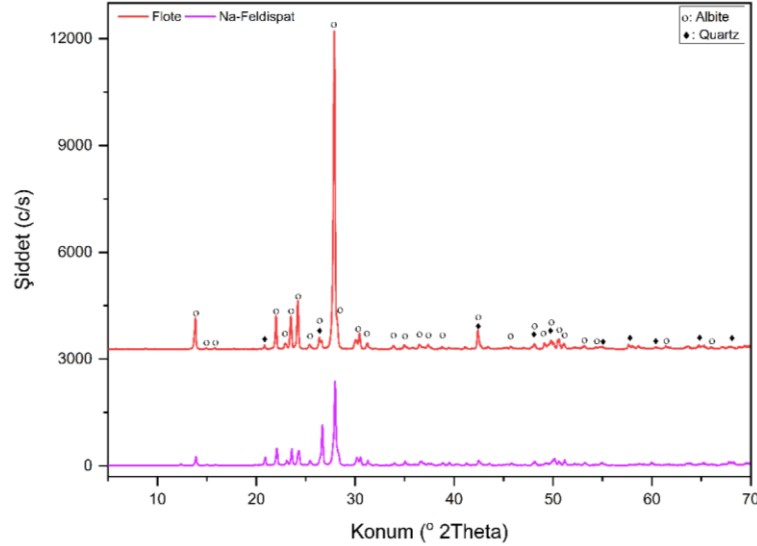
**Şekil 4.2.** Kil numunelerine ait mineralojik analiz sonucu

Kil numunelerine ait XRD analiz sonucu İstanbul ve Ukrayna kili yapılarında Kuvars, Kaolen ve İllit minerallerini bulundururken, Afyon kilinin bu mineraller dışında yapısında Microline mineralinin de bulundurduğu gözlemlenmiştir.



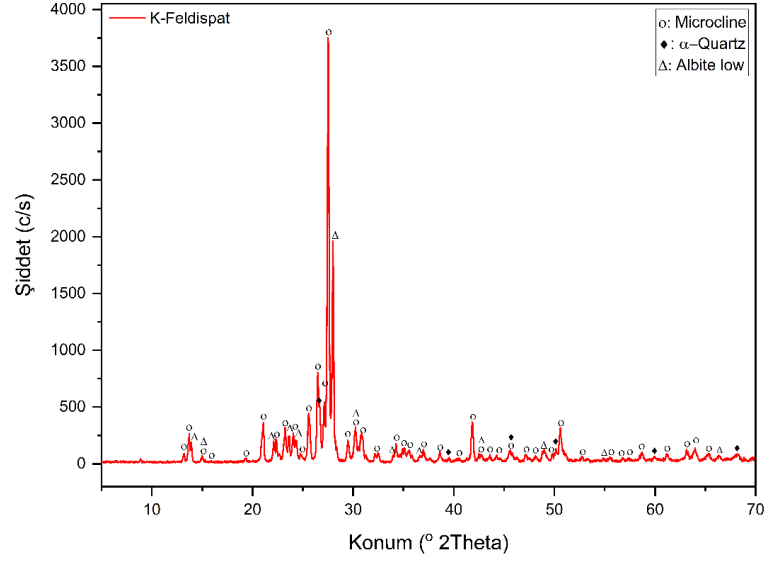
Şekil 4.3. Kaolen numunesine ait mineralojik analiz sonucu

Kaolen numunesine ait XRD analiz sonucu numunenin yapısında Kaolen ve  $\alpha$ -Kuvars minerallerinin bulunduğu gözlemlenmiştir.



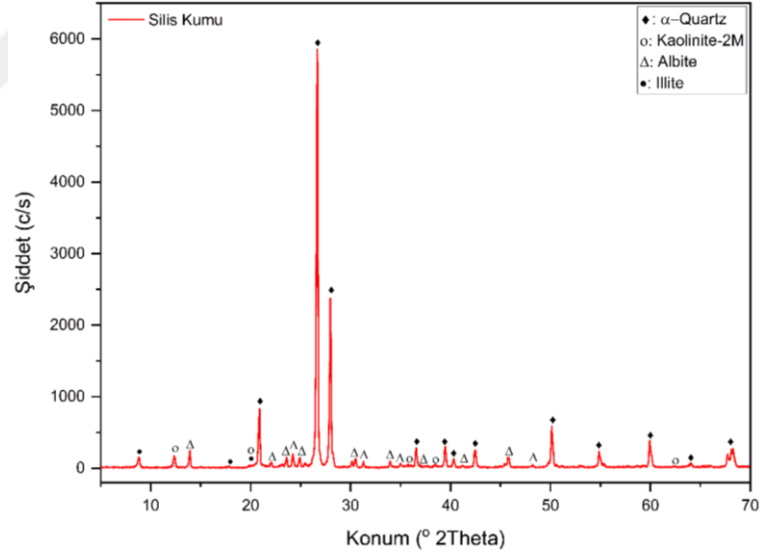
Şekil 4.4. Sodyum-Feldispat numunelerine ait mineralojik analiz sonucu

Sodyum-Feldispat numunelerine ait XRD analiz sonucu Na-Feldispat ve Flote numunelerinin yapılarında Albite ve Kuvars minerallerinin bulunduğu gözlemlenmiştir.



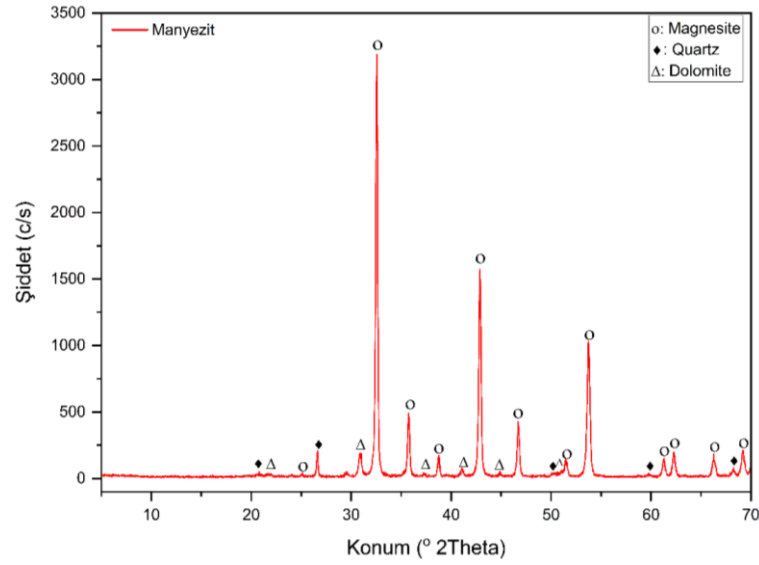
Şekil 4.5. Potasyum-Feldispat numunesine ait mineralojik analiz sonucu

K-Feldispat numunesine ait XRD analiz sonucu numunenin yapısında Microcline, Albite ve  $\alpha$ -Kuars minerallerinin bulunduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. Silis kumu numunesine ait mineralojik analiz sonucu

Silis numunesine ait XRD analiz sonucu numunenin yapısında  $\alpha$ -Kuars minerali dışında, Kaolen-2M, Albite ve illit minerallerinin de bulunduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Manyezit numunesine ait mineralojik analiz sonucu

Manyezit numunesine ait XRD analiz sonucu numunenin yapısında Manyezit minerali dışında, Dolomit ve Kuvars minerallerinin de bulunduğu gözlemlenmiştir.

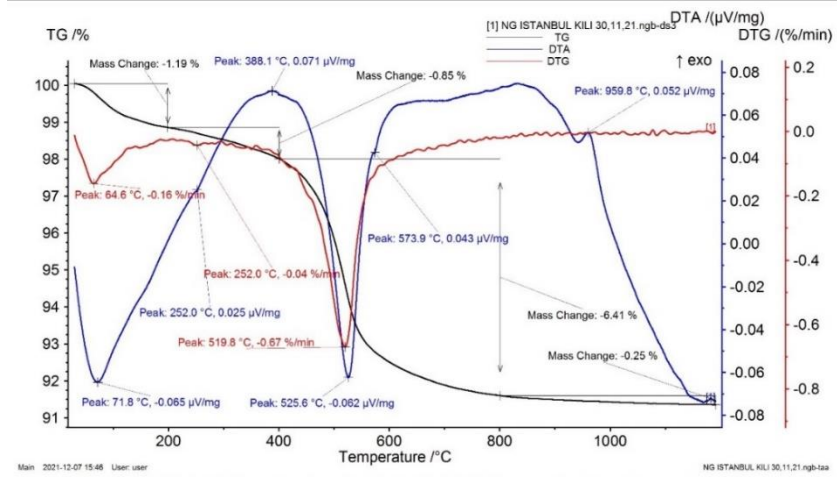
Mineralojik analiz özeti ise Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Hammaddelerin mineralojik analiz özeti

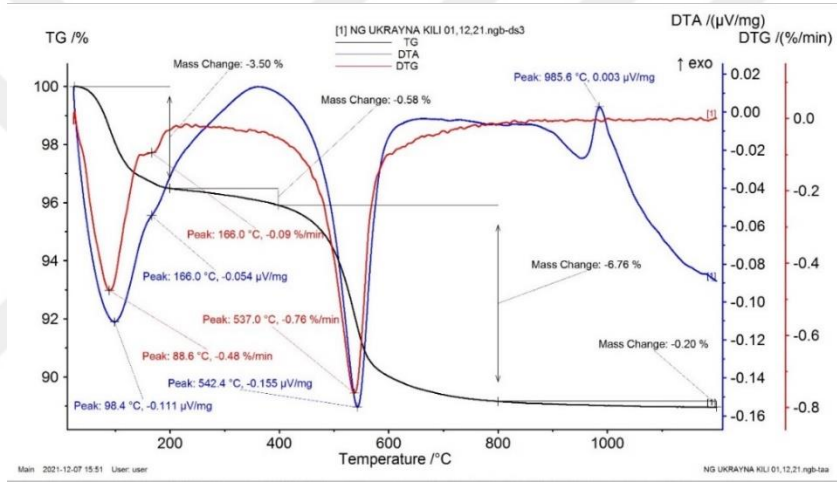
Hammadde		Fazlar			
Kil	İstanbul Kili	Kuvars	Kaolin	İllite	-
	Ukrayna Kili	Kuvars	Kaolin	İllite	-
	Afyon Kili	Kuvars	Kaolin	İllite	Microline
Kaolin	Kaolin	Kuvars	Kaolin	-	
Feldispat	Na-Feldispat	Albit	Kuvars	-	-
	Flote	Albit	Kuvars	-	-
	K-Feldispat	Mikroklin	Kuvars	Mikroklin	-
Kuvars	Silis Kumu	Kuvars	Albite	Kaolin	İllite
Manyezit	Manyezit	Manyezit	Dolomite	Kuvars	-

#### 4.3.3. Kullanılan hammaddelerin ısıl davranışlarının incelenmesi

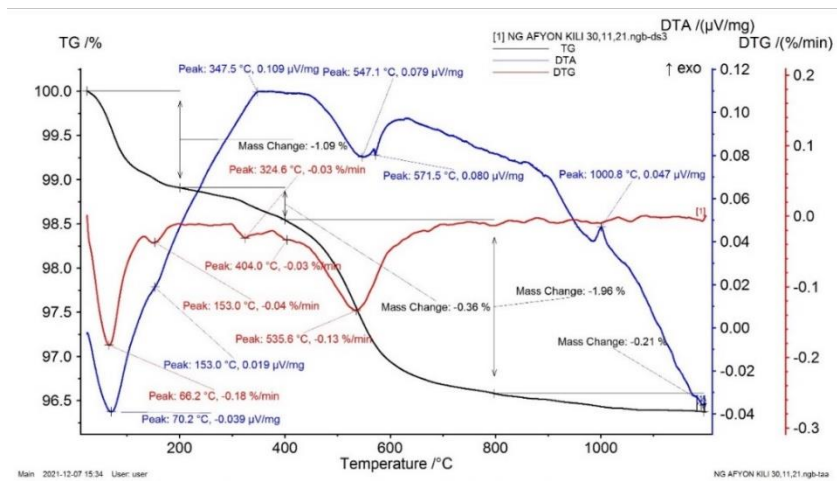
Diferansiyel ısıl analiz yöntemleri kullanılarak hammaddelere uygulanan ısıl işlem sırasında meydana gelen reaksiyonlar tespit edilmiştir. 10°C/dak ısıtma hızı kullanılarak 20°C ile 1200°C arasında TG-DTA analizi Netzsch STA 449 F3 model cihaz kullanarak yapılmıştır. Yapılan analizlerin sonucu Şekil 4.8- 4.16 'da verilmiştir.



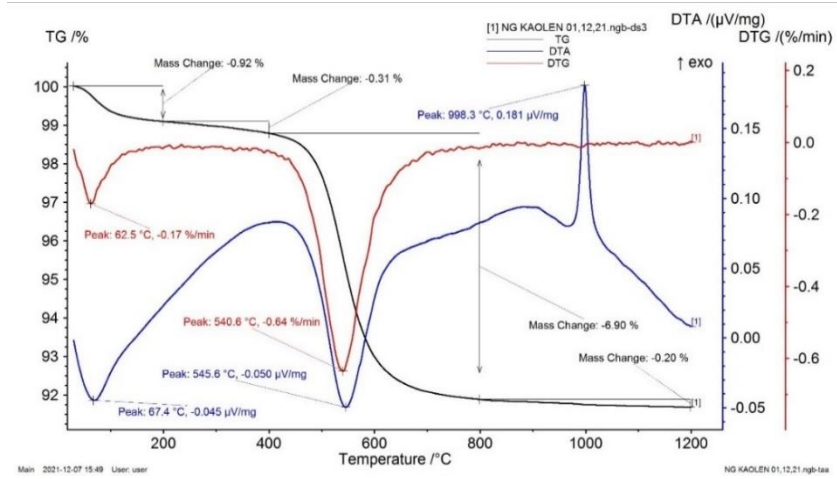
Şekil 4.8. İstanbul kiline ait TG-DTA analiz sonucu



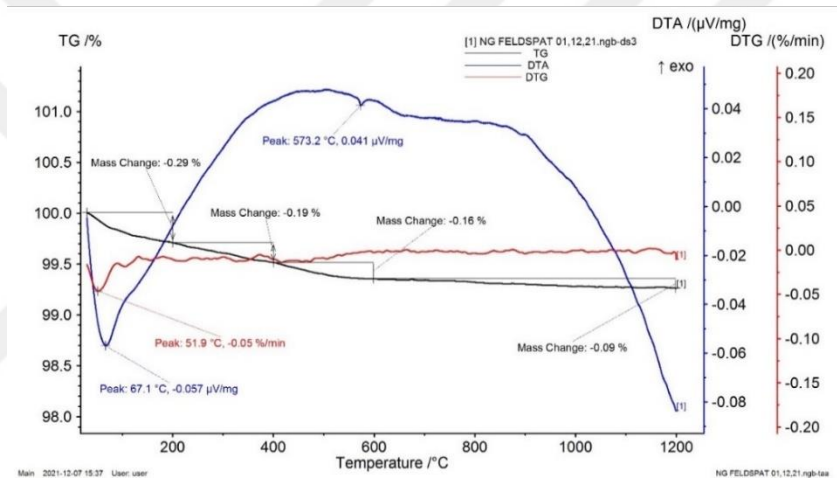
Şekil 4.9. Ukrayna kiline ait TG-DTA analiz sonucu



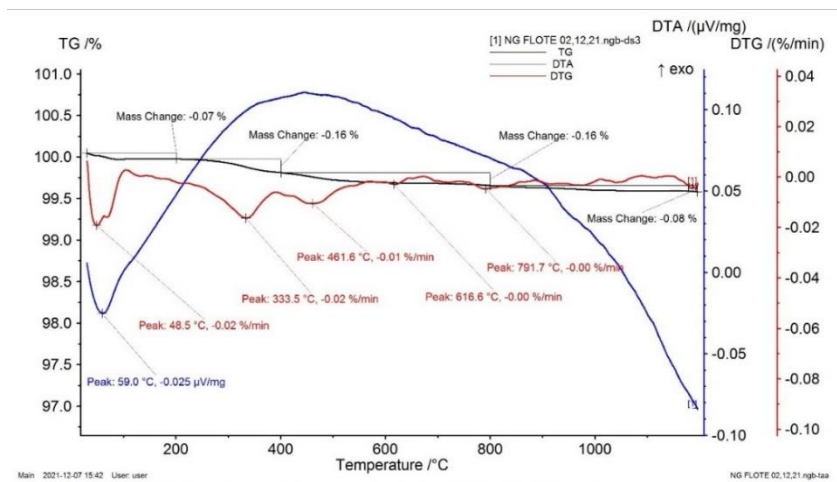
Şekil 4.10. Afyon kiline ait TG-DTA analiz sonucu



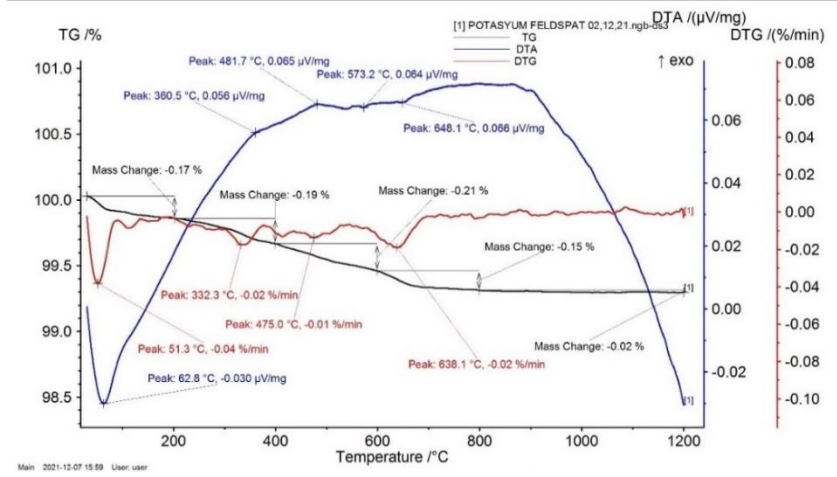
Şekil 4.11. Kaolen numunesine ait TG-DTA analiz sonucu



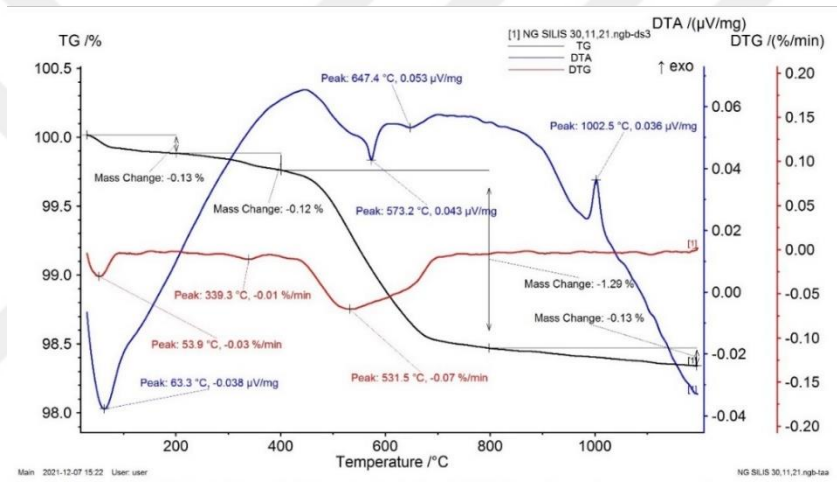
Şekil 4.12. Na-feldispat numunesine ait TG-DTA analiz sonucu



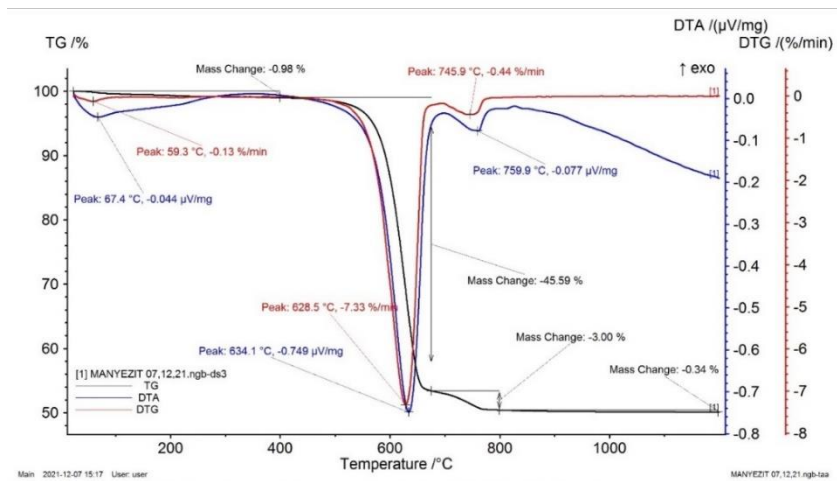
Şekil 4.13. Flote numunesine ait TG-DTA analiz sonucu



Şekil 4.14. K-feldispat numunesine ait TG-DTA analiz sonucu



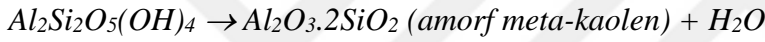
Şekil 4.15. Silis numunesine ait TG-DTA analiz sonucu



Şekil 4.16. Manyezit numunesine ait TG-DTA analiz sonucu

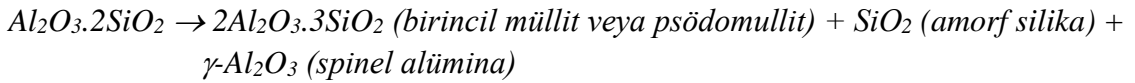
İstanbul kiline ait TG-DTA analizi Şekil 4.8’de verilmiştir. TG-DTA analizi incelendiğinde, TG eğrisinin türevinde belirlenen 64,6 °C’deki pik ve TG eğrisinde gözlenen kütle kaybı, kaolinit ve illit fazlarının yapısındaki tabakalar arasındaki fiziksel su kaybından dolayıdır. DTA eğrisinde 71,8 °C’de gözlenen endotermik pik de fiziksel suyun uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Kaolinit ünitelerinin düzenlenmesindeki düzensizlikler sonucu tabakalar arasına giren az miktarda suyu 252 °C’de kaybeder. DTA eğrisinde 388,1°C’deki ekzotermik pik ise organiklerin yapıdan uzaklaşmasını göstermektedir.

DTA eğrisinde 525,6 °C’deki endotermik pik kaolinit yapısındaki kristal suyun uzaklaşması ve “*dehidroksilasyon*” ismi ile de bilinen kaolen-meta-kaolen dönüşümü dolaylıdır. Buna bağlı olarak, DTG eğrisinde bu sıcaklığa yakın olarak 521,4 °C’de pik görülmektedir. Kristal suyundan dolayı toplam %6,41’lik bir kütle kaybı belirlenmiştir. Kaolen-meta kaolen dönüşüm sonucu aşağıdaki reaksiyon gerçekleşmektedir:



DTA eğrisinde 573,9 °C’de gözlenen endotermik pik ise kuvarsın  $\alpha$ - $\beta$  faz dönüşümünden dolayıdır.

959,8 °C’de görülen keskin ekzotermik pik de kaolinit fazından kaynaklanan metakaolenin amorf silika ve  $\gamma$  Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spinel fazına dönüşümünden dolayıdır. Bu dönüşüm sonucu aşağıdaki reaksiyon gerçekleşmektedir:



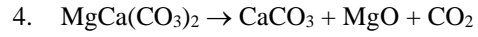
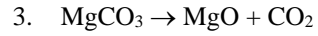
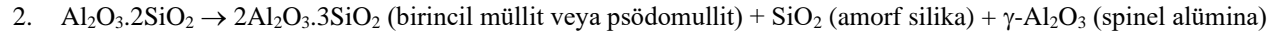
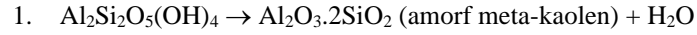
Çalışmalarda kullanılan diğer hammaddelere yapılan ısıl analiz sonuçları benzer şekilde değerlendirilerek Tablo 10’ da özetlenmiş, TG-DTA analiz eğrilerinin yorumları verilmiştir.

**Tablo 4.6.** Hammaddelerin ısı analiz sonuçlarının özeti

Hammadde	DTA Analiz Sıcaklıkları/Açıklamaları		TG Analiz Sonucu
	Endotermik Pikler ve Pik sıcaklıkları	Ekzotermik Pikler ve Pik sıcaklıkları	
<b>Ukrayna Kili</b>	→ 98,4 °C ve 166,0 °C/Fiziksel Su kaybı → 542,4°C/Kaolen-meta-kaolen dönüşümü (dehidroksilasyon <sup>1</sup> ) → <b>Not:</b> α-β kuvars dönüşümü kuvars kristalinin düşük miktarda yapıda bulunduğu için gözükmemektedir.	→ 985,6°C/amorfl meta-kaolen 'in kristal fazlara dönüşümü <sup>2</sup>	%11,04
<b>İstanbul Kili</b>	→ 71,8 °C ve 252,0 °C/Fiziksel Su kaybı → 525,6°C/Kaolen-meta-kaolen dönüşümü (dehidroksilasyon <sup>1</sup> ) → 573,9 °C/α-β kuvars dönüşümü	→ 388,1°C/Organiklerin yapıdan uzaklaşması → 959,8 °C /amorfl meta-kaolen 'in kristal fazlara dönüşümü <sup>2</sup>	%8,7
<b>Afyon Kili</b>	→ 70,2 °C ve 153,0 °C/Fiziksel Su kaybı → 547,1°C/Kaolen-meta-kaolen dönüşümü (dehidroksilasyon <sup>1</sup> ) → 571,5 °C/α-β kuvars dönüşümü	→ 347,5°C/Organiklerin yapıdan uzaklaşması → 1000,8°C/amorfl meta-kaolen 'in kristal fazlara dönüşümü <sup>2</sup>	%3,62
<b>Kaolen</b>	→ 67,4 °C /Fiziksel Su kaybı → 545,6°C/Kaolen-meta-kaolen dönüşümü (dehidroksilasyon <sup>1</sup> )	→ 998,3°C /amorfl meta-kaolen 'in kristal fazlara dönüşümü <sup>2</sup>	%8,33
<b>Na-Feldispat</b>	→ 67,1 °C /Fiziksel Su kaybı → 573,2 °C/α-β kuvars dönüşümü		%0,73
<b>Flote</b>	→ 59,0 °C /Fiziksel Su kaybı <b>Not:</b> α-β kuvars dönüşümü kuvars kristalinin düşük miktarda yapıda bulunduğu için gözükmemektedir.		%0,47
<b>K-Feldispat</b>	→ 62,8 °C /Fiziksel Su kaybı → 573,2 °C/α-β kuvars dönüşümü → 648,1°C/Kaolen-meta-kaolen dönüşümü (dehidroksilasyon <sup>1</sup> ) → <b>Not:</b> α-β kuvars dönüşümü kuvars kristalinin düşük miktarda yapıda bulunduğu için gözükmemektedir.	→ 360,5 °C ve 481,7 °C /Organiklerin yapıdan uzaklaşması	%0,74
<b>Silis Kumu</b>	→ 63,3 °C /Fiziksel Su kaybı → 573,2 °C/α-β kuvars dönüşümü → 647,4°C/Kaolen-meta-kaolen dönüşümü (dehidroksilasyon <sup>1</sup> )	→ 1002,5°C /amorfl meta-kaolen 'in kristal fazlara dönüşümü <sup>2</sup>	%1,67

**Tablo 4.6. (Devam) Hammaddelerin ısı analiz sonuçlarının özeti**

Hammadde	DTA Analiz Sıcaklıkları/Açıklamaları		TG Analiz Sonucu
	Endotermik Pikler ve Pik sıcaklıkları	Ekzotermik Pikler ve Pik sıcaklıkları	Toplam Kütle kaybı (1200 °C)
<b>Manyezit</b>	→ 67,4 °C /Fiziksel Su kaybı → 634,1 °C/MgCO <sub>3</sub> (Manyezit) bozunumu <sup>3</sup> → 759,9°C/MgCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (Dolomit) bozunumu <sup>4</sup> → <b>Not:</b> α-β kuvars dönüşümü kuvars kristalinin düşük miktarda yapıda bulunduğu için gözükmemektedir.		%49,91



#### 4.4. Porselen Karosu Reçete Kıstasları

Porselen ve seramik kaplama malzemelerinde kullanılan hammaddeler genellikle iki gruba ayrılır: plastik ve plastik olmayan hammaddeler. Plastik hammaddeler, deformasyona izin veren bir özellik olan plastisiteye sahiptir. Kil ve kaolin gibi malzemeler plastik hammaddelere örnektir. Plastik olmayan hammaddeler ise flakslar ve dolgu malzemelerini içerir ve kendi başlarına plastisiteye sahip değildir. Plastik olmayan hammaddeler, büyük partikül boyutlarına sahiptir ve bünyeye ağ benzeri bir destek sağlar. Ayrıca, viskoziteyi azaltarak bünyenin şekillenmesini kolaylaştırır. Plastik olmayan hammaddeler, düşük su içeriğiyle daha fazla plastisite elde etmeyi sağlar. Ayrıca, büyük partikül boyutu, paketlenme yoğunluğunu artırarak mukavemeti ve deformasyonu azaltır. [7].

##### 4.4.1. Tipik hammadde kıstasları

Üç farklı bileşimi (kil, feldspat ve kuvars) nedeniyle porselenler üç eksenli seramikler olarak da adlandırılır. Sinterlenmiş bünyenin mekanik mukavemetini arttırmak için kuvars yerine alümina, feldspat yerine nefelin siyenit kullanılabilir. Bu birincil hammaddeler Tablo 4.7 'de listelenmiştir [7].

**Tablo 4.7.** Ticari Seramik kaplama üretiminde kullanılan birincil hammaddeler

Hammadde	Kompozisyon	Yaygın safsızlıklar
Kil	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	Kuvars*, $TiO_2$ , $Fe_2O_3$
Kaolen	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	Montmorilinit, Kuvars
Sodyum-Feldispat	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	$K_2O$ , CaO, MgO, Kuvars
Potasyum-Feldispat	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	$Na_2O$ , CaO, MgO, Kuvars
Nefelin siyenit	$K_2O \cdot 3Na_2O \cdot 4Al_2O_3 \cdot 9SiO_2$	CaO, MgO, Kuvars
Alümina	$Al_2O_3$	$Na_2O$
Kuvars	$SiO_2$	$TiO_2$ , $Fe_2O_3$

\* Kildeki kuvars safsızlığı ağırlıkça %35'e kadar yüksek olabilir

##### 4.4.1.1. Kil ve kaolen

Geleneksel seramiklerde "kil", plastisite ve ham mukavemet sağlayan, porselenin şekillendirme aşamalarında kullanılan ve ürün rengine katkıda bulunan hammaddeleri ifade eder. Kaolen (kaolinit) en yaygın kil mineralidir ve 1:1 tabakalı silikattır. Kil mineralleri, feldispatik kayaların bozunmasıyla oluşur. Potasyumun uygun şekilde uzaklaştırılmadığı durumlarda ise illitik killer (2:1 silikatlar) oluşur [7]. Kil içeriğine ve

safsızlığına bağılı olarak porselen reçetelerinde kil miktarı genelde ağırlıkça %25-%45 aralığında, kil ve kaolen toplamı ise %35-%50 aralığında olmalıdır.

#### **4.4.1.2. Flaks veya akışkanlar**

Tarihsel olarak, porselen üretiminde en yaygın olarak kullanılan flaks malzemeleri potasyum feldispatlardır (mikroklin ve ortoklaz). Potasyum feldispatlar genellikle safsızlık olarak bünyelerinde albit (sodyum feldispat) ve anortit (kalsiyum feldispat) minerallerini bulundurur. Albit, ticari porselenlerde fluks bileşeni olarak kullanılırken, anortit genellikle yer ve porselen karolarında tercih edilmez. Nefelin siyenit, feldispatların yerini alabilen bir başka ticari bileşendir. Nefelin sinterleme sıcaklığını düşürür ve cam fazındaki alkali seviyesini artırır. Nefelin siyenit, nefelin, albit ve mikroklin minerallerinden oluşur ve feldispatlardan daha yüksek bir alkali:silika oranına sahiptir. Porselen karoların sinterlenmesi viskoz akışlı bir yonteme dayanır ve düşük su emme özelliğı istenir. Bu nedenle sinterleme esnasında akışkan malzemelerin reçetede bulunması ve gözenelerin kapanması önemlidir. Bu bağlamda, feldispat genellikle reğetenin yaklaşık yarısını oluşturur [7]. Feldispatların içeriğıne ve safsızlığına bağılı olarak porselen reçetelerinde feldispat miktarı genelde reçetelere ağırlıkça %45-%55 aralığında girilmektedir.

#### **4.4.1.3. Dolgu malzemesi**

Dolgu malzemeleri, porselen karoların matrisinde en büyük partikül boyutuna sahip olan malzemelerdir ve çeşitli fonksiyonları yerine getirirler. Büyük partiküller, kurutma sırasında çatlak oluşumunu engelleyerek ve sinterleme sürecinde pyroplastik deformasyonu azaltarak bir iskelet yapı oluştururlar. Porselen karoların yaygın olarak kullanılan dolgu malzemeleri arasında kuvars ve çakmaktaşı bulunur. Bu malzemeler, feldspatik camda silika çözünmesini sağlayarak mikroyapısal evrim için önemli bir rol oynarlar. Alternatif olarak, kalsine alümina kuvarsın yerine geçebilir ve mekanik özellikleri iyileştirebilir. Ancak yüksek maliyeti nedeniyle alümina kullanımı sınırlıdır [7]. Seramik kaplama malzeme üretiminde genellikle silis kumu kuvars kaynağı olarak kullanılır. Silis kumunun saflığına ve kil ve kaolenden temin edilen kuvars miktarını da göz önünde bulundurarak, reçetelerde ağırlıkça %10'a kadar kullanılmaktadır. Porselen reçetelerinde kil, kaolen ve silis kumu toplamı ise genelde ağırlıkça %45-%55 aralığında olmaktadır.

#### 4.4.1.4. Ağırlıkça oksit miktarları kıstasları

Dondi ve ark. [17] İtalyan seramik sektöründe üretilen 26 farklı sırsız porselen karoların kimyasal analizini yaparak sınıflandırma çalışması gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, porselen karoları düşük, orta ve yüksek silika içeriğine sahip üç ayrı sınıfa kategorize etmişlerdir.

- i. Düşük silikatlı porselen karolar: Bu tip karolar ağırlıkça %68' den düşük silika ( $\text{SiO}_2$ ) içeriğine ve buna karşılık oldukça yüksek MgO (>1,5%ağ.) ve alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 21\%$ ağ.) içerirler. Alkali oksitler ( $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ) miktarları %5'in altındadır.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  oranı ise 0,31'den yüksek olmalıdır.
- ii. Orta silikatlı porselen karolar: Bu tip karolar ağırlıkça %68-%70 silika ( $\text{SiO}_2$ ) içeriğine ve buna karşılık orta seviyede MgO (ağırlıkça %0,5-1,1) ve alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3 =$  ağırlıkça %20-%21,5) içerirler. Alkali oksitler geniş bir aralık içerebiliyor ama toplamı genelde ağırlıkça %5-%5,5 civarındadır.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  oranı ise 0,29-0,31 olmalıdır.
- iii. Yüksek silikatlı porselen karolar: Bu tip karolar oldukça yüksek silika ve alkali oksitler (ağırlıkça %71' den yüksek silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve (alkali oksitler toplamı >5,0%ağ.) içermektedir. Buna karşılık oldukça düşük alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3 < 20\%$ ağ.) ve alkali toprak oksitleri ( $\text{MgO} \leq 0,7\%$ ağ. ve  $\text{CaO} \leq 1,4\%$ ağ.) içerirler.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  oranı ise 0,29'dan düşük olmalıdır.

#### 4.4.1.5. Seger formülü kıstasları

Seger formülü özellikle reçetedeki alkali ve toprak alkali metal-oksitler miktarına bağlı olarak amfoterler ve asitler grubundaki oksitler değerinde farklılık gösterebilmektedir (Bkz. Tablo 4.1)

#### 4.4.2. Deney tasarımında $\alpha$ ve $\beta$ risklerini en düşüğe çekmek amaçlı sabit tutulan oran

İstatistiksel hipotez, öncelikle örneklenen bir örneklem hakkında bir varsayım tahminidir. Hipotez testi sonucunda, varsayılan hipotezin reddedilip reddedilmemesine yönelik bir karar verilerek, varsayım doğrulanır veya doğrulanmaz. Hipotez testlerinde, örneklem büyüklüğü n'e dayanan gözlem istatistiğine dayanarak karar verilir, bu nedenle her zaman olası hatalar içerebilir. Bu bağlamda, iki tür hata tipi gözlenir:  $\alpha$  (Tip I hata: hipotezin gerçekte doğru olduğunda reddedilmesi) ve  $\beta$  (Tip II hata: hipotezin aslında yanlış olduğunda kabul edilmesi). Bu hata olasılıkları genellikle yanlış karar verme

riskleri olarak adlandırılır. İstatistiksel hipotez testlerinde, amaç  $\alpha$  ve  $\beta$  risklerini en aza indirmektir. Bu testlerde genellikle  $\alpha$ , önceden belirlenen bir düzeyde tutulur ve karar kuralı,  $\beta$  hata olasılığını en küçük hale getirecek şekilde oluşturulur [68]. Faktörlerin etkilerini daha iyi görebilmek  $\alpha$  ve  $\beta$  risklerinin en düşüğe çekmek için Tez kapsamında uygulanan kurallar özeti Tablo 4.8 'de verilmiştir.

**Tablo 4.8.** *Tip I ve II hataları en aza indirmek için uygulanan bir dizi karar kuralları ve açıklamaları*

Ölçüt	Açıklama
Tipik hammadde kıstasları	Son özellikler üzerindeki hammadde mineralojik etkilerini minimize etmek amacıyla, tipik hammadde miktarını sınırlamak için literatür bilgilerinden yola çıkarak bir dizi kural belirlenmiştir. Bunlar: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>25 &lt; \text{Toplam Kil} &lt; 45</math></li> <li>• <math>\text{Kuars ve Kaolen} &lt; 10</math></li> <li>• <math>35 &lt; \text{Toplam Kil ve Kaolen} &lt; 50</math></li> <li>• <math>45 &lt; \text{Toplam Kil, Kaolen ve Kuvars} &lt; 55</math></li> <li>• <math>45 &lt; \text{Toplam feldispat} &lt; 55</math></li> </ul>
Seğer oranı kıstası	Tüm formülasyonlarda, çeşitli oksit bileşenlerinin dengesi bozulmaması için $R_2O+RO/R_2O_3+RO_2$ oranı $0.1 \pm 0,01$ olarak sabitlenmiştir.
Tane boyut kıstasları	Son özellikler üzerinde tane boyutu etkisini en aza indirmek için, kaba ve koloidal taneler yönelik bir dizi kural uygulanmıştır. Bunlar <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>63 \mu</math> üzeri tane boyutu reçetelerde <math>&lt; \%2</math> ile sınırlandırılmıştır.</li> <li>• <math>2 \mu</math> altı taneler ise <math>\%11</math>-%14 arasında sabit tutulmuştur.</li> </ul> Değirmen süreleri bu parametreleri sağlamak üzere ayarlanmıştır.

#### 4.5. Belirlenen Reçeteler

Tam faktöriyel deney tasarımı yöntemine göre hazırlanmış olan reçete kodlarının içeriği ve detaylı oksit seviyeleri Tablo 4.9 'de verilmiştir.

**Tablo 4.9.** *Faktörler ve seviyelerine göre numune kodları*

Reçete Kodu	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	MgO/CaO
A-1	5,2	1,5	0,8
A-2	8,2	1,5	0,8
A-3	5,2	8	0,8
A-4	8,2	8	0,8
A-5	5,2	1,5	3
A-6	8,2	1,5	3
A-7	5,2	8	3
A-8	8,2	8	3

Reçetelerin içeriği ve Seğer formülasyonları Tablo 4.10-4.12 'de verilmiştir.

**Tablo 4.10.** Seger hesaplama tablosuna göre istenen Seger oranlarının sağlandığı reçete içeriği

Reçete kodu	Afyon Kili	İstanbul Kili	Ukrayna Kili	Kaolen	Toplam kil	Toplam Kil + Kaolen	Na-Feld.	Flote	K-Feld.	Toplam feldispat	Manyezit	Silis Kumu	Toplam Kil + Kaolen + Silis
A-1	-	4,11%	35,97%	5,14%	40,08%	45,22%	-	25,69%	27,75%	53,44%	0,31%	1,03%	46,25%
A-2	39,42%	-	-	2,96%	39,42%	42,38%	16,86%	8,87%	21,68%	47,41%	0,26%	9,95%	52,33%
A-3	-	22,45%	20,80%	6,78%	43,25%	50,03%	9,58%	38,78%	-	48,36%	0,36%	1,25%	51,28%
A-4	26,51%	-	-	9,89%	26,51%	36,40%	50,48%	3,06%	-	53,54%	0,37%	9,69%	46,09%
A-5	-	26,55%	19,32%	3,62%	45,87%	49,49%	-	24,15%	22,94%	47,09%	1,97%	1,45%	50,94%
A-6	38,85%	-	-	2,92%	38,85%	41,77%	16,62%	8,74%	21,36%	46,72%	1,70%	9,81%	51,58%
A-7	-	21,53%	19,95%	7,98%	41,48%	49,46%	9,18%	37,50%	-	46,68%	2,66%	1,20%	50,66%
A-8	26,00%	-	-	9,48%	26,00%	35,48%	50,00%	3,00%	-	53,00%	2,02%	9,50%	44,98%

**Tablo 4.11. Hazırlanan reçetelerin oksit değerleri**

Reçete Kodu	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
A-1	67,53	22,02	4,1	4,14	0,37	0,64	0,54	0,63
A-2	75,09	15,54	3,98	4,04	0,26	0,44	0,48	0,12
A-3	68,14	22,19	5,69	1,08	0,42	0,73	0,97	0,71
A-4	75,54	15,63	6,08	1,16	0,29	0,5	0,39	0,25
A-5	66,89	21,81	3,74	3,78	1,35	0,62	1,08	0,69
A-6	74,46	15,41	3,94	4,0	1,05	0,49	0,48	0,12
A-7	67,31	21,86	5,54	1,05	1,72	0,79	0,95	0,7
A-8	74,78	15,47	6,05	1,14	1,2	0,56	0,39	0,25
<i>En küçük değer</i>	66,89	15,41	3,74	1,05	0,26	0,44	0,39	0,12
<i>En büyük değer</i>	75,54	22,19	6,08	4,14	1,72	0,79	1,08	0,71
<i>Referans değer [17]</i>	66,6<X<75,9	15,0<X<22,5	2,5<X<9,0	1,0<X<4,0	0,2<X<3,5	X<2,0	X<2,0	X<1,0

**Tablo 4.12.** Hazırlanan reçetelerin seger değerleri

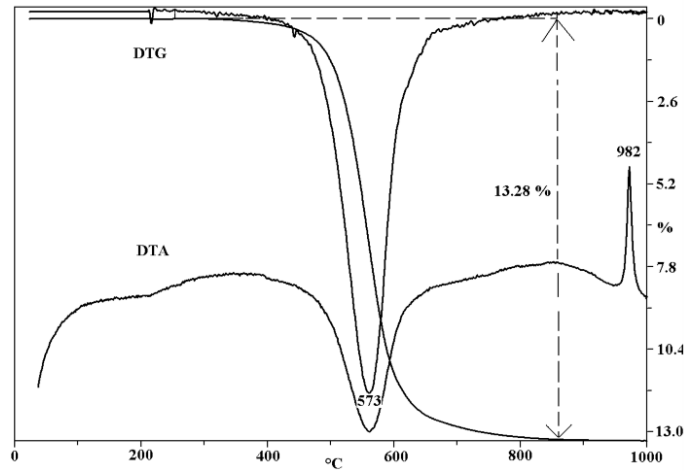
Reçete Kodu	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	MgO+CaO	R <sub>2</sub> O+RO/R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +RO <sub>2</sub>
A-1	8,60800	1,65400	10,26200	0,50668	0,33630	0,84298	0,07004	0,08698	0,15702	0,0974
A-2	10,29800	1,25600	11,55400	0,52857	0,35336	0,88193	0,05288	0,06519	0,11807	0,0866
A-3	8,94780	1,71700	10,66480	0,72421	0,09052	0,81473	0,08255	0,10271	0,18526	0,0938
A-4	9,92830	1,21100	11,13930	0,77520	0,09692	0,87212	0,05691	0,07098	0,12789	0,0898
A-5	7,67970	1,47500	9,15470	0,41594	0,27711	0,69305	0,23039	0,07656	0,30695	0,1092
A-6	8,78840	1,07200	9,86040	0,45070	0,30131	0,75201	0,18604	0,06196	0,24800	0,1014
A-7	7,12650	1,36400	8,49050	0,56812	0,07095	0,63907	0,27084	0,09009	0,36093	0,1178
A-8	8,32320	1,01500	9,33820	0,65306	0,08105	0,73411	0,19942	0,06648	0,26590	0,1071
Ortalama	8,790	1,352	10,141	0,585	0,194	0,779	0,144	0,077	0,221	0,1
Standart Sapma	0,9560	0,2269	0,9513	0,1154	0,1133	0,0777	0,0771	0,0127	0,0777	0,01

#### 4.6. DTA Eğrisinden Hesaplanan Kaolen, Manyezit ve Dolomit Faz Miktarları

Kayaların veya minerallerinin geliştirildiği koşullar genellikle termal aktivitelerini belirler. Minerallerin önemli bir kısmı ısıtmaya tepki olarak herhangi bir termal reaksiyon göstermediği için, bu yöntemin uygulanabilirliği yalnızca termal olarak aktif mineraller için sınırlıdır. Bununla birlikte, minerallerin tanımlanması ve nicel olarak belirlenmesi için en uygun olan bozunma reaksiyonlarının sıcaklığı hem malzeme özelliklerine hem de analiz koşullarına oldukça duyarlıdır. Bu gerçek, diğer yöntemlere kıyasla çeşitli avantajlar sunsa da termal analiz için biraz dezavantajlıdır. Mevcut durumun, yani termal analizin, kapasitelerine kıyasla küçük bir rol oynamasının nedeni, analiz için en uygun olan reaksiyon sıcaklıklarının, diğer analitik yöntemlerde (X -ışın kırınımı, kızılötesi spektroskopisi, vb.) kullanılan diğer parametrelere göre daha az kesin bir şekilde belirlenebilmesidir. Bu nedenleri göz önünde bulundurarak DTA analizi ile reaksiyona bağlı olarak numunelerin sadece Kaolen, Manyezit ve Dolomit içeriğini belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında aşağıdaki bilgiler kullanılmıştır.

##### 4.6.1. Kaolen mineralinin termal davranışı

###### 4.6.1.1. Kaolen ( $kaolen-T_c$ ) – $Al_2Si_2O_5(OH)_4$



Şekil 4.17. Kaolen'in termogravimetrik eğrileri

Örnek: Gürcistan (Uluslararası Standart, Kil Mineralleri Derneği) [79].

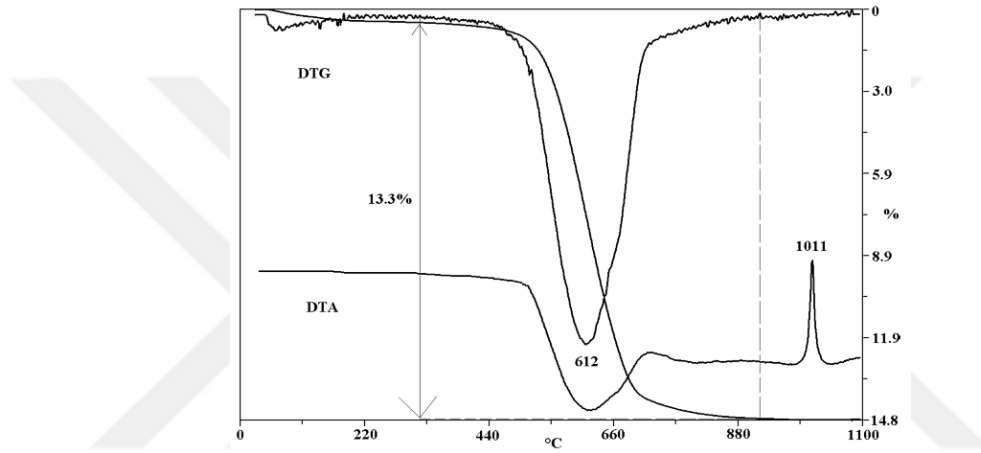
- Örnek kütle: 130 mg
- Isıtma hızı: 10 °C/dak
- Dehidroksilasyon sırasında kütle kaybı: % 13.28
- Reaksiyona göre numunenin kaolinit içeriği: %95

Buna istinaden %100 kaolen (kaolen-T<sub>c</sub>) içeren bir numunenin dehidroksilasyon sırasında %13,98 kütle kaybı olmaktadır.

#### Reaksiyonlar:

- i. 530–590 °C: **endotermik**:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (amorft meta-kaolen) +  $\text{H}_2\text{O}$ : **dehidroksilasyon**
- ii. 900–1000 °C: **ekzotermik**:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$  (birincil müllit veya psödo-müllit) +  $\text{SiO}_2$  (amorft silika) +  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (spinel alümina): **amorft meta-kaolen'in kristal fazlara dönüşümü**

#### 4.6.1.2. Dikit (kaolen-2M) – $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$



Şekil 4.18. Dikit'in termogravimetrik eğrileri

Örnek: Sondaj Sárospatak–65 10,2 m, Macaristan [79].

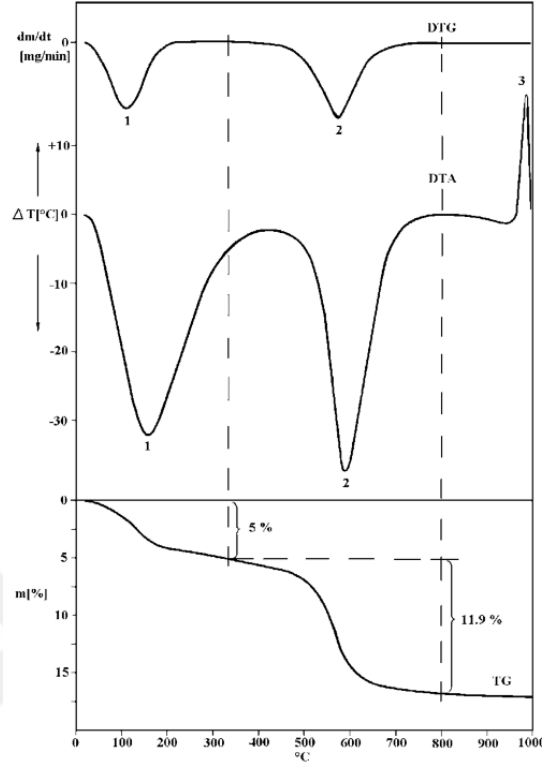
- Numune kütlesi: 118,9 mg
- Isıtma hızı: 10 °C/dak
- Dehidroksilasyon sırasında kütle kaybı: %13,31
- Reaksiyona göre numunenin dikit içeriği: %95

Buna istinaden %100 dikit (kaolen-2M) içeren bir numunenin dehidroksilasyon sırasında %14,01 kütle kaybı olmaktadır.

#### Reaksiyonlar:

- i. 600–670 °C: **endotermik**:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (amorft meta-dikit) +  $\text{H}_2\text{O}$ : **dehidroksilasyon**
- ii. 990–1020 °C: **ekzotermik**:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$  (müllit): **amorft meta-kaolen'in kristal fazlara dönüşümü**

#### 4.6.1.3. Fireclay (kaolen-1M<sub>d</sub>) – Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>.nH<sub>2</sub>O (n<2)



Şekil 4.19. Fireclay'in termogravimetrik eğrileri

Örnek: Almanya [79].

- Örnek kütle: 1000 mg
- Isıtma hızı: 17 °C/dak
- Dehidrasyon sırasında kütle kaybı: %5,0
- Dehidroksilasyon sırasında kütle kaybı: %11,9
- Reaksiyona göre numunenin Şamot içeriği: 90%

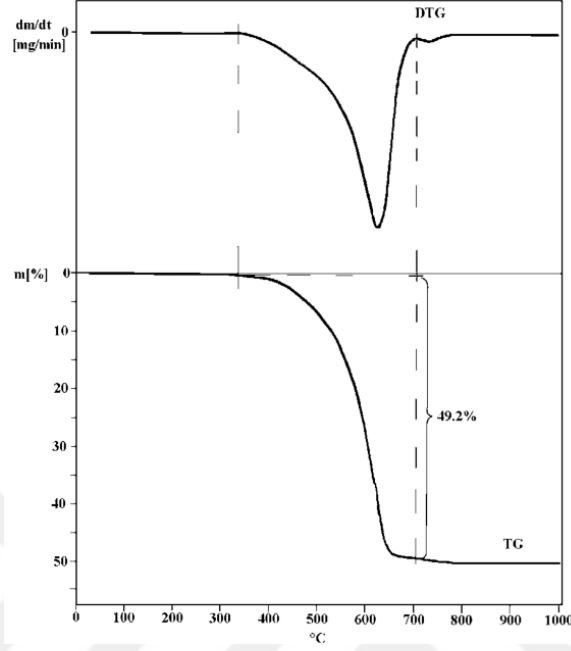
Buna istinaden %100 Fireclay (kaolen-1M<sub>d</sub>) içeren bir numunenin dehidroksilasyon sırasında %13,22 kütle kaybı olmaktadır.

#### Reaksiyonlar:

- 40–200 °C: **endotermik**: Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>.nH<sub>2</sub>O → Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub> (amorf meta-kaolen) + nH<sub>2</sub>O: **dehidrasyon**
- 530–590 °C: **endotermik**: Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> → Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub> (amorf meta-kaolen) + H<sub>2</sub>O: **dehidroksilasyon**
- 900–1000 °C: **ekzotermik**: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub> → 2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3SiO<sub>2</sub> (birincil müllit veya psödo-mullit) + SiO<sub>2</sub> (amorf silika) + γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (spinel alümina): **amorf meta-kaolen'in kristal fazlara dönüşümü**

## 4.6.2. Karbonat minerallerinin termal davranışı

### 4.6.2.1. Manyezit ( $MgCO_3$ )



Şekil 4.20. Manyezitin termogravimetrik eğrileri

Örnek: Hnusta, Slovakya [79].

- Örnek kütle: 900 mg
- Isıtma hızı: 10 °C/dak
- Ayrışma sırasında kütle kaybı: %49,2
- Ayrışmaya dayalı numunenin manyezit içeriği: %95

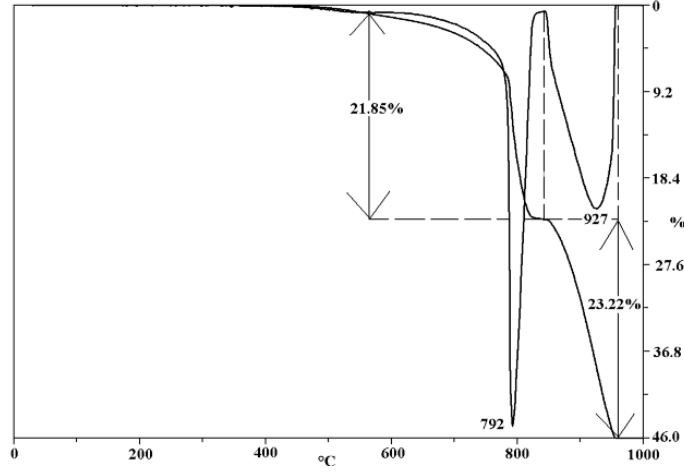
Buna istinaden %100 Manyezit içeren bir numunenin bozunma sırasında %51,79 kütle kaybı olmaktadır.

#### Reaksiyon:

- Endotermik ayrışma (bozunum) 620–650 °C'de gerçekleşir:  $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$

Bozunma sıcaklıkları artan demir (Fe) ikamesi ile belirgin şekilde azalır.

#### 4.6.2.2. Dolomit $MgCa(CO_3)_2$



Şekil 4.21. Dolomitin termogravimetrik eğrileri

Örnek: Gellért Tepesi, Budapeşte, Macaristan [79].

- Numune kütlesi: 267,9 mg
- Isıtma hızı: 10 °C/dak
- İlk ayrışma sırasında kütle kaybı: %21,85
- İkinci ayrışma sırasında kütle kaybı: %23,22
- İlk reaksiyona göre numunenin dolomit içeriği: %92
- Numunedeki diğer termal olarak aktif mineraller: kalsit (%3), kil minerali

Buna istinaden %100 Dolomit içeren bir numunenin ilk bozunma sırasında %23,75 kütle kaybı olmaktadır.

#### Reaksiyonlar:

- 750–800 °C'de: **endotermik**:  $MgCa(CO_3)_2 \rightarrow CaCO_3 + MgO + CO_2$  (ilk dolomit piki, daha karmaşık yapısı nedeniyle, manyezit reaksiyonundan daha yüksek sıcaklıkta meydana gelir)
- 840 ve 950 °C arası: **endotermik**:  $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

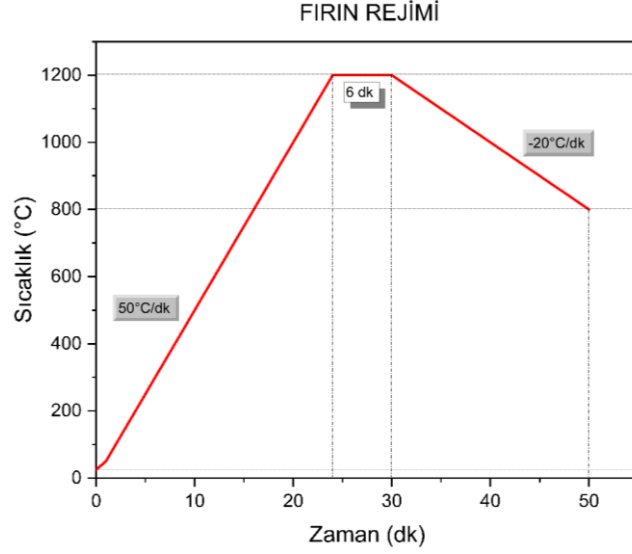
Bu hesaplamaları ve numunelerin TG-DTA eğrilerini göz önünde bulundurarak farklı hammaddelerin kaolen, manyezit ve dolomit içeriği belirlenmiştir. Daha sonra hazırlanan reçetelere ve hammaddelerin yüzdesine bağlı olarak reçetelerin kaolen, manyezit ve dolomit içeriği hesaplanmıştır. Hesaplamalar Tablo 4.13 'te verilmiştir.

**Tablo 4.13.** Numunelerin TG-DTA eğrisine göre hesaplanan kaolen, manyezit ve dolomit miktarı

Reçete Kodu	Kaolen İçeriği (%ağ.)	Manezit içeriği (%ağ.)	Dolomit içeriği (%ağ.)
A-1	22,20493	0,25990	0,03729
A-2	8,13711	0,21798	0,03128
A-3	23,81198	0,30182	0,04331
A-4	9,49182	0,31021	0,04451
A-5	23,68038	1,65165	0,23699
A-6	8,02112	1,42528	0,20451
A-7	23,56690	2,23014	0,32000
A-8	9,20043	1,69357	0,24301

#### 4.7. Porselen Karo Bünyelerinin Hazırlanması

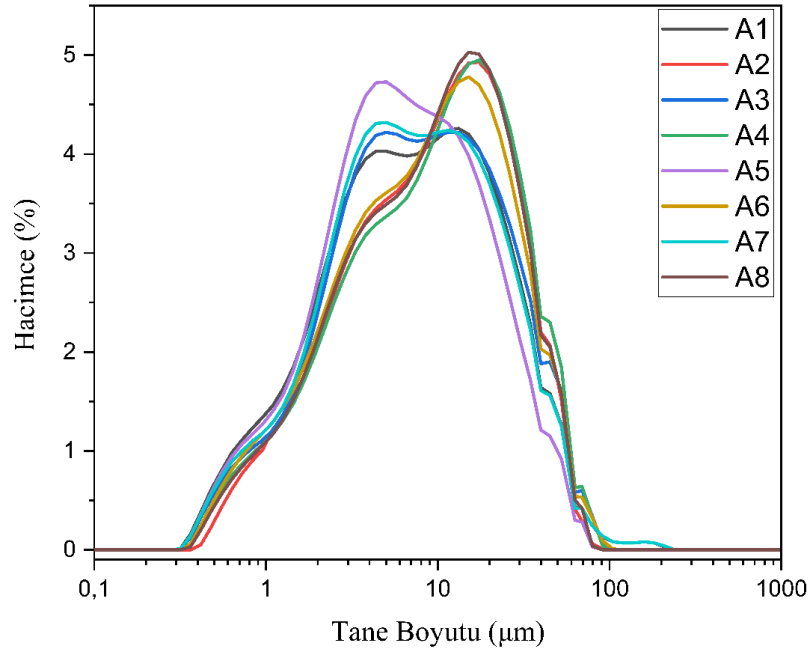
İlk reçetelerin deneme tartımları, toplam reçete ağırlığı 500 g. üzerinden hesaplanarak yapılmıştır. Hammaddeler etüvde kurutulmuştur. Süspansiyonlar, katı içeriği ağırlıkça yaklaşık %65 olacak şekilde hazırlandı ve ağırlıkça %0.7 Sodyum silikat dispersan ile stabilize edildi. Reçete yüzdelere göre tartımları yapılan hammaddeler, 63 µm elek bakiyesi %2'in altında elde edilinceye kadar, 36-44 dakika aralığında süreler ile alümina bilyeli değirmenlerde öğütülmüşlerdir. Daha sonra 150 °C'lik etüvde kurutulup, halkalı öğütücü ile toz haline getirilmişlerdir. Bu tozlar, püskürtme kontrollü bir şekilde %5,5–6 oranında nemlendirilerek preslemeye hazır granül haline getirilmiştir. Nem homojenliği için bir gece bekletilen granüller, tek yönlü kuru preste 110 bar (420 kg/cm<sup>2</sup>) basınçla 50mm x 100 mm boyutunda şekillendirilmiştir. Şekillendirilen karoların bünyelerindeki nemi tamamen uzaklaştırana kadar 110 °C 'lik etüvde kurutulmuştur. Hazırlanan her bir reçete için beş numune hazırlanmış; bu numunelerden birer tanesi fleximetre ile deformasyon tayininde kullanılmıştır, diğer dört tanesi ise her bir reçete için belirlenen pişirim sıcaklığı için kullanılmıştır. Numuneler porselen karosu fırın rejimine göre 50 dakikalık çevrim süresi ile pişirilmiştir. Bunun için toplam 24 dk'lık bir süreçte 50°C/dk sıcaklık artışı ile tepe sıcaklığa ulaşım, tepe sıcaklığında 6 dk bekleyip, 20°C/dk ile toplam 20 dk'lık bir süre de soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. Çalışmalarda kullanılan fırın (ısıtma ve soğutma) rejimi.

#### 4.8. Hazırlanan Reçetelerin Tane Boyutu Dağılımı

Bünye çamurlarının tane boyut ve dağılımları lazer difraksiyon tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Hazırlanan reçetelerin tane boyutunu kontrol altında tutmak ve olabildiği kadar tane boyutlarını sabitlemek için bilyalı değirmen kullanılmıştır. Hazırlanan reçetelerin 63 µm elek bakiyesi %2'in altında elde edilinceye kadar değirmende öğütülmüş ve 63 µm elek bakiyesi %2'in altına indiğinde öğütme durdurulmuş ve çamurun tane boyut dağılımı lazer difraksiyon tekniği ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.23 'de verilmiştir.



Şekil 4.23. Hazırlanan reçetelerin tane boyut dağılımı

Elek bakiyesi dışında masse reçetelerinin koloidal tane boyut oranı da seramik kaplama malzemelerinin gerek süreç parametrelerine gerekse son özelliğine etki eden bir parametre olduğu bilinmektedir. Buna esasen reçetelerin koloidal tane boyutu da birbirinden çok farklılık göstermemesi için öğütme çalışmalarında dikkat edilmiştir. Koloidal tane boyutu yani 2 µm dan daha küçük taneler hacimce %11-%14 aralığında sabit tutulmaya özen gösterilmiştir. Böylece hem elek bakiyenin hem koloidal tane boyutunu kontrol altına aldığımızda tane boyut etkeninin etkisini son özelliklerde minimuma düşürme şansına sahip olmaktadır.

Reçetelerin öğütme süresi ve tane boyut dağılımı ile ilgili detaylı bilgiler Tablo 4.13'te verilmiştir.

**Tablo 4.14.** Reçetelerin lazer difraksiyon tekniği ile ölçülen tane boyut analiz sonuçları (%hacimce)

Reçete kodu	Öğütme süresi (dk)	d10	d50	d90	d97	<2 µm	>63 µm
A1	36	1,478	7,715	31,842	51,82	%14,53	%1,63
A2	36	1,772	10,145	34,150	49,41	%11,62	%0,77
A3	36	1,692	8,171	33,775	53,37	%12,38	%1,57
A4	43	1,815	10,789	36,678	54,65	%11,28	%1,64
A5	36	1,529	6,728	26,635	43,44	%14,12	%0,61
A6	41	1,694	9,636	34,490	52,88	%12,29	%1,50
A7	39	1,608	7,640	31,626	51,83	%13,19	%1,64
A8	44	1,836	10,316	34,342	50,38	%11,18	%0,95

## 5. STANDART TEST VE KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

Deney tasarım yöntemi ile 8 farklı özellik ele alınmıştır. Bunlar yoğunluk, su emme, (lineer) pişme küçülmesi, mukavemet, Young modülü, Deformasyon davranışları (pyroplastik indeksi ve camsı faz viskozitesi) ve 500 °C ‘deki ısıl genleşme katsayısını içermektedir. Nihai örneklerle yapılan testlerin yöntemleri bu kısımda açıklanmıştır.

### 5.1. Yoğunluk Ölçümü

Sinterlenen numunelerin Archimed prensibine göre yığınsal yoğunluğu Denklem (5.1) ile hesaplanmıştır. Yığınsal yoğunluk numune kütlesi/yığınsal hacim olarak tanımlanmaktadır [77].

$$Yığınsal (bulk)yoğunluk \quad B = \left( \frac{W_K}{W_D - W_A} \right) \times \rho_{su} \quad (5.1)$$

Burada;

$W_K$  :Kuru numunenin havadaki ağırlığı (g)

$W_A$  :Su emdirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı (g)

$W_D$  :Su emdirilmiş (doymuş) numunenin havadaki ağırlığı (g)

$\rho_{su}$  :Su yoğunluğu

### 5.2. Su Emme

Sinterlenen karolardan kesilen numunelere su emme testi TS EN ISO 10545-3 su emme tayinine göre; numunelerin kaynatma cihazına yerleştirilmesi ve suyun kaynamasından itibaren 2 saat süresince kaynatılması ve 4 saat bekletilmesiyle yapılmış ve Denklem (5.2) ile su emme değerleri hesaplanmıştır.

$$\% su emme = \left( \frac{W-D}{D} \right) \times 100 \quad (5.2)$$

Burada;

$D$  :Kuru Ağırlık

$W$  :Su emdirilmiş Ağırlık

### 5.3. Boyut Değişiminin Ölçülmesi

Küçülmenin bilinmesi, kuruma ve pişme sırasında malzemenin istenen boyutlarda olabilmesi için kalıp boyutlarının bu küçülmelere göre ayarlanmasına imkan sağlar. Seramik mamüllerin kurutulduklarında bünyelerinin küçülmesi, şekillendirme suyunun bünyeden uzaklaşması ile açıklanabilir. Hammadde tanecikleri arasındaki su sıcaklık ile bünyeden uzaklaşınca taneler birbirine yaklaşıyor küçülme olur. Küçülme genellikle

yüzde olarak ifade edilirse de doğrusal, alansal veya hacimsel olarak ayrı ayrı belirlenebilir.

Hazırlanan 50 mm x 100 mm ebatlarındaki karoların ham, kuru ve pişmiş boyutları kumpas yardımıyla ölçülmüş Denklem (5.3) ile her bir numunenin % pişme küçülmesi değeri hesaplanmıştır.

$$\% (lineer) \text{ Pişme küçülmesi} = \left( \frac{I_1 - I_2}{I_1} \right) \times 100 \quad (5.3)$$

Burada;

$I_1$  :Kuru numune boyu (mm)

$I_2$  :Pişmiş numune boyu (mm)

#### 5.4. Mukavemet Ölçümleri

Numunelerin pişmiş mukavemeti TS EN ISO 10545-4 standardına göre üç noktalı eğme testi ile belirlenmiştir. Cihazın destek ayakları üzerine yerleştirilen karoya giderek artan yükü kırılıncaya kadar basınç uygulanmış ve Denklem (5.4) kullanılarak pişmiş mukavemet belirlenmiştir.

$$\sigma = \left( \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2} \right) N/mm^2 \quad (5.4)$$

Burada;

$P$  :Kırılma yükü (N)

$L$  :Destekler arası uzaklık (mm)

$b$  :Numunenin kırılan yüzeyinin eni (mm)

$d$  :Numunenin kırılan yüzeyindeki yükseklik (mm)

#### 5.5. Ultrasonik Muayene ve Elastisite Modülleri

Ultrasonik dalgaların malzeme içerisinde, Ultrasonik dalga üretebilme ve dalgaları algılayabilme özelliğine sahip olan prob aracılığıyla bir demet halinde gönderilmesi ve malzemenin iç yapısına bağlı olarak değişimlere uğrayan dalga demetinin malzemedan çıktığı anda kullanılan prob aracılığı ile alınarak değişimlerinin saptanmasına Ultrasonik muayene ismi verilir. Ultrasonik dalgalar ara yüzeylerden kuvvetle yansır. Çatlaklar, ince tabaka toplanmaları, büzölmeler, çukurlar, boşluklar, gözenekli kısımlar ve iç yapıda sürekliliği bozan yapılar ara yüzey oluşturduklarından kolaylıkla incelenebilmektedir. Malzeme içinde oluşan Ultrasonik dalga çeşitlerinin en önemlileri, ortam parçacıklarının titreşim şekline ve yayılma yönüne göre ‘‘boyuna, enine ve yüzey’’ dalgaları olmak üzere üç gruba ayrılır.

Boyuna dalgalar veya basınç dalgaları ( $C_b$ ) yayıldığı ortamın parçacıklarını sıkıştırma ve gevşemeye zorlayarak hareket eder ve yayılma yönü titreşim yönü ile aynı, yani paraleldir. Titreşim yönü yayılma yönüne dik olan dalgalara ise, enine veya kesme dalgaları ismi verilir. Enine dalgalar, yayıldıkları ortam parçacıklarını çapraz yönde çekmeye zorlar. Enine dalga hızı ( $C_e=C_b/2$ ), boyuna dalga hızının yaklaşık yarısıdır. Yüzey (Rayleigh) dalgaları, sadece malzemenin yüzeyinde yayılabilmektedir. Yüzey dalgalarının hızı, aynı malzemede enine dalgalar hızının yaklaşık %90'dır ve malzeme yüzeyinden en fazla 1 dalga boyu derinlikte yayılabilir. ( $C_y=0,9C_e$ ). Yüzey dalgaları daha ziyade, yüzeye yakın çatlakların tespiti ve karmaşık şekilli malzemelerin testinde kullanılır.

Boyuna, enine ve yüzey dalgalarının hızları, frekansa ve malzeme boyutundan bağımsız olarak, malzemenin yoğunluğuna ve Elastisite modüllerine bağlıdır. Boyuna, enine ve yüzey dalgalarının hızları, Elastisite modülleri ve poisson oranlarına bağlı olarak aşağıdaki denklemlerde verilmiştir;

$$\mu = \frac{1-2(V_e/V_b)^2}{2-2(V_e/V_b)^2} \quad (5.5)$$

$$E = V_b^2 \times \rho \left( \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \right) \quad (5.6)$$

Burada;

$t_b, t_e$  :Sırasıyla boyuna ve enine dalgalarının tekrar süreleri ( $\mu s$ )

$T$  :Kalınlık (mm)

$\rho$  :Yoğunluk ( $kg/m^3$ )

$V_b$  :Boyuna dalgalarının hızları (m/s) [ $V_b = \left( \frac{T}{t_b/2} \right) \times 10^3$ ]

$V_e$  :Enine dalgalarının hızları (m/s) [ $V_e = \left( \frac{T}{t_e/2} \right) \times 10^3$ ]

$\mu$  :Poisson oranı

$E$  :Young (Elastisite) modülü

Yukarıdaki denklemlerden görüleceği gibi, bir malzemede boyuna, enine ve yüzey dalgası hızlarını ölçerek, o malzemenin Elastisite ve kayma modüllerini tayin etmek mümkündür. Bu çalışmada bu teknik ve bağlantılardan yararlanarak malzemelerin Elastisite modülleri hesaplanmıştır.

## 5.6. Deformasyon Davranışının Belirlenmesi

Bünyelerin deformasyon davranışları Misura Flex 3.32-ODHT-HSM 1600/80 marka ve model fleksimetre cihazı kullanılarak 1200 °C’de incelenmiştir. 86 mm uzunluk, 6 mm kalınlığında hazırlanan iki alümina destek üzerine yerleştirilen ham numunelerin orta noktaları kameralar aracılığıyla takip edilerek ısıtma işlemi süresince (+) ya da (-) yöndeki deformasyon davranışları incelenmiştir.

Fleximetre sonuçlarından yola çıkarak numunelerin pyroplastik indeks (PI) ve camsı viskozite değeri (E) hesaplanmıştır. Pyroplastik indeks ve viskozite hesaplamaları yapılırken, numunelerin maksimum tepe sıcaklığındaki (1200 °C) değerleri kullanılmıştır.

Pyroplastik indeks (PI) ve camsı faz viskozite değeri (E) aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır.

$$P.I. = sb^2/L^4 \quad (5.7)$$

Burada;

s :maksimum deformasyon(cm)

b :numune kalınlığı(cm)

L :destekler arası mesafe(cm)

$$E = (5pgL^4)/(32s_{max}b^2) \quad (5.8)$$

Burada;

p :bulk yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)

g :yerçekimi ivmesi (cm/s<sup>2</sup>)

L :destekler arası mesafe (cm)

s<sub>max</sub> :maksimum deformasyon (cm/s)

## 5.7. Doğrusal Isıl Genleşme Katsayısı Tayini

Pişmiş bünyelerin doğrusal ısıl genleşme katsayıları Netzsch marka DIL 402 PC model dilatometre cihazı ile tayin edilmiştir. Sinterlenen bünyeler kesilerek, boyutları elmas diske sahip kesme cihazında 5x5x50 mm’ye (genişlik x kalınlık x uzunluk) getirilmiş, kenar paralellikleri sağlanmış ve cihaza yerleştirilerek 10 °C/dak ısıtma hızıyla 650 °C’ye kadar ısıtılarak analizleri gerçekleştirilmiştir.

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Bu kısımda A1-A8 numunelerinin iki farklı sıcaklıkta (1180 °C ve 1200 °C) ve merkez noktası olan A9 reçetesinin 1190 °C sıcaklığındaki fiziksel, termal ve deformasyon özellikleri verilmiştir.

### 6.1. Fiziksel ve Termal Özellikler

Bu kısımda numunelerin su emme, yoğunluk, mukavemet, pişme küçülmesi ve ısı genleşme katsayısı sonuçları verilmektedir.

**Tablo 6.1.** Deney tasarımı için hazırlanan numunelerin fiziksel ve termal özellik test sonuçları

Numune	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Su emme (%)	Mukavemet (kg/cm <sup>2</sup> )	Pişme küçülmesi (%)	Isıl genleşme katsayısı (500°C)× 10 <sup>-7</sup>
A1-1180 °C (1)	2,42	0,10	599,6	8,99	77,916
A2-1180 °C (1)	2,15	5,80	366,9	6,79	88,248
A3-1180 °C (1)	2,40	0,52	639,0	8,56	72,530
A4-1180 °C (1)	2,14	6,11	369,9	6,67	85,150
A5-1180 °C (1)	2,45	0,00	643,9	9,88	78,052
A6-1180 °C (1)	2,35	0,27	527,9	10,17	93,446
A7-1180 °C (1)	2,44	0,00	581,4	10,06	73,817
A8-1180 °C (1)	2,37	0,15	579,1	10,73	89,334
A1-1200 °C (1)	2,42	0,00	573,7	8,94	77,961
A2-1200 °C (1)	2,35	0,09	478,6	9,31	94,833
A3-1200 °C (1)	2,42	0,00	563,4	8,69	73,645
A4-1200 °C (1)	2,32	0,46	511,1	9,98	88,086
A5-1200 °C (1)	2,43	0,00	541,1	9,34	76,034
A6-1200 °C (1)	2,36	0,00	425,6	10,21	93,748
A7-1200 °C (1)	2,43	0,00	459,1	9,42	71,903
A8-1200 °C (1)	2,36	0,00	563,3	10,53	88,201
A1-1180 °C (2)	2,42	0,12	615,8	8,93	77,811
A2-1180 °C (2)	2,15	5,90	381,8	6,84	88,112
A3-1180 °C (2)	2,39	0,57	637,0	8,40	72,770
A4-1180 °C (2)	2,14	6,14	340,9	6,65	85,270
A5-1180 °C (2)	2,45	0,00	621,2	9,82	78,110
A6-1180 °C (2)	2,34	0,38	516,8	10,11	93,489
A7-1180 °C (2)	2,44	0,00	581,4	10,09	73,770
A8-1180 °C (2)	2,37	0,12	582,5	10,77	89,414
A1-1200 °C (2)	2,42	0,00	579,8	8,67	77,615
A2-1200 °C (2)	2,35	0,08	508,9	9,39	94,590
A3-1200 °C (2)	2,42	0,00	530,1	8,55	73,377
A4-1200 °C (2)	2,34	0,56	520,3	9,92	88,586
A5-1200 °C (2)	2,42	0,00	554,5	9,17	76,198
A6-1200 °C (2)	2,35	0,00	442,6	10,18	93,504
A7-1200 °C (2)	2,43	0,00	456,5	9,13	72,269
A8-1200 °C (2)	2,36	0,00	569,5	10,47	88,008

## 6.2. Elastisite Modülleri

Numunelerin poisson oranları ve Young modülleri bölüm 5.5 ve 5.6 denklemler ile hesaplanmış, sonuçlar Tablo 6.2 'de verilmiştir.

**Tablo 6.2.** Deney tasarımı için hazırlanan numunelerin elastisite modülleri test sonuçları

Numune	Kalınlık (mm)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Boyuna tekrar süresi (μs)	Enine tekrar süresi (μs)	Poisson Oranı	Young Modülü (GPa)
A1-1180 °C (1)	6,14	2420	2,04	3,40	0,2188	76,95
A1-1180 °C (2)	6,05	2420	2,04	3,40	0,2188	74,71
A2-1180 °C (1)	7,07	2150	3,24	5,30	0,2016	36,78
A2-1180 °C (2)	7,43	2150	3,3	5,0	0,1141	42,31
A3-1180 °C (1)	5,70	2400	2,0	3,30	0,2097	69,30
A3-1180 °C (2)	6,27	2390	2,2	3,52	0,1795	71,55
A4-1180 °C (1)	6,90	2140	2,84	5,10	0,2753	39,96
A4-1180 °C (2)	6,80	2140	2,88	5,0	0,2517	39,64
A5-1180 °C (1)	5,46	2450	1,96	3,0	0,1276	73,21
A5-1180 °C (2)	5,86	2450	2,12	3,10	0,0607	74,29
A6-1180 °C (1)	5,88	2350	2,08	3,30	0,1704	69,86
A6-1180 °C (2)	6,24	2340	2,28	3,50	0,1314	67,32
A7-1180 °C (1)	6,49	2440	2,12	3,50	0,2102	81,23
A7-1180 °C (2)	6,62	2440	2,16	3,60	0,2188	80,45
A8-1180 °C (1)	6,61	2370	2,08	3,70	0,2690	76,79
A8-1180 °C (1)	6,48	2370	1,96	3,60	0,2893	79,21
A1-1200 °C (1)	6,20	2420	2,08	3,40	0,2010	77,31
A1-1200 °C (2)	6,05	2420	2,04	3,60	0,2635	69,09
A2-1200 °C (1)	6,70	2350	2,44	3,80	0,1492	67,17
A2-1200 °C (2)	6,63	2350	2,44	3,60	0,0751	68,56
A3-1200 °C (1)	5,43	2420	1,84	3,0	0,1985	76,01
A3-1200 °C (2)	5,95	2420	2,04	3,40	0,2188	72,26
A4-1200 °C (1)	6,42	2320	2,44	3,80	0,1492	60,88
A4-1200 °C (4)	6,69	2340	2,56	4,0	0,1531	60,38
A5-1200 °C (1)	5,60	2430	1,76	3,0	0,2376	83,83
A5-1200 °C (2)	5,62	2420	1,80	3,0	0,2188	82,80
A6-1200 °C (1)	6,61	2360	2,28	3,6	0,1651	74,16
A6-1200 °C (2)	6,79	2350	2,32	3,80	0,2029	72,20
A7-1200 °C (1)	6,21	2430	2,04	3,40	0,2188	79,04
A7-1200 °C (2)	6,33	2430	2,08	3,40	0,2010	80,92
A8-1200 °C (1)	6,46	2360	2,24	3,60	0,1841	71,99
A8-1200 °C (2)	6,44	2360	2,24	3,60	0,1841	71,54

## 6.3. Deformasyon Özellikleri

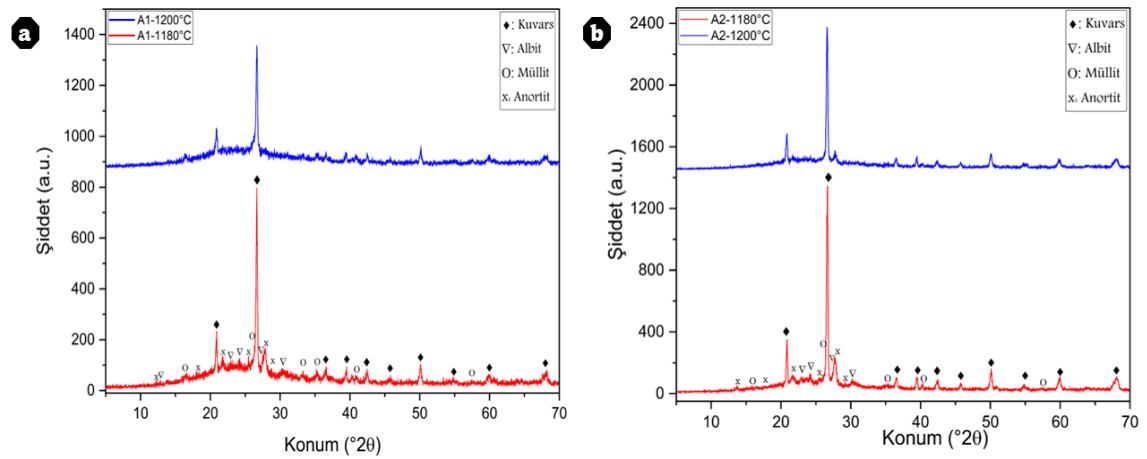
Numunelerin pyroplastik indeks (PI) ve camsı faz viskozite değerleri (E) 5.7 ve 5.8 denklemlerine göre hesaplanmış, sonuçlar Tablo 6.3 'de verilmiştir.

**Tablo 6.3.** Numunelere ait 1200°C deki Pyroplastik indeks ve camsı faz viskozite değerleri

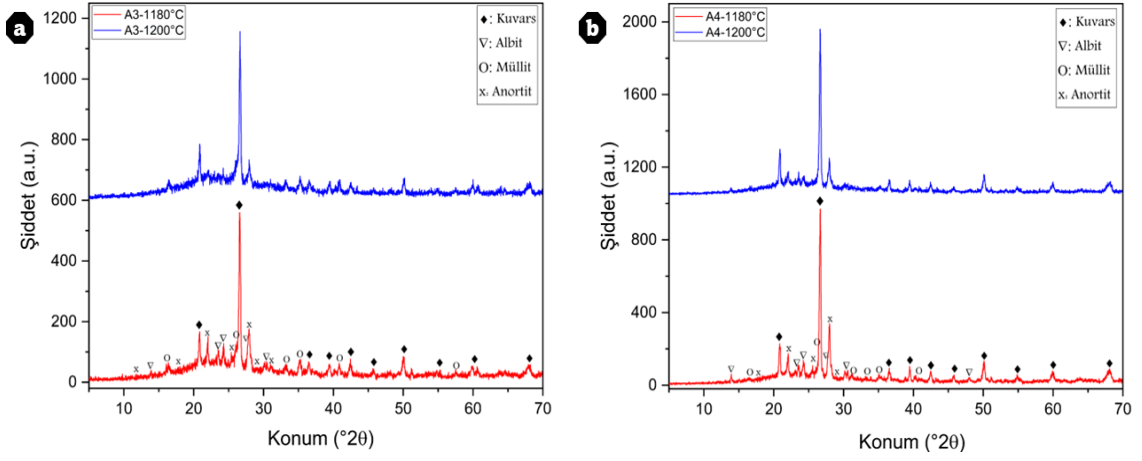
Numune	PI (1/cm)×10 <sup>-5</sup>	E (GPa.s)
A1 (1)	10,49	0,22
A1 (2)	10,39	0,23
A2 (1)	8,74	0,33
A2 (2)	8,77	0,30
A3 (1)	5,16	0,43
A3 (2)	5,25	0,40
A4 (1)	11,56	0,27
A4 (2)	11,14	0,29
A5 (1)	9,47	0,17
A5 (2)	9,74	0,16
A6 (1)	9,51	0,25
A6 (2)	9,44	0,23
A7 (1)	10,89	0,13
A7 (2)	10,91	0,16
A8 (1)	9,30	0,23
A8 (2)	9,46	0,22

#### 6.4. Faz Analizi

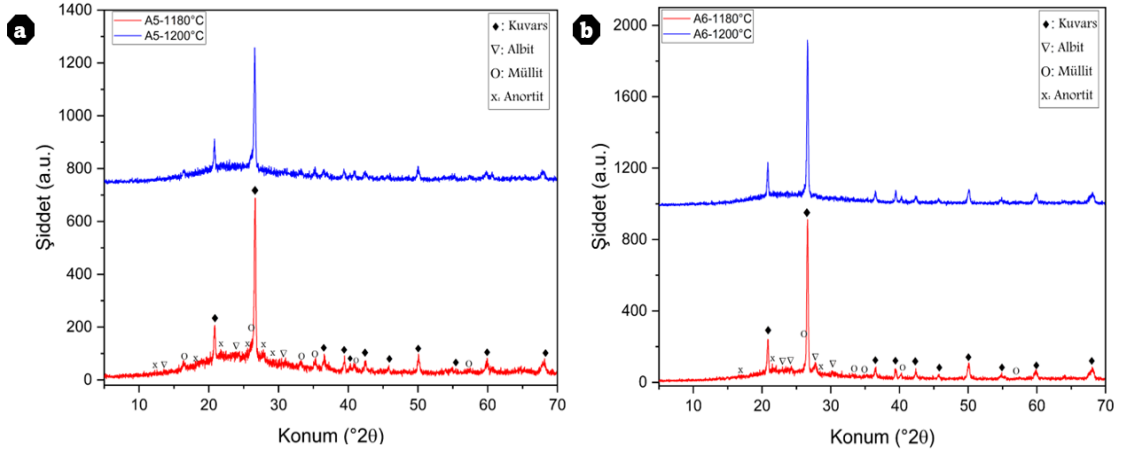
Deney tasarımı kapsamında 8 farklı reçete 2 farklı sıcaklıktan (1180°C ve 1200°C) oluşan reçetelerimiz sinterlenmiştir. Sinterlenme sonucu bünyelerden oluşan fazlar ve faz miktarları kalitatif ve kantitatif yöntemler ile belirlenmiş, sonuçlar aşağıda verilmiştir. Kantitatif faz analizi XRD desenlerini ele alarak MUAD [78] yöntemini kullanarak hesaplanmıştır.



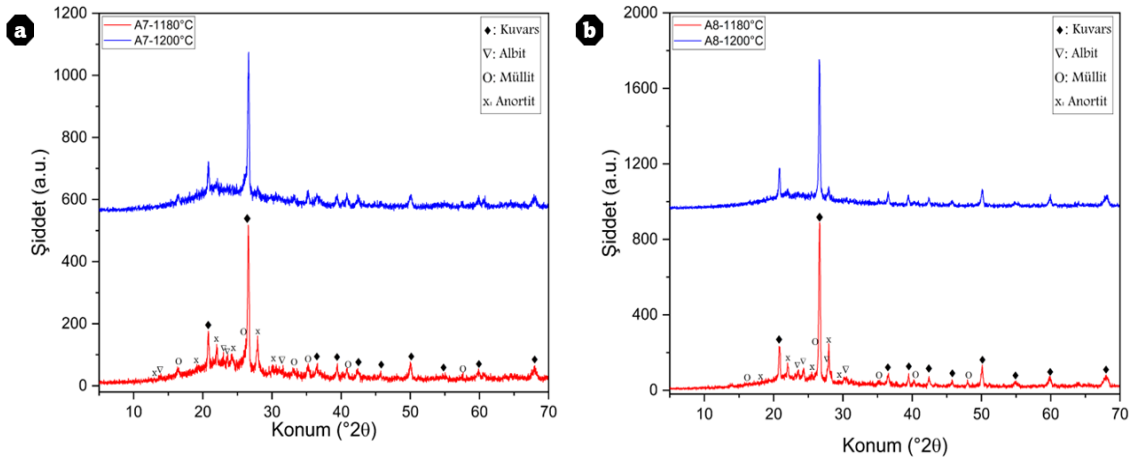
**Şekil 6.1.** a) A-1 ve b) A-2 kodlu reçetelere ait XRD desenleri



Şekil 6.2. a) A-3 ve b) A-4 kodlu reçetelere ait XRD desenleri



Şekil 6.3. a) A-5 ve b) A-6 kodlu reçetelere ait XRD desenleri



Şekil 6.4. a) A-7 ve b) A-8 kodlu reçetelere ait XRD desenleri

Bünyelerde meydana gelen fazların kantitatif analizi Maud Rietveld programı ile yapılmış sonuçlar Tablo 6.4 'te verilmiştir. Tablodaki Sigma değeri yapılan analizin XRD paterni ile uyum iyiliğini temsil etmektedir. Teorikte bu değer 1 ile 2 aralığında olması istenmektedir.  $R_p$  değeri ise en küçük karelerin kalıntı toplamını ifade etmektedir ve daha düşük  $R_p$  değerleri ( $R_p \leq 18$ ) işlem sonucunun daha güvenilir olduğunu işaret etmektedir.

**Tablo 6.4.** Reçetelerin kantitatif faz analiz sonuçları.

Numune	Kuvars	Müllit	Albit	Anortit	Camsı faz	Sigma	% $R_p$
A1-1180°C	13,57±0,0	8,18±0,58	6,88±0,82	1,12±0,76	70,24±1,64	1,23	13,91
A1-1200°C	11,49±0,0	8,12±0,43	1,63±0,61	1,07±0,24	77,69±1,91	1,21	13,53
A2-1180°C	23,51±0,0	2,38±0,38	7,50±2,27	7,25±0,75	59,34±1,32	1,37	15,87
A2-1200°C	19,29±0,0	2,39±0,31	3,43±0,29	5,11±0,47	69,78±1,48	1,10	13,94
A3-1180°C	14,08±0,0	8,87±0,46	10,04±0,39	4,70±2,20	62,31±3,28	1,26	16,13
A3-1200°C	11,98±0,0	9,18±0,45	3,72±0,50	1,85±0,49	73,25±1,70	1,24	15,72
A4-1180°C	22,36±0,0	4,95±0,53	11,91±0,53	3,51±0,57	57,27±1,35	1,49	18,73
A4-1200°C	19,03±0,0	4,77±0,31	5,39±0,40	2,79±0,31	68,02±1,34	1,29	16,25
A5-1180°C	13,53±0,0	7,10±0,42	0,75±0,21	1,26±0,36	77,30±1,66	1,26	14,45
A5-1200°C	11,78±0,0	7,17±0,34	0,09±0,23	0,22±0,37	80,74±1,70	1,25	16,85
A6-1180°C	23,54±0,0	3,05±0,45	4,76±0,49	0,91±0,40	67,73±1,23	1,20	15,30
A6-1200°C	21,37±0,0	2,99±0,30	0,61±0,21	0,25±0,20	74,77±1,33	1,22	15,45
A7-1180°C	13,48±0,0	6,53±0,34	1,65±0,48	1,66±0,93	76,66±2,12	1,23	15,81
A7-1200°C	11,47±0,0	6,42±0,38	0,36±0,17	0,79±0,24	80,94±1,84	1,23	15,77
A8-1180°C	20,24±0,0	2,30±0,24	7,42±0,41	2,29±0,49	67,72±1,30	1,32	16,40
A8-1200°C	17,83±0,0	2,58±0,27	2,70±0,36	0,86±0,40	76,03±1,44	1,25	15,47

Reçetelerin kantitatif faz analiz sonuçları değerlendirildiğinde girdi Seger değerleri ve oksit oranlarıyla karşılaştırdığımızda aşağıda verilen sonuçlar elde edilmektedir:

- Müllit miktarının artan pişirim sıcaklığı ile oranının değişmediği ve 1180°C'nin üzerindeki tepe sıcaklığı ve bekleme süresinden bağımsız olduğunu [15, 17, 76] doğrulamaktadır.
- Sinterleme sıcaklığının artışı ile albit, anortit ve kuvars parçacıklarının camsı faz da çözülmesi ile birlikte mikroyapıda camsı faz miktarının artışı gözlemlenmiştir.

- Hammadde karışımında daha yüksek SiO<sub>2</sub> içeriğine sahip reçetelerin nihai mikroyapılarında kalıntı kuvars fazının daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Mikroyapıda bulunan kalıntı kuvars miktarı ile ilgili sinterleme sıcaklığı da önem arz ettiği [15-17] için aynı sıcaklıkta (örneğin 1180 °C 'de) sinterlenen reçeteleri karşılaştırdığımızda hammadde karışımında en yüksek SiO<sub>2</sub> içeriğine sahip olan (A2, A4 ve A6) reçetelerinin son mikroyapılarında en yüksek kalıntı kuvars fazı bulduklarını gözlemlenmiştir. A7 reçetesi ise Seger formülünde en düşük SiO<sub>2</sub> değerine sahip olmakla birlikte, nihai mikroyapısında diğer reçetelere kıyasla daha düşük kalıntı kuvars fazı içermektedir. Yapıdaki kalıntı kuvars miktarı ise alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) miktarı ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir.
- Müllit oluşumu için ana bileşenler alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve silika (SiO<sub>2</sub>) dir. Bu bileşenlerin doğru oranlarda ve yeterli miktarlarda (genellikle 3:2 oranında) bulunması müllit oluşumunu destekler [2]. Dondi ve ark. [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, seramik yapıların müllit oluşumunu değerlendirmek için deneysel müllit miktarı (M<sub>den</sub>) ve potansiyel müllit miktarı (M<sub>pot</sub>) kantitatif olarak belirlenerek müllit oluşum indeksi (MOI) hesaplanmıştır (MOI= M<sub>den</sub>/M<sub>pot</sub>= 0.718 M<sub>den</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Bu formülden de yapıdaki alümina miktarının müllit oluşumu üzerinde yüksek bir etkisi olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlarına bakıldığında A1, A3 ve A5 gibi yüksek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> değerine sahip reçetelerin son mikroyapıdaki müllit miktarı diğer reçetelerden daha yüksektir. Diğer taraftan A2, A6 ve A8 reçetelerinde daha düşük Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı son mikroyapıda daha düşük müllit fazı ile sonuçlanmıştır.
- Son mikroyapıda camsı faz oranının R<sub>2</sub>O+RO/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+RO<sub>2</sub> miktarıyla ilişkili olduğu gözlemlenmektedir. Yüksek R<sub>2</sub>O+RO/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+RO<sub>2</sub> oranına sahip reçeteler, daha yüksek bir camsı faz içeriğine sahip oldukları görülmektedir. Örneğin, R<sub>2</sub>O+RO/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+RO<sub>2</sub> oranı en yüksek olan A5 ve A7 reçeteleri (~0,11), 1180 °C'de yaklaşık %77 camsı faz oranına sahip en yüksek camsı faz içeriğine sahip reçetelerdir. Öte yandan, R<sub>2</sub>O+RO/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+RO<sub>2</sub> oranı en düşük olan A2 ve A4 reçeteleri (%0,87 ve %0,90), sırasıyla %54 ve %57 camsı faz oranına sahip en düşük camsı faz içeriğine sahip reçeteler olarak belirlenmiştir. Ek olarak camsı faz miktarı, MgO+CaO ile nispeten yüksek bir pozitif

korelasyon sergilemektedir. Buda bu toprak alkali oksitlerinin varlığının, camsı faz oluşumuna ve stabilizasyonuna katkıda bulunduğunu göstermektedir.

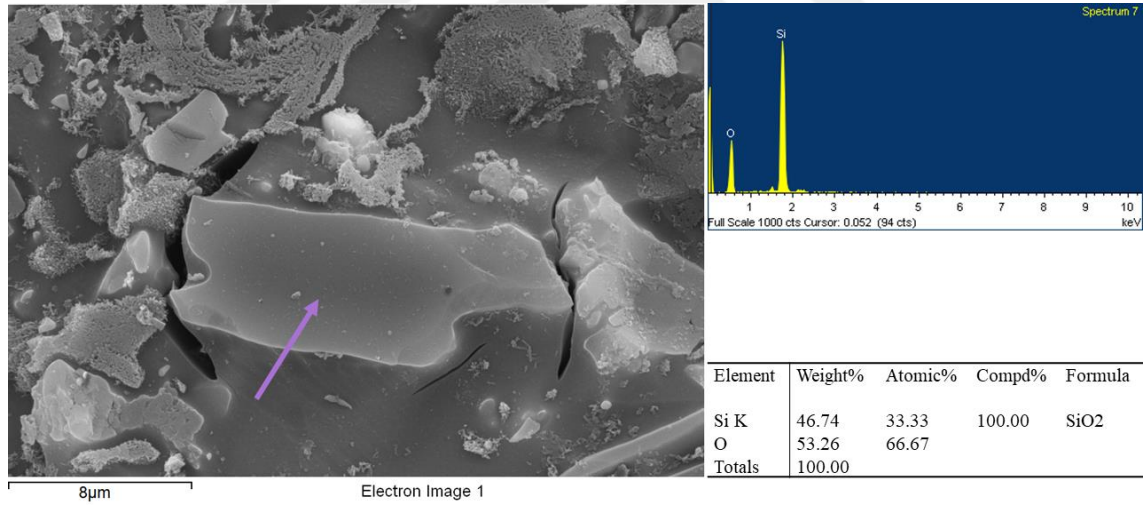
- Albit ve anortit oluşumunda ise sırasıyla hammadde de bulunan Sodyum oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ve kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) oranları son mikroyapıda bu fazların miktarı ile birebir ilişkili olduğu görülmektedir. A4 ve A3 en yüksek  $\text{Na}_2\text{O}$  seger değerine sahipken en yüksek albit fazı da son mikroyapıda bünyesinde bulundurmaktadır.

## 6.5. Mikroyapı Analizi

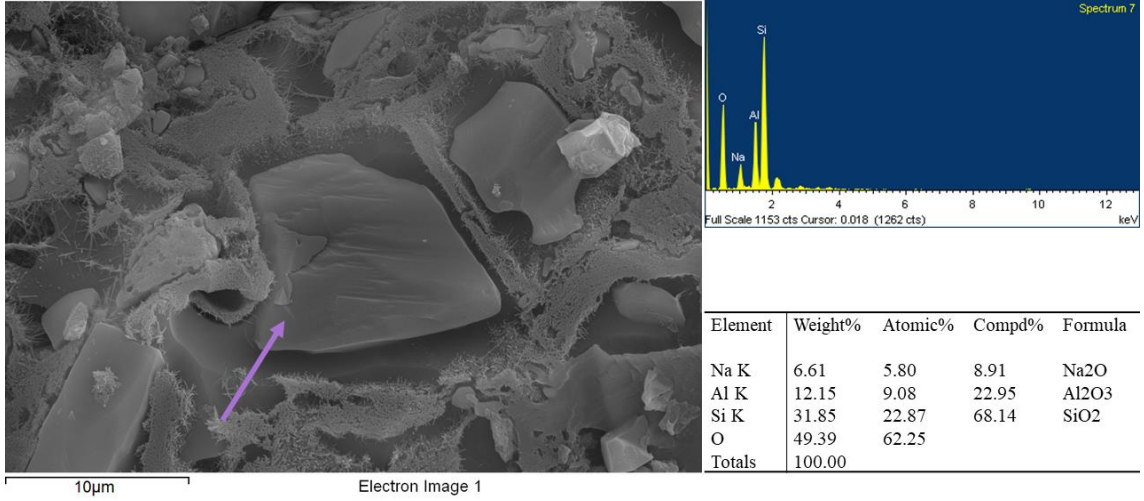
Deney tasarım kısmında hazırlanan reçetelerin SEM-EDX analizi gerçekleştirilmiş sonuçlar bu bölümde değerlendirilmiştir.

### 6.5.1. Tespit edilen fazların mikroyapısal ve kimyasal analizleri

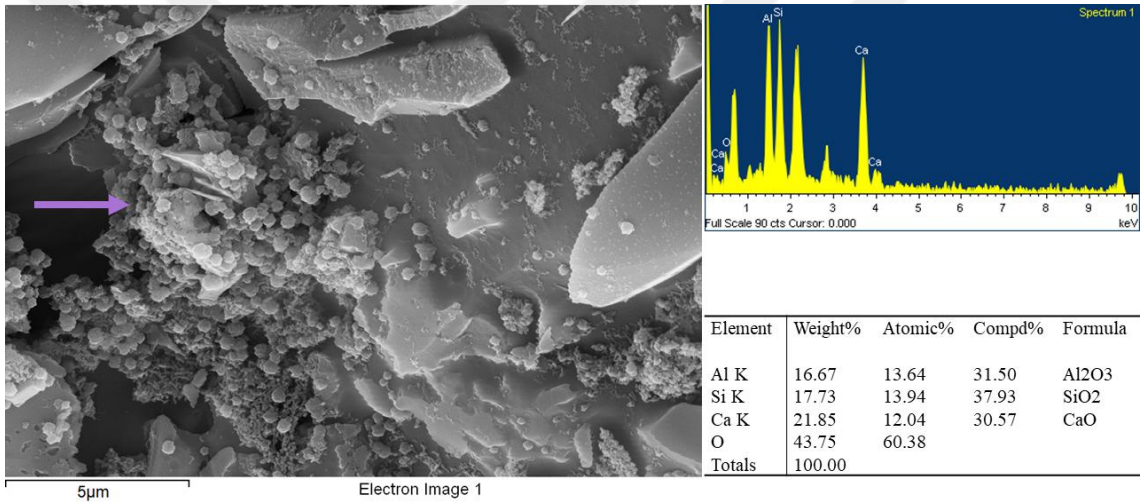
Numunelerin mikroyapılarında bulunan farklı fazların (Kuars, Müllit, albit ve anortit) şematik görüntüleri ve EDX analiziyle elde edilen kimyasal analizleri bu bölümde verilmiştir.



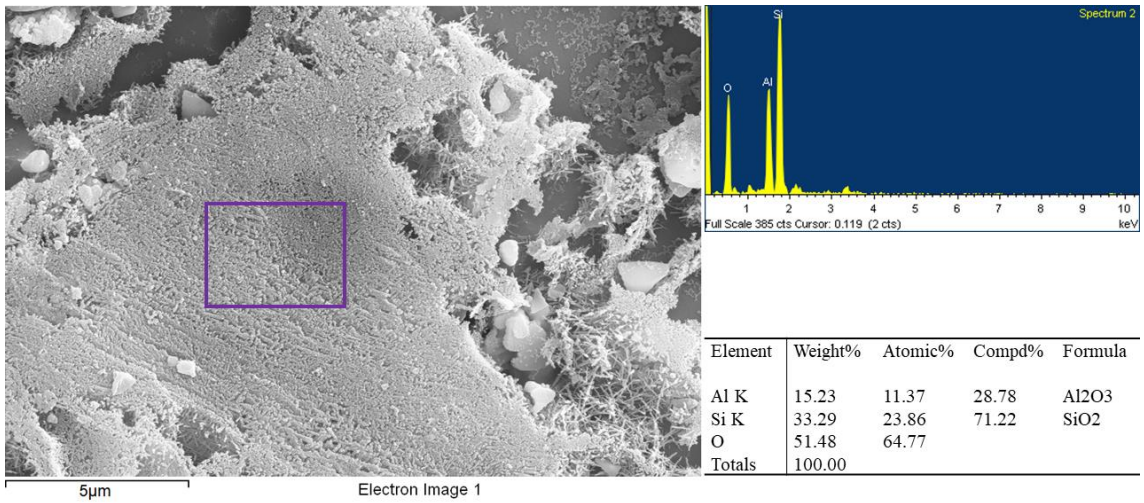
Şekil 6.5. Kuvars tanesinin şematik görünümü ve EDX analizi



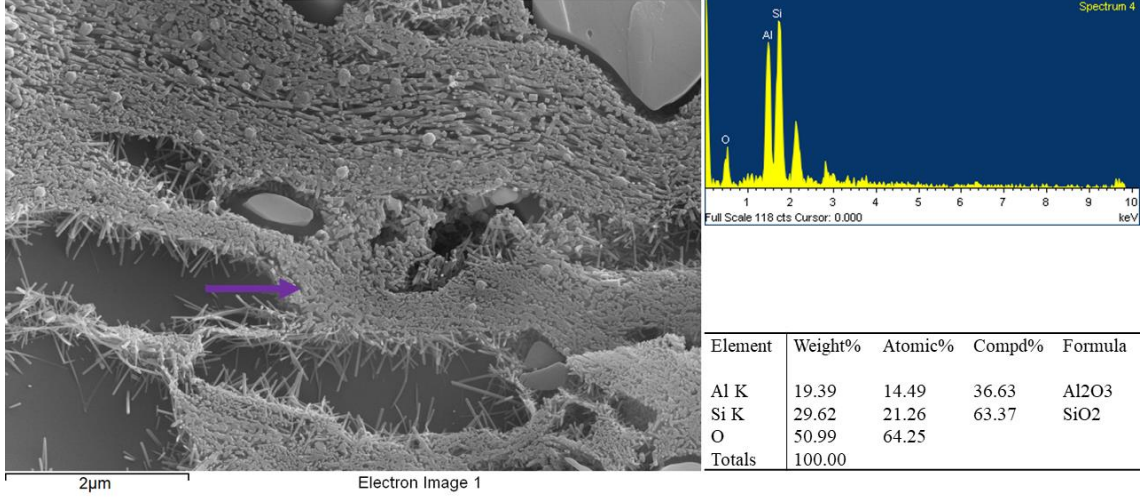
Şekil 6.6. Albit mineralinin şematik görünümü ve EDX analizi



Şekil 6.7. Anortit fazının şematik görünümü ve EDX analizi



Şekil 6.8. Müllit fazının şematik görünümü ve alan EDX analizi

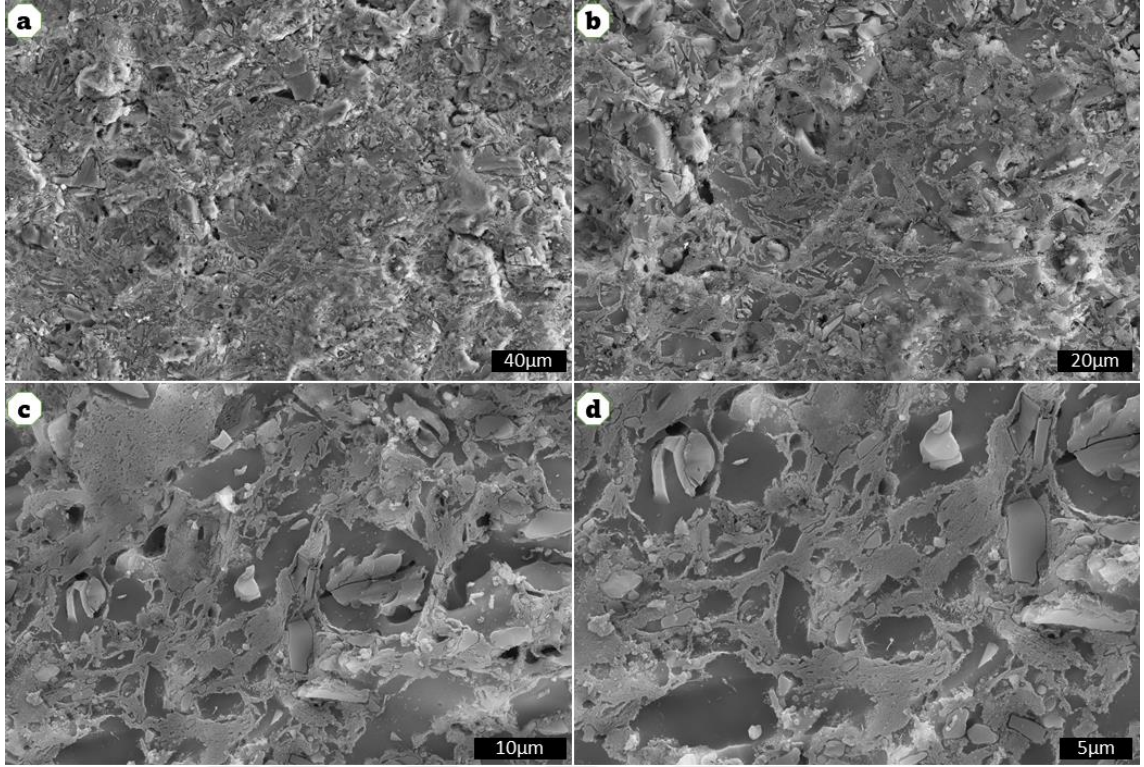


Şekil 6.9. Müllit fazının şematik görünümü ve nokta EDX analizi

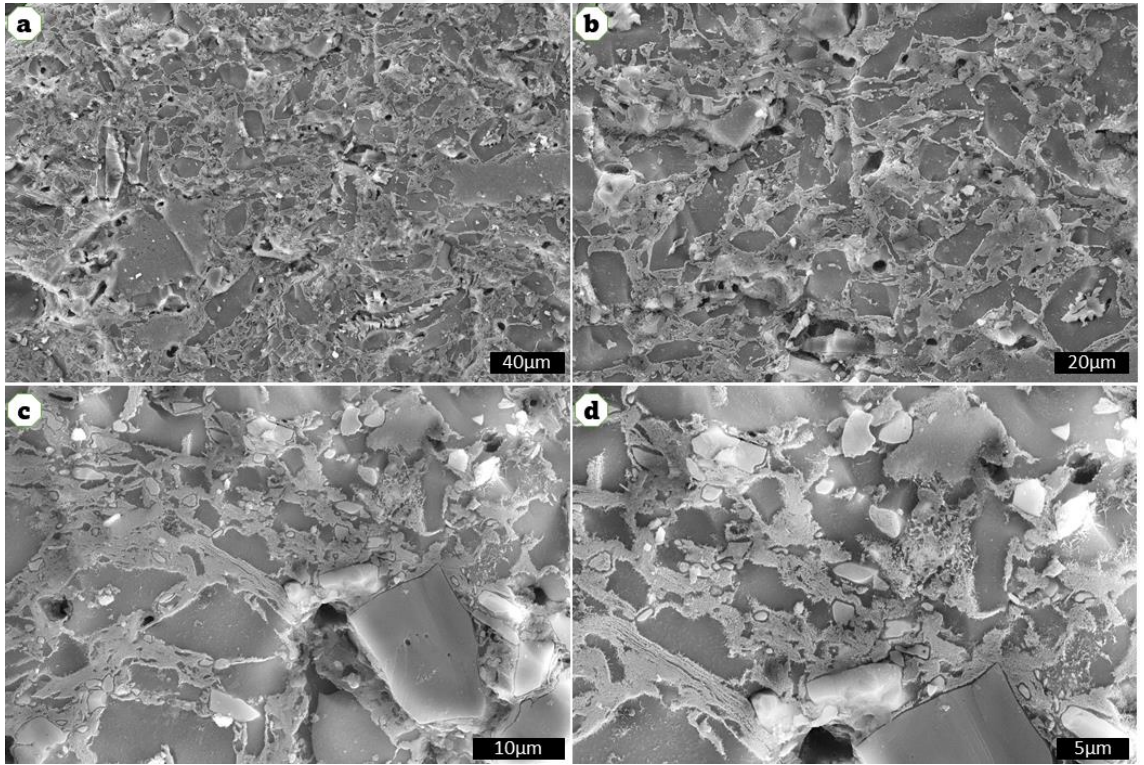
### 6.5.2. Numunelerin SEM görüntüleri

Deney tasarımı için hazırlanan numunelerin dağlanmış kesitten alınan görüntüleri sırasıyla 1KX, 2KX, 5KX ve 8KX büyütmelerde ikincil elektron (SE) yöntemi ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

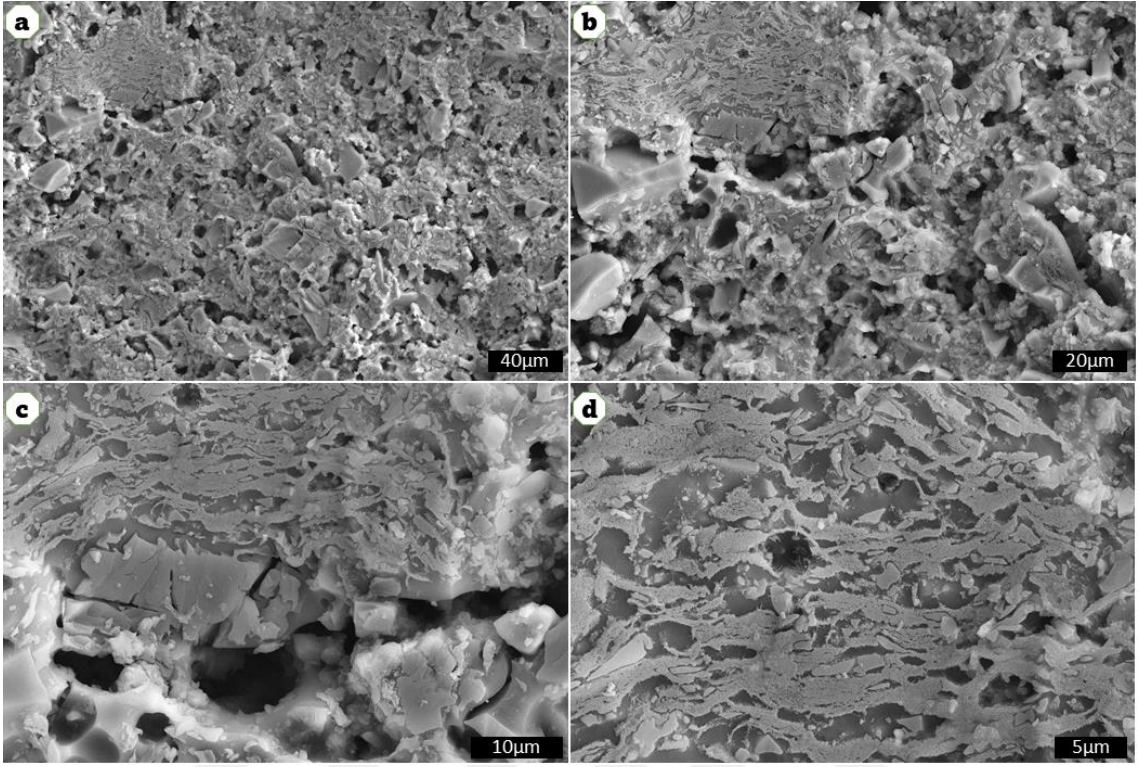
Numuneler Hidroflorik asit ile 30 sn dağlanmış, saf su ile yakındıktan sonra nem tayin cihazında nemlerinin uzaklaştırmasının ardından iletkenliğinin sağlanması için altın (Au) ile kaplanmıştır. Numunelere ait görüntüler Şekil 6.10-6.25 'de verilmiştir.



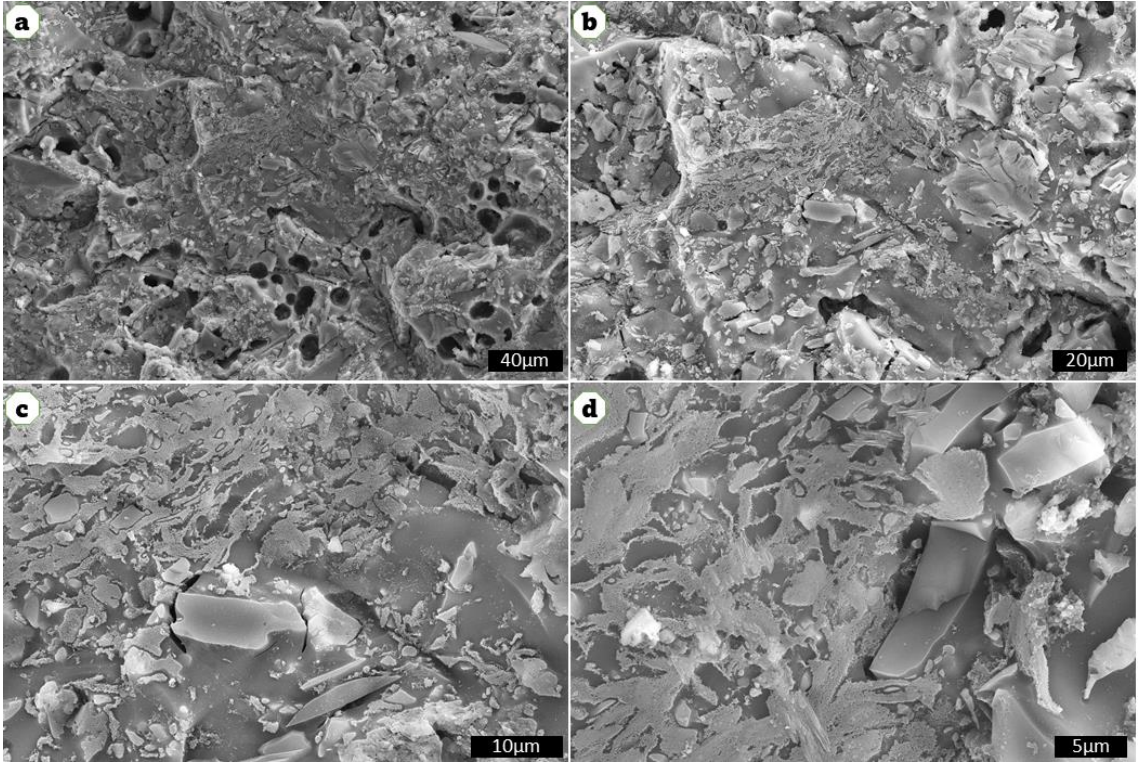
Şekil 6.10. Al-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



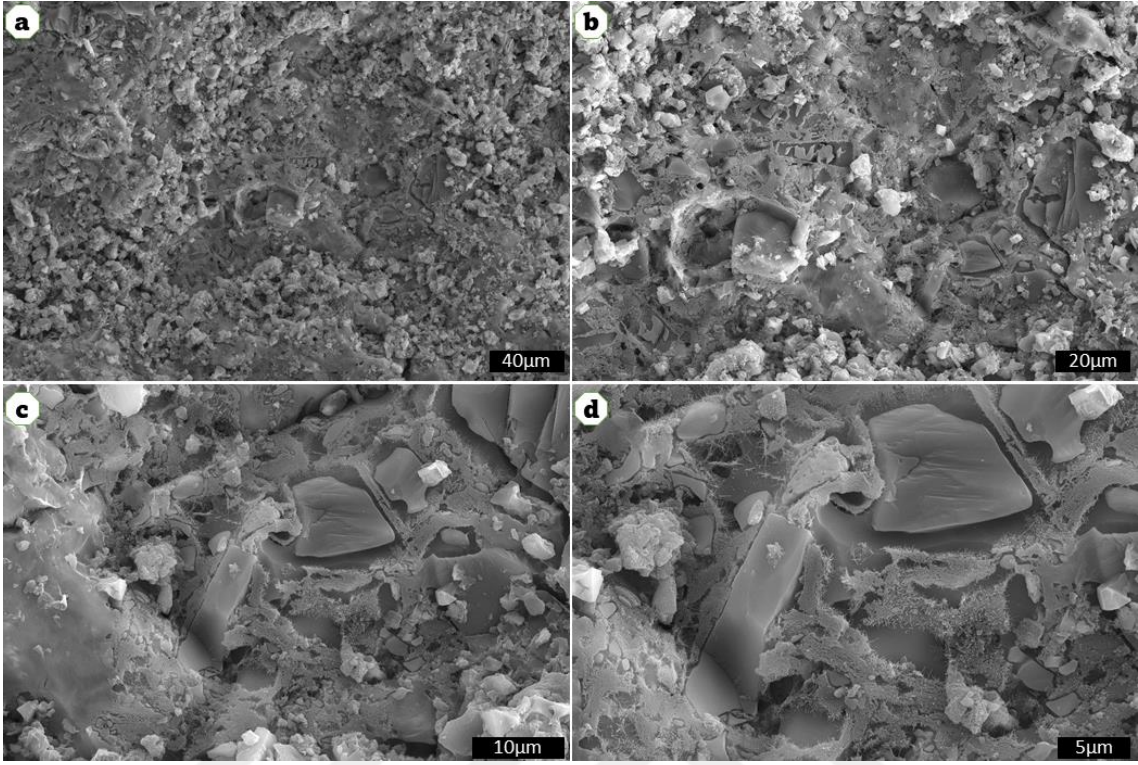
Şekil 6.11. Al-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



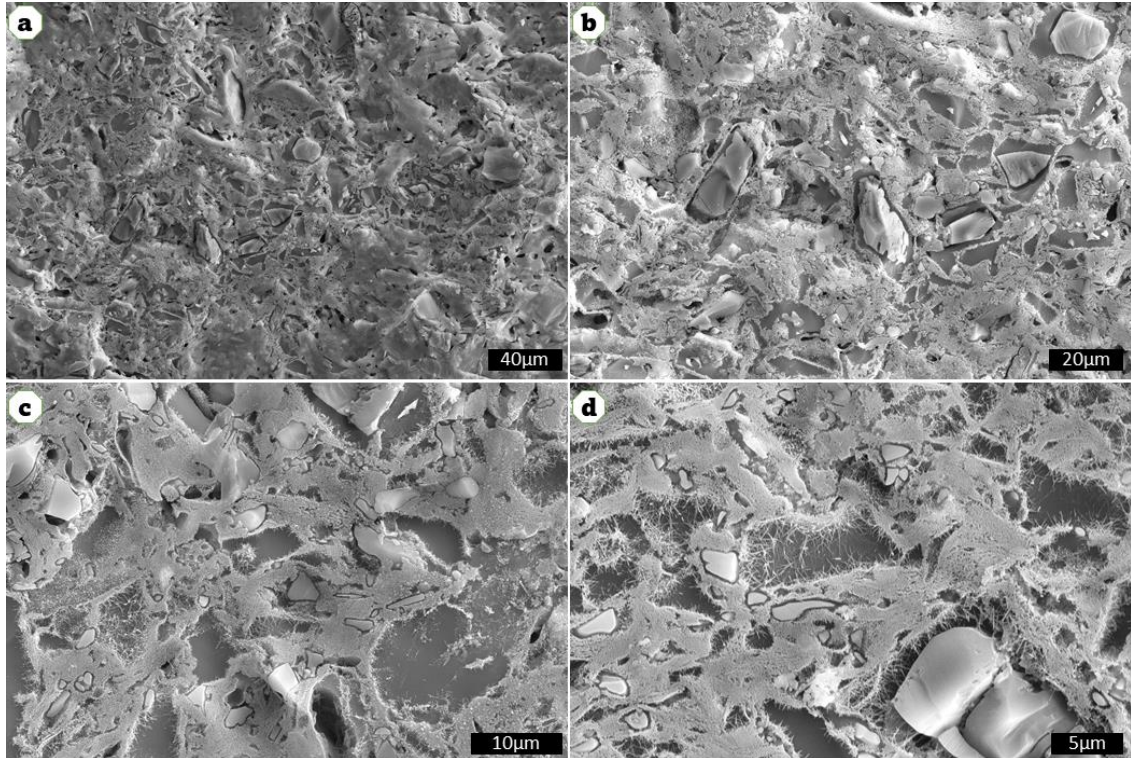
Şekil 6.12. A2-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



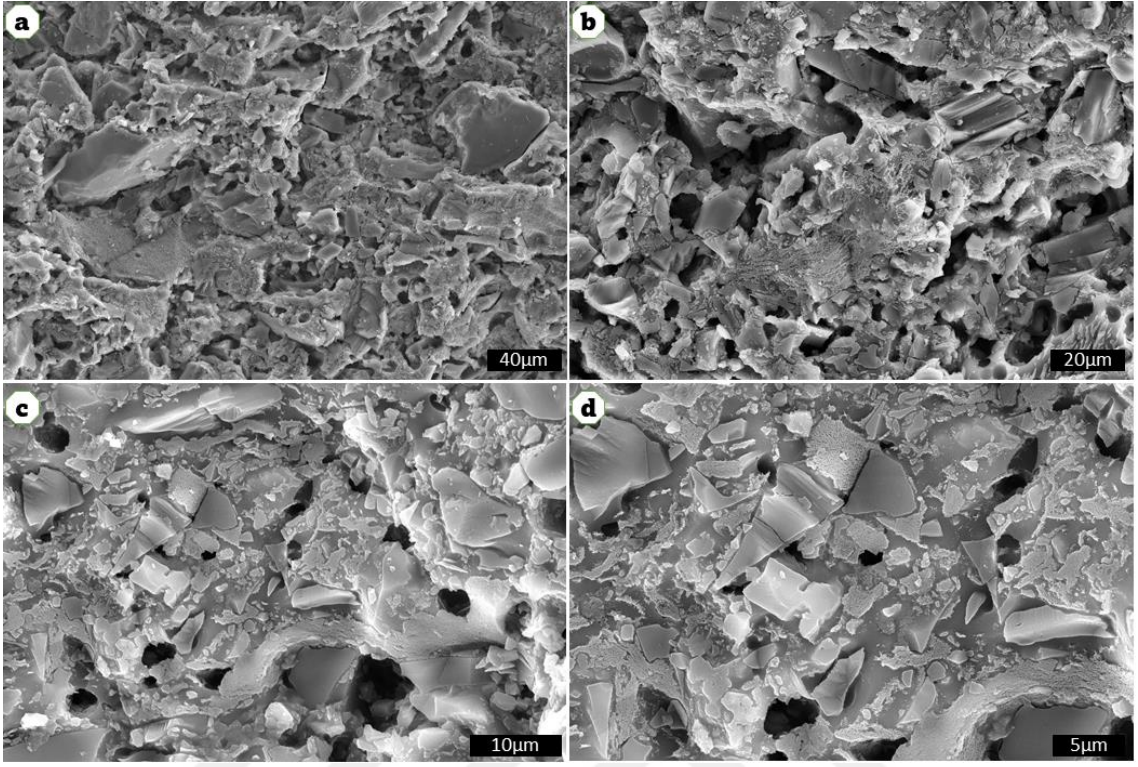
Şekil 6.13. A2-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



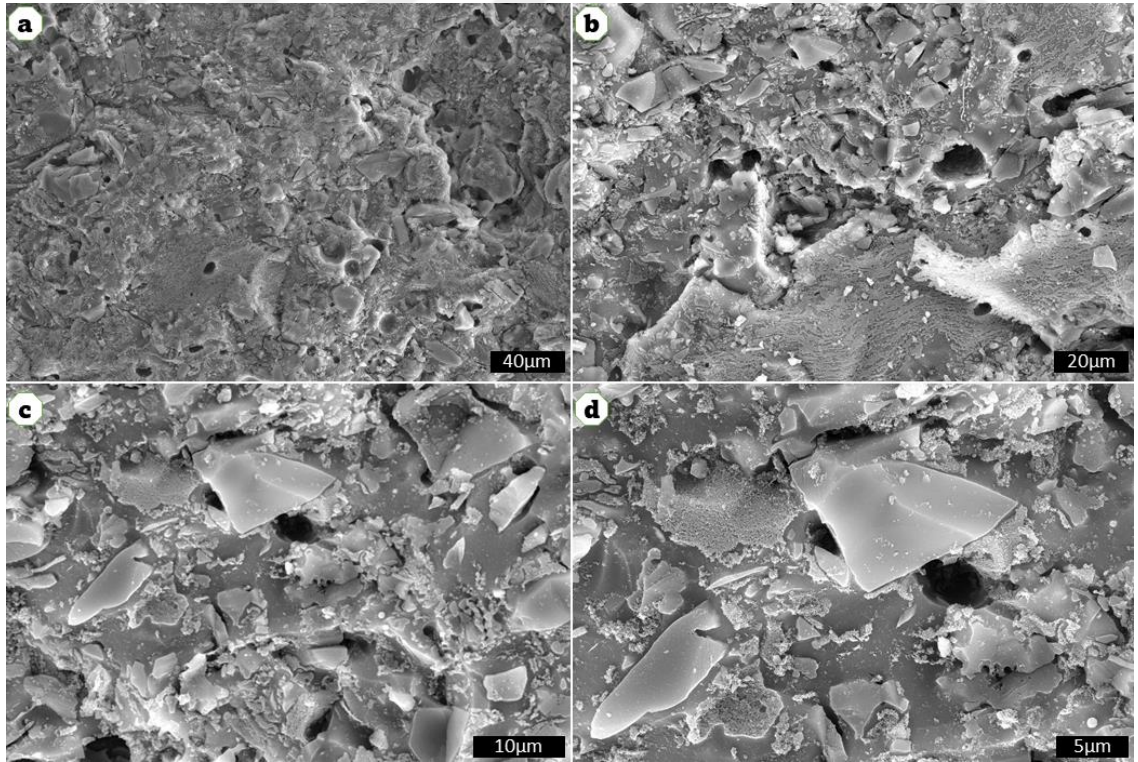
Şekil 6.14. A3-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



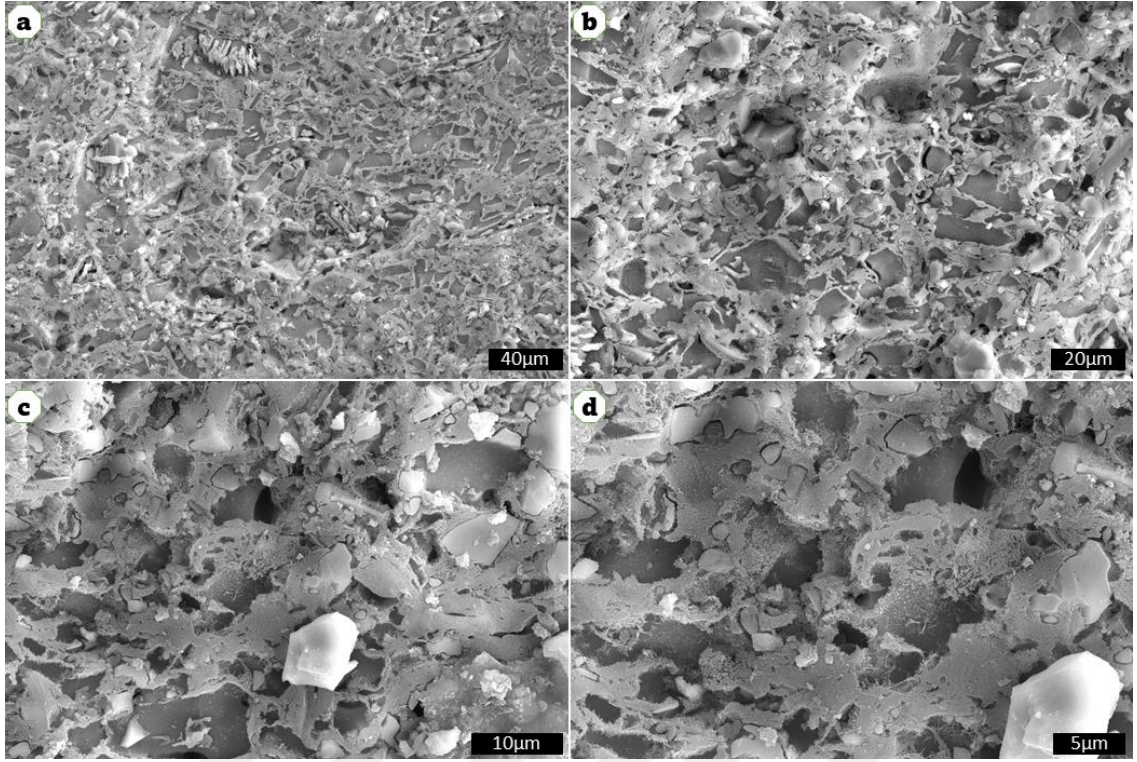
Şekil 6.15. A3-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



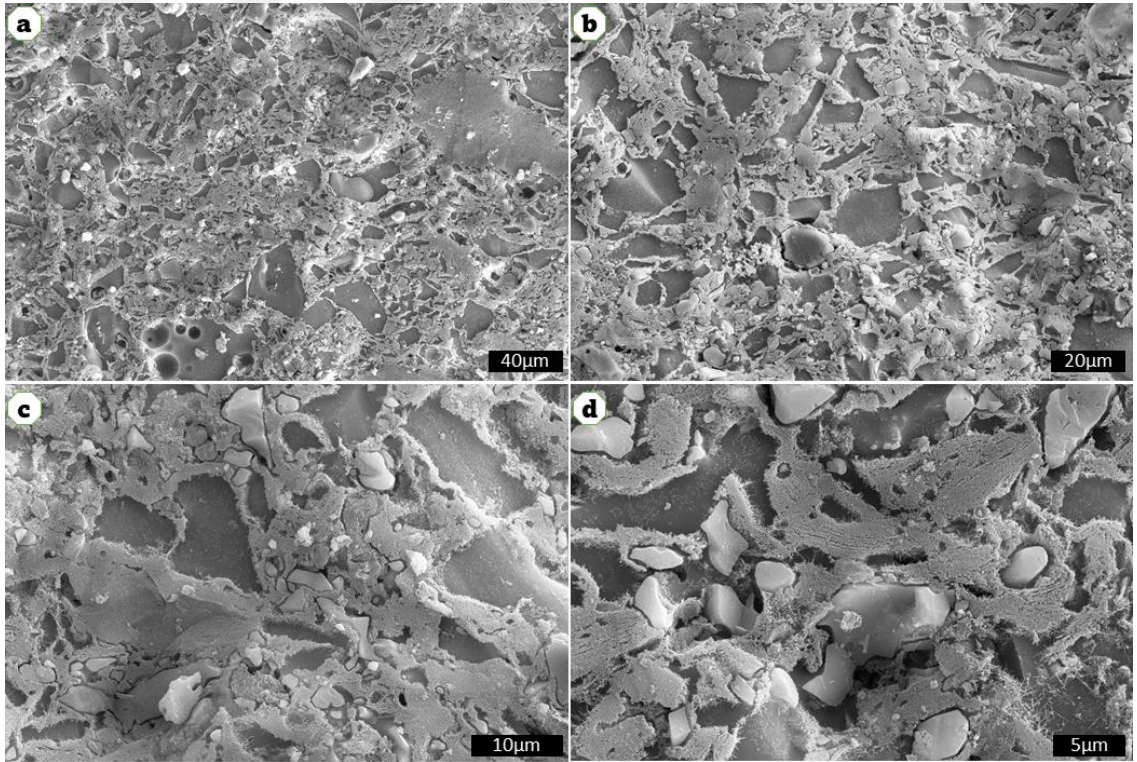
Şekil 6.16. A4-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



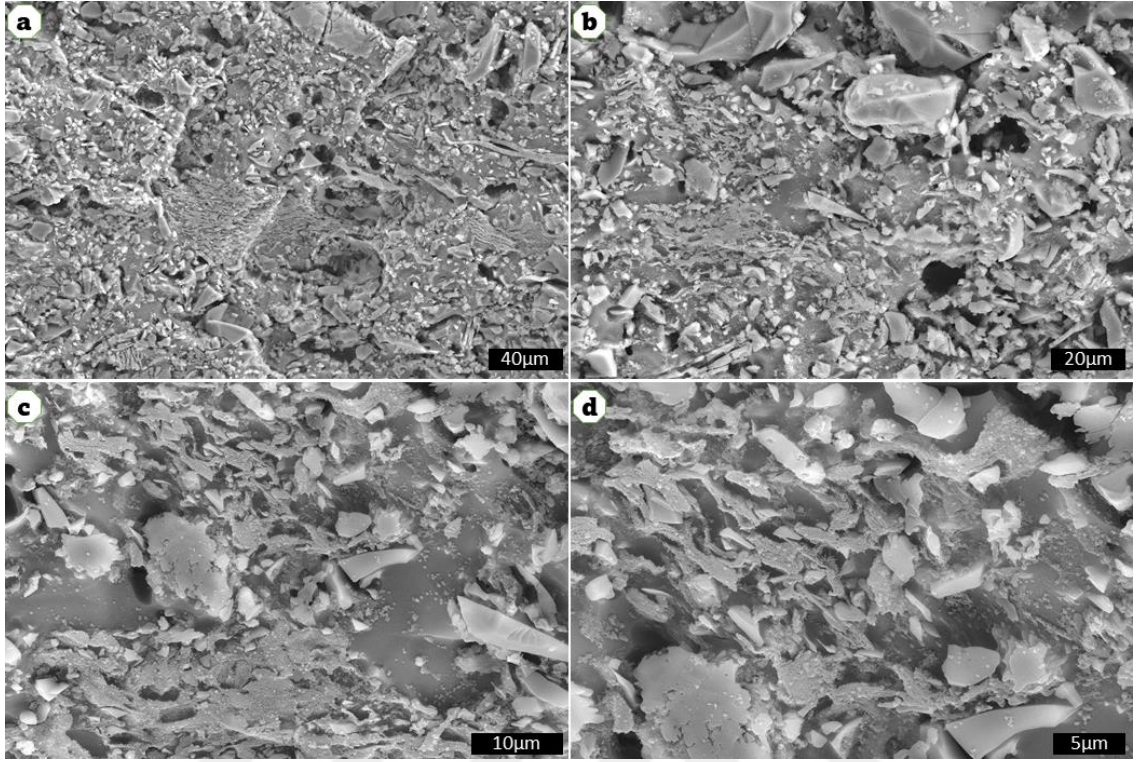
Şekil 6.17. A4-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



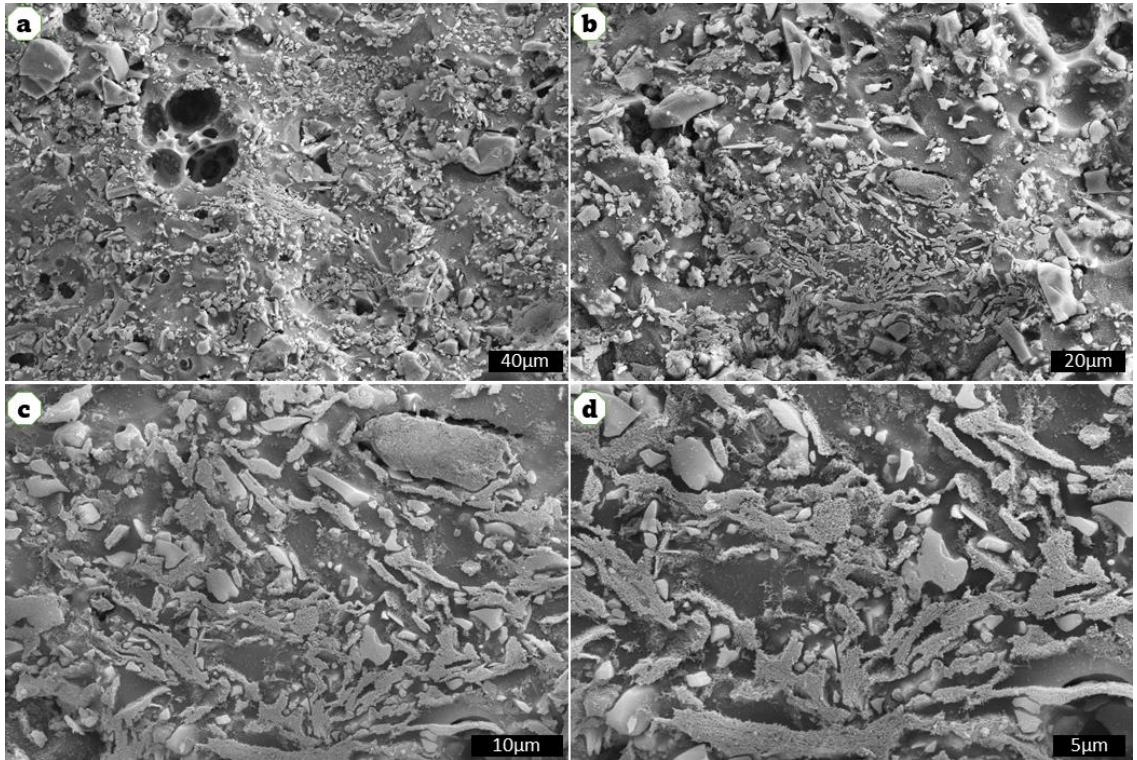
**Şekil 6.18.** A5-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) **a)**1 KX, **b)**2 KX, **c)**5 KX ve **d)** 8 KX görüntüleri



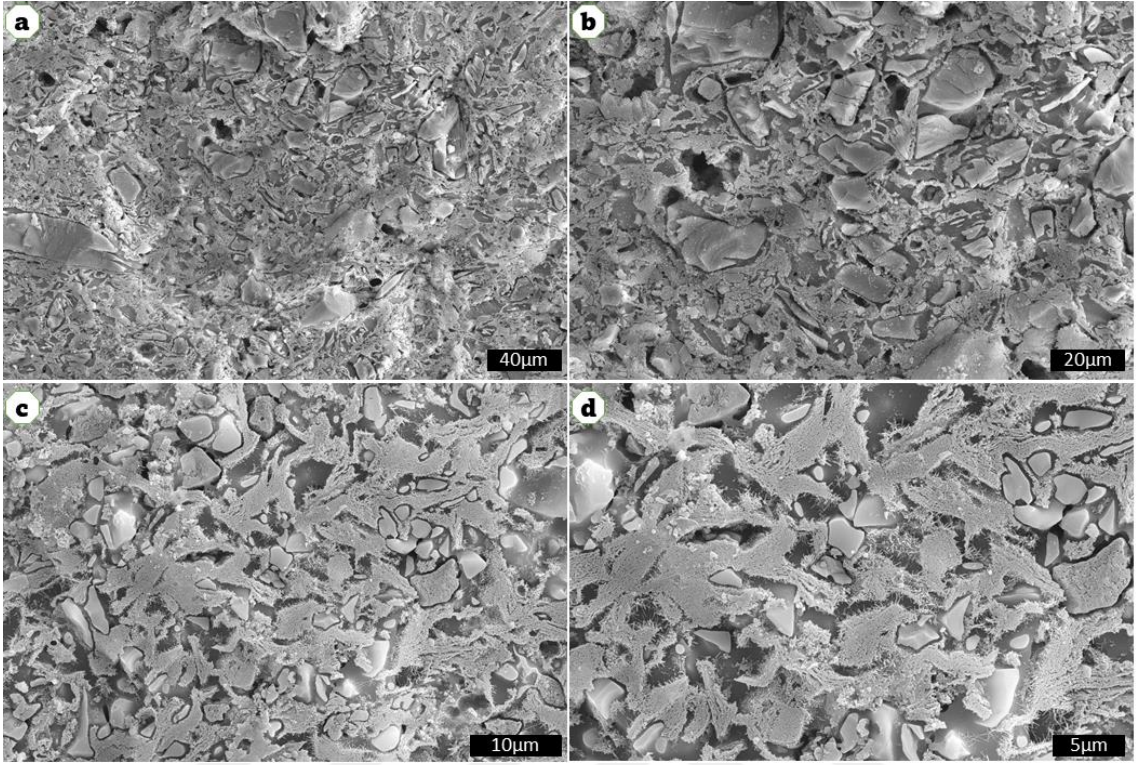
**Şekil 6.19.** A5-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) **a)**1 KX, **b)**2 KX, **c)**5 KX ve **d)** 8 KX görüntüleri



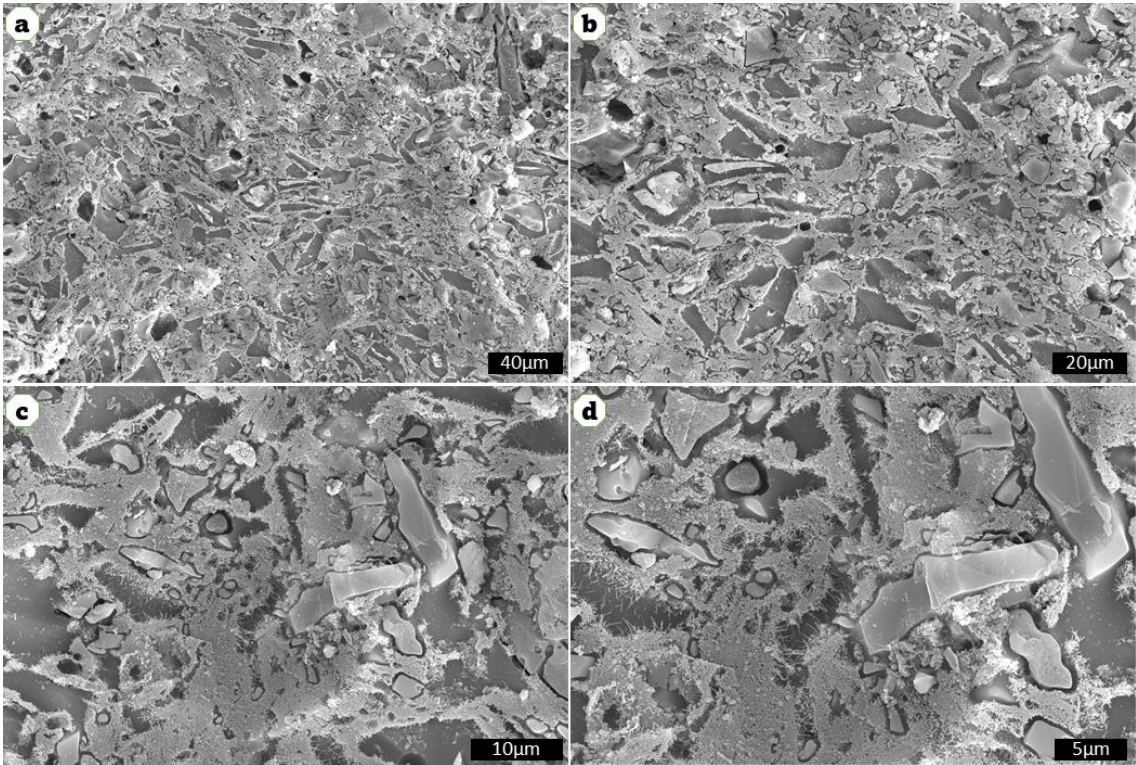
**Şekil 6.20.** A6-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) **a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX** görüntüleri



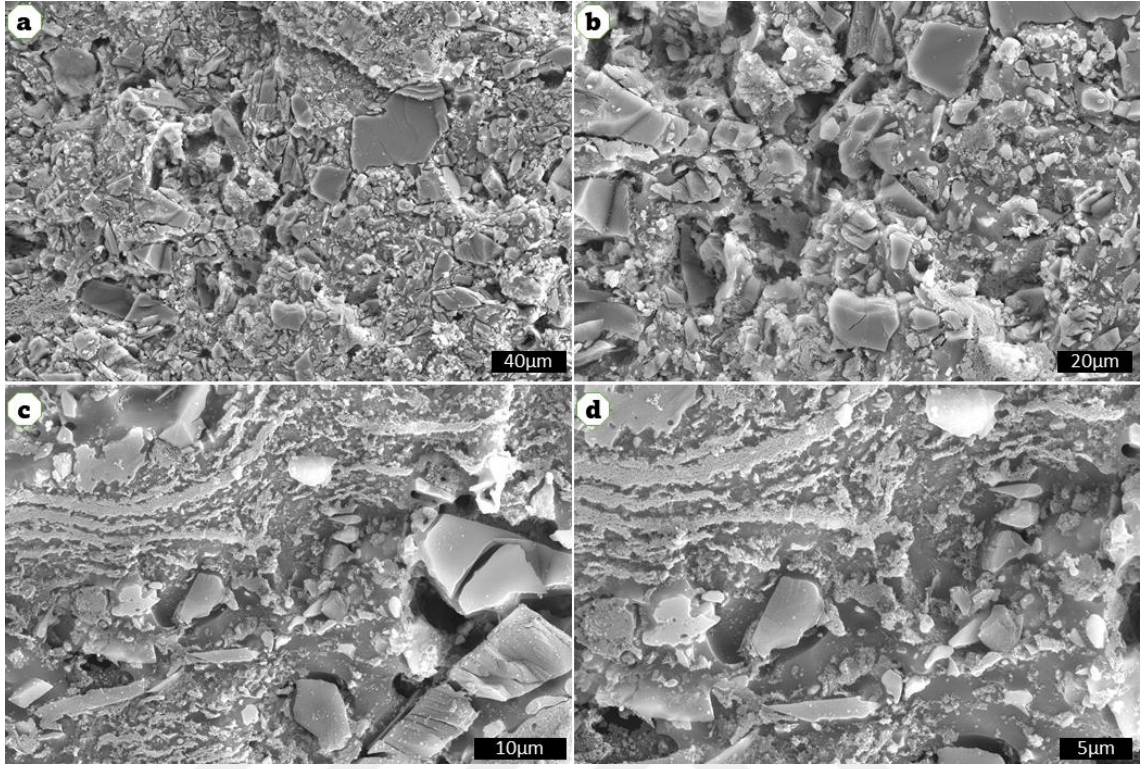
**Şekil 6.21.** A6-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) **a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX** görüntüleri



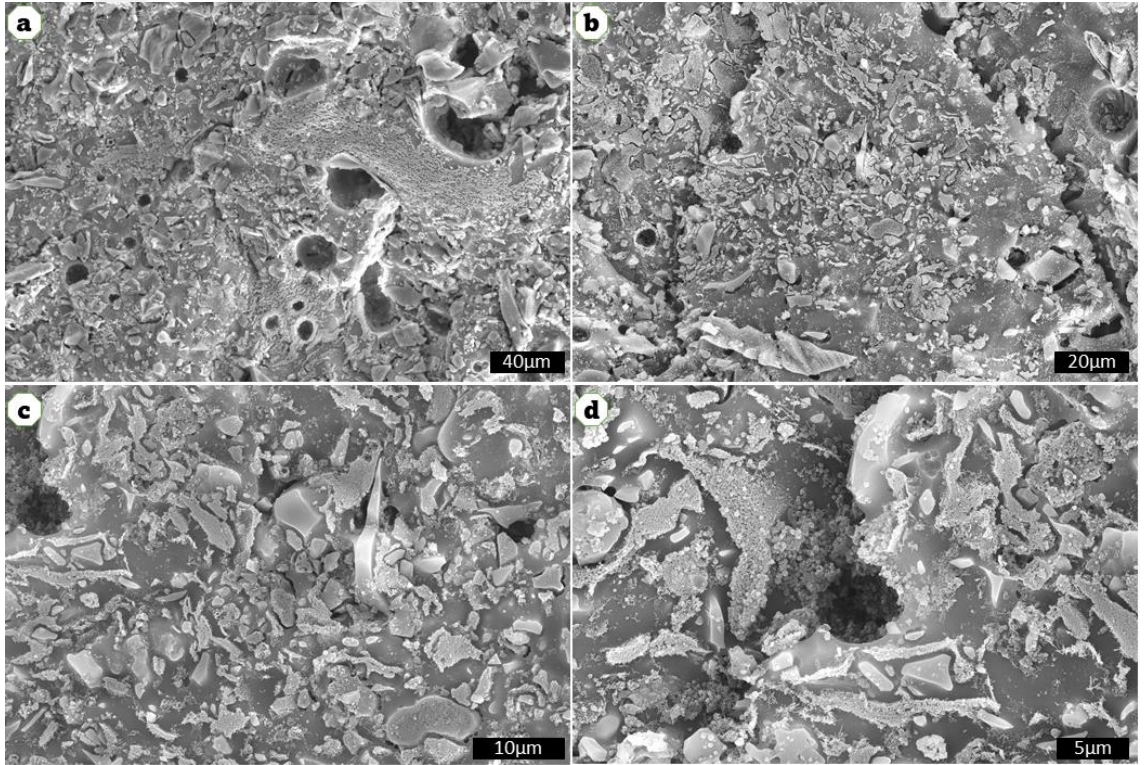
Şekil 6.22. A7-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



Şekil 6.23. A7-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



Şekil 6.24. A8-1180 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri



Şekil 6.25. A8-1200 °C koldu numunenin ikincil elektron (SE) a)1 KX, b)2 KX, c)5 KX ve d) 8 KX görüntüleri

## 7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Belirlenen Seger oranlarında, Seger hesaplama çizelgesinde hammadde miktarları ile ayarlama yapılarak, en son reçete hammadde miktarları elde edilmiştir. Deney tasarımı yöntemine göre yoğunluk ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ), su emme (%) pişme mukavemeti ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), Poisson oranı, Young Modülü (GPa),  $500\text{ }^\circ\text{C}$  'de ısıl genleşme katsayısı, toplam pişme küçülmesi, Pyroplastik inkesi ve camsı faz viskozitesi dikkate alınarak, deneyler iki tekrar ile elde edilmiştir.

Deney sonuçları için en başta aykırı değer ve normallik testleri gerçekleştirilmiştir. Böylece sonuçların dağılımı ve anlamlılığı test edilmiştir.

Daha sonra deney sonuçları 3 farklı şekilde değerlendirilmiştir:

- i. Deney tasarımı yöntemini kullanarak ANOVA tablosunun incelenmesi ve regresyon modellerinin oluşturulması
- ii. Deney tasarımında yer almayan bağımsız değişkenlerin farklı özelliklere olan etkisi standartlaştırılmış Pareto analizi ile test edilmiştir.
- iii. Özellik-Özellik regresyon incelenmesi gerçekleştirilmiş ve olası modeller oluşturulmuştur.

### 7.1. Bağımlı Değişkenlerin Değerlendirmesi

Tez kapsamında, sonuçların olası aykırı değer tespiti ve anlamlılık dağılımını incelemek için popülasyon testleri her bir özellik için incelenmiştir.

#### 7.1.1. Popülasyon testi

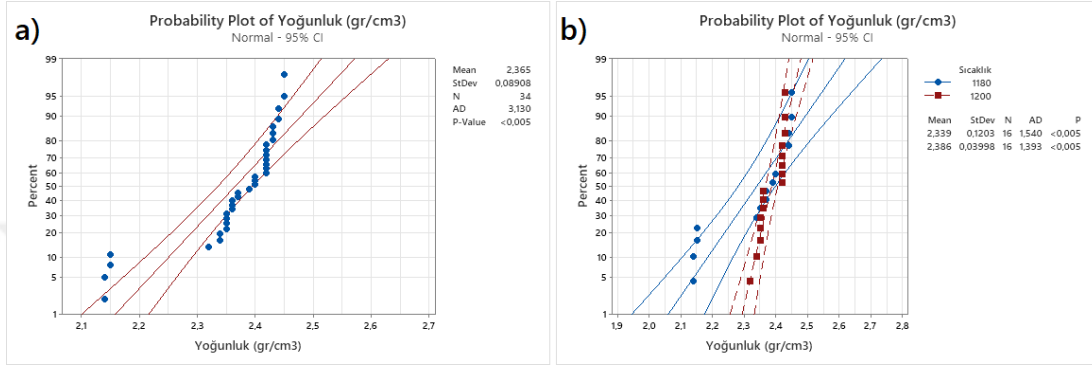
Popülasyon testi için ise Anderson-Darling yöntemi ( $\alpha=0,05$  seviyesinde) uygulanmıştır. Bu yöntemi kullanarak hem sıcaklık faktörünü bir kategorik değişken olarak hem tüm verileri aynı katagoride değerlendirerek (sıcaklık faktörünü göz ardı ederek) popülasyon testi uygulanmıştır.

Bu yöntemin hipotezi testi şu şekilde tanımlanır:

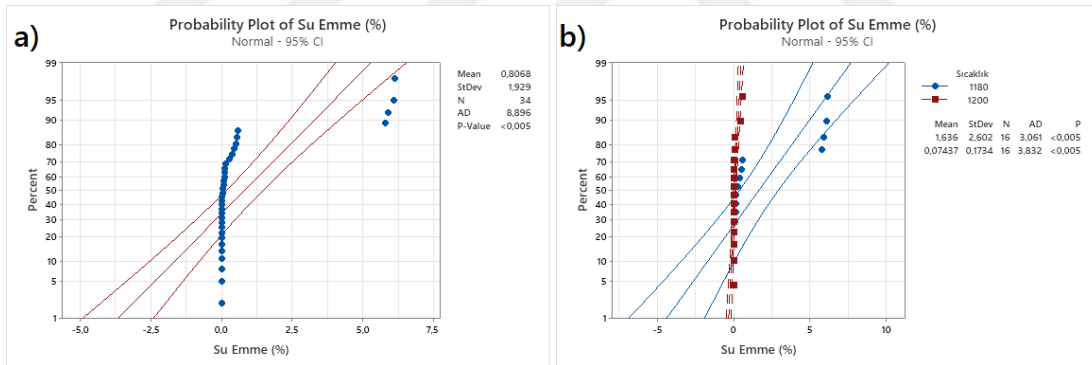
- $H_0$ : Veriler belirli bir dağılımı takip eder.
- $H_1$ : Veriler belirtilen dağılıma uymuyor

Anderson-Darling testi, bir popülasyonun normal dağılıma uygunluğunu değerlendirmek için kullanılan istatistiksel bir testtir. Bu test, veri dağılımının normal dağılıma ne kadar yakın olduğunu belirlemek için gözlem değerlerini kullanır. Anderson-Darling testi, gözlem değerlerinin beklenen normal dağılıma olan uyumunu değerlendiren bir kritik değerle karşılaştırır. Anderson-Darling testi için kritik değerler, test edilen

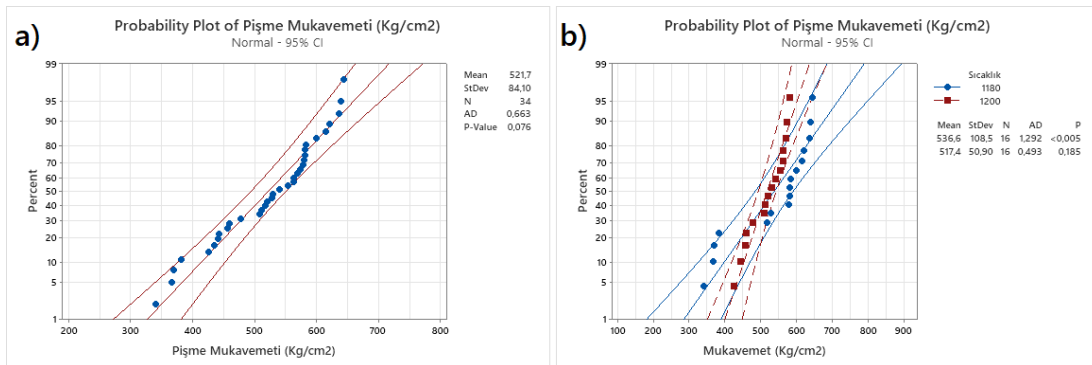
belirli dağılıma bağlıdır. Test tek taraflı bir testtir ve testin sonucu iki şekilde yorumlanabilir: test istatistiği (AD değeri)  $\alpha$  kritik değerden büyükse, verilerin varsayılan dağılıma ait olduğu hipotezi reddedilir. Sonuç p-değerine göre test edildiğinde ise, (bu testin sıfır hipotezi, popülasyonun belirli bir biçimde dağılmış olmasıdır), p değeri seçilen  $\alpha$  seviyesinden [ $\alpha=0,05$ ] düşükse,  $H_0$  reddedilir ve test edilen verilerin varsayılan dağılıma göre dağılmadığı kanıtlanır. Sonuçlar Şekil 7.1-7.8 'de verilmiştir.



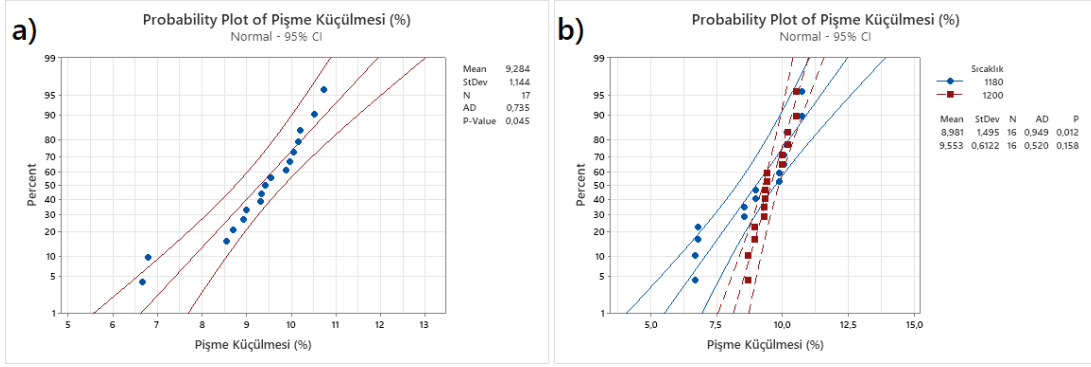
Şekil 7.1. Yoğunluğa ait a) toplam veri seti b) kategorik değişkenli normallik testi



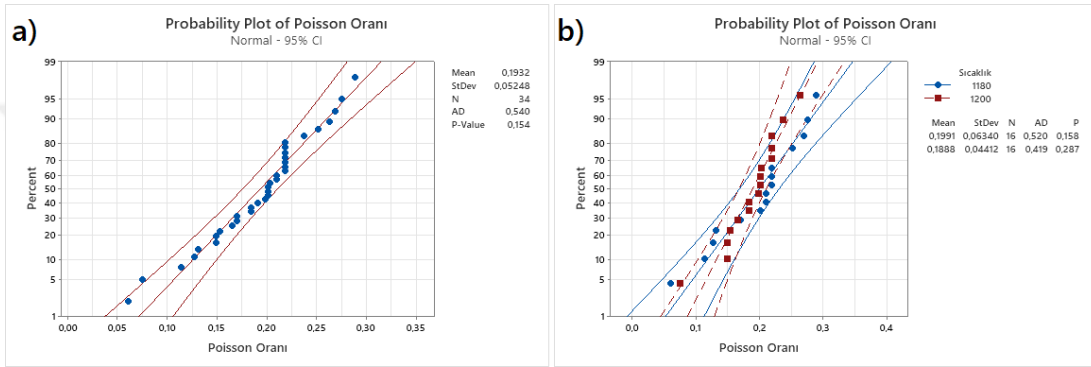
Şekil 7.2. Su emmeye ait a) toplam veri seti b) kategorik değişkenli normallik testi



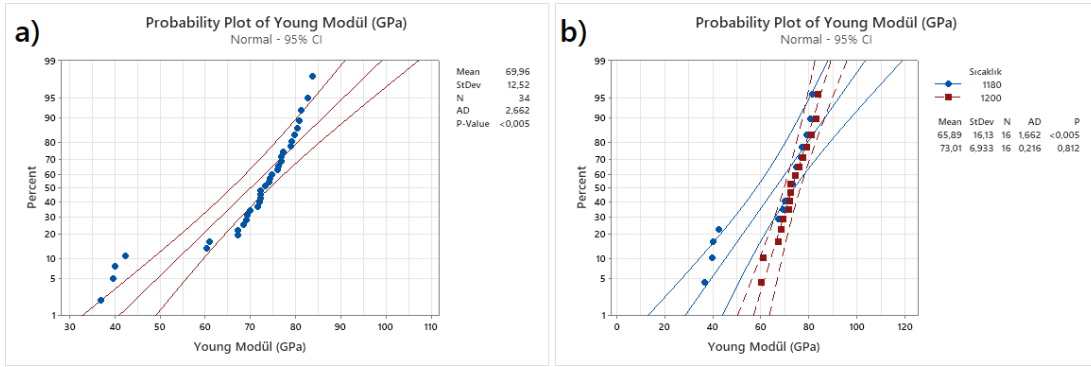
Şekil 7.3. Pişme mukavemetine ait a) toplam veri seti b) kategorik değişkenli normallik testi



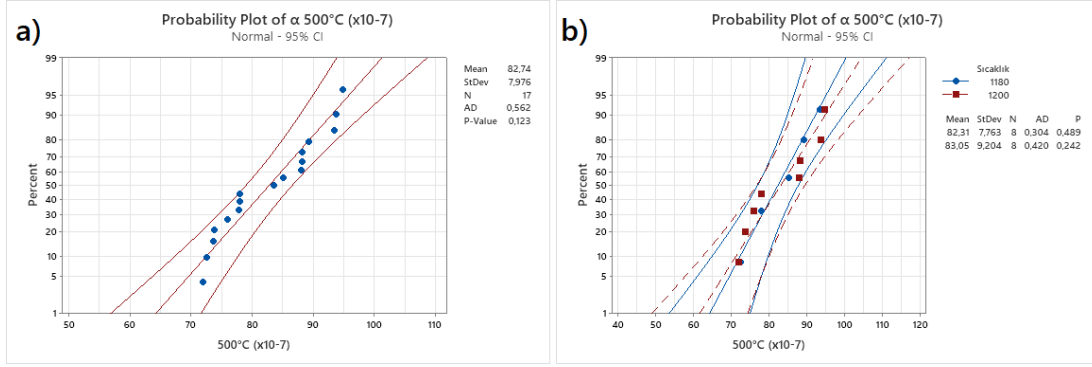
Şekil 7.4. Toplam pişme küçülmesine ait a) toplam veri seti b) kategorik değişkenli normallik testi



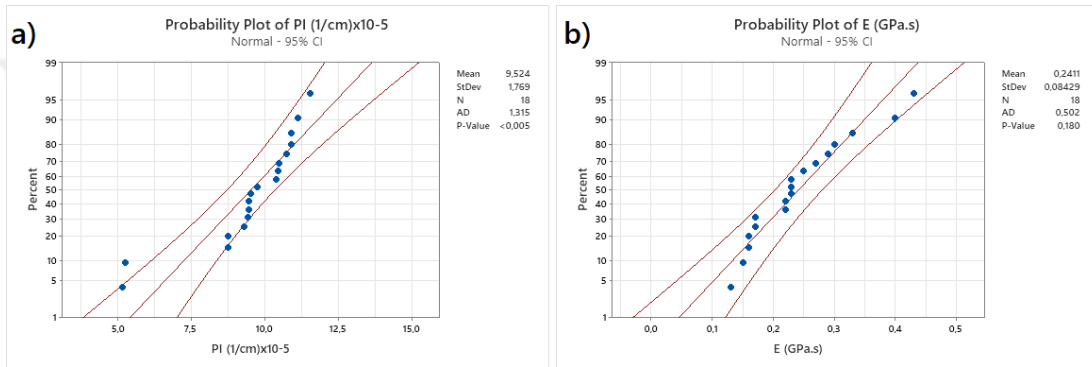
Şekil 7.5. Poisson oranına ait a) toplam veri seti b) kategorik değişkenli normallik testi



Şekil 7.6. Young modülüne ait a) toplam veri seti b) kategorik değişkenli normallik testi



Şekil 7.7. 500 °C'deki ısı genleşme katsayısına ait a) toplam veri seti b) kategorik değişkenli normallik testi



Şekil 7.8. Fleximetre sonuçlarına ait a) Pyroplastik deformasyon indeksi b) camlı faz viskozite normallik testi

Anderson-Darling testinin sonuçlarının yorumlanması sırasında, istatistiksel anlamlılık düzeyinin önemli bir rol oynadığını vurgulamak gerekmektedir. Eğer belirli bir anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık tespit edilirse, normal dağılım hipotezi reddedilir. Bunun anlamı, incelenen veri setinin normal dağılıma uygun olmadığı ve alternatif bir dağılım modeli düşünülmesi gerektiğidir. Bu düzey, testin ne kadar güvenilir olduğunu ve hangi sonuçların istatistiksel olarak anlamlı olduğunu belirlemek için kullanılır. Anderson-Darling normallik testi sonuçları hakkında detaylı bilgiler Tablo 7.1 'de özetlenmiştir.

**Tablo 7.1. Popülasyon test sonuçları**

Özellik	Tüm veri seti Popülasyon testi ( $\alpha=0,05$ )		Sıcaklığa göre Popülasyon testi ( $\alpha=0,05$ )		
	P	Normallik sonucu	Sıcaklık	P	Normallik sonucu
Yoğunluk	<0,005	Normal Olmayan	1180 °C	<0,005	Normal Olmayan
			1200 °C	<0,005	Normal Olmayan
Su emme	<0,005	Normal Olmayan	1180 °C	<0,005	Normal Olmayan
			1200 °C	<0,005	Normal Olmayan
Pişme mukavemet	0,076	Normal	1180 °C	<0,005	Normal Olmayan
			1200 °C	0,185	Normal
Poisson oranı	0,154	Normal	1180 °C	0,158	Normal
			1200 °C	0,287	Normal
Young modülü	<0,005	Normal Olmayan	1180 °C	<0,005	Normal Olmayan
			1200 °C	0,812	Normal
Pişme Küçülmesi	0,045	Normal Olmayan	1180 °C	0,012	Normal Olmayan
			1200 °C	0,158	Normal
Isıl genleşme katsayısı (500 °C)	0,123	Normal	1180 °C	0,489	Normal
			1200 °C	0,242	Normal
Pyroplastik İndeksi (PI)	<0,005	Normal Olmayan	Sıcaklıktan bağımsız *		
Camsı faz viskozitesi (E)	0,180	Normal	Sıcaklıktan bağımsız *		

### 7.1.2. Aykırı değer tespiti

Farklı özelliklerde aykırı değer tespiti için ‘‘Çeyrek Kütle (quartiles)’’ yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, veri seti çeyreklerine (Q1, Q2 ve Q3) ayrılır. Q1, verilerin alt %25'ini, Q2 (medyan) verilerin ortanca %50'sini ve Q3 ise verilerin üst %25'ini temsil eder.

Çeyrek Kütle yöntemiyle aykırı değerleri tespit etmek için aşağıdaki adımlar izlenir:

- i. IQR (Interquartile Range - Çeyrek Aralık) hesaplanır: IQR, Q3'ten Q1'in çıkarılmasıyla elde edilir.  $IQR = Q3 - Q1$ .
- ii. Alt sınırlar (Lower Fence) hesaplanır: Alt sınır, Q1'den  $1,5 * IQR$  çıkarılarak elde edilir.  $Alt\ sınır = Q1 - 1,5 * IQR$ .
- iii. Üst sınırlar (Upper Fence) hesaplanır: Üst sınır, Q3'e  $1,5 * IQR$  eklenerek elde edilir.  $Üst\ sınır = Q3 + 1,5 * IQR$ .
- iv. Aykırı değerlerin belirlenmesi: Veri setinde, alt sınırların altında veya üst sınırların üzerinde bulunan değerler aykırı değer olarak kabul edilir

Bu yöntemde aykırı değerler, veri setindeki diğer değerlerden büyük ölçüde farklı olan veya beklenmedik değerler olarak kabul edilen verilerdir. Bu yöntem, veri setindeki ekstrem değerleri tespit etmek ve potansiyel olarak anormal değerleri belirlemek için kullanılır. Bu yöntem özellikle kümedeki veriler normal bir dağılıma sahip olmadığında tercih edilen bir yöntemdir ve bir önceki aşamada normallik testi sonuçlarını göz önünde bulundurarak seçilmiştir.

Bu yöntemi uygulayarak çıktı aykırı test sonuçları incelenmiş, sonuçlar Tablo 7.2 ve 7.3 'te verilmiştir. Tablolarda ‘‘false’’ kelimesi o verinin aykırı değer olarak tespit edilmediği, ‘‘true’’ kelimesi ise o verinin aykırı değer olarak belirlendiğini göstermektedir.

**Tablo 7.2.** Sıcaklığa bağlı iki tekrarlı özelliklerin aykırı değer tespit testi sonucu

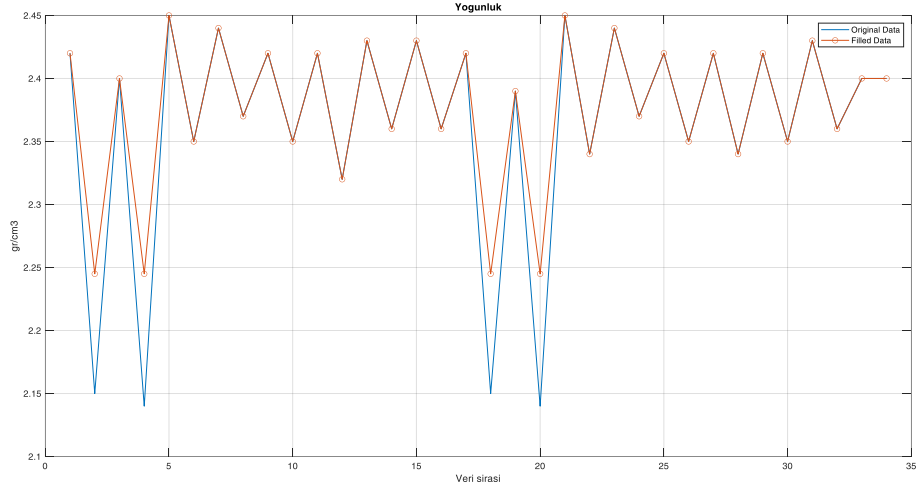
<b>Numune</b>	<b>Yoğunluk</b>	<b>Su Emme</b>	<b>Pişme Mukavemet</b>	<b>Pişme Küçülmesi</b>	<b>Poisson Oranı</b>	<b>Young Modülü</b>	<b>Isıl genleşme katsayısı</b>
A1-1180 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A2-1180 (1)	true	true	false	true	false	true	false
A3-1180 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A4-1180 (1)	true	true	false	true	false	true	false
A5-1180 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A6-1180 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A7-1180 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A8-1180 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A1-1200 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A2-1200 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A3-1200 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A4-1200 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A5-1200 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A6-1200 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A7-1200 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A8-1200 (1)	false	false	false	false	false	false	false
A1-1180 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A2-1180 (2)	true	true	false	true	false	true	false
A3-1180 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A4-1180 (2)	true	true	false	true	false	true	false
A5-1180 (2)	false	false	false	false	true	false	false
A6-1180 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A7-1180 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A8-1180 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A1-1200 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A2-1200 (2)	false	false	false	false	true	false	false
A3-1200 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A4-1200 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A5-1200 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A6-1200 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A7-1200 (2)	false	false	false	false	false	false	false
A8-1200 (2)	false	false	false	false	false	false	false

**Tablo 7.3.** Sıcaklıktan bağımsız iki tekrarlı özelliklerin aykırı değer tespit testi sonucu

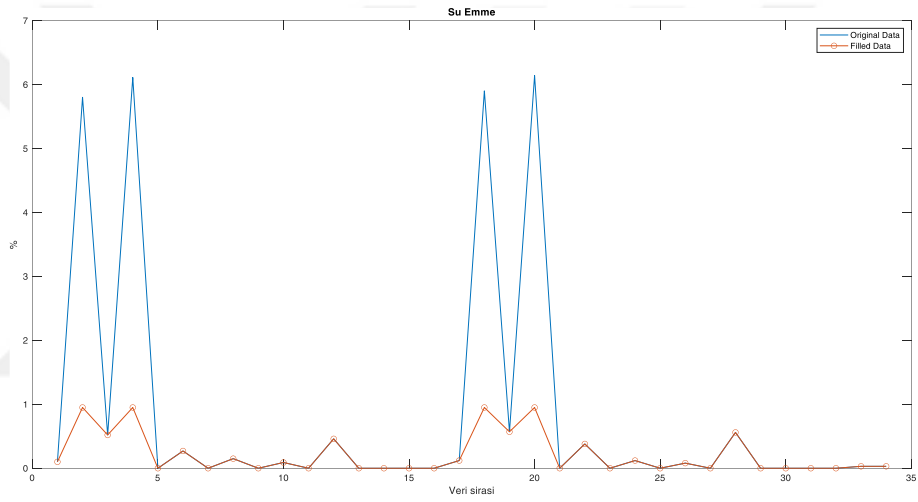
Numune	Pyroplastik İndeksi (PI)	Camsı faz viskozitesi (E)
A1 (1)	false	false
A2 (1)	false	false
A3 (1)	true	false
A4 (1)	false	false
A5 (1)	false	false
A6 (1)	false	false
A7 (1)	false	false
A8 (1)	false	false
A1 (2)	false	false
A2 (2)	false	false
A3 (2)	true	false
A4 (2)	false	false
A5 (2)	false	false
A6 (2)	false	false
A7 (2)	false	false
A8 (2)	false	false

Aykırı değer analizi sonucu Yoğunluk, Su emme, Pişme küçülmesi, Poisson oranı, Young modülü ve Pyroplastik indeksi özellikleri veri setlerinde aykırı değer bulduklarını tespit edilmiştir.

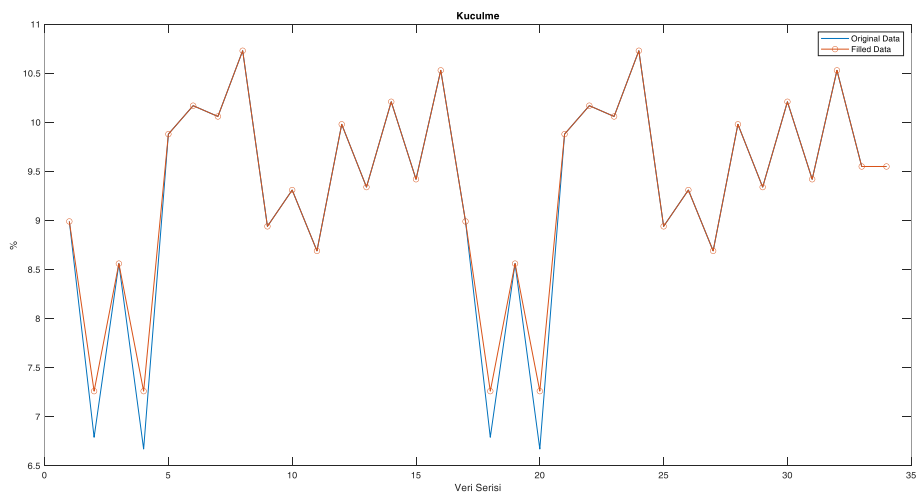
Aykırı değer olarak tespit edilen veriler “*Klips (clip)*” yöntemi kullanarak yeni veriler ile doldurulmuştur. Klips yöntemi, veri setindeki değerlerin bir alt sınıra (alt klips) veya üst sınıra (üst klips) sınırlanması ile gerçekleştirilir. Aykırı değerler, belirlenen klips sınırları dışında kalan değerler olarak kabul edilir ve klips uygulanarak bu değerlerin sınıra çekilmesi sağlanır. Örneğin, bir veri setindeki sayısal değerlerde aykırı değerler tespit edildiğinde, alt klips yöntemi kullanılarak bu değerlerin alt sınıra sınırlanması sağlanabilir. Alt klips değeri belirlenir ve aykırı değerler bu değerle değiştirilir. Böylece, aykırı değerlerin potansiyel etkileri azaltılırken, veri setinin genel özellikleri korunmuş olur. Üst klips yöntemi de aynı prensiple çalışır, ancak aykırı değerler üst sınıra sınırlanır. Veri setindeki yüksek değerlere sahip aykırı değerler, üst klips değeriyle değiştirilir. Bu yöntemi kullanarak *çeyrek kütle* yöntemiyle belirlenen alt eşikten küçük olan öğeler için alt eşik değeri; üst eşikten büyük olan değerler için üst eşik değeri aykırı değerlerin yerini almıştır. Bu işlem ile ilgili detaylı sonuçlar Şekil 7.9-7.14 ‘te verilmiştir.



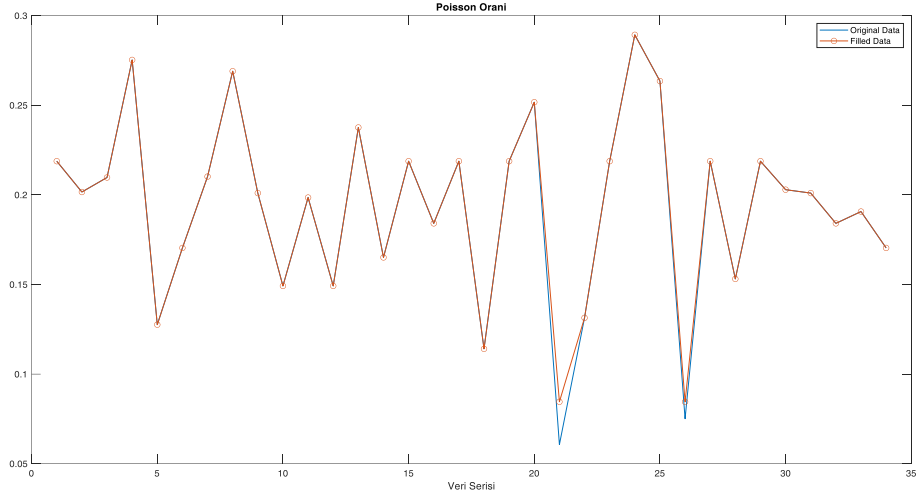
Şekil 7.9. Yoğunluk özelliğinde aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi



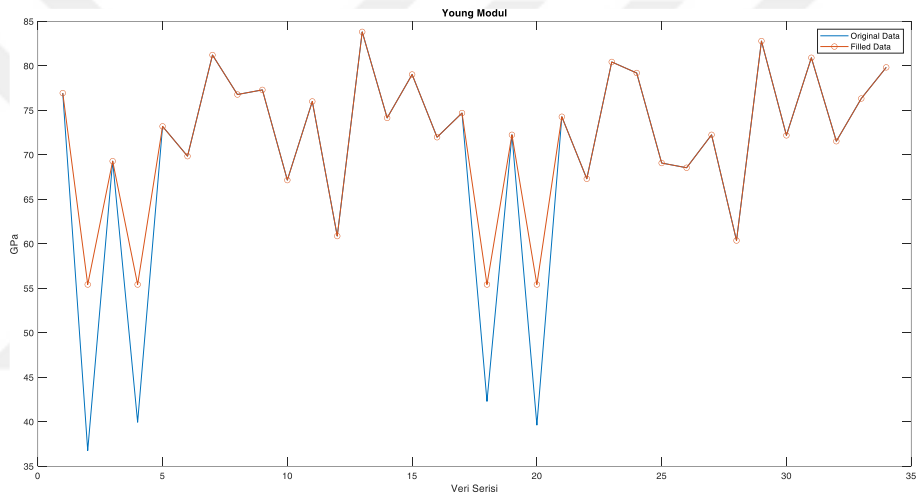
Şekil 7.10 Su emme özelliğinde aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi



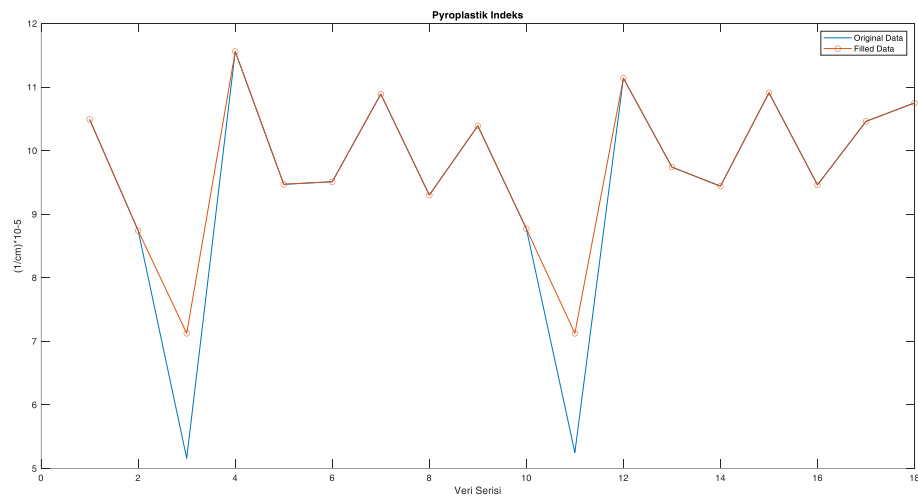
Şekil 7.11 Pişme küçülmesi özelliğinde aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi



Şekil 7.12 Poisson oranında aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi



Şekil 7.13 Young modülü özelliğinde aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi



Şekil 7.14 Pyroplastik indeksinde aykırı değer yerleştirmesi öncesinde ve sonrasındaki veri dizilimi

Aykırı değer tespiti ve ayıklama sonrası farklı özelliklerdeki veri setleri Tablo 7.4 ve 7.5 'te tekrar oluşturulmuştur.

**Tablo 7.4.** Sıcaklığa bağlı özelliklerin aykırı değer tespiti ve ayıklama sonrası elde edilen nihai değerler

Numune	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Su Emme (%)	Pişme Mukavemet (kg/cm <sup>2</sup> )	Pişme Küçülmesi (%)	Poisson Oranı	Young Modülü (GPa)	Isıl genleşme katsayısı (500°C)× 10 <sup>-7</sup>
A1-1180 (1)	2,42	0,10	599,6	8,99	0,2188	76,95	77,916
A2-1180 (1)	2,245	0,95	366,9	7,26	0,2016	55,435	88,248
A3-1180 (1)	2,4	0,52	639	8,56	0,2097	69,3	72,53
A4-1180 (1)	2,245	0,95	369,9	7,26	0,2753	55,435	85,15
A5-1180 (1)	2,45	0,00	643,9	9,88	0,1276	73,21	78,052
A6-1180 (1)	2,35	0,27	527,9	10,17	0,1704	69,86	93,446
A7-1180 (1)	2,44	0,00	581,4	10,06	0,2102	81,23	73,817
A8-1180 (1)	2,37	0,15	579,1	10,73	0,269	76,79	89,334
A1-1200 (1)	2,42	0,00	573,7	8,94	0,201	77,31	77,961
A2-1200 (1)	2,35	0,09	478,6	9,31	0,1492	67,17	94,833
A3-1200 (1)	2,42	0,00	563,4	8,69	0,1985	76,01	73,645
A4-1200 (1)	2,32	0,46	511,1	9,98	0,1492	60,88	88,086
A5-1200 (1)	2,43	0,00	541,1	9,34	0,2376	83,83	76,034
A6-1200 (1)	2,36	0,00	425,6	10,21	0,1651	74,16	93,748
A7-1200 (1)	2,43	0,00	459,1	9,42	0,2188	79,04	71,903
A8-1200 (1)	2,36	0,00	563,3	10,53	0,1841	71,99	88,201
A1-1180 (2)	2,42	0,12	615,8	8,99	0,2188	74,71	77,816
A2-1180 (2)	2,245	0,95	381,8	7,26	0,1141	55,435	88,112
A3-1180 (2)	2,39	0,57	637	8,56	0,2188	72,26	72,77
A4-1180 (2)	2,245	0,95	340,9	7,26	0,2517	55,435	85,27
A5-1180 (2)	2,45	0,00	621,2	9,88	0,08455	74,29	78,11
A6-1180 (2)	2,34	0,38	516,8	10,17	0,1314	67,32	93,489
A7-1180 (2)	2,44	0,00	581,4	10,06	0,2188	80,45	73,77
A8-1180 (2)	2,37	0,12	582,5	10,73	0,2893	79,21	89,414
A1-1200 (2)	2,42	0,00	579,8	8,94	0,2635	69,09	77,615
A2-1200 (2)	2,35	0,08	508,9	9,31	0,08455	68,56	94,59
A3-1200 (2)	2,42	0,00	530,1	8,69	0,2188	72,26	73,377
A4-1200 (2)	2,34	0,56	520,3	9,98	0,1531	60,38	88,586
A5-1200 (2)	2,42	0,00	554,5	9,34	0,2188	82,8	76,198
A6-1200 (2)	2,35	0,00	442,6	10,21	0,2029	72,2	93,504
A7-1200 (2)	2,43	0,00	456,5	9,42	0,201	80,92	72,269
A8-1200 (2)	2,36	0,00	569,5	10,53	0,1841	71,54	88,008

**Tablo 7.5.** Sıcaklıktan bağımsız özelliğin aykırı değer tespiti ve ayıklama sonrası elde edilen nihai değerler

Numune	PI (1/cm)x10 <sup>-5</sup>	E (GPa,s)
A1 (1)	10,49	0,22
A2 (1)	8,74	0,33
A3 (1)	7,125	0,43
A4 (1)	11,56	0,27
A5 (1)	9,47	0,17
A6 (1)	9,51	0,25
A7 (1)	10,89	0,13
A8 (1)	9,30	0,23
A1 (2)	10,39	0,23
A2 (2)	8,77	0,30
A3 (2)	7,125	0,40
A4 (2)	11,14	0,29
A5 (2)	9,74	0,16
A6 (2)	9,44	0,23
A7 (2)	10,91	0,16
A8 (2)	9,46	0,22

## 7.2. Varyans Analizi (ANOVA) ve Regresyon Modelleri

ANOVA analizi ve regresyon modeli, tam ve kademeli (stepwise) yöntemler olmak üzere iki farklı yöntemle gerçekleştirildi. Katmanlı ANOVA tablosu, incelenen çıktı (bağımlı değişken) değerine göre anlamlı derecede etkili olan faktörleri içermektedir. ANOVA tablosunda etkisi anlamsız olan ana faktörler ve etkileşim faktörleri hata terimine eklenmiştir. Hipotezlerin anlamlılık testleri,  $\alpha=0,05$  anlamlılık düzeyine göre yapılmıştır ve  $H_0$  red bölgesi P değeri ile belirtilmektedir. Faktör ana etkileri ve etkileşimlerinin P değeri 0,05'ten büyük ise bu etkileşimler ve etkiler hata terimine eklenirken, P değeri 0,05'ten küçük olan faktör ana etkileri ve etkileşimlerinden F değeri en yüksek olan en etkili olanıdır. Bu aşamada izlenen adımlar aşağıda verilmiştir.

- (1) *Yanıt/Tepki (response)*: En İyi Alt Kümeler Regresyonunu (Best Subsets Regression) belirleme yöntemidir. Bu yöntemde yüksek ayarlanmış R-kare [R-Sq(adj)], küçük standart regresyonun hatası ve değişken sayısı artı bire yakın bir Mallows' Cp'si olan bir model aranmaktadır,
- (2) *DOE analizi*: Deney tasarımı analizinde hem tam hem kademeli analiz modeli oluşturulmuştur. Tam deney tasarım analizi kullanarak faktörlerin

ANOVA tablosu oluşturulmuş ve bu tabloda düzeltilmiş kare toplamı (*Adj SS*) değerlerinden yola çıkarak ana etmenlerin her bir özellik üzerinde etkisi tayin edilmiştir. Bu hedef doğrultusunda, çeşitli etmenlerin belirli özelliklerdeki etkisini göstermek amacıyla pasta grafiği kullanılmıştır. Pasta grafiği oluşturulurken, parametrelerin etkisi SSA/SST oranı üzerinden yüzde olarak hesaplanmıştır. Daha sonra normal deney tasarım modelindeki karmaşıklığı gidermek için kademeli deney tasarım analiz yöntemi uygulanmış ve özelliklerin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Kademeli deney tasarım yönteminde  $\alpha$  seviyesi 0,05 olarak uygulanmıştır. Buna istinaden p-değeri  $\alpha=0,05$ 'ten büyük olan etkiler modele dahil edilmemiştir. Bu analizde aşağıdaki çıktılar elde edilmiştir.

- a. *Artık grafikleri (modelin uygunluk kontrolü)*: Uygunluk kontrolü veya adequacy checking, hataların üç önemli varsayımını doğrular: (i) hataların normal dağılım varsayımı, (ii) hataların sabit varyans varsayımı ve (iii) hataların bağımsızlık varsayımı. Bu varsayımların doğruluğu, deneysel veriler ile regresyon modelinden elde edilen veriler veya tahmin edilen yanıt değerleri arasındaki farktan kaynaklanan hata değerlerini karşılaştırarak yönetilir. Bu varsayımlar, çeşitli istatistiksel hata grafikleri aracılığıyla doğrulanabilir. Bu çalışmada, herhangi bir ileri istatistiksel analizden önce ve dört farklı grafikten (Bunlar; standartlaştırılmış hataların normal olasılık, histogramı, uygun değer ve gözlem sırası grafikleri) yararlanarak, bu üç varsayımın doğruluğunu kontrol etmek amacıyla model uygunluk kontrolü gerçekleştirilmiştir.
- b. *Standartlaştırılmış etkilerin normal ve Pareto grafiği*: Bu adımda, en etkili faktörleri daha iyi belirlemek için ANOVA'dan türetilen normal olasılık grafiği ve Pareto grafiği kullanılmıştır. Bu görsel araçlar, sadece operasyonel faktörlerin öngörülen yanıtlar üzerindeki yönsel ve boyutsal etkilerini görsel olarak açıklamakla kalmaz, aynı zamanda bu değerlendirmeyi F-istatistikleri aracılığıyla kolaylaştırarak iki yönlü bir amaca hizmet eder. Normal grafik, bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki yönlü

etkisini (pozitif veya negatif) gösterir. Pozitif ana etkiler, tepkiyi arttırırken, negatif ana etkiler tepkiyi azaltır. Pareto grafiği ise standartlaştırılmış etkilerin mutlak değerlerini en b¼y¼kten en k¼¼¼e sıralanmış olarak g¼sterir. Bir Pareto grafiğindeki standartlaştırılmış etkiler, tipik olarak belirli bir fakt¼r seviyesinin ortalaması ile genel ortalama arasındaki farkın standart hata ile b¼l¼nmesiyle hesaplanır. Bu hesaplama, her fakt¼r¼n yanıt değişkeni ¼zerindeki etkisini standart sapmalar cinsinden ¼lçer. Standartlaştırılmış etki, farklı fakt¼rlerin yanıt değişkenini etkilemedeki g¼receli ¼nemini karşılaştırmak için kullanılır. Ayrıca, Pareto grafiği, belirlenen  $\alpha$  seviyesine g¼re istatistiksel olarak anlamlı olan etkileri g¼stermek için bir referans çizgisi çizer. Sayısal değeri bu referans çizginin değerinden b¼y¼k olan fakt¼rler, tepki ¼zerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip oldukları ifade edilir.

- c. *Regresyon analizi*: Bir regresyon modeli, ana fakt¼rlerinin etkisini dikkate alarak bir yanıtı niceliksel olarak tahmin eder. F-istatistikleri kullanılarak her bir terimin ¼neminin incelenmesi ve modeli oluşturmak için ¼nemli terimlerin seçilmesi yoluyla bir ANOVA tablosundan t¼retilir. Ana etkileri ve etkileşimleri içeren bu ¼nemli terimler daha sonra regresyon modeline dahil edilir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (7.1)$$

Burada Y bağımlı değişken,  $X_1, \dots, X_k$  anlamlı bağımsız değişkenler,  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  katsayılar ve  $\varepsilon$  hata terimidir. Regresyon modelindeki katsayılar, analizde kullanılan t-değerleri tablosundan elde edilir. Bu veriler tipik olarak bir ¼rnek veya pop¼lasyon için hem bağımsız değişkenlerin (etki) hem de bağımlı değişkenin (yanıt/tepki) g¼zlemlerinden veya ¼lç¼mlerinden oluşur. Regresyon analizi, hatayı veya tahmin edilen değerler ile bağımlı değişkenin gerçek g¼zlemlenen değerleri arasındaki farkı en aza indiren en uygun katsayıları bulmak için bu verileri kullanır. Bu uyumun kalitesi, modelin performansının temel g¼stergeleri olarak hizmet eden

korelasyon katsayısı ( $R^2$ ), düzeltilmiş katsayı ( $R^2$ -adj.) ve tahmin edilen katsayı ( $R^2$ -pred.) değerleriyle ifade edilir [67].

- (3) *Ana Etki grafikleri*: Ana etki grafikleri, istatistiksel analizlerde kullanılan bir görselleştirme aracıdır. Bu grafikler, bağımlı değişkenin farklı gruplar arasındaki farklılıklarını göstermek için kullanılır. Ana etki, faktörlerin bağımlı değişken üzerindeki doğrudan etkisini ifade eder. Ana etki grafikleri, faktörlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini anlamak ve sonuçları daha iyi yorumlamak için önemli bir araçtır. Grafikler, gruplar arasındaki farklılıkları görsel olarak vurgulayarak analiz sonuçlarını daha anlaşılır hale getirir. Ayrıca, ana etkiler grafiği etkilerin büyüklüğünü ve istatistiksel önemini değerlendirmek için kullanılır.
- (4) *Etkileşim grafiği*: Etkileşim grafiği, istatistiksel analizlerde kullanılan bir görselleştirme aracıdır. Bu grafik, faktörler arasındaki etkileşimin bağımlı değişken üzerindeki etkisini gösterir. Etkileşim, faktörler arasındaki ilişki veya etkileşimin bağımlı değişken üzerindeki farklılıkları ifade eder. Etkileşim grafiği, faktörler arasındaki etkileşimi anlamak ve sonuçları daha iyi yorumlamak için önemli bir araçtır. Grafikler, faktörlerin birlikte etkileşiminin bağımlı değişken üzerindeki etkisini vurgulayarak analiz sonuçlarını daha anlaşılır hale getirebilir.
- (5) *Optimize yanıt sonuçları*: Optimize yanıt sonuçları, bir optimizasyon problemi için elde edilen en iyi veya en uygun çözümleri ifade eder. Bu sonuçlar, optimizasyon probleminin amaç fonksiyonunu maksimize etmek veya minimize etmek için en iyi parametre değerlerini veya çözüm noktalarını belirler.

Deney tasarımının tam analiz ANOVA tablosu tez içerisinde, kademeli ANOVA toplusu ise EK-2’de verilmiştir. Regresyon modelindeki katsayıların elde edildiği t-değeri tablosu ise EK-3’te verilmiştir.

### **7.2.1. Yoğunluk için deney tasarımı sonuçları**

Yoğunluk sonuçları deney tasarım metoduna göre iki tekrarda gerçekleşmiş sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

### 7.2.1.1. Yoğunluk için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi

Yoğunluk özelliğinin alt küme ve alt küme etkileşim faktörlerini incelediğimizde  $SiO_2/Al_2O_3-MgO/CaO-Sıcaklık$  alt kümesi en yüksek  $R^2$  (adj), en düşük hata (S) değerine sahip olması ve Mallows Cp değeri değişken sayısı+1 değerine en yakın olmak suretiyle en iyi alt küme ve dolayısıyla en etkin ana faktörler olarak belirlenmiştir (Tablo 7.6).

**Tablo 7.6.** Yoğunluk özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu

Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows Cp	S	S i O N S 2 a M i / 2 g c A O O a 1 / / k 2 K C l O 2 a i 3 O O k
1	47,7	46,1	40,8	19,1	0,065395	X
1	14,4	11,8	3,1	50,3	0,083672	X
2	62,2	59,7	54,3	7,5	0,056521	X X
2	54,6	51,7	45,1	14,6	0,061904	X X
3	69,1	66,0	60,0	3,0	0,051957	X X X
3	62,2	58,4	51,1	9,5	0,057423	X X X
4	69,1	64,9	57,1	5,0	0,052808	X X X X

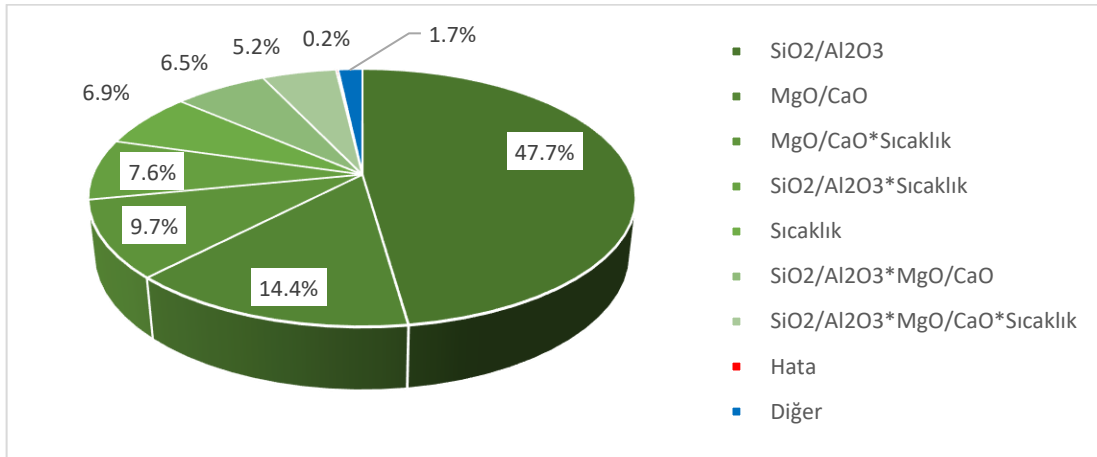
### 7.2.1.2. Yoğunluk için varyans analizi

Yoğunluk için tam ANOVA tablosu ve bu tablodan elde edilen etmenlerin etkisini gösteren pasta grafiği Tablo 7.7 ve Şekil 7.15' te verilmektedir.

Ana etmenler arasında en belirgin faktör, %47,7'lik bir etki payı ile  $SiO_2/Al_2O_3$  oranıdır.  $MgO/CaO$  ve  $MgO/CaO*Sıcaklık$  ikili etkileşim faktörü ise yoğunluk üzerinde sırasıyla %14,4 ve %9,7'lik etki paylarıyla ikinci ve üçüncü en önemli faktörlerdir.

**Tablo 7.7.** Yoğunluk için Anova tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	0,119700	0,007980	319,20	0,000
Linear	4	0,099412	0,024853	994,12	0,000
SiO2/Al2O3	1	0,080000	0,080000	3200,00	0,000
Na2O/K2O	1	0,000050	0,000050	2,00	0,176
MgO/CaO	1	0,015312	0,015312	612,50	0,000
Sıcaklık	1	0,004050	0,004050	162,00	0,000
2-Way Interactions	6	0,017237	0,002873	114,92	0,000
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O	1	0,000200	0,000200	8,00	0,012
SiO2/Al2O3*MgO/CaO	1	0,003612	0,003612	144,50	0,000
SiO2/Al2O3*Sıcaklık	1	0,005000	0,005000	200,00	0,000
Na2O/K2O*MgO/CaO	1	0,000612	0,000612	24,50	0,000
Na2O/K2O*Sıcaklık	1	0,000000	0,000000	0,00	1,000
MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,007812	0,007812	312,50	0,000
3-Way Interactions	4	0,003038	0,000759	30,38	0,000
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*MgO/CaO	1	0,000113	0,000113	4,50	0,050
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*Sıcaklık	1	0,000800	0,000800	32,00	0,000
SiO2/Al2O3*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,002112	0,002112	84,50	0,000
Na2O/K2O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,000012	0,000012	0,50	0,490
4-Way Interactions	1	0,000012	0,000012	0,50	0,490
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,000012	0,000012	0,50	0,490
Error	16	0,000400	0,000025		
Total	31	0,120100			

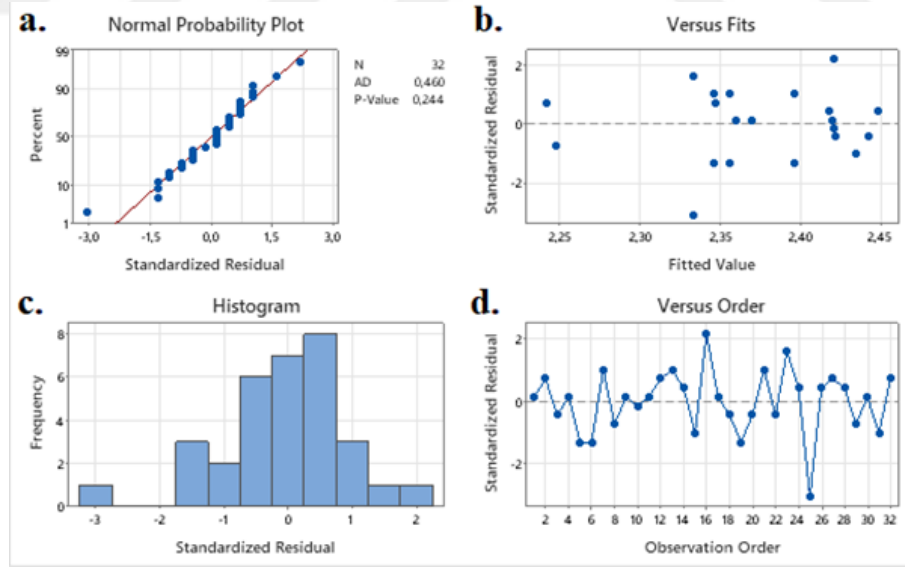


**Şekil 7.15.** Yoğunluk için pasta grafiğ i

Daha sonra kademeli ANOVA tablosu oluşturularak deney tasarım analizi  $\alpha=0,05$  seviyesinde gerçekleştirilmiştir (EK 2.1). Böylece p-değ eri  $\alpha=0,05$ 'ten büyük olan etkiler modele dahil edilmemiştir. Etkilerin standartlaştırılmış grafiğ ine bakıldığında  $Na_2O/K_2O$

ana faktörü ve  $Na_2O/K_2O*Sıcaklık$ ,  $Na_2O/K_2O*MgO/CaO*Sıcaklık$  ve  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*MgO/CaO*sıcaklık$  etkileşim faktörlerinin p-değerleri  $\alpha=0,05$ 'ten büyük olduğu için modele dahil edilememiştir.

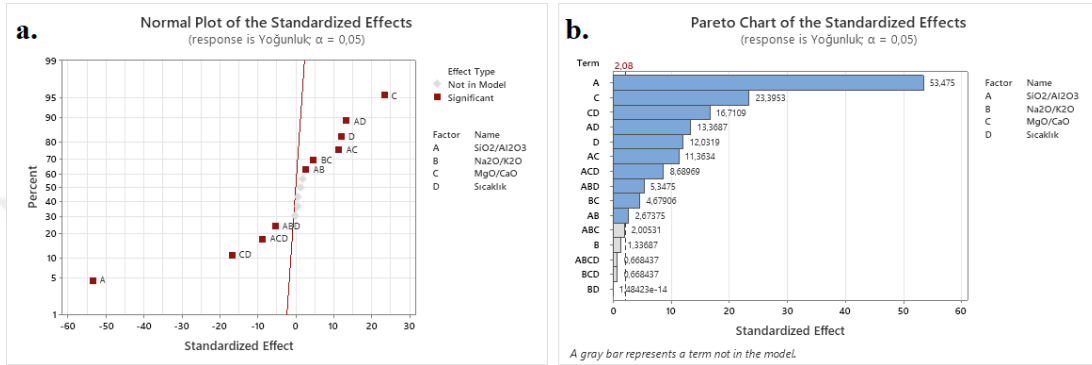
Yoğunluğun normal olasılık grafiği (Şekil 7.16) dikkate alındığında, tüm artık noktaların düz bir çizgi boyunca dağıldığı gözlemlenmektedir. Bu da tüm bağımlı değişkenlerin normal dağıldığının bir göstergesidir. Histogram grafiği aynı zamanda bağımlı değişkenlerin normal dağılımını da destekleyen neredeyse simetrik histogram çubuklarını göstermektedir. Öte yandan, standart artık ve uygun değer grafikleri, tüm veri noktalarının anlamlı bir yapı olmadan rastgele dağıtıldığını göstermektedir. Ayrıca artıkların sabit varyans kriterlerini de doğrular. Standartlaştırılmış artık ve gözlem sırası grafikleri, artıkların gözlem sırasından bağımsız olarak tamamen rastgele olduğunu gösterir, bu da artık noktalarının birbirinden bağımsız olduğunu ima eder. Sonuçta artıklara ilişkin tüm varsayımlara tam olarak uyulmaktadır. Bu nedenle önerilen regresyon modeli, söz konusu özellikler için deneysel verileri iyi bir şekilde ifade edebilmektedir. Bu yaklaşım tüm diğer tepkiler için de uygulanarak, diğer özelliklerin artık değer grafikleri de aynı şekilde yorumlanmıştır.



Şekil 7.16. Yoğunluk için artık değerlerin a) normal, b) uygun değer, c) histogram ve d) gözlem sırası grafikleri

Bu adımda, en etkili faktörleri daha iyi belirlemek için ANOVA'dan türetilen normal olasılık grafiği ve Pareto grafiği kullanılmıştır. Bu yöntem, yanıt değişkenini etkileyen farklı faktörlerin göreceli önemini karşılaştırılmasına olanak tanır. Şekil 7.17'

de gösterilen sonuçlar incelendiğinde yoğunluğu üzerindeki en önemli üç faktörün  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $MgO/CaO$  ve  $MgO/CaO*Sıcaklık$  etkileşim faktörü olduğu görülür.  $SiO_2/Al_2O_3$  ve  $MgO/CaO*Sıcaklık$  faktörleri yoğunluğu üzerinde olumsuz etkiye sahipken,  $MgO/CaO$  pozitif bir etkiye sahiptir. Bu yaklaşım tüm diğer tepkiler için de uygulanarak, yanıtları etkileyen tüm faktörler hem yönsel hem boyutsal olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 7.17. Yoğunluk için a) etkilerin standartlaştırılmış normal grafiği ve b) Pareto grafiği

Yoğunluğu etkileyen etmenlerin modellenmesinde deneysel doğrusal regresyon kullanılmıştır. Bu modelin katsayılarının hesaplanmasında kullanılan t-değeri tablosu EK 3.1' de verilmiştir. Kademeli deney sonuçlarından elde edilen matematiksel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$Yoğunluk (gr/cm^3) = 2,37500 - 0,050000 SiO_2/Al_2O_3 + 0,021875 MgO/CaO + 0,011250 Sıcaklık + 0,002500 SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O + 0,010625 SiO_2/Al_2O_3*MgO/CaO + 0,012500 SiO_2/Al_2O_3*Sıcaklık + 0,004375 Na_2O/K_2O*MgO/CaO - 0,015625 MgO/CaO*Sıcaklık - 0,005000 SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*Sıcaklık - 0,008125 SiO_2/Al_2O_3*MgO/CaO*Sıcaklık$$

Yoğunluk için modelin hata değeri yaklaşık 0,005 olarak hesaplanmıştır. Bu matematiksel model ile ilgili model özeti Tablo 7.8' de verilmiştir.

Tablo 7.8. Yoğunluk için elde edilen matematiksel model özeti

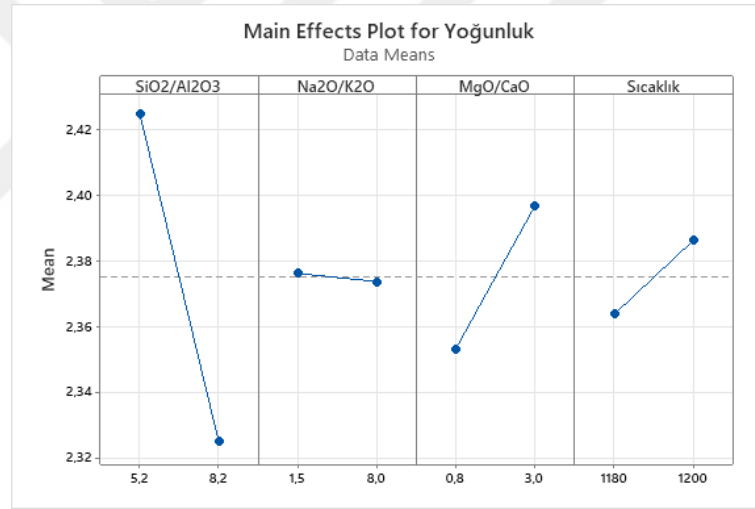
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0052893	99,51%	99,28%	98,86%

### 7.2.1.3. Yoğunluk için ana etki ve etkileşim grafikleri

Deney sonuçlarına göre, yoğunluk için ana etki ve etkileşim grafikleri sırasıyla Şekil 7.18 ve 7.19' da verilmiştir.

Ana etki grafiklerine bakıldığında,  $SiO_2/Al_2O_3$  oranının yoğunlukla ters orantılı olduğu gözlemlenmektedir. Yani  $SiO_2/Al_2O_3$  oranı arttıkça yoğunluk azalmaktadır. Öte yandan,  $MgO/CaO$  oranı ve *sıcaklık* artışı yoğunluğun artmasıyla ilişkilidir.  $MgO/CaO$  oranı ve *sıcaklık* arttıkça yoğunluk da artmaktadır. Diğer bir faktör olan  $Na_2O/K_2O$  oranının ise yoğunluk üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı gözlemlenmektedir. Bu faktör yoğunluk üzerinde anlamlı bir etki yapmamaktadır.

Özet olarak,  $SiO_2/Al_2O_3$  oranının düşürülmesi,  $MgO/CaO$  oranı ve *sıcaklık* artışının ise artırılması yoğunluğu artırma potansiyeline sahiptir.  $Na_2O/K_2O$  oranı ise yoğunluk üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir.



Şekil 7.18. Deney sonuçlarına göre, yoğunluk için ana faktörlerin etki grafikleri

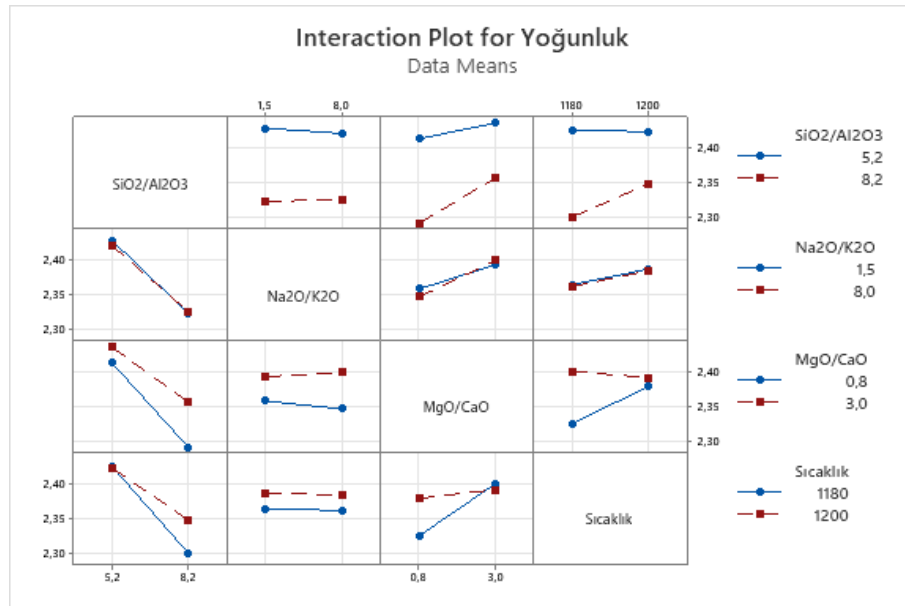
Etkileşim grafiklerine bakıldığında, yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde  $MgO/CaO$  ve *sıcaklık* artışının yoğunluk üzerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum,  $MgO/CaO$  ve *sıcaklık* faktörlerinin yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde yoğunluk artışını daha belirgin bir şekilde etkilediğini göstermektedir.

Öte yandan, düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde  $MgO/CaO$  ve *sıcaklık* artışının yoğunluk üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu durum,  $MgO/CaO$  ve *sıcaklık* faktörlerinin düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde yoğunluk artışını sınırlı bir şekilde etkilediğini göstermektedir.

Bu bulgular,  $SiO_2/Al_2O_3$  oranının  $MgO/CaO$  ve sıcaklık faktörleriyle etkileşimini gösteren önemli bir bilgi sunmaktadır. Yüksek ve düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranlarına sahip bünyelerde  $MgO/CaO$  ve sıcaklık faktörlerinin yoğunluk üzerindeki etkilerinin farklı olduğu belirlenmiştir. Bu bilgi, seramik veya porselen üretiminde  $SiO_2/Al_2O_3$  oranının ve  $MgO/CaO$  ile sıcaklık faktörlerinin yoğunluk üzerindeki optimize edilmiş etkisini anlamak için önemli bir rehberlik sağlamaktadır.

Sıcaklık ve  $MgO/CaO$  etkileşim grafiği incelendiğinde, düşük  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde sıcaklık faktörünün yoğunluk artışında etkili olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, sıcaklığın düşük  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde yoğunluk artışını teşvik eden bir etken olduğunu göstermektedir. Öte yandan, yüksek  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde sıcaklığın yoğunluk üzerindeki etkisi kaybolmaktadır. Bu durum, yüksek  $MgO/CaO$  oranının yoğunluk üzerindeki etkisini baskıladığını ve sıcaklığın bu bünyelerdeki yoğunluk değişimini etkilemediğini göstermektedir.

Bu sonuçlar,  $MgO/CaO$  oranının yoğunluk üzerindeki etkisini sıcaklık faktörü ile etkileşimini gösteren önemli bir bilgi sunmaktadır. Düşük ve yüksek  $MgO/CaO$  oranlarına sahip bünyelerde sıcaklık faktörünün farklı etkiler sergilediği belirlenmiştir.

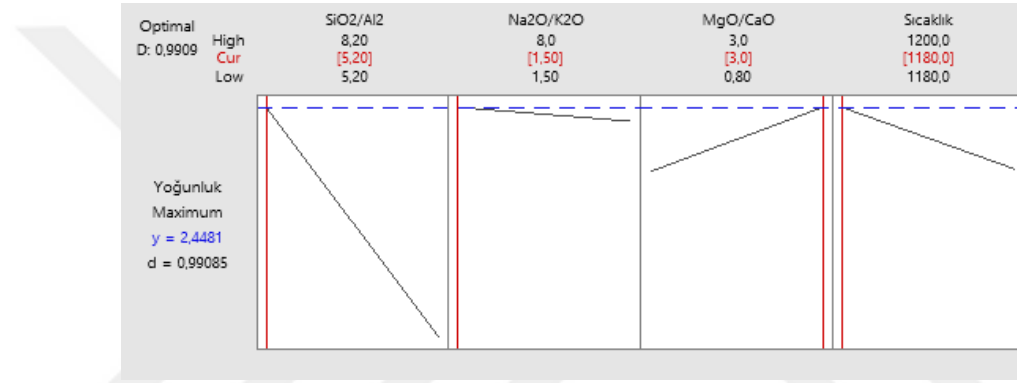


Şekil 7.19. Deney sonuçlarına göre, yoğunluk için etkileşim grafikleri

Bu bulgular, porselen veya seramik üretiminde  $SiO_2/Al_2O_3$  oranının ve  $MgO/CaO$  ile *sıcaklık* faktörlerinin ve  $MgO/CaO$  oranının ve *sıcaklık* faktörünün yoğunluk üzerindeki etkisini anlamak ve optimize etmek için önemli bir rehberlik sağlamaktadır.

#### 7.2.1.4. Yoğunluk için optimize yanıt sonucu

Yoğunluğu maksimize etmek amaçlı optimum yanıt hesaplanmış sonucu Şekil 7.20 'de verilmiştir. Yoğunluğu maksimize etmek adına en iyi oranlar  $SiO_2/Al_2O_3=5,2$ ,  $Na_2O/K_2O=1,5$ ,  $MgO/CaO=3$  ve sinterleme sıcaklığı  $1180^\circ C$  olarak belirlenmiştir. Model tahminine istinaden  $\alpha=0,05$  seviyesinde bu oranlara sahip bir bünyenin yoğunluğu 2,43 ile 2,46  $gr/cm^3$  aralığında olmalıdır.



Şekil 7.20. Maksimum yoğunluk için optimum tahmin grafiği

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.9 'da verilmiştir.

Tablo 7.9. Optimum yoğunluk için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı

Değişken	Düzyey
$SiO_2/Al_2O_3$	5,2
$Na_2O/K_2O$	1,5
$MgO/CaO$	3
Sıcaklık ( $^\circ C$ )	1180

Yanıt	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Yoğunluk ( $gr/cm^3$ )	2,44812	0,00310	(2,44168; 2,45457)	(2,43537; 2,46088)

#### 7.2.2. Su emme için deney tasarımı sonuçları

Su emme sonuçları deney tasarım metoduna göre iki tekrarda gerçekleştirilmiş sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

### 7.2.2.1. Su emme için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi

Su emme özelliğinin alt küme ve alt küme etkileşim faktörlerini incelediğimizde  $SiO_2/Al_2O_3$ - $MgO/CaO$ - $Sıcaklık$  alt kümesi en yüksek R-Sq (adj), en düşük hata (S) değerine sahip olması ve Mallows Cp değeri değişken sayısı+1 değerine en yakın olmak üzere en iyi alt küme ve dolayısıyla en etkin ana faktörler olarak belirlenmiştir (Tablo 7.10).

**Tablo 7.10.** Su emme özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu

Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows Cp	S	S i O N S 2 a M i / 2 g c A O O a 1 / / k 2 K C l O 2 a i 3 O O k
1	16,6	14,0	5,5	16,7	1,7888	X
1	15,9	13,3	4,8	17,1	1,7963	X
2	32,5	28,1	18,3	9,8	1,6351	X X
2	32,2	27,8	17,9	9,9	1,6388	X X
3	48,1	42,9	32,7	3,1	1,4576	X X X
3	32,6	25,8	12,5	11,7	1,6610	X X X
4	48,2	41,0	27,8	5,0	1,4813	X X X X

### 7.2.2.2. Su emme için varyans analizi

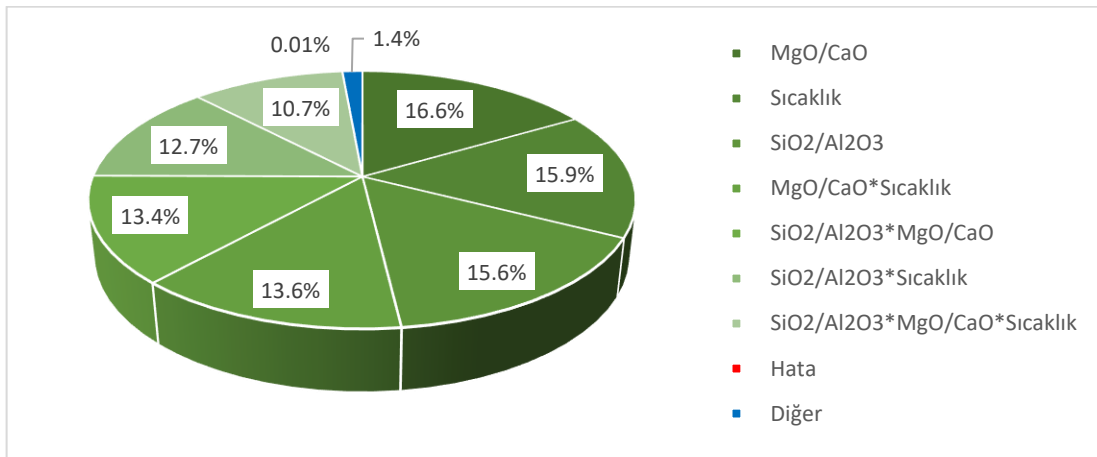
Su emme için ana etmenlerden en önemli faktör %16,5 ile  $MgO/CaO$  oranıdır.  $Sıcaklık$  ve  $SiO_2/Al_2O_3$  faktörleri ise sırasıyla %15,9 ve %15,6 ile ikinci ve üçüncü en önemli faktörlerdir.

İkili etkileşim faktörleri ( $MgO/CaO*Sıcaklık$ ,  $SiO_2/Al_2O_3*MgO/CaO$  ve  $SiO_2/Al_2O_3*Sıcaklık$ ), su emme üzerinde belirgin bir rol oynadıkları gözlemlenmektedir. Bu etkileşim faktörlerinin su emme üzerinde sırasıyla %13,6, %13,4 ve %12,7 gibi önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Su emme için tam ANOVA tablosu ve bu tablodan elde edilen etmenlerin etkisini gösteren pasta grafiği Tablo 7.11 ve Şekil 7.21’ de verilmektedir.

**Tablo 7.11.** Su emme için Anova tablosu

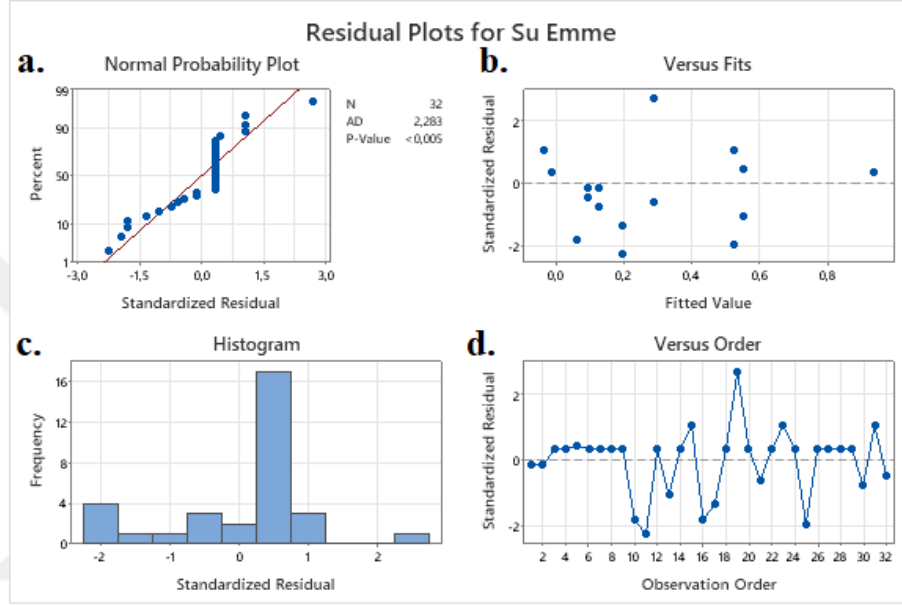
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	3,38159	0,225439	277,46	0,000
Linear	4	2,35393	0,588481	724,28	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0,66125	0,661250	813,85	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,05611	0,056112	69,06	0,000
MgO/CaO	1	0,90451	0,904513	1113,25	0,000
Sıcaklık	1	0,73205	0,732050	900,98	0,000
2-Way Interactions	6	0,82017	0,136696	168,24	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,00500	0,005000	6,15	0,025
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	0,23805	0,238050	292,98	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	1	0,15401	0,154013	189,55	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,13781	0,137812	169,62	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	0,00405	0,004050	4,98	0,040
MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,28125	0,281250	346,15	0,000
3-Way Interactions	4	0,15137	0,037844	46,58	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,00405	0,004050	4,98	0,040
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	0,13781	0,137812	169,62	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,00451	0,004512	5,55	0,032
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,00500	0,005000	6,15	0,025
4-Way Interactions	1	0,05611	0,056112	69,06	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,05611	0,056112	69,06	0,000
Error	16	0,01300	0,000813		
Total	31	3,39459			



**Şekil 7.21.** Su emme için pasta grafiği

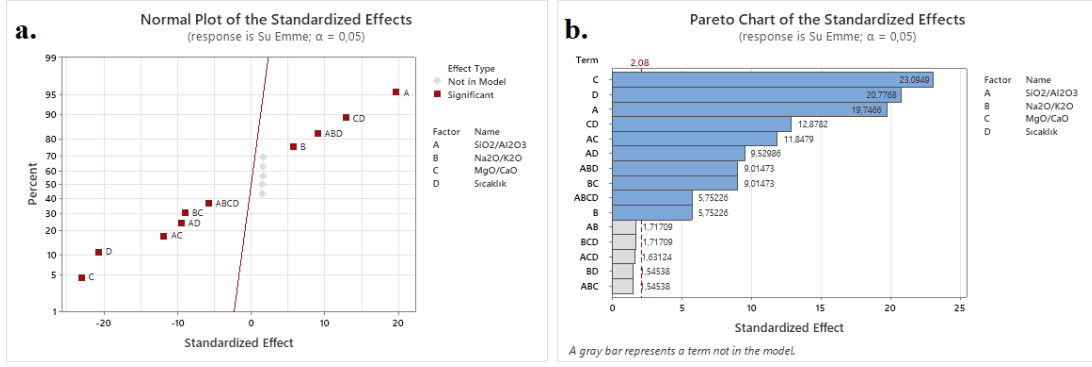
Deney tasarımı analizi devamında, kademeli ANOVA tablosu oluşturularak kademeli regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Etkilerin standartlaştırılmış grafiğine bakıldığında  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O$ ,  $Na_2O/K_2O*Sıcaklık$ ,  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*MgO/CaO$ ,

$SiO_2/Al_2O_3 * MgO/CaO * sıcaklık$  ve  $Na_2O/K_2O * MgO/CaO * Sıcaklık$  etkileşim faktörlerinin p-değerleri  $\alpha=0,05$ 'ten büyük olduğu için modele dahil edilememiştir. Kademeli ANOVA tablo sonuçları EK 2.2'de verilmiştir. Daha sonra herhangi bir ileri istatistiksel analizden önce, artık değer grafiklerinden yararlanarak, bu üç varsayımın doğruluğunu kontrol etmek amacıyla model uygunluk kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 7.22' de ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 7.22. Su emme için artık değer a) normal, b) uygun değer, c) histogram ve d) gözlem sırası grafikleri

Şekil 7.23'te Su emme için kademeli ANOVA tablosu sonucu elde edilen Normal olasılık ve Pareto grafiklerini vermektedir. Bu grafiklere istinaden,  $SiO_2/Al_2O_3$  ve  $Na_2O/K_2O$  faktörlerinin etkileri pozitif yöndeyken,  $MgO/CaO$  ve  $Sıcaklık$  faktörlerinin etkileri negatif yönde olduğu görülmektedir.  $MgO/CaO$ ,  $Sıcaklık$  ve  $SiO_2/Al_2O_3$  faktörleri ise sırasıyla su emme üzerinde en büyük etkiye sahip oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 7.23. Su emme için a) etkilerin standartlaştırılmış normal grafiği ve b) Pareto grafiği

Su emmeyi etkileyen etmenlerin modellenmesinde deneysel doğrusal regresyon kullanılmıştır. Bu modelin katsayılarının hesaplanmasında kullanılan t-değeri tablosu EK 3.2 'de verilmiştir. Kademeli deney sonuçlarından elde edilen matematiksel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Su Emme (\%)} = & 0,22563 + 0,14375 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,04188 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} - 0,16812 \text{ MgO}/\text{CaO} \\ & - 0,15125 \text{ Sıcaklık} - 0,08625 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO}/\text{CaO} \\ & - 0,06937 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Sıcaklık} - 0,06562 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} * \text{MgO}/\text{CaO} \\ & + 0,09375 \text{ MgO}/\text{CaO} * \text{Sıcaklık} + 0,06563 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} * \text{Sıcaklık} \\ & - 0,04188 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} * \text{MgO}/\text{CaO} * \text{Sıcaklık} \end{aligned}$$

Su emme için modelin hata değeri bu model için 0,041 olarak hesaplanmıştır. Bu matematiksel model ile ilgili model özeti Tablo 7.12 'de verilmiştir.

Tablo 7.12. Su emme için elde edilen matematiksel modelin özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0411805	98,95%	98,45%	97,56%

### 7.2.2.3. Su emme için ana etki ve etkileşim grafikleri

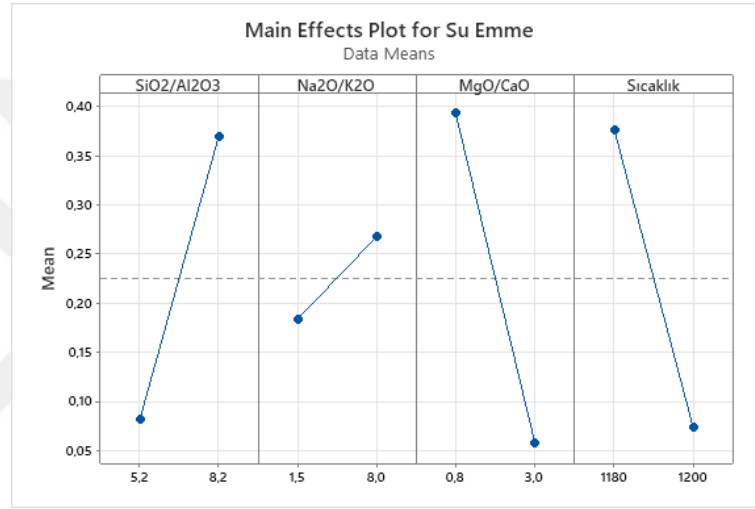
Deney sonuçlarına göre, yoğunluk için ana etki ve etkileşim grafikleri sırasıyla Şekil 7.24 ve 7.25 'te verilmiştir.

Ana etki grafiklerine bakıldığında, *MgO/CaO* oranı ve *sıcaklık* faktörlerinin su emme özelliği ile ters orantılı olduğu gözlemlenmektedir. Yani, *MgO/CaO* oranı ve *sıcaklık* arttıkça su emme miktarı azalmaktadır. Bu faktörler su emme özelliğini olumlu yönde etkilemektedir.

Bunun aksine,  $SiO_2/Al_2O_3$  oranı su emme ile doğru orantılıdır. Yani,  $SiO_2/Al_2O_3$  oranı arttıkça su emme miktarı da artmaktadır. Bu faktör su emme özelliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

$Na_2O/K_2O$  faktörü ise su emme özelliği üzerinde oldukça düşük bir etkiye sahiptir. Yoğunlukta olduğu gibi su emme özelliğinde de  $Na_2O/K_2O$  faktörünün etkisi önemsizdir.

Bu gözlem ve analizler, su emme özelliğinin kontrolü ve optimize edilmesi için  $MgO/CaO$  oranı, *sıcaklık* ve  $SiO_2/Al_2O_3$  oranının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.  $Na_2O/K_2O$  faktörü ise su emme özelliği üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir.



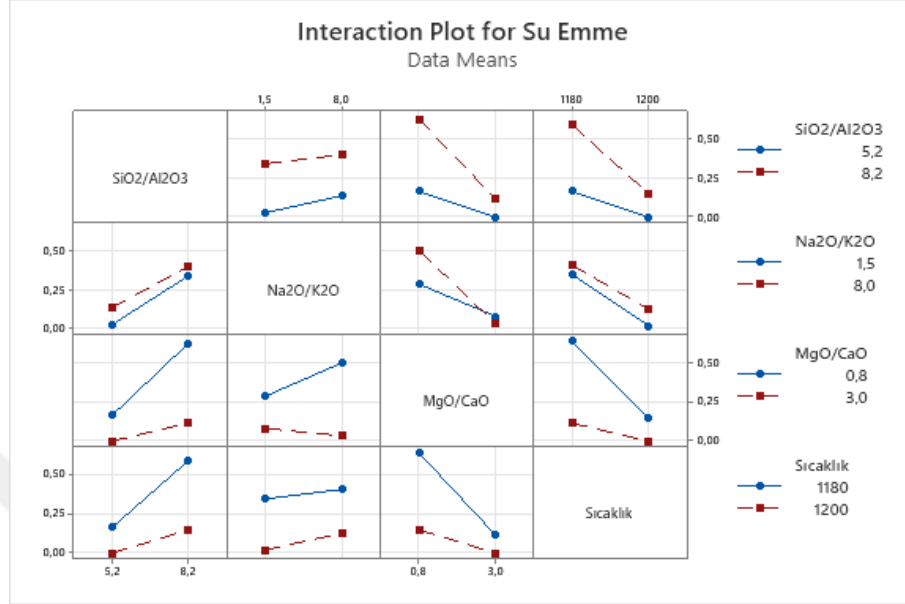
Şekil 7.24. Deney sonuçlarına göre, su emme için ana faktörlerin etki grafikleri

Etkileşim grafiklerine bakıldığında, yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranlarına sahip bünyelerde  $MgO/CaO$  oranı ve *sıcaklık* artışının su emme üzerinde daha etkili olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda,  $MgO/CaO$  oranı ve *sıcaklık* arttıkça su emme miktarının daha belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir.

Öte yandan, düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranlarına sahip bünyelerde  $MgO/CaO$  oranı ve *sıcaklık* artışının su emme üzerinde çok az bir etkisi olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda,  $MgO/CaO$  oranı ve *sıcaklık* artışıyla birlikte su emme miktarında sadece hafif bir azalma gerçekleşmektedir.

*Sıcaklık* ve  $MgO/CaO$  etkileşim grafiğine bakıldığında, düşük  $MgO/CaO$  oranlarına sahip bünyelerde *sıcaklık* faktörünün su emme azalması için etkili olduğu görülmektedir. Ancak, yüksek  $MgO/CaO$  oranlarına sahip bünyelerde *sıcaklığın* su emme üzerindeki etkisinin azaldığı görülmektedir.

Bu gözlem ve analizler, su emme özelliğinin kontrol edilmesi ve optimize edilmesi için  $SiO_2/Al_2O_3$  oranı,  $MgO/CaO$  oranı ve sıcaklık faktörlerinin etkileşimini dikkate almanın önemli olduğunu göstermektedir.

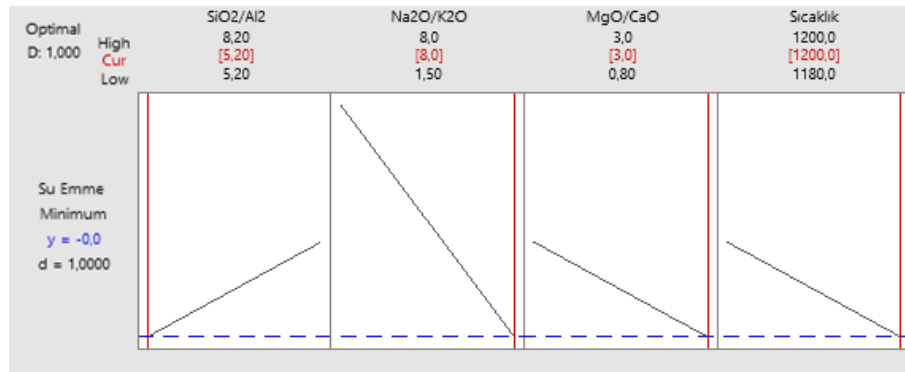


Şekil 7.25. Deneysel sonuçlarına göre, su emme için etkileşim grafikleri

#### 7.2.2.4. Su emme için optimize yanıt sonucu

Su emme özelliğini minimize etmek amaçlı optimum yanıt hesaplanmış, sonucu Şekil 7.26 'da gösterilmiştir.

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini aşağıda verilmiştir, Su emmeyi minimize etmek adına en iyi oranlar  $SiO_2/Al_2O_3=5,2$ ,  $Na_2O/K_2O=8,0$ ,  $MgO/CaO=3,0$  ve sinterleme sıcaklığı 1200°C olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.26. Minimum su emme için optimum tamin grafiği

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.13 'te verilmiştir.

**Tablo 7.13.** *Optimum su emme için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı*

Değişken	Düzye
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	8
MgO/CaO	3
Sıcaklık (°C)	1200

Yanıt	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Su Emme (%)	0,0000	0,0425	(0,0000; 0,0314)	(0,0000; 0,0684)

### 7.2.3. Pişme mukavemet için deney tasarımı sonuçları

Pişme mukavemeti sonuçları deney tasarım metoduna göre iki tekrarda gerçekleştirilmiş sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

#### 7.2.3.1. Pişme mukavemet için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi

Pişme mukavemeti özelliğinin alt küme ve alt küme etkileşim faktörlerini incelediğimizde *SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO/CaO-Sıcaklık* alt kümesi en yüksek R-Sq (adj), en düşük hata (S) değerine sahip olması ve Mallows Cp değeri değişken sayısı+1 değerleri birbirine oldukça yakın olmak üzere en iyi alt küme ve dolayısıyla en etken ana faktörler olarak belirlenmiştir.

**Tablo 7.14.** *Mukavemet özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu*

Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows Cp	S	S i O N S 2 a M i / 2 g c A O O a 1 / / k 2 K C l O 2 a i 3 O O k
1	29,8	27,6	20,9	0,7	71,564	X
1	2,5	0,0	0,0	12,6	84,347	X
2	32,3	27,9	18,8	1,6	71,418	X X
2	31,1	26,6	17,3	2,1	72,052	X X
3	33,5	26,9	15,0	3,1	71,919	X X X
3	32,4	25,7	13,5	3,6	72,518	X X X
4	33,7	24,5	9,3	5,0	73,066	X X X X

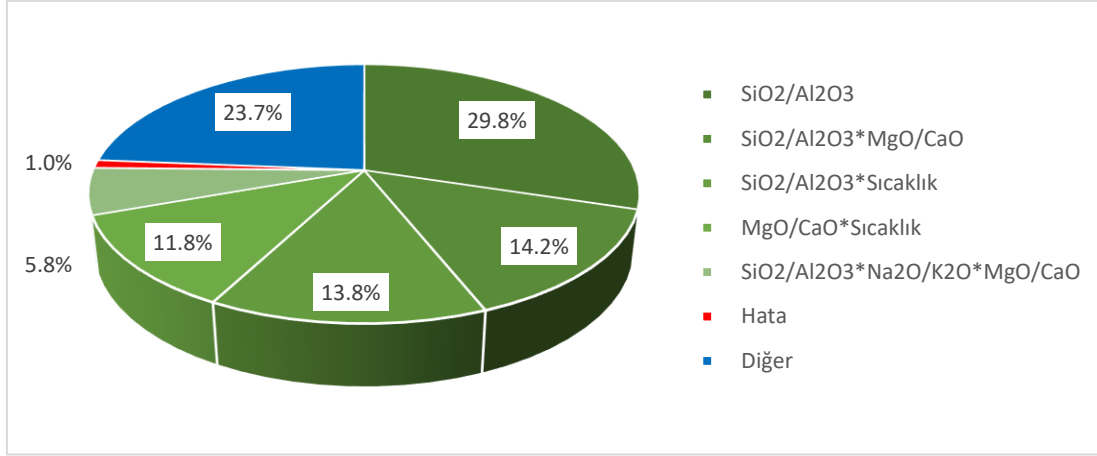
### 7.2.3.2. Pişme mukavemeti için varyans analizi

Pişme mukavemeti için yapılan ANOVA analizi sonucunda elde edilen tablo ve bu tablodan elde edilen etmenlerin etkisini gösteren pasta grafiği sırasıyla Tablo 7.15 ve Şekil 7.27' de sunulmaktadır. Ana etmenlerden en önemli faktör, %30'luk etkisiyle  $SiO_2/Al_2O_3$  faktörüdür. Bu faktörün, pişme mukavemeti üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. İkinci ve üçüncü en önemli faktörler ise sırasıyla %15 ile  $SiO_2/Al_2O_3*Sıcaklık$  ve % 14 ile  $SiO_2/Al_2O_3*MgO/CaO$  ikili etkileşim faktörleridir.

$Na_2O/K_2O$  faktörünün,  $SiO_2/Al_2O_3$  ve  $MgO/CaO$  faktörleri ile etkileşimi ise pişme mukavemeti üzerinde yaklaşık %6'lık bir etkisi olduğu görülmektedir.

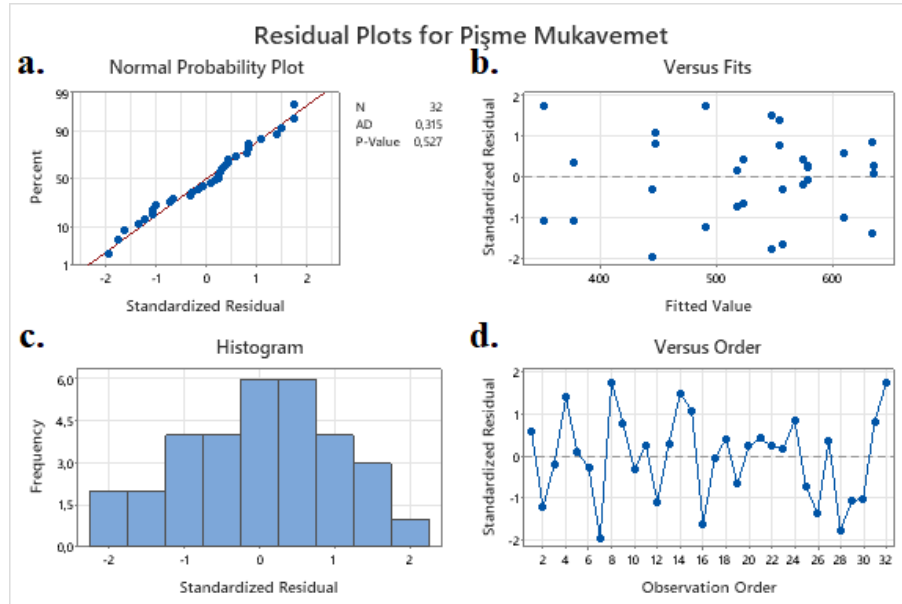
**Tablo 7.15.** Pişme mukavemeti için Anova tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	216201	14413,4	99,36	0,000
Linear	4	78608	19652,1	135,47	0,000
$SiO_2/Al_2O_3$	1	69546	69545,9	479,41	0,000
$Na_2O/K_2O$	1	350	349,8	2,41	0,140
$MgO/CaO$	1	5767	5767,4	39,76	0,000
Sıcaklık	1	2945	2945,3	20,30	0,000
2-Way Interactions	6	106974	17829,0	122,90	0,000
$SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O$	1	13995	13994,6	96,47	0,000
$SiO_2/Al_2O_3*MgO/CaO$	1	33037	33037,4	227,74	0,000
$SiO_2/Al_2O_3*Sıcaklık$	1	32207	32207,2	222,02	0,000
$Na_2O/K_2O*MgO/CaO$	1	268	268,0	1,85	0,193
$Na_2O/K_2O*Sıcaklık$	1	30	30,4	0,21	0,653
$MgO/CaO*Sıcaklık$	1	27437	27436,5	189,13	0,000
3-Way Interactions	4	30602	7650,6	52,74	0,000
$SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*MgO/CaO$	1	13547	13546,6	93,38	0,000
$SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*Sıcaklık$	1	5719	5719,2	39,42	0,000
$SiO_2/Al_2O_3*MgO/CaO*Sıcaklık$	1	10967	10966,8	75,60	0,000
$Na_2O/K_2O*MgO/CaO*Sıcaklık$	1	370	369,9	2,55	0,130
4-Way Interactions	1	17	16,5	0,11	0,740
$SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*MgO/CaO*Sıcaklık$	1	17	16,5	0,11	0,740
Error	16	2321	145,1		
Total	31	218522			

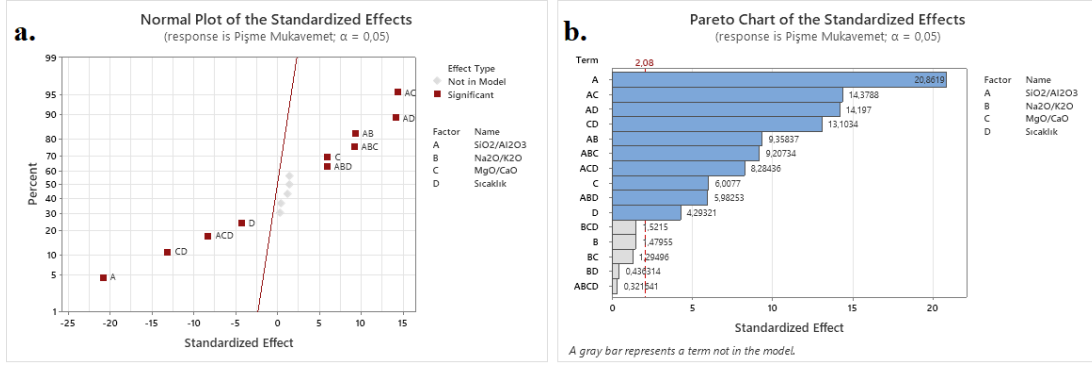


Şekil 7.27. Pişme mukavemeti için pasta grafiği

Daha sonra kademeli ANOVA tablosu oluşturularak deney tasarım analizi gerçekleştirilmiştir. Etkilerin standartlaştırılmış grafiğinde bakıldığında  $Na_2O/K_2O$  faktörü ve  $Na_2O/K_2O*MgO/CaO$ ,  $Na_2O/K_2O*Sıcaklık$ ,  $Na_2O/K_2O*MgO/CaO*Sıcaklık$  ve  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*MgO/CaO*sıcaklık$  etkileşim faktörlerinin p-değerleri  $\alpha=0,05$ 'ten büyük olduğu için modele dahil edilememiştir. Kademeli ANOVA tablo sonuçları EK 2.3'te verilmiştir. Oluşturulmuş modelin artık değer grafikleri ve standartlaştırılmış etki Şekil 7.28 ve 7.29 'da verilmiştir.



Şekil 7.28. Pişme mukavemeti için artık değer a) normal, b) uygun değer, c) histogram ve d) gözlem sırası grafikler



Şekil 7.29. Pişme mukavemeti için a) etkilerin standartlaştırılmış normal grafiği ve b) Pareto grafiği

Mukavemeti etkileyen etmenlerin modellenmesinde deneysel doğrusal regresyon kullanılmıştır. Bu modelin katsayılarının hesaplanmasında kullanılan t-değeri tablosu EK 3.3 'te verilmiştir. Kademeli deney sonuçlarından elde edilen matematiksel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \text{Pişme Mukavemeti (Kg/cm}^2\text{)} &= 526,97 - 46,62 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + 13,43 \text{ MgO/CaO} - 9,59 \text{ Sıcaklık} \\
 &+ 20,91 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O/K}_2\text{O} + 32,13 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO/CaO} \\
 &+ 31,72 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Sıcaklık} - 29,28 \text{ MgO/CaO} * \text{Sıcaklık} \\
 &+ 20,58 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O/K}_2\text{O} * \text{MgO/CaO} \\
 &+ 13,37 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O/K}_2\text{O} * \text{Sıcaklık} \\
 &- 18,51 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO/CaO} * \text{Sıcaklık}
 \end{aligned}$$

Pişme mukavemeti için hata değeri bu model için 12,64 olarak hesaplanmıştır. Bu matematiksel model ile ilgili model özeti Tablo 7.16 'da verilmiştir.

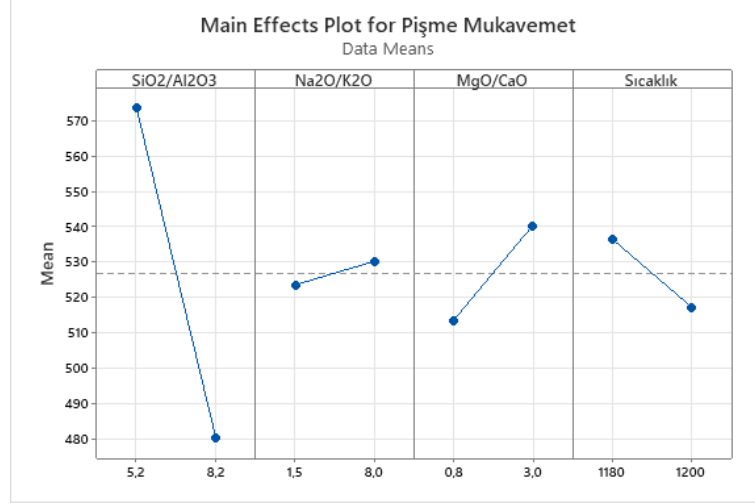
Tablo 7.16. Pişme mukavemeti için elde edilen matematiksel model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
12,6410	98,46%	97,73%	96,43%

### 7.2.3.3. Pişme mukavemet için ana etki ve etkileşim grafikleri

Deney sonuçlarına göre, pişme mukavemeti için ana etki ve etkileşim grafikleri Şekil 7.30 ve 7.31 'de verilmiştir.

Ana etki grafiklerine bakıldığında,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ve *Sıcaklık* faktörlerinin artışının pişme mukavemetini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Bu faktörlerin artmasıyla birlikte pişme mukavemetinde bir azalma gözlenmektedir. Öte yandan, *MgO/CaO* ve  $\text{Na}_2\text{O/K}_2\text{O}$  faktörlerinin artışı ise pişme mukavemetini olumlu yönde etkilemektedir. Bu faktörlerin artması pişme mukavemetinin artmasına neden olmaktadır.

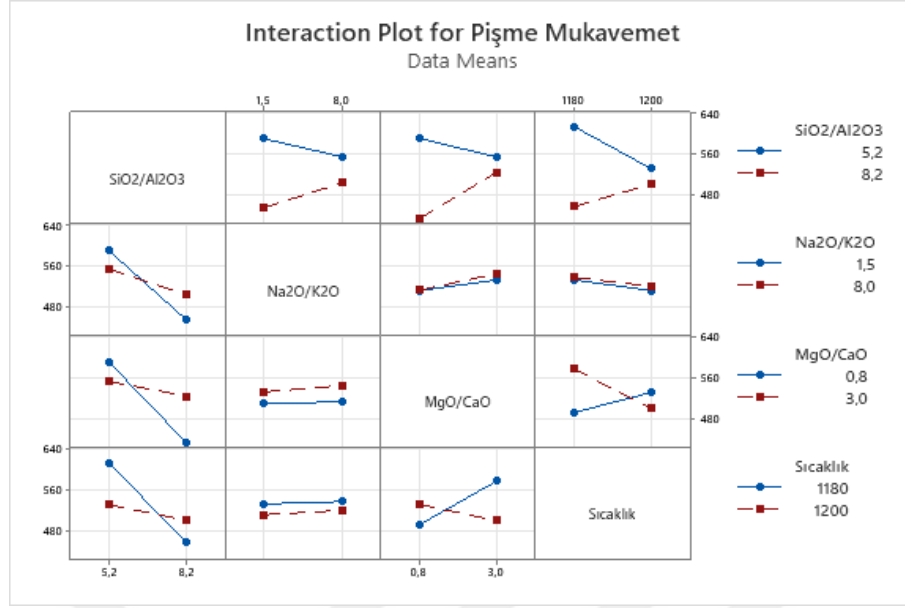


Şekil 7.30. Deney sonuçlarına göre, pişme mukavemeti için ana faktörlerin etki grafikleri

Etkileşim grafiklerine bakıldığında, yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerin Sıcaklık,  $MgO/CaO$  ve  $Na_2O/K_2O$  faktörlerinin artışından olumlu yönde etkilendiği gözlenmektedir. Bu faktörlerin artmasıyla birlikte pişme mukavemetinde bir artış meydana gelmektedir. Ancak, düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde tam tersi bir davranış gözlenmektedir. Bu durumda, Sıcaklık,  $MgO/CaO$  ve  $Na_2O/K_2O$  faktörlerinin artışı pişme mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir.

Düşük  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde Sıcaklık artışının mukavemete avantaj sağladığı görülmektedir. Ancak, yüksek  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde Sıcaklık artışı mukavemetin düşmesine neden olmaktadır. Yüksek  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde  $Na_2O/K_2O$  oranının artışının mukavemetin az miktarda artışına yol açtığı ancak düşük  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde  $Na_2O/K_2O$  oranının artışının mukavemet açısından nötr bir etkiye sahip olduğu gözlenmektedir.

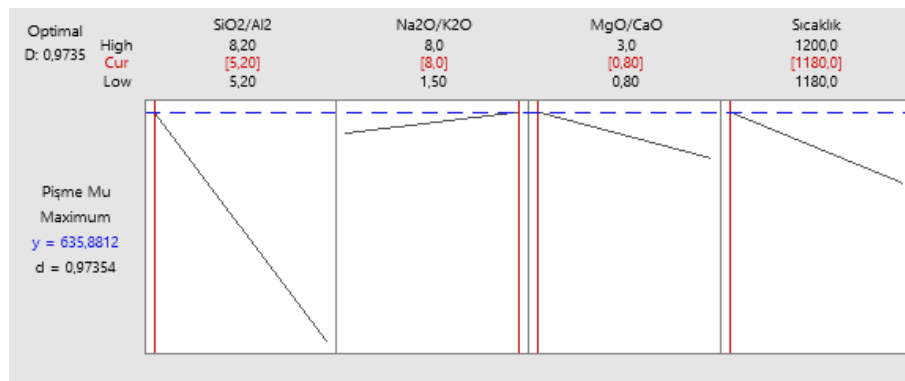
$Na_2O/K_2O$  ile Sıcaklık faktörlerinin ikili etkileşimine bakıldığında ise, Sıcaklık artışının (hem yüksek hem de düşük  $Na_2O/K_2O$  oranlarında) pişme mukavemetini negatif yönde etkilediği, yani mukavemetin azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.31. Deney sonuçlarına göre, pişme mukavemeti için etkileşim grafikleri

#### 7.2.3.4. Pişme mukavemet için optimize yanıt

Nihai mukavemeti maksimize etmek amaçlı optimum yanıt hesaplanmış, sonucu Şekil 7.32' de verilmiştir. Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini aşağıda verilmiştir, Yoğunluğu maksimize etmek adına en iyi oranlar  $SiO_2/Al_2O_3=5,2$ ,  $Na_2O/K_2O=8,0$ ,  $MgO/CaO=0,80$  ve sinterleme sıcaklığı 1180 °C olarak belirlenmiştir. Model tahminine istinaden  $\alpha=0,05$  seviyesinde bu oranlara sahip bir bünynenin pişme mukavemeti 605 ile 666  $Kg/cm^2$  aralığında olmalıdır.



Şekil 7.32. Maksimum mukavemet için optimum tahmin grafiği

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.17 'de verilmiştir.

**Tablo 7.17.** *Optimum pişme mukavemeti için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı*

Değişken	Düzyey
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	8
MgO/CaO	0,8
Sıcaklık (°C)	1180

Yanıt	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Pişme Mukavemeti (Kg/cm <sup>2</sup> )	635,88	7,41	(620,47; 651,29)	(605,41; 666,35)

#### 7.2.4. Poisson oranı için deney tasarımı sonuçları

Poisson oranı sonuçları deney tasarım metoduna göre iki tekrarda gerçekleşmiş sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

##### 7.2.4.1. Poisson oranı için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi

Poisson oranı özelliğinin alt küme ve alt küme etkileşim faktörlerini incelediğimizde *SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O-sıcaklık* alt kümesi en yüksek R-Sq (adj), en düşük hata (S) değerine sahiptir. Mallows Cp değerinin ise değişken sayısının +1 değerine oldukça yakın olması nedeni ile *SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O-sıcaklık* alt kümesi en iyi alt küme ve dolayısıyla en etken ana faktörler olarak belirlenmiştir (Tablo 7.18).

**Tablo 7.18.** *Poisson oranının bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu*

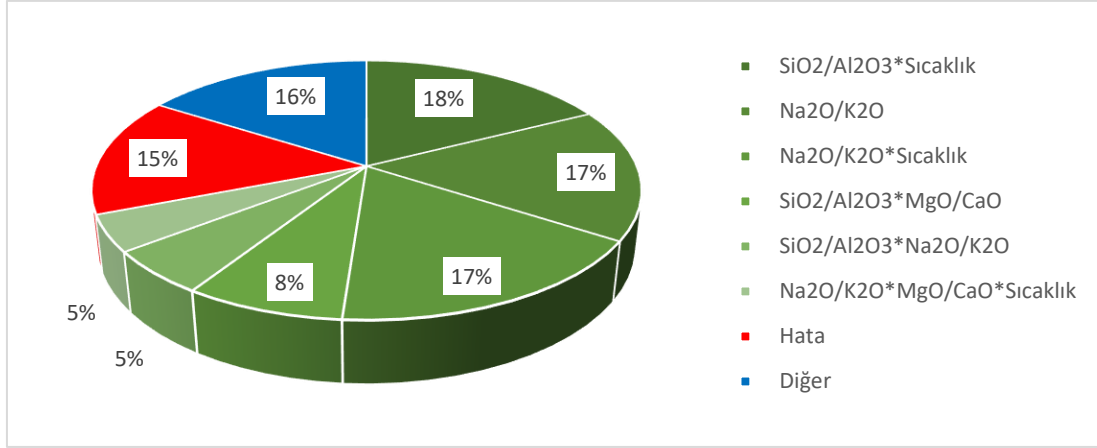
Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows Cp	S	S i O N S 2 a M i / 2 g c A O O a l / / k 2 K C l O 2 a i 3 O O k
1	16,6	13,9	5,5	0,3	0,048683	X
1	2,6	0,0	0,0	5,4	0,052591	X
2	19,2	14,0	2,1	1,4	0,048681	X X
2	17,5	12,2	0,0	2,0	0,049183	X X
3	20,1	12,1	0,0	3,0	0,049197	X X X
3	19,2	11,1	0,0	3,3	0,049478	X X X
4	20,1	9,1	0,0	5,0	0,050030	X X X X

#### 7.2.4.2. Poisson oranı için varyans analizi

Poisson oranı için tam ANOVA tablosu ve bu tablodan elde edilen etmenlerin etkisini gösteren pasta grafiği sırasıyla Tablo 7.19 ve Şekil 7.33' te verilmektedir. Ana etmenlerden önemli faktörü %18 ile  $SiO_2/Al_2O_3$ \*Sıcaklık etkileşim faktörüdür, Ardından  $Na_2O/K_2O$  bağımsız değişkeni ve  $Na_2O/K_2O$ \*Sıcaklık etkileşimi %17 etki ile ikinci ve üçüncü en önemli faktörler olarak belirlenmiştir.

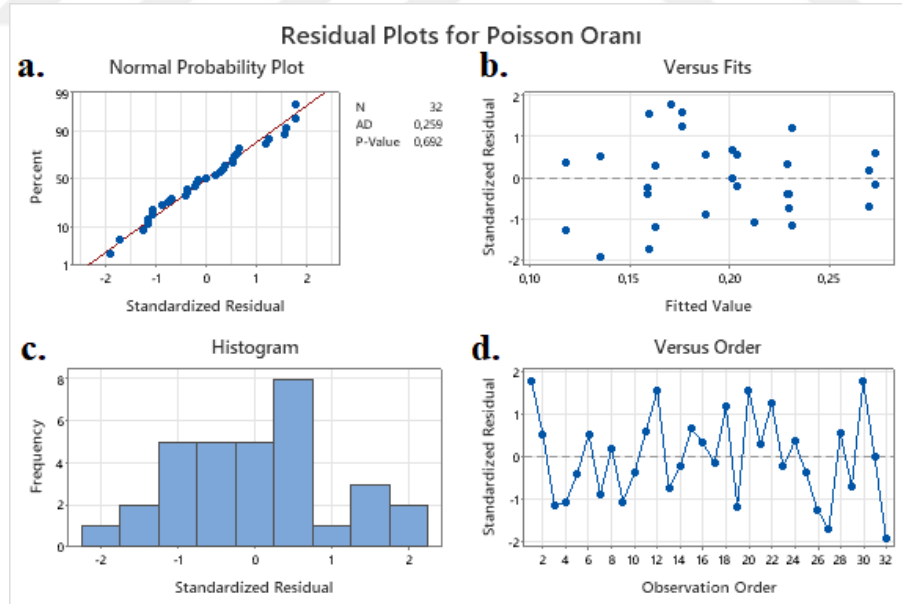
**Tablo 7.19.** Poisson oranı için Anova tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	0,070975	0,004732	6,65	0,000
Linear	4	0,017280	0,004320	6,07	0,004
SiO2/Al2O3	1	0,002632	0,002632	3,70	0,072
Na2O/K2O	1	0,013633	0,013633	19,16	0,000
MgO/CaO	1	0,000005	0,000005	0,01	0,932
Sıcaklık	1	0,001010	0,001010	1,42	0,251
2-Way Interactions	6	0,047480	0,007913	11,12	0,000
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O	1	0,005320	0,005320	7,48	0,015
SiO2/Al2O3*MgO/CaO	1	0,006275	0,006275	8,82	0,009
SiO2/Al2O3*Sıcaklık	1	0,014505	0,014505	20,39	0,000
Na2O/K2O*MgO/CaO	1	0,001423	0,001423	2,00	0,176
Na2O/K2O*Sıcaklık	1	0,014904	0,014904	20,95	0,000
MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,005053	0,005053	7,10	0,017
3-Way Interactions	4	0,005891	0,001473	2,07	0,133
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*MgO/CaO	1	0,002108	0,002108	2,96	0,105
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*Sıcaklık	1	0,000361	0,000361	0,51	0,486
SiO2/Al2O3*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,000042	0,000042	0,06	0,811
Na2O/K2O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,003380	0,003380	4,75	0,045
4-Way Interactions	1	0,000324	0,000324	0,46	0,510
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,000324	0,000324	0,46	0,510
Error	16	0,011384	0,000712		
Total	31	0,082360			

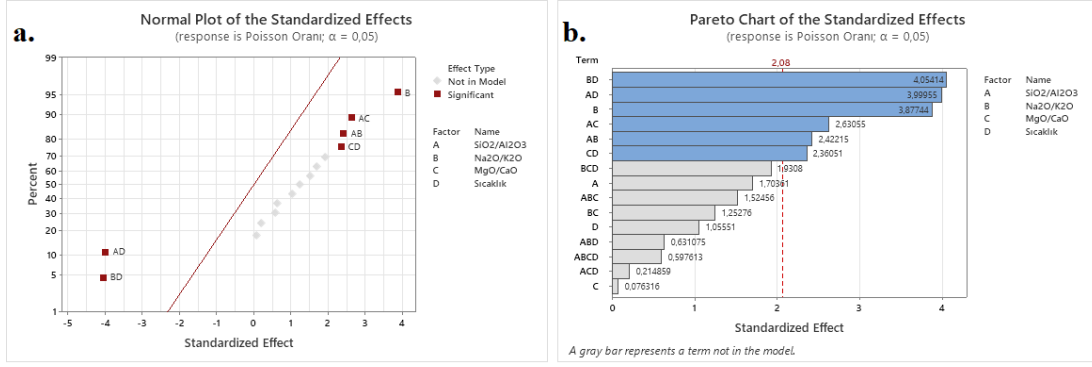


Şekil 7.33. Poisson oranı için pasta grafiği

Daha sonra kademeli ANOVA tablosu oluşturularak deney tasarım analizi  $\alpha=0,05$  seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Etkilerin standartlaştırılmış grafiğine bakıldığında  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $MgO/CaO$  ve sıcaklık ana faktörleri ve  $Na_2O/K_2O*MgO/CaO$  ikili etkileşim ve üçlü ve dördü etkileşim faktörlerinin tamamının p-değerleri  $\alpha=0,05$ 'ten büyük olduğu için modele dahil edilememiştir. Kademeli ANOVA tablo sonuçları EK 2.4'te verilmiştir. Oluşturulmuş modelin artık değer ve standartlaştırılmış etki grafikleri Şekil 7.34 ve 7.35'te verilmiştir.



Şekil 7.34. Poisson oranı için artık değer a) normal, b) uygun değer, c) histogram ve d) gözlem sırası grafikleri



Şekil 7.35. Poisson oranı için a) Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve b) Pareto grafiği

Poisson oranını etkileyen etmenlerin modellenmesinde deneysel doğrusal regresyon kullanılmıştır. Bu modelin katsayılarının hesaplanmasında kullanılan t-değeri tablosu EK 3.4 'te verilmiştir. Kademeli deney sonuçlarından elde edilen matematiksel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Poisson Oranı} = & 0,19501 + 0,02064 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} + 0,01289 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} \\ & + 0,01400 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO}/\text{CaO} - 0,02129 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Sıcaklık} \\ & - 0,02158 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} * \text{Sıcaklık} + 0,01257 \text{ MgO}/\text{CaO} * \text{Sıcaklık} \end{aligned}$$

Poisson oranı için bu modelin hata değeri 0,03 olarak tespit edilmiştir. Bu matematiksel model ile ilgili model özeti Tablo 7.20 'de verilmiştir.

Tablo 7.20. Poisson oranı için elde edilen matematiksel model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0301129	72,47%	65,87%	54,90%

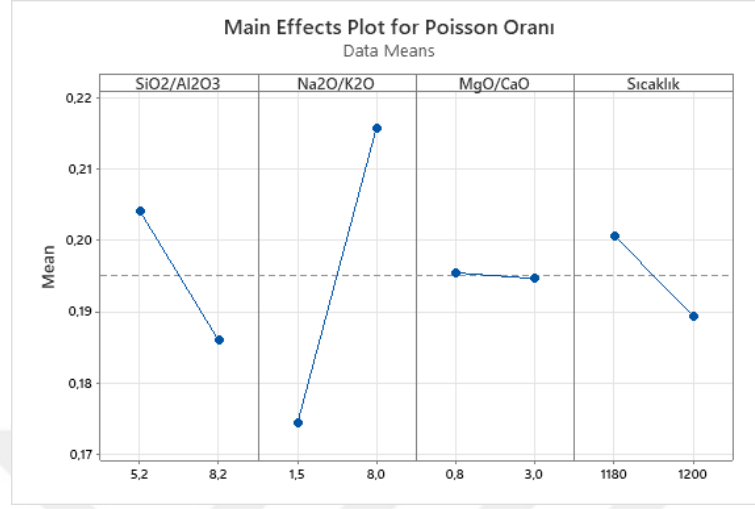
Poisson oranı için yapılan varyans analizi sonuçlarına (bkz. Şekil 7.33 ve Tablo 7.20) göre, oluşturulan modelin R-sq değeri düşük ve hata oranı yüksek olması nedeni ile modelin güvenilirliği düşüktür. Bu durum, belirlenen bağımsız değişkenlerin Poisson oranı üzerinde çok fazla etkiye sahip olmadığını göstermektedir.

#### 7.2.4.3. Poisson oranı için ana etki ve etkileşim grafikleri

Deney sonuçlarına göre, poisson oranı için ana etki ve etkileşim grafikleri aşağıda verilmiştir.

Ana etki grafiklerine bakıldığında,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}/\text{CaO}$  ve  $\text{Sıcaklık}$  faktörlerinin artışı Poisson oranını negatif yönde etkilemektedir, yani bu faktörlerin artışı Poisson oranının azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  faktörünün artışı ise

Poisson oranını pozitif yönde etkilemektedir, yani bu faktörün artışı Poisson oranının artmasına yol açmaktadır.

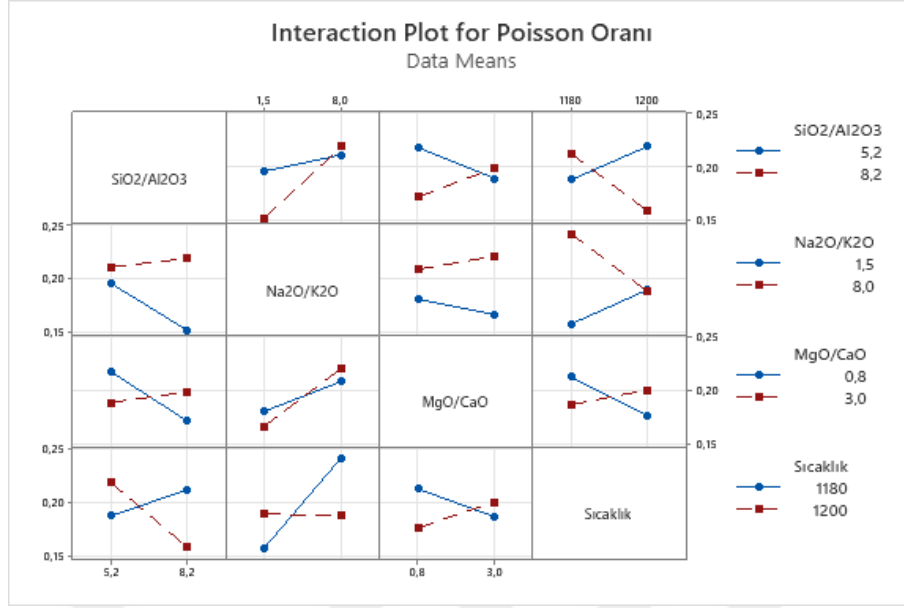


Şekil 7.36. Deney sonuçlarına göre, Poisson oranı için ana etki grafikleri

Etkileşim grafiklerine bakıldığında yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyeler  $MgO/CaO$  ve  $Na_2O/K_2O$  faktörlerinin artışından olumlu etkilenmektedirler. Düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde ise  $Na_2O/K_2O$  artışı ile beraber hala pozitif bir etki söz konusu iken,  $MgO/CaO$  artışı tam tersi bir davranış göstererek, Poisson oranını negatif etkilemektedir.  $SiO_2/Al_2O_3$  faktörünün  $Sıcaklık$  faktörü ile etkileşimine bakıldığında Düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde  $Sıcaklık$  artışı özelliği pozitif etkilerken, yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde özelliği olumsuz etkilemektedir.

$MgO/CaO$  faktörünün  $Na_2O/K_2O$  ve  $Sıcaklık$  faktörleri ile etkileşimine bakıldığında  $Na_2O/K_2O$  artışı hem yüksek hem düşük  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerin Poisson oranı özelliklerini olumlu etkilerken,  $Sıcaklık$  faktörü sadece yüksek  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde olumlu etki bırakmaktadır. Bunun tersine düşük  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde  $Sıcaklık$  artışı Poisson oranının düşüşüne neden olmaktadır.

$Na_2O/K_2O$  ile  $Sıcaklık$  faktörlerinin ikili etkileşimine bakıldığında ise, düşük  $Na_2O/K_2O$  oranına sahip bünyelerde sıcaklık artışı Poisson oranı özelliğini pozitif etkilerken, yüksek  $Na_2O/K_2O$  oranına sahip bünyelerde özelliği negatif etkilemektedir.

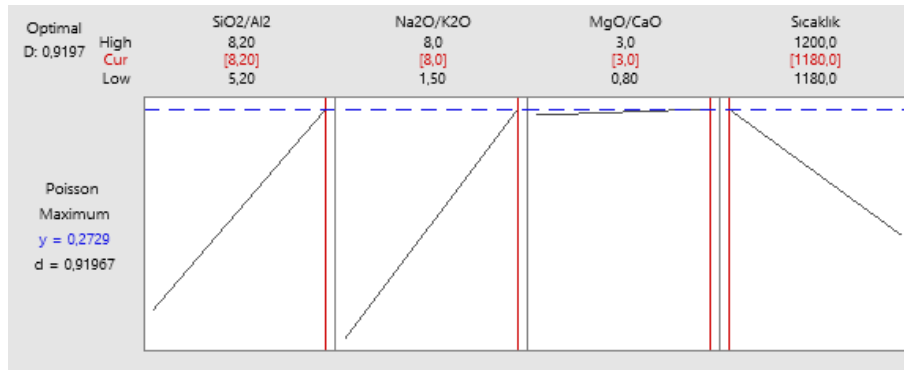


Şekil 7.37. Deney sonuçlarına göre, Poisson oranı için etkileşim grafikleri

#### 7.2.4.4. Poisson oranı için optimize yanıt

Poisson oranı için optimum yanıt (maksimize etmek amaçlı) hesaplanmış sonuçlar Şekil 7.38 'de verilmiştir.

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini aşağıda verilmiştir. Poisson oranını maksimize etmek adına en iyi oranlar  $SiO_2/Al_2O_3=8,2$ ,  $Na_2O/K_2O=8,0$ ,  $MgO/CaO=3,0$  ve sinterleme sıcaklığı 1180 °C olarak belirlenmiştir. Model tahminine istinaden  $\alpha=0,05$  seviyesinde bu oranlara sahip bir bünyenin pişme mukavemeti 0,20-0,34 aralığında olmalıdır.



Şekil 7.38. Maksimum Poisson oranı için optimum tahmin grafiği

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.21 'de verilmiştir.

**Tablo 7.21.** *Optimum Poisson oranı için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı*

Değişken	Düzye
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,2
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	8
MgO/CaO	3
Sıcaklık (°C)	1180

Yanıt	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Poisson Oranı	0,2792	0,0141	(0,2438; 0,3019)	(0,2044; 0,3413)

### 7.2.5. Young modülü için deney tasarımı sonuçları

Young modülü sonuçları deney tasarım metoduna göre iki tekrarda gerçekleşmiş sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

#### 7.2.5.1. Young modülü için yanıt/trpk (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi

Young modülünün alt küme ve alt küme etkileşim faktörlerini incelediğimizde SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO/CaO-Sıcaklık alt kümesi en yüksek R-Sq (adj), en düşük hata (S) değerine sahip olması ve Mallows Cp değeri değişken sayısı+1 değerine en yakın olmak süreti ile en iyi alt küme ve dolayısıyla en etken ana faktörler olarak belirlenmiştir.

**Tablo 7.22.** *Young modülü özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu*

Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows Cp	S	S i O N S 2 a M i / 2 g c A O O a 1 / / k 2 K C l O 2 a i 3 O O k
1	30,5	28,4	21,5	29,9	10,599	X
1	28,0	25,7	18,6	32,1	10,793	X
2	58,5	55,8	50,1	7,7	8,3213	X X
2	38,4	34,4	25,7	25,1	10,143	X X
3	66,4	63,0	56,9	3,0	7,6187	X X X
3	58,5	54,4	46,7	9,7	8,4587	X X X
4	66,4	61,7	53,8	5,0	7,7489	X X X X

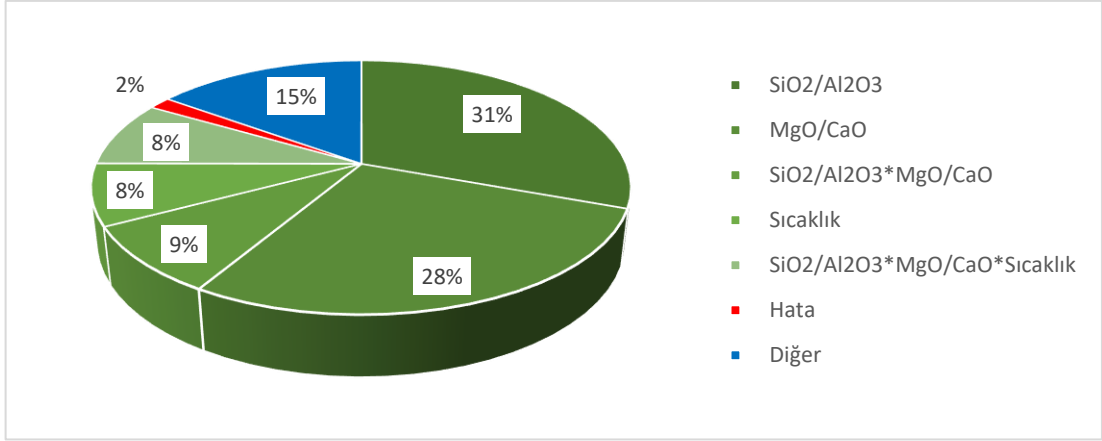
#### 7.2.5.2. Young modülü için varyans analizi

Young modülü için tam ANOVA tablosu (Tablo 7.23) ve bu tablodan elde edilen etmenlerin etkisini gösteren pasta grafiğinde verilmektedir (Şekil 7.39). Ana etmenlerden

önemli faktör %31 ile  $SiO_2/Al_2O_3$  oranıdır,  $MgO/CaO$  ise %28'lik bir etki ile young modülü üzerinde önemli bir etmen olduğu gözükmektedir. Bunların dışında,  $SiO_2/Al_2O_3*MgO/CaO*$  ikili etkileşim faktörü ise %9'luk bir etki ile en önemli etkileşim faktörü olduğu gözükmektedir.

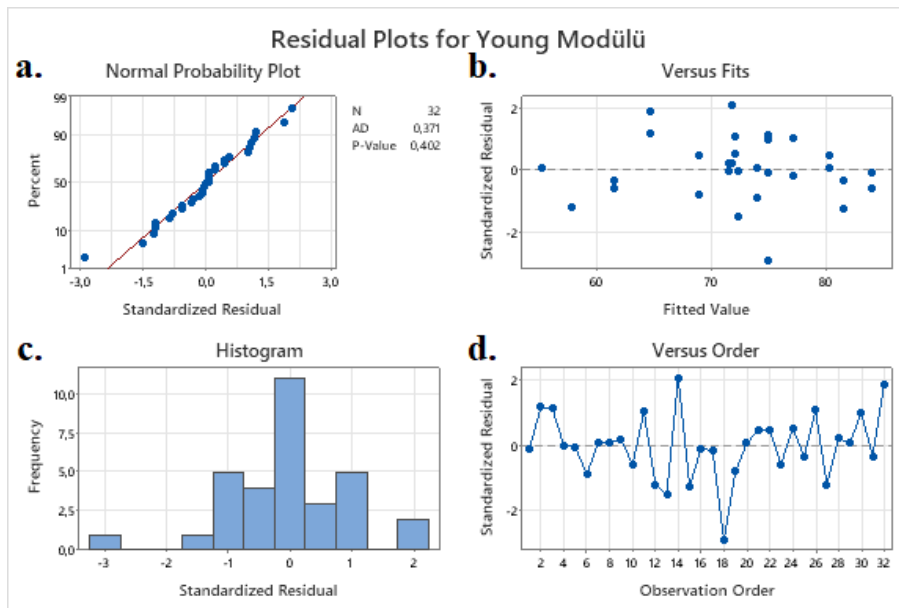
**Tablo 7.23.** Young modülü için Anova tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	2067,90	137,860	36,67	0,000
Linear	4	1623,53	405,882	107,95	0,000
SiO2/Al2O3	1	818,71	818,708	217,75	0,000
Na2O/K2O	1	0,02	0,020	0,01	0,943
MgO/CaO	1	724,09	724,092	192,59	0,000
Sıcaklık	1	80,71	80,709	21,47	0,000
2-Way Interactions	6	251,05	41,842	11,13	0,000
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O	1	0,16	0,157	0,04	0,841
SiO2/Al2O3*MgO/CaO	1	99,62	99,617	26,50	0,000
SiO2/Al2O3*Sıcaklık	1	5,36	5,363	1,43	0,250
Na2O/K2O*MgO/CaO	1	66,70	66,701	17,74	0,001
Na2O/K2O*Sıcaklık	1	63,28	63,281	16,83	0,001
MgO/CaO*Sıcaklık	1	15,93	15,933	4,24	0,056
3-Way Interactions	4	172,78	43,195	11,49	0,000
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*MgO/CaO	1	6,77	6,771	1,80	0,198
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*Sıcaklık	1	23,19	23,188	6,17	0,024
SiO2/Al2O3*MgO/CaO*Sıcaklık	1	92,82	92,820	24,69	0,000
Na2O/K2O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	50,00	50,000	13,30	0,002
4-Way Interactions	1	20,54	20,544	5,46	0,033
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	20,54	20,544	5,46	0,033
Error	16	60,16	3,760		
Total	31	2128,06			

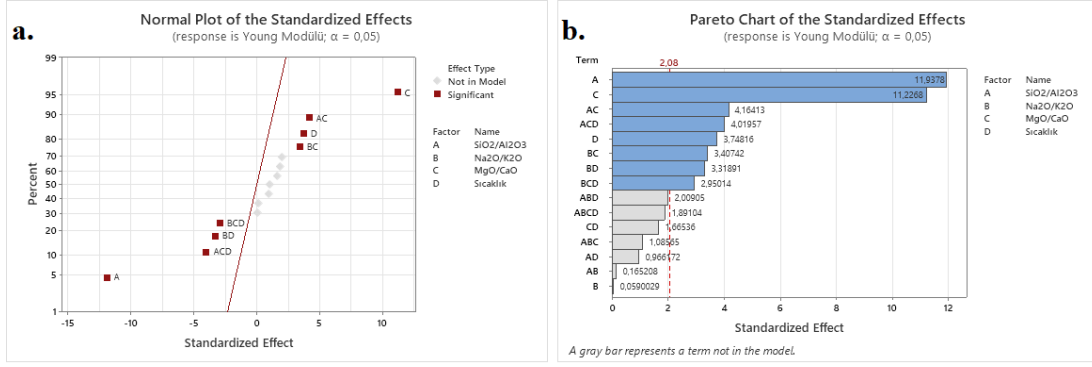


Şekil 7.39. Young modülü için pasta grafiği

Daha sonra kademeli ANOVA tablosu oluşturularak deney tasarım analizi  $\alpha=0,05$  seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Artık değerler grafiklerine (Şekil 7.40) bakıldığında, sonuçların tüm varsayımlara tam olarak uygun olduğu görülmektedir. Etkilerin standartlaştırılmış grafiğine bakıldığında (Şekil 7.41)  $Na_2O/K_2O$  ana faktörü ve  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O$ ,  $SiO_2/Al_2O_3*Sıcaklık$ ,  $MgO/CaO*Sıcaklık$ ,  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*MgO/CaO$ ,  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*sıcaklık$  ve  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*MgO/CaO*sıcaklık$  etkileşim faktörlerinin faktörlerinin p-değerleri  $\alpha=0,05$ 'ten büyük olduğu ve bu nedenle modele dahil edilmediği görülmektedir. Kademeli ANOVA tablo sonuçları EK 2.5'te verilmiştir.



Şekil 7.40. Young modülü için artık değer a) normal, b) uygun değer, c) histogram ve d) gözlem sırası grafikleri



Şekil 7.41. Young modülü için a) Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve b) Pareto grafiği

Young modülünü etkileyen etmenlerin modellenmesinde deneysel doğrusal regresyon kullanılmıştır. Bu modelin katsayılarının hesaplanmasında kullanılan t-değeri tablosu EK 3.5 'te verilmiştir. Kademeli deney sonuçlarından elde edilen matematiksel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \text{Young Modül (GPa)} = & 71,421 - 5,058 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + 4,757 \text{ MgO/CaO} + 1,588 \text{ Sıcaklık} \\
 & + 1,764 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO/CaO} + 1,444 \text{ Na}_2\text{O/K}_2\text{O} * \text{MgO/CaO} \\
 & - 1,406 \text{ Na}_2\text{O/K}_2\text{O} * \text{Sıcaklık} - 1,703 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO/CaO} * \text{Sıcaklık} \\
 & - 1,250 \text{ Na}_2\text{O/K}_2\text{O} * \text{MgO/CaO} * \text{Sıcaklık}
 \end{aligned}$$

Young modülü için modelin hata değeri 2,40 olarak hesaplanmıştır. Bu matematiksel model ile ilgili model özeti Tablo 7.24 'te verilmiştir.

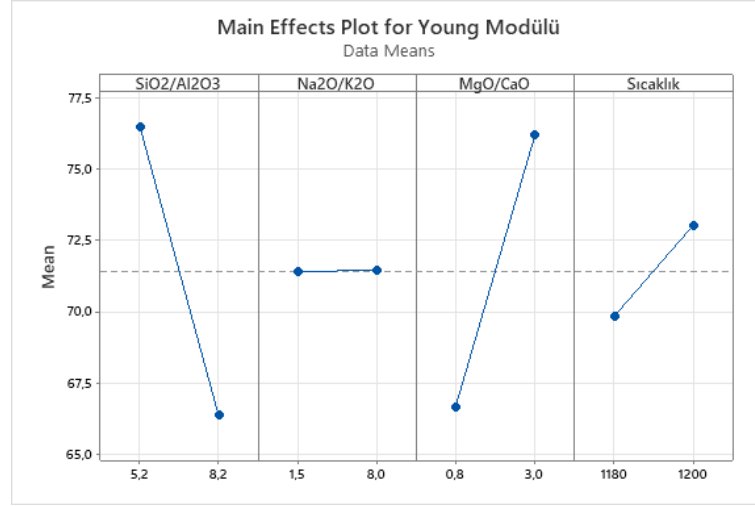
Tablo 7.24. Young modülü için elde edilen matematiksel model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2,39686	93,79%	91,63%	87,98%

### 7.2.5.3. Young modülü için ana etki ve etkileşim grafikleri

Deney sonuçlarına göre, Young modülü için ana etki ve etkileşim grafikleri Şekil 7.42 ve 7.43 'te verilmiştir.

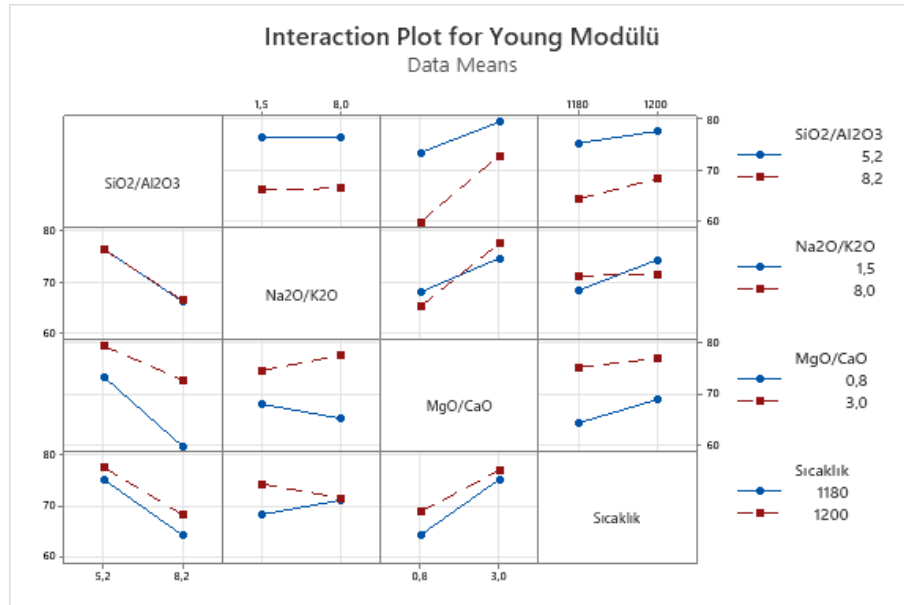
Ana etki grafiklerine bakıldığında, *MgO/CaO* ve *Sıcaklık* faktörlerinin artışının Young modülünü pozitif yönde etkilediği gözlemlenirken, *SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* faktörünün artışının Young modülünü olumsuz etkilediği görülmektedir. *Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O* faktörünün ise Young modülü üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı belirlenmektedir.



Şekil 7.42. Deney sonuçlarına göre, Young modülü için ana etki grafikleri

Etkileşim grafiklerine bakıldığında  $SiO_2/Al_2O_3$  faktörü Young modülünü maksimize etmek adına hem  $MgO/CaO$  hem  $Sıcaklık$  faktörlerinin artışından olumlu etkilendiği gözükmemektedir. Diğer taraftan yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde  $MgO/CaO$  hem  $Sıcaklık$  artışı ile iyileşme hızının daha yüksek olduğu görülmektedir.

$Sıcaklık$  ve  $MgO/CaO$  etkileşim grafiğinde ise  $Sıcaklık$  artışı hem düşük hem yüksek  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde Young modülü artışı için bir etken olduğu, artış hızının düşük  $MgO/CaO$  oranlarına sahip bünyelerde daha hızlı olduğu görülmektedir.

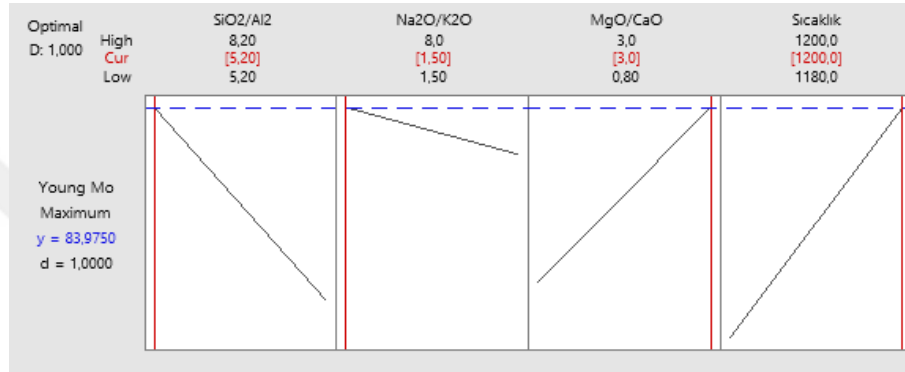


Şekil 7.43. Deney sonuçlarına göre, Young modülü için etkileşim grafikleri

#### 7.2.5.4. Young modülü için optimize yanıt

Yoğunluğu maksimize etmek amaçlı optimum yanıt hesaplanmış sonuçlar Şekil 7.44 'te verilmiştir.

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.25 'te verilmiştir. Young modülünü maksimize etmek adına en iyi oranlar  $SiO_2/Al_2O_3=5,2$ ,  $Na_2O/K_2O=1,5$ ,  $MgO/CaO=3$  ve sinterleme sıcaklığı  $1200^\circ C$  olarak belirlenmiştir. Model tahminine istinaden  $\alpha=0,05$  seviyesinde bu oranlara sahip bir bünyenin Young modülü 78 ile 89 GPa aralığında olmalıdır.



Şekil 7.44. Maksimum Young modülü için optimum tahmin grafiği

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.25 'te verilmiştir.

Tablo 7.25. Optimum Young modülü için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı

Değişken	Düzy
$SiO_2/Al_2O_3$	5,2
$Na_2O/K_2O$	1,5
$MgO/CaO$	3
Sıcaklık ( $^\circ C$ )	1200

Yanıt	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Young Modül (GPa)	83,98	1,27	(81,35; 86,60)	(78,36; 89,59)

#### 7.2.6. Pişme küçülmesi için deney tasarımı sonuçları

Pişme küçülmesi sonuçları deney tasarım metoduna göre iki tekrarda gerçekleşmiş sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

### 7.2.6.1. Pişme küçülmesi için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi

Pişme küçülmesi özelliğinin alt küme ve alt küme etkileşim faktörlerini incelediğimizde *MgO/CaO-Sıcaklık* alt kümesi en yüksek R-Sq (adj), en düşük hata (S) değerine sahip olması ve Mallows Cp değeri değişken sayısı+1 değerine en yakın olmak üzere en iyi alt küme ve dolayısıyla en etken ana faktörler olarak belirlenmiştir (Tablo 7.26).

**Tablo 7.26.** Pişme küçülmesi özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu

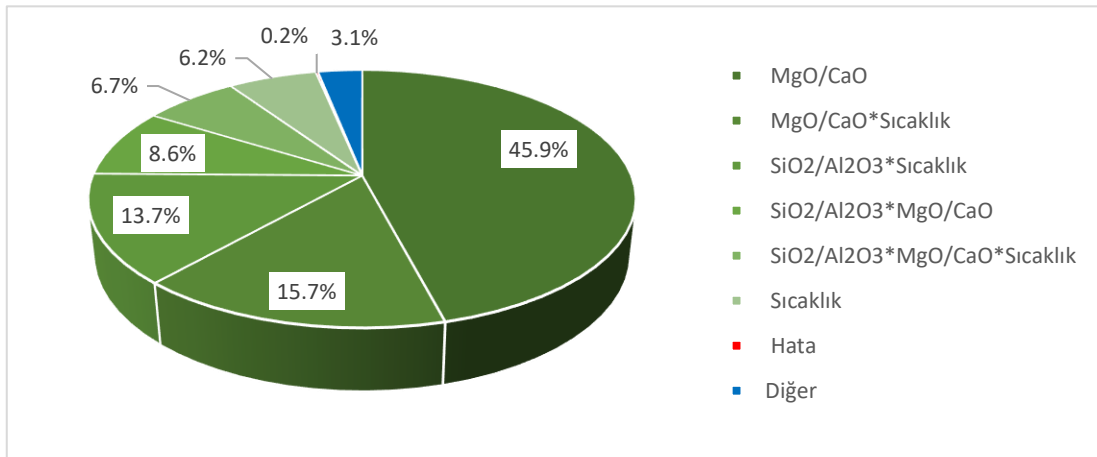
Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows Cp	S	S			
						O	N	M	S
1	45,9	44,2	38,7	3,0	0,84150				
1	6,2	3,3	0,0	27,3	1,1082				X
2	52,2	49,1	42,0	1,2	0,80421			X	X
2	46,2	42,8	34,9	4,9	0,85256		X	X	
3	52,5	47,7	38,3	3,0	0,81490		X	X	X
3	52,2	47,5	38,0	3,2	0,81684	X		X	X
4	52,5	46,0	33,7	5,0	0,82816	X	X	X	X

### 7.2.6.2. Pişme küçülmesi için varyans analizi

Pişme küçülmesi için tam ANOVA tablosu ve bu tablodan elde edilen etmenlerin etkisini gösteren pasta grafiği aşağıda verilmektedir. Ana etmenlerden önemli faktör yaklaşık %46 ile *MgO/CaO* oranıdır, *MgO/CaO\*Sıcaklık* ve *SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\*Sıcaklık* ikili etkileşimi de sırasıyla yaklaşık %16 ve %14 ile ikinci ve üçüncü en önemli faktördür. Pişme küçülmesinin tam ANOVA tablosu Tablo 7.27 'de pasta grafiği ise Şekil 7.45' te verilmiştir.

**Tablo 7.27.** Pişme küçülmesi için Anova tablosu

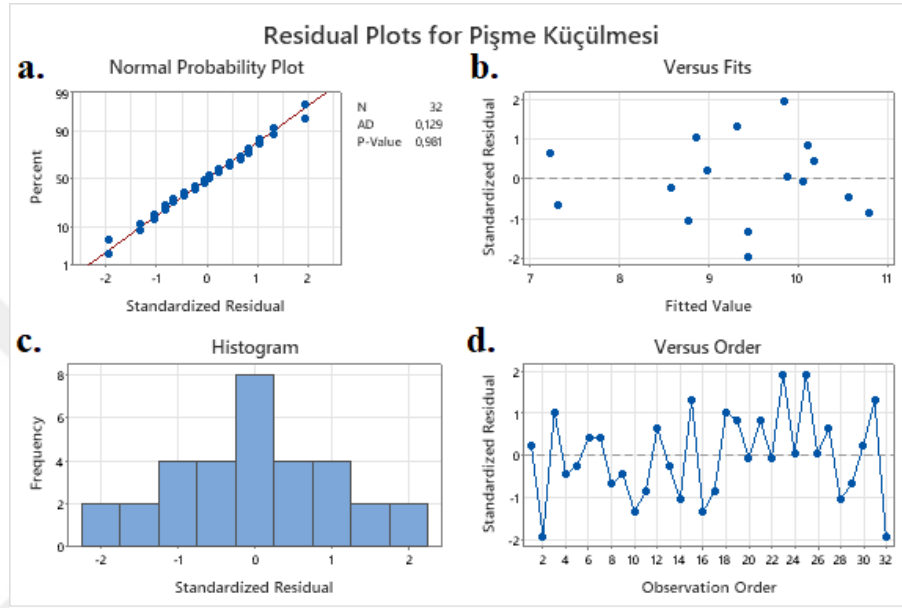
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	41,8409	2,7894	714,08	0,000
Linear	4	22,0216	5,5054	1409,39	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0,0325	0,0325	8,32	0,010
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,1275	0,1275	32,64	0,000
MgO/CaO	1	19,2510	19,2510	4928,26	0,000
Sıcaklık	1	2,6106	2,6106	668,32	0,000
2-Way Interactions	6	16,5831	2,7638	707,54	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,4278	0,4278	109,52	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	3,6046	3,6046	922,78	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	1	5,7291	5,7291	1466,65	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,2016	0,2016	51,61	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	0,0496	0,0496	2,70	0,051
MgO/CaO*Sıcaklık	1	6,5703	6,5703	1682,00	0,000
3-Way Interactions	4	3,0852	0,7713	197,46	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,0465	0,0465	11,91	0,003
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	0,0276	0,0276	2,07	0,052
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO*Sıcaklık	1	2,7966	2,7966	715,93	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,2145	0,2145	54,92	0,000
4-Way Interactions	1	0,0496	0,0496	3,63	0,0509
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,0496	0,0496	3,63	0,0509
Error	16	0,0000	0,0000		
Total	31	31,9727			



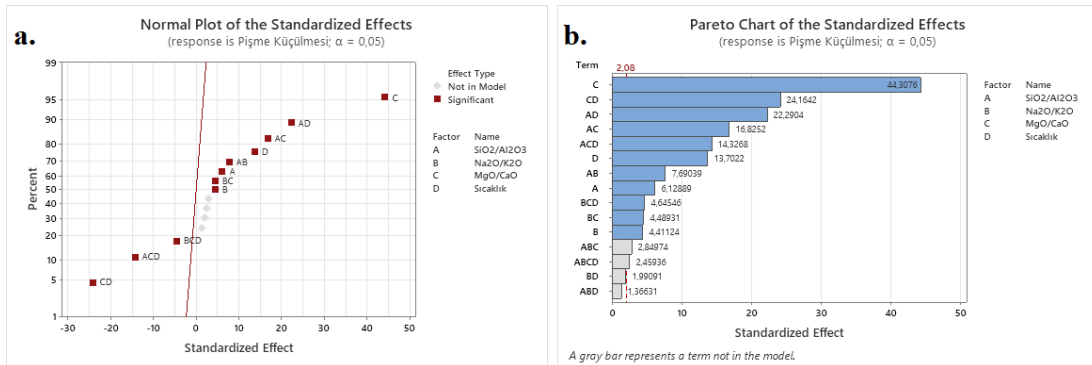
**Şekil 7.45.** Pişme küçülmesi için pasta grafiği

Daha sonra kademeli ANOVA tablosu oluşturularak deney tasarım analizi  $\alpha=0,05$  seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Buna istinaden etkilerin standartlaştırılmış grafiğine

bakıldığında  $Na_2O/K_2O$ \*Sıcaklık,  $SiO_2/Al_2O_3$ \* $Na_2O/K_2O$ \*sıcaklık,  $SiO_2/Al_2O_3$ \* $Na_2O/K_2O$ \*sıcaklık ve  $SiO_2/Al_2O_3$ \* $Na_2O/K_2O$ \*MgO/CaO\*sıcaklık etkileşim faktörlerinin p-değerleri  $\alpha=0,05$ 'ten büyük olduğu için modele dahil edilememiştir. Kademeli ANOVA tablo sonuçları EK 2.6'da verilmiştir. Oluşturulmuş modelin artık değer ve standartlaştırılmış etki grafikleri Şekil 7.46 ve 7.47 'de verilmiştir.



Şekil 7.46. Pişme küçülmesi için artık değer a) normal, b) uygun değer, c) histogram ve d) gözlem sırası grafikleri



Şekil 7.47. Pişme küçülmesi için a) Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve b) Pareto grafiği

Pişme küçülmeyi etkileyen etmenlerin modellenmesinde deneysel doğrusal regresyon kullanılmıştır. Bu modelin katsayılarının hesaplanmasında kullanılan t-değeri tablosu EK 3.6 'da verilmiştir. Kademeli deney sonuçlarından elde edilen matematiksel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\text{Pişme Küçülmesi (\%)} &= 9,3331 + 0,0981 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,0706 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} \\
&+ 0,7094 \text{ MgO}/\text{CaO} + 0,2194 \text{ Sıcaklık} \\
&+ 0,1231 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} \\
&+ 0,2694 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO}/\text{CaO} + 0,3569 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Sıcaklık} \\
&+ 0,0719 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} * \text{MgO}/\text{CaO} - 0,3869 \text{ MgO}/\text{CaO} * \text{Sıcaklık} \\
&- 0,2294 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO}/\text{CaO} * \text{Sıcaklık} \\
&- 0,0744 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} * \text{MgO}/\text{CaO} * \text{Sıcaklık}
\end{aligned}$$

Pişme küçülmesi için modelin hata değeri 0,09 olarak hesaplanmıştır. Bu matematiksel model ile ilgili model özeti Tablo 7.28 'de verilmiştir.

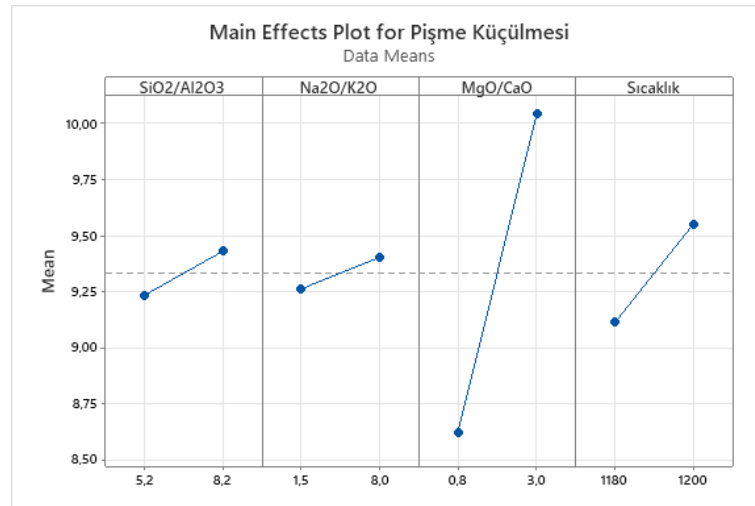
**Tablo 7.28.** Pişme küçülmesi için elde edilen matematiksel model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0905677	99,49%	99,20%	98,69%

### 7.2.6.3. Pişme küçülmesi için ana etki ve etkileşim grafikleri

Deney sonuçlarına göre, pişme küçülmesi için ana etki ve etkileşim grafikleri Şekil 7.48 ve 7.49 'da verilmiştir

Ana etki grafiklerine dikkatlice bakıldığında,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  faktörlerinin pişme küçülmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı yeniden gözlemlenmiştir. Bununla birlikte,  $\text{MgO}/\text{CaO}$  ve  $\text{Sıcaklık}$  faktörlerinin artışı, pişme küçülmesinde bir artışa neden olmaktadır. Bu faktörlerin artışı, pişme küçülmesinin artmasına yol açmaktadır.

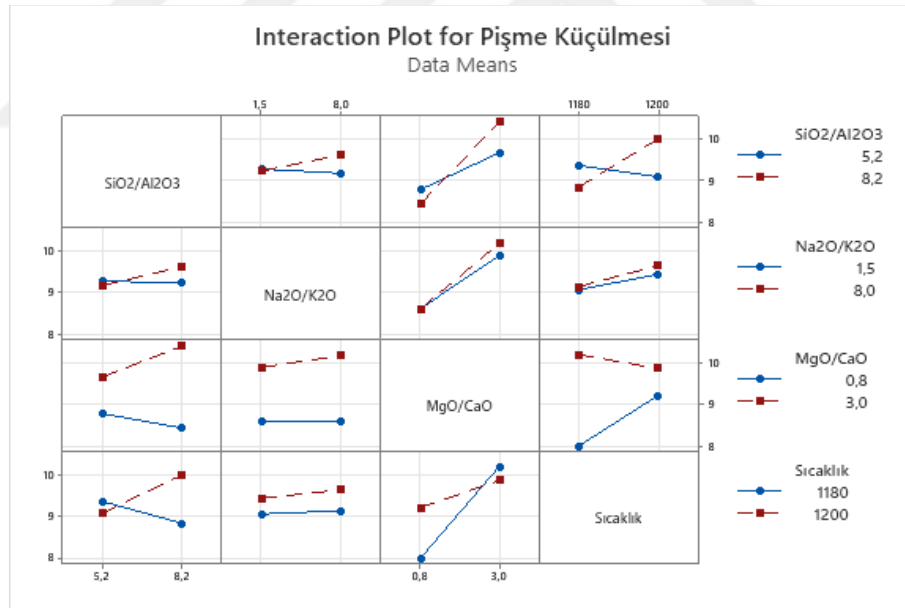


**Şekil 7.48.** Deney sonuçlarına göre, pişme küçülmesi için ana etki grafikleri

Etkileşim grafiklerine bakıldığında  $SiO_2/Al_2O_3$  ve  $Na_2O/K_2O$  faktörlerinin etkileşimi bile pişme küçülmesi özelliği üzerinde çok fazla bir etkisinin olmadığı gözlemlenmektedir. Ancak sabit bir  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyede  $MgO/CaO$  artışı pişme küçülmesinin artışına neden olacağı görülmektedir. Düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde *Sıcaklık* artışı çok etkili olmaksızın, yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde *Sıcaklık* artışı pişme küçülmesini arttırdığı görülmektedir.

$MgO/CaO$  faktörünün  $Na_2O/K_2O$  faktörüyle etkileşimi pişme küçülmesine çok fazla bir katkıda bulunmamaktadır.  $MgO/CaO$  faktörünün *Sıcaklık* faktörüyle etkileşiminde ise iki farklı eğilim ile karşılaşmaktayız. Düşük  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde *Sıcaklık* artışı pişme küçülmesini arttırırken, yüksek  $MgO/CaO$  oranları için *Sıcaklık* artışı pişme küçülmesini düşürmektedir.

$Na_2O/K_2O$  faktörüyle *Sıcaklık* faktörünün etkileşimine baktığımızda bu faktörlerin artışı çok fazla bir etkiye sebep olmadan herhangi birisinin artışı ikili etkileşimde pişme küçülmesini eser miktarda arttırdığı görülmektedir.

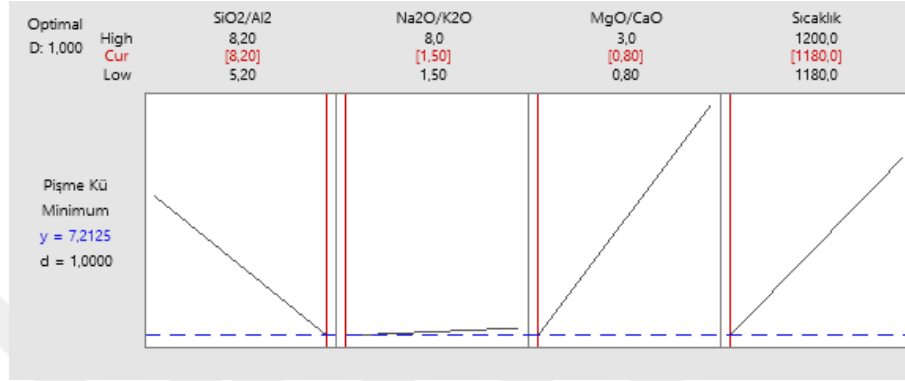


Şekil 7.49. Deney sonuçlarına göre, pişme küçülmesi için etkileşim grafikleri

#### 7.2.6.4. Pişme küçülmesi için optimize yanıt

Pişme küçülmesi minimize etmek amaçlı optimum yanıt hesaplanmış sonuçlar Şekil 7.50 'de verilmiştir.

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.29 'da verilmiştir. Pişme küçülmesini minimize etmek adına en iyi oranlar  $SiO_2/Al_2O_3=8,2$ ,  $Na_2O/K_2O=1,5$ ,  $MgO/CaO=0,80$  ve sinterleme sıcaklığı  $1180^{\circ}C$  olarak belirlenmiştir, Model tahminine istinaden  $\alpha=0,05$  seviyesinde bu oranlara sahip bir bünyenin pişme küçülmesi %7 ile %7,4 aralığında olmalıdır.



Şekil 7.50. Minimum pişme küçülmesi için çoklu yanıt tahmini ve model tahmin aralığı

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.29 'da verilmiştir.

Tablo 7.29. Optimum pişme küçülmesi için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı

Değişken	Düzye
$SiO_2/Al_2O_3$	8,2
$Na_2O/K_2O$	8
$MgO/CaO$	0,8
Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )	1180

Yanıt	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Pişme Küçülmesi	7,2125	0,0555	(7,0968; 7,3282)	(6,9910; 7,4340)

### 7.2.7. Isıl genişleme katsayısı için deney tasarımı sonuçları

Isıl genişleme katsayısı numunelerin  $500^{\circ}C$ 'deki ısıl genişleme katsayısı değerlerine göre iki tekrarda gerçekleştirilmiş sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

#### 7.2.7.1. Isıl genişleme katsayısı için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi

Isıl genişleme katsayısı özelliğinin alt küme ve alt küme etkileşim faktörlerini incelediğimizde  $SiO_2/Al_2O_3-Na_2O/K_2O$  alt kümesi en yüksek R-Sq (adj), en düşük hata (S) değerine sahip olması ve Mallows Cp değeri değişken sayısı+1 değerine en yakın

olmak üzere en iyi alt küme ve dolayısıyla en etken ana faktörler olarak belirlenmiştir (Tablo 7.30).

**Tablo 7.30.** Pişme küçülmesi özelliğinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu

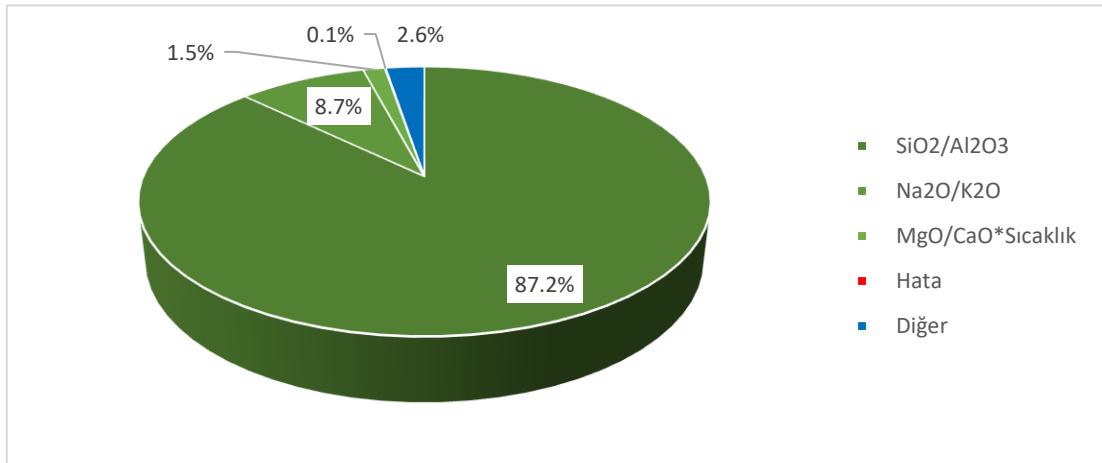
Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows Cp	S	S i O 2 / A l O 3	N a O 2 O	M g O a C a O	S i c a k l i k
1	87,2	86,4	83,5	28,9	2,9443	X			
1	8,7	2,6	0,0	286,6	7,8726		X		
2	95,9	95,3	93,9	2,5	1,7280	X	X		
2	87,5	85,7	81,2	30,1	3,0196	X		X	
3	96,1	95,2	93,2	3,7	1,7415	X	X	X	
3	96,1	95,2	93,2	3,8	1,7456	X	X		X
4	96,3	95,1	92,4	5,0	1,7616	X	X	X	X

#### 7.2.7.2. Isıl genleşme katsayısı için varyans analizi

Isıl genleşme katsayısı için tam ANOVA tablosu ve bu tablodan elde edilen etmenlerin etkisini gösteren pasta grafiği sırasıyla Tablo 7.31 ve Şekil 7.51 'de verilmektedir. Ana etmenlerden önemli faktör yaklaşık %87,2 ile  $SiO_2/Al_2O_3$  oranıdır.  $Na_2O/K_2O$  faktörü ise ısıl genleşme katsayısına %8,7 etki ile diğer önemli faktördür.

**Tablo 7.31.** Isıl genişleme için Anova tablosu

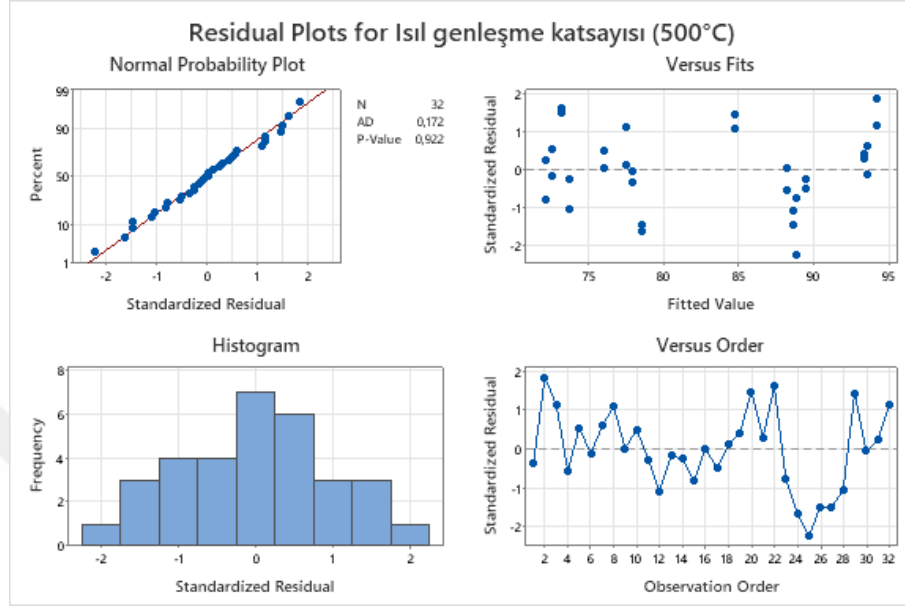
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	1017,16	72,654	199,23	0,005
Linear	4	980,65	245,164	672,26	0,001
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	887,86	887,861	2434,60	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	88,23	88,228	241,93	0,004
MgO/CaO	1	2,38	2,376	6,52	0,125
Sıcaklık	1	2,19	2,189	6,00	0,134
2-Way Interactions	6	31,45	5,241	14,37	0,066
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,13	0,129	0,35	0,612
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	7,10	7,100	19,47	0,048
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	1	8,21	8,211	22,52	0,042
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,14	0,145	0,40	0,593
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	0,96	0,956	2,62	0,247
MgO/CaO*Sıcaklık	1	14,91	14,907	40,88	0,024
3-Way Interactions	4	4,26	1,420	3,89	0,211
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,08	0,083	0,23	0,681
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	2,45	2,448	6,71	0,122
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO*Sıcaklık	1	1,73	1,729	4,74	0,161
4-Way Interactions	1	0,0496	0,0496	5,89	0,143
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,0496	0,0496	5,89	0,143
Error	16	0,73	0,365		
Total	31	1017,89			



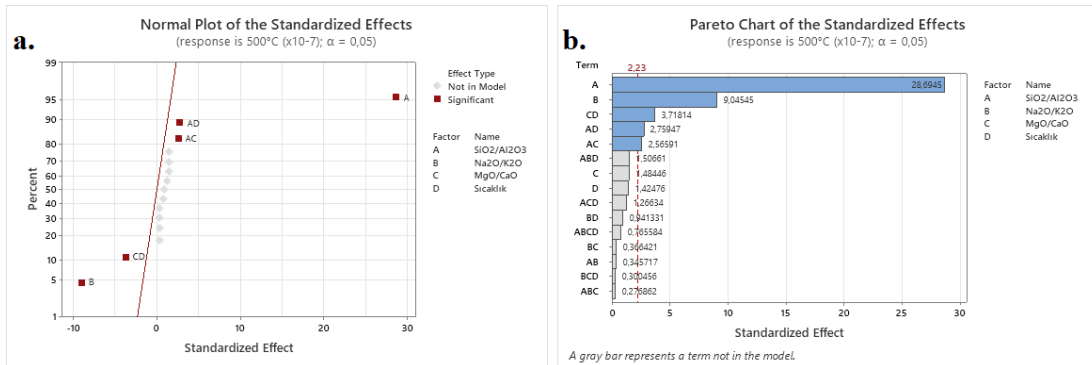
**Şekil 7.51.** Pişme küçülmesi için pasta grafiği

Bir sonraki adımda, kademeli ANOVA tablosu oluşturularak deney tasarım analizi  $\alpha=0,05$  seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Etkilerin standartlaştırılmış grafiğine bakıldığında  $SiO_2/Al_2O_3$  ve  $Na_2O/K_2O$  ana faktörleri ve  $SiO_2/Al_2O_3*MgO/CaO$ ,  $SiO_2/Al_2O_3*sıcaklık$  ve  $MgO/CaO*Sıcaklık$  etkileşim faktörleri hariç, diğer faktörlerinin p-değerleri  $\alpha=0,05$ 'ten

büyük olduğu için modele dahil edilememiştir. Kademeli ANOVA tablo sonuçları EK 2.7’de verilmiştir. Oluşturulmuş modelin artık değer ve standartlaştırılmış etki grafikleri Şekil 7.52 ve 7.53 ‘te verilmiştir.



Şekil 7.52. Isıl genleşme katsayısı için artık değer a) normal, b) uygun değer, c) histogram ve d) gözlem sırası grafikleri



Şekil 7.53. Isıl genleşme katsayısı için a) Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve b) Pareto grafiği

Isıl genleşme katsayısı etkileyen etmenlerin modellenmesinde deneysel doğrusal regresyon kullanılmıştır. Bu modelin katsayılarının hesaplanmasında kullanılan t-değeri tablosu EK 3.7 ’de verilmiştir. Kademeli deney sonuçlarından elde edilen matematiksel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Isıl genleşme katsayısı} = & 82,681 + 7,449 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 2,348 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} \\ 500^\circ\text{C}(\times 10^{-7}) & + 0,666 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO}/\text{CaO} + 0,716 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Sıcaklık} \\ & - 0,965 \text{ MgO}/\text{CaO} * \text{Sıcaklık} \end{aligned}$$

500 °C’deki ısı genleşme katsayısı için modelin hata değeri yaklaşık 1,04 olarak hesaplanmıştır. Bu matematiksel model ile ilgili model özeti Tablo 7.32 ‘de verilmiştir.

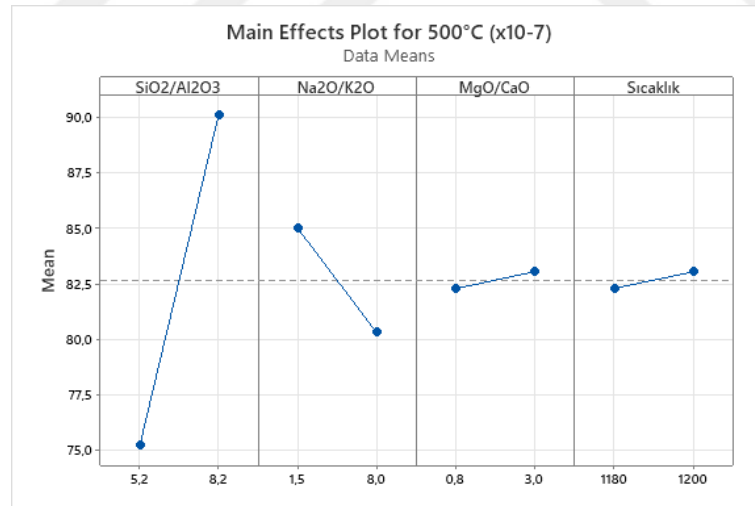
**Tablo 7.32.** Isıl genleşme katsayısı için elde edilen matematiksel model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,03842	98,94%	98,74%	98,39%

### 7.2.7.3. Isıl genleşme katsayısı için ana etki ve etkileşim grafikleri

Deney sonuçlarına göre, ısı genleşme katsayısı için ana etki ve etkileşim grafikleri Şekil 7.54 ve 7.55 ‘te verilmiştir.

Ana etki grafiklerine dikkatlice bakıldığında,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  faktörünün ısı genleşme özelliği üzerinde en etkili faktör olduğu gözlemlenmiştir.  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranının artışı, ısı genleşme katsayısında bir artışa neden olurken,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  faktörünün artışı ise ısı genleşme katsayısında bir azalmaya yol açmaktadır.  $\text{MgO}/\text{CaO}$  ve  $\text{Sıcaklık}$  faktörlerinin ise ısı genleşme katsayısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir.

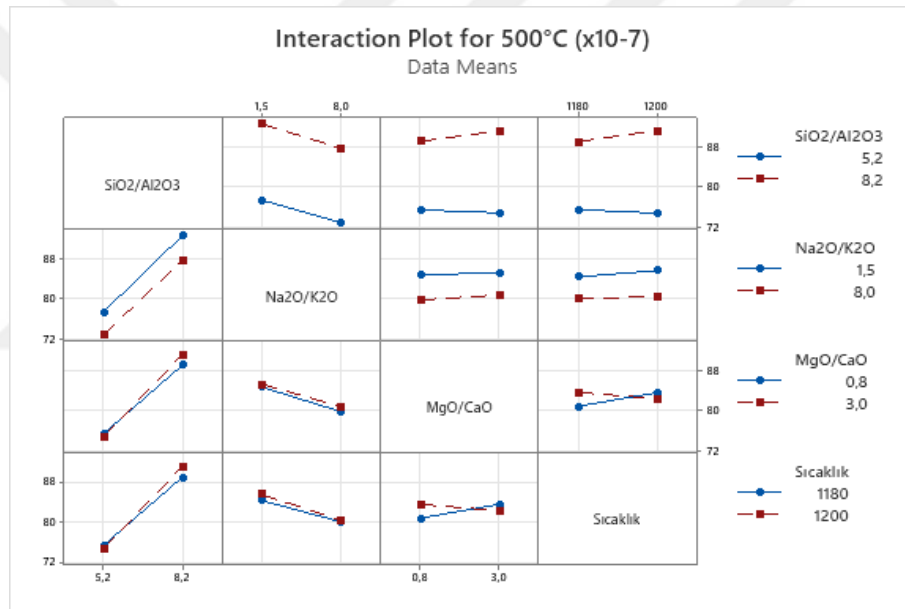


**Şekil 7.54.** Deney sonuçlarına göre, ısı genleşme katsayısı için ana etki grafikleri

Etkileşim grafiklerine dikkatlice bakıldığında,  $\text{MgO}/\text{CaO}$  ve  $\text{Sıcaklık}$  faktörlerinin ısı genleşme katsayısı üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Bu faktörler arasındaki etkileşim, ısı genleşme katsayısı üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmamaktadır.

$MgO/CaO$  ve  $Sıcaklık$  faktörlerinin  $SiO_2/Al_2O_3$  faktörüyle etkileşimine bakıldığında, düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde bu iki faktörün artışının ısı genleşme üzerinde etkili olmadığı görülmektedir. Ancak yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bünyelerde  $MgO/CaO$  ve  $Sıcaklık$  faktörlerinin artışının ısı genleşmeyi arttırdığı belirlenmiştir. Aynı şekilde, sabit  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına sahip bir bünyede  $Na_2O/K_2O$  faktörünün artışının ise ısı genleşme katsayısını düşürdüğü gözlemlenmiştir.

$Na_2O/K_2O$  faktörünün diğer faktörlerle etkileşimine bakıldığında, sabit  $SiO_2/Al_2O_3$  ve  $MgO/CaO$  oranına sahip ve sabit bir sıcaklıkta pişmiş bir bünye için  $Na_2O/K_2O$  oranının artışının ısı genleşme katsayısını düşürdüğü görülmektedir. Bu durum,  $Na_2O/K_2O$  faktörünün ısı genleşme özelliği üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.



Şekil 7.55. Deney sonuçlarına göre, ısı genleşme katsayısı için etkileşim grafikleri

#### 7.2.7.4. Isıl genleşme katsayısı için optimize yanıt

Isıl genleşme katsayısı için mutlak bir optimum değer belirlemek mümkün değildir. Bu özellik, sıvı ve bünye uyumu için önemlidir ve sıvının ısı genleşme katsayısına bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, bu özelliğe yönelik bir optimum yanıt hesaplaması yapılmamıştır. Isıl genleşme katsayısı, özellikli bir uygulama veya gereksinim çerçevesinde değerlendirilmelidir. Farklı bileşimler ve koşullar altında farklı ısı genleşme katsayıları tercih edilebilir.

### 7.2.8. Pyroplastik indeksi için deney tasarımı sonuçları

Fleximetre ölçümlerinden hesaplanan pyroplastik indeksi (PI) sonuçları sinterleme sıcaklığı faktöründen bağımsız olarak iki tekrarda gerçekleşmiş sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

#### 7.2.8.1. PI için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi

Pyroplastik indeksinin alt kümeleri ve alt küme etkileşim faktörlerine yönelik incelememizde,  $R^2(\text{adj})$  değerinin birçok alt küme için sıfır olduğu ve S ve Mallows Cp değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür (Tablo 7.33). Bu nedenle, regresyon analizi ile en önemli faktörleri en iyi alt kümeleri belirlemek olası bir seçenek değildir. Bu bağlamda, daha doğru bir değerlendirme için diğer aşamadaki etkilerin standartlaştırılmış normal ve Pareto grafiklerinden yardım alınmıştır.

**Tablo 7.33.** Pyroplastik indeksinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu

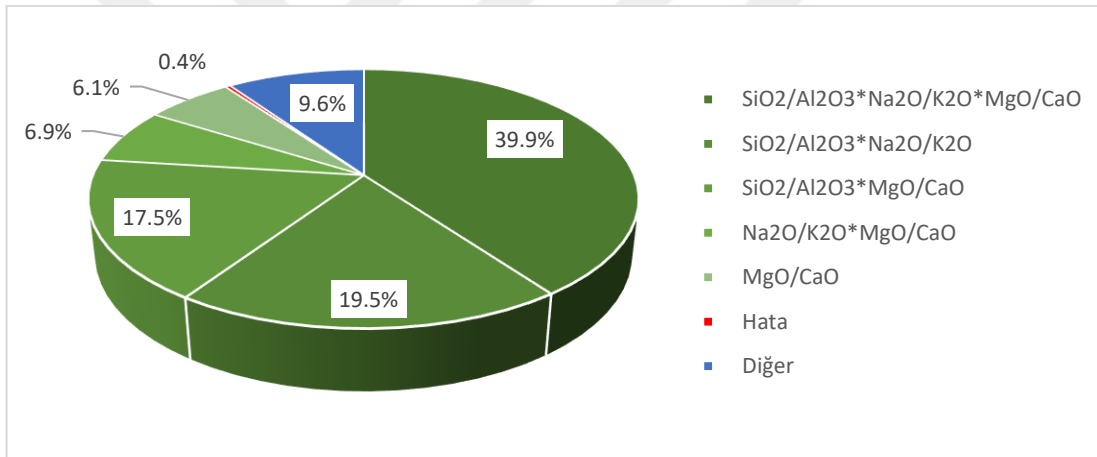
Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows Cp	S	S i O N 2 a M / 2 g A O O I / / 2 K C O 2 a 3 O O
1	6,1	0,3	0,0	0,7	1,7670	X
1	3,7	0,0	0,0	1,1	1,7895	X
2	9,8	0,0	0,0	2,2	1,7885	X X
2	7,1	0,0	0,0	2,6	1,8154	X X
3	10,8	0,0	0,0	4,0	1,8412	X X X

#### 7.2.8.2. Pyroplastik indeksi için varyans analizi

PI için tam ANOVA tablosu ve bu tablodan elde edilen etmenlerin etkisini gösteren pasta grafiği sırasıyla Tablo 7.34 ve Şekil 7.56 'da verilmektedir. Bu anlamda  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*MgO/CaO$  yaklaşık %40 bir etki ile en önemli faktör olarak öne çıkmaktadır.  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O$  ve  $SiO_2/Al_2O_3*MgO/CaO$  etkileşim faktörleri ise sırasıyla %19,5 ve %17,5 ile ikinci ve üçüncü en önemli faktörlerdir. Ana etmenlerden en önemli faktör ise %6,1 ile  $MgO/CaO$  faktörü olarak belirlenmiştir.

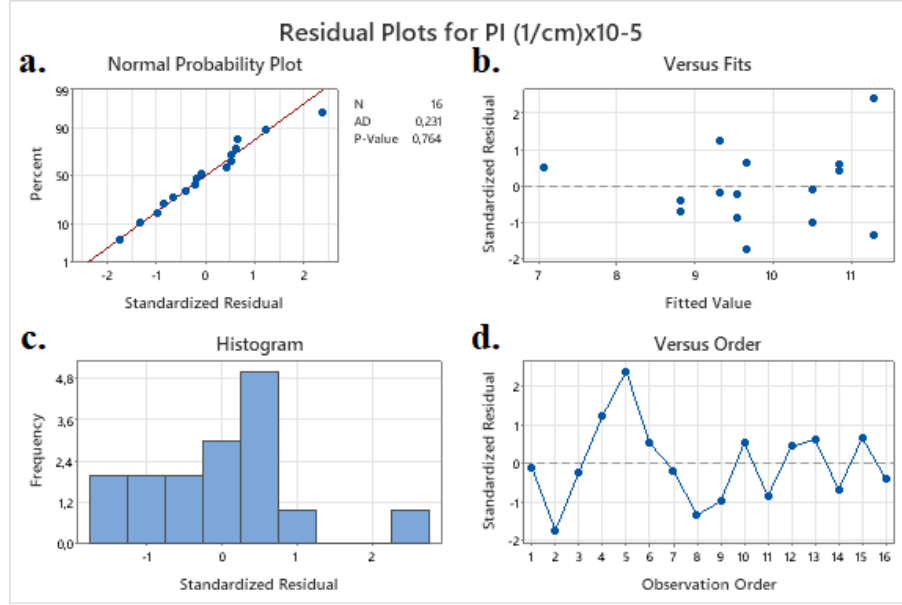
**Tablo 7.34.** *PI için Anova tablosu*

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	24,7104	3,5301	194,03	0,000
Linear	3	0,9697	0,3232	17,77	0,001
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0,1980	0,1980	10,88	0,011
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,0576	0,0576	3,17	0,113
MgO/CaO	1	0,7140	0,7140	39,25	0,000
2-Way Interactions	3	10,4182	3,4727	190,88	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	5,1076	5,1076	280,73	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	4,3890	4,3890	241,24	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,9216	0,9216	50,65	0,000
3-Way Interactions	1	13,3225	13,3225	732,26	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	13,3225	13,3225	732,26	0,000
Error	8	0,1455	0,0182		
Total	15	24,8559			

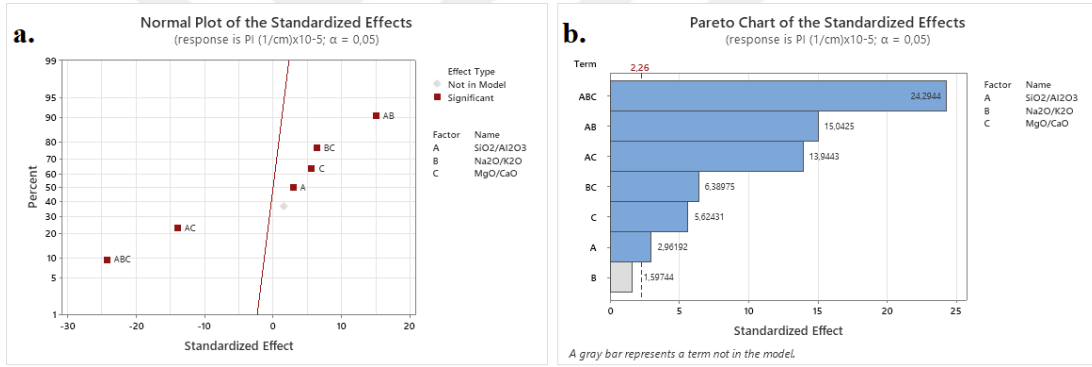


**Şekil 7.56.** *PI için Pasta grafiği*

Bir sonraki aşamada, kademeli ANOVA tablosu oluşturularak deney tasarım analizi  $\alpha=0,05$  seviyesinde gerçekleştirildiğinde, sadece  $Na_2O/K_2O$  ana faktörünün p-değerleri  $\alpha=0,05$ 'ten büyük olduğu için modele dahil edilememiştir. Kademeli ANOVA tablo sonuçları EK 2.8'de verilmiştir. Oluşturulmuş modelin artık değer ve standartlaştırılmış etki grafikleri sırasıyla Şekil 7.57 ve 7.58 'te verilmiştir.



Şekil 7.57. PI için artık değer a) normal, b) uygun değer, c) histogram ve d) gözlem sırası grafikleri



Şekil 7.58. PI için a) Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve b) Pareto grafiği

Pyroplastik indeksini etkileyen etmenlerin modellenmesinde deneysel doğrusal regresyon kullanılmıştır. Bu modelin katsayılarının hesaplanmasında kullanılan t-değeri tablosu EK 3.8 'de verilmiştir. Kademeli deney sonuçlarından elde edilen matematiksel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$PI (cm^{-1}) \times 10^{-5} = 9,6288 + 0,1112 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,2113 \text{ MgO}/\text{CaO} + 0,5650 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} - 0,5238 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO}/\text{CaO} + 0,2400 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} * \text{MgO}/\text{CaO} - 0,9125 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} * \text{MgO}/\text{CaO}$$

Pyroplastik indeksi için modelin hata değeri 0,15 olarak hesaplanmıştır. Bu matematiksel model ile ilgili model özeti Tablo 7.35 'te verilmiştir.

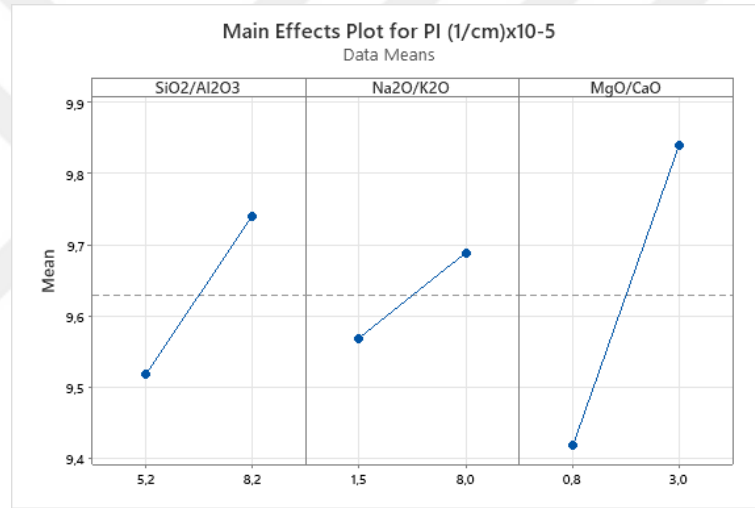
**Tablo 7.35.** *PI için elde edilen matematiksel model özeti*

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,150241	99,18%	98,64%	97,42%

### 7.2.8.3. *PI için ana etki ve etkileşim grafikleri*

Deney sonuçlarına göre, PI için ana etki ve etkileşim grafikleri sırasıyla Şekil 7.59 ve 7.60 'da verilmiştir.

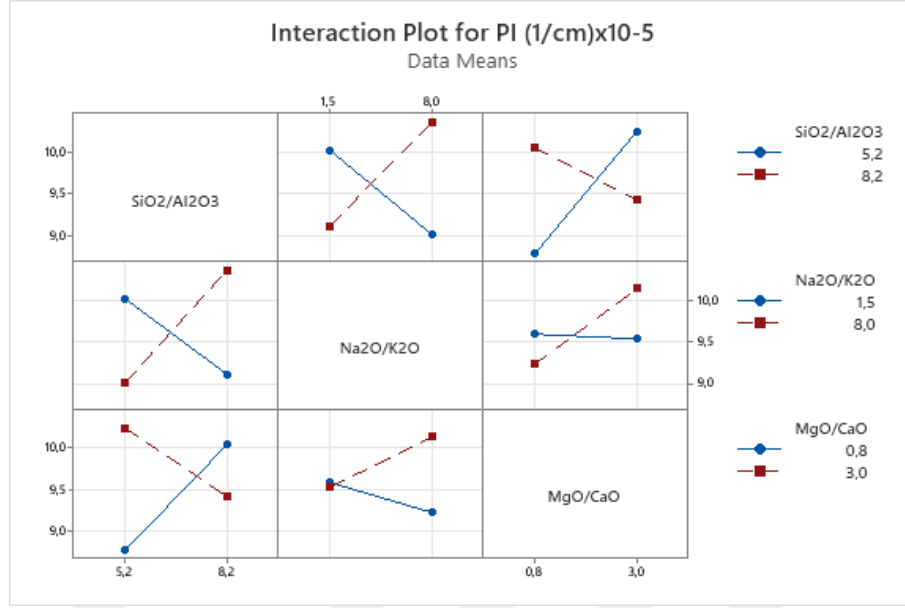
Ana etki grafiklerine bakıldığında tüm ana faktörlerin oranının artışıyla birlikte pyroplastik indeksinin de arttığı görülmektedir.  $MgO/CaO$  ve akabinde  $SiO_2/Al_2O_3$  faktörlerinin pyroplastik indeksi üzerine en çok etkiye sahip faktörler olduğu görülmektedir.



**Şekil 7.59.** *Deney sonuçlarına göre, PI için ana etki grafikleri*

Etkileşim grafiklerine bakıldığında yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranlarında  $MgO/CaO$  oranının artışının PI'yi düşürürken, düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranlarında  $MgO/CaO$  oranının artışının PI'yi arttırmaktadır.  $Na_2O/K_2O$ 'nun  $SiO_2/Al_2O_3$  ile etkileşimi ise tam tersi bir eğilim izlemektedir. Bu anlamda düşük  $SiO_2/Al_2O_3$  oranlarında  $Na_2O/K_2O$  oranının artışının PI'yi düşürürken, yüksek  $SiO_2/Al_2O_3$  oranlarında  $Na_2O/K_2O$  oranının artışının PI'yi arttırmaktadır.

$MgO/CaO$  ve  $Na_2O/K_2O$  etkileşim grafiğinde ise düşük  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde  $Na_2O/K_2O$  artışı PI'yi düşürürken, yüksek  $MgO/CaO$  oranlarında  $Na_2O/K_2O$  oranının artışının PI'yi arttırmaktadır.

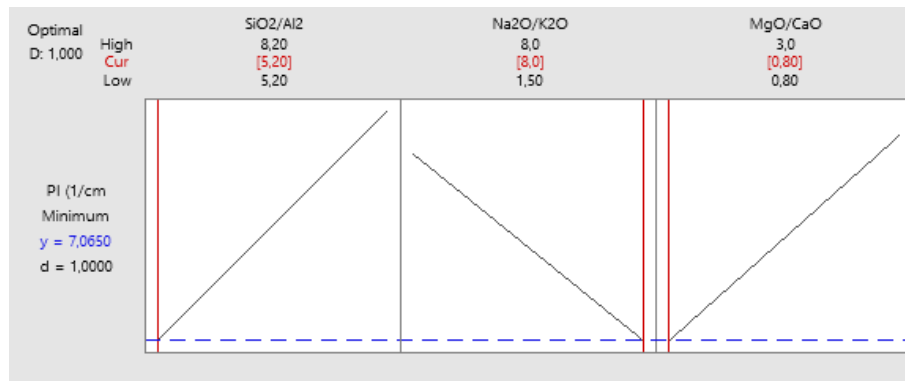


Şekil 7.60. Deney sonuçlarına göre, PI için etkileşim grafikleri

#### 7.2.8.4. PI için optimize yanıt

Pyroplastik indeksi minimize etmek amaçlı optimum yanıt hesaplanmış, sonuç Tablo 7.61' de verilmiştir.

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini aşağıda verilmiştir. PI'yi minimize etmek adına en iyi oranlar  $SiO_2/Al_2O_3=5,2$ ,  $Na_2O/K_2O=8,0$ ,  $MgO/CaO=0,80$  olarak belirlenmiştir. Model tahminine istinaden  $\alpha=0,05$  seviyesinde bu oranlara sahip bir bünyenin pyroplastik indeksinin yaklaşık  $7 \times 10^{-5}$  olmalıdır.



Şekil 7.61. Minimum pyroplastik deformasyon için optimum tahmin grafiği

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.36 'da verilmiştir.

**Tablo 7.36.** Optimum PI için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı

Değişken	Düzy
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	8
MgO/CaO	0,8

Yanıt	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
PI (cm <sup>-1</sup> ) × 10 <sup>-5</sup>	7,0650	0,0994	(6,8402; 7,2898)	(6,6575; 7,4725)

### 7.2.9. Camsı faz viskozitesi için deney tasarımı sonuçları

Fleximetre ölçümlerinden hesaplanan camsı faz viskozite (E) sonuçları sıcaklıktan bağımsız olarak deney tasarım metoduna göre iki tekrarda gerçekleşmiş sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

#### 7.2.9.1. Camsı faz viskozitesi için yanıt/tepki (en iyi alt kümeler regresyonu) analizi

Camsı faz viskozitesi özelliğinin alt küme ve alt küme etkileşim faktörlerini incelediğimizde SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O-MgO/CaO alt kümesi en yüksek R-Sq (adj), en düşük hata (S) değerine sahip olması ve Mallows Cp değeri değişken sayısı+1 değerine en yakın olmak sureti ile en iyi alt küme ve dolayısıyla en etken ana faktörler olarak belirlenmiştir (Tablo 7.37).

**Tablo 7.37.** Camsı faz viskozitesinin bağımsız değişkenlere bağlı en iyi alt kümeler tablosu

Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows Cp	S	S i O N 2 a M / A O O 1 / / 2 K C O 2 a 3 O O
1	43,8	40,3	29,6	1,5	0,065133	X
1	3,0	0,0	0,0	12,8	0,085578	X
2	46,8	39,7	24,8	2,7	0,065461	X X
2	46,3	39,1	24,1	2,8	0,065753	X X
3	49,3	38,4	18,4	4,0	0,066145	X X X

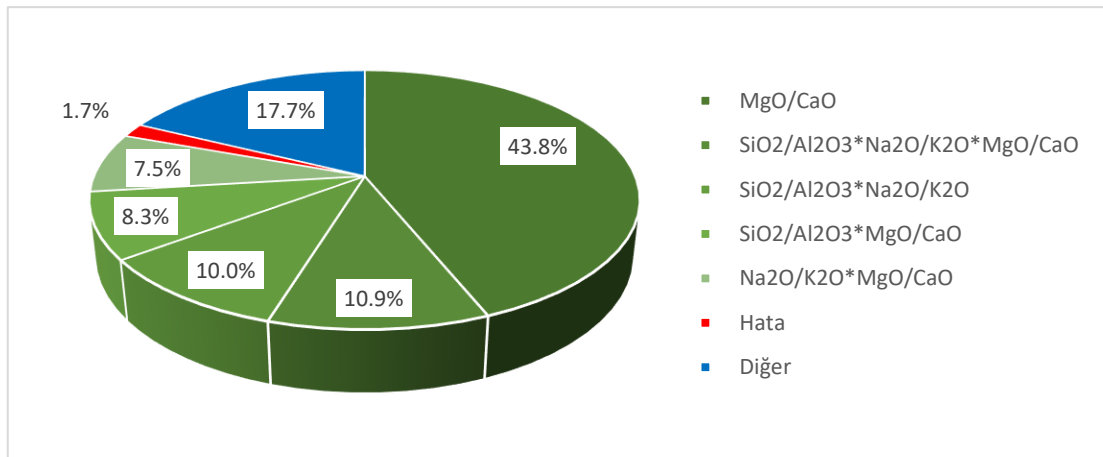
#### 7.2.9.2. Camsı faz viskozitesi için varyans analizi

Camsı faz viskozitesi için yapılan tam ANOVA tablosu ve elde edilen sonuçlara dayanarak etmenlerin etkisini gösteren pasta grafiği, Tablo 7.38 ve Şekil 7.62'de

sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, ana etmenler arasında en büyük etkiye sahip olan faktör %43,8 ile  $MgO/CaO$  oranıdır. Bu faktörün camsı faz viskozitesi üzerinde belirgin bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, pyroplastik indekste olduğu gibi etkileşim faktörlerinin de önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O*MgO/CaO$  etkileşim faktörü %11,  $SiO_2/Al_2O_3*Na_2O/K_2O$  etkileşim faktörü %10 ve  $SiO_2/Al_2O_3*MgO/CaO$  etkileşim faktörü ise %8,3 gibi önemli etki yüzdelerine sahiptir. Bu sonuçlar, bu etkileşim faktörlerinin camsı faz viskozitesini belirleyen faktörler arasında önemli bir role sahip olduğunu göstermektedir.

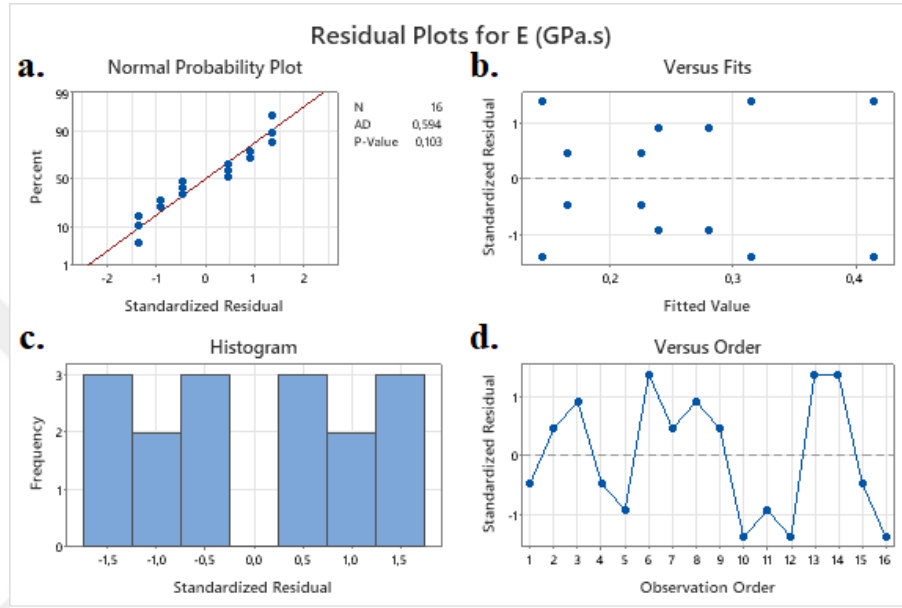
**Tablo 7.38.** Camsı faz viskozitesi için Anova tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0,103875	0,014839	62,48	0,000
Linear	3	0,059525	0,019842	83,54	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0,003025	0,003025	12,74	0,007
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,003600	0,003600	15,16	0,005
MgO/CaO	1	0,052900	0,052900	222,74	0,000
2-Way Interactions	3	0,031125	0,010375	43,68	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,012100	0,012100	50,95	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	0,010000	0,010000	42,11	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,009025	0,009025	38,00	0,000
3-Way Interactions	1	0,013225	0,013225	55,68	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,013225	0,013225	55,68	0,000
Error	8	0,001900	0,000238		
Total	15	0,105775			

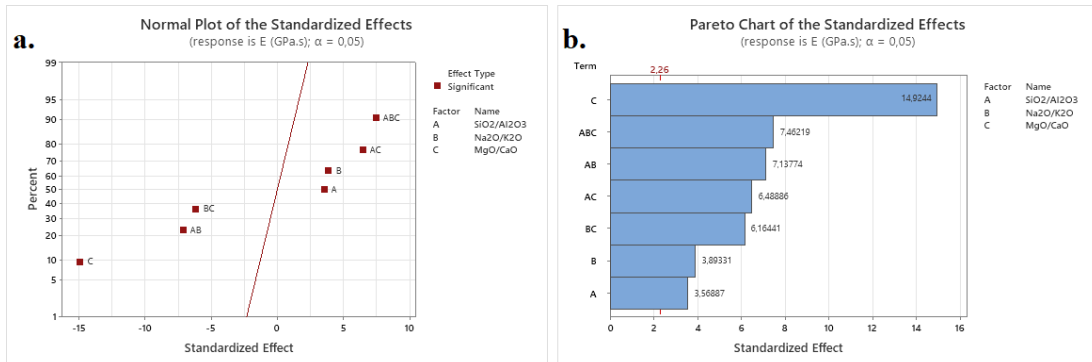


**Şekil 7.62.** Camsı faz viskozitesi için pasta grafiği

Bir sonraki adımda, ANOVA tablosu oluşturularak deney tasarım analizi  $\alpha=0,05$  seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Etkilerin standartlaştırılmış grafiğine bakıldığında faktörlerinin tamamının p-değerleri  $\alpha=0,05$ 'ten küçük olduğu için modele dahil edilmiştir. Kademeli ANOVA tablo sonuçları EK 2.9'da verilmiştir. Oluşturulmuş modelin artık değer ve standartlaştırılmış etki grafikleri Şekil 7.63 ve 7.64 'te verilmiştir.



Şekil 7.63. Camısı faz viskozitesi için artık değer a) normal, b) uygun değer, c) histogram ve d) gözlem sırası grafikleri



Şekil 7.64. Camısı faz viskozitesi için a) Standartlaştırılmış etkilerin normal grafiği ve b) Pareto grafiği

Camsı faz viskozitesini etkileyen etmenlerin modellenmesinde deneysel doğrusal regresyon kullanılmıştır. Bu modelin katsayılarının hesaplanmasında kullanılan t-değeri tablosu EK 3.9 'da verilmiştir. Kademeli deney tasarım sonuçlarından elde edilen matematiksel model eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\text{Camsı faz viskozitesi} &= -0,1036 + 0,05556 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,1233 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} + 0,0484 \text{ MgO}/\text{CaO} \\
(\text{GPa},s) &- 0,01583 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} - 0,01031 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO}/\text{CaO} \\
&- 0,04256 \text{ Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} * \text{MgO}/\text{CaO} \\
&+ 0,005361 \text{ SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} * \text{MgO}/\text{CaO}
\end{aligned}$$

Camsı faz viskozitesi için modelin hata değeri bu model için yaklaşık 0,015 olarak hesaplanmıştır. Bu matematiksel model ile ilgili model özeti Tablo 7.39 'da verilmiştir.

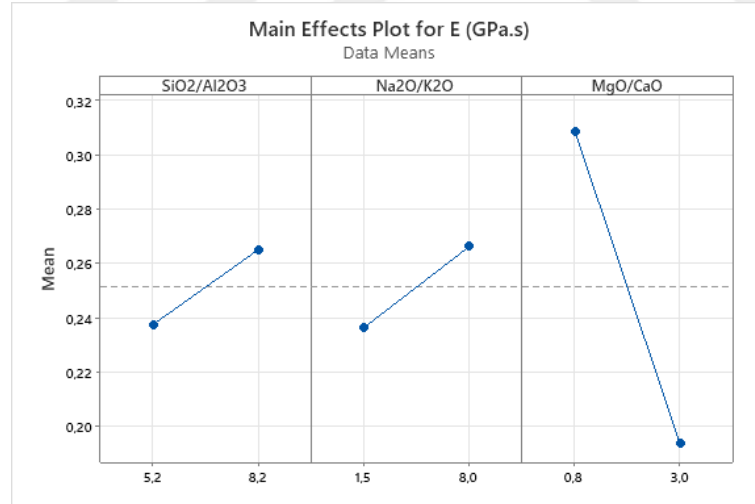
**Tablo 7.39.** Camsı faz viskozitesi için elde edilen matematiksel model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0154110	98,20%	96,63%	92,81%

### 7.2.9.3. Camsı faz viskozitesi için ana etki ve etkileşim grafikleri

Deney sonuçlarına göre, camsı faz viskozitesi için ana etki ve etkileşim grafikleri sırasıyla Şekil 7.65 ve 7.66 'da verilmiştir.

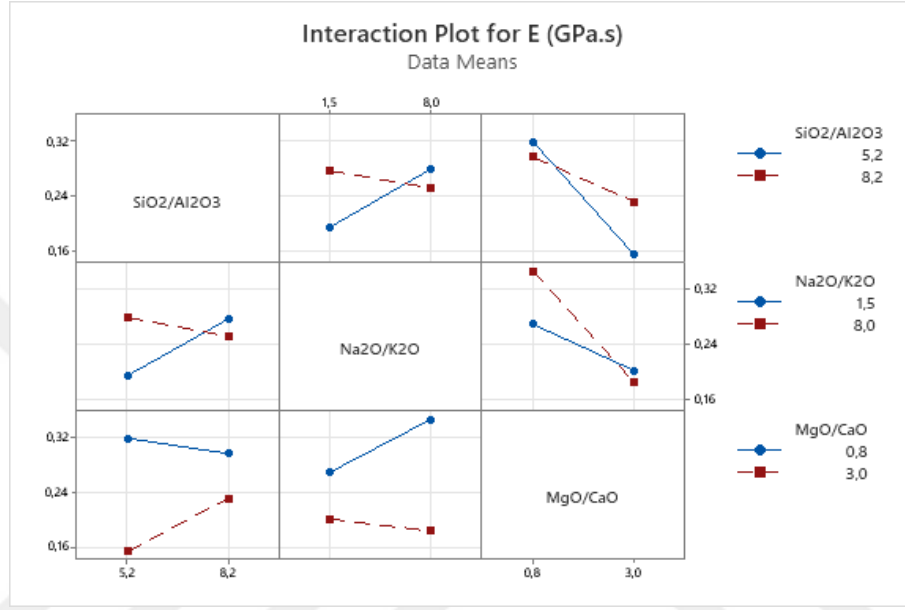
Ana etki grafiklerine bakıldığında  $\text{MgO}/\text{CaO}$  camsı faz viskozitesi üzerine en çok etkiye sahip faktör olduğu görülmektedir.  $\text{MgO}/\text{CaO}$  oranının artışı camsı faz viskozitesinin düşüşüne neden olurken  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{Si}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  artışı camsı faz viskozitesinin artışına neden olmaktadır (Şekil 7. 65).



**Şekil 7.65.** Deney sonuçlarına göre, camsı faz viskozitesi için ana etki grafikleri

Etkileşim grafiğine (Şekil 7. 66) bakıldığında sabit  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarında  $\text{MgO}/\text{CaO}$  oranının artışının camsı faz viskozitesini düşürdüğü görülmektedir.  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 'nun  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ile etkileşim grafiğinde ise düşük  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarında  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  oranının artışının camsı faz viskozitesini arttırırken, yüksek  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

oranlarında  $Na_2O/K_2O$  oranının artışının camsı faz viskozitesini bir miktar düşürmektedir.  $MgO/CaO$  ve  $Na_2O/K_2O$  etkileşiminde ise düşük  $MgO/CaO$  oranına sahip bünyelerde  $Na_2O/K_2O$  artışı camsı faz viskozitesini arttırırken, yüksek  $MgO/CaO$  oranlarında  $Na_2O/K_2O$  oranının artışının camsı faz viskozitesini bir miktar düşürmektedir.

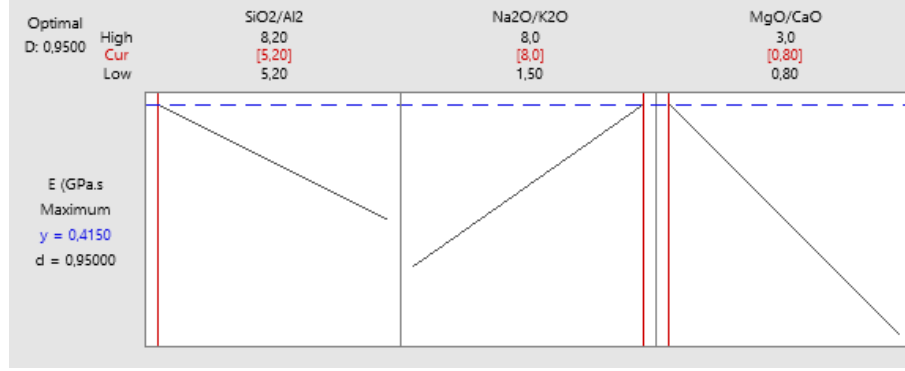


Şekil 7.66. Deney sonuçlarına göre, camsı faz viskozitesi için etkileşim grafikleri

#### 7.2.9.4. Camsı faz viskozitesi için optimize yanıt

Camsı faz viskozitesi için optimum yanıt hesaplamaları, pyroplastik deformasyonun minimize edilmesi amacıyla camsı faz viskozitesinin maksimize edilmesi gerektiği bilinciyle gerçekleştirilmiştir. Optimum yanıt hesaplamalarına dayanarak elde edilen sonuçlar Şekil 7.67 'de sunulmuştur.

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.40 'da verilmiştir. Camsı faz viskozitesini maksimize etmek adına (pyroplastik indeksi ile bağlantılı olarak) en iyi oranlar  $SiO_2/Al_2O_3=5,2$ ,  $Na_2O/K_2O=8,0$ ,  $MgO/CaO=0,80$  olarak belirlenmiştir. Model tahminine istinaden  $\alpha=0,05$  seviyesinde bu oranlara sahip bir bünyenin yoğunluğu 0,37 ile 0,46 GPa,s aralığında olmalıdır.



Şekil 7.67. Maksimum camlı faz viskozitesi için optimum tahmin grafiği

Bu anlamda en iyi yanıt ve model tahmini Tablo 7.9 'da verilmiştir.

Tablo 7.40. Optimum camlı faz viskozitesi için yanıt tahmini ve model tahmin aralığı

Değişken	Düzyey
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	8
MgO/CaO	0,8

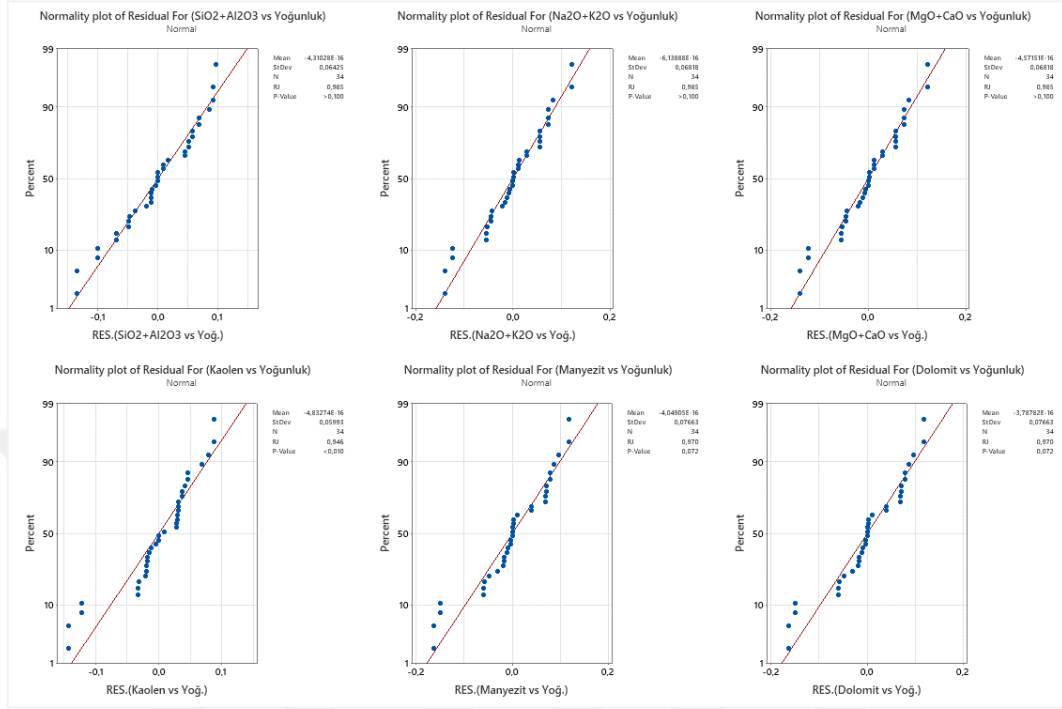
Yanıt	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
E (GPa,s)	0,4150	0,0109	(0,3899; 0,4401)	(0,3715; 0,4585)

### 7.3. Deney Tasarımı Dışında Kalan Bağımsız Değişkenlerin Analizi

Deney tasarımından bağımsız olan, numunelerin ağırlıkça kaolen, manyezit ve dolomit yüzdeleri ile SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerleri gibi girdi analizleri ve hesaplamaları yapılmıştır (Bkz. 4.5 ve 4.6). Bu analizlerde, oksit oranlarından (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O ve MgO/CaO) bağımsız olarak çıktılarla birlikte bu girdilerin özellikler üzerindeki standartlaştırılmış etkileri incelenmiştir. Bu analizlerde, popülasyon (normallik) testi ve Pareto testi kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

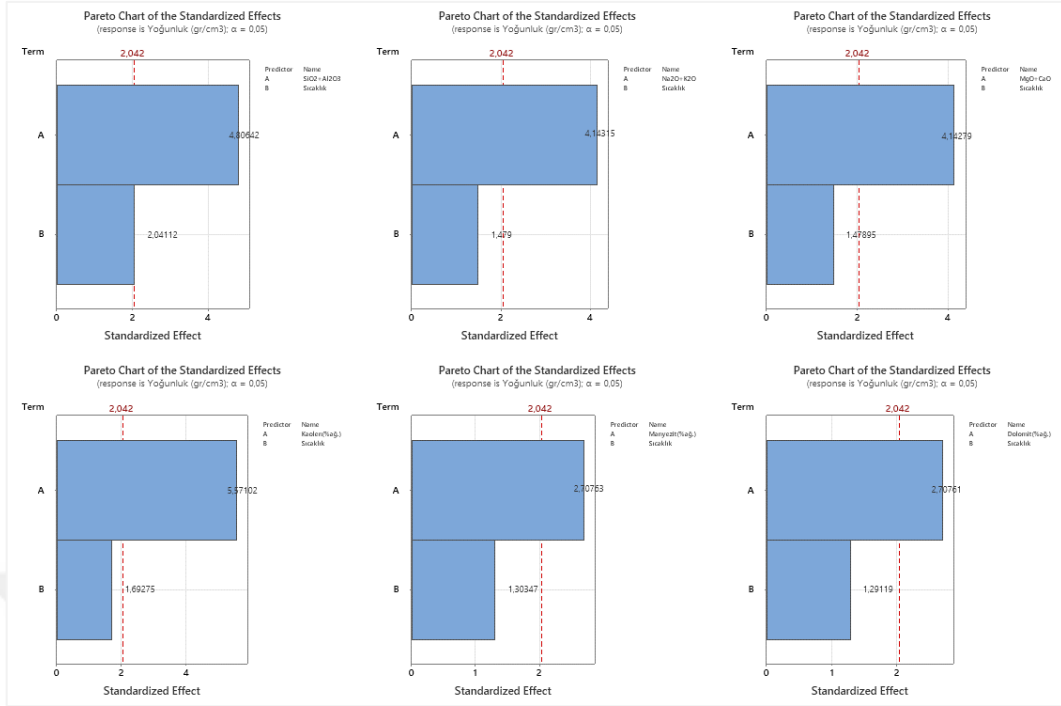
Popülasyon testinde, regresyon analizinden elde edilen artık değerler kullanılarak  $\alpha=0,05$  seviyesinde Ryan-Joiner yöntemiyle normallik testi gerçekleştirilmiştir. Regresyon testinden elde edilen Pareto grafiği ise sürekli ve kategorik değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Pareto grafiği, sonuçların %80'inin nedenlerin %20'sinden kaynaklandığını göstermektedir. Bu nedenle, 80 çizgisinin sağında kalan etkiler hayati önem taşımaktadır. Pareto grafiği,

standartlaştırılmış değerlerle sonuçların birbiriyle karşılaştırılabilirliğini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu testlerin sonuçları aşağıda verilmiştir.



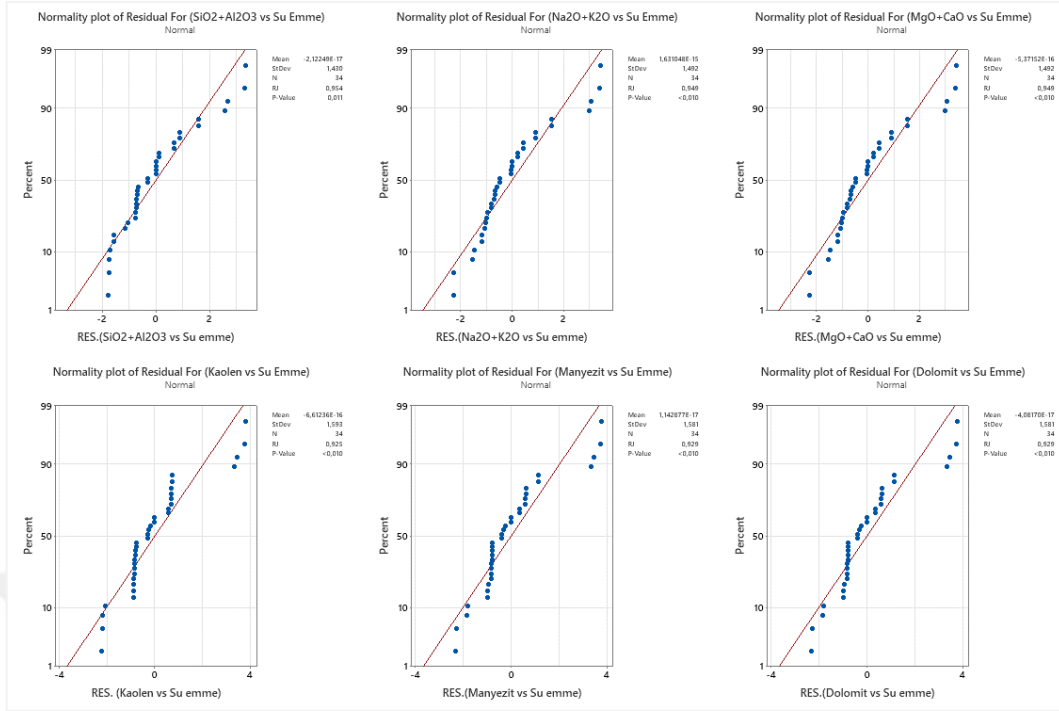
Şekil 7.68. Sürekli değişkenlere karşı yoğunluğun

Yoğunluğun kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerlerine karşı ikili normallik dağılım testine bakıldığında, sadece kaolen ile dağılımlarının normal olmadığı (P değeri <0,05), diğer girdiler ile ikili dağılımlarının normal bir dağılıma sahip olduğu (P değeri >0,05) gözlemlenmektedir.



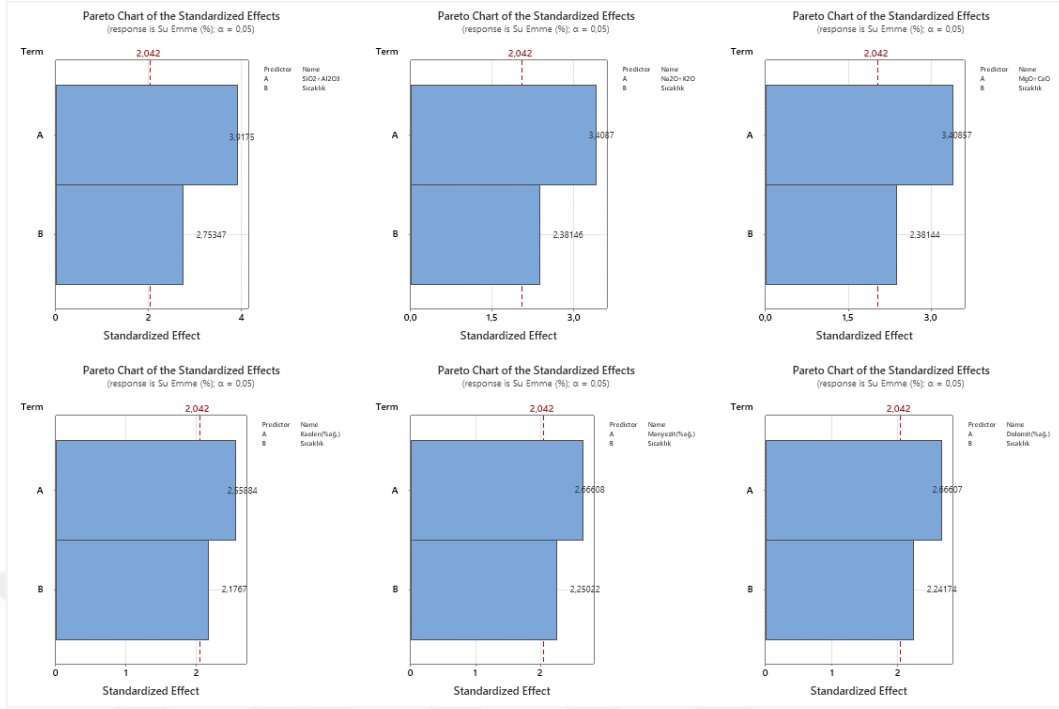
Şekil 7.69. Yoğunluk için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği

Sürekli değişkenlerin (kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerleri) sıcaklık yani kategorik değişken eşliğinde yoğunluk üzerinde etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak sürekli değişkenleri sıcaklık faktöründen bağımsız olarak yoğunluk üzerinde geçerli bir etkiye sahip oldukları görülmektedir. Standartlaştırılmış etki değerlerini göz önünde bulundurduğumuzda seger formülüne göre sırasıyla SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO faktörleri, tipik hammadde girdilerinde ise sırasıyla kaolen, manyezit ve dolomit en yüksek etkiye sahip oldukları görülmektedir.



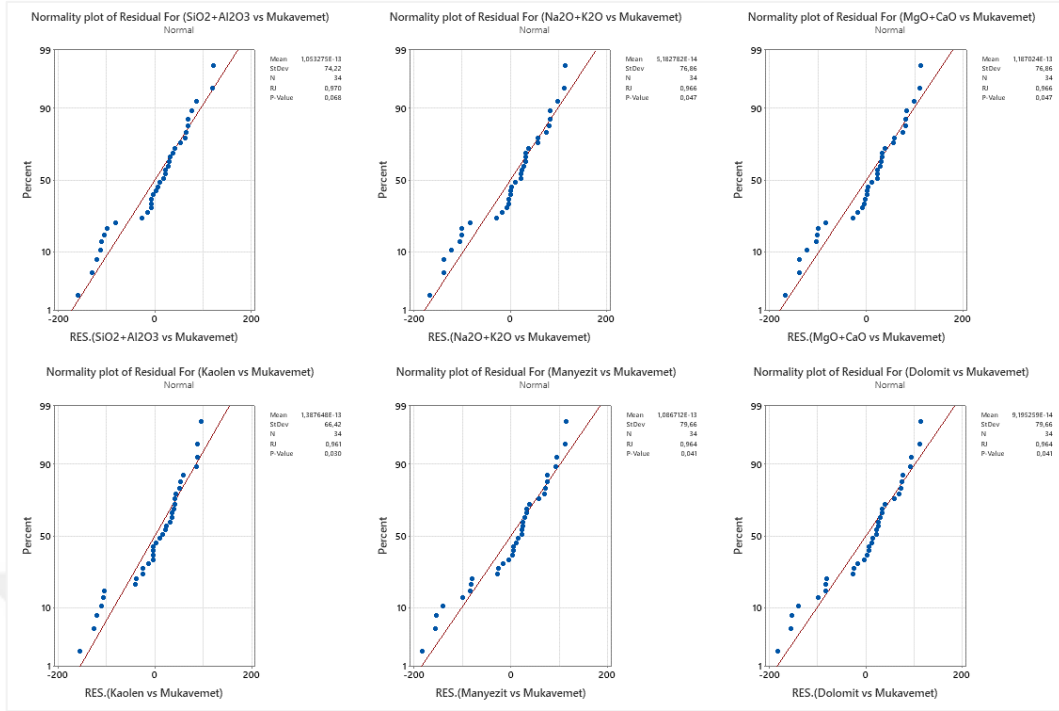
**Şekil 7.70.** Sürekli değişkenlere karşı su emme özelliğinin normallik testi

Su emme'nin kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerlerine karşı ikili normallik dağılım testine bakıldığında, Su emmenin sürekli değişkenlerin hepsi ile ikili dağılımlarının normal bir dağılım olmadığı gözlemlenmektedir (P değeri hepsi için <0,05).



Şekil 7.71. Su emme için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği

Sürekli değişkenlerin (kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{MgO}+\text{CaO}$  seger değerleri) sıcaklık yani kategorik değişken eşliğinde su emme üzerinde etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak sürekli değişkenleri su emme üzerinde geçerli bir etkiye sahip oldukları görülmektedir. Standartlaştırılmış etki değerlerini göz önünde bulundurduğumuzda seger formülüne göre sırasıyla  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{MgO}+\text{CaO}$  faktörleri, tipik hammadde girdilerinde ise sırasıyla manyezit, dolomit ve kaolen en yüksek etkiye sahip oldukları görülmektedir. Su emme sonuçlarına baktığımızda sıcaklığında bir kategorik değişken olarak su emme özelliğini etkilediğini görmek mümkündür. Buna esasen örnek verilmek gerekirse,  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  faktörü değiştiğinde su emme özelliği etkilenecek olup, aynı bünyenin farklı sıcaklıklarda sinterlenmesi de su emmeyi etkileyecektir.

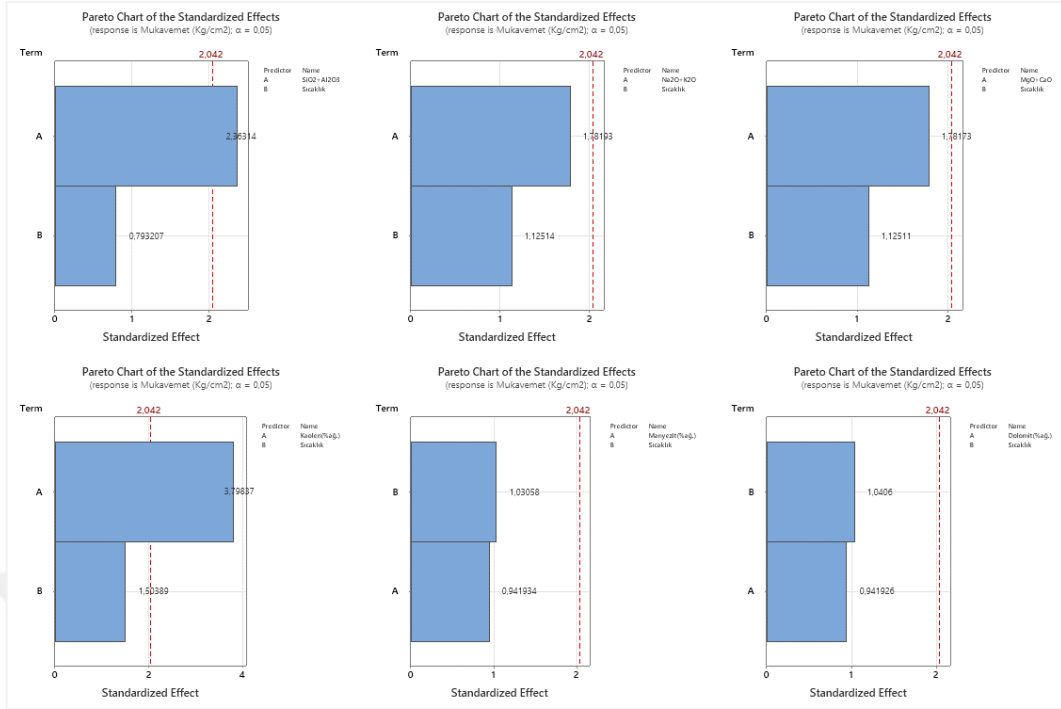


Şekil 7.72. Sürekli değişkenlere karşı pişme mukavemetin normallik testi

Mukavemetin kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerlerine karşı ikili normallik dağılım testi yapıldığında, elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

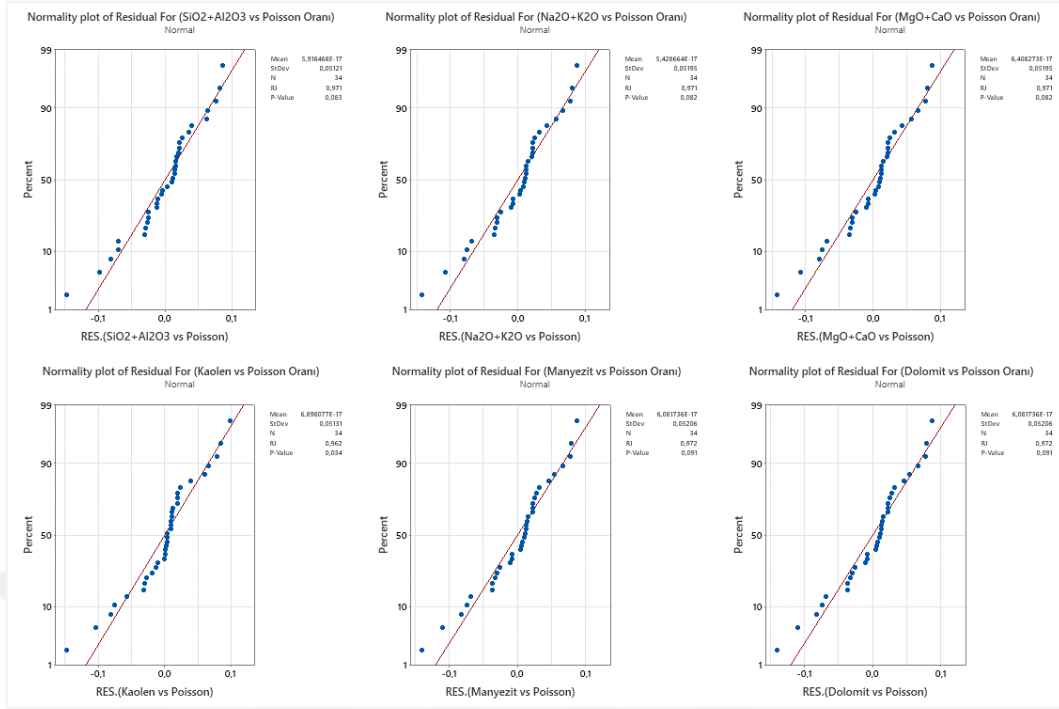
- SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Dağılımı normal (P değeri > 0,05)
- Diğer girdiler: Dağılımları normal bir dağılıma sahip değil

Bu sonuçlara göre, mukavemetin SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> değerine karşı ikili normallik dağılımı normal olarak kabul edilebilirken, diğer girdilerin ikili normallik dağılımları normal bir dağılıma sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, analizlerde dikkate alınması gereken bir husustur ve ilgili girdilerin dağılımlarının normal olmayan bir dağılım olduğunu göz önünde bulundurularak uygun istatistiksel yöntemlerin kullanılması önemlidir.



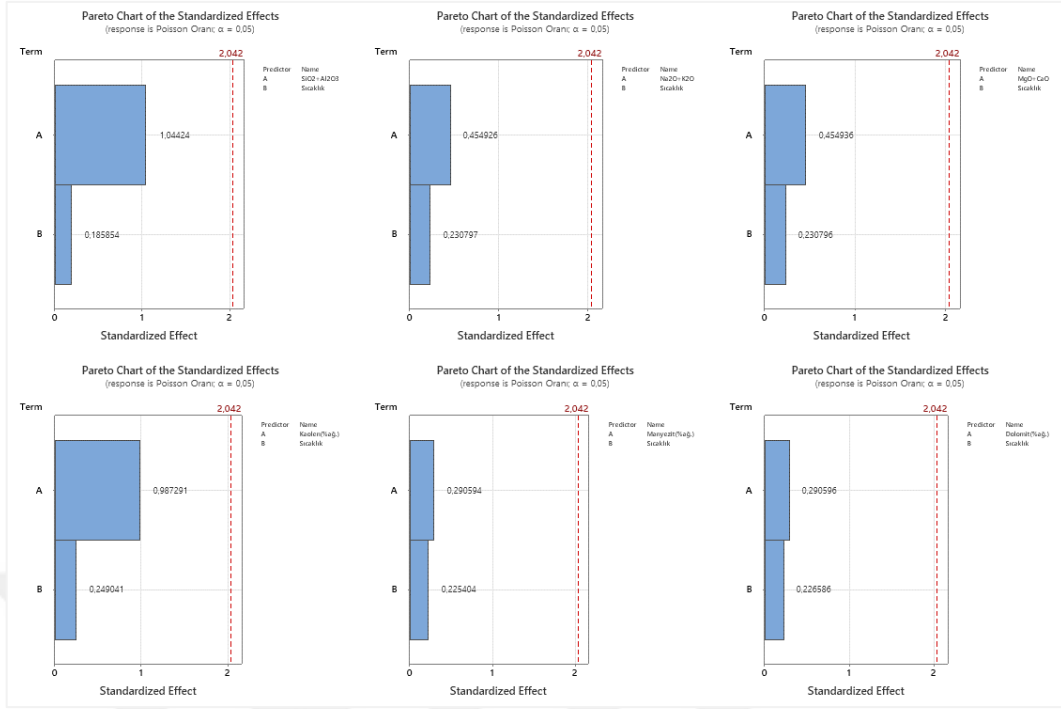
**Şekil 7.73.** Pişme mukavemeti için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği

Mukavemet üzerinde sürekli değişkenlerin (kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{MgO}+\text{CaO}$  seger değerleri) sıcaklık faktörü eşliğinde etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sadece  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  ve kaolen faktörlerinin mukavemet üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu değişkenler, sıcaklık faktöründen bağımsız olarak mukavemet üzerinde etkili oldukları görülmektedir. Karşılaştırma yapıldığında, başlangıç kaolen miktarının mukavemet üzerindeki etkisinin  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  değerinden daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Diğer faktörlerin ise mukavemet üzerinde çok az bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.



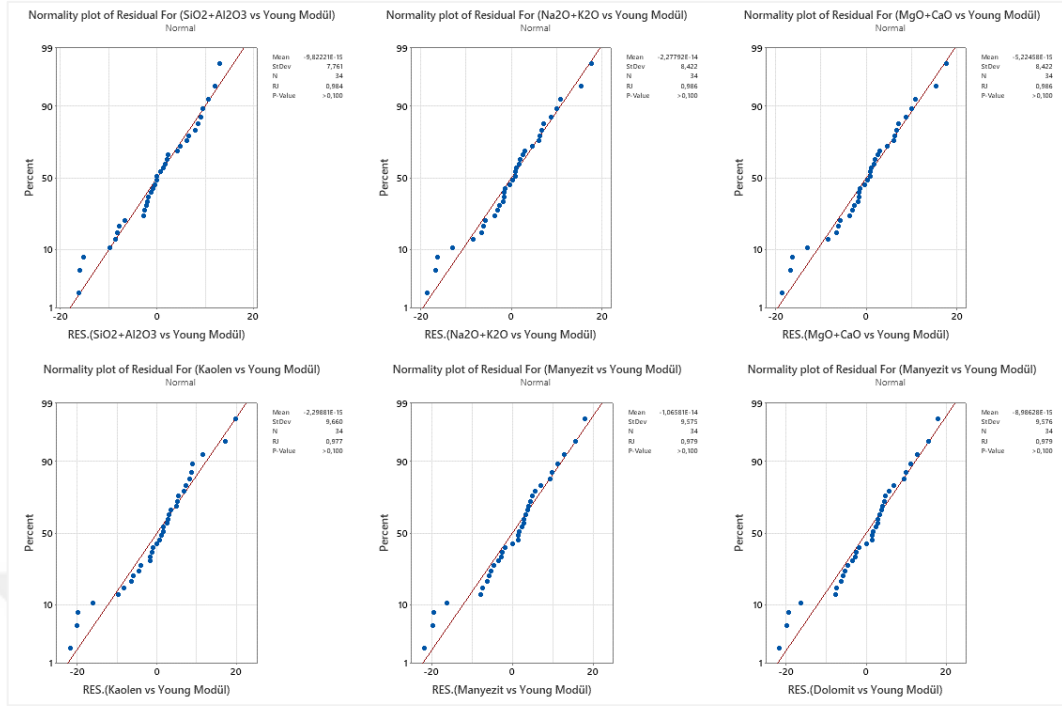
Şekil 7.74. Sürekli değişkenlere karşı Poisson oranının normallik testi

Poisson oranının kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerlerine karşı ikili normallik dağılım testine bakıldığında, Poisson oranı sürekli değişkenlerin hepsi ile ikili dağılımlarının normal bir dağılım olmadığı gözlemlenmektedir (P değeri hepsi için <0,05).



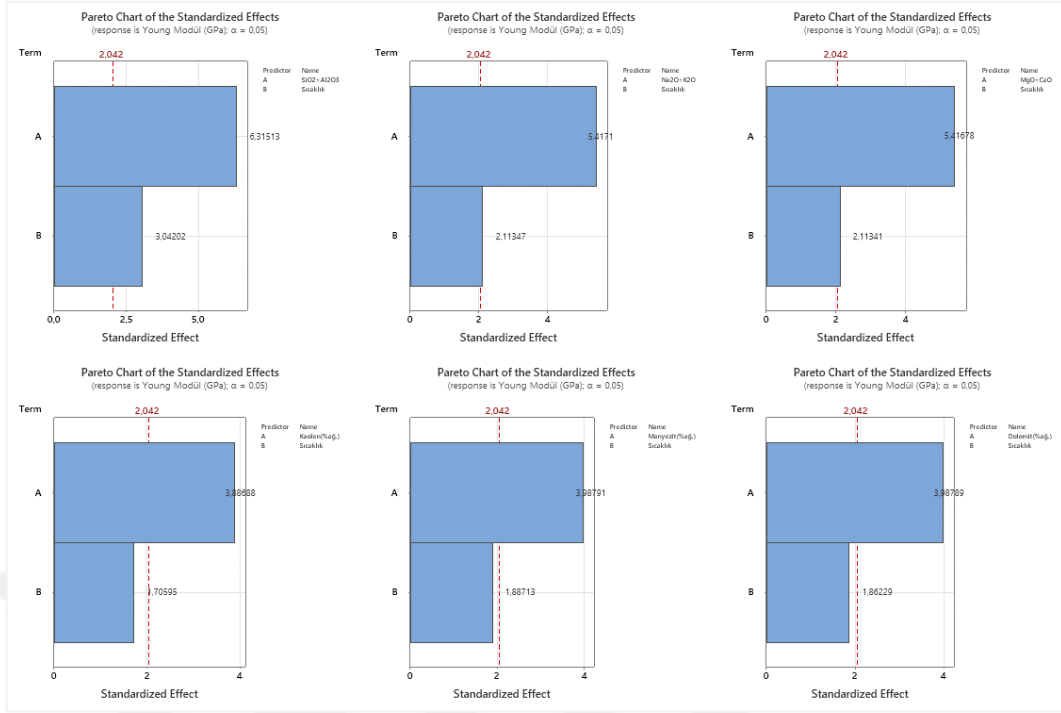
Şekil 7.75. Poisson oranı için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği

Sürekli değişkenlerin (kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerleri) sıcaklık yani kategorik değişken eşliğinde Poisson oranı üzerinde etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak bu değişkenlerin Poisson oranı üzerinde herhangi bir geçerli etkiye sahip olmadıkları görülmektedir.



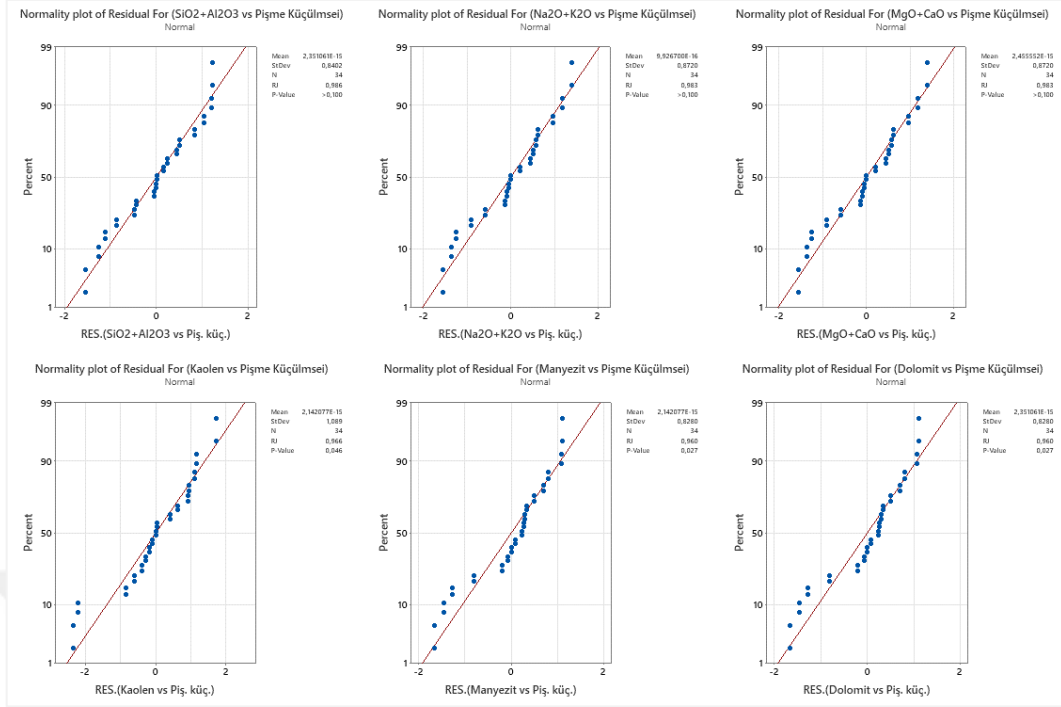
Şekil 7.76. Sürekli değişkenlere karşı Young modülünün normallik testi

Young modülü için, kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerlerinin ikili normallik dağılımına bakıldığında, tüm sürekli değişkenlerin Young modülü ile ikili dağılımlarının normal bir dağılıma sahip olduğu gözlemlenmektedir. Her bir değişken için yapılan normallik testi sonuçları, P değerlerinin 0,05'ten büyük olduğunu göstermektedir.



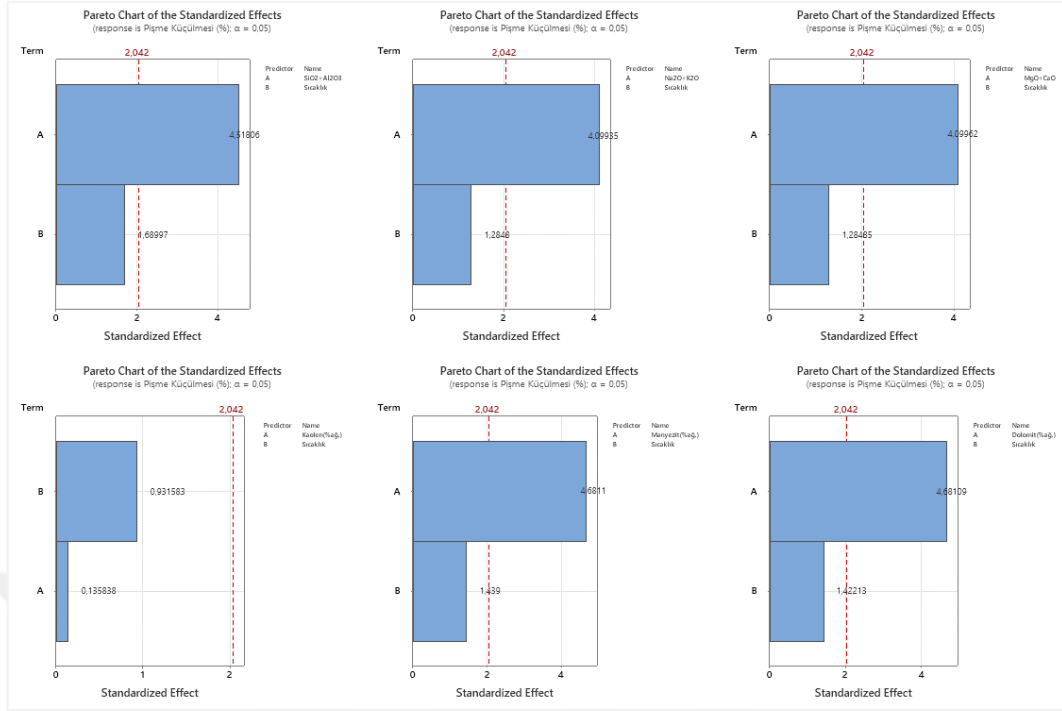
Şekil 7.77. Young modülü için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği

Young modülü üzerinde sürekli değişkenlerin (kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{MgO}+\text{CaO}$  seger değerleri) sıcaklık faktörüyle etkileşimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sürekli değişkenlerin Young modülü üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Standartlaştırılmış etki değerleri dikkate alındığında, Seger formülasyonuna göre sırasıyla  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}+\text{CaO}$  ve  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  faktörlerinin en yüksek etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Hammadde girdileri açısından ise manyezit, dolomit ve kaolenin en yüksek etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Seger formülasyonundaki faktörler sıcaklık faktöründen etkilenirken, hammadde faktörlerinin sıcaklık faktöründen daha az etkilendiği görülmüştür. Bu bağlamda, standartlaştırılmış etki değerlerine göre  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  faktörünün Young modülü üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.



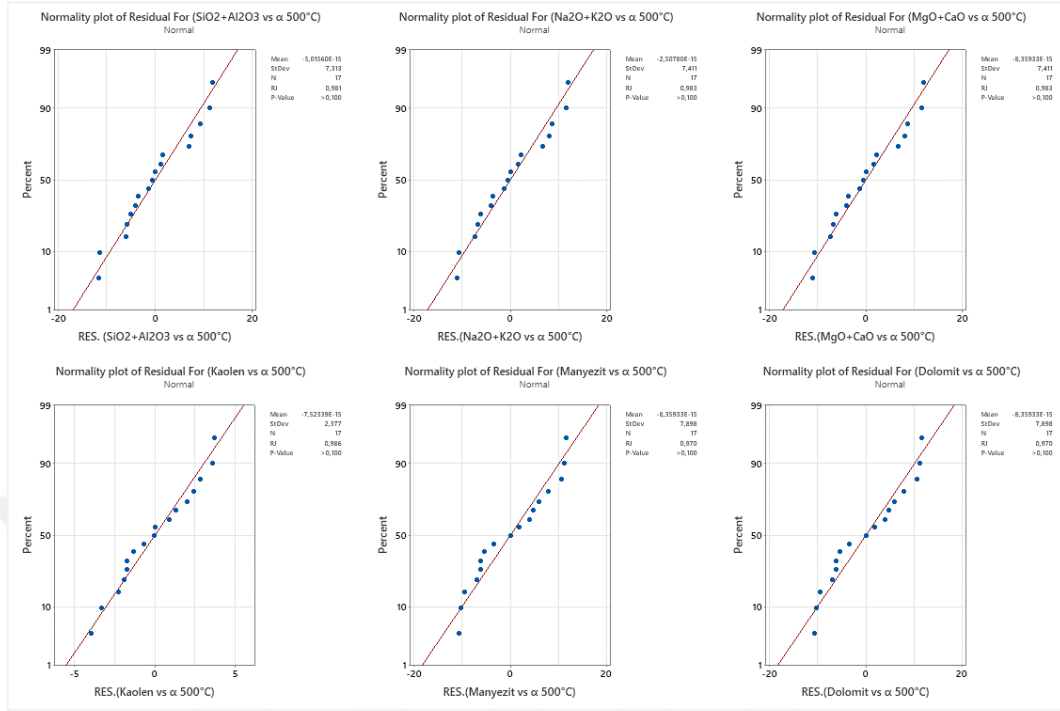
**Şekil 7.78.** Sürekli değişkenlere karşı pişme küçülmesi özelliğinin normallik testi

Pişme küçülmesi üzerinde kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerlerinin etkisini değerlendirmek için ikili normallik dağılım testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, seger formüllerine ait faktörler olan SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO'nun dağılımlarının normal olduğu belirlenmiştir (P değeri >0,05). Ancak, tipik hammadde girdileri olan kaolen, manyezit ve dolomit yüzdeleri ile ilgili ikili dağılımların normal bir dağılıma sahip olmadığı gözlemlenmiştir (P değeri <0,05). Bu sonuçlar, pişme küçülmesi üzerindeki etkilerin seger formüllerine ait faktörlerden kaynaklandığını ve hammadde girdilerinin etkisinin normal dağılım göstermediğini göstermektedir.



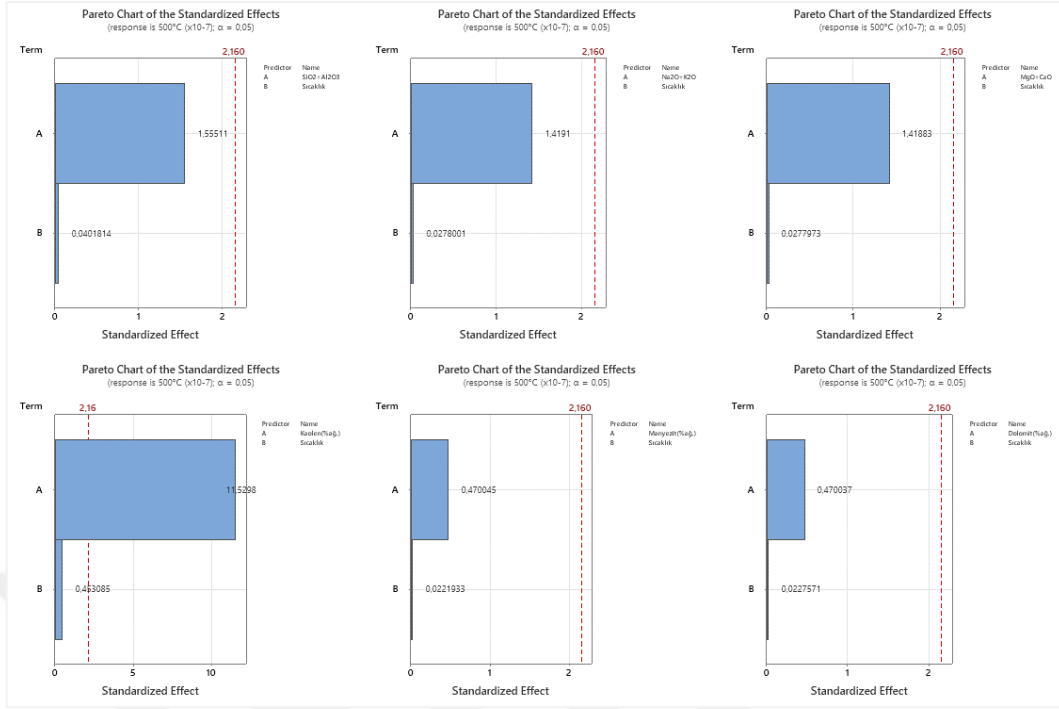
Şekil 7.79. Pişme küçülmesi için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği

Pişme küçülmesi üzerinde kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{MgO}+\text{CaO}$  seger değerlerinin etkisini sıcaklık faktörü eşliğinde değerlendiren bir analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, reçetedeki kaolen miktarı dışındaki sürekli değişkenlerin, pişme küçülmesi üzerinde sıcaklık faktöründen bağımsız olarak geçerli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Standartlaştırılmış etki değerlerine bakıldığında, seger formülasyonuna göre  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}+\text{CaO}$  ve  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  faktörlerinin, hammadde girdileri arasında ise manyezit ve dolomit faktörlerinin pişme küçülmesi üzerinde en yüksek etkiye sahip oldukları belirlenmiştir. Bu bağlamda, standartlaştırılmış etki değerlerine göre, reçetedeki girdiler arasında manyezit faktörünün pişme küçülmesi üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir.



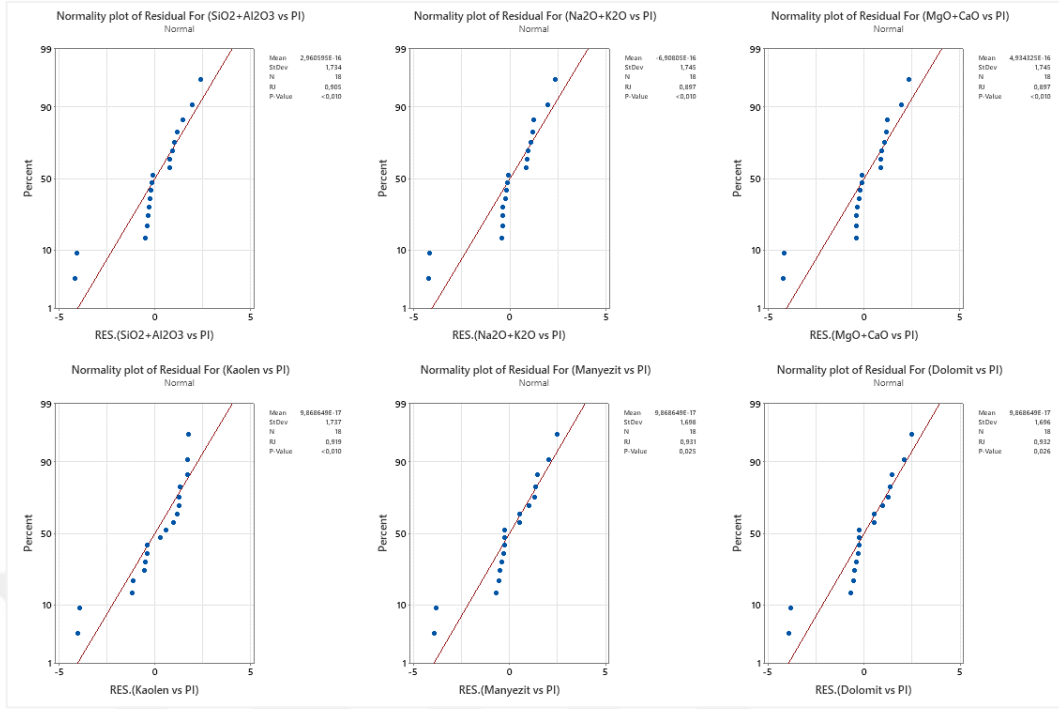
**Şekil 7.80.** Sürekli değişkenlere karşı ısı genleşme katsayısının normallik testi

Kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerlerinin 500 °C'deki ısı genleşme katsayısı üzerindeki etkisini incelemek için ikili normallik dağılımına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bu özelliğin sürekli değişkenlerin tamamıyla ikili dağılımlarının normal bir dağılıma sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, P değerlerinin tüm sürekli değişkenler için 0,05'ten büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerlerinin 500°C'deki ısı genleşme katsayısı üzerinde normal dağılıma sahip olduklarını göstermektedir.



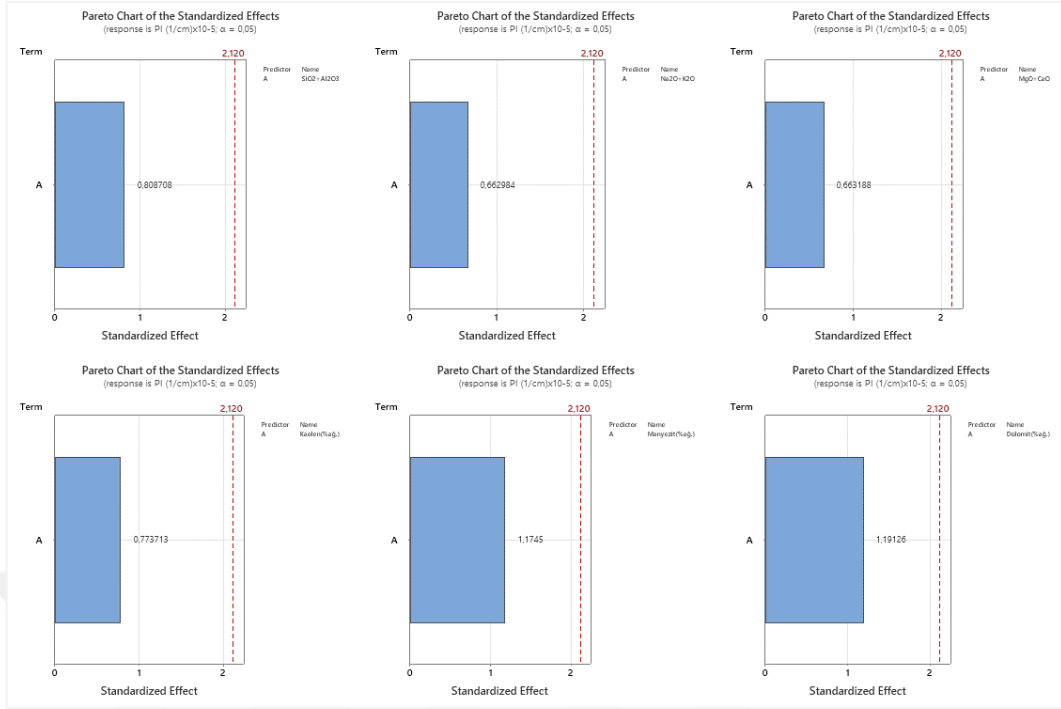
Şekil 7.81. Isıl genleşme katsayısı için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği

Sürekli değişkenlerin (kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{MgO}+\text{CaO}$  seger değerleri) sıcaklık yani kategorik değişken eşliğinde  $500^\circ\text{C}$ 'deki ısıl genleşme katsayısı üzerinde etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak reçetede başlangıç kaolen miktarı hariç bu değişkenlerin bu özellik üzerinde herhangi bir geçerli etkiye sahip olmadıkları görülmektedir. Standartlaştırılmış etki değerlerine bakıldığında ise reçetede kaolen miktarının ısıl genleşme katsayısı üzerinde sıcaklık faktöründen bağımsız olarak yüksek bir etkisi olduğu görülmektedir.



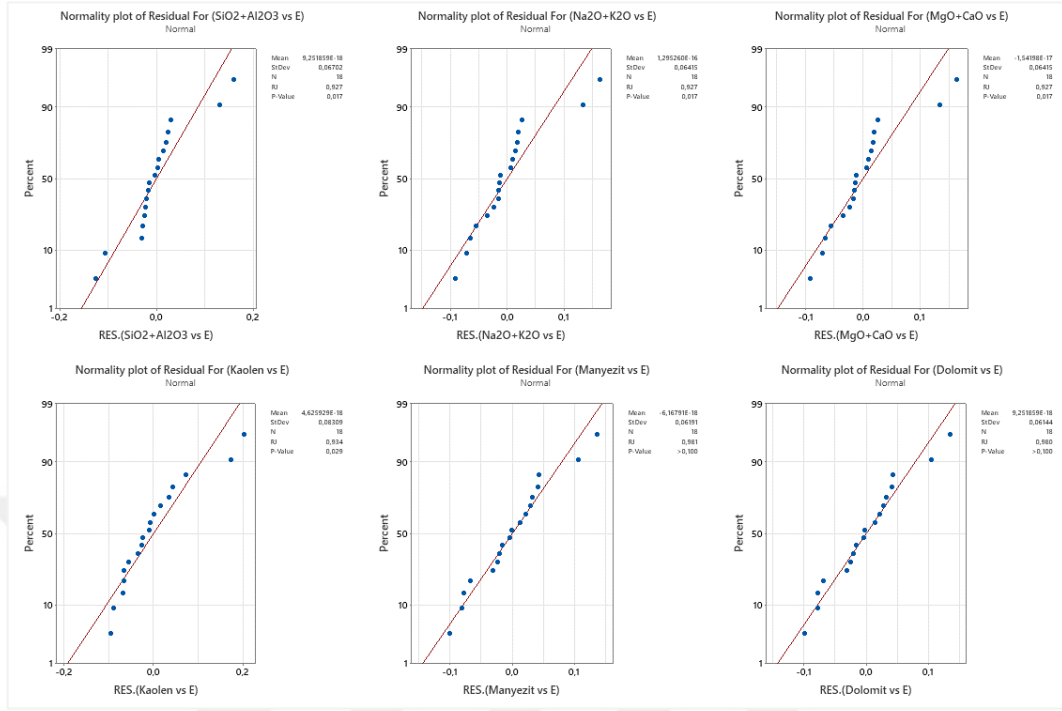
Şekil 7.82. Sürekli değişkenlere karşı Pyroplastik deformasyon indeksinin normallik testi

Kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerlerinin Pyroplastik deformasyon indeksi üzerindeki etkisini incelemek için ikili normallik dağılımına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bu indeksin sürekli değişkenlerin tamamıyla ikili dağılımlarının normal bir dağılıma sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, P değerlerinin tüm sürekli değişkenler için 0,05'ten küçük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerlerinin Pyroplastik deformasyon indeksi üzerinde normal bir dağılıma sahip olmadıklarını göstermektedir.



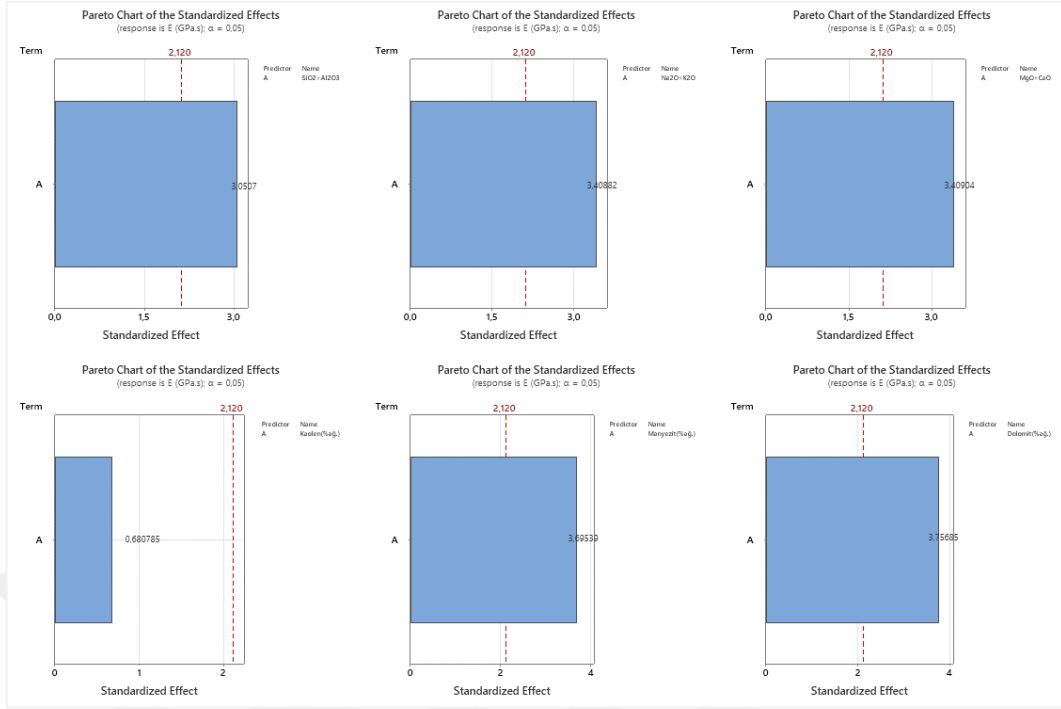
**Şekil 7.83.** Pyroplastik deformasyon indeksi için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği

Pyroplastik deformasyon indeksi üzerinde kaolen, manyeazit, dolomit yüzdeleri ve  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{MgO}+\text{CaO}$  seger değerlerinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bu sürekli değişkenlerin Pyroplastik deformasyon indeksi üzerinde herhangi bir geçerli etkiye sahip olmadığı görülmüştür. İstatistiksel analizler sonucunda, bu değişkenlerin Pyroplastik deformasyon indeksi üzerinde anlamlı bir etkilerinin olmadığı tespit edilmiştir.



**Şekil 7.84.** Sürekli değişkenlere karşı camsı faz viskozite değerinin normallik testi

Camsı faz viskozitesinin kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{MgO}+\text{CaO}$  seger değerleri üzerinde ikili normallik dağılım testi gerçekleştirilmiştir. Bu test sonucunda, sadece manyezit ve dolomit girdilerinin dağılımlarının normal olduğu gözlemlenmiştir (P değeri  $>0,05$ ). Diğer girdiler ise ikili dağılımlarının normal bir dağılıma sahip olmadığı belirlenmiştir (P değeri  $<0,05$ ).



**Şekil 7.85.** Camısı faz viskozite değeri için sürekli ve kategorik değişkenlerin standartlaştırılmış Pareto grafiği

Sürekli değişkenlerin (kaolen, manyezit, dolomit yüzdeleri ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve MgO+CaO seger değerleri) camısı faz viskozitesi üzerinde etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak reçetede başlangıç kaolen miktarı hariç diğer değişkenlerin bu özellik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Standartlaştırılmış etki değerlerine bakıldığında ise sırasıyla reçetede dolomit ve manyezit miktarı, MgO+CaO, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ve SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seger değerleri camısı faz viskozitesi üzerinde en önemli etkiye sahip faktörlerdir.

#### 7.4. Doğrulama Çalışmaları

ANOVA tablosundan elde edilen matematiksel modelleri doğrulamak amaçlı bir doğrulama veri seti hazırlanmıştır. Doğrulama reçetelerini hazırlarken deney tasarımında uygulanan tipik hammadde kıstasları ve farklı faktörlerin sınır noktalarını dikkate alarak 6 farklı reçete oluşmuştur. Reçete hazırlama sırasında ana reçetelerde olduğu gibi tipik hammaddeler kıstasları (Bkz. Tablo 4.8) uygulanmıştır. Reçetelerin içeriği aşağıda verilmiştir.

**Tablo 7.41. Doğrulama reçetelerin içeriği**

Numune	Afyon Kili	İstanbul Kili	Ukrayna Kili	Kaolen	Na-Feldispat	Flote	K-Feldispat	Manyezit	Silis Kumu
V1	36,00%	6,00%	-	3,00%	15,50%	10,00%	20,00%	0,50%	9,00%
V2	20,00%	5,00%	15,00%	3,00%	12,00%	15,00%	20,00%	1,00%	9,00%
V3	30,00%	5,00%	5,00%	3,00%	20,00%	15,00%	12,00%	1,50%	8,50%
V4	15,00%	10,00%	18,00%	6,00%	21,00%	19,00%	7,00%	1,00%	3,00%
V5	-	16,00%	19,00%	9,00%	23,00%	20,00%	6,00%	2,00%	5,00%
V6	6,00%	10,00%	15,00%	7,50%	13,00%	38,30%	3,00%	0,70%	6,50%

Ana faktörlerin yani oksit oranlarının deney tasarımında seviyeleri  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  için 5,2-8,2,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  için 1,5-8,0 ve  $\text{MgO}/\text{CaO}$  için 0,8-3,0 olarak belirlendiğini göz önünde bulundurarak doğrulama reçeteleri için bu faktörler için sırasıyla 5,7-7,9, 1,5-7,35 ve 1,0-2,7 aralığında tasarlanmış, iki farklı sıcaklıkta (1180°C ve 1200°C) sinterlenmiştir. Doğrulama reçetelerinin seger oksit oranları Tablo 7.42 'de verilmiştir.

**Tablo 7.42. Doğrulama reçetelerin oksit oranları**

Numune	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}/\text{CaO}$
V1	7,8	1,5	1,3
V2	6,7	1,7	1,8
V3	7,4	2,5	2,4
V4	6,1	3,6	1,7
V5	5,7	5,0	2,7
V6	5,9	7,35	1,0

Üretim sürecinde, tane boyutu farklılığını ortadan kaldırmak amacıyla, 63  $\mu\text{m}$  elek bakiyesinin %2'nin altında olması ve koloidal tanelerin %11-14 aralığında olmasına dikkat edilmiştir. Doğrulama reçetelerinde, ana reçetelerdeki sinterleme rejimi aynen uygulanmıştır.

#### 7.4.1. Doğrulama reçetelerin sonuçları

Tablo 7.43-7.45 'te doğrulama setinin deneysel (Den.) sonuçları ve regresyon modellerinden elde edilen %95 güven düzeyindeki aralık tahminleri (A.T.) karşılaştırılmıştır.

**Tablo 7.43.** Doğrulama setinin teknik özellikler için deneysel sonuçları ve regresyon modellerinden elde edilen %95 güven düzeyindeki aralık tahminleri

Numune	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )		Su emme (%)		Pişme küçülmesi (%)		Isıl genleşme katsayısı (500°C) × 10 <sup>-7</sup>		Mukavemet (kg/cm <sup>2</sup> )	
	Den.	A.T.	Den.	A.T.	Den.	A.T.	Den.	A.T.	Den.	A.T.
V1-1180 °C	2,29	2,27:2,30	0,88	0,54:0,90	8,12	7,85:8,25	90,35	87,1:91,2	440,2	410:467
V1-1200 °C	2,36	2,35:2,37	0,02	0,0:0,3	9,58	9,32:9,74	95,68	88,7:93,8	533,7	464:521
V2-1180 °C	2,37	2,35:2,37	0,17	0,22:0,57	9,03	8,8:9,2	88,01	82,4:87,3	538,4	506:560
V2-1200 °C	2,39	2,375:2,40	0,02	0,0:0,25	9,29	9,25:9,65	86,96	82,5:87,4	518,8	492:546
V3-1180 °C	2,36	2,34:2,36	0,12	0,20:0,55	9,61	9,3:9,7	90,32	85,6:90,5	553,9	497:552
V3-1200 °C	2,36	2,36:2,38	0,0	0,0:0,23	9,75	9,63:10,03	89,94	85,4:90,3	507,2	464:519
V4-1180 °C	2,40	2,37:2,40	0,18	0,15:0,49	9,19	8,87:9,25	83,23	78,3:83,1	560,2	537:591
V4-1200 °C	2,41	2,39:2,41	0,0	0,0:0,22	9,25	9,11:9,50	82,34	78,1:82,9	537,8	504:559
V5-1180 °C	2,43	2,41:2,435	0,02	0,0:0,26	9,75	9,64:10,05	77,44	75,9:80,9	591,2	566:622
V5-1200 °C	2,42	2,40:2,43	0,0	0,0:0,18	9,46	9,26:9,66	74,87	73,5:78,5	505,7	479:535
V6-1180 °C	2,38	2,36:2,38	0,55	0,33:0,69	8,64	8,28:8,69	76,11	74,2:79,2	556,9	541:598
V6-1200 °C	2,41	2,39:2,41	0,0	0,0:0,25	9,14	8,86:9,27	79,14	75,0:80,05	524,8	509:565

**Tablo 7.44.** Doğrulama setinin elastik modülleri için deneysel sonuçları ve regresyon modellerinden elde edilen %95 güven düzeyindeki aralık tahminleri

Numune	Poisson Oranı		Young Modülü (GPa)	
	Den.	A.T.	Den.	A.T.
V1-1180 °C	0,1965	0,0939:0,2265	59,63	56,89:67,52
V1-1200 °C	0,2360	0,09216:0,2247	65,32	62,88:73,51
V2-1180 °C	0,1936	0,0919:0,2212	68,34	63,13:73,49
V2-1200 °C	0,2091	0,1301:0,2594	71,98	68,73:79,09
V3-1180 °C	0,2294	0,1043:0,2332	68,21	63,35:73,75
V3-1200 °C	0,2036	0,1258:0,2547	74,07	68,54:78,93
V4-1180 °C	0,2028	0,1132:0,2401	71,04	65,78:76,05
V4-1200 °C	0,2243	0,1410:0,2678	73,35	69,54:79,82
V5-1180 °C	0,1878	0,1033:0,2316	77,89	70,02:80,46
V5-1200 °C	0,1414	0,1469:0,2749	81,46	74,49:84,93
V6-1180 °C	0,1688	0,1629:0,2937	70,61	64,19:74,83
V6-1200 °C	0,2441	0,1305:0,2614	70,81	65,27:75,91

**Tablo 7.45.** Doğrulama setinin fleksimetre sonuçları için deneysel sonuçları ve regresyon modellerinden elde edilen %95 güven düzeyindeki aralık tahminleri

Numune	PI (1/cm)×10 <sup>-5</sup>		Camsı faz viskozitesi (GPa.s)	
	Den.	A.T.	Den.	A.T.
V1	7,48	8,78:9,53	0,39	0,25:0,33
V2	9,64	9,28:9,98	0,31	0,20:0,28
V3	9,81	9,18:9,90	0,30	0,20:0,28
V4	9,52	9,27:9,98	0,34	0,21:0,29
V5	10,21	9,61:10,34	0,34	0,15:0,23
V6	9,86	8,08:8,82	0,32	0,31:0,39

Tablo 7.43 'te, teknik özellikler için doğrulama setinin deneysel sonuçları ile 95% güven düzeyinde regresyon modellerinden elde edilen tahmin aralığı karşılaştırılmıştır. Yoğunluk ve lineer çekme sonuçları, regresyon modellerinin tahmin aralığı içinde tamamen yer almaktadır. Su emme, termal genişleme katsayısı (500°C'de) ve mukavemet için deneysel sonuçlar da regresyon modellerinin tahmin aralığıyla uyum içindedir. Sadece su emme özelliği için iki doğrulama örneğinin sonuçları tahmin edilen aralık değerlerinden farklılık göstermektedir. Termal genişleme katsayısı (500°C'de) ve

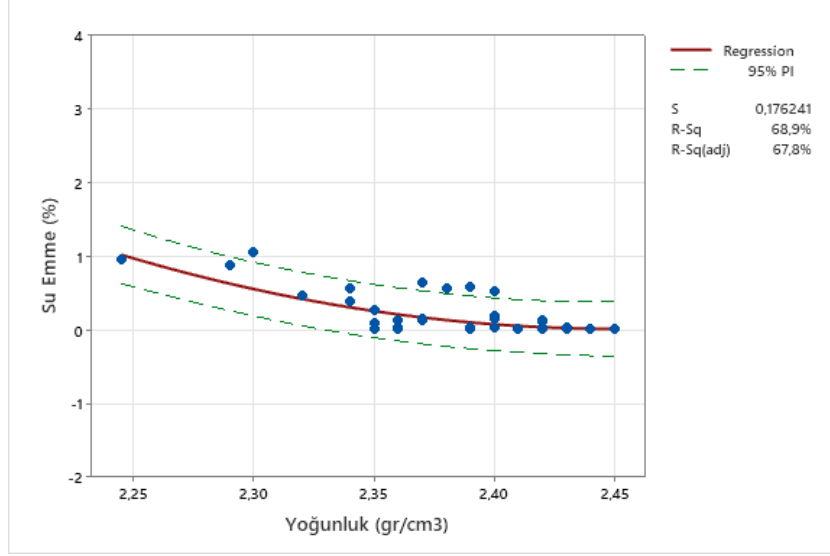
mukavemet için ise üç ve bir örnek farklılık göstermektedir. Su emme, termal genişleme katsayısı (500°C'de) ve mukavemet özellikleri için belirlenen maksimum tolerans değerleri sırasıyla %0,1, %2 ve %2,43 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, doğrulama setinin deneysel sonuçlarının ve regresyon modellerinden elde edilen tahmin aralığının 95% güven düzeyinde karşılaştırılması ve her bir modelin tolerans seviyeleri dikkate alındığında, geliştirilen regresyon modellerinin yüksek öngörülebilirlik sağladığı söylenebilir.

Tablo 7.44 'te, elastik modüller için doğrulama setinin deneysel sonuçları ile 95% güven düzeyinde regresyon modellerinden elde edilen tahmin aralığı karşılaştırılmıştır. Elastik modüllerinde deneysel sonuçlar da regresyon modellerinin tahmin aralığıyla uyum içindedir, ancak 95% güven düzeyinde regresyon modellerinden elde edilen tahmin aralıklarının geniş bir aralığa sahip olduğu (tolerans seviyelerinin yüksek olduğu) ve spesifik sonuçlardan uzak olduğu gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, regresyon modellerinin tolerans seviyelerinin yüksek olması modelin öngörülebilirlik seviyesini düşürmektedir.

Tablo 7.45 'te, fleksimetre sonuçları için doğrulama setinin deneysel sonuçları ile %95 güven düzeyinde regresyon modellerinden elde edilen tahmin aralığı karşılaştırılmıştır. Bu tabloda özellikle camsı faz viskozitesi özelliğinde, deneysel sonuçlar ile regresyon sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu ve modelin tahmin aralığının deneysel sonuçlarla uyumlu olmadığı gözlenmektedir. Pyroplastik indeksinde ise iki doğrulama örneğinin sonuçları tahmin edilen aralık değerlerinden farklılık göstermektedir. PI özelliği için belirlenen maksimum tolerans değeri %14,8 olarak belirlenmiştir.

### **7.5. Özellik-Özellik İlişkilerin Tespiti**

Çalışmanın bu kısmında özellikler (yoğunluk, su emme, pişme mukavemeti, Poisson oranı, Young modülü, pişme küçülmesi, pyroplastik indeksi ve camsı faz viskozitesi) arasında bir ilişkinin olup olmadığına MINITAB 20 uygulama kullanarak bakılmıştır. Böylece özellik-özellik ilişkileri incelenmiş aralarındaki olası regresyon hesaplanmıştır. Bu anlamda farklı regresyon modelleri denenmiş en düşük SS ve en yüksek R-Sq değerine sahip model ilişkiyi temsil etmek amaçlı seçilmiştir.



Şekil 7.86. Yoğunluk ile su emme arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu

$$F(x) = 142,0 - 115,8 x + 23,63 x^2$$

Burada,  $x$ = Yoğunluk ve  $f(x)$ =Su emme değişkenleridir.

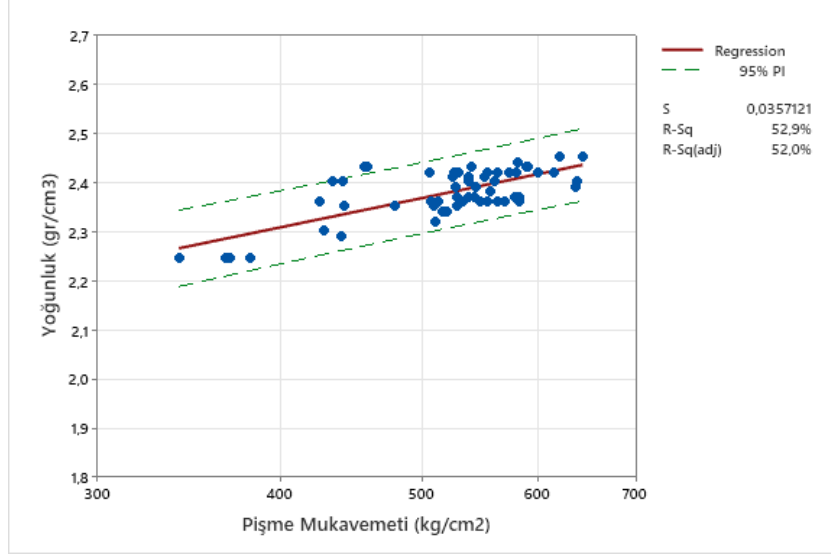
Modelin varyans analizi ile ilgili değerler Tablo 7.46 'da verilmiştir.

Tablo 7.46. Yoğunluk-Su emme denklemine ait varyans analizi

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	3,78771	1,89385	60,97	0,000
Error	55	1,70834	0,03106		
Total	57	5,49605			

Tablo 7.46 'deki varyans analizi sonuçlarına göre, regresyon modeli için F değeri 60,97 ve p değeri 0,000 olarak verilmiştir. Bu, modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve yoğunluk değişkeninin su emme üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gösterir. Regresyon formülündeki katsayılar, yoğunluğun su emme üzerindeki etkisini gösterir. Örneğin, negatif katsayı  $-115,8x$ , yoğunluğun artmasıyla su emmenin azaldığını ifade eder. Belirli bir noktadan sonra, pozitif katsayı  $23,63x^2$ , yoğunluğun artmasıyla su emmenin arttığını gösterir.

Bu regresyon modeli, yoğunluğun su emme değişkeni üzerindeki etkisini nicel olarak açıklar ve bu etkiyi matematiksel bir denklemlerle ifade eder. Modelin katsayıları, yoğunluğun su emme üzerindeki etkisini ölçerken, denklem kullanılarak su emme değerinin tahmin edilmesi sağlanır. Bu şekilde, yoğunluğun su emme üzerindeki etkisi ve ilişkisi istatistiksel olarak analiz edilebilir ve tahminler yapılabilir.



Şekil 7.87 Yoğunluk ile Mukavemet arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu

$$F(x) = 0,7105 + 0,6138 \log_{10}(x)$$

Burada, x=Mukavemet ve f(x)=Yoğunluk değişkenleridir.

Modelin varyans analizi ile ilgili değerler Tablo 7.47 'de verilmiştir.

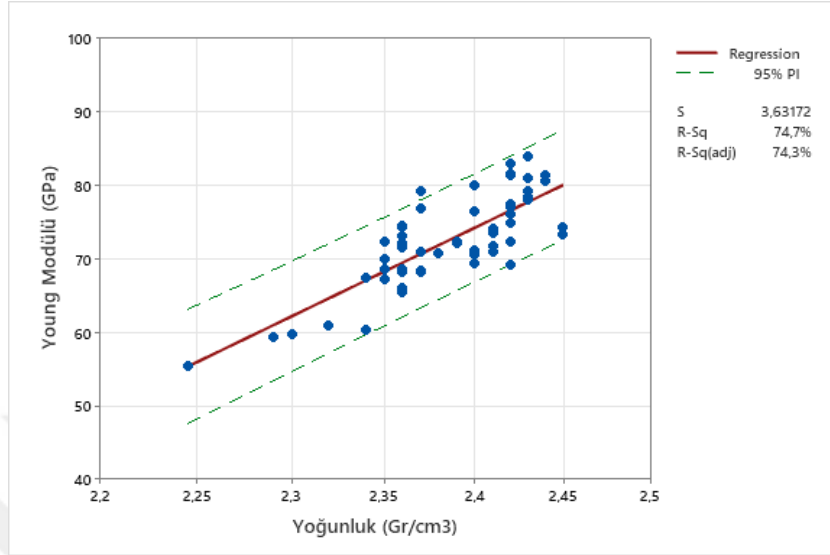
Tablo 7.47. Yoğunluk-Mukavemet denklemine ait varyans analizi

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0,080170	0,0801698	62,86	0,000
Error	56	0,071420	0,0012754		
Total	57	0,151590			

Tablo 7.47 'deki varyans analizi sonuçlarına göre, regresyon modeli için F değeri 62,86 ve p değeri 0,000 olarak verilmiştir. Bu değerler, modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve mukavemet değişkeninin yoğunluk üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Regresyon formülündeki katsayılar, mukavemetin yoğunluk üzerindeki etkisini temsil etmektedir. Sabit katsayı olan 0,7105, mukavemetin artmasıyla yoğunluğun da artacağını göstermektedir. Bu durum, mukavemetin yoğunlukla pozitif bir ilişkisi olduğunu ifade etmektedir. Logaritmik katsayı ise 0,6138 olarak belirlenmiştir ve mukavemetin logaritması ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Logaritmik katsayının pozitif olması, mukavemetin artmasıyla yoğunluğun da artacağını göstermektedir.

Bu regresyon formülü, mukavemet ve yoğunluk arasındaki ilişkiyi nicel olarak ifade ederek, mukavemetin yoğunluk üzerindeki etkisini analiz etmemizi sağlamaktadır.

Bu şekilde, regresyon formülü kullanılarak mukavemet değeri bilindiğinde yoğunluk değerini tahmin etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 7.88. Yoğunluk ile Young modülülü arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu

$$F(x) = -172,8 + 649,4 \log_{10}(x)$$

Burada,  $x$ =Yoğunluk ve  $f(x)$ =Young modülülü değişkenleridir.

Modelin varyans analizi ile ilgili değerler Tablo 7.48 'de verilmiştir.

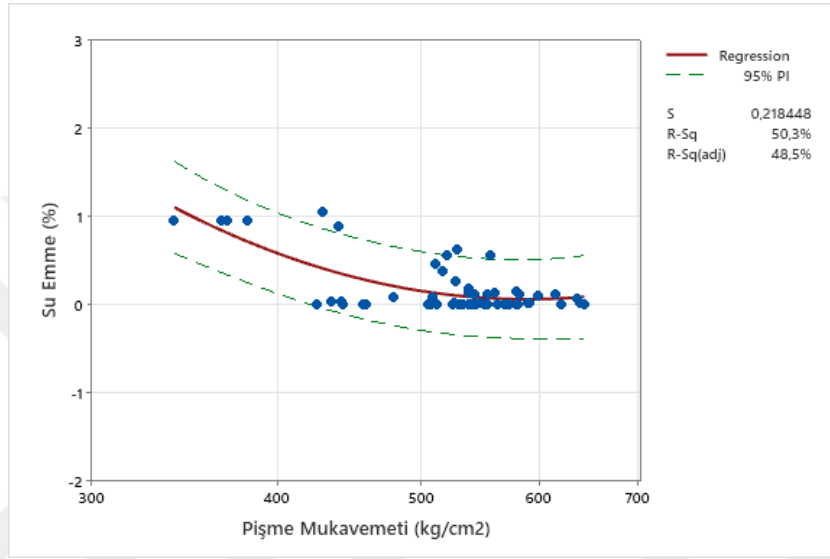
Tablo 7.48. Yoğunluk-Young modülülü denklemine ait varyans analizi

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	2185,21	2185,21	165,68	0,000
Error	56	738,61	13,19		
Total	57	2923,82			

Regresyon modeli için F değeri 165,68 ve p değeri 0,000 olarak verilmiştir. Bu değerler, modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve mukavemet değişkeninin yoğunluk üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gösterir. Bu analiz, Yoğunluk-Young modülülü denklemine dayalı regresyon modelinin veri setine iyi uydurulduğunu ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Varyans analizi tablosu, regresyon modelinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Regresyon formülündeki sabit terim (-172,8), yoğunluğun etkisini temsil etmektedir. Pozitif bir değere sahip olan 649,4 logaritmik katsayı ise yoğunluğun logaritması ile Young modülülü arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır.

Logaritmik katsayının pozitif olması, yoğunluğun artmasıyla Young modülünün de artacağını göstermektedir. Logaritmik dönüşüm kullanıldığından, yoğunluktaki her bir birimlik artış, Young modülünde logaritmik ölçekte daha büyük bir artışa yol açacaktır.

Bu regresyon formülü, yoğunluk değerleri verildiğinde Young modülünü tahmin etmek için kullanılabilir. Örneğin, belirli bir yoğunluk değeri verildiğinde, bu formül kullanılarak Young modülünün tahmin edilmesi mümkündür.



Şekil 7.89. Su emme ile Mukavemet arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu

$$F(x) = 141,2 - 101,9 \log_{10}(x) + 18,38 \log_{10}(x)^2$$

Burada, x=Mukavemet ve f(x)=Su emme değişkenleridir.

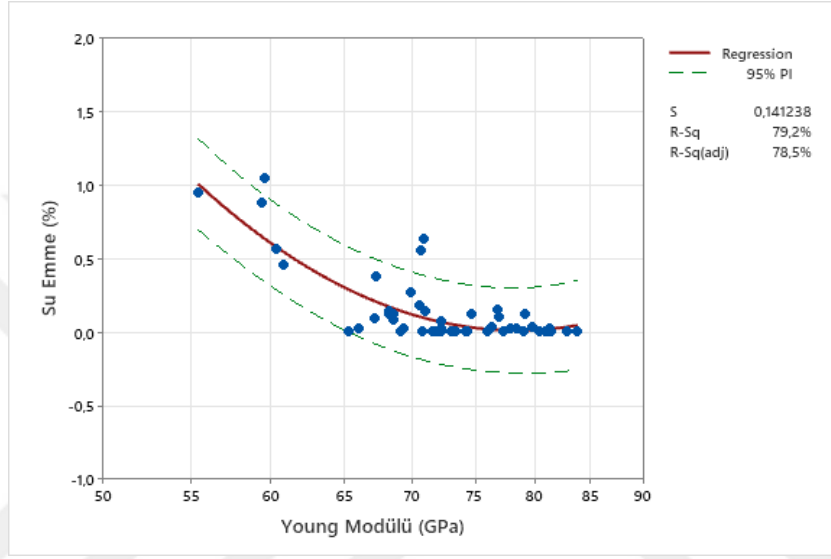
Modelin varyans analizi ile ilgili değerler Tablo 7.49 'da verilmiştir.

Tablo 7.49. Su emme-Mukavemet denklemine ait varyans analizi

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	2,65388	1,32694	27,81	0,000
Error	55	2,62458	0,04772		
Total	57	5,27846			

Tablo 7.49 'deki varyans analizi sonuçlarına göre, regresyon modeli için F değeri 27,81 ve p değeri 0,000 olarak verilmiştir. Bu değerler, modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve mukavemet değişkeninin yoğunluk üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Regresyon formülünde sabit terim 141,2, Mukavemetin artmasıyla Su emmenin azalacağını ifade eder. Logaritmik terimler olan  $-101,9 \log_{10}(x)$  ve  $18,38 \log_{10}(x)^2$ , Mukavemetin logaritması ile Su emme arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Logaritmik terimlerin katsayılarının negatif olması, Mukavemetin artmasıyla Su emmenin azalacağını gösterir. Logaritmik dönüşüm kullanıldığından, Mukavemetin her bir birimlik artışı, Su emmesinde logaritmik ölçekte daha büyük bir azalışa yol açar.



Şekil 7.90. Su emme ile Young modülü arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu

$$F(x) = 156,2 - 164,9 \log_{10}(x) + 43,51 \log_{10}(x)^2$$

Burada,  $x$ =Young modülü ve  $f(x)$ =Su emme değişkenleridir.

Modelin varyans analizi ile ilgili değerler Tablo 7.50 'de verilmiştir.

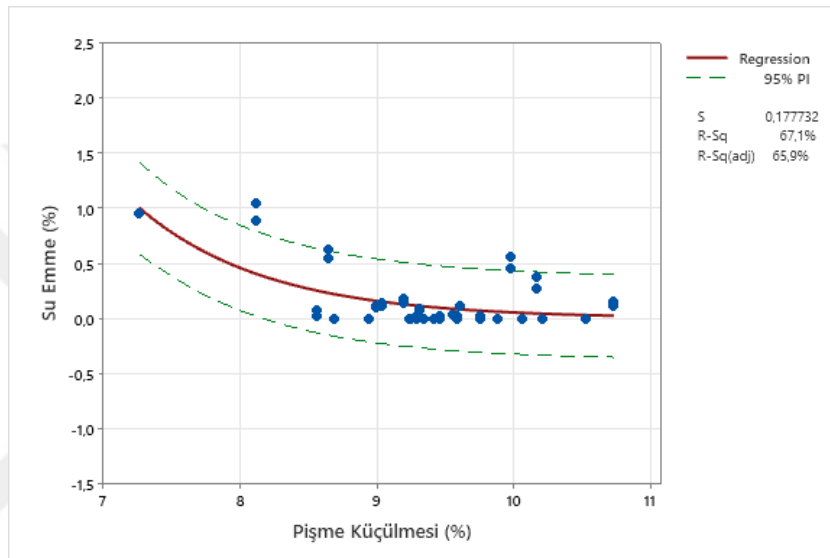
**Tablo 7.50.** Su emme-Young modülü denkleminde ait uygunluk değerleri

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	4,18131	2,09065	104,80	0,000
Error	55	1,09716	0,01995		
Total	57	5,27846			

Tablo 7.50 'deki varyans analizi sonuçlarına göre, regresyon modeli için F değeri 104,80 ve p değeri 0,000 olarak verilmiştir. Bu değerler, modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve mukavemet değişkeninin yoğunluk üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Bu formülde, sabit terim 156,2, Young modülünün artmasıyla Su emmenin azalacağını ifade eder. Logaritmik terimler olan  $-164,9 \log_{10}(x)$  ve  $43,51 \log_{10}(x)^2$ , Young modülünün logaritması ile Su emme arasındaki ilişkiyi açıklar.

Logaritmik terimlerin katsayılarının negatif olması, Young modülünün artmasıyla Su emmenin azalacağını gösterir. Logaritmik dönüşüm kullanıldığından, Young modülünün her bir birimlik artışı, Su emmesinde logaritmik ölçekte daha büyük bir azalışa yol açar.



Şekil 7.91. Su emme ile Pişme küçülmesi arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu

$$F(x) = \exp(7,70611 - 1,06093 x)$$

Burada,  $x$ =Pişme küçülmesi ve  $f(x)$ =Su emme değişkenleridir.

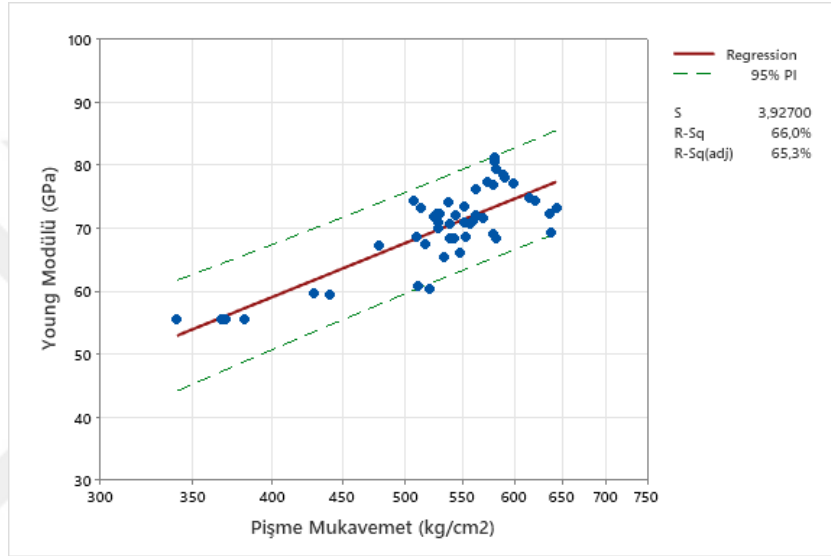
Modelin varyans analizi ile ilgili değerler Tablo 7.51 'de verilmiştir.

Tablo 7.51. Su emme-Young modülü denklemine ait varyans analizi

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	3,54109	1,77055	56,05	0,000
Error	55	1,73737	0,03159		
Total	57	5,27846			

Tablo 7.51 'deki varyans analizi sonuçlarına göre, regresyon modeli için F değeri 56,05 ve p değeri 0,000 olarak verilmiştir. Bu değerler, modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve mukavemet değişkeninin yoğunluk üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Bu formülde, üstel fonksiyon olan exp, pişme küçülmesi değerinin Su emme üzerindeki etkisini ifade eder. Sabit terim 7,70611 ise Pişme küçülmesinin artmasıyla Su emmenin artacağını gösterir. Ekspansiyel terimin katsayısı -1,06093, Pişme küçülmesinin Su emme üzerindeki etkisinin büyüklüğünü belirler. Bu katsayı negatif olduğu için, Pişme küçülmesinin artması Su emmenin azalmasına neden olur. Bu regresyon formülü, Pişme küçülmesi değerleri verildiğinde Su emmeyi tahmin etmek için kullanılabilir.



Şekil 7.92. Mukavemet ile Young modülü arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu

$$F(x) = -170,4 + 88,18 \log_{10}(x)$$

Burada, x=Mukavemet ve f(x)=Young modülü değişkenleridir.

Modelin varyans analizi ile ilgili değerler Tablo 7.52 'de verilmiştir.

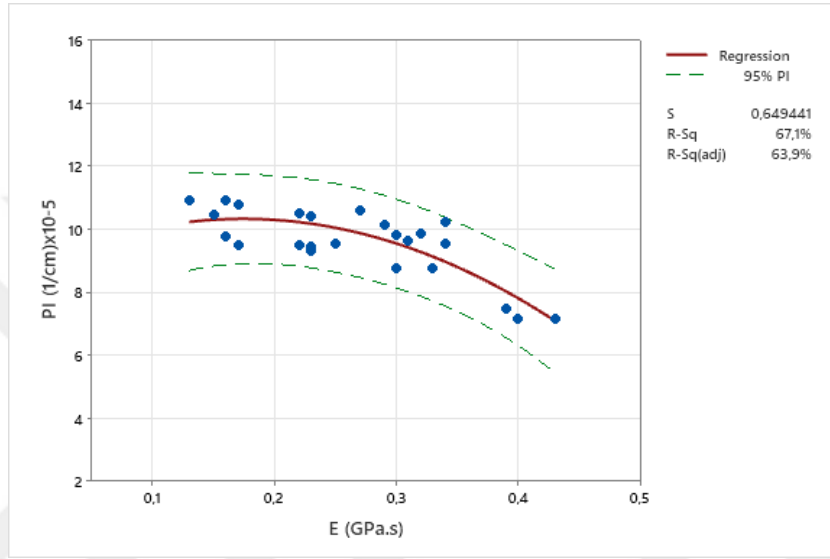
Tablo 7.52. Mukavemet-Young modülü denklemine ait varyans analizi

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	1377,90	1377,90	89,35	0,000
Error	46	709,38	15,42		
Total	47	2087,28			

Tablo 7.52 'deki varyans analizi sonuçlarına göre, regresyon modeli için F değeri 89,35 ve p değeri 0,000 olarak verilmiştir. Bu değerler, modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve mukavemet değişkeninin yoğunluk üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Bu formülde, sabit terim olan -170,4, Mukavemetin Young modülü üzerindeki baz etkiyi temsil eder. Pozitif bir değere sahip olan logaritmik katsayı 88,18 ise Mukavemetin logaritması ile Young modülü arasındaki ilişkiyi açıklar.

Logaritmik katsayının pozitif olması, Mukavemetin artmasıyla Young modülünün de artacağını gösterir. Logaritmik dönüşüm kullanıldığından, Mukavemetteki her bir birimlik artış, Young modülünde logaritmik ölçekte daha büyük bir artışa yol açar.



Şekil 7.93. Camlı faz viskozitesi (E) ile Pyroplastik deformasyon indeksi (PI) arasındaki ilişkiyi temsil eden regresyon analiz sonucu

$$F(x) = 8,815 + 17,17 x - 49,28 x^2$$

Burada,  $x=E$  ve  $f(x)=PI$  değişkenleridir.

Modelin varyans analizi ile ilgili değerler Tablo 7.53 'te verilmiştir.

Tablo 7.53. E-PI denklemine ait varyans analizi

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	18,0447	9,02235	21,39	0,000
Error	21	8,8572	0,42177		
Total	23	26,9019			

Tablo 7.53 'teki varyans analizi sonuçlarına göre, regresyon modeli için F değeri 21,39 ve p değeri 0,000 olarak verilmiştir. Bu değerler, modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve mukavemet değişkeninin yoğunluk üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Bu formülde, sabit terim olan 8,815, E'nin PI üzerindeki baz etkiyi temsil eder. 17,17 ve -49,28 ise E'nin ikinci dereceden bir etkisinin olduğunu gösteren katsayılarıdır.

Eğer katsayılar pozitif ise, E'nin artması PI'nin de artmasına yol açar. Ancak, ikinci dereceden terim negatif olduğundan, E'nin artması PI'nin başlangıçta artmasına ancak daha sonra azalmasına neden olabilir.

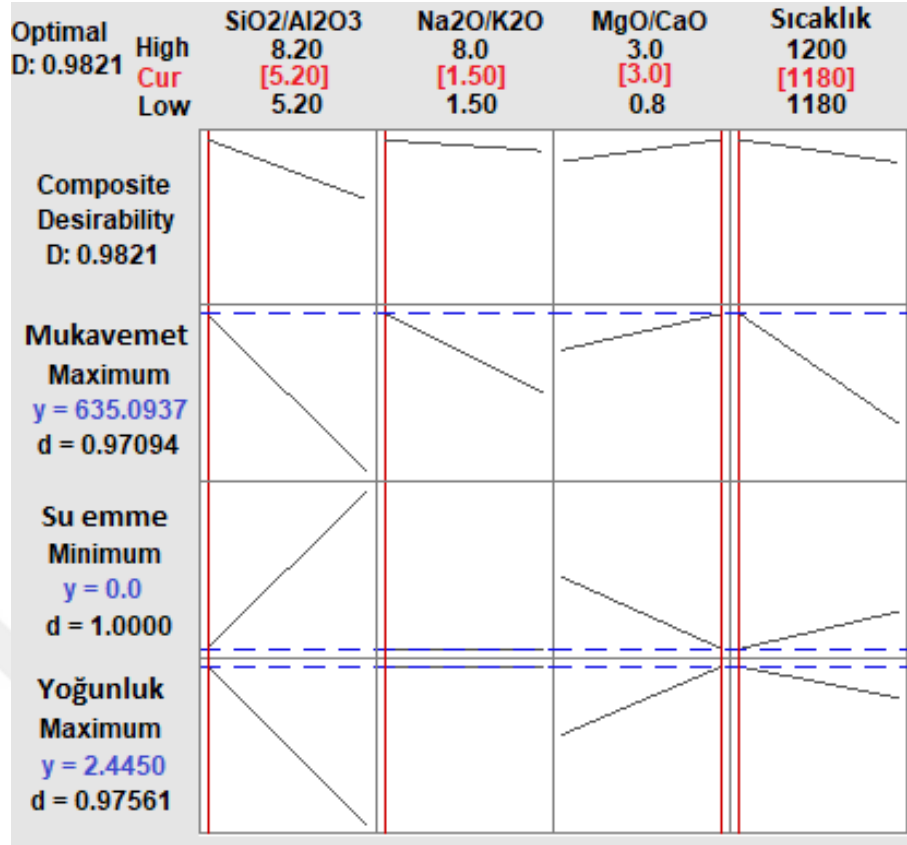
Bu regresyon formülü, belirli bir E değeri verildiğinde PI değerini tahmin etmek için kullanılabilir. Örneğin, belirli bir gerilme değeri verildiğinde, bu formül kullanılarak PI değerinin tahmin edilmesi mümkündür.

Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, Poisson oranı ve 500°C'deki ısıl genleşme katsayısı ile diğer özellikler arasında anlamlı bir ilişki saptanamamıştır. Bu durum, incelenen özellikler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişkinin olmadığını göstermektedir. Bu sonuçlar, Poisson oranı ve ısıl genleşme katsayısının diğer özellikler üzerinde doğrudan etkilerinin olmadığını veya bu etkilerin istatistiksel olarak belirlenemediğini işaret etmektedir.

#### **7.6. Optimize Yanıt**

Geliştirilen regresyon modelinden, belirli bir ürünün istenen özelliklerini elde etmek adına bağımsız faktörlerin veya kontrol edilen değişkenlerin optimal durumu belirlenebilir. Bu çalışmada, MINITAB 20'de yanıt iyileştirici fonksiyonunu (*reponse optimizer*) kullanılarak üç yanıt (yoğunluk, su emme ve pişme mukavemeti) özelliğinin optimum değerleri hedeflenmiştir. Hedefler, minimum sinterleme sıcaklığıyla birleştirilmiş maksimum mukavemet ve yoğunluk ve minimum su emme elde olarak ayarlanmıştır. Şekil 7.94, istenen yanıtlar için optimizasyon grafiğini göstermektedir.

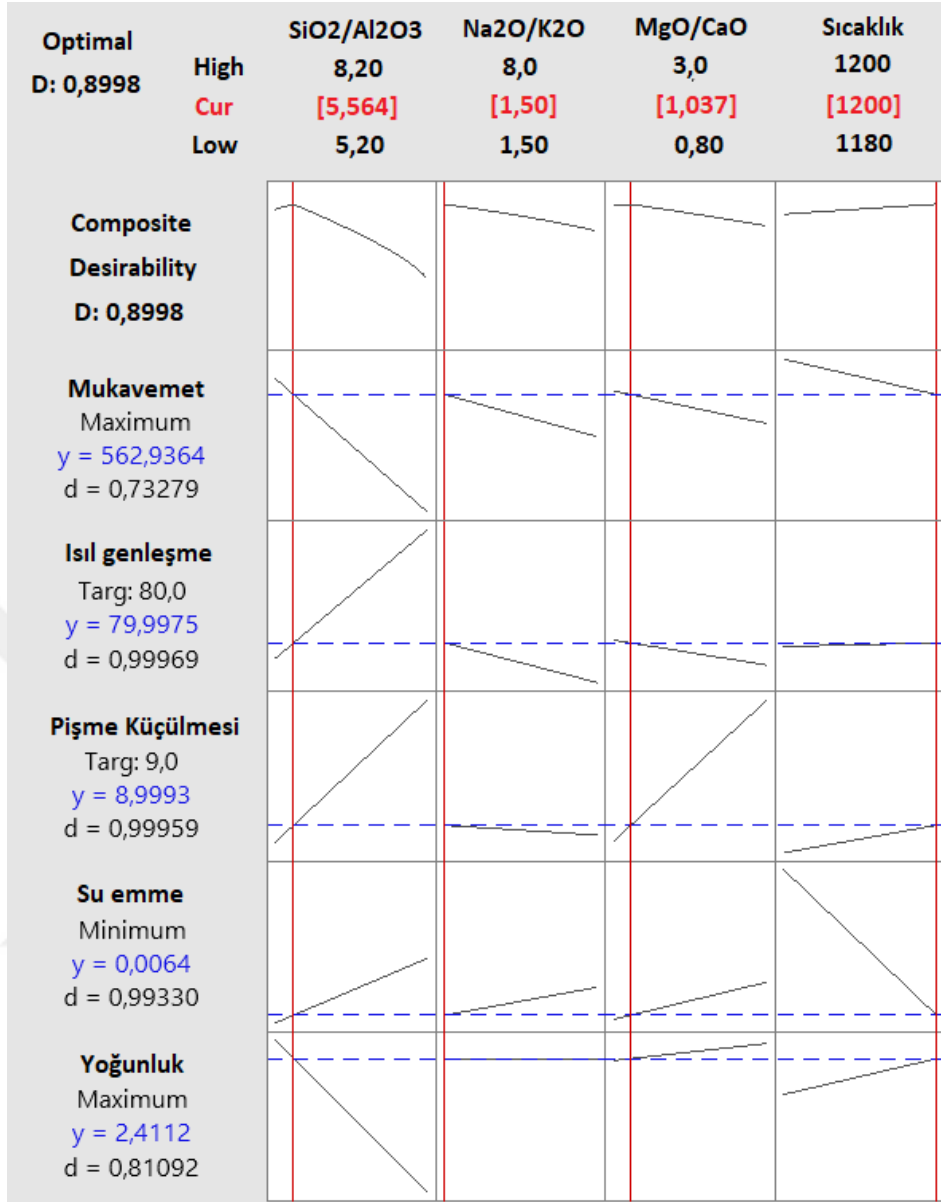
Optimize sonuçlarına göre, maksimum mukavemet, maksimum kütle yoğunluğu ve minimum su emmenin sırasıyla 635,09 kg/cm<sup>2</sup>, 2,445 g/cm<sup>3</sup> ve %0,0 olduğu tahmin edilmektedir. Bu arzu edilen yanıtlar, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 5,2, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O = 1,50, MgO/CaO = 3,0 ve 1180 °C'lik sinterleme sıcaklığında, 0,90'dan büyük bileşik istenirliği (D: composite desirability) ile elde edilir. Daha yüksek bileşik istenirlik (0,9'dan büyük ve 1,0'a yakın), istatistiksel analizin daha yüksek güvenilirliği ve doğruluğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle, optimizasyon grafiğinde önerilen optimal koşulun (D=0.9821 değeri ile) oldukça güvenilir olduğu beyan edilebilir.



Şekil 7.94. Porselen karoların seçilen yanıtlarında kontrol edilen değişkenlerin optimum durumu

Bir diğer optimize yanıt ise pişme küçülmesi ve ısıl genleşme katsayıları için hedef değer belirlenerek gerçekleştirilmiştir. Böylece optimize sonuç maksimum mukavemet ve yoğunluk ve minimum su emme ile beraber pişme küçülmesi %9 ve 500 °C deki ısıl genleşme katsayısı ise  $80 \times 10^{-7}$  için tasarlanmıştır. Bu tasarımın optimum grafiği Şekil 7.95 'te verilmiştir.

Optimize sonuçlarına göre, 500 °C deki ısıl genleşme katsayısını  $80 \times 10^{-7}$  ve pişme küçülmesi %9 değerlerini elde etmek için maksimum mukavemet, maksimum kütle yoğunluğu ve minimum su emmenin sırasıyla 562,9 kg/cm<sup>2</sup>, 2,411 g/cm<sup>3</sup> ve %0,006 olduğu tahmin edilmektedir. Bu arzu edilen yanıtlar, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 5,564, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O = 1,50, MgO/CaO = 1,037 ve 1200 °C'lik sinterleme sıcaklığında, D≈0,90 bileşik istenirliği ile elde edilir.



Şekil 7.95. Porselen karoların seçilen yanıtlarında kontrol edilen değişkenlerin target değerleri ile optimum durumu

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kullanılan deneysel yöntem, porselen karoların özellikleri üzerindeki çeşitli faktörlerin sistemli bir şekilde araştırılmasını sağlamak için deney tasarımı yaklaşımını kullanmıştır. Deney tasarımı yaklaşımı, bağımsız değişkenleri sistematik olarak değiştirerek ve buna bağlı olarak bağımlı değişkenleri ölçerek seramik üretim sürecinin optimize edilmesine ve geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Temel amaç, en büyük etkiye sahip faktörleri belirlemek ve bu faktörlerin optimal ayarlarını belirleyerek istenen sonuca ulaşmaktır. Deneysel tasarım,  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $Na_2O/K_2O$ ,  $MgO/CaO$  oranları ve pişirme sıcaklığı gibi dört ana faktörü dikkate alarak  $2^4$  tam faktöriyel tasarım yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Porselen malzemelerin kimyasal bileşimi ve buna bağlı olarak Seger değerleri elde edilmiş ve bu değerlere dayanarak oksit oranları aralıkları hesaplanmıştır. İstatistiksel hipotez analizi, tip I ve tip II hataları en aza indirmek için karar kurallarının uygulanmasını içermiştir. Ayrıca, belirli hammadde miktarlarının sınırlanması, oksit oranlarının dengesinin korunması ve parçacık boyutunun etkilerinin en aza indirilmesi için ek kriterler belirlenmiştir. Bu kriterlere dayanarak dokuz farklı formülasyon hazırlanmış ve bunların karşılık gelen Seger değerleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar tam faktöriyel tasarımı kullanılarak analiz edilmiş ve bağımsız değişkenlerin yanıtlar üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. İstatistiksel modelin uygunluğu, artıkların varsayımlarının doğrulanmasıyla kontrol edilmiştir. Sonuçlar, faktörler ile porselen karoların özellikleri arasındaki ilişkileri ortaya koymuş ve istenen özelliklere ulaşmak için optimal ayarları belirleme imkanı sağlamıştır. Bu çalışmada kullanılan deneysel yöntem, porselen karoların özelliklerini etkileyen faktörlerin sistemli bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen sonuçlar, üretim sürecinin optimize edilmesi ve seramiklerin kalitesinin iyileştirilmesi için değerli bilgiler sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu bulgulara dayanarak seramik üretim sürecinin anlayışını ve kontrolünü daha da geliştirmek için kullanılabilir. Bu istatistiksel yaklaşıma dayalı olarak birkaç sonuca ulaşılmıştır:

- Seramik karosu formülasyonunda Seger oranlarının kullanılması geçerliliğini göstermektedir. İstatistiksel analiz, Seger oranlarının porselen karolarında belirli pişirme sıcaklıklarında yoğunluk, su emme, pişme küçülmesi, termal genleşme katsayısı ve nihai mukavemet gibi önemli özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu da seramik karosu üretiminde istenen sonuçları elde

etmek için Seger oranlarının formülasyon sürecinde dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

- Varyans analizi (ANOVA), normal ve Pareto grafiği, tahmin edilen yanıtlar üzerinde en büyük etkiye sahip faktörleri belirlemek için kullanılmıştır.  $SiO_2/Al_2O_3$  faktörü ve  $C MgO/CaO$  faktörünün incelenen özellikler üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu açıktır. Özellikle,  $SiO_2/Al_2O_3$  yoğunluk, termal genleşme katsayısı, Young modülü ve porselen karolarının mukavemeti üzerinde en büyük etkiye sahip faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum, regresyon denklemi, pasta ve pareto grafikleri ile de belirtilmektedir. Öte yandan, su emme, Pyroplastik indeksi, camsı faz viskozitesi ve pişme küçülmesi için en etkili değişken  $MgO/CAO$ 'dur.
- Pişirme sıcaklığının porselen karoların nihai özellikleri üzerindeki etkisiyle ilgili istatistiksel analiz sonuçları bağımsız olarak değerlendirildiğinde nihai özellikler üzerinde tek başına çok önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu durumda, sadece pişirme sıcaklığını değiştirmek, herhangi bir özelliği geliştirmek veya herhangi bir sorunu çözmek için bir çözüm sunmayacağı anlamına gelmektedir.
- Porselen karoların optimize edilmiş fiziksel özellikleri (maksimum mukavemet, maksimum yoğunluk ve minimum su emme),  $SiO_2/Al_2O_3 = 5,2$ ,  $Na_2O/K_2O = 1,50$ ,  $MgO/CaO = 3,0$  ve  $1180\text{ }^\circ\text{C}$  pişirme sıcaklığıyla ( $D= 0,9821$ ) elde edilmiştir.

Genel olarak, Seger oranlarına ve sıcaklığa dayalı regresyon modelleri yüksek iyi uyum ölçüleri göstermekte ve güçlü tahmin yeteneklerini göstermektedir. Araştırmacılar, verilen tahmin değişkenlerden yola çıkarak yanıtları doğru bir şekilde tahmin etmek ve istenen malzeme özelliklerine ulaşmak için bu modelleri kullanabilirler.

Üretimde önerilen modellerin ekonomik yönleri, maliyet optimizasyonu, kaynak tahsisi, üretim verimliliği ve genel karlılık açısından önemli etkileri olabilir. Üreticiler, bu modelleri kullanarak daha yüksek üretkenlik, optimize ürünler ve pazar yerinde rekabet avantajı elde edebilirler.

## KAYNAKÇA

- [1] Carbajal, L., Rubio-Marcos, F., Bengochea, M.A. and Fernandez, J.F. (2007). Properties related phase evolution in porcelain ceramics. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 27 (13–15), 4065–4069.
- [2] Sánchez, E., García-Ten, J., Sanz, V. and Moreno, A. (2010). Porcelain tile: Almost 30 years of steady scientific-technological evolution. *Ceram. Int.*, 36 (3), 831–845.
- [3] **De Noni, A., Hotza, D., Soler, V.C. and Vilches, E.S. (2010). Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part I: Microstructural characterization and developed phases after firing. *Mater. Sci. Eng. A*, 527 (7–8), 1730–1735.**
- [4] Berto, A.M. (2006). Ceramic tiles: Above and beyond traditional applications. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 27 (2), 1607–1613.
- [5] Barba, A. (2005). From Chemical Engineering to Ceramic Technology : A Review of Research at the Instituto de Tecnología Cerámica. *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, 44, 155–168.
- [6] Nascimento de Souza, B., Dal Bó, M., Hotza, D. and Fredel, M.C. (2022). Chemical modification of porcelain tile surface to optimize flexural strength and Weibull modulus through the ion exchange process. *J. Build. Eng.*, 56, 104735.
- [7] Carty W.M. and Senapati, U. (1998). Porcelain - Raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior. *J. Am. Ceram. Soc.*, 81 (1), 3–20.
- [8] Gültekin, E.E., Topateş, G. and Kurama, S. (2017). The effects of sintering temperature on phase and pore evolution in porcelain tiles. *Ceram. Int.*, 43 (14), 11511–11515.
- [9] Frizzo, R.G., Zaccaron, A., de Souza Nandi, V. and Bernardin, A. M. (2020). Pyroplasticity on porcelain tiles of the albite-potassium feldspar-kaolin system: A mixture design analysis. *J. Build. Eng.*, 31, 101432.
- [10] Sánchez, E., Sanz, V., Castellano, J., Sales, J., Kayacı, K., Taşkıran, M.U., Anıl, Ü.E., Türk, Ş.(2019). Residual stresses in porcelain tiles. Measurement and process variables assessment. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 39 (11), 3364–3372.
- [11] Bia, V., Do, M., Ra, M., Melandri, C. and G, S. (2002). Role of Microstructure in Mechanical Properties of Porcelain Stoneware Tiles. *Qualicer 2002: VII Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico*, Castellon, Spain.
- [12] Contartesi, F., Melchiades, F.G. and Boschi, A.O. (2019). Anticipated Overfiring in Porcelain Tiles: Effects of the firing cycle and green bulk density. *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, 58 (2), 69–76.
- [13] Tamsu Selli, N. (2020). Relationship between microstructure and the impact resistance of porcelain stoneware tiles. *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, 1–10.
- [14] De Noni, A., Hotza, D., Soler, V.C. and Vilches, E.S. (2010). Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part II: Mechanical properties and microscopic residual stress. *Mater. Sci. Eng. A*, 527 (7–8), 1736–

1743.

- [15] De Noni, A., Hotza, D., Soler, V.C. and Vilches, E.S. (2011). Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part III: Effect of the cooling rate of the firing cycle. *Mater. Sci. Eng. A*, 528 (9), 3330–3336.
- [16] De Noni, A., Hotza, D., Soler, V.C. and Vilches, E.S. (2009). Effect of quartz particle size on the mechanical behaviour of porcelain tile subjected to different cooling rates. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 29 (6), 1039–1046.
- [17] Dondi, M., Ercolani, G., Melandri, C., Mingazzini, C. and Marsigli, M. (1999). Chemical composition of porcelain stoneware tiles and its influence on microstructural and mechanical properties. *InterCeram Int. Ceram. Rev.*, 48 (2), 2016–2019.
- [18] Martín-Márquez, J., Rincón, J. M. and Romero, M. (2010). Effect of microstructure on mechanical properties of porcelain stoneware. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 30 (15), 3063–3069.
- [19] Jazayeri S.H. and Salem, A. (2007). A kinetic study on the development of porosity in porcelain stoneware tile sintering. *Bull. Ceram. y Vidr.*, 46 (1), 1–6.
- [20] Kaljuvee, T., Stubna, I., Hulan, T., Uiban, M., Einard, M., Traksmaa, R., Viljus, M., Jefimova, J., Trikkel, A. (2022). Thermal Behavior of Ceramic Bodies Based on Estonian Clay from the Arumetsa Deposit with Oil Shale Ash and Clinker Dust Additives. *Processes*, 10 (1), 46.
- [21] Cargnin, M., Guelli, S.M.A., Souza, U., Ulson de Souza, A.A. and de Noni JR., A. (2014). Modeling and simulation of the effect of the firing curve on the linear shrinkage of ceramic materials: Part 1 – Laboratory scale. *Brazilian J. Chem. Eng.*, 32 (2), 433–443.
- [22] Cantore, G., Milani, M., Montorsi, L. and Paltrinieri, F. (2018). Energy efficiency analysis of an entire ceramic kiln : A numerical approach. *MMC\_B*, 87 (3), 159–166.
- [23] Sánchez, E., Sanz, V., Castellano, J., Sales, J., Kayacı, K., Taşkıran, M.U., Anıl, Ü.E., Türk, Ş. (2019). Residual stresses in porcelain tiles. Measurement and process variables assessment. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 39 (11), 3364–3372.
- [24] Santos-Barbosa, D., Hotza, D., Boix, J. and Mallol, G. (2013). Modelling the Influence of Manufacturing Process Variables on Dimensional Changes of Porcelain Tiles. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2013 (1), 1–12.
- [25] Jiang, H., Jiang, F., Hu, D., Wang, R., Lu, J. and Li, B. (2019). Numerical modeling of compressive failure mechanisms in ceramic materials at high strain rates. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 347, 806–826.
- [26] Sánchez, E., Sanz, V., Castellano, J., Sales, J., Kayacı, K., Taşkıran, M.U., Anıl, Ü.E., Türk, Ş. (2019). Revisiting pyroplastic deformation. Application for porcelain stoneware tile bodies. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 39 (2–3), 601–609.
- [27] Milani, M., Montorsi, L., Venturelli, M., Tiscar, J.M. and García-Ten, J. (2019). A numerical approach for the combined analysis of the dynamic thermal behaviour

- of an entire ceramic roller kiln and the stress formation in the tiles. *Energy*, 177, 543–553.
- [28] Fragassa, C. (2016). Modelling the viscoelastic response of ceramic materials by commercial finite elements codes. *FME Trans.*, 44 (1), 58–64.
- [29] Sarbandi, B. (2014). Finite element simulation of ceramic deformation during sintering. *Paris Inst. Technol.*, 109.
- [30] Ter Teo, P., Zakaria, S. K., Mohd Sharif, N., Abu Seman, A., Taib, M. A. A., Mohamed, J. J., Yusoff, M., Yusoff, A. H., Mohamad, M., Ali, A., Masri, M. N. (2012). Application of General Full Factorial Statistical Experimental Design's Approach for the Development of Sustainable Clay-Based Ceramics Incorporated with Malaysia's Electric Arc Furnace Steel Slag Waste. *Crystals*, 11 (4), 442.
- [31] Lin, B., Liu, F., Zhang, X., Liu, L., and Zhu, X. (2011). Simulation Technology in the Sintering Process of Ceramics. *InTech*. doi: 10.5772/13082.
- [32] De Andrade R.M. and Eduardo, A.C. (2011). Methodology for automatic process of the fired ceramic tile's internal defect using IR images and artificial neural network. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 33 (1), 67–73.
- [33] Vieira, J., Dias, F.M. and Mota, A. (2004). Artificial neural networks and neuro-fuzzy systems for modelling and controlling real systems: A comparative study. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 17 (3), 265–273.
- [34] Kumru, M. (2011). Neural networks and search for minimum defectiveness in molding operation in ceramic industry. *INISTA 2011 - 2011 Int. Symp. Innov. Intell. Syst. Appl.*, 335–339.
- [35] Mohammed, T.H. (2018). Application of artificial neural network for defect prediction in ceramic tiles manufacturing. *Proc. 136th IRES Int. Conf.*, 51–54.
- [36] Elevado, K.J.T., Galupino, J.G. and Gallardo, R.S. (2018). Artificial Neural Network (ANN) modelling of concrete mixed with waste ceramic tiles and fly ash. *Int. J. GEOMATE*, 15 (51), 154–159.
- [37] Tarhan, M. (2010). *Porselen karo bünyelerinde sinterleme hızı-kompozisyon ilişkileri*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [38] Çelebi, A. (2015). *Deney tasarımı yöntemi kullanılarak oksit oranlarının yer karosu özelliklerine etkisinin incelenmesi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [39] Vari, A. (2000). Raw material preparation and forming of ceramic tiles. S.A.L.A., Modena, Italy
- [40] Biffi, G. (1999). *Porcelain stoneware - production manual and methods of use*. Gruppo Editoriale Faenza Editrice S.p.A., Faenza.
- [41] Reed, J. S. (1995). *Principles of Ceramics Processing*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [42] Rambaldi, E., Carty, W.M., Tucci, A. and Esposito, L. (2007). Using waste glass

as a partial flux substitution and pyroplastic deformation of a porcelain stoneware tile body. *Ceram. Int.*, 33 (5), 727- 733.

- [43] Yıldız, B., (2010). *Diopsit Esaslı Duvar Karosu Sır ve Angoplarının Geliştirilmesi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [44] Mysen, B.O. and Richet, P. (2005). Silicate Glasses and Melts: Properties and Structure, *Elsevier B. V.*, Amsterdam, Netherland, 69-100.
- [45] Sarı, H. (2012). *Seramik Sağlık Gereçlerinde Pişirim Sıcaklık Ve Sürelerinin Azaltılması*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [46] Taylor, J.R. and Bull, A.C. (1986). *Ceramic Glaze Technology*. Institute of Ceramics & Pergamon Press, Oxford, U.K.
- [47] Richet, P., Roskosz, M. and Roux, J. (2006). Glass formation in silicates: Insights From composition, *Chemical Geology*, 225, 388-401.
- [48] Toplis, M.J., Dingwell, D.B., Hess, K.U. and Lenci, T. (1997). Viscosity, fragility, and configuration entropy of melts along the join SiO<sub>2</sub>-NaAlO<sub>2</sub>, *Amer. Mineral.*, 82, 979–990.
- [49] Shelby, J.E. (1997). *Structures of glasses. Introduction to Glass Science and Technology* (Ed: House, T.G.), The Royal Society of Chemistry, NorthYorkshire, U.K, 69–89.
- [50] Shen, J. and Gren, D.J. (2004). Effect of K/Na Ratio in mixed alkali lime silicate glasses on the rheological and physical properties. *J. Non-Cryst.*, 344, 66–72.
- [51] Fluegel, A. (2007). Glass viscosity calculation based on a global statistical modeling approach, *Eur. J. Glass Sci. Technol. A.*, 48, 13–30.
- [52] Aras, A. ve Demirhan, H. (2007). Handit, talk, hidromanyezit, sepiyolitli dolomitin seramik bünyelerde davranışı, Türkiye Jeoloji Kurultayı.
- [53] Mukhopadhyay, T.K., Ghosh, S., Ghatak, S. and Maiti, H.S. (2006). Effect of pyrophyllite on vitrification and on physical properties of triaxial porcelain. *Ceram. Int.*, 32, 871–876.
- [54] Dondi, M., Biasini, V., Guarini, G., Raimondo, M., Argnani, A. and Di Primio, S. (2002). The influence of magnesium silicates on technological behavior of porcelain stoneware tiles. *Key Engineering Materials* Vols. 206-213, 1795–1798.
- [55] Gualtieri A. (1995). Kinetic study of the kaolinite-mullite reaction sequence. Part II: mullite formation. *Phys. Chem. Minerals*, 22, 215–222.
- [56] Barsoum, W.M. (1996). *Fundamentals of ceramics*. McGraw hill, New york, U.S.A.
- [57] Somiya, S. and Moriyoshi, Y. (1990). Sintering key papers. *Elsevier Applied Science*, London, U.K.
- [58] Mackenzie J.K. and Shuttleworth R. (1949). A Phenomenological Theory of Sintering. *Proc. Phys. Soc.*, b62, 833–852, London.

- [59] Montorsi, M., Mugoni, C., Passalacqua, A., Annovi, A., Marani, F., Fossa, L., Capitani, R., & Manfredini, T. (2016). Improvement of color quality and reduction of defects in the ink jet-printing technology for ceramic tiles production: A Design of Experiments study. *Ceram. Int.*, 42 (1B), 1459–1469.
- [60] Correia, S.L., Curto, K.A.S., Hotza, D. and Segadães, A.M. (2004). Using statistical techniques to model the flexural strength of dried triaxial ceramic bodies. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 24 (9), 2813–2818.
- [61] Ngun, B.K., Mohamad, H., Katsumata, K., Okada, K. and Ahmad, Z.A. (2014). Using design of mixture experiments to optimize triaxial ceramic tile compositions incorporating Cambodian clays. *Appl. Clay Sci.*, 87, 97–107.
- [62] Menezes, R.R. et al. (2008). Optimization of wastes content in ceramic tiles using statistical design of mixture experiments. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 28 (16), 3027–3039.
- [63] Erginel, N., Dogan, B. and Ay, N. (2004). The Statistical Analysis of Coloring Problems Faced in Ceramic Floor Tile Industry. *Key Eng. Mater.*, 264–268, 1693–1696.
- [64] Ibáñez-Forés, V., Bovea, M.D. and Simó, A. (2011). Life cycle assessment of ceramic tiles. Environmental and statistical analysis. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 16 (9), 916–928.
- [67] Montgomery, D.C. (2001). *Design and Analysis of Experiments*. 5th Edition, New York, USA: John Wiley & Sons.
- [68] Hicks, C.R. (1994). *Deney Düzenlemede İstatistiksel Yöntemler*. (Çevirenler: Muluk, Z., Kurt, S., Toktamış, Ö. Ve Karaağaoğlu, E.) Bornova-İzmir: Ege Üniversitesi Basımevi.
- [69] Çömlekçi, N. (1978). *Deney Planlamasına Giriş*. Eskişehir İktisadi ve Ticari İlimler Akademisi Yayını, Eskişehir.
- [70] Becker, C.R., Mixture, S.T. and Carty, W.M. (2004). The Role of Flux Choice in Triaxial Whiteware Bodies. *Jour. Euro. Ceram. Soc.*, 24, 2389–2397.
- [71] Chatterjee, A., Chitwadgi, S., Kulkarni, M. and Kaviraj, A.K. (2001). Effect of sodium and potassium feldspar ratio on the phase development and microstructure of fired porcelain tiles. *Tile&Brick International*, 17, 104–107.
- [72] Çiğdemir, G., Kara, A. ve Kara, F. (2005). Porselen karo bünyelerinin kompozisyon-sinterleme davranışı ilişkilerin incelenmesi. *SERES III. Uluslararası Katılımlı Seramik, Cam, Emaye Sır ve Boya Semineri*, 570–581.
- [73] Dağ, P. (2009). *Sağlık gereçlerinde kompozisyon değişimlerinin sinterleme üzerine etkileri*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [74] Das, S.K. and Dana, K. (2003). Differences in densification behavior of K- and Na-feldspar-containing porcelain bodies. *Thermochimica Acta*, 406, 199–206.
- [75] Scharrer, J.F., and Geol, J. (1950). Applied Ceramic Technology. *Sacmi*, Volume I-II58, 5, 514.

- [76] Lerdprom, W. (2014). *Firing of porcelain*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. New York: Alfred Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [77] Ozturk, Z.B. and Ay, N. (2012). An investigation of the effect of alkaline oxides on porcelain tiles using factorial design. *J. Ceram. Process. Res.*, 13 (5), 635–640.
- [78] Lutterotti, L. and Scardi P. (1990). Simultaneous structure and size-strain refinement by the Rietveld method. *J. Appl. Crystallogr.*, 23, 246–52.
- [79] Földvári, M. (2011). *Handbook of Thermogravimetric System of Minerals and Its Use in Geological Practice*. Geological Institute of Hungary, Budapest.



## EKLER

**EK 1.** Tam faktörlü deney tasarım tablosu

Std. Sıra	Bel. Sıra	Bloklar	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	MgO/CaO	Sıcaklık (°C)
1	30	1	5,2	1,5	0,8	1180
2	12	1	8,2	1,5	0,8	1180
3	13	1	5,2	8,0	0,8	1180
4	8	1	8,2	8,0	0,8	1180
5	24	1	5,2	1,5	3,0	1180
6	21	1	8,2	1,5	3,0	1180
7	22	1	5,2	8,0	3,0	1180
8	17	1	8,2	8,0	3,0	1180
9	3	1	5,2	1,5	0,8	1200
10	2	1	8,2	1,5	0,8	1200
11	14	1	5,2	8,0	0,8	1200
12	25	1	8,2	8,0	0,8	1200
13	16	1	5,2	1,5	3,0	1200
14	7	1	8,2	1,5	3,0	1200
15	15	1	5,2	8,0	3,0	1200
16	9	1	8,2	8,0	3,0	1200
17	1	1	5,2	1,5	0,8	1180
18	27	1	8,2	1,5	0,8	1180
19	5	1	5,2	8,0	0,8	1180
20	29	1	8,2	8,0	0,8	1180
21	26	1	5,2	1,5	3,0	1180
22	19	1	8,2	1,5	3,0	1180
23	20	1	5,2	8,0	3,0	1180
24	11	1	8,2	8,0	3,0	1180
25	18	1	5,2	1,5	0,8	1200
26	32	1	8,2	1,5	0,8	1200
27	28	1	5,2	8,0	0,8	1200
28	23	1	8,2	8,0	0,8	1200
29	10	1	5,2	1,5	3,0	1200
30	6	1	8,2	1,5	3,0	1200
31	31	1	5,2	8,0	3,0	1200
32	4	1	8,2	8,0	3,0	1200

## EK 2. Anlamlı etkileri içeren son ANOVA tabloları.

**EK 2.1.** Yoğunluk özelliğinde kullanılan kademeli deney tasarım analizinin ANOVA tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	0,119512	0,011951	427,19	0,000
Linear	3	0,099362	0,033121	1183,89	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0,080000	0,080000	2859,57	0,000
MgO/CaO	1	0,015312	0,015312	547,34	0,000
Sıcaklık	1	0,004050	0,004050	144,77	0,000
2-Way Interactions	5	0,017237	0,003447	123,23	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,000200	0,000200	7,15	0,014
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	0,003612	0,003612	129,13	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	1	0,005000	0,005000	178,72	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,000613	0,000613	21,89	0,000
MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,007812	0,007812	279,26	0,000
3-Way Interactions	2	0,002913	0,001456	52,05	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	0,000800	0,000800	28,60	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,002113	0,002113	75,51	0,000
Error	21	0,000587	0,000028		
Lack-of-Fit	5	0,000187	0,000037	1,50	0,245
Pure Error	16	0,000400	0,000025		
Total	31	0,120100			

**EK 2.2.** Su emme özelliğinde kullanılan kademeli deney tasarım analizinin ANOVA tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	3,35897	0,335897	198,07	0,000
Linear	4	2,35392	0,588481	347,02	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0,66125	0,661250	389,93	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,05611	0,056113	33,09	0,000
MgO/CaO	1	0,90451	0,904512	533,37	0,000
Sıcaklık	1	0,73205	0,732050	431,68	0,000
2-Way Interactions	4	0,81112	0,202781	119,58	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	0,23805	0,238050	140,37	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	1	0,15401	0,154013	90,82	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,13781	0,137812	81,27	0,000
MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,28125	0,281250	165,85	0,000
3-Way Interactions	1	0,13781	0,137813	81,27	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	0,13781	0,137813	81,27	0,000
4-Way Interactions	1	0,05611	0,056113	33,09	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,05611	0,056113	33,09	0,000
Error	21	0,03561	0,001696		
Lack-of-Fit	5	0,02261	0,004522	5,57	0,004
Pure Error	16	0,01300	0,000812		
Total	31	3,39459			

**EK 2.3.** Pişme mukavemeti özelliğinde kullanılan kademeli deney tasarım analizinin ANOVA tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	215167	21516,7	134,65	0,000
Linear	3	78259	26086,2	163,25	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	69546	69545,9	435,22	0,000
MgO/CaO	1	5767	5767,4	36,09	0,000
Sıcaklık	1	2945	2945,3	18,43	0,000
2-Way Interactions	4	106676	26668,9	166,90	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	13995	13994,6	87,58	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	33037	33037,4	206,75	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	1	32207	32207,2	201,55	0,000
MgO/CaO*Sıcaklık	1	27437	27436,5	171,70	0,000
3-Way Interactions	3	30233	10077,5	63,07	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	13547	13546,6	84,78	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	5719	5719,2	35,79	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO*Sıcaklık	1	10967	10966,8	68,63	0,000
Error	21	3356	159,8		
Lack-of-Fit	5	1035	206,9	1,43	0,268
Pure Error	16	2321	145,1		
Total	31	218522			

**EK 2.4.** Poisson oranının özelliğinde kullanılan kademeli deney tasarım analizinin ANOVA tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	0,059690	0,009948	10,97	0,000
Linear	1	0,013633	0,013633	15,03	0,001
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,013633	0,013633	15,03	0,001
2-Way Interactions	5	0,046057	0,009211	10,16	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,005320	0,005320	5,87	0,023
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	0,006275	0,006275	6,92	0,014
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	1	0,014505	0,014505	16,00	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	0,014904	0,014904	16,44	0,000
MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,005053	0,005053	5,57	0,026
Error	25	0,022670	0,000907		
Lack-of-Fit	9	0,011285	0,001254	1,76	0,155
Pure Error	16	0,011384	0,000712		
Total	31	0,082360			

**EK 2.5.** *Young modülü özelliğinde kullanılan kademeli deney tasarım analizinin ANOVA tablosu*

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	1995,93	249,491	43,43	0,000
Linear	3	1623,51	541,169	94,20	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	818,71	818,708	142,51	0,000
MgO/CaO	1	724,09	724,092	126,04	0,000
Sıcaklık	1	80,71	80,709	14,05	0,001
2-Way Interactions	3	229,60	76,533	13,32	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	99,62	99,617	17,34	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	66,70	66,701	11,61	0,002
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	1	63,28	63,281	11,02	0,003
3-Way Interactions	2	142,82	71,410	12,43	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO*Sıcaklık	1	92,82	92,820	16,16	0,001
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	50,00	50,000	8,70	0,007
Error	23	132,13	5,745		
Lack-of-Fit	7	71,98	10,282	2,73	0,045
Pure Error	16	60,16	3,760		
Total	31	2128,06			

**EK 2.6.** *Pişme küçülmesi özelliğinde kullanılan kademeli deney tasarım analizinin ANOVA tablosu*

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	31,8086	2,8917	352,54	0,000
Linear	4	18,1106	4,5276	551,98	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0,3081	0,3081	37,56	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,1596	0,1596	19,46	0,000
MgO/CaO	1	16,1028	16,1028	1963,16	0,000
Sıcaklık	1	1,5400	1,5400	187,75	0,000
2-Way Interactions	5	11,8375	2,3675	288,63	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,4851	0,4851	59,14	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	2,3220	2,3220	283,09	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	1	4,0755	4,0755	496,86	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,1653	0,1653	20,15	0,000
MgO/CaO*Sıcaklık	1	4,7895	4,7895	583,91	0,000
3-Way Interactions	2	1,8606	0,9303	113,42	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO*Sıcaklık	1	1,6836	1,6836	205,26	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO*Sıcaklık	1	0,1770	0,1770	21,58	0,000
Error	20	0,1641	0,0082		
Pure Error	16	0,0000	0,0000		
Total	31	31,9727			

**EK 2.7.** 500°C'deki ısı genleşme katsayısında kullanılan kademeli deney tasarım analizinin ANOVA tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	2000,20	400,04	465,29	0,000
Linear	2	1942,70	971,35	1129,78	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	1773,71	1773,71	2063,00	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	168,99	168,99	196,55	0,000
2-Way Interactions	3	57,50	19,17	22,29	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	12,18	12,18	14,16	0,001
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	1	16,34	16,34	19,01	0,000
MgO/CaO*Sıcaklık	1	28,98	28,98	33,71	0,000
Error	26	22,35	0,86		
Lack-of-Fit	10	21,92	2,19	80,29	0,000
Pure Error	16	0,44	0,03		
Total	31	2022,56			

**EK 2.8.** Pyroplastik indeksinde kullanılan kademeli deney tasarım analizinin ANOVA tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	24,6528	4,1088	182,03	0,000
Linear	2	0,9120	0,4560	20,20	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0,1980	0,1980	8,77	0,016
MgO/CaO	1	0,7140	0,7140	31,63	0,000
2-Way Interactions	3	10,4182	3,4727	153,85	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	5,1076	5,1076	226,28	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	4,3890	4,3890	194,44	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,9216	0,9216	40,83	0,000
3-Way Interactions	1	13,3225	13,3225	590,22	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	13,3225	13,3225	590,22	0,000
Error	9	0,2032	0,0226		
Lack-of-Fit	1	0,0576	0,0576	3,17	0,113
Pure Error	8	0,1455	0,0182		
Total	15	24,8559			

**EK 2.9.** Camsı faz viskozitesinde kullanılan kademeli deney tasarım analizinin ANOVA tablosu

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	1
Model	7	0,103875	0,014839	62,48	0,000
Linear	3	0,059525	0,019842	83,54	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0,003025	0,003025	12,74	0,007
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,003600	0,003600	15,16	0,005
MgO/CaO	1	0,052900	0,052900	222,74	0,000
2-Way Interactions	3	0,031125	0,010375	43,68	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1	0,012100	0,012100	50,95	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	1	0,010000	0,010000	42,11	0,000
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,009025	0,009025	38,00	0,000
3-Way Interactions	1	0,013225	0,013225	55,68	0,000
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	1	0,013225	0,013225	55,68	0,000
Error	8	0,001900	0,000238		
Total	15	0,105775			

### EK 3. Regresyon eşitliklerinin t-değer tablosu.

**EK 3. 1.** Yoğunluk özelliği için regresyon katsayılarını oluşturan t-değer tablosu

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		2,37500	0,00094	2540,06	0,000	
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,100000	-0,050000	0,000935	-53,47	0,000	1,00
MgO/CaO	0,043750	0,021875	0,000935	23,40	0,000	1,00
Sıcaklık	0,022500	0,011250	0,000935	12,03	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	0,005000	0,002500	0,000935	2,67	0,014	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	0,021250	0,010625	0,000935	11,36	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	0,025000	0,012500	0,000935	13,37	0,000	1,00
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	0,008750	0,004375	0,000935	4,68	0,000	1,00
MgO/CaO*Sıcaklık	-0,031250	-0,015625	0,000935	-16,71	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	-0,010000	-0,005000	0,000935	-5,35	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO*Sıcaklık	-0,016250	-0,008125	0,000935	-8,69	0,000	1,00

**EK 3. 2.** Su emme özelliği için regresyon katsayılarını oluşturan t-değer tablosu

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,22563	0,00728	30,99	0,000	
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,28750	0,14375	0,00728	19,75	0,000	1,00
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	0,08375	0,04188	0,00728	5,75	0,000	1,00
MgO/CaO	-0,33625	-0,16812	0,00728	-23,09	0,000	1,00
Sıcaklık	-0,30250	-0,15125	0,00728	-20,78	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	-0,17250	-0,08625	0,00728	-11,85	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	-0,13875	-0,06937	0,00728	-9,53	0,000	1,00
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	-0,13125	-0,06562	0,00728	-9,01	0,000	1,00
MgO/CaO*Sıcaklık	0,18750	0,09375	0,00728	12,88	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	0,13125	0,06563	0,00728	9,01	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO*Sıcaklık	-0,08375	-0,04188	0,00728	-5,75	0,000	1,00

**EK 3. 3.** Pişme mukavemeti özelliği için regresyon katsayılarını oluşturan t-değer tablosu

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		526,97	2,23	235,82	0,000	
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-93,24	-46,62	2,23	-20,86	0,000	1,00
MgO/CaO	26,85	13,43	2,23	6,01	0,000	1,00
Sıcaklık	-19,19	-9,59	2,23	-4,29	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	41,82	20,91	2,23	9,36	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO	64,26	32,13	2,23	14,38	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Sıcaklık	63,45	31,72	2,23	14,20	0,000	1,00
MgO/CaO*Sıcaklık	-58,56	-29,28	2,23	-13,10	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*MgO/CaO	41,15	20,58	2,23	9,21	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O*Sıcaklık	26,74	13,37	2,23	5,98	0,000	1,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *MgO/CaO*Sıcaklık	-37,03	-18,51	2,23	-8,28	0,000	1,00

**EK 3. 4.** Poisson oranı için regresyon katsayılarını oluşturan t-değer tablosu

<b>Term</b>	<b>Effect</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T-Value</b>	<b>P-Value</b>	<b>VIF</b>
Constant		0,19501	0,00532	36,63	0,000	
Na2O/K2O	0,04128	0,02064	0,00532	3,88	0,001	1,00
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O	0,02579	0,01289	0,00532	2,42	0,023	1,00
SiO2/Al2O3*MgO/CaO	0,02801	0,01400	0,00532	2,63	0,014	1,00
SiO2/Al2O3*Sıcaklık	-0,04258	-0,02129	0,00532	-4,00	0,000	1,00
Na2O/K2O*Sıcaklık	-0,04316	-0,02158	0,00532	-4,05	0,000	1,00
MgO/CaO*Sıcaklık	0,02513	0,01257	0,00532	2,36	0,026	1,00

**EK 3. 5.** Young modülü için regresyon katsayılarını oluşturan t-değer tablosu

<b>Term</b>	<b>Effect</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T-Value</b>	<b>P-Value</b>	<b>VIF</b>
Constant		71,421	0,424	168,56	0,000	
SiO2/Al2O3	-10,116	-5,058	0,424	-11,94	0,000	1,00
MgO/CaO	9,514	4,757	0,424	11,23	0,000	1,00
Sıcaklık	3,176	1,588	0,424	3,75	0,001	1,00
SiO2/Al2O3*MgO/CaO	3,529	1,764	0,424	4,16	0,000	1,00
Na2O/K2O*MgO/CaO	2,887	1,444	0,424	3,41	0,002	1,00
Na2O/K2O*Sıcaklık	-2,813	-1,406	0,424	-3,32	0,003	1,00
SiO2/Al2O3*MgO/CaO*Sıcaklık	-3,406	-1,703	0,424	-4,02	0,001	1,00
Na2O/K2O*MgO/CaO*Sıcaklık	-2,500	-1,250	0,424	-2,95	0,007	1,00

**EK 3. 6.** Pişme Küçülmesi için regresyon katsayılarını oluşturan t-değer tablosu

<b>Term</b>	<b>Effect</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T-Value</b>	<b>P-Value</b>	<b>VIF</b>
Constant		9,3331	0,0160	582,95	0,000	
SiO2/Al2O3	0,1963	0,0981	0,0160	6,13	0,000	1,00
Na2O/K2O	0,1412	0,0706	0,0160	4,41	0,000	1,00
MgO/CaO	1,4187	0,7094	0,0160	44,31	0,000	1,00
Sıcaklık	0,4387	0,2194	0,0160	13,70	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O	0,2463	0,1231	0,0160	7,69	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*MgO/CaO	0,5387	0,2694	0,0160	16,83	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*Sıcaklık	0,7138	0,3569	0,0160	22,29	0,000	1,00
Na2O/K2O*MgO/CaO	0,1437	0,0719	0,0160	4,49	0,000	1,00
MgO/CaO*Sıcaklık	-0,7737	-0,3869	0,0160	-24,16	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*MgO/CaO*Sıcaklık	-0,4588	-0,2294	0,0160	-14,33	0,000	1,00
Na2O/K2O*MgO/CaO*Sıcaklık	-0,1488	-0,0744	0,0160	-4,65	0,000	1,00

**EK 3. 7.** 500 °C' deki ısı genleşme katsayısı için regresyon katsayılarını oluşturan t-değer tablosu

<b>Term</b>	<b>Effect</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T-Value</b>	<b>P-Value</b>	<b>VIF</b>
Constant		82,681	0,260	318,49	0,000	
SiO2/Al2O3	14,898	7,449	0,260	28,69	0,000	1,00
Na2O/K2O	-4,697	-2,348	0,260	-9,05	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*MgO/CaO	1,332	0,666	0,260	2,57	0,028	1,00
SiO2/Al2O3*Sıcaklık	1,433	0,716	0,260	2,76	0,020	1,00
MgO/CaO*Sıcaklık	-1,930	-0,965	0,260	-3,72	0,004	1,00

**EK 3. 8.** Pyroplastik deformasyon indeksi için regresyon katsayılarını oluşturan t-değer tablosu

<b>Term</b>	<b>Effect</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T-Value</b>	<b>P-Value</b>	<b>VIF</b>
Constant		9,6288	0,0376	256,36	0,000	
SiO2/Al2O3	0,2225	0,1112	0,0376	2,96	0,016	1,00
MgO/CaO	0,4225	0,2113	0,0376	5,62	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O	1,1300	0,5650	0,0376	15,04	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*MgO/CaO	-1,0475	-0,5238	0,0376	-13,94	0,000	1,00
Na2O/K2O*MgO/CaO	0,4800	0,2400	0,0376	6,39	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*MgO/CaO	-1,8250	-0,9125	0,0376	-24,29	0,000	1,00

**EK 3. 9.** Camı faza viskozitesi için regresyon katsayılarını oluşturan t-değer tablosu

<b>Term</b>	<b>Effect</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T-Value</b>	<b>P-Value</b>	<b>VIF</b>
Constant		0,25125	0,00385	65,21	0,000	
SiO2/Al2O3	0,02750	0,01375	0,00385	3,57	0,007	1,00
Na2O/K2O	0,03000	0,01500	0,00385	3,89	0,005	1,00
MgO/CaO	-0,11500	-0,05750	0,00385	-14,92	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O	-0,05500	-0,02750	0,00385	-7,14	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*MgO/CaO	0,05000	0,02500	0,00385	6,49	0,000	1,00
Na2O/K2O*MgO/CaO	-0,04750	-0,02375	0,00385	-6,16	0,000	1,00
SiO2/Al2O3*Na2O/K2O*MgO/CaO	0,05750	0,02875	0,00385	7,46	0,000	1,00

## ÖZGEÇMİŞ

### ORCID NO:

Ad Soyad :

Yabancı Dil :

Doğum Yeri ve Yılı :

E-Posta :

### Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- Yıl, Üniversite, Enstitü/Fakülte, Bölüm, Anabilim Dalı
- Yıl, Görev, Kurum, Birim

### Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Yıl, Yayınmın/Faaliyetin Türü, Adı ve Bilgileri, Yeri
- Yazarın Soyadı, Adının ilk harfi. (Yayın yılı). Makale adı. Dergi Adı, Cilt (sayı), Sayfa numaraları.

### Ödülleri:

- Yıl, Derece, Ödül Adı, Yeri

### Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- Yıl, Birlik/Dernek/Kuruluş Adı, Yeri.