KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİLLİ ZEMİNLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YÜKSEK SICAKLIK İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olcay POLAT

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Sami ARSOY

KOCAELİ, 2009

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİLLİ ZEMİNLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YÜKSEK SICAKLIK İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olcay POLAT

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 6 Nisan 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 12 Mayıs 2009

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Doç. Dr. Sami ARSOY	Prof. Dr. Akın ÖNALP	Yrd.Doç.Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ
(.....)	(.....)	(.....)

KOCAELİ, 2009

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Zeminlerin iyileştirilmesi geoteknik mühendisliğinde son derece önem arz eden bir konu olup, son yıllarda üzerinde yoğun olarak çalışmaların yürütüldüğü bir alandır. Geçmişte seyrek olarak uygulamalarının gerçekleştirildiği zeminlerin yüksek sıcaklık etkisinde bırakılarak iyileştirilmesinin konu edinildiği bu çalışmada, yöntemin deneysel koşullarda iyileştirilebilirliği sorgulanmıştır. Bu tez çalışması ile ilerleyen yıllarda bu alanda yürütülebilecek uygulamalara faydalı olmasını dilerim.

İlkin yüksek lisans eğitimimde beni yönlendiren, tez çalışmamda ilgi ve desteklerini benden hiç esirgemeyen, üstelik bu tez çalışması ile geoteknik mühendisliği dalına merakımı sayesinde daha da çok arttıran değerli hocam sayın Doç. Dr. Sami ARSOY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Normal yüksek lisans eğitimim süresince bursiyer olarak görev aldığım TUBİTAK 106M231 numaralı araştırma projesinden ötürü TÜBİTAK kurumuna teşekkür ederim. Ayrıca laboratuarda sürdürülen deneysel çalışmalarda yardımları ile Arş. Gör. Cüneyt YILMAZ ve Arş. Gör. Erdinç KESKİN'e de teşekkür ederim.

Son olarak, maddi ve manevi destekleri ile hayatım boyunca hep yanımda olup, bana yaşam pınarı olan anneme sevgilerle...

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
TABLOLAR DİZİNİ xi
FOTOĞRAF DİZİNİ xii
SİMGELER DİZİNİ xiii
KISALTMALAR xiv
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
1.1. Giriş 1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 2
BÖLÜM 2. YÜKSEK SICAKLIK İLE ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ 4
2.1. Giriş 4
2.2. Önceki Çalışmalar 4
2.2.1. Zemini yüzeyden ısıtarak iyileştirme 5
2.2.2. Zemini boru düzeneği kurarak iyileştirme 6
2.2.3. Tünel mühendisliğinde 8
2.3. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Zeminlerin Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Değişimi 8
2.4. Fiziksel Özelliklerin Değişimi 9
2.4.1. Atterberg (kıvam) limitlerinin değişimi 9
2.4.2. Ağırlığın değişimi 10
2.4.3. Özgül ağırlığının değişimi 11
2.4.4. Özgül ısının değişimi 12
2.4.5. Rengin değişimi 12
2.4.6. Sıkıştırılabilirlik özelliklerinin değişimi 13
2.4.7. Genleşme ve büzülmenin değişimi 14
2.4.8. Mukavemet özellikleri 15
2.4.9. Serbest basınç mukavemetinin değişimi 15
2.4.10. Eğilme mukavemetinin değişimi 17
2.4.11. Basınç mukavemeti ve yoğunluk arasındaki ilişki 17
2.4.12. Yoğunluk, görünür porozite ve büzülmenin değişimi 18
2.4.13. Elastisite modülünün değişimi 18
2.5. Kimyasal Özelliklerin Değişimi 19
BÖLÜM 3. ZEMİNLERİN ISIL ÖZELLİKLERİ 23
3.1. Giriş 23
3.2. Zeminde Isı İletiminin Önemi 23
3.3. Zeminde Isı İletimi 24
3.4. Isının Yayılımı 26
3.4.1. İletim 27
3.4.2. Taşınım 27
3.4.3. Işınım 28
3.5. Isıl Değişkenler 28

3.5.1. Isı difüzyonu 28
3.5.2. Gizli ısı difüzyonu....30
3.5.3. Isıl genleşme (veya büzülme) 31
3.5.4. Özgül ısı ve ısı sığası (kapasitesi)....31
3.6. Zeminlerde Isı İletimi....35
3.6.1. Zeminlerin ısı iletimini etkileyen faktörler....35
3.6.1.1. Kuru birim hacim ağırlığının etkisi....37
3.6.1.2. Su içeriğinin etkisi....39
3.6.1.3. Zemin suyunun fazı....40
3.6.1.4. Boşluk oranı ve porozitenin etkisi....41
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR....42
4.1. Giriş....42
4.2. Yöntem....42
4.2.1. Deney numunelerinin seçimi....42
4.2.2. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler....43
4.2.3. Harvard minyatür kalıbında sıkıştırma deneyi....44
4.2.4. Numunelerinin hazırlaması....45
4.2.5. Numunelerin kurutulma süreci....46
4.2.6. Numunelerin ısıtılma süreci....47
4.2.7. Görünür porozite deneyi....50
4.2.8. Serbest basınç mukavemeti belirleme deneyi....51
4.2.9. Gerilme modülünün hesaplanması....54
4.2.10. Serbest basınç mukavemetinin belirli bir sıcaklığın farklı uygulama sürelerinde numuneler için değişiminin deneyleri....54
4.2.11. Serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler için değişiminin deneyleri....55
4.2.12. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapmasının hesaplanması .56
4.3. Materyal....57
4.3.1. Kullanılan numunelerin bazı zemin özellikleri....57
4.3.2. Kullanılan cihazlar 57
4.3.2.1. Harvard minyatür sıkıştırma deney düzeneği....57
4.3.2.2. Yüksek sıcaklık fırını 58
4.3.2.3. Serbest basınç mukavemeti deney düzeneği....59
BÖLÜM 5. LABORATUAR DENEY SONUÇLARI 61
5.1. Giriş....61
5.2. İşlenmiş kaolin Numunesinin Deney Sonuçları....61
5.2.1. İşlenmiş kaolinin doğal hâldeki zemin özellikleri 61
5.2.2. Özgül ağırlığın değişimi....62
5.2.3. Plastisite özelliklerinin değişimi 62
5.2.4. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi....63
5.2.5. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi....64
5.2.6. Serbest basınç mukavemetinin değişimi 65
5.2.7. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi....66
5.2.8. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması....67
5.2.9. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi 67
5.2.10. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi 68
5.2.11. Gerilme modülünün değişimi 69
5.3. Tekirdağ Kili Numunesinin Deney Sonuçları 70
5.3.1. Tekirdağ kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 70

5.3.2. Özgül ağırlığın değişimi 71
5.3.3. Plastisite özelliklerinin değişimi 71
5.3.4. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi 72
5.3.5. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 73
5.3.6. Serbest basınç mukavemetinin değişimi 74
5.3.7. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi 75
5.3.8. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması 76
5.3.9. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi 76
5.3.10. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi 77
5.3.11. Gerilme modülünün değişimi 78
5.3.12. En az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan çalışmalar 79
5.3.12.1. Serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler için değişimi 79
5.3.12.2. Serbest basınç mukavemetinin az çatlaklı ve en az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler için değişimi 80
5.3.12.3. Serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler için birim deformasyonla değişimi 81
5.3.12.4. Serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler için birim deformasyonla oransal değişimi 82
5.4. Köseköy Kili Numunesinin Deney Sonuçları 83
5.4.1. Köseköy kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 83
5.4.2. Özgül ağırlığın değişimi 83
5.4.3. Plastisite özelliklerinin değişimi 84
5.4.4. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi 85
5.4.5. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 86
5.4.6. Serbest basınç mukavemetinin değişimi 86
5.4.7. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi 87
5.4.8. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması 88
5.4.9. Serbest basınç mukavemetinin belirli bir sıcaklığın farklı uygulama süreleri için değişimi 89
5.4.10. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi 89
5.4.11. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi 90
5.4.12. Gerilme modülünün değişimi 91
5.5. Yuvacık Kili Numunesinin Deney Sonuçları 92
5.5.1. Yuvacık kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 92
5.5.2. Özgül ağırlığın değişimi 92
5.5.3. Plastisite özelliklerinin değişimi 93
5.5.4. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi 94
5.5.5. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 95
5.5.6. Serbest basınç mukavemetinin değişimi 95
5.5.7. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi 96
5.5.8. Serbest basınç mukavemetinin belirli bir sıcaklığın farklı uygulama süreleri için değişimi 97
5.5.9. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması 98
5.5.10. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi 99
5.5.11. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi 99
5.5.12. Gerilme modülünün değişimi 100
5.6. Bentonit Kili Numunesinin Deney Sonuçları 101
5.6.1. Bentonit numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 101

5.6.2. Özgül ağırlığın değişimi 101
5.6.3. Plastisite özelliklerinin değişimi 102
5.6.4. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi 103
5.6.5. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 104
5.6.6. Serbest basınç mukavemetinin değişimi 104
5.6.7. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi 105
5.6.8. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması 106
5.6.9. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi 107
5.6.10. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi 107
5.6.11. Gerilme modülünün değişimi 108
5.7. Killi Kum Numunesinin Deney Sonuçları 109
5.7.1. Killi kum numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 109
5.7.2. Özgül ağırlığın değişimi 110
5.7.3. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi 110
5.7.4. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 111
5.7.5. Serbest basınç mukavemetinin değişimi 112
5.7.6. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi 112
5.7.7. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması 113
5.7.8. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi 114
5.7.9. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi 114
5.7.10. Gerilme modülünün değişimi 115
5.8. Görünür Porozite Deneyi Sonuçları ve Isıl İşlem Görmüş Numunelerin Su Etkisinde Bazı Fiziksel Özelliklerinin Değişimi 116
5.8.1. İşlenmiş kaolin numunesinde görünür porozite deneyi 116
5.8.2. İşlenmiş kaolin numunesinde porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 117
5.8.3. İşlenmiş kaolin numunesinde hacmin oransal değişimi 117
5.8.4. Tekirdağ kili numunesinde görünür porozite deneyi 118
5.8.5. Tekirdağ kili numunesinde porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 118
5.8.6. Tekirdağ kili numunesinde hacmin oransal değişimi 119
5.8.7. Bentonit numunesinde görünür porozite deneyi 120
5.8.8. Bentonit numunesinde porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 120
5.8.9. Bentonit numunesinde hacmin oransal değişimi 121
BÖLÜM 6. LABORATUAR DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ 122
6.1. Giriş 122
6.2. Özgül Ağırlığın Oransal Değişimi 124
6.3. Likit Limitin Değişimi 125
6.4. Plastik Limitin Değişimi 125
6.5. Plastisite İndisinin Değişimi 126
6.6. Ağırlığın Oransal Değişimi 127
6.7. Hacmin Oransal Değişimi 128
6.8. Kuru BHA'nın Oransal Değişimi 129
6.9. Boşluk Oranın Oransal Değişimi 130
6.10. Porozitenin Oransal Değişimi 131
6.11. Serbest Basınç Mukavemetinin Değişimi 132
6.12. Serbest Basınç Mukavemetinin Oransal Değişimi 135
6.13. Birim Deformasyonun Değişimi 136
6.14. Birim Deformasyonun Oransal Değişimi 137
6.15. Gerilme Modülünün Değişimi 137
6.16. Gerilme Modülünün Oransal Değişimi 138

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....140
7.1. Sonuçlar.....140
7.2. Öneriler.....143
KAYNAKLAR.....145
ÖZGEÇMİŞ.....149

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Irvine'nin geliştirdiği ısıl iyileştirme aletinin şematik görünümü (Irvine, 1930 ve Sherrard, 1958) 6
Şekil 2.2: Zeminlerin ısıl iyileştirilmesinde kullanılan kapalı boru sistemi (Fujii, 1971) 7
Şekil 2.3: Zeminlerin ısıl iyileştirilmesinde kullanılan açık boru sistemi (Fujii, 1971) 8
Şekil 3.1: Bir zemin elementinde ısının iletimi (Andersland ve Ladanyi, 1994) 25
Şekil 3.2: Killi (− − −) ve Kumlu (—) zeminlerde ısı difüzyonun su içeriğine bağlı olarak değişimi (Abu-Hamdeh, 2003) 28
Şekil 3.3: Isı iletiminin granüler bir zeminde temas yüzeyi/dane sayısının kuru birim hacim ağırlıkla değişimi: S ≤ %1(kare) ve S ≥ %50 (artı) 38
Şekil 5.1: Kaolin numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 62
Şekil 5.2: Kaolin numunesinde plastisite özelliklerinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 63
Şekil 5.3: Kaolin numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 64
Şekil 5.4: Kaolin numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 65
Şekil 5.5: Kaolin numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 66
Şekil 5.6: Kaolin numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 66
Şekil 5.7: Kaolin numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması 67
Şekil 5.8: Kaolin numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi 68
Şekil 5.9: Kaolin numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi 69
Şekil 5.10: Kaolin numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 70
Şekil 5.11: Tekirdağ kili numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 71
Şekil 5.12: Tekirdağ kili numunesinde plastisite özelliklerinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 72
Şekil 5.13: Tekirdağ kili numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 73
Şekil 5.14: Tekirdağ kili numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 74

Şekil 5.15: Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 75
Şekil 5.16: Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 75
Şekil 5.17: Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması 76
Şekil 5.18: Tekirdağ kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi 77
Şekil 5.19: Tekirdağ kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi 78
Şekil 5.20: Tekirdağ kili numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 79
Şekil 5.21: En az çatlaklı Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 80
Şekil 5.22: Az çatlaklı ve en az çatlaklı Tekirdağ kili numunelerinde serbest basınç mukavemetinin numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 80
Şekil 5.23: Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı numuneler için birim deformasyonla farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 81
Şekil 5.24: Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı numunelerde birim deformasyonla farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 82
Şekil 5.25: Köseköy kili numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 84
Şekil 5.26: Köseköy kili numunesinde plastisite özelliklerinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 84
Şekil 5.27: Köseköy kili numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 85
Şekil 5.28: Köseköy kili numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 86
Şekil 5.29: Köseköy kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 87
Şekil 5.30: Köseköy kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 88
Şekil 5.31: Köseköy kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması 88
Şekil 5.32: Köseköy kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı ısıtma süreleri etkisinde değişimi 89
Şekil 5.33: Köseköy kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi 90
Şekil 5.34: Köseköy kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi 91
Şekil 5.35: Köseköy kili numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 91
Şekil 5.36: Yuvacık kili numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 93
Şekil 5.37: Yuvacık kili numunesinde plastisite özelliklerinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 93

Şekil 5.38: Yuvacık kili numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 94
Şekil 5.39: Yuvacık kili numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 95
Şekil 5.40: Yuvacık kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 96
Şekil 5.41: Yuvacık kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 97
Şekil 5.42: Yuvacık kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı ısıtma süreleri etkisinde değişimi 98
Şekil 5.43: Yuvacık kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması 98
Şekil 5.44: Yuvacık kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi 99
Şekil 5.45: Yuvacık kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi 100
Şekil 5.46: Yuvacık kili numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 100
Şekil 5.47: Bentonit numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 102
Şekil 5.48: Bentonit numunesinde plastisite özelliklerinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 102
Şekil 5.49: Bentonit numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 103
Şekil 5.50: Bentonit numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 104
Şekil 5.51: Bentonit numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 105
Şekil 5.52: Bentonit numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 106
Şekil 5.53: Bentonit numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması 106
Şekil 5.54: Bentonit numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi 107
Şekil 5.55: Bentonit numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi 108
Şekil 5.56: Bentonit numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 109
Şekil 5.57: Killi kum numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 110
Şekil 5.58: Killi kum numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 111
Şekil 5.59: Killi kum numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi 111
Şekil 5.60: Killi kum numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 112
Şekil 5.61: Killi kum numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 113

Şekil 5.62: Killi kum numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması 113
Şekil 5.63: Killi kum numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi 114
Şekil 5.64: Killi kum numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi 115
Şekil 5.65: Killi kum numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi 115
Şekil 5.66: 1050 °C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş kaolin numunesinin farklı aşamalarda porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 117
Şekil 5.67: 1050 °C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş kaolin numunesinin farklı aşamalarda hacminin oransal değişimi 118
Şekil 5.68: 600°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş Tekirdağ kili numunesinin farklı aşamalarda porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 119
Şekil 5.69: 600°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş Tekirdağ kili numunesinin farklı aşamalarda hacminin oransal değişimi 119
Şekil 5.70: 600°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş bentonit numunesinin farklı aşamalarda porozite ve boşluk oranının oransal değişimi 120
Şekil 5.71: 600°C'de ısıl işlem görmüş bentonit numunesinin farklı aşamalarda hacminin oransal değişimi 121
Şekil 6.1: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında özgül ağırlığın oransal değişimi 124
Şekil 6.2: Farklı sıcaklıklar için likit limitin numuneler arasında değişimi 125
Şekil 6.3: Farklı sıcaklıklar için plastik limitin numuneler arasında değişimi 126
Şekil 6.4: Farklı sıcaklıklar için plastisite indisinin numuneler arasında değişimi 127
Şekil 6.5: Farklı sıcaklıklar için ağırlığın numuneler arasında oransal değişimi 128
Şekil 6.6: Farklı sıcaklıklar için hacmin numuneler arasında oransal değişimi 129
Şekil 6.7: Farklı sıcaklıklar için kuru BHA'nın numuneler arasında oransal değişimi 130
Şekil 6.8: Farklı sıcaklıklar için boşluk oranının numuneler arasında oransal değişimi 131
Şekil 6.9: Farklı sıcaklıklar için porozitenin numuneler arasında oransal değişimi 132
Şekil 6.10: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında serbest basınç mukavemetinin değişimi 133
Şekil 6.11: Farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti değişiminin numuneler arasında birlikte gösterimi 134
Şekil 6.12: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında serbest basınç mukavemetinin oransal değişimi 135
Şekil 6.13: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında birim deformasyonun değişimi 136
Şekil 6.14: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında birim deformasyonun oransal değişimi 137
Şekil 6.15: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında gerilme modülünün değişimi 138
Şekil 6.16: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında gerilme modülünün oransal değişimi 139

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Ortalama serbest basınç mukavemetinin (MPa) uygulanan sıcaklık ve ısıtma süresi ile değişimi 16
Tablo 2.2: Isıtılma sıcaklığının yoğunluk, görünür porozite ve büzülme üzerindeki değişimi 18
Tablo 3.1: SI birim sisteminde dönüşüm katsayıları 26
Tablo 3.2: Bazı zeminlerin ısıl difüzyon katsayıları (Andersland ve Ladanyi, 1994) 30
Tablo 3.3: Bazı araştırmacılar tarafından özgül ısı ve ısı kapasitesinin karşılaştırılması (Abu-Hamdeh, 2003) 34
Tablo 3.4: Bazı maddelerin belirli sıcaklık ve su içeriklerinde ısı iletim katsayıları (Andersland ve Ladanyi, 1994) 35
Tablo 3.5: Deneysel ve deterministik yöntemle hesaplanan ısı iletkenlik katsayıları (Günal, 2001) 36
Tablo 3.6: Buzun bazı fiziksel özellikleri (Farouki, 1986) 41
Tablo 4.1: Numuneler üzerinde yapılan rutin deneyler 44
Tablo 4.2: Farklı numunelerin deneyleri gerçekleştirilen sayıları (adet) 50
Tablo 4.3: Farklı numunelerin deneyleri gerçekleştirilen ısıtılma süreleri (sa) 50
Tablo 4.4: Köseköy ve Yuvacık killerinin 800 °C sıcaklıklarda farklı ısıtma süreleri için sayısı (adet) 54
Tablo 4.5: En az çatlaklı olarak hazırlanıp farklı yüksek sıcaklıklar uygulanan Tekirdağ kili numunelerinin sayıları 56
Tablo 4.6: Kullanılan numuneler ve bazı zemin özellikleri 57
Tablo 5.1: Kaolin numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 61
Tablo 5.2: Tekirdağ kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 70
Tablo 5.3: Köseköy kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 83
Tablo 5.4: Yuvacık kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 92
Tablo 5.5: Bentonit numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 101
Tablo 5.6: Killi kum numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri 109
Tablo 6.1: Zemin özelliklerinin doğal hâldeki bütün numuneler için birlikte gösterimi 123

FOTOĞRAF DİZİNİ

Fotoğraf 2.1: Oda sıcaklığından başlanarak yüksek sıcaklıklar uygulanmış, kumtaşı numunelerinde renk dönüşümü 12
Fotoğraf 4.1: Isıl işleme hazırlanan killi kum numuneleri 46
Fotoğraf 4.2: Yüksek sıcaklıkta ısıtılan numuneler 49
Fotoğraf 4.3: 6 saat boyunca 800 °C'de yüksek sıcaklık uygulanıp, kırılmış Yuvacık kili numunesi 55
Fotoğraf 4.4: Harvard minyatür sıkıştırma deney düzeneği 58
Fotoğraf 4.5: Yüksek sıcaklık fırını 59
Fotoğraf 4.6: Serbest basınç mukavemetinin ölçüldüğü deney düzeneği 60

SİMGELER DİZİNİ

A : Alan
A_0 : Düzeltilmiş alan
C : Isı kapasitesi
CS : Compressive Stress
C_{buz} : Buzun özgül ısı kapasitesi
C_{hava} : Havanın özgül ısı kapasitesi
$C_{katı}$: Katının özgül ısı kapasitesi
C_{su} : Suyun özgül ısı kapasitesi
C_{vf} : Donmuş bir zemin bünyesinde hacimsel ısı kapasitesi
C_{vu} : Donmamış bir zemin bünyesinde hacimsel ısı kapasitesi
C_{vw} : Suyun özgül ısı kapasitesi
C_p : Özgül ısı kapasitesi
c : Kohezyon
c : Özgül ısı
cm : Santimetre
d : Numune çapı
d : Yoğunluk
dk. : Dakika
d_{su} : Suyun yoğunluğu
g : Yer çekim ivmesi
i : Isıl büyüklük
k : Isı iletim katsayısı
k_{eff} : Efektif ısıl iletim katsayısı
h : Tokmağın düşme yüksekliği
E : Enerji
E_{top} : Toplam enerji
E : Elastisite modülü
K : Kelvin
km : Kilometre
L_0 : İlk boyu
ΔL : Toplam deformasyon değeri
L_v : Zeminin hacimsel gizli ısısı
L' : Suyun kütlece gizli ısı değeri
l : Uzunluk
l_0 : İlk uzunluk
m : Metre
m : Kütle
m_{buz} :Buz kütlesi
m_{hava} : Hava kütlesi
m_{su} : Su kütlesi
N : Tabaka sayısı
P : Yük

ΔT : Sıcaklık farkı
Δx : İki uç yüzey arasındaki mesafe
°C : Sıcaklık (Celcious)
°F : Sıcaklık (Fahrenayt)
sa. : Saat
S_u : Drenajsız kayma gerilmesi
Q : Isı iletimi
V : Hacim
V_0 : İlk hacim
V_T : Toplan hacim
V_v : Boşluk hacmi
q : Birim alandaki ısı iletimi
β : Isıl genleşme katsayısı
β_v : Hacimsel ısıl genleşme katsayısı
σ : Gerilme
σ_1 : Düşey gerilme
σ_3 : Yanal gerilme
ε : Birim deformasyon oranı
α : Isı iletim katsayısı
ρ : Maddenin yoğunluğu
ρ_d : Zeminin kuru yoğunluğu
ρ_f : Zeminin donmuş hâldeki birim hacim ağırlığı
ρ_{df} : Zeminin donmuş hâldeki kuru hacim ağırlığı
γ_n : Doğal birim hacim ağırlık
γ_k : Kuru birim hacim ağırlık
W : Ağırlık
W : Su içeriği
W_{org} : Ağırlıkça organik madde içeriği
W_u : Ağırlıkça donmuş bir zemin bünyesindeki donmamış zeminin su içeriği
W_i : Ağırlıkça donmuş bir zemin bünyesindeki donmuş su içeriği
x : İki uç yüzey arasındaki mesafe

KISALTMALAR

ASTM : American Society for Testing and Materials
BHA : Birim Hacim Ağırlık
DTA : Differential Thermal Analysis
DTG : Differential Thermal Gravimetry
DSC : Differential Scanning Calorimetry
GPa : Giga Pascal
J : Joule
LL : Likit Limit
MPa : Mega Pascal
Pa : Pascal
PI : Plastisite İndisi
PL : Plastik Limit
SEM : Scanning Electron Microscopy
TCR : Thermal Contact Resistance

TG : Thermogravimetry
X-ray : X-ray diffraction

KİLLİ ZEMİNLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YÜKSEK SICAKLIK İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Olcay POLAT

Anahtar Kelimeler: Zemin iyileştirilmesi, zeminlerin ısıl yöntemlerle iyileştirilmesi, zeminlerin ısıl özellikleri, mekanik özelliklerin ısıl yöntemler ile değişimi, serbest basınç mukavemeti.

Özet: Yüksek sıcaklık ile zeminlerin iyileştirilmesi eski çağlardan beri stabilizasyon ve seramik yapımında kullanılmıştır. Genel olarak yüksek maliyetli kabul edilen tekniğin uygulaması birkaç vaka ile sınırlı olmuştur. Ancak, geleneksel zemin iyileştirme yöntemlerinin günümüz kompleks ihtiyaçlarının giderilmesi konusunda beliren dolaylı maliyetler karşısında yüksek sıcaklık ile zemin iyileştirme konusunun yeniden ele alınarak irdelenmesi gerekli görülmüştür.

Bu çalışmada, önceki çalışmalar tanıtıldıktan sonra zeminlerin ısıl özellikleri detaylı olarak özetlenmiştir. Daha sonra, 1 silt, 4 farklı kil ve 1 killi kum çeşidinden üretilen numuneler üzerinde 100 $^{\circ}$C ila 1050 $^{\circ}$C arasında değişen sıcaklık uygulaması ayrıntılı bir program dâhilinde uygulanmış ve killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin değişimi laboratuar koşullarında araştırılmıştır.

Numunelerin tespit edilen en yüksek ortalama serbest basınç mukavemeti uygulanan iyileştirme sıcaklığına ve zemin tipine bağlı olarak değişmekle birlikte 5 ila 17 MPa arasında ölçülmüştür. Ulaşılan bu değerler ortalama bir zemin türünün doğal hâlindeki serbest basınç dayanımının birkaç yüz katı olup ısıl iyileştirme ile mukavemetin oldukça yüksek değerlere ulaşabileceğine işaret etmektedir.

Sıcaklığın mertebesine ve uygulama zamanına bağlı olarak ulaşılan mukavemetlerde değişimler gözlemlenmiştir. Bir kil numunesi için uygulanan sıcaklık seviyesini arttırmak serbest basınç mukavemetini sürekli arttırmayabilir. Benzer olarak, iyileştirme sıcaklığının uygulama süresini arttırmak ise serbest basınç mukavemetini en büyük yapmayabilir. Diğer bir deyişle, iyileştirilmesi istenen bir zemin numunesinin optimal bir sıcaklık uygulama seviyesi olduğu gibi optimal bir ısıtma süresinin varlığı da tespit edilmiştir.

Yüksek sıcaklığın laboratuarda belirlenen optimal ısıtma sıcaklığı ve süresinden yola çıkarak arazi çalışmalarının yapılması önerilmektedir. Böylelikle, istenilen mukavemete ulaşabilmek için gerekli olan enerji kullanımı belirlenerek maliyet optimizasyonu yapmak da mümkün olabilecektir.

IMPROVEMENT MECHANICAL PROPERTIES OF CLAYEY SOILS WITH HIGH TEMPERATURE

Olcay POLAT

Key Words: Soil improvement, thermal stabilization of soils, thermal properties of soils, variation of the mechanical properties with heat treatment, unconfined compression stress.

Abstract: Thermal modification of soils has been used since the ancient times in soil stabilization and in ceramic production although it has been limited to a few cases due to the associated high costs. Nowadays, traditional applications of soil stabilization methods are facing increasing indirect costs in solving today's ever complex needs. As a results, a revisit to thermal modifications of soils as a mean of soil stabilization method is deemed necessary.

In this study, the previous work has been presented first, followed by the detailed introduction of soil thermal properties. Afterwards, samples from 1 silt, 4 different clays and 1 sandy-clay soil types were subject to thermal treatment ranging from 100 °C to 1050 °C as part of a detailed laboratory test program in order to study the subsequent change in the engineering properties of the clayey soils upon heating.

Results of the unconfined compression tests on samples showed values of 5 to 17 MPa depending on the soil type and the treatment temperature. These values are hundreds of times more than the typical strength of a natural clay sample and they are indicative of the significant potential with the thermal treatment technique.

Depending on the treatment temperature and the treatment time, the achieved strength varies. Increasing the treatment temperature does not necessarily increases the strength and increasing the treatment temperature does not keep increasing the strength, either. In other words, it has been found that there exists an optimum treatment temperature and an optimum treatment time for a given soil, which needs to be determined experimentally.

Field studies based on the laboratory values of the optimum treatment temperature and the optimum treatment time are highly recommended in order to fully unleash the potential of the thermal stabilization technique. Field studies will also make possible in determining the optimum costs associated with the technique.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Ülkemizde ve dünyada günbegün yeni yerleşim alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gereksinim yapılaşmayı gerektirirken, yapıların yer alacağı mühendislik özellikleri yeterli zemin sahaları ihtiyacını ortaya koymaktadır. Doğada mühendislik özellikleri iyi olmayan zeminlerle sıkça karşılaşılmakta ve bu olumsuz zeminlerin iyileştirilmesi, geoteknik mühendisliğinin alt dallarından biri olan zeminlerin iyileştirilmesi alanını oluşturmaktadır.

Ülkemizde mühendislik özellikleri, üzerine gelmesi planlanan yapı için uygun olmayan zeminlerle sıkça karşılaşılmaktadır. Diğer yandan mevcut yapıların yer aldığı zemin kaynaklı sorunlar ortaya çıkabilmekte ve bu yapıların yer aldığı zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi yoluna gidilmektedir.

Geçmişten günümüze zeminlerin iyileştirilmesi, geoteknik mühendisliğinde önemli bir yere sahiptir. Zeminlerin güçlendirilmesinin tarihi 5000 yıl önceye kadar uzanmakta olup, antik Mezopotamya, Mısır, Yunanistan ve Romalılar kireç ilavesi ile yol zemini iyileştirmişlerdir (McDowell, 1959).

Belirli bir zemin sahasında inşa edilmesi planlanan bir yapı için, olumsuz zemin koşulları mevcut ise öncelikli olarak aşağıdaki çözümler düşünülebilir;

- Yapılması planlanan yapının sahası değiştirilip, mühendislik özellikleri daha olumlu farklı bir yer seçilir.
- Yapıdan gelecek yükü, emniyetli olarak taşıyabilecek bir temel sistemi tasarlanır.
- Bir sahada mühendislik özellikleri istenmeyen mevcut zemin kaldırılarak, yerine istenilen özelliklere sahip zemin dolgusu yapılır.

- Mevcut zeminin, zemin özellikleri dikkate alınarak, özelliklerinin iyileştirilmesi yoluna gidilir.

Geoteknik anlamda problemli zeminler olarak anılan sahalar, farklı zemin özelliklerinin yetersizliği kapsamında değişik birçok sınıfa ayrılabilir. Örneğin; planlanan yapılaşma için bir sahada taşıma gücünün yetersizliği, oturmaların istenilen sınırlardan fazla olması veya şişme-büzülme potansiyeli yüksek olan bir zemin ile karşılaşılıp, olumsuz mevcut zemin özellikleri olan bir arazide inşa edilmek durumunda kalınabilir. Günümüzde bu mühendislik özellikleri yetersiz zeminlerin iyileştirilmesine yönelik birçok yöntem bulunmakla birlikte yeni yöntemler geliştirilmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan zeminlerin yüksek sıcaklık etkisinde bırakılarak iyileştirmesi konu edinilmiş ve bu etkinin zeminler üzerindeki mekanik özellikleri irdelenmiştir. Literatürde bu yöntem ile ilgili uygulamalara bakıldığında sınırlı sayıda çalışmaya rastlanılmaktadır. Bu çalışma ile literatüre katkı amaçlanmış olup yüksek sıcaklığın zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılabilirliği sorgulanmıştır.

Killi zeminlerin mekanik özelliklerinin, yüksek sıcaklık etkisinde bırakılarak iyileştirilmesi yeni olmayıp yüksek maliyetler gerektirdiğinden seyrek uygulanmaktadır. Bir sonraki bölümde sunulacak olan literatür çalışmalarından da anlaşılacağı üzere, yüksek sıcaklığın killer üzerinde deneysel koşullarda nasıl bir etki yapacağı hakkında yapılmış sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Diğer yandan mevcut çalışmaların çoğunlukla seramik mühendisliği alanında mikroyapıya yönelik analizler olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma, zeminlerin yüksek sıcaklık kullanılarak mekanik özelliklerindeki değişimin irdelendiği bir seri deneysel çalışmayı kapsamaktadır. Yürütülen çalışmada, bir silt, dört farklı kil ve killi kum zemin tipleri dikkate alınmış olup, sıcaklığa bağlı olarak zemin iyileştirilmesinin mertebesi araştırılmıştır.

Çalışmada genel anlamda, farklı zemin özelliklerine sahip numunelerin farklı yüksek sıcaklıklar etkisinde mekanik özelliklerinin değişimi irdelenmiştir. Öncelikli olarak değişen yüksek sıcaklıklarda bırakılan numunelerin serbest basınç mukavemetinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bunun yanında belirli bir numunenin, kademeli olarak artan yüksek sıcaklıklar etkisinde iyileştirilebilirliği uygulanan sıcaklık büyüklüğünün yanında ısıl işlem süresi ile de bağlantılı olabilirliği sorgulanmıştır.

BÖLÜM 2. YÜKSEK SICAKLIK İLE ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ

2.1. Giriş

Bu bölümde, öncelikli olarak geçmişte uygulamalarının gerçekleştirildiği zeminlerin yüksek sıcaklık etkisinde bırakılarak iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalardan bahsedilecektir.

İkinci kısımda, farklı alanlardan araştırmacıların yüksek sıcaklık etkisinde bırakılan zemin numuneleri üzerinde yapmış olduğu çalışmalardan derlenen literatür bilgileri yer bulacaktır. Böylelikle zemin numunelerinin bu etki neticesinde yapısında cereyan eden fiziksel ve kimyasal değişimler hakkında ön bilgi edinilecektir.

2.2. Önceki Çalışmalar

Zeminlerin ısıl yöntem ile iyileştirilmesi yeni bir çalışma olmamasına rağmen geçmişte bu alanda sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu yöntemin sıkça uygulama alanı bulamayışı, uygulanması esnasında iyileştirilmek istenen zemin sahasında, verilecek sıcaklığın belirli bir süre ve seviyede bir ısı kaynağı tarafından sağlanmasını gerektirmekte ve bu ısının sağlanışı uygulamacı için yüksek maliyetlere sebep olması ile açıklanabilmektedir.

Zeminlerin ısıl yöntemlerle iyileştirilmesi, antik dönemlerden beri stabilizasyon ve seramik yapımında kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem tarihsel olarak gözlendiğinde yüksek maliyetler gerektirdiğinden günümüzde uygulama bulamamaktadır (Mayne ve diğ., 2000).

M. R. Hausmann (1990)'a göre, zemini ısıtarak iyileştirmek çok fazla enerji kaybına neden olmaktadır. Gerçekleştirilmesi planlanan bir çalışma için 1 m^3 killi bir zemini iyileştirmede 50-100 L petrol yakıtı gerekebilmektedir. Enerji sarfiyatının ve hava

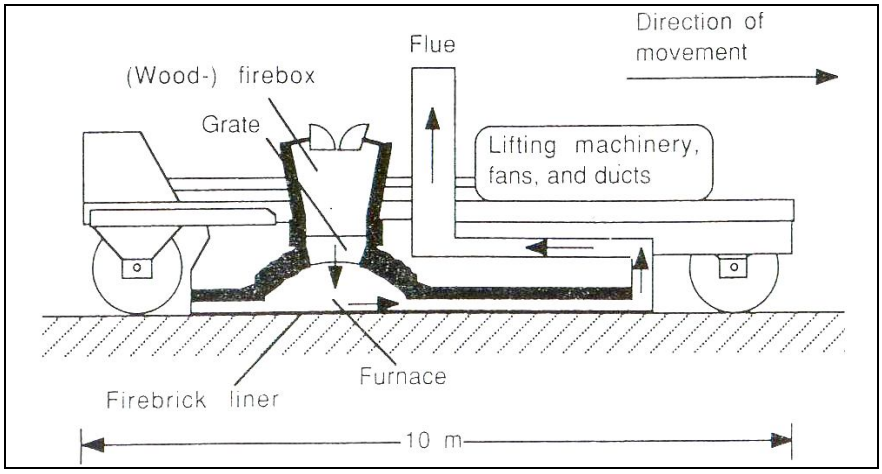
kirliliğinin olabildiğince arttığı çağımızda, yüksek ısı enerjisi harcayarak zemin iyileştirilmesi önümüzdeki yıllarda uygulanabilirliği düşünülmeyebilir. Fakat zeminlerin doğal ya da atık olarak içeriğinde yanıcı gazlar içermesi, bu yöntemin uygulanabilirliği ile ilgili bazı özel durumları oluşturmaktadır (M. R. Hausmann, 1990).

Zeminlerin ısıl yöntemlerle iyileştirilmesinde geçmişte arazide yapılan uygulamalar incelendiğinde, zemini ısıtmada kullanılan ısı kaynağı sıvı, gaz, ya da tahta, kömür gibi katı maddelerin yakılması ile sağlanabilmiş ve bu sağlanan ısı zemine direkt yüzeyden veya zemin içerisinde dolaşacak olan borular vasıtası ile uygulandığı öğrenilmektedir (M. R. Hausmann, 1990).

Geçmişte arazide zeminlerin yüksek sıcaklık etkisinde bırakılarak iyileştirilmesi neticesinde yapılmış birkaç çalışma bulunmaktadır. Bu uygulamalar, ilerleyen alt maddelerde anlatılacağı üzere, iyileştirilmesi hedeflenen zemin bünyesinde belirlenmiş bir ısıtma düzeneği kurulup, bu ısının zemine belirli bir sıcaklık kademesi ve süresi boyunca tesiri neticesinde gerçekleştirilmiştir. Aşağıda yeralan ilk iki alt başlıkta zeminlere arazide yüksek sıcaklık uygulama yöntemi kısaca anlatılacaktır.

2.2.1. Zemini yüzeyden ısıtarak iyileştirme

Bu uygulama türüne öncü olarak Avustralya'da Irvine (1930, 1934) tarafından gerçekleştirilen bir killi yol yüzeyini ısıtarak yapılan iyileştirme çalışması gösterilmektedir. Çalışmada, su muhteviyatı yüksek hassas kil zemini ısıtmak için hızı saatte 2-10 m arasında değişen bir makine geliştirip, bu makineye bağlı ısıtma kazanında tahta yakılması ile zemin yüksek sıcaklıklar etkisinde bırakılarak iyileştirmiştir. Bu uygulama sonrasında, katman kalınlığı 5-20 cm kalınlığında değişim gösteren plastik olmayan zemin elde edilmiştir. Isıl iyileştirme sonrasında, ısıl işlem görmüş zeminin boyutlarının büyüklüğü 10 cm kalınlığa kadar değişen birbirine kilitlenmiş katı malzemelere dönüştüğü belirlenmiştir.



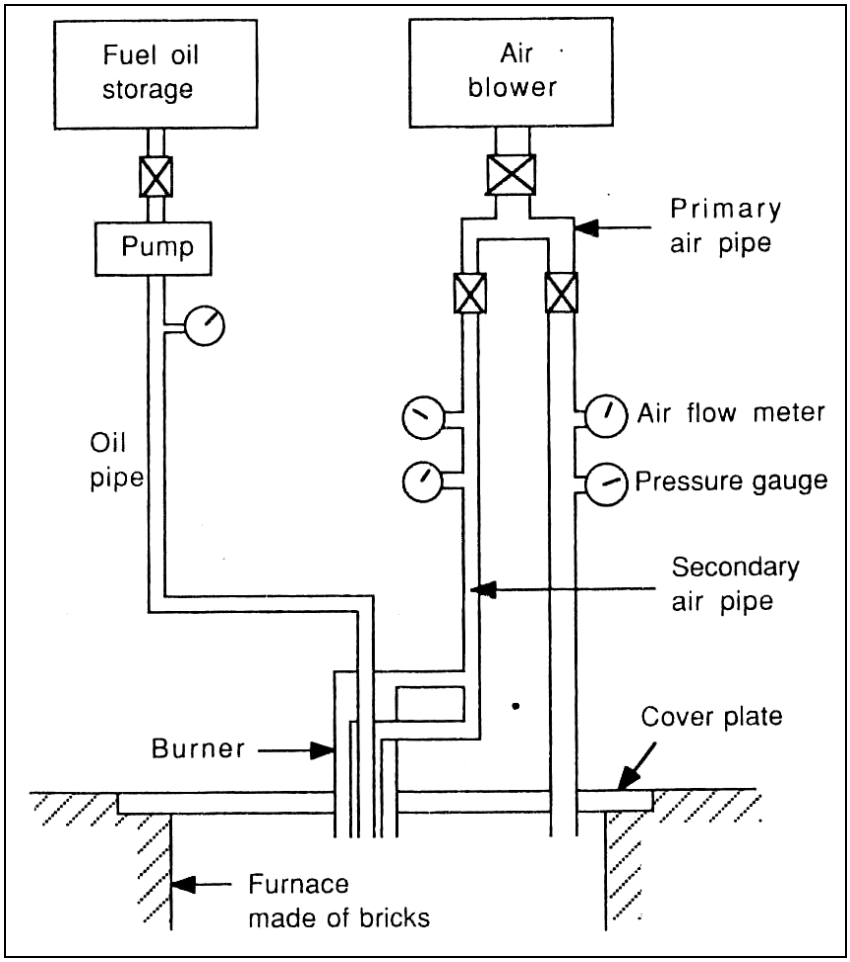
Şekil 2.1: Irvine'nin geliştirdiği ısıl iyileştirme aletinin şematik görünümü (Irvine, 1930 ve Sherrard, 1958)

Araştırmacının geliştirdiği, zeminleri ısıtmakta kullanılan bu mekanizma sayesinde New South Wales ve Queensland yol geçkisinin bazı kesimlerinde zeminleri iyileştirmekte kullanılmıştır. Çalışmacıya göre, 1 m^3 zemini iyileştirebilmek için yaklaşık olarak 400 kg kadar tahtanın yakılması gerektiğini belirtmiş olup, aynı zamanda ısıl yöntemlerle 16 km uzunluğunda yeni oluşturulacak bir yol inşaatının, çakılla yapımından daha az maliyetli olacağını belirtmiştir. Ayrıca Irvine, killere ısıl iyileştirme uygulayarak beton agregası yapımında kullanılabilirliğin de göz önünde bulundurulmasını önermiştir.

2.2.2. Zemini boru düzeneği kurarak iyileştirme

Fujii (1971), bir zemine ısıl işlem uygulama yönteminin açık ve kapalı olarak iki farklı yöntemle uygulanabileceğini belirtmiştir.

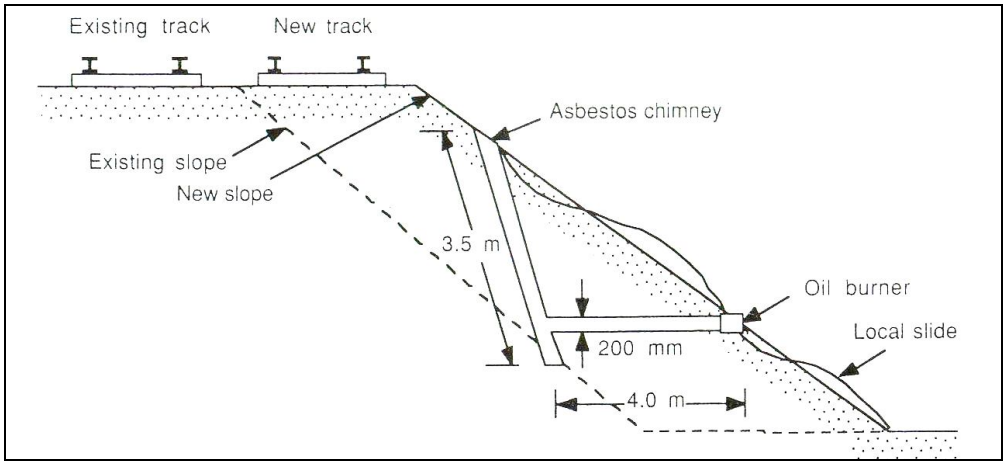
Araştırmacı tarafından oluşturulan düzenekte, atık zemin sahasındaki güçlendirilen zeminin, belirli bir derinlik ve aralıklarla yerleştirdiği kapalı boru sistemi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Zemin içerisine kurulan bu düzenek; 5 metre aralıkları olan, uzunlukları 2-6 metre derinliklerinde değişen, toplamda 227 boru ile kurulmuştur. Bu sisteme ısıl işlem 7-15 gün arasında uygulanmış ve toplamda 760 L benzin kullanılmıştır. Bu çalışmada yürütülen araştırmalara göre, bu ısıtma hattından geçen bir borunun 2 m için çevresini etkileyebildiği ve bunun neticesinde 60 L/m^3 benzin kullanıldığı gözlenmiştir.



Şekil 2.2: Zeminlerin ısıl iyileştirilmesinde kullanılan kapalı boru sistemi (Fujii, 1971)

Bu araştırmacının gerçekleştirdiği bir diğer çalışma, Kanazawa-Japonya'da üzerinden yolgeçen bir şevin açık boru sistemi kullanılarak iyileştirilmesinde uygulanmıştır. Bir benzin yakma kazanı ile 10 günü aşkın süre boyunca, yerleştirilen bir borunun merkezinden 3 m uzaklıkta 300 °C sıcaklığa ulaşana kadar ısıtılması ve her bir boru için 1200 L benzinin yakılması ile gerçekleştirilmiştir.

Bu yöntem esas alındığında iyileştirilmiş zemin, doğal hâline göre bütünüyle ıslak hâlde olmuş olsa bile, mukavemeti 10 ile 20 katı arasında artarak değişmektedir.



Şekil 2.3: Zeminlerin ısıl iyileştirilmesinde kullanılan açık boru sistemi (Fujii, 1971)

2.2.3. Tünel mühendisliğinde

Tünel yapılarında çeşitli nedenler ile yangınlar çıkmakta ve mevcut zemin yapısı ile yapı elemanları bu yüksek sıcaklıktan etkilenmektedir. Son yıllarda bu etkilerin araştırılmasına yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Geçmişte çıkan tünel yangınlarına bakıldığında, bünyede belirli bir süre boyunca etkiyen şiddetli yangın, zeminde kalıcı olarak iyileşme sağlamıştır. Mamafih, yüksek sıcaklığın kontrolsüz etkisinden dolayı mevcut tünel betonunun hasarı ve/veya can kayıpları ile sonuçlanan vakalar mevcuttur (Yong, 2004).

2.3. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Zeminlerin Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Değişimi

Zeminlerin yüksek sıcaklık etkisinde bırakılması neticesinde fiziksel ve kimyasal yapılarındaki değişimleri incelendiğinde, çoğunlukla seramik mühendisliği alanında yapılan çalışmalara rastlanılmaktadır.

Kil yüzeyi yüksek su tutma kapasitesine sahip olup, yüzey suyu tutuk ve serbest olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Kil yüzeyindeki su tabakalarından farklı olarak, kilin kristal yapısında da su molekülleri bulunmaktadır. Belirli bir sıcaklığa varıldığında ise önemli fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelmektedir. Kilin, kimyasal yapısındaki suyun sistemden alınması için kil türüne bağlı olarak 400-850 °C sıcaklık uygulaması gerekmektedir (Önalp, 2002). Killi zeminlerin 700 °C

sıcaklığa kadar ısıtıldığında killerin mikroyapısında fiziksel ve kimyasal değişmeler meydana gelir (Abu-Zreig ve diğ., 2001). Ayrıca ısı etkisinde killi zeminlerin iyileştirilmesi ile zeminlerin katyon değiştirme kapasitesi ve sıkıştırılabilirliği azalır (Joshi, 1994).

Joshi (1994), ısı etkisinde killi zeminlerin iyileştirilmesi ile zeminlerin katyon değiştirme kapasitesi ve sıkıştırılabilirliği azaldığını belirtmiş ve tuğla yapımında kullanılan kil numunelerine 300-700 °C sıcaklık uygulamıştır. Araştırmacı yaptığı bu çalışmada, sıcaklık düzeyinin artması ile numunelerinin mukavemetinin de arttığını belirtmiştir.

M. R. Hausmann (1990)'a göre, bir killi zemin 400 °C sıcaklığın üzerinde ısıl iyileştirmeye tabii tutulduğunda o zeminin mühendislik özellikleri kalıcı olarak değişikliğe uğrar. Bu olay zeminin dondurularak iyileştirilmesinden farklıdır çünkü yapay olarak soğutulup dondurulan bir zemin bünyesindeki su eridiğinde önceki hâline göre yapısı zayıflar ve eski hâline döner. Diğer yandan, yine bu araştırmacıya göre kiremit gibi yapı malzemelerinin yapımında 500-700 °C optimal sıcaklık aralığı olarak uygulanabilmektedir.

2.4. Fiziksel Özelliklerin Değişimi

2.4.1. Atterberg (kıvam) limitlerinin değişimi

Abu-Zreig ve diğ. (2001) öğütülmüş hâlde iki farklı kil ile silt numunesinin 100, 200, 300 ve 400 °C sıcaklık uygulamaları için yaptığı çalışmada, numunelerin Atterberg limitlerinin değişimini incelemişlerdir. Likit ve plastik limit değerleri, sıcaklık artışı ile hızlı bir şekilde azalmıştır. Atterberg limiti oda sıcaklığında elde edilen değerlere nazaran, 100 °C'de çok küçük oranda azalmıştır. Her üç numune için 400 °C sıcaklıkta likit limit değerleri, %60'dan fazla oranda azalırken, plastik limit değeri ise sıfırlanmıştır.

Yüksek sıcaklık etkisinde killi zeminlerinin plastisite özelliklerinin değişiminin incelendiği bir diğer çalışma Tan ve diğ. (2003) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Araştırmacılar, iki farklı kil numunesi üzerinde çalışmış ve sıcaklık uygulamasının 100 °C'den başlayıp, kademeli olarak artarak 1000 °C sıcaklığa kadar artışı için deneyler yapmışlardır. Likit ve plastik limitin 300 °C sıcaklık uygulaması için önemli derecede azaldığını belirtilmiştir. Referans sıcaklığı kabul edilen 100 °C sıcaklığa göre 300 °C sıcaklıkta likit limitinin sırayla başlangıçta küçük olan numune için yüzde olarak 53 ve 64 oranında azalırken, plastik limit, likit limite benzer olarak sırayla yüzdece, 79 ve 84 oranında azaldığını belirlenmiştir. 400 °C ve 1000 °C sıcaklık aralıklarında ise likit limit için önemli bir değişim gözlenmezken, plastisitenin sıcaklık artışı ile sürekli azalarak, 400 °C sıcaklıkta kaybolduğu tespit edilmiştir.

Bir diğer çalışma, Kalkan ve Bayraktutan (2007) tarafından beş farklı kil numunesi üzerinde yapılmıştır. Çalışmada 100, 200, 300, 400 ve 500 °C sıcaklık uygulamalarında, killerin Atterberg limitlerinin değişimi incelenmiştir. Numunelerin 300 °C sıcaklık uygulamasında likit ve plastik limitinin yaklaşık %50 oranında azaldığı belirlenmiştir. Likit limit, 400 °C ve 500 °C sıcaklık değerlerinde önemli bir değişime uğramamıştır. Plastik limitin değişiminde ise 400 °C sıcaklık seviyesi için önemli düzeyde azalmış ve 500 °C'de bu özellik ortadan kalkmıştır.

2.4.2. Ağırlığın değişimi

Killerde yerçekimi etkisinde bulunan serbest su, etüv sıcaklığında bünyeden buharlaşabilmektedir. Hidratlanma suyu (soğrulmuş su) ise kil mineralinden 110 °C sıcaklıkta tutulması neticesinde uzaklaşabilmekte ve numune sıcaklığı düştüğünde bu hidrate olmuş su kil yüzeyini tekrar kaplamaktadır (Önalp, 2002).

Kaolin, illit ve montmorillonit numunelerinin katkı olarak kullanıldığı seramik yapımında kullanılan bir malzeme için ağırlık değişiminin gözlendiği bir çalışma Merino ve diğ. (2006) tarafında yapılmıştır. Termogravemetrik yöntem vasıtasıyla bu numunelerin 900 °C sıcaklıktan kademeli olarak artarak, 1200 °C sıcaklığa kadar değişen sıcaklık kademelerinde ağırlıklarının değişimi tespit edilmiştir.

Çalışmada, her üç numunede serbest suyun olmadığı durum için kaolin numunesinin, yaklaşık 550 °C sıcaklıkta yapısındaki suyun OH^- iyonuna dönüştüğünü ve böylelikle ağırlığını %13 oranında kaybettiği belirlenmiştir.

Montmorillonit numunesinde, iki farklı özellikte su bulunduğu belirtilmiş olup, bunların;
i) Dane yüzeyinde yer alan ve 200-400 °C sıcaklıkta bünyeden uzaklaşabilen higroskopik su,
ii) Numunelerinin ağırlığının önemli bir oranda kaybolduğu numunenin mineral yapısında bulunan ve ağırlıkça en fazla 600 °C sıcaklıkta OH^- iyonu olarak uzaklaşan su olduğu belirtilmiştir. Montmorillonoit numunesinin 800 °C sıcaklıktaki ağırlığı, başlangıç ağırlığına kıyasla %9 oranında kayba uğradığı tespit edilmiştir.

Diğer yandan illit mineralinde ise üç farklı aşamada ağırlıkça azalımın olduğunu ve bunların;
iii) 350 °C'ye kadar higroskopik suyun uzaklaşması ile,
iv) Sıcaklık aralığının 350-650 °C olduğu kademede, mineral yapısında bulunan suyun, illitin kristal kafesinde bulunan OH^- iyonuna dönüştüğünü,
v) 650 °C üzerindeki sıcaklıklarda, kalsiyum karbonatın karbon dioksite dönüştüğünü ve en büyük ağırlık kaybının 775 °C sıcaklıkta meydana geldiğini ve bu oranının yaklaşık %11 kadar olduğu belirtmiştir.

2.4.3. Özgül ağırlığının değişimi

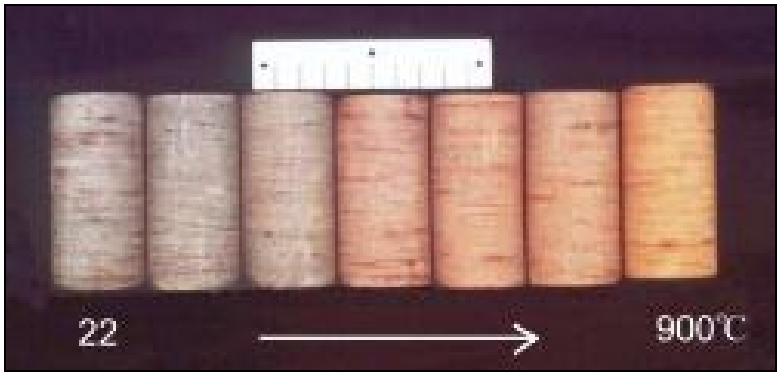
Tan ve diğ. (2003) tarafından iki farklı öğütülmüş kil numunesi üzerinde yapılan çalışmada, başlangıçta sırayla 2.78 ve 2.64 olarak belirlenen numunelerin özgül ağırlık değerleri, yine sırayla 600 °C'ye kadar dikkate değer bir azalış gösterip, 2.50 ve 2.43 olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık kademesinden sonraki sıcaklık kademeleri olan 800 °C ve 1000 °C için ise özgül ağırlığın yaklaşık olarak sabit kaldığı tespit edilmiştir.

2.4.4. Özgül ısının değişimi

Hâjpal ve Török (1998) yaptığı çalışmada iki farklı kumtaşı üzerinde özgül ısılarını kalorimetre kullanarak belirlemişlerdir. İlk tip kumtaşında ısı uygulanmadan önceki durum için 0.7 J/g K olarak belirlenen özgül ısı, yaklaşık 700 °C sıcaklıkta, 3 J/g K olmuş ve 900 °C'de 1.1 J/g K olduğu tespit edilmiştir. İkinci tip kumtaşında ise yine başlangıç değeri 0.7 J/g K olan özgül ısı 550 °C sıcaklıkta, 1.25 J/g K iken, uygulanan sıcaklığın 900 °C olduğu kademede, 0.8 J/g K olarak tespit edilmiştir.

2.4.5. Rengin değişimi

Török ve Hâjpal (2005), çapı 40 mm olup, yüksekliği çapının iki katı olan silindirik numuneler üzerinde yaptığı çalışmada, toplam 10 farklı kumtaşı numuneleri üzerinde artan yüksek sıcaklıklar etkisi için renklerinde cereyan eden değişimi incelemişlerdir. Başlangıçta gri renkte olan numuneler, uygulanan sıcaklıkların 150, 300, 450, 600, 750 ve 900 °C olduğu kademeler için 6 saat boyunca ısıl işleme maruz bırakılmıştır. Aşağıdaki resimden anlaşılacağı üzere, sırayla sıcaklığın artışına bağlı olarak, numune renklerinin griden kızıla dönüştüğü gözlenmektedir.



Fotoğraf 2.1: Oda sıcaklığından başlanarak yüksek sıcaklıklar uygulanmış, kumtaşı numunelerinde renk dönüşümü

Yürütülen çalışmada, yüksek sıcaklık etkisindeki bu renk değişimi, geotit ve hematit gibi ikincil minerallerden olan ferrus minerallerinin kumtaşının rengini kızıla dönüştürmesi ile açıklanmıştır. Fakat araştırmacılar yine de bu etkinin, tüm kumtaşları için geçerli olmayacağına dikkat çekerek renk değişiminin sadece sıcaklık

artışı ile değil, aynı zamanda demirin oksidasyon durumu ve mineral tipinin etkisinin olacağına dikkati çekmişlerdir.

2.4.6. Sıkıştırılabilirlik özelliklerinin değişimi

Abu-Zereig ve diğ. (2001) tarafından öğütülmüş iki farklı kil ve silt numunesinin yüksek sıcaklıklar etkisinde optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlık ilişkisinin değişimi incelenmiştir. Bu iki değişkenin, 100 °C sıcaklık uygulaması ve oda sıcaklığında belirlenen büyüklükleri yaklaşık olarak değişmediği belirtilmiştir. Uygulanan 200, 300 ve 400 °C sıcaklık kademeleri için optimum su içeriğinin kademeli olarak düşerek, her üç zemin numunesi için de %10 kadar düştüğü tespit edilirken, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 100-300 °C sıcaklık aralığında önemli düzeyde artmış ve 400 °C için önemli oranda değişmediği saptanmıştır. Uygulanan sıcaklığın 100 °C olduğu seviyede, kuru birim hacim ağırlığı büyük olan numunenin 400 °C sıcaklık kademesinde de kuru birim hacim ağırlığı yine büyük olmak üzere %11 oranında artış, diğer kil numunesi için ise %7 oranında artış belirlenmiştir. Diğer yandan silt numunesinin maksimum kuru birim hacim ağırlığı başlangıç durumuna göre, %12 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Bir başka çalışma, iki farklı toz hâlinde öğütülmüş kil numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir (Tan ve diğ., 2003). Çalışmada referans sıcaklığı olarak kabul edilen 100 °C sıcaklıkta, optimum su içeriğinin 400 °C sıcaklık için önemli oranda düşmüştür. Bu iki kil numunesinin sırayla 100 °C sıcaklık uygulamasında %27.4 ve %36.0 olarak belirlenen optimum su içerikleri, 400 °C sıcaklıkta hızla düşerek, yine yüzdesel olarak sıra ile 17.5 ve 17.6 olduğu tespit edilmiştir. Artan sıcaklık kademeleri için bu değişken önemli oranda azalım göstermeyip, 1000 °C sıcaklıkta optimum su içerikleri iki numunede yine sırayla %17.0 ve %16.0 olarak bulunmuştur. Maksimum kuru birim hacim ağırlık ise sıcaklığın 100 °C olduğu kademede kN/m^3 olarak sırayla 15.8 ve 11.9 olarak belirlenirken, 400 °C sıcaklıkta çarpıcı düzeyde artarak kN/m^3 olarak, 16.6 ve 16.8 olarak hesaplanmıştır. Sonraki artan sıcaklıklar etkisinde, bu değişkende önemli oranda farklılık gözlenmemiştir.

Kalkan ve Bayraktutan (2007) tarafından yapılan çalışmada beş farklı kil için 100, 200, 300, 400 ve 500 °C sıcaklık etkisinde bu özelliklerin değişimini incelenmiştir. 400 °C'de optimum su içeriği 100 °C sıcaklığa göre yaklaşık %50 oranında düşerken, maksimum kuru birim hacim ağırlık yaklaşık %10 oranında artış göstermiştir. Bundan sonraki sıcaklık uygulaması olan 500 °C için ise optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değişkenlerinde önemli bir değişim saptanmamıştır.

2.4.7. Genleşme ve büzülmenin değişimi

Mbumbia ve diğ. (2000) yaptığı çalışmada, Kamerun'un Etoug-Ebe bölgesinden alınıp, 60×33×27 mm^3 boyutlarında hazırlanan numunelere, kademeli olarak artan yüksek sıcaklıklar uygulanmış ve hacimsel büzülmenin değişimini incelemişlerdir. İçeriğinde %30 oranında kum bulunan yüksek plastisiteli bir kil çeşidi numunelerini, laboratuar sıcaklığı olan (27 °C), 110, 350, 550, 750, 850 ve 975 °C sıcaklılarına tabii tutulmuştur. Çalışmacılar, farklı yüksek sıcaklıklar uygulayacağı numuneleri, farklı ısıtma süreleri olan 4 ve 8'er saatlik süreleri için de ısıl işlem uygulayarak, bu etkinin numuneler üzerinde hacimsel değişimine olan katkısını gözlemişlerdir.

Hacimsel büzülmenin sırayla 4 ve 8 saat ısı uygulanan numunelerde, 110 °C sıcaklıktaki numunenin hacmi referans alınarak, 550 °C'de ortalama alınarak, %3.5 ve %2.7 oranında gözlenirken, 750 °C sıcaklık uygulaması için ise %2.5 ve %1.8 olduğu tespit edilmiştir. Ardıl artan sıcaklık uygulamalarında ise bu değişken hızla artmış ve 975 °C'de, %9.8 ve %9.3 olarak belirlenmiştir.

Seramik yapımında kullanılıp Tayvan'ın Miao-Li bölgesinden alınan kil numunesinin uygulanan yüksek sıcaklık aşamalarının 900, 1000, 1100, 1200 ve 1250 °C olduğu bir diğer çalışma Lee ve Yeh (2007) tarafından yapılmıştır. Çalışmada, 3×4×45 mm^3 boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklinde hazırlanan numuneler, referans sıcaklık olarak kabul edilen 110 °C sıcaklıkta 4 saat bekletilmiştir. Sonrasında numunelere 1 saat boyunca yüksek sıcaklıklar uygulanmış ve 900 °C sıcaklıkta hacimce %12.3 büzülme göstermiş olup, 1000 °C sıcaklıkta bu değişken önemli oranda değişim göstermemiştir. Bundan sonraki artan sıcaklık aşamaları olan

1100 °C ve 1200 °C sıcaklıklar için bu değişken hızla artarak, 1200 °C'de %27.55 olarak tespit edilmiştir. En son sıcaklık seviyesinde ise hacimsel büzülmenin önemli oranda değişmediği saptanmıştır.

Bir diğer çalışma ise Monterio ve diğ. (2007) tarafından yapılmıştır. Kiremit yapımında kullanılan Brezilya'nın Campos dos Goytacazes, Rio de Janerio bölgesinden alınan killere yüzdece 0, 3, 5 ve 10 oranlarında katkı maddeleri eklenmiştir. 11.5×2.5×1.0 cm^3 boyutlarında sıkıştırılan numuneler bir gün 110 °C sıcaklıkta kurutulduktan sonra 700, 900 ve 1100 °C sıcaklıklar etkisinde 1'er saat kalmıştır. Araştırmacılar, çalışmada değişen katkı oranlarında ve sıcaklık uygulamalarında numunelerin boysal uzamalarını gözlemiştir. Sıcaklığın sırayla 700 °C ve 900 °C olduğu kademelerde, boysal büzülme yaklaşık olarak %1.5 ve %3 arasında kalırken, eklenen katkı maddesi oranının, bu değişken üzerinde etkili olmadığı belirlenmiştir. 1100 °C sıcaklıkta ise katkı maddesi oranının %0, %3 ve %5 içerikleri için boysal uzama %9 kadar olurken, katkı maddesinin %10 içeriğinde bu değişken küçük oranda azalarak, %8.5 oranına düşmüştür.

2.4.8. Mukavemet özellikleri

Bir zeminin içsel sürtünme direnci ve diğer özellikleri uygulanan sıcaklığa bağlı olarak kalıcı ya da geçici olarak değişikliğe uğrar (Mitchell, 1969, Joshi ve diğ., 1994).

2.4.9. Serbest basınç mukavemetinin değişimi

Abu-Zreig ve diğ. (2001) de yaptığı çalışmada öğütülmüş iki farklı kil ve silt numunelerinde değişen sıcaklık uygulamaları etkisinde bırakılması neticesinde serbest basınç mukavemetinin değişimini incelemişlerdir. Sıcaklığın 100, 200, 300 ve 400 °C seviyelerine tabii tutulan toz halinde numuneler, sonrasında sıkıştırma kalıbında modifiye olarak sıkıştırılmış ve serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Uygulanan sıcaklığın 100 °C olduğu kademede ilgili değişken en yüksek olmak şartıyla, ardıl artan sıcaklık uygulamalarında için kademeli olarak bütün numunelerde sürekli düşmüş ve son sıcaklık kademesi olan 400 °C'de sıfırlanmıştır.

Bu araştırmacılar, yürütülen çalışmada öğütülmüş hâlde ısıtıp sonrasında şekil verilen numuneler üzerindeki bu düşüşü, zeminin bünyesindeki kohezyon özelliğini yitirmesi ve organik madde yapısının bozulması ile açıklamıştır. Ayrıca gözlenen bu eğilim, kademeli olarak artan sıcaklık uygulaması etkisinde, zeminin daneli bir yapıya dönüştüğünü ve serbest basınç mukavemetinin düşüşündeki eğilime çok benzer olarak, plastik limitin de kademeli olarak azaldığına dikkat çekmişlerdir.

Zeminlerin yüksek sıcaklık etkisinde serbest basınç mukavemetinin araştırıldığı bir diğer çalışma, Mbumbia ve diğ. (2000) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan yöntem, Abu-Zreig ve diğ. (2001) tarafından yapılan araştırmadan farklı olarak, numunelere kübik kalıpta hazırladıktan sonra ısıl işlem uygulanmasıdır. İçeriğinde %30 oranında kum bulunan zemin numuneleri, kademeli olarak değişen sıcaklıklarda ve sürelerde ısıtılmıştır.

Laboratuar sıcaklığı (27 °C), 110, 350, 550, 750, 850 ve 975 °C sıcaklığında ısıtıldığında sıcaklık etkisi ile 4 ve 8'er saat ısıtılan numunelerin sıcaklığın artışı ile serbest basınç mukavemetinin sürekli olarak yükseldiği belirtilmiştir. Diğer yandan dikkati çeken önemli bir husus, ısıtma süresinin artışı ile serbest basınç mukavemetinin süre etkenine bağlı olarak sürekli olarak artmadığıdır. Aşağıdaki tabloda, bu araştırmacıların yaptığı deneysel çalışma için numunelerin ortalama serbest basınç mukavemetinin sıcaklık ve ısıtma süresi ile olan ilişkisi özetlenmiştir.

Tablo 2.1: Ortalama serbest basınç mukavemetinin (MPa) uygulanan sıcaklık ve ısıtma süresi ile değişimi

Uygulanan sıcaklık (°C)		350	550	750	850	975
Süre (saat)	4	4.60	9.75	9.95	11.27	14.23
	8	4.41	9.59	10.33	11.80	14.69

2.4.10. Eğilme mukavemetinin değişimi

Martín-Márquez ve diğ. (2007) yaptığı çalışmayı, içeriğinde %50 kaolin, %40 feldspat ve %10 kuvars içeren, hızlı ısıtma uygulaması için ticari seramik olarak kullanılan numuneler üzerinde yapmıştır. Optimum ısıtma sıcaklığının 1260-1280 °C sıcaklık olduğunu belirtip, bu sıcaklıklarda ısıtılan numunelerin ortalama eğilme mukavemetinin 34±2 MPa olurken, bunun yanında Young modülünün 72 GPa olarak hesaplandığı tespit edilmiştir.

Lee ve Yeh (2007) yaptıkları çalışmada, kil numuneleri üzerinde sıcaklığın eğilme mukavemeti üzerindeki değişimini incelemişlerdir. Etüv sıcaklığında kurutulmuş numuneler, sıcaklığın 900, 1000 ve 1200 °C artan seviyeleri için uygulanmıştır. Numunelerin boyutları 3×4×45 mm^3 olarak hazırlanırken, ısıtma hızları 2 °C/dk. ve 10 °C/dk. olarak seçilmiştir. Hedeflenen sıcaklığa ulaşan numuneler, 60 dakika boyunca bu sıcaklıkta tutulmuş ve sonrasında eğilme testi yapılmıştır. Isıtma hızının 10 °C/dk. olduğu durum, 2 °C/dk. olduğu duruma göre küçük oranda daha büyük eğilme mukavemeti değerleri göstermiştir. Numunelerin ısıtma hızının 10 °C/dk. olarak belirlendiği durumda sırayla 900, 1000, 1100 ve 1200 °C sıcaklık kademeleri için eğilme mukavemeti, 7.17 MPa, 10.10 MPa, 16.36 MPa ve 26.94 MPa olarak hesaplanmıştır.

2.4.11. Basınç mukavemeti ve yoğunluk arasındaki ilişki

Merino ve diğ. (2006) seramik üretiminde kullanılan killere farklı oranlarda katkı maddesi ekleyip, bu numuneleri yüksek sıcaklık etkisinde bırakarak serbest basınç mukavemeti ile yoğunluk arasındaki değişimi incelemişlerdir. Sırayla çap ve boyu 23 mm ve 46 mm olarak hazırlanan silindir numunelere 900, 1000, 1100, 1125, 1150, 1175 ve 1200 °C büyüklüğünde sıcaklıklar 60 dakika boyunca uygulanmıştır.

Araştırmacılar, üzerinde çalıştığı yaklaşık 900 numune üzerinde geliştirdiği eşitlikte basınç mukavemeti ve yoğunluk arasında üstel bir eşitlik ilişkisi kurarak;

$$CS = A\,e^{-\frac{B}{yogunluk}} \quad (2.1)$$

bağıntısının olduğunu belirtip, bu formül logaritmik olarak ise,

$$LnCS = LnA - \frac{B}{Yogunluk} \quad (2.2)$$

ile ifade edileceğini belirtmiş ve eşitlikte;

$$LnA = 9.987,\ B = 11.149 \quad (2.3)$$

ile olduğunu hesaplamışlardır.

2.4.12. Yoğunluk, görünür porozite ve büzülmenin değişimi

Isıl işlem görmüş killi zeminler üzerinde yoğunluk, görünür porozite ve büzülmenin değişiminin incelendiği çalışmalardan biri Lee ve Yeh (2007) tarafından yapılmıştır. İlgili çalışmada, sıcaklığın artışı ile yoğunluk ve büzülme artarken, görünür porozitenin azaldığı belirlenmiş ve aşağıdaki tablo ile gösterilmiştir.

Tablo 2.2: Isıtılma sıcaklığının yoğunluk, görünür porozite ve büzülme üzerindeki değişimi

Uygulanan sıcaklık (°C)	Yoğunluk (gr/cm^3)	Görünür porozite (%)	Büzülme (%)
900	1.83	32.26	12.30
1000	1.84	32.20	12.78
1100	1.99	25.92	18.90
1200	2.22	15.50	27.55
1250	2.24	1.79	28.70

2.4.13. Elastisite modülünün değişimi

Lee ve Yeh (2007) tarafından yapılan çalışmada, kil numuneleri için yüksek sıcaklığın elastisite modülü üzerindeki değişimi incelenmiştir. Etüv sıcaklığında kurutulmuş numuneler, sıcaklığın 900, 1000 ve 1200 °C artan seviyelerde uygulanmıştır.

Çalışmada, numunelerin eğilme mukavemetini saptayarak, elastisite modülü de hesaplanmıştır. Isıtılma sıcaklığının 200-900 °C arasındaki olduğu seviyeler için elastisite modüllerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Isıtma süresinin 10 °C/dk. olduğu durum için sırayla 900, 1000, 1100 ve 1200 °C sıcaklıklarda elastisite modülü kademeli olarak artarak; 2.82 GPa, 3.79 GPa, 9.00 GPa ve 14.92 GPa olarak belirlenmiştir.

2.5. Kimyasal Özelliklerin Değişimi

Bir birleşik ya da kristalde belirli bir sıcaklığa varıldığında önemli fiziksel ve kimyasal değişimler olur. Killi zeminlerin yüksek sıcaklık etkisinde bırakılması neticesinde yapısında, enerji ve ağırlıklarında değişimler olmaktadır. Bu değişimlerin ölçüldüğü metotlar, ısıl yöntemler olarak bilinir ve mineral cinsi ve içeriğinin belirlenmesinde kullanılabilir. Bu yöntemler, differential thermal analysis (DTA), differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetri (TG) ve differential thermal gravimetry (DTG) olarak adlandırılır (Önalp, 2002). Ayrıca scanning electron microscopy (SEM) ve X-ray diffraction (XRD) yöntemleri de kimyasal özelliklerin saptanmasında kullanılmaktadır.

Mbumbia ve diğ., (2000) yüksek plastisiteli zeminlerin yüksek sıcaklıklar etkisinde bırakılması neticesinde, yapılarında cereyan eden kimyasal değişimi incelemişlerdir. Sıcaklık kademelerinin 110, 350, 550, 750, 850 ve 975 °C olduğu koşullar için numuneler 4 ve 8'er saatlik olmak üzere iki farklı ısıtma süresine tabii tutulmuştur. Araştırmacılar, killi zeminlere yüksek sıcaklık uygulanarak killerin çömlek yapımı için kullanılabilirliğinin mümkün olduğunu belirtilmişlerdir. Yapılan dane çapı dağılımı analizine göre, doğal hâldeki numunenin içeriğinde silt de bulunan kumlu kil olduğu tespit edilmiştir.

Bu numunenin doğal durumu için yapılan kimyasal analiz neticesinde içeriğinde başlıca silika, alimüna ve demir oksitler olduğu belirlenmiştir. 500-900 °C sıcaklık uygulaması için bazı dayanım değişkenleri göz önünde bulundurulduğunda, uygun sıcaklık aralığı olduğunu belirtilip, bu sıcaklık uygulaması aralığı için yapılan analizlerde çoğunluklu fazın kuvars, kaolinit, geotit ve hematit olduğu saptanırken,

biotit ve zirkonda ayrıca görülmekte olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, 600 °C sıcaklık için yeni bir faz oluşumunun meydana geldiğini belirtip, bu yapıyı ferrik aliminyum silikat olarak tanımlamışlardır.

Killerin yüksek sıcaklık etkisinde kimyasal yapısındaki değişimlerin incelendiği bir diğer çalışma, Jordan ve diğ. (2008) tarafından yürütülmüştür. Beş ayrı kil numunesi 65 °C sıcaklıkta 3 gün boyunca bekletildikten sonra, maksimum sıcaklığın 800, 850, 950, 1050, 1100 ve 1150 °C olduğu kademelerde 35 dakika boyunca tutulmuştur.

Yüksek sıcaklık uygulaması öncesinde yoğunluklu olarak kalsit ve kuvars fazlarından oluştuğu belirlenirken, yapılan kimyasal analizde yüzdesel olarak, 40.02-59.00 oranında SiO_2, 16.95-27.75 oranında CaO, 14.80-17.43 oranında değişen aralıklarda Al_2O_3 ve küçük oranda alkalin metallerinden meydana geldiği belirlenmiştir. 800 °C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numuneler için mineral içeriğinde en yüksek oranda kuvars minerali meydana gelmek üzere, sırayla yoğunluklu olarak potastik feldspat, hematit, illit, kalsit ve kalsiyum oksit içerdiği tespit edilmiştir. Sıcaklığın kademeli olarak artışı ile kuvars ve hematit mineralinin oranı azalmış, kalsiyum oksit ve kalsit minerali ortadan kalkmış potastik feldspat miktarı azalarak augite ve wollastonite oluşmuştur.

Monterio ve diğ. (2007) tarafından yapılan çalışmada, tuğla ve kiremit yapımında kullanılan Brezilya'nın Campos dos Goytacazes, State of Rio de Jenerio bölgesinden alınan killere yüzdece 0, 3, 5 ve 10 oranında bataklık zemin (kil) eklenmiştir. Çalışmada, 110 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilen numuneler, sonrasında tuğla ve kiremit yapımında uygulanan 700, 900 ve 1100 °C sıcaklık kademelerine birer saat boyunca uygulanıp mineralojik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişimini XRD, dane çapı dağılımı ve kimyasal analiz ile belirlenmiştir.

Araştırmacılar, başlangıçta bu killerin içeriğinde ağırlıklı olarak kaolin, kuvars, mikamsı ve gibsit minerallerinden oluştuğunu belirlenmişlerdir. İlave olarak, kullanılan bataklık zeminin içeriğinde ise kaolin, kuvars, gibsite ve geotit başlıca minerallerden oluştuğu saptanmıştır. Kullanılan katkı maddesi için ise sırayla

yüzdece, 30.67, 30.39, 24.68, 11.59 oranlarında LoI, Al_2O_3, SiO_2 ve Fe_2O_3 ve bazı bileşiklerinden oluştuğu tespit edilmiştir.

İlgili çalışmada, test edilen DTA ve TG analizlerden belirlendiği üzere, numunelere eklenen katkı maddesinin yüksek sıcaklık uygulaması esnasında iki ekzotermik ve iki endotermik pik cereyan etmiştir. İlk endotermik pik, 95.9 °C sıcaklıkta gerçekleşip, higroskopik suyun salınmasından dolayı ağırlıkça %7.56 oranında kayba neden olurken, ikincil endotermik pik, 516.7 °C sıcaklıkta kaolin dehidrasyonu ile ilgili olup, ağırlıkça % 4.98 kadar ağırlıkça azalıma neden olmuştur. Ekzotermik piklerden ilki, 313.6 °C'de organik maddenin oksidasyonundan meydana gelmiş ve ağırlıkça %17.70 azalıma sebep olmuştur. İkinci ve son ekzotermik pik, sıcaklığın 931.2 °C olduğu düzeyde metakaolinin bölünmesinden meydana gelmiştir. Araştırmacılar, yüksek sıcaklıklar uygulanmış numuneler için içeriğine atık zemin numunesi eklenen kil numunelerinin, seramik endüstrisinde kullanılabileceğini önermiştir.

Martín-Márquez ve diğ., (2007) tarafından yapılan çalışmada, içeriğinde %50 kaolin, %40 feldspat ve %10 kuvars bulunan, hızlı ısıtma uyguladığı ticari seramik olarak kullanılan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Boyutları 50×50×8 mm^3 dikdörtgenler prizması olarak hazırlanan numuneler, ilkin 110 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Yüksek sıcaklığın 1200-1300 °C arasında değişen altı farklı sıcaklığın ve ısıtma süresinin yaklaşık 30 dakika olarak seçildiği numunelere SEM ile X-ray analizlerini doğal hâldeki ve ısıtılma sonrası numuneler için uygulanmış ve kıyaslanmıştır.

Bu çalışmaya göre, numunelerin ısıtılma süreci öncesinde, yapılan kimyasal ve mineralojik analizinde, eklenen karışımı oluşturan bileşenlerde yoğunluklu olarak kaolin, mikrokline, illit, albit ve kuvars mineralinden oluştuğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar, tüm numunelerin 1200-1300 °C sıcaklık aralığında iyi sinterleşme gösterdiğini belirtip, 550 °C sıcaklıkta α→β kuvars dönüşümünden dolayı geniş bir endotermik bandın meydana geldiğini ve bu etkinin %4.68 oranında kütle kaybına neden olduğu açıklamışlardır. Ekzotermik pik ise mullit kristallenme sebebiyle sıcaklığın yaklaşık 1000 °C olduğu seviyede meydana gelirken, son endotermik

azalım, en yüksek sıcaklıkta cereyan etmiş ve feldspat bileşiğinden kaynaklanan likit faz formasyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir.

Killerden farklı olarak yaygın olarak yapı malzemesi olarak kullanılan kumtaşlarının sıcaklık etkisinde içsel ve mineral yapısının değişimi Hâjpal ve Török (1998) tarafından incelenmiştir. Araştırmacılar yaptığı analizde, önemli değişimin doğal hâlde kuvars, feldspat, kil mineralleri ve mikadan oluşan çimento malzemesinde meydana geldiğini belirtip, bunlar içerisinde kuvars, feldspat ve mika minerallerinin 900 °C sıcaklıkta bile değişim göstermediği saptamışlardır. Bunun aksine, kil minerallerinin yapısının sıcaklığın 450 °C üzerindeki uygulamaları için göçtüğü belirlenmiştir.

Bir diğer çalışma Khalfaoui ve diğ. (2006) tarafından, Fas'ın Al Haouz bölgesinden alınan bir kil türü ile gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık uygulaması öncesinde içeriğinde ağırlıkça yaklaşık olarak yüzdece sırayla 22, 8, 40, 15, 5 oranlarında kuvars, hematit, illit, klorit ve kaolinit minerallerinin olduğu belirlenmiştir. Optimum su içeriği belirlenen kil numuneleri $4\times10\times40$ mm^3 kalıplar hâlinde hazırlanmış ve sonrasında 100 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. Ardından, kuru numuneleri 20 °C/dk. ısıtma hızı olan bir fırında, 850-1075 °C sıcaklıklar arasında kademeli olarak değişen sıcaklıklar için 2 saat boyunca tabii tutulmuştur.

Yapılan X-ray analizinde, 900 °C sıcaklıkta kaolinit ve klorit mineral yapısının bozulurken kuvars, hematit, K-feldspat ve illit minerallerinin çok küçük miktarda bu sıcaklık uygulamasından etkilendiğini belirlenmiştir. 950 °C sıcaklıkta illit yapısının bozulduğunu, uygulama sıcaklığının 1000 °C geçmesi neticesinde ise mineral yapısında kuvars dönüşümü meydana geldiği belirlenmiştir.

BÖLÜM 3. ZEMİNLERİN ISIL ÖZELLİKLERİ

3.1. Giriş

Zemin ısıl özelliklerinin bilinmesi birçok bilim dalında önem arz etmektedir. Zeminde ısı iletimini etkileyen faktörler ve bu bileşenleri belirlemek için yapılan çalışmalar son yıllarda önem kazanmaktadır (Ochsner ve diğ., 2001). Örneğin, kazı yapılmak istenen bir alanda geçici olarak zeminlerin dondurulması gereksinimi ortaya çıkabilmekte ve burada dondurulmak istenen zemin bünyesi için verilmesi gereken ısıyı hesaplayabilmede o zemine ait ısıl parametrelerinin olabildiğince net olarak bilinmesi gerekmektedir.

Zemin yapısı içerisinde gerçekleşen birçok ısıl hadise, zeminlerin ısı transfer özelliğiyle ilgilidir. Ancak ısı transferinin doğru olarak anlaşılması için, o bünyeyi oluşturan ısıl parametrelerin bütünüyle bilinmesi gerekir. Zeminde ısı ve iletimi birçok faktöre bağlı olarak değişen ve son yıllarda üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan önemli bir konudur (Abu-Hamdeh, 2000).

Çoğunluklu killi zeminlerde, yüksek sıcaklık etkisinde mekanik özelliklerinin değişiminin yanı sıra temel ısıl parametrelerinin bilinmesi çalışmanın mühendislik uygulamaları için bu konuyu önemli kılmaktadır. Bu yüzden, zeminlerin ısıl özellikleri ile ilgili temel bilgiler bu bölümde özetlenmiştir.

3.2. Zeminde Isı İletiminin Önemi

Isı transferi ile mühendislikte birçok uygulamada karşılaşılmaktadır. İnşaat mühendisliğinde zeminlerin ısı iletiminin en çok karşılaşıldığı uygulamalar sıralanırsa şu başlıklar altında toplanabilmektedir;

- Karayolları
- Yapı temelleri
- Havaalanları
- Yeraltı güç kabloları
- Boru hatları

Bu faktörler incelendiğinde, zeminde ısı iletim faktörünün etkisi ön plana çıkmakta ve bu özelliğin diğer hangi faktörlerle değiştiği bilinmelidir. Buna bağlı olarak ısı iletim kapasitesinin yüksek ya da düşük olmasının istenmesi, uygulama bulduğu alana göre değişebilmektedir. Örneğin karayollarının alt temel dolgusunun yapımında ısı iletiminin yüksek olması kılcal suyun da olabileceği bir rejimde istenmez. Çünkü bilindiği üzere, temel tabakasına ulaşan su, kış mevsimlerinde yüksek ısı iletim kapasitesinde hava şartlarının etkisi ile donar ve bunun neticesinde donan su hacimce arttığından yol kaplamasında kabarmalar oluşturur. Bu çevrimin tersi ise ilkbahar mevsiminde eriyen buz kristalleri yine ısı iletim kapasitesinin yüksek olduğu zeminde hacimce küçülmelere neden olduğundan yol tabanının içine doğru çökmeler ile sonuçlanır. Ve böylece yol temel tabakasının taşıma gücü azalır.

Bu vakaya verilebilecek bir başka örnek yeraltından geçen inşaat yapılarıdır. Mesela sürekli elektrik akımının geçtiği güç kabloları zamanla ısınır ve oluşan bu ısı ile elektrik iletimi optimal olmaktan çıkıp iletilmek istenen enerji kayıplara uğrar. Böylelikle kablo yüzeyinde kalıcı hasarlar meydana gelir. Bunun aksine, yeraltından sıcak su akımının geçtiği boru hatlarında ısı kaybının en az olması, enerjinin daha az tüketimi açısından önemlidir.

3.3. Zeminde Isı İletimi

Genel olarak ısı transferi, sıcaklık farkının olduğu belirli uzunluk ve kesit alanı için belirli sürede sıcaklığın yüksek olduğu bir alandan, daha düşük olduğu bir alana enerjinin transferi olarak tanımlanabilir. Isı iletimi mikro boyutta göz önüne alındığında sıcaklık farkından oluşan moleküllerin kendi aralarında çarpışması ile cereyan eder. Böylece ısı enerjisi moleküller arasında çarpışmalar ile aktarılmış olur (Martin, 2004).

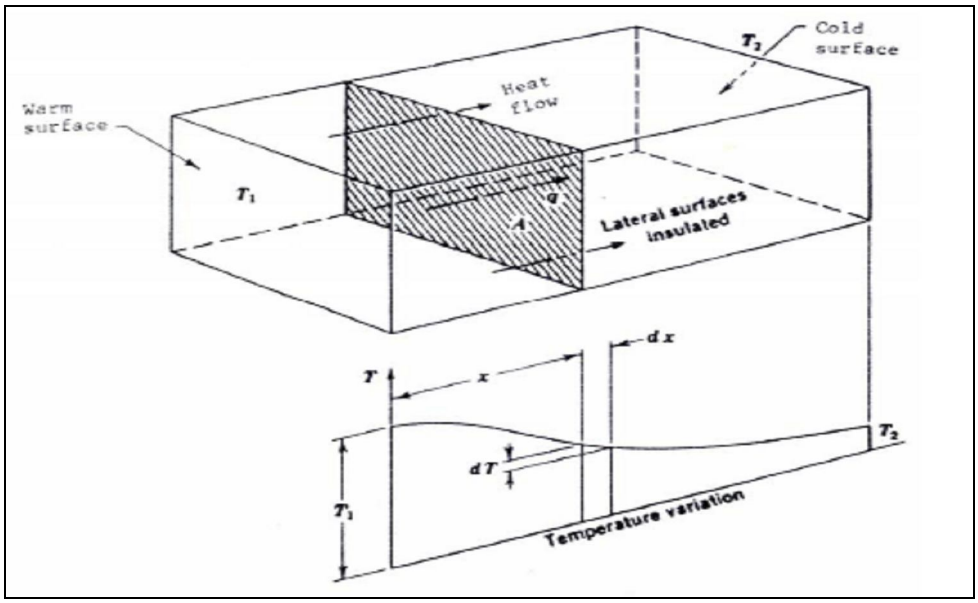
Zemin içerisindeki ısı akışını belirleyebilmek için onun ısıl özelliklerini doğru olarak belirleyebilmek gerekir. Bir zeminde ısının iletimi o zeminin ısıl özellikleri tarafından kontrol edilir (De Vries, 1963).

Zeminde ısı iletimi, o zeminin ısı iletkenliği ve sıcaklık farkına bağlıdır. Isı transferi sabit bir parametre olmayıp; zeminin mineralojik özellikleri, sıcaklık, su içeriği, porozite ve bazı faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir (Abu-Hamdeh, 2003).

Isı iletimi problemlerinde bazı kabuller yaparak, bu problemleri çözebilmek için ısı iletimi sırasında aşağıdaki varsayımlar yapılabilmektedir (Dağsöz, 1973).

1. Maddelerin özgül ısı ve ağırlıkları sabit kalır.
2. Isı iletim katsayısı sıcaklık farkı ile değişmemektedir.
3. Cisim homojen yapı gösterir.
4. Cisim izotrop yapı gösterip, ısı iletim katsayısı cismin her doğrultusunda aynı kalmaktadır.
5. Cisimde hâl değişimi cereyan etmez.

Bir elementte ısının akışı aşağıdaki gibi gösterilip, denklemle ifade edilebilir.



Şekil 3.1: Bir zemin elementinde ısının iletimi (Andersland ve Ladanyi, 1994)

$$q = \frac{Q}{A} = - k \frac{\Delta T}{\Delta x} = k\, i \qquad (3.1)$$

Bu denklemde;

q (W/m^2): birim alandaki ısı iletimi,

Q (W): ısı iletimi,

A (m^2): ısı akışının dikey yönde gerçekleştiği kesit alanı,

T (°C veya K): iki uç yüzey arasındaki sıcaklık farkı,

x (m): iki uç yüzey arasındaki mesafe,

k (m^2/sn): ısı difüzyon katsayısı,

$\Delta T/\Delta x$ (K/m veya °C/m): ısıl büyüklük farkı ve

i (K/m veya °C/m) simgesi de ısıl büyüklük farkını ifade etmektedir.

Mühendislikte ısı, sıcaklık, enerji ve basınç farklı değişkenlerle ifade edilmektedir. Aşağıdaki tabloda, bu bölümde kullanılan bazı birimlerin bir başka birime dönüşümünde kullanılan çarpım katsayısı ve dönüştürülen birim SI birim sistemine göre özetlenerek tablo hâlinde gösterilmiştir.

Tablo 3.1: SI birim sisteminde dönüşüm katsayıları

Birim	Çarpım katsayısı	Dönüştürülen birim
m cal/cm s °C	0.4184	W/m K
K cal/m hr °C	1.1622	W/m K
Btu.in./ft^2 hr °F	0.1442	W/m K
Btu./ft hr °F	1.731	W/m K
Atmosfer	101.325	kilo paskal
Kalori	4.1868	Joule
cal/g °C	4186,8	J/kg K
cal/cm s °C	418.4	W/m K
°F	(°F - 32)/1.8	°C

3.4. Isının Yayılımı

Isı enerjisi malzemeler üzerinden iletim, taşınım ve ışınım vasıtası ile yayılabilmektedir. Aşağıda maddeler hâlinde bu yayılma türleri kısaca anlatılacaktır.

3.4.1. İletim

İletim vasıtasıyla ısı iletimi ortalama hızları farklı moleküllerin çarpışmaları ya da hareketsiz moleküller bulunduran yalıtkanlarda moleküllerin uzunlamasına salınımları ve iletkenler için de elektron hareketi ile meydana gelmektedir (Atagündüz, 1983).

Zeminde ısı iletimi, o zemini oluşturan katı, sıvı ve gaz arasında gerçekleşir. Sıvı ve gaz fazının bulunduğu yerlerde ısı iletimi, moleküllerin birbirine çarpması ve böylece ortalama kinetik enerjilerinin aktarılması ile sıcak bölgeden soğuk bölgeye aktarılmış olur. Zemin içerisindeki katı minerallerdeki ısı iletimi ise ısının daha yüksek olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru birbirine yay gibi bağlanmış atomlarının titreşimi esasına dayanır. Isının iletim yoluyla aktarılırken, zeminde ısı geçişini sağlayabilecek tüm yollar aynı anda gerçekleşir (Farouki, 1986).

Buzun 0 °C sıcaklıktaki ısı iletkenliği, oda sıcaklığındaki suyun yaklaşık üç katıdır (Andersland ve Ladanyi, 1994). Isının iletim yolu ile aktarıldığı ısı miktarı bir zeminde kuru birim hacim ağırlığın ve doyma derecesinin artması ile yükselir (Farouki, 1986).

3.4.2. Taşınım

Maddelerin akışkan hâlleri olan sıvı ve gaz durumu için bu fazların kendi içerisinde ısı etkisinde yer değiştirmesine ısının taşınımı denmektedir. Isı taşınımı, genel olarak zorlanmış ve doğal ya da serbest olarak ikiye ayrılabilmektedir. Zorlanmış ısı taşınımında, bir sistemde hava akımının vantilatörün etkisi ile dışarıdan bir enerji sarfiyatı neticesinde meydana gelirken, doğal ısı taşınımı ise bir sobanın üzerindeki havanın sıcaklık etkisiyle özgül ağırlığının azalarak bir başka bölgeye taşınması ile açıklanabilir. Zeminler için zorlanmış ısı taşınımı zemin boşluklarındaki hava ve suyun basınç farkı ile meydana gelir ve bu sebeple doymamış zeminlerde oluşan su akışı, ısıya diktir. Bu su akışı ısı iletimini arttırıcı yönde etki eder (Günal, 2001). Bu taşınım etkisi kumlarda killere göre daha az olsa da ısı iletkenliğini %20 artmasına neden olabilir (Johansen, 1975).

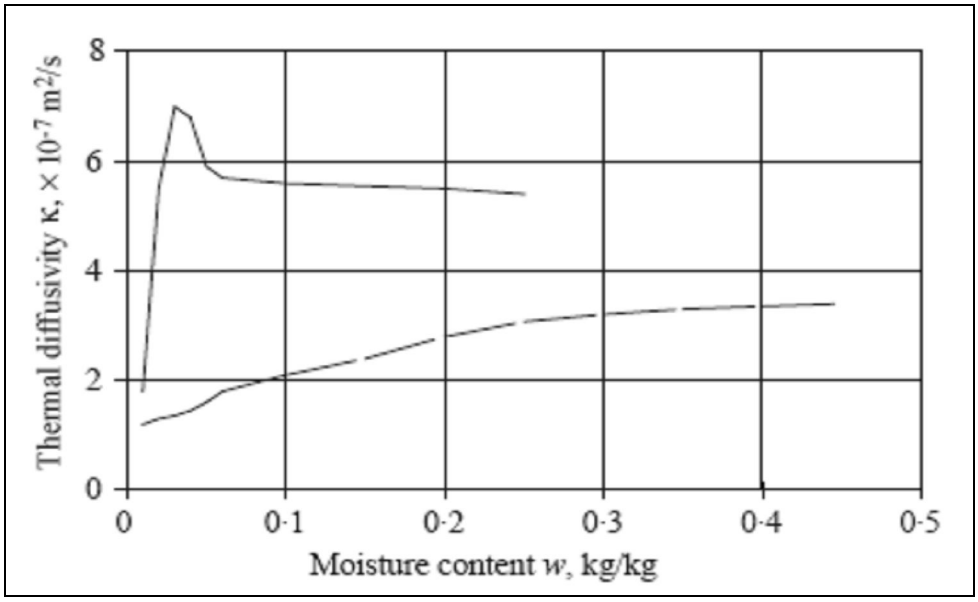
3.4.3. Işınım

Radyasyon, maddenin sıvı gaz fazında elektromanyetik dalgalarla ısı enerjisinin yayılımı olarak açıklanabilir. Isı iletiminin bu şekilde yayılımı, zeminler için ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Kumlu zeminlerde radyasyonun etkisi toplam ısı iletiminin %1'den daha azdır (Farouki, 1986). Ayrıca iri daneli zeminlerde, Wakao ve Kato'nun (1969) 20 mm çapındaki çakıllar üzerinde yaptığı deneylerde, radyasyon etkisinin, toplam ısı iletiminin %10'u kadar olabileceğini belirlenmiştir.

3.5. Isıl Değişkenler

3.5.1. Isı difüzyonu

Isı difüzyonu, ısı iletiminin hacimsel ısı kapasitesine oranı olarak tanımlanır. Abu-Hamdeh (2003), ısı difüzyonunun killi ve kumlu zeminlere göre değişimini su içeriğinin bir fonksiyonu olduğunu ifade etmiştir. Aşağıdaki şekilden de görüldüğü gibi, kumlu zeminlerin aynı su içeriğinde, daha yüksek ısı difüzyonuna sahip olduğunu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.2: Killi (− − −) ve Kumlu (—) zeminlerde ısı difüzyonun su içeriğine bağlı olarak değişimi (Abu-Hamdeh, 2003)

Abu-Hamdeh ve Reeder (2000), belirli bir birim hacim ağırlığındaki artan su içeriği değerleri için, kumlu zeminlerin ısı difüzyon kapasitesi önemli derecede yükselirken, bu artışın killi zeminlerde daha az olduğu belirtmiştir. Su içeriğinin artışı ile kum daneleri arasındaki su filmi tabakaları, kil ve siltlere göre daha büyük olmaktadır. Böylece, daneler arasındaki boşluklara dolan su, ısı iletimini arttıracaktır. Ayrıca zemin yapısının kum, silt ve kil olması da birinci dereceden ısı iletimini etkileyecektir. Buradan yola çıkarak kumlu zeminlerin ısıl difüzyonu, kil ve silt yoğunluklu zeminlere göre daha yüksek olacağını söylenilebilir.

Isı difüzyonundaki bu genel değişim açıklanacak olursa, düşük su içeriklerinde iki farklı zemin tipi için de ısıl yayılım yüksek su içeriklerine nazaran daha azdır. Genel olarak kumlu zeminlerin düşük su içeriklerinde ısı difüzyon katsayısı düşükken, artan su içerikleri için belirli bir su içeriğine kadar arttığı ve sonra doygunluğa erişeceği su içeriklerinde bu faktörün azalan yönde etki yaptığı gözlenmiştir (Abu-Hamdeh, 2003).

Kumlu zeminlerin ısı difüzyon özelliğinin tepe yaptığı nokta için, ısı iletimi ve hacimsel ısı kapasitesi özelliklerinin birbirine bağlı olarak değişimi ile açıklanabilir. Tepe yapmadan önceki durum için ısı iletimindeki artış, hacimsel ısı kapasitesindeki artışa göre daha büyük artış gösterdiği, diğer yandan tepe noktasından sonraki durum için ısı iletiminin hacimsel ısı kapasitesine göre daha az arttığı ve böylece ısı difüzyonun azaldığı söylenilebilecektir. Böylece kumlu bir zemin için tepe noktasından sonra ısı difüzyonu azalacaktır. Killi zeminlerde belirli bir su içeriğine göre ısı iletiminin hacimsel ısı kapasitesine göre belirgin olmayan bir artış olduğu ve ilerleyen su içeriklerinde sabitlendiği belirlenmiştir (Abu-Hamdeh, 2003).

Aşağıdaki tabloda, zemin kökenli olan ve olmayan bazı maddelerin ısıl difüzyon katsayıları kendi aralarında kıyaslanabilmek üzere gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Bazı zeminlerin ısıl difüzyon katsayıları (Andersland ve Ladanyi, 1994)

Malzeme	Isıl difüzyon, α (m^2/s)×10^7
Gümüş	1133
Demir	173
Kumtaşı	10
Buz	11,2
Sıkı doygun kum	8
Yumuşak doygun kil	4
Kuru zemin	2,5
Su	1,4
Organik zemin daneleri	1
Hava	0,21

3.5.2. Gizli ısı difüzyonu

Gizli ısı, sabit sıcaklık ve basınçta birim kütlede meydana gelen gaz difüzyonudur. Maddenin sıvı ve gaz hâlleri için belirli bir sıcaklık etkisinde, bu iki hâl birbirine dönüşebilmektedir.

Bir cismin katı fazdan sıvı faza dönüşmesi sırasında, birim kütlesi ortamdan ısı alır. Bu değer, 0 °C buzun aynı sıcaklıktaki su hâline dönüşebilmesi için 333.7 MJ/kg olarak bilinir. Bu dönüşümün tersi ise suyun buz hâle geçerek ortamdan enerji alması ile gerçekleşir ve bu aralıkta sıcaklık sabit kalır.

Gerekli enerji kapasitesi gözenekli bir zemin yapısında bulunan ağırlıkça su içeriğine bağlı olarak değişmektedir (Andersland ve Ladanyi, 1994).

$$L_v = \rho_d L' \frac{W - W_u}{100} \qquad (3.2)$$

Burada;

L_v (kJ/m^3): zeminin hacimsel gizli ısısı,

$L' = 333.7$ kJ/kg suyun kütlece gizli ısı değeri,

ρ_d (kg/m^3): zeminin kuru birim hacim ağırlığı,

W: ağırlıkça toplam su içeriği ve

W_u: ağırlıkça donmuş bir zemin bünyesinde donmamış zeminin su içeriği yüzdesidir.

Çakıl ve kumlu zeminlerde donmuş suyun az ya da hiç olmadığı bir durum için w_u ifadesi çok küçük olup, böylelikle birçok pratik problemlerde zeminlerin hacimsel gizli ısısını hesaplamada sıfır kabul edilebilmektedir.

3.5.3. Isıl genleşme (veya büzülme)

Isıl genleşme, ısı ve mekanik enerji çifti ile ilgidir. Isıl genleşme ya da büzülme katsayısı β, birim boyda (l), boy değişiminin (l_o), sıcaklık değişimine oranı olarak tanımlanabilir.

$$\beta = \frac{1}{l_0}\frac{\Delta l}{\Delta T} = \frac{\varepsilon}{\Delta T} \tag{3.3}$$

Bu eşitlikte;

l_0 : sıcaklık değişiminin meydana geldiği ilk uzunluk,

$\frac{\Delta l}{l_0}$: ε, birim boy değişimidir (Andersland ve Ladanyi, 1994).

Eğer malzeme izotropik ise (tüm yönlerde eşit ısıl genleşme meydana geliyorsa) β ile hacimsel ısıl genleşme (β_v) ile doğrusal bir ilişki kurularak;

$$\beta = \frac{\beta_v}{3} \tag{3.4}$$

ile ifade edilebilmektedir.

Buz için β sıcaklık ile değişerek,

$\beta(°C)^{-1} = (54\text{-}0.18T)\times10^{-6}$ eşitliği ile bulunabilir.

3.5.4. Özgül ısı ve ısı sığası (kapasitesi)

Isı kapasitesi ya da özgül ısı (C), bir cismin sıcaklığını 1 Celsius cinsinden yükseltmek için gerekli ısı enerjisidir. Bu değişken aşağıdaki eşitlik ile bilinip, birimi ağırlığa (J/gr °C, J/gr K) ya da hacme bağlı olarak (J/m^3 °C, J/m^3 K) olarak ifade edilebilmektedir.

Bir maddenin ısı kapasitesi, o maddenin yoğunluğu $\rho(kg/m^3)$ ile değişmektedir. Böylelikle özgül ısı kapasitesi (C_p), ısı kapasitesinin yoğunluğa bölünmesi ile bulunur ve birimi ağırlığa (J/gr °C, J/gr K) bağlı olarak ifade edilebilmektedir.

$$C_p = \frac{C}{\rho} \tag{3.5}$$

Belirli bir zemin bünyesi; sırayla katı, su, buz ve hava bileşenlerinden oluşabilir ve bu değişkenlerin ağırlıkları; $m_{katı}$, m_{su}, m_{buz} ve m_{hava} ve yine sırayla ısı kapasitesi $C_{katı}$, C_{su}, C_{buz} ve C_{hava} ile gösterilirler. Buna göre belirli bir zemin hacminin özgül ısı kapasitesi (C_p) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir.

$$C_p\left(\frac{kJ}{Kg}\ °C\right) = \frac{1}{m}\left(C_{katı}\ m_{katı} + C_{su}\ m_{su} + C_{buz}\ m_{buz} + C_{hava}\ m_{hava}\right) \tag{3.6}$$

Bu denklemden yararlanılarak hacimsel ısı kapasitesi, V hacimli bir zemin için havanın katkısı ihmal edilebileceği de göz önüne alınarak (Andersland ve Ladanyi, 1994),

$$C_v\left(\frac{MJ}{m^3}\ °C\right) = C_m\,\rho_f = \rho_{df}\left(C_{katı} + C_{su}\,W_u + C_{buz}\,W_i\right) \tag{3.7}$$

ile eşitlenir. Bu denklemde, sırayla ρ_f ile ρ_{df} donmuş bir zeminde doğal ve kuru birim hacim ağırlık iken, W_u ile W_i ise donmamış ve donmuş su içeriği olarak tanımlanmaktadır.

Kütlesel ısı kapasitesi olarak simgelenen C_m ve ρ ise birim hacim ağırlık olmak şartıyla;

$$C_m = \frac{C_v}{\rho} = \frac{C_v}{\rho_d(1+W)} \tag{3.8}$$

eşitliği ile hesaplanır.

Bir maddenin özgül ısısı, o maddenin ısı kapasitesinin, suyun ısı kapasitesine oranı olarak tanımlanır. Buradan anlaşılacağı üzere, bir zemin için hacimsel ısı kapasitesi sırayla donmamış ve donmuş hâller için aşağıdaki eşitlik de olduğu gibi hesaplanabilir;

$$C_{vu} = \frac{\rho_d}{\rho_w}(0.17 + 1.0\ \frac{W}{100})\ C_{vw} \tag{3.9}$$

$$C_{vf} = \frac{\rho_d}{\rho_w}\ (0.17 + 1.0\ \frac{W_u}{100} + 0.5\ \frac{W - W_u}{100})\ C_{vw} \tag{3.10}$$

Yukarıdaki eşitliklerde, suyun özgül ısısı C_{vw} = 4.187 MJ/m^3 °C ve sırayla ρ_d ve ρ_w zeminin kuru birim hacim ağırlığı ve suyun yoğunluğudur. Özgül ısı değeri (C_v) genel olarak sırayla; mineraller, su, buz ve organik maddeler için 0.17, 1.0, 0.5 ve 0.40 olarak alınabilmektedir (Andersland ve Ladanyi, 1994).

Zeminlerin ısı kapasitesi birkaç faktöre bağlı olmak üzere değişebilmektedir. Bu faktörler iki ana grupta toplanabilir. Bunlardan ilki zeminin içsel özellikleri olan mineralojik birleşimi ve organik madde içeriğidir (Wierenga ve diğ., 1969). Dış faktörler ise zemini çevreleyen su içeriği ve zemin kuru birim hacim ağırlığı ile de ilgilidir (Yadav ve Saxena, 1973).

Su içeriği ısının iletiminin üzerinde çok önemli bir yere sahip olup, su miktarının belirli bir ısı etkisinde değişimini kontrol edebilmek zordur. Su içeriği zeminlerin ısı kapasitesinde de oldukça önemli olup, suyun bu ısı etkisindeki değişimini gözlemek zordur. Zeminin ısı kapasitesi, sıkıştırılan bir zeminde birim hacim ağırlığının artmasına ve porozitenin azalmasına sebep olacağından, bu değişim önemli derecede fark yaratacaktır (Abu-Hamdeh, 2003).

Abu-Hamdeh (2003), Ürdün'deki zeminler üzerinde yaptığı çalışmalardan elde ettiği verileri kullanarak zemin içindeki ısı rejiminin değişimini bazı eşitliklerle tahmin etmiştir. Elde edilen bu yöntemler, Ürdün ziraat endüstrisinde önemli derecede ilgi

bulmuştur. Çalışmacıya göre, bir bitkinin filizlenmesi ve gelişimi büyük oranda dış etkilere bağlı olduğu ve zemin ısıl özelliklerinin mikro klima üzeride çok önemlidir.

Bu araştırmacı yaptığı çalışmada, farklı zemin tiplerinde ısı kapasitesi ve özgül ısı değerlerinin su içeriği ile birim hacim ağırlığının üzerindeki etkileri incelemiştir. İkinci aşamada ise hesaplanan ve ölçülen ısı iletim katsayısı ve hacimsel su içeriği değerlerini değişen su içeriği değerleri, zemin yoğunluğu ve yapıları için karşılaştırmıştır.

Belirlenen bir su içeriği ve birim hacim ağırlıkta hazırlanan numuneler üzerinde yapılan çalışmada özgül ısı, hacimsel ısı kapasitesi ve ısı difüzyonu laboratuar koşulları üzerinde yapılan bir seri deneyde, bu değişkenler içerisinde özgül ısının su içeriği ile arttığı belirlenmiştir. Aynı zamanda hacimsel ısı kapasitesi, su içeriği ve zemin birim hacim ağırlığı ile artmıştır (Abu-Hamdeh, 2003).

Yine aynı çalışmacı yaptığı çalışmada hesaplanan ve ölçülen değerler arasında çok küçük kabul edilebilir farklar olduğunu tespit etmiştir. Killi zeminler, aynı su içeriği ve birim hacim ağırlıkta genelde kumlu zeminlere göre daha yüksek özgül ısı ve hacimsel ısı kapasitesi göstermektedir. Aşağıdaki tabloda, farklı araştırmacılar tarafından kil ve kum numuneler için özgül ısı ve hacimsel ısı kapasitesi değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir (Abu-Hamdeh, 2003).

Tablo 3.3: Bazı araştırmacılar tarafından özgül ısı ve ısı kapasitesinin karşılaştırılması (Abu-Hamdeh, 2003)

	Özgül ısı (kJ/kg °C)		Hacimsel ısı kapasitesi (MJ/m^3 °C)	
	Kum	Kil	Kum	Kil
Abu - Hamdeh (2003)	0.83-1.67	1.17-2.25	1.09-3.04	1.48-3.54
Ghuman ve Lal (1985)	0.91	1.35	1.52	1.44
Yadav ve Saxena (1973)	0.82-1.61	1.13-1.98	1.14-3.14	1.56-3.51
Bristow (1998)	-	-	1.10-3.00	-

3.6. Zeminlerde Isı İletimi

Isı iletim katsayısı k ile gösterilip, yüzeysel olarak, belirli bir ısı etkisinde oluşan sıcaklık farkının bir maddenin bünyesinde yayılabilme niteliğidir. Tüm maddelerin değişen aralıklarda ısı iletim katsayısı vardır, ancak bu faktör diğer fiziksel şartların aynı kaldığı durumlar için geçerli olmaktadır. Aşağıdaki tabloda, zemin kökenli olan ve olmayan bazı maddelerin ısı illetim katsayıları kendi aralarında kıyaslanabilmek üzere gösterilmiştir.

Tablo 3.4: Bazı maddelerin belirli sıcaklık ve su içeriklerinde ısı iletim katsayıları (Andersland ve Ladanyi, 1994)

Malzeme	Isıl iletkenlik, k (W/m K)
Gümüş	406.0
Demir	50.0
Çelik	50.2
Hava (0 °C)	0.024
Hava (10 °C)	0.026
Su (0 °C)	0.56
Su (21 °C)	0.72
Buz (0 °C)	1.2
Buz (-40 °C)	1.2
Tuğla, kırmızı	0.6
Beton	1.7
Kaya	2.2
Turba	0.07
Organik zemin	0.25
Kum, kuru	1.1
Kum, w=%18, donmamış	1.3
Kum, w=%18, donmuş	1.3
Kil, kuru	0.9
Kil, w=%25, donmamış	1.1
Kil, w=%25, donmuş	1.1

3.6.1. Zeminlerin ısı iletimini etkileyen faktörler

Bir zeminin ısı iletim özelliği, o bünyeyi oluşturan doğasında (mineralojik) ve onun dışında meydana gelen fiziksel özellikleri ile ilgilidir. Bu dış etkenlerde zeminin birim hacim ağırlığı, su içeriği, organik madde içeriği, porozite, boşluk oranı, sıcaklık ve zemin donmuş ya da donmamış olması etkili olmaktadır (Farouki, 1986).

Bu faktörler, iki ana grupta toplanacak olursa, ilki zeminin doğasında olurken (mineralojik), diğeri ise bulunduğu ortam ve fiziksel özellikleri ile ilgili olduğu söylenebilir. Zeminin doğasında olan faktörler onun yapısı, mineralojik birleşimi ve organik madde içeriği ile açıklanabilir. Zemin yapısının dışında gelişen faktörler içerdiği su yüzdesi ve zeminin kuru birim hacim ağırlığı ile değişir (Abu-Hamdeh, 2003).

Zemin katı, sıvı ve gazdan oluşan daneli bir yapıya sahiptir. Isı iletim özelliği bu bileşenlerin hacimsel katılımları, danelerin boyutu ve daneler ile sıvı faz arasındaki kurulan temas yüzeylerine bağlı olarak değişebilmektedir (Bever, 1976).

Killi zeminlerin değişik fiziksel şartlarda ısı iletim katsayılarının incelendiği bir diğer çalışma, Günal (2001) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, aynı zemin sondaj logundan alınmış olup farklı derinliklerinden çıkarılan dört farklı kil numunesi üzerinde deneysel ve deterministik yöntem ile bulunan zemin ısıl iletkenlik katsayıları belirlenip, karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.5: Deneysel ve deterministik yöntemle hesaplanan ısı iletkenlik katsayıları (Günal, 2001)

Numune	Deneysel ısıl iletkenlik (W/m K)	Hesaplanan ısıl iletkenlik (W/m K)	Güç (W)	Numune boyu (m)	Sıcaklık farkı (K)	Su içeriği (%)	Kuru BHA (gr/cm^3)	Porozite (%)	Doy. derecesi (S_r)
CL	1.657	2.071	10	0.03	369	0.4085	1.433	0.469	1.00
CL	1.644	16.473	10	0.03	372	0.2969	1.464	0.466	0.9319
CL	1.639	16.445	10	0.03	373.1	0.2693	1.462	0.469	0.8377
CH	1.638	16.729	10	0.03	373.3	0.1708	1.461	0.478	0.5118

Bu çalışmacı, bir zemin bünyesinde ısıl iletkenliği etkileyen birçok değişken olduğunu belirtmiştir. Bu etkinin, başta zeminde su içeriği olmak kaydıyla, zemin bileşenlerinin granülometri, porozite, içerdiği suyun fazı (donmuş veya donmamış olması), yoğunluğu, tuzluluğu, katkı maddeleri, zemin danelerinin birbiriyle temas yüzeyi, özgül ısıları ve içerdiği organik maddeler gibi birçok değişenin olduğunu belirtmiştir.

Literatür çalışmalarına göre, bir zeminin ısı iletkenlik özelliğini değiştiren faktörler içsel ve fiziksel faktörler olarak ikiye ayrılabilir. Bu faktörler aşağıda alt başlıklar hâlinde incelenmiştir.

3.6.1.1. Kuru birim hacim ağırlığının etkisi

American Society of Testing Meterials (A.S.T.M.) tarafından derlenen veriler üzerinde yapılan çalışmalara göre kuru zeminlerin ısı iletkenliğinin, o zeminin birim hacim ağırlığı ile ilgili olduğu bulgusu elde edilmiştir (Thalmann, 1950).

Danelerin şekli ve onların sahip olduğu dane çapı dağılımı, ısı iletkenliğini iki yönde etkilemektedir. Bunlar; zemin daneleri arasındaki porozite ve daneler arasında ısı akışının sağlandığı temas yüzeyleridir. Tahmin edileceği üzere aynı granülometri ve yoğunluğa sahip küresel olmayan daneler, küresel olanlara nispeten kendi aralarında daha fazla temas yüzeyi oluşturacak ve böylelikle zemin bünyesinin kuru birim hacim ağırlığının artmış olması ile daneler arasında ısı iletimini arttıracaktır (Thalmann, 1950).

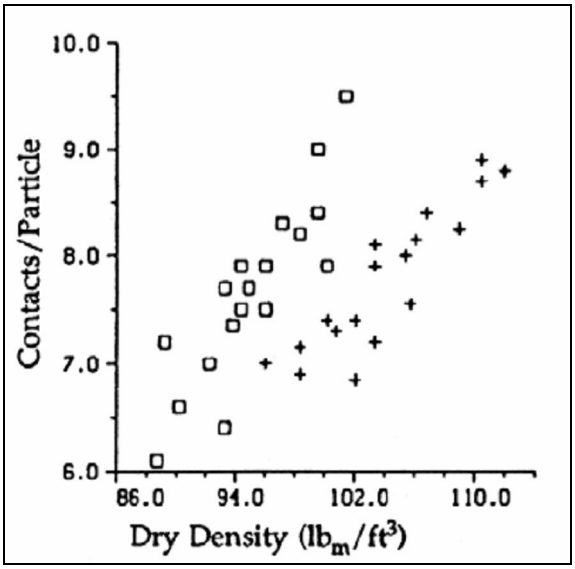
Tarnawski ve diğ. (2002), yaptığı çalışmada TCR olarak simgelediği ısıl etki yüzeyinin direnci, daneli bir zeminde belirli bir kesit alanı için zeminde sıcaklık düşüşünün, ortalama ısı iletimine oranı olarak ifade etmiştir. Bu ifadeye göre, killi (gevşek yerleşime sahip) zeminler, kumlu zeminlere göre daha büyük TCR değerleri gösterdiği belirlenmiştir.

Örneğin, kumtaşı yapısındaki, kuvars danelerinin yarattığı çimentolama etkisi, bir faktör olarak efektif ısıl iletkenliğini (k_{eff}), beş kata kadar arttırabilmektedir. Ayrıca ısıl etki yüzeyi direnci, doygunluğun arştı ile kademeli olarak azalır. Bu yüzden, k_{eff} üzerindeki çimentolanma etkisi, bir zeminde su içeriğinin artmasının neticesinde oluşturulan etki ile benzerlik göstermeyeceğini söylemek mümkündür (Tarnawski, 2002).

Zeminin belirli bir su içeriğinde, birim hacim ağırlığının artması ısı iletimini arttırır. Kuru birim hacim ağırlığın artması, birim hacimde daha fazla zemin danelerinin

artması neticesinde gelişecek ve ısı iletiminin havaya göre ısının üzerinden daha iyi iletildiği danelerin birbiri arasındaki temas sayısı da artmış olacaktır (Becker ve diğ., 1992).

Aşağıdaki şekilde, daneler arası temas sayısının dane sayısına oranlanması ile olan ilişkisi ile kuru birim hacim ağırlık arasındaki bağıntı, zeminin yuvarlak yüzeyli olmayan ve olan durum için gösterilmiştir (Becker ve diğ., 1992).



Şekil 3.3: Isı iletiminin granüler bir zeminde temas yüzeyi/dane sayısının kuru birim hacim ağırlıkla değişimi: S ≤ %1(kare) ve S ≥ %50 (artı)

Okwueze (1996) yaptığı çalışmada, kumlu zeminlerde yüksek ısı iletim katsayıları elde etmiştir. Bu çalışmacı, kumlu zeminlerde daneler arasındaki boşluklara yayılmış suyun ve havanın yayılımının ısı iletimini etkilediğini ve bu ortamda yayılımını özel kıldığını belirtmiştir.

Verilen sabit bir su içeriği değeri için zeminin kuru yoğunluğunun artması, ısı iletim özelliğini arttıracaktır (Abu-Hamdeh, 2000).

Farouki (1986) yaptığı çalışmada, kumlu zeminlere kil eklenerek ısı iletkenliğinin artacağını belirtmiş ve kumlu zemine farklı oranlarda kaolin ekleyerek karşılaştırmalar yapmıştır. Çalışmasında, %8 oranında kaolin eklenmiş karışımın o kum örneği için en optimal ısı iletkenliğine sahip olduğunu gözlemiştir. Bilindiği

üzere, kumlu zeminler killere nazaran daha yüksek iletkenliğe sahip olsa da, kum daneleri arasına yerleşen kil mineralleri, daneler arasındaki boşlukları doldurmuş ve böylece ısı iletkenliği de arttırmış olmaktadır.

Zeminlerin mineral birleşimi, o zemin bünyesinin ısıl iletkenliğini etkiler. Buna göre, yüksek kuvars içeren kumlu zeminler genelde yüksek plajiyoksal, feldspat ve piroksen içeren kumlu zeminlere nazaran daha büyük ısı iletkenliğine sahip olacaktır (Peters-Lidard ve diğ., 1998).

3.6.1.2. Su içeriğinin etkisi

Su içeriğinin bir zemin bünyesindeki değişimi, ısı iletkenliğini önemli derecede etkilemektedir. Aynı birim hacim ağırlıkta olan iki zemin numunesi için su içeriğinin artması, ısı iletimini belirgin bir şekilde arttırır (Abu-Hamdeh, 2000).

Abu-Hamdeh (2000)'de yoğunlukları 1.23-1.59 gr/cm^3 arasında değişen dört farklı numune üzerinde yaptığı çalışmada su içeriğindeki artışın ısı iletimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu araştırmacı, %1.4 ve %21.2 aralığında değişen su içeriklerinde yapılan çalışmada, kum için 0.58-1.94 W/m K, kumlu lem için 0.19-1.12 W/m K, lem için 0.29-0.76 W/m K, killi lem için 0.36-0.69 W/m K değerlerini tespit etmiştir.

Aynı araştırmacı tarafından yapılan bir diğer çalışmada, yoğunlukları 1.30-1.50 gr/cm^3 arasında değişen %0.06-0.1 arasında değişen nem içeriklerinde kum için 0.43-0.98 W/m K, kumlu lem için 0.35-0.55 W/m K, lem için 0.44-0.50 W/m K, killi lem için ise 0.29-0.44 W/m K aralığında değişen değerler bulmuştur.

Bütünüyle kuru olamayan bir zemin bünyesi, daneler ve sıvı fazdan oluşmaktadır. Bu durum için zeminin ısı iletim katsayısı (k), hacimsel su içeriği (w), porozite (n) ve kuru zeminin ısı iletkenliği (k_s) gibi bazı faktörlere bağlı olmaktadır. Isı iletimi ile hacimsel su içeriğinin artışı arasında doğrusal bir artış olsa da, bu bazı hâllerde karmaşık olabilir. Bu hadiseyi, o zeminin mineralojisi ve içerdiği hava ile ilgili olduğunu söylemek mümkündür (Cosenza ve diğ., 2003).

Pande ve Gori (1986)'ye göre, bir zeminin suya doygunluğu, o zeminin ısı iletimini üç aşamada ilgilendirmektedir. Kuru bir zemin nemlendirildiğinde, ince bir film tabakası danelerin yüzeyini kaplar ve bu etki yüzeyler arasında geçitler oluşturur. Bu geçitler, ısı akışını kolaylaştırır ve ısı iletkenliğini arttırılmış olunur.

Yine aynı araştırmacılara göre, düşük su içeriklerinde su zemin danelerini kaplar. Suyun zemin daneleri arasında kapladığı geçitler bütünüyle sağlanamadığından, ısı iletiminin daha az muhteviyatlı duruma göre yüksektir. Belirli bir zemin bünyesi için ısı iletimi esnasında ısı etkisi ile zeminde bulunan suyun buharlaşıp uzaklaşacağı ve böylece ısı iletiminin zamana bağlı olarak sabit kalmayacağı da unutulmamalıdır.

Yüksek su içeriklerinde ise daneler arasında su bütünüyle yayılarak, ısı iletimini arttıracaktır. Zemin daneleri arasında oluşturduğu geçitler su ile kaplanır ve sürekli bir ısı iletimi sağlanacak bir ortam oluşturur. Zeminin su içeriği değerinin artması, hava boşluğunun azalmasına sebep olur. Zemin bütünüyle doygun olduğunda zeminin ısı iletkenliği sabit bir değere ulaşır (Pande ve Gori, 1986).

3.6.1.3. Zemin suyunun fazı

Su bilindiği üzere buz, sıvı ve gaz hâlinde olmak üzere üç farklı durumda olabilir. Zemin yapısı, çok özel durumlar haricinde sudan ayrı düşünülemez. Zemin içerisinde su, iklimin çok soğuk geçtiği kış mevsimlerinde bütünüyle donmuş veya donmamış hâlde, bütünüyle suya doygun veya en çok karşılaşılan durum olan suya doygun olmayıp su ve gaz hâlinde bulunabilirler. Diğer yandan, zemin içerisindeki suyun iklimsel şartların etkisi ile durağan olmadığı ve bu fazların sabit kalmayıp birçok fiziksel etkilerle de değiştiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Zemin bünyesinin içeriğinde bulunan su, sıcaklık değişimi mikro düzeyde iken moleküllerin çarpışmasına ve ısının bu yolla iletimine sebep olurken, aksi durum için su ısısının azalan yönde değişmesi moleküllerin daha az çarpışmasıyla ısı iletiminin yavaşlamasına neden olur (Farouki, 1986).

Tablo 3.6: Buzun bazı fiziksel özellikleri (Farouki, 1986)

Sıcaklık (°C)	Özgül ısı (cal/gr °C)	Isıl iletkenlik (cal/cm s °C)	Yoğunluk (gr/cm^3)
-20	0.468	5,81	0.920
-10	0.485	5,54	0.919
0	0.503	5,35	0.917

Zeminde sıcaklık etkisi, T > 0 °C değerleri için küçük oranda ısı iletkenliğini etkiler. Ayrıca, zemin içerisindeki suyun donmuş durumda olması ısı iletkenliğini önemli derecede arttıran bir faktördür (Andersland ve Ladanyi, 1994).

3.6.1.4. Boşluk oranı ve porozitenin etkisi

Zemin bünyesinde boşluk miktarının azalması, birim hacimde daneler arasında daha fazla temas yüzeyinin kurulması ile sonuçlanacaktır. Buradan yola çıkarak, mineral yapıları ve diğer fiziksel şartları aynı olan kırılmış kayalardan oluşan zeminler yuvarlak daneli zeminlere nazaran daha fazla temas yüzeyine sahip olacağından, ısı iletim kapasitesi daha yüksek olacaktır (Kersten, 1949).

Isı iletim katsayısı, bazı zemin tiplerinde kum > kil > turba zemin olarak sıralanıp, bu ısı iletim farkı birim zeminin doygunluğu ve o zeminin porozitesi ile ilgilidir (Molindo ve Alile, 2007).

Rawls (1982), 1323 zemin numunesinde porozitenin ısı iletimi üzerindeki etkisini saptayabilmek için deneyler yapmıştır. Zemin özelliklerinin ısı iletimine etkisini gözleyebilmek için elde ettiği analizleri yorumlandığında bir zeminin porozitesinin, kuvars içeriği ve yoğunluğundan daha önemli olduğunu gözlemiştir.

Zemin yapısını oluşturan danelerinin boyutu, kuru zeminlerin ısı iletkenliğini değiştirmektedir. Aynı boşluk oranına sahip iyi derecelenmiş (SW veya GW) zeminler ile kötü derecelenmiş (SP veya GP) zeminler kıyaslandığında iyi derecelenmiş zeminlerin daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğunu söylenebilir. Bu faktör, iyi derecelenmiş zeminlerin daha düşük poroziteye sahip olmasındandır (Thalmann, 1950).

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Bu bölümde, laboratuarda yürütülen deneysel çalışmalarda izlenen yöntem ve deneylerin yapılmasında kullanılan materyal anlatılacaktır. İlerleyen kısımlarda, numunelerin seçiminden başlanarak, numunelerin sıcaklık uygulaması sonrasına kadar uygulanan deney programı ayrıntılı olarak sıralı bir biçimde yer alacaktır. Buna paralel olarak, kullanılan deney aletleri, materyal alt başlığında sunulacaktır.

Bu tez çalışmasında, gerçekleştirilen bütün deneyler Kocaeli Üni. İnşaat Müh. Bölümü Geoteknik Laboratuarında yürütülüp, deneylerin yapılmasında aksi belirtilmedikçe American Society for Testing and Materials (ASTM) esas alınıp, numunelerin sınıflandırılması birleşik sınıflama sistemine (ASTM) göre yapılmıştır. Deneylerin bu standartlara göre yapılmasında, J. E. Bowles (1992)'in ''Engineering Properties of Soils and Their Measurement'' adlı eserinden yararlanılmıştır.

4.2. Yöntem

4.2.1. Deney numunelerinin seçimi

Gerçekleştirilen deneylerde, dört farklı kil ile birer silt ve killi kum numunesi üzerinde çalışılmıştır. Bu numunelerin seçiminde, yürütülecek deneysel çalışmaların daha kapsamlı olabileceği gözetilerek, zemin özellikleri birbirinden farklılaşan numuneler ile çalışılmak istenmiştir.

Deneysel çalışma programına katılan numuneler içerisinde ilki, zemin mekaniği laboratuar deneylerinde sıkça araştırma amaçlı, seramik endüstrisinde ise yaygın olarak kullanılan düşük plastisiteli işlenmiş kaolindir. Numune, Eczacıbaşı firmasından işlenmiş kaolin olarak isimlendirilerek alınmış ve birleştirilmiş sınıflama sistemine göre silt zemin grubunda yer alan bir numunedir. Kaolin bir kil minerali

olmasına karşın, silt (ML) olarak sınıflandırılması kullanılan kaolinin işlenmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, işleme aşamaları hakkında firmadan bilgi alınamamış olup ML sınıflamasına sebep olan etkenler belirlenememiştir. İlerleyen bölümler içinde numune işlenmiş kaolin yerine, sadece kaolin adı ile anılması yeğlenmiştir.

Kil numuneleri arasında, doğal kil olmasının yanında farklılaşan plastisite özellikleri ve kum içerikleri dikkate alınarak Kocaeli ilinin Köseköy ve Yuvacık bölgelerinden alınmış kil numuneleri ile Tekirdağ ilinden alınmış bir kil numunesi yer almaktadır. Diğer kil türü, yüksek plastisite özelliği anılan ile Montmorrillonite kil grubundan olup, Döker Döküm firmasından temin edilen bentonit kilidir.

Öte yandan, yüksek sıcaklık etkisinin kumlu zeminler için yaratacağı etkinin açığa çıkarılmasının önemli olacağı düşünülmüştür. Bu etkinin ortaya konması hedeflenerek yapay olarak hazırlanmış, kohezyon özelliği kazanması için temiz kum içerisine ağırlıkça yaklaşık %10 bentonit eklenmiş killi kum numunesi üzerinde çalışılarak tespit edilmiştir.

4.2.2. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler

Bu çalışmada, üzerinde çalışılan bütün numunelerin yüksek sıcaklık uygulanması öncesinde aşağıdaki maddelerde değinileceği üzere doğal zemin özelliklerinin tanımlanmasına yönelik deneyler yapılmıştır. Sonrasında, mevcut doğal zemin özellikleri farklı yüksek sıcaklıklar etkisinde değişmesi tahmin edilen, seçilen özelliklerin değişimi numuneler arasında saptanmıştır.

Minyatür bir sıkıştırma düzeneği ile oluşturulan silindirik biçimde numunelere, daha sonra belirli bir deney programı dâhilinde ısıl işlem uygulanmıştır. Ardından, bu ısıl işlem uygulamasının numunelerin serbest basınç mukavemeti üzerinde nasıl bir etki oluşturabileceğini belirleyebilmek için deneyler yürütülmüştür.

Numuneler için gerçekleştirilen deneyler, ilerleyen alt başlıklarda deneylerin yapılış sırasına göre sıralı olarak sunulacaktır. Ayrıca çalışmada, yapılan deneyler içerisinde

laboratuarda rutin deneyler için ilgili standartlarının verilmesi ile yetinilecek iken, Harvard minyatür kalıbında sıkıştırma, görünür porozite ve serbest basınç mukavemeti deneylerinin kısaca açıklanmasının anlamlı olacağı düşünülmüştür.

Aşağıdaki tabloda, numuneler üzerindeki gerçekleştirilen rutin deneyler standartları ile birlikte verilmiştir.

Tablo 4.1: Numuneler üzerinde yapılan rutin deneyler

Deney	Standart No
Yıkamalı Elek Analizi	ASTM D421 ve ASTM D422
Hidrometre	ASTM D421 ve ASTM D422
Likit ve Plastik Limit	ASTM D4318
Su İçeriği	ASTM D2216
Doğal ve Kuru BHA	ASTM D4254
Organik Madde İçeriği	ASTM D2974
Özgül Ağırlık	ASTM D854

4.2.3. Harvard minyatür kalıbında sıkıştırma deneyi

Bu deneyin yapılmasında, Harvard Üniversitesi'nden S. D. Wilson (1950) adlı araştırmacının geliştirmiş olduğu yöntem esas alınmıştır.

Üzerinde çalışılan bütün numuneler, Harvard minyatür kalıbında modifiye olarak sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Numunelerin bu yöntem ile sıkıştırılması, optimum su içeriğinde, hacimce eşit 5 tabaka olacak şekilde ölçeklendirilerek, her tabaka için belirli ağırlık ve yükseklikteki tokmağın 51 kez düşürülmesinden ibarettir. Bu tokmaklama işlemi, aynı şekilde her tabaka için tekrarlanarak, numuneler belirli bir mekanik enerji ile sıkıştırılmış olmaktadır.

Böyle bir sıkıştırma işlemi, belirli bir enerji sarfiyatını gerektirmektedir. Laboratuar düzeneği ile uygulanan enerji hesaplanacak olursa, sıkıştırma tokmağının belirli bir yükseklikten her bir düşüşü,

$$E = m\,g\,h \tag{4.2}$$

Olurken, tokmaklama işlemi her bir tabaka için belirli sayıda tekrarlandığından, toplam harcanan enerji;

$$E_{top} = L\ N\ m\ g\ h \tag{4.3}$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu formülde;

E: enerji (Joule)
E_{top}: toplam enerji (Joule)
L: tabaka sayısı
N: her tabaka için tekrarlanan vuruş sayısı
m: sıkıştırma tokmağının ağırlığı (gr)
g: yer çekim ivmesi (9,81 m/sn^2)
h: tokmağın düşme yüksekliği (cm) olarak ifade edilir.

4.2.4. Numunelerinin hazırlaması

Silt ve killi numunelerde, Harvard minyatür sıkıştırma kalıbında, optimum su içeriğinde sıkıştırılmıştır. Killi kum numunesinde ise temiz kumun içerisine ağırlıkça %10 oranında bentonit eklenerek, kumun kil ile karışımında silindirik hâlde dengede kalabildiği oran gözetilip, numuneler üretilirken, öte yandan optimum su içeriğinde sıkıştırılması sağlanmıştır.



Fotoğraf 4.1: Isıl işleme hazırlanan killi kum numuneleri

4.2.5. Numunelerin kurutulma süreci4

Serbest basınç mukavemeti belirlenen numuneler, ısıl işlemin dolaylı olarak uygulanmadığı (hazırlandığında ve havada kurutulmuş hâldeki) ve ısıl işlemin dolaylı olarak uygulandığı (etüv sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklar) durumları için hazırlanmıştır

Üzerinde çalışılan kil numuneleri içerisinde, sıcaklık uygulamaları öncesinde özellikle yüksek plastisiteli killer için büyük yüzey çatlaklarının oluştuğu görülmüştür. Malzeme özelliklerinden tahmin edileceği üzere, silindirik hâlde hazırlanan bir numunenin belirlenmek istenen serbest basınç mukavemetini, yüzeyinden görünen çatlaklılığı önemli ölçüde etkileyeceği aşikârdır.

Bu hadiseyi, optimum su içeriklerinde sıkıştırılan numunelerin havada kurutulması esnasında bünyesindeki suyu, büzülme limitindeki su içeriğine ulaşana kadar hızlıca kaybetmesi ile açıklamak mümkündür. Numunelerin havada kurutulması esnasında yapılan nitel gözlemlerde, bu kuruma süresinin uzatılması neticesinde yüzeyinde çok daha küçük çatlaklar olabileceği belirlenmiştir.

Numunelerde gözlenen bu su kaybının hızı, sıkıştırıldığı optimum su içeriğinin yanında, her bir numunenin kendine has zemin özellikleri ile ilgili olarak hava ortamından sağlanan ısı etkisinde, birim zamandaki suyun ağırlıkça buharlaşma miktarı (ısıl difüzyon) ile açıklamak yerinde olacaktır. Numunelerin, yüzeyinde belirlenen çatlaklar, içeriğinde su difüzyonunun nispeten hızlı gerçekleştiği durumlar için fark edilebilir nitelikte olduğu belirleniştir.

Farklı su içeriklerinde hazırlanan numunelerin, etüv ve artan yüksek sıcaklık uygulamaları için bu özelliği dikkate alınarak, içeriğindeki su buharlaşmasının olabildiğince yavaş gerçekleşmesi istenmiştir. Bu nedenle, kalıpta sıkıştırılarak hazırlanan numuneler, belirli bir süre (örneğin; yüksek plastisiteli bentonit için yaklaşık dört gün, düşük plastisiteli kaolin için bir gün) laboratuar ortamı sıcaklığında (~20 °C) kurumaya bırakılmıştır. Bu kuruma süresinin yeterliliği, numunenin laboratuar sıcaklığında ağırlığının değişmediği durum için kontrolü yapılabilmektedir (büzülme limitine geldiği su içeriği). Sonrasında büzülme limitine geldiği bilinen numuneler, havada kurutulmuş veya istenilen sıcaklık uygulamaları için serbest basınç mukavemeti deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deneyleri yapılacak numunelerin böyle bir kurutma yöntemi sonrasında uygulanan ısıl işlem sürecinin, arazi uygulamaları ile benzeşim göstereceği düşünülmektedir. Çünkü, zeminlerin yüksek sıcaklık etkisinde bırakılarak arazide iyileştirilmesi göz önünde bulundurulduğunda, sahada iyileştirilmek istenen alan öncelikli olarak ıslak olmaması, uygulanacak olan ısı enerjisinin sarfiyatının az olması açısından önemli olmaktadır. Zira, arazide doğal su içerikliklerinde bir zemin alanı ile laboratuarda kendi hâlinde kurumaya bırakılmış ve sonrasında ısıl işlem uygulanmış numuneler benzerlik göstermiş olacaktır.

4.2.6. Numunelerin ısıtılma süreci

Dolaylı olarak sıcaklık uygulanmamış numuneler, hazırlandığında ve havada kurutulmuş hâlde olmak üzere iki farklı su içerinde hazırlandığından bahsedilmişti.

Bu şekilde hazırlanan numuneler, hazırlandığındaki ve belirli bir süre laboratuar ortamı sıcaklığında kurumaya bırakıldıktan sonraki su içeriğinde, serbest basınç mukavemetinin belirlenmesini kapsamaktadır. Burada elde edilmek istenen bulgu, dolaylı olarak sıcaklık uygulanmamış numunelerin, kendi aralarında zemin özelliklerinin değişmeyeceği her ne kadar bilinse de, numunelerin hazırlandığındaki su içeriği ile havada kurutulmuş durumlarındaki su içeriğinin, etüvde kurutulmuş (su içeriğinin olmadığı) hâldeki bir numuneye kıyasla serbest basınç mukavemetinin nasıl bir fark yaratacağını belirleyebilmektir.

Numunelere sıcaklığın dolaylı uygulamaları ise, bir gün boyunca etüv (~100 °C) tarafından sağlandığı ve ilerleyen bölümlerde etüvde bekletildikten sonra planlanan sürelerde ve yüksek sıcaklık uygulaması olarak bilinecek olan 200, 400, 600, 800 ve 1050 °C sıcaklık kademelerini kapsamaktadır.

Planlanan sıcaklık uygulamalarının bütün numuneler için bahsi geçecek olan zemin özellikleri üzerindeki değişimi kıyaslayabilmede yine aynı o numunenin, 100 °C sıcaklıkta ısıtılmış durumdaki ortalamaları alınarak saptanan zemin özellikleri, serbest basınç mukavemeti ve gerilme modülü referans sıcaklık değeri olarak kabul edilmiş ve 5 ile 6. bölümlerde, deney sonuçlarının oransal olarak gösterimi için 1 olarak alınmıştır.

İlgili kısımlarda, yüksek sıcaklığın artan kademelerinde, numuneler için belirlenen değişkenlerin oransal değişiminin hesaplanmasında referans sıcaklığı olarak kabul edilen etüv sıcaklığında (~100 °C) saptanan değere oranlanarak belirlenmiştir.



Fotoğraf 4.2: Yüksek sıcaklıkta ısıtılan numuneler

Bir silt ve dört farklı kil numunesi, değişen sürelerde;

- Hazırlandığında (optimum su içeriğinde)
- Havada kurutulmuş hâlde (büzülme limitindeki su içeriğinde)
- 100 ° C-Etüvde kurutulmuş hâlde (su içeriğinin olmadığı durumda)
- 200 °C
- 400 °C
- 600 °C
- 800 °C
- 1050 °C

sıcaklık aşamaları için deneyleri yapılırken, yüksek sıcaklığın serbest basınç mukavemeti üzerine etkisinin önemli düzeyde değişmeyeceği düşünülen killi kum numunesi için ise sadece;

- 100 °C
- 400 °C
- 1050 °C sıcaklık kademeleri için deneyler yapılmıştır.

Aşağıdaki ardışık iki tabloda, üzerinde deneyleri gerçekleştirilen numunelerin türü, yüksek sıcaklığın dolaylı olarak uygulanmadığı ve uygulananlar için süresi ile birlikte sıcaklık kademeleri ve sayısı özetlenmiştir.

Tablo 4.2: Farklı numunelerin deneyleri gerçekleştirilen sayıları (adet)

	Hazırlandığında	Havada kurutulmuş	100 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1050 °C
İşlenmiş kaolin	5	5	5	5	5	5	5	5
Tekirdağ kili	2	4	5	5	5	4	4	5
Köseköy kili	3	3	3	3	3	3	3	3
Yuvacık kili	3	3	3	3	3	3	3	3
Bentonit	2	5	4	5	5	5	5	5
Killi kum	2	-	5		2	-	-	5

Tablo 4.3: Farklı numunelerin deneyleri gerçekleştirilen ısıtılma süreleri (sa)

	100 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1050 °C
İşlenmiş kaolin	24	24	24	24	24	24
Tekirdağ kili	24	24	24	24	24	24
Köseköy kili	6	6	6	6	6	6
Yuvacık kili	6	6	6	6	6	6
Bentonit	24	24	24	24	24	24
Killi kum	24	-	24	-	-	24

4.2.7. Görünür porozite deneyi

Görünür porozite deneyinin yapılış yöntemi, belirli bir standart esas alınarak yapılmamıştır. Üzerinde çalışılan bütün numunelerin porozite verileri sıcaklığın dolaylı olarak uygulanmadığı ve uygulandığı durumlar için değişen süreçler boyunca zemin prizmasından hesaplanarak belirlenmiş ve deney sonuçlarının yer aldığı 5. bölümde gösterilmiştir.

Bu deneyin gerçekleştirilmesi, numunenin belirli yüksek sıcaklık uygulamasından sonraki kuru ağırlığı belirlenip (w_1), kaynayan bir kabın içerisinde 4 saat boyunca bekletilmesi şartıyla gerçekleştirilmektedir. Bu kaynatma süresi sonrasında numuneler, kaptan çıkarılarak vakit kaybetmeden yüzeyi kurulanıp, numunenin suya doygun ağırlığı (w_2) tartılarak tespit edilir. Arşimet ilkesine göre bir cismin ağırlığı,

içerdiği boşluğa su dolacak kadar artacak ve böylelikle suyun yoğunluğuna (d_{su}) bölündüğünde, numunenin içerdiği boşluk hacmi (V_v) belirlenmiş olacaktır. Numunenin görünür porozitesinin tespiti için içerdiği boşluk hacmi;

$$V_v = \frac{w_2 - w_1}{d_{su}} \tag{4.4}$$

olarak hesaplanır.

Bu deney yönteminin doğruluğunun saptanması amaçlanarak, en az çatlaklı olarak hazırlanıp, belirli sıcaklık kademesi ve süresinde ısıl işlem etkisinde bırakılan farklı zemin özellikleri gözetilerek seçilen kaolin, Tekirdağ kili ve bentonit numuneleri ile çalışılmıştır. Ardından ayn numunenin, özgül ağırlığı piknometre yöntemi ile saptanarak, karşılaştırılmıştır. Bu deney sonuçları ve su etkisinde kalan numunelerin bazı fiziksel özelliklerinin değişimi 5. Bölümde sunulacaktır

Diğer yandan, bu deneyin yapılma esnasında dikkati çeken önemli bir nokta, 6 ve 24 saat kademeli olarak artan yüksek sıcaklıklar etkisinde bırakılan bir silt ile tüm kil numunelerin, suda kaynatılması sırasında en az 600 °C'de ısıl işlem görmüş örneklerinin su etkisinde ayrışmadan kalabilmiş olmasıdır. Bu hadise, belirli bir yüksek sıcaklık uygulaması ile numunenin daneleri arasında kalıcı bağlar oluşabildiğine işaret etmektedir.

4.2.8. Serbest basınç mukavemeti belirleme deneyi

Bu deneyin yapılmasında, ASTM D2166 esas alınmıştır. Bu çalışmada silindirik olarak hazırlanan tüm numunelerin, serbest basınç mukavemeti belirlenmiştir. Serbest basınç mukavemeti belirleme deneyi zeminlerin kayma direncinin saptanmasında kullanılan hızlı ve gerçekleştirilmesi basit bir yöntemdir. Oluşturulan silindirik numuneler, yanal yönde yüklenmemiş olup ($\sigma_3 = 0$), numuneler düşey gerilme etkisinde (σ_1) etkisinde kırılmıştır. Mohr-Coulomb kırılma hipotezine göre, numunenin drenajsız olarak belirlenen kayma direnci, görünür kohezyon ile içsel sürtünme açısına bağlı olup;

$$S_u = c = \frac{q_u}{2} \tag{4.5}$$

eşitliği ile ifade edilir. Yukarıdaki eşitlikte zemin numunesinin kırılma sürecinde gösterdiği en yüksek düşey direnç q_u olarak simgelenip, zeminin serbest basınç mukavemeti diye adlandırılmaktadır. Bu değişkenin ikiye bölünmesi ile drenajsız kayma gerilmesi (S_u) ya da kohezyon (c) bulunur.

Deneylerde hazırlanan bütün numunelerin Harvard minyatür sıkıştırma düzeneğinde, boyu (L) ile çapı (d) ile;

$$2 < \frac{L}{d} < 2.5 \tag{4.6}$$

boyut aralığını sağlayan numuneler üretilmiştir. Bu oranın, 2 değerinden küçük olması durumunda numunede kırılma eğrileri üst üste gelecek, aksi takdirde 2.5 değerinden büyük olması koşulunda ise numunede burkulma cereyan edecektir.

Bu esaslara göre hazırlanan numune, serbest basınç dayanımı test cihazının yük hücresine olabildiğince narin bir şekilde yerleştirilip, numune üzerine ilkin temas etmeyen düşey yük hücresinin boşluğu alınır. Sonrasında numunenin yüklenme süreci esnasında düşey birim deformasyonunu gözleyebilmek amacıyla, deformasyon saati yük hücresine dikey olacak biçimde sabitlenir. Yüklenmeye başlayan numune için cihazdan okunan yük (kg) değerleri, birim deformasyon saatinin her 0.1 mm deformasyon değişimi için deney sonlanana kadar okunarak not alınır. Yapılacak hesaplamalarda ise serbest basınç deneyine başlanmadan boy ve çapı belirlenen numunenin birim deformasyon değeri;

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} (\text{mm/mm}) \tag{4.7}$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, ΔL numunenin toplam deformasyon değeri, L_0 ise numunenin başlangıçtaki boyudur. Numunenin kırılma süresince gerilme değeri;

$$\sigma = \frac{P}{A'} (N/mm^2 = MPa) \quad (4.8)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

Denklemde, okunan kilogram olarak P yükü Newton birimine çevrilmiş, A' ise düzeltilmiş alandır. Düzeltilmiş alan, numunenin kırılması esnasında hacminin değişmediği kabulü ile açıklanabilmektedir. Artan düşey yük etkisinde boyu kısalan numunenin, kesit alanı artacak ve nihayetinde hacmi değişmeden kalacaktır. Numunenin serbest basınç mukavemeti deneyi öncesinde toplam hacmi (V_T), kesit alanı ($A_{0)}$ ve boyu (L_0) olmak üzere;

$$V_T = A_0 L_0 \quad (4.9)$$

numunenin kırılma süresince kısalarak azalan toplam boyu ΔL;

$$V_T = A' (L_0 - \Delta L) \quad (4.10)$$

eşitliği ile sabit hacimden tespit edilecek, ε birim deformasyon oranı olmak üzere düzeltilmiş alan,

$$A' = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (4.11)$$

ile bulunacaktır.

Deneyleri yapılan her bir numunenin, serbest basınç dayanımlarının hesaplanmasında alan düzeltmesi yapılarak analiz yapılmıştır.

4.2.9. Gerilme modülünün hesaplanması

Bu değişkenin hesaplanmasında, numunenin serbest basınç mukavemeti deneyinde aldığı en yüksek gerilme değerinin, yine o numunenin kırıldığı andaki durum için birim deformasyona bölünmesi ile tespit edilmiştir.

4.2.10. Serbest basınç mukavemetinin belirli bir sıcaklığın farklı uygulama sürelerinde numuneler için değişiminin deneyleri

Numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, serbest basınç mukavemetinin değişen sıcaklık uygulamaları için farklılaşacağı düşünülmektedir. Ancak, belirli bir numunenin belirli bir sıcaklık kademesi için uygulanma süresinin, serbest basınç mukavemetini ne ölçüde etkileyeceği öğrenilmek istenmiştir. Doğal killer oluşu göz önünde bulundurularak Köseköy ve Yuvacık killerine uygulanan seçilmiş bir yüksek sıcaklık kademesinde farklı ısıl işlem süreci gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.4: Köseköy ve Yuvacık killerinin 800 °C sıcaklıklarda farklı ısıtma süreleri için sayısı (adet)

Süre (saat)	0.5	1	3	6	12	24
Köseköy kili	2	1	2	3	2	2
Yuvacık kili	2	2	2	3	2	2

Numunelerin 6 saatlik sıcaklık uygulaması, bütün farklı sıcaklıklar için zaten mevcuttur. Isıtılma süresinin 800 °C olarak seçilip, yüksek sıcaklık fırınında, bu sıcaklık değerine ulaşıldığı seviyede 0.5, 1, 3, 6, 12 ve 24 saat farklılaşan kademeleri için bazı deneyler gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki fotoğrafta, 6 saat boyunca yüksek sıcaklık uygulanmış Yuvacık kili numunesinin belirli bir kalınlıktaki dış yüzeyi ile iç yüzeyi arasındaki ısının tesir farklılığından dolayı oluşan renk dönüşümü görülmektedir.



Fotoğraf 4.3: 6 saat boyunca 800 °C'de yüksek sıcaklık uygulanıp, kırılmış Yuvacık kili numunesi

4.2.11. Serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler için değişiminin deneyleri

Numunelerin laboratuar ortamında kurutulma sürecinde, numune yüzeyinde görünür çatlaklılığın meydana geldiğinden bahsedilmiş ve serbest basınç dayanımı üzerinde etkin bir faktör olacağı alt başlık 4.2.5'de vurgulanmıştı.

Bu etkinin araştırılması için seçilen Tekirdağ kili numunesi ile testler yapılmak istenmiştir. Laboratuar ortamında kurumaya bırakılmış Tekirdağ kili numunelerinin, kuruma süresinin daha fazla uzatılarak yüzeyindeki çatlaklılığın görünürde neredeyse hiç olabileceği tahmin edilmiş ve sonrasında serbest basınç mukavemeti belirlenerek, bu fark test edilip mevcut az çatlaklı olarak hazırlanan aynı tür numunelerin seçilen özellikleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 4.5: En az çatlaklı olarak hazırlanıp farklı yüksek sıcaklıklar uygulanan Tekirdağ kili numunelerinin sayıları

Uygulanan sıcaklık (°C)	200	400	600	800	1050
Adet	1	4	5	3	2

Tekirdağ kilinin laboratuar ortamı sıcaklığında, hazırlandığı andan büzülme limitindeki su içeriğine ulaşması yaklaşık olarak 2 gün olarak belirlenmiştir. Bu sürenin uzatılarak hazırlanan numuneler, yine laboratuar ortamı sıcaklığında tutulmuş, ancak numuneler üzerine hava almasını olabildiğince engelleyen şeffaf plastik poşet geçirilmiş, hava akımının olmadığı bir ortamda tutulmuş ve normal kuruma süresi yaklaşık 2 gün olan bu kil numunesinin kuruması 6 güne uzatılmıştır.

Bu en az yüzey çatlaklılığı ile hazırlanan numunelerin, yüksek sıcaklık kademeleri olan 200, 400, 600, 800 ve 1050 °C için serbest basınç mukavemeti test edilmiş ve Bölüm 5'de sunulacağı üzere kıyaslanmıştır. İlgili kısımda, az çatlaklı Tekirdağ kili olarak isimlendirilecek numuneler laboratuar ortamında, normal fiziksel şartlarda kurumaya bırakılarak yüksek sıcaklık uygulamasına hazırlanmıştır.

4.2.12. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapmasının hesaplanması

Etüv sıcaklığı ve farklı yüksek sıcaklık uygulamalarının 6 ile 24 saatleri için numunelerin 5. bölümde serbest basınç dayanımı değerlerinin ortalama değerler üzerinden ifade edilecektir.

Yapılan analizlerde, bazı numunelerin özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında ortalaması hesaplanacak serbest basınç mukavemeti değerlerinin birbirinden diğer sıcaklık uygulamalarına nazaran, daha ayrık değerler aldığı tespit edilmiştir. Bu farklılık dikkate alınarak, ilgili değişimin istatistiksel olarak ifade edilmesinin önemli olacağı düşünülmüş ve numunelerin ilgili ısıtma süreleri için standart sapma değerleri hesaplanıp, grafiksel olarak gösterilmiştir.

4.3. Materyal

4.3.1. Kullanılan numunelerin bazı zemin özellikleri

Tablo 4.6: Kullanılan numuneler ve bazı zemin özellikleri

Numune	PI (%)	Zemin türü	Kum içeriği (%)
İşlenmiş kaolin	11	ML	0
Tekirdağ kili	37	CH	7
Köseköy kili	13	CL	33
Yuvacık kili	25	CH	22
Bentonit	234	CH	0
Killi kum	NP	SC	90

4.3.2. Kullanılan cihazlar

Yöntem bölümüne paralel olarak, rutin deneylerin gerçekleştirilmesinde kullanılan deney aletleri düzeneği bu kısımda verilmeyeceği gibi, Harvard minyatür sıkıştırma ile serbest basınç deney düzenekleri ve yüksek sıcaklık fırınının özellikleri fotoğrafları ile birlikte kısaca anlatılacaktır.

4.3.2.1. Harvard minyatür sıkıştırma deney düzeneği

Numunelerin farklı sıcaklık uygulamaları öncesinde silindirik olarak hazırlanmasında kullanılmıştır. Bu deney aleti, numuneyi çevreleyecek olan 33.25 mm × 71.50 mm boyutunda silindir kalıp, sıkıştırmada kullanılan 34 cm düşme yüksekliğinde, 158 gr ağırlığında tokmak ve kalıptan numuneyi çıkarmada kullanılan mekanizmadan oluşmaktadır.



Fotoğraf 4.4: Harvard minyatür sıkıştırma deney düzeneği

4.3.2.2. Yüksek sıcaklık fırını

Numunelere yüksek sıcaklık uygulamasında kullanılmıştır. Cihaz, PROTERM marka olup, etrafında kalın yalıtım yüzeyleri ile iç kısmında ısı sağlayan her iki yanında tellerden ve termometreden oluşmaktadır.

Cihazın ön yüzünde, fırın sıcaklığını gösteren dijital ekrandan sıcaklık ayarı yapılabilmekte ve ayarlanan sıcaklık değerine yükselişi gözlenebilmektedir. Isıtma gücü 1500 Watt olup, sıcaklık kapasitesi 1100 °C, duyarlılığı 1 °C olarak üretilmiştir. Sıcaklığın, ayarlanan bir sıcaklığa ulaşma hızı yaklaşık 10 °C/dk. olduğu tespit edilmiştir.



Fotoğraf 4.5: Yüksek sıcaklık fırını

4.3.2.3. Serbest basınç mukavemeti deney düzeneği

Numunelerin hazırlandığında, havada kurutulmuş ve artan sıcaklık uygulamalarında serbest basınç dayanımının tayininde kullanılmıştır. Cihaz, DENSI FS 8000 marka olup ön yüzündeki dijital ekrandan deney esnasında numunenin üzerine aldığı yük kilogram cinsinden okunabilmektedir. Numunelerin kırılma süresince, deformasyon kontrolü yük hücresine sabitlenen 0.01 mm duyarlıklı deformasyon saatiyle belirlenmiştir. Yükleme hızı tüm kırılan numuneler için 0.85 mm/dk. deformasyon yapacak şekilde ayarlanmıştır. Testi yapılan numunelerin serbest basınç dayanımının büyüklüğüne göre 500 veya 5000 kg kapasiteli yükleme hücresi kullanılabilmektedir.



Fotoğraf 4.6: Serbest basınç mukavemetinin ölçüldüğü deney düzeneği

BÖLÜM 5. LABORATUAR DENEY SONUÇLARI

5.1. Giriş

Bu bölümde, farklı zemin özelliklerine sahip numuneler üzerinde yapılan çalışmaların laboratuar deney sonuçları sunulmuştur. Numunelerin kademeli olarak artarak uygulanan sıcaklık ve sürelerinin etkisinde ilgili zemin özellikleri, serbest basınç mukavemeti, birim deformasyon ve gerilme modülünün değişimi belirlenmiştir. Bu değişkenlerin tespitinde, silindirik hâlde sıkıştırılmış numunelerin öncelikli serbest basınç mukavemeti belirlenmiş, ardından farklılaşan zemin özelliklerinin tespit edilmesinde aynı tür ve sıcaklık uygulamasına tabii tutulmuş numuneler öğütülerek üzerinde deneyler yapılmış olup, sonuçlarının gösterilmesinde ortalama değerler alınmıştır.

5.2. İşlenmiş kaolin Numunesinin Deney Sonuçları

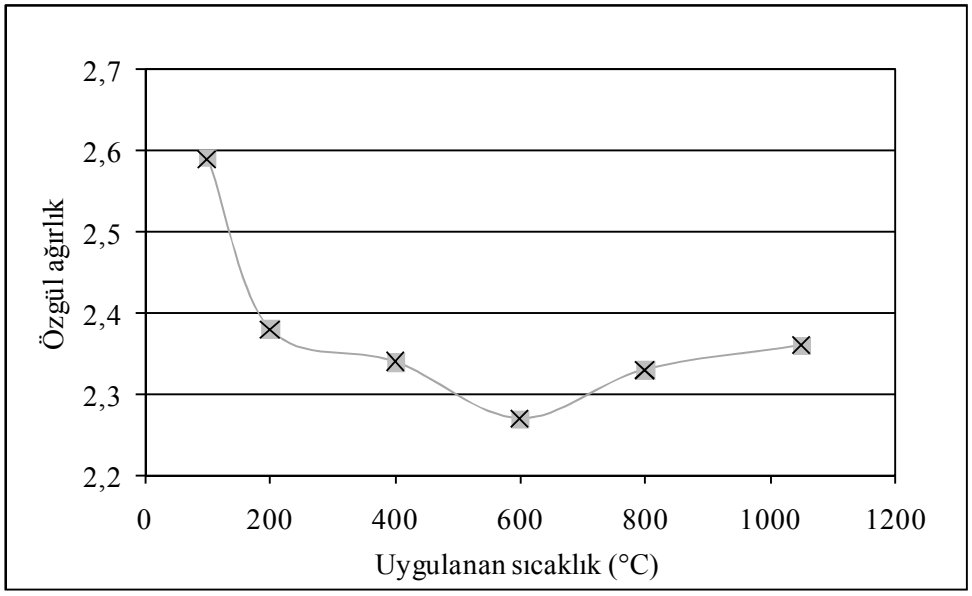
5.2.1. İşlenmiş kaolinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Tablo 5.1: İşlenmiş kaolin numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Renk	Beyaz
Özgül ağırlık	2.59
Likit limit (%)	42
Plastik limit (%)	31
Plastisite indisi (%)	11
Kum (2 mm-75μm) (%)	0
Silt (75μm-2μm) (%)	55
Kil (< 2 μm) (%)	45
Aktivite	0.31
Harvard maks. kuru BHA (kN/m^3)	14.7
Harvard optimum su muh. (%)	18.5
Organik madde içeriği (%)	0
Birleştirilmiş zemin sınıfı	ML

5.2.2. Özgül ağırlığın değişimi

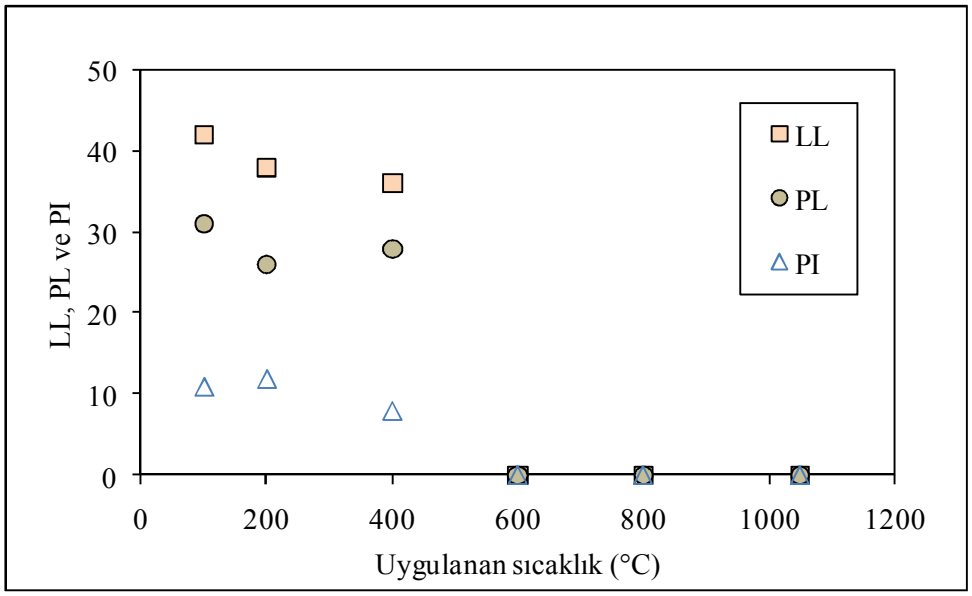
Numunenin özgül ağırlık değerleri, artan sıcaklık uygulamaları neticesinde önce azalmış, sonrasında hafifçe artan bir eğilim göstermiştir. Değişkenin düşüşündeki bu eğilim, kristal kafes yapısının sıcaklık artışı ile bozulmasının sonucu olarak açıklanabilir. Numunede, başlangıçtaki özgül ağırlık değeri 2.59 olup, 200 °C'de hızlı olarak düşerek, 2.38 olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın 600 °C olduğu aşamada numunenin en düşük özgül ağırlık değeri, 2.27 olarak tespit edilmiş ve sırayla artan sıcaklık aşamaları için 800 °C ve 1050 °C'de 2.33 ve 2.36 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.1: Kaolin numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.2.3. Plastisite özelliklerinin değişimi

Numunenin başlangıçta sırasıyla, 42 ve 31 olan likit ve plastik limit değerleri, 200 °C'de 38 ve 26 ve 400 °C sıcaklıkta 36 ve 28 olarak belirlenmiştir. 600 °C sıcaklık uygulamasında ise numunenin plastisite özelliğini bütünüyle yitirip, plastik olmayan davranış gösterdiği tespit edilmiştir.



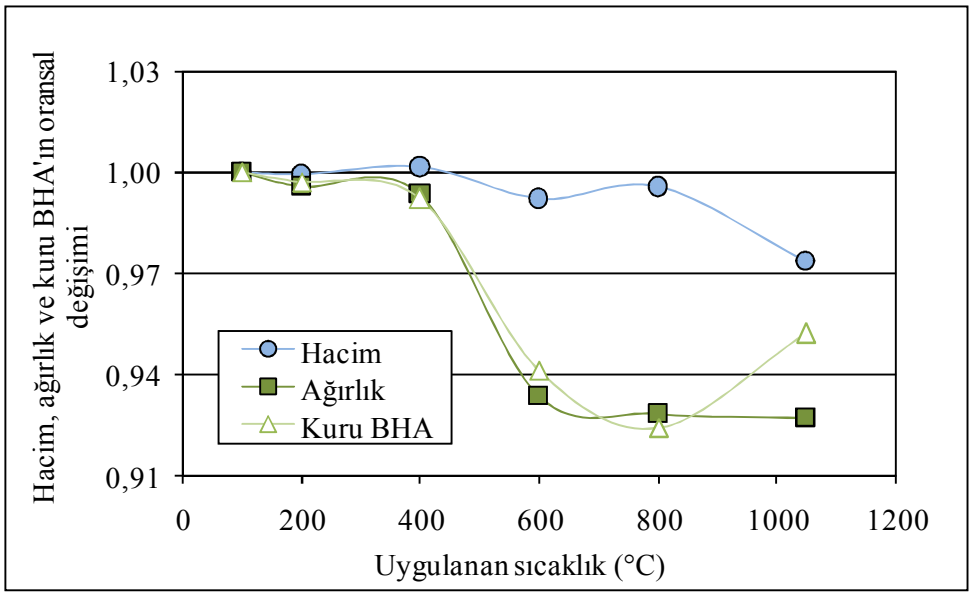
Şekil 5.2: Kaolin numunesinde plastisite özelliklerinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.2.4. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi

Numuneye artan sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak, ağırlığın oransal değerinin sürekli azaldığı belirlenmiştir. Bu değişkenin, 600 °C'deki sıcaklık uygulamasında, referans sıcaklık uygulamasına göre hızla düşerek, 0.93 olduğu tespit edilmiştir. Ardıl artan sıcaklık kademeleri için ise bu değişkendeki düşüş küçük oranda devam etmiştir.

Hacmin oransal değişiminin ise 1050 °C'ye kadar yaklaşık aynı kaldığı belirlenmemiştir Numunede, bu değişken en küçük 1050 °C sıcaklıkta meydana gelmiş olup, 0.97 olarak hesaplanmıştır.

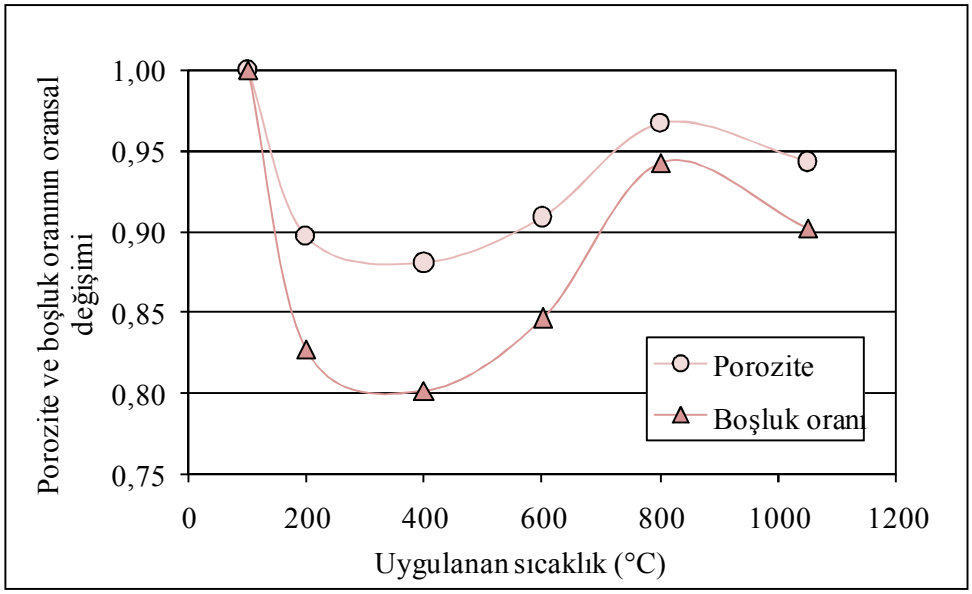
Bu iki değişkene bağlı olarak kuru BHA'nın oransal değişimi, uygulanan sıcaklığın 800 °C olduğu kademede başlangıca göre önemli düzeyde azalıp, 0.97'ye düştüğü ve sonraki sıcaklık kademesinde artışa geçerek 0.93 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.3: Kaolin numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.2.5. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

Numunede başlangıçta sırayla porozite ve boşluk oranı 0.45 ve 0.81 olarak hesaplanmıştır. Bu değişkenler 400 °C sıcaklık uygulamasına kadar dikkate değer biçimde azalırken, sırayla porozite ve boşluk oranının oransal değerleri, 0.88 ve 0.80 olarak hesaplanmıştır. 800 °C'ye kadar bu değişkenlerde artış önemli düzeyde atış belirlenirken, numune 1050 °C'de yine azalan bir eğilim göstererek sırayla porozite ve boşluk oranının oransal değerleri 0.94 ve 0.90 olarak belirlenmiştir.

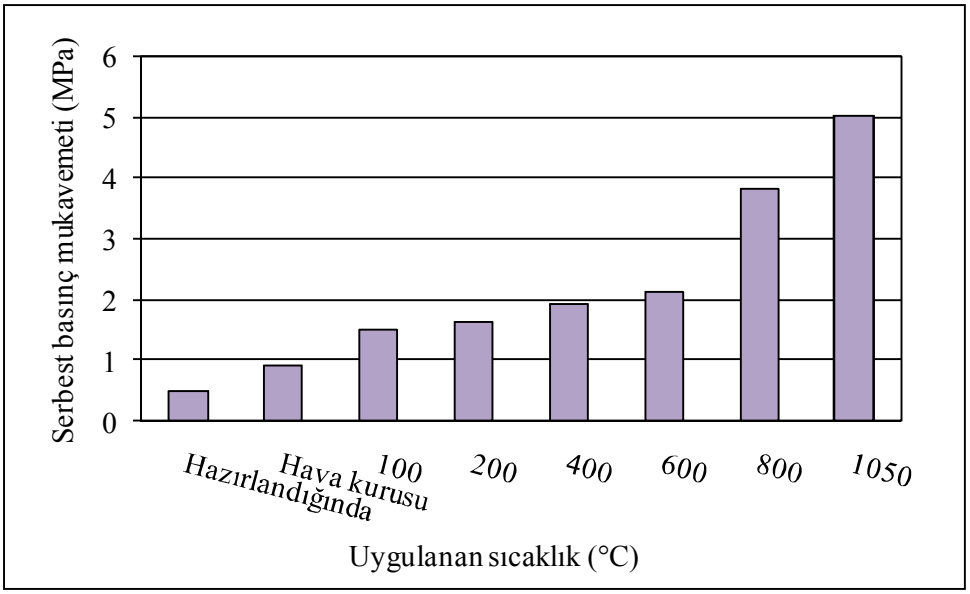


Şekil 5.4: Kaolin numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.2.6. Serbest basınç mukavemetinin değişimi

Artan sıcaklıklar uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin sürekli arttığı gözlenmiştir. Dolaylı yoldan sıcaklık uygulamasının olmadığı durumda, numunelerin sırayla hazırlandığı ve havada kurutulmuş hâldeki serbest basınç mukavemeti değerleri, 0.48 MPa ve 0.92 MPa olduğu saptanmıştır.

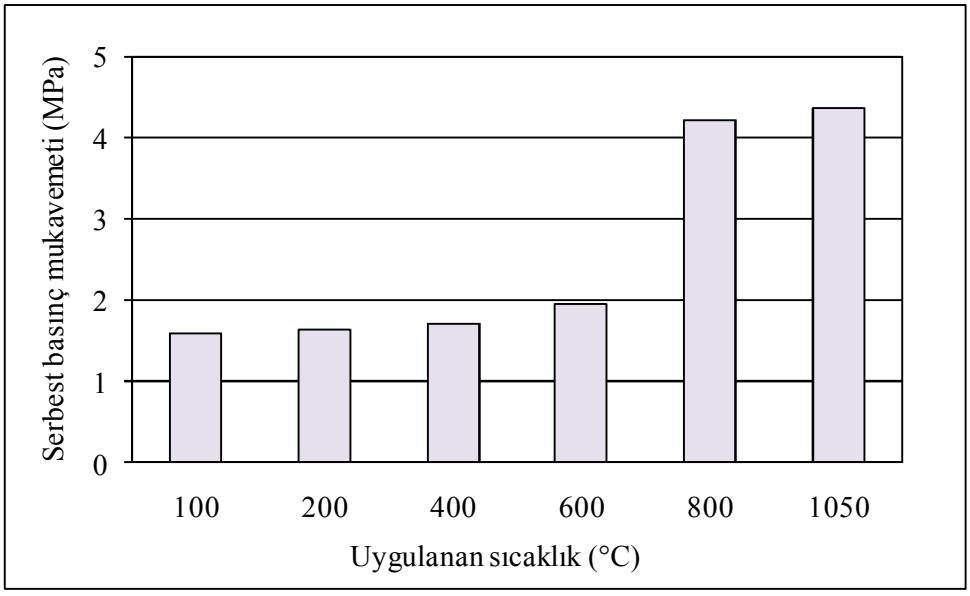
Bu değişken referans sıcaklık uygulamasına kıyasla, 600 °C'ye kadar kademeli olarak artmış ve 2.11 MPa olarak belirlenmiştir. Bundan sonraki artan sıcaklık kademeleri için sırayla, 800 °C ve 1050 °C için serbest basınç mukavemeti önemli düzeyde artış göstererek 3.81 MPa ve 5.02 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.5: Kaolin numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.2.7. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi

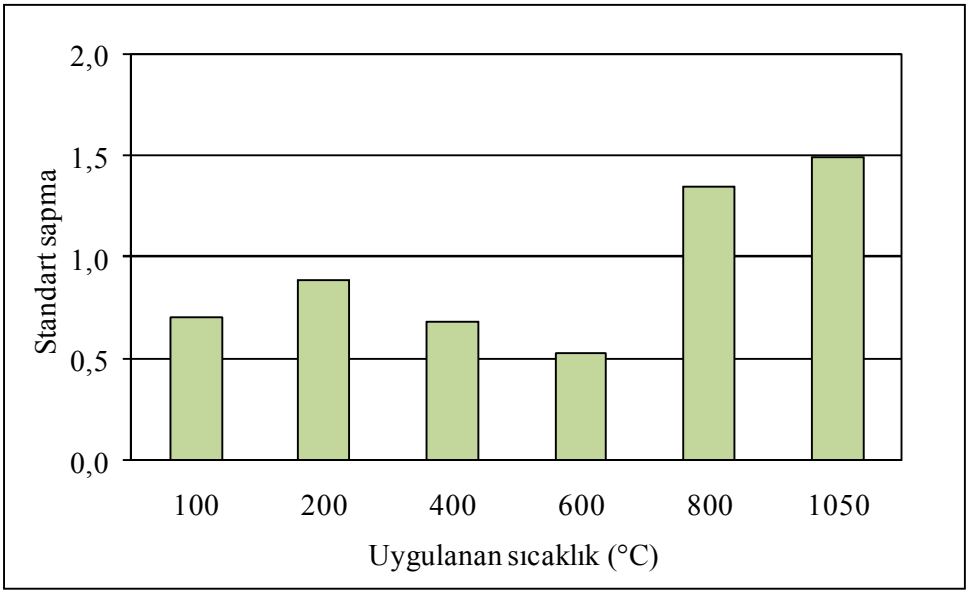
Numunenin serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi, uygulanan sıcaklık kademesinin 600 °C olduğu aşamaya kadar önemli oranda değişim gözlenmezken sırayla, 800 °C ve 1050 °C olduğu kademelerde çarpıcı düzeyde artarak 4.21 MPa ve 4.36 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.6: Kaolin numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.2.8. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması

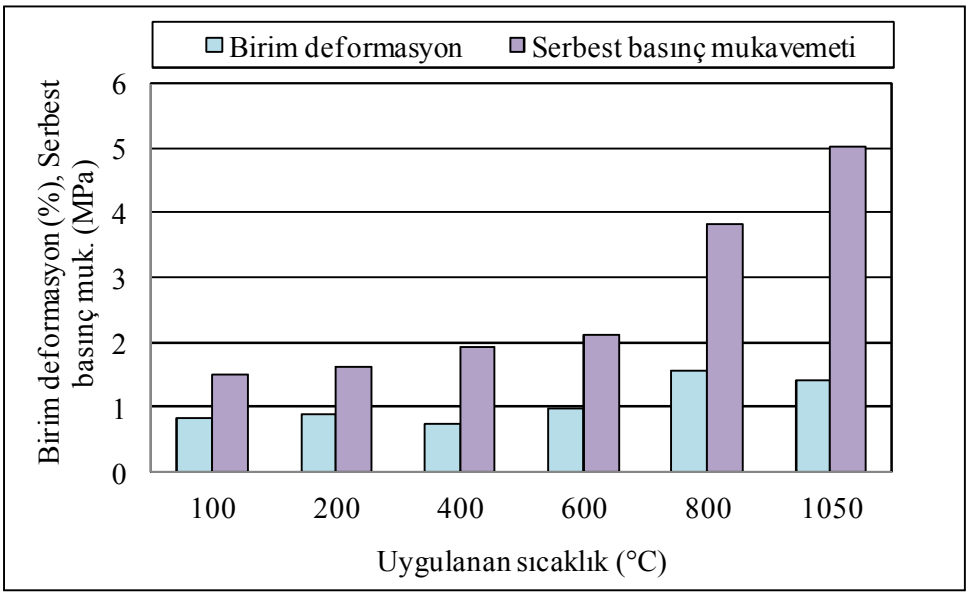
Numune için standart sapma değerleri, 800 °C'ye kadar olan sıcaklık uygulamaları için 0.5 MPa ile 1 MPa arasında hesaplanırken, en son iki sıcaklık kademeleri için sırayla 800 °C ve 1050 °C'de 1.35 MPa ve 1.50 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.7: Kaolin numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması

5.2.9. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi

Numunede birim deformasyonun yüzdesel olarak değişimi, artan sıcaklık uygulamaları etkisinde, düzenli bir eğilim göstermemiştir. Bu değişken, en yüksek 800 °C sıcaklıkta %1.56 olarak belirlenmiştir.

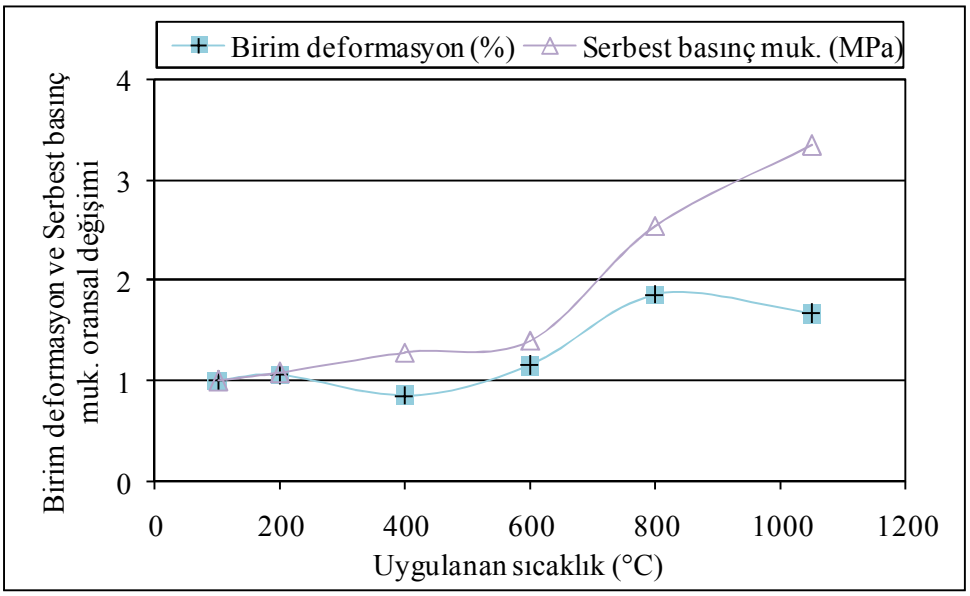


Şekil 5.8: Kaolin numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi

5.2.10. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi

Numunenin birim deformasyonun oransal değişimi, sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak en yüksek 800 °C'de 1.86 olarak hesaplanmıştır. Son sıcaklık aşamasında ise bu değişkenin hafifçe azalarak 1.67 olduğu tespit edilmiştir.

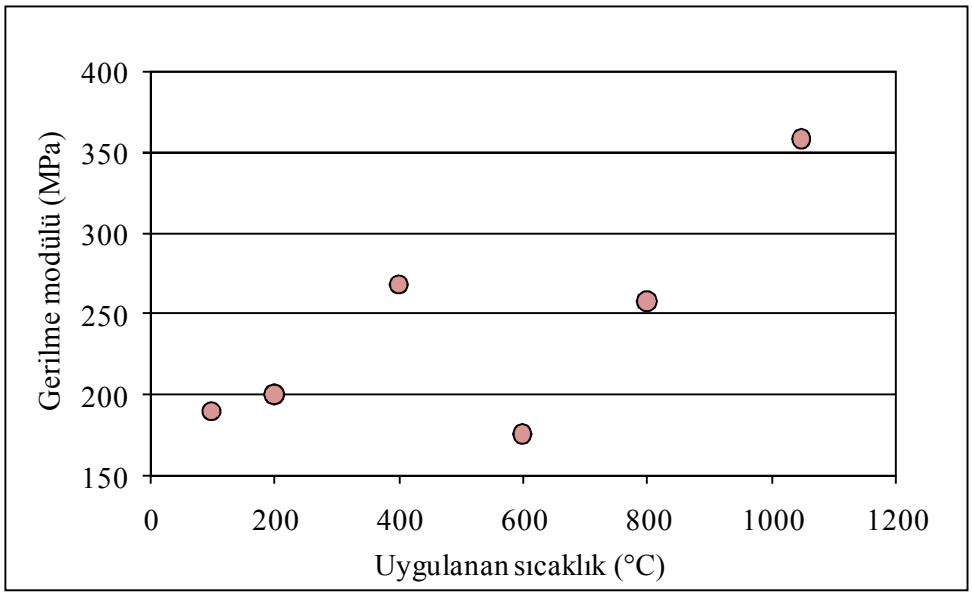
Serbest basınç mukavemetinin oransal değişimine bakıldığında ise artan sıcaklık uygulamaları neticesinde, kademeli olarak artarak sırayla, 800 °C ve 1050 °C'de 2.54 ve 3.35 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.9: Kaolin numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi

5.2.11. Gerilme modülünün değişimi

Numunede gerilme modülünün değişimi, başlangıç sıcaklığından 400 °C sıcaklığa kadar artan ve yine bu eğilime benzer olarak 600 °C sıcaklıktan 1050 °C sıcaklığa kadar artan bir değişim tespit edilmiştir. Gerilme modülü, 100 °C sıcaklık uygulamasında 190 MPa olarak hesaplanırken, 400 °C'de 268 MPa olarak hesaplanmıştır. 600 °C sıcaklıkta ise bu değişken ani olarak düşerek 176 MPa olarak belirlenmiş, artan sıcaklık kademelerinde artmaya devam ederek, 1050 °C'de en yüksek 358 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.10: Kaolin numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.3. Tekirdağ Kili Numunesinin Deney Sonuçları

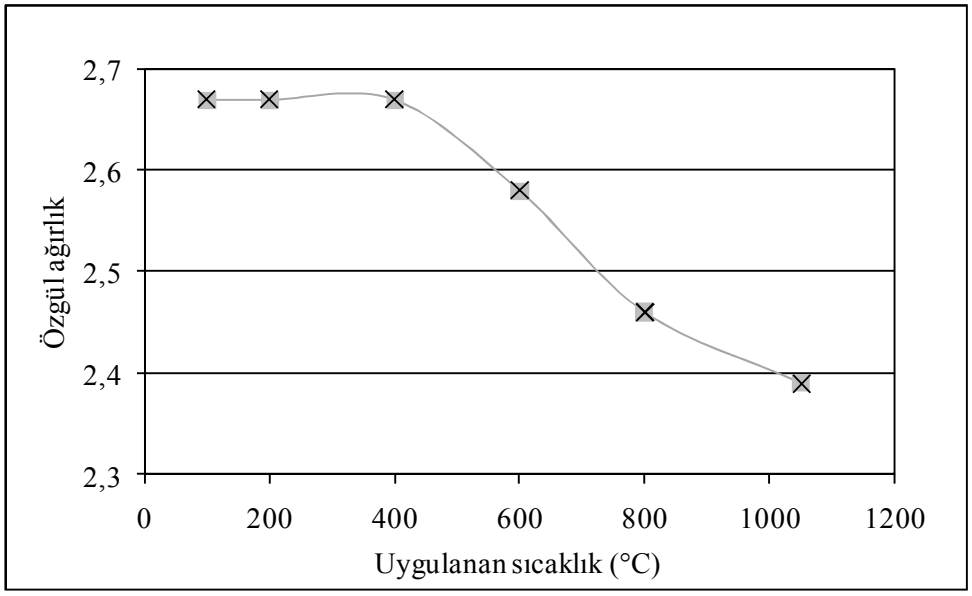
5.3.1. Tekirdağ kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Tablo 5.2: Tekirdağ kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Renk	Koyu kahverengi
Özgül ağırlık	2.67
Likit limit (%)	59
Plastik limit (%)	22
Plastisite indisi (%)	37
Kum (2 mm-75μm) (%)	7
Silt (75μm-2μm) (%)	53
Kil (< 2 μm) (%)	40
Aktivite	0.93
Harvard maks. kuru BHA (kN/m^3)	22.1
Harvard optimum su muh. (%)	17.2
Organik madde içeriği (%)	1.69
Birleştirilmiş zemin sınıfı	CH

5.3.2. Özgül ağırlığın değişimi

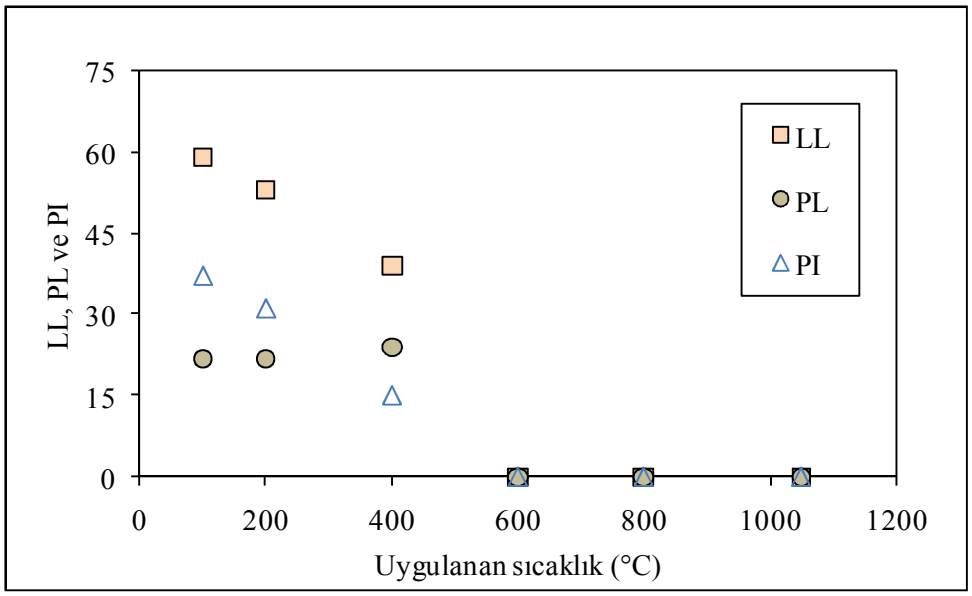
Numunenin özgül ağırlık değerleri, artan sıcaklık uygulamaları neticesinde 100, 200 ve 400 °C için 2.67 değerinde sabit kalmış, ardından aşamalı olarak azalmıştır. Bu değişken, uygulanan en yüksek sıcaklık kademesinin 1050 °C olduğu seviyede en düşük, 2.39 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.11: Tekirdağ kili numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.3.3. Plastisite özelliklerinin değişimi

Numunenin başlangıçta sırasıyla, 59 ve 22 olan likit ve plastik limit değerleri, 200 °C'de 53 ve 22, 400 °C'de 39 ve 24 olarak belirlenmiştir. 600 °C sıcaklık uygulamasında ise numunenin plastisite özelliğini bütünüyle yitirip, plastik olmayan davranış gösterdiği tespit edilmiştir.



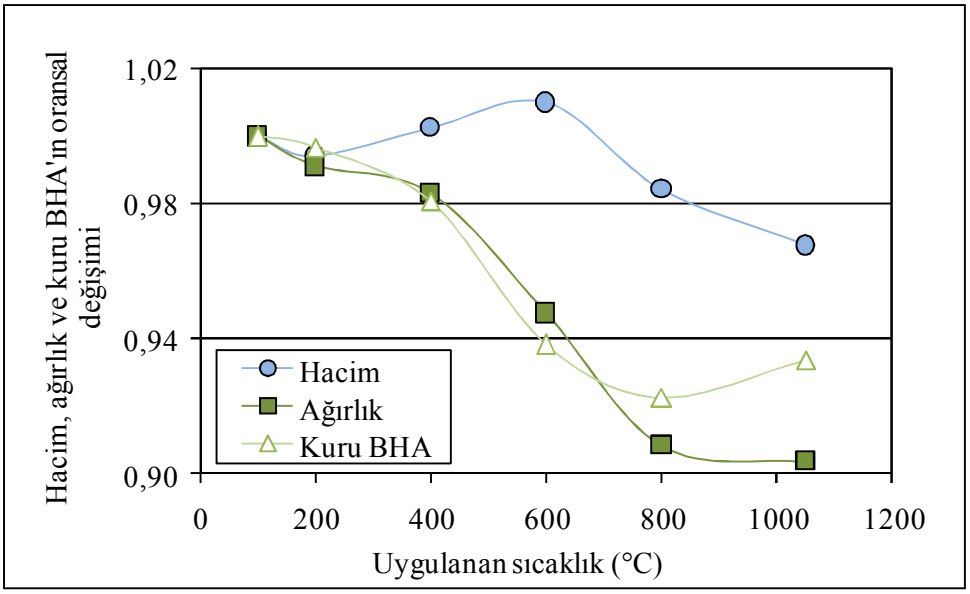
Şekil 5.12: Tekirdağ kili numunesinde plastisite özelliklerinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.3.4. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi

Numuneye artan sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak, ağırlığı oransal değerinin sürekli azaldığı belirlenmiştir. Bu değişken, 400 °C sıcaklıktan 800 °C'ye kadar hızla düşerek, 800 °C'de 0.91 olarak hesaplanmıştır. Ardıl sıcaklık kademesi için ise değişkende önemli düzeyde azalım gözlenmemiştir.

Hacmin oransal değişiminin ise ilk üç sıcaklık kademesi için önemli düzeyde değişmezken, 600 °C sıcaklıkta en fazla %1 kadar arttığı belirlenmiştir. Bu değişken, sonraki artan sıcaklık kademelerinde hızla azalarak, sırayla 800 °C ve 1050 °C'de 0.98 ve 0.97 olarak tespit edilmiştir.

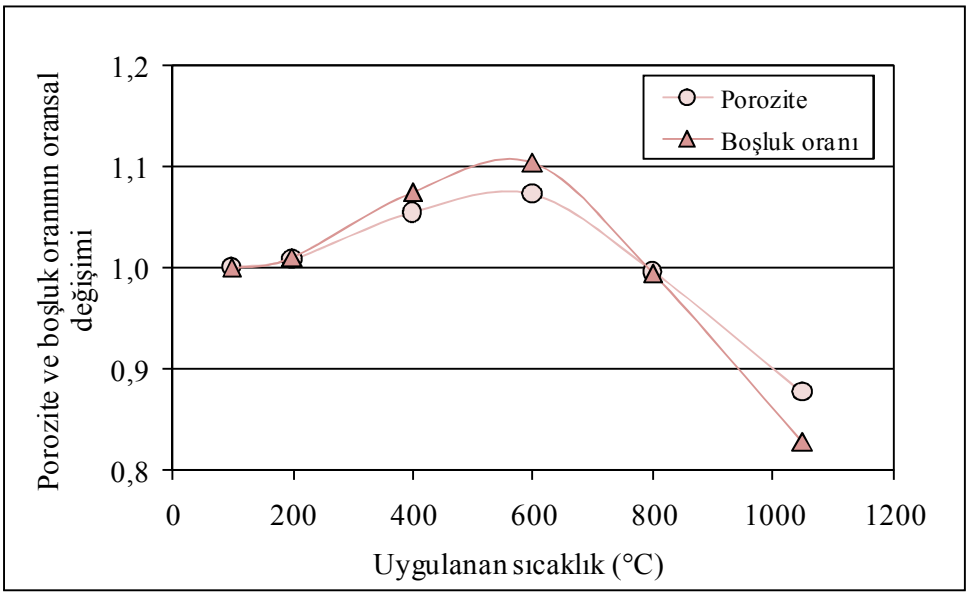
Bu iki değişkene bağlı olarak kuru BHA'nın oransal değişimi, 800 °C'ye kadar kademeli olarak düşüp, 0.92 olarak tespit edilmiştir. Ardıl sıcaklık kademesi için bu değişken hafifçe artış göstererek, 0.93 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.13: Tekirdağ kili numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.3.5. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

Numunede başlangıçta sırayla porozite ve boşluk oranı 0.28 ve 0.40 olarak hesaplanmıştır. Bu iki değişkenin oransal değişimleri, 200 °C sıcaklık uygulamasında neredeyse değişmezken, 400 °C ve 600 °C sıcaklıkta kademeli olarak artarak 600 °C'de sırayla porozite ve boşluk oranı oransal değerleri, 1.07 ve 1.10 olarak tespit edilmiştir. Sonraki artan iki sıcaklık kademesi için ise sırayla porozite ve boşluk oranının oransal değişimi hızla azalarak, 1050 °C'de 0.88 ve 0.83 olduğu belirlenmiştir.

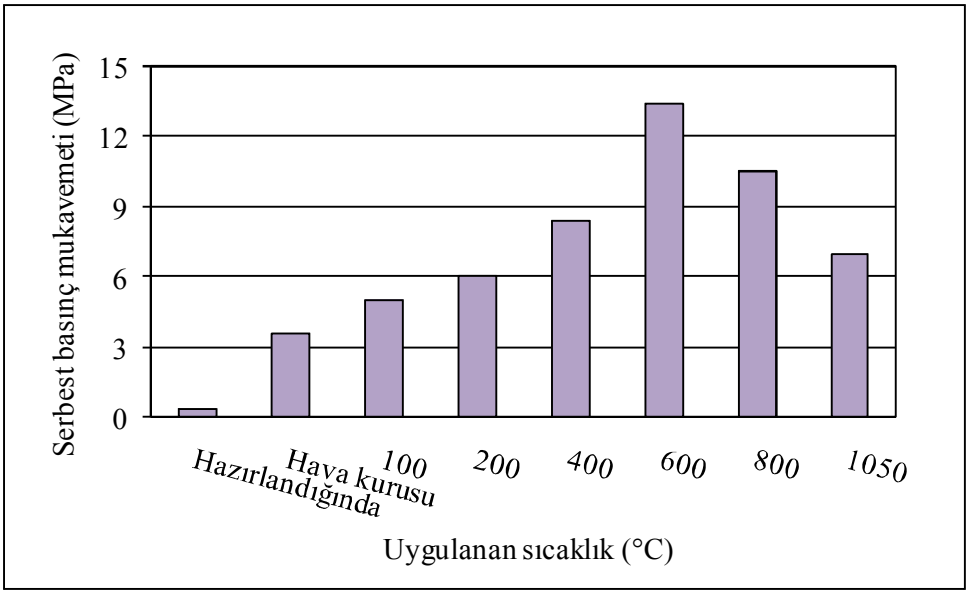


Şekil 5.14: Tekirdağ kili numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.3.6. Serbest basınç mukavemetinin değişimi

Artan sıcaklıklar uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin 600 °C'ye kadar kademeli olarak artıp, sonraki sıcaklık uygulamalarında yine kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir. Dolaylı yoldan sıcaklık uygulamasının olmadığı durumda, numunelerin sırayla hazırlandığı ve havada kurutulmuş hâldeki serbest basınç mukavemeti değerleri, 0.31 MPa ve 3.58 MPa olduğu saptanmıştır.

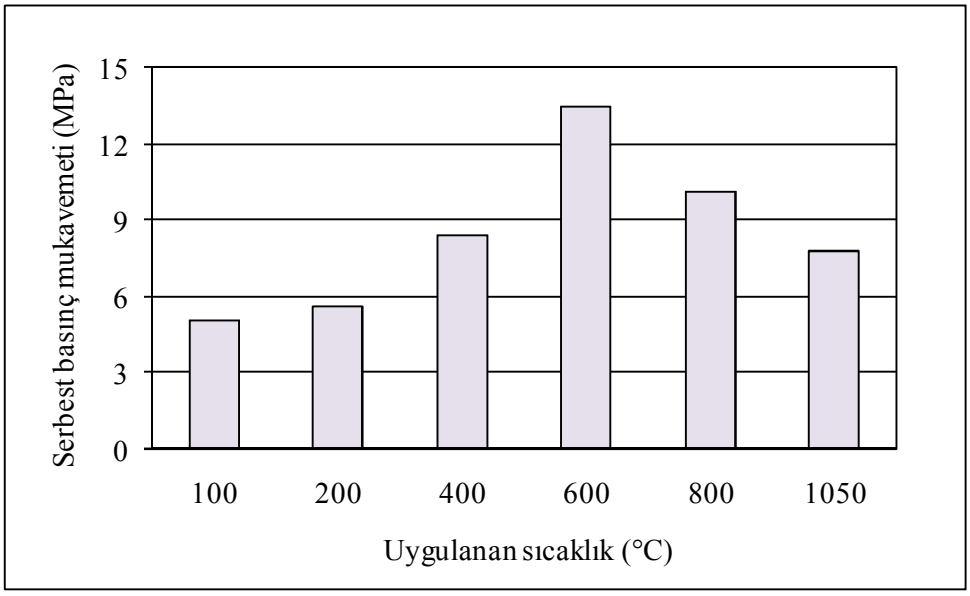
Bu değişken referans sıcaklık uygulamasına kıyasla, 600 °C'de en yüksek 13.44 MPa olarak belirlenirken, sırayla ardıl artan sıcaklık kademeleri için hızla azalarak 10.48 MPa ve 6.96 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.15: Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.3.7. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi

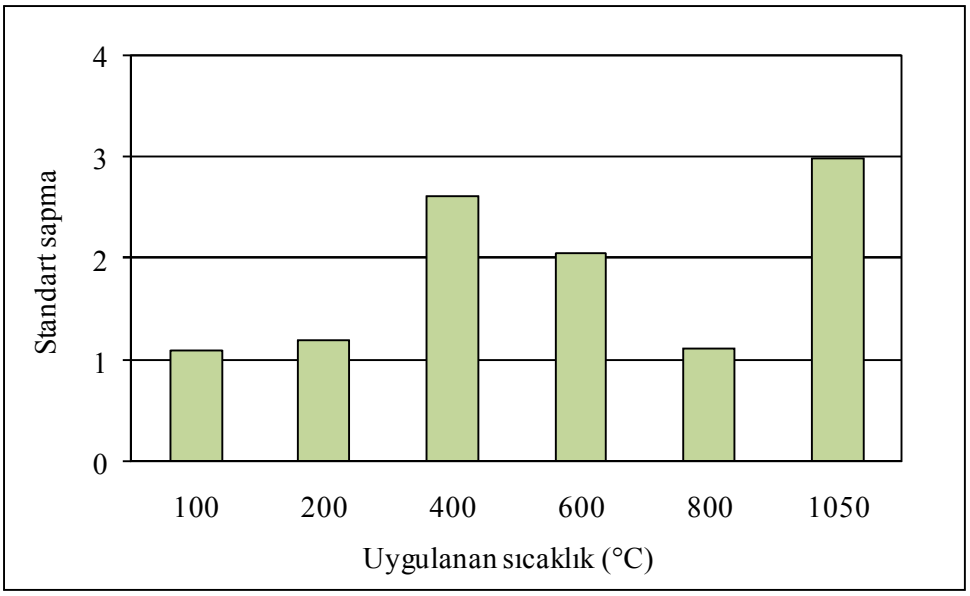
Numunenin serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi, uygulanan sıcaklık kademesinin 600 °C olduğu seviyeye kadar aşamalı olarak arttığı ve 13.46 MPa olduğu tespit edilmiştir. Bu değişken, sırayla daha sonraki artan iki sıcaklık aşaması için hızla azalmış ve 10.11 MPa ve 7.74 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.16: Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.3.8. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması

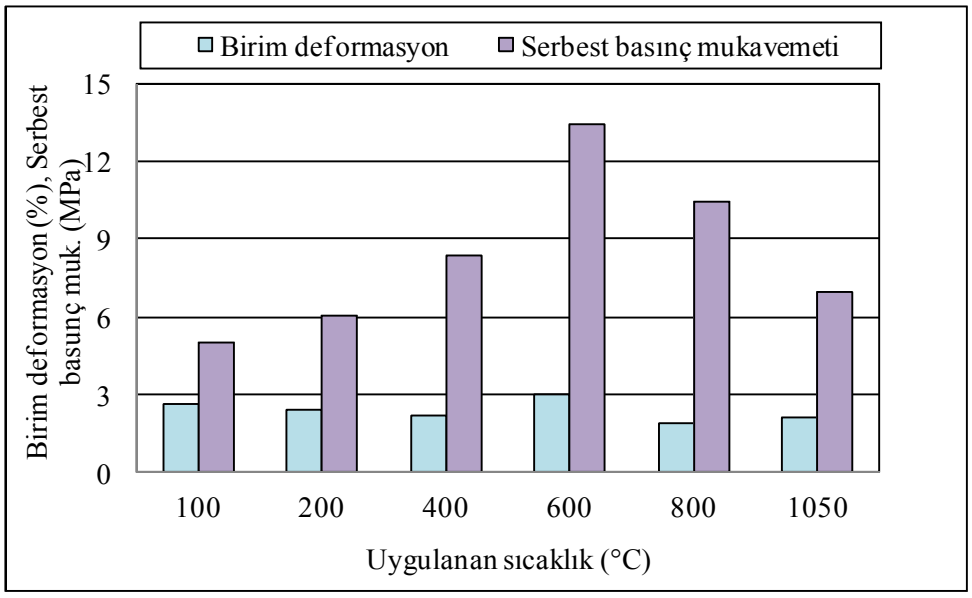
Numune için standart sapma değerleri, sıcaklığın artışına bağlı olarak düzenli bir değişim göstermemiştir. Bu değişkenin en yüksek, 1050 °C sıcaklıkta 2.98 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.17: Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması

5.3.9. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi

Numunede birim deformasyonun yüzdesel olarak değişimi, artan sıcaklık uygulamaları etkisinde, düzenli bir değişim göstermemiştir. Bu değişkenin en yüksek değeri, sıcaklığın 600 °C olduğu kademede, %3.00 olarak hesaplanmıştır.

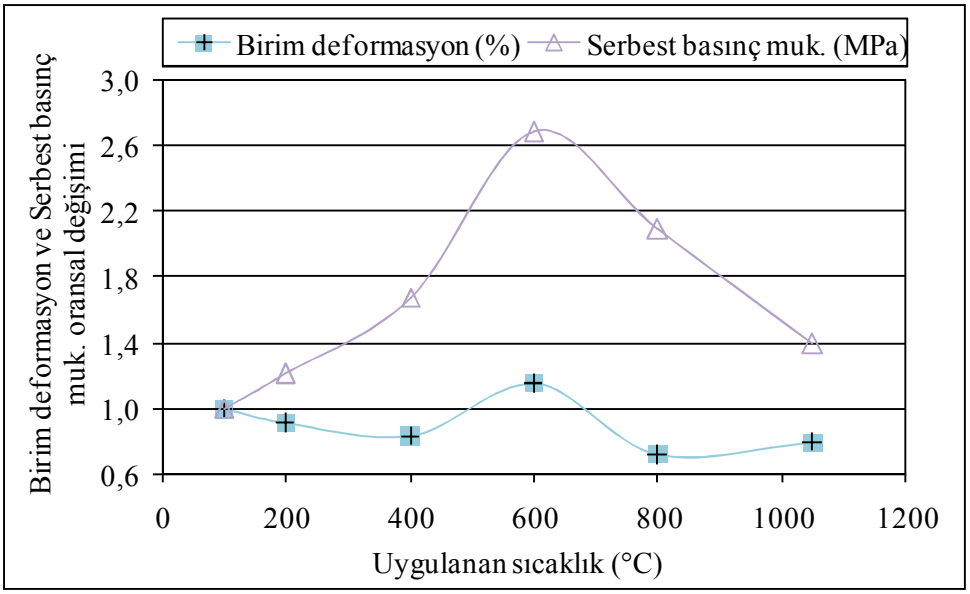


Şekil 5.18: Tekirdağ kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi

5.3.10. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi

Numunenin birim deformasyonunun oransal değişimi, sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak, en yüksek 600 °C sıcaklık kademesinde, 1.15 olarak hesaplanmıştır.

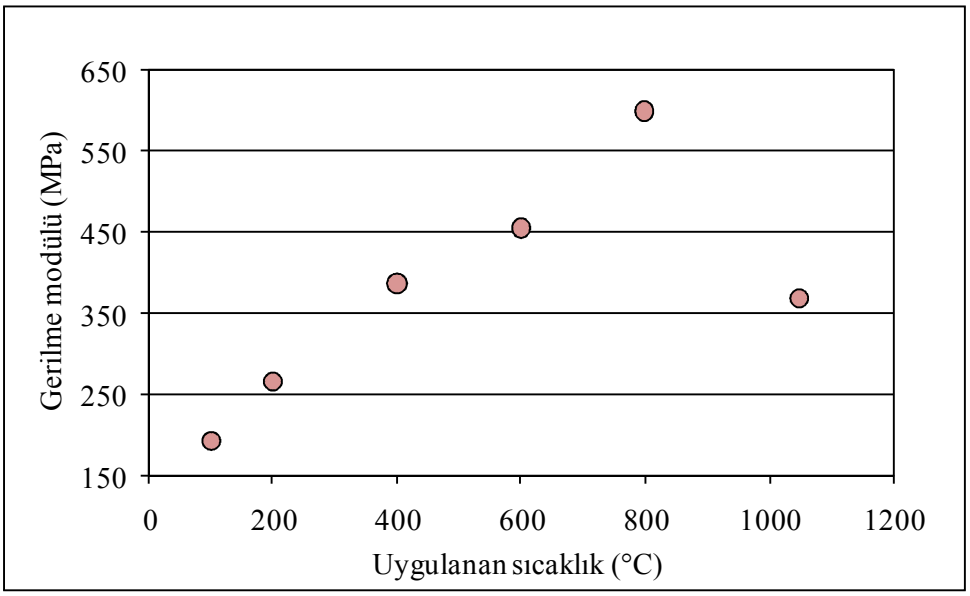
Serbest basınç mukavemetinin oransal değişimine bakıldığında ise artan sıcaklık uygulamaları neticesinde, 600 °C sıcaklığa kadar artan ve sonraki sıcaklık kademeleri için azalan bir eğilim gözlenmiştir. Bu değişken, 600 °C'de en yüksek 2.68 iken, 1050 °C'de 1.39 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.19: Tekirdağ kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi

5.3.11. Gerilme modülünün değişimi

Numunede gerilme modülünün değişimi, 800 °C sıcaklığa kadar kademeli olarak artmış ve daha sonraki sıcaklık kademesi için düştüğü belirlenmiştir. Bu değişken 100 °C'de 192 MPa olarak belirlenirken, en yüksek 800 °C sıcaklıkta 599 MPa olarak tespit edilmiştir. Uygulanan sıcaklığın 1050 °C olduğu kademede ise gerilme modülü azalarak, 368 MPa değerine düştüğü hesaplanmıştır.



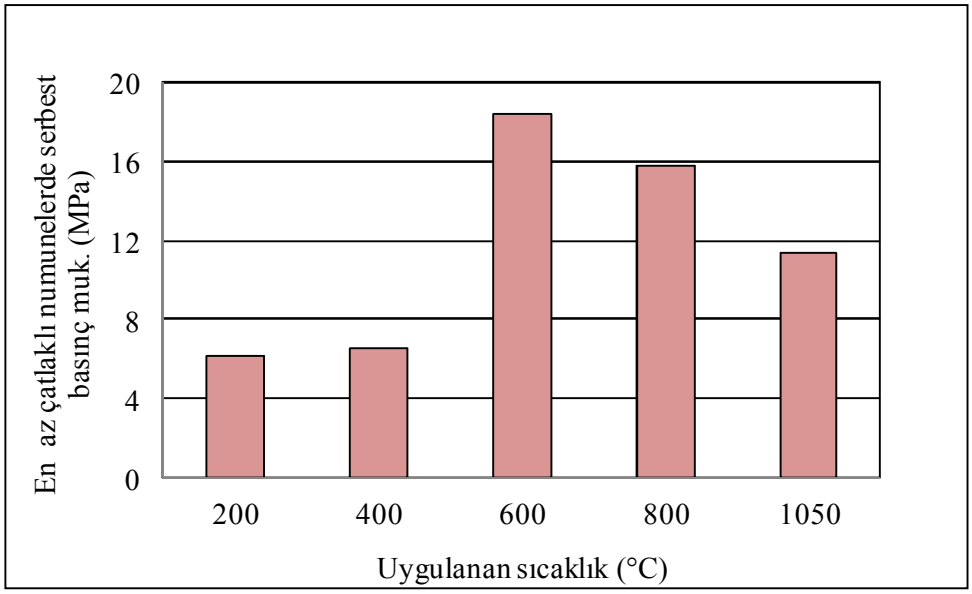
Şekil 5.20: Tekirdağ kili numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.3.12. En az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan çalışmalar

5.3.12.1. Serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler için değişimi

Yüzey görünümü açısından en az çatlaklı olarak hazırlanan Tekirdağ kili numuneleri uygulanan sıcaklığın 200, 400, 600, 800 ve 1050 °C kademeleri için serbest basınç mukavemetinin değişimi test edilmiştir. Bu tez çalışmasında, yüksek sıcaklık etkisinde bırakılan kil numuneleri içerisinde en yüksek serbest basınç mukavemeti, en az çatlaklı olarak hazırlanan Tekirdağ kili numuneleri üzerinde belirlenmiştir.

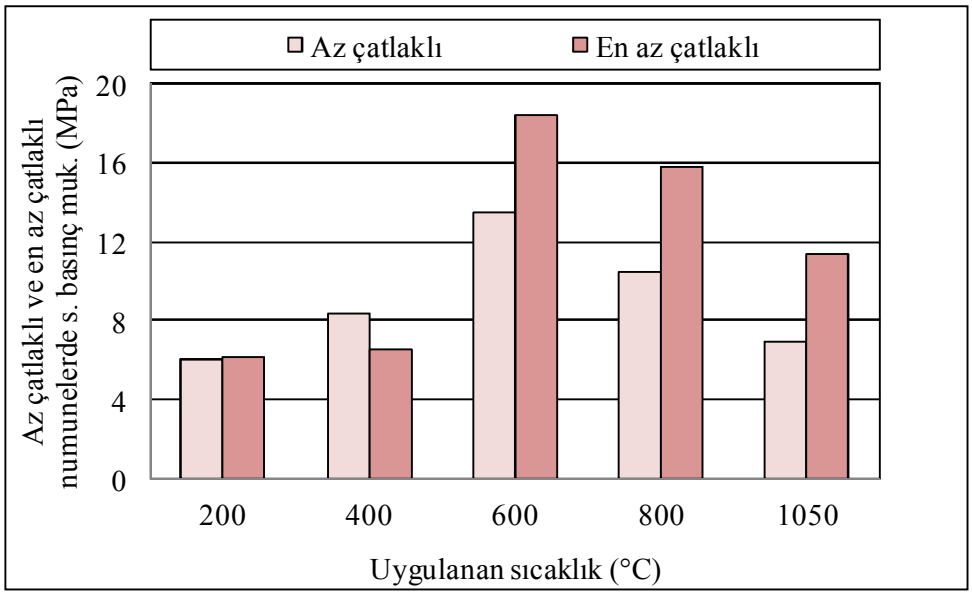
En az çatlaklı numuneler üzerinde 200 °C sıcaklıkta ısıtılan numunenin serbest basınç mukavemeti 6.13 MPa olarak belirlenirken, bu değişken en yüksek 600 °C sıcaklıkta, 18.39 MPa olarak tespit edilmiştir. Sonraki uygulanan iki sıcaklık aşaması için serbest basınç mukavemeti kademeli olarak düşmüş ve 1050 °C'de 11.39 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.21: En az çatlaklı Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.3.12.2. Serbest basınç mukavemetinin az çatlaklı ve en az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler için değişimi

Aşağıdaki şekilden anlaşılacağı üzere, en az çatlaklı numuneler, az çatlaklı numunelere kıyasla sıcaklığın 400 °C haricindeki uygulamalarında daha yüksek mukavemet değerleri göstermiştir.

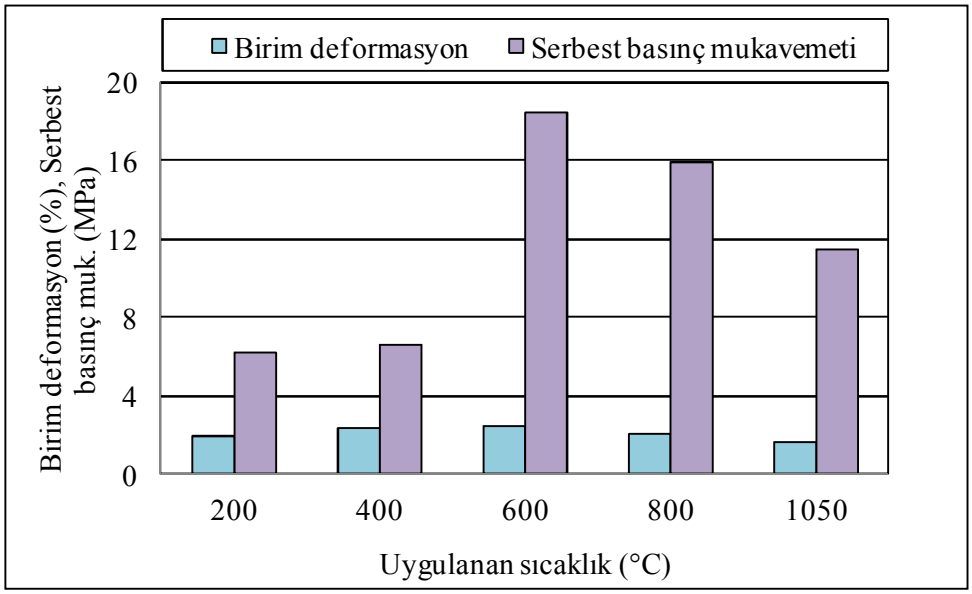


Şekil 5.22: Az çatlaklı ve en az çatlaklı Tekirdağ kili numunelerinde serbest basınç mukavemetinin numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

Burada dikkati çeken önemli bir husus, yüksek sıcaklığın ileri düzeyde olmadığı, 200 ve 400 °C için en az çatlaklı numuneler ile az çatlaklı numuneler arasında belirgin serbest basınç mukavemeti farklılıkları gözlenmemiş olmasıdır. Bu hadiseyi, az ya da en az çatlaklı olarak hazırlanmış numuneler üzerindeki çatlaklılığın, uygulanacak sıcaklık artışı ile daha da artarak ortaya çıkacağı ve böylece serbest basınç mukavemetini önemli ölçüde değiştirebileceği ile açıklamak anlamlı olacaktır.

5.3.12.3. Serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler için birim deformasyonla değişimi

En az çatlaklı Tekirdağ kili numuneleri için birim deformasyonun değişiminde, az çatlaklı Tekirdağ kiline göre benzer değişimler göstererek, 600 °C sıcaklıkta en yüksek ama daha az birim deformasyon yüzdesi meydana geldiği tespit edilmiştir. En az çatlaklı Tekirdağ kili numunesinde bu değişken, artan sıcaklık kademeleri için 600 °C'de belirlenip, %2.39 olarak hesaplanmıştır.

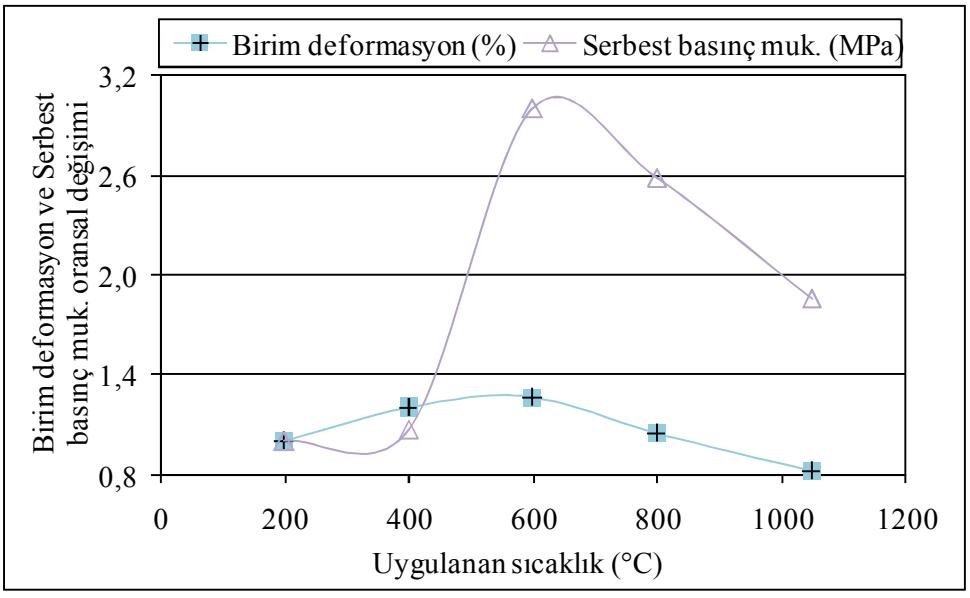


Şekil 5.23: Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı numuneler için birim deformasyonla farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.3.12.4. Serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler için birim deformasyonla oransal değişimi

Numunenin birim deformasyonun oransal değişimi, sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak kademeli bir biçimde, 600 °C'ye kadar artan ve sonrasında yine kademeli olarak azalan bir eğilim belirlenmiştir. Bu değişkenin en yüksek değeri, az çatlaklı olarak hazırlanan numunenin en yüksek birim deformasyon oranının saptandığı 600 °C sıcaklık uygulamasın benzer olarak bu sıcaklıkta en yüksek, 1.26 iken en düşük 1050 °C'de, 0.82 olarak hesaplanmıştır.

Serbest basınç mukavemetinin oransal değişimine bakıldığında ise ilk iki sıcaklık aşaması için yaklaşık aynı kalmıştır. Bu değişken, en yüksek uygulanan sıcaklığın 600 °C olduğu kademe için 3.00 olarak belirlenirken, ardıl artan sıcaklık kademelerinde kademeli olarak düşerek, 1050 °C'de 1.86 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.24: Tekirdağ kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin en az çatlaklı numunelerde birim deformasyonla farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.4. Köseköy Kili Numunesinin Deney Sonuçları

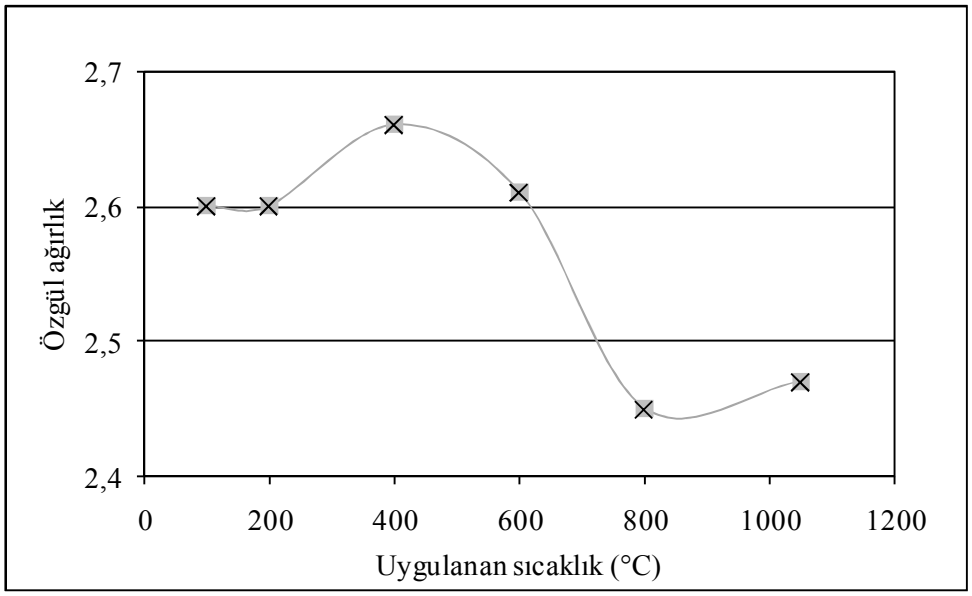
5.4.1. Köseköy kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Tablo 5.3: Köseköy kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Renk	Kahverengi
Özgül ağırlık	2.60
Likit limit (%)	36
Plastik limit (%)	24
Plastisite indisi (%)	12
Kum (2 mm-75μm) (%)	33
Silt (75μm-2μm) (%)	37
Kil (< 2 μm) (%)	30
Aktivite	0.40
Harvard maks. kuru BHA (kN/m^3)	22.0
Harvard optimum su muh. (%)	16.9
Organik madde içeriği (%)	5.64
Birleştirilmiş zemin sınıfı	CL

5.4.2. Özgül ağırlığın değişimi

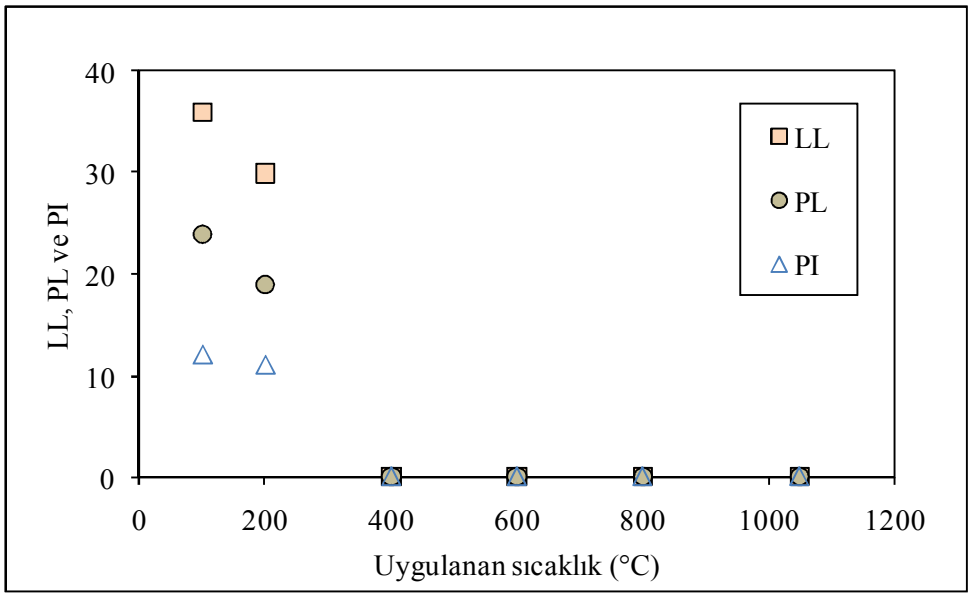
Numunenin özgül ağırlık değerleri, artan sıcaklık uygulamaları neticesinde ilk iki sıcaklık aşaması için değişmeyip, 2.60 olarak belirlenmiştir. Bu değişken, 400 °C sıcaklık kademesinde en yüksek değerine ulaşıp, 2.66 olarak tespit edilmiştir. Sonraki sıcaklık kademesi için hızla azalmış ve 800 °C sıcaklıkta en az 2.45 olarak belirlenmiştir. Son sıcaklık kademesinde ise özgül ağırlık, hafif artış göstererek 2.47 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.25: Köseköy kili numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.4.3. Plastisite özelliklerinin değişimi

Numunenin başlangıçta sırasıyla, 36 ve 24 olan likit ve plastik limit değerleri, 200 °C'de 30 ve 19 olarak belirlenmiştir. 400 °C sıcaklık uygulamasında ise numunenin plastisite özelliğini bütünüyle yitirip, plastik olmayan davranış gösterdiği tespit edilmiştir.



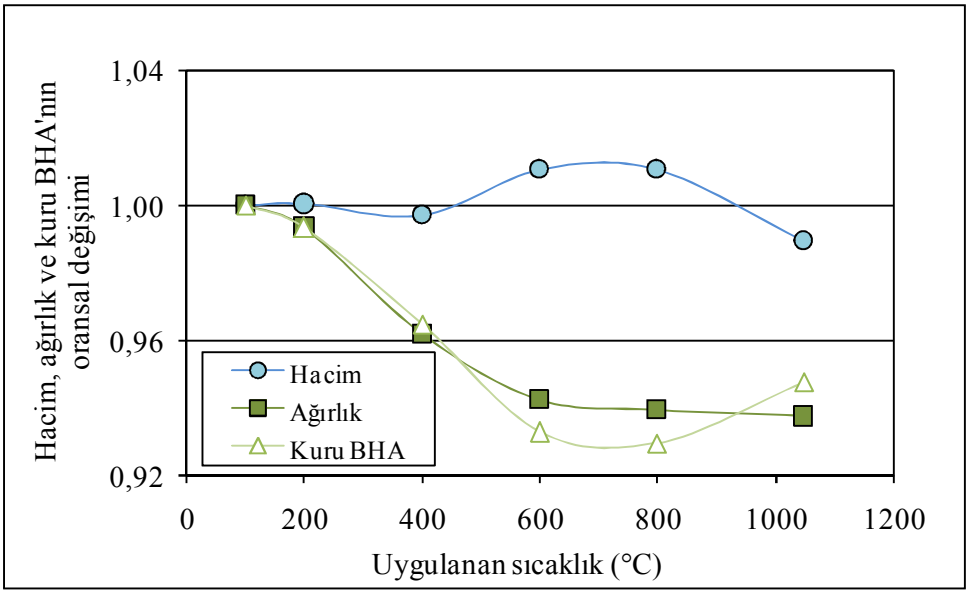
Şekil 5.26: Köseköy kili numunesinde plastisite özelliklerinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.4.4. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi

Numuneye artan sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak, ağırlığının oransal değerinin sürekli azaldığı belirlenmiştir. Bu değişken, sıcaklık kademesinin 600 °C olduğu durum için önemli seviyede düşmüş ve 0.94 olarak hesaplanmıştır. Ardıl artan sıcaklık uygulamalarında bu oransal değerin, küçük oranda azalmaya devam ettiği tespit edilmiştir.

Hacmin oransal değişiminin ise yaklaşık olarak 400 °C'ye kadar sabit kalıp, 600 °C ve 800°C sıcaklıklar için 1.1 olarak belirlenmiştir. Uygulanan son sıcaklık kademesi olan 1050 °C'de ise bu değişken azalım gösterip, 0.99 olduğu tespit edilmiştir.

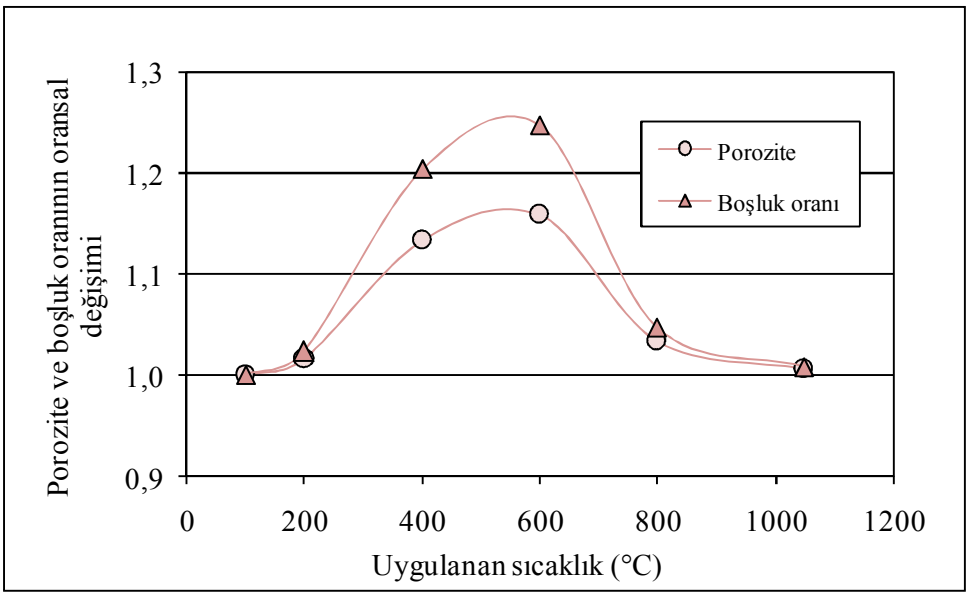
Bu iki değişkene bağlı olarak kuru BHA'nın oransal değişimi, 600 °C sıcaklıkta hızla azalarak 0.93 değerine düşmüştür. Bu değişken, 800 °C sıcaklık kademesi için küçük oranda azalmaya devam etmiş ve son uygulanan sıcaklık kademesinde artarak 0.95 olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 5.27: Köseköy kili numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.4.5. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

Numunede başlangıçta sırayla porozite ve boşluk oranı sırayla, 0.30 ve 0.43 olarak hesaplanmıştır. Bu iki değişkenin oransal değişimleri, uygulanan sıcaklığın 600 °C olduğu kademeye kadar artış göstermiş olup, ardından artan sıcaklık kademeleri için azalım azalmıştır. Bu oransal değişkenler, 600 °C sıcaklığa kadar kademeli olarak artıp, sırayla porozite ve boşluk oranının oransal değerleri 1.16 ve 1.25 olduğu hesaplanmıştır. 800 °C sıcaklıkta bu değişkenler ani olarak düşmüş ve son sıcaklık uygulamasında yaklaşık olarak başlangıç değerine ulaşmıştır.

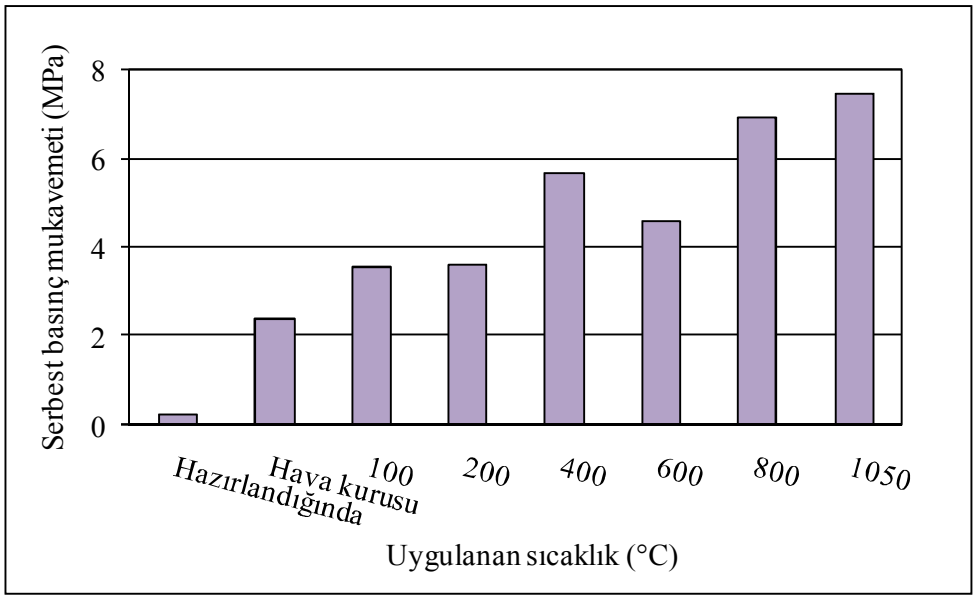


Şekil 5.28: Köseköy kili numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.4.6. Serbest basınç mukavemetinin değişimi

Artan sıcaklıklar uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin 600 °C sıcaklık kademesi hariç, sürekli artış gözlenmiştir. Dolaylı yoldan sıcaklık uygulamasının olmadığı durumda, numunelerin sırayla hazırlandığı ve havada kurutulmuş hâldeki serbest basınç mukavemeti değerleri, 0.22 MPa ve 2.36 MPa olduğu saptanmıştır.

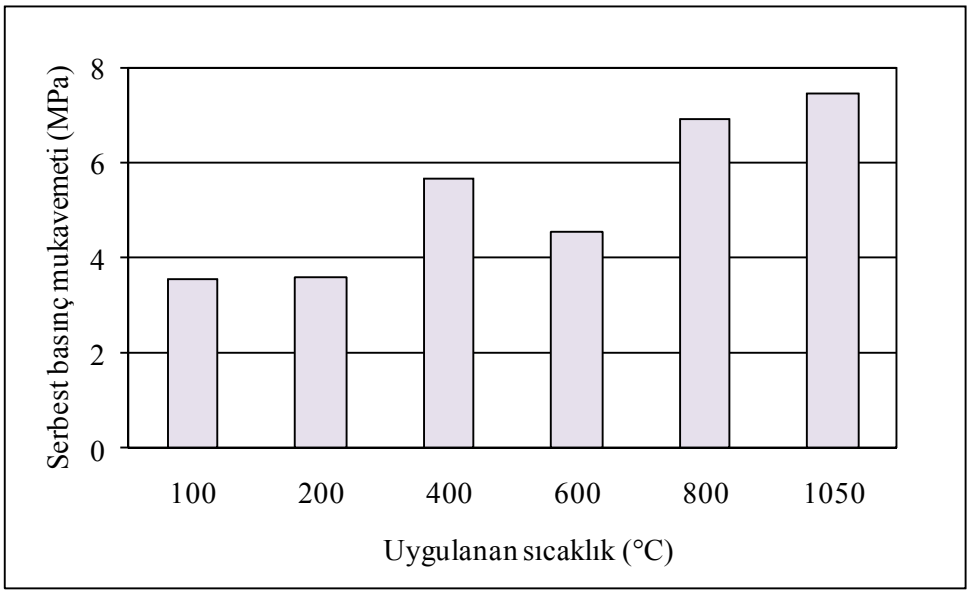
Bu değişken referans sıcaklık uygulamasına kıyasla, 400 °C sıcaklık uygulamasına kadar kademeli olarak artarak 5.15 MPa olarak belirlenirken, 600 °C sıcaklıkta düşüşe geçerek 4.37 MPa olarak tespit edilmiştir. Ardıl artan sıcaklık uygulamaları için sırayla, 800 °C ve 1050 °C'de hızla artarak son sıcaklık kademesinde, 7.23 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.29: Köseköy kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.4.7. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi

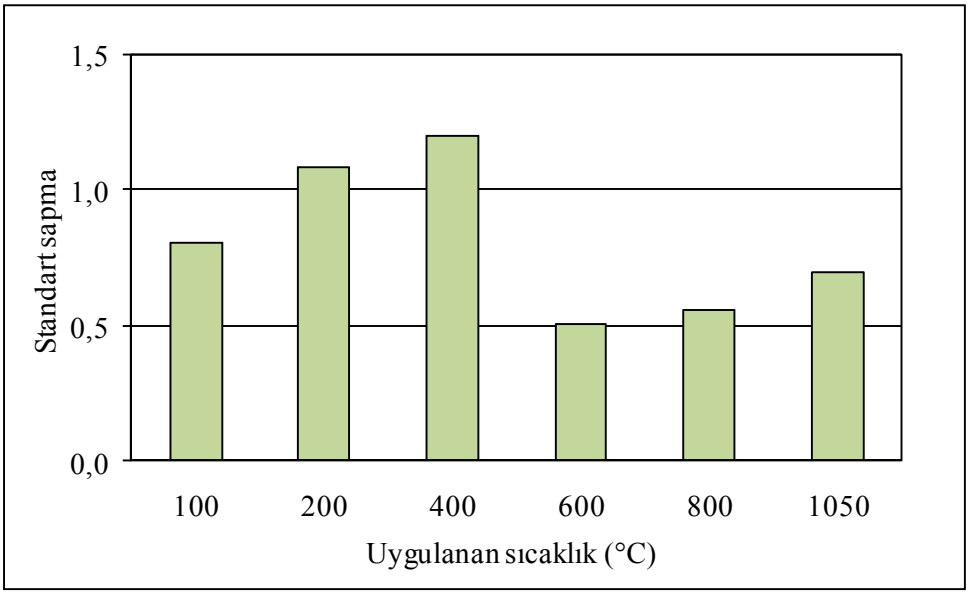
Numenin serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi, uygulanan sıcaklık kademesinin 600 °C olduğu aşama haricinde artan bir eğilim gösterdiği belirlenmiştir. İlk dört sıcaklık kademesi içerisinde en yüksek serbest basınç mukavemeti 400 °C'de gözlenmiş olup, 5.66 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değişken, sonraki artan sıcaklıklar için sırayla, 800 °C ve 1050 °C'de 6.93 MPa ve 7.45 MPa olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.30: Köseköy kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.4.8. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması

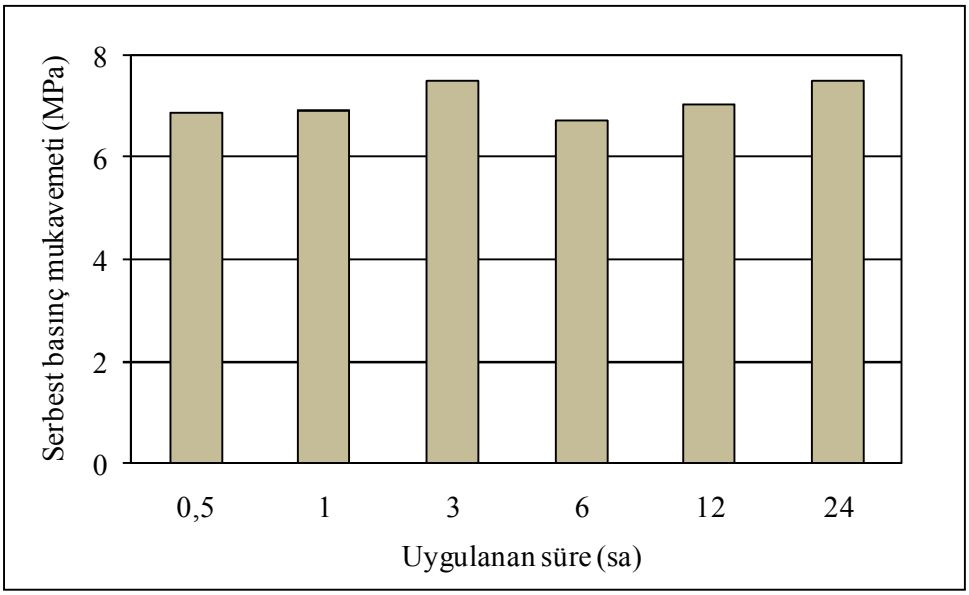
Numune için standart sapma değerleri, ilk üç sıcaklık kademesi için aşamalı olarak artış göstermiş olup, en yüksek 400 °C sıcaklıkta 1.19 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.31: Köseköy kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması

5.4.9. Serbest basınç mukavemetinin belirli bir sıcaklığın farklı uygulama süreleri için değişimi

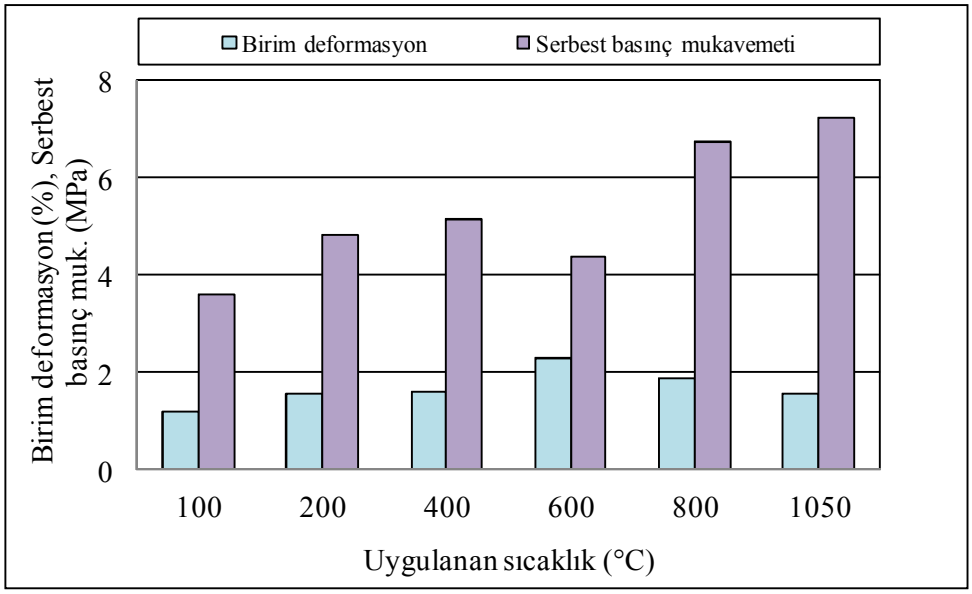
Aşağıdaki şekilden anlaşılacağı üzere, Köseköy kilinin 800 °C sıcaklıkta farklı ısıtma sürelerinde tutulması neticesinde, serbest basınç mukavemetinin değişiminde önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmektedir. Numune, 0.5 saatlik sıcaklıkta tutulması ile 6.88 MPa mukavemet kazanmış olup, en yüksek serbest basınç mukavemetini 3 ve 24 saatlik ısıtma sürelerinde kazanarak, 7.51 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.32: Köseköy kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı ısıtma süreleri etkisinde değişimi

5.4.10. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi

Numunede birim deformasyonun yüzdesel olarak değişimi, artan sıcaklık uygulamaları etkisinde, 600 °C sıcaklığa kadar kademeli olarak artan, sonrasında azalan bir eğilim göstermiştir. Bu değişkenin en yüksek değeri, 600 °C sıcaklıkta meydana gelmiş olup, %2.29 olarak tespit edilmiştir. Ardıl artan sıcaklık kademelerinde ise birim deformasyon sürekli azalarak, 1050 °C'de %1.56 olarak hesaplanmıştır.

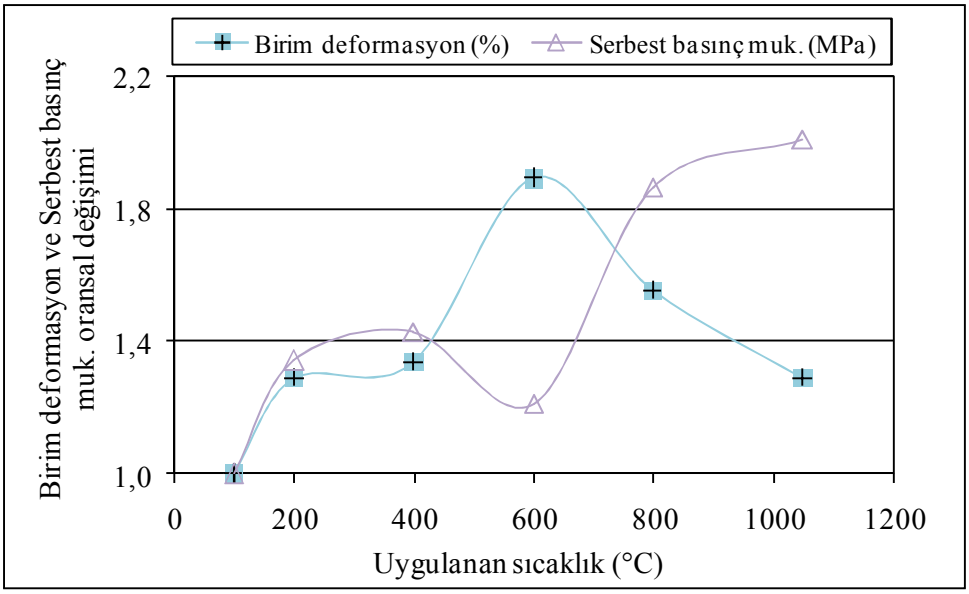


Şekil 5.33: Köseköy kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi

5.4.11. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi

Numunenin birim deformasyonunun oransal değişimi, sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak 600 °C'de yükselmiş, sonrasında hızla azalan bir eğilim göstermiştir. Bu değişken, en yüksek 600 °C sıcaklıkta 1.89 olarak tespit edilmiştir.

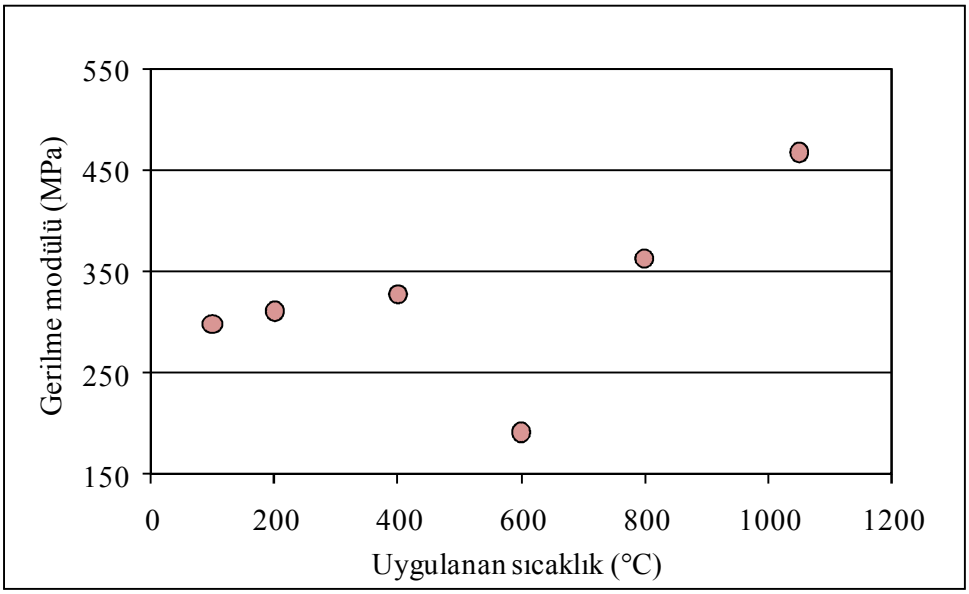
Serbest basınç mukavemetinin oransal değişimine bakıldığında ise artan sıcaklık uygulamaları neticesinde, 600 °C'nin haricinde artan bir eğilim belirlenmiştir. Bu değişken, 600 °C'de 1.21 iken, sırayla 800 °C ve 1050 °C'de 1.87 ve 2.01 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.34: Köseköy kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi

5.4.12. Gerilme modülünün değişimi

Numunede gerilme modülünün değişimi, 600 °C sıcaklık uygulamasının haricindeki kademeler için uygulanan sıcaklığın artışı ile arttığı görülmektedir. Bu değişkenin en düşük değeri, 600 °C'de 191 MPa olarak belirlenirken, en yüksek son sıcaklık uygulamasında, 467 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.35: Köseköy kili numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.5. Yuvacık Kili Numunesinin Deney Sonuçları

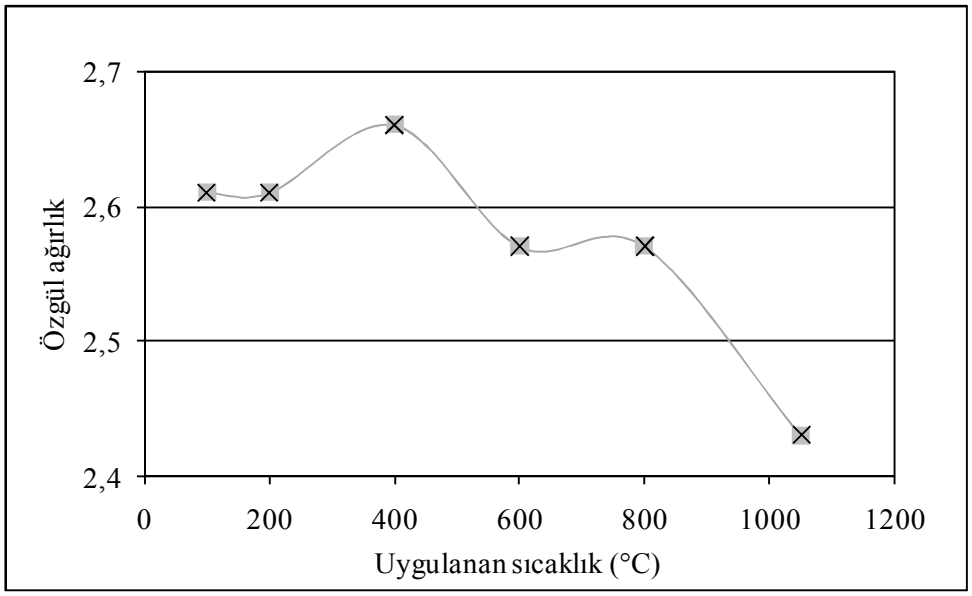
5.5.1. Yuvacık kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Tablo 5.4: Yuvacık kili numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Renk	Kahverengi
Özgül ağırlık	2.61
Likit limit (%)	56
Plastik limit (%)	31
Plastisite indisi (%)	25
Kum (2 mm-75μm) (%)	22
Silt (75μm-2μm) (%)	55
Kil (< 2 μm) (%)	23
Aktivite	1.09
Harvard maks. kuru BHA (kN/m^3)	19.0
Harvard optimum su muh. (%)	24.1
Organik madde içeriği (%)	3.02
Birleştirilmiş zemin sınıfı	CH

5.5.2. Özgül ağırlığın değişimi

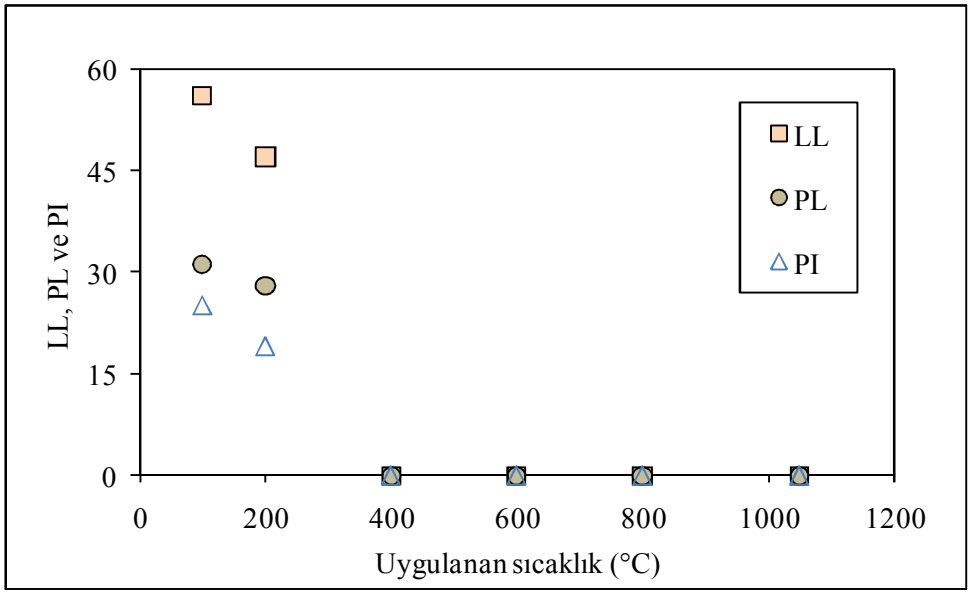
Numunenin özgül ağırlık değerleri, artan sıcaklık uygulamaları neticesinde ilk iki sıcaklık kademesinde sabit kalmış ve 2.61 olarak tespit edilmiştir. Bu değişken, 400 °C sıcaklıkta artarak 2.66 olduğu belirlenirken, 600 ve 800 °C'de düşerek aynı kalmış ve 2.57 olarak belirlenmiştir. Sıcaklık uygulamaları arasında en az olarak özgül ağırlık, 1050 °C'de, 2.43 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.36: Yuvacık kili numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.5.3. Plastisite özelliklerinin değişimi

Numunenin başlangıçta sırasıyla, 56 ve 31 olan likit ve plastik limit değerleri, 200 °C sıcaklıkta 47 ve 28 olarak belirlenmiştir. Numune, 400 °C sıcaklık uygulamasında ise plastisite özelliğini bütünüyle yitirip, plastik olmayan davranış gösterdiği tespit edilmiştir.



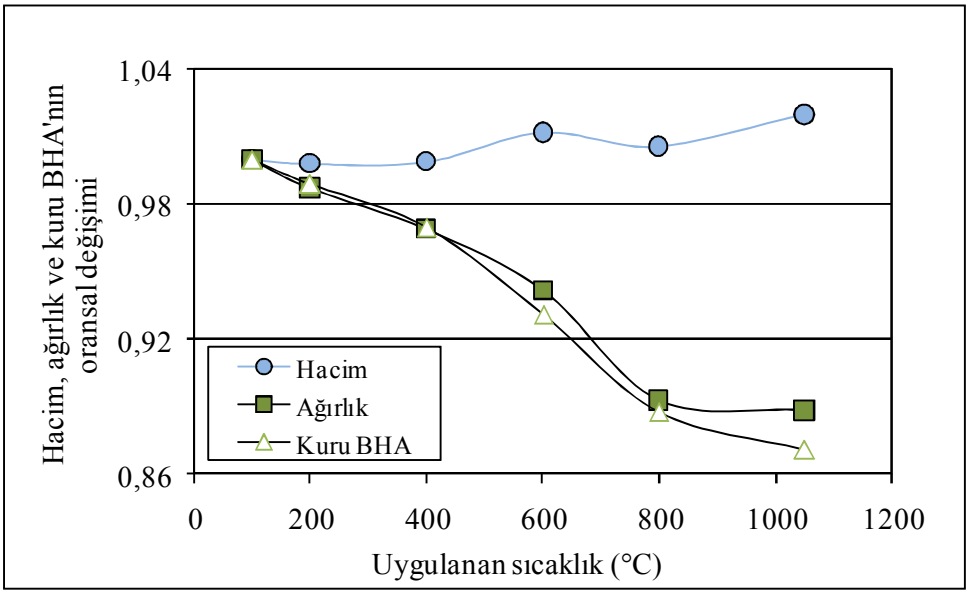
Şekil 5.37: Yuvacık kili numunesinde plastisite özelliklerinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.5.4. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi

Numuneye artan sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak, ağırlığının sürekli azaldığı belirlenmiştir. Ağırlığın oransal değişimi, uygulanan sıcaklığın 800 °C olduğu kademeye kadar hızla düşmüş ve 0.89 olarak hesaplanmıştır. Son sıcaklık kademesinde ise bu değişkende önemli oranda azalım gözlenmemiştir.

Hacmin oransal değişiminin ise artan sıcaklık uygulamaları ile önemli düzeyde değişkenlik göstermediği belirlenmiştir. Bu değişkenin en büyük değeri, en büyük sıcaklık kademesi olan 1050 °C'de, 1.02 olarak tespit edilmiştir.

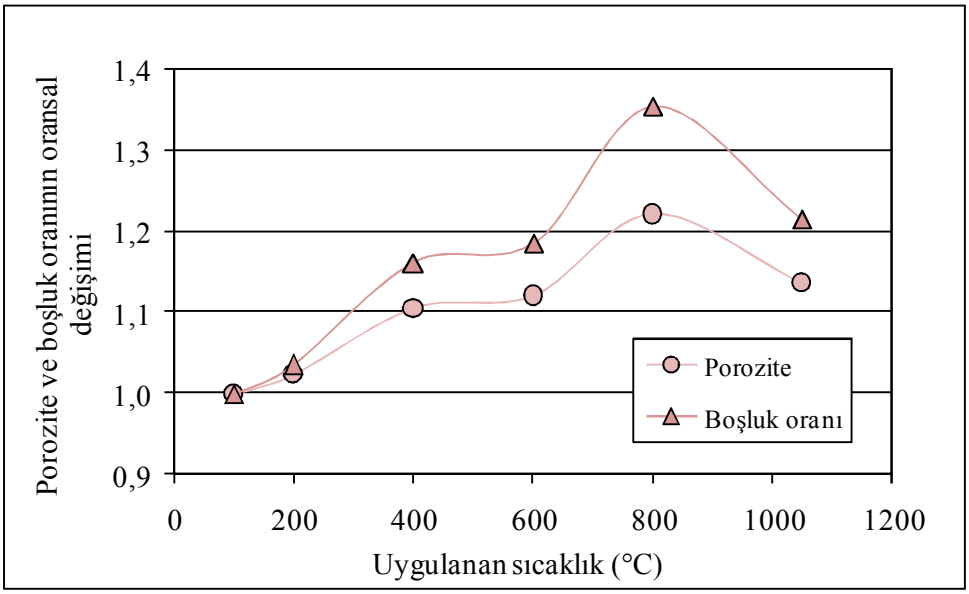
Bu iki değişkene bağlı olarak kuru BHA'nın oransal değişimi kademeli olarak sürekli düşmüştür. Bu değişkenin en küçük değeri, uygulanan sıcaklığın 1050 °C olduğu aşamada belirlenmiş olup, 0.87 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.38: Yuvacık kili numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.5.5. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

Numunede başlangıçta sırayla porozite ve boşluk oranı 0.32 ve 0.46 olarak hesaplanmıştır. Bu iki değişkenin oransal değişimleri, sıcaklığın 400 °C olduğu seviyeye kadar kademeli olarak artmış ve 600 °C sıcaklıkta önemli düzeyde değişmediği saptanmıştır. Sırayla en yüksek porozite ve boşluk oranının oransal değerlerinin belirlendiği 800 °C için bu değişkenler, 1.22 ve 1.35 olarak hesaplanmıştır. Son sıcaklık kademesi için sırayla porozite ve boşluk oranının oransal değerleri hızla azalarak, 1.13 ve 1.21 olduğu tespit edilmiştir.

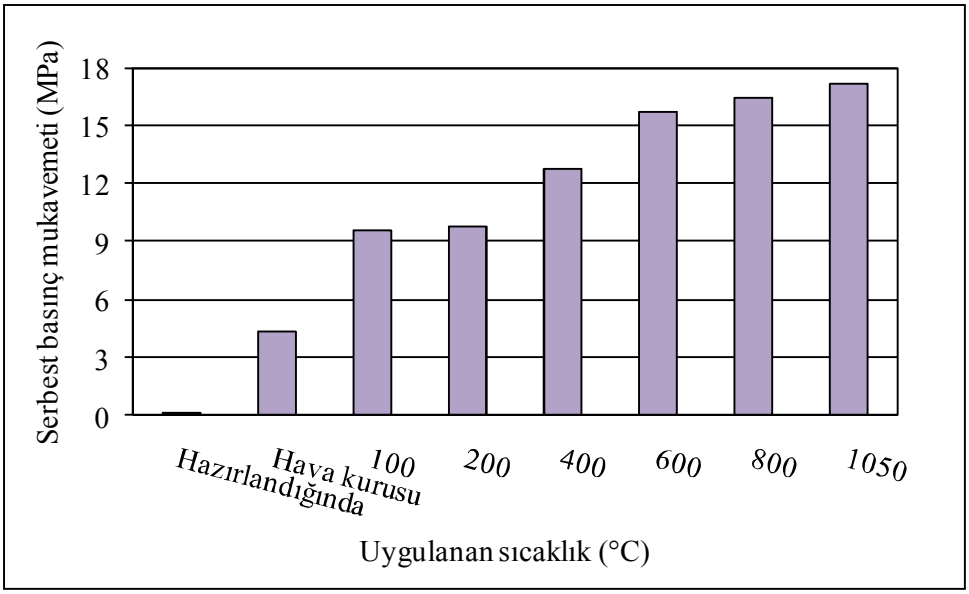


Şekil 5.39: Yuvacık kili numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.5.6. Serbest basınç mukavemetinin değişimi

Artan sıcaklıklar uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin sürekli olarak attığı gözlenmiştir. Dolaylı yoldan sıcaklık uygulamasının olmadığı durumda, numunelerin sırayla hazırlandığı ve havada kurutulmuş hâldeki serbest basınç mukavemeti değerleri, 0.20 MPa ve 4.37 MPa olduğu saptanmıştır.

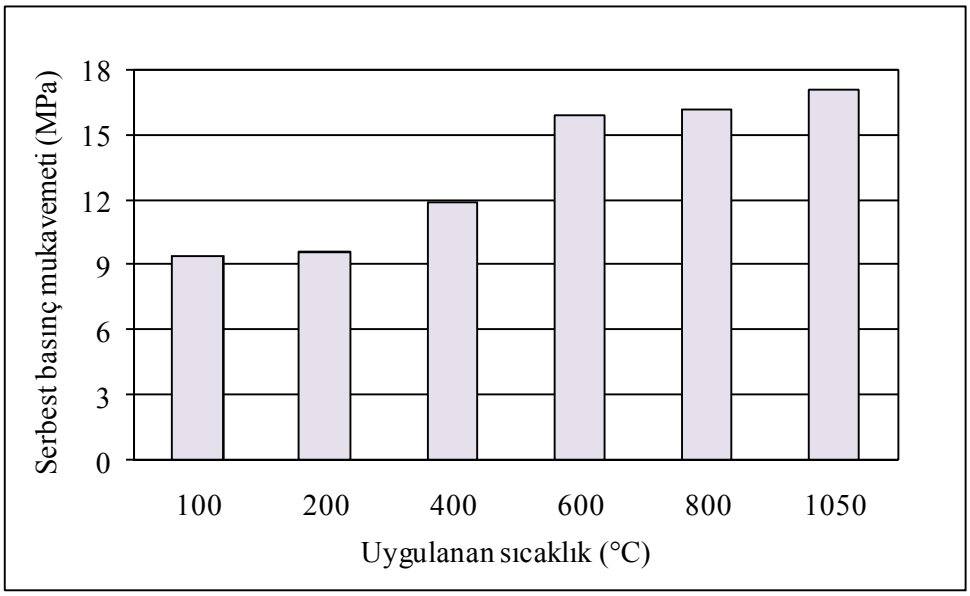
Bu değişken referans sıcaklık uygulamasına kıyasla, 200 °C sıcaklıkta fark edilebilir bir artış göstermemiş ve 9.81 MPa olarak belirlenmiştir. Ardıl artan sıcaklık uygulamaları için ise bu değişken aşamalı olarak artarak, en yüksek serbest basınç mukavemeti 1050 °C'de 17.16 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.40: Yuvacık kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.5.7. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi

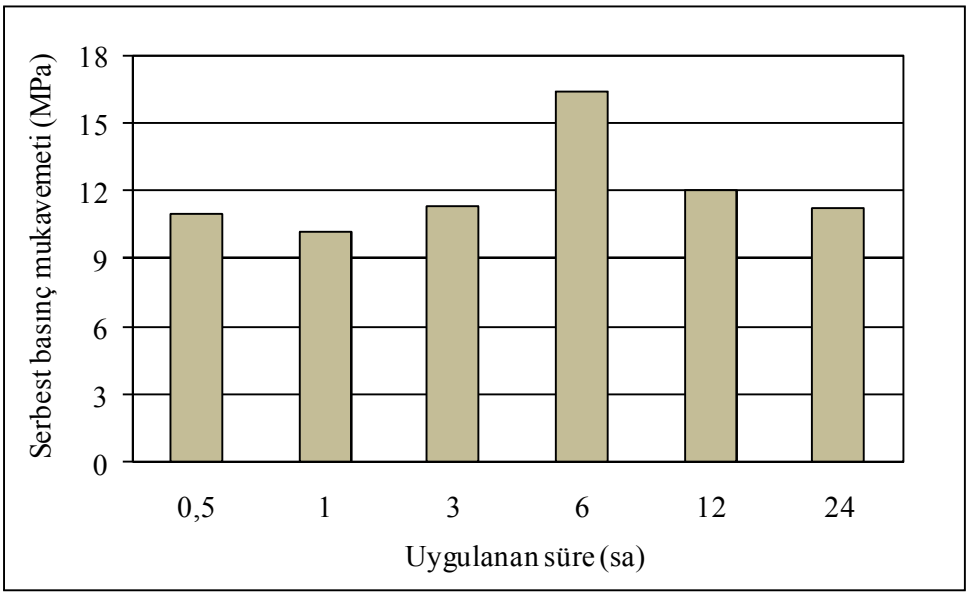
Numunenin serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi, uygulanan sıcaklık kademesinin 100 °C ve 200 °C olduğu kademelerde yaklaşık aynı kalmış ve sonraki sıcaklık uygulamaları için sürekli olarak artış göstermiştir. Bu değişkenin en yüksek değeri, 1050 °C'de 17.08 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.41: Yuvacık kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.5.8. Serbest basınç mukavemetinin belirli bir sıcaklığın farklı uygulama süreleri için değişimi

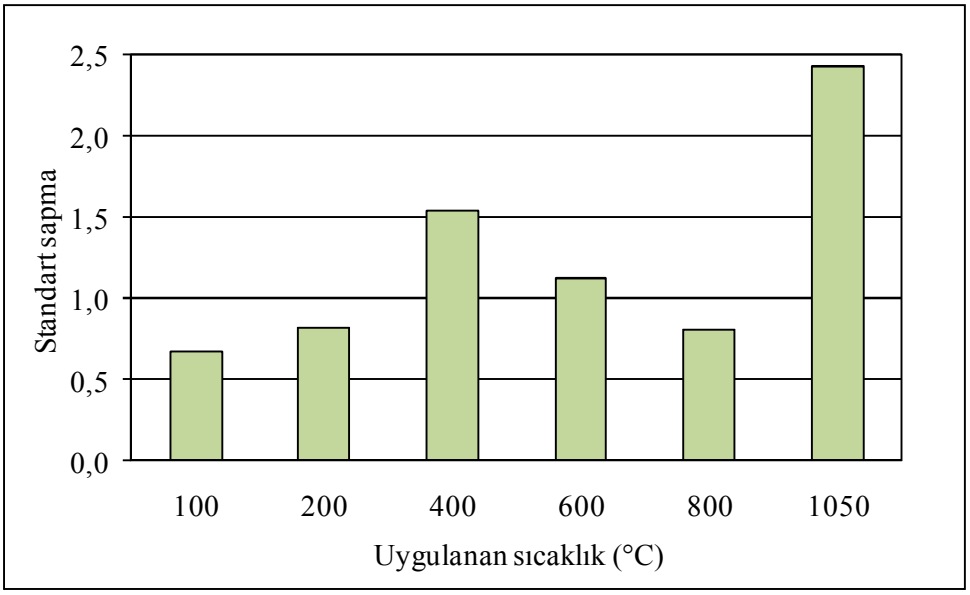
Aşağıdaki şekilden anlaşılacağı üzere, Yuvacık kilinin 800 °C sıcaklıkta farklı ısıtma sürelerinde tutulması neticesinde, serbest basınç mukavemeti 6 saatlik ısıtma süresinin dışındaki süreler için yaklaşık olarak aynı kaldığı gözlenmektedir. Numune, 0.5 saat sıcaklıkta tutulması ile 10.96 MPa mukavemet kazanmış olup, en yüksek serbest basınç mukavemetini 6 saatlik ısıtma süresinde kazanarak, 16.41 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.42: Yuvacık kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı ısıtma süreleri etkisinde değişimi

5.5.9. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması

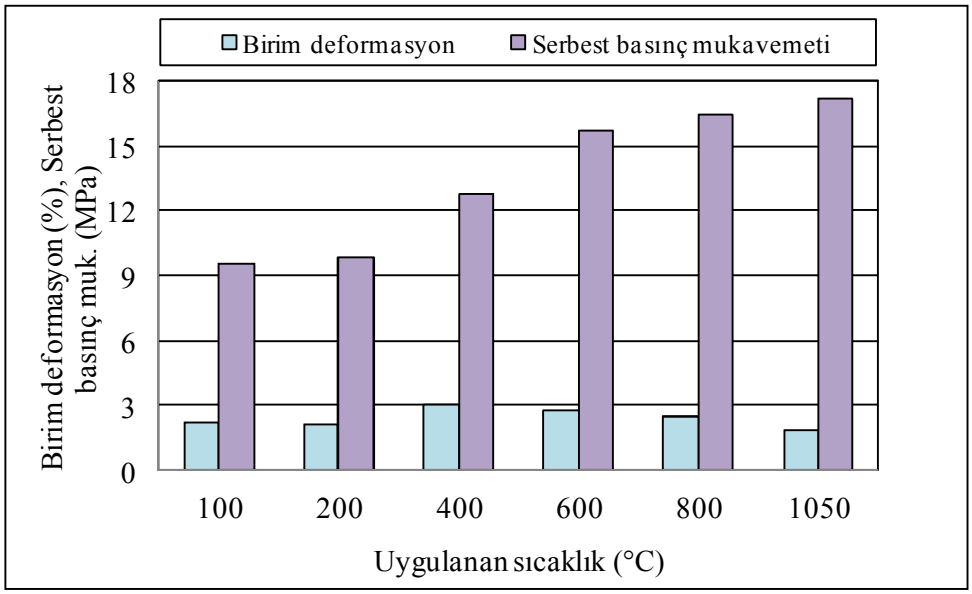
Numunenin standart sapma değerleri, uygulanan sıcaklığın 400 °C ve 1050 °C olduğu kademeler için diğer sıcaklık uygulamalarına nazaran yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu değişken, sırayla sıcaklığın 400 °C ve 1050 °C olduğu aşamalarda, 1.54 MPa ve 2.43 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.43: Yuvacık kili numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması

5.5.10. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi

Numunede birim deformasyonun yüzdesel olarak değişimi, artan sıcaklık uygulamaları etkisinde, 400 °C'ye kadar yükselen ve sonraki uygulamalar için kademeli olarak azalan bir eğilim göstermiştir. Bu değişken, 400 °C sıcaklıkta %3.02 olarak hesaplanmıştır.

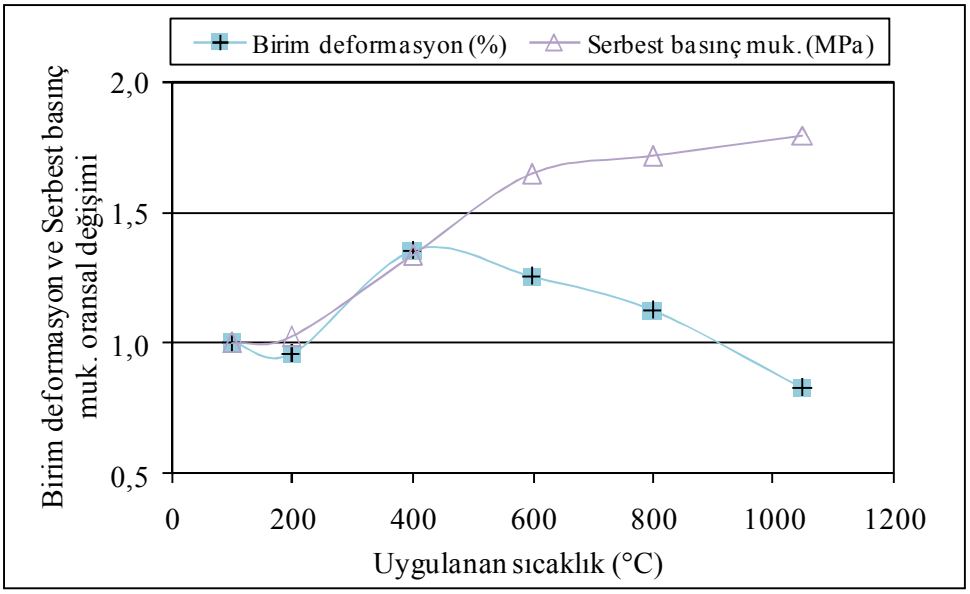


Şekil 5.44: Yuvacık kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi

5.5.11. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi

Numunenin birim deformasyonunun oransal değişimi, sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak, 400 °C'de en yüksek 1.35 olarak belirlenirken, ardıl artan sıcaklık uygulamaları için kademeli olarak düşerek, son sıcaklık kademesinde 0.83 olarak tespit edilmiştir.

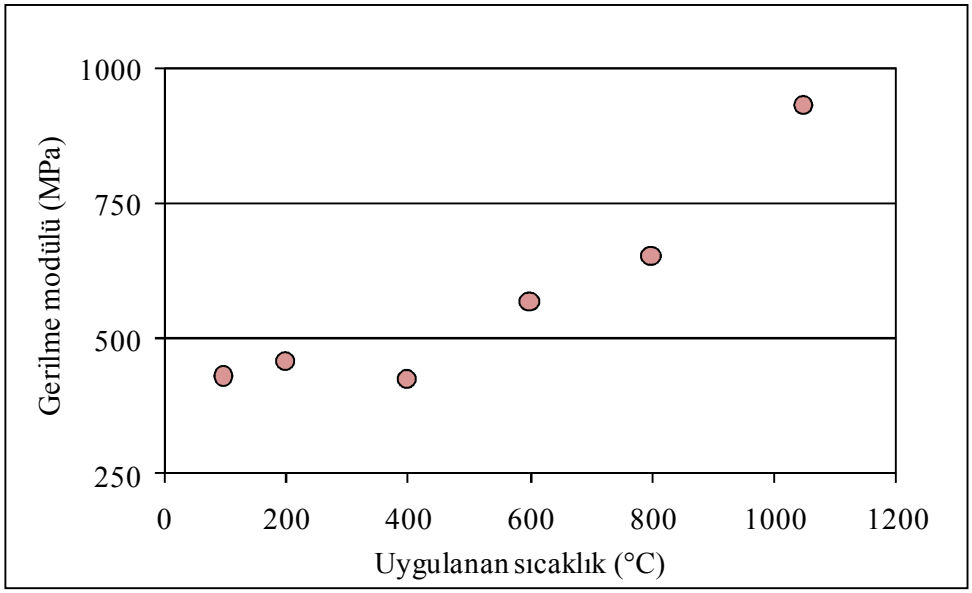
Serbest basınç mukavemetinin oransal değişimine bakıldığında ise artan sıcaklık uygulamaları neticesinde, sürekli arttığı belirlenmiştir. Bu değişken, 200 °C için hafifçe artarken, sonraki uygulanan sıcaklıklarda hızlanarak 1050 °C'de en yüksek, 1.35 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.45: Yuvacık kili numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi

5.5.12. Gerilme modülünün değişimi

Numunede gerilme modülünün değişimi, 400 °C sıcaklık uygulamasının haricindeki kademeler için sıcaklığın artışı ile artan bir eğilim göstermiştir. Bu değişken, 100 °C sıcaklık uygulamasında 430 MPa olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık uygulamalarının sırayla 600 °C, 800 °C ve 1050 °C olduğu aşamalarda, gerilme modülü 568 MPa, 653 MPa ve 931 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.46: Yuvacık kili numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.6. Bentonit Kili Numunesinin Deney Sonuçları

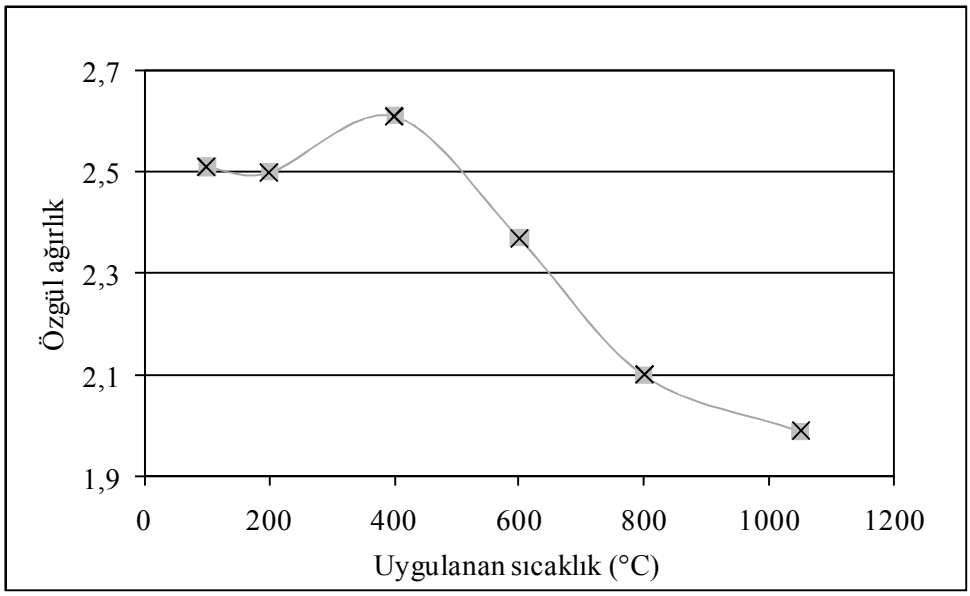
5.6.1. Bentonit numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Tablo 5.5: Bentonit numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Renk	Yeşil
Özgül ağırlık	2.51
Likit limit (%)	304
Plastik limit (%)	70
Plastisite indisi (%)	234
Kum (2 mm-75μm) (%)	0
Silt (75μm-2μm) (%)	27
Kil (< 2 μm) (%)	73
Aktivite	3.20
Harvard maks. kuru BHA (kN/m^3)	13.9
Harvard optimum su muh. (%)	61.2
Organik madde içeriği (%)	0.25
Birleştirilmiş zemin sınıfı	CH

5.6.2. Özgül ağırlığın değişimi

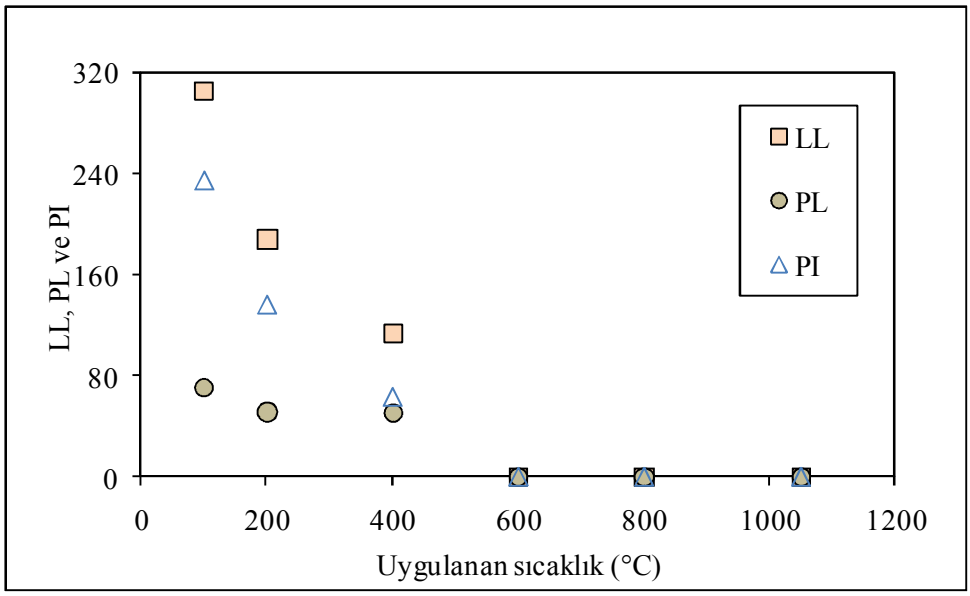
Numunenin özgül ağırlık değerleri, artan sıcaklık uygulamaları neticesinde başlangıçta 2.51 olarak belirlenirken, 200 °C'de önemli düzeyde değişmeyip, 2.50 olarak tespit edilmiştir. Uygulanan sıcaklık kademesinin, 400 °C olduğu aşamada bu değişkenin en yüksek değeri 2.61 iken, artan sıcaklık uygulamalarında sürekli düşerek 1050 °C'de en düşük, 1.99 olarak tespit belirlenmiştir.



Şekil 5.47: Bentonit numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.6.3. Plastisite özelliklerinin değişimi

Numunenin başlangıçta sırasıyla, 304 ve 70 olan likit ve plastik limit değerleri, 200 °C sıcaklıkta 187 ve 51, 400 °C'de 113 ve 50 olarak belirlenmiştir. 600 °C sıcaklık uygulamasında ise, numunenin plastisite özelliğini bütünüyle yitirip, plastik olmayan davranış gösterdiği tespit edilmiştir.



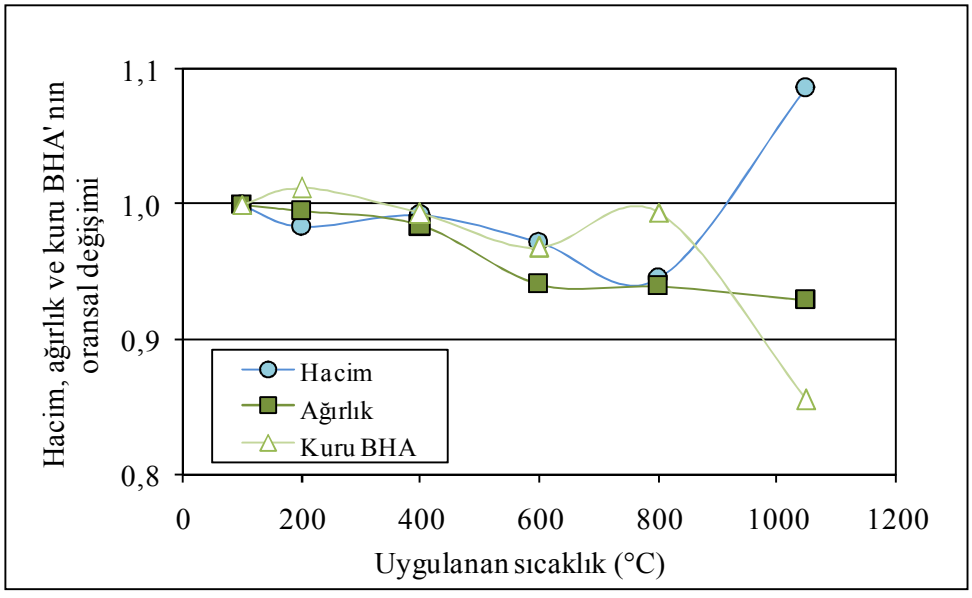
Şekil 5.48: Bentonit numunesinde plastisite özelliklerinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.6.4. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi

Numuneye artan sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak, ağırlığının oransal değerinin sürekli azaldığı belirlenmiştir. Bu değişken, ilk üç uygulanan sıcaklık kademesine nazaran 600 °C'de belirgin bir şekilde düşerek, 0.94 olarak hesaplanmıştır. Sonraki artan sıcaklık kademelerinde, bu azalış hafif oranda devam etmiş ve son sıcaklık uygulamasında, 0.93 olarak hesaplanmıştır.

Hacmin oransal değişiminin ise artan sıcaklık uygulamaları için 800 °C'ye kadar düştüğü, sonraki sıcaklık uygulaması için ise ani olarak arttığı belirlenmiştir. Bu değişken 800 °C sıcaklıkta, 0.94 olarak belirlenirken, 1050 °C'de hızla artmış ve 1.09 olduğu tespit edilmiştir.

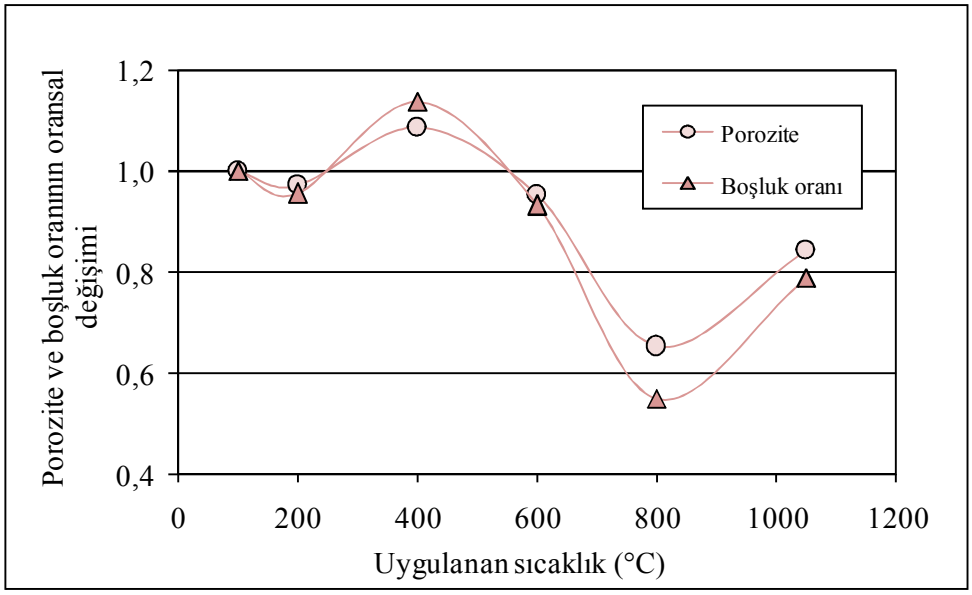
Bu iki değişkene bağlı olarak kuru BHA'nın oransal değişimi, uygulanan sıcaklığın 800 °C olduğu kademede yaklaşık olarak başlangıç oranına gelmiştir. Son sıcaklık kademesinde ise bu değişken hızla düşerek, 0.86 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.49: Bentonit numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.6.5. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

Numunede başlangıçta sırayla porozite ve boşluk oranı 0.35 ve 0.53 olarak hesaplanmıştır. Bu iki değişkenin oransal değişimleri, uygulanan sıcaklığın 200 °C olduğu kademe için yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Sırayla porozite ve boşluk oranı 400 °C'de artış göstermiş ve oransal olarak en yüksek, 1.08 ve 1.14 olduğu tespit edilmiştir. Ardıl artan sıcaklık kademeleri için hızla düşerek, 800 °C'de sırayla porozite ve boşluk oranının oransal olarak, 0.65 ve 0.55 olduğu hesaplanmıştır. Son uygulanan sıcaklık kademesinde ise sırayla porozite ve boşluk oranı değişkenleri oransal olarak, 0.84 ve 0.79 değerine yükselmiştir.

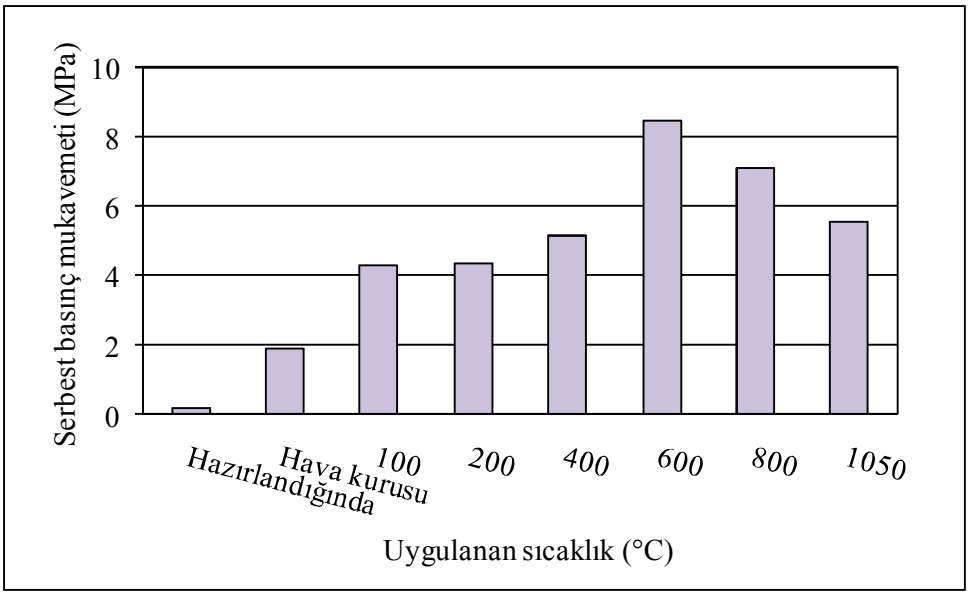


Şekil 5.50: Bentonit numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.6.6. Serbest basınç mukavemetinin değişimi

Artan sıcaklıklar uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemetinin 600 °C'ye kadar kademeli olarak artıp, sonraki sıcaklık uygulamalarında kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir. Dolaylı yoldan sıcaklık uygulamasının olmadığı durumda, numunelerin sırayla hazırlandığı ve havada kurutulmuş hâldeki serbest basınç mukavemeti değerleri, 071 MPa ve 1.91 MPa olduğu saptanmıştır.

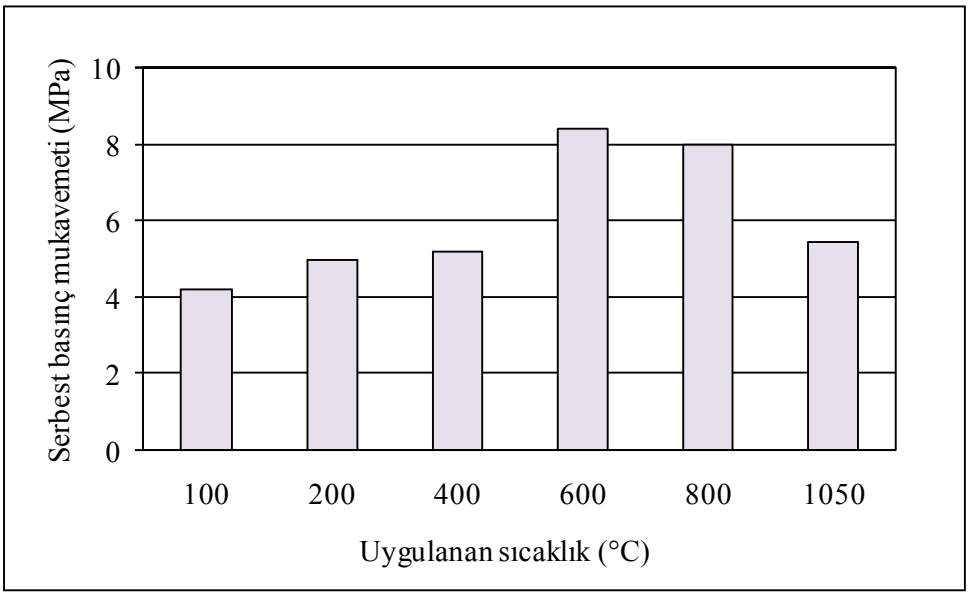
Bu değişken referans sıcaklık uygulamasına kıyasla, 200 °C sıcaklık için fark edilebilir oranda değişmemiş ve 4.32 MPa olarak belirlenmiştir. Uygulanan sıcaklığın 600 °C olduğu kademede, en yüksek serbest basınç mukavemeti, 8.44 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu değişken ardıl artan iki sıcaklık kademesi için sırayla, 800 °C ve 1050 °C için 7.09 MPa ve 5.53 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.51: Bentonit numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.6.7. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi

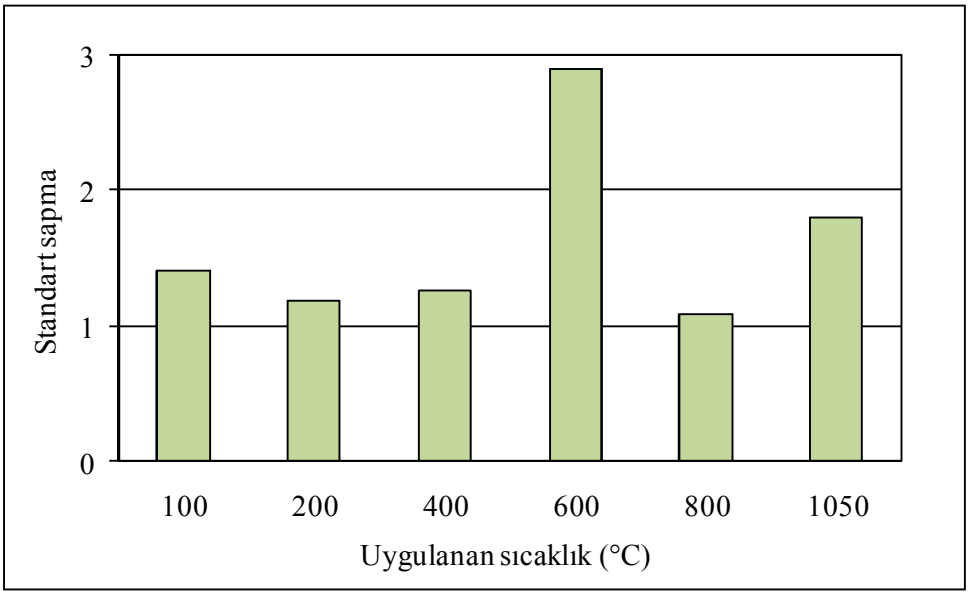
Numenin serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi, uygulanan sıcaklık kademesinin ilk üç aşamasında yaklaşık aynı kalmış ve 400 °C'de 5.16 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu değişken, 600 °C sıcaklıkta fark edilebilir oranda artış göstererek 8.38 MPa olarak hesaplanmıştır. Sonraki iki sıcaklık aşaması için serbest basınç mukavemeti sırayla, 800 °C ve 1050 °C'de kademeli olarak azalarak, 7.98 MPa ve 5.44 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.52: Bentonit numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.6.8. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması

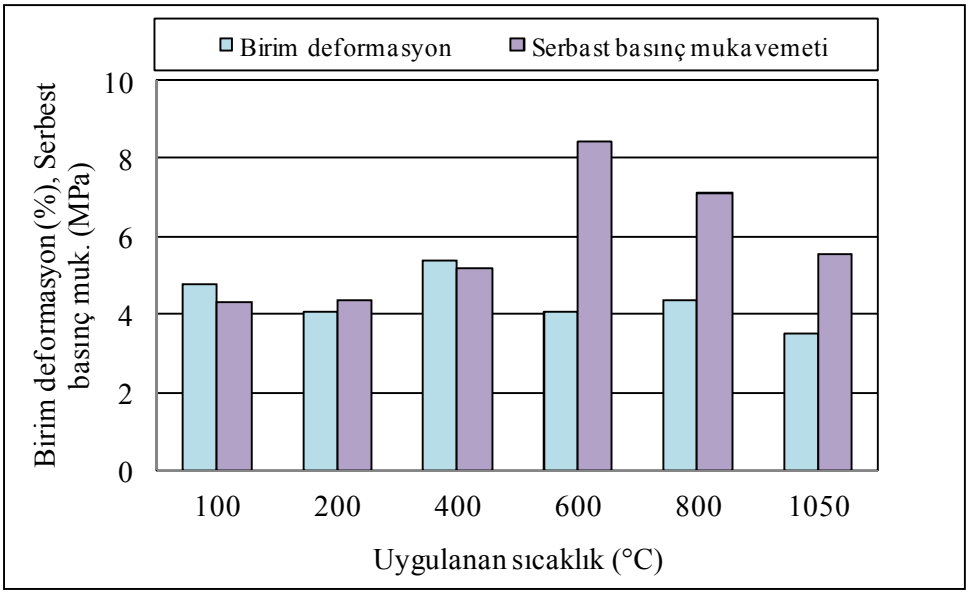
Numunenin standart sapma değerleri, 600 °C sıcaklık uygulamasının dışındaki sıcaklık uygulamalarında yaklaşık aynı olduğu tespit edilmiştir. Bu değişken, en yüksek 600 °C'de 2.90 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.53: Bentonit numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması

5.6.9. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi

Numunede birim deformasyonunun yüzdesel olarak değişimi, artan sıcaklık uygulamaları etkisinde düzenli bir değişim göstermemiştir. Bu değişken, en yüksek olarak sıcaklığın 400 °C olduğu kademede meydana gelip %5.37 iken, en düşük değeri 1050 °C sıcaklıkta %3.51 olarak hesaplanmıştır.

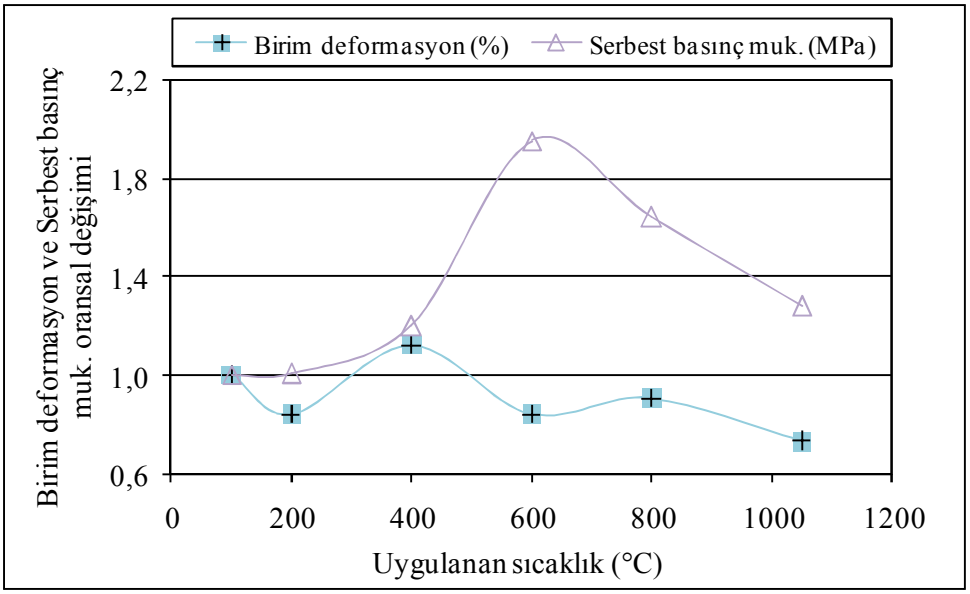


Şekil 5.54: Bentonit numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi

5.6.10. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi

Numunenin birim deformasyonunun oransal değişiminde, sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak düzenli bir değişim tespit edilmemiştir. Bu değişkenin en düşük değeri, uygulanan sıcaklığın 200 °C ve 600 °C olduğu kademeler için 0.84 olarak belirlenirken, en yüksek 400 °C'de, 1.12 olarak hesaplanmıştır.

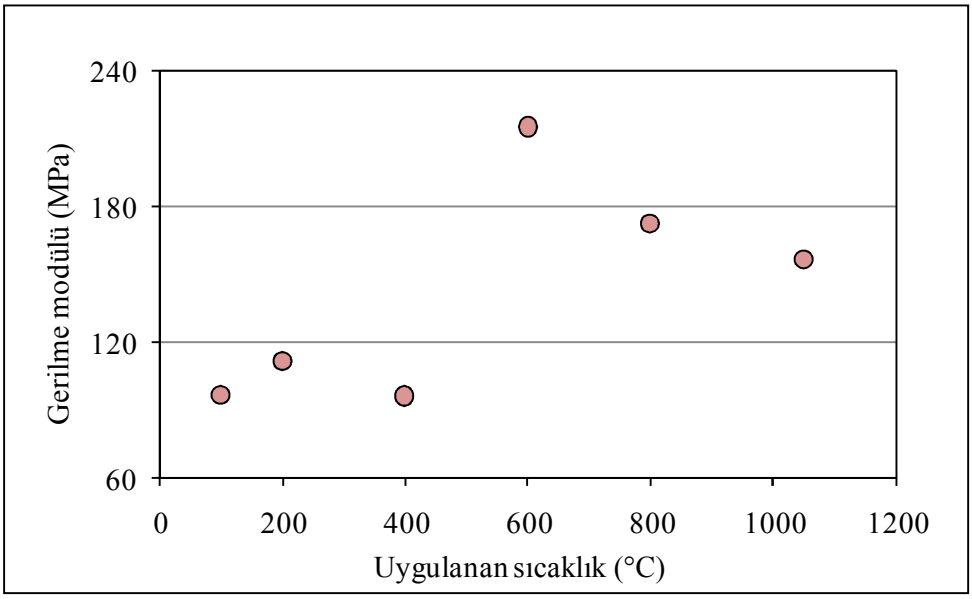
Serbest basınç mukavemetinin oransal değişimine bakıldığında ise 600 °C sıcaklık kademesine kadar sürekli artarak en yüksek, 1.95 olarak tespit edilmiştir. Sonraki artan sıcaklık kademeleri için bu değişken kademeli olarak azalmış ve 1050 °C'de 1.28 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.55: Bentonit numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi

5.6.11. Gerilme modülünün değişimi

Numunede gerilme modülünün değişimi, ilk üç sıcaklık kademesi için önemli düzeyde farklılaşmadığı belirlenmiş ve en düşük 400 °C sıcaklıkta, 96 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değişkenin en yüksek değeri, uygulanan sıcaklığın 600 °C olduğu kademede, 215 MPa olarak hesaplanmıştır. Sırayla artan sıcaklık kademeleri olan 800 °C ve 1050 °C için bu değişken azalarak, 172 MPa ve 156 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.56: Bentonit numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.7. Killi Kum Numunesinin Deney Sonuçları

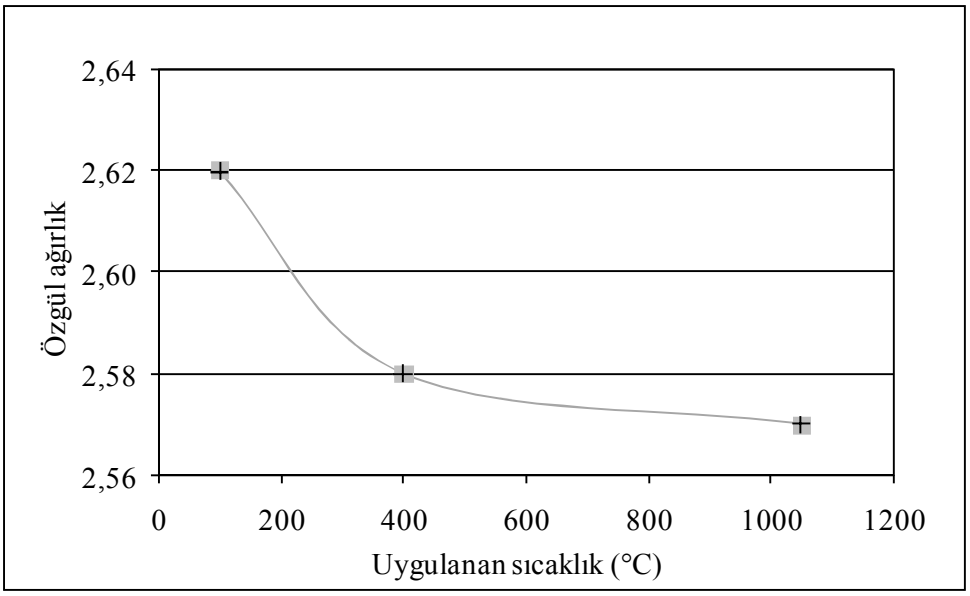
5.7.1. Killi kum numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Tablo 5.6: Killi kum numunesinin doğal hâldeki zemin özellikleri

Renk	Açık yeşil
Özgül ağırlık	2.62
Likit limit (%)	-
Plastik limit (%)	-
Plastisite indisi (%)	NP
Kum (2 mm-75μm) (%)	90
Silt (75μm-2μm) (%)	2.7
Kil (< 2 μm) (%)	7.3
Aktivite	-
Harvard maks. kuru BHA (kN/m^3)	17.4
Harvard optimum su muh. (%)	11.41
Organik madde içeriği (%)	0.18
Birleştirilmiş zemin sınıfı	SC

5.7.2. Özgül ağırlığın değişimi

Numunenin özgül ağırlık değerleri, artan sıcaklık uygulamaları neticesinde azalan yönde eğilim göstermiştir. Bu değişken, başlangıçta, 2.62 iken, sırayla 400 °C ve 1050 °C sıcaklıklarda 2.58 ve 2.57 olarak tespit edilmiştir.



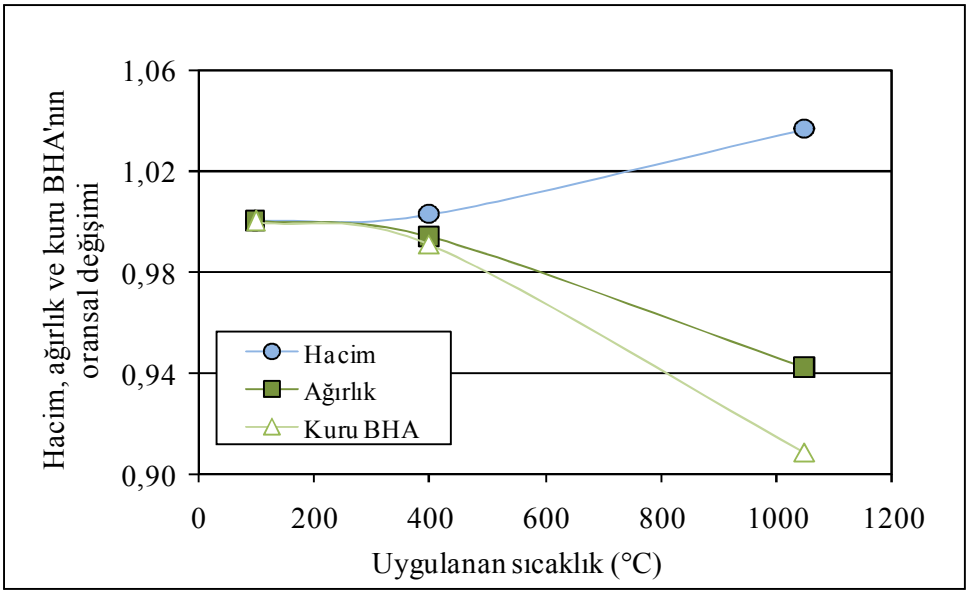
Şekil 5.57: Killi kum numunesinde özgül ağırlığın farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.7.3. Ağırlık, hacim ve kuru birim hacim ağırlığın oransal değişimi

Numuneye artan sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak, ağırlığının oransal değerinin sürekli azaldığı belirlenmiştir. Bu değişken, uygulanan sıcaklığın 400 °C olduğu kademe için önemli düzeyde azalmamış olup, 1050 °C'de hızla azalarak, 0.94 olarak hesaplanmıştır.

Hacmin oransal değişiminin ise artan sıcaklık uygulamaları için sürekli artarak, sıcaklığın 1050 °C olduğu kademede, 1.04 olduğu tespit edilmiştir.

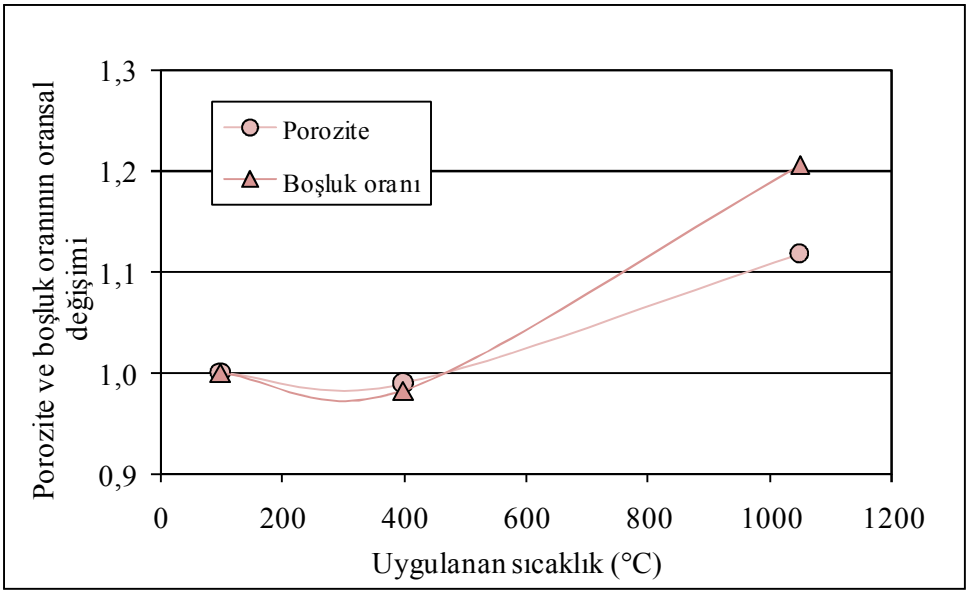
Bu iki değişkene bağlı olarak kuru BHA'nın oransal değişimi, uygulanan sıcaklık etkisinde sürekli düşmüş ve 1050 °C'de, 0.91 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.58: Killi kum numunesinde ağırlık, hacim ve kuru BHA'nın farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.7.4. Porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

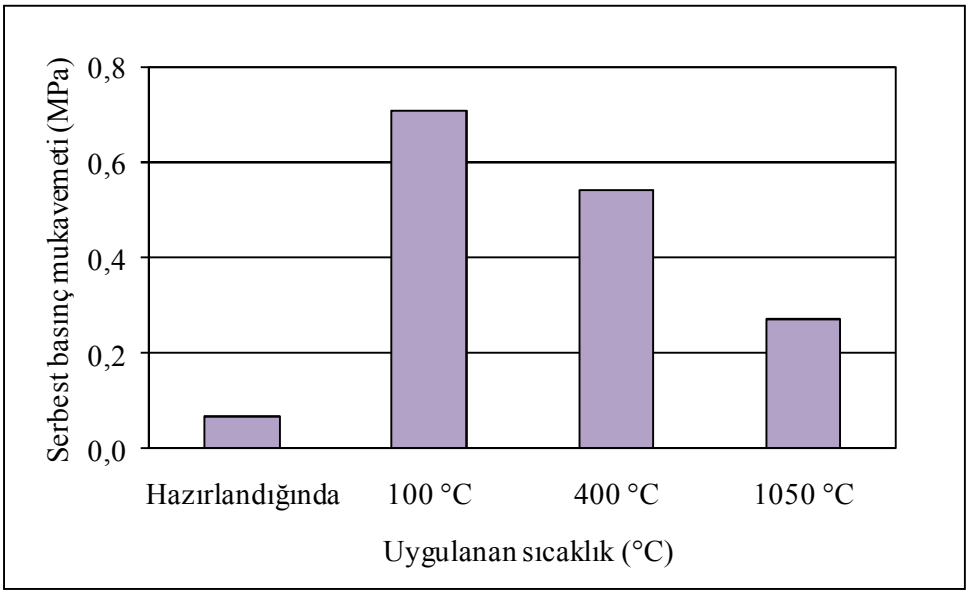
Numunede başlangıçta sırayla porozite ve boşluk oranı 0.38 ve 0.62 olarak hesaplanmıştır. Bu değişkenlerin oransal değişimleri, uygulanan sıcaklığın 400 °C olduğu aşamada yaklaşık aynı kalmıştır. Son sıcaklık uygulaması olan 1050 °C için sırayla porozite ve boşluk oranının oransal değerleri hızla artarak, 1.12 ve 1.21 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.59: Killi kum numunesinde porozite ve boşluk oranının farklı sıcaklıklar etkisinde oransal değişimi

5.7.5. Serbest basınç mukavemetinin değişimi

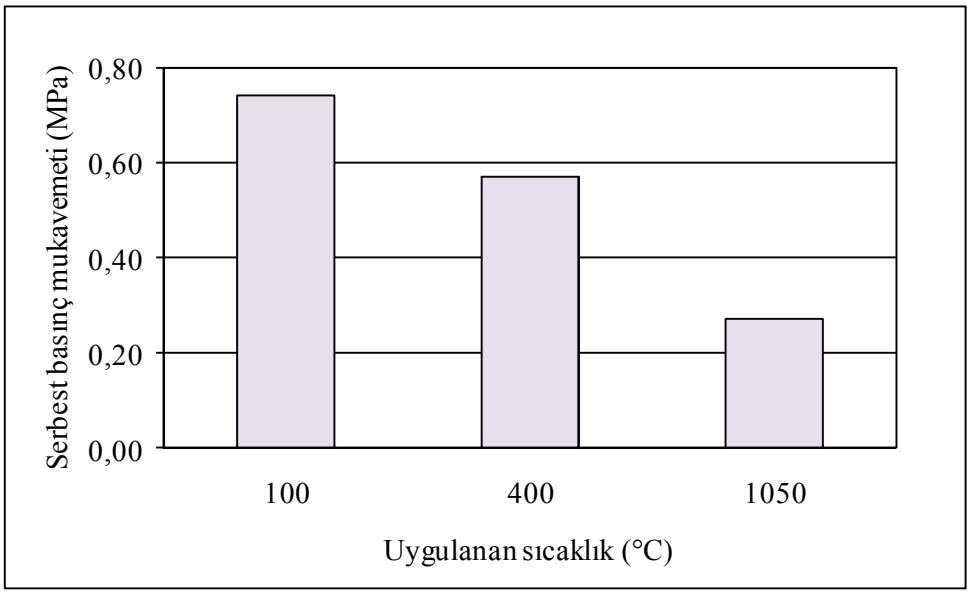
Artan sıcaklıklar uygulanmış numunenin serbest basınç mukavemeti, sürekli azalan eğilim göstermiştir. Bu değişkenin en yüksek değeri, referans sıcaklık uygulamasında 0.71 MPa olarak bulunurken, sırayla artan 400 °C ve 1050 °C sıcaklıklarda 0.54 MPa ve 0.27 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.60: Killi kum numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.7.6. Serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi

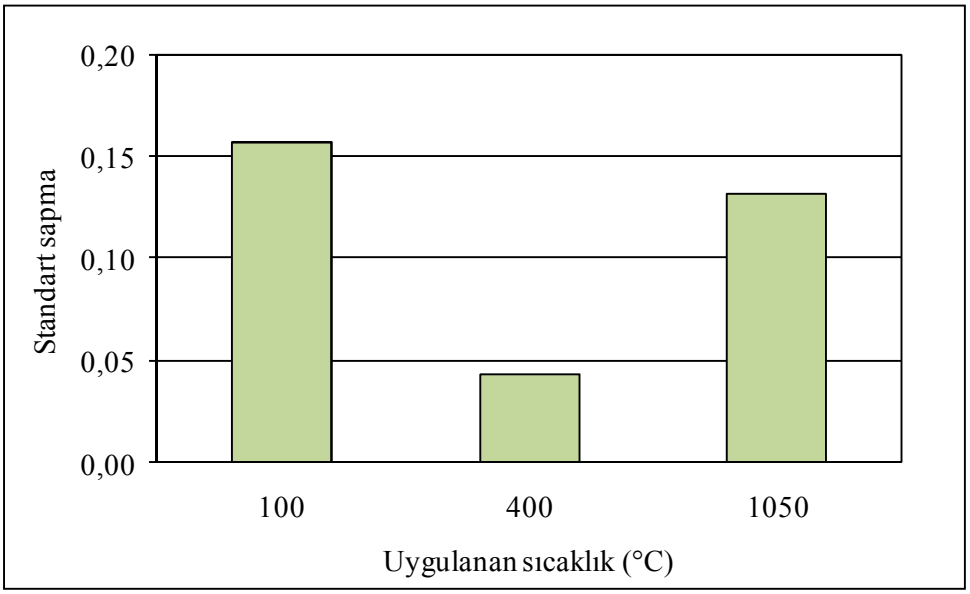
Numenin serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için değişimi, uygulanan sıcaklığın 100 °C kademesi için 0.74 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu değişken sırayla, 400 °C ve 1050 °C'de hızla azalarak, 0.57 MPa ve 0.27 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.61: Killi kum numunesinde serbest basınç mukavemetinin medyan numuneler için farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.7.7. Serbest basınç mukavemeti değişiminin standart sapması

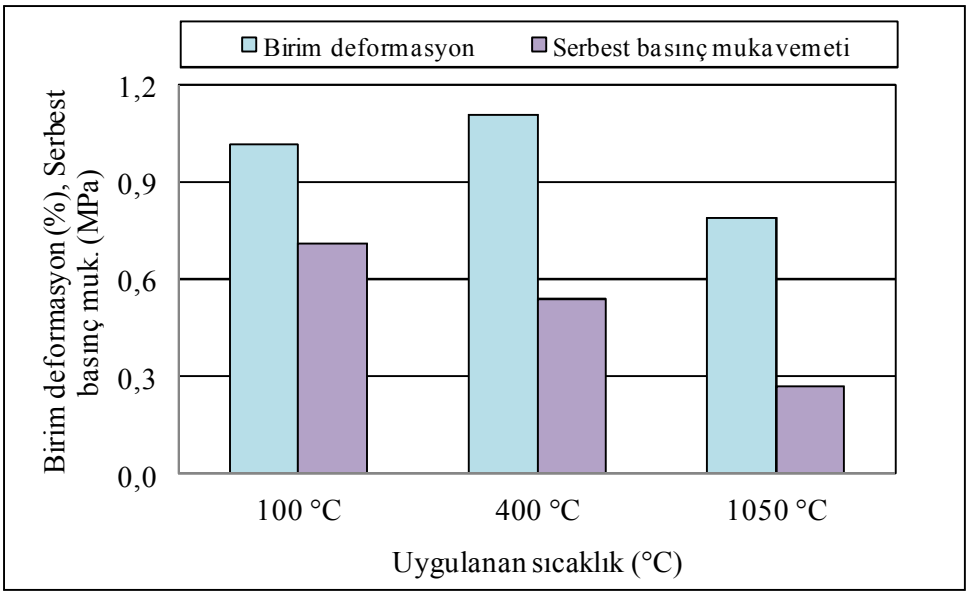
Numune için standart sapma değerleri, küçük bir aralıkta değiştiği belirlenmiştir. Bu değişkenenin en yüksek değeri, 100 °C sıcaklıkta 0.16 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.62: Killi kum numunesinde serbest basınç mukavemetinin farklı sıcaklıklar etkisinde standart sapması

5.7.8. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla değişimi

Numunede birim deformasyonun yüzdesel olarak değişimi, artan sıcaklık uygulamaları etkisinde, 400 °C için en yüksek olarak belirlenmiş ve 1.11 olarak hesaplanmıştır.

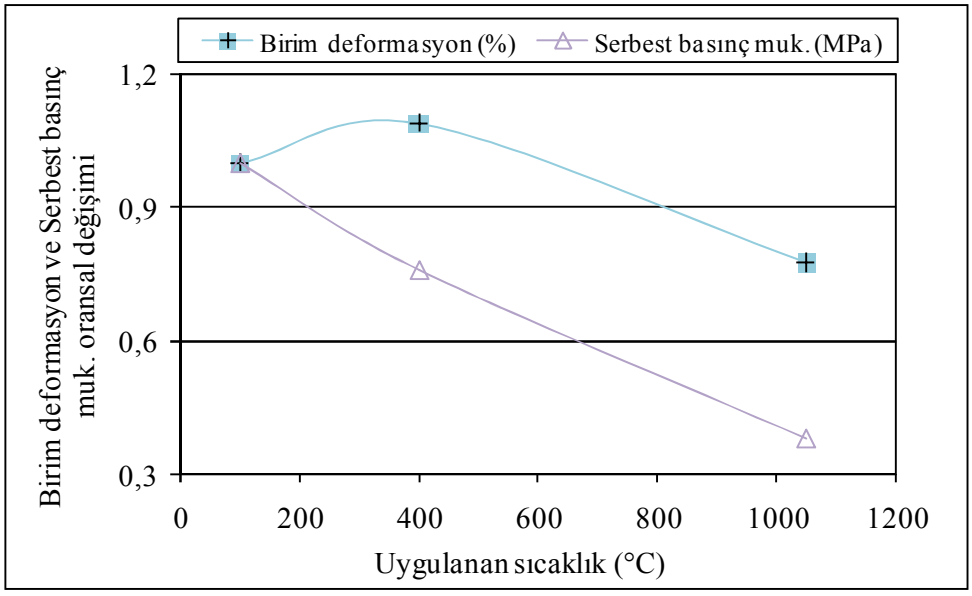


Şekil 5.63: Killi kum numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun değişimi

5.7.9. Serbest basınç mukavemetinin birim deformasyonla oransal değişimi

Numunenin birim deformasyonunun oransal değişimi, sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak 400 °C'de hafifçe artış göstermiş olup, 1.09 olarak hesaplanmıştır. Bu değişken, ardıl sıcaklık kademesi için azalıp, 0.77 olduğu tespit edilmiştir.

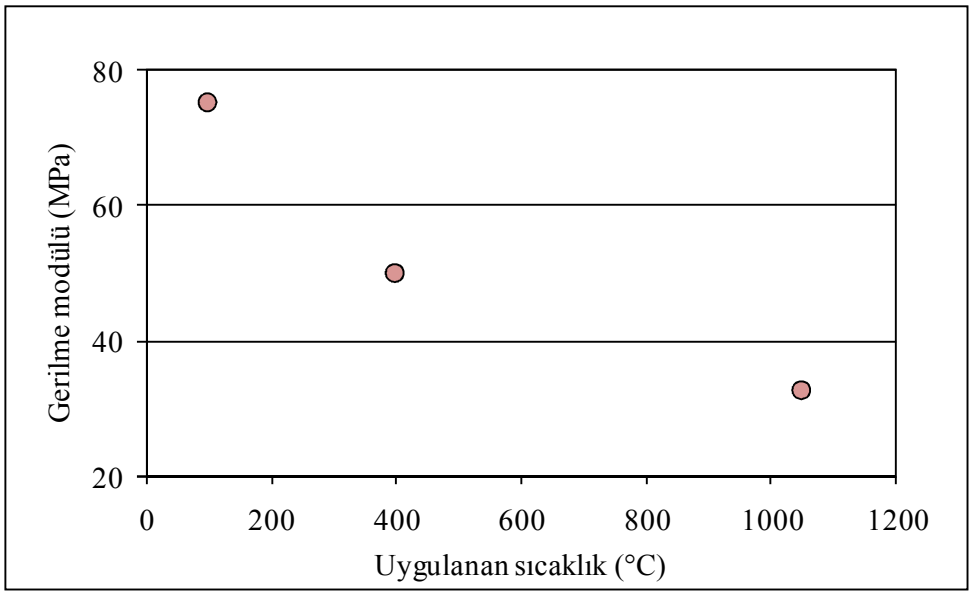
Serbest basınç mukavemetinin oransal değişimine bakıldığında ise artan sıcaklık uygulamaları için sürekli azalarak, 1050 °C sıcaklıkta 0.38 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.64: Killi kum numunesinde farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyonun oransal değişimi

5.7.10. Gerilme modülünün değişimi

Numune gerilme modülünün değişimi, sürekli olarak azalan bir eğilim göstermiştir. Uygulanan sıcaklığın 100 °C olduğu kademe için 75 MPa olarak hesaplanan bu değişken, artan sıcaklık kademelerinde düşerek 1050 °C'de 33 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.65: Killi kum numunesinde gerilme modülünün farklı sıcaklıklar etkisinde değişimi

5.8. Görünür Porozite Deneyi Sonuçları ve Isıl İşlem Görmüş Numunelerin Su Etkisinde Bazı Fiziksel Özelliklerinin Değişimi

Zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Uygulanması planlanan yöntem, zemin özelliklerine göre her ne kadar değişkenlik gösterecek olsa da, mevcut arazide su kalıcı ya da geçici olarak bulunacaktır. Bununla ilişkili olarak, zeminlerin mekanik değişkenlerinin sudan önemli ölçüde değiştiği bilinmektedir.

Bu nedenle, ısıl iyileştirilme uygulanmış zemin numuneleri üzerinde su etkisinin irdelenmesi anlamlı olacağı düşünülmüş ve ilerleyen alt başlıklar hâlinde sunulacak olan kaolin, Tekirdağ ve bentonit kili numunelerinin, su etkisinde farklı aşamalarda bırakılması sonucu bazı fiziksel özelliklerinin değişimi sunulmuştur.

İyileştirme sıcaklıkları 100, 200, 400, 600, 800 ve 1050 °C olup, üzerinde deneysel çalışmalar yürütülen bütün kil numunelerin mineral kökenine bağlı olmakla birlikte numunelerin sudan etkilenmeden mekanik özelliklerindeki kalıcı iyileştirmenin en az 600 °C sıcaklıkta gerçekleştiği saptanmıştır.

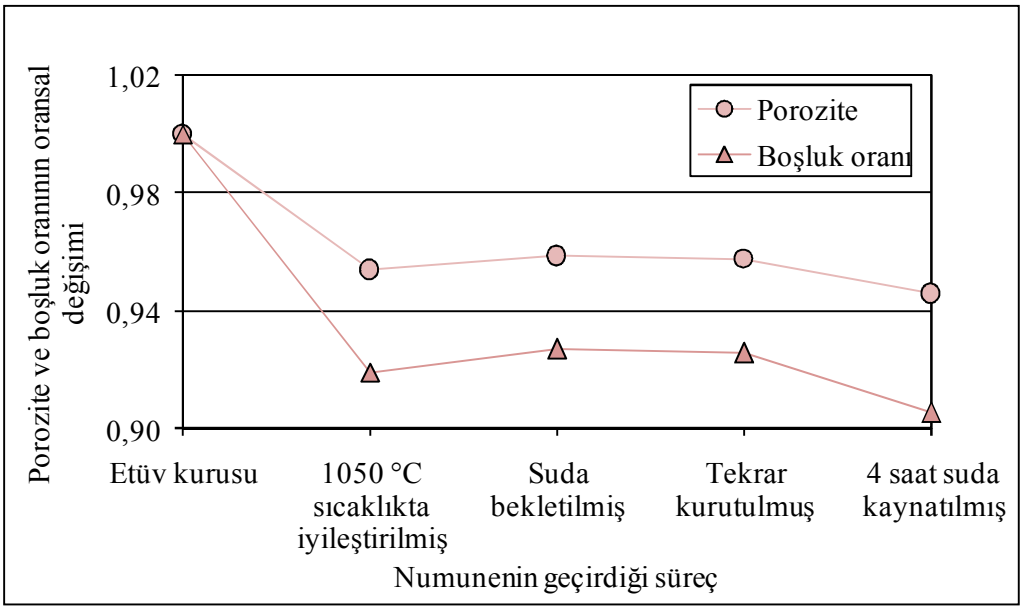
Diğer yandan, kalıcı olarak iyileşmiş zemin numunelerinin porozite değişkenlerini hızlı olarak belirlemeye yarayan görünür porozite deneyinin, üzerinde deneyleri yapılan numuneler için doğruluğu araştırılmıştır.

5.8.1. İşlenmiş kaolin numunesinde görünür porozite deneyi

Isıtılma sıcaklığının 1050 °C olduğu ısıl işlem görmüş bir kaolin numunesinde, görünür porozite deneyi ile bulunan özgül ağırlık değeri 2.356 iken, bu değişken aynı numune için öğütülerek piknometre deneyi vasıtasıyla gerçekleştirildiğinde 2.38 olarak belirlenmiştir.

5.8.2. İşlenmiş kaolin numunesinde porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

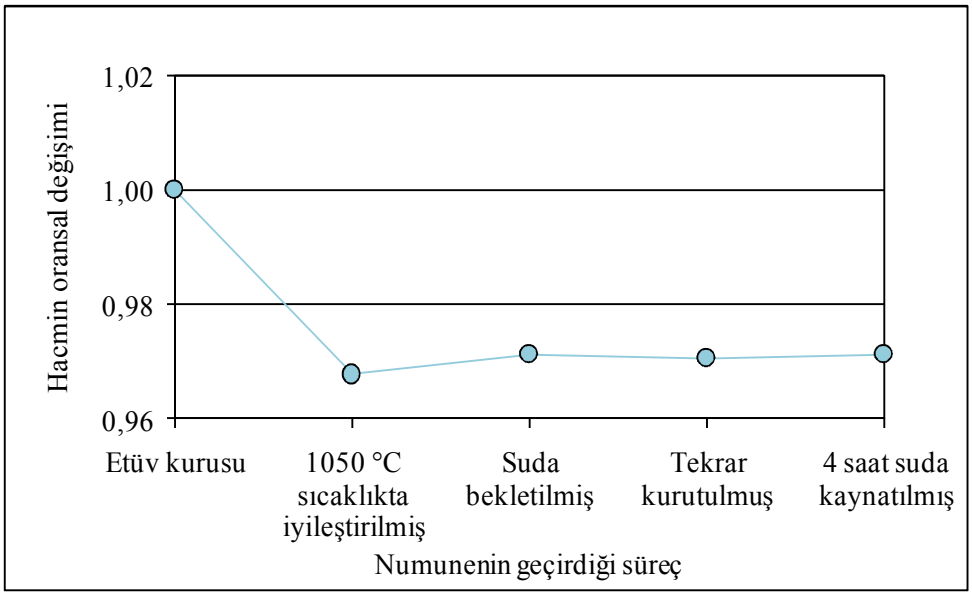
Aşağıdaki şekilde numunenin, başlangıçtaki hâlde sırayla porozite ve boşluk oranı 0.83 ve 0.45 olmak üzere, bu özelliklerin değişimi numunenin geçirdiği değişen süreçler boyunca gösterilmiştir. Kaolin numunesinde bu iki değişken, uygulama sıcaklığının 1050 °C olduğu kademede hızla düşmüştür. Numunenin, 4 saat suda kaynatılmış hâldeki aşama için sırayla porozite ve boşluk oranının oransal değerleri, 0.95 ve 0.91 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.66: 1050 °C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş kaolin numunesinin farklı aşamalarda porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

5.8.3. İşlenmiş kaolin numunesinde hacmin oransal değişimi

Uygulama sıcaklığının 1050 °C olduğu kademede kaolin numunesinin değişen süreçler için hacminin oransal değişimi önce hızla azalan, ardından neredeyse değişmeyen bir eğilim gözlenmiştir. Numunenin, 4 saat suda kaynatılması ile hacminin başlangıç duruma göre oransal değişkenin 0.97 olduğu tespit edilmiştir.



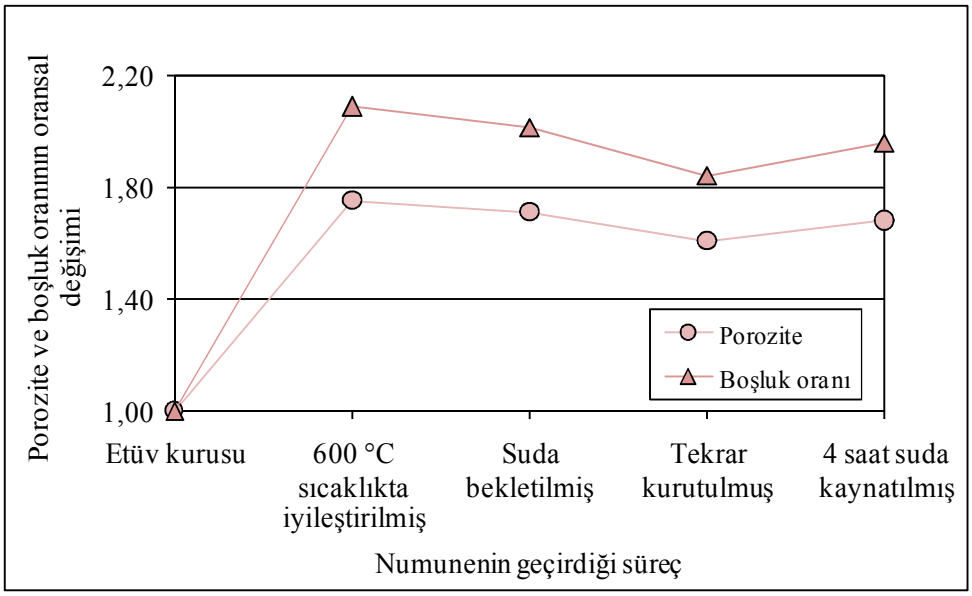
Şekil 5.67: 1050 °C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş kaolin numunesinin farklı aşamalarda hacminin oransal değişimi

5.8.4. Tekirdağ kili numunesinde görünür porozite deneyi

Uygulama sıcaklığının 600 °C olduğu Tekirdağ kili numunesinde, görünür porozite deneyi ile bulunan özgül ağırlık değeri 2.603 iken, bu değişken aynı numunenin öğütülerek piknometre deneyi vasıtasıyla gerçekleştirildiğinde 2.60 olarak belirlenmiştir.

5.8.5. Tekirdağ kili numunesinde porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

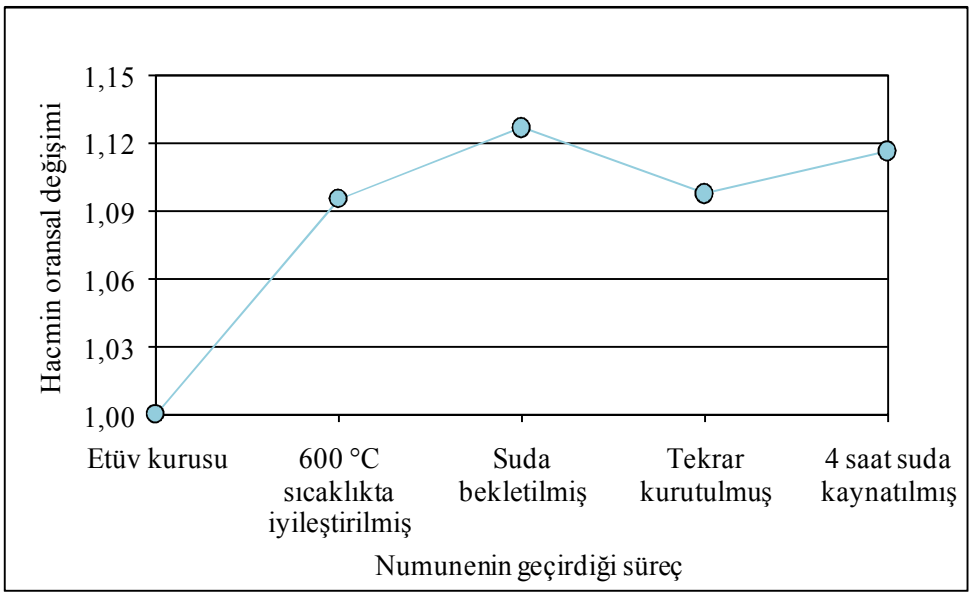
Aşağıdaki şekilde numunenin, başlangıçtaki hâlde sırayla porozite ve boşluk oranı 0.18 ve 0.21 olmak üzere, bu özelliklerin değişimi numunenin geçirdiği süreç aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Tekirdağ kili numunesinde bu iki değişken sıcaklığın 600 °C uygulamasında hızla artarak, sırayla porozite ve boşluk oranının oransal değerleri, 1.75 ve 2.09 olarak hesaplanmıştır. Bundan sonraki iki uygulama için bu değişkenler, kademeli olarak düşmüş ve son uygulamada sırayla porozite ve boşluk oranının oransal değerleri, 1.68 ve 1.96 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.68: 600°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş Tekirdağ kili numunesinin farklı aşamalarda porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

5.8.6. Tekirdağ kili numunesinde hacmin oransal değişimi

Uygulama sıcaklığının 600 °C olduğu kademede ısıtılmış Tekirdağ numunesinde hacmin oransal değişimi, suda bekletilmiş duruma kadar artmış ve 1.13 olarak tespit edilmiştir. Sonrasındaki uygulamalar için bu değişken, ilkin hafifçe düşeşe geçmiş ardından yükselerek, 1.12 olmuştur.



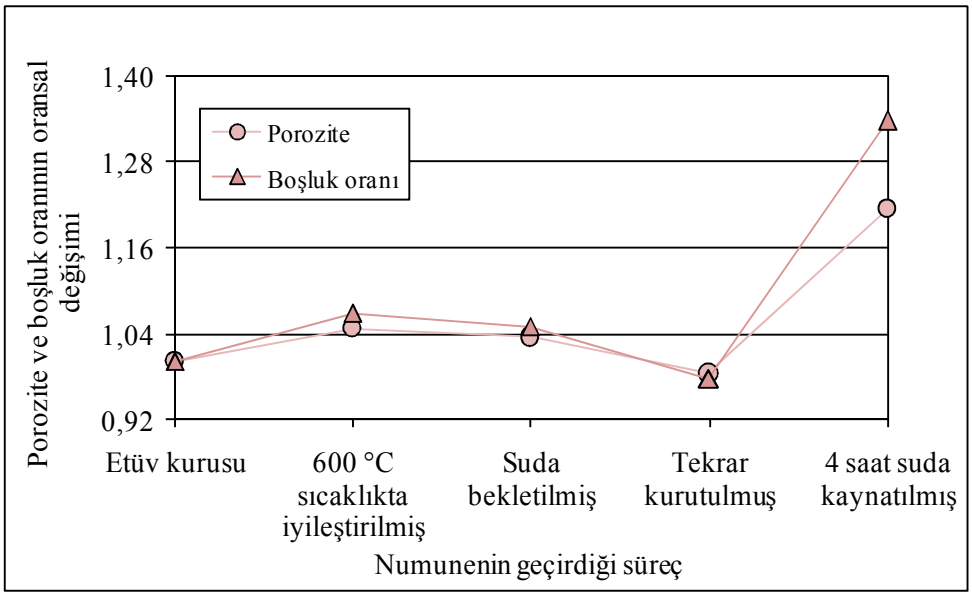
Şekil 5.69: 600°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş Tekirdağ kili numunesinin farklı aşamalarda hacminin oransal değişimi

5.8.7. Bentonit numunesinde görünür porozite deneyi

Uygulama sıcaklığının 600 °C olduğu bentonit numunesinde, görünür porozite deneyi ile bulunan özgül ağırlık değeri 2.563 iken, bu değişken aynı numunenin öğütülerek piknometre deneyi vasıtasıyla gerçekleştirildiğinde 2.45 olarak belirlenmiştir.

5.8.8. Bentonit numunesinde porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

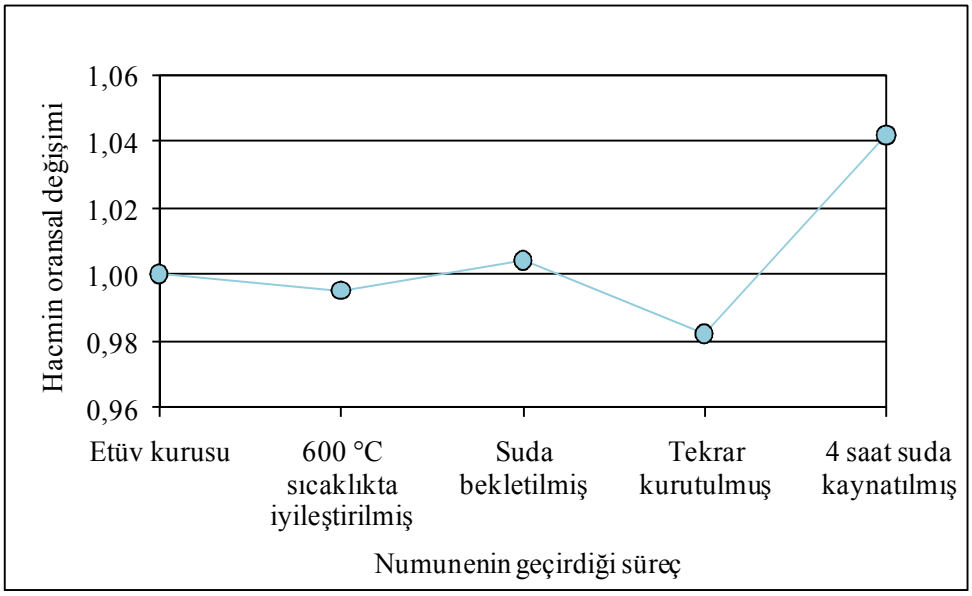
Aşağıdaki şekilde numunenin, başlangıçtaki hâlde sırayla porozite ve boşluk oranı 0.43 ve 0.30 olmak üzere, bu özelliklerin değişimi numunenin geçirdiği süreç boyunca gösterilmiştir. Bentonit numunesinde, porozite ve boşluk oranı ilk üç aşama için başlangıç durumuna kıyasla yaklaşık aynı kalmıştır. Numunenin 4 saat kaynatılmış durumu için sırayla porozite ve boşluk oranının oransal değerleri hızla artarak, 1.21 ve 1.34 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.70: 600°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş bentonit numunesinin farklı aşamalarda porozite ve boşluk oranının oransal değişimi

5.8.9. Bentonit numunesinde hacmin oransal değişimi

Uygulama sıcaklığının 600 °C olduğu bentonit numunesinin değişen süreçler için hacminin oransal değişimi ilk üç aşamada yaklaşık aynı kalırken, sırayla sonraki aşamalar için azalmış ve ardından artmıştır. Numunenin tekrar kurutulması ile bu değişken, 0.98 olurken, ardından 4 saat suda kaynatılması sonucunda bu değişken hızla yükselmiş ve 1.04 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.71: 600°C'de ısıl işlem görmüş bentonit numunesinin farklı aşamalarda hacminin oransal değişimi

BÖLÜM 6. LABORATUAR DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ

6.1. Giriş

Laboratuar deney sonuçları bir önceki bölümde sunulmuş olduğu üzere deneyleri gerçekleştirilen her bir numunenin başlangıç durumunda ve kademeli olarak değişen sıcaklık uygulamaları neticesinde zemin özelliklerinin değişimi gösterilmişti.

Bu bölümde, deneyleri yapılan farklı numunelerin, değişen sıcaklık uygulamaları için zemin özelliklerinin değişimi aynı şekiller üzerinde gösterilmiştir. Burada hedeflenen amaç, ilgili özelliklerinin değişimini numuneler arasında aynı değişen sıcaklık uygulamaları için kıyaslayabilmektir.

Deneysel çalışmaların anlatıldığı bölümden hatırlanacağı üzere, farklı zemin özelliklerine sahip numunelerin, 100 °C sıcaklıkta etüvde kurutulmuş hâli referans numuneyi temsil etmektir. Bütün numunelerin kademeli olarak artan sıcaklık uygulamaları için belirlenen bazı özelliklerinin değişimi ve bu özelliklerinin her birinin oransal değişimi bu bölümde aynı şekiller üzerinde gösterilerek kıyaslanmıştır.

Aşağıdaki tabloda, numunelerin doğal hâldeki bazı zemin özellikleri anımsatılmak üzere özetlenmiştir.

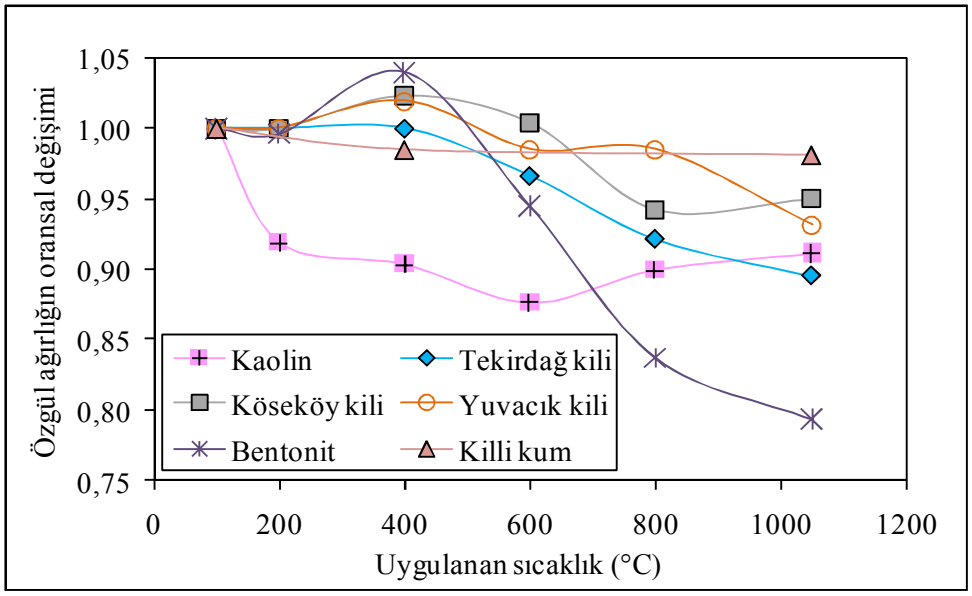
Tablo 6.1: Zemin özelliklerinin doğal hâldeki bütün numuneler için birlikte gösterimi

Numune	İşlenmiş kaolin	Tekirdağ kili	Köseköy kili	Yuvacık kili	Bentonit	Killi kum
Renk	Beyaz	Koyu kahverengi	Kahverengi	Kahverengi	Yeşil	Açık yeşil
Özgül ağırlık	2.59	2.67	2.60	2.61	2.51	2.62
Likit limit (%)	42	59	36	56	304	-
Plastik limit (%)	31	22	24	31	70	-
Plastisite indisi (%)	11	37	12	25	234	NP
Kum (2 mm-75μm) (%)	0	7	33	22	0	90
Silt (75μm-2μm) (%)	55	53	37	55	27	2.7
Kil (<2 μm) (%)	45	40	30	23	73	7.3
Aktivite	0.31	0.93	0.40	1.09	3.20	-
Harvard maks. kuru BHA (kN/m^3)	14.7	22.1	22.0	19.0	13.9	17.4
Harvard optimum su muh. (%)	18.5	17.2	16.9	24.1	61.2	11.41
Organik madde içeriği (%)	0	1.69	5.64	3.02	0.25	0.18
Birleştirilmiş zemin sınıfı	ML	CH	CL	CH	CH	SC

6.2. Özgül Ağırlığın Oransal Değişimi

Özgül ağırlığın oransal değişimi, artan sıcaklık uygulamaları için bütün numunelerde azalan yönde eğilim göstermiştir. Kaolin numunesinde özgül ağırlığın oransal değişimi, 600 °C sıcaklığa kadar azalış gözlenmiş olup, sonrasında hafifçe artarak 1050 °C sıcaklıkta 0.91 olmuştur. Uygulanan sıcaklık kademesinin artışı neticesinde, bu değişkenin ilk üç sıcaklık aşaması haricinde sürekli olarak azaldığı Tekirdağ kili numunesinde, son sıcaklık kademesi için değeri, 0.90 olarak hesaplanmıştır.

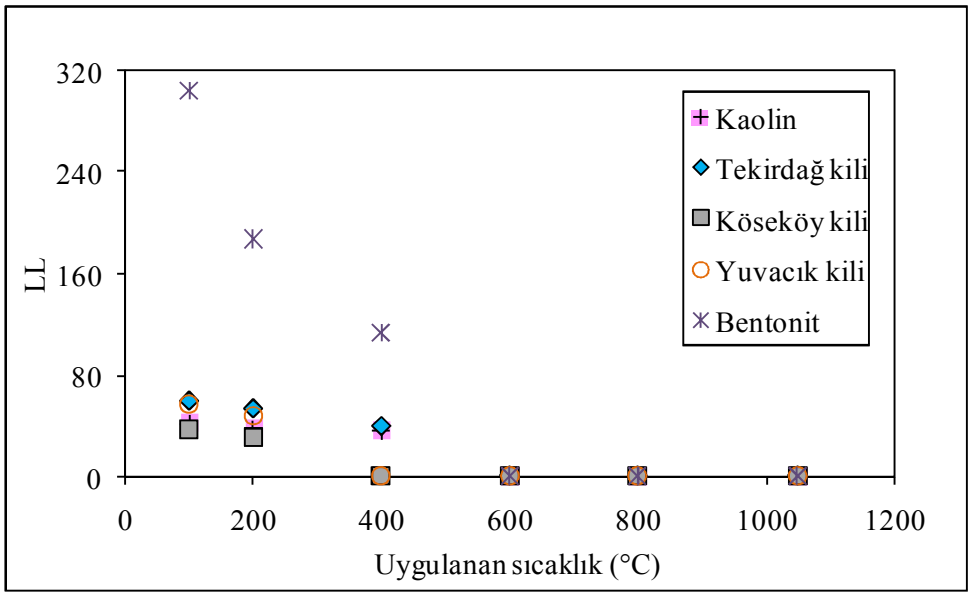
Sırayla Köseköy ve Yuvacık killerinde sıcaklığın 400 °C kademesi için bu değişken ilkin hafifçe artmış, sonrasında azalan bir eğilim göstererek 1050 °C sıcaklıkta, 0.95 ve 0.93 olarak hesaplanmıştır. Bentonit numunesinde ise özgül ağırlık oransal olarak, 200 °C'de sabit kalırken, 400 °C sıcaklıkta artış göstermiş ve ardıl uygulanan sıcaklıklarda hızla düşerek 1050 °C'de, 0.79 olarak tespit edilmiştir. En az özgül ağırlık oransal değişiminin hesaplandığı killi kum numunesinde bu değişken, 1050 °C'de 0.98 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.1: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında özgül ağırlığın oransal değişimi

6.3. Likit Limitin Değişimi

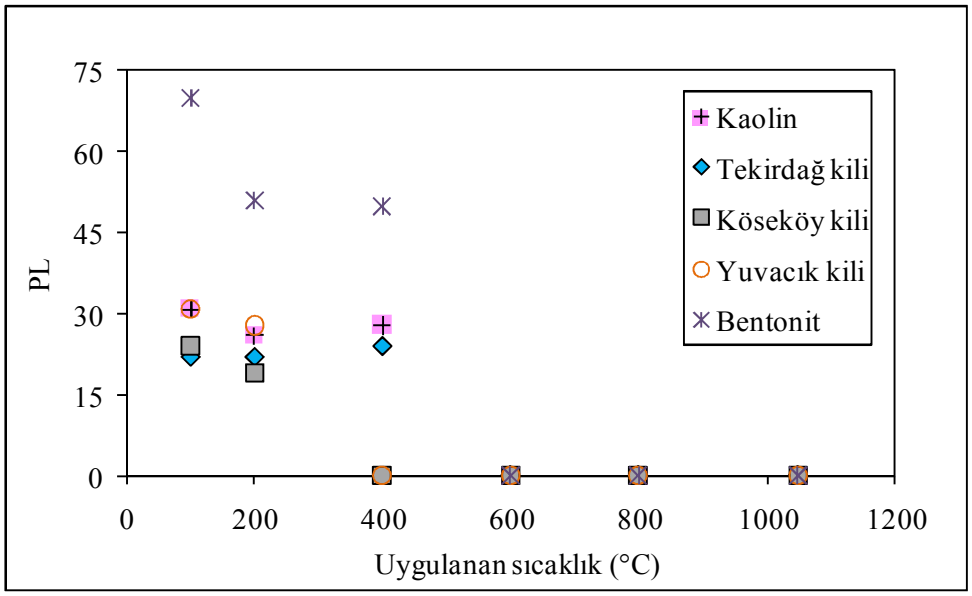
Numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde bırakılması neticesinde likit limitinde önemli değişimler belirlenmiştir. Uygulanan sıcaklığın artışı ile tüm numunelerin likit limit değerleri sürekli azalmıştır. Kaolin, Tekirdağ kili ve bentonit numuneleri için bu değişken 600 °C sıcaklık için ortadan kalkerken, Yuvacık ve Köseköy killeri 400 °C'de likit limit özelliğini yitirmiştir.



Şekil 6.2: Farklı sıcaklıklar için likit limitin numuneler arasında değişimi

6.4. Plastik Limitin Değişimi

Referans sıcaklığa göre, bütün numuneler için kademeli olarak artan sıcaklıklar etkisinde, plastisite özelliği genel olarak azalan bir eğilim göstermiştir. Plastik limit, Köseköy ve Yuvacık killeri için 400 °C'de kaybolmuştur. Kaolin, Tekirdağ ve bentonit killeri için ise bu özellik, uygulanan sıcaklığın 600 °C olduğu kademe için ortadan kalkmıştır.

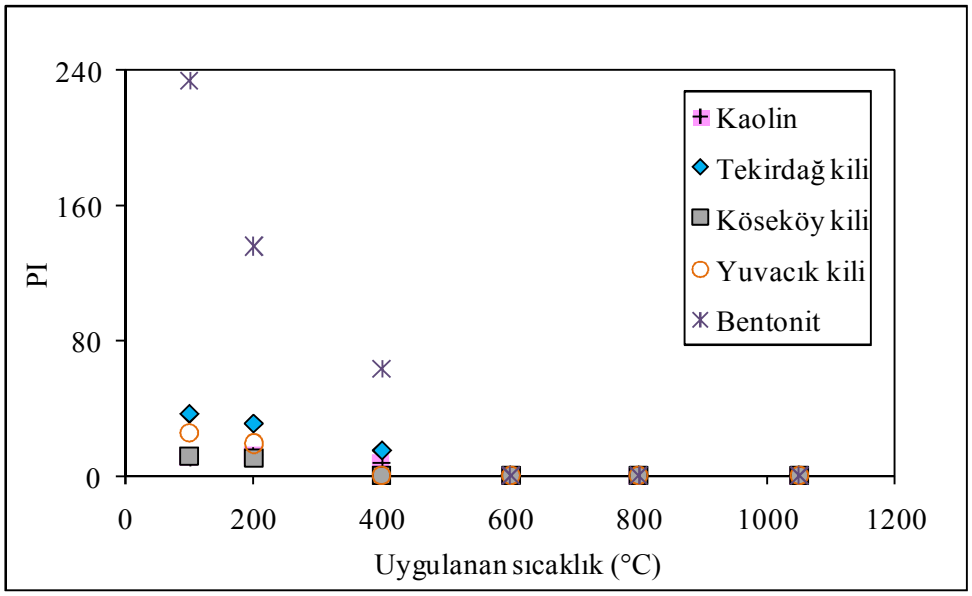


Şekil 6.3: Farklı sıcaklıklar için plastik limitin numuneler arasında değişimi

6.5. Plastisite İndisinin Değişimi

Plastisite indisi, likit limitin plastik limitten farkı olduğu bilinmektedir. Bu değişken, kaolin numunesi haricindeki numuneler için uygulanan sıcaklığın artışı ile azalan yönde değişim göstermiştir.

Kaolin numunesinde 200 °C sıcaklıkta plastisite özelliği referans sıcaklığa nazaran küçük oranda artış göstermiş ve sonraki sıcaklık aşamasında düşüş göstererek 600 °C sıcaklıkta, plastisite özelliğini bütünüyle yitirmiştir. Köseköy ve Yuvacık kili numunelerinin, 200 °C'de plastisite özelliği önemli oranda düşmüş ve 400 °C sıcaklıkta ise numunelerin plastisitesini tamamen yitirdiği belirlenmiştir. Tekirdağ ve bentonit numunelerinde ise 600 °C sıcaklığa kadar bu değişken kademeli olarak düşerek, plastik olmayan özellik göstermiştir.

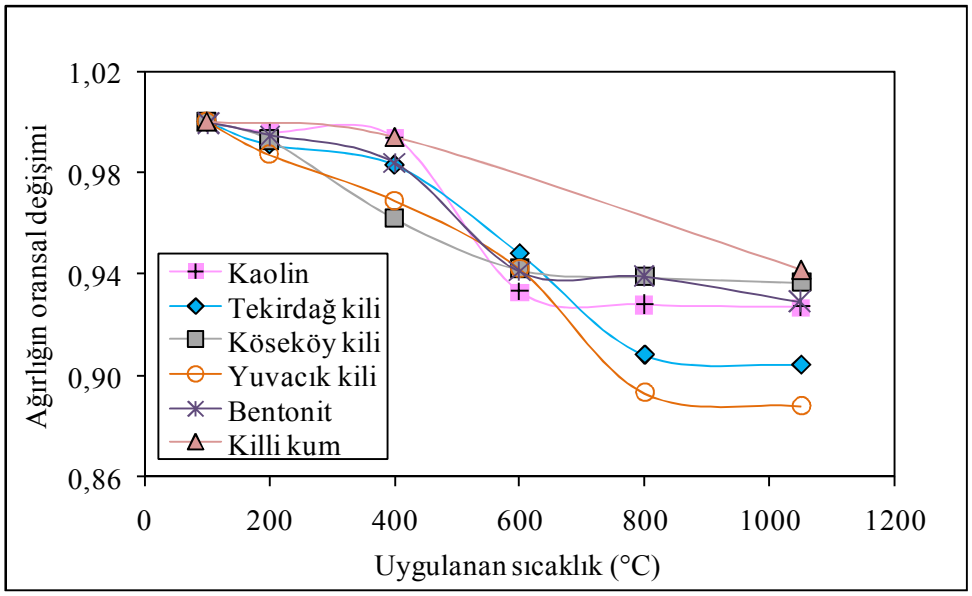


Şekil 6.4: Farklı sıcaklıklar için plastisite indisinin numuneler arasında değişimi

6.6. Ağırlığın Oransal Değişimi

Kademeli olarak uygulanan sıcaklık artışına bağlı olarak, bütün numunelerinin ağırlıklarının sürekli azaldığı belirlenmiştir. Diğer yandan, aşağıdaki şekilden genel olarak bütün numunelerin ağırlıklarının oransal düşüşü, 400 ve 800 °C sıcaklık kademeleri için önemli oranda azaldığı anlaşılmakta olup, 1050 °C sıcaklık uygulaması için bu hızlı düşüş devam etmemiştir.

Kaolin, Köseköy kili ve bentonit numuneleri için ağırlık düşüşünün önemli oranda azaldığı sıcaklık kademesi 600 °C olmuş ve numuneler için bu değişken yaklaşık 0.94 olarak belirlenmiştir. Sırayla Tekirdağ ve Yuvacık killeri için ise ağırlıklarında 800 °C sıcaklıkta önemli oranda azalış olduğu belirlenirken, bu değişkenin yaklaşık 0.91 ve 0.89 olduğu saptanmıştır. Üzerinde üç farklı sıcaklık uygulandığı killi kum numunesi için ise 400 °C sıcaklıkta ağırlık önemli oranda değişmemiş olup, 1050 °C sıcaklıkta fark edilebilir düşüş tespit edilmiş ve 0.94 olarak hesaplanmıştır.

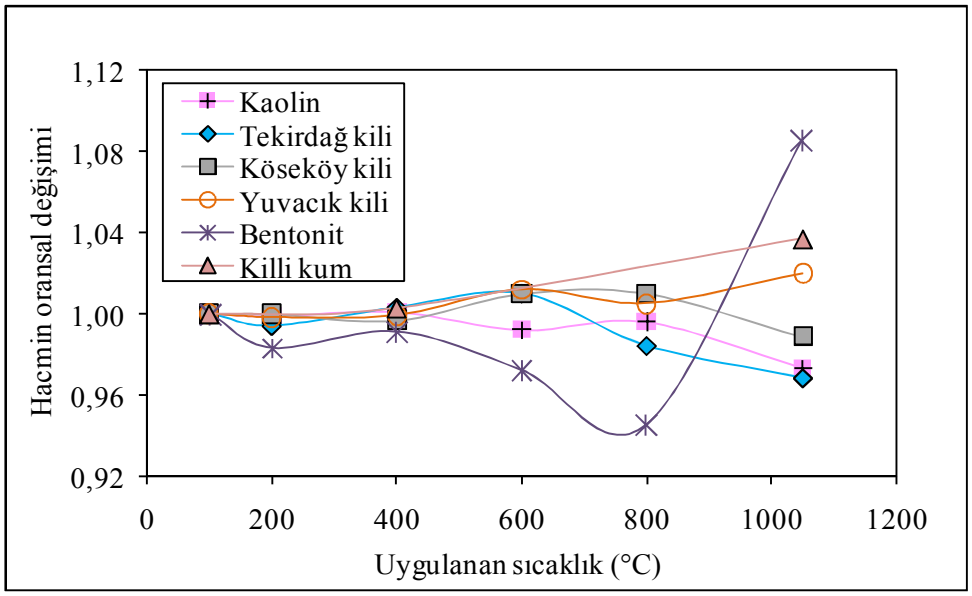


Şekil 6.5: Farklı sıcaklıklar için ağırlığın numuneler arasında oransal değişimi

6.7. Hacmin Oransal Değişimi

Numuneler arasında artan yüksek sıcaklık uygulamaları etkisinde bentonit numunesinin haricinde hacimce oransal göze çarpan değişiklikler belirlenmemiştir. Bentonit numunesinin 800 °C sıcaklıkta bu oransal değeri 0.94 olarak hesaplanırken, 1050 °C'de hacimce önemli düzeyde artış gösterip, başlangıç hacmine nazaran hacmin oransal büyüklüğü 1.09 olarak belirlenmiştir.

Uygulanan sıcaklığın 1050 °C olduğu kademesinde sırayla kaolin ve Tekirdağ kili numunesi için azalarak, bu değişken yaklaşık 0.97 olarak tespit edilmiştir. Köseköy kilinde bu değişken önemli düzeyde değişmeyip, 1050 °C'de yaklaşık olarak başlangıç oranına gelmiştir. Bentonit numunesinin haricinde, sırayla bu değişkenin numuneler arasında en yüksek değerinin belirlendiği Yuvacık kili ve killi kumda 1.02 ve 1.04 olarak hesaplanmıştır.

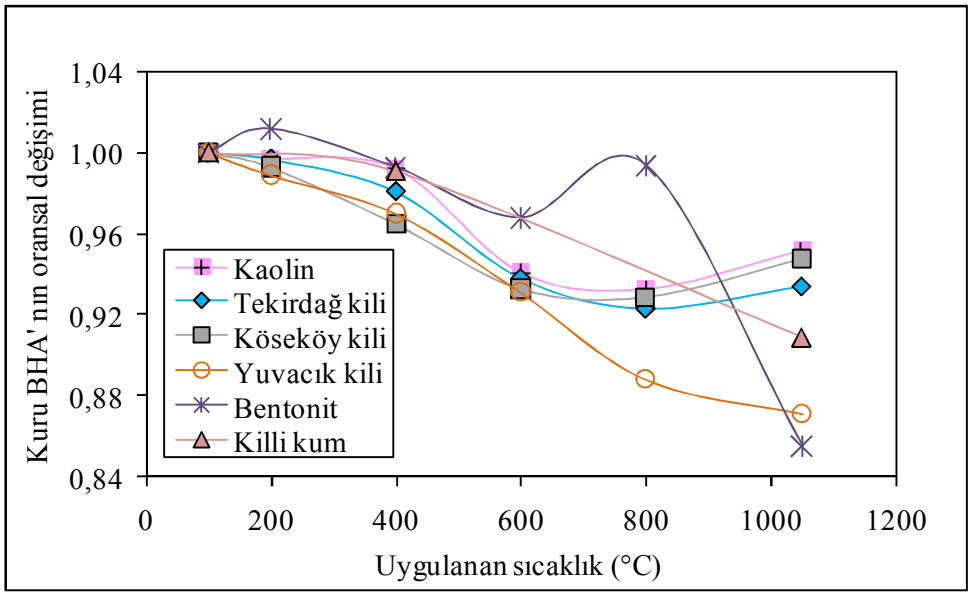


Şekil 6.6: Farklı sıcaklıklar için hacmin numuneler arasında oransal değişimi

6.8. Kuru BHA'nın Oransal Değişimi

Kademeli olarak artan sıcaklık aşamaları için bütün numunelerin genel olarak kuru birim hacim ağırlığının azaldığı saptanmıştır. Artan sıcaklık uygulamalarında, kıyaslanan numuneler arasında bentonit numunesinin bu oransal değişkeni, fark edilebilir biçimde değişmiştir. Numune için bu değişken, 600 °C sıcaklıkta 0.97 olmuş, uygulanan sıcaklığın 800 °C olduğu durumda referans sıcaklıktaki değerine yükselmiş, lâkin bir sonraki sıcaklık kademesinde hızla azalarak, 0.85 olarak hesaplanmıştır.

Sırayla kaolin, Tekirdağ ve Köseköy killeri için 800 °C sıcaklıkta kuru BHA oransal olarak, yaklaşık 0.93 değerine kadar azalırken, 1050 °C'de, 0.95, 0.93 ve 0.95 olarak hesaplanmıştır. Yuvacık kili ise uygulanan sıcaklığın aşamalı olarak artışına bağlı olarak, değişken kademeli olarak sürekli azalmış ve 1050 °C'de 0.87 olarak hesaplanırken, killi kum numunesinde için bu değişken, uygulanan sıcaklığın artışı ile sürekli düşerek 1050 °C'de, 0.91 olarak belirlenmiştir.

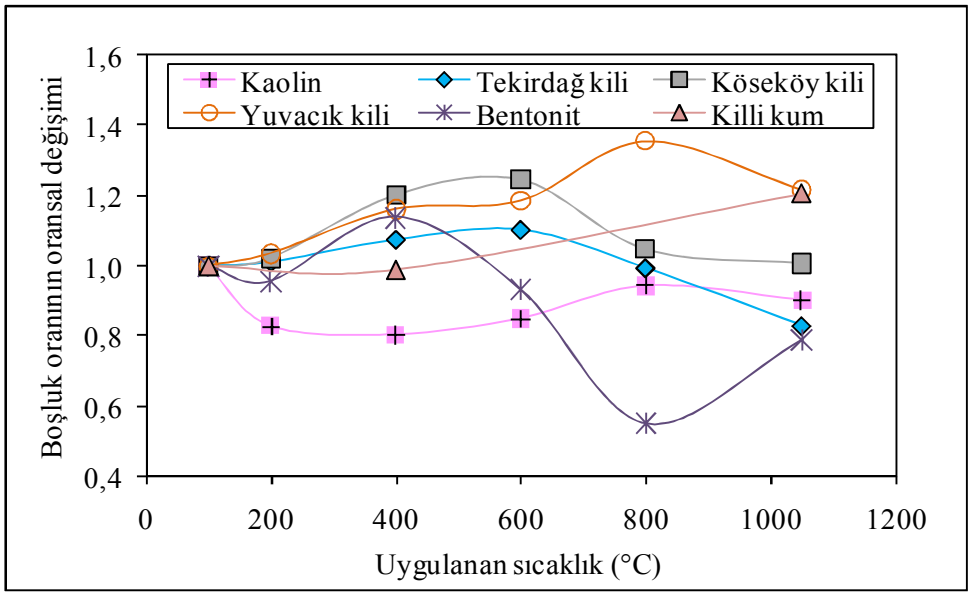


Şekil 6.7: Farklı sıcaklıklar için kuru BHA'nın numuneler arasında oransal değişimi

6.9. Boşluk Oranın Oransal Değişimi

Boşluk oranının oransal değişimi, numuneler arasında artan sıcaklık kademeleri için belirgin eğilimler göstermemiştir. Kaolin numunesi için bu değişken, sıcaklığın 400 °C değerine kadar azalarak 0.80 katına düşmüş, daha sonraki sıcaklık kademelerinde artan bir eğilim göstererek, son sıcaklık uygulamasında 0.90 olmuştur. Sırayla Tekirdağ, Köseköy ve Yuvacık killerinin artan sıcaklık uygulamalarında boşluk oranı, oransal olarak öncelikle artmış ardından azalarak, 1050 °C sıcaklıkta 0.83, 1.01 ve 1.21 olarak hesaplanmıştır.

Bentonit numunesinde boşluk oranının oransal değeri, sıcaklık artışına bağlı olarak 400 °C için artarak, 1.14 olarak belirlenmiş, 800 °C'de hızla azalarak 0.55 ve son sıcaklık kademesi olan 1050 °C için artarak 0.79 olarak tespit edilmiştir. Killi kum numunesinde kademeli olarak artan sıcaklıklarda, bu değişken öncesinde hafifçe azalmış, ardından son sıcaklık kademesinde hızla artarak, 1.21 olarak belirlenmiştir.

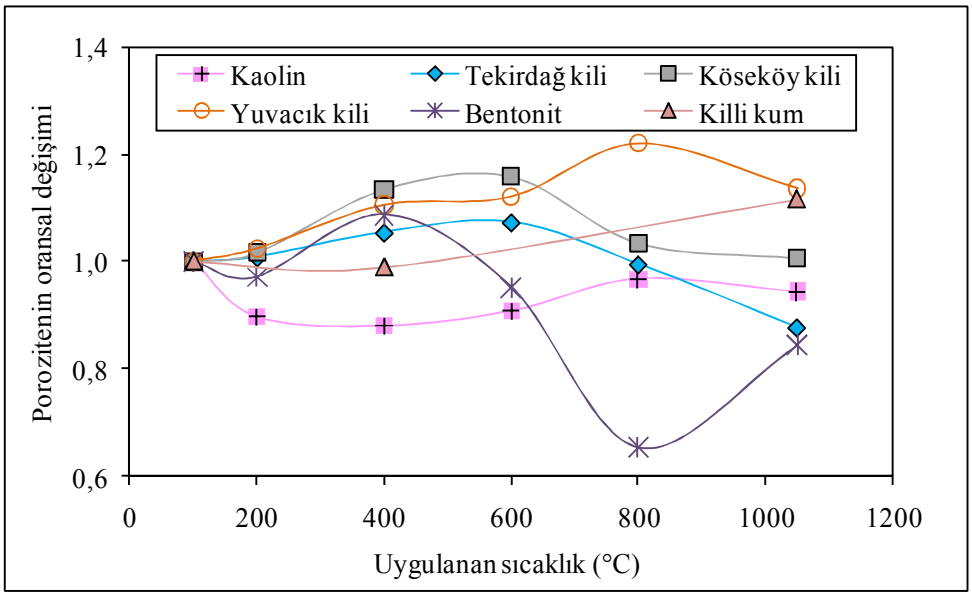


Şekil 6.8: Farklı sıcaklıklar için boşluk oranının numuneler arasında oransal değişimi

6.10. Porozitenin Oransal Değişimi

Porozite, boşluk oranının bir fonksiyonu olarak, uygulanan yüksek sıcaklıklar etkisinde boşluk oranının oransal değişimine göre benzer eğilimler göstermiştir. Bu değişken, kaolin numunesinde sıcaklığın artışı ile 400 °C'ye kadar azalarak, 0.88 olmuş, sonrasında 1050 °C sıcaklıkta, 0.94 olarak tespit edilmiştir. Bu değişken, sırayla Tekirdağ, Köseköy ve Yuvacık killerinde kademeli olarak sıcaklık artışı ile 600 °C'ye kadar artmış, sonrasında son uygulanan sıcaklık için 0.88, 1.00 ve 1.14 olarak hesaplanmıştır.

Bentonit numunesinde bu değişken düzenli olarak farklılaşmamış olup, en düşük 800 °C'de 0.65 ve en yüksek 400 °C sıcaklık uygulamasında, 1.09 olarak hesaplanmıştır. Killi kum numunesinde porozitenin oransal değişimi, önce hafifçe azalmış ve sonrasında artışa geçerek 1050 °C'de, 1.12 olduğu tespit edilmiştir.



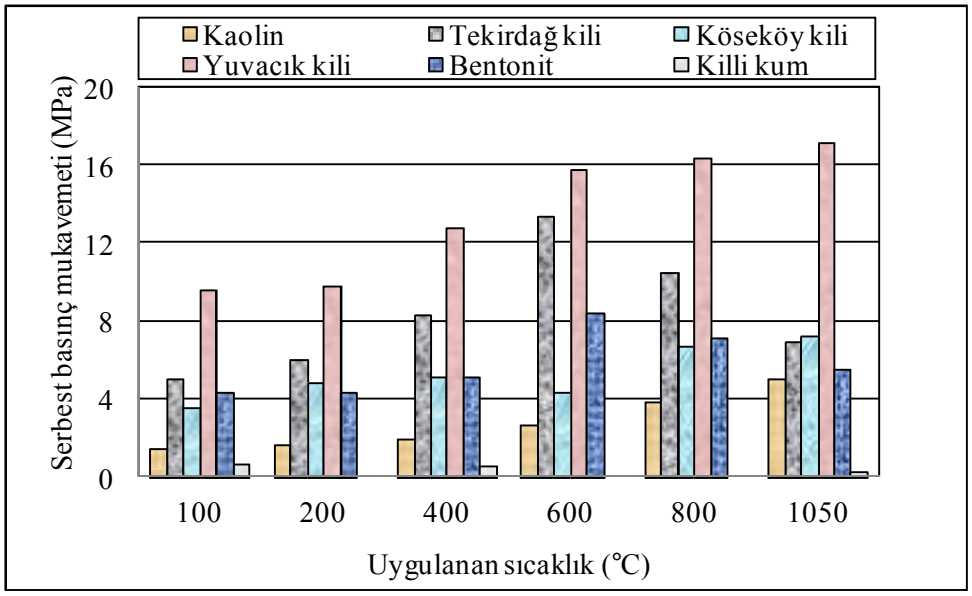
Şekil 6.9: Farklı sıcaklıklar için porozitenin numuneler arasında oransal değişimi

6.11. Serbest Basınç Mukavemetinin Değişimi

Kademeli olarak artan yüksek sıcaklıklar uygulanan numunelerde, serbest basınç mukavemeti büyüklüklerinde çarpıcı değişiklikler gözlenmiştir. Bu değişken, numunenin türü ve uygulanan sıcaklığa bağlı olarak farklılık göstermektedir.

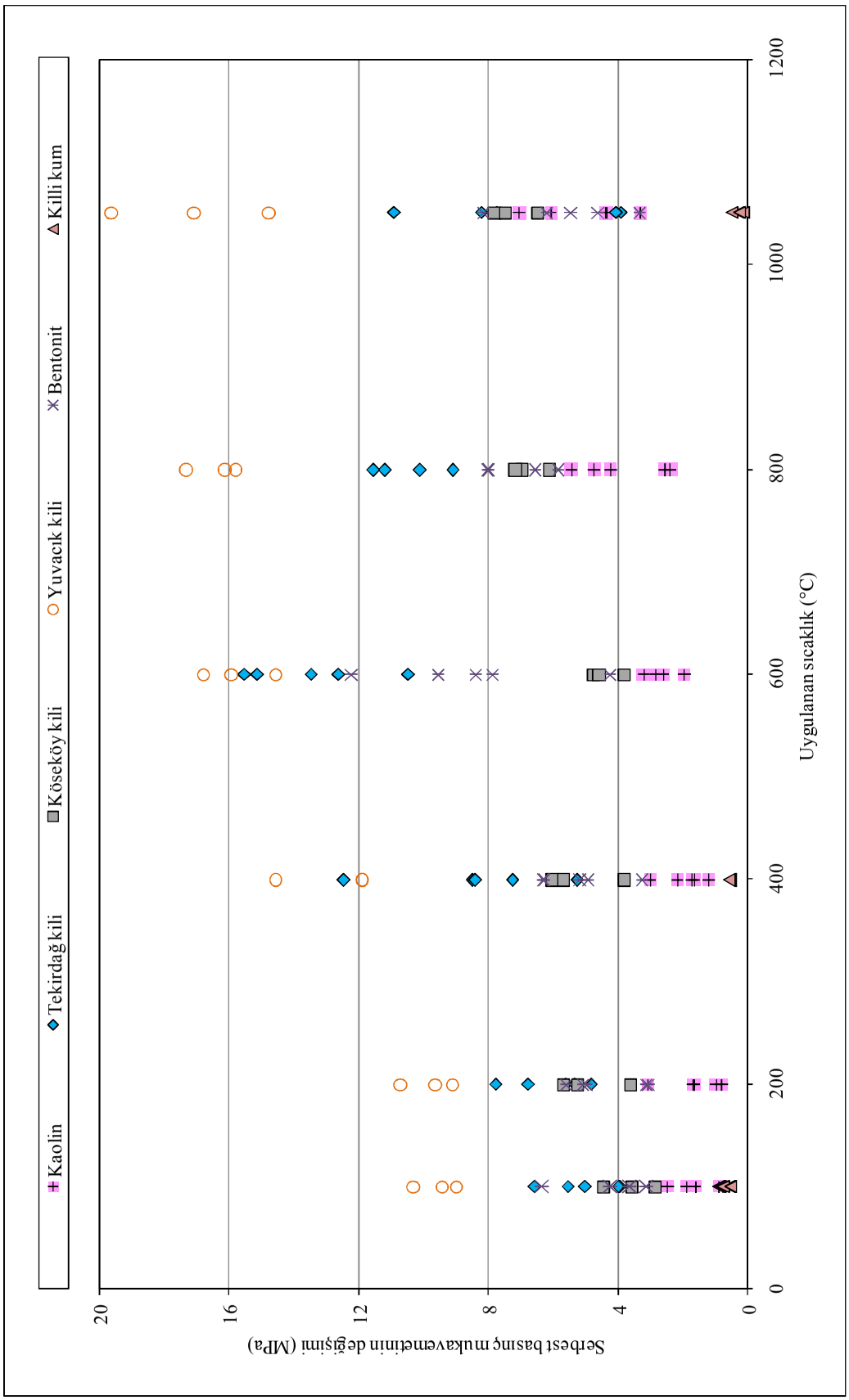
Sırayla kaolin ve Yuvacık kili numunelerinde serbest basınç mukavemeti artan sıcaklık etkisinde sürekli arttığı belirlenmiş olup mukavemet değerleri uygulanan sıcaklığın 1050 °C olduğu kademede, 5.02 MPa ve 17.16 MPa olarak belirlenmiştir. Tekirdağ ve bentonit killeri için serbest basınç mukavemeti, 600 °C'ye kadar artmış ve ardıl artan sıcaklık aşamalarında düşüşe geçmiştir, sırayla Tekirdağ ve bentonit killerinde 600 °C'de bu değişken, 13.44 MPa ve 8.44 MPa olarak tespit edilmiştir.

Köseköy kilinin artan sıcaklık uygulamalarına bakıldığında, 600 °C'deki uygulamasının haricinde sürekli olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu numune için 1050 °C sıcaklıkta belirlenen en büyük serbest basınç mukavemeti, 7.23 MPa olarak bulunmuştur. Diğer yandan, sadece üç farklı sıcaklık aşamasının uygulanmış olduğu killi kum numunesinde serbest basınç mukavemeti en yüksek, referans sıcaklığında gerçekleştiği belirlenmiş ve 0.71 MPa olarak tespit edilmiştir. Numunede daha sonraki iki sıcaklık aşaması için bu değişken, kademeli olarak düşmüştür.



Şekil 6.10: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında serbest basınç mukavemetinin değişimi

Üzerinde çalışmalar yürütülen bütün numunelerin etüv sıcaklığından başlanarak, 1050 °C sıcaklığa kadar kademeli olarak artarak sıcaklıklar uygulanmış durumları için ortalaması alınan her bir serbest basınç mukavemeti büyüklükleri, kendi aralarında kıyaslanabilmek üzere aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

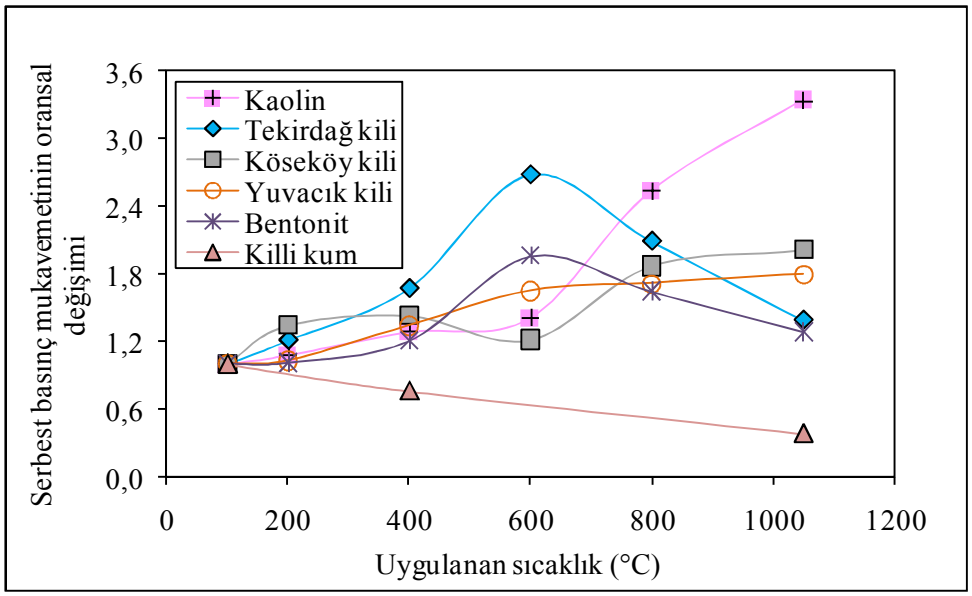


Şekil 6.11: Farklı sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti değişiminin numuneler arasında birlikte gösterimi

6.12. Serbest Basınç Mukavemetinin Oransal Değişimi

Numuneler arasında, serbest basınç mukavemetinin kademeli olarak artan sıcaklıklar etkisinde oransal değişimleri incelendiğinde, belirgin eğilimler gözlenmemiştir. Bir önceki maddeye benzer olarak, sırayla kaolin ve Yuvacık kili numunelerinin serbest basınç mukavemetinin oransal değişkenleri uygulanan sıcaklık ile sürekli artarak, 1050 °C'de, 3.35 ve 1.79 olarak hesaplanmıştır.

Uygulanan sıcaklığın, 600 °C olduğu kademede bu değişkenin en yüksek değerlerinin belirlendiği iki numune arasında olan, sırayla Tekirdağ ve bentonit killeri için 2.68 ve 1.95 olarak belirlenmiştir. 600 °C sıcaklığın dışındaki serbest basınç mukavemetinin oransal büyüklüğünün kademeli olarak sürekli arttığı Köseköy kilinde ise 1050 °C sıcaklıkta en yüksek, 2.01 olarak belirlenmiştir. Killi kum numunesinde, artan sıcaklık kademeleri için serbest basınç mukavemetinin oransal değişimi sürekli azalmış ve 1050 °C'de, 0.38 olarak tespit edilmiştir.



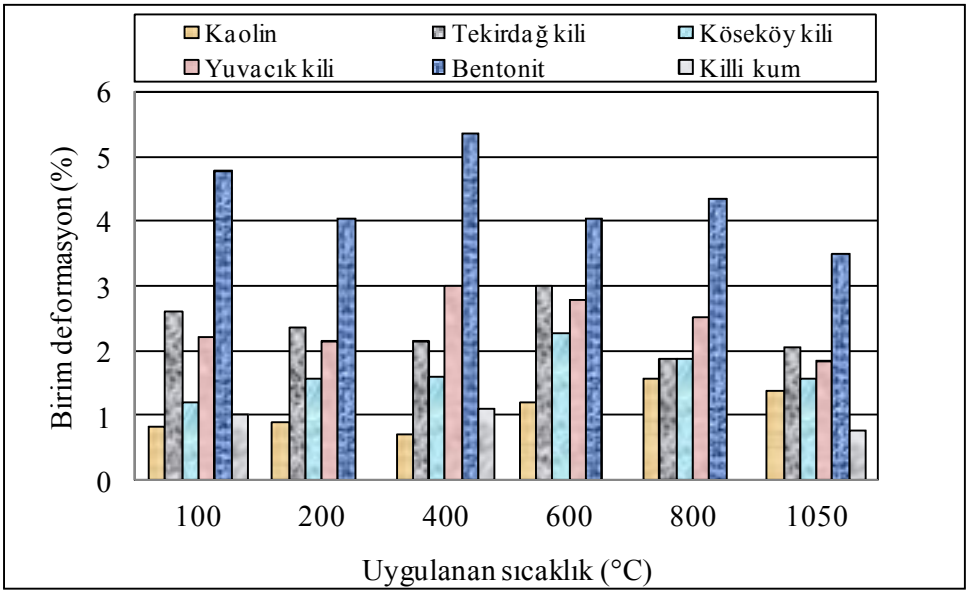
Şekil 6.12: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında serbest basınç mukavemetinin oransal değişimi

6.13. Birim Deformasyonun Değişimi

Numunelerin kırılma anında aldığı birim deformasyon değerlerinin, uygulanan yüksek sıcaklıklar etkisindeki değişimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Bu değişim incelendiğinde her bir numune için uygulanan farklı sıcaklıklarda birim deformasyon aralıkları önemli oranda değişmediği söylenilebilir. Ancak diğer yandan, numuneler arasında herhangi bir sıcaklık aşaması için göze çarpan deformasyon farklılıklarına sahip olduğunu belirtmekte yarar vardır.

Numunelerin kırılma anındaki en yüksek birim deformasyon bentonit numunesinde olduğu belirlenmiştir. Bu numunede, en büyük birim deformasyon 400 °C sıcaklıkta, %5.37 olduğu tespit edilmiştir. Kaolin numunesinin artan sıcaklık uygulamaları için 800 °C, en yüksek birim deformasyon değerinin elde edildiği kademe olup, %1.56 olarak hesaplanmıştır.

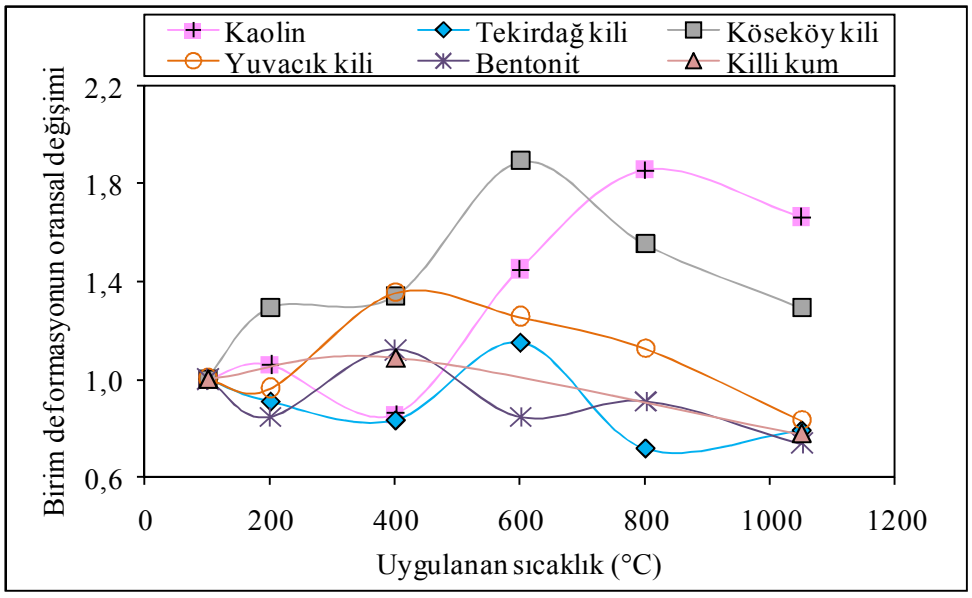
Sırayla Tekirdağ ve Köseköy kileri, 600 °C sıcaklık için en büyük birim deformasyonlar tespit edilirken bu birim deformasyon, %3.00 ve %2.29 olarak hesaplanmıştır. Uygulanan sıcaklığın 400 ° C olduğu kademede sırayla Yuvacık ve killi kum numunelerinde en yüksek birim deformasyon belirlenirken, %3.02 ve %1.11 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.13: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında birim deformasyonun değişimi

6.14. Birim Deformasyonun Oransal Değişimi

Birim deformasyon değişiminin oransal değişimine bakıldığında numuneler arasında düzenli bir eğilim gözlenmemektedir. Uygulanan sıcaklığın 600 °C olduğu kademe için en yüksek birim deformasyon oransal değerinin saptandığı sırayla Tekirdağ ve Köseköy killerinde bu değişken, 1.15 ve 1.89 olarak hesaplanmıştır. Sırayla Yuvacık ve bentonit killerinde bu değişken en büyük, 400 °C'de 1.35 ve 1.12 olarak hesaplanmıştır. Killi kum numunesinde bu değişken, sıcaklığın 400 °C olduğu aşamada en büyük olarak tespit edilmiş olup, 1.09 olarak hesaplanmıştır.

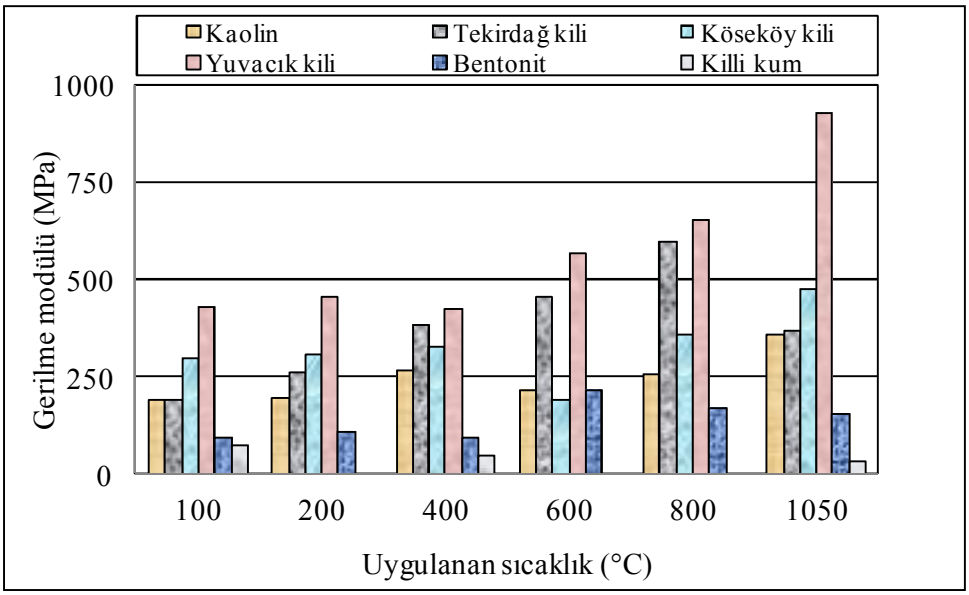


Şekil 6.14: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında birim deformasyonun oransal değişimi

6.15. Gerilme Modülünün Değişimi

Gerilme modülü numuneler arasında artan sıcaklık uygulamalarında farklılaşan eğilimler tespit edilmiştir. Kaolin numunesinde bu değişken en yüksek 1050 °C'de 358 MPa olarak hesaplanırken, uygulanan sıcaklığın 600 °C sıcaklık kademesi haricinde, sürekli arttığı Köseköy kilinde ise en yüksek 1050 °C sıcaklıkta, 467 MPa tespit edilmiştir. Tekirdağ kilinde bu değişken, 800 °C sıcaklıkta en yüksek olarak belirlenerek, 599 MPa olmuş ve sonraki sıcaklık kademesi için düşmüştür.

400 °C sıcaklık kademesinin dışındaki sıcaklık uygulamalarında bu değişkenin kademeli olarak arttığı Yuvacık kili numunesinde, en yüksek gerilme modülü 1050 °C sıcaklıkta 931 MPa olarak hesaplanmıştır. Bentonit numunesinde gerilme modülü, artan sıcaklık kademeleri için belirgin bir eğilim göstermemiş olup, en yüksek 600 °C'de, 215 MPa olarak belirlenmiştir. Uygulanan sıcaklık artışı ile bu değişkenin kademeli olarak azaldığı killi kum numunesi için en yüksek değeri, referans sıcaklıkta belirlenerek, 75 MPa olarak hesaplanmıştır.

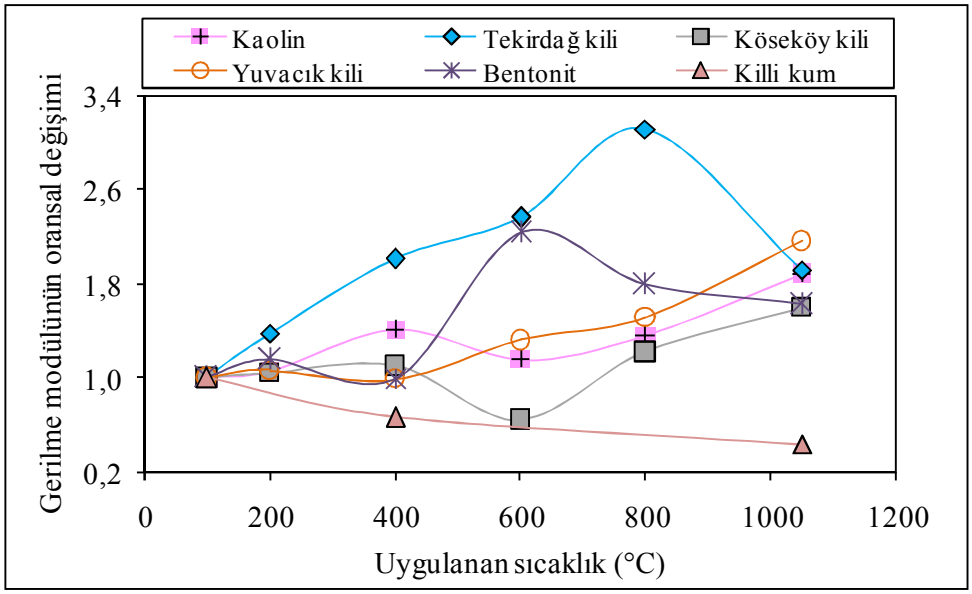


Şekil 6.15: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında gerilme modülünün değişimi

6.16. Gerilme Modülünün Oransal Değişimi

Bütün numunelerin kademeli olarak artan sıcaklık uygulamaları için numuneler arasında gerilme modülünün oransal olarak değişimine bakıldığında belirgin değişimler gözlenmemiştir. Kaolin numunesinde bu değişkenin, 400 ve 600 °C sıcaklık uygulamaları dışında artan bir eğilim gösterdiği belirlenirken, 1050 °C'de bu oransal değişken, 1.89 olarak hesaplanmıştır. Köseköy kilinde gerilme modülünün oransal büyüklüğünün, 600 °C sıcaklık kademesi dışında sürekli arttığı dikkate alınarak, 1050 °C'de 1.60 olarak hesaplanmıştır. Son sıcaklık uygulamasının dışındaki bu değişkenin sürekli arttığı Tekirdağ kili numunesinde, 800 °C için en yüksek olup, 3.11 olarak hesaplanmıştır.

Diğer yandan, 400 °C sıcaklık uygulamasının dışındaki artan sıcaklık kademeleri için sürekli arttığı Yuvacık kili numunesinde bu değişkenin en yüksek değeri, 1050 °C'de 2.16 olarak tespit edilmiştir. Gerilme modülünün oransal değişiminin düzenli olarak değişmediği bentonit numunesinde ise en yüksek 600 °C sıcaklık uygulamasında 2.24 olarak elde edilmiştir. Killi kum numunesinde ise artan sıcaklık uygulamaları için bu değişken sürekli azalarak, 100 °C sıcaklıkta, 1.00 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.16: Farklı sıcaklıklar için numuneler arasında gerilme modülünün oransal değişimi

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

- Yüksek sıcaklık uygulanan numunelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. Böylece ısıl işlem görmüş numunelerin farklı yüksek sıcaklık kademeleri uygulanmış hâldeki durumları için zemin özelliklerinin değişeceğini söylemek mümkündür. Yüksek sıcaklığın, yapılan deneysel çalışmalarda zemin özelliklerinin değişimi üzerinde etkili olduğu görülmüş ve tespit ediliştir.

- Yüksek sıcaklıkta bırakılan numunelerin mekanik özelliklerinde de önemli değişimler olduğu saptanmıştır. Gerçekleştirilen serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçlarından anlaşılacağı üzere, silt ve killi numunelerin 600, 800 ve 1050 °C sıcaklık uygulamaları için zemin numunesinden öte bir kaya numunesi gibi davranış gösterdiği belirlenmiştir.

- Numunelerin tespit edilen en yüksek ortalama serbest basınç mukavemeti uygulanan sıcaklıklarla birlikte, kaolin için 1050 °C'de 5.02 MPa, Tekirdağ kili için 600 °C'de 13.44 MPa, Köseköy kili için 1050 °C'de 7.23 MPa, Yuvacık kili için 1050 °C'de 17.16 MPa, bentonit için 600 °C'de 8.44 MPa, killi kum için 100 °C'de 0.71 MPa olarak tespit edilmiştir.

- Yürütülen deneysel çalışmalarda görüldüğü üzere, yüksek sıcaklık her bir kil numunesinin mukavemetini belirli bir sıcaklık kademesi için en yüksek yapmıştır. Diğer bir deyişle bir zeminin, zemin özelliklerine bağlı olarak belirli bir sıcaklıkta serbest basınç mukavemeti en yüksek değerine ulaşılır.

- Zeminlerin yüksek sıcaklık etkisinde bırakılarak iyileştirilmesi ancak killi zeminler için geçerli olduğu saptanmıştır. Killi kum numunesinin, artan sıcaklar

etkisinde bırakılması neticesinde serbest basınç dayanımı sıcaklığın artışı ile kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir.

- Gerçekleştirilen tüm serbest basınç mukavemeti deneylerinin büyüklüğü için değişen zemin özelliklerindeki numuneler, uygulanan farklı sıcaklık kademeleri, farklı ısıtma süreleri, numune yüzey görünümünün az yahut en az çatlaklı olması bakımından ele alınabilir. Numuneler arasında, bütün bu değişkenler göz önünde bulundurulduğunda, serbest basınç dayanım değeri en yüksek olarak Tekirdağ kili numunesinin, en az çatlaklı olarak hazırlanmış ve 600 °C'de 24 saat boyunca ısıl işlem görmüş numunelerinde belirlenmiş olup, 18.39 MPa olarak hesaplanmıştır.

- Yüzey görünümü açısından az ve en az çatlaklı olarak hazırlanan Tekirdağ kili numunelerinde, uygulanan artan yüksek sıcaklık kademeleri için serbest basınç mukavemetinde genel olarak önemli oranda değişimler olduğu saptanmıştır. En az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler, az çatlaklı olarak hazırlanan numuneler ile kıyaslandığında, serbest basınç dayanımı büyüklüklerinde 200 ve 400 °C sıcaklıklar için mühim değişimler belirlenmezken, 600 °C'de 1.37, 800 °C de 1.51 ve 1050 °C sıcaklıkta 1.64 kat artış olduğu tespit edilmiştir.

- Belirli bir sıcaklık kademesi için farklı ısıl işlem sürelerinin serbest basınç mukavemetine olan etkisinin araştırıldığı Köseköy ve Yuvacık killerinde önemli bulgular elde edilmiştir. Her iki numune için seçilen 800 °C sıcaklık uygulaması için 0.5, 1, 3, 6, 12, 24 saat süreleri boyunca ısıya tabii tutulmuştur. Köseköy kilinin sırayla en yüksek ve en düşük serbest basınç mukavemeti değerleri 3 ve 24 saatleri için 7.51 MPa, 6 saatte 6.72 MPa olarak tespit edilmiştir. Yine sırayla Yuvacık kilinde en yüksek ve en düşük serbest basınç mukavemeti 6 saatte 16.41 MPa, 1 saatte 10.20 MPa olarak tespit edilmiştir.

- İyileştirilmek istenen bir zemin numunesinin, optimal bir sıcaklık seviyesi olduğu gibi, optimal ısıtma süresi vardır. Bir kil numunesi için nasıl uygulanan sıcaklık seviyesini arttırmak serbest basınç mukavemetini arttırmayabilirse, uygulanan bir sıcaklık aşaması için ısıtma süresini arttırmak serbest basınç mukavemetini en büyük yapmayabilir.

- Isıl işlemin 3 ve 24 saat kademeli olarak artan yüksek sıcaklıklarında iyileştirilmiş numuneler arasında, su etkisinde kalıcı iyileştirmenin 600 °C sıcaklık uygulamasında sağlandığı belirlenmiştir.

- Deneyleri yapılan numunelerin yüksek sıcaklığa hazırlanma yönteminde, serbest basınç mukavemeti belirlenen bütün numuneler ilkin silindirik olarak hazırlanmış, ardından uygulanmak istenen sıcaklık için belirlenen sürede tutulmuştur. Bu çalışma için deneyleri gerçekleştirilen numunelerin bu şekilde ısıtma yönteminin seçilmesi arazide uygulanabilecek bir zemin iyileştirme uygulaması ile benzerlik göstereceği düşünülmektedir.

- Bu çalışma, killi zeminlerin yüksek sıcaklıklar etkisinde serbest basınç mukavemeti üzerine olan etkisini inceleyen Abu-Zreig ve diğ., (2001) yaptığı çalışmada izlenen yöntemden bütünüyle farklılık göstermektedir. Abu-Zreig ve diğ., toz hâlindeki kil numunelere sıkıştırma öncesinde kademeli olarak artan yüksek sıcaklıklar uygulamış, ardından sıkıştırarak serbest basınç mukavemetini belirlenmiştir. Toz hâlinde ısıtılan numunelerin serbest basınç mukavemeti 100, 200, 300 ve 400 °C kademeleri için sürekli olarak hızla azalmıştır. Bu hadiseyi, killerin toz hâlinde ısıtıldığında kayma direnci bileşenlerinden biri olan kohezyon özelliğini kaybetmesi ile açıklamak mümkün olmaktadır.

- Yüksek sıcaklık uygulanan bütün numunelerin test edilen zemin özellikleri, sıcaklık aşamasına bağlı olarak değişmiştir. Bu özelliklerin değişiminde göze çarpan en önemli hususlardan biri zeminlerin plastisite özelliklerindeki değişimdir. Bütün kil numuneleri sıcaklık uygulamasının 600 °C olduğu aşamada plastitisite özelliğini yitirmiş ve NP (Non-Plastic) davranış göstermiştir.

- Son yıllarda yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılan hafif agregaların üretilmesi de temelde bu esasa dayanmakta olup, yüksek sıcaklık etkisi ile malzeme ağırlığı azaltılmak ve dayanım özellikleri arttırılmaktadır. Üzerinde çalışılan bütün numunelerde, yüksek sıcaklığın artan bütün aşamaları için ağırlıklarında sürekli azalım olduğu belirlenmiştir. Bu ağırlık düşüşü, hafif agrega üretiminde karşılaşılan değişim ile benzerlik gösterdiğini belirtmekte fayda vardır.

- Kademeleri olarak artan sıcaklık seviyeleri için sıcaklığın artışına bağlı olarak genelde numunelerin özgül ağırlığı azalan yönde eğilim göstermiştir.

7.2. Öneriler

- Gerçekleştirilen laboratuar deneylerinde farklı yüksek sıcaklıklar uygulanan numunelerin, öncelikli olarak serbest basınç mukavemetinin ve belirlenen zemin özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Yine bu sıcaklıklar etkisinde zeminlerin konsolidasyon davranışı üzerine çalışmalar yürütülüp, ısıl etkilerin oturma hadisesi üzerinde nasıl etkilerinin olabileceği araştırılabilir.

- Zeminlerin iyileştirilmesinde amaçlanan hedeflerden biri permeabilite (geçirimlilik) olmaktadır. Zeminlerin suyu hızla geçirimliliği birçok durum için istenmektedir. Farklı yüksek sıcaklık ve sürelerde bırakılmış silindirik olarak hazırlanmış farklı kil kökenine sahip numuneler üzerinde minyatür bir permeabilite deney düzeneği kurularak, permeabilitenin değişimi incelenebilir. Böylece ısıl yöntemler uygulanmış numunelerin bu değişken için davranışı saptanmış olunur.

- Zeminlerin yüksek sıcaklıkta iyileştirilmesinin yer aldığı 2. Bölümde bu alanda şimdiye kadar yapılan bazı çalışmalar için ısıl etkilerin zeminler üzerinde fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişimi özetlenmiştir. Fiziksel özelliklerin değişimi ile bu tez çalışmasında yürütülen deney sonuçları incelendiğinde büyük benzerlikler gözlenmiştir. Ancak kimyasal özellikler ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında ısıl etkilerin killer üzerindeki değişimleri çoğunlukla seramik mühendisliği alanında mikroyapı analizleri ile incelenip, belirlenmiştir. Bu çalışma için zeminlerin ısıl etkiler neticesinde laboratuar imkânlarının sınırlılığı açısından inceleme yapılamamış olup, bu çalışmanın devamı olabilecek araştırmalarda mikroyapıya yönelik analizler ile fiziksel özelliklerin değişimi arasında ilişkiler kurulabilir.

- Yoğunluklu olarak, killi zeminlerin deneysel koşullarda iyileştirilebilirliğinin araştırıldığı bu çalışmanın bir başka aşaması arazi uygulamaları olabilir.

- Yüksek sıcaklık uygulamasının her zeminin kendine özgü özelliklerine bağlı olarak, optimal bir ısıtma sıcaklığı ve süresinin olduğu laboratuar deneyleri ile belirlenmişti. Başta arazide yüksek maliyetlere yol açacağı düşünülen yüksek sıcaklık ile zemin iyileştirmesinin, oysaki belirli bir zemin tipinin özellikleri dikkate alınıp, optimal sıcaklık kademesi ile ısıl işlem süresi belirlendiği taktirde, bu yöntemin arazide uygulanması ile ilgili ekonomik çözümler ortaya konulabilir.

KAYNAKLAR

1. Abu-Hamdeh N. H. and Reeder, R., ‘‘Soil Thermal Conductivity: Effects of Density, Moisture, Salt, Concentration and Organic Matter’’***Soil Science Society of America Journal***, 64, 1285-1290, (2000).

2. Abu-Hamdeh N. H., ‘‘Thermal Properties of Soils as Affected by Density and Water Content’’***Biosystems Engineering***, 86(1), 97-102, (2003).

3. Abu-Zreig M. M., Al-Akhras N. M., Attom M. F., ‘‘Influence of Heat Treatment on the Behaviour of Clayey Soils’’, ***Applied Clay Science***, 20, 129-135, (2001).

4. Andersland, O.B. and Ladanyi, B., “Physical and thermal properties”, ***An introduction to frozen ground engineering, Chapman and Hall***, New York, N.Y., 1-62. (1994).

5. Atagündüz G., ‘‘Isı Transferi’’, ***Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü***, Yayın No. 1, İzmir, 1-187, (1983).

6. Becker B. R., Misra A., Fricke B. A., ‘‘Devolepment of Correlations for Soil Thermal Conductivity’’, ***International Communications in Heat and Mass*** Transfer, 19, 59-68, (1992).

7. Bever L. D., Gardner W. H., Gardner W. R., ‘‘Soil Physics’’, 4th Edn., ***Wiley Eastern Limited***, New Delphi, (1976).

8. Beziat A., Dardaine M., Gabis B., ‘‘Effect of Compaction Pressure and Water Content on the Thermal Conductivity of Some Natural Clays., ***Clays and Clay Minerals***, 36(5), 462-466, (1988).

9. Bowles J. E., ‘‘Engineering Properties of Soils and Their Measurement’’, ***Irvine/McGraw-Hill Companies***, 1-164, (1992).

10. Cosenza P., Guerin R., Tabbagh A., ‘‘Relationship between Thermal Conductivity and Water Content of Soils Using Numerical Modeling’’, European Journal of Soil Science, 54, 81-587, (2003).

11. Dağsöz A. K., ‘‘Isı Geçişi’’, ***Birsen Kitabevi Yayınları***’’, İstanbul, 1-41, (1973).

12. De Vries D. A., ‘‘Thermal Properties of Soils’’, ***In: Physics of Plant Environment*** (Van WijkWR, ed), 210-235, North-Holland, Amsterdam, (1963).

13. Farouki O. T., ‘‘Ground Thermal Properties’’, ***ASCE***, New York, 186-203, (1985).

14. Farouki O.T., “Thermal properties of Soils”, ***Series on Rock and Soil Mechanics,*** 11, Transactions Tech.,136, (1986).

15. Fujii T., ‘‘The Practical Application of Thermal and Freezing Methods to Soil Stabilization’’, ***First Australia-New Zealand Conference on Geomechanics***, Melbourne, 337-347, (1971).

16. Günal A. Y., ‘‘Killi Zeminlerin Isıl Özellikleri’’, Yüksek lisans tezi, ***Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, 44-65, (2001).

17. Hausmann M. R., ‘‘Engineering Principles of Ground Modification’’, ***Mc Graw-Hill Publishing Company***, 385, (1990).

18. Hâjpal M., Török Á, ‘‘Petrophysical and Mineralogical Studies of Burnt Sandstones’’, ***2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering***, Budapest, Hungary, (1998).

19. Irvine L. R., ‘‘Road Making by Heat Treatment of Soils’’***Trans. Institution of Engineers***, 405-416, (1930).

20. Johansen O, ‘‘Thermal Conductivity of Soils’’, ***Ph.D. Thesis,*** Trondheim, Norway, (CRREL Draft Translation 637, 1977). (1975).

21. Jordan M. M., Montero M. A., Meseguer S., Sanfeliu T., ‘‘Influence of Firing Temperature and Mineralogical Composition on Bending Strength and Porosity of Ceramic Tile Bodies’’, ***Applied Clay Science***, 42, 266-271, (2008).

22. Joshi R., Gopal A., Horsfield D., Nagaraj T. J., ***Geotechnical Engineering***, 120, 1080-1089, (1994).

23. Kalkan E., Bayraktutan M. S., ‘‘Geotechnical Evaluation of Turkish Clay Deposits: a Case Study in Northern Turkey’’, ***Enviromental Geology***, 14, 937-950, (2007).

24. Kersten M. S., ‘‘Laboratory Research for the Determination of the Thermal Properties of Soils’’, ACFEL, Technical Report 23, AD 712516, (1949).

25. Khalfaouni A., Kacim S., Hajjaji M., ‘‘Sintering Mechanism and Ceramic Phases of an İllitic-Chloritic Raw Cla***y***’’, ***Journal of the European Ceramic Society***, 26, 161-167, (2006).

26. Lee V.-G., Yeh T.-H., ‘‘Sintering Effects on the Development of Mechanical Properties of Fired Clay Ceramics’’, ***Materials Science & Engineering***, 485, 5-12, (2008).

27. Mayne P. W., Burns S. E., Circeo L. J., ‘‘High Temperature Magmavication of Geomaterials by Nontransferred Plasma Arc’’, ***Geotechnical and Geoenvironmental Enginnering,*** 126(5), 387-396, (2000).

28. Martín-Márquez J., Ma Rinco’n J., Romero M., ‘’Effect of Firing Temperature on Sintering of Porcelain Stoneware Tiles, ***Ceramics International***, 34, 1867-1873, (2007).

29. Martin A. I., ‘‘Hydrate Bearing Sediments – Thermal Conductivity’’, Thesis of Master, ***Master of Science in Civil and Enviromental Engineering***, Georgian Institute of Technology, USA, (2004).

30. Mbumbia L., Mertens de Wilmars A., Tirlocq J., ‘‘Performance Characteristics of Lateritic Soil Bricks Fired at Low Temperatıres: A Case Study of Cameron’’, ***Construction and Building Meterials***, 14, 121-131, (2000).

31. McDowell C., ‘‘Stabilization of soils with lime, lime/fly ash and other lime reactive materials’’, ***Highway Research Board***, Bulletin 231, 60-66, (1959).

32. Merino I., Arévalo L. F., Romero F., ‘‘Preparation and Characterization of Ceramic Products by Thermal Treatment of Sewage Sludge Ashes Mixed with Different Additives’’, ***Waste and Management***, 27, 1829-1844, (2006).

33. Mitchell J. K., ‘‘Temperature Effects on the Engineering Properties and Behaviour of Soils’’, ***Highway Research Board, Special Report 103***, 9-28, Washington, DC, (1969).

34. Molindo W. A. and Alile O. M. ‘‘Evaluation of the Thermal Conductivity of Soils in Edo State’’, ***Journal of Applied Scientific***, 7 (4), 519-522, (2007).

35. Monteiro S. N., Alexandre J., Margem J. I., Sáncez R., Vieria C. M. F., ″Incorporation of Sludge Waste from Water Treatment Plant into Red Ceramic’’, ***Construction and Building Materials***, 22, 1281-1287, (2008).

36. Ochsner T. E., Horton R., Ren T., ‘‘A New Perspective on Soil Thermal Properties’’, ***Soil Science Society of America Journal***, 65, 1641-1647, (2001).

37. Okwueze E. E., ‘‘Assesment of near Surface Ground Water Resource within the Eastern Niger Delta’’, ***Global J. Pure Applied Science***, 2, 210-221, (1996).

38. Önalp A., ‘‘Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği’’, ***Birsen Kitabevi***, 58-114, (2002).

39. Pande R. N., Gori F., ‘‘Effective Media Formation and Conduction Through Unsaturated Granular Materials’’, International Journal Heat Mass Transfer’’, 30(5), 993-1000, (1986).

40. Peters-Lidard C. D., Blackburn E., Liang X., Wood E. F., ‘‘The Effect of Soil Thermal Conductivity Parameterization on Surface Energy Fluxes and Temperature’’, ***Journal of the Atmospheric Science***, 55(7), 1209-1224, (1998).

41. Rawls W. J., Brakensiek D. L., Saxton K. E., ‘‘Estimation of Soil Water Properties’’, ***Transactions American Society Agricultural Engineers***, 25, 1316-1320, (1998).

42. Sherrard H. R., Australian Road Practice, ***Melbourne University Press***, (1958).

43. Tan Ö., Yılmaz L., Zaimoğlu A. Ş., ‘‘Variation of Some Engineering Properties of Clays with Heat Treatment’’, ***Materials Letters***, 58, 1176-1179, (2003).

44. Tarnawski V. R., Leong W. H., Gori F., Buchan G. D., Sundberg J., ‘‘Interparticle Contact Heat Transfer in Soil System at Moderate Temperatures’’***International Journal of Energy Research***, 26, 1345-1358, (2002).

45. Thalmann R. E., ‘‘Thermal Conductivity of Dry Soils’’, ***M. S. Thesis Dissertation***, University of Kansas, (1950).

46. Török Á., Hâjpal M., ‘‘Effect of Temperature Changes on the Mineralogy and Physical Properties of Sandstones. A Laboratory Study’’, ***Restoration of Buildings and Monuments***, 11, 1-8, Budapest, Hungary, (2005).

47. Wakao N., Kato K., ‘‘Effective Thermal Conductivity of Packed Beds’’, ***Journal of Chemical Engineering of Japan***, 2(1), 24-33, (1969).

48. Wierenga P. J., Nielsen D. R., Hagan R. M., ‘‘Thermal Properties of Soil Based upon Field and Laboratory Measurements’’, ***Soil Society of America Proceedings***, 33, 354-360, (1969).

49. Wilson S. D., ‘‘Small Compaction Apparatus Duplicates Field Result Closely’’, Enginnering News-Record, 34-36, (1950).

50. Yadav M. R., Saxena G. S., ‘‘Effect of Compaction and Moisture Content on Specific Heat and Thermal Capacity of Soils’’, ***Journal of Indian Society of Soil Science***, 21, 129-132, (1973).

51. Yong M. W., ‘‘Extreme Geotechnical Response To High Heat From Tunnel Fires’’, Master Thesis, ***Faculty of the Graduate School of the University of Maryland***, USA, 1-2, (2004).

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Adana'nın Ceyhan ilçesinde doğdu. İlk ve ortaöğrenimi İmamoğlu ilçesinde tamamladı. 2002 yılında Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı, 2006 yılında mezun oldu. Yine aynı yıl bu bölümde yüksek lisansa kabul edildi, normal yüksek lisans süresi boyunca yürütücülüğünü tez danışmanı hocasının üstlendiği ''İleri Teknoloji İle Zemin Su Muhtevasının Belirlenmesinin Geoteknik Mühendisliğine Getireceği İnovasyonların İrdelenmesi'' konulu, TÜBİTAK 106M231 numaralı araştırma projesinde bursiyer olarak görev aldı. Yazar, şu anda özel bir kurumda inşaat mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.