

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TAGUCHİ YÖNTEMİ KULLANILARAK HAFİF GENLEŞMİŞ KİL ÜRETİMİNİN
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUNUS URAN

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. ÖZKAN KÜÇÜK

BİLECİK, 2022

10448600

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TAGUCHİ YÖNTEMİ KULLANILARAK HAFİF GENLEŞMİŞ KİL ÜRETİMİNİN
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUNUS URAN

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. ÖZKAN KÜÇÜK

BİLECİK, 2022

10448600

BEYAN

“Taguchi Yöntemi Kullanılarak Hafif Genleşmiş Kil Üretiminin Optimizasyonu” adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR	☐	DESTEK ALINMAMIŞTIR	☒
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Yunus Uran

Tarih

.....

İmza

.....

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının yazılmasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Prof. Dr. Özkan KÜÇÜK'e değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca bu çalışmanın yapılmasında malzeme temini sağladığı ve laboratuvar imkânlarını sunduğu için Söğüt Toprak Madencilik A.Ş. şirketine teşekkür ederiz.

Savunma sınavı sırasında değerli jüri üyelerim Sayın Doç. Dr. Fatih APAYDIN, Doç. Dr. Ali ÇELİK' e çalışmamın son haline gelmesindeki değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen biricik eşime teşekkür ederim.

Yunus Uran

2022

ÖZET

TAGUCHİ YÖNTEMİ KULLANILARAK HAFİF GENLEŞMİŞ KİL ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYONU

Genleşmiş kil agrega üretiminde, hangi parametrelerin etkili olduğunu bilmek ve bu parametrelerin genleşme üzerinde ne kadar etkili olduğunu belirlemek önemlidir. Bu çalışmada, hafif genleşmiş kil bilyelerinin üretiminin optimum şartlarının Taguchi yöntemi ile belirlenmesi incelenmiş olup, performans değeri olarak genleşme oranı ve pişme kaybı, su emme oranı ve tane yoğunluğu dikkate alınmış ve analiz edilmiştir. Çalışmada, parametre olarak organik madde yüzdesi (0, 1, 2, 3 ve 4), ön ısıtma sıcaklığı (150, 200, 300, 400 ve 500°C), ön ısıtma süresi (1, 3, 5, 7 ve 9 dakika), sinterleme sıcaklığı (1050, 1100, 1150, 1175 ve 1200°C) ve sinterleme süresi (5, 7, 9, 11 ve 13 dakika) seçilmiş ve deneylerin tümünde tane boyutu 250 µm altı olarak sabit alınmıştır. Buna göre optimum şartlar, organik madde yüzdesi %3, ön ısıtma sıcaklığı 150°C, ön ısıtma süresi 1 dakika, sinterleme sıcaklığı 1200°C ve sinterleme süresi 13 dakika olarak bulunmuştur. Bu şartlarda, tahmin edilen genleşme oranı %4,34 olup, yapılan deneylerde %4,32'lik bir değer, pişirme kaybı için ise tahmin edilen değer %30,30 olup, yapılan deneylerde %31,63'lük bir değer elde edilmiştir. Ayrıca parametrelerin çıktılar üzerindeki yüzde etkileri de hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hafif Genleşmiş Kil, Taguchi Metodu, Optimizasyon, Kil Bilyesi.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF LIGHTWEIGHT EXPANDED CLAY PRODUCTION BY USING THE TAGUCHI METHOD

In the production of lightweight expanded clay, it is important to know which parameters are effective and to determine the effect of these parameters on the expansion. In this study, the optimum functioning of slightly expanded clay balls was investigated by the Taguchi method, and the water absorption rate in the expansion process and firing was reviewed and analyzed as a value. In addition, the water absorption rate and grain density were analyzed under optimum conditions. In the study, organic matter percentage (0, 1, 2, 3 and 4), preheating temperature (150, 200, 300, 400 and 500oC), preheating time (1, 3, 5, 7 and 9 minutes), The sintering temperature (1050, 1100, 1150, 1175 and 1200oC) and sintering time (5, 7, 9, 11 and 13 minutes) were chosen and the grain size was fixed as below 250 μm in all of the experiments. Accordingly, the optimum conditions were found to be organic matter percentage 3%, preheating temperature 150oC, preheating time 1 minute, sintering temperature 1200oC and sintering time 13 minutes. Under these conditions, the estimated expansion rate is 4.34%, a value of 4.32% in the experiments, the estimated value for the cooking loss is 30.30%, and a value of 31.63% was obtained in the experiments. In addition, the percentage effects of the parameters on the outputs were calculated.

Keywords: Lightly Expanded Clay, Taguchi Method, Optimization, Clay Ball.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Kıl ve Kıl Mineralinin Tanımı	3
1.1.1. Kılın Özellikleri.....	5
1.1.1.1. Renk	5
1.1.1.2. Sinterleşme.....	5
1.1.1.3. Kohezyon	5
1.1.1.4. Plastisite	6
1.1.1.5. Rötire.....	6
1.1.1.6. Yağlılık ve Yağsızlık	6
1.2. Kıl Mineralinin Sınıflandırılması.....	6
1.3. Kıl Üretimi.....	7
1.4. Kılın Kullanım Alanları	8
1.5. Genleşebilen Kıl	8
1.6. Genleşmiş Kıl Üretimi	10
1.6.1. Kılın Genleşme Mekanizması.....	10
1.6.2. Hammaddenin Hazırlanması	14
1.6.2.1. Kırma ve Boyutlandırma	14

1.6.2.2. Peletleme	15
1.6.2.3. Ekstrüzyon.....	16
1.6.2.4. Döner Fırında Pişirme	17
1.7. Genleşmiş Kilin Kullanım Alanları.....	18
1.7.1. Yapısal Hafif Beton.....	19
1.7.2. Yüksek Performanslı Beton Duvar	21
1.7.3. Asfalt Kaplama (Kırsal, Şehir ve Otoyol).....	21
1.7.4. Yapısal Beton (Yüksek performans dahil)	22
1.7.5. Jeoteknik.....	22
1.7.6. Bahçe Bitkileri Uygulamaları	22
1.7.7. Özel Beton.....	23
1.7.8. Çeşitli Farklı Kullanımlar	23
2. LİTERATÜR TARAMASI	24
3. MATERYAL VE METOT	28
3.1. Materyallerin Hazırlanışı.....	28
3.2. Kilin Genleştirilmesi.....	31
3.3. Taguchi Metodu.....	34
3.4. Genleşmiş Kilin Analizinde Kullanılan Yöntemler	36
3.4.1. X Işınları Floresans Tekniği (XRF).....	36
3.4.2. X-Işınları Difraksiyonu Tekniği(XRD)	37
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI	39
4.1. Genleşmiş Kil Üretiminde Optimum Şartların Belirlenmesi	39
4.1.1. Ortogonal Deney Tasarımının Belirlenmesi.....	39
4.1.2. Deney Tasarımı Sonuçları.....	40
4.1.3. Varyans Analizleri	51
4.2. Üretilen Genleşmiş Killer ve Özellikleri.....	53

5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	55
5.1. Optimizasyon Verilerinin Değerlendirilmesi	55
5.1.1. Parametrelerin Performans İstatistiği Üzerine Etkileri.....	55
5.1.2. İstatistiksel Hesaplamalar	64
5.2. Sonuç.....	64
KAYNAKÇA	66



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1. 1. Degens'e Göre Kil Minerallerinin Sınıflandırılması.....	7
Tablo 3. 1. Çalışmada Kullanılan Kil' in Kimyasal Analizi	28
Tablo 3. 2. Kil ve Organik Madde Karışım Oranları.....	31
Tablo 4. 1. Tasarımın Parametre ve Seviyeleri	39
Tablo 4. 2. Tasarımın Deney Planı	39
Tablo 4. 3. Tasarımın Deney Planı ve Sonuçları.....	40
Tablo 4. 4. Pişme Kaybı İçin Marjinal Ortalama Değerler	41
Tablo 4. 5. Genleşme Oranı İçin Marjinal Ortalama Değerler.....	44
Tablo 4. 6. Tane Yoğunluğu İçin Marjinal Ortalama Değerler	46
Tablo 4. 7. Su Emme Oranı İçin Marjinal Ortalama Değerler	48
Tablo 4. 8. Optimizasyon Deneyi İçin Varyans Analizi (Genleşme Oranı İçin).....	52
Tablo 4. 9. Optimizasyon Deneyi İçin Varyans Analizi (Pişme Kaybı İçin)	52
Tablo 4. 10. Optimizasyon Deneyi İçin Varyans Analizi (Tane Yoğunluğu İçin).....	52
Tablo 4. 11. Optimizasyon Deneyi İçin Varyans Analizi (Su Emme Oranı İçin).....	53
Tablo 4. 12. Çalışmada Üretilen Genleşmiş Kil' in Kimyasal Analizi	53
Tablo 5. 1. Pişme Kaybı İçin Performans İstatistiği Değerleri.....	55
Tablo 5. 2. Genleşme Oranı İçin Performans İstatistiği Değerleri	57
Tablo 5. 3. Tane Yoğunluğu İçin Performans İstatistiği Değerleri	59
Tablo 5. 4. Su Emme Oranı İçin Performans İstatistiği Değerleri	61
Tablo 5. 5. Deneylerde Optimum Çalışma Şartları, Gözlemlenen ve Tahmin Edilen Genleşme Oranı ve Pişme Kaybı	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Genleşmiş Kil Agregası	2
Şekil 1.2. Kil Tanelerinin Tabaka Yapılarının Görüntüsü	4
Şekil 1.3. Kil Minerallerinin İki Temel Kristal Yapısı	4
Şekil 1.4. Döner Fırının Son Bölümü	10
Şekil 1.5. Kil Minerallerinde Tabakalanmalar	11
Şekil 1.6. Kaolinit Tabakalanması	11
Şekil 1.7. Montmorillonit Tabakalanması	12
Şekil 1.8. İllit Tabakalanması	12
Şekil 1.9. Genleşmiş Killerin Bileşim Sınırları	13
Şekil 1.10. Çift Katlı Titreşimli Elek	15
Şekil 1.11. Pan Pelletizer	16
Şekil 1.12. Extrusion Machine	17
Şekil 1.13. Döner Fırın Tesisinin Görünümü	18
Şekil 1.14. Genleşmiş Kil İle Yapılmış Hafif Beton Kullanılmış Bir Yapı	20
Şekil 1.15. Hafif Beton İle Yapılmış Bir Köprü	20
Şekil 3. 1. Çalışmada Kullanılan Kil'in XRD Grafiği	29
Şekil 3. 2. Etüvde Kurutulmuş Kil Numuneleri	29
Şekil 3. 3. Halkalı Öğütücüde Kırılmış 250 Mikron Altı Kil	30
Şekil 3. 4. Kil'e Farklı Oranlarda Organik Madde İlave Edilerek Yapılan Karışımlar	30
Şekil 3. 5. Şekillendirme İçin Kullanılan Makine	31
Şekil 3. 6. Sinterleme Fırını	32
Şekil 3. 7. Genleştirilmiş Kil Bilyesi Üretimi Akım Şeması	32
Şekil 3. 8. Piknometre Kullanarak, Arşimet Prensibi İle Tane Yoğunluğu Tespiti	33
Şekil 3. 9. 24 Saat Suda Bekletilen Genleştirilmiş Kil Numunesi	34

Şekil 3. 10. Bir Kristalde X Işını Kırınımı	38
Şekil 4. 1. Organik Madde Miktarının Pişme Kaybına Etkisi	42
Şekil 4. 2. Ön Isıtma Sıcaklığının Pişme Kaybına Etkisi.....	42
Şekil 4. 3. Ön Isıtma Süresi Pişme Kaybına Etkisi	43
Şekil 4. 4. Sinterleme Sıcaklığının Pişme Kaybına Etkisi	43
Şekil 4. 5. Sinterleme Süresinin Pişme Kaybına Etkisi	43
Şekil 4. 6. Organik Madde Miktarının Genleşme Oranına Etkisi	44
Şekil 4. 7. Ön Isıtma Sıcaklığının Genleşme Oranına Etkisi.....	45
Şekil 4. 8. Ön Isıtma Süresinin Genleşme Oranına Etkisi	45
Şekil 4. 9. Sinterleme Sıcaklığının Genleşme Oranına Etkisi.....	45
Şekil 4. 10. Sinterleme Süresinin Genleşme Oranına Etkisi.....	46
Şekil 4. 11. Organik Madde Miktarının Tane Yoğunluğuna Etkisi	47
Şekil 4. 12. Ön Isıtma Sıcaklığının Tane Yoğunluğuna Etkisi	47
Şekil 4. 13. Ön Isıtma Süresinin Tane Yoğunluğuna Etkisi	47
Şekil 4. 14. Sinterleme Sıcaklığının Tane Yoğunluğuna Etkisi.....	48
Şekil 4. 15. Sinterleme Süresinin Tane Yoğunluğuna Etkisi	48
Şekil 4. 16. Organik Madde Miktarının Su Emme Oranına Etkisi	49
Şekil 4. 17. Ön Isıtma Sıcaklığının Su Emme Oranına Etkisi	49
Şekil 4. 18. Ön Isıtma Süresinin Su Emme Oranına Etkisi.....	50
Şekil 4. 19. Sinterleme Sıcaklığının Su Emme Oranına Etkisi	50
Şekil 4. 20. Sinterleme Süresinin Su Emme Oranına Etkisi	50
Şekil 4. 21. Deneyler Sonucunda Üretilmiş Genleşmiş Kil Bilyeleri	54
Şekil 5.1. Organik Madde Miktarının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	55
Şekil 5.2. Ön Isıtma Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi	56
Şekil 5.3. Ön Isıtma Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi	56
Şekil 5.4. Sinterleme Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi	56

Şekil 5.5. Sinterleme Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	57
Şekil 5.6. Organik Madde Miktarının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	57
Şekil 5.7. Ön Isıtma Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	58
Şekil 5.8. Ön Isıtma Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi	58
Şekil 5.9. Sinterleme Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi	58
Şekil 5.10. Sinterleme Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	59
Şekil 5. 11. Organik Madde Miktarının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	59
Şekil 5.12. Ön Isıtma Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	60
Şekil 5.13. Ön Isıtma Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi	60
Şekil 5.14. Sinterleme Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi	60
Şekil 5.15. Sinterleme Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	61
Şekil 5.16. Organik Madde Miktarının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	61
Şekil 5.17. Ön Isıtma Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	62
Şekil 5.18. Ön Isıtma Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi	62
Şekil 5.19. Sinterleme Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi	62
Şekil 5. 20. Sinterleme Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi.....	63

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

μ : Ortalama

ρ : Yoğunluk

A_i : A parametresinin i seviyesi

e_i : Deneysel hata

ft: Feet

m: Fırına konmadan önce ham peletlerin kütlesi

m₁: Fırından çıkartılan genleşmiş kilin soğutulduktan sonraki kütlesi

M₁: Kuru genleşmiş kil numuneleri kütlesi

M₂: 24 saat suya daldırılıp bekletilmiş genleşmiş kil kütlesi

Mpa: MegaPaskal

N: Toplam deney sayısı

n: Yapılan toplam deney sayısı

n_r: Teyit deneyinin tekrar sayısı

R₁: Peletlerin fırına girmeden önceki çapı

R₂: Peletlerin genleşme sonrası çapı'dır.

SCLC: Hafif Agregalı Beton

SN: Performans İstatistiği

SD: Parametrelerin serbestlik derecesi

S_e: Tahmini hata için güven aralığı

W: Su Emme Oranı

X_i: i. deneyde kullanılan parametre seviyelerinin toplam etkinlik boyutu

X_{ij}: Bir parametrenin i seviyesindeki parametre çıktıları.

y: Parametrenin deneysel olarak bulunan değeridir.

Y_i: i. deneyin tahmin edilen performans değeri

Y_m: Marjinal ortalama

1. GİRİŞ

Amerika Birleşik Devletleri'nin 1917'de I. Dünya Savaşı'na girmesinin yarattığı lojistik sorunlar, gemi inşa etmek için yüksek kaliteli levha çeliği kıtlığı ile birleşti. Federal Hükümetin bir kolu olan Birleşik Devletler Filo Şirketi, çelikten başka malzeme kullanarak bir gemi inşa programı planlamakla suçlandı. Bu malzemelerden biri de İskandinav ülkelerinde gemi yapımında kullanılan betonarmeydi (Escs, 2021).

Temel sorun, ölü ağırlığın azaltılmasıydı ve pomza taşı, cüruf ve cüruf gibi doğal agregalarla yapılan betondan testler yapıldı, ancak bunların düşük dayanımları ve tekdüzelik eksikliği nedeniyle uygun olmadığı bulundu. Araştırmacılar Stephan J. Hayde' nin çalışmalarını öğrendiler ve bazı şeylerin, killerin ve arduvazların, görünüşte antik Romalılar tarafından yüzyıllar önce kullanılan volkanik bazaltlara benzeyen hafif, veziküllü bir ürün üretmek üzere işlenebileceği bulgularını doğrulayan ileri deneyler yaptılar. Ancak karakter ve kalite açısından çok daha tekdüzeydi, bu nedenle beton agregası için daha uygundu. Bu da, Stephan J. Hayde' nin hala geliştirme aşamasında olan ürününün araştırılmasına yol açtı. Ulusal Standartlar Bürosu, önce daha fazla araştırma ve deney yapma görevi ve daha sonra 1918'de agreganın üretim miktarı ile görevlendirildi. O yılın Şubat ayında, Stephan J. Hayde 'ye süreciyle ilgili bir patent verildi (ABD Patenti No. 1,255,878) ve gemi inşa programının hem deneysel hem de inşaat aşamaları için patent haklarını Federal Hükümete ücretsiz olarak kullandı (Escs, 2021).

Savaştan sonra ürünün ticarileştirilmesinde ilerleme kaydedildi. Amerikan Agregası Şirketi, hafif agregası tesislerinin işletimini lisanslamak için Kansas City'de kuruldu. 1941'de Amerika Birleşik Devletleri'nde ve Kanada'da sekiz lisanslı ürün oluşturuldu. Ancak, 1946'da Stephan J. Hayde 'nin patentlerinin süresi dolana kadar hızlı bir büyüme olmadı; 1940'ların sonlarında ve 1950'lerin başlarında, II. Dünya Savaşı sonrası inşaat sektöründe kullanılmasının sağlamak için hafif agregası üretmek üzere birçok yeni şirket kuruldu. Öncelikle Amerika Birleşik Devletleri standartlarına giren genişletilmiş killeri, daha sonraları Avrupa standartlarına girmiştir (Escs, 2021).

Genleştirilmiş kil hafif yapı elemanı olmasından dolayı aynı ağırlıkta depreme daha dayanıklı, yüksek yapılar inşa edilmesini sağlar. Ayrıca yapılarda ısı ve ses yalıtımı, drenaj, toprak basıncını azaltma ve dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Genleştirilmiş kil sebze yetiştiriciliği, seracılık, fidecilik, peyzaj, çiçekçilik ve topraksız tarımda kullanılan ideal bir malzemedir. Genleştirilmiş kil tanelerinin içerisinde büyük oranda hava boşluğu olduğu için

toprak içinde havalanma ve su geçirgenliğini yüksek oranda tutar. Toprakta buharlaşmayı sağlaması sayesinde su kayıplarını azaltır. Hastalık taşımaz, Uygun Ph oranı sayesinde ($6.5 < \text{pH} < 8.5$) bitkiler için uygun bir gelişme ortamı oluşturur (Lecat, 2021).

Yapılan birçok çalışmadan elde edilen verilere dayanarak, genleşen kil agregalarının, diğerlerine göre bazı üstünlükleri tespit edilmiştir. Hafif agrega olarak kullanılan agregaların teknik özellikleri kullanım alanlarını doğrudan etkilemektedir. Fiziksel ve mekanik özellikleri agregaların, taşıyıcı beton, hafif blok, lento, dolgu malzemesi vb. amaçlarla kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Taşıyıcı betonlarda kullanılan genleşen kil agregalarından üretilmiş betonların taşıma kapasitesi diğer agregalara göre daha yüksek olması nedeniyle hafif yapı elemanlarının çoğunun üretiminde kullanılabilmektedir (Özgüven, 2009).

Genleşmiş kil agregaları, belirli özellikleri taşıyan killerden üretilmektedir. Döner fırınlarda $1100-1300^{\circ}\text{C}$ derecelerde ısıtılıp genleşen killer, hacim artışına uğrarlar. Bu özellikleri taşıyan killi şist, kil ve şeyllere genel olarak genleşen killer denilmektedir. Gelişmiş ülkelerde yaygın olarak üretilerek kullanılan bu tür hafif agregalar için gerekli hammadde aramaları artarak devam etmektedir. Bu nedenle zengin kil yataklarına sahip olan ülkemizin bu kaynakları daha önem kazanmıştır. Ülkemiz farklı türden kil hammaddelerinin aramacılığının ve üretiminin yoğun olarak yapıldığı başlıca ülkelerden sayılmaktadır. Endüstrinin birçok dalında farklı niteliğe sahip kil hammaddelerine ihtiyaç duyulması nedeniyle, killer cazibelerini uzun yıllardır korumuşlardır. Şekil 1.1. de genleştirilmiş kil agregasından örnek gösterilmiştir (Lecat, 2021).



Şekil 1.1. Genleşmiş Kil Agregası

Genleşmiş kil dünyada light expanded clay, hydroton, leca, exclay, keramzit, blahton, expanded clay, haydite, hidrokültür taşı, hidroton, kil topu, kil biyesi isimleriyle bilinmektedir. Türkiye de ise Lecat (Light Expanded Clay Agreg Turkey) adı ile piyasaya girmiştir. Pişirilip genleştirilen killeri, Hydroponic (hidroponik) sistemlerde de kullanılan bir agreg türüdür(Lecat, 2021).

Dünyada yaklaşık 100 yıldır üretilen ve kullanılan genleştirilmiş killeri maalesef Türkiye de yeni yeni fark edilmekte ve bununla alakalı endüstriyel ölçekli tesisler geçte olsa kurulmaya başlanmıştır. Bu çalışmada killeri farklı sıcaklıklarda, farklı sürelerde belirli oranlarda katkı maddesi de ilave ederek en ideal genleşme şartları ortaya konulmaya çalışılmış ve genleşmiş killeri kullanım alanları araştırılmıştır.

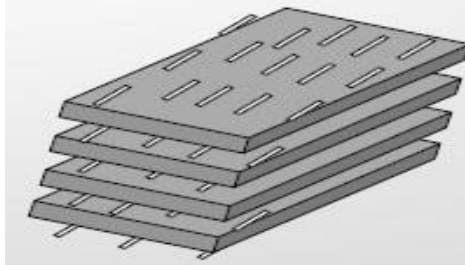
1.1. Kil ve Kil Mineralinin Tanımı

Bilim insanları tarafından Killeri değişik şekillerde tanımlanmıştır. Jeologlara göre tane boyutu $<2\mu\text{m}$ olan mineraller, İnşaat mühendisleri plastik özelliklerini ve dayanımını seramikçiler ise pişme özelliklerini dikkate alarak tanım yapmıştır. Kimyacılar, kilin içindeki belli bir kristal yapıya sahip, hidratlanmış alüminyumun ve magnezyum silikat mineral içeriğinin fazla miktarda olduğunu belirlemişlerdir.

Kil doğada bol miktarda bulunan minerallerden olmasına rağmen saf halde bulmak çok kolay değildir. En saf kil olarak bilinen ve Çin kilinde yüksek oranda bulunan kaolen $2\text{SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ formülü ile gösterilmiştir. Kilin içerisinde alüminyum silikatlarla beraber, magnezyum, kalsiyum, sodyum, silis, mika, demir oksit, kalker ve kuvars gibi mineraller bulunmaktadır.

Kilin rengi yapısındaki yabancı maddelerden dolayı kırmızımtırak, esmer, sarımtırak gibi renklerde olabilir. Killeri; alüminyum ve silika içeriği yüksek, doğada oldukça fazla miktarda bulunan, yumuşak ve çok ince taneli, feldspat, mika ve diğer silikatların ayrışması ile oluşmuş sedimanter mineralleridir (Rice,1987:473).

Kil mineralleri bünyelerinde mika minerali bulunmasından dolayı plastik özellik gösterirler. Kil taneleri defter sayfaları ya da kâğıt destesi şeklinde tabakalar halinde yığılırlar. Bu tanelerden her biri negatif yüke sahiptir, Şekil 1.2 'de gösterilmiştir.



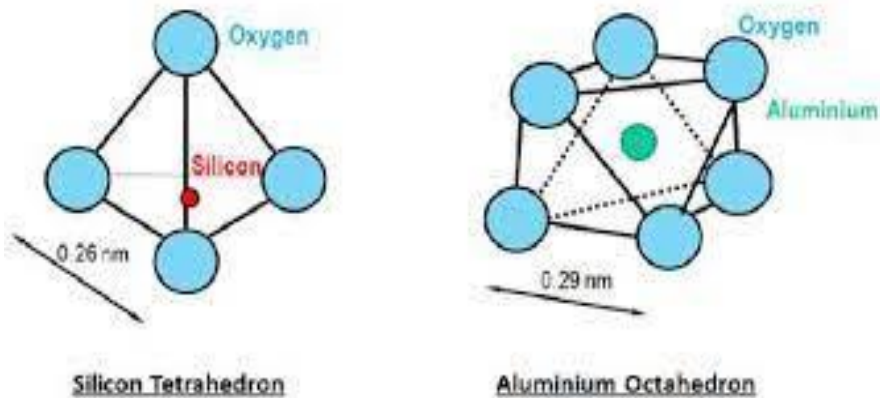
Şekil 1.2.Kil Tanelerinin Tabaka Yapılarının Görüntüsü

Killer plastik veya amorf özellik gösterebilirler, genel olarak plastik özellikli gösteren killerin doğal su içeriği %20 civarındadır. Fakat su içeriği, kil tabakasının üzerindeki örtü kalınlığına göre değişiklik gösterebilir. Killerin su içeriği derinliğine göre azalıp artabilir. Bu kalın örtü altında basınca maruz kalan ve porozitesini kaybeden killer Şiferton olarak adlandırılır ve bunlar tabakalanma yüzeyine paralel bölünme gösterirler. Daha ileriki evreler de basınç ve sıcaklığın da etkisiyle killer Şistlere dönüşür. Şiferton olarak adlandırılan ateş killeri, düşük miktarda demir oksit, kireç magnezyum ve alkali içeriğine sahiptir. 1500°C ve daha yukarı sıcaklıklarda bozulma göstermeden kalabilirler.

Kil mineralleri farklı iki temel yapı taşından oluşurlar (Şekil 1.3).

Birinci yapı taşı; Geometrik şekli oktahedral (düzgün sekiz yüzlü) olup, merkezde alüminyum, demir ve magnezyum atomlarından biri, köşelerde ise merkez atomundan eşit uzaklıkta hidroksiller veya oksijen atomu bulunmaktadır.

İkinci yapı taşı; Geometrik şekli tetrahedral (düzgün dörtyüzlü) olup , merkezde silisyum atomu, köşelerde ise merkez atomundan eşit uzaklık da hidroksiller veya oksijen atomu yer almaktadır.



Şekil 1.3. Kil Minerallerinin İki Temel Kristal Yapısı

1.1.1. Kilin Özellikleri

Killerin renk, sinterleşme, kohezyon, plastisite, rötire, yağlılık ve yağsızlık gibi önemli özellikleri bulunmaktadır.

1.1.1.1. Renk

Killer doğada kahverengi, sarı, kırmızı, gri, beyaz ve siyahımsı gibi farklı renklerde bulunabilirler. Bu renkler kilin fırınlarda pişirilmesinin ardından değişim yaşayabilirler. Örneğin, rengi siyah olan bir kil piştikten sonra beyaz olabilir. Bunun sebebi kilin içerisinde bulunan kömür gibi maddelerin varlığıdır. Ayrıca killerin pişme esnasında sinterleşmesi ilerledikçe renk şiddeti de artar. Kil saf haldeyken beyaz renkli olur ve kaolin adını alır. Genelde metal oksitlerle karışık bir şekilde bulundukları için doğal olarak renklenmiş durumdadırlar. Kilin rengi aynı zamanda bize içinde bulunan maddeler hakkında bilgi verir. Örneğin; kırmızı renkten demir-peroksit, açık kahverengi renginden limonit, siyah ve gri renkten ise mangan bioksit bulunduğu anlaşılabılır. Ayrıca kil yapısındaki oksitlerin yüksek sıcaklıkla renkleri değiştiği için kilin fırınlanmadan önceki rengiyle sonraki rengi farklılık gösterir.

1.1.1.2. Sinterleşme

Killerin sinterleşme sıcaklıkları birbirinden farklıdır. Feldispat, demir oksit, kalker, koloit ve kuvars bakımından zengin olan killer genellikle 900°C civarı sıcaklıkta sinterleşirler. Bazı killer 1100°C'ye kadar normal oldukları halde, 1050-1100°C arasında feldspatların erimeye başlamasıyla değişikliğe uğrarlar. Erime derecesi ile sinterleşme derecesi arasındaki farkın az olmaması, belli bir mesafede olması gerekir. Bazı killer (Refrakterler) 1580°C'ye kadar dayanıklıdırlar. Partiküller arasında oluşan sinterleşmenin, denge koşulları altında gerçekleştiği kabul edilebilir.

1.1.1.3. Kohezyon

Bir bütünü oluşturan bileşenlerin bir arada durabilme yeteneği kohezyonun özelliğidir. Bu özellik, kil hamurunun kuruduğu zaman kendisine verilmiş olan bir arada durabilme özelliğini muhafaza etme kabiliyetine sahip olmasıdır. Örneğin kum bu özelliğe sahip değildir ve ıslak halde kurumaya bırakıldığında ufak bir darbe sebebiyle kendi kendine dağılma gösterir. Kil su ile karıştırılırsa ancak kohezyon özelliğine sahip olabilir. Sudan başka bir sıvıyla karıştırıldığında kohezyon özelliği kazanmaz.

1.1.1.4. Plastisite

Killerin plastiklik özellikleri kristallerinin ince ve levhacıklar halinde olmasından dolayı ortaya çıkar. Bu levhacıklar üst üste birikmiş haldedirler. Levhacıkların arası, kil su ile çamur haline getirildiğinde su dolar. Çamur şeklini alan malzemeye baskı uygulandığı zaman bu levhacıklar birbirleri üzerinden kayar ve verilmek istenen şekli oluştururlar. Killerin plastiklik özelliği kili işlenebilir halde çamur şekline getirmek için yeterli olan su miktarı ile tayin edilir. Kil çamur şeklini alana kadar ne kadar su emerse o kadar plastiktir. Killerin plastisite suyu %15 ile %40 arasında olmalıdır. Kilin işlenebilme ve biçimlendirilebilme özelliği su ile karıştırıldığında, ortaya çıkar. Bu plastisite özelliğidir, tüm mineraller içinde, plastiklik özelliği olan tek mineral kildir.

1.1.1.5. Rötire

Kil su ilavesi ile karıştırılıp, yoğurulup biçimlendirildikten sonra kuruma aşamasına geçildiğinde ölçüleri küçülür. Yani hacmi azalır. Hacim küçülmesi fırınlanma sırasında da devam eder, bu olaya kilin rötire yapması denir. Killerin plastisite özelliklerine göre rötire değişiklik gösterebilir. Killer, kuruma ve fırında pişme esnasında küçülürler. Kuruma küçülmesi fiziksel, pişme küçülmesi kimyasal bir olaydır. Kil tanelerinin inceliğine bağlı olarak, fazla su kaldıran killer daha fazla küçülme gösterirler. Kuruma küçülmesi, çevre suyuna bağlıdır. Pişme küçülmesi ise kil mineralinin yapısına ve cinsine bağlıdır.

1.1.1.6. Yağlılık ve Yağsızlık

Plastiklik özelliği çok iyi olan killere yağlı kil denir. Kaygan özellik gösterirler. Yüzeyleri yağlı gibi hafif parlak olur, fazla su emerler ve yoğrulma suları yüksektir. Yağlı killerin bağlama yetenekleri yüksektir, plastik özellik göstermeyen madde taneciklerini sıkı bir şekilde tutarlar. Yağsız kil ise yüzeyi parlak ve kaygan olmayan, pürüzlü görünüme sahip killere denir. Bağlama özellikleri zayıftır, az su kaldırır ve suda çabuk dağılırlar. Sinterleşmeleri için yüksek ısı gereklidir.

1.2. Kil Mineralinin Sınıflandırılması

Literatürde kil minerallerinin sınıflanmasında bir birliktelik mevcut değildir. Birçok araştırmacı tarafından kabul edilen sınıflamalar mevcuttur. Killer, sulu alüminyum silikat olup bu sınıflama içerisindeki tüm mineraller için partikül boyu 1/256 mm veya 4 mikron olarak verilmektedir (Wentworth, 1922). Son yıllarda yapılan çalışmalarda kil boyutunun 2 mikrona kadar düştüğü savunulmaktadır. Daha büyük boyutları kil kavramına dahil edilmemektedir

Kil terimi jenezi belirtmez. Terim hem hidrotermal faaliyetin sebep olduğu bozuşma ürünleri için, hem de sedimantasyon yoluyla çökelmiş taneler için geçerli bir kavram olarak sayılmakta olup, bu tür küçük parçacıkları oluşturan minerallere göre kimyasal sınıflamalar yapılmıştır. Bu sınıflamalardan kristal yapılarına göre olan sınıflandırma Degens'e göre (Tablo 1.1.)'de, gösterilmiştir (Endüstriyel Hammadde Alt Komisyonu, 2000).

Tablo 1. 1. Degens'e Göre Kil Minerallerinin Sınıflandırılması

YAPI	GRUP	CİNS
2 Tabakalı olanlar	Kaolinit grubu	Kaolinit
	a-Eş boyutlu olanlar	Dikit
	b-Bir yönde uzamış olanlar	Halloysit
3 Tabakalı olanlar	Simektit grubu	Montmorillonit
	İllit grubu	Bedielit
	Vermikülit grubu	İllit
		Vermikülit
4 Tabakalı olanlar Zincir yapısı olanlar	Klorit grubu	Klorit
	Sepiyolit grubu	Sepiyolit
		Atapulgit
		Paligorskit

1.3. Kil Üretimi

Kil yatakları genellikle, açık işletme usulleri ile işletilirler. Yeraltı işletmeciliği nadir olup, daha çok şiferton yataklarında görülür. Dünya kil üretiminin büyük kısmı, açık işletme ekipmanlarının kullanıldığı, açık işletme yöntemiyle yapılmaktadır. Daha az miktarda kil üretimi ise, kapalı (yeraltı) işletme yöntemleri ile yapılmaktadır. Gerek açık işletme, gerekse kapalı işletme yöntemlerinde; kil damarının kalınlığına göre makina ve ekipmanla üretimin yanı sıra, emek yoğun bir şekilde üretim de yapılmaktadır. Seramik kili üretiminin yaklaşık % 90'ı açık işletme olarak yapılmakta olup, % 10'luk çok az bir kısmı kapalı işletme şeklindedir. Emek yoğun bir şekilde yapılan üretim, kil tabakası kalınlıkları 20 - 25 cm'den 1 m'ye kadar olan ocaklarda daha fazladır. Kilin oluşum sırasındaki şartlara bağlı olarak çok kısa mesafelerde yatay ve dikey değişimler göstermesi, özellikle fayans-seramik-sıhhi tesisat, porselen ve elektro porselen yapımında kullanılan killerin harmanlanması ve homojenleştirilmesini gerektirmektedir. Üretimi yapılan kilin kalitesine bağlı olarak, kil, tüvenan olarak kullanıldığı gibi kullanım amacına göre kilin zenginleştirilmesi de gerekebilmektedir (Endüstriyel Hammadde Alt Komisyonu, 2000).

Bu amaçla üretilen kil, kırma işleminden sonra havuzlarda su içerisinde karıştırıcıların da yardımıyla çözülür. Daha sonra ilkel yıkama, süzme veya hidrosiklonlar vasıtasıyla zenginleştirme işlemine tabi tutulur.

1.4. Killerin Kullanım Alanları

Birçok Endüstriyel alanda killer kullanılmaktadır. Kil minerallerinin bazı kullanım alanları şunlardır;

- Çimento, tuğla, kiremit, yapısal karo, yer karosu, fayans
- Kanalizasyon borusu, drenaj boruları, pis su borusu
- Sıhhi tesisat, dolgu, sondaj, kaplamalar (asfalt vb.)
- Çanak, çömlek, çini, cam, porselen, elektro porselen
- Refrakter sanayi
- Petrol ve yağ endüstrisinde katalizör
- Fren balatalarında asbest yerine
- Polyesterler, tekstil, kauçuk sanayi
- Boya, ilaç ve kimya sanayi
- Tarım
- Kozmetik
- Kaplanmış ark – kaynak elektrotlarında
- Boya, renk giderici madde olarak
- Plastik, kâğıt, döküm sanayi

1.5. Genleşebilen Killer

Genleştirilmiş kil için kullanılan yaygın hammaddeler; erken sinterleşen kil, kumlu kil (Lem, mil), killi şist ve şifertondur. Bunlar mineralojik olarak illit, serizit ve montmorillonit gibi tabakalı silikatlardan meydana gelir. Avrupa'da aktüel deniz dibi killeri ile acı su killeri, rüzgar erozyonuna bağlı Löss killeri, Jura killeri, Devonien yaşlı killişistler ve şifertonlar teknik bakımdan değerlendirilebilecek ölçüde genleşme özelliğine sahip hammaddeler olarak tespit edilmiştir (Mta, 2021).

Kil hammaddelerinde genleşme ve gözenek oluşumunun nedenler konusunda farklı görüşlerin varlığı bu görüşlerden bazılarının tutarsızlığı genleşme ve gözenek oluşumunun ana fiziksel ve kimyasal faktörler hakkında yetersiz bilgi sahibi olduğuna kanıttır. Kil genleşmesini yöneten yasalarla ilgili kapsamlı çalışmalarının sonucu kayaların mineral

bileşimi, doğrudan polimineral killerin bileşiminin genleşme ve gözenek oluşumuna bağımlılığını ortaya koymuştur.

Kil kayaçlarında, özellikle büyük tanelerde bulunan çok miktarda kuvars, killerin genleşmesini kötüleştirir. Kısmen hücre duvarlarının malzemesine yerleşmiş pişmiş büyük kuvars taneler yapıyı bozar, yığın yoğunluğunu artırır, örneklerin kırılabilirliklerini artırır.

Kil kayaçlarında ince bir şekilde dağılmış kuvarsın %10-12'sinin varlığı, killerin genleşmesini önemli ölçüde etkilememiştir. Ayrıca, kuvars kapanmalarının içeriğini azaltmak için kil elütrasyonu konusunda bir dizi deney yapılmıştır. Bu kuvars içeriğindeki azalma ile genleşmiş malzemelerin yığın yoğunluğunun azaldığını göstermiştir.

İyi genleşen kil ve şeyllerin çoğu % 17-22 Al_2O_3 içerir. Al içeriği azaldıkça killerin genleşmesi keskin bir şekilde azalır. Killerdeki fazla Al_2O_3 (% 22-24'ten fazla) da olumsuz etkiler, ateşleme sırasında kil hammaddelerinin genleşmesi (genleşme sıcaklığı) keskin bir şekilde artar. Bununla birlikte, yaklaşık % 22-24 Al_2O_3 içeren killer, hafif yüksek ateşleme sıcaklıklarında iyi genleşir ve dayanıklı bir agrega verir (Escs, 2021).

Demir oksit içeriğindeki azalma ile killerin genleşmesi belirgin şekilde azalır. Düşüşün karakteristik özelliği kil kayalarının genleşmesi, $Fe_2O_3:FeO$ oranında bir artışa karşılık gelir. Demir oksit' in mutlak içeriği düşer.

Yüksek genleşme gösteren kil ve kayaçların çoğu az miktarda oksit içerir. Killerdeki CaO içeriği arttıkça bunlardan hazırlanan ham granüllerin keskin bir şekilde pişirilmesi kötüleşir. Yüksek derecede genleşmeye sahip incelenen kil ve şeyllerin çoğu yaklaşık %2,5 - % 3 ($K_2O + Na_2O$) içerir. Bazı genleşmeyen killerde, bu oksitlerin içeriği daha da yüksektir. Kil hammaddesindeki K_2O+Na_2 içeriği düşükse genleşmede az olur. Killi kayalarının kimyasal bileşimi, erime sıcaklıklarında eriyiğin viskozitesini değerlendirmeyi ve genleşip genleşmeyeceğini tahmin etmeyi kendi başına sağlamaz. Bununla birlikte, bazı killi kayaç kategorilerinin geliştirilmiş kil üretimi için uygun olup olmadığına karar verilebilmemizi sağlar.

Bir dizi deney sonucunda, kil hammaddesindeki (kalsine madde bakımından) bileşenlerin optimal içerikleri (% olarak) belirlendi: SiO_2 :55-67, Al_{23} : 20-24, MgO : 1,5-3,5, CaO : 1,5-2,5 $Fe_2O_3 + FeO$: 6-9, $K_2O + Na_2O$:1,5-3,5. Kural olarak, tek tek bileşenlerinde farklı içeriğe sahip olan killer ve şeyller, daha düşük genleşme ile ayırt edilir (Toropkov NE, Kutugin VA,2014).

1.6. Genleşmiş Kil Üretimi

1.6.1. Killerin Genleşme Mekanizması

Genişleyecek bir kil, şeyl veya arduvazın iki özelliği olmalıdır:

- Füzyon başlangıç noktasına kadar ısıtıldığında gazlar oluşmalıdır.
- Malzemenin ısıtılmasıyla oluşan cam, oluşan gazları hapsedecek bir viskozite de olmalıdır.



Şekil 1.4. Döner Fırının Son Bölümü

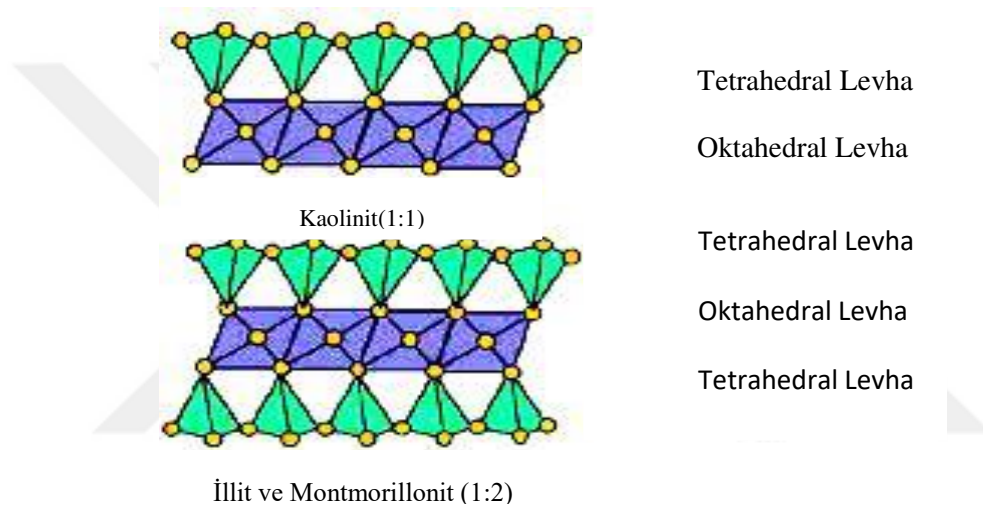
Birçok araştırmacının genleşme olayı hakkında ileri teorileri vardır. En kapsamlı erken rapor 1948'de Conley ve diğerleri tarafından yayınlandı. Bunu 1962'de Hamlin izledi.

Riley, çok sayıda kilin kimyasal bileşimlerini üç eksenli bir diyagramda çizdi (Şekil 1.9.) ve genleşmiş killerin düştüğü sınırlı bir alan buldu. Bu alanın, ısıtıldığında yeterince viskoz bir camın oluşacağı bileşim sınırlarını sınırladığını düşündü. Bu sınırlar içindeki bazı genleşmeyen killer, optimum camsı faz oluşmasına rağmen gaz üreten bileşikler içermiyordu. Genleşme alanının dışına düşen bazı genleşmeyen killerin bileşimlerini silika ve alümina ilaveleriyle sınırlara getirmek için ayarladı ve genleştiklerini buldu. Ayrıca kaolinit, silisik asit ve mikro kilin feldspattan yapay killer üretti, böylece bileşimleri sınırların hemen dışına çıktı(Escs, 2021).

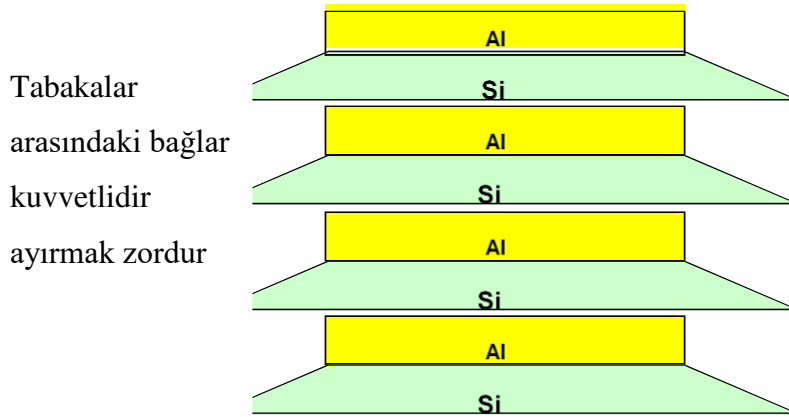
Mineralojik bileşimin en önemli değeri, ısıl işlemin ana aşamalarında faz dönüşümleri de dâhil olmak üzere, genleşmiş kilin yapı oluşumunun karmaşık fizikokimya sal sürecini önceden belirlemesi gerçeğinde yatmaktadır. Kimyasal bileşim esas olarak kil hammaddelerinin mineralojik bileşimine bağlıdır. Bu nedenle, her bir bileşenin içeriğinin sınırlarını ve bunların genleşen ve genleşmeyen kil hammaddelerinin yanı sıra değişen derecelerde genleşmeye sahip hammaddelerin oranlarını belirlemek önemlidir (Onatskiy, 1987).

Birçok araştırmacı yüzey gerilimi ve viskoziteyi incelemiştir, bu bize göstermiştir ki; silika ve alümina camın viskozitesini arttırır, soda ve potas vitrifikasyon aralığını genişletir (vitrifikasyonun başlangıcı ile füzyon arasındaki sıcaklık aralığı). Ayrıca kalsiyum, magnezyum ve demir oksit viskoziteyi azaltır ve vitrifikasyon aralığını kısaltır (Escs, 2021).

Çoğu kil mineralinin temel kristal yapısı (Şekil 1.3.), tetrahedral (Si, Al)–O ve oktahedral (Al, Mg, Fe)–(O,OH) olmak üzere iki bileşenden oluşur. Kaolinlerin temel yapısal birimi, bir tetrahedral ve bir oktahedral katmandan oluşur. Mikalar, illit, montmorillonit ve vermikülit, karşılıklı olarak bakan iki tetrahedral katman arasına sıkıştırılmış tek oktahedral katmanlardan oluşur.

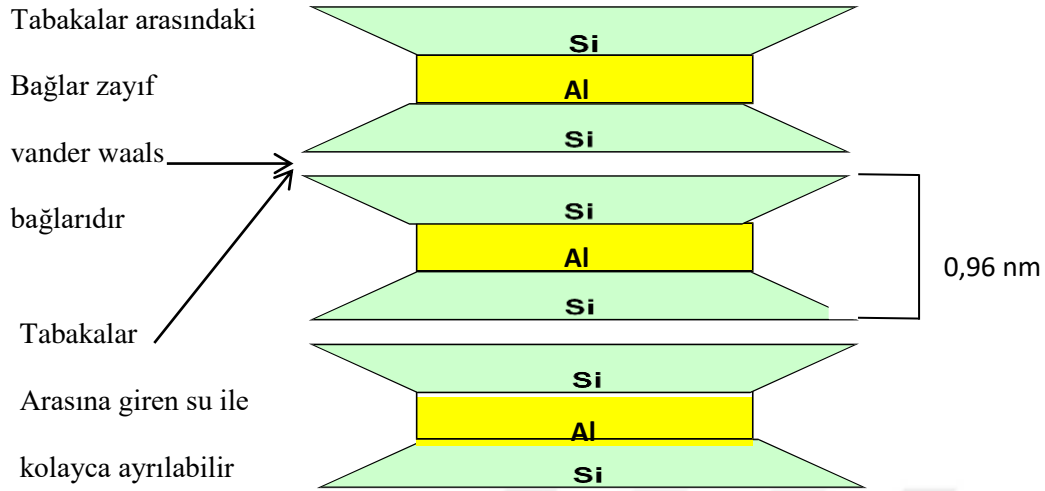


Şekil 1.5. Kil Minerallerinde Tabakalanmalar



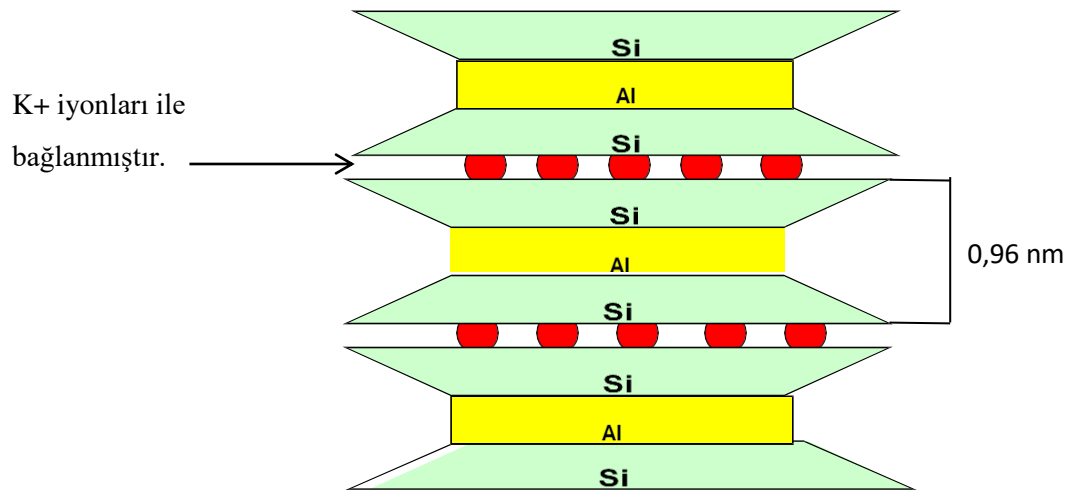
Şekil 1.6. Kaolinit Tabakalanması

Montmorillonit smektit olarak da isimlendirilir, su ile temasında şişer.



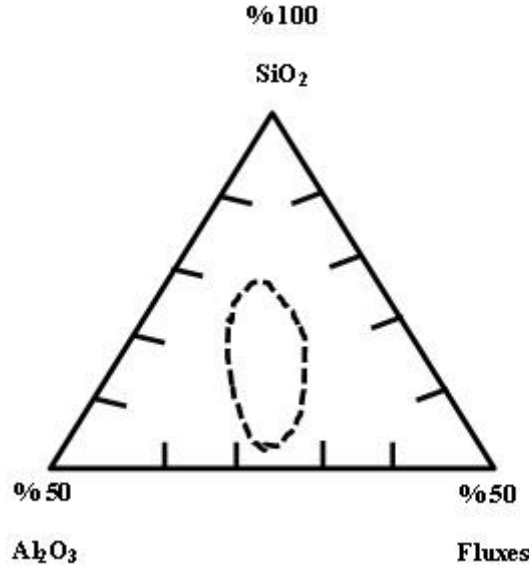
Şekil 1.7. Montmorillonit Tabakalanması

Bu şekilde oluşturulan tabaka, kolaylıkla değişebilen (montmorillonit) veya değiştirilemeyen (mika) katyonlarla ayrılır. Kloritlerde, bu ara katman katyonları, (Mg, Fe, Al) (OH)₂ bileşimine sahip oktahedral koordineli bir katmanla değiştirilir.



Şekil 1.8. İllit Tabakalanması

Alümina açısından zengin kaolin mineralleri genişmezler çünkü 2550°F (1400°C)'ye ısıtılana kadar camsı bir faz oluşmaz. İllitler, montmorillonitler ve kloritler, yüksek alkali veya toprak alkali element içeriği nedeniyle genişirler, çünkü 1740° ila 1920° F (950° ila 1050°C) arasında camsı bir faz oluşumunu destekler. Bu mineraller ayrıca genişmişliğin normal olarak meydana geldiği sıcaklıklara kadar su yüzdesini tutar.



Şekil 1.9. Genleşmiş Killerin Bileşim Sınırları

Çoğu yazar, Şekil 1.9. 'da olduğu gibi üç eksenli bir diyagramda gösterilen bileşimin bir camın viskozitesini belirleyeceğini söylemenin yeterli olmadığı konusunda hemfikirdir. Viskozite ayrıca kil minerallerine, akışların kombinasyonlarına ve oranlarına bağlıdır. Pişmiş killerin genleşmesi ve vitrifikasyonuna ilişkin kapsamlı bir referans listesi, 1979 yılında Wilson H.S. tarafından rapor edilmiştir.

Araştırmacılar tarafından bildirildiği gibi, genleşmiş killerin yüzde 50'sinden fazlasında, karbondioksit tek genleşmiş gazdı ve diğerleri karbon dioksit ve Kükürt dioksit içeriyordu, ancak asla tek başına Kükürt dioksit yoktu. Dolomit ve ankerit daha az yaygın kaynaklarla kalsitin baskın karbondioksit kaynağı olduğunu buldular. İçinde birkaç durumda, gazın tek kaynağı kömürdü. Pirit ve bazı durumlarda markazit, Kükürt dioksitin kaynaklarıydı(Escs, 2021).

Wilson, lignosülfonatlar (kalsiyum-amonyum, kalsiyum ve sodyum), un ve sodyum karbonatların eklenmesiyle zayıf genleşmiş kilin genleşmesini iyileştirdi. Tüm katkı maddeleri ile yüzde 2' lik eklemeler yeterliydi. Diğer araştırmalar, hem organik maddenin hem de kalsiyum karbonatların, genleşmişliğe neden olan karbondioksit ürettiğini buldu. Ya organik maddeyi uzaklaştırarak ya da kalsiyum karbonatı yok ederek siltin genleşmesi azaltıldı; her iki işlem de yapıldığında silt genleşmedi. Yukarıdaki tartışmalardan, genleşmişliğin gerçek nedenleri hakkında çeşitli görüşler olduğu açıktır. Bu yazarların çalışmalarından, kilin kimyasal bileşiminin, ısıtmada oluşan camın viskozitesini belirlediği açıktır. Akışkanlar yeterli miktarda mevcutsa ve alkalın toprak içeriği nispeten düşükse,

oluşan camın viskozitesi değişecektir ve genleştirici gazları hapsetmek için yeterli olacaktır. Ayrıca kil mineralleri montmorillonit, illit veya klorit olmalıdır. Burada bildirilmeyen diğerleri, genleşmiş gazların karbon dioksit, kükürt dioksit, oksijen ve sudan biri veya bir kombinasyonu olabileceğini göstermektedir. Bu gazlar karbonatlardan, organik maddelerden, sülfatlardan, sülfürlerden, kil minerallerinden ve demir oksitten oluşabilir (Escs, 2021).

1.6.2. Hammaddenin Hazırlanması

1.6.2.1. Kırma ve Boyutlandırma

Hazırlık öncelikle kırma ve boyutlandırmayı içerir. Kırma, çeneli, merdaneli, döner veya konik kırıcılar veya çekiçli veya darbeli değirmenler ile yapılabilir. Kullanılan kırıcı tipi, malzemenin kırma özelliklerine ve istenen boyuta bağlıdır, kırılan parçacığın optimum şekli bir küptür. Şekil önemlidir çünkü elde edilen agreganın şeklini yönetir. Kırma işlemi tek bir işlemde yapılabileceği gibi istenilen boyuta ulaşılmadan önce eleme ile birlikte ikincil kırma da içerebilir. Genellikle titreşimli elekler kullanılır (Escs, 2021).

Çeneli kırıcı; şeyller, arduvazlar ve nispeten kuru killeri için en popüler birincil kırıcıdır. Islak veya yapışkan killeri bu tip kırıcıyı tıkama eğiliminde olacaktır. Birkaç tip merdaneli kırıcı vardır. Tek merdaneli kırıcılarda genellikle merdanenin çevresinde, malzemeyi içbükey bir kırıcı plakaya karşı aşındıran ve parçalayan topuzlar veya dişler bulunur. Bu yaygın bir kırıcı türü değildir. Yarı sert veya hafif ıslak malzemede kullanışlıdır. Çift merdaneli kırıcılar düz, oluklu veya dişlidir. Yarı sert ve yaş malzemelerde etkilidirler. Kil yapışkan ise, bir rulonun diğerinden daha hızlı dönmesi avantajlıdır. Eşit olmayan hızlarda dönen merdaneler kili parçalama eğilimindedir. Döner kırıcılarda koninin eğiminde farklılık gösteren pek çok küçük varyasyon vardır. Konik kırıcı genellikle sert malzeme üzerinde ikincil kırıcı olarak kullanılır.

Tipik bir çekiçli değirmende, çekiçlerle donatılmış rotor yüksek hızda döner. Malzeme hem çekiçlerin etkisiyle hem de kırıcı plakalara doğru fırlatılarak ezilir. Malzeme yeterince ezildiğinde makinenin altındaki elek çubuklarının arasından geçer. Çeşitli malzemeler üzerinde kullanılabilir.

Bir darbeli değirmen, bir çekiçli değirmenden, rotorun daha yüksek hızda dönmesi ve makinenin elek çubukları içermemesi bakımından farklıdır.

Malzemenin ateşleme özelliklerine ve istenen ürün tipine bağlı olarak, malzemenin oldukça yakın boyutlu fraksiyonlar halinde elenmesi gerekebilir. Fırın beslemesi, istenen

boyutlarda agrega üretmek için fırından çıkan ürün minimum kırma gerektirecek şekilde boyutlandırılmalıdır.

Beslemeyi fırına hazırlamak için hammadde olarak şeyl veya arduvaz kullanıldığında, kırma ve eleme (Şekil 1.10) işlemleri genellikle gerekli olan tek şeydir. Bu aynı zamanda bazı killer için de geçerlidir. Bununla birlikte, diğer killer, elleçlemeye dayanamayacak kadar yumuşak veya gevrektiler ve ufalanarak çok fazla "incelme" ile sonuçlanırken, diğerleri şişirici gazları hapsetmek için yeterince yoğun değildir, bu da zayıf bir ürünle sonuçlanır. İki veya daha fazla kilin harmanlanması gerekli olabilir ve bu gibi durumlarda kil topak haline getirilebilir veya ekstrüde edilebilir(Escs, 2021).



Şekil 1.10. Çift Katlı Titreşimli Elek

1.6.2.2. Peletleme

Peletleme diski veya tavası, merkezi eksenini etrafında dönen ve disk yüzeyinin üzerinde uzanan bir kenara sahip eğimli bir disktiler (yaklaşık 45 derece). Kenar diske dik olabilir, dışa doğru eğimli olabilir veya kademeli olarak yükseltilir. Disk dönerken hareket, parçacıkların bir su spreyi ve bir kuru malzeme kaplaması ile alternatif olarak ıslatılmasıdır.



Şekil 1.11. Pan Pelletizer

Bu hareket, parçacıkların boyutu kademeli olarak arttıkça bir kar küresi etkisine neden olur. En büyük küreler diskin çevresine doğru hareket eder ve istenilen boyuta ulaştıklarında çemberin üzerinden boşalır. Boyut, diskin eğimine ve dönme hızına, jantın yüksekliğine ve kuru malzeme ile suyun giriş noktalarına bağlıdır(Escs, 2021).

1.6.2.3. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon makinesi, uzunluğu boyunca bir dizi bıçak veya bıçak içeren bir şaftın, kil plastik duruma ulaşana kadar kil veya şeyl ve suyu karıştırdığı yatay bir küvettir. Bıçaklar, karıştırmanın yanı sıra malzemeyi küvet boyunca hareket ettirecek şekilde bir açıyla yerleştirilmiştir. Şaftın ucundaki kapalı bir burgu, plastik kili alır ve bir kalıptan çıkarır. Küvet, bıçaklı iki şaft içerebilir. Zıt yönlerde dönen bu miller, kilin plastisitesi düşük olduğunda kullanılır ve tek milden daha iyi karıştırma ve pug vermeleri gerekir. Makine ayrıca bir vakum odası içerebilir. Plastik kil, küvetin ucundan havanın bir vakum pompasıyla çekildiği bir odaya düşer. Haznenin alt kısmındaki bir burgu, havası alınmış kili kalıp içinden sıkar. Kilin havasının alınması onu daha yoğun hale getirir ve genellikle daha iyi genleşen bir malzeme ile sonuçlanır(Escs, 2021).

Kalıp, delikli bir plaka veya kalın telli bir elek olabilir. Kalıptan çıkan kil akıntıları, döner bir bıçakla kesilir veya kendi ağırlıkları altında kırılır. Ekstrüde peletler diğer makineler tarafından yapılanlardan daha yoğundur ve çoğu durumda daha fazla şişkinliğe neden olur.

Hazırlanan hammaddenin depolanması için gerekli hazırlıklar yapılmalıdır. Genellikle bir vardiyada, tesisi üç vardiya çalışır durumda tutacak kadar hazırlanır. Kırıcıların veya peletleyicilerin küçük onarımlar gerektirmesi durumunda hazırlanan malzeme hazır bulundurulmalıdır. Bu nedenle en az bir günlük üretim için depolama sağlanmalıdır.

Hazırlanan ham peletler, bir dalgalanma haznesinden döner fırına geçer. Dalgalanma kutusu, fırının başarılı bir şekilde çalışması için çok önemli olan sabit bir oranda fırına beslemeye izin verir. Kıl topakları parçalanır ve fırından geçerken topak haline getirilir.

Beslenen peletlerin boyutlandırılması, ürünün kalitesi için çok önemlidir; daha büyük topaklar, eşdeğer şişkinlik sağlamak için daha küçük parçalara göre daha fazla ısı gerektirir. Belirli ham maddeye bağlı olarak, maksimum verimlilik için peletlerin aynı şekilde boyutlandırılması gerekir(Escs, 2021).



Şekil 1.12. Extrusion Machine

1.6.2.4. Döner Fırında Pişirme

Döner fırın, en basit haliyle, boyuna eksenini etrafında dönen, neredeyse yatay bir refrakter hat silindridir. Hammadde üst uca beslenir ve ısı alt uca uygulanır, malzeme ısı akışına ters akım ile hareket eder. Malzeme, uzunluk, çap ve dönüş hızına bağlı olarak

yaklaşık 30 ila 60 dakika içinde, maksimum 1920° ve 2190° F (1050°C ve 1200°C) arasında bir sıcaklığa ısıtılır. Isıtma hızı, fırının uzunluğunun yaklaşık 2/3'ü kadar kademelidir, daha sonra maksimuma ulaşılan kadar hızla artar, böylece parçacıkların içini ısıtır, böylece gazlar camdan oluşan matris tarafından tutulacak şekilde serbest bırakılır.

Döner fırın üretimi ile ilgili temel bilgi kaynakları arasında “Döner Çimento Fırını”, Peray 1986 ve “Keramzit Üretimi” (Döner Fırın Genişletilmiş Clay, Shale and Slate, Onatski OL, 1971 (Rusça)) bulunmaktadır. Mevcut tesislerde kullanılan fırınlar 60 ila 225 ft (18,3 ila 68,6m) arasında değişen çeşitli uzunluklarda ve 6 ila 12 ft (1,8 ila 3,7 m) arasında çaplardadır. Çoğu fırın, tüm uzunluk boyunca bir çaptadır (Şekil 1.11.), ancak bazıları iki çaptadır, daha büyük çap şişkinlik bölgesindedir. Malzeme, daha küçük ön ısıtma bölgesinde, daha büyük şişkinlik bölgesinden daha hızlı hareket eder(Escs, 2021).



Şekil 1.13. Döner Fırın Tesisinin Görünümü

1.7. Genleşmiş Kilin Kullanım Alanları

Genleşmiş şeyl, kil ve arduvaz hafif agreganın üstün nitelikleri birçok uygulamada etkili ve ekonomiktir. Genleşmiş kil kullanan ilk büyük ölçekli ticari projeler, 1918'de United States Fleet Corporation için yapılan birkaç büyük beton geminin inşasıyla başladı. Yaklaşık yüzyıldır Genleşmiş kil, dünya çapında elliden fazla farklı alanda başarıyla uygulanmaktadır. Uygulamaların en dikkat çekenleri arasında beton duvarcılık, yüksek binalar, beton köprü döşemeleri, prekast ve öngerilmeli beton elemanlar, asfalt yol yüzeyleri, toprak düzenleyici ve jeoteknik dolgular ve topraksı tarım sayılabilir. Ayrıca genleşmiş kil bilyeleri, tasarımcılara sabit yük, arazi, sismik koşullar, inşaat programları ve bütçelerin zorluklarını karşılamak için çözümler oluşturma konusunda daha fazla esneklik sağlar.

1.7.1. Yapısal Hafif Beton

Döner fırın ile üretilen genleşmiş kil agrega sahanın ve yapının sürdürülebilirliğine katkıda bulunan çok sayıda uygulamada kullanılmasına izin veren benzersiz özelliklere sahip çevre dostu bir üründür ayrıca genleşmiş kil agregası ile yapılan yapısal hafif beton, binalarda ve açıkta kalan yapılarda ağırlık ve dayanıklılık sorunlarını çözer. Yapısal hafif beton, normal ağırlıktaki betona benzer mukavemetlere sahiptir, ancak tipik olarak % 25 ila % 35 daha hafiftir. Yapısal hafif beton, daha az ölü yük, iyileştirilmiş sismik yapısal tepki, daha uzun açıklıklar, daha iyi yangın dereceleri, daha ince kesitler, azaltılmış kat yüksekliği, daha küçük boyutlu yapısal elemanlar, daha az takviye çeliği ve daha düşük temel maliyetleri sağlayarak tasarım esnekliği ve önemli maliyet tasarrufu sunar. Döner fırın üretimi yapısal hafif agrega, sahanın ve yapının sürdürülebilirliğine katkıda bulunan çok sayıda uygulamada kullanılmasına izin veren benzersiz özelliklere sahip çevre dostu bir üründür. Örnekler, betonda hafif agrega kullanımının malzeme tasarrufu sağladığını göstermiştir. İşçilik ve nakliye maliyetinin yanı sıra betonun performansını ve hizmet ömrünü iyileştirir. Ayrıca, nasıl kullanıldığını göstermiştir.

Genleştirilmiş hafif agrega kullanılan beton, daha iyi termal özelliklere, daha iyi yangın derecelerine, azaltılmış otojen büzölmeye, mükemmel donma ve çözölmeye dayanıklılığına, agrega ve çimento matrisi arasında iyileştirilmiş temas bölgesine sahiptir. Ayrıca daha iyi elastik uyumluluğun bir sonucu olarak daha az mikro çatlamaya, daha yüksek patlamaya dayanıklılığa ve daha iyi şok ve ses emilimi vardır, Yüksek performanslı hafif agrega betonu ayrıca daha az çatlama, gelişmiş kayma direncine sahiptir ve beton pompalama yöntemiyle kolayca yerleştirilir. Bunun yanında hafif betonun düşük ısı iletkenliği, kriyojenik uygulamalar veya yüksek sıcaklıkta petrol depolama yapıları gibi termal olarak hassas uygulamalar için önemli ölçüde daha iyi yalıtım nitelikleri sağlar.

Hafif betonun kullanılmasının önemli bir nedeni de, genellikle bir yapının işlevselliğini, mimari ifadesini veya inşa edilebilirliğini artıran ağırlık azaltma içindir. Binalarda bu, daha ince yangına dayanıklı levhalar, daha uzun açıklıklar, etkileyici çatı tasarımı, daha yüksek binalar, mevcut yapılara eklenen ilave katlar ve kötü zemin koşullarına sahip yerlerde inşa edilirken sağlanır. Ağırlık azaltma, daha küçük bir ayak izi sağlayarak arazi kullanımını optimize eder, bu da çevredeki alanın daha fazla insan dostu olmasını sağlar.

Daha az inşaat malzemesi de kullanılır: Temel yüklerindeki azalma, daha küçük temeller, daha az kazık, daha küçük kazık başlıkları ve daha az takviye ile sonuçlanabilir;

Azaltılmış sabit yükler, daha küçük destek elemanlarına (güverteler, kirişler, kiriş ve iskeleler) neden olabilir. Azaltılmış sabit yük, atalet sismik kuvvetlerinin azalmasına neden olur;



Şekil 1.14. Genleşmiş Kil ile Yapılmış Hafif Beton Kullanılmış Bir Yapı

Köprülerde ise hafif beton kullanımı daha geniş bir köprü güvertesinin (ilave şeritler) mevcut yapısal destekler üzerine küçük değişikliklerle veya hiç değişiklik yapılmadan yerleştirilmesine izin verebilir. İyileştirilmiş inşa edilebilirlik, bir iskelenin bir tarafında hafif betonun ve diğer tarafında eşit ağırlık sağlamak için normal ağırlıklı betonun kullanıldığı ve iskelenin hafif tarafında daha uzun bir açıklık barındırdığı dengeli konsol köprü inşaatı ile sonuçlanabilir. Köprü güvertesi yerleşimlerinde veya kaplamalarında, takviye üzerinde daha fazla örtü sağlamak veya yapıya ilave ölü yük eklemekten daha iyi drenaj sağlamak için güverte daha kalın olabilir. Daha uzun köprü açıklıkları oluşturmak için hafif beton kullanılmış, böylece maliyetli ve estetik açıdan kabul edilemez ayaklara olan ihtiyacı azaltmıştır (Escs, 2021).



Şekil 1.15. Hafif Beton ile Yapılmış Bir Köprü

Daha uzun veya daha büyük prekast elemanlar, toplam ağırlığı arttırmadan üretilir. Bu taşıma sırasında yük başına daha az bağlantı veya daha fazla eleman ile kaldırılması veya dikilmesi daha kolay olan bir sistemde daha az kolon veya payanda elemanı ile sonuçlanır. Nakliye maliyetindeki tasarrufların, hafif beton kullanmanın artan maliyetini çok aştığı belgelenmiş birkaç durum vardır. Bazı prekast tesislerde, optimum beton yoğunluğunu belirlemek için her bir elemanın nakliye maliyeti bilgisayar tarafından değerlendirilir.

Denizcilik uygulamasında, artan izin verilen üst borda yükleri ve hafif beton kullanımından kaynaklanan azaltılmış su çekimi, kuru havuzlardan ve sık nakliye kanallarından daha kolay harekete izin verebilir.

Belirli yoğunluklu beton, tasarım esnekliğini ve proje ekonomisini geliştirmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Belirtilen yoğunluk, 120 lb/ft³ (1920 kg/m³) değerinden daha büyük, ancak tamamen normal ağırlıklı agregalardan oluşan betondan daha düşük denge beton yoğunluklarıyla sonuçlanan, sınırlı miktarda hafif agrega içeren beton olarak tanımlanır. Belirtilen yoğunlukta betonun artan kullanımı, mühendislerin yapısal verimliliği (dayanıklılık-yoğunluk oranı) iyileştirmek için beton yoğunluğunu optimize etme, beton ürün taşıma ve inşaat maliyetlerini düşürme ve çok düşük çimentolu betonun hidratasyonunu iyileştirme kararlarından kaynaklanmaktadır (Escs, 2021).

1.7.2. Yüksek Performanslı Beton Duvar

- Zeminin üstünde ve altında Beton Yığma Birimler (CMU'lar)
- Mimari birimler (bölünmüş yüz, renkli vb.)
- Daha büyük CMU'lar (8x8x24, vb.)
- Beton tuğla (tüm şekiller ve renkler)
- Segmental istinat duvarları
- Gizlilik çitleri ve ses bariyeri duvarları
- Ses emme duvarları
- Diğer (önceden dökülmüş lentolar, gevşek dolgu, çekirdek yalıtımı, döşeme taşları, teras üniteleri, vb.)

1.7.3. Asfalt Kaplama (Kırsal, Şehir ve Otoyol)

- Yüzey işlemleri (talaş contası, conta kaplaması vb.)
- Tesis karışımı conta kaplaması ve açık dereceli sürtünme kaba

- Sıcak karışım yüzeyi kaba
- Mikro yüzey kaplama (bulamaç conta)
- Soğuk karışım (çukur yaması, küçük onarımlar vb.)

1.7.4. Yapısal Beton (Yüksek performans dahil)

- Çelik çerçeveli binalardaki zeminler (metal güverte üzerine doldurun)
- Prekast ve ön gerilmeli elemanlar (kirişler, çift t, eğimli duvarlar, yükseltilmiş erişim döşeme panelleri, kalaslar, domuz kaburgaları, yardımcı tonozlar, borular, köprü güverteleri, süs eşyaları, vb.)
- Betonarme karkas bina ve park yapıları (ardgermeli döşeme sistemleri dahil her türlü)
- Yüzer rıhtımlar, tekneler ve açık deniz platformları
- Köprü tabliyeleri, iskeleler ve AASHTO kirişleri (ön gerilmeli, ardgermeli ve normal güçlendirme)
- Prekast beton üzerine kaplama

1.7.5. Jeoteknik

- Kıyı yapıları
- Peyzaj ve yükseltilmiş plaza dolguları
- Perdeler ve istinat duvarları
- Yapısal onarım ve rehabilitasyon
- Fakir toprakları ve bataklıkları doldurma
- Yalıtım dolgusu ve yalıtımlı yol tabanı
- Sığ temeller
- Yalıtım için veya içerideyken yeraltı borularını ve boru hatlarını kaplamak
- Kararsız toprak koşulları
- Çöp sızıntı suyu drenaj sistemleri

1.7.6. Bahçe Bitkileri Uygulamaları

- Yeşil çatı (yoğun, kapsamlı)
- Bitki yağmur hendeği (Bioswales)
- Toprak düzenleyici (dikim, golf yeşillikleri, saksı toprağı vb.)
- Spor alanları (beyzbol sahaları) ve toprak yollar (koşu, bisiklet, at, stok araba)

- Zemin örtüsü (dekoratif ve yalıtkan)
- Yabani otlarla mücadelede (Herbisit) ve gübre taşıyıcı olarak
- Topraksız tarım (Hidroponik)

1.7.7. Özel Beton

- Ahşap zemin sistemlerinde
- Düz çatılar için çatı dolgusu (yalıtım ve eğim)
- Isıya duyarlı elemanların etrafını yalıtkan dolgu
- Torbalı beton karışımı
- Çimento duvar panosu
- Yapay taş
- Refrakter (şömine kütükleri ve kutuları, baca gömlekleri vb.)
- Fırınlarda, kazanlarda, bacalarda, petrokimyada endüstriyel kullanımlar için yalıtkan refrakter rafine etme vb.
- Ferrocement ve püskürtme beton
- Hayvan ve çevre yapıları (kanalizasyon arıtma vb.)
- Hafif beton çatı kiremitleri

1.7.8. Çeşitli Farklı Kullanımlar

- Kil tuğla için grog
- Yerleşik çatılarda kaplama taşı ve balast
- Buzlu yollar için kaydırmazlık/çekiş kumu
- Atık su arıtma ve su filtrelerinde orta
- Geçirimsiz plastik astarlar için yangın koruması

2. LİTERATÜR TARAMASI

Genleşmiş kil agregaların üretimi, teknik özelliklerinin karşılaştırılması ve yapı malzemesi olarak kullanımı üzerine literatürde birçok çalışma yapılmıştır.

Genleştirilmiş kil agrega üretimi için etkin parametrelerin incelenmesi üzerine yapılmış bir çalışmada, farklı parametrelerin üretimi nasıl etkilediğini belirlemek için üç ayrı alandan örnekler kullanılarak genleşme testleri yapılmıştır. Genleşme testlerinde parametre olarak kil tane boyutu, pelet boyutu, fırın sıcaklığı ve pişirme süresi seçilmiştir. Üretim üzerindeki etkileri ayrı ayrı kanıtlanmıştır. Kil boyutunun küçültülmesinin genleşme üzerinde olumlu, pelet boyutunun küçültülmesinin ise olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca fırın içindeki sıcaklık ve kilin fırında kalma süresinin de elde edilen agrega kalitesi için kritik değerler olduğu belirtilmiş ve optimum üretim için şartlar detaylı olarak anlatılmıştır (Ozguven & Gunduz, 2012). Arıöz ve arkadaşları (Arıöz, 2007) yapmış olduğu bir çalışmada, tuğla ve kiremit yapımında kullanılan kilin kömür ile farklı oranlarda karıştırılıp 1000-1200 °C arasında ki sıcaklıklarda ısıtılmasına tabi tutulması sonucu hafif, genleştirilmiş kil agregaları üretmişler, sonrasında agregaların kitlesel yoğunluk ve su emme özellikleri belirlenmiştir. Isıl işlem sıcaklığının ve kömür katkısı miktarının üretilen agregaların özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan diğer bir çalışmada (L. Gündüz, Kalkan, Ş. O. & Özgüven, A. , 2020) genleşen kil olarak değerlendirilebilecek en önemli sahalardan biri olan Ankara-Kalecik kil sahasının detaylı arazi ve laboratuvar çalışmaları ile endüstriye kazandırılması amaçlanmıştır. Katkısız genleştirme deneyleri sonucunda genleşme oranı 6,3 ve agrega birim hacim ağırlığı 291 kg/m³ olan çok kaliteli bir genleşmiş kil agregası üretiminin mümkün olduğu iddia edilmiştir.

Bo Li, Tung-Chai Ling (Bill) 2016 tarihli makalelerinde iki aşamalı bir ısıtma işleminin etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada kanalizasyon çamuru ve tuzlu kilden hazırlanan Genleşmiş kilin özellikleri araştırılmış ve şu sonuçlar çıkarılmıştır. 1) Arıtma çamurundan ve peletlerden çıkan ana piroliz gazları yanıcı H₂, CH₄ ve CO. Nispeten düşük miktarda CO₂ tespit edildi. Yeterli gazın olması için sinterleme işlemi sırasında ve ayrıca olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması için aleve dayanıklı gazlar, 400 ile 600°C arası piroliz sıcaklıkları tavsiye edilir. 2) Ön ısıtma sıcaklığının artırılması, esas olarak genleşmiş kilin ezilme mukavemetini azaltmıştır. Ön ısıtma süresinin ezilme mukavemeti ve su emme üzerindeki etkisi daha az açık. Parametreler en yüksek ezilme mukavemetini ve en düşük su emilimini için 400°C ön ısıtma sıcaklığı ve 30 dk. bekletme süresi önerilmektedir. 3) Sinterlemenin artmasıyla genleşmiş kilin ezilme

mukavemeti ve yoğunluğu arttı. Bu ürünü üretmek içinde daha yüksek bir sıcaklığın (1150°C) çok önemli olduğunu yansıtır. Yeterli camsı faz ve genleşmiş kilin vitrifiye yüzeyi en düşük su emilimi Sinterleme sıcaklığı 1150°C'ye yükseldiğinde de %1,06 oranında kayıt edilmiştir. 4) Sinterleme işleminde bekleme süresi açısından, daha kısa bir süre (yani 5 dakika) muhtemelen daha iyi kırma gücü üretir. Ancak, kademeli olarak daha uzun bir bekleme süresi olduğunda yoğunluğu ve su emilimini azalır. 5) Genleşmiş kilin büzülmesi ve tutuşma kaybı, esas olarak sinterleme sıcaklığı ile kontrol edildi. Sinterleme süresi yerine sinterleme sıcaklığındaki bir artış beklendiği gibi, hem büzülme hem de tutuşma kaybını arttırdı. 6) Genel sonuçlar, arıtma çamuru ve tuzlu kil kullanmanın uygun olduğunu göstermektedir. Genleşmiş kilin üretimi 30 dakika boyunca 400°C'lik bir ön ısıtma sıcaklığı ve ardından bir düşük yoğunluklu bir genleşmiş killerde etmek için 1150°C'de 15 dakika sinterleme işlemi önerilir. (0,665 g/cm³ yığın yoğunluğu), düşük su emme (%1,06) ve karşılaştırılabilir yüksek mukavemet (11.1 MPa).

Jolanta Latosinska, Maria Zygallo, 2009 tarihli çalışmaların da genleştirilmiş kil üretiminde hammaddeye kanalizasyon çamuru ilavesinin gözeneklilik üzerine etkisini araştırmışlar ve şu sonuçlara ulaşmışlardır;

Agrega hammadde kütlesine eklenen arıtma çamuru gözenekliliğini artırır, agrega üretimi sırasında atık su çamuru ilavesi ile atmosfere kirletici emisyon seviyesi doğal çevre için bir tehdit oluşturmaz, kullanılan çamurun bir sonucu olarak kondüktometrik olarak ölçülen sinter bileşenlerinin çözünürlüğü azaldığı saptanmıştır

Ayrıca genleşmiş kil sinter matrisinden ağır metallerin sızması, izin verilen sınırlar içindedir, arıtma çamurunun bileşimi, özellikle ağır metal içeriği, çamurun tarımsal veya doğal nötralizasyonu durumunda olduğu gibi, agrega üretiminde çamuru işe yaramaz hale getirir, önerilen teknoloji, kanalizasyon çamurunun kullanılması için atıksız bir yöntemdir ve kül madde seramik sinter yapısı içinde yer alır.

Genleşmiş kil agregalarının hafif betonda kullanılabilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada da Ankara- Kalecik çevresinde bulunan genleşen kil yatağından alınan kil örnekleriyle, 900 – 1150 °C de ısıtma işlem sonrası genleşmiş kil agregaları üretilmiştir. Bu üretilen agregalarla hafif beton yapılarak, kırma agregalarla yapılan referans betonla karşılaştırılmıştır. Hafif ve kırma agregaların su emmeleri, taze beton birim ağırlığı ve 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Genleşmiş kil agregalarının su emmesi % 10 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Genleşen killerin 1100°C de 10 dakika ısıtma işlem sonrası iri

agreganın özgül ağırlığı 1,83 olarak saptanmıştır. 1150°C de 10 dakika ısıtılma tabi tutulan iri agregalarda genleşme katsayısı 3,2 kat artmıştır ve özgül ağırlıkları 0,87 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. İnce agreganın özgül ağırlığı 1,89 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. İnce ve iri agregası genleştirilmiş kil agregası kullanımıyla yapılan betonun (1100°C de 10 dakika ısıtılma tabi tutulan numunelerle) taze birim hacim ağırlığı 1759 kg/dm³ olarak tartılmıştır. Genleştirilmiş kil agregasının kullanımıyla birim hacim ağırlık 2000 kg/m³ altına düşürülmüştür. Genleştirilmiş kil agregalarıyla üretilen betonda 28 günlük basınç dayanımı 44,90 MPa olarak ölçülmüştür. Bu basınç dayanımı ile taşıyıcı sistemde kullanılabilecek hafif beton elde edilmiştir. Kıрма agregayla üretilen betonun birim hacim ağırlığı 2435 kg/dm³ olarak tartılmıştır. Kıрма agregayla yapılan normal betonda ki 28 günlük basınç dayanımı 54,5 MPa olarak bulunmuştur(Gökçe, 2007).

Genleştirilmiş kil agregası ile farklı çimento dozajlarında taşıyıcı hafif beton üretim olanakları ve betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, doğal kumun ve genleştirilmiş kil agregasının kullanıldığı beton karışımları tasarlanmıştır. Genleştirilmiş kil agregası ile 1,7 kg/m³ gibi düşük bir yoğunluğa sahip, basınç dayanımı 41,27 MPa olan taşıyıcı hafif beton elde etmenin mümkün olduğu belirlenmiştir. Üretilen hafif beton karışımlarında 450 kg/m³ çimento dozlu betonların en yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu bulunmuştur(Subaşı, 2009). Yapılan bir araştırmada, genleşmiş kil agregaları ile tasarlanmış geleneksel ve hafif yapı betonları arasındaki dayanım ve elastik özellikleri karşılaştırılmıştır(Dilli, Atahan, & Şengül, 2015). Genleşmiş kil agregası ve silis dumanının hafif betonun özellikleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, araştırmacılar (Ahmad, Chen, & Farasat Ali Shah, 2019) ısı yalıtımı, ısıtılma kütlesi ve yapı malzemesi olarak kullanılacak, kendiliğinden akışlı ve enerji verimli hafif agregalı köpük betonun (LAFC) formülasyonu üzerinde yoğunlaşmışlardır.

Bir yapı malzemesi olarak hafif genleşmiş kil agregası hakkında yapılan bir araştırmada, geleneksel çimento esaslı malzemelerde ve ayrıca inorganik polimerlerde (jeopolimerler) yapı malzemelerinin bir parçası olarak kullanılmasına odaklanan daha önce yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, LECA beton ve harcının bazı özelliklerini değiştirmek için eklenen çeşitli malzemeler hakkında bilgi verilmiş ve raporlanmıştır(Rashad, 2018). Piero vd. kendiliğinden şişmeyen killerden hafif beton için genleşmiş kil agrega üretimi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır(Piero & Piero, 2004). Genleşmiş kil agregalı kendiliğinden yerleşen hafif beton üretiminin incelendiği bir araştırmada, hafif agregalı betonun (SCLC) kendi kendine yerleşe bilirliliği analiz edilmiş ve

formülasyonu için izin verilen sınırlar önerilmiştir. SCLC'nin normal titreşimli hafif betona göre daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur(Bogas, Gomes, & Pereira, 2012).

Nkansah vd. PAH'ların (fenantren, floranten ve piren) sudan uzaklaştırılması için bir sorbent olarak hafif genişletilmiş kil agregasının (LECA) kullanımını araştırmışlardır. Araştırmacılar LECA'nın, sulu PAH'ların uzaklaştırılması için alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir(Nkansah, Christy, Barth, & Francis, 2012).

Genleşmiş kilin kullanıldığı diğer bir incelemede, genleşmiş kil granüllerinin birleştirilmiş gözenekli örneklerinin akustik ve akustik olmayan özelliklerinin sistematik bir çalışması sunulmuş ve parçacık boyutunun konsolide genleşmiş killerin akustik performansı üzerindeki etkisi deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır(Vašina, Hughes, Horoshenkov, & Lapčík, 2006).

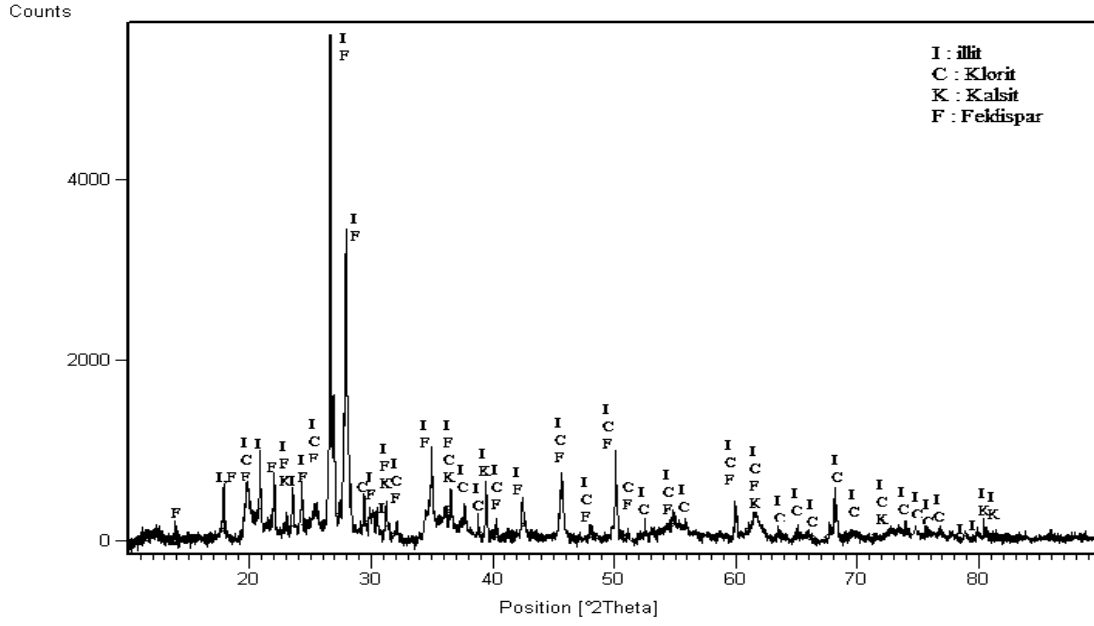
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyallerin Hazırlanışı

Bu çalışmada kullanılan kil örnekleri, Söğüt Toprak Madencilik A.Ş. şirketine ait kil ocağından temin edilmiştir. Kullanılan kilin kimyasal analizleri XRF cihazı ile yapılmış olup Tablo 3.1 de ve XRD grafiği ise Şekil 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3.1. Çalışmada Kullanılan Kil' in Kimyasal Analizi

Bileşik	Yüzde (%)
Ateş kaybı: LOI	6,387
NiO	0,043
CuO	0,026
BaO	0,402
Fe ₂ O ₃	5,601
ZrO ₂	0,048
CaO	2,407
ZnO	0,024
SrO	0,015
TiO ₂	1,292
Al ₂ O ₃	16,885
SiO ₂	59,966
MnO	0,128
MgO	1,501
K ₂ O	1,438
Na ₂ O	3,362
P ₂ O ₅	0,343
SO ₃	0,211



Şekil 3. 1. Çalışmada Kullanılan Kil'in XRD Grafiği

Kil sahasından alınan kil numunesi öncelikle etüvde 105°C de 2 saat kurutuldu (Şekil 3.2).



Şekil 3. 2. Etüvde Kurutulmuş Kil Numuneleri

Kurutulan numuneler daha sonra 250 mikron altında olacak şekilde halkalı öğütücüde öğütüldü. Ayrıca organik madde olarak kullanılan katkı maddesi de aynı şekilde halkalı öğütücüde 250 mikron altına düşürüldü (Şekil 3.3.).



Şekil 3. 3. Halkalı Öğütücüde Kırılmış 250 Mikron Altı Kil

Öğütülmüş olan kil örnekleri belirli oranlarda organik madde ile Tablo 3.2’de belirtilen oranlarında karıştırılarak 5 ayrı karışım hazırlandı (Şekil 3.4). Bu karışımların %23’lük bir nem oranına sahip olabilmesi için, su ilave edildi ve malzeme iyice yoğurularak şekillendirmeye hazır hale getirildi.



Şekil 3. 4. Kil’e Farklı Oranlarda Organik Madde İlave Edilerek Yapılan Karışımlar

Tablo 3. 2. Kil ve Organik Madde Karışım Oranları

	Karışım Oranları	
	Kil (%)	Organik Madde (%)
1.KARIŞIM	100	0
2.KARIŞIM	99	1
3.KARIŞIM	98	2
4.KARIŞIM	97	3
5.KARIŞIM	96	4

Bu hazırlanan 5 ayrı karışım, aşağıdaki makina yardımı ile 8mm'lik peletler haline getirildi (Şekil 3.5.).



Şekil 3. 5. Şekillendirme İçin Kullanılan Makine

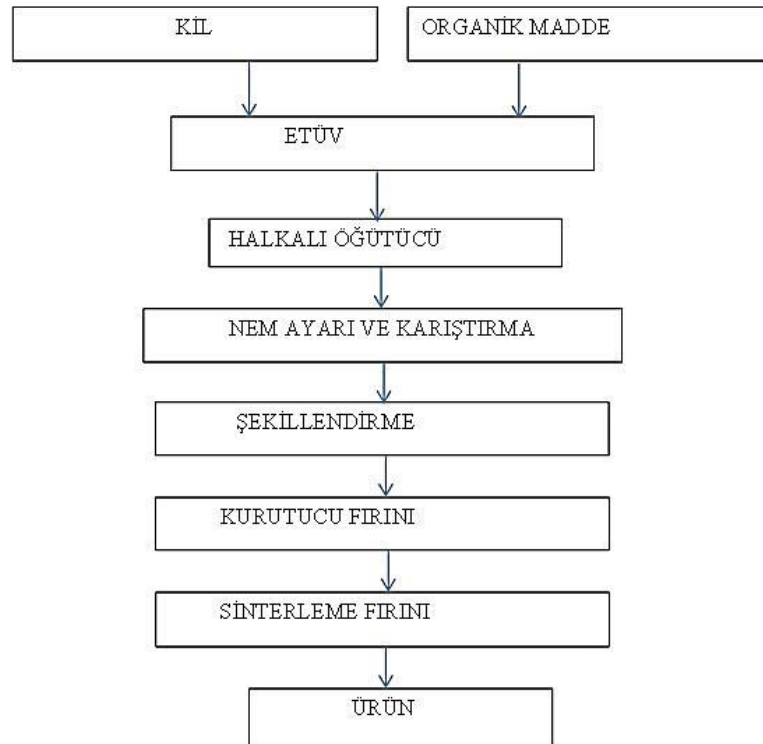
3.2. Kilin Genleştirilmesi

Deney planına göre (Tablo 4.2) hazırlanan peletler, önce farklı sıcaklık ve sürelerde kurutma işlemine tabi tutmak için fırına atıldı, ardından sinterleme işlemi için tekrar fırına konuldu, burada da farklı süre ve sıcaklıklarda örnekler bekletilerek hafif genişmiş kil üretimi gerçekleştirildi.



Şekil 3. 6. Sinterleme Fırını

Genleşmiş kilin laboratuvar ortamında üretim aşaması hammadde sahasından kili almakla başlar. Kullanılacak kil ve organik madde önce Etüvde kurutulur daha sonra halkalı öğütücüde öğütülerek istenilen boyuta indirgenir. Tablo 3.2.’deki karışım oranlarında organik madde ile karıştırılıp su ilavesi ile belirli bir nem oranına getirilen hammadde daha sonraki aşamada şekillendirme yapılarak genleştirme işlemlerine hazır hale getirilmiş olur. Genleştirme işlemi için önce kurutma için kullanılan fırın da daha sonra sinterleme için kullanılan fırına atılarak (Şekil 3.6.) farklı süre ve ısılarda genleştirme işlemine tabi tutulur. Genleşmiş kil bilyesi üretimine ait akım şeması şekil 3.7 de verilmiştir.



Şekil 3. 7. Genleştirilmiş Kil Bilyesi Üretimi Akım Şeması

Elde edilen genleşmiş kil numunelerinde tane yoğunluğu, pişme kaybı, genleşme oranı ve su emme oranı analizleri yapıldı. Daha sonra elde edilen veriler kullanılarak, optimum parametre seviyeleri Taguchi Metodu yardımıyla belirlendi.



Şekil 3. 8. Piknometre Kullanarak, Arşimet Prensibi İle Tane Yoğunluğu Tespiti

Numunelerin tane yoğunlukları Arşimet prensibine göre (Şekil 3.8.) piknometre kullanılarak ölçülmüş ve aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{C-A}{[B+(C-A)]-D} \quad (3.1)$$

Burada;

A: piknometrenin boş ağırlığı,

B: su dolu piknometrenin ağırlığı,

C: Piknometre + numune ağırlığı,

D: piknometre + su + numune ağırlığı'dır.

Her bir sıcaklıktaki numunelerin ham(R_1) ve genleşme sonrası(R_2) çapları kumpas yardımı ile tespit edilmiş, % genleşme miktarı ise aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Genleşme} = \left(\frac{R_1/2}{R_2/2} \right)^3 \quad (3.2)$$

Burada;

R_1 : Peletlerin fırına girmeden önceki çapı,

R_2 : Peletlerin genleşme sonrası çapıdır.

Pişme Kaybı içinde numunelerin ham(m) ve genleşme sonrası(m₁) tartımları alınmış, % pişme kaybı aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$\%Pişme\ Kaybı = \frac{m-m_1}{m} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada;

m: fırına konmadan önce ham peletlerin kütlesi

m₁: fırından çıkartılan genleşmiş kil soğutulduktan sonraki kütlesidir.

Su emme oranının (W) hesaplanmasında, önce kuru genleşmiş kil numuneleri tartılmış (M₁), daha sonra genleşmiş kil numunesi 24 saat suya daldırılıp bekletilmiş ve tekrar tartılmıştır(M₂) (Şekil 3.6.). Su emme oranı (W), 24 saatlik daldırmadan sonra, su emme yüzdesi olarak aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$W = \frac{100 \times (M_2 - M_1)}{M_1} \quad (3.4)$$



Şekil 3. 9. 24 Saat Suda Bekletilen Genleştirilmiş Kil Numunesi

3.3. Taguchi Metodu

Endüstriyel süreçlerin optimizasyonunda, iyi planlanmış ve analiz edilmiş ön üretim deneyleri, ürünlerin kalitesini iyileştirmede ve maliyeti en aza indirmede, analizi sağlıklı yapabilmek için önemli katkı sağladığından dolayı istatistiksel deney tasarımları kullanılmaktadır. Zaman alıcı ve maliyetli olan klasik deney tasarımında; bir faktörün etkisi incelenirken, incelenen faktör dışındaki tüm faktörler sabit tutulup, sadece araştırılan faktör değiştirilmektedir. Oysa istatistiksel deney tasarımında, birçok faktörün aynı anda sistematik olarak değişimi söz konusudur. Faktörlerin etkileri iyi bir şekilde incelendiğinde, sürecin kontrolü için uygun adımlar atılabilir(Şirvancı, 1997). İstatistiksel deney tasarım

yöntemlerinden biri olan Taguchi Yöntemi, en az deney yaparak maliyetleri en düşük seviyede tutma prensibine dayanan bir yöntemdir(Taguchi, 1987). Bu yöntemin diğer istatistiksel deney tasarım yöntemlerinden farkı; bir deneyi etkileyen parametreleri, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen olmak üzere iki grupta incelenmesi ve çok sayıda parametreyi ikiden fazla seviyede incelemeye imkân sağlamasıdır.

Genellikle ürün veya sürecin her birinin performans karakteristiği nominal değer veya hedef değere sahip olmalıdır. Amaç, bu hedef değer etrafındaki değişkenliği azaltmaktır. DeneySEL verilerden belirlenecek optimum çalışma şartları, farklı ortamlarda veya farklı zamanlarda, her zaman aynı veya birbirine yakın performans değerini verebilmelidir. Bunun için kullanılacak optimizasyon kriteri, Taguchi'ye göre performans istatistiğidir. Parametrelerin optimum şartlarının bulunmasında aşağıdaki performans istatistiği formülleri kullanılmaktadır(Küçük, 2005).

Daha büyük daha iyi;

$$SN_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right) \quad (3.5)$$

Daha küçük daha iyi;

$$SN_S = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2 \right) \quad (3.6)$$

Burada;

n: deney tekrar sayısı,

y: parametrenin deneysel olarak bulunan değeridir.(burada y: genleşme oranı veya pışme kaybı vs.).

Eğer bir araştırmada, hedef maksimum değere ulaşmaksa, SN_L değerini maksimum yapan parametre seviyeleri optimumdur. Eğer amaç minimum değeri yakalamaksa SN_S 'yi maksimum yapan parametre seviyeleri optimumdur (Montgomery, 1991). Taguchi yönteminde tespit edilen optimum çalışma şartlarını veren performans değeri,

$$Y_{it} = \mu + X_i + e_i \quad (3.7)$$

Eşitliği yardımı ile tahmin edilir.

Burada;

Y_{it} : i. deneyin tahmin edilen performans değeri,

X_i : i. deneyde kullanılan parametre seviyelerinin toplam etkinlik boyutu,

μ : ortalama ve e_i : deneysel hatadır.

Eşitlik (3.7), ilave modelin uygun olup olmadığını belirlemek için deneysel verileri kullanarak hesaplanan bir tahmindir. Bu yüzden tahmini hata için güven sınırları belirlenmelidir(Phadke, 1989). Tahmini hata, gözlenen Y_{it} ile tahmin edilen $\hat{Y}_{it}$ arasındaki farktır. Tahmini hata için güven aralığı (S_e) aşağıdaki eşitlikler yardımı ile bulunur.

$$S_e = \pm 2 \sqrt{\left(\frac{1}{n_0}\right) \sigma_e^2 + \left(\frac{1}{n_r}\right) \sigma_e^2} \quad (3.8)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{\text{Hata kareleri toplamı}}{\text{Hata için serbestlik derecesi}} \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{n_0} = \frac{1}{n} + \left[\frac{1}{n_{A_i}} - \frac{1}{n} \right] + \left[\frac{1}{n_{B_i}} - \frac{1}{n} \right] + \left[\frac{1}{n_{C_i}} - \frac{1}{n} \right] + \dots \quad (3.10)$$

Burada;

S_e : güven aralığı,

n : yapılan toplam deney sayısı,

n_r : teyit deneyinin tekrar sayısı ve n_{A_i} , n_{B_i} , n_{C_i} , ... A, B, C parametrelerinin i. seviyelerinin sayısıdır. Eğer tahmini hata, bu sınırlar dışında ise, bu modelin uygun olmadığı farz edilir(Phadke, 1989).

Doğrulama deneyi, kontrol parametreleri arasındaki etkileşimlerin varlığını tespit etmek için güçlü bir araçtır. Optimum koşullar altında tahmin edilen yanıt, gözlemlenen yanıtla eşleşmiyorsa, etkileşimlerin önemli olduğu anlamına gelir. Öngörülen yanıt, gözlemlenen yanıtla eşleşirse, etkileşimlerin muhtemelen önemli olmadığı ve toplamsal modelin iyi bir yaklaşım olduğu anlamına gelir(Phadke, Kackar, Speeney, & Grieco, 1983).

3.4. Genleşmiş Kilin Analizinde Kullanılan Yöntemler

3.4.1. X Işınları Floresans Tekniği (XRF)

X-ışınları floresans tekniği (XRF), genel olarak foton madde etkileşmesi sonucu meydana gelen karakteristik X-ışınları ve saçılma fotonlarının nicel ve nitel değerlendirilmesine bağlı olarak uygulanan bir tekniktir. Katı, sıvı, toz durumlarında uygulanabilmektedir. XRF tekniği ile kimyasal bileşimi belirlemede hızlı, duyarlı ve güvenilir

bir şekilde malzemeye zarar vermeden kısa sürede ölçüm yapılmaktadır. Bu nedenle bilimsel ve teknolojik araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Çalış Açıkbaz, 2020).

X-Işınları Floresans Spektrometresi ile: Si, Al, Ti, Mn, Mg gibi ana element oksitleri yüzde (%) ağırlık cinsinden (MnO, MgO vb.)

Rb, Ba, Sr gibi eser elementleri,

Cr, Ni, Co, Cu ve Zn gibi geçiş elementlerini,

La, Ce, Pr, Nd gibi nadir toprak elementlerinin ppm düzeyinde analiz edilir.

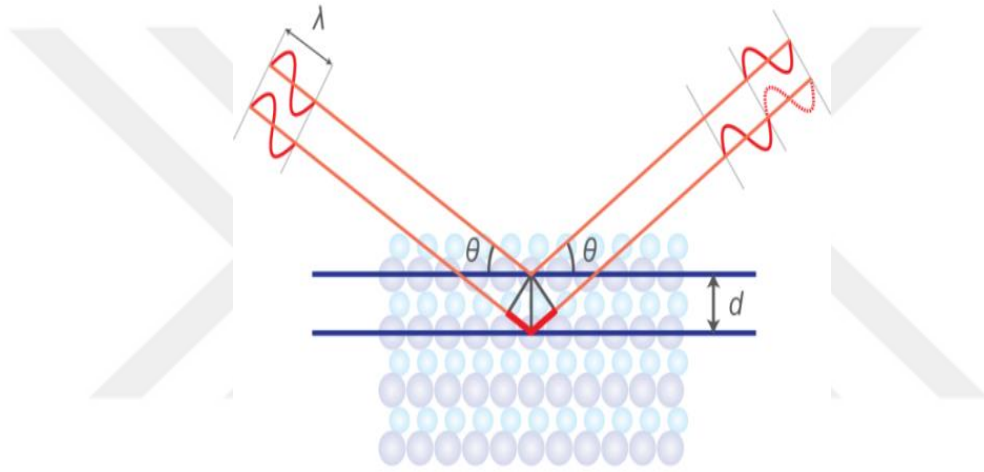
Atom numarası 9 ile 92 arasında olan elementlerin kantitatif analizini yapar. Atom numarası 9'un altında olan elementleri inceleyemez. XRF genelde 50kV ve 50mA'da çalışır.

Numuneden çıkan floresans radyasyon mümkün olduğu kadar şiddetli olmalıdır. Böylece kısa zamanda hassas ve doğru bir şekilde floresans radyasyon ölçülebilir. Numuneden çıkan radyasyonun şiddeti, X-ışını tüpünden gelen ana radyasyonun şiddetine, dalga boyuna ve element miktarına bağlıdır. X ışını tüpü seçimi, tespit edilecek elementlere göre değişir. Wolfram x ışını tüpü, ağır metallerde yüksek şiddette floresans radyasyon verir. Buna karşılık krom tüpü hafif metaller için daha uygundur. Floresans analizinde, ölçülen dalga boyu $0,2\text{\AA}^{\circ}$ - $20\text{\AA}^{\circ}$ aralığında değişmektedir. Alt sınır esas itibarı ile tüpe uygulanan voltaj ile sınırlıdır. Üst sınır ise cihaza bağlı olarak değişmekte ve uzun dalga boylu floresans radyasyonun geçtiği ortam (hava, sayaç penceresi) tarafından absorplanma derecesine bağlıdır. Absorbsiyon, bu bakımdan XRF ile tespit edilebilen hafif elementleri sınırlamaktadır. Eğer, spektrometre havada çalışıyorsa saptanabilen en hafif element Ti ($Z=22$, $K\alpha=2,75\text{\AA}$)'dur. X-ışını yolu, He gazı ile doldurulursa absorbsiyon azalır ve Al saptanabilen en hafif element ($Z=13$, $K\alpha=8,3\text{\AA}$) olur. Vakumlu ticari spektrometrelerde ise daha düşük sınıra (F) ($Z=9$, $K\alpha=18,3\text{\AA}$) ulaşılır (Çalış Açıkbaz, 2020).

3.4.2. X-Işınları Difraksiyonu Tekniği(XRD)

Kristal yapı, üç boyutlu uzayda düzgün tekrarlanan bir deseni temel alan bir atomik yapıya sahiptir. Bu nedenle, katıların kristal yapısı, yapıda bulunan atom gruplarının ya da moleküllerin katıya özgü olacak şekilde geometrik düzende bir araya gelmesi ile oluşur. İlk kez Max van Laue tarafından kristal yapı ve yapı içerisindeki atomların dizilişleri X-ışını kırınım desenleri kullanılarak incelenmiştir. Katıların kristal yapılarını incelemek için en çok kullanılan kırınım tekniği X ışını kırınımıdır. Bu tekniğin sıkça kullanılmasının 2 ana sebebi vardır. Bunlar; 1. X-ışınlarının dalga boyları, yoğunlaştırılmış maddedeki (condensed

matter) atomik mesafeler ölçüsündedir ve bu özellik, yapısal araştırmalarda kullanılmalarını sağlar. 2. X-ışını kırınım teknikleri, incelenen numuneyi değiştirmez. Katı malzemelerin incelenmesinde kullanılan X-ışınlarının dalga boyları, atomlar arası mesafelerle kıyaslanabilir büyüklükte olup yaklaşık olarak 0,5 Å ile 2,5 Å arasında değişir. X-ışınları kristal yapı üzerine düşürüldüğünde, ışınlar katı yüzeyinden küçük geliş açılarıyla tam yansımaya uğrarlar ve ışınlar kristaldeki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılırlar. Kristal yapıdaki bu saçılımlar kırınım olarak adlandırılır ve kırınım çok sayıda atomu içeren saçılmalardan meydana gelir. X ışınlarının kristal yapıda kırınımı Bragg Kanunu ile açıklanır ve Bragg kanunun en basit şekli ile $n\lambda = 2d\sin\theta$ formül ile verilir (Şekil 4). (Çalış Açıkbaş, 2020)



Şekil 3. 10. Bir Kristalde X Işını Kırınımı

Modern X-ışını cihazlarında, kırınıma uğrayan ışının kırınım açısını ve şiddetini ölçecek ışınım sayıcılar bulunur. Böylece kırınım açısı (2θ)'nın, kırınıma uğrayan ışının şiddetine göre değişimini veren kırınım deseni elde edilir. Desen üzerindeki pik genişliklerine ve zemin şiddetine bakılarak malzemenin kristalleşmesi hakkında bilgi edinilebilir. Kısaca; X-Işınları difraksiyonu tekniği(XRD) kataloğunda yer alan tüm malzemelerin faz yapısı, kimyasal kompozisyonu, tane boyutu, latis parametresi, yapıdaki değişimleri, kristal yönelmesi, atom pozisyonları hakkında bilgi veren bir sistemdir. Basitçe malzemenin faz (mineralojik) analizi hakkında bilgi verir(Çalış Açıkbaş, 2020).

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

4.1. Genleşmiş Kil Üretiminde Optimum Şartların Belirlenmesi

4.1.1. Ortogonal Deney Tasarımının Belirlenmesi

Bu çalışmada katkı maddesi olarak organik bir madde kullanılarak üretilen genleşmiş kil bilyelerinin optimum şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu deneylerde genleşmiş kil üretiminin optimum seviyelerinin belirlenmesinde 5 parametre ve her bir parametre için 5 seviye olmak üzere $L_{25} (5^5)$ Taguchi faktöriyel fraksiyonel deney tasarımı planı seçilmiş olup, parametreler ve seviyeleri Tablo 4.1 de ve deney planı Tablo 4.2 de verilmiştir.

Tablo 4. 1. Tasarımın Parametre ve Seviyeleri

	Parametreler	Seviyeler				
		1	2	3	4	5
A	Organik Madde (%)	0	1	2	3	4
B	Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	150	200	300	400	500
C	Ön Isıtma Süresi (Dakika)	1	3	5	7	9
D	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	1050	1100	1150	1200	1175
E	Sinterleme Süresi (Dakika)	5	7	9	11	13

Tablo 4. 2. Tasarımın Deney Planı

Dene y No	A	B	C	D	E	Organik madde (%) A	Ön Isıtma Sıcaklığı (°C) B	Ön Isıtma Süresi (Dak.) C	Sinterleme Sıcaklığı (°C) D	Sinterleme Süresi (Dak.) E
1	1	1	1	1	1	0	150	1	1050	5
2	1	2	2	2	2	0	200	3	1100	7
3	1	3	3	3	3	0	300	5	1150	9
4	1	4	4	4	4	0	400	7	1200	11
5	1	5	5	5	5	0	500	9	1175	13
6	2	1	2	3	4	1	150	3	1150	11
7	2	2	3	4	5	1	200	5	1200	13
8	2	3	4	5	1	1	300	7	1175	5
9	2	4	5	1	2	1	400	9	1050	7
10	2	5	1	2	3	1	500	1	1100	9
11	3	1	3	5	2	2	150	5	1175	7
12	3	2	4	1	3	2	200	7	1050	9
13	3	3	5	2	4	2	300	9	1100	11
14	3	4	1	3	5	2	400	1	1150	13
15	3	5	2	4	1	2	500	3	1200	5
16	4	1	4	2	5	3	150	7	1100	13
17	4	2	5	3	1	3	200	9	1150	5

18	4	3	1	4	2	3	300	1	1200	7
19	4	4	2	5	3	3	400	3	1175	9
20	4	5	3	1	4	3	500	5	1050	11
21	5	1	5	4	3	4	150	9	1200	9
22	5	2	1	5	4	4	200	1	1175	11
23	5	3	2	1	5	4	300	3	1050	13
24	5	4	3	2	1	4	400	5	1100	5
25	5	5	4	3	2	4	500	7	1150	7

4.1.2. Deney Tasarımı Sonuçları

Tablo 4.2 de verilen deney planına göre yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.3’de verilmiştir. Çıktıların (pişme kaybı, genleşme oranı, tane yoğunluğu, su emme oranı) marjinal ortalama değerleri ise (4.1) eşitliği ile hesaplanmış ve Tablo 4.4, Tablo 4.5, Tablo 4.6 ve Tablo 4.7 de verilmiştir. Ayrıca oluşturulan grafiklerde (Şekil 4.1.)-(Şekil 4.20.) verilmiştir.

$$Y_m = \sum_{j=1}^n \frac{x_{ij}}{n} \quad (4.1)$$

x_{ij} : bir parametrenin i seviyesindeki parametre çıktıları

n: i seviyedeki deney sayısı

i: parametre seviyesi

j: i seviyesindeki deney numarası

Tablo 4. 3. Tasarımın Deney Planı ve Sonuçları

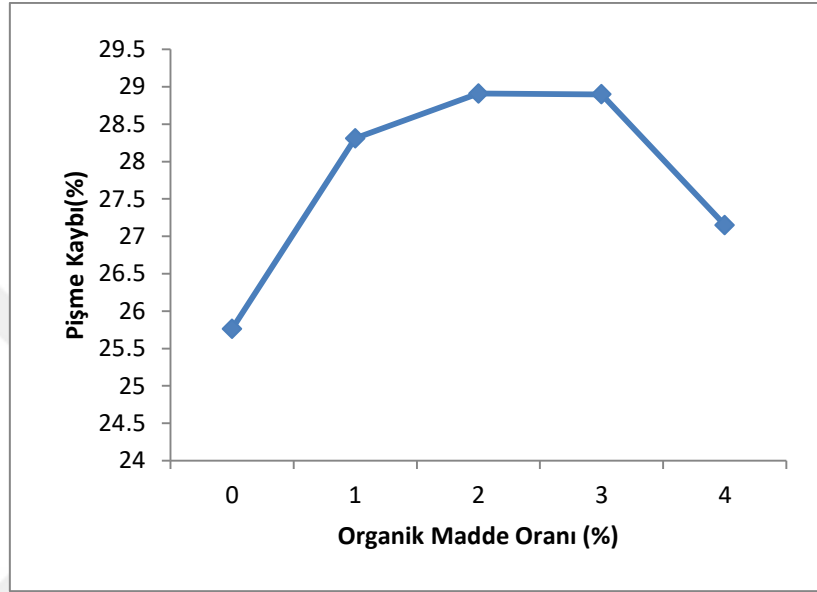
Deney No	A	B	C	D	E	Ort. Pişme Kaybı (%)	Ort. Genleşme Oranı (%)	Ort. Tane Yoğunluğu	Ort. Su emme oranı (%)
1	1	1	1	1	1	27	0,670	1,532	13,00
2	1	2	2	2	2	27	0,670	1,481	8,390
3	1	3	3	3	3	23	0,670	1,469	7,640
4	1	4	4	4	4	25	1,000	1,576	6,660
5	1	5	5	5	5	27	0,670	1,369	7,190
6	2	1	2	3	4	28	1,424	0,880	6,130
7	2	2	3	4	5	29	1.424	0.713	3,730
8	2	3	4	5	1	29	0,670	1,770	11,00

9	2	4	5	1	2	26	1,000	1,890	12,14
10	2	5	1	2	3	29	1,000	1,693	11,94
11	3	1	3	5	2	30	1,953	0,810	9,830
12	3	2	4	1	3	29	1,953	0,650	13,35
13	3	3	5	2	4	29	0,670	1,620	9,590
14	3	4	1	3	5	30	2,600	0,670	7,350
15	3	5	2	4	1	27	0,670	1,559	5,440
16	4	1	4	2	5	29	2,600	0,700	10,32
17	4	2	5	3	1	30	4,291	0,640	9,400
18	4	3	1	4	2	30	3,375	0,590	3,430
19	4	4	2	5	3	27	1,0000	1,268	15,23
20	4	5	3	1	4	28	1,0000	1,549	13,18
21	5	1	5	4	3	28	4,2910	0,530	2,240
22	5	2	1	5	4	23	2,5996	0,750	8,230
23	5	3	2	1	5	30	1,1289	0,870	12,68
24	5	4	3	2	1	27	0,6699	1,435	12,63
25	5	5	4	3	2	27	0,6699	1,496	6,430

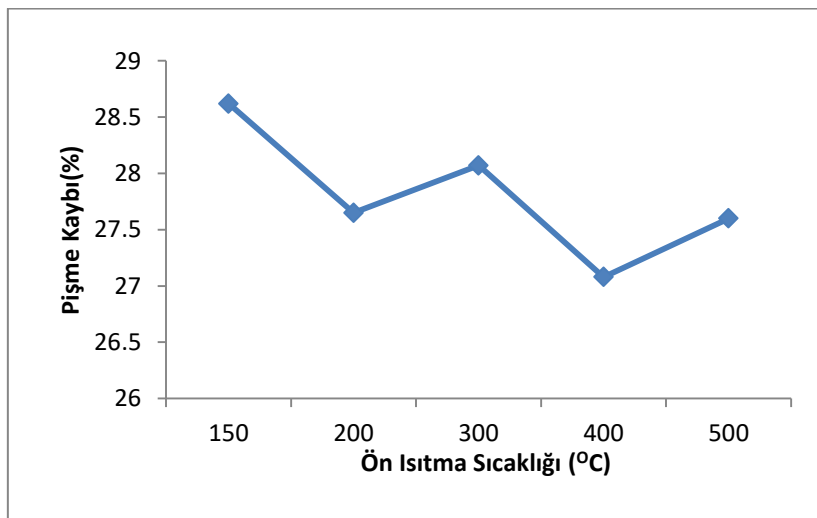
Tablo 4. 4. Pişme Kaybı İçin Marjinal Ortalama Değerler

Parametreler	Seviyeler	Ym
A: Organik Madde (%)	1	25,76
	2	28,31
	3	28,91
	4	28,90
	5	27,15
B: Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	1	28,62
	2	27,65
	3	28,07
	4	27,08
	5	27,60
C: Ön Isıtma Süresi (Dakika)	1	27,84
	2	27,86
	3	27,22
	4	27,97
	5	28,14
D: Sinterleme Sıcaklığı (°C)	1	28,02
	2	28,37
	3	27,70

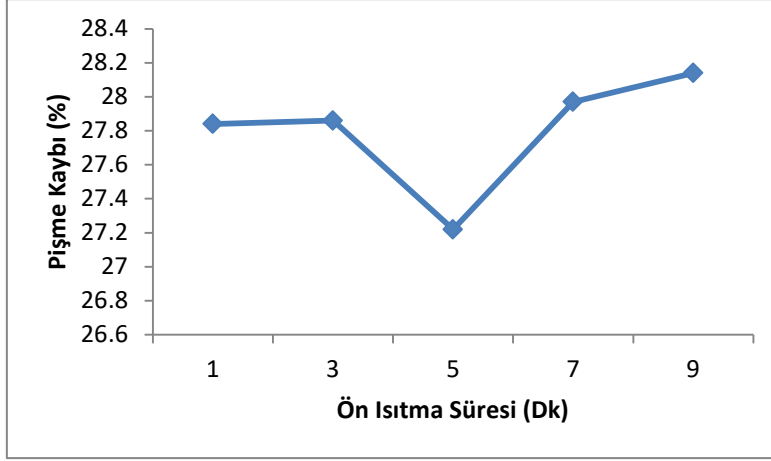
	4	27,77
	5	27,17
E: Sinterleme Süresi (Dakika)	1	27,75
	2	28,10
	3	27,56
	4	26,76
	5	28,86



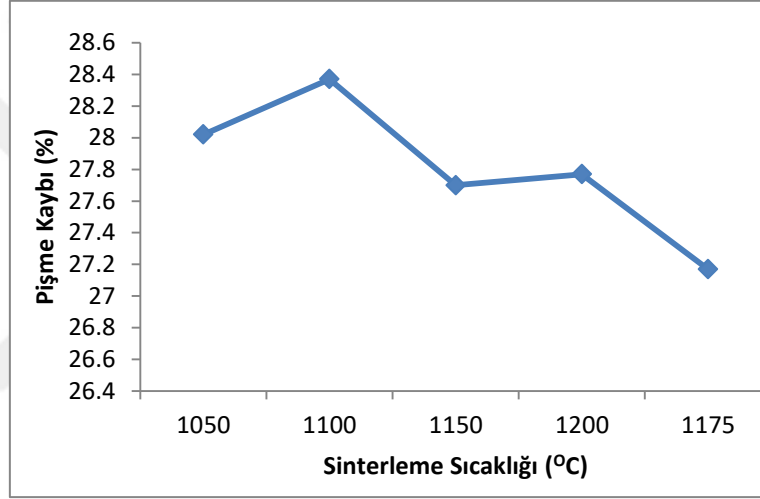
Şekil 4. 1. Organik Madde Miktarının Piştirme Kaybına Etkisi



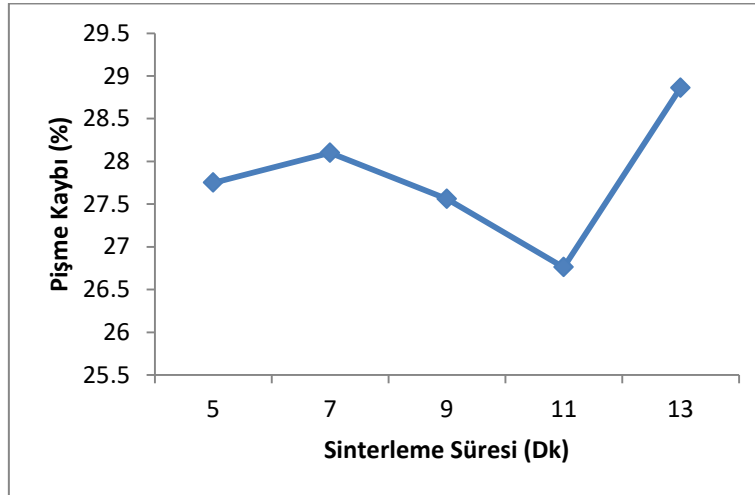
Şekil 4. 2. Ön Isıtma Sıcaklığının Piştirme Kaybına Etkisi



Şekil 4. 3. Ön Isıtma Süresi Pişme Kaybına Etkisi



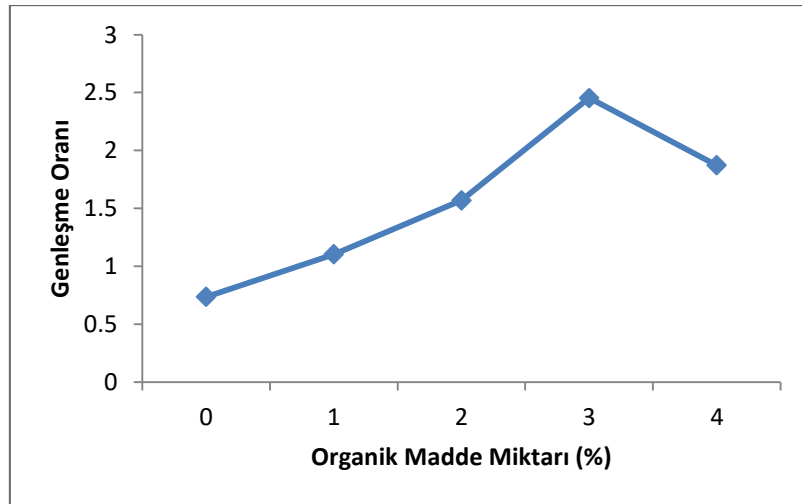
Şekil 4. 4. Sinterleme Sıcaklığının Pişme Kaybına Etkisi

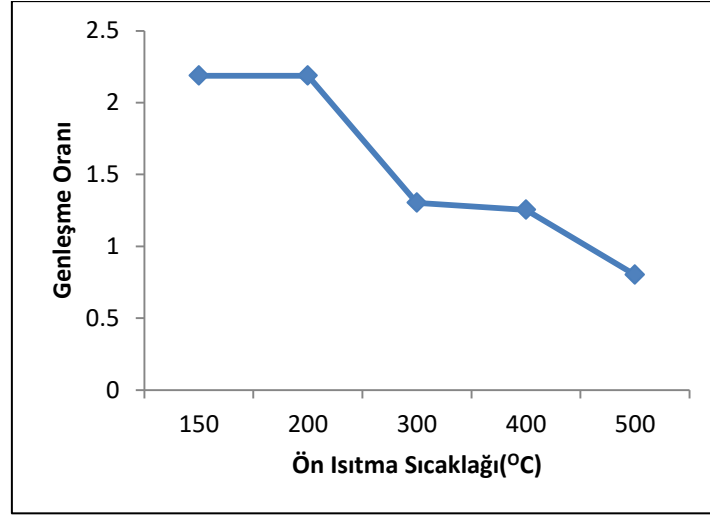


Şekil 4. 5. Sinterleme Süresinin Pişme Kaybına Etkisi

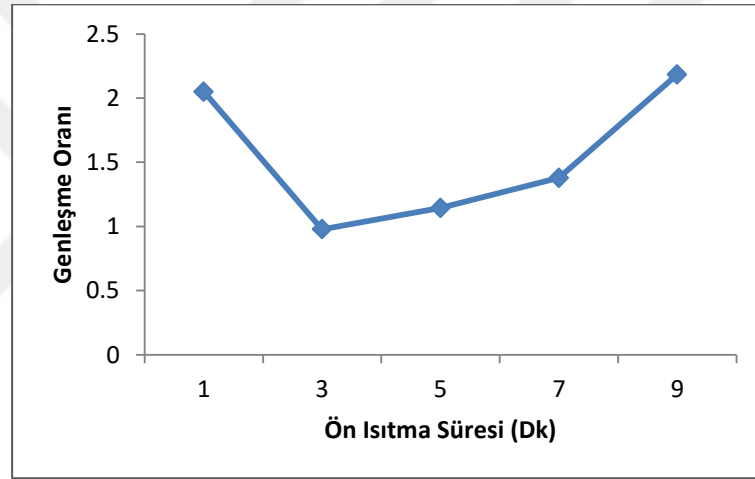
Tablo 4. 5. Genleşme Oranı İçin Marjinal Ortalama Değerler

Parametreler	Seviyeler	Ym
A: Organik Madde (%)	1	0,7359
	2	1,1035
	3	1,5691
	4	2,4531
	5	1,8719
B: Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	1	2,1875
	2	2,18752
	3	1,3027
	4	1,2539
	5	0,8020
C: Ön Isıtma Süresi (Dakika)	1	2,0488
	2	0,9875
	3	1,1434
	4	1,3785
	5	2,1844
D: Sinterleme Sıcaklığı (°C)	1	1,1504
	2	1,1219
	3	1,9309
	4	2,1520
	5	1,3785
E: Sinterleme Süresi (Dakika)	1	1,3941
	2	1,5336
	3	1,7828
	4	1,3387
	5	1,6844

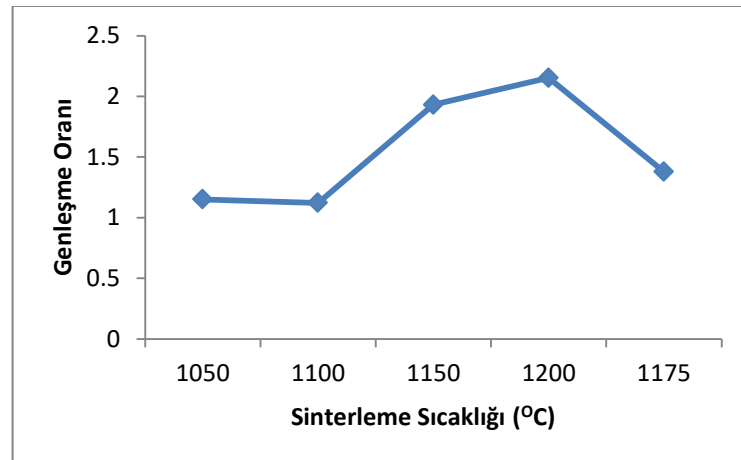
**Şekil 4. 6.** Organik Madde Miktarının Genleşme Oranına Etkisi



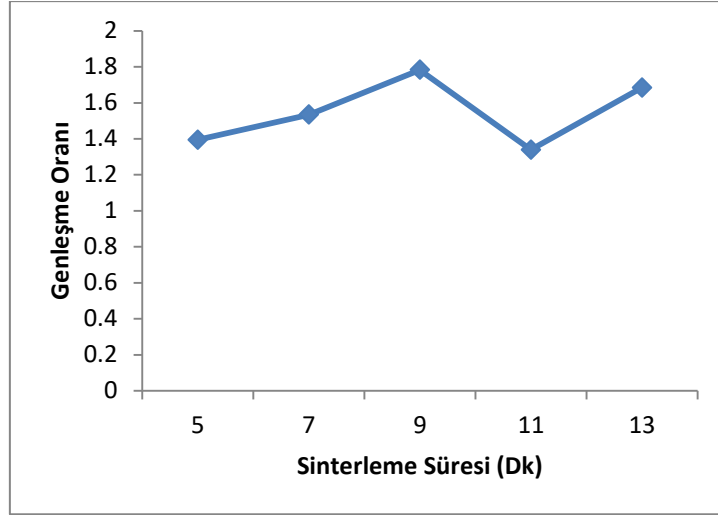
Şekil 4. 7. Ön Isıtma Sıcaklığının Genleşme Oranına Etkisi



Şekil 4. 8. Ön Isıtma Süresinin Genleşme Oranına Etkisi



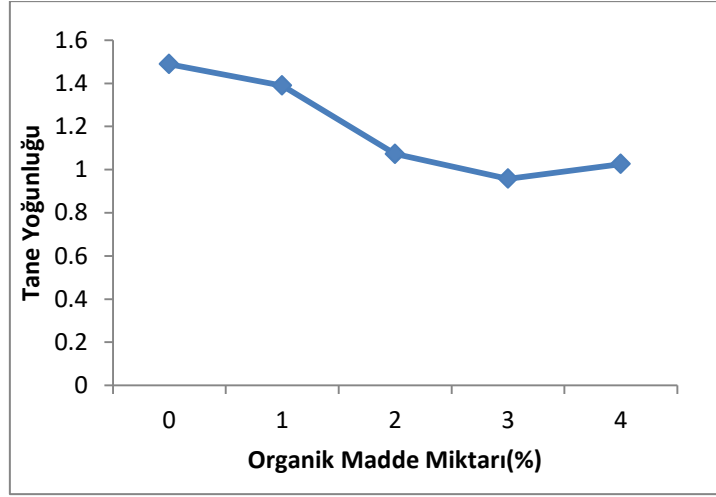
Şekil 4. 9. Sinterleme Sıcaklığının Genleşme Oranına Etkisi



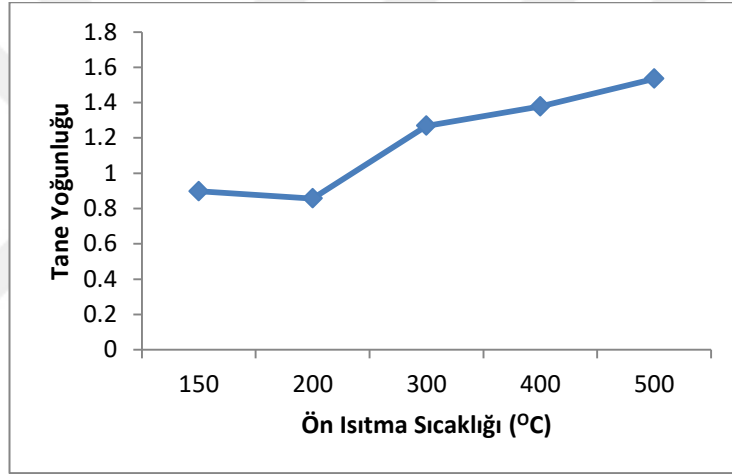
Şekil 4. 10. Sinterleme Süresinin Genleşme Oranına Etkisi

Tablo 4. 6. Tane Yoğunluğu İçin Marjinal Ortalama Değerler

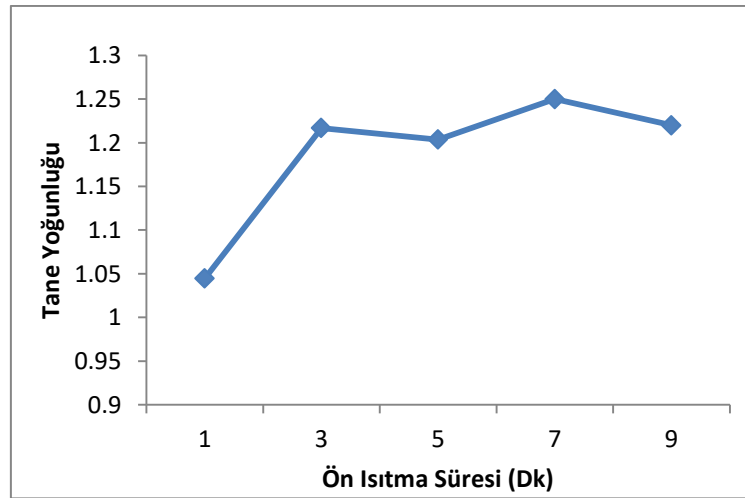
Parametreler	Seviyeler	Ym
A: Organik Madde (%)	1	1,4887
	2	1,3894
	3	1,0729
	4	0,9577
	5	1,0261
B: Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	1	0,8972
	2	0,8564
	3	1,2687
	4	1,3779
	5	1,5346
C: Ön Isıtma Süresi (Dakika)	1	1,0445
	2	1,2168
	3	1,2036
	4	1,2500
	5	1,2199
D: Sinterleme Sıcaklığı (°C)	1	1,3081
	2	1,3909
	3	1,0375
	4	0,9978
	5	1,2005
E: Sinterleme Süresi (Dakika)	1	13964
	2	1,2587
	3	1,1250
	4	1,2815
	5	0,8732



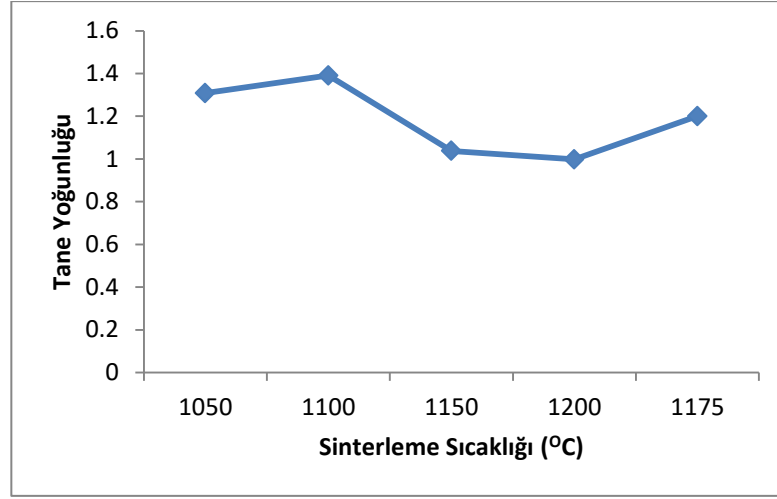
Şekil 4. 11. Organik Madde Miktarının Tane Yoğunluğuna Etkisi



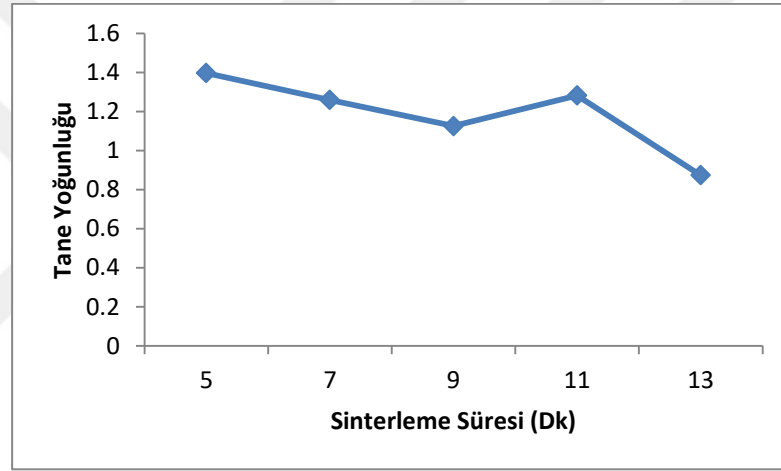
Şekil 4. 12. Ön Isıtma Sıcaklığının Tane Yoğunluğuna Etkisi



Şekil 4. 13. Ön Isıtma Süresinin Tane Yoğunluğuna Etkisi



Şekil 4. 14. Sinterleme Sıcaklığının Tane Yoğunluğuna Etkisi

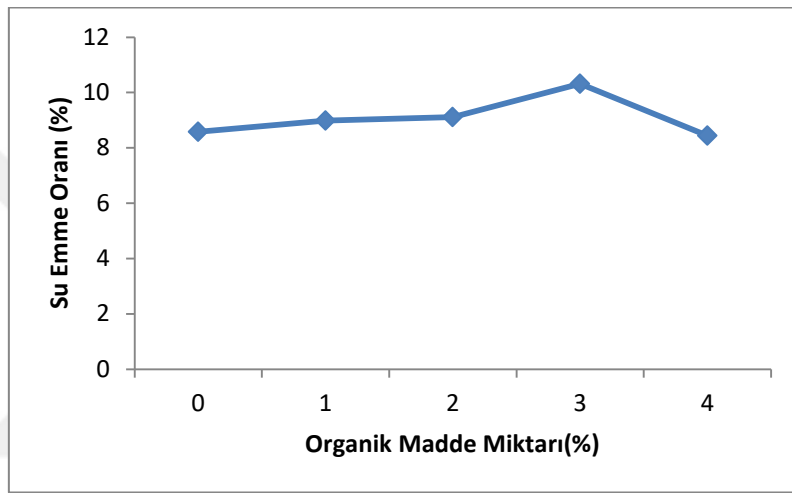


Şekil 4. 15. Sinterleme Süresinin Tane Yoğunluğuna Etkisi

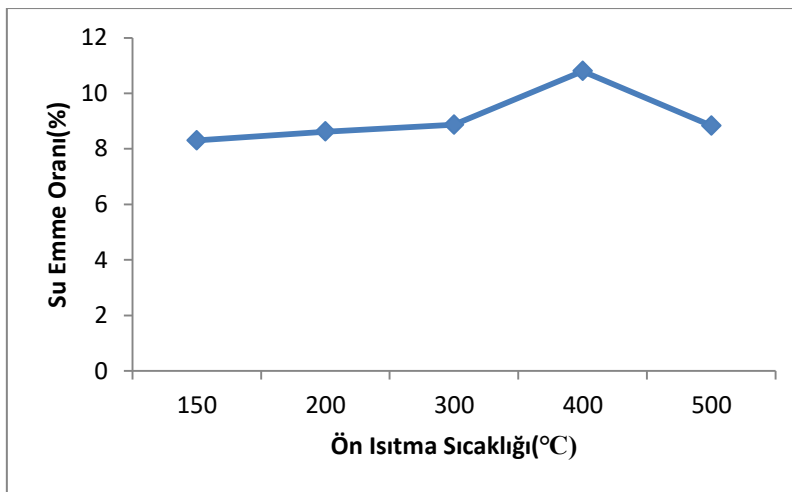
Tablo 4. 7. Su Emme Oranı İçin Marjinal Ortalama Değerler

Parametreler	Seviyeler	Ym
A: Organik Madde (%)	1	8,578
	2	8,985
	3	9,109
	4	10,312
	5	8,439
B: Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	1	8,302
	2	8,620
	3	8,867
	4	10,801
	5	8,834
C: Ön Isıtma Süresi (Dakika)	1	8,788
	2	9,573
	3	9,401
	4	9,550

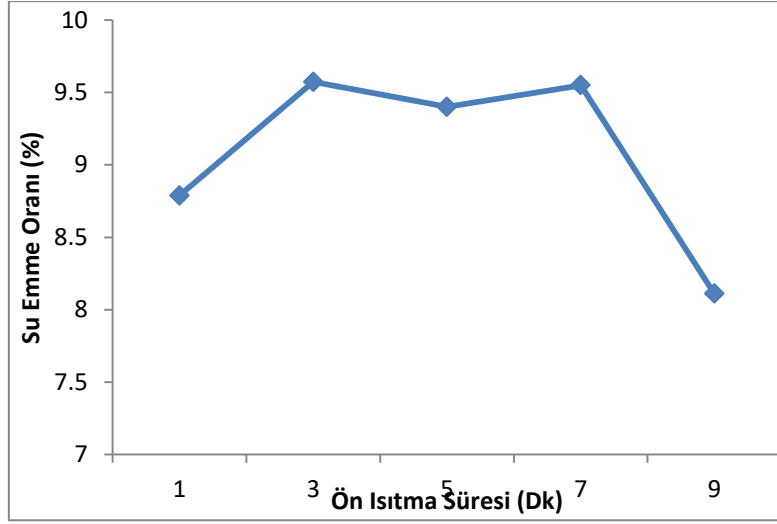
	5	8,111
D: Sinterleme Sıcaklığı (°C)	1	12,867
	2	10,573
	3	7,390
	4	4,299
	5	10,294
E: Sinterleme Süresi (Dakika)	1	10,292
	2	8,043
	3	10,077
	4	8,758
	5	8,250



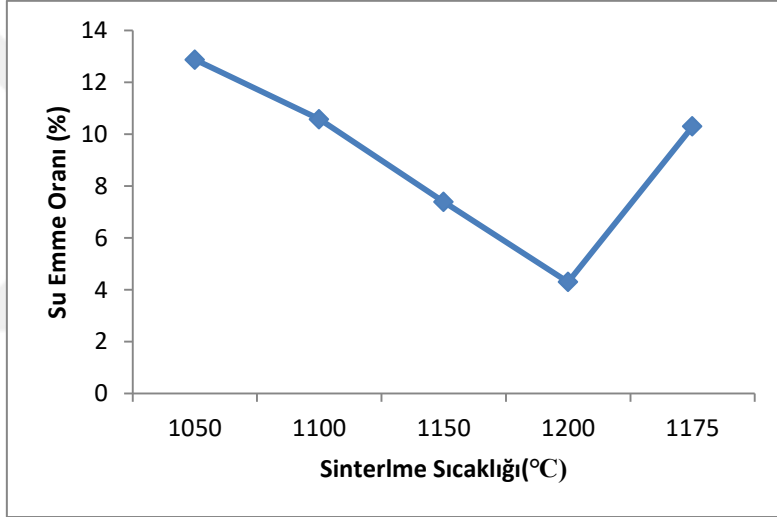
Şekil 4. 16. Organik Madde Miktarının Su Emme Oranına Etkisi



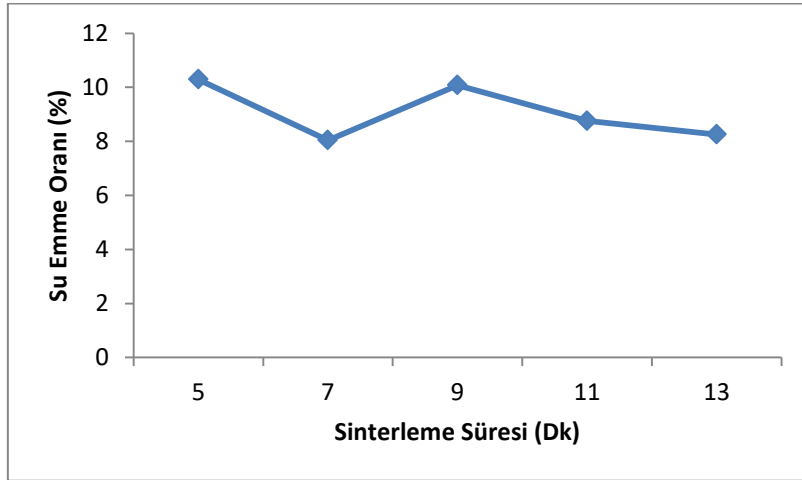
Şekil 4. 17. Ön Isıtma Sıcaklığının Su Emme Oranına Etkisi



Şekil 4. 18. Ön Isıtma Süresinin Su Emme Oranına Etkisi



Şekil 4. 19. Sinterleme Sıcaklığının Su Emme Oranına Etkisi



Şekil 4. 20. Sinterleme Süresinin Su Emme Oranına Etkisi

4.1.3. Varyans Analizleri

Genleşmiş kil üretiminin optimum şartlarının belirlenmesinde ve varyans analizlerinin yapılmasında MINİTAB R13 yazılımı kullanılmıştır. Varyans analiz hesaplamalarında aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$SS_A = \frac{\sum (A_i)^2}{n} - M, \quad SS_B = \frac{\sum (B_i)^2}{n} - M, \dots, \quad SS_Y = \frac{\sum (Y_i)^2}{n} - M \quad (4.2)$$

$$M = \frac{\sum (A_i + B_i + \dots Y_i)^2}{N} \quad (4.3)$$

$$SD_A = (A \text{ parametresinin seviye sayısı} - 1) \quad (4.4)$$

A, B,...,Y : Parametreler

A_i : A parametresinin i seviyesi

n : Her bir seviyede yapılan deneyin tekrar sayısı

N : Toplam deney sayısı

SD : Parametrelerin serbestlik derecesi

$$MS_A = \frac{SS_A}{SD_A}, \quad MS_B = \frac{SS_B}{SD_B}, \quad (4.5)$$

$$SD_T = N - 1 \quad (4.6)$$

$$SD_{Hata} = SD_T - \sum SD_i \quad (4.7)$$

$$SS_{Hata} = SS_T - \sum (SS_A + SS_B + \dots) \quad (4.8)$$

$$SS_T = \sum Y_i^2 - M \quad (4.9)$$

$$MS_{Hata} = \frac{SS_{Hata}}{SD_{Hata}} \quad (4.10)$$

$$F_A = \frac{MS_A}{MS_{Hata}} \quad (4.11)$$

Parametrelerin etkin olup olmadıkları, deneysel olarak bulunan F Deneysel değeri ile F_{Tablo} değerlerinin karşılaştırılmasıyla tespit edilmiştir. Eğer $F_{Deneysel} > F_{Tablo}$ ise, ilgili parametre performans değeri üzerinde etkindir. Eğer $F_{Deneysel} < F_{Tablo}$ ise parametre performans değeri üzerinde etkin değildir. Tasarım deneyleri için yapılan varyans analizleri genleşme oranı için Tablo 4.8’de, pişme kaybı için Tablo 4.9, tane yoğunluğu için tablo 4.10 ve su emme oranı için ise tablo 4.11’de verilmektedir.

Tablo 4. 8. Optimizasyon Deneyi İçin Varyans Analizi (Genleşme Oranı İçin)

Parametreler	Serbestlik Derecesi SD _i	Kareler Toplamı SS _i	Kareler Ortalaması MS _i	F _{Deneyisel}	Etkinlik (%)
A Organik Madde (%)	4	17,8160	4,45399	20,20	32,41
B Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	4	15,2114	3,80286	17,25	27,68
C Ön Isıtma Süresi (Dakika)	4	11,7257	2,93141	13,30	21,34
D Sinterleme Sıcaklığı (°C)	4	8,7973	2,19933	9,98	16,01
E Sinterleme Süresi (Dakika)	4	1,4143	0,35356	1,60	2,57
Hata	29	6,3938	0,22048	-	-
Toplam	49	61,3585	-	62,33	-

$$F_{\text{Tablo}(4.29)_{0,95}}=2,70, F_{\text{Tablo}(4.29)_{0,99}}=4,05$$

Tablo 4. 9. Optimizasyon Deneyi İçin Varyans Analizi (Pişme Kaybı İçin)

Parametreler	Serbestlik Derecesi SD _i	Kareler Toplamı SS _i	Kareler Ortalaması MS _i	F _{Deneyisel}	Etkinlik (%)
A Organik Madde (%)	4	72,992	18,2479	10,25	59,56
B Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	4	13,233	3,3083	1,86	10,81
C Ön Isıtma Süresi (Dakika)	4	4,878	1,2194	0,68	3,95
D Sinterleme Sıcaklığı (°C)	4	7,809	1,9523	1,10	6,39
E Sinterleme Süresi (Dakika)	4	23,618	5,9044	3,32	19,29
Hata	29	51,639	1,7807		
Toplam	49	174,168			

$$F_{\text{Tablo}(4.29)_{0,95}}=2,70, F_{\text{Tablo}(4.29)_{0,99}}=4,05$$

Tablo 4. 10. Optimizasyon Deneyi İçin Varyans Analizi (Tane Yoğunluğu İçin)

Parametreler	Serbestlik Derecesi SD _i	Kareler Toplamı SS _i	Kareler Ortalaması MS _i	F _{Deneyisel}	Etkinlik (%)
A Organik Madde (%)	4	27,4574	6,86436	24,21	39,21
B Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	4	19,3020	4,82549	17,02	27,57
C Ön Isıtma Süresi (Dakika)	4	1,999	0,49998	1,76	2,85
D Sinterleme Sıcaklığı (°C)	4	5,1264	1,28159	4,52	7,32
E Sinterleme Süresi (Dakika)	4	16,1412	4,03531	14,23	23,05
Hata	29	8,2236	0,28357		
Toplam	49	78,2505			

$$F_{\text{Tablo}(4.29)_{0,95}}=2,70, F_{\text{Tablo}(4.29)_{0,99}}=4,05$$

Tablo 4. 11. Optimizasyon Deneyi İçin Varyans Analizi (Su Emme Oranı İçin)

Parametreler	Serbestlik Derecesi SD_i	Kareler Toplamı SS_i	Kareler Ortalaması MS_i	$F_{Deneyse}$	Etkinlik (%)
A Organik Madde (%)	4	21,920	5,480	7,50	3,93
B Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	4	38,831	9,708	13,28	6,97
C Ön Isıtma Süresi (Dakika)	4	15,910	3,977	5,44	2,85
D Sinterleme Sıcaklığı (°C)	4	437,550	109,388	149,66	78,48
E Sinterleme Süresi (Dakika)	4	43,289	10,822	14,81	7,77
Hata	29	21,196	0,731		
Toplam	49	578,696			

$$F_{Tablo(4.29)_{0,95}}=2,70, F_{Tablo (4.29)_{0,99}}=4,05$$

Tablo 4.8 incelendiğinde sinterleme süresi dışındaki tüm parametrelerin $F_{Deneyse}$ değerlerinin F_{Tablo} değerlerinden büyük olduğu görülmektedir. Bu da optimizasyondaki seçilen sinterleme süresi dışındaki tüm parametrelerin, performans değeri üzerinde oldukça etkili olduğu anlamına gelmektedir. Her bir parametrenin etkinliği $F/\Sigma F$ denklemden yaklaşık olarak belirlenmiştir. (Levent, Kaya, Kocakerim, Yiğit, & Küçük, 2007). Burada en etkin parametrenin organik madde miktarının olduğu açıkça görülmektedir.

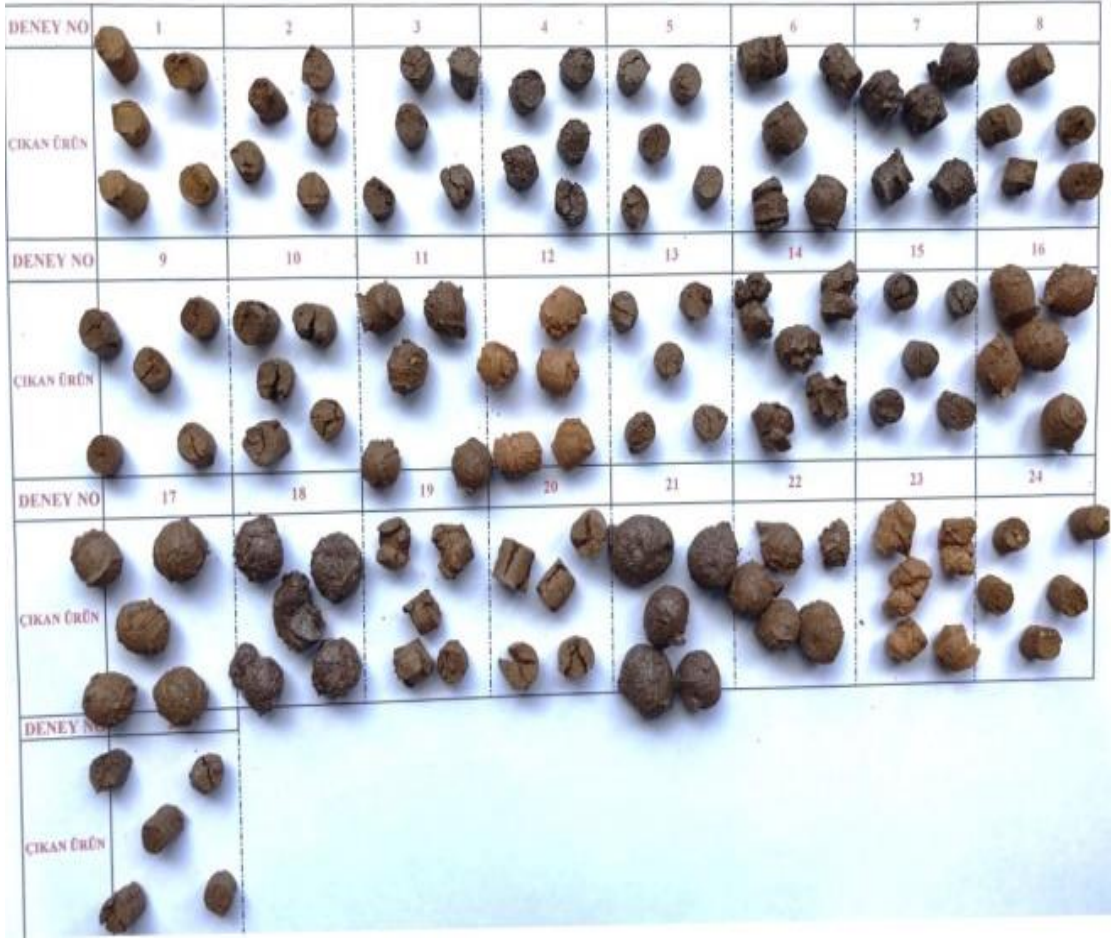
4.2. Üretilen Genleşmiş Killer ve Özellikleri

Çalışmalar sonucunda üretilen genleşmiş kil numuneleri Şekil 4.21 de ve XRF ile yapılan kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.12.'de verilmiştir. Burada eser miktarda bulunan elementler analiz edilmemiştir. Ayrıca her bir deneyde elde edilen genleşmiş kilin tane yoğunluğu 530 kg/m^3 ila 1890 kg/m^3 aralığında değişmekte olup, optimum şartlardaki tane yoğunluğu 702 kg/m^3 olarak bulunmuştur.

Tablo 4. 12. Çalışmada Üretilen Genleşmiş Kil' in Kimyasal Analizi

Bileşik	Yüzde (%)
Ateşte kayıp: LOI	0,09
Fe_2O_3	7,19
CaO	3,09
TiO_2	1,00
Al_2O_3	17,46

SiO ₂	63,60
MgO	2,02
K ₂ O	2,92
Na ₂ O	0,86



Şekil 4. 21. Deneyler Sonucunda Üretilmiş Genleşmiş Kil Bilyeleri

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

5.1. Optimizasyon Verilerinin Değerlendirilmesi

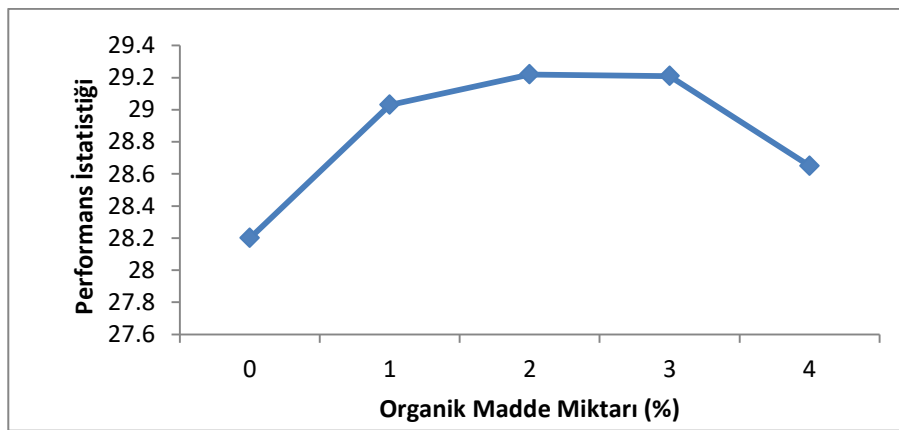
Optimizasyon deneylerinde parametrelerin pişme kaybı, genleşme oranı, tane yoğunluğu ve su emme oranı üzerine etkileri beş parametre ve beş seviye kullanılarak incelenmiştir. Parametrelerin optimizasyon kriteri üzerindeki etkileri belirlenirken, pişme kaybı ve genleşme oranı için “en büyük en iyi”, tane yoğunluğu ve su emme oranı için “en küçük en iyi” durumu için geliştirilen performans istatistiği kullanılmıştır.

5.1.1. Parametrelerin Performans İstatistiği Üzerine Etkileri

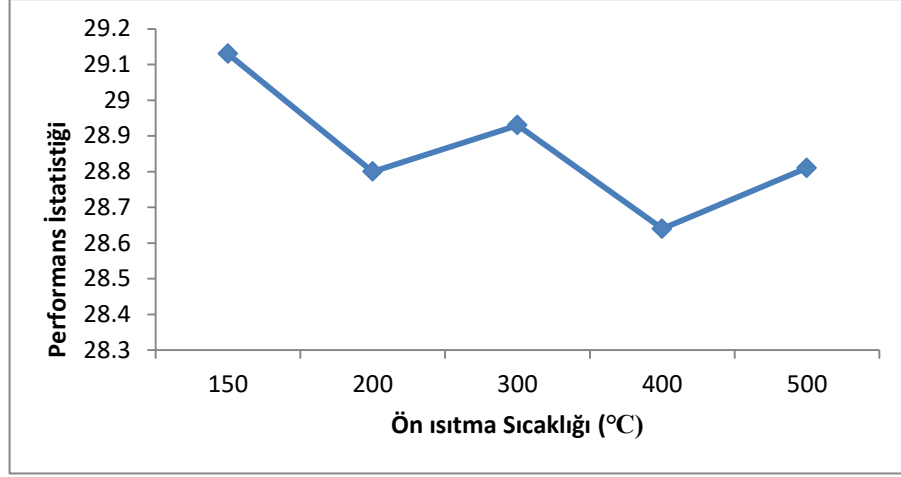
Performans istatistiği olarak en büyük en iyi durumunun kullanıldığı optimizasyon işlemi için pişme kaybı için performans istatistiği değerleri Tablo 5.1 de verilmiş ve grafik olarak da şekil 5.1-5.5 de verilmiştir.

Tablo 5. 1. Pişme Kaybı İçin Performans İstatistiği Değerleri

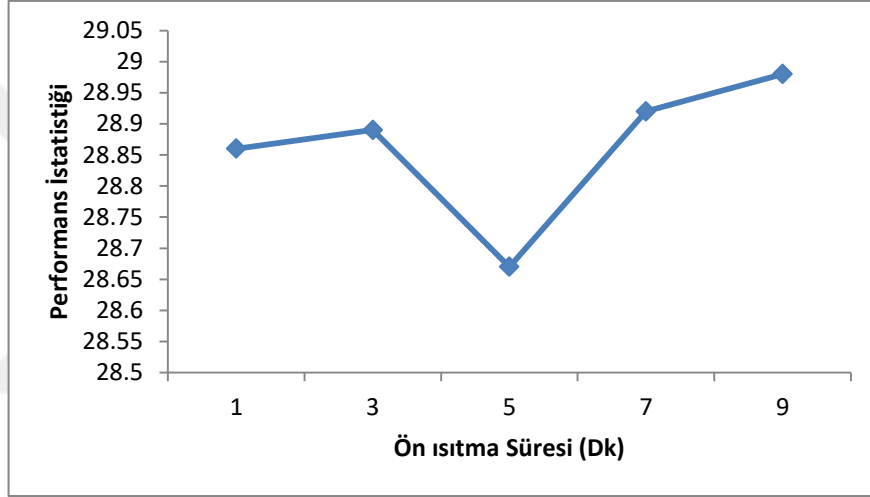
Seviyeler	Parametreler				
	A	B	C	D	E
1	28,20	29,13	28,86	28,94	28,86
2	29,03	28,80	28,89	29,05	28,96
3	29,22	28,93	28,67	28,81	28,77
4	29,21	28,64	28,92	28,86	28,52
5	28,65	28,81	28,98	28,65	29,20



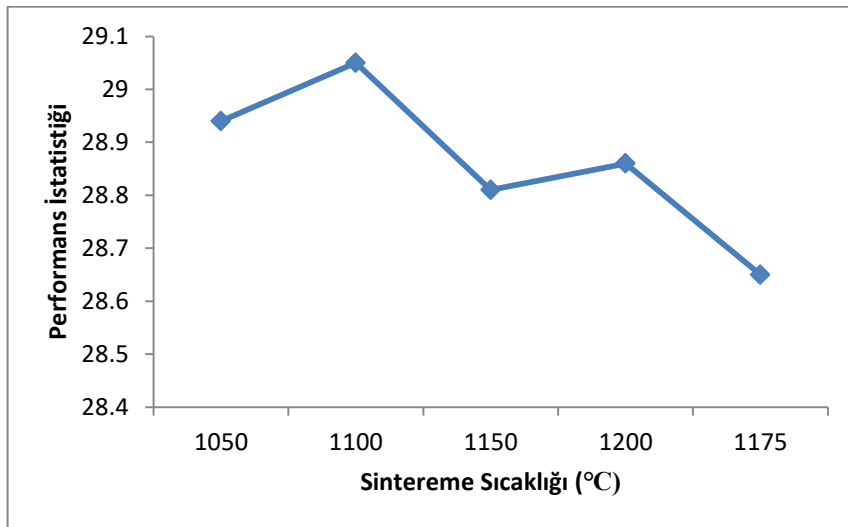
Şekil 5.1. Organik Madde Miktarının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



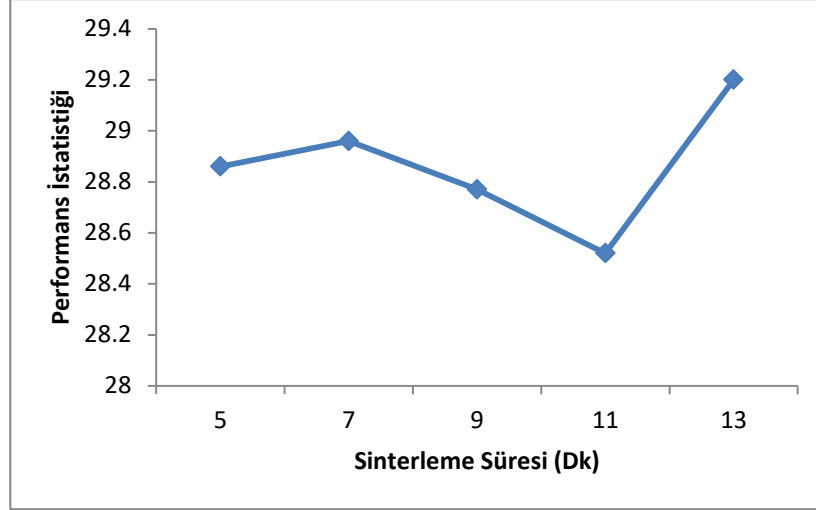
Şekil 5.2. Ön Isıtma Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



Şekil 5.3. Ön Isıtma Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



Şekil 5.4. Sinterleme Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi

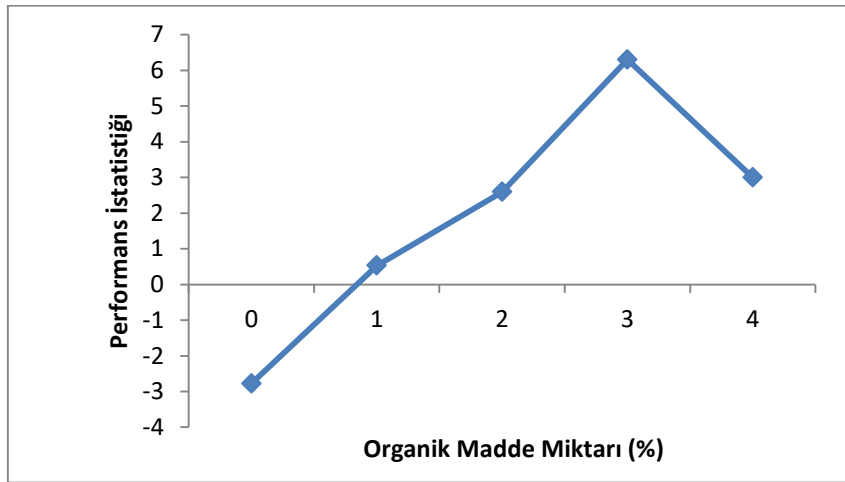


Şekil 5.5. Sinterleme Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi

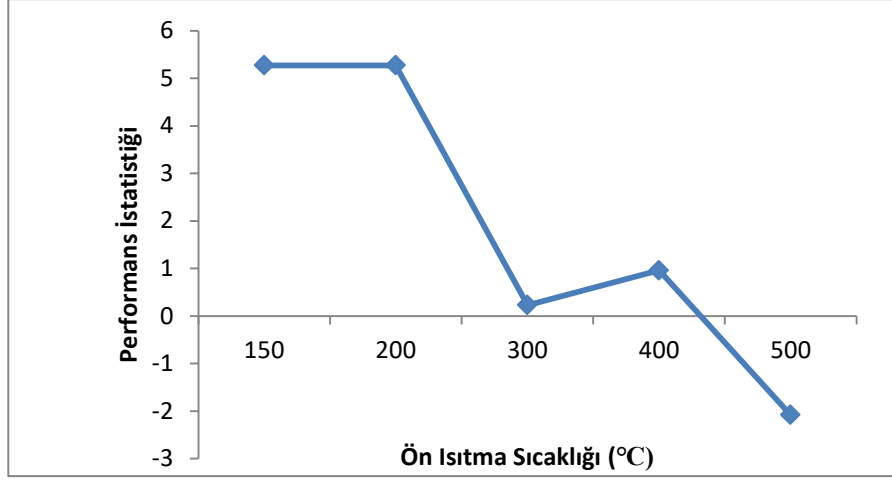
Performans istatistiği olarak en büyük en iyi durumunun kullanıldığı optimizasyon işlemi için genişleme oranı için performans istatistiği değerleri Tablo 5.2 de verilmiş ve grafik olarak da Şekil 5.6-5.10 da verilmiştir.

Tablo 5. 2. Genişleme Oranı İçin Performans İstatistiği Değerleri

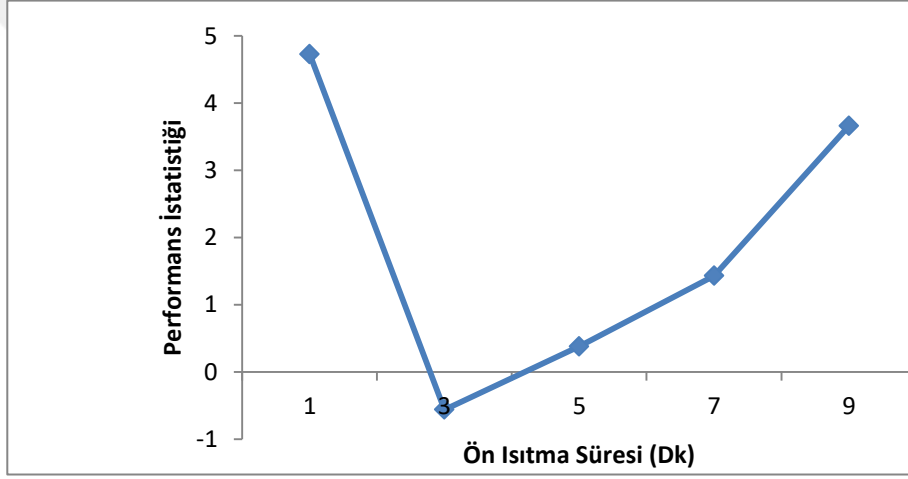
Seviyeler	Parametreler				
	A	B	C	D	E
1	-2,7836	5,2707	4,7365	0,6776	-0,2534
2	0,5318	5,27077	-0,5673	-0,4281	1,8842
3	2,5937	0,2360	0,3849	3,4119	2,9973
4	6,3030	0,9637	1,4307	4,5613	1,5776
5	3,0087	-2,0877	3,6687	1,4307	3,4478



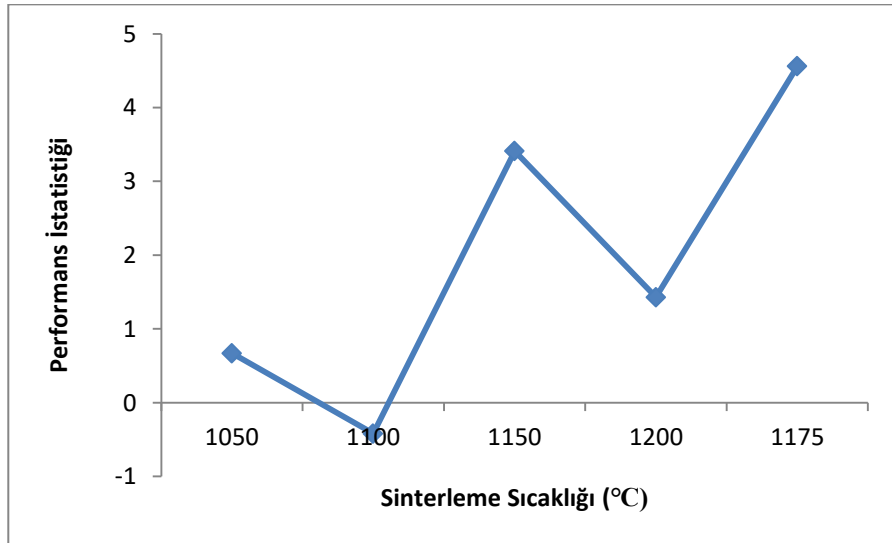
Şekil 5.6. Organik Madde Miktarının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



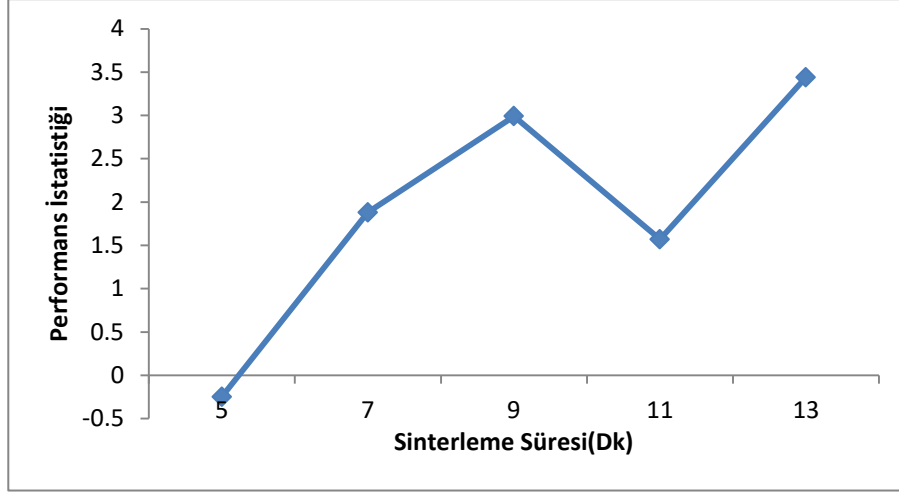
Şekil 5.7. Ön Isıtma Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



Şekil 5.8. Ön Isıtma Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



Şekil 5.9. Sinterleme Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi

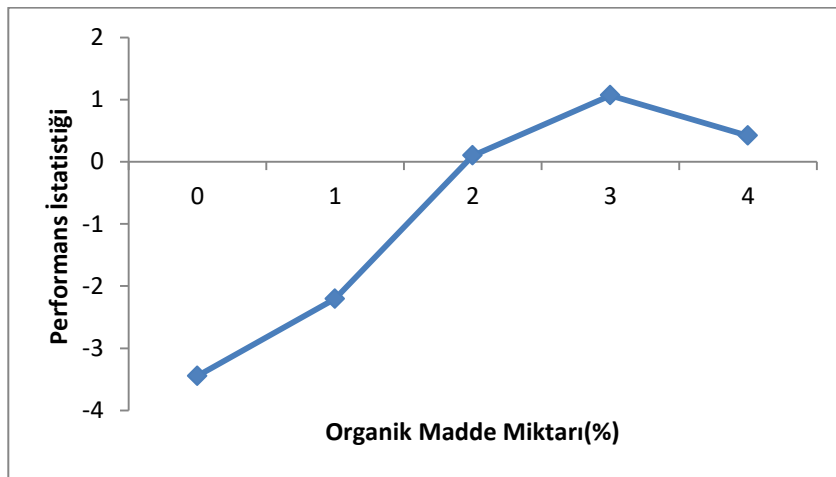


Şekil 5.10. Sinterleme Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi

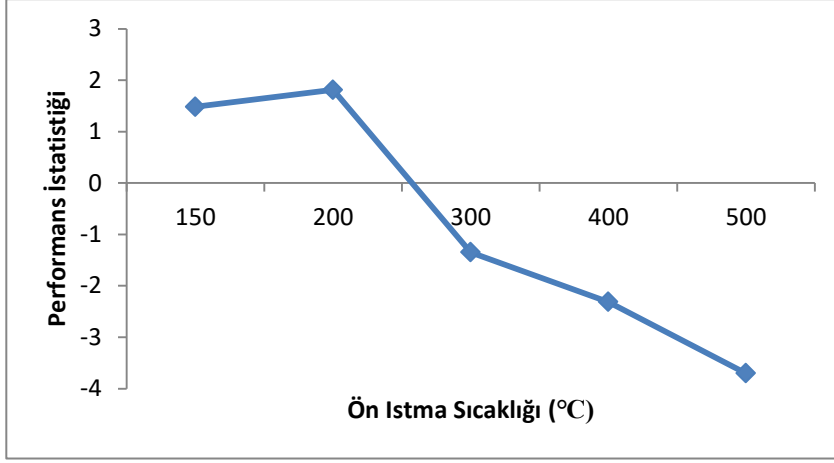
Performans istatistiği olarak en küçük en iyi durumunun kullanıldığı optimizasyon işlemi için tane yoğunluğu için performans istatistiği değerleri Tablo 5.3 de verilmiş ve grafik olarak da Şekil 5.11-5,15 da verilmiştir.

Tablo 5. 3. Tane Yoğunluğu İçin Performans İstatistiği Değerleri

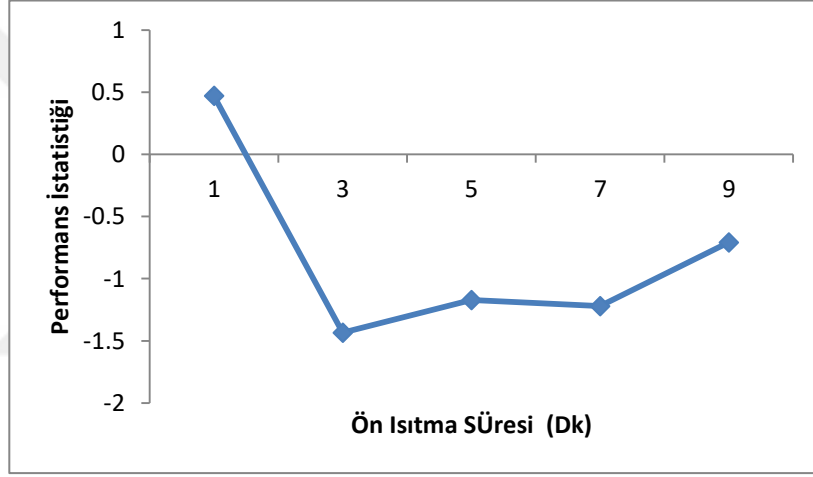
Seviyeler	Parametreler				
	A	B	C	D	E
1	-3,44550	1,48098	0,46897	-1,69360	-2,43115
2	-2,20405	1,81224	-1,43436	-2,5000	-1,21544
3	0,09879	-1,34663	-1,17151	0,25791	-0,20295
4	1,06579	-2,31183	-122057	1,01677	-1,70566
5	0,41853	-3,70120	-0,70897	-1,14683	1,48876



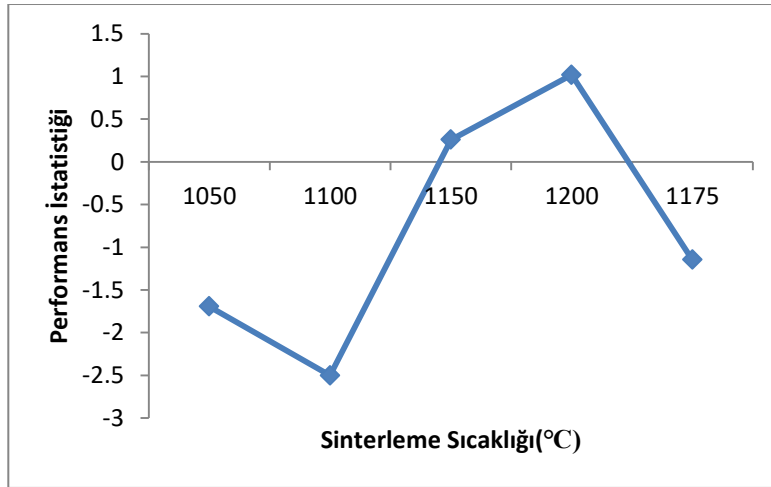
Şekil 5. 11. Organik Madde Miktarının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



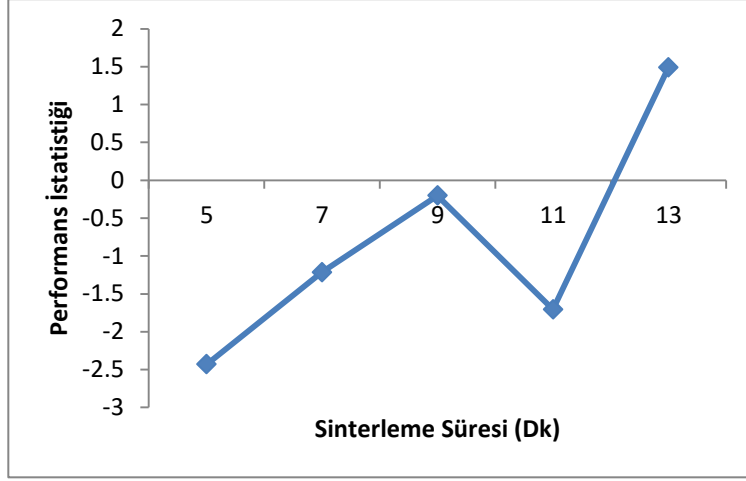
Şekil 5.12. Ön Isıtma Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



Şekil 5.13. Ön Isıtma Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



Şekil 5.14. Sinterleme Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi

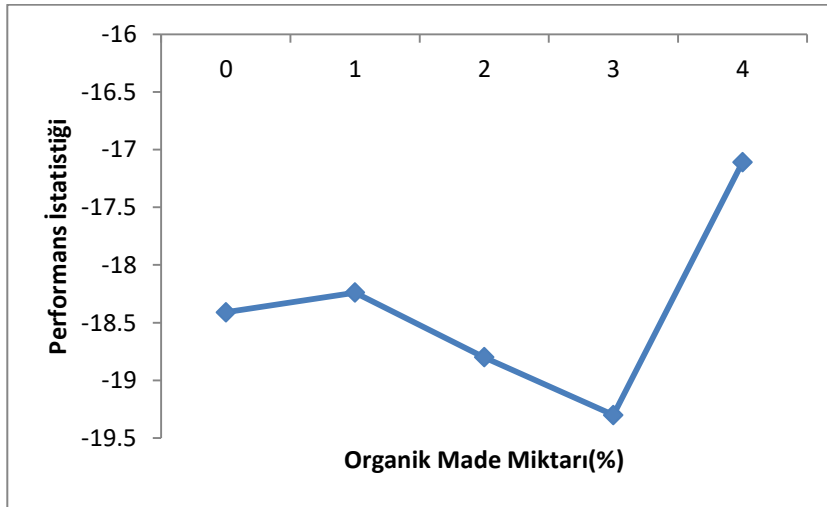


Şekil 5.15. Sinterleme Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi

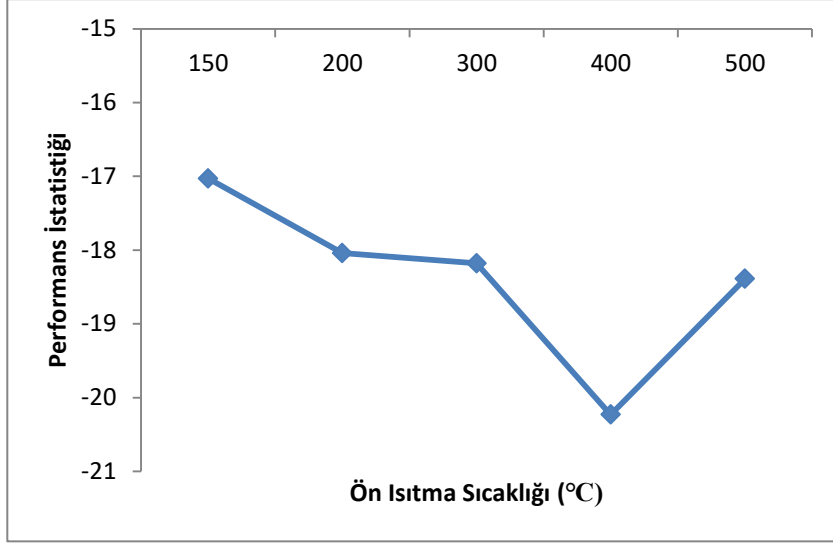
Performans istatistiği olarak en küçük en iyi durumunun kullanıldığı optimizasyon işlemi için su emme oranı için performans istatistiği değerleri Tablo 5.4 de verilmiş ve grafik olarak da Şekil 5.16-5,20 da verilmiştir.

Tablo 5. 4. Su Emme Oranı İçin Performans İstatistiği Değerleri

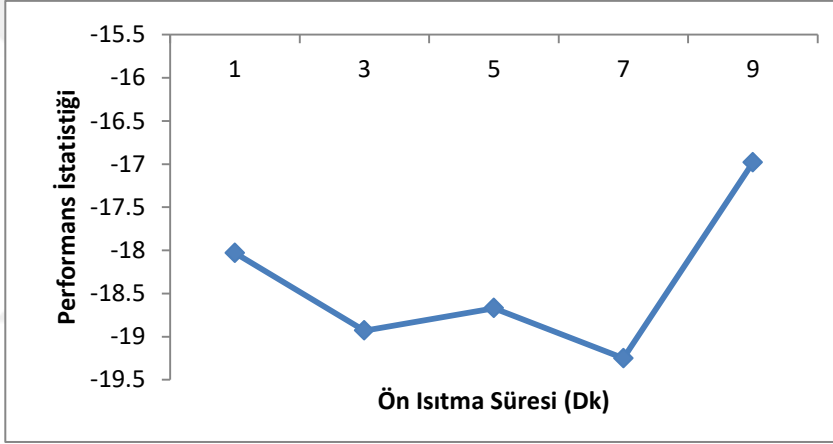
Seviyeler	Parametreler				
	A	B	C	D	E
1	-18,41	-17,03	-18,03	-22,18	-19,86
2	-18,24	-18,04	-18,93	-20,39	-17,38
3	-18,80	-18,18	-18,67	-17,27	-18,47
4	-19,30	-20,23	-19,25	-12,06	-18,51
5	-1,11	-18,39	-16,98	-19,95	-17,64



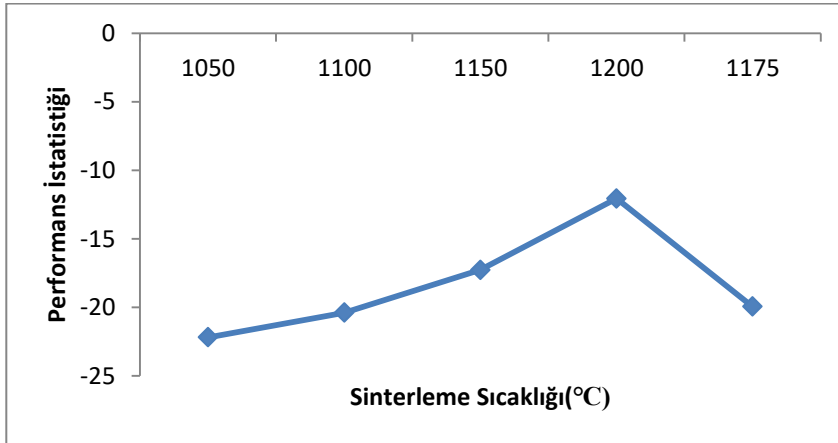
Şekil 5.16. Organik Madde Miktarının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



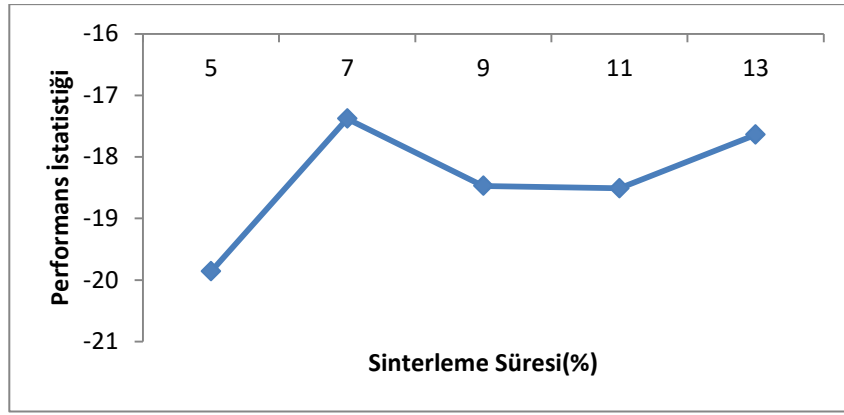
Şekil 5.17. Ön Isıtma Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



Şekil 5.18. Ön Isıtma Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



Şekil 5.19. Sinterleme Sıcaklığının Performans İstatistiği Üzerine Etkisi



Şekil 5. 20. Sinterleme Süresinin Performans İstatistiği Üzerine Etkisi

Pişme kaybı ve genişleme oranı için çalışmalarda kullanılan parametrelerin optimum seviyeleri ve bu seviyelere ait sayısal değerler ve alternatif çalışma şartları Tablo 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5.5’de verildiği gibi genişleme oranını maksimum yapan parametre değerleri, pişme kaybı için de alternatif bir şart olarak da düşünülebilir. Burada pişme kaybı için 2.durum ile alternatif olan 3.durum hemen hemen aynı güven aralığı içinde kaldığından genişleme oranı için bulunan A₄, B₁, C₁, D₄ ve E₅ optimum şartları pişme kaybı içinde kabul edilerek, her iki performans değeri için optimum şart A₄, B₁, C₁, D₄ ve E₅ olarak alınabilir. Bu optimum şartlarda üretilen genişmiş kil bilyelerinin tane yoğunluğu ve su emme yüzdesi de araştırılmış olup, tane yoğunluğu 702 kg/m³ su emme yüzdesi 6,45 olarak bulunmuştur.

Tablo 5. 5. Deneylerde Optimum Çalışma Şartları, Gözlemlenen ve Tahmin Edilen Genişleme Oranı ve Pişme Kaybı

Parametreler	Genişleme Oranı İçin		Pişme Kaybı İçin			
	1.Durum*		2.Durum**		3. Durum***	
	Değer	Seviye	Değer	Seviye		
A: Organik Madde (%)	3	4	2	3	3	4
B: Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	150	1	150	1	150	1
C: Ön Isıtma Süresi (Dakika)	1	1	9	5	1	1
D: Sinterleme Sıcaklığı (°C)	1200	4	1100	2	1200	4
E: Sinterleme Süresi (Dakika)	13	5	13	5	13	5
Gözlemlenen değer (%)	4,32		%30,30		%27,80	
Tahmin edilen değer (%)	4,34		%31,63		%30,70	
Güven aralığı (%), Se	3,22-5,46		28,45-34,81		27,52-33,88	

*Genişleme oranı için SN_L değerlerine göre optimum şartlar

** Pişme Kaybı için SN_L değerlerine göre seçilen optimum şartlar

*** Pişme Kaybı için Alternatif bir çalışma şartı

5.1.2. İstatistiksel Hesaplamalar

İstatistiksel hesaplamaların ve analizlerin yapılmasında MİNİTAB R13 paket programından yararlanılmıştır. Hafif genleşmiş kil üretiminde genleşme oranı ve pişme kaybını maksimum yapan parametre seviyelerinin bulunmasında (3.5) numaralı eşitlik kullanılmıştır. Genleşme oranı ve pişme kaybını maksimum yapan parametre seviyelerini tespit etmek için Tablo 4.3'deki değerler kullanılarak (3.5) nolu eşitlikten SN_L değerleri bulunmuştur. Bu SN_L değerleri yardımıyla parametre seviyeleri için marjinal ortalama performans istatistiği değerleri (SN_{ort}) hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.1. ve 5.2.'de grafik olarak verilmiştir. SN_{ort} değerini maksimum yapan parametre seviyelerine ait performans değerini tahmininde (3.7) nolu eşitlik kullanılmıştır.

Şekil 5.1. incelendiğinde SN_{ort} değerini maksimum yapan parametre seviyeleri, A_4 , B_1 , C_1 , D_4 ve E_5 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla genleşme oranını maksimum yapan parametre değerleri A_4 , B_1 , C_1 , D_4 ve E_5 olacaktır. Buna göre optimum şartlar; organik madde miktarı için %3, ön ısıtma sıcaklığı için 150°C, ön ısıtma süresi için 1 dakika, sinterleme sıcaklığı için 1200°C ve sinterleme süresi için 13 dakika olarak bulunmuştur. Optimum şartlar altında tahmin edilen genleşme oranı 4,34 ve deneysel olarak bulunan değerde 4,32'dir.

Şekil 5.2. incelendiğinde SN_{ort} değerini maksimum yapan parametre seviyeleri, A_4 , B_1 , C_5 , D_2 ve E_5 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla pişme kaybını maksimum yapan parametre değerleri A_4 , B_1 , C_5 , D_2 ve E_5 olacaktır. Buna göre optimum şartlar; organik madde miktarı için %3, ön ısıtma sıcaklığı için 150°C, ön ısıtma süresi için 9 dakika, sinterleme sıcaklığı için 1100°C ve sinterleme süresi için 13 dakika olarak bulunmuştur. Optimum şartlar altında tahmin edilen pişme kaybı %31,6 ve deneysel olarak bulunan değerde %30,3 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca pişme kaybını, genleşme oranının optimum olduğu şartlar (A_4 , B_1 , C_1 , D_4 ve E_5) için değerlendirdiğimizde tahmin edilen pişme kaybı %30,7 ve deneysel olarak bulunan değerde %27,8 olarak bulunmuştur.

5.2. Sonuç

Mevcut çalışmadan çıkan başlıca sonuçlar şunlardır:

Hafif Genleşmiş kil üretiminde genleşme oranı üzerinde etkili olan parametreler etkinlik düzeyine göre sırasıyla organik madde, ön ısıtma sıcaklığı, ön ısıtma süresi, sinterleme sıcaklığıdır.

Hafif Genleşmiş kil üretiminde pişme kaybı üzerinde etkili olan parametreler ise etkinlik düzeyine göre sırasıyla organik madde, sinterleme süresi, ön ısıtma sıcaklığı,

sinterleme sıcaklığı ve ön ısıtma süresidir. Ön ısıtma süresi %99 güven seviyesinde etkin olmayıp, %95 güven seviyesinde ise çok az etkilidir.

Seçilen parametre değerleri dahilinde optimum koşullar, organik madde miktarı için %3, ön ısıtma sıcaklığı için 150°C, ön ısıtma süresi için 1 dakika, sinterleme sıcaklığı için 1200°C ve sinterleme süresi için 13 dakikadır. Bu koşullar altında genleşme oranı 4,32, pişme kaybı %27,80, tane yoğunluğu 702 kg/m³, su emme yüzdesi 6,45 olarak bulunmuştur.

Öngörülen ve gözlenen değerler birbirine çok yakındır ve toplamsal modelin üretim sürecinin çeşitli parametrelere bağımlılığını açıklamak için yeterli olduğu sonucuna varılabilir.

Laboratuvar ortamında Taguchi yöntemi ile belirlenen optimum koşullar gerçek üretim ortamlarında da tekrarlanabilir olduğundan; bu çalışmanın bulguları endüstriyel ölçekte işleme için çok faydalı olabilir.

KAYNAKÇA

Ahmad, M. R., Chen, B., & Farasat Ali Shah, S. (2019). *Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. Construction and Building Materials*, 220, 253-266. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.171>

Ariöz, Karasu, B., Kılınç, K., Kaya, G., Arslan, G., Tuncan, M., Tuncan, A. & Kıvrak, S. (2007). *Production of Expanded Clay Aggregate by The Use of Coal. Paper presented at the The IV. Ceramic, Glass, Enamel, Glaze and Pigment Seminar with International Participation (SERES 2007)*, 1054-1062, Eskisehir, Turkey.

Bogas, J. A., Gomes, A., & Pereira, M. F. C. (2012). *Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. Construction and Building Materials*, 35, 1013-1022. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.111>

Bo Li, Tung-Chai Ling (Bill), (2016). *İki Aşamalı Bir Isıtma İşleminin Kanalizasyon Çamuru ve Tuzlu Kil İle Hazırlanan Hafif Agreganın Özellikleri Üzerindeki Etkileri, Article in Construction and Building Materials* ·

Çalış Açıkbaz,(2020). MM5016: *Malzemelerin Mikroskopik Ve Spektroskopik Karakterizasyonu*, Prof. Dr. Nurcan ÇALIŞ AÇIKBAŞ Yüksek Lisans Ders Notları

Dilli, M. E., Atahan, H. N., & Şengül, C. (2015). *A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates. Construction and Building Materials*, 101, 260-267. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.080>

Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, (2000). *Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri Cilt I* (Sermik Killeri-Kaolen-Feldispat-Pirofolit-Wollastonit-Talk) Çalışma Grubu Raporu Ankara

Escs, 2021. <https://www.escsi.org>

Gündüz, L., Kalkan, Ş. O. & Özgüven, A. (2020). *Genleşmiş Kil Agregaların Teknik Özelliklerinin Karşılaştırılması Üzerine Bir Çalışma Ankara Kalecik Bölgesi Örneği. Hazır Beton*, 157, 65-72.

Gökçe, (2007). *Genleşmiş Kil Agregalarının Hafif Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi Yapı Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Ekim 2007*

Jolanta Latosinska, Maria Zygadlo, (2009). *Kanalizasyon Çamuru Katmanının Gözeneklilik Üzerine Etkisi Hafif Genişletilmiş Kil (Leca) Ve Ağır Metallerin Seramik Matristen Liç Düzeyi*, Environment Protection Engineering, 190-196, Poland ,2009

Küçük, Ö., Kocakerim, M.M., Çopur, M. & Yartaşı, A. (2005). *Optimization Of Dissolution Of Ulexite In (NH₄)₂SO₄ Solutions*. Canadian Metallurgical Quarterly, 44(1), 53-58. doi:<https://doi.org/10.1179/cmqr.2005.44.1.53>

Lecat, (2021). *Söğüt Toprak Madencilik A.Ş. Lecat nedir*. Retrieved from <https://lecat.com.tr/lecat-nedir>

Levent, M., Kaya, Ö., Kocakerim, M., Yiğit, V., & Küçük, Ö. (2007). *Optimization of desulphurization of Artvin–Yusufeli lignite with acidic hydrogen peroxide solutions*. Fuel, 86(7), 983-992. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.10.010>

Montgomery, D. C. (1991). *Design and Analysis of Experiments*, . ABD: John Wiley & Sons Inc.

Mta, (2021). *Seramik Killer* [Erişim:08.11.2021<https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/seramik-killer>]

Nkansah, M. A., Christy, A. A., Barth, T., & Francis, G. W. (2012). *The use of lightweight expanded clay aggregate (LECA) as sorbent for PAHs removal from water*. Journal of Hazardous Materials, 217-218, 360-365. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.038>

Onatskiy, S. P. (1987). *Expanded Clay Production*: 3rd ed., rev. and add, M., Stroyizdat Publ., 1987, p. 333 (in Russian).

Ozguven, A., & Gunduz, L. (2012). *Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate*. Cement and Concrete Composites, 34(6), 781-787. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.007>

Özgüven, A. (2009). *Genleşen Kil Agrega Üretimi Ve Endüstriyel Olarak Değerlendirilmesi*. (Doktora), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği. (237301)

Phadke, M. S. (1989). *Quality engineering using robust design*, . Prentice Hall, New Jersey, 61-292.

- Phadke, M. S., Kackar, R. N., Speeney, D. V., & Grieco, M. J.** (1983). *Off-line quality control in integrated circuit fabrication using experimental design*. The Bell System Technical Journal, 62(5), 1273-1309. doi:10.1002/j.1538-7305.1983.tb02298.x
- Pioro, L. S., & Pioro, I. L.** (2004). *Production of expanded-clay aggregate for lightweight concrete from non-selfbloating clays*. Cement and Concrete Composites, 26(6), 639-643. doi:https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00103-3
- Rashad, A. M.** (2018). *Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview*. Construction and Building Materials, 170, 757-775. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009
- Subaşı, S.** (2009). *Production of structural lightweight concrete with expanded clay aggregate*. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ, 24(3), 559-567.
- Şirvancı, M.** (1997). *Kalite için deney tasarımı “Taguchi Yaklaşımı”*. İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Taguchi, G.** (1987). *System of Experimental Design, Quality Resources: (Vol. 1)*. New York.
- Toropkov NE, Kutugin VA,** (2014). *Dependence Of Physical And Chemical Properties Of Clay Raw Material In Technologies Of Claydite*, International Research Journal ISSN 2303-9868, Candidate of Technical Sciences, National Research Tomsk Polytechnic University, 52
- Vašina, M., Hughes, D. C., Horoshenkov, K. V., & Lapčík, L.** (2006). *The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates*. Applied Acoustics, 67(8), 787-796. doi:https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.08.003