



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**KİLLİ ZEMİNLERİN KİREÇ İLE STABİLİZASYONUNA SÜLFAT
İÇERİĞİNİN ETKİSİ**

Nashat SARIKAHYA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. İlknur BOZBEY**

**II. DANIŞMAN
Doç. Dr. Paul BEETHAM**

Haziran, 2023

İSTANBUL

TEZ KABUL VE ONAYI

Nashat SARIKAHYA tarafından, **Prof. Dr. İlknur BOZBEY** danışmanlığında hazırlanan "**KİLLİ ZEMİNLERİN KİREÇ ile STABİLİZASYONUNA SÜLFAT İÇERİĞİNİN ETKİSİ**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **23/06/2023** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

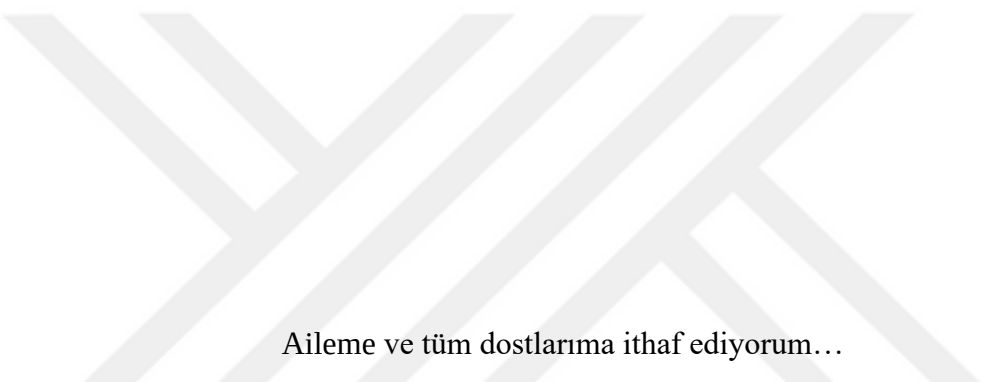
	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. İlknur BOZBEY	☒
	İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa	Kabul
	İnşaat Mühendisliği Bölümü	☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Safiye Feyza ÇİNİCİOĞLU	☒
	Özyeğin Üniversitesi	Kabul
	İnşaat Mühendisliği Bölümü	☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Aykut ŞENOL	☒
	İstanbul Teknik Üniversitesi	Kabul
	İnşaat Mühendisliği Bölümü	☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK	☒
	İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa	Kabul
	İnşaat Mühendisliği Bölümü	☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER	☒
	Yıldız Teknik Üniversitesi	Kabul
	İnşaat Mühendisliği Bölümü	☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Nashat SARIKAHYA

(İmza)



Aileme ve tüm dostlarıma ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

KİLLİ ZEMİNLERİN KİREÇ İLE STABİLİZASYONUNA SÜLFAT İÇERİĞİNİN ETKİSİ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 27090

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin hazırlanmasında bana her konuda yardımcı olan, yönlendiren her türlü deneyimini benimle paylaşan Sayın Danışman Hocam Prof. Dr. İlknur BOZBEY'e çok teşekkür ederim.

Tez izleme toplantılarında fikirlerini benden esirgemeyen, fikirleriyle yol gösteren ve tezime katkı sağlayan Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU ve Prof. Dr. Aykut ŞENOL'a teşekkürlerimi sunarım. Jüri üyeleri Prof. Dr. Sadık Öztoprak ve Doç. Dr. Pelin Tohumcu Özener'e katkıları için teşekkür ederim.

Tez çalışması sırasında kimyasal analizlerde gerekli yardımı yapan ve en büyük desteği gösteren değerli hocam Prof. Dr. Namık AYSAL'a ve İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Jeoloji Bölümü X-Ray Analiz Laboratuvarı ve Jeokronoloji ve Jeokimya Laboratuvarı'nda görev yapan Dr. Fatma Şişman Tükel, Astronom Ersin Kaygısız ve Jeoloji Yüksek Mühendisi Fulya Uzun'a teşekkür ederim.

Çalışmam süresince benden yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen sevgili hocam Doç. Dr. Cihan ÖSER ve Arş. Gör. Dr. Sinan SARĞIN'a teşekkür ederim. Sevgili çalışma arkadaşlarım Arş.Gör. Fatma Tuğçe ÇINAR ve İnşaat Yüksek Mühendisi Hossein ZORIYEH ALIGHOLI 'a teşekkür ederim. Doktora öğrenimimde emeği geçen laboratuvar teknisyeni Oğuz FİRİDİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatımın her anında hep yanımda olan desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili annem İbtesam ALKUTUB'a, sevgili babam Asım SARIKAHYA'a ve abim Timur SARIKAHYA'a ve ablam Bayan SARIKAHYA'a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ.....	xiv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	3
2.1. KİLLERİN KİREÇ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ VE OLUŞAN REAKSİYONLAR.....	3
2.2. ZEMİNLERDE SÜLFAT İÇERİĞİ	5
2.3. ETRİNJİT TANIMI VE OLUŞUMU	8
2.4. ETRİNJİT OLUŞUMUNUN YARATTIĞI HASARLAR.....	14
2.5. ETRİNJİT OLUŞUMUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLER	16
2.6. ETRİNJİTİN OLUŞMASI İÇİN GEREKLİ OLAN SÜLFAT MİKTARI	17
2.7. ETRİNJİT OLUŞUMUNA DAİR LABORATUVAR VE ARAZİ ÇALIŞMALARINDA ELDE EDİLEN BULGULAR	18
3. YÖNTEM	26
3.1. MONTMORİLLONİT KİL İLE YAPILAN DENEYLER	27
3.1.1. Montmorillonit Kili ve Kirecin Özellikleri	27
3.1.2. Sülfat Kaynağı ve Miktarı	29
3.1.3. Deneyler	30
3.2. KAOLİN TİPİ KİL İLE YAPILAN DENEYLER	32
3.3. CHINAFİLL VE K-BRITE KAOLİNİ İLE YAPILAN DENEME DENEYLERİ.....	33
3.4. ÖZEL OLARAK TEMİN EDİLEN İKİ TİP KAOLİN İLE YAPILAN ANA DENEYLER	35
3.4.1. Chinafill ve K-Brite Killerinin Özellikleri	35
3.4.2. Sülfat Kaynağı.....	38
3.4.3. Chinafill ve K-Brite İle Yapılan Şişme Deneyleri	39
3.4.4. Sıkıştırma Su Muhtevasının Etkisi	40

3.4.5. Olgunlaştırma Süresinin Etkisinin İncelenmesi	40
3.4.6. Soğutucuda Kür Yapılmasının Etkisi	40
3.5. BÜYÜK NUMUNELER ÜZERİNDE YAPILAN DENEYLER	41
3.6. ETRİNJİTE BAĞLI ŞİŞMEYİ ENGELLEMEK İÇİN YENİ BİR ÖNERİ YAPILMASI.....	46
3.7. KİMYASAL ANALİZLER	46
3.7.1. XRD Analizi.....	46
3.7.2. SEM Analizleri.....	48
3.7.3. ICP-MS ve ICP OES Analizi	50
3.8. ŞİŞME BASINCI ÖLÇÜMLERİ	51
4. BULGULAR	53
4.1. MONTMORİLLONİTE KİLİ SONUÇLARI	53
4.1.1. Montmorillonit Kili İçin Şişme Deney Sonuçları	53
4.1.2. Montmorillonit Kili ile Hazırlanan Numunelerde Mukavemet Deney Sonuçları...	53
4.2. KAOLİN KİLİ SONUÇLARI	60
4.3. KAOLİN VE MONTMORİLLONİTE KİLİNE KUM İLAVE EDİLEREK YAPILAN DENEYLER	60
4.4. CHINAFİLL VE K-BRITE İLE YAPILAN DENEME DENEYLERİNİN SONUÇLARI.....	62
4.4.1. Konsolidasyon Deney Aletinde Yapılan Ölçümler	62
4.4.2. Büyük Numuneler Üzerinde Yapılan İlk Deneyler.....	63
4.5. CHINAFİLL VE K-BRITE İLE YAPILAN DENEY SONUÇLARI	68
4.5.1. Chinafill Kili İle Elde Edilen Sonuçlar	68
4.5.2. K-Brite Kaolini İle Yapılan Konsolidasyon Deneyleri	82
4.5.2.1 Su muhtevası etkisi	85
4.5.2.2. Olgunlaştırma etkisi	86
4.5.3. Her İki Kil için Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması	92
4.6. SERBEST ŞİŞME DENEYLERİNİN SONUÇLARI	93
4.6.1. Chinafill ile Yapılan Serbest Şişme Deneylerinin Sonuçları	94
4.6.2. K-Brite ile Yapılan Serbest Şişme Deneylerinin Detaylı Değerlendirmesi	101
4.7. BÜYÜK VE KÜÇÜK NUMUNELERDE ELDE EDİLEN DEĞERLERİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	105
4.8. BÜYÜK NUMUNELER İÇİN HER İKİ KİL BAKIMINDAN YAPILAN DEĞERLENDİRMELER (HACİMSSEL ŞİŞME VE ÇATLAK ORANI BAKIMINDAN KARŞILAŞTIRMA).....	108
4.9. ŞİŞME BASINCI DEĞERLERİ	110

4.10. ÖNERİLEN YENİ İYİLEŞTİRME YÖNTEMİNİN SONUÇLARI	112
4.11. KİMYASAL ANALİZLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	113
4.11.1. XRD Analizleri	113
4.11.2. ICP Analizleri.....	117
4.11.3. SEM Sonuçları	120
5. TARTIŞMA.....	123
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	125
KAYNAKLAR.....	129
EKLER	135
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	184
ETİK KURUL İZİN YAZISI	186
ÖZGEÇMİŞ	188

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Kireçle stabilize edilmiş kil zeminde bir çimentolu matris gelişimi (Locat ve diğ. 1990).....	5
Şekil 2.2: Jips ve doğal formunda sodyum sülfat (Talluri, 2013).	6
Şekil 2.3: Kurumuş kildeki sülfat kristal oluşumları. (TDOT, 2005).	7
Şekil 2.4: Etrinjit ve taumasitin mikroyapıda görünümü (URL 1).....	8
Şekil 2.5: Etrinjit kristali (URL 2).....	8
Şekil 2.6: Etrinjitin mineral yapısının şeması (Puppala ve diğ,2018).	10
Şekil 2.7: Etrinjit mineralinin (a) sülfat iyonlarını tutan sütunlar ile (b) kalsiyum ve su molekülleri olmayan alüminyum polihedra sütunu arasındaki kanalları gösteren şematik diyagramları (Myneni ve diğ., 1997).....	12
Şekil 2.8: Etrinjitin neden olduğu hacim değişikliğinin molar hacim yolu ile gösterilmesi. (Little ve diğ., 2010).	14
Şekil 2.9: Yolda oluşan kabarma ((Petry, 1992).	14
Şekil 2.10: Etrinjit oluşumunun verdiği hasarlar (TDOT, 2000).	15
Şekil 2.11: Sülfat içeren zeminlerde kireç ile iyileştirmeye yönelik prosedür, (TDOT, 2005).	22
Şekil 3.1: Araziden getirilen kil.....	27
Şekil 3.2: Alçıtaşı ve sodyum sülfatın granülometri.	29
Şekil 3.3: Kompaksiyon eğrileri.....	31
Şekil 3.4: Sıkıştırma kalıplarında hazırlanan numuneler.	31
Şekil 3.5: Numuneler için kullanılan kür ortamı.	32
Şekil 3.6: Mukavemet deneyleri için doymuş kum ortamı içerisinde bırakılmış montmorillonit kili numuneleri.....	32
Şekil 3.7: Satın alınan iki tip kaolin.	34
Şekil 3.8: Chinafill kaolini için elde edilen XRD analizi kırınım deseni ve mineral birlikteliği.	38
Şekil 3.9: K-Brite kaolini için elde edilen XRD analizi kırınım deseni ve mineral birlikteliği.	38
Şekil 3.10: Sülfatın deneylerden önce öğütülmesi.	39
Şekil 3.11: Laboratuvarda bulunan iklimlendirme dolabı.	41
Şekil 3.12: Büyük numunelerin doymuş hale getirilmesi için kullanılan kovalar.	42
Şekil 3.13: Ocak 2020 ayında Avcılar'da ölçülen sıcaklıklar.	42
Şekil 3.14: Laboratuvar dışında küre bırakılan numuneler.	43
Şekil 3.15: Fotoğraf çekme sistemi.	44
Şekil 3.16: Digimizerde izlenen hesap adımları.	44
Şekil 3.17: Philips PW 1700 XRD cihazı gonyometre ve numune haznesi.	47
Şekil 3.18: XRD analizi için numune hazırlaması ve cihaza yerleşmesi.	48
Şekil 3.19: ESEM analizi için epoksi ve altın ile kaplanmış numuneler.....	49

Şekil 3.20: SEM Analiz cihazı.	49
Şekil 3.21: Perkin Elmer NexION 200B (ICP-MS cihazı) ESI NWR 213 (LA cihazı).	51
Şekil 3.22: Avio 2000 (ICP-OES cihazı).	51
Şekil 4.1: Montmorillonit kili için yapılan şişme ölçümleri.	53
Şekil 4.2: %4 kireç ve 56 gün kür sonrası dayanım değerleri.	54
Şekil 4.3: %4 kireç ve bir yıl kür sonrası dayanım değerleri.	55
Şekil 4.4: %7 kireç ve 56 gün kür sonrası dayanım değerleri.	56
Şekil 4.5: %7 kireç ve bir yıl kür sonrası dayanım değerleri.	57
Şekil 4.6: Suya maruz kalmayan (kuru) ve suya maruz kalan numunelerde deney sonu su muhtevası-mukavemet ilişkisi.	58
Şekil 4.7: Kaolin kili ile elde edilen şişme değerleri.	60
Şekil 4.8: Farklı kum yüzdelğinde kaolin kili numunelerinde konsolidasyon aletinde gözlenen şişme davranışı (%3.5 kalsiyum veya %3.5 sodyum sülfat).	61
Şekil 4.9: Montmorillonit ve kum karışımında elde edilen değerler.	62
Şekil 4.10: Chinafill ile yapılan deneme deneyleri.	63
Şekil 4.11: Farklı kum yüzdelğinde serbest şişme deneyleri a) %25 Chinafill, %4 kireçli, %3.5 sodyum sülfat b) %50 Chinafill, %4 kireçli, %3.5 sodyum sülfat.	64
Şekil 4.12: %75 K-Brite-%25 kum - %4 kireç - % 3.5 kalsiyum sülfat (optimum) ve 3 gün kür.	64
Şekil 4.13: %75 K-Brite - %25 kum- %4 kireç - % 5 kalsiyum sülfat (optimum) ve 3 gün kür.	64
Şekil 4.14: %75 K-Brite - %25 kum- %4 kireç - %10 kalsiyum sülfat (optimum) ve 3 gün kür.	65
Şekil 4.15: Chinafill - %25 kum- %4 kireç- % 3.5 kalsiyum sülfat- (optimum) ve 28 gün kür.	65
Şekil 4.16: %75 Chinafill - %25 kum - %4 kireç - % 5 kalsiyum sülfat (optimum) ve 28 gün kür.	65
Şekil 4.17: %75 Chinafill -%25 kum - %4 kireç - %10 kalsiyum sülfat (optimum) ve 28 gün kür.	65
Şekil 4.18: %25 Chinafill -%75 kum - %4 kireç - %3.5 kalsiyum sülfat (optimum) ve 28 gün kür.	66
Şekil 4.19: %25 Chinafill - %75 kum -%4 kireç- %5 kalsiyum sülfat (optimum) ve 28 gün kür.	66
Şekil 4.20: %25 Chinafill - %75 kum -%4 kireç- %10 kalsiyum sülfat (optimum) ve 28 gün kür.	66
Şekil 4.21: Serbest şişme numunelerinde çatlak seviyesi puanı ve şişme korelasyonu.	68
Şekil 4.22: Chinafill kaolini için konsolidasyon aletinde ölçülen şişme değerleri.	69
Şekil 4.23: Chinafill kili için şişme hızının değişimi.	70
Şekil 4.24: Chinafill kili için şişme hızlarının karşılaştırılması.	72
Şekil 4.25: Chinafill kili için normal kür uygulanan numuneler için kür süresinin etkisi.	73
Şekil 4.26: Chinafill kili için normal kür yapılan numuneler için su muhtevasının etkisi.	73
Şekil 4.27: Chinafill için “Su muhtevası etkisi puanı” değişimi.	75
Şekil 4.28: Chinafill kili için olgunlaştırma süresi uygulanan numunelerde şişme davranışı.	76
Şekil 4.29: Chinafill kili için olgunlaştırma süresi uygulamanın farklı sülfat oranları bakımından etkisi.	76
Şekil 4.30: Chinafill için olgunlaştırma yapılmasının şişme hızına etkisi.	77

Şekil 4.31: Chinafill kili için “Olgunlaştırmaya göre şişme puanı” değişimi.	78
Şekil 4.32: Chinafill kili için şişme yüzdeleri üzerinde soğutucu kür ortamının etkisi.....	78
Şekil 4.33: Chinafill kili için soğutucu kür ortamının şişme hızına etkisi.	79
Şekil 4.34: Chinafill kili için soğutucu ortam kürüne göre şişme puanının değerlendirilmesi.	80
Şekil 4.35: Chinafill kili için kuru tarafta sıkıştırılan numuneler için şişme hızlarının karşılaştırılması.....	81
Şekil 4.36: Chinafill kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler için şişme hızlarının karşılaştırılması.	81
Şekil 4.37: Chinafill kili için kuru ve optimum numuneleri için “Şişme tamamlanma oranı, ŞTO” karşılaştırılması.	82
Şekil 4.38: K-Brite kaolini için konsolidasyon aletinde ölçülen şişme değerleri.....	83
Şekil 4.39: K-Brite kaolini için şişme hızları.	84
Şekil 4.40: K-Brite için farklı jips seviyelerinde sıkıştırma su muhtevası etkisi.	86
Şekil 4.41: K-Brite kili için “Su muhtevası etkisi puanı” değerlendirmesi.....	86
Şekil 4.42: K-Brite kili için olgunlaştırmanın şişme yüzdesine etkisi.	87
Şekil 4.43: K-Brite kili için olgunlaştırmanın şişme hızına etkisi.....	87
Şekil 4.44: K-Brite kili için farklı jips seviyelerinde şişme yüzdeleri.....	88
Şekil 4.45: K-Brite kili için “Olgunlaştırmaya göre şişme puanı” değerlendirilmesi.	89
Şekil 4.46: K-Brite için soğutucu ortam kürü etkisi.....	89
Şekil 4.47: K-Brite kili için “soğutucu ortam kürüne göre şişme puanı” değişimi.	90
Şekil 4.48: K-Brite kili için kuru tarafta sıkıştırılan numuneler için şişme hızlarının karşılaştırılması.....	91
Şekil 4.49: K-Brite kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler için şişme hızlarının karşılaştırılması.	91
Şekil 4.50: Kuru ve optimumda sıkıştırılan K-Brite numuneleri için şişme hızlarının karşılaştırılması.....	92
Şekil 4.51: Chinafill ve K-Brite killeri için konsolidasyon deney aletinde ölçülen şişme değerlerinin karşılaştırılması.	93
Şekil 4.52: Bazı numuneler için görüntü analiz sonuçları.....	94
Şekil 4.53: Chinafill kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.	95
Şekil 4.54: Chinafill kili için kuru su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.	96
Şekil 4.55: Chinafill kili için ıslak su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.	96
Şekil 4.56: Chinafill kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan ve dışarıda yapılan soğuk kür ortamında kalan numunelerde yapılan ölçümler.	97
Şekil 4.57: Chinafill kili için kuru su muhtevasında sıkıştırılan ve soğutucu kür ortamından kalan numunelerde yapılan ölçümler.....	98
Şekil 4.58: Chinafill kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan soğutucu kür ortamında kalan numunelerde yapılan ölçümler.....	99
Şekil 4.59: Chinafill kili için büyük numunelerde ölçülen şişme değerleri.	100
Şekil 4.60: Chinafill kili için farklı jips yüzdeleri için hacimsal şişme ve çatlak oranı değerlerinin karşılaştırılması.	101
Şekil 4.61: K-Brite kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.	102

Şekil 4.62: K-Brite kili için kuru su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.	102
Şekil 4.63: K-Brite kili için optimum muhtevasında sıkıştırılan ve 2 yıl süre ile küre maruz kalan numunelerde yapılan ölçümler.	103
Şekil 4.64: K-Brite kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan ve soğuk kür ortamına maruz kalan numunelerde yapılan ölçümler.	103
Şekil 4.65: K-Brite kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan ve dışarıda soğuk kür ortamına maruz kalan numunelerde yapılan ölçümler.	104
Şekil 4.66: K-Brite kili için kuru su muhtevasında sıkıştırılan ve dışarıda yapılan soğuk kür ortamına maruz kalan numunelerde yapılan ölçümler.	104
Şekil 4.67: K-Brite kili için büyük numunelerde ölçülen serbest şişme deney sonuçları.	105
Şekil 4.68: Chinafill kili için sonuçların karşılaştırılması.	106
Şekil 4.69: K-Brite kili için sonuçların karşılaştırılması.	106
Şekil 4.70: Chinafill ve K-Brite numunelerinin hacimsal şişme ve çatlak oranı bakımından karşılaştırılması.	108
Şekil 4.71: Chinafill ve K-Brite kaolin numunelerin yatay şişme ve çatlak oranı bakımından karşılaştırılması.	109
Şekil 4.72: Chinafill ve K-Brite kaolin numunelerin düşey şişme ve çatlak oranı bakımından karşılaştırılması.	109
Şekil 4.73: Jips yüzdesi ve şişme basıncı arasındaki ilişki.	111
Şekil 4.74: Şişme yüzdesi ve şişme basıncı arasındaki ilişki.	111
Şekil 4.75: Önerilen yöntemin şişme değerleri üzerindeki etkisi.	113
Şekil 4.76: Karşılaştırmalı XRD sonuçları.	114
Şekil 4.77: Her iki kildeki Al_2O_3 değerleri.	118
Şekil 4.78: Her iki kildeki SO_3 değerleri.	118
Şekil 4.79: Çözünen sülfat-su muhtevası ilişkisi.	119
Şekil 4.80: C23, Chinafill, serbest şişme numunesi, %3.5 kalsiyum sülfat, Kuru, Normal kür, 28 gün kür.	120
Şekil 4.81: C24, Chinafill, serbest şişme numunesi, %5 kalsiyum sülfat, Kuru, Normal kür, 28 gün kür.	121
Şekil 4.82: B78, K-Brite, serbest şişme numunesi, %5 kalsiyum sülfat, kuru, normal kür, 28 gün kür.	121
Şekil 4.83: Y01, K-Brite, serbest şişme numunesi, % 5 kalsiyum sülfat, optimum, önerilen iyileştirme yöntemi, normal kür, 28 gün kür.	122

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Etrinjit oluşumu için moleküler hacim değerleri (Little ve diğ. 2010).	13
Tablo 3.1: Montmorillonit tip kilin özellikleri.	28
Tablo 3.2: Kirecin (CL80) kimyasal ve fiziksel özellikleri.(URL 3)	28
Tablo 3.3: Kum ilave edilen kaolin için kompaksiyon deney sonuçları.	33
Tablo 3.4: Chinafill kaolin kili fiziksel özellikleri.	35
Tablo 3.5: Chinafill kaolin kili dane büyüklüğü ile ilgili özellikler.	35
Tablo 3.6: Chinafill kaolin kili kimyasal özellikleri.	36
Tablo 3.7: K-Brite kaolin kili fiziksel özellikleri.	36
Tablo 3.8: K-Brite kaolin kili tane büyüklüğü ile ilgili özellikler.	36
Tablo 3.9: K-Brite kaolin kili kimyasal özellikleri.	37
Tablo 3.10: Atterberg Limit değerleri.	37
Tablo 3.11: Optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri.	39
Tablo 4.1: Serbest basınç numuneleri için XRD analiz sonuçları.	59
Tablo 4.2: Serbest şişme numunelerinde yapılan görüntü analizi ölçümleri.	67
Tablo 4.3: Chinafill ve K-Brite killeri için ölçülen şişme basıncı değerleri (maksimum 20 gün sonunda).	110
Tablo 4.4: Bu çalışmada yapılan XRD analizi sonuçları.	115

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	:American Society for Testing and Materials (Amerikan Standardı)
C3A	: $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$
C3S	: $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$
C-H	: $\text{Ca}(\text{OH})_2$
C-A-S-H	:Kalsiyum Alüminat Silikat Hidrat
C-S-H	:Kalsiyum Silikat Hidrat
EDS	:Elektron Dağılım Spektrometresi
ICP	:İndüktif Eşleşmiş Plazma
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskop
XRD	:X-Işını Difraktometresi

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KİLLİ ZEMİNLERİN KİREÇ İLE STABİLİZASYONUNA SÜLFAT İÇERİĞİNİN ETKİSİ

Nashat SARIKAHYA

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Danışman: Prof. Dr. İknur BOZBEY

II. Danışman: Doç. Dr. Paul BEETHAM

Bu çalışmanın amacı kireç ile iyileştirilen killi zeminlerde oluşan etrinjit kaynaklı deformasyonları belirleyen faktörlerin tespit edilmesidir. Bu faktörler; sülfat yüzdesi, kil tipi, sıkıştırma su muhtevası, sıkıştırmadan önce uygulanan bir gün olgunlaştırma süresi, kür süresi ve kür sürecindeki ortam sıcaklığı olarak seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan malzemeler, zemin olarak montmorillonit kili, laboratuvarındaki mevcut bir kaolin kili, özel bir firmadan temin edilen alüminyum içeriği yüksek Chinafill ve K-Brite kaolin tipi killerdir. Deneylerde farklı aşamalarda kireç yüzdesi olarak %4, %5 ve %7 ve sülfat olarak %1, %3,4, %3,5, %5 ve %7 jips (alçıtaşı) ve sodyum sülfat kullanmıştır. Montmorillonit numuneleri için konsolidasyon deney aletinde şişme deneyleri yapılmış ve etrinjit oluşup oluşmadığı şişme davranışı ile yakalanmaya çalışılmıştır. Bu numunelerde yapılan çok sayıda deney sonucunda kabarma elde edilememiştir. Bu kil ile yapılan mukavemet deneylerinde sülfat yüzdesi %1, %3,5 ve kireç yüzdesi ise %4 ve %7 olarak seçilmiştir. Numuneler, optimum, optimum+3 ve optimum-3 su muhtevalarında sıkıştırılmış ve 56 ve 365 günlük kür süresi sonunda serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Bir grup numune ise etrinjit oluşumunu tetiklemek amacıyla doymuş kum içerisinde bekletilmiş ve daha sonra mukavemet deneylerine tabii tutulmuştur. Montmorillonit kili ve kalsiyum sülfat ile şişme elde edilememiştir. Serbest basınç mukavemeti deneyleri sonucunda, sülfat içeriğinin kireç yüzdesine ve kür süresine bağlı olarak iyileştirilen zeminlerin dayanım özelliğini etkilediği görülmüştür, ancak bu etki her zaman olumsuz değildir. Laboratuvarında mevcut olan kaolin tipi killerle hazırlanan numunelerde, uygulanan deney süreleri içerisinde şişme elde edilememiş, bu nedenle kil numunelere kum ilavesi yapılmış ve numune içerisine su girişi hızlandırılmıştır. Bu numunelerde ancak sınırlı seviyede şişme elde edilebilmiştir. Son aşamada, piyasadan temin edilen alüminyum içeriği yüksek iki tip kaolin kili (Chinafill ve K-Brite) ve %25 kum ilave edilerek hazırlanan numunelerde kireç ve sülfat ilavesi ile önemli seviyelerde şişme ölçülmüştür. Deneylere bu grup ile devam edilmiştir. Numuneler üç farklı sıkıştırma su muhtevasında hazırlanmıştır. Bazı numuneler için

sıkıştırılmadan önce olgunlaştırma süresi uygulanmıştır. İklimlendirme dolabında ve soğuk havada yapılan kür süresinin ve az sayıda numunede iki yıllık kür süresinin etkisi etkisi de araştırılmıştır. Bu grup için iki farklı boyutta numuneler test edilmiştir. Küçük numuneler konsolidasyon kalıbında şişme testine tabii tutulmuştur. Kuru tarafta sıkıştırılan ve üç gün süre ile küre tabii tutulan numunelerde, genel davranış olarak şişme davranışı otuz gün süre ile devam etmiştir. Şişmenin ilk beş- on gün içerisinde daha hızlı olduğu, ancak sonrasında şişme hızının yavaşladığı söylenebilir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde, üç gün kür sonunda suya maruz kalan numunelerde şişmenin yüksek olduğu, ancak yirmi sekiz gün kür sonunda numunelerde daha az şişme olduğu görülmüştür. Islak tarafta sıkıştırılan numunelerde hem üç gün, hem de yirmi sekiz gün sonunda şişme değerleri diğer numunelere göre daha düşüktür. Olgunlaştırma sürecinin etrinjit kaynaklı kabarmaları tüm şartlarda olmasa da azaltabildiği görülmüştür. Soğuk kür sürecinin etkisi ile ilgili farklı şartlar için değerlendirme yapılmıştır. Büyük numuneler doymuş kum içerisine yerleştirilerek serbest şişmeye tabii tutulmuştur. Numunelerde yatay ve düşey deplasmanlar ölçülmüştür. Bu numunelerden günlük alınan fotoğraflar ile şişme nedeniyle oluşan çatlakların gelişimi dijital olarak değerlendirilmiştir. Büyük boyutlu numunelerde de bütün Chinafill ve K-Brite numunelerde şişme olmuştur. Chinafill ve K- Brite numunelerinin bir kısmı üzerinde şişme basıncı da ölçülmüş ve 350 kPa'lara varan yüksek şişme basıncı değerleri ölçülmüştür. Çok sayıda numune için XRD analizleri, ve daha az sayıda olmak üzere ICP analizleri ve SEM analizleri yapılmış ve zeminin mineralojik bileşiminde belirgin değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Deneyler sonrası oluşan şişmeye neden olan etrinjit mineralleri de XRD çekimlerinde saptanmıştır. Kilin alüminyum içeriğinin ve permeabilitesinin etrinjit kaynaklı kabarma için çok önemli iki etken olduğu bu çalışmada gösterilmiştir. |

Haziran 2023 , |207| sayfa.

Anahtar kelimeler: Zemin iyileştirmesi, killi zemin, kireç, sülfat, etrinjit, kabarma|

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

EFFECT OF SULFATE CONTENT ON LIME STABILIZATION OF CLAYEY SOILS

Nashat SARIKAHYA

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science

Department of Civil Engineering

Programme of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. İlknur BOZBEY

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Paul BEETHAM

The aim of this research is to determine the factors which affect etringite-induced deformations in clay soils stabilized with lime. The factors were selected as sulfate percentage, clay type, compaction water content, one day mellowing time before compaction, curing time and ambient temperature during the curing process. The materials used in this study were montmorillonite clay as a base, an existing kaolin clay in the laboratory, Chinafill and K-Brite kaolin type clays with high aluminum content obtained from a private company. Gypsum (gypsum) and sodium sulfate were used at different stages of the experiments with lime percentages of 4%, 5% and 7% and sulfate percentages of 1%, 3.4%, 3.5%, 5% and 7%. For the montmorillonite samples, swelling tests were carried out in the consolidation test apparatus and the swelling behavior was used to determine whether etringite was formed. No swelling was obtained in these specimens as a result of numerous experiments. In the strength tests with this clay, sulfate percentages of 1% and 3.5% and lime percentages of 4% and 7% were selected. The specimens were compacted at optimum, optimum+3 and optimum-3 water contents and free compressive strength tests were performed after 56 and 365 days of curing. One group of specimens was kept in saturated sand to trigger the formation of etringite. With montmorillonite, swelling could not be achieved with calcium sulphate. The unconfined compressive strength tests showed that sulfate content affects the strength of the cured soils depending on the percentage of lime and curing time, but this effect is not always negative. The specimens prepared with kaolin-type clays available in the laboratory did not swell within the applied test periods, so sand was added to the clay specimens and water penetration into the specimens was accelerated. Only limited swelling could be achieved in these samples. In the last stage, significant swelling was measured

in the samples prepared by adding two types of kaolin clay with high aluminum content (Chinacell and K-Brite) and 25% sand. Experiments continued with this group. The specimens were prepared at three different compaction water contents. For some specimens, a mellowing period was applied before compaction. Two different sizes of specimens were tested for this group. The effect of curing time in an air conditioning cabinet and in cold air and, for a small number of specimens, the effect of a two-year curing period were also investigated. Small specimens were subjected to swelling test in a consolidation mold. The specimens were compacted on the dry side and cured for three days and the general swelling behavior continued for thirty days. It can be said that swelling occurred faster in the first five to ten days, but then the swelling rate slowed down. In the specimens compacted at optimum water content, it was observed that the swelling was high in the specimens exposed to water after three days of curing, but less swelling occurred in the specimens after twenty-eight days of curing. The swelling values of the specimens compacted on the wet side were lower than the other specimens both at the end of three days and at the end of twenty-eight days. It was observed that the mellowing process can reduce the swelling caused by ettringite, although not in all conditions. The effect of the low curing temperatures during curing was also evaluated for different conditions. Large specimens were placed in saturated sand and subjected to free swelling. Horizontal and vertical displacements were measured. Daily photographs were taken of these specimens and the development of cracks due to swelling was digitally evaluated. Swelling occurred in all Chinacell and K-Brite specimens, even in the large size specimens. Swelling pressure was also measured on some of the Chinacell and K-Brite specimens and high swelling pressure values up to 350 kPa were measured. XRD analyses, and to a lesser extent ICP analyses and SEM analyses were carried out for a large number of samples and significant changes in the mineralogical composition of the soil were observed. Ettringite minerals causing the swelling after the experiments were also detected in the XRD images. It was seen in this study that the aluminum content and permeability of the clay are two very important factors for the swelling caused by ettringite.

June 2023, 207 pages.

Keywords: Soil improvement, clayey soil, lime, sulfate, ettringite, swelling

1. GİRİŞ

Sülfatlı zeminler, genellikle içerdikleri sülfat mineralleri nedeniyle agresif ve zararlı olabilen bir ortam yaratır. Kireç ile stabilize edilen killi zeminlerde sülfat minerallerinin kireç ve kil mineralleri ile reaksiyonu sonucunda etrinjit oluşur. Sülfatlı zeminlerde etrinjit oluşumunun ana sebepleri sülfat içeren malzemelerin kullanımı veya sülfat içeren su kaynaklarıdır. Yapı malzemeleri veya dolgu malzemeleri olarak sülfat içeren malzemelerin kullanılması, sülfat iyonlarının zemine nüfuz etmesine ve etrinjit oluşumuna neden olabilir. Zemin suyunda yüksek miktarda sülfat iyonu bulunması da, zeminlerde etrinjit oluşumunu teşvik edebilir. Etrinjit oluşumu sonucunda zeminin dayanıklılığında azalma oluşabilir, yapısal bozulmalar olabilir, çatlaklar ve deformasyonlar meydana gelebilir. Etrinjitin etkilerini azaltmak veya önlemek için uygun zemin incelemesi, doğru malzeme seçimi ve uygun inşaat teknikleri kullanımı önemlidir. Bu nedenle sülfat içeren zeminlerin karakterizasyonu ve uygun inşaat yöntemlerinin kullanılması, etrinjit oluşumunun minimize edilmesine yardımcı olabilir.

Kireç ilavesi ile etrinjit oluşumu için bazı şartların sağlanması gerekir. Zeminde yeterli seviyede sülfat içeriği bulunmalıdır. Kireç gibi kalsiyum içeren katkı maddeleri, pH değerini 12'ye yükseltecektir. Bu durumda kil minerallerinde bulunan alüminyum ve silikanın çözünür. Alümina ve silika içeren kil mineralleri, sülfat mineraller, su ve kalsiyum ile biraraya gelerek etrinjit oluşur. Ancak hava sıcaklığı da etkilidir. Etrinjit hava sıcaklığı 15°C'den fazla olduğunda oluşur. Etrinjit oluşuktan sonra ortam sıcaklığı 15°C'nin altına inene dek büyümeye devam eder. Bu sıcaklıkta nem ve karbonat mevcut ise, etrinjit taumasit adı verilen başka bir kristale dönüşür.

Oluşan etrinjit miktarı, zemin ortamına da bağlı olarak iyileştirilmiş zeminde farklı seviyelerde kabarmaya neden olabilir. Kireç ile iyileştirilen sülfatlı zeminlerde meydana gelen kabarmalar karayollarında karşılaşılabilen sorunlardan birisidir ve bu konuda özellikle sülfatlı zeminlerin olduğu ülkelerde çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Bu çalışmaların büyük çoğunluğu çözünen sülfat içeriği 10,000 ppm'den (%1) daha küçük zeminler üzerinde yapılmıştır. Bu nedenle 10,000 ppm'den daha büyük sülfat içeriği için henüz iyileştirme yöntemler tam olarak ortaya konamamıştır. Ancak dünyada bazı bölgelerde sülfat içeriklerinin 50,000 ppm'den (%5) daha büyük olduğu bilinmektedir. Çok yüksek sülfat içeriklerinin etrinjit oluşumunu ne seviyede etkilediğinin anlaşılması önemlidir.

Bu çalışmanın amacı kireç ile stabilize edilen zeminlerde killi zeminlerde oluşan etrinjit kaynaklı deformasyonlar için etkili olan faktörlerin tespit edilmesidir. Bu tezde çalışılan faktörler sülfat yüzdesi, kireç yüzdesi, kil mineralojisi, sıkıştırmadan önce bir günlük olgunlaştırma süresi, kür süresi ve ortam sıcaklığı olarak seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan zeminler, montmorillonit kili, laboratuvarda mevcut olan bir kaolin kili, özel bir firmadan temin edilen ve Alüminyum içeriği yüksek Chinafill Kaolini ve K-Brite Kaolinidir. Montmorillonit deneylerinde kısa ve uzun süreli kür sonucunda mukavemet deneyleri yapılmıştır. Bu numunelerde etrinjite bağlı şişme-kabarma davranışı görülmemiştir. Kaolin tipi killerle hazırlanan numunelerde deney süreleri içerisinde şişme elde edilememiş, kil numunelere kum ilavesi yapılmış, numune içerisine su girişi hızlandırılmıştır. Bu numunelerde de şişme sınırlı olmuştur. Son aşamada alüminyum içeriği yüksek killerle yapılan ve kum ilave edilen numunelerde önemli seviyelerde kabarma ölçülmüştür. Bu grup killer ile deneyler, iki farklı numune boyutunda hazırlanmıştır. Bazı numuneler için sıkıştırmadan önce bir günlük olgunlaştırma süresi uygulanmıştır. Küçük numuneler konsolidasyon kalıbında teste tabii tutulurken, büyük numuneler doymuş kum içerisinde bekletilmiştir. Bu numunelerden günlük alınan fotoğraflarda şişme nedeniyle oluşan çatlakların gelişimi dijital olarak değerlendirilmiştir. İklimlendirme dolabında ve soğuk havada yapılan kür süresinin ve az sayıda numunede iki yıllık kür süresinin etkisi de araştırılmıştır. Etrinjite bağlı şişme basınçları tayin edilmiş, etrinjit oluşumunu minimize etmek amaçlı pratik bir iyileştirme önerisi sunulmuştur. Numuneler üzerinde yapılan XRD ve SEM analizleri ile numunelerin büyük bölümünde etrinjit oluştuğu görülmüştür. Bu çalışmada etrinjit oluşumunu etkileyen faktörlerin anlaşılmasına yönelik özgün bulgular elde edilmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. KİLLERİN KİREÇ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ VE OLUŞAN REAKSİYONLAR

Şişen killer dünyanın her yerinde probleme neden olmaktadır. Adams ve diğ.(2008)'e göre suya doymamış ve şişme potansiyeli olan zeminler ABD'nin dörtte birini kaplamakta ve mevsimsel nem değişikliklerinden dolayı büyük miktarlarda kabarma ve büzölmeye maruz kalmaktadır. Bu hareketler, şişen zeminler üzerine inşa edilen altyapının çatlamasına ve eğilmesine ve yıllık milyarlarca dolarlık hasara yol açmaktadır. 1980'de ABD'deki şişen zemin hasarının yılda yedi milyar dolar olduğu tahmin edilmekte ve bu hasarların üçte birinin müstakil evlerde ve ticari binalarda gerçekleştiğı belirtilmektedir (Wray ve Meyer, 2004). Şişen zeminler nedeniyle konutlarda oluşan hasarın oluşturduğu maliyetinin yılda yaklaşık on üç milyar dolar olduğunu da görölmektedir (Witherspoon, 2000). Yaşamı tehdit edici veya felaket niteliğinde olmamasına rağmen, diğ er doğal olaylara kıyasla, şişen zeminler de kesinlikle doğal bir tehlike yaratmaktadır. Aslında, şişen zemin hasarı, tek başına yaklaşık 25 milyar dolarlık hasar veren Katrina Kasırgası (2005) hariç olmak üzere sel, kasırga, deprem ve hortumların neden olduğu ortalama yıllık hasarı aşmaktadır (Wray ve Meyer 2004). Günümüzde, şişen zeminleri stabilize etmenin en ekonomik ve kabul edilen yolu sıkıştırmadan önce zeminleri katkı maddeleri ile stabilize etmektir.

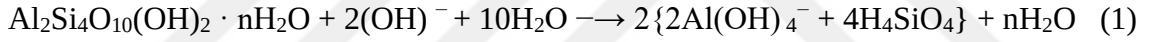
Katkı maddeleri ile yapılan zemin iyileştirmesi ile işlenebilirlik, mukavemet, rijitlik ve şişme özelliklerini iyileştirmek üzere yol, havalimanı, dolgu, veya kanal kaplaması inşaatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Nelson ve Miller, 1992; Puppala ve diğ., 2006, 2009; De Bel ve diğ., 2009; Pedarla ve diğ., 2011; Yi ve diğ., 2016). Hacim değişim davranışının katkı maddeleri ile azaltılmasına ek olarak zeminin plastisite, mukavemet ve rijitlik özelliklerinin iyileştirilmesi 1930'lardan beri uygulanmıştır (Chen, 1988). Zeminde uzun dönemde meydana gelen iyileştirme genellikle zemin partikülleri arasında yeni kristallerin oluşması ve danelerin birbirine bağlanması yoluyla meydana gelir (Jones ve Holtz, 1973, Petry ve Armstrong, 1989, Chittoori, 2008).

Zeminleri iyileştirmenin en sık kullanılan yollarından birisi, bu zeminleri kimyasal yöntemler ile stabilize etmektir. Killerin stabilizasyonunda en çok kullanılan kimyasal ise kireçtir (Little, 1995). Kireç insanoğlunun kullandığı ilk kimyasallardan biridir ve çok farklı zeminlerde stabilizasyon amacıyla kullanılabilir. Sönmemiş kireç (kalsiyum oksit, CaO) kireçtaşını yüksek

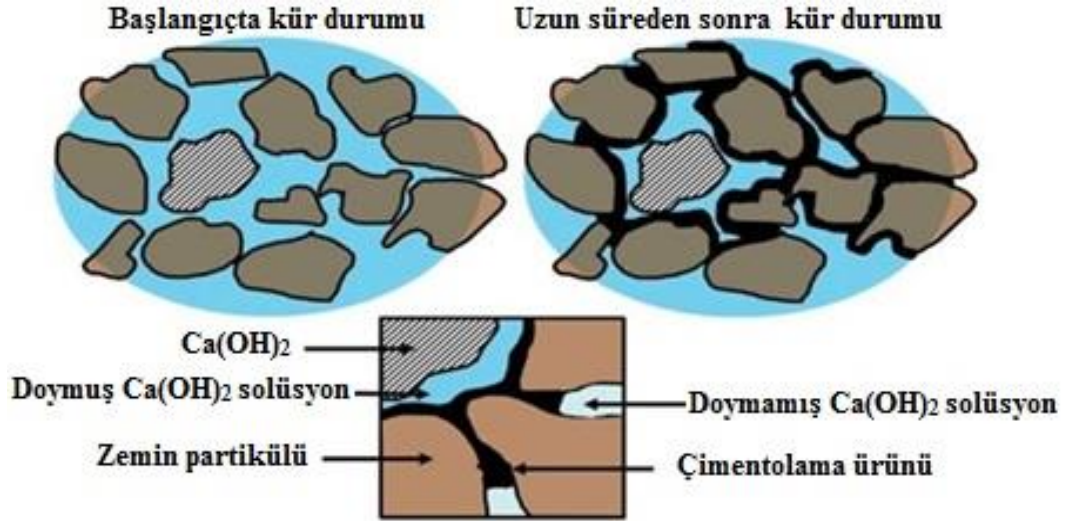
sıcaklıkta işleyerek elde edilir. Sönmüş kireç ise (kalsiyum hidroksit, Ca(OH)_2 sönmemiş kirecin suyla reakte edilmesiyle oluşur. Kirecin killi zeminlere etkisi bakımından dört ana başlık kation değişimi, flokülasyon, puzolanik reaksiyon ve karbonatlaşma olarak sıralanabilir.

Kireç ile iyileştirmelerde en iyi sonuçlar genellikle orta ve yüksek plastisiteye sahip killerde alınır (Little, 1999; Puppala ve diğ., 2006, 2013). Kireç kullanarak zemin stabilizasyonu yapılmasının iki farklı uygulaması mevcuttur. Birincisi modifikasyon ve ikincisi stabilizasyondur. Modifikasyon, belirli zemin özelliklerinin kısa sürede değişimini ifade eder (Sherwood, 1962). Stabilizasyonda ise zemin içerisinde çimentolu bir matris gelişir ve şişme potansiyelinde azalmaya ve mukavemetinde artışa yol açar. Stabilizasyon ancak zemine yeterli miktarda katkı maddesi eklendiğinde meydana gelir.

Stabilizasyon şu şekilde oluşur. Yüksek alkali ortamda kil parçacıklarını oluşturan alüminosilikat levhalar, pH değeri 10.4'ün üzerinde çözünür hale gelir, ancak optimum çözünürlük pH 12.4 civarında elde edilir (Bell, 1996). Kil minerallerinde alkalın koşullar altında oluşan çözünme Denklem (1)'de gösterilmektedir:



Bu ortam çözünmüş kil parçacıklarının, kalsiyum silikat hidratları (CSH), kalsiyum alüminat hidratları (CAH) ve kalsiyum alüminyum silikat hidratlarını (CASH) oluşturmak üzere solüsyon içerisinde serbest kalsiyum iyonlarıyla reaksiyona girmesini sağlar. Örneğin, çimento özellikli hidratlı minerallerde C_4AH_{13} , C_3AH_{11} , CAH_{10} , $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ve C_2ASH_8 , tespit edilmiştir (Bell, 1996). Çözünmeyen hidratlar, reaksiyona girmeyen kil partiküllerini kaplar ve zemin içindeki boş alanları dolduran çimentolu bir matris oluşturur. Bu çimentolu matris daha yüksek mühendislik performansına sahip malzemenin ortaya çıkmasını sağlar. Bu ortam Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Kireçle stabilize edilmiş kil zeminde bir çimentolu matris gelişimi (Locat ve diğ. 1990)

Zemin alkali kaldıkça ($\text{pH} > 10.4$) kil minerallerinin çözümümü ve müteakip pozolanik reaksiyonlar devam edecektir. Daha sonra zeminin dayanımı da zamanla birlikte aylarca hatta yıllarca artmaya devam edecektir. Kireç stabilizasyonunun nihai etkisi zemin bileşimi, kireç içeriği, kil mineralojisi, kürleme sıcaklığı ve zemin pH'ına bağlıdır (Mohamed, 2000).

Little (1995)'e göre kireç-zemin pozolanik reaksiyonlarını birtakım faktörler etkilemektedir. Bunlar ortam pH'ı, baz katyon konsantrasyonları, silika-alümina konsantrasyonları, zeminin organik içeriği ve zeminin çözünabilir sülfat içeriği olarak sıralanabilir. İlk dört faktör pozolanik reaksiyonların hızını ve derecesini etkiler. Reaksiyonların hızının farklı zemin tipleri ile farklı iklim bölgeleri arasında önemli ölçüde değiştiği bilinmektedir. Ayrıca organik karbon içeriği, kil içeriği, kilin mineralojisi de kireç zemin etkileşimi bakımından önemlidir.

2.2. ZEMİNLERDE SÜLFAT İÇERİĞİ

Little ve diğ. (2009)'e göre zeminlerdeki sülfat kaynağı iki kategoriye ayrılabilir ve bunlar birincil ve ikincil kaynaklar olarak sınıflandırılır. Birincil kaynaklar doğal halde bulunan jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve magnezyum sülfat (MgSO_4) olarak sıralanabilir. Düşük çözünürlük sebebi ile (2.58 gm/L) jips asıl sülfat kaynağı olarak kabul edilebilir. Sülfat granüler zeminler içerisinde genellikle su ile birlikte uzaklaşacağı için çok büyük miktarlarda bulunmaz, ancak killi zeminler içerisinde düşük permeabilite nedeniyle kalır. İkincil kaynaklar

ise sülfatların oksidasyonu ile oluşan sülfitleerdir. Şekil 2.2’de jips ve doğal formunda sülfat görülmektedir.



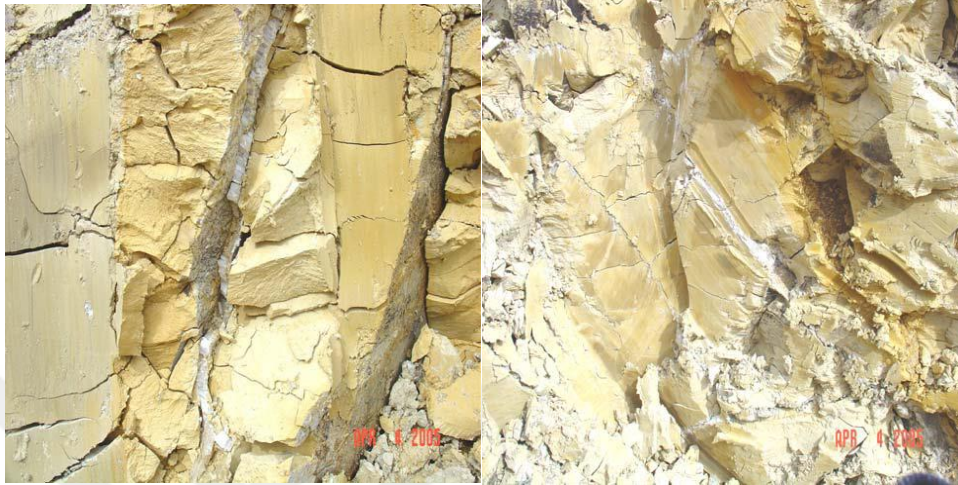
Şekil 2.2: Jips ve doğal formunda sodyum sülfat (Talluri, 2013).

Sülfat iyonlarının varlığı etrinjitin oluşumunda anahtar olduğu için sülfat miktarı zeminlerin reaktivitesini tanımlamada kritik öneme sahiptir. Tam bir sülfür karakterizasyonu, zeminlerde bulunan farklı sülfür türlerinin tanımlanmasını gerektirir. Zemindeki sülfür içeriği dört ana kategori altında değerlendirilir.

- Suda çözünebilen sülfatlar
- Asit çözünür sülfatlar
- Toplam düşük sülfür ve
- Toplam sülfür

Tektaş Ulaştırma Dairesi, TDOT (2005)’e göre pek çok mineral potansiyel sülfat/sülfid mineral kaynakları olabilir. Bunlar için basinit, markazit, alçıtaşı (kalsiyum sülfat), sodyum sülfat, anhidrit ve anhidritik örnek olarak verilebilir. Sülfatlar, dokuya veya plastisiteye bakmaksızın her türlü zeminde oluşabilir. Genel olarak yüksek plastisiteli zeminlerde yüksek tutma özellikleri ve çözünür sülfat içeren suyu tutma kabiliyeti nedeniyle sülfatların kalma olasılığı daha yüksektir. Düşük hidrolik iletkenliğe ve yüksek kılcal özelliklerine sahip olan zemin, sülfat taşıyan minerallerin oluşması ve depolanması için depo görevi görmeye eğilimlidir. Düşük geçirgenlik ve yüksek kılcallık gibi zemin özellikleri tipik olarak killi ve şeyllerle ilişkilidir. Geçirgenliği düşük zeminlerde, su zeminden kolayca akamaz, sülfatlar kolayca çözülmez ve akışlara veya daha düşük hidrolik potansiyele sahip diğer alanlara

taşınmaz. Sülfatlar ayrıca granüler zeminlerde özellikle kurak bölgelerde veya çok az su hareketi olmuş olan tabakalarda da bulunabilir. Kuru koşullar altında da killere ve şeyiller suyun içine girebileceği bir kuruma (desikasyon) çatlak ortamı oluşturabilir. Kuruduklarında Şekil 2.3'te görüldüğü gibi sülfat kristal oluşumları kalır.



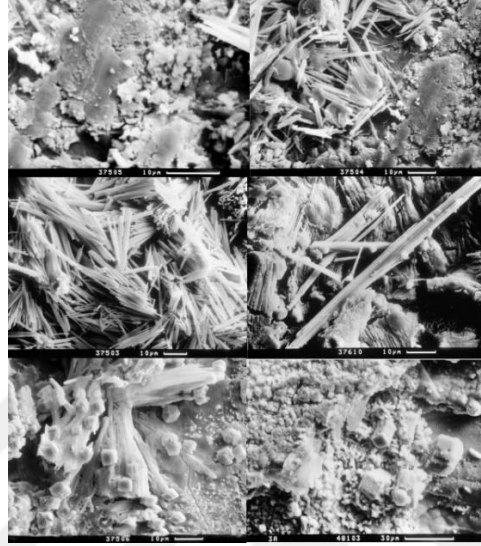
Şekil 2.3: Kurumuş kildeki sülfat kristal oluşumları. (TDOT, 2005).

Kuruma döngüleri sırasında, sülfatlar yüzeyde toz halinde görülebilir. Bu sülfatlar, killerdeki kuruma (desikasyon) çatlakları veya üzerinden su akan yamaçlarla yollardaki kalsiyum uygulanmış katmanlara taşınabilir. Suyun mevcudiyeti etrinjit oluşumu için çok önemli olduğu için bir projenin topoğrafik özelliklerine bağlı olarak örneğin alçak kotlarda bulunan alanlarda risk daha fazla olabilir. Bu alanlarda büyük miktarda su biriktirebilir ve alanda kalsiyum bazlı uygulamalar yapıldığında sülfatın neden olduğu kabarmalar için yüksek risk oluşabilir.

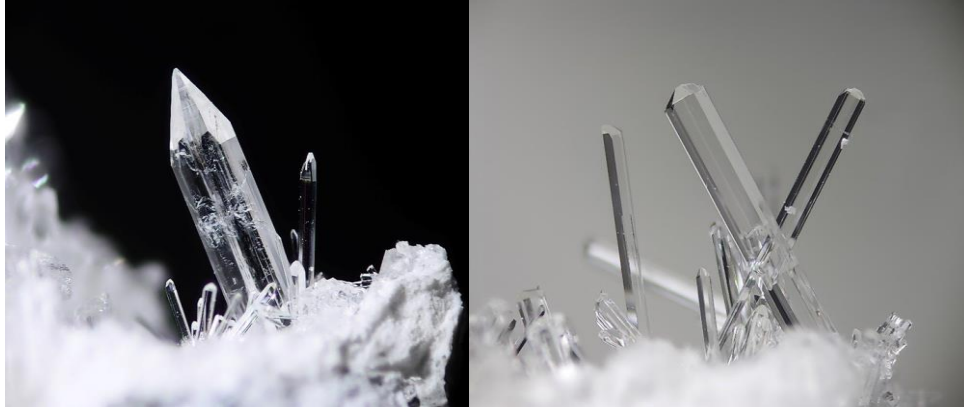
Etrinjit oluşumu için ortamda muhakkak çözünmüş sülfat bulunması gereklidir. Ortamda jips ya da sülfat içereni bir faz bulunması etrinjit oluşmasını gerektirmez. Sülfatın çözünmesi ve serbest hale gelmesi gerekir. Ancak düşük pH değerlerinde sülfatın çözünürlüğü sınırlıdır. Ancak asıl etkili olan faktörlerden birisi ortamda ne kadar su bulunduğudur. Zeminde sıkıştırma için kullanılan su miktarı sülfatın çözünmesi için yeterli olmayabilir. Örneğin sodyum sülfat, jipse göre daha hızlı bir şekilde sülfat sağlayacağı için etrinjit oluşumu da daha hızlı olmaktadır (Little ve diğ., 2010).

2.3. ETRİNJİT TANIMI VE OLUŞUMU

Kireç ile iyileştirilen bir zeminde sülfat iyonu mevcut ise sülfat kilin yapısındaki alüminyum iyonu ve kireçteki kalsiyum iyonunu ile etrinjit ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) adı verilen bir bileşik oluşturmaktadır.



Şekil 2.4: Etrinjit ve thaumasitin mikroyapıda görünümü (URL 1).

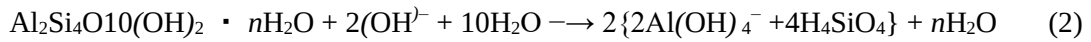


Şekil 2.5: Etrinjit kristali (URL 2).

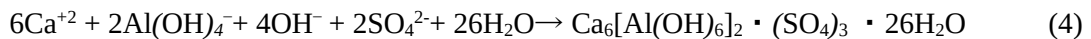
Zeminde farklı formlarda kalsiyum alüminat-sülfat hidratları mevcut olmakla birlikte, bugüne kadar Lerch ve diğ.(1929) tarafından ortaya atılan “Sulu solüsyonlarda sadece monosülfat hidrat ve trisülfat hidrat (etrijit) kararlı aşamalardır.” şeklindeki bulgu kabul görmektedir. Monosülfat hidratın oluşumu veya hidrasyonu genişlemeye yol açmazken, etrinjitin oluşumu ve/veya müteakip hidrasyonu önemli miktarda hacim artışına neden olur. Bir etrinjit kristal

çekirdeklendiği zaman, sistemin sıcaklığı yaklaşık 15°C'nin altına düşmediği sürece neredeyse saf bir son ürün olarak büyümeye devam eder. Bu sıcaklığın altında ve sistemde çözünür karbonatların bulunduğu varsayıldığında, etrinjit bir seri ara bileşim ile $[\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{SO}_4)(\text{CO}_3)]_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ taumasite dönüştürülebilir ve alüminyum yerine silikanın ve sülfat yerine karbonatın ikame edilmesi ile meydana gelir (Kollman ve Strubel, 1981). Etrinit gibi taumasit de, suya maruz kaldığında çok büyük hacim değişikliklerine neden olabilir. Taumasit ve etrinjitin X ışını kırınım desenleri ile neredeyse ayırt edilemez, bununla birlikte, söz konusu iki mineral, elektron mikroskopu (EDX) veya diferansiyel termal analizler (DTA) ile ayırt edilebilir. Mehta ve Klein (1966), nispeten yüksek alümina içerikli ortamlarda monosülfat hidrat oluşumuna, daha düşük alümina içerikli ortamlarda ise etrinjit oluşumuna uygun ortam oluştuğunu göstermiştir. Monosülfat-kalsiyum alüminat hidrat oluşumu, Al_2O_3 'ün SO_4 'ya molar oranının birden büyük olduğu durumlarda tercih edilmektedir; bu oran birden düşük olduğunda etrinjit oluşumu tercih edilmektedir. Monosülfat hidrat sadece nemli koşullarda kararludur, oysa etrinjit yapısal bütünlüğünün büyük kısmını ıslak ve kuru koşullarda da korur. Komurka ve Scheiber (1989) ve Strohbauch ve Kuzel (1988) daha düşük sıcaklıklarda etrinjitin, daha yüksek sıcaklıklarda ise monosülfatın daha kararlı olduğunu termodinamik ilkelere dayanarak tespit etmişlerdir. Ghorab ve Kishar (1985) etrinjitin yaklaşık 11 pH'lık bir solüsyonda 60°C'ye kadar stabil olduğunu ve çözünürlüğünün sıcaklık ile arttığını ortaya koymuştur.

Etrinitin oluşması aşağıdaki gibi açıklanabilir. Kil mineralleri içeren bir zemine kireç ilave edilmesi ve pH değerinin 10,5'tan yüksek olması durumunda alüminosilikatlar Denklem 2'de görüldüğü gibi çözünür.

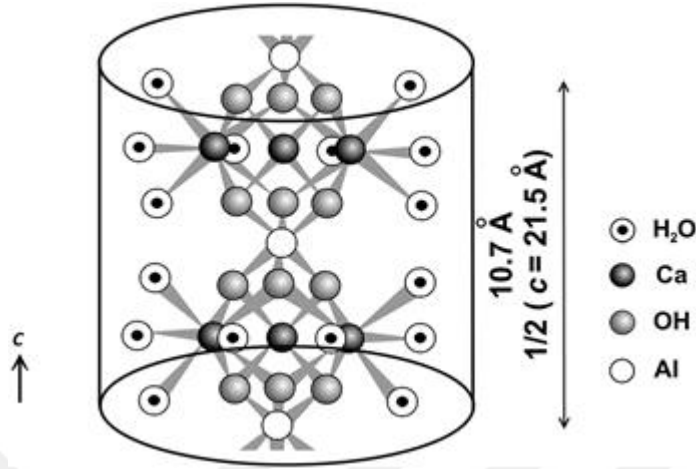


Alüminat iyonları $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, Denklem 4'te gösterilen etrinjiti oluşturmak için, alçıtaşının çözünmesinden (Denklem 3) gelen sülfat iyonlarıyla reaksiyona girer.



Görüldüğü gibi 1 mol etrinjit oluşturmak için 6 mol CaO , 1 mol Al_2O_3 , 3 mol SO_4 ve 32 mol su gereklidir. Little ve diğ. (2010)'da yapılan stokiyometri hesaplara göre, 1% SO_4 varlığı uygun şartlarda, %4.36 miktarda etrinjit oluşumuna neden olabilir. Bu sülfatın etrinjit

oluşumunu kontrol ettiği durumlar için geçerlidir ve esasen teorik bir hesaptır. Etrinjitin mineralinin yapısı Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6: Etrinjitin mineral yapısının şeması (Puppala ve diğ.,2018).

Basista ve Weglewski (2009), etrinjiti oluşturabilen mekanizmalar ile ilgili olarak çeşitli teoriler üretmiştir. Bunlar aşağıda sunulmaktadır.

- "Topokimyasal" mekanizma (Brown ve Taylor, 1999; Cohen, 1983; Kalousek & Benton, 1970; Mather, 1973; ; Ogawa ve Roy, 1981; Soroka, 1979)

Topokimyasal oluşum ve kristallerin anizotropik olarak büyümesi etrinjiti oluşturan birincil mekanizmadır. Bu tip oluşumda kristaller katı fazın sınırlarında oluşur ve kristaller farklı yönlerde büyür.

- "Kristal büyüme" teorisi (Ish-Shalom ve Bentur, 1974; Kalousek ve Benton, 1970; Nakamura, Sudoh ve Akaiwa, 1968; Ogawa ve Roy, 1982; Schwiete, Ludwig ve Jager, 1966)

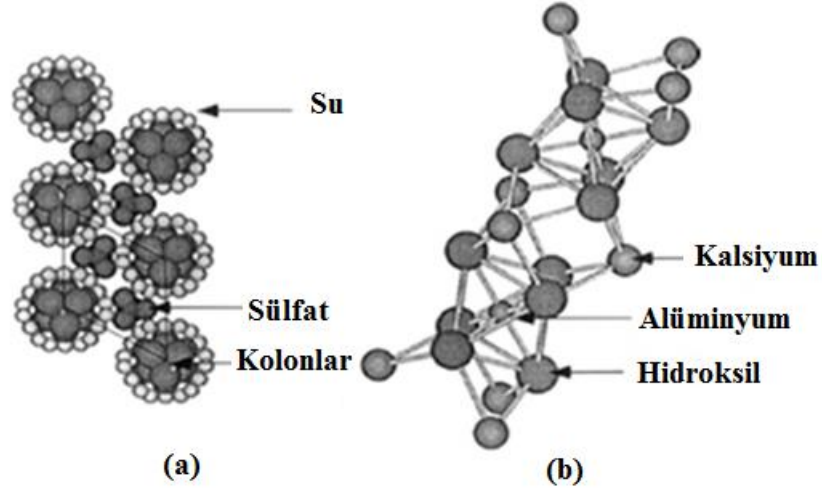
Diğer mekanizma ise kristal büyüme teorisidir ve oluşan etrinjit minerallerini suyu absorbe etmesidir. Negatif yük ve yüksek spesifik yüzey alanı, çok miktarda suyun kristaller tarafından tutulmasına yol açar. Kristaller arasında güçlü bir kimyasal bir bağ olmadığından, araya giren su itmeye yol açarak şişmeye neden olur. Kristal büyüme teorisinde etrinjit oluşumu reaksiyon bölgeleri ile kesiştiği, büyümeye devam ettiği ve karşılıklı olarak basınç uyguladığı zaman genişleme meydana gelir.

- "Kristal şişme" teorisi (Chen ve Mehta, 1982; Mehta, 1973, 1976; Min ve Tang, 1994).

Kristal şişme teorisinde ise genişleme kolloidal veya jel boyutunda olan nispeten küçük etrinjit kristallerinin şişmesinden kaynaklanır. Genişlemenin yarattığı gerilme, reaksiyonun serbest enerjisinin işe dönüşmesinden kaynaklanmaktadır (Kalousek ve Benton, 1970). Kristal şişme teorisinde etrinjit, solüsyon mekanizması ile oluşur. Kristaller çok küçük, jel benzeri ve koloidal boyuttadır. Bu kristaller, belirli killerin şişmesine neden olarak benzer bir şekilde etrinjit kristallerinin etrafında bir elektrik çift katmanı oluşturarak, yüzey enerjilerini düşürmek için iyonları ve su moleküllerini absorbe edebilir (Little ve diğ., 2010). Bu katmanların kesişmesi kristallerde şişme basıncı üretir (Min ve Tang, 1994). Bu şişme nedeniyle kristal içerisinde yaklaşık 241 MPa basınç oluşabilmektedir. Bu kristaller kalsiyum silikat hidratlar (CSH) ve kalsiyum alüminat hidratlar (CAH) gibi puzolanik reaksiyon ürünlerinden farklıdır ve zemin, agrega veya başka puzolanik ürün gibi bir engele ulaştıklarında büyüme durur.

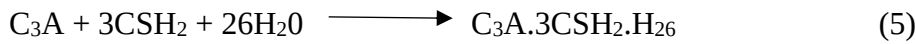
Çimentolu bir sistemin bir mekanizma veya başka bir nedenle etrinjit oluşturma eğiliminin gözenek çözeltisindeki hidroksit iyonu $[\text{OH}^-]$ konsantrasyonu tarafından belirlendiğini göstermiştir. Yüksek OH^- ortamında topokimyasal ve kristal şişmesi ve düşük OH^- ortamında kristal büyümesi olması beklenir.

Karmaşık etrinjit yapısının basitleştirilmiş görünüşü Şekil 2.7'de verilmektedir (Moore ve diğ., 1970, Myneni ve diğ., 1997). Etrinjit minerali, c eksenine paralel uzanan sütunlar ve kanallarla boru şeklinde bir yapıya sahiptir. Kolonlar öncelikli olarak alüminyum oktahedronlar ve kalsiyum polihedronlardan oluşur. Kalsiyum polihedronlar içinde su ve hidroksil iyonlarının her birinin dört apekte bulunduğu üçgen prizma olan bir şekle sahiptir. Tübüler yapı bir $\text{Ca}_6(\text{Al}(\text{OH})_6)_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}^{+6}$ yapısı oluşturacak şekilde daima aynı tarzda tekrar eden bir alümina ve üç kalsiyum polihedron zincirinden oluşur. İki alüminyum oktahedron $[\text{Al}(\text{OH})_6]^{-3}$ üç kalsiyum polihedrondan oluşan bir grup ile bağlanır. Paylaşılan hidroksil iyonları (OH^-) kalsiyum ve alüminyum polihedra arasında köprü oluşturur ve mineralin c eksenini boyunca uzanan sürekli bir zincir oluşturur. Koordinasyon polihedra su molekülleri tarafından tamamlanır. Sütunlar arasındaki kanallar $[(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]^{-6}$ iyonları tarafından işgal edilir (Şekil 2.7a) ve Şekil 2.7b).



Şekil 2.7: Etrinjit mineralinin (a) sülfat iyonlarını tutan sütunlar ile (b) kalsiyum ve su molekülleri olmayan alüminyum polihedra sütunu arasındaki kanalları gösteren şematik diyagramları (Myneni ve diğ., 1997).

Etrinjit veya diğer bir mineralin neden olduğu hacim değişikliği için kimyasal formüllerden faydalanılabilir. Reaksiyonlarda kütle değişimi olmasa bile, hacimsel değişiklikler olmaktadır. Her bileşiğin bir mol için sahip olduğu hacim bellidir ve buna molar hacim denir. Eğer bir reaksiyonda oluşan bileşiğin hacmi, reaksiyona giren maddelerden daha yüksek ise, hacim artışı oluşacaktır. Little ve diğ. (2010)'da etrinjit için suyu nasıl temin ettiğine göre farklı hacim değişikliklerinin verildiği bir hesaplama verilmektedir. Bu hesaba göre aşağıdaki formülün hacimsel değerleri kullanılabilir.



Bu eşitlikte, C_3A , trikalsiyum alüminat, CSH_2 jips ve H sudur. Tablo 2.1'te etrinjiti oluşturan bileşiklerin ve etrinjitin moleküler hacimleri verilmektedir.

Tablo 2.1: Etrinjit oluşumu için moleküler hacim değerleri (Little ve diğ. 2010).

Bileşik	Moleküler hacim (cm ³ /mol)
C3A	89.1
CSH2	74.2
H2O	18
Giren maddelerin toplam molar hacmi	779.7
Oluşan etrinjitin toplam molar hacmi C3A.3CSH2.H2O	737.6

Sülfat içeren killi bir zemin, kireç ve su bir araya geldiğinde etrinjit oluşması için uygun bir ortam oluşur. Sıkıştırma işlemi olduktan sonra oluşan etrinjit için zaten hacim içerisinde var olan su kullanılacaktır. Bu durumda, hacim değişikliği Denklem 6 ve Denklem 7 ile hesaplanabilir;

$$Hacim\ değişikliği, \% = \frac{(Oluşan\ bileşiğin\ molar\ hacmi - Giren\ maddelerin\ molar\ hacmi)}{Oluşan\ bileşiğin\ molar\ hacmi} \quad (6)$$

$$Hacim\ değişikliği, \% = \frac{737.6 - 89.1 - 3 \cdot 74.2 - 26.18}{779.7} = \%5 \quad (7)$$

Yani sıkıştırma suyu içerisindeki kısıtlı suyun kullanılması durumunda hacimde %5 civarında azalma olmaktadır. Etrinjit oluşsa bile hacim artışına bu aşamada sebep olmamaktadır. Ancak sıkıştırma işlemi bittikten sonra oluşacak etrinjit, dışarıdaki suyu hacmin içerisine alacaktır. Yani su reaksiyona dışarıdan girer ise, bu hesap aşağıdaki gibi (Denklem 8) olur (Little ve diğ., 2010).

$$Hacim\ değişikliği, \% = \frac{737.6 - 311.7}{311.77} = \%137 \quad (8)$$

Bu miktar çok ciddi bir hacim artışı anlamına gelir. Bu durum Şekil 2.8’de temsili olarak gösterilmektedir.

Su girişı 425.6 cm ³ /mol	Ca, Al ve S 311.7 cm ³ /mol	$\Delta V=426$ cm ³ /mol	ETRİNJİT 737.6 cm ³ /mol
	Su	$\Delta V=0$	Su
	Diğer mineraller	$\Delta V=0$	Diğer mineraller

Şekil 2.8: Etrinjitin neden olduğu hacim değişikliğinin molar hacim yolu ile gösterilmesi. (Little ve diğ., 2010).

2.4. ETRİNJİT OLUŞUMUNUN YARATTIĞI HASARLAR

Yol üstyapısı için zeminleri iyileştirmek amacıyla kalsiyum bazlı katkı maddelerinin (kireç, çimento ve uçucu kül) kullanımı yıllardır başarıyla gerçekleştirilen uygulamalardır. Ancak kalsiyum bazlı katkı maddeler uygulanmış birçok zeminde sülfat ve/veya sülfür minerallerinin mevcudiyeti nedeniyle kabarma problemleri yaşanmıştır. Bu minerallerin sıkıştırma sonrasında oluşumu yollarda büyük miktarda kabarma ve dayanım kaybı ile sonuçlanabilir. Kalsiyum, sülfat, alüminat reaksiyonu sonucunda etrinjit oluşumu zeminin sıkıştırılması öncesinde olduğu takdirde büyük bir sorun oluşmaz. Ancak, sıkıştırmadan sonra veya yol hizmete açıldıktan sonra oluştuğunda, ortaya çıkan kabarma çok tahrip edici olabilir. Aşağıda Şekil 2.9’da yollarda oluşan hasarlar görülmektedir.



Şekil 2.9: Yolda oluşan kabarma ((Petry, 1992).

Etrinjit oluşumu, çözünmüş kil partiküllerinden gelen alüminyum ile birlikte stabilizasyonda kullanılan kireç ve/veya çimento ile zeminde bulunan sülfat minerallerinin reaksiyona girmesi ile meydana gelir. Stabilize edilmiş tabaka karıştırıldıktan ve sıkıştırıldıktan sonra bu mineraller oluştur ise zemin içinde basınç uygular, çünkü minerallerin molar hacmi, onların türetilmiş olduğu reaktantların molar hacminden daha büyüktür (Little ve diğ., 2010). Sülfatın neden olduğu kabarma kaplama yapısının tamamına ciddi hasar verir. Bu durum, kaplama yüzeyinde hem enine ve uzunlamasına sırtlar ve hem de çatlaklar şeklinde kendini gösterebilir. Bu durumda mukavemet kaybı da kadar ciddidir ki, önemli kalıcı deformasyonlar meydana gelebilir (Hunter, 1988; Rollings ve Burkes, 1999; Snedker ve Temporal, 1990, Harris ve diğ., 2004, Little ve diğ., 2005, Petry ve diğ., 1992, Perrin ve diğ., 1992). Zeminlerdeki etrinjit çökmesi karmaşık bir durumdur ve zemin bileşimi, yapım yöntemleri, suyun mevcudiyeti, iyon göçü ve iyileştirilmiş tabakalardaki boşluk yapısı gibi faktörlere bağlı olarak meydana gelir.



Şekil 2.10: Etrinjit oluşumunun verdiği hasarlar (TDOT, 2000).

Gözlemler bu reaksiyonların çok hızlı olabileceği ve bir yağmur yağışından sonra gece boyunca meydana gelebileceğini gösterilmiştir. Ancak bazı durumlarda reaksiyon gecikebilir ve problemin yol yüzeyine yansması yıllar alabilir. Araştırmalar, reaksiyon hızının sülfat kristallerinin parçacık boyutundan (daha ince taneli sülfatlar daha hızlı reaksiyon anlamına gelir) ve sistemde mevcut olan su miktarından (daha fazla su daha hızlı reaksiyon anlamına gelir) kaynaklandığını ortaya koymuştur. Etrinjit esasen Portland çimento beton üretiminde de normal bir reaksiyon ürünü olarak küçük miktarlarda üretilmektedir. Beton içindeki sınırlı gözenek alanıyla absorbe edilebilenden daha büyük basınçlara yol açar ise, bu basınç dayanımında azalmaya neden olur (Taylor, 1964). Zemin-kireç stabilizasyonunda ise boşluk oranı betonunkinden çok daha büyüktür ve bu nedenle zemin boşlukları içerisinde çok daha fazla miktarlarda etrinjit oluşumunun meydana gelmesi beklenmektedir.

Diğer taraftan etrinjit şişmeye neden olsa da tek mineral değildir. Kil-sülfat kayaçları olarak da bilinen anhidrit içeren kil kayaların şişmesi, yüz kırk yılı aşkın bir süre önce Güney Almanya'da Schanz Demiryolu Tünelinin inşasından bu yana birçok geoteknik projede büyük sorunlara neden olmuştur (Schädlich ve diğ., 2013). Mühendislik yöntemlerindeki ilerlemelere ve geçmiş yıllarda kazanılan pratik deneyimlere rağmen, kil-sülfat kayaçlarının şişme basınçlarının ve deformasyonlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi son derece zordur. Ayrıca, zemin kabarması, bir kez şişme su girişi tarafından tetiklendiğinde, uzun yıllar boyunca gelişmeye devam edebilir ve şişmeyi durdurmak pratik olarak imkansızdır (Schweizer ve diğ., 2019). Kil sülfat kayalarının şişmesi ile ilgili en dikkat çekici problemlere demiryolu ve karayolu tünelleri ve viyadüklerin yapımı sırasında karşılaşılmaktadır. Örneğin, Almanya'daki Baden-Württemberg ve İsviçre'deki Jura Dağları'ndaki tünel projelerinden bazılarında tünel tabanının altındaki malzemelerin yükselmesinden kaynaklanan şiddetli kabarmalar olduğu bildirilmiştir (Anagnostou ve diğ., 2010; Madsen ve Müller-Vonmoos, 1989; Wittke 2004; Wittke ve diğ., 2007). İspanya'da, Madrid'den Barselona'ya yüksek hızlı bir demiryolu sağlamak için inşa edilen Camp Magré, Lilla ve Puig Cabrer gibi tüneller, sülfatın neden olduğu kabarmadan etkilenmiştir (Alonso ve diğerleri 2013; Ramon ve diğerleri, 2017).

2.5. ETRİNJİT OLUŞUMUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Taumasit, etrinjite ek olarak oluşan diğer bir mineraldir ve hidratlı kalsiyum silikon karbonat sülfat hidroksit olarak da bilinmektedir. Taumasit de etrinjit gibi oldukça yüksek bir şişme potansiyeline sahiptir ve sadece düşük sıcaklıklarda oluşur. Etrinjitin yaklaşık 15°C'nin altındaki sıcaklıklarda izostrüktürel transformasyonu esnasında çözünür silika ve karbonat bulunmaktaysa, taumasit oluşabilir (Little ve diğ., 2005). pH, ısı, iyon aktivitesi ve çözünmüş iyon konsantrasyonları gibi jeokimyasal faktörler zemin suyu sistemlerinde etrinjitin çökmesini ve stabilitesini etkileyen faktörlerdir (Little ve diğ., 2005). Alüminyum miktarının da etrinjit oluşumunu etkilediği bilinmektedir. Düşük alüminyum miktarları sadece etrinjit oluşumuna neden olurken, yüksek alüminyum miktarları pozolanik reaksiyonlara ve etrinjite neden olmaktadır. Buna bağlı olarak pozolanik içerikler etrinjitin yaratacağı etkiyi azaltabilmektedir. Bu nedenle sadece sülfat seviyesinin bilinmesi oluşacak hasarı belirlemek için yeterli değildir. Boşluk oranının da etrinjitin oluşturduğu kabarma bakımından çok etkili olduğu ve düşük boşluk oranı olması durumunda şişmenin daha fazla olacağı görülmektedir. Kür sıcaklığı da etkilidir. Beetham (2015) kür sıcaklığının 20°C yerine 8°C'de olması

durumunda çok daha yüksek şişme değerlerine ulaşılacağını belirtmektedir. Little ve diğ. (2005)'e göre gerekli reaktanların tümü mevcut olsa bile, etrinjitin çökmesi, termodinamik avantajlılığa ve sistemdeki sınırlayıcı reaktanların miktarına bağlı olabilir. Dermatas ve diğ. (1995)'e göre sülfat taşıyan zeminlere kireç uygulanması sırasında mevcut alüminyum iyonları oluşan etrinjit çökmesinin miktarını belirleyen sınırlayıcı reaktanı oluşturur ve zeminlerin çoğunda alüminyumun ana kaynağı kil partikülleridir. Kil parçacıklarının çoğu yüksek yüzey alanları ve kristal yapılarının doğası nedeniyle yüksek pH koşullarında bir miktar çözünmeye duyarlıdır. Bu nedenle daha yüksek kil konsantrasyonu mevcudiyeti genellikle daha yüksek miktarlarda alüminyum mevcudiyeti anlamına gelir. Alüminyum mevcudiyeti ayrıca kil tipine ve çözünürlük özelliklerine bağlıdır.

2.6. ETRİNJİTİN OLUŞMASI İÇİN GEREKLİ OLAN SÜLFAT MİKTARI

Little ve diğ. (2009)'e göre sülfat kaynaklı hasar riskini belirlemeye yönelik mevcut metodoloji, zemindeki genellikle suda çözünür olan sülfat konsantrasyonuna dayanır. Sülfat içeriği genellikle ppm (milyonda parça) veya mg/kg (ppm'ye eşit) veya zeminin yüzde kuru ağırlığı (10000 ppm veya 10000 mg/kg, kütle olarak yüzde 1'e eşittir) olarak ifade edilir.

Zeminde ne kadar çok sülfat bulunursa ortamda o kadar çok etrinjit oluşabilmektedir ancak sülfat miktarına ilaveten o zeminde bulunan kil miktarı ve türü de sülfat mineral oluşumu ve bununla ilişkili olarak kabarmaya katkıda bulunur (Ferris ve diğ., 1991). Kil tipinin de sülfatlı zeminlerde meydana gelen kabarma miktarında rol oynadığına inanılmaktadır. Örneğin, smektitler üç tabakadan oluşan çok fazla şişebilen killerdir. Yüksek seviyelerde simektit içeren killer, yukarıda yüksek plastisite kil olarak tarif edildiği gibi, stabilize edilmesi için de daha fazla miktarda katkı malzemesine ihtiyaç duyacaktır (Ferris ve diğ., 1991). Kaolinit ise diğer bir kil minerali türüdür. Kaolinit sadece iki katmana sahip olsa da az sayıda katman daha fazla alüminyum sağlamaya yardımcı olabilir (Ferris ve diğ., 1991).

Tektaş Ulaştırma Bölümü tarafından yapılan araştırmalara göre, sülfat konsantrasyonları 3000 ppm'e kadar olan zeminler bir günlük olgunlaştırma ile kireç ile sağlıklı bir şekilde stabilize edilebilir. 8000 ppm den fazla sülfat konsantrasyonlarına sahip zeminler, diğer bir kimyasal katkı kullanılması veya ilave nem sağlanması ile stabilize edilebilir. Sülfat konsantrasyonları 8000 ppm aştığı durumda kireç ve uçucu külün birlikte kullanılması gibi alternatif iyileştirme önerilmektedir (TDOT, 2000).

Berger ve diğ. (2001), kalsiyum içerikli katkılarla iyileştirilen zeminlerde 0.3%'ten daha küçük sülfat içeriklerinin etrinjit bakımından sorun yaratmayacağını göstermiştir. Yazarlar içerik 0.3% ve 0.8% arasında ise önlem alınması gerekebileceğini, 0,8%'den daha büyük içeriklerdeki zeminler ise kalsiyum içerikli katkıları ile iyileştirilmemesi gerektiğini belirtmiştir. Puppala ve diğ. (2003), 1000 ppm'den daha düşük olan sülfat içeriklerinde sorun olmayacağını, 1000-2500 ppm arasında ise ilave kireç yüzdeleri ile sorunun çözülebileceğini belirtmiştir. Sülfat içerikleri 2500 ppm'den daha yüksek ise bu tür bir iyileştirmeden kaçınılması gerektiği belirtilmektedir. Harris ve diğ. (2004), 7000 ppm'den daha yüksek içeriklerde kireç stabilizasyonunun kullanılmaması gerektiğini belirtmektedir. Little ve diğ. (2009)'e göre çeşitli seviyelerde sülfat içeren (1000 ppm'den 10000 ppm'ye kadar olan) zeminlerin kalsiyum bazlı stabilizatörlerle iyileştirildiğinde etrinjit oluştuğu birçok vakada belgelenmiştir.

Ulusal Kireç Derneği (NLA, 2004)'e göre, geliştirilen standartlara göre zeminler herhangi bir kalsiyum bazlı katkı maddesi (kireç, Portland çimentosu, uçucu kül, vb.) ile stabilize edildiğinde çözünebilir sülfat tuzlarının varlığı problem çıkarabilir. Bu standartlara göre, 3000 ppm'den (%0,3) düşük zemin sülfat konsantrasyonlarının problemlere neden olması olasılık dışıdır. 3000 ile 5000 ppm (%0,3-%0,5) arasında olan konsantrasyon değerlerine sahip zeminler, bol su kullanılması ve kireç ile zeminin sıkıştırmadan önce yeterli zaman ayrılması (olgunlaştırma) gibi iyi uygulamalara özen gösterildiği takdirde kolaylıkla stabilize edilebilir.

Bu gözlemlere dayanarak, belirli bir zeminde ortama zarar verecek miktarda etrinjit oluşturmak için gerekli olan eşik seviyelerinin ne olduğunun belirlenmesinin oldukça karmaşık olduğu görülmektedir. Bu gözlenen farklılıklar öncelikle zemindeki mineralojideki farklılıktan kaynaklanmaktadır, çünkü zemindeki minerallerin türü ve yüzdesi, öncelikle kil mineralleri, etrinjit oluşturmak için gereken alüminatların salımını belirlemektedir.

2.7. ETRİNJİT OLUŞUMUNA DAİR LABORATUVAR VE ARAZİ ÇALIŞMALARINDA ELDE EDİLEN BULGULAR

Abdi (1993) tarafından yapılan bir çalışmada, alçıtaşı katkılarının ve kireçle stabilize edilen kaolinin performans üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Zemin farklı kireç yüzdeleri ile (ağırlıkça %6 ve %14) ve alçıtaşı (ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8) ile karıştırılmış ve daha sonrasında sıkıştırılmıştır. Numuneler 2 günden 20 haftaya kadar olan süre ile 30°C ve 100% bağıl nem

ortamında kürlenmiştir. Numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmış, kürlenme ve bunu takip eden ıslatma sırasında genleşme, su emme ve şişme basıncı davranışı belirlenmiştir. Kireç ilavesinin ve bunu takiben kürlenmenin kaolinin su emmesini, doğrusal genleşmesini ve şişme basıncını önemli ölçüde azalttığı bulunmuştur. Az miktarlardaki alçıtaşı miktarında bu özelliklerde iyileşme görülmüştür. Ancak daha yüksek alçıtaşı seviyelerinde (%8'e kadar) önemli ölçüde su emme, aşırı genleşme ve yüksek şişme basınçları ölçülmüştür. Su ile temasta oluşan bu aşırı hacim dengesizliğinin, belirli bir kireç içeriği için hem başlangıçtaki nemli kürlenme süresine hem de alçı içeriğine karşı çok hassas olduğu bulunmuştur.

Little ve diğ. (2010)'a göre etrinjit oluşması ile ilgili süreci değiştirmek için aşağıdaki önlemler alınabilir. Başlangıçta mümkün olduğunca çok sülfat çözündürmek için imalat sırasında mümkün olduğunca çok su kullanmak çekirdeklenme alanlarını ve çekirdeklenme alanlarının uniform olarak dağılması ihtimalini artırır. Bu olgunlaştırma zamanı ile sağlanır. Olgunlaşma süresi boyunca etrinjit oluşur ve sıkıştırma sırasında oluşan etrinjit büyük ölçüde parçalanır. Daha fazla etrinjit oluşumu için ise ortamda sülfat kalmayacağı için etrinjit ile ilgili sorunların bertaraf edilmesi bu şekilde bir dereceye kadar çözülebilir.

Petry ve diğ. (1992)'nin bazı inşaat tekniklerinin sülfat etkisiyle oluşan zararlı reaksiyonların önüne geçebildiğini kanıtlamaktadır. Genel olarak, bu inşaat yöntemleri şu şekilde özetlenebilir. Karıştırma ve olgunlaştırma süresi boyunca ve sıkıştırma öncesinde sülfatları çözündürmek ve kalsiyum-sülfat-alüminat-hidrat ürünlerinin oluşumunu başlatmak için ortamda yeterli suyun mevcut olması etrinjitin neden olduğu kabarmayı azaltır. Stabilizasyon sonrası reaksiyona yol açan yüksek sülfatlı suyun stabilize tabakaya yayılması engellenebilmesi için yol kaplamasının uygun drenaj sağlamak üzere tasarlanması önemlidir. Kalsiyum-sülfat-alüminat-hidratların oluşumu uygun koşullar altında hızlı bir şekilde meydana geldiğinden, reaksiyonları inşaat sürecinin başında ve sıkıştırma öncesinde başlatmak faydalı olur. Kalsiyum bazlı bir katkı ile stabilize edilmiş bir kilde yüksek çözünebilir sülfatın mevcudiyeti ve yol kaplamasının imalatı bitene kadar reaksiyonun meydana gelmemesi en kötü senaryodur. Örneğin yüksek oranda çözülebilir sülfat içerikli bir kili stabilize etmek için sönmemiş kireç kullanılırsa, sönmemiş kirecin homojen dağılmaması ve yetersiz suyla karıştırılması neticesinde, ortamdaki su çözünebilir sülfatları zeminden uygunsuz bir şekilde karıştırılan sönmemiş kirece taşıyana kadar reaktantlar "hareketsiz" durabilir. Bu durumda su kireci hidratlayacak ve yüksek sülfat ortamında alümina salacak olan kilin pH'ını artıracaktır. Sonuç

kalsiyum-alüminat-sülfat-hidrat oluşumu olabilir. Uygun karıştırma ve su muhtevası kontrolü bu durumun meydana gelmesini önleyebilir veya etrinjitin yarattığı etkileri minimuma indirebilir.

Quiñónez ve diğ. (2022) çalışmasında olgunlaştırma süresinin, sönmüş kireç ve Portland çimentosu kullanılarak stabilize edilmiş sülfat bakımından zengin zeminlerin mukavemeti ve serbest şişmesi üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi amaçlamıştır. Kürlenme süresi, karışımların mukavemetini değiştirmede en etkili faktördür. İstatistiksel olarak, olgunlaştırma süresinin stabilize edilmiş sülfat bakımından zengin zeminlerin şişmesini etkilemede önemli olduğunu gösterilmiştir. Olgunlaştırma süresi iki günden dört güne uzatıldığında, yeniden sıkıştırma işlemi sırasında daha gelişmiş kristallerin kırılması/yeniden düzenlenmesi nedeniyle kabarmada da önemli bir azalma gözlemlenmiştir.

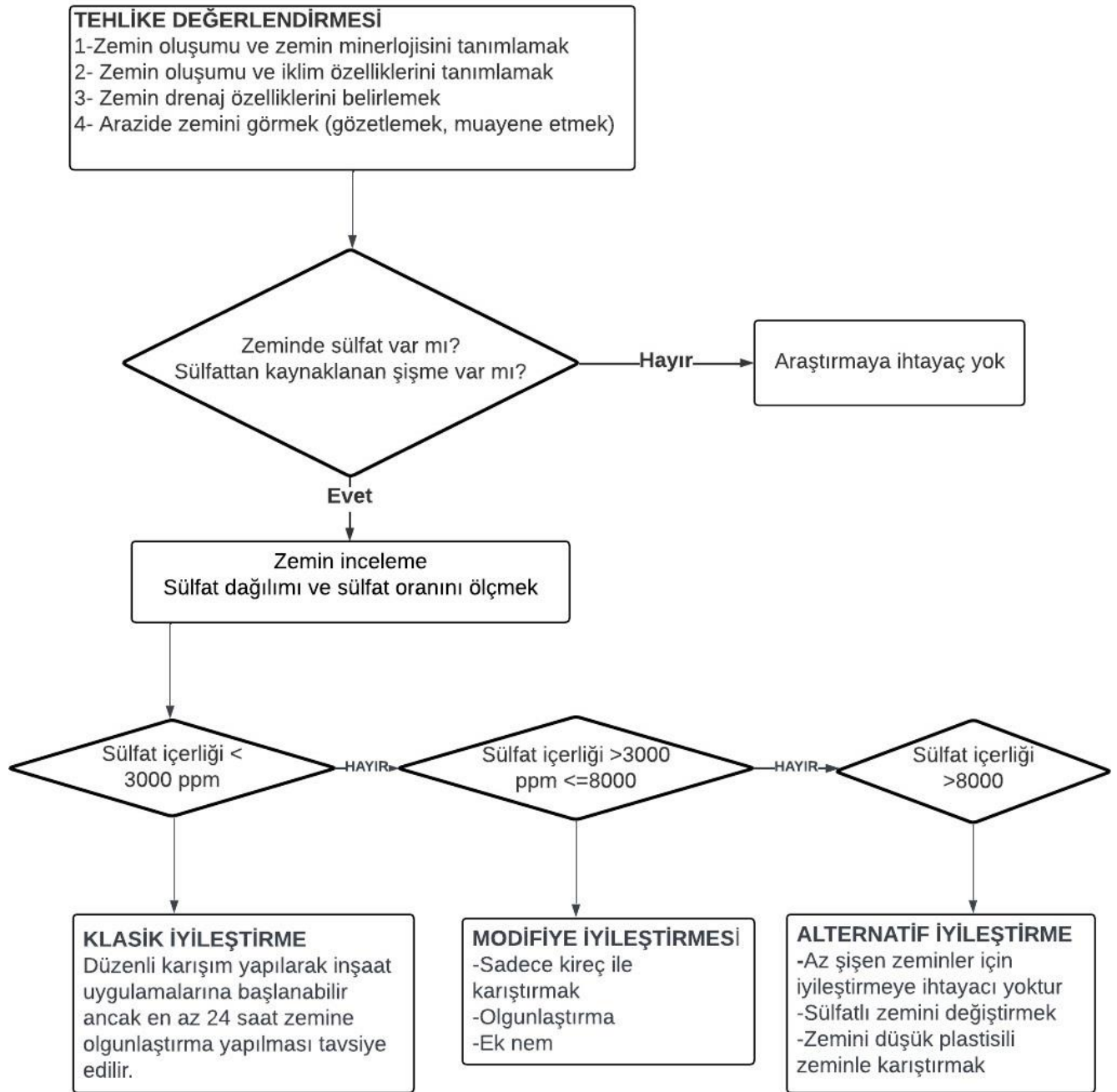
Ulusal Kireç Derneği (NLA, 2004)'e göre 5000 ppm'in üzerinde konsantrasyonlara sahip sülfatlı zeminler genellikle ilki ilk karıştırmadan önce ve ikincisi de olgunlaştırma süresinden sonra olmak üzere iki seviyede kireç uygulamasına tabi tutulur. Zeminin su muhtevası mümkün olduğunca çok sülfatı çözdürmek ve etrinjiti sıkıştırma öncesi oluşmaya zorlamak için bir günden fazla süren bir olgunlaştırma süresi boyunca optimumun yüzde beş üzerine çıkarılır. Etrinjit oluşur oluşmaz nispeten stabildir ve gelecekte problemlere neden olması olasılık dışıdır. Olgunlaştırma süresinden sonra zemine ilave kireç eklenir ve inşaat normal şekilde devam eder.

Puppala ve diğ. (2018)'e göre olgunlaştırmamanın amacı, olgunlaştırma süresi boyunca mevcut tüm sülfatları çözündürmektir, böylece daha sonra etrinjit/taumasit oluşturacak şekilde sülfat artık mevcut olmayacaktır. Çalışmalarında kullandıkları altı zeminden ikisi yüksek sülfat içeriğine sahiptir ve "sıkıştırma öncesi" olgunlaştırma tekniği kullanılarak başarıyla stabilize edilmiştir. Bu zeminlerin sülfat seviyeleri 30000 ppm'nin altındadır. Bu çalışma, diğer tüm faktörlerin (sülfat içeriği, reaktif alümina ve silika içeriği) aynı kalması şartıyla, kaolinit mineral baskınlığına sahip zeminlerin etrinjit kaynaklı kabarmaya daha eğilimli olduğunu göstermektedir. Sıkıştırma boşluk oranları, etrinjit büyümesi ve sonrasında oluşan kabarma üzerinde de önemli bir etkiye sahip olduğunu, çünkü daha yüksek boşluk oranlarına sahip zeminlerin başlangıçta oluşan etrinjit büyümesini tolere edebileceğini göstermiştir.

Bir diğer önemli araştırma Talluri ve diğ. (2013) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada incelenen altı zemin arasından dört zemin olgunlaştırma süresine izin verilerek etkili bir şekilde

stabilize edilebilmiştir. Bu çalışmada göz önüne alınan olgunlaştırma süreleri 0,3 ve 7 gündür. Olgunlaştırma süresine izin verilmemesi durumunda, tüm zeminler kireç ile stabilize edildikten sonra yüksek kabarma dayanımı sergilemişlerdir. Daha uzun olgunlaştırma dönemleri, etrinjittin olgunlaştırma sırasında oluşumuna neden olmuştur. Nihai sıkıştırmadan önce yeniden karıştırma işlemi sırasında, oluşmuş olan etrinjit kırılmış ve yetersiz sülfat kalmış olması nedeniyle daha fazla büyümesi engellenmiştir. Olgunlaştırma sonrasında karışıma ilave nem sağlanmıştır. Bu durum 30000 ppm'nin altında sülfat içeriğine sahip olan altı zeminlerden dördü için geçerlidir. Diğer iki zemin iki zemin 30000 ppm'nin üzerinde sülfat içermekte olup, olgunlaştırma dönemlerini artırmak suretiyle bile stabilize edilememiştir. Olgunlaştırma sırasında sülfat danesinin boyutu da göz önüne alınması gerektiği görülmüştür. Serbest basınç mukavemeti değerlerinde olgunlaştırma süresine bağlı olarak azalmalar ölçülmüş olmakla birlikte, bunun hacim değişikliği davranışları üzerindeki etkisi çok az olmuştur. Araştırma kil mineralojisinin değerlendirilmesinin de çok önemli olduğunu göstermektedir, çünkü mevcut kil minerallerinin türü, onların sülfat reaksiyonlarındaki reaktiviteleri hakkında fikir vermektedir.

Puppala ve diğ. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada 10000 ppm'nin üzerinde sülfat içeren stabilize edilmiş zeminlerin davranışı incelenmiştir. Çalışmada kireç ile stabilize edilmiş farklı zemin sınıfına sahip iki zemin incelenmiştir. 30000 ppm veya daha düşük sülfat içeren zeminde olgunlaştırma süresinin kabarma potansiyelini önemli bir miktarda azalttığı görülmüştür. 30000 ppm'den daha fazla sülfat içeren başka bir zeminde ise daha uzun süreli olgunlaştırma dönemlerinde dahi kabarma devam etmiştir. Aynı çalışmada düşük alümina içeriklerinin etrinjit oluşumunu ve kabarmayı kolaylaştırırken, yüksek alümina içeriklerinde hem etrinjit hem de puzolanik reaksiyonların aynı anda meydana geldiği görülmüştür. Ancak bu durumda puzolanik reaksiyonların baskınlığı nedeniyle daha az kabarma gözlenmiştir. Bu çalışmada boşluk oranının kabarmayı etkilediği de görülmüştür. Aşağıdaki akış şeması, sülfat seviyelerini temel alan bir uygulama karar şemasını sunmaktadır.



Şekil 2.11: Sülfat içeren zeminlerde kireç ile iyileştirmeye yönelik prosedür, (TDOT, 2005).

Buttress ve diğ. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada Avrupa Hızlandırılmış hacimsel şişme testine (EN13286-49) tabi tutulan iki adet kireçle stabilize edilmiş sülfat içeren yapay zeminin fiziko kimyasal analiz sonuçlarını sunmaktadır. Test sırasında çeşitli aralıklarda numuneler alınmış ve numuneler mikroyapısal analize tabi tutulmuştur. Etrinjit her iki zemin türünde de oluşturulmuşken, kristal morfolojilerinde önemli farklılıklar görülmüştür. Kaolin esaslı

zeminlerden oluşan etrinjit kristalleri çok küçük, koloidal büyüklüktedir ve diğer parçacıkların yüzeyinde oluşma eğilimindedir. Bunun aksine, montmorillonitten oluşturulan etrinjit kristalleri nispeten büyüktür ve tipik olarak gözenek çözeltisindeki yüzeyden uzakta oluşmuştur. Etrinitin oluştuğu mekanizmanın boşluk çözeltisindeki hidroksit iyon konsantrasyonu ve kilin temel yapısı ile belirlendiği sonucuna varılmıştır. Kaolin zeminde, etrinjit topokimyasal bir mekanizma ile oluşmakta ve kristal şişmesi ile genişlemektedir. Montmorillonit zeminde ise çözelti mekanizması ve kristal büyümesi ile oluşmaktadır. Her kilden üretilen yüksek sülfatlı zeminler, Avrupa hızlandırılmış hacimsel şişme testine (EN13286-49) tabi tutulmuştur. Numune sıkıştırılmadan önce ve belirlenmiş aralıklarla alınmış ve mikroskopik ve faz kompozisyonu analizine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, kaolin esaslı killerin eşdeğer sülfat içeriğinde montmorillonitlerden daha zararlı bir şişme tepkisi verdiğini göstermektedir. XRD, dTGA ve SEM-EDX analizi sonuçları kaolin zeminlerindeki etrinjit kristallerinin çok küçük ve saptanması zor olduğunu bulmuştur, bu da etrinjitin tercihen bir topokimyasal biçimde oluştuğunu, genişlediğini ve daha sonra bir kristal şişme mekanizması ile daha da genişlediğini göstermektedir.

Ehwailat ve diğ. (2021), sülfat içeren kaolin içeriğine sahip zemini kireç stabilizasyonu ile iyileştirmiş ve kürden sonra su içinde bırakılmayan yüksek kalsiyum sülfat (%10) içerikli zemin numunelerinde zemin mukavemetinde önemli artış gözlemlenmiştir. 28 günlük kürlemeden sonra kireç ile iyileştirilmiş zeminlerin mukavemeti, kil-kireç-alçıtaşı ile stabilize edilmiş zemin numunelerine kıyasla ıslatmadan sonra önemli ölçüde iyileşmiştir. Alçıtaşının varlığı nedeniyle oluşan etrinjit üretimi iyileştirilmiş zeminlerin yapısını önemli ölçüde etkilediğinden bu düşük mukavemetin nedeni olabilir. Etrinit oluşumu zemin numunelerinin genişlemesine neden olmuştur.

Paramora ve diğ. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, %3 sönmemiş kireçle işlenmiş düşük ve yüksek sülfatlı bir zeminin şişme potansiyeli değerlendirilmiştir. Şişme testi yöntemlerinden birisi yaş California Taşıma Oranı (CBR) için İngiliz Standardı yöntemlerine ve hızlandırılmış şişme testleri olarak seçilmiştir. Ancak su 10°C olarak kullanılmıştır. Bulgular, suya erişim yolunun, 10°C'de yapılan testlerle ölçülen şişme derecesinde oldukça etkili olduğunu ve en fazla şişmenin serbest hızlandırılmış şişme testlerinde ölçüldüğünü doğrulamaktadır. Islatma suyuna alçı eklenmesi durumunda, normalde musluk suyunda şişmeyen düşük sülfatlı numunelerde %6,5'a kadar ve yüksek sülfatlı zeminlerde daha da yüksek genleşmeye (%22)

neden olmuştur. California Taşıma Oranı (CBR) testlerinde şişme çok daha az olarak ölçülmüştür. Bu araştırmanın sonuçları, test düzeneğinin meydana gelen şişme miktarı üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Suyu erişim ile numunelerin hacimsel değişimi arasında pozitif doğrusal bir ilişki vardır. Bu nedenle, en yüksek şişme miktarı serbest hızlandırılmış şişme testinde, en düşük şişme miktarı ise California Taşıma Oranı CBR testinde ölçülmüştür. Mineroloji testleri, numunelerde yalnızca sınırlı miktarda etrinjit oluştuğunu ve dolayısıyla daha yüksek şişmenin numune tarafından alınan bağlanmamış sudan kaynaklandığını göstermektedir. 10°C'de sülfat şişmesinin kimyasal sürecinin sadece zemindeki etrinjit ve taumasit büyüme miktarıyla ölçülmediği açıktır, bu nedenle bu minerallerin oluşumuna ilişkin daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Diğer bir çalışma Newbury ve diğ. (2021) tarafından yapılmıştır. Bu laboratuvar çalışmasında yüksek sülfatlı bir zemini stabilize etmek için %6 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) ve 24 saatlik bir olgunlaştırma periyodu ile %2 sönmemiş kireç kullanmıştır. Bu çalışmada standart bir test yöntemi farklı su sıcaklıklarında test edilmiştir. Bulgular, 20°C numunelerde ortalama şişmenin 5.7 mm olduğunu göstermektedir, ancak, 10°C numunelerde ortalama 10.3 mm ile miktarın neredeyse iki katına çıkmıştır. Kireçle iyileştirilmiş bir malzemenin yerinde performansını tahmin etmek için 20°C'de gerçekleştirilen laboratuvar testleri kullanılırken dikkatli olunması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Beetham (2015) çalışmasında sülfatlı zeminlerin kireç ile stabilizasyonu çalışılmıştır. Bu çalışmada verildiği üzere sülfat şişmesi sorunları nispeten nadir olsa da, meydana geldiklerinde genleşme seviyesi çok yüksek olabilir. 1989'da Oxford, İngiltere'deki M40 otoyolunun inşaatı sırasında yüksek bir sülfat şişmesi gelişmiştir. Kireç stabilizasyon çalışmalarından sonraki kış döneminde, 250 mm derinliğinde yer alan kireçle işlenmiş bir tabaka 150 mm'ye kadar şişmiş ve üstteki yol inşaatını tahrip etmiştir. M40 karayolu hasarından bu yana, sülfat şişmesi reaksiyonlarını daha iyi anlamak için önemli miktarda çaba sarf edilmiştir ve bu konudaki bilimsel bilgi durumu nispeten güçlüdür. Bu çalışmada kireç stabilizasyonunun saha uygulamalarını yansıtan bir hazırlama yönteminin kullanıldığı bir dizi laboratuvar deneyi, büyük kil topraklarının kireçle stabilize edilmiş killi zeminin dayanıklılığı üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılmıştır. Bu yöntem hem düşük hem de yüksek sülfatlı killi zeminlere uygulanmıştır. Farklı sıcaklıklar da test edilmiştir. Mineralojik testler, 8°C'de kristalli etrinjitin büyümesinin yavaşladığı ve suyu emmek için yüksek afiniteye sahip olan etrinjit öncüsünün bu

durumda çok daha uzun süre kaldığı hipotezini mümkün kılmıştır. Bu nedenle, 20°C'deki laboratuvar şişme testleri, sahada gelişebilecek şişme miktarını büyük ölçüde olduğundan az tahmin edebileceği düşünülmektedir.



3. YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan malzemeler ve yapılan deneyler tanıtılmaktadır. Etrinjitin hangi şartlarda ve ne seviyede oluştuğunun anlaşılabilmesi için deneylerde farklı killeri, farklı tür ve miktarda sülfat tipleri mineralleri, kuvars ve kalsit kullanılmıştır. Bu çalışmalar başlıca üç bölüme ayrılabilir.

- a. Montmorillonit kili ile yapılan deneyler
- b. Doğal kaolin ile yapılan deneyler
- c. İşlenmiş iki tip kaolin ile yapılan deneyler

Tez kapsamındaki çalışmalara öncelikle daha aktif bir kil olduğu için montmorillonit kili ile başlanmıştır. Bu kilin etrinjit oluşumu için de uygun olacağı varsayılmıştır. Bu numuneler üzerinde yapılan indeks deneylerinden sonra, etrinjit oluşumunun mukavemet üzerindeki etkisini incelemek amacıyla çok sayıda sıkıştırılmış numune hazırlanmıştır. Numuneler farklı kür süreleri sonunda su girişine maruz bırakılmış ve sonrasında mukavemet deneyleri yapılarak su girişine maruz bırakılmamış numuneler ile karşılaştırılmıştır. Montmorillonit ile hazırlanan, kireç ve sülfat içeren numunelerde konsolidasyon deney aletinde şişme görülmemiştir. Bir sonraki aşamada şişmenin sağlanması için kil tipi değiştirilerek doğal kaolin ile deneylere devam edilmiştir. Bu grup için konsolidasyon aletinde şişme deneyleri yapılmıştır. Bu numunelerde de şişme elde edilemeyince, numunelere farklı yüzdelerde kum ilavesi yapılmış ve numune içerisine daha hızlı su girişinin sağlanması amaçlanmıştır. İlave olarak kompaksiyon kalıbında da numuneler hazırlanmış ve büyük boyutlu numuneler üzerinde kabarma deneyleri yapılmıştır. Kum içeren numunelerde farklı miktarlarda şişme ölçülebilmektedir. Bu deneyler sırasında numuneler üzerinde oluşan çatlaklar, düşey ve yatay deplasmanlar kayıt altına alınmıştır. Bu veri, kil tipine bağlı olarak çatlak miktarı ve şişme mekanizmasının değiştiğini göstermiştir. Daha sonraki deneylerde benzer ölçümler dijitalleştirilerek kullanılmıştır. Son aşamada ise alüminyum içeriği yüksek iki farklı tip kil piyasadan temin edilmiş ve çok sayıda kabarmaya yönelik deneyler yapılmıştır. Deneylerde kür süresi, numune büyüklüğü, kür sıcaklığı gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. Bu numunelerin bir kısmı üzerinde şişme basıncı da ölçülmüştür. Her gruptan çok sayıda numune için XRD deneyleri ve ICP deneyleri yapılmış ve şişme davranışı ile ilişkilendirilmek amaçlanmıştır. İlave olarak etrinjit oluşumunu engellemek veya azaltmak amacı ile ekonomik ve kolay bir yöntem önerilmiş ve bu amaca

yönelik deneme deneyleri yapılmıştır. Elde edilmiş olan tüm sonuçlar literatürde yer alan mevcut çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

3.1. MONTMORİLLONİT KİL İLE YAPILAN DENEYLER

3.1.1. Montmorillonit Kili ve Kirecin Özellikleri

Çalışmanın bu bölümünde kullanılan zemin İstanbul ili, Avrupa Yakasından bu tez projesi için laboratuvara getirilmiştir. Zemin laboratuvara çuvallar içerisinde getirilmiş ve deneylerde kullanılmak üzere uygun şekilde hazırlanmıştır. Şekil 3.1’de laboratuvara getirilen zemin numuneleri gösterilmektedir. Numuneler yapılacak deneyler için 4 nolu elekten geçecek şekilde öğütülmüş ve daha sonra deneylerde kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Araziden getirilen kil.

Ufalama işlemi ardından zeminin indeks özelliklerinin belirlenmesi için kıvam limitleri ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Zeminin indeks özelliklerine ait değerler Tablo 3.1’de verilmektedir. Elek analizi sonucunda kum yüzdesi %3, silt ve kil yüzdesi ise % 97 olarak bulunmuştur. Kil Plastisite kartına göre montmorillonit kili sınıfına girmekle birlikte esasen düşük-yüksek plastisite sınırındadır. Kil üzerinde yapılmış olan kimyasal analizler sonucunda içeriğinde montmorillonit-klorit-muskovit-kuvars olduğu görülmüştür. Deneylerde kireç olarak CL-80 S tipi sönmüş kireç kullanılmıştır. Kirecin kimyasal özellikleri Tablo 3.2’de verilmektedir. Bu grup numune için konsolidasyon şişme deneyleri konsolidasyon deney aletinde yapılmıştır.

Mukavemet deneyleri kapsamında serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Kireç yüzdesi, şişme deneylerinde %5, mukavemet deneylerinde ise %4 ve %7 olarak seçilmiştir. Doğal haldeki zeminin ve kireçli zeminin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerlerini belirlemek için kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerde Standart Proktor kompaksiyon enerjisi kullanılmıştır.

Tablo 3.1: Montmorillonit tip kilin özellikleri.

Özellik	Değer
Likit Limit (%)	51
Plastik Limit (%)	23
Plastisite İndisi	28
Zemin Sınıfı (USCS)	(CL-CH) sınırında
Sülfat içeriği (mg/kg)	16.9
Standart Proktor Enerjisinde Optimum Su Muhtevası (%)	23
Standart Proktor Enerjisinde Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	15.1

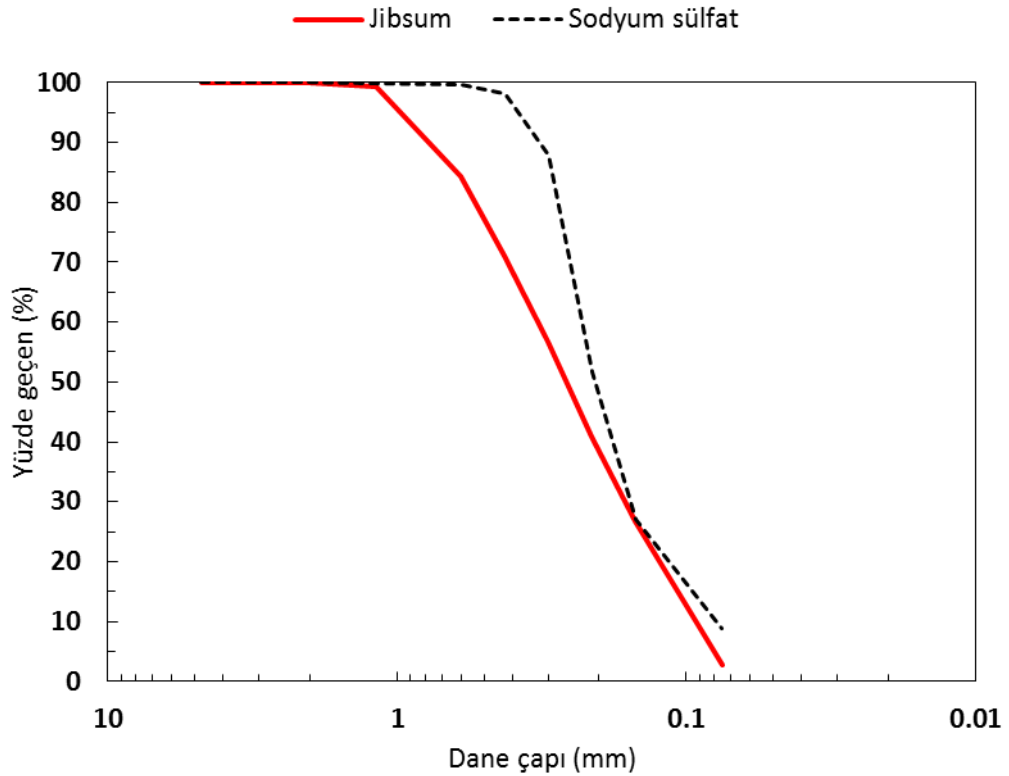
Tablo 3.2: Kirecin (CL80) kimyasal ve fiziksel özellikleri.(URL 3)

Analiz Değerleri	%
Kızdırma Kaybı	Maks. 6
Ca(OH) ₂	Min. 83
TOPLAM CaO+MgO	Min. 90
MgO	Maks. 3
Çözünmeyen Madde	Maks. 2.5
H ₂ O	Maks. 2.0
SO ₃	Maks. 2.0
R ₂ O ₃	Maks. 1.5
200µ (Elek Üstü)	Maks. 1
90µ (Elek Üstü)	Maks. 5
Birim Hacim Kütlesi (Kg/dm ³)	Maks. 0.5

3.1.2. Sülfat Kaynağı ve Miktarı

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Merkez Laboratuvarı'nda yapılan kimyasal analiz sonucunda doğal zeminde bulunan sülfat miktarı 16.9 mg/kg (ppm) olarak belirlenmiştir. Bu değer etrinjit oluşumu için yeterli olmadığından zemine ilave olarak sülfat eklenmesi gerekmiştir. Bu amaçla montmorillonit kili için kullanılan sülfat kaynakları jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve Sodyum Sülfat (Na_2SO_4)'tır kullanmıştır. Jips bazı numunelerde öğütülmeden, bazı numunelerde ise öğütülerek kullanılmış ve sülfatın öğütülmesinin reaksiyon süreçlerindeki etkisi de incelenmiştir. İnce ufalama için 40 nolu elek altı sülfat malzemesi kullanılmıştır

Sülfat (SO_3) yüzdesi bazı deneylerde %0.5 (2000 ppm), bazı deneylerde ise %1 (4000 ppm) ve %3.4 (13600 ppm) olarak seçilmiştir. Bunlar etrinjit oluşumu için literatürdeki alt ve üst sınır değerler olarak değerlendirilebilir. Kullanılan iki tip sülfatın dane dağılım eğrileri aşağıda verilmektedir.



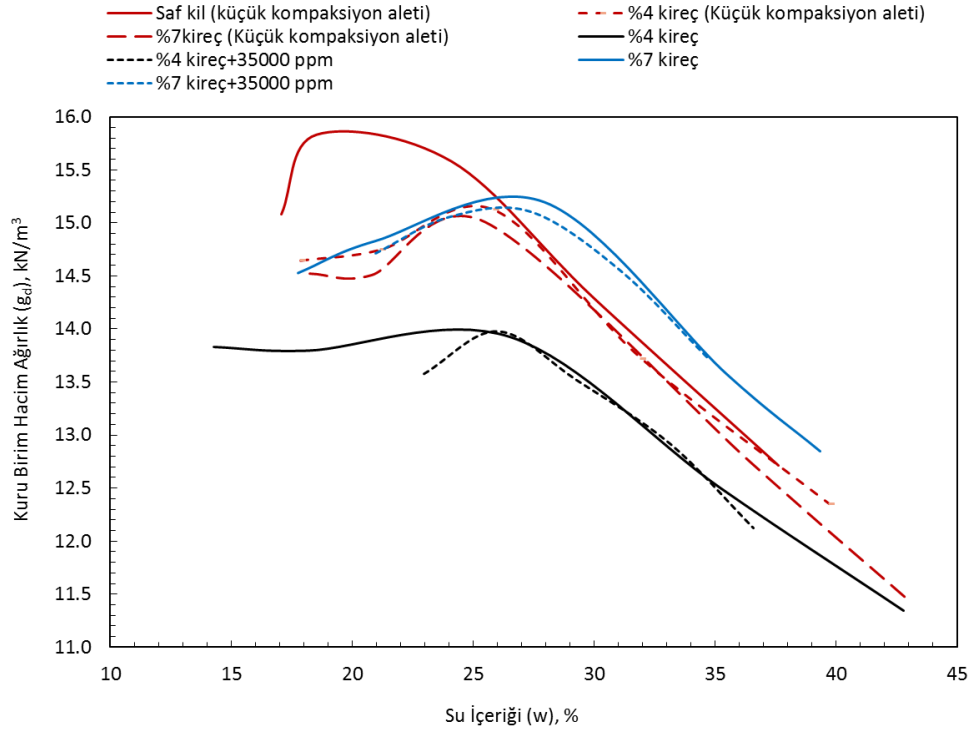
Şekil 3.2: Alçıtaşı ve sodyum sülfatın granülometri.

3.1.3. Deneyler

Etrinjitin oluşumu şişme davranışına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla konsolidasyon deney aletinde şişme deneyleri yapılmıştır. Numuneler için zemin kuru olarak hazırlanmış ve daha sonra sülfat ve kireç ilave edilmiştir. Son olarak u ilavesi yapılmıştır. Tüm deneylerde musluk suyu kullanılmıştır. Tüm deneylerde 4 nolu elekten elenen zemin ile numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin homojen olabilmesi çok önemlidir, bu nedenle tüm karışımlarda aynı metod uygulanmıştır. Karışımlar öncelikle bir saat süre ile üzeri kapatılarak bekletilmiş ve bir saatlik olgunlaştırma süresi sağlanmıştır. Daha sonra karışım özenli bir şekilde tüm numuneler için aynı süre uygulanarak karıştırılmıştır. Bu karışımlar üzerinde kompaksiyon deneyleri yapılmış ve maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri elde edilmiştir. % 4 ve %7 kireç için optimum su muhtevası bulunmuştur. Sonuçlar Şekil 3.3'te görülmektedir. Sülfat ilavesinin kompaksiyon eğrilerine olan etkisinin çok az olduğu görülmektedir.

Numuneler iki farklı numune boyutunda hazırlanmıştır. Bunlardan ilki laboratuvarında bulunan Standart Kompaksiyon kalıbı, diğeri ise küçük boyutlu numune hazırlama kalıbıdır. Küçük kalıpta Standart Proktor Kompaksiyon Enerjisine ulaşabilmek için numuneler yedi tabaka halinde ve her tabakaya 25 vuruşu olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Kalıbın çapı 5 cm, boyu ise 10 cm'dir. Her iki kalıp Şekil 3.4'te görülebilir. Numuneler üç farklı su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Bunlar “optimum”, “optimum+3” ve “optimum-3” su muhtevalarıdır.

Konsolidasyon numuneleri için büyük kalıplarda sıkıştırma yapılmıştır. Numuneler sıkıştırma kalıbından çıkarılarak konsolidasyon kalıbına alınmış ve 7 gün, 28 gün ve 56 gün kür süresi sonunda konsolidasyon deneyine tabii tutulmuştur. İlave olarak sülfat içeriğinin mukavemete olan etkisi de incelenmiştir. Zemin karışımları 28, 56 ve 365 gün için kür odasına bırakılarak dayanımın zamanla değişimi incelemiştir. Her kür günü için 72 adet numune test edilmiştir. Her numune katkısı için dört numune hazırlanmış, kür süresi sonunda iki numune hemen kırılmış, iki numune ise doymuş kum ortamı içerisinde bırakılmış (Şekil 3.6) ve sonrasında mukavemet deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.3: Kompaksiyon eğrileri.



Şekil 3.4: Sıkıştırma kalıplarında hazırlanan numuneler.



Şekil 3.5: Numuneler için kullanılan kür ortamı.



Şekil 3.6: Mukavemet deneyleri için doymuş kum ortamı içerisinde bırakılmış montmorillonit kili numuneleri.

3.2. KAOLİN TİPİ KİL İLE YAPILAN DENEYLER

Montmorillonitik kili ile yapılan deneylerde şişme oluşmadığı için, bir sonraki deney grubuna laboratuvarında bulunan kaolin kili ile devam edilmiştir. Bu grupta sadece konsolidasyon deney aletinde şişme deneyleri yapılmıştır. Jips yüzdesi %3.4 ve %10 olarak seçilmiştir. %10 jips yüzdesi ile literatürdeki üst sınırların da üzerine çıkarılmış, böylece bu grup deneyde etrinjit oluşmasının sağlanması için gayret edilmiştir. Jips bir kısım numunede olduğu gibi kullanılmış, bazı numunelerde ise ufaltılarak kullanılmıştır. Bu grup deneyde kireç yüzdesi %4 olarak seçilmiştir.

Bu değerler kullanılarak, kompaksiyon kalıbında numuneler hazırlanmış, konsolidasyon kalıbına alınmış ve uzun süreli şişme davranışı gözlenmiştir. Ancak bulgular bölümünde görüleceği gibi bu kil ile de şişme elde edilememiştir. Şişme oluşmamasının kilin içerisine yeteri kadar su girişi olmaması ile ilişkili olabileceği düşünülmüş ve kaoline kum ilave edilmesi ve böylece numunelerin permeabilitesinin artması ve su girişinin hızlanması sağlanmaya çalışılmıştır. Kum iki farklı yüzde olarak ilave edilmiştir. Bunlar % 75 kum içeren karışım, diğeri ise % 50 kum içeren karışımdır. Sıkıştırma için Standart Proktor Deney kompaksiyon enerjisi kullanılmıştır. Kompaksiyon deney sonuçları Tablo 3.3'te verilmektedir.

Tablo 3.3: Kum ilave edilen kaolin için kompaksiyon deney sonuçları.

Numune tipi	γ_d (kN/m ³)	w_{opt} , %
% 4 kireçli (% 25 kil (kaolin) + % 75 kum)	17.7	15
% 4 kireçli (% 50 kil (kaolin) + % 50 kum)	21.4	23.5

3.3. CHINAFİLL VE K-BRITE KAOLİNİ İLE YAPILAN DENEME DENEYLERİ

İlk iki aşamada kullanılan killerde kabarma davranışının görülmemiş olması istenilen seviyede etrinjit oluşmadığını göstermektedir. Bu nedenle yeni bir kil tipi arayışına gidilmiş ve piyasada satılan iki tip kaolin kili satın alınarak laboratuvara getirilmiştir. Bu grup deneylerde iki tip kaolin kili kullanılmıştır. Killerden birisi Chinafill 830, diğeri ise Kaolin K-Brite HK 158 kili olup, aynı firmadan tedarik edilmiştir. Bu killerin tedarik sürecinde alüminyum yüzdeleri yüksek olan kaolin çeşidinin seçilmesi hedeflenmiş ve firma tarafından bu iki kil çeşidi önerilmiştir. Bu iki tip kil laboratuvar Şekli 3.7'de görüldüğü gibi torbalar içerisinde getirilmiştir. Bu killere farklı miktarda kum ilave edilip serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Bu numunelerde şişme elde edildiğinden, teze bu killer ile devam edilmiştir.



Şekil 3.7: Satın alınan iki tip kaolin.

İlk olarak Chinafill kili ile deneme deneyleri yapılmıştır. Numunelerin permeabilitesini artırmak için kum kullanılmıştır. Sülfat yüzdesi %1, %3.5 ve kireç yüzdesi %4 ve %7 olarak seçilmiştir. Deneme deneylerinde bazı numunelerde sodyum sülfat, bazılarında ise kalsiyum sülfat kullanılmıştır. Kum yüzdesi %25, %50 ve %75 olarak seçilmiştir. Numuneler Standart Proktor enerjisi kullanılarak kompaksiyon kalıplarında hazırlanmıştır. Numuneler 3 gün ve 28 gün süre ile küre tabi tutulmuştur. Kür ortamı için laboratuvar ortam sıcaklığı ve %100'e yakın bir nem ortamı kullanılmıştır. Kür süresi sonunda konsolidasyon deney aletinde serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Etrinjit oluşumunun tüm safhalarının gözlenebilmesi için deneylere mümkün olduğu kadar uzun bir süre devam edilmiştir. Deneyler sonunda %25 kum içeriğinde şişme olduğu, %75 kum içeriğinde ise şişmenin sınırlı olduğu görülmüş ve deneylere %25 kum ile devam edilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre Chinafill ve K-Brite ile yapılan asıl deneylere başlanmıştır. Bu deneylerde sıkıştırma su muhtevasının, sülfat yüzdesinin ve kür süresinin ve kür sıcaklığının etkisi uzun süreli deneylerle araştırılmıştır.

3.4. ÖZEL OLARAK TEMİN EDİLEN İKİ TİP KAOLİN İLE YAPILAN ANA DENEYLER

3.4.1. Chinafill ve K-Brite Killerinin Özellikleri

Her iki kil için üretici firma tarafından kimyasal özellikler Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te sunulmaktadır.

Tablo 3.4: Chinafill kaolin kili fiziksel özellikleri.

Ölçülen değer	Değeri
Parlaklık, %	85.5
Renk Ölçümü	
Renk Tonu	1.54
Doygunluk	0.39
Luminance A, %	87.5
pH Değeri	5.0
Nem, %	< 1.0
Kütle Yoğunluğu, kg/m ³	350

Tablo 3.5: Chinafill kaolin kili dane büyüklüğü ile ilgili özellikler.

Ölçülen değer		Değer
Ekrandaki kalıntı	%	0.02
> 45 µm		
Parçacık Boyutu Dağılımı	%	59
< 2 µm		
D ₅₀	µm	1.5
Yüzey Alanı BET	m ² /g	9
Yağ Emme	g/100 g	56

Tablo 3.6: Chinafill kaolin kili kimyasal özellikleri.

Ölçülen değer	Değer
SiO ₂	49.3
Al ₂ O ₃	35.1
Fe ₂ O ₃	0.4
TiO ₂	0.4
Na ₂ O	0.1
K ₂ O	2.3
Akkor kaybı	11.8

Tablo 3.7: K-Brite kaolin kili fiziksel özellikleri.

Ölçülen değer	Değeri
Parlaklık, %	87.0
Renk Ölçümü	
Renk Tonu	96.8
Doygunluk	-0.7
Luminance A, %	3.9
Ph Değeri	6.0
Nem, %	< 1.0
Kütle Yoğunluğu, kg/m ³	300

Tablo 3.8: K-Brite kaolin kili tane büyüklüğü ile ilgili özellikler.

Ölçülen değer	%	Değer
Ekrandaki kalıntı > 45 µm		0.02
Parçacık Boyutu Dağılımı < 2 µm	%	90
D ₅₀	µm	0.4
Yüzey Alanı BET	m ² /g	19
Yağ Emme	g/100 g	65

Tablo 3.9: K-Brite kaolin kili kimyasal özellikleri.

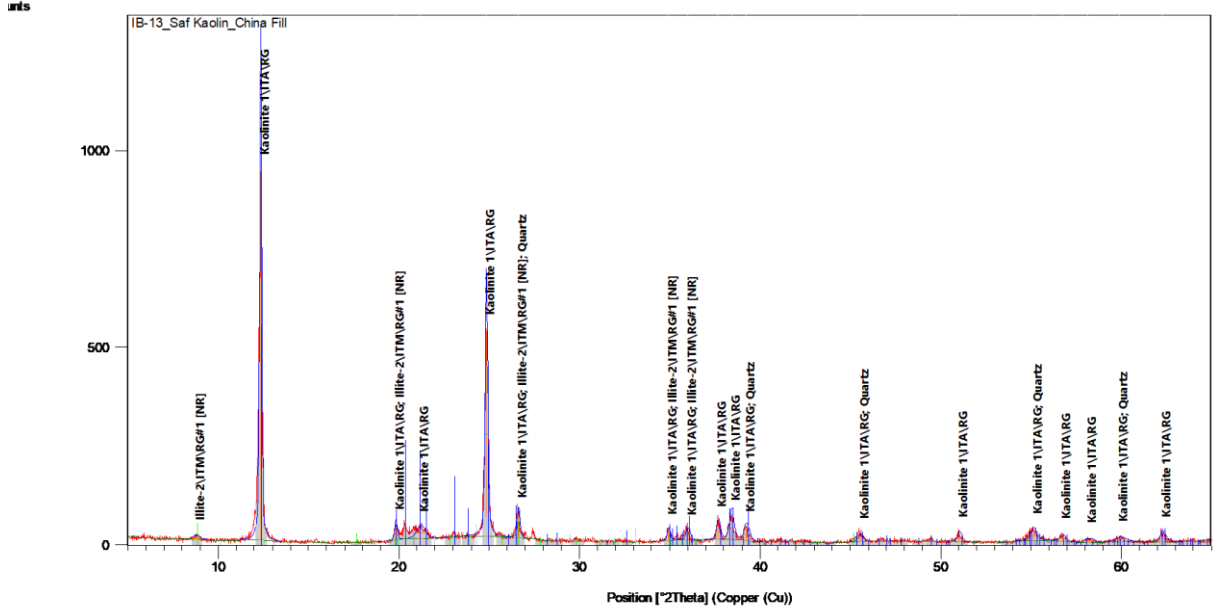
Ölçülen değer	Birim	Değer
SiO ₂	%	47.2
Al ₂ O ₃	%	37.2
Fe ₂ O ₃	%	0.65
TiO ₂	%	0.15
Na ₂ O	%	0.05
K ₂ O	%	0.9
Akkor kaybı	%	13.3

Bu iki kil birbirlerinden fiziksel özellikleri bakımından farklıdır. Chinafill kili için kil yüzdesi %59, K-brite için %90'dır. Chinafill için D₅₀ değeri 1.5 µm, K Brite için ise 0.4 µm'dır. Diğer önemli bir fark da spesifik yüzey alanıdır. Chinafill için 9 m²/g olan bu değer, K-Brite için 19 m²/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler K-Brite kilinin hem içerdiği kil içeriği bakımından hem de ortalama dane boyunun daha küçük olması ve spesifik yüzey alanının büyük olması bakımından Chinafill kiline göre daha aktif olacağını göstermektedir. Alüminyum içerikleri bakımından her iki kilin birbirine yakın olduğu görülmektedir. K-Brite %2 daha fazla Al₂O₃ içermektedir.

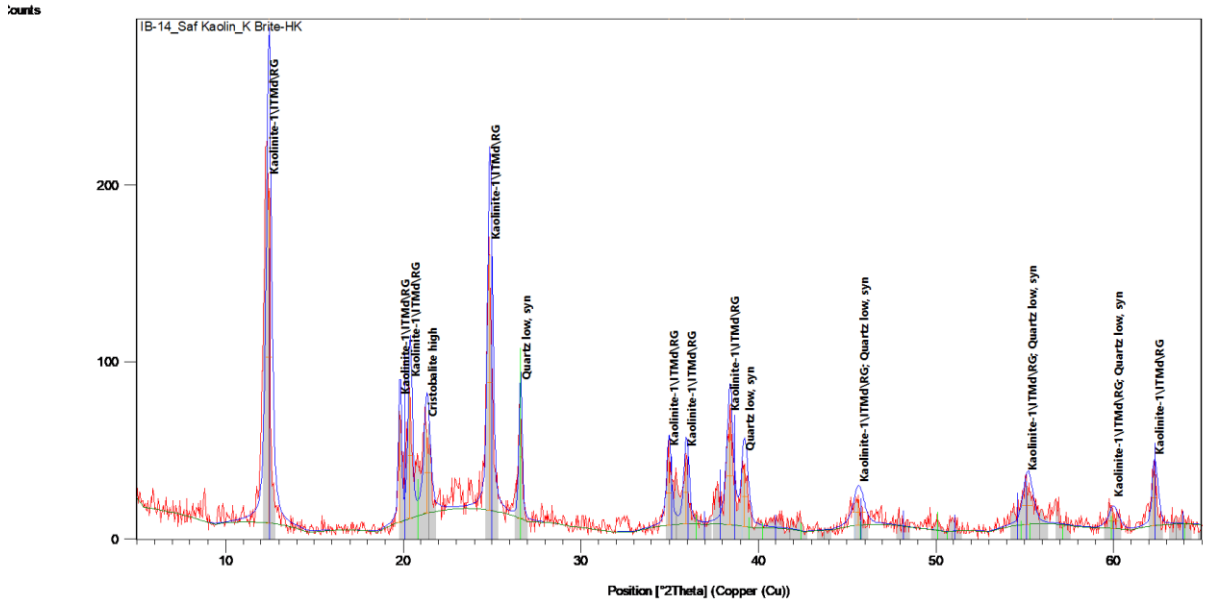
Bu killerin Atterberg Limit değerleri bulunmuş ve Tablo 3.9'da sunulmuştur. Her iki zemin de USCS'e göre CL'dir, yani düşük plastiseli kil sınıfındadır. Bu iki kile ait XRD grafikleri aşağıda görülmektedir. Killerin Atterberg Limitleri ile uyumlu olarak kaolin olduğu görülmektedir.

Tablo 3.10: Atterberg Limit değerleri.

	Likit Limit, %	Plastik Limit, %	Plastisite İndisi	Zemin sınıfı (USCS)
Chinafill	64	46	18	MH
K-Brite	57	42	15	MH



Şekil 3.8: Chinafill kaolini için elde edilen XRD analizi kırınım deseni ve mineral birlikteliği.



Şekil 3.9: K-Brite kaolini için elde edilen XRD analizi kırınım deseni ve mineral birlikteliği.

3.4.2. Sülfat Kaynağı

Bu grup deneyde sülfat olarak alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve sodyum sülfat kullanılmıştır. Sülfat, kullanılmadan önce 100 nolu elekten geçecek şekilde öğütülmüştür (Şekil 3.10). Bu grup deneyde alçıtaşı ve sodyum sülfat yüzdesi %3.5, %5 ve %10 olarak seçilmiştir. Esasen %10

alçıtaşı veya sodyum sülfat içeriği literatürde deneyler için kullanılan değerlere göre çok yüksek bir yüzdendir ancak etrinjit oluşabilmesi için bu değere çıkılmak zorunda kalınmıştır. Ayrıca çok yüksek sülfat içeriğinin etkisinin de araştırılması amaçlanmıştır. Numunelerde sülfat sağlamak için jips veya alçıtaşı kullanıldığında, ilave edilen miktarın tamamının sülfat olmadığı vurgulanmalıdır. Bir molu 126 gram olan jips molekülünün sadece 96 gramı SO_4 'tür.



Şekil 3.10: Sülfatın deneylerden önce öğütülmesi.

3.4.3. Chinafill ve K-Brite İle Yapılan Şişme Deneyleri

Bu numuneler için öncelikle Standart Proktor kompaksiyon enerjisi kullanılarak optimum su muhtevaları ve maksimum birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Bu değerler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.11: Optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri.

Numune tipi	γ_d (kN/m ³)	w_{opt} , %
%75 Chinafill+%25 Kum	14.4	28
%75 K-Brite+%25 Kum	13.8	31

Şişme deneyleri iki farklı ortamda yapılmıştır. Bunlar; konsolidasyon aletinde yapılan şişme deneyleri* ve kompaksiyon kalıbında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan şişme deneyleri olarak iki ana gruba ayrılabilir. Deneylerde sıkıştırma su muhtevasının, olgunlaştırma süresinin ve farklı sıcaklıklarda yapılan kürün etkisi de incelenmiştir. Detaylar aşağıda verilmektedir.

3.4.4. Sıkıştırma Su Muhtevasının Etkisi

Numuneler optimum, optimuma göre kuruve optimuma göre ıslak tarafta oluşturulmuştur. Seçilen sıkıştırma su muhtevaları Chinafill kaolinde %25 %28 ve %31'dir. K-Brite kilinde bu değerler %28, %31, %34'tür.

3.4.5. Olgunlaştırma Süresinin Etkisinin İncelenmesi

Şişmenin olgunlaştırma süresinden nasıl etkilendiği de araştırma konusu olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda on iki adet deney yapılmıştır. Bu deneylerde şişme bakımından daha yüksek değerler veren kuru ve optimumda sıkıştırılan numuneler kullanılmıştır. Olgunlaştırma amacıyla zemin karışımı, kireç, sülfat ve su ile karıştırıldıktan sonra bir gün süre ile olgunlaştırma için su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde bekletilmiştir. Kompaksiyon bir sonraki gün yapılmıştır. Kompaksiyondan sonra numuneler kür sürecine bırakılmıştır.

3.4.6. Soğutucuda Kür Yapılmasının Etkisi

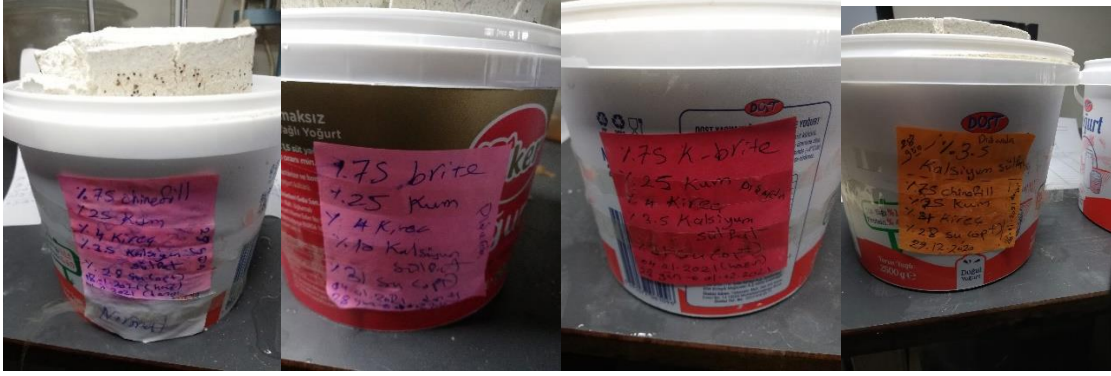
Etrnjit oluşumunun kür sıcaklığından ne seviyede etkilendiği de araştırma konusudur. Bir grup numune bölümümüzün Malzeme Laboratuvarında bulunan iklimlendirme aletinde 28 gün süre ile döngülü bir küre maruz bırakılmıştır. Dolap içerisindeki sıcaklık -8 ila +8 arasında değişecek şekilde ayarlanmış ve numuneler 8 saat soğukta, 16 saat ise sıcakta kalacak şekilde ayar yapılmıştır. Kür süresi sonunda bu numuneler konsolidasyon deney aletinde deneye maruz bırakılmıştır. Böylelikle imalattan sonra kür sürecinde soğuk bir iklime maruz kalan numunelerde oluşacak şişme davranışı incelenmiştir.



Şekil 3.11: Laboratuvarda bulunan iklimlendirme dolabı.

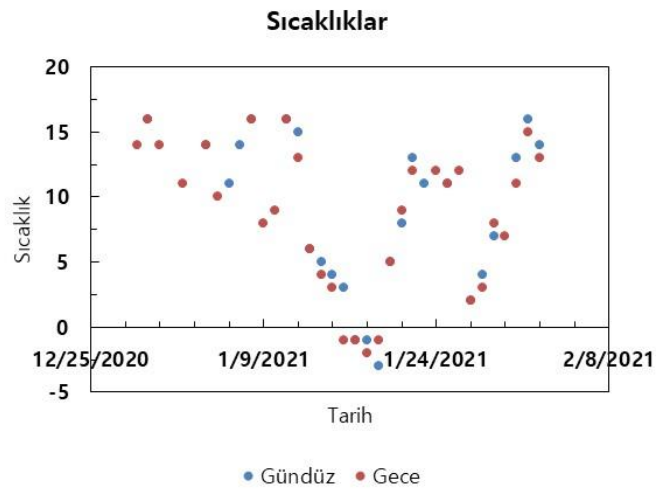
3.5. BÜYÜK NUMUNELER ÜZERİNDE YAPILAN DENEYLER

Konsolidasyon aletinde yapılan deneylerin uzun sürmesi nedeniyle deney sayısını artırmak amacıyla büyük boyutlu şişme deneyleri de yapılmıştır. Chinafill ve K-Brite kiline küçük numunelerde olduğu gibi %25 kum ilave edilerek, kompaksiyon kalıplarında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırırmada üç farklı su muhtevası kullanılmıştır. Daha sonra kalıptan çıkarılan numuneler su muhtevalarını kaybetmeyecek şekilde sarılmış ve küre bırakılmıştır. Kür süresinin bitiminden sonra numuneler plastik kovalar içerisindeki kum içerisine yerleştirilmiştir. Kumun her zaman doygun olması sağlanmıştır. Numunenin çok büyük bir kısmı kum içerisinde kalmıştır, üst kısmı ise açıktadır. Bu deney düzeneği Şekil 3.12’de görülmektedir. Numunelerde başlangıçta her gün, daha sonra aralıklı günlerde çap artışı, boy artışı ve hacim artışı ölçülmüştür. Ayrıca ölçüm yapılan her gün fotoğraf çekilmiş ve bu fotoğraflar daha sonra sayısal bakımdan değerlendirilmiştir. Deneyler aşağıdaki gruplar halinde yapılmıştır.



Şekil 3.12: Büyük numunelerin doygun hale getirilmesi için kullanılan kovalar.

1. *Normal kür uygulanan numuneler:* Bu numuneler için üç farklı jips yüzdesi ve üç farklı sıkıştırma su içeriği kullanılmıştır. Kür sürecinde numuneler laboratuvarda 18°C civarında ve %100'e yakın bir nem ortamında bekletilmiştir.
2. *Ocak 2020'de laboratuvar dış ortamda (laboratuvar dışı) küre bırakılan numuneler:* İklimlendirme dolabında deney yapılması için bir süre beklenmesi gerektiği için, süreci daha verimli kullanmak amacıyla Ocak 2020'de bir grup numunenin laboratuvar dışında küre bırakılmasına karar verilmiştir. Bu numuneler büyük numuneler olarak hazırlanmıştır. Bu dönemde alınan sıcaklık değerleri Şekli 3.13'te görülmektedir. Sıcaklıkların 16°C ila -3°C arasında değiştiği görülmektedir. İstanbul ve benzeri iller için tipik bir kış iklimidir. Laboratuvarın önünde bir plastik kova içerisinde bırakılan numuneler Şekil 3.14'te sunulmaktadır.



Şekil 3.13: Ocak 2020 ayında Avcılar'da ölçülen sıcaklıklar.



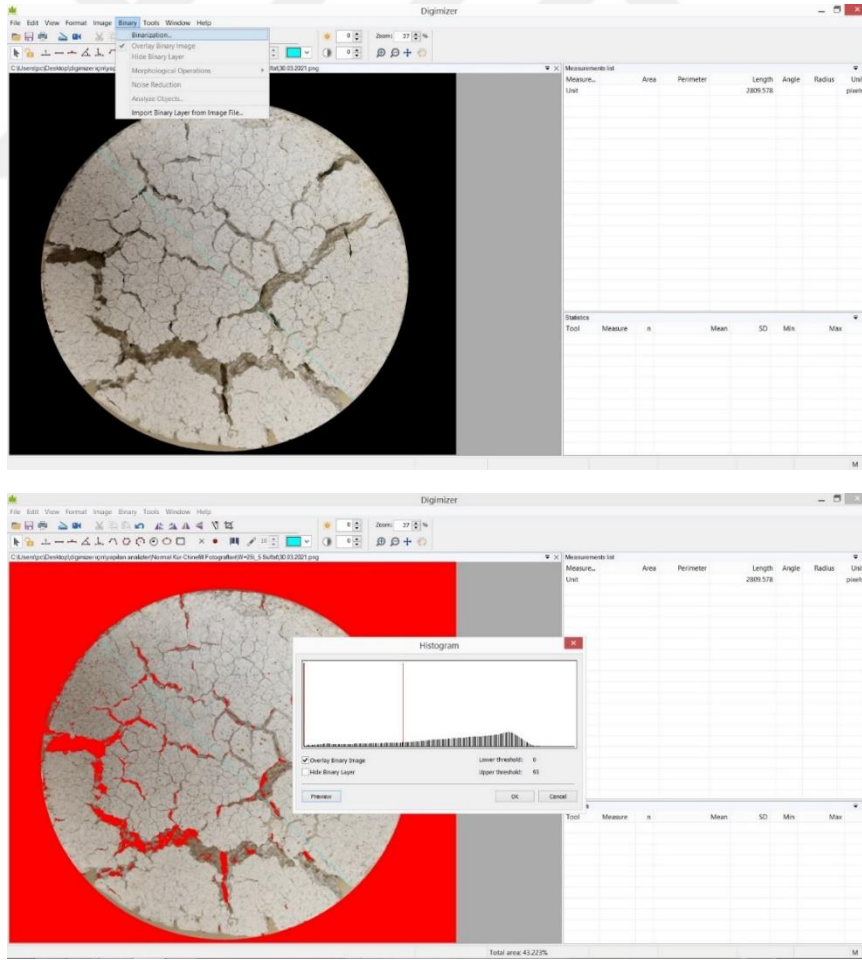
Şekil 3.14: Laboratuvar dışında küre bırakılan numuneler.

3. *Uzun süreli kür sonunda suya maruz bırakılan numuneler:* K-Brite kili ile hazırlanan üç adet büyük numune iki senelik kür süresi sonunda suya maruz bırakılmış ve bu süre sonunda şişme miktarı ölçülmüştür.

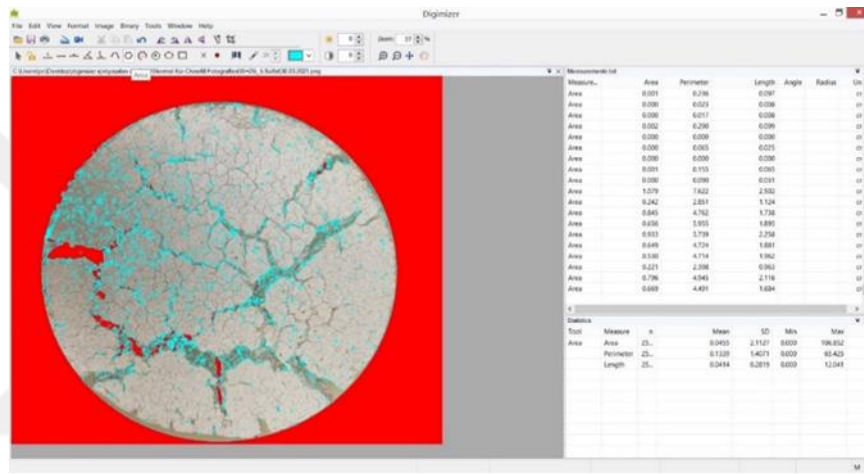
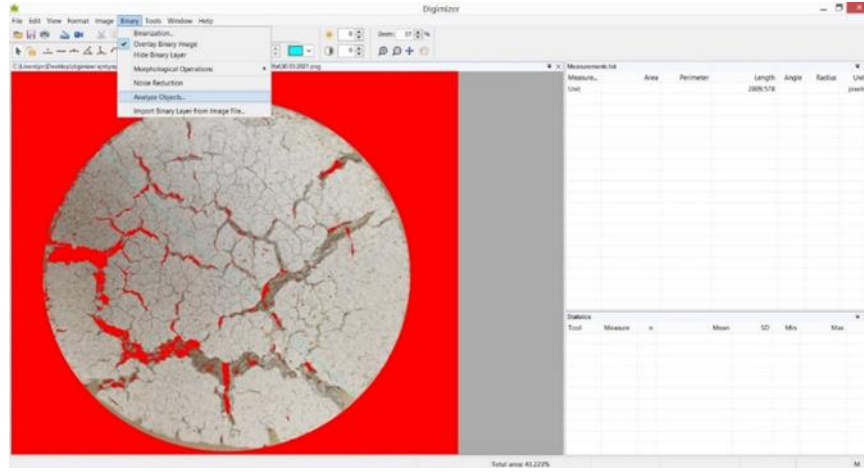
Serbest şişmeye maruz bırakılan tüm bu numuneler için fotoğraf çekimi için özel bir düzenek hazırlanmış ve tüm numunelerin yüzeyi aynı mesafeden belli aralıklarla aynı ışık altında çekilmiştir (Şekil 3.15). Digimizer (Digimizer Image Analysis Software) görüntü analiz programı kullanılarak numunelerin çatlak miktarları ve yüzey değişimleri için ölçüm yapılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan bu program, hassas manuel ölçümlerin yanı sıra nesne özelliklerinin ölçümleriyle otomatik nesne algılamaya izin veren, kullanımı kolay ve esnek bir görüntü analiz yazılım paketidir. Numune şiştikçe ilave olarak günlük çap ve boy ölçümü yapılmıştır. Ölçümler Şekil 3.16’da gösterilen adımlarla yapılmıştır.



Şekil 3.15: Fotoğraf çekme sistemi.



Şekil 3.16: Digimizerde izlenen hesap adımları.



Measurements list						
Measure...	Area	Perimeter	Length	Angle	Radius	Un
Area	0.001	0.236	0.097			cr
Area	0.000	0.023	0.008			cr
Area	0.000	0.017	0.008			cr
Area	0.002	0.290	0.099			cr
Area	0.000	0.000	0.000			cr
Area	0.000	0.065	0.025			cr
Area	0.000	0.000	0.000			cr
Area	0.001	0.155	0.065			cr
Area	0.000	0.090	0.031			cr
Area	1.079	7.622	2.502			cr
Area	0.242	2.851	1.124			cr
Area	0.845	4.762	1.738			cr
Area	0.656	5.955	1.895			cr
Area	0.933	5.739	2.258			cr
Area	0.649	4.724	1.881			cr
Area	0.530	4.714	1.962			cr
Area	0.221	2.398	0.963			cr
Area	0.796	4.945	2.116			cr
Area	0.669	4.491	1.684			cr

Şekil 3.16 (devam): Digimizerde izlenen hesap adımları.

Bu ölçümler yapıldıktan sonra aşağıdaki formül (Denklem 3.1) kullanılarak Çatlak Oranı (Orjinal alana göre) hesaplanmıştır.

$$\text{Çatlak Oranı (Orjinal Alana Göre)} = \left(\frac{\text{Çatlak alanları toplamı}}{\text{Numunemin orijinal alanı}} \right) * 100 \dots (3.1)$$

Farklı günler için hesaplanan bu oranlar daha sonra her numune için gün sayısına karşılık olarak çizilmiştir. Farklı numuneler arasındaki farklılık incelenmiştir.

3.6. ETRİNJİTE BAĞLI ŞİŞMEYİ ENGELLEMEK İÇİN YENİ BİR ÖNERİ YAPILMASI

Kireç ile yapılan iyileştirmelerde temel amaç, zeminin geçirgenliğini düşürmek, şişme oranını azaltmaktır ve mukavemeti artırmaktır. Zeminin etrinjite bağlı şişme oranını azaltmak amacı ile az sayıda numune için hazırlama aşamasında bir değişiklik yapılmıştır. Bu amaçla az sayıda numune (optimum +%4) su muhtevasında hazırlanmış ve olgunlaştırma süresi yine bir gün seçilmiştir. Ancak olgunlaştırmaya izin verildikten sonra numuneler havaya maruz kalacak şekilde bir saat süre ile bekletilmiş, su muhtevaları optimum su muhtevası seviyesine düşmesi beklenmiştir. Daha sonra sıkıştırma işlemi yapılmış ve numune 28 gün süre ile küre bırakılmıştır. Kür süresi sonunda numuneler suya maruz bırakılmış ve şişme miktarı ölçülmüştür. Böylelikle numuneler hem olgunlaştırmanın etkisinden, hem de etrinjit oluşumu bakımından optimumun ıslak su muhtevasında oluşan olumlu etkiden yararlanmıştır. Literatürde mevcut olan yöntemde zemine tekrar su ilave edilmekte ve ıslak tarafta sıkıştırma yapılmaktadır. Önerilen bu tür bir imalat işlemi optimum su muhtevasında yapılacak sıkıştırma işlemleri için kullanılabilir.

3.7. KİMYASAL ANALİZLER

Bu çalışmanın hedeflerinden birisi kimyasal analizlerin yapılması ve etrinjit oluşumunun kimyasal yöntemler ile gösterilebilmesidir. Bu amaçla çeşitli ileri analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler aşağıda sunulmaktadır.

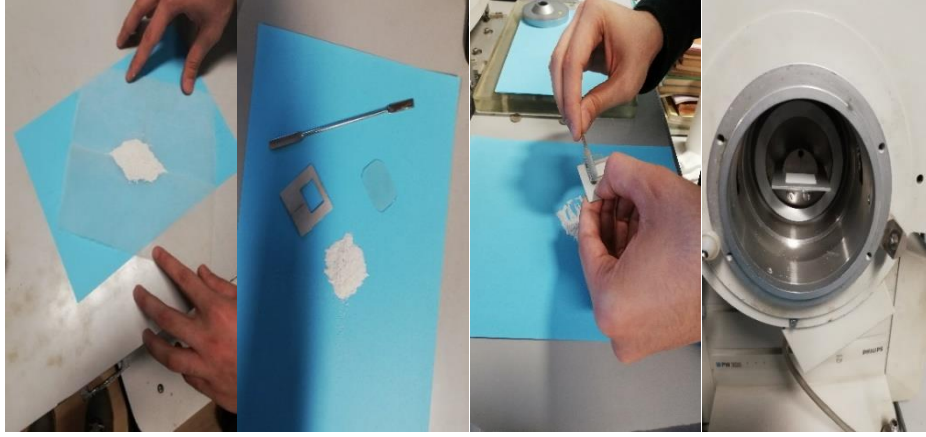
3.7.1. XRD Analizi

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristalin

faz için elde edilen desenler mineraller için önerilen veri tabanları kullanılarak yorumlanır. İdeal bir yorumlama için aranan mineralin %100'lük piki ile birlikte en az üç yüksek intensiteli pikinin bulunması gereklidir. XRD mineralojik analiz için örnek sırasıyla kırma ve öğütme işlemlerinden geçirilerek pudra kıvamına getirilir. Öğütme işlemi agat havan yardımıyla 400 meshden'den küçük hale getirilecek şekilde yapılır. Bu çalışma kapsamında öğütülen numunelerin XRD analizleri; İ.Ü.-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mineraloji-Petrografi Anabilim Dalı laboratuvarındaki Philips PW1700 marka cihazda CuK α radyasyonu, Ni filtre, 40 kV gerilim, 20 mA akım, $2\theta=1^\circ/\text{dk}$ gonyometre hızı, 1 cm/dk duyarlılıklarında 5 – 55o arasında yapılmıştır. Elde edilen difraktogramlar Philips High Score Plus yazılımında yer alan JCPDS kartlarıyla eşleştirilerek bilgisayar ortamında değerlendirilmiştir



Şekil 3.17: Philips PW 1700 XRD cihazı gonyometre ve numune haznesi.



Şekil 3.18: XRD analizi için numune hazırlaması ve cihaza yerleşmesi.

3.7.2. SEM Analizleri

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM analizi), yüzey kırıkları, kusurlar, kirleticiler veya korozyon için çeşitli malzemeleri değerlendirmek için faydalı yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağlar. SEM analizleri oluşturulan numuneler morfolojik ve mikroyapısal değişiklikleri tespit eder. SEM analizi, bir numunenin yüzey topografyasının karmaşık, yüksek büyütülmüş görüntülerini üretmek için odaklanmış bir elektron demeti kullanan güçlü bir araştırma aracıdır (URL4). Bu çalışmada zemin numunelerinin mikroyapısal analizleri SEM tekniği kullanılarak yapılmıştır. SEM yöntemi, küçük bir alana odaklanmış yüksek enerjili elektronlarla bir yüzeyin taranması prensibine bağlıdır. SEM analizleri başlamadan önce numuneler üzerinde kolaylıkla hareket etmesini sağlamak için ve kristal parçaları kolayca görüntülemek için numuneler epoksi ve altın ile kaplanmıştır (Şekil 3.19). Şekil 3.20'de SEM Analiz cihazı görülmektedir.



Şekil 3.19: ESEM analizi için epoksi ve altın ile kaplanmış numuneler.



Şekil 3.20: SEM Analiz cihazı.

3.7.3. ICP-MS ve ICP OES Analizi

ICP (Inductively Coupled Plasma), sıvı ve katı numunelerde çok sayıda elementin hassas, ucuz, hızlı ve doğru şekilde, niteliksel, niceliksel ya da yarı-niceliksel olarak ölçülmesine olanak sağlayan ileri teknoloji ürünü bir analiz tekniğidir.

Jeokimyasal analizler kapsamında, derlenen numuneler bir kısmı İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa- Merlab değer kısmı ise Jeoloji Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Taş Kesme Laboratuvarı'nda kesilmiş ve kimyasal analiz için hazırlanmıştır. Retsch marka agat havan makinesiyle 15 dakikalık periyodlarla öğütülmüştür. Her farklı örnek öğütüldükten sonra agat harcı kuvars kumu ile 5 dakika muamele edilerek normal temizleme prosedürüne göre temizlenmiştir. Numuneler, analiz için yeterli bir boyuta öğütülmüş olarak paketlenmiştir. İlk olarak, LOI (ateşleme kaybı) hesaplamaları için numuneler potalara yerleştirildi ve her bir potaya konulan numune miktarı hassas bir terazi kullanılarak kaydedilmiştir. Numuneler numaralandırılmış ve mufla fırınına yerleştirilmiştir. Kül fırınına 900 °C'ye ayarlanmış ve 900°C'lik sabit sıcaklıkta 2 saat tutulmuştur. Nem ve tüm uçucular buharlaştıktan sonra numune nemden korumak için desikatöre konmuş, daha sonra hassas terazide tartılmıştır. Tutuşma kaybı değerleri hesaplandıktan sonra numuneler, İÜC Jeokimya Numune Hazırlama Laboratuvarında hassas terazi kullanılarak 0.2 g numune numunesi ile 1 g lityum tetraborat karıştırılarak platin krozelere yerleştirilmiştir. Potadaki karışım tahta bir çubukla karıştırılarak homojen hale getirildi. Numuneler, bir mufla fırınında 1100°C'de toplam 15 dakika eritilmiştir. 15 dakika sonra erimiş numunelerden biri kül fırınından alınarak %5 konsantrasyonda hazırlanmış HNO₃ içine konulmuştur. Ana oksit değerleri Jeoteknik Mühendisliği Bölümü Jeokronoloji ve Jeokimya Laboratuvarında Perkin-Elmer Avio 200 model ICP-OES kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 3.22). Eser ve nadir toprak değerleri, cam slayt örneklerine entegre katı hal lazer aşındırma modeli ESI NWR213 ile Perkin-Elmer NexION 2000B model ICP-MS kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 3.21). Tek hücreli helyum atmosferinde (0.6 mL/dak) frekans 10 Hz'de 6.5 J/cm² olarak ayarlanmış ve spot büyüklüğü 100 µm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.21: Perkin Elmer NexION 200B (ICP-MS cihazı) ESI NWR 213 (LA cihazı).



Şekil 3.22: Avio 2000 (ICP-OES cihazı).

3.8. ŞİŞME BASINCI ÖLÇÜMLERİ

Gerek konsolidasyon, gerekse büyük boyutlu şişme numunelerinde yüksek şişme değerleri ölçülmüştür, ancak şişme basıncının hangi seviyelerde oluştuğunu ölçmek bu deneylerde mümkün olmamaktadır. Bu nedenle seçilen numuneler üzerinde şişme basıncı değerleri ölçülmüştür. Bu numuneler şişme bakımından daha büyük değerlere ulaşan numuneler seçilmiştir. Deneylerdeki gün kısıtlaması nedeniyle deneyler genellikle yirminci güne kadar

devam ettirilmiştir. Deneyler bitirildiğinde, en az dört beş günlük denge durumuna ulaşılmıştır, ancak etrinjit oluşumunu mekanizması nedeniyle bazı deneylerde daha yüksek şişme basınçlarına ulaşılabileceği deneyler bittiğinde görülmüştür. Ancak elde edilen neticeler de mertebe bilgisi bakımından yeterli görülmüştür.

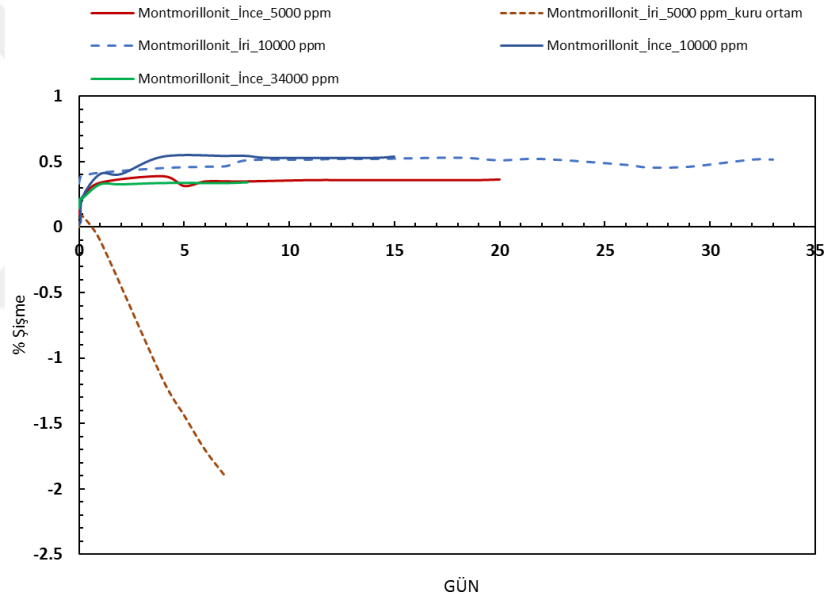


4. BULGULAR

4.1. MONTMORİLLONİTE KİLİ SONUÇLARI

4.1.1. Montmorillonit Kili İçin Şişme Deney Sonuçları

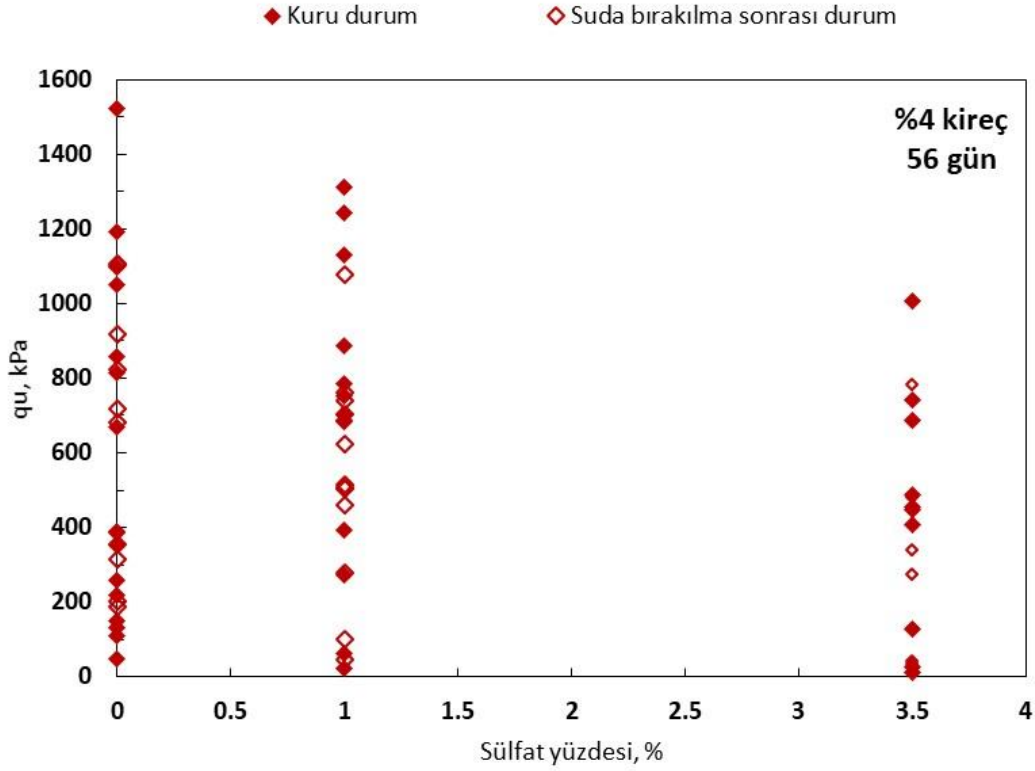
Test edilen montmorillonit numunelerde elde edilen şişme yüzdeleri Şekil 4.1’de görülmektedir. Bu deneyler deneme deneyleri kategorisinde değerlendirilebilir. Bazı numuneler için şişme (kabarma) davranışı suya maruz bırakılmadan, diğerlerinde ise suya maruz bırakılarak, doyurulmuş durumda incelenmiştir. Bu kil ile yapılan deneylerde %0.5 (5000 ppm) ve %1 (10000 ppm) jips içeriğinde kabarma oluşmadığı görülmektedir. Jipsin daha iri ve daha ince ufalanmış olması da sonucu değiştirmemiştir.



Şekil 4.1: Montmorillonit kili için yapılan şişme ölçümleri.

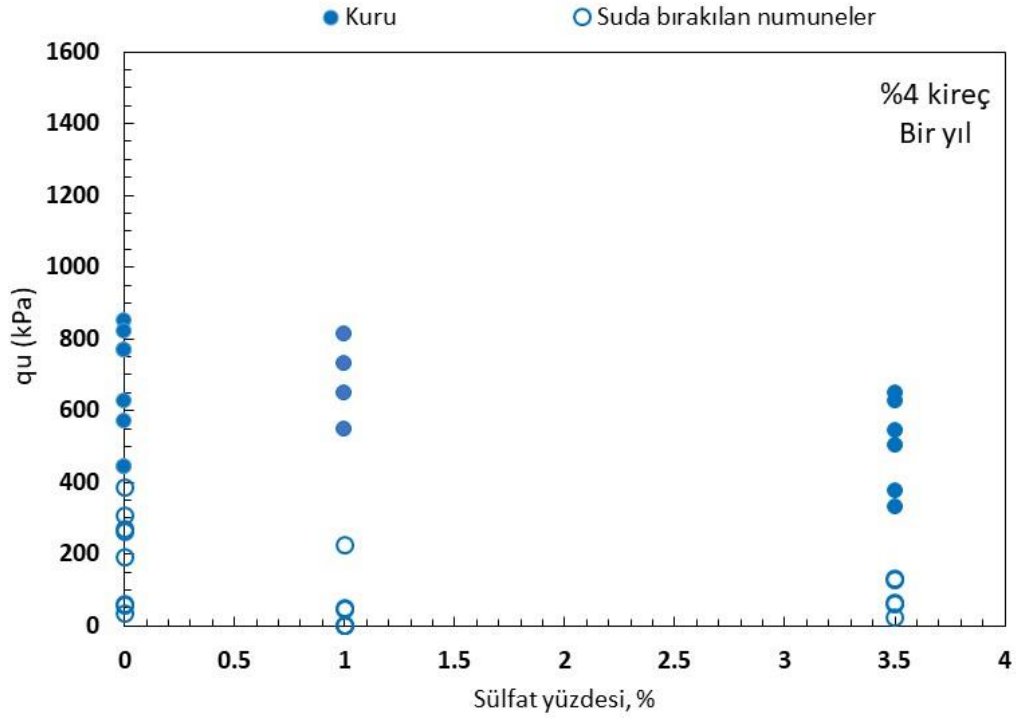
4.1.2. Montmorillonit Kili ile Hazırlanan Numunelerde Mukavemet Deney Sonuçları

Montmorillonit kili ve %4 kireç ve %7 kireç ve %1 ve %3.5 sülfat içeriği ile hazırlanan grupların serbest basınç dayanımlarını bulabilmek için hazırlanan örnekler üzerinde ASTM D 2166–00 (2003) standardına uygun olarak serbest basınç mukavemet (tek eksenli) deneyleri yapılmıştır. Deneyler 56 gün sonunda ve bir yıl kür süresi sonunda yapılmıştır. Şekil 4.2’de mukavemet deneylerinin sonuçları görülmektedir.



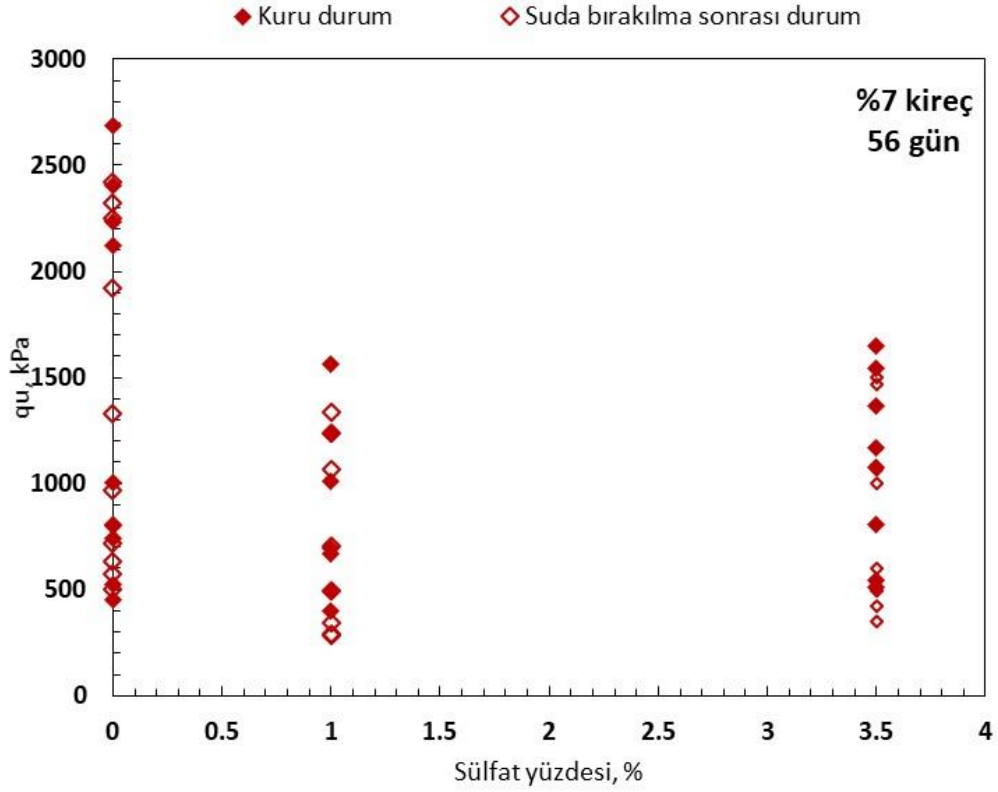
Şekil 4.2: %4 kireç ve 56 gün kür sonrası dayanım değerleri.

Suda bırakılan numunelerde sülfat içeriğine bağlı olarak hacim değişikliği gözlenmemiştir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, %4 kireç ilave edilen ve iki farklı yüzdede jips ilave edilen numunelerde, 56 günlük dayanımlarda sülfat yüzdesine bağlı oluşabilecek bir farklılık az sayıda numune dışında görülmemektedir. Bu numunelerde mukavemet için üst limit, sülfatsız numuneler için 1000-1500 kPa civarı, sülfatlı numuneler için ise 1000 ve 1200 kPa olarak ölçülmüştür. Farklı sıkıştırma su muhtevasına bağlı olarak bir değerlendirme yapılamamıştır. Kuru ve suya maruz bırakılan numuneler arasında çok belirgin farklar olmamakla birlikte, sıkıştırma su muhtevasında deneye tabii tutulan numunelerin suya maruz bırakılanlardan bir miktar daha yüksek mukavemete sahip olduğu söylenebilir. Numunelerin kür süresinin elli altı gün olması nedeniyle numunelerin önemli bir dayanım kazandığı ve suda bırakılma süresi olan otuz gün boyunca numunelerde ilave puzolanik reaksiyonlar oluştuğu ve böylece suda bırakılmadan kaynaklı olabilecek dayanım kayıplarının önüne geçildiği düşünülmektedir.



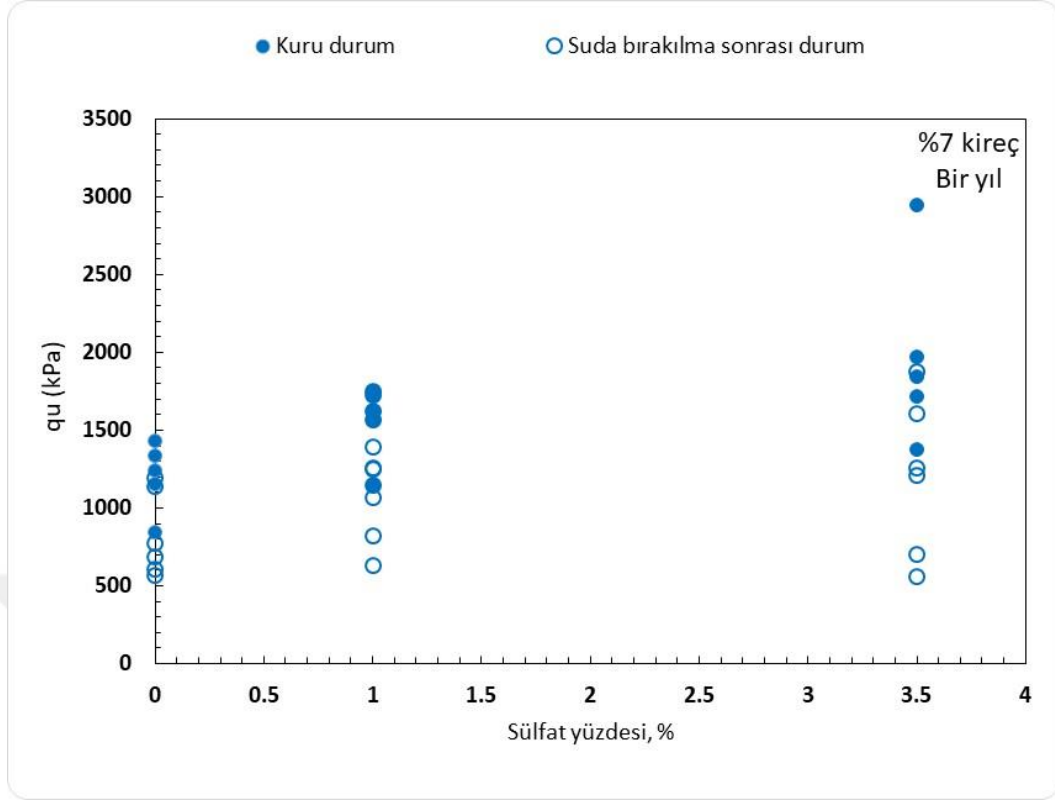
Şekil 4.3: %4 kireç ve bir yıl kür sonrası dayanım değerleri.

Şekil 4.3'te, %4 kireç ile iyileştirilen ve bir yıl süre ile küre bırakılan numunelerin sonuçları görülmektedir. Gerek kürden hemen sonra, gerekse su içerisinde bırakıldıktan sonra test edilen numunelerde etrinjit oluşumu nedeniyle kabarma davranışı görülmemiştir. Bir yıl sonunda mukavemet değerlerinde %3.5 sülfat içeriğine bağlı olarak azalma görülmektedir. Tüm numunelerde suda bırakılma sonucu mukavemet değerlerinde önemli seviyelerde düşüş olmuştur. Otuz gün suya maruz kalma sürecinin sonunda dahi kabarma oluşmamış olması, etrinjit oluşmuş olsa bile, bunun kabarmaya yol açamamış olduğunu göstermektedir. Uzun dönemde oluşan sülfata bağlı yeni kristallerin mukavemet sağlayan mineral oluşumunu bir miktar engellemiş olabileceği ve oluşan etrinjitin pozolanik reaksiyonlar ile oluşan yapıyı yenerek bozulmaya ve kabarmaya yol açacak seviyede olmadığı görüşü oluşmuştur. Bu kristaller kalsiyum silikat hidratlar (CSH) ve kalsiyum alüminat hidratlar (CAH) gibi pozolanik reaksiyon ürünlerinden farklıdır ve zemin, agrega veya başka pozolanik ürün gibi bir engelleme ulaştıklarında büyüme durmaktadır.



Şekil 4.4: %7 kireç ve 56 gün kür sonrası dayanım değerleri.

%7 kireç ile iyileştirilen ve 56 gün kür süresi uygulanan numunelerde suda bırakılan numunelerde de jips içeriğine bağlı olarak hacim değişikliği gözlenmemiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, %7 kireç ve iki farklı yüzdede jips ilave edilen numunelerde, 56 günlük dayanımlarda sülfat yüzdesine bağlı olduğu düşünülen bir azalma görülmektedir. Kür süresinden sonra teste tabii tutulan ve suda bekletildikten sonra teste tabii tutulan numunelerde belirgin bir fark görülmemiştir. Numunelerin suda bırakılma süresi otuz gün olduğu için bu süre boyunca numunelerde ilave puzolanik reaksiyonlar oluştuğu ve böylece suda bırakılmadan kaynaklı olabilecek dayanım kayıplarının önüne geçildiği düşünülmektedir. %7 kireç ilavesinin, %4 kireç ilavesine nazaran daha yüksek dayanımlara ulaşıldığı görülmektedir.



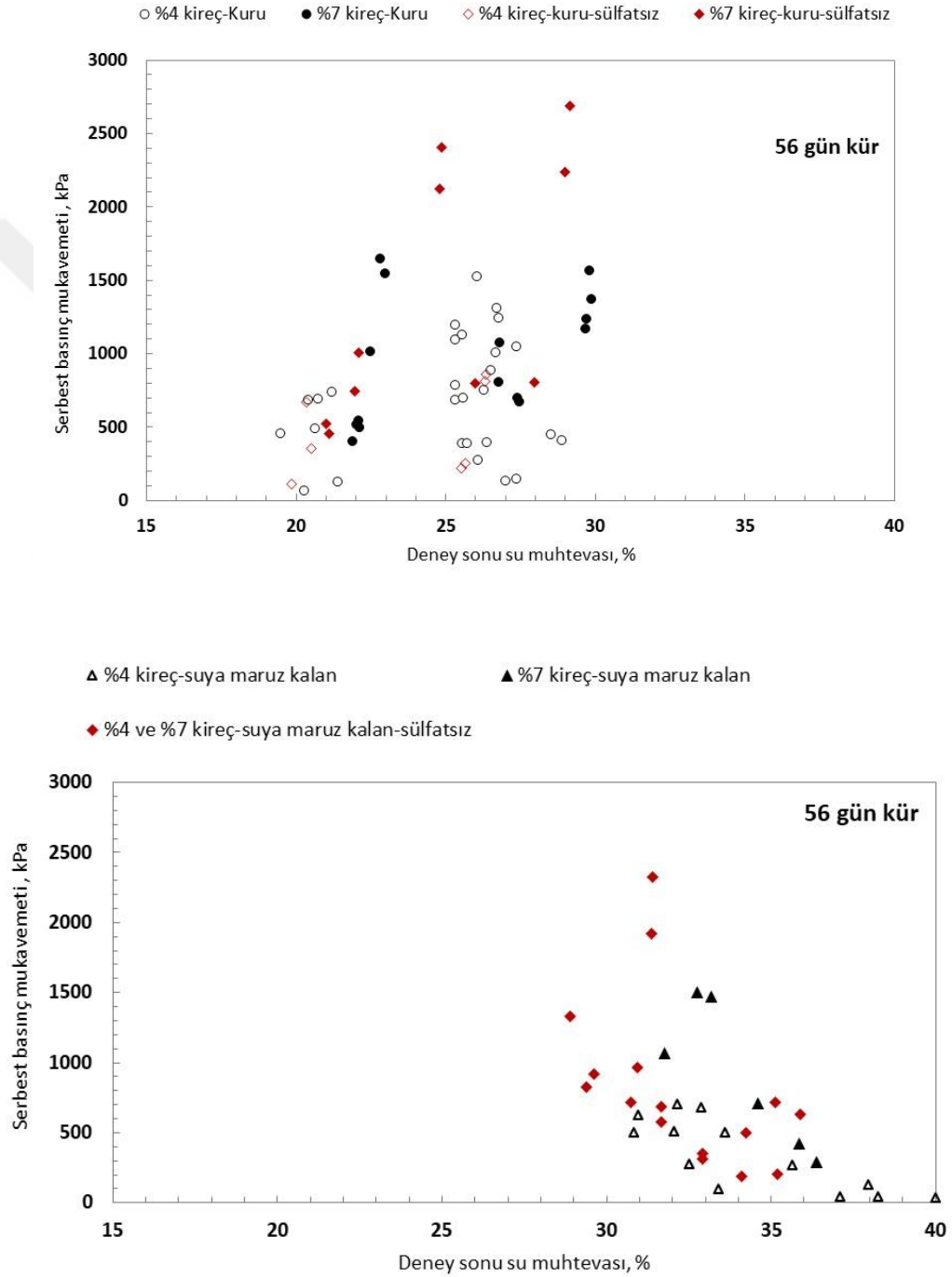
Şekil 4.5: %7 kireç ve bir yıl kür sonrası dayanım değerleri.

%7 kireç içeren ve bir yıl süre ile küre tabi tutulan numunelerde sülfatsız duruma göre mukavemetlerde azalma oluşmuştur. Numuneler suda bırakılma durumundan da göreceli olarak daha az etkilenmiştir, yani minimum 500 kPa civarında bir dayanım elde edilebilmiştir, hatta 1500 kPa civarına çıkan değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar montmorillonit kilinde elde edilen mukavemet değerlerinin hem kür süresine hem de sülfat yüzdesine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Bu deneyler sonucunda, 56 gün kür süresi sonunda suya maruz kalan ve kalmayan numuneler arasında belirgin farklar olmaması, suya maruz kalma sürecinin kürün devam edebilmesi yönünde bir ortam oluşturduğu ve etrinjit oluşumu yeterli seviyede gerçekleşmediği için kabarma da oluşmadığı görülmektedir. Bir yıl sonunda ise zaten tüm kür süreci tamamlanmış olduğu için, suya maruz kalan numunelerde yumuşama olabilmektedir. Ancak yine numunelerde kabarma oluşmamış olması, etrinjit oluşumunun yeterince olmadığını göstermektedir.

Bir sonraki aşamada 56 gün küresi sonundaki tüm numuneler sıkıştırma su muhtevalarına göre birlikte değerlendirilmiştir. Numuneler optimum, optimumun kuru tarafı ve optimumun ıslak

tarafında olacak şekilde hazırlanmış ve deney sonrasında numunelerin su muhtevaları ölçülmüştür. Suyu maruz bırakılmayan numunelerde sıkıştırma su muhtevasına bağlı olan direkt bir ilişki görülmemiştir. Suyu maruz bırakılan numunelerde ise su muhtevası artışı ile birlikte mukavemet değerlerinde büyük düşüşler oluşmuştur. Sülfatlı ve sülfatsız numuneler arasında suya maruz kalmanın yarattığı bir azalma görülmemektedir.



Şekil 4.6: Suyu maruz kalmayan (kuru) ve suya maruz kalan numunelerde deney sonu su muhtevası-mukavemet ilişkisi.

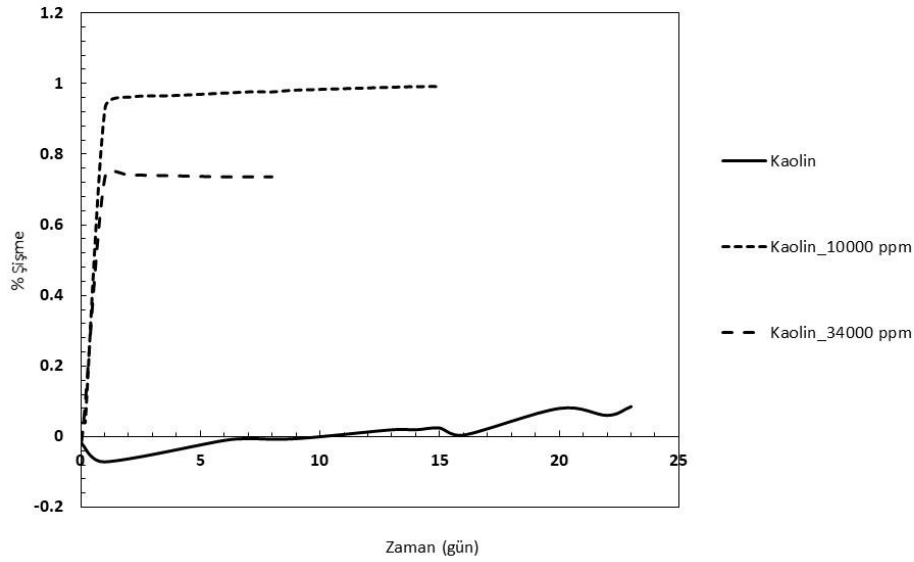
Daha sonra yapılacak deneylere altlık teşkil etmek ve rehber olmak üzere, bu numunelerden dört adedi İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Merkez Laboratuvarı'na (MERLAB) gönderilmiş ve XRD analizi ve ICP deneyleri yaptırılmıştır. Numunelerden iki adedinde etrinjit tespit edildiği görülmektedir. Bir adedinde jips tespit edilmiş, birinde ise bu konuda bir tespit yapılamamıştır. Bu sonuçlar, etrinjit oluşumunun muhakkak kabarma ile sonuçlanmadığına işaret etmektedir. Yüksek kireç içeriğinde pozolanik reaksiyonların, etrinjit oluşumunun önüne geçtiği ve bu nedenle kabarmanın oluşmadığı kabul edilebilir. Daha sonra Jeoloji Mühendisliği laboratuvarlarında yapılan XRD analizleri sonucunda da montmorillonit içeren numunelerde etrinjit oluşumu görülmüştür.

Tablo 4.1: Serbest basınç numuneleri için XRD analiz sonuçları.

Numune No	Sülfat ve Kireç Oranları	Kür günü	Etrinit Oluşumu
1	% 1 jips + % 4 kireç (w=%25)	56	Evet
2	% 3.5 jips + % 4 kireç (w=%25)	56	Jipsum
3	% 3.5 jips + % 4 kireç (w=%22)	56	Evet
4	% 1 jips + % 4 kireç (w=%25)	56	Hayır
5	% 3.5 jips + % 7 kireç (w=%30)	56	Evet
6	% 3.5 jips + % 7 kireç (w=%27)	56	Evet
7	% 1 jips + % 7 kireç (w=%27)	56	Evet
8	% 1 jips + % 7 kireç (w=%27)	56	Evet
9	% 3.5 jips + % 4 kireç (w=%25)	56	Evet
10	% 3.5 jips + % 4 kireç (w=%25)	56	Evet
11	% 1 jips + % 4 kireç (w=%25)	56	Evet
12	% 1 jips + % 4 kireç (w=%28)	56	Evet

4.2. KAOLİN KİLİ SONUÇLARI

Montmorillonit kili ile yapılan deneylerde şişme oluşmadığı için, bir sonraki deney grubuna laboratuvarında bulunan kaolin kili ile devam edilmiştir. Bu grup deneyde jips yüzdesi %3.4 ve %10 olarak seçilmiştir. Jips bir kısım numunelerde olduğu gibi kullanılmış, bazı numunelerde ise ufaltılarak kullanılmıştır. Kireç yüzdesi %5 olarak seçilmiştir. 7 gün kür sonunda konsolidasyon deney aletinde şişme deneyleri yapılmış ve etrinjit oluşup oluşmadığı şişme davranışı ile yakalanmaya çalışılmıştır. Şekil 4.7’de numuneler üzerinde yapılan şişme deneyi gösterilmektedir. Bu numunelerde de kabarma elde edilememiştir.

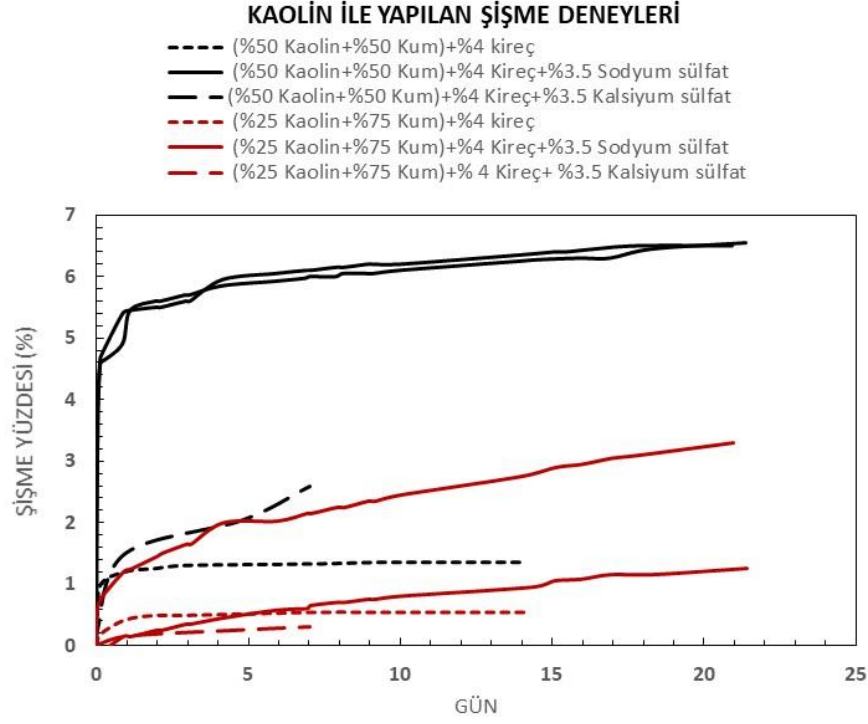


Şekil 4.7: Kaolin kili ile elde edilen şişme değerleri.

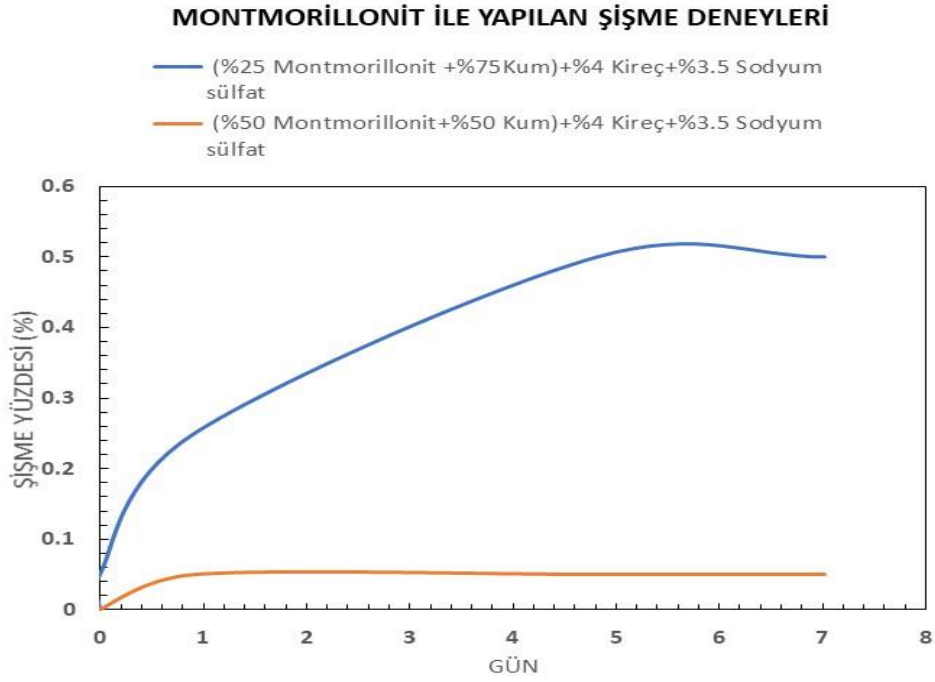
4.3. KAOLİN VE MONTMORİLLONİTE KİLİNE KUM İLAVE EDİLEREK YAPILAN DENEYLER

Kaolin ve montmorillonit kili ile şişme elde edilemediği için, bir sonraki aşamada bu killere kum ilave edilerek, numunelerin permeabilitesinin artması ve su girişinin hızlanması amaçlanmıştır. Bu malzemeler kullanılarak, öncelikle farklı kum yüzdeleri ile numuneler hazırlanmıştır. Farklı miktarlarda kaolin ve kum kullanarak, %3.5 sülfat (sodyum sülfat veya jips) içeren ve % 4 kireç ile stabilize edilen zemin numunelerindeki şişme deneylerinin sonuçları Şekil 4.8 ve 4.9’de gösterilmektedir. %50 kum içeren karışımda sülfat etkisiyle kabarma olduğu, ancak %75 kum içeren karışımda kabarmanın daha düşük olduğu görülmüştür. Kilin az olması kabarmanın oluşmasını engellemektedir. Montmorillonit kilinde

%50 kum karışımında dahi şişme elde edilememiştir. Genel olarak sodyum sülfat kalsiyum sülfata nazaran daha fazla şişme yapmaktadır. Sonuç olarak gerek laboratuvardaki mevcut kaolin kilinin gerekse montmorillonit içeren kilin etrinjit üretmek için yeterli kimyasal içeriğe sahip olmadığına karar verilmiştir.



Şekil 4.8: Farklı kum yüzdelerinde kaolin kili numunelerinde konsolidasyon aletinde gözlenen şişme davranışı (%3.5 kalsiyum veya %3.5 sodyum sülfat).

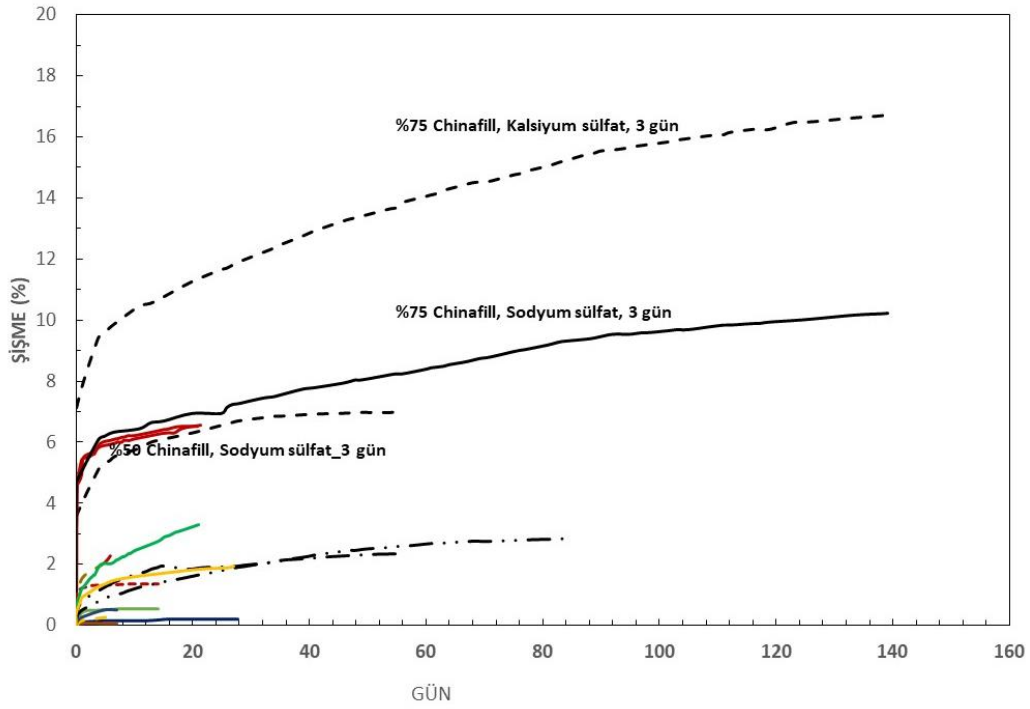


Şekil 4.9: Montmorillonit ve kum karışımında elde edilen değerler.

4.4. CHINAFİLL VE K-BRITE İLE YAPILAN DENEME DENEYLERİNİN SONUÇLARI

4.4.1. Konsolidasyon Deney Aletinde Yapılan Ölçümler

Konsolidasyon aletinde yapılan şişme ölçümleri, Chinafill kilinde hem kalsiyum sülfat, hem de sodyum sülfat ile şişme oluştuğunu göstermiştir. Uzun dönem kür edilen numunelerde ve daha az kil içeren yani kil içeriği %50 ve %25 olan numunelerde ölçülebilen şişme yüzdeleri makul bir deney süresinde %4 değerinin altında kalmaktadır. Bu nedenle %25 kum içeriğinin şişme oluşturma bakımından uygun olduğu kanaatine varılmış ve deneylere bu kum yüzdesi ile devam edilmiştir.



Şekil 4.10: Chinafill ile yapılan deneme deneyleri.

4.4.2. Büyük Numuneler Üzerinde Yapılan İlk Deneyler

Deneme deneyi kapsamında değerlendirilebilecek bu deneylerde Chinafill ve K-Brite kili ve %25, %50 ve %75 kum ilavesi ile hazırlanan numuneler, optimum su muhtevasında ve (%3.5, %5 ve %10) kalsiyum sülfat içeriği ile kompaksiyon kalıbında hazırlanıp 3 gün ve 28 gün süre ile kürde bırakılmıştır. Kür süresi bittiğinde numuneler suya doygun kum ortamına konulmuştur. Bu numunelerde serbest şişme deneyi yapılmıştır. Günlük olarak şişme değerleri ölçülmüş ve fotoğrafları çekilmiştir. Bu deneylerdeki amaç daha sonraki büyük şişme deneyleri için altlık oluşturmaktır. Sonuçlar Şekil 4.11 ila 4.20 arasında ve Tablo 4.3'te gösterilmektedir. Şekillerde fotoğrafın hangi gün çekildiği görülmektedir. Kum yüzdesi arttıkça, oluşan kabarma miktarının azaldığı görülmektedir. %75 kil içeren numunelerde, 3 gün ve 28 gün kür süresi sonunda şişme olduğu görülmüştür. Etrinjit oluşumu ve şişme suya maruz kalındıktan bir gün sonra başlamıştır. Etrinjit oluşumu ve buna bağlı kabarma oluşabilmesi için kuma ihtiyaç duyulmakla birlikte, bu miktarın %50'den daha az olması gerektiği görülmüştür.



Şekil 4.11: Farklı kum yüzdelerinde serbest şişme deneyleri a) %25 Chinafill, %4 kireçli, %3.5 sodyum sülfat b) %50 Chinafill, %4 kireçli, %3.5 sodyum sülfat.



Şekil 4.12: %75 K-Brite-%25 kum - %4 kireç - % 3.5 kalsiyum sülfat (optimum) ve 3 gün kür.



Şekil 4.13: %75 K-Brite - %25 kum- %4 kireç - % 5 kalsiyum sülfat (optimum) ve 3 gün kür.



Şekil 4.14: %75 K-Brite - %25 kum- %4 kireç - %10 kalsiyum sülfat (optimum) ve 3 gün kür.



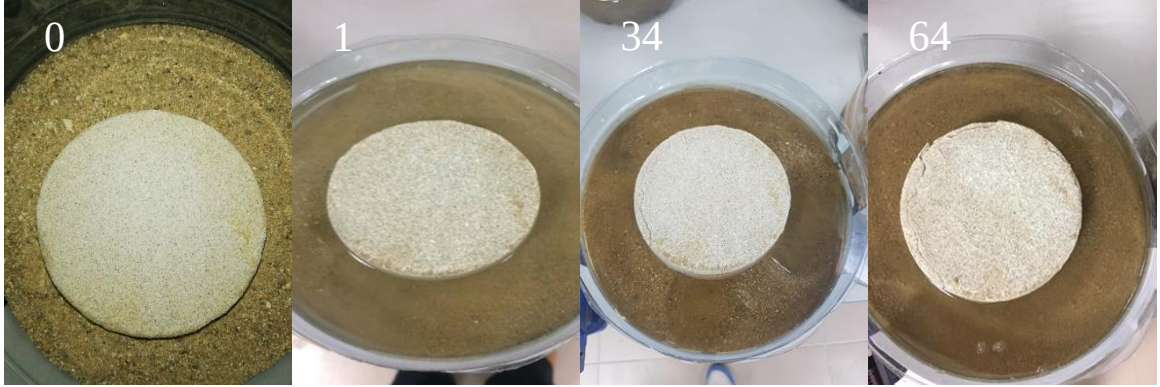
Şekil 4.15: Chinafill - %25 kum- %4 kireç- % 3.5 kalsiyum sülfat- (optimum) ve 28 gün kür.



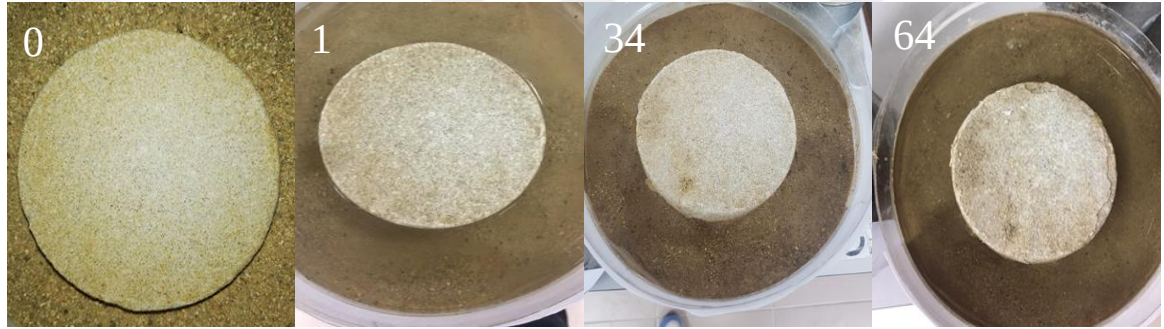
Şekil 4.16: %75 Chinafill - %25 kum - %4 kireç - % 5 kalsiyum sülfat (optimum) ve 28 gün kür.



Şekil 4.17: %75 Chinafill - %25 kum - %4 kireç - %10 kalsiyum sülfat (optimum) ve 28 gün kür.



Şekil 4.18: %25 Chinafill - %75 kum - %4 kireç - %3.5 kalsiyum sülfat (optimum) ve 28 gün kür.



Şekil 4.19: %25 Chinafill - %75 kum - %4 kireç- %5 kalsiyum sülfat (optimum) ve 28 gün kür.



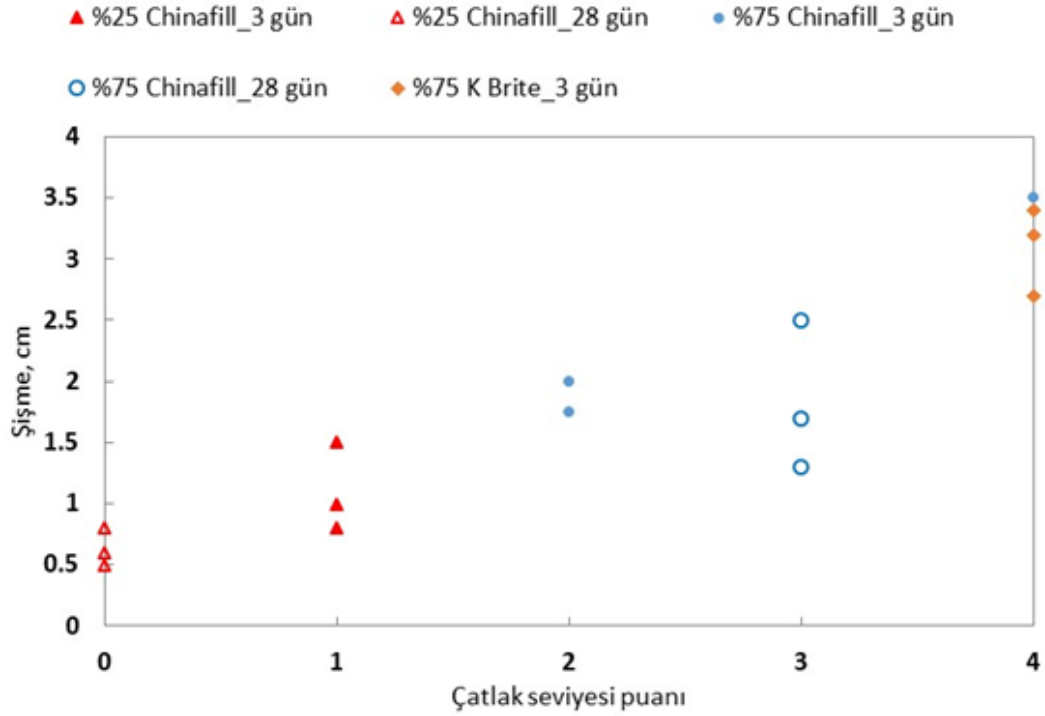
Şekil 4.20: %25 Chinafill - %75 kum - %4 kireç- %10 kalsiyum sülfat (optimum) ve 28 gün kür.

Bu görüntüler şu şekilde kullanılmıştır. Oluşan çatlakların sayısı ve sıklığı ve oluşan kabarma miktarı değerlendirilerek bir sınıflandırma puan yöntemi oluşturulmuştur. Bu sınıflandırma sisteminde çatlak miktarına göre çok az, az, orta, yüksek, çok yüksek olmak üzere beş sınıf oluşturulmuştur. Daha sonra bu değerler 0'dan 4'e kadar puanlanmış ve bu değerler ölçülen kabarma miktarı ile korele edilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 4.21'de görülmektedir. Chinafill

ve K-Brite killeri arasında oluşan çatlak seviyesi puanı ve şişme yüzdeleri arasında bir ilişki olabildiği görülmüştür. Buna istinaden çatlak ile ilgili ölçümlerin sayısallaştırılarak devam etmesine karar verilmiştir. Tezin ileriki çalışmalarında çatlak görüntüleri sayısallaştırılmıştır.

Tablo 4.2: Serbest şişme numunelerinde yapılan görüntü analizi ölçümleri.

No	Karışım Oranları	Kaolin tipi	Sülfat tipi ve oranı	Kür süresi (gün)	Çatlama seviyesi puanı	Şişme (cm)
1	%75 kaolin +%25 kum-%4 kireç	Chinacell	%3.5 CaSO ₄	3	2	1.75
2	%75 kaolin +%25 kum-%4 kireç- %5 kalsiyum sülfat	Chinacell	%5 CaSO ₄	3	4	3.5
3	%75 kaolin +%25 kum-%4 kireç	Chinacell	%10 CaSO ₄	3	3	2
4	%25 kaolin +%75 kum-%4 kireç	Chinacell	%3.5 CaSO ₄	3	1	1.5
5	%25 kaolin+%75 kum-%4 kireç	Chinacell	%5 CaSO ₄	3	1	0.8
6	%25 kaolin +%75 kum-%4 kireç	Chinacell	%10 CaSO ₄	3	1	1
7	%75 kaolin +%25 kum-%4 kireç	K-brite-hk	% 3.5 CaSO ₄	3	4	3.2
8	%75 kaolin +%25 kum-%4 kireç	K-brite-hk	%5 CaSO ₄	3	4	3.4
9	%75 kaolin +%25 kum-%4 kireç	K-brite-hk	%10 CaSO ₄	3	4	2.7
10	%75 kaolin (chinacell) +%25 kum-%4 kireç	Chinacell	% 3.5 CaSO ₄	28	3	1.7
11	%75 kaolin +%25 kum-%4 kireç	Chinacell	%5 CaSO ₄	28	3	1.3
12	%75 kaolin +%25 kum-%4 kireç	Chinacell	% 10 CaSO ₄	28	3	2.5
13	%75 kaolin +%25 kum-%4 kireç	Chinacell	%3.5 CaSO ₄	28	0	0.6
14	%25 kaolin +%75 kum-%4 kireç	Chinacell	%5 CaSO ₄	28	0	0.5
15	%25 kaolin +%75 kum-%4 kireç	Chinacell	%10 CaSO ₄	28	0	0.8



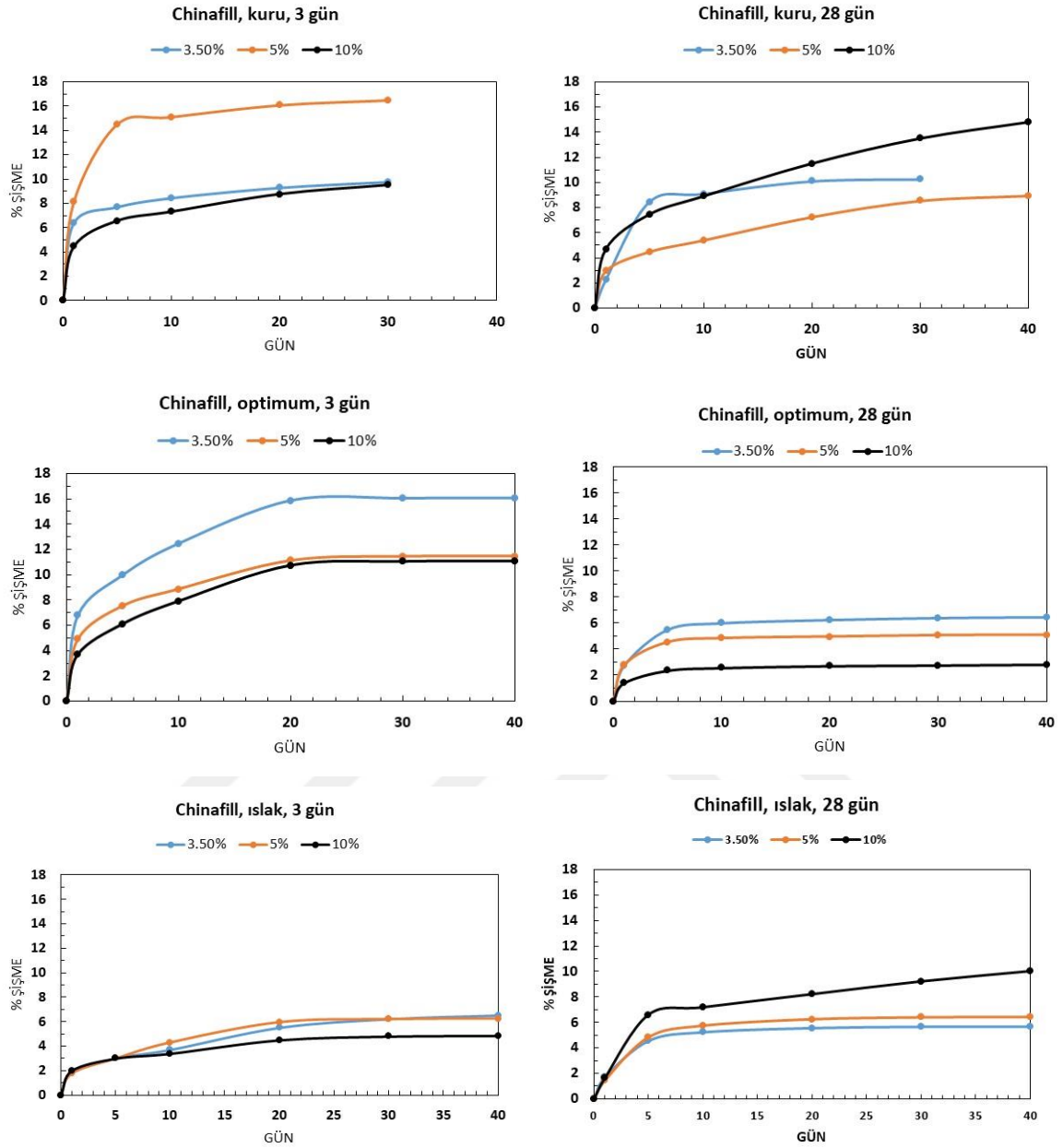
Şekil 4.21: Serbest şişme numunelerinde çatlak seviyesi puanı ve şişme korelasyonu.

4.5. CHINAFILL VE K-BRITE İLE YAPILAN DENEY SONUÇLARI

İki tip kaolin ve %25 kum kullanılarak, %3.5, %5 ve %10 jips çeren ve %4 ve %7 kireç ile stabilize edilen zemin numuneleri ile yaptığı şişme deneylerinin sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Deneyler 30. ya da 40. günde yeni deneyleri yapabilmek amacıyla bitirilmiştir. Bu nedenle referans olarak bu günlerin alındığı söylenebilir. Bu grafiklerde %3.5, %5 ve %10 olarak yer alan değerler jips yüzdesini ifade etmektedir.

4.5.1. Chinafill Kili İle Elde Edilen Sonuçlar

Chinafill (%75 kil, %25 kum) ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon şişme değerleri Şekil 4.22’te yer almaktadır. Sonuçlar sıkıştırma su muhtevası, jips yüzdesi, şişmenin süreç içinde değişimi ve şişme hızı bakımından değerlendirilmiştir.

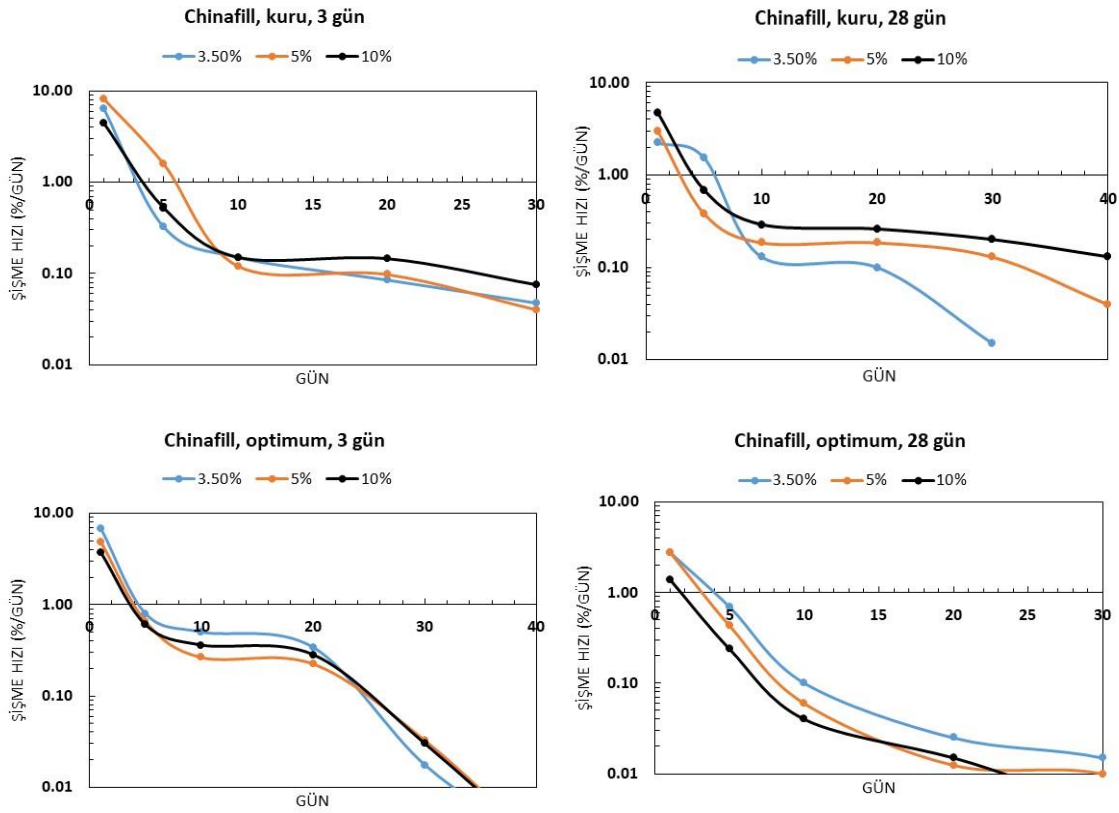


Şekil 4.22: Chinafill kaolini için konsolidasyon aletinde ölçülen şişme değerleri.

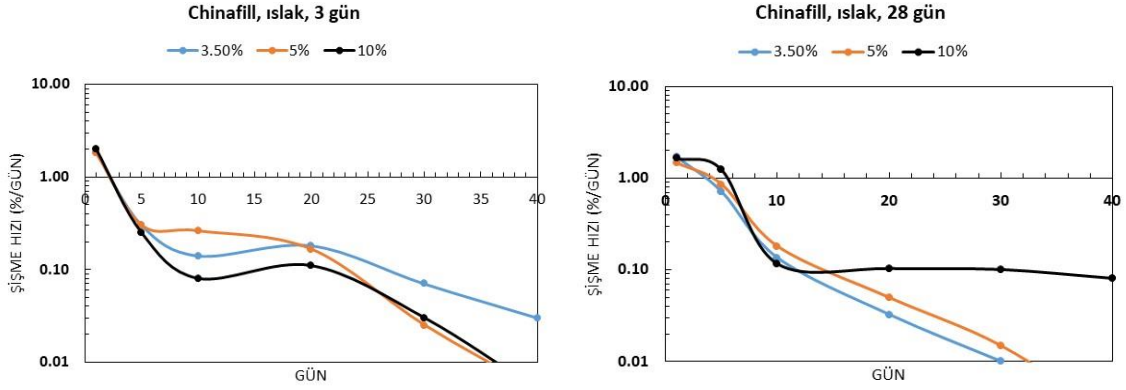
Tüm numunelerde su ilave edildiği andan itibaren şişme oluşmaya başlamıştır. Sıkıştırma su muhtevası ile oluşan etrinjit kristalleri olsa bile, şişmeye neden olmadığı görülmüştür, yani kabarmaya neden olacak etrinjit oluşumu için dışarıdan su ilavesine ihtiyaç bulunmaktadır. Kuru tarafta sıkıştırılan ve üç gün süre ile küre tabi tutulan numunelerde, genel davranış olarak şişme davranışı uzun süre devam etmiştir. Yirmi sekiz gün süre ile küre tutulan numunelerde de uzun kür süresinin olumlu bir etkisi görülmemiştir. Bazı numunelerde bir süre sonra şişme değerleri sabitlemiştir. Bu durum daha fazla şişme için gerekli olan sülfatın ortamda kalmadığına işaret etmektedir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde, üç gün kür

süresi sonunda suya maruz kalan numunelerde, şişmenin yüksek olduğu ancak 28 gün kür sonunda numunelerde daha az şişme olduğu görülmüştür. Islak tarafta sıkıştırılan numunelerde ise hem üç gün, hem de yirmi sekiz gün sonunda oluşan şişme değerleri diğer numunelere göre daha düşüktür. 28 gün kür süresi sonunda %10 jips içeriğinde şişme değerleri %10'lara ulaşılmaktadır. Test edilen ikinci numunede de bu değerlere ulaşılmıştır. Islak tarafta sıkıştırmanın şişme miktarı üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür, ancak çok yüksek jips içeriğinde ıslak tarafta sıkıştırmanın da yeterli olmayabileceği görülmektedir.

Şişme hızı ile ilgili değerlendirmeler bu bölümde verilmektedir. Şişme hızı, bir önceki güne göre oluşan şişme artışını ifade etmektedir. Üç günlük kür sonunda suya maruz kalan numunelerde, eğer sıkıştırma su muhtevası kuru veya optimum ise, ilk beş günde şişme hızı %10 / gün seviyelerine ulaşmaktadır. Kuru durumda 28 günde de bu yüksek hız görülmektedir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde 28 gün kür süresi sonunda şişme hızları beş gün sonunda %2 /gün seviyelerine inmektedir. Islak sıkıştırmada ise başlangıçtan itibaren her iki kür günü için % 2 / gün seviyesinin altındadır.



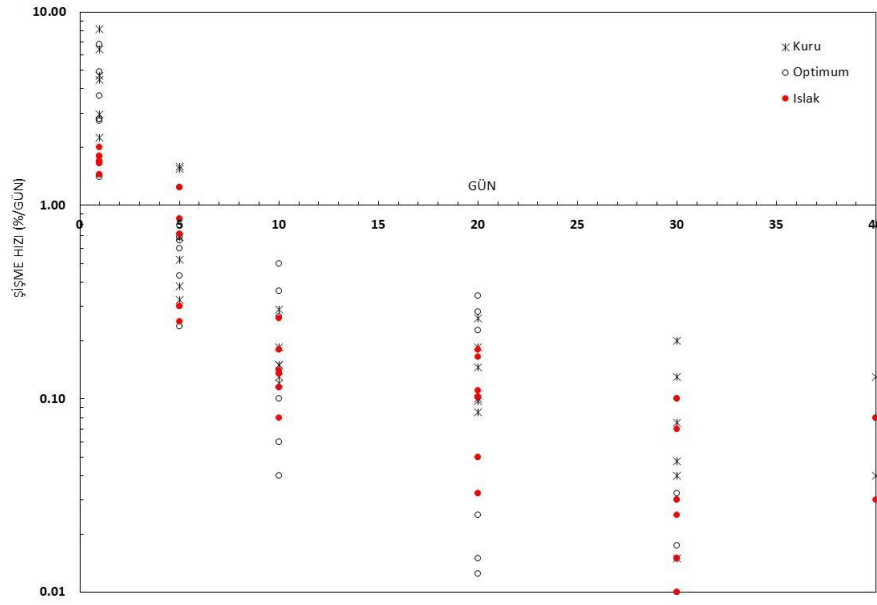
Şekil 4.23: Chinafill kili için şişme hızının değişimi.



Şekil 4.23 (devam): Chinafill kili için şişme hızının değişimi.

Sıkıştırma su muhtevasının ve sülfat içeriğinin şişme miktarını olduğu kadar, şişme hızını da etkilediği görülmektedir. Kuru tarafta yapılan sıkıştırmada, ilave edilen suyun zemin içerisindeki alüminyumun ve jipsteki sülfat içeriğinin çözünmeyi yeterince sağlayamaması neticesinde, suya maruz kalma sonrasında bu çözünme hemen olmakta ve etrinjit oluşumu çok hızlı ve yüksek olmaktadır. Optimum ve kısa kür süresi için de bu argüman geçerlidir. Islak tarafta sıkıştırılan numunelerde ise, şişme hızları daha yavaştır. Islak tarafta yapılan sıkıştırmının sülfat çözünümüne ve bir miktar etrinjit oluşumuna neden olduğu ve bu nedenle suya maruz kalma durumunda bu sürecin daha yavaş oluştuğu görülmektedir.

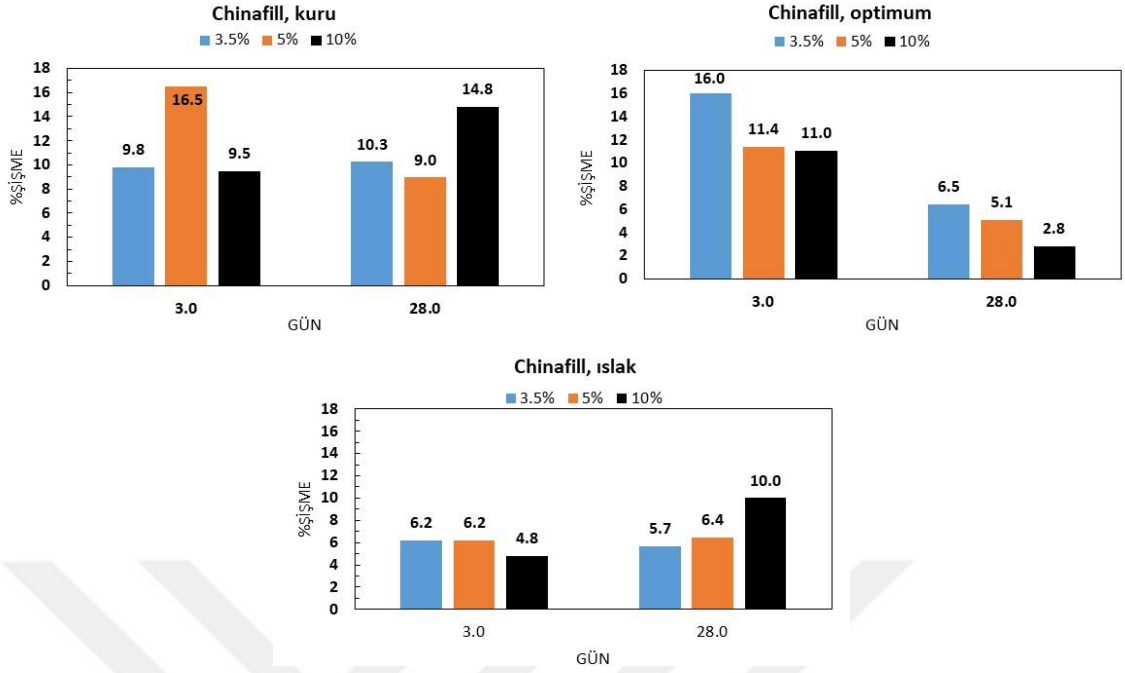
Şekil 4.24'te tüm şişme hızları bir arada görülmektedir. Beş günden sonra bütün şişme hızlarının %1/gün altına indiği görülmektedir. Bu değerler konsolidasyon deney aletinde yapılan deneyler için geçerlidir. Başka sınır şartları altında şişme hızları değişebilir.



Şekil 4.24: Chinafill kili için şişme hızlarının karşılaştırılması.

4.5.1.1. Kür süresinin etkisi

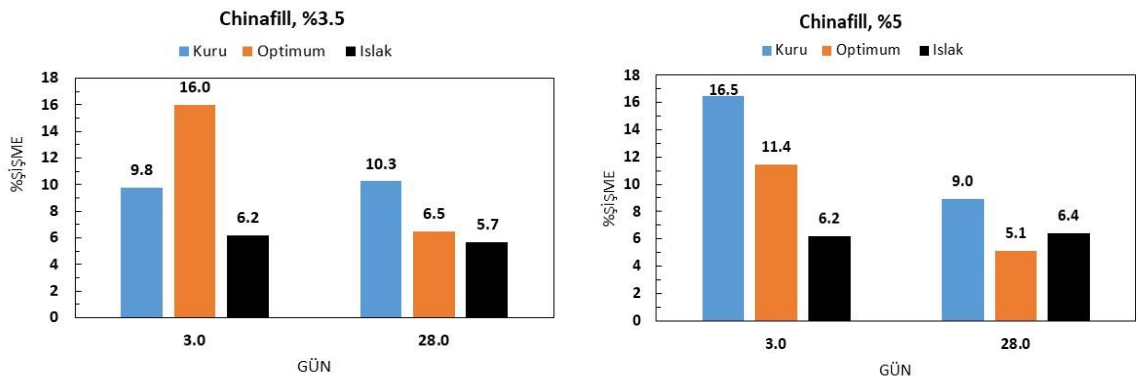
Bu bölümde kür süresinin etkisi değerlendirilmektedir. Şekil 4.25'te, %3.5 ve %5 jips içeren zeminlerde kür süresi ile birlikte şişme değerlerinde azalma olabildiği görülmüştür. %10 jips içeriğinde ise 28 günlük kür süresi şişme yüzdesini azaltmak için yeterli olmamaktadır. Kür süresinin artması ile birlikte öncelikle pozolanik reaksiyonların oluştuğu ve yapının daha stabil hale geldiği, böylelikle etrinjit nedeniyle oluşan şişmenin engellenebileceği savı her numune için doğrulanmamaktadır. 28 günlük kür süresi sonunda da yüksek değerlerde şişme davranışı görülebilmektedir. Kür süresinin 28 güne kadar artışı etrinjite bağlı şişmeyi engellemede yeterli değildir. Kuru tarafta yapılan sıkıştırma işleminin etkin olamaması ve homojen bir dağılımı sağlayamaması sebebiyle bu sıkıştırma su muhtevasında elde edilen değerler de kür gününe ya da sülfat içeriğine bağlı bir ilişki görülmemiştir.



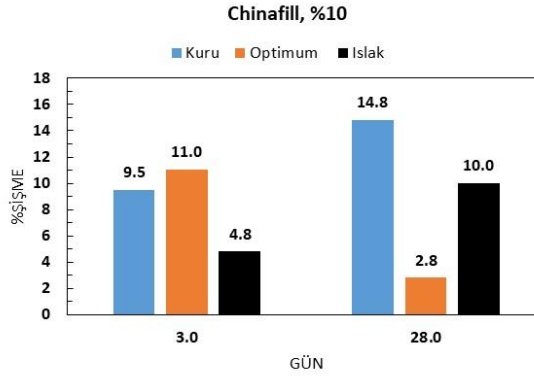
Şekil 4.25: Chinafill kili için normal kür uygulanan numuneler için kür süresinin etkisi.

4.5.1.2 Sıkıştırma su muhtevasının etkisi

Şekil 4.26'da ise, şişme değerlerinin sıkıştırma su muhtevasına göre değişimi görülmektedir. Sülfat miktarlarına göre değişmekle birlikte, ıslak sıkıştırmanın genel olarak şişmeyi azaltıcı bir yönü olduğu görülmektedir. Sülfat yüzdesinin çok yüksek olduğu %10'luk numunelerde ise, ıslak sıkıştırmanın şişmeyi 28 gün kür sonunda dahi engelleyemediği görülmektedir.



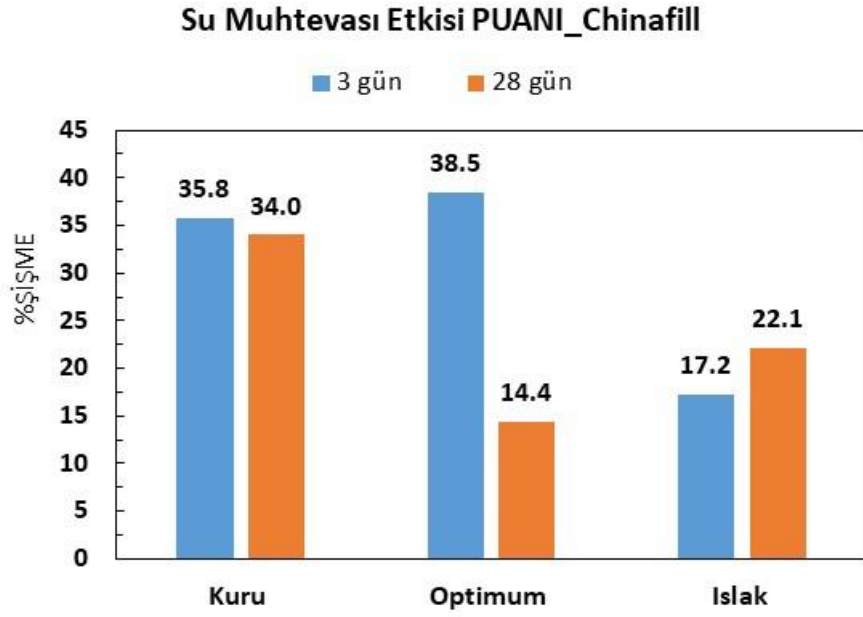
Şekil 4.26: Chinafill kili için normal kür yapılan numuneler için su muhtevasının etkisi.



Şekil 4.26 (devam): Chinafill kili için normal kür yapılan numuneler için su muhtevasının etkisi.

Su muhtevası etkisinin ne seviyede olduğunun daha kolay bir şekilde değerlendirilmesi için tüm sülfat yüzdeleri için elde edilen şişme yüzdeleri toplanmış ve her bir sıkıştırma su muhtevası için tek bir değer elde edilmiştir. Arazide bu seviyede olmasa bile sülfat seviyelerinde değişiklik olabilmekte, bazı lokasyonlarda daha yüksek, bazı lokasyonlarda daha düşük sülfat konsantrasyonları ile karşılaşmaktadır. Bu nedenle tüm bu değişkenliği de dikkate alabilen bir “**Su muhtevası etkisi puanı**” hesaplanmıştır. Değerler Şekil 4.27’de sunulmuştur. Bu çerçevede değerlendirildiğinde;

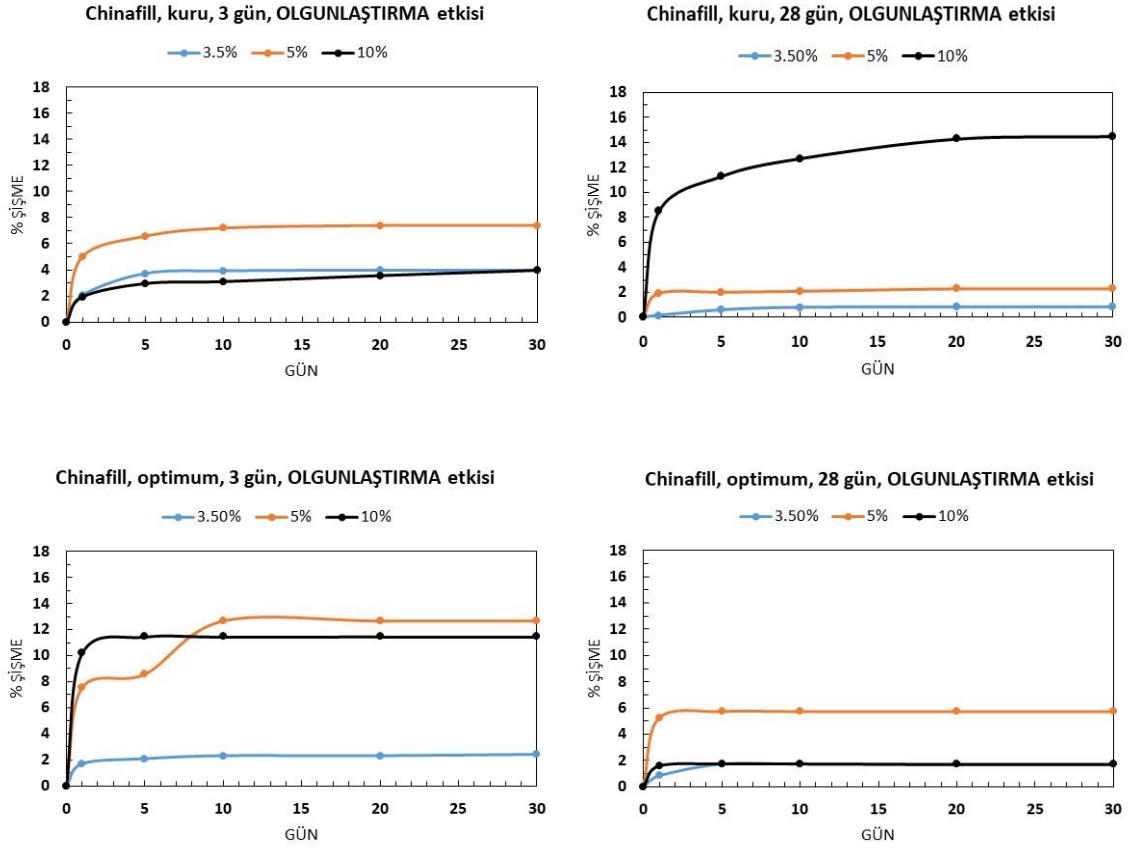
- Kuru durumda kür süresinin bir etkisinin olmadığı, her durumda yüksek şişme olduğu görülmektedir.
- Optimum durumda kür süresinin artması ile şişme değerlerinde yarı yarıya düşüş olmuştur.
- Islak durumda ise kuru ve optimum duruma göre 3 günlük kür süresinde bile yarı yarıya yakın düşüşler olduğu görülmektedir. Ancak puan bakımından her iki kür günü puanları birbirine eşittir.
- Tüm su muhtevaları bakımından, şişme değerleri çok yüksektir ve kabul edilemeyecek seviyededir. Sonuç olarak optimum ve ıslak tarafta sıkıştırmanın ve minimum 28 gün kür süresi uygulamanın şişmeyi azaltmada etkin olduğu, ancak tamamen engelleyemediği görülmektedir. Değerler kabul edilebilir sınırların (%3) çok üzerindedir.



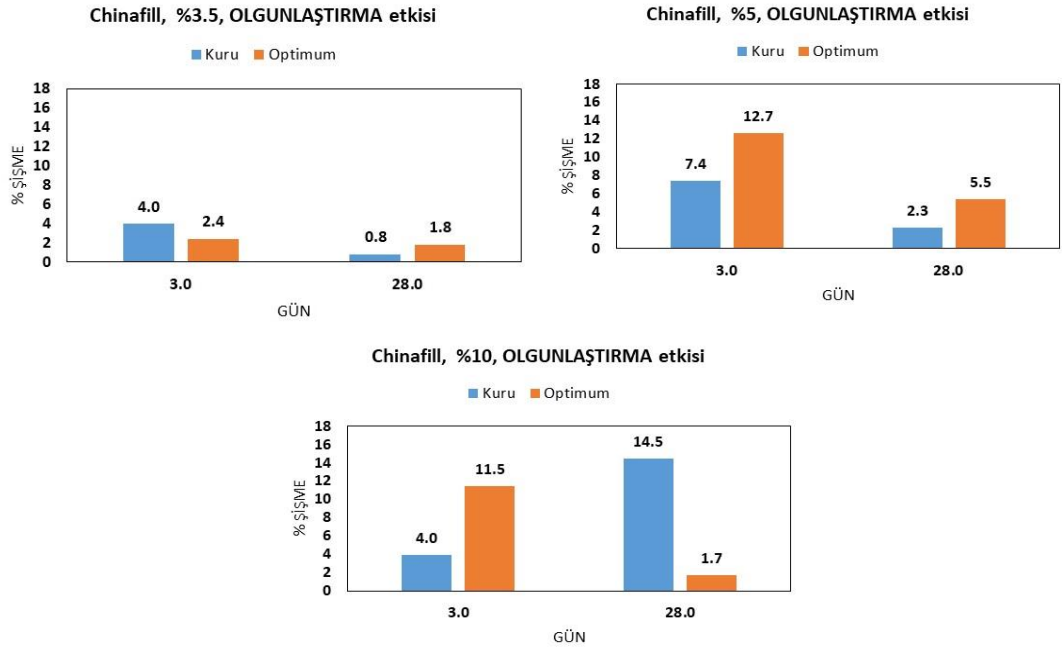
Şekil 4.27: Chinafill için “Su muhtevası etkisi puanı” değişimi.

4.5.1.3.Olgunlaştırma süresinin etkisi

Bu deneyler kuru ve optimum tarafta sıkıştırılan numuneler için yapılmıştır. Bir günlük olgunlaştırma süresi sonunda ölçülen şişme değerleri Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da gösterilmektedir. Olgunlaştırma süresine izin verilmesi ile genel olarak şişme değerlerinde düşüş olduğu görülebilir. Kuru tarafta sıkıştırılan numunelerde %10 jips içeriği ve 28 gün kür süresi dışında olgunlaştırma süresine bağlı olarak şişme değerlerinde azalma olmuştur. Kuru sıkıştırmada, çok yüksek sülfat içeriği olmadığı takdirde olgunlaştırma süresinin iyileştirmede başarılı olduğu görülmektedir. Optimum su muhtevastaki numuneler için üç günlük kür süresi sonunda en büyük etki %3.5 jips içeriğinde olmuştur. Diğer numunelerde ise bu seviyede etki oluşmamıştır. 28 gün sonunda ise kısmen de olsa iyileştirme etkisi görülmektedir. Olgunlaştırma süresinde etrinjitin bir kısmının oluştuğu, numune sıkıştırıldıktan sonra ise geride kalan sülfatın ise daha düşük miktarda etrinjit üretebildiği düşünülmektedir. Şekil 4.29’da görüldüğü gibi, olgunlaştırma sürecine maruz bırakılan ve 28 gün kür süresinden önce suya maruz kalmayan numunelerde şişme davranışı, sülfat yüzdesi çok yüksek değilse makul seviyelerde olabilmektedir.

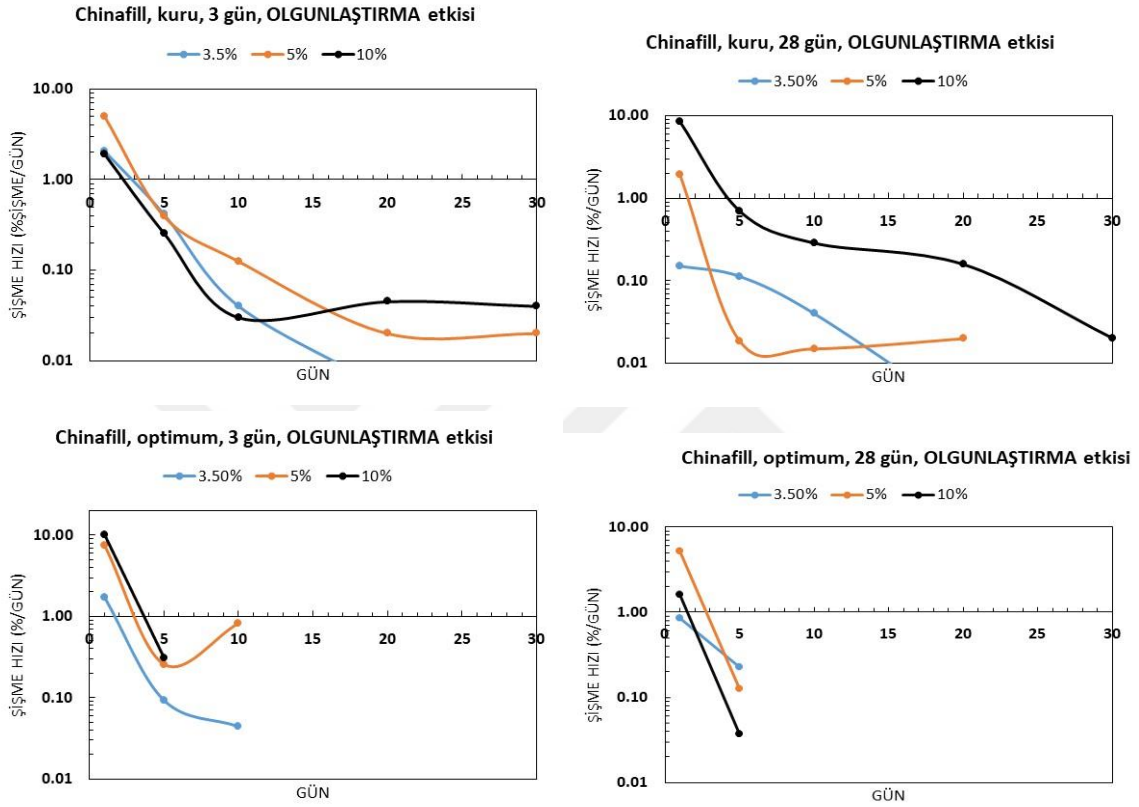


Şekil 4.28: Chinafill kili için olgunlaştırma süresi uygulanan numunelerde şişme davranışı.



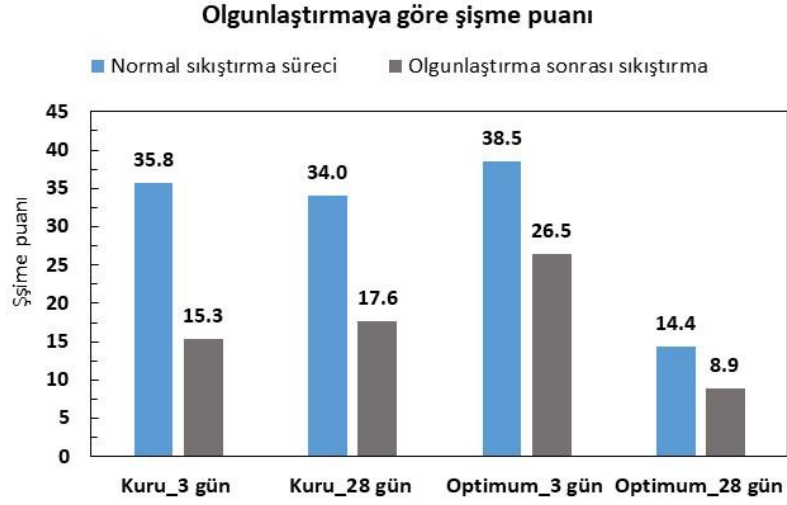
Şekil 4.29: Chinafill kili için olgunlaştırma süresi uygulamanın farklı sülfat oranları bakımından etkisi.

Şişme hızları bakımından değerlendirildiğinde, olgunlaştırmanın etkisi şu şekilde değerlendirilebilir. Tüm numunelerde şişmenin çoğunlukla ilk beş gün içerisinde tamamlandığı görülmektedir. İlk günlerde şişme hızları %10/gün değerleri seviyesine ulaşabilmektedir. Şişme hızları tüm numunelerde ilk beş gün sonunda %1/gün değerinin altına inmektedir. Sülfat içeriği ve şişme hızları arasında bir ilişki kurulamamaktadır.



Şekil 4.30: Chinafill için olgunlaştırma yapılmasının şişme hızına etkisi.

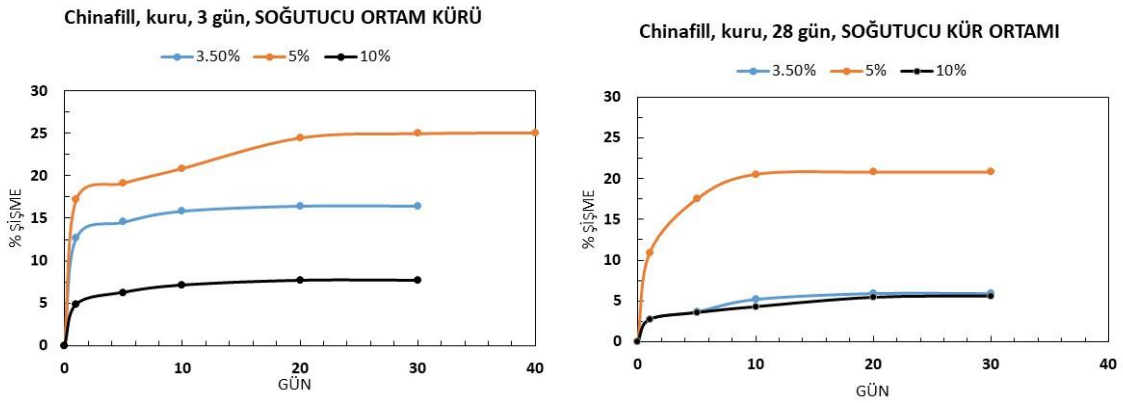
Bu grup sonuç için de bir “**Olgunlaştırmaya göre Şişme Puanı**” hesaplanmıştır. Farklı sülfat yüzdelere sahip zeminler için elde edilen değerler toplanmış ve grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Olgunlaştırma yapılan numunelerde, 28 gün kür süresi sonunda daha düşük şişme seviyeleri elde edilmiştir. Ancak her halükârda, bu değerler yol üstyapısına zarar verecek seviyededir ve bu nedenle bu seviyede elde edilen iyileştirme kabul edilemez. Bir günlük olgunlaştırma süresinin etrinjit oluşumu nedeniyle oluşan kabarmayı durdurmak için yeterli olmadığı görülmektedir.



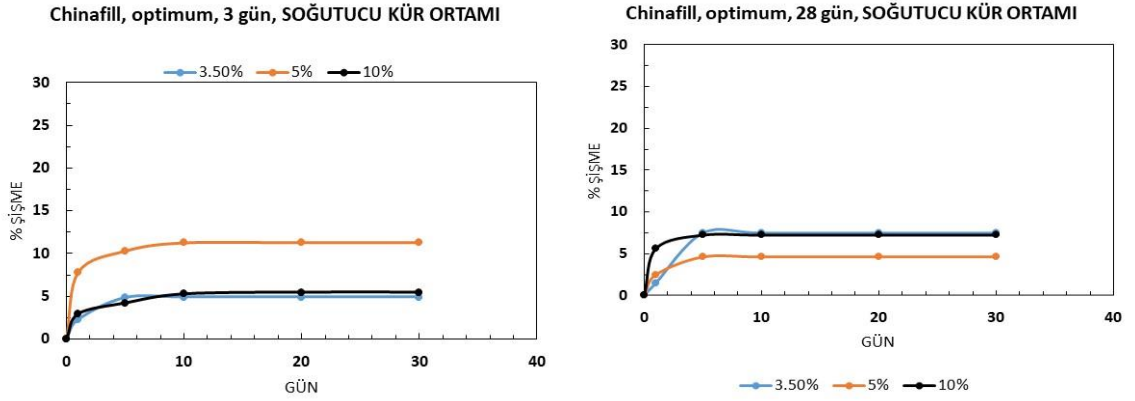
Şekil 4.31: Chinafill kili için “Olgunlaştırmaya göre şişme puanı” değişimi.

4.5.1.4. İklimlendirme dolabında (Soğutucu kür ortamı) yapılan kür sürecinin etkisi

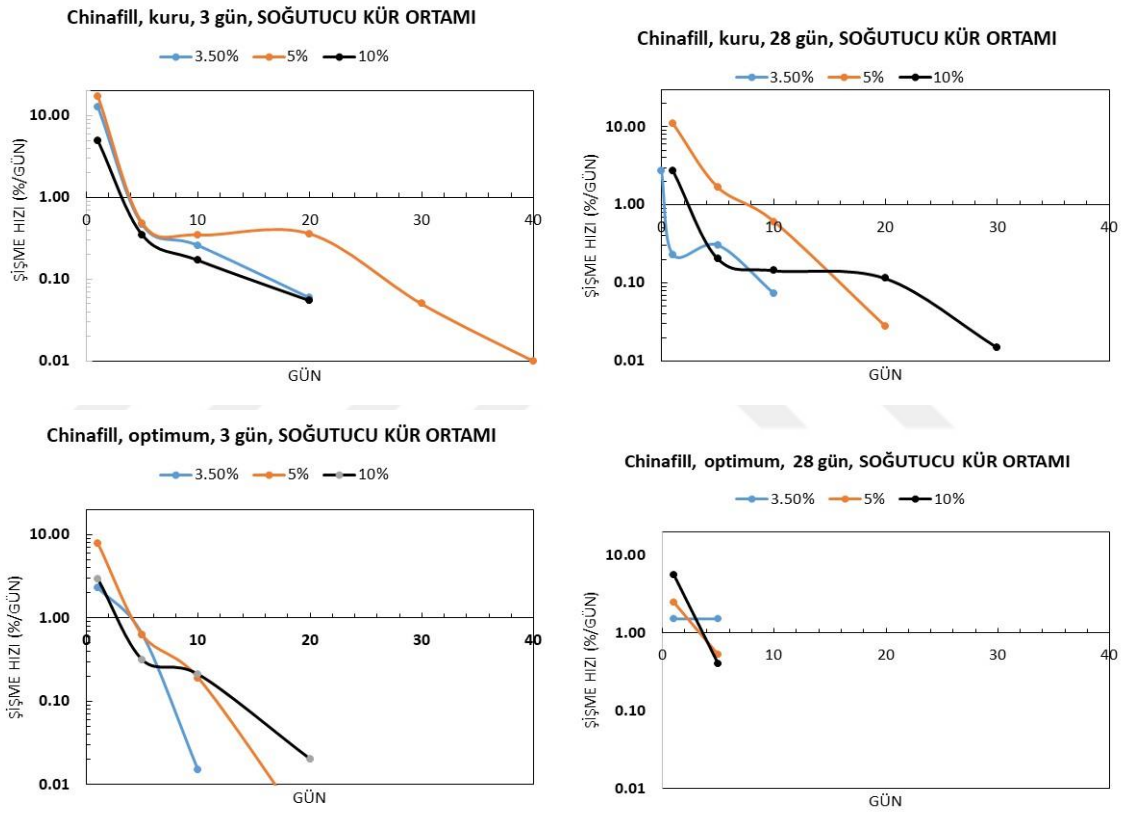
Şekli 4.32, iklimlendirme dolabında yapılan kür süreci sonucunda ölçülen şişme değerlerini göstermektedir. Kuru tarafta yapılan sıkıştırma ile hazırlanan numunelerde soğutucu kür ortamı şişme değerlerini etkilemektedir. Numunenin kuru taraftaki su muhtevasında hazırlanması ve sonrasında kür sürecinde numunenin soğuk ortamda kalması sonucunda sülfat çözünmesinin yetersiz olduğu ve tüm etrinjit üretiminin suya maruz kalındığında olduğu görülmektedir. Bu durum 3 gün kür süresi için çok etkili olmuştur. 28 gün kür sonunda da %5 jips ile yüksek bir şişme değerine ulaşılmıştır. Diğer değerler daha düşüktür. Şişme hızları Şekil 4.33’te görülmektedir. Bir numune dışında şişme hızları genellikle ilk beş gün sonunda %1/gün değerinin altına düşmektedir. Kimyasal bir süreç olan etrinjit oluşumunun jips yüzdesi arttıkça artmadığı görülmektedir. Başka mekanizmalar da etkilidir.



Şekil 4.32: Chinafill kili için şişme yüzdeleri üzerinde soğutucu kür ortamının etkisi.



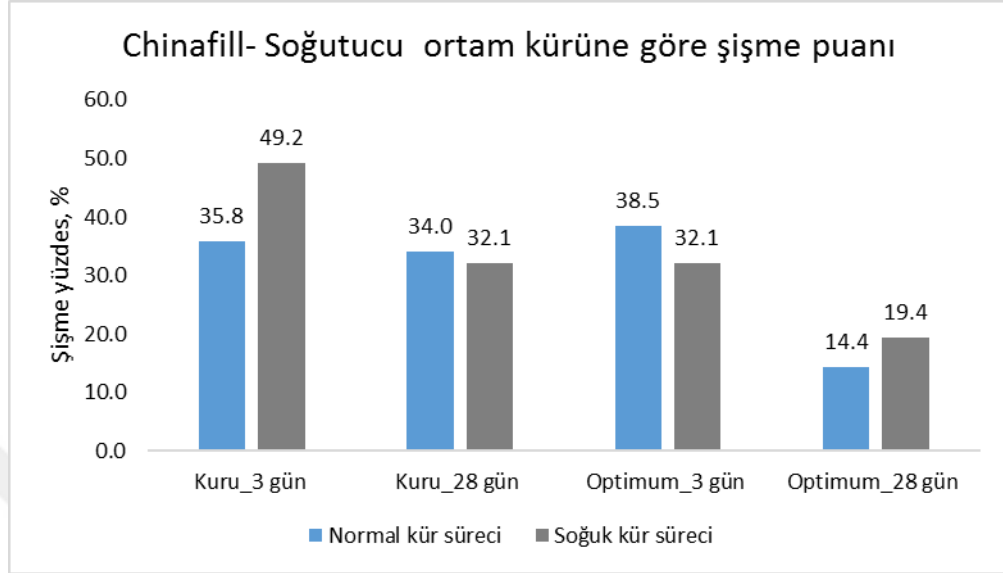
Şekil 4.32(devam): Chinafill kili için şişme yüzdeleri üzerinde soğutucu kür ortamının etkisi.



Şekil 4.33: Chinafill kili için soğutucu kür ortamının şişme hızına etkisi.

Şekil 4.34'te soğuk ortam için “Soğutucu Ortam Kürüne Göre Şişme Puanı” değerlendirmesi yapmaktadır. Her iki kür durumu için karşılaştırma yapıldığında “kuru tarafta sıkıştırma ve üç gün kür” sonunda şişmeye maruz kalan numunelerde soğuk kür neticesinde daha yüksek şişme değerleri elde edilmiştir. Diğer numunelerde ise değerler birbirine yakındır. Kuru tarafta sıkıştırma yapılmadığı ve çok az kür süresi olmadığı durumunda, oluşacak olan

etrinjitin neden olduğu kabarmanın numunelerin soğuk havada ya normal kür ortamında kür edilmesi ile ilgili olmadığı görülmektedir.

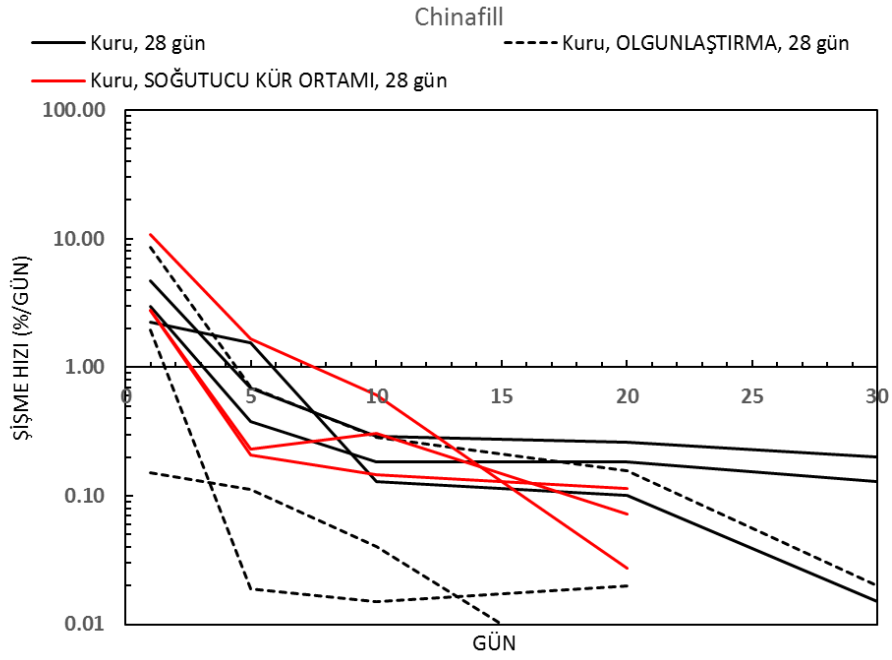


Şekil 4.34: Chinafill kili için soğutucu ortam kürüne göre şişme puanının değerlendirilmesi.

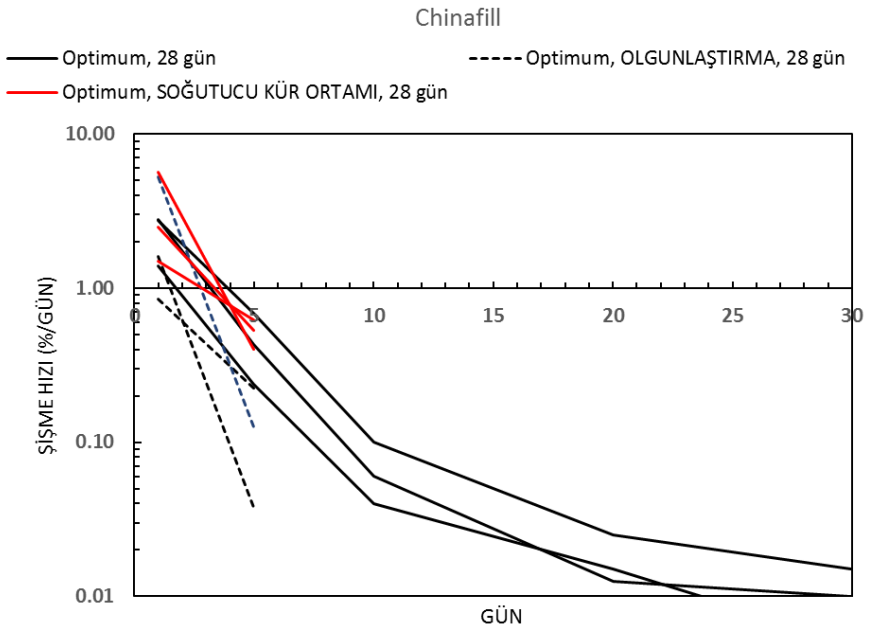
4.5.1.5. Chinafill kili için tüm etkenlerin şişme hızı bakımından bir arada değerlendirilmesi

Bu bölümde şişme hızlarının tüm etkenler bakımından değerlendirilmesi yapılmıştır. Kuru ve optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde şişme hızı grafikleri Şekil 4.35 ve 4.36'da birlikte verilmektedir. Sonuçlar şu şekilde değerlendirilebilir;

- Her iki sıkıştırma su muhtevasında da olgunlaştırma süresi, şişme hızını önemli ölçüde azalmıştır. Sadece çok yüksek bir değer olan %10 jips seviyesinde şişme hızı olgunlaştırma sürecinden etkilenememiştir.
- Soğutucu kür ortamının şişme hızını etkilemediği, kuru sıkıştırma için ilk yirmi günde, optimum sıkıştırma için ilk beş günde şişmenin tamamlandığı görülmektedir.



Şekil 4.35: Chinafill kili için kuru tarafta sıkıştırılan numuneler için şişme hızlarının karşılaştırılması.

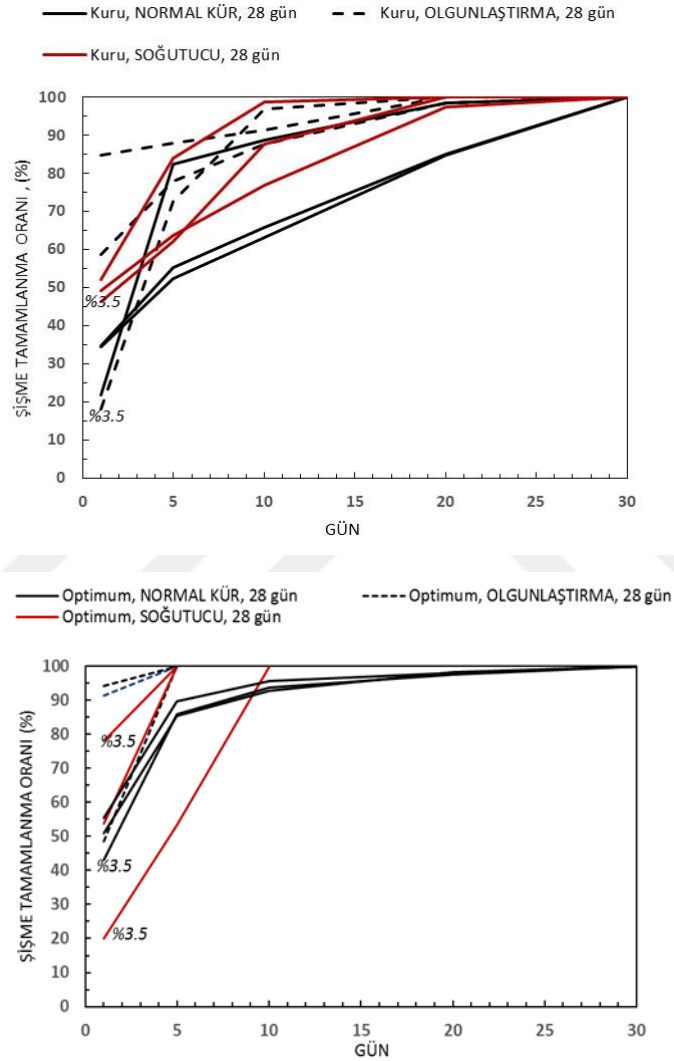


Şekil 4.36: Chinafill kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler için şişme hızlarının karşılaştırılması.

Bu bölümde ilave olarak “Şişme tamamlanma oranı, ŞTO” tanımlanmıştır. Bu oran aşağıdaki formül (Denklem 4.1) ile hesaplanmıştır.

$$\text{Şişme tamamlanma oranı (ŞTO)} = \frac{\text{Herhangi bir gündeki şişme miktarı}}{\text{Toplam şişme miktarı}} \times 100 \text{ (Denklem 4.1)}$$

Bu yeni terim ile, şişmenin farklı koşullar altında nasıl ilerlediği daha iyi ifade edilebilmektedir. Şekil 4.37’de Chinafill kili için kuru ve optimumda ıkıştırma için “**Şişme tamamlanma oranı, ŞTO**” sunulmuştur. En düşük jips yüzdesi olan %3.5 içeriğinde, birinci gün sonunda her durumda en düşük ŞTO değerine ulaşılmaktadır. Olgunlaştırma süresinin uygulanması ile birinci günün sonunda oldukça yüksek etrinjit tamamlanma yüzdelere ulaşılabilirdiği görülmektedir.

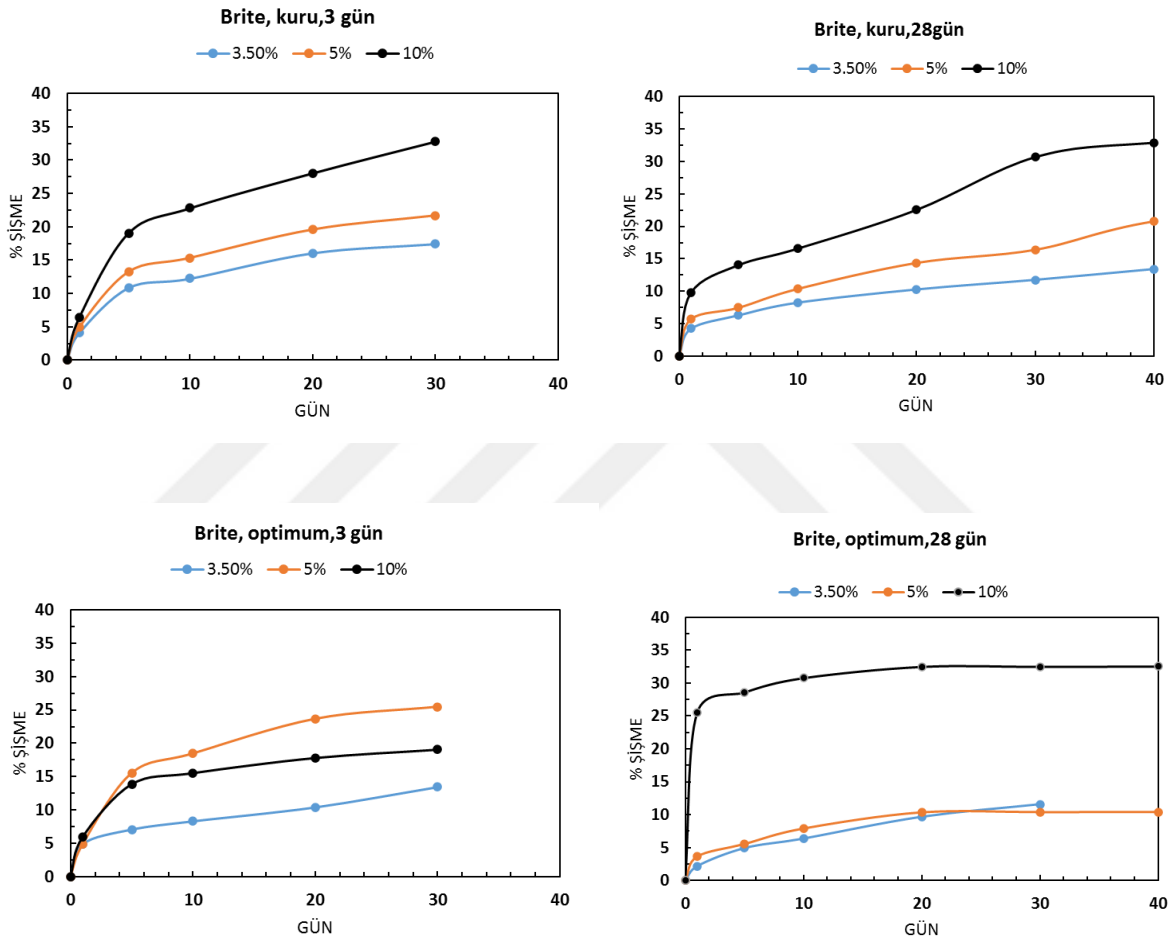


Şekil 4.37: Chinafill kili için kuru ve optimum numuneleri için “Şişme tamamlanma oranı, ŞTO” karşılaştırılması.

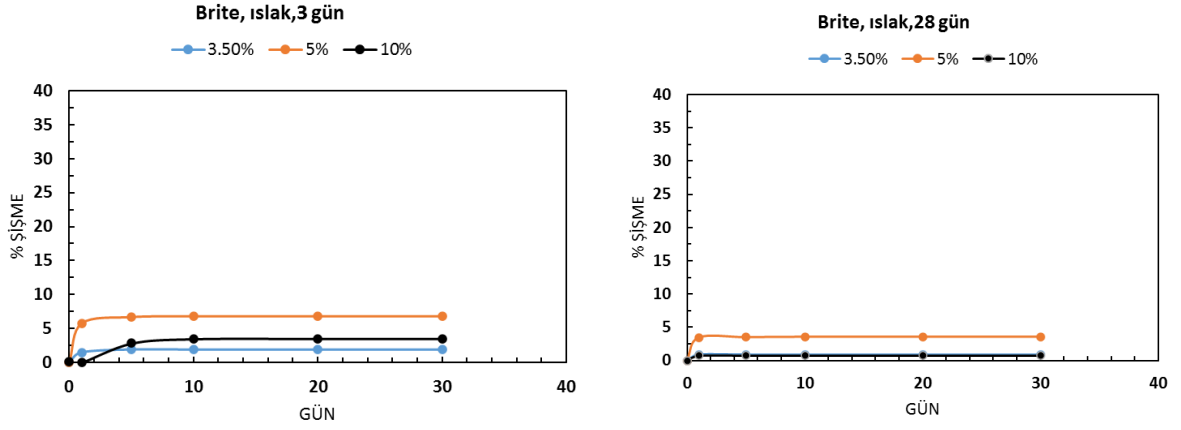
4.5.2. K-Brite Kaolini İle Yapılan Konsolidasyon Deneyleri

Bu kilde elde edilen sonuçlar Şekil 4.38 ve 4.39’da sunulmuştur. Tüm numunelerde su ilave edildiği andan itibaren şişme oluşmaya başlamıştır. Kuru ve optimum tarafta sıkıştırılan

numunelerde üç gün kür süresi uygulanması durumunda, şişme hızı azalmakla birlikte ölçümün alındığı 30 gün ya da 40 gün sonrasında dahi şişme devam etmektedir. Bu su muhtevalarında 28 gün kür süresi sonunda suya maruz kalan numunelerde de şişme davranışı görülmektedir. Kuru tarafta sıkıştırılan numunelerde şişme yüzdeleri %35'lere ulaşmaktadır. Bu kil için ıslak tarafta sıkıştırma yapılması şişmeyi önemli miktarda azaltmıştır. Değerler, üç gün kür için %10 değerinin altına, 28 gün kür için %5 değerinin altına inmiştir.

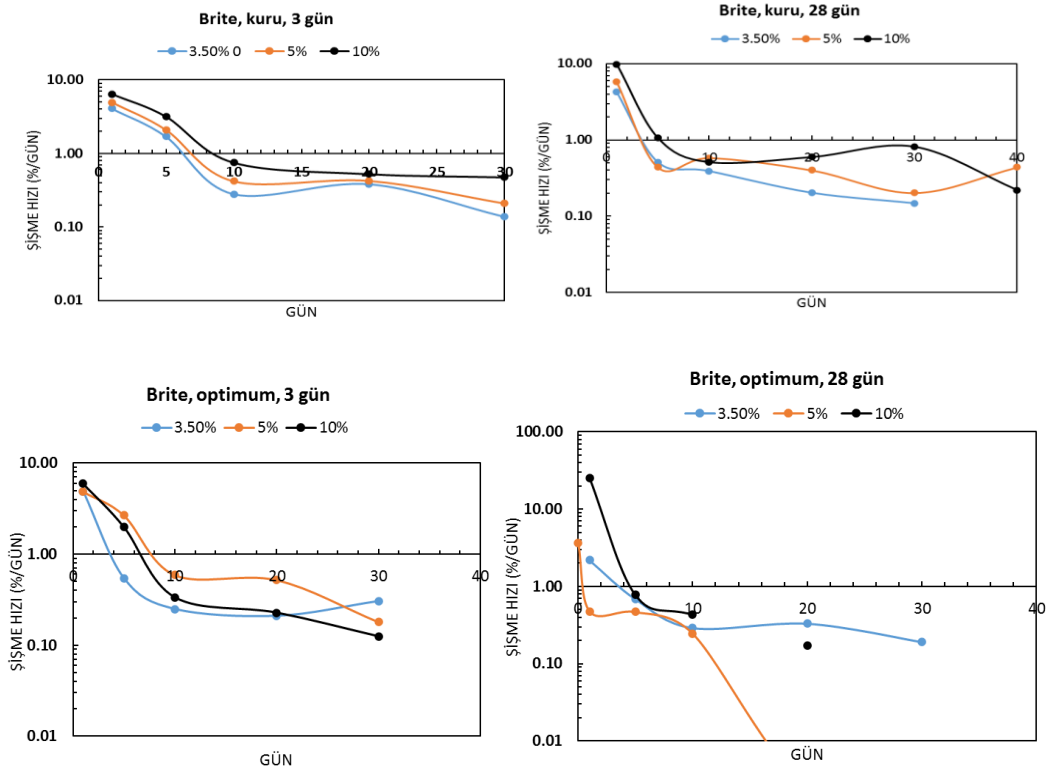


Şekil 4.38: K-Brite kaolini için konsolidasyon aletinde ölçülen şişme değerleri.

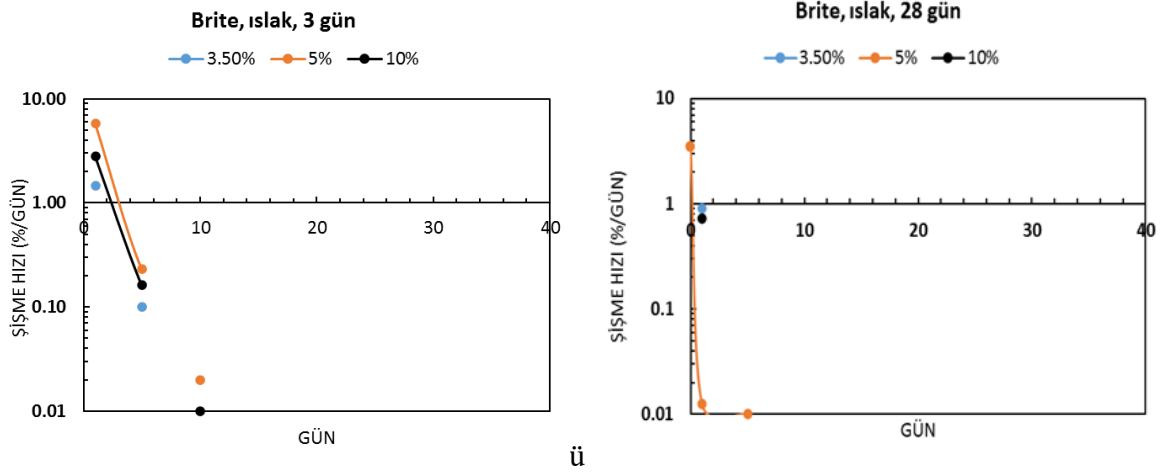


Şekil 4.38(devam) : K-Brite kaolini için konsolidasyon aletinde ölçülen şişme değerleri.

Şişme hızları bakımından da hızların günlere bağlı olarak değiştiği görülmektedir. İlk 10 günde genellikle daha yüksek şişme hızları görülmekte, daha sonraki günlerde ise şişme hızları düşmektedir. İlk beş gün için maksimum şişme hızının %10 / gün ve daha düşük olduğu görülmektedir.



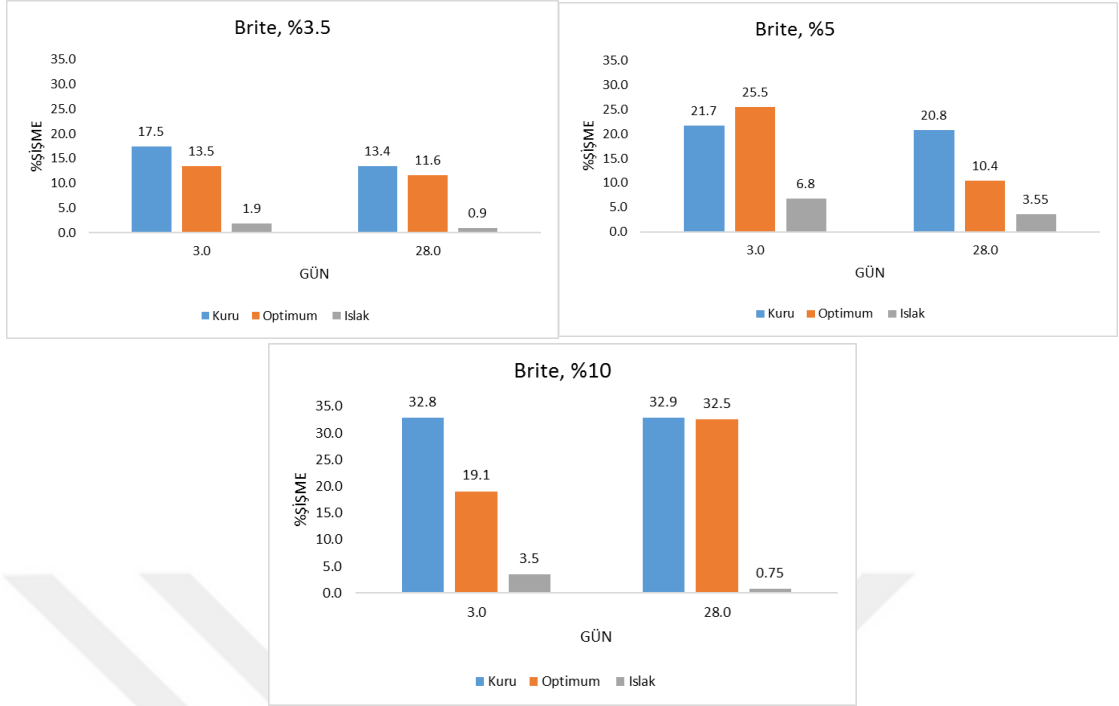
Şekil 4.39: K-Brite kaolini için şişme hızları.



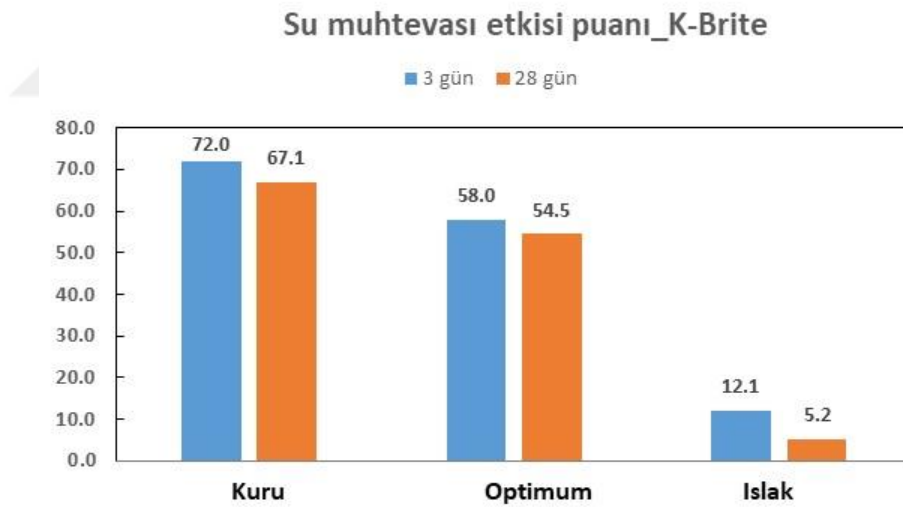
Şekil 4.39 (devam): K-Brite kaolini için şişme hızları.

4.5.2.1 Su muhtevası etkisi

Şekil 4.40'ta K-Brite kili için sıkıştırma su muhtevasının etkisi görülmektedir. Optimumun kuru su muhtevasında ve optimum su muhtevasında yapılan sıkıştırma her iki kür gününde de yüksek şişme değerlerine neden olmaktadır. Bu kil için ıslak tarafta sıkıştırma çok etkili olmuştur ve %10 sülfat içeriğinde dahi şişme miktarlarında çok önemli miktarda düşüş sağlandığı görülmüştür. Şekil 4.41'de gösterilen “**Su muhtevası etkisi puanı**” da bu kil için ıslak sıkıştırmanın etkisinin çok yüksek olduğunu göstermektedir. Kuru ve ıslak taraftaki sıkıştırma için her iki kür gününde de değerler çok yüksektir. Kür gününün olumlu bir etkisi görülmemiştir.



Şekil 4.40: K-Brite için farklı jips seviyelerinde sıkıştırma su muhtevası etkisi.

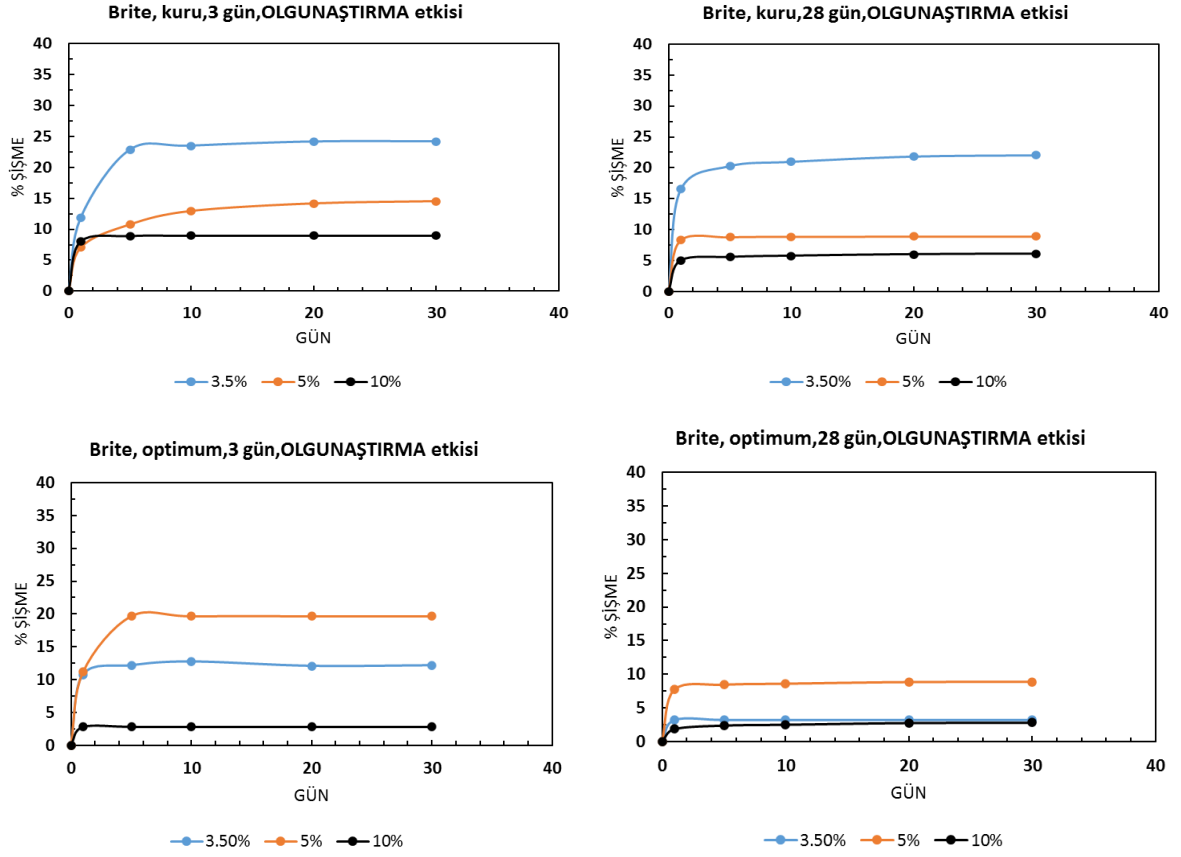


Şekil 4.41: K-Brite kili için “Su muhtevası etkisi puanı” değerlendirmesi.

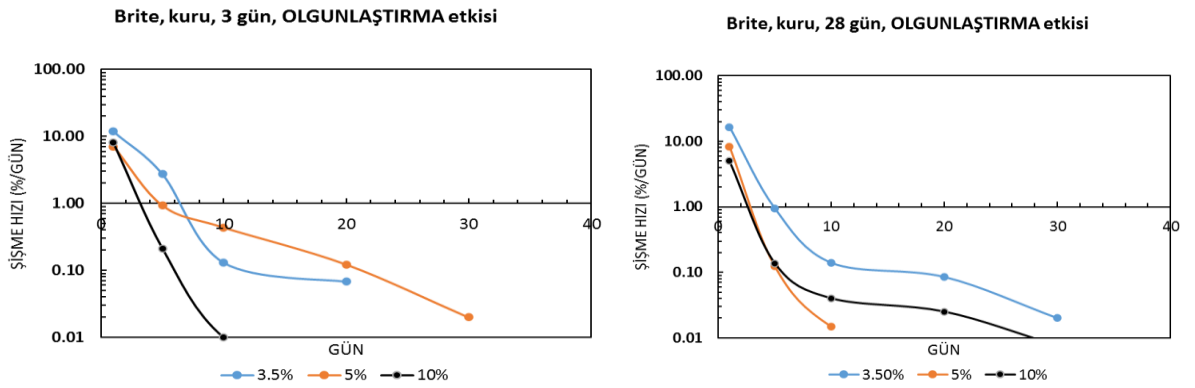
4.5.2.2. Olgunlaştırma etkisi

Bu grup kil için olgunlaştırma süreci sonunda oluşan şişme değerleri ve şişme hızları Şekil 4.42 ve 4.43’te görülmektedir. Olgunlaştırma sürecinin etkili olduğu ve şişme yüzdeleri azalttığı görülmektedir. Arazide uygulanacak olgunlaştırma süresi laboratuvar da uygulanabilir.

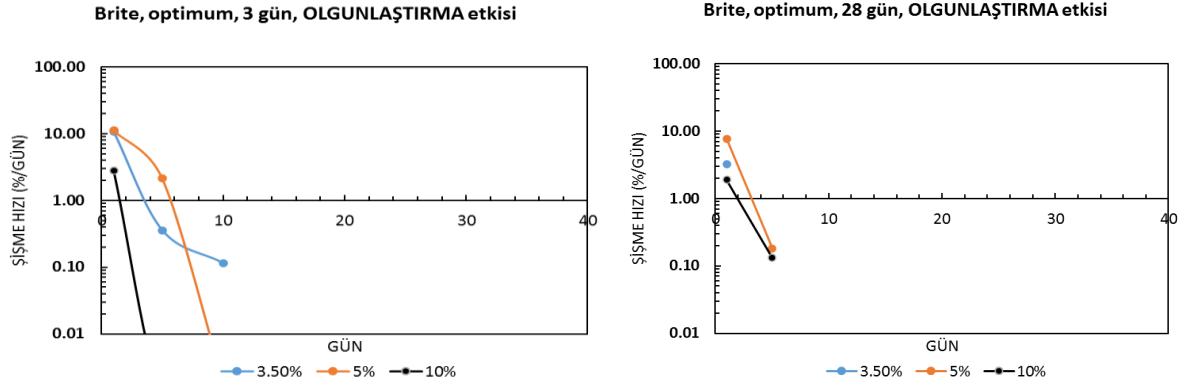
Ancak çok uzun olgunlaştırma sürelerinin de sıkıştırmayı zorlaştıracığı ve boşluklu bir yapıya neden olacağı unutulmamalıdır.



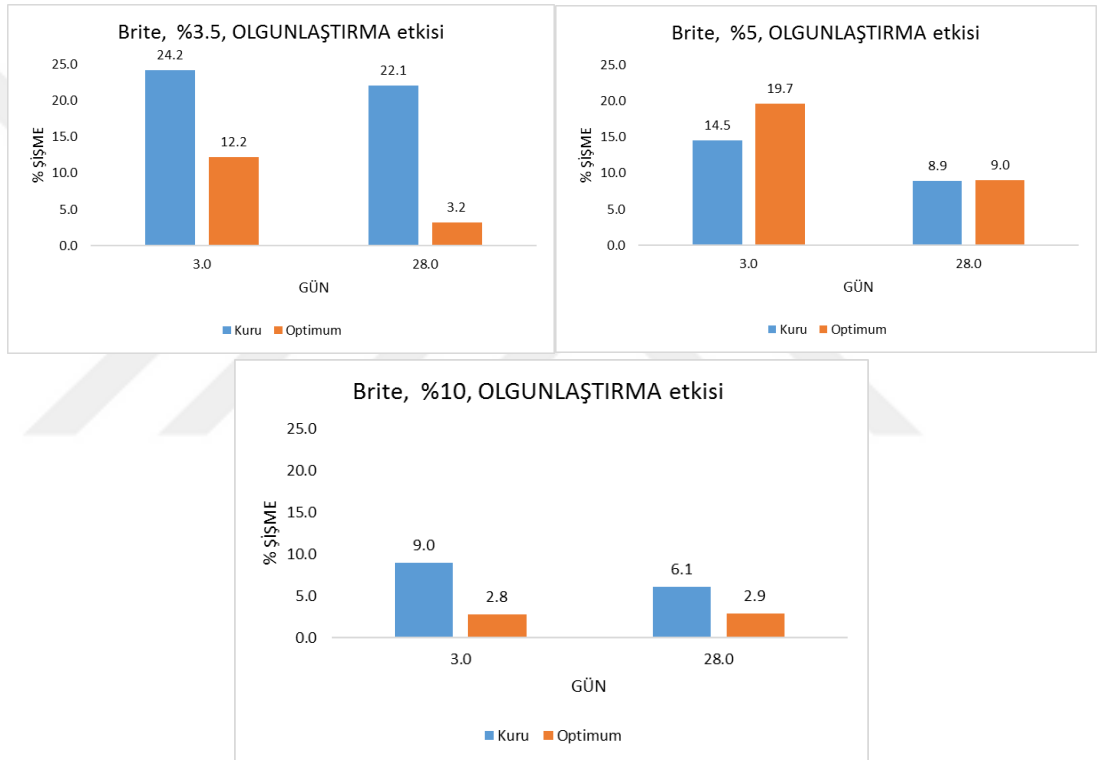
Şekil 4.42: K-Brite kili için olgunlaştırmanın şişme yüzdesine etkisi.



Şekil 4.43: K-Brite kili için olgunlaştırmanın şişme hızına etkisi.

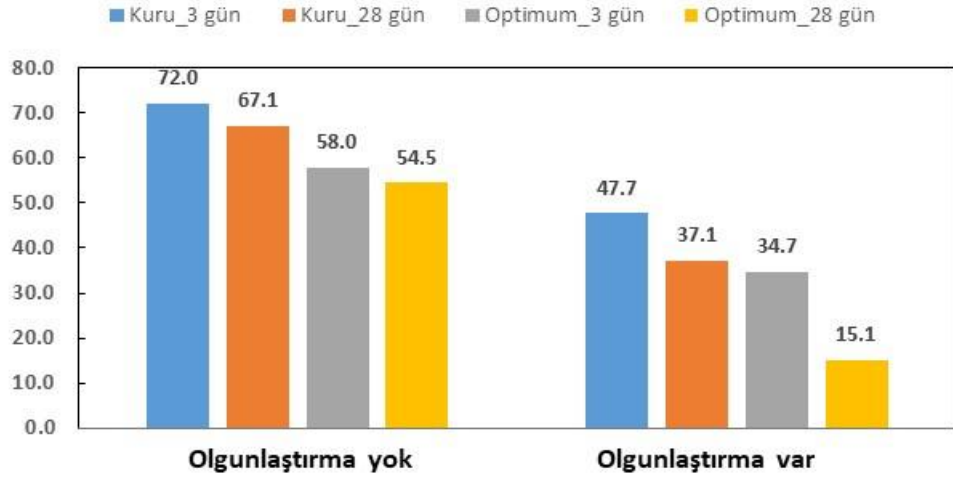


Şekil 4.43 (devam): K-Brite kili için olgunlaştırmanın şişme hızına etkisi.



Şekil 4.44: K-Brite kili için farklı jips seviyelerinde şişme yüzdeleri.

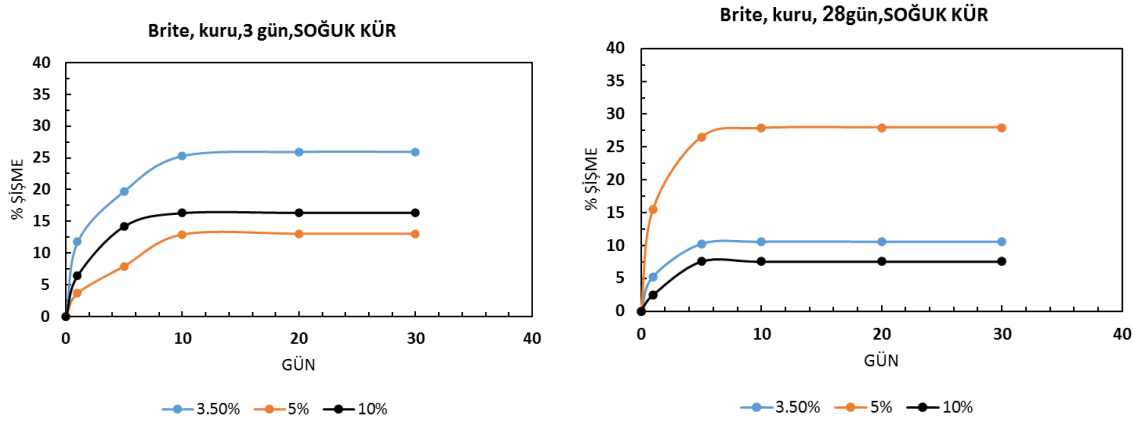
Olgunlaştırmaya göre şişme puanı_K-Brite



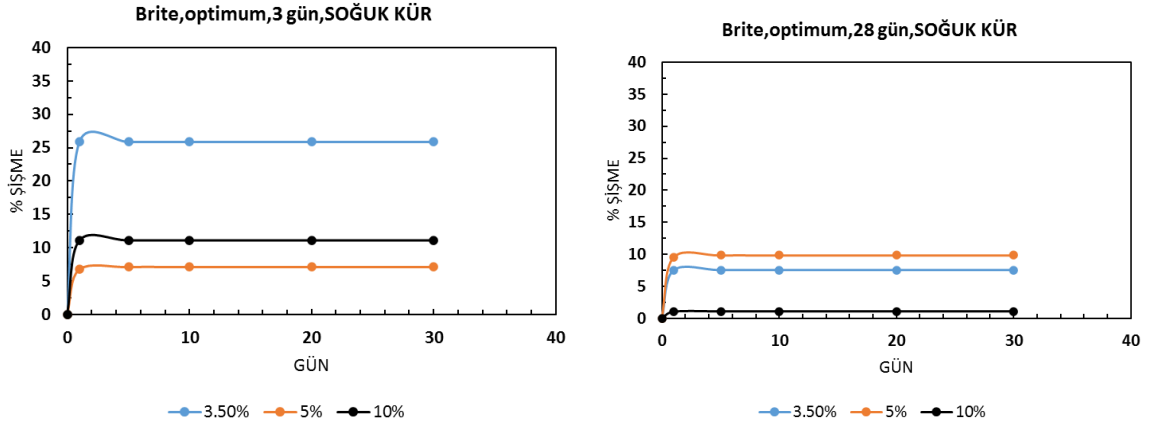
Şekil 4.45: K-Brite kili için “Olgunlaştırmaya göre şişme puanı” değerlendirilmesi.

4.5.2.3.K-Brite kili için soğutucu (İklimlendirme dolabında kür süreci) kür etkisi

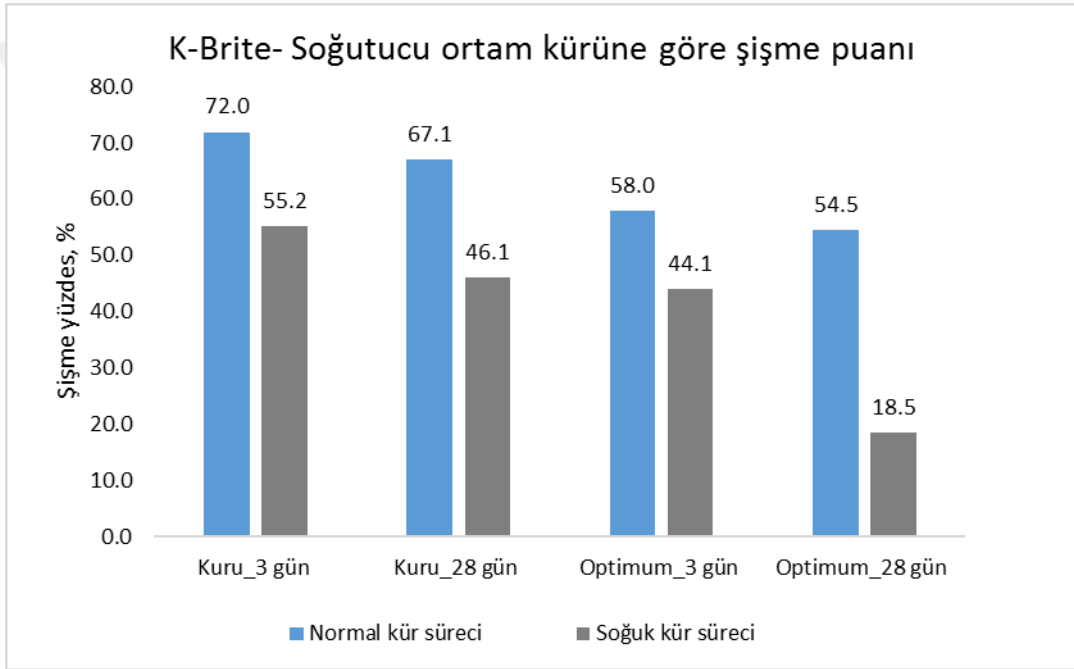
K-Brite kili için soğutucu ortamda kür uygulanması şişme yüzdeleri değiştirmiş ve şişme değerlerinde bir miktar azalma olmuştur. Elde edilen şişme değerleri olgunlaştırma ile ulaşılan şişme değerlerine yakındır. Son olarak, soğutucu ortam kürüne göre şişme puanı hesaplanmıştır. Şekil 4.46’da görüldüğü gibi soğutucu ortamda kür yapılması, normal kürü göre azalmaya neden olmaktadır. Soğutucu ortamın etkisinin kil mineralojisine göre değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.46: K-Brite için soğutucu ortam kürü etkisi.



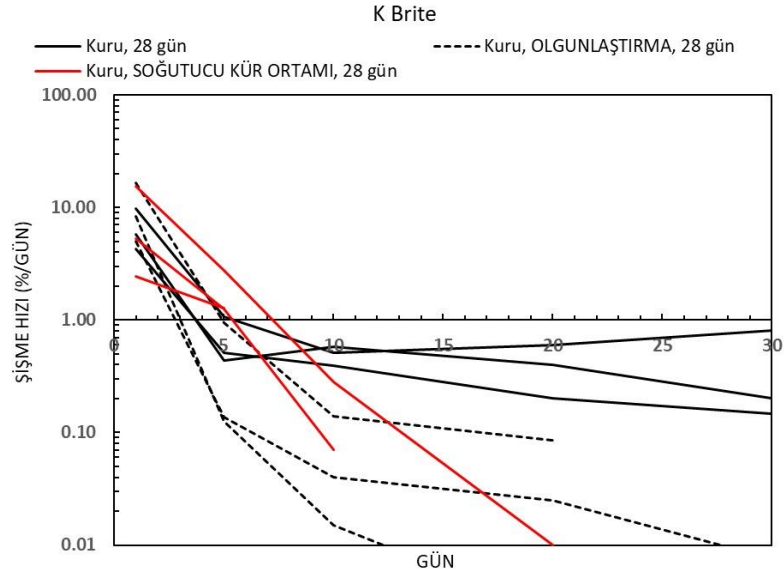
Şekil 4.46 (devam): K-Brite için soğutucu ortam kürü etkisi.



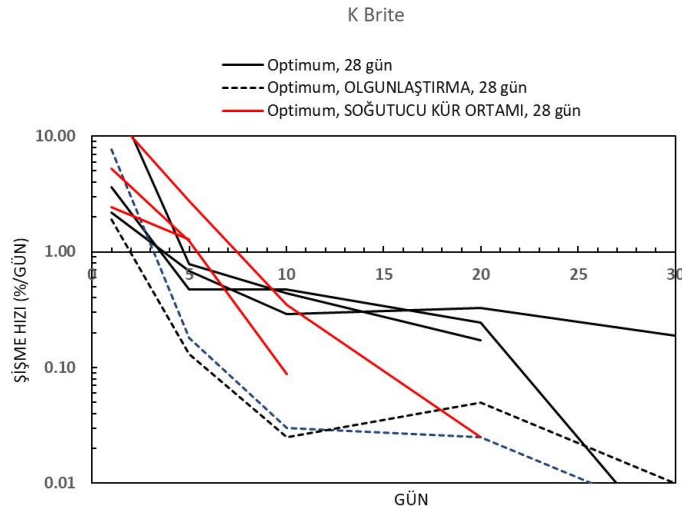
Şekil 4.47: K-Brite kili için “soğutucu ortam kürüne göre şişme puanı” değişimi.

4.5.2.4.K-Brite kili için tüm etkenlerin bir arada değerlendirilmesi

K-Brite kili için normal kür, olgunlaştırma sonrası ve soğutucu ortam kürü sonrası oluşan şişme hızları Şekil 4.48’de gösterilmektedir. Normal kür ve soğutucu kür sonunda oluşan şişme hızlarının benzer mertebelerde olduğu, ancak olgunlaştırma sonucunda elde edilen şişme hızlarının ise Chinafill kilinde olduğu gibi daha düşük olduğu görülmektedir.

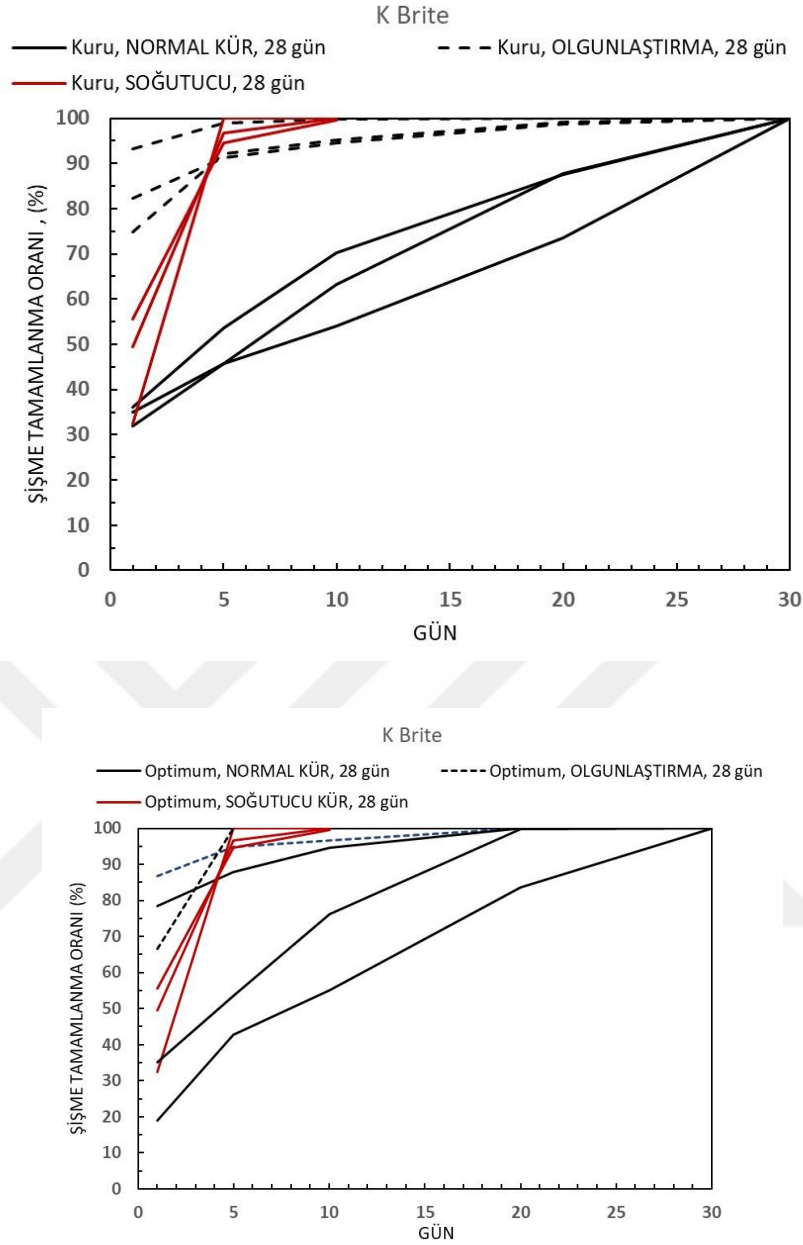


Şekil 4.48: K-Brite kili için kuru tarafta sıkıştırılan numuneler için şişme hızlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.49: K-Brite kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler için şişme hızlarının karşılaştırılması.

Chinafill kili için olduğu gibi bu kil için de “**Şişme Tamamlanma Oranları, ŞTO**” değerlendirilmiştir. ŞTO değerleri, her üç durum için farklılaşmaktadır. Normal kür ortamına maruz bırakılan numunelerde şişme uzun sürede oluşmuş, soğutucu kür ortamında ise daha kısa sürede oluşmuştur. Soğutucu ve olgunlaştırma sonucunda benzer şişme yüzdeleri oluşmakla birlikte, olgunlaştırma sürecinin sonunda suya maruz kalındığında, birinci gün sonunda çok yüksek ŞTO oranlarına ulaşıldığı görülmektedir. Yani sıkıştırmadan önce yapılan olgunlaştırma süresi, suya maruz kalındığında oluşan şişmeleri hızlandırmaktadır.

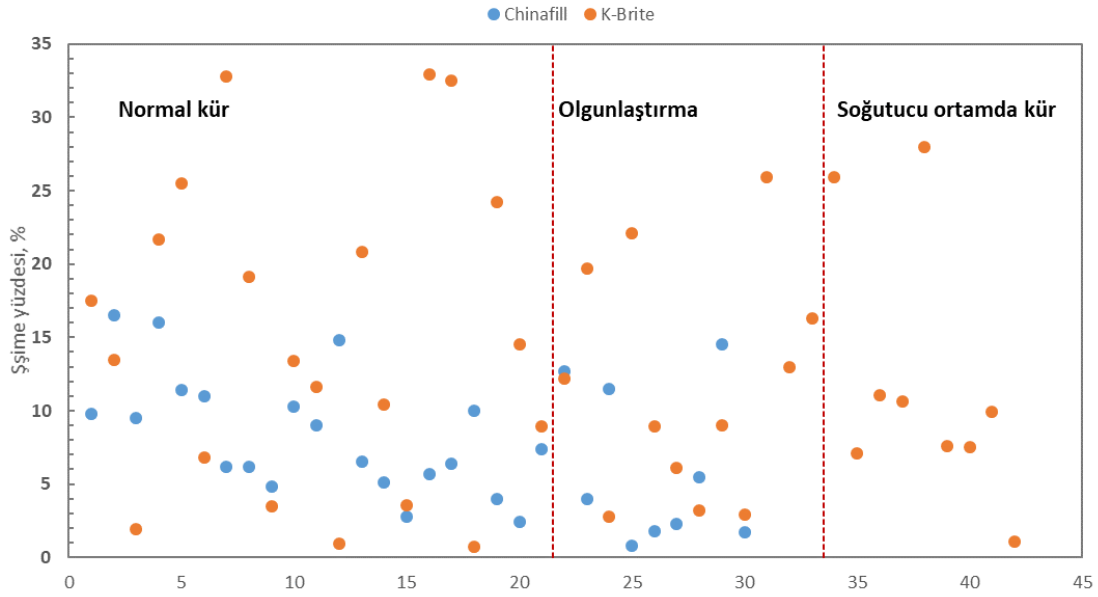


Şekil 4.50: Kuru ve optimumda sıkıştırılan K-Brite numuneleri için şişme hızlarının karşılaştırılması.

4.5.3. Her İki Kil için Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması

Bu bölümde her iki kil için elde edilen değerler bir arada gösterilmektedir. Değerler oldukça dağınık olmakla birlikte, K-Brite ile daha yüksek şişme değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Tüm deneylerde elde edilen değerlerin yol üstyapısı için kritik değer olan %3'ün üzerinde olduğu görülmektedir. Sadece bazı durumlarda daha düşük şişme değerleri ölçülmüştür. Esasen K-Brite kilinin daha ince daneli olması, yüzey alanının daha yüksek olması ve bir miktar da

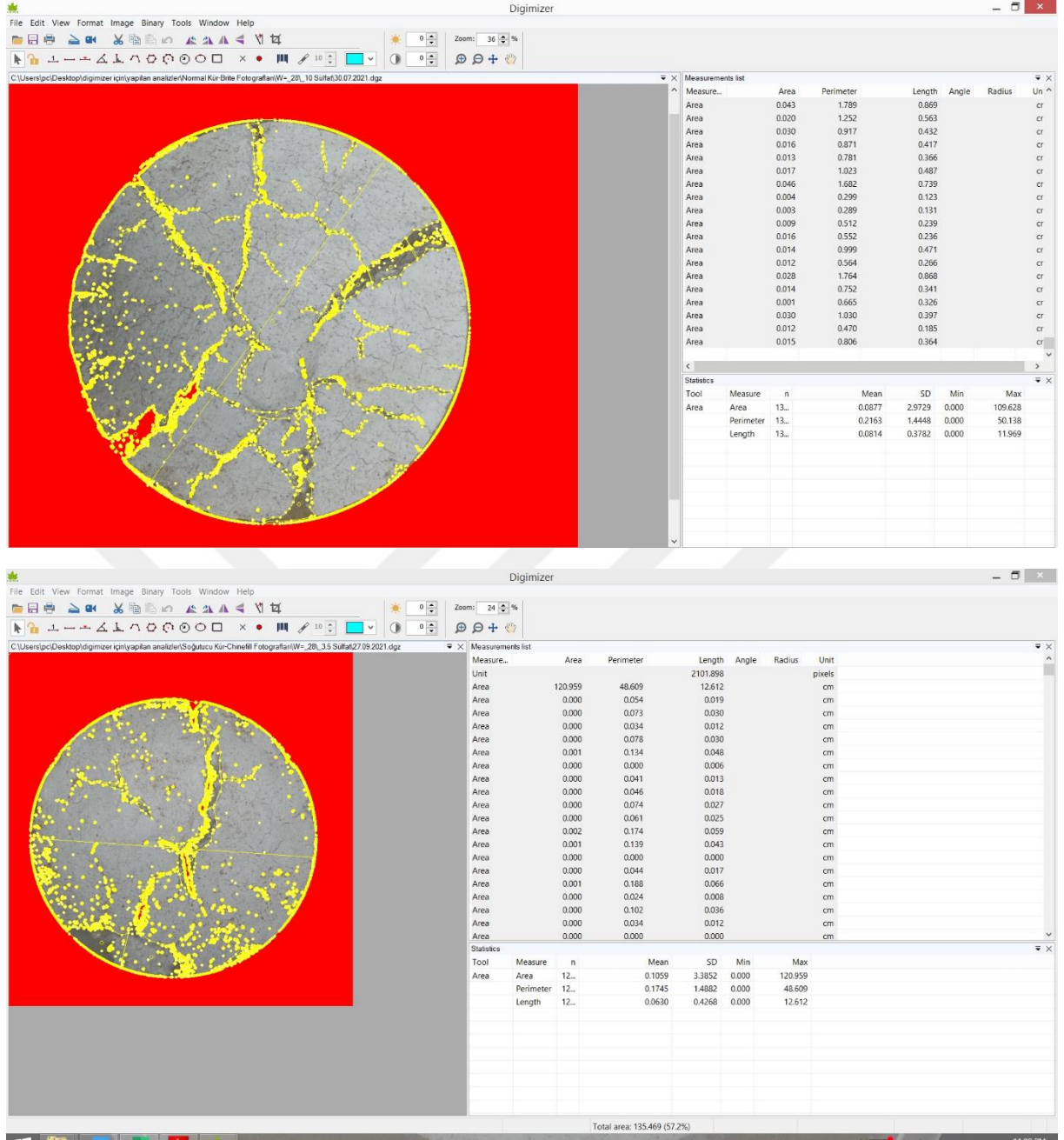
olsa daha yüksek alimünyum oksit içermesi nedeniyle daha yüksek miktarda etrinjit oluşumu olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 4.51: Chinafill ve K-Brite killeri için konsolidasyon deney aletinde ölçülen şişme değerlerinin karşılaştırılması.

4.6. SERBEST ŞİŞME DENEYLERİNİN SONUÇLARI

Bu bölümde büyük numunelerde elde edilen şişme davranışına ait değerler ve görüntü analizleri verilmektedir. Büyük numuneler üzerinde yapılan serbest şişme deneylerinde düşeyde, yatayda oluşan deplasmanlar günlük bazda ölçülmüş, ayrıca çatlak oluşumu fotoğraflanmıştır. Değerlendirmeler düşeyde şişme, yatayda şişme ve hacimsel değişim üzerinden hesaplanmıştır. Hacimsel şişme yüzdeleri orijinal hacme göre hesaplanmıştır. Ayrıca çekilen fotoğraflardaki çatlak oluşumu sayısal olarak değerlendirilmiştir. Örnek çatlak görüntüleri ve yapılan ölçümler Şekil 4.52’de verilmektedir.

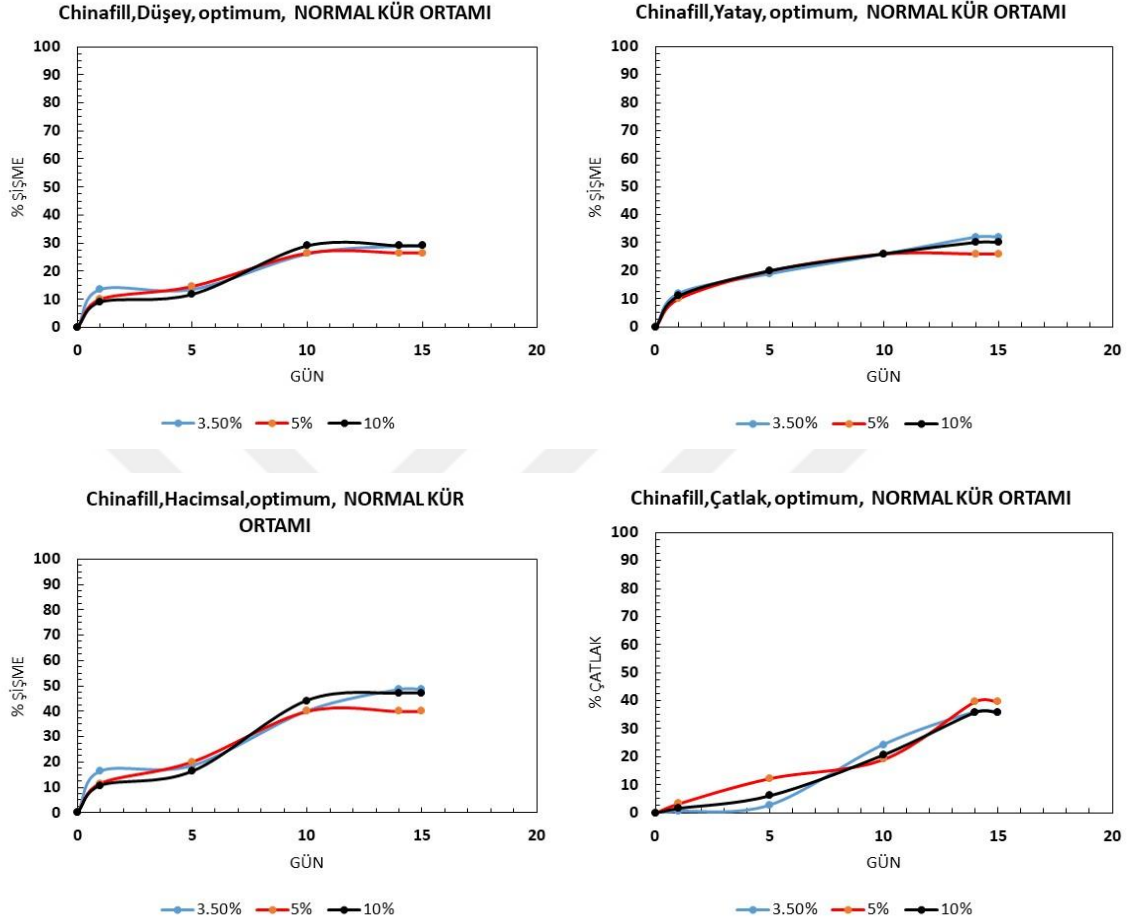


Şekil 4.52: Bazı numuneler için görüntü analiz sonuçları.

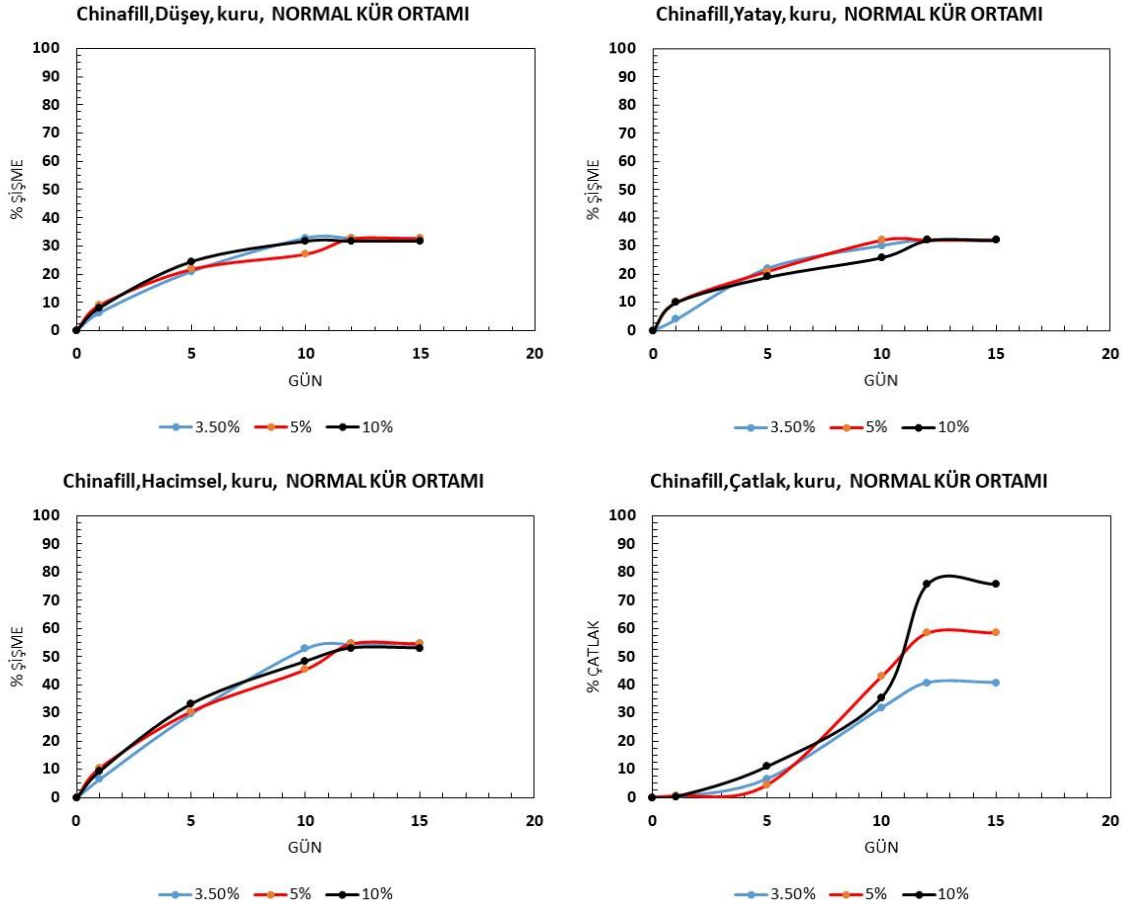
4.6.1. Chinafill ile Yapılan Serbest Şişme Deneylerinin Sonuçları

Bu grupta test edilen üç farklı grup için elde edilen değerler bu bölümde 4.53 ila 4.58 arasında sunulmaktadır. Bu gruplardan birincisi normal kür ortamında kür edilen, ancak üç farklı su muhtevasında sıkıştırılan numunelerdir. İkincisi laboratuvar dışında küre tabii tutulan ve soğuk kür olarak adlandırılan numunelerdir. Üçüncü grup ise soğutucu dolapta küre tabii tutulan numunelerdir. Her numune için, düşeyde, yatayda şişmenin ve hacimsel değişimin zaman

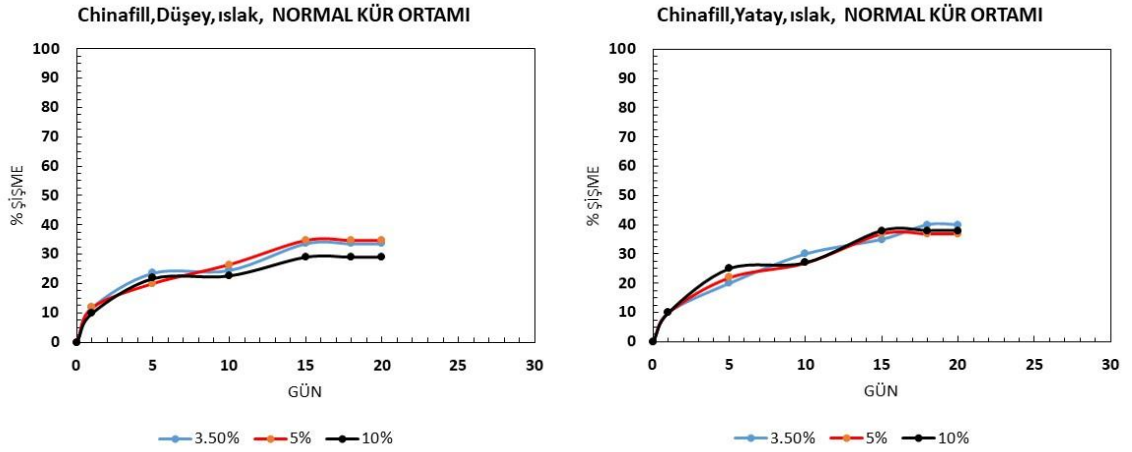
boyunca gelişimi ve ilave olarak çatlak yüzdesinin zamanla değişimi hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi genellikle farklı jips içerikleri için düşeyde ve yatayda farklı ölçüm alınmamıştır. Ancak çatlak yüzdelerindeki değerlendirmelerde ve hacimsel olarak farklılıklar ölçülmüştür.



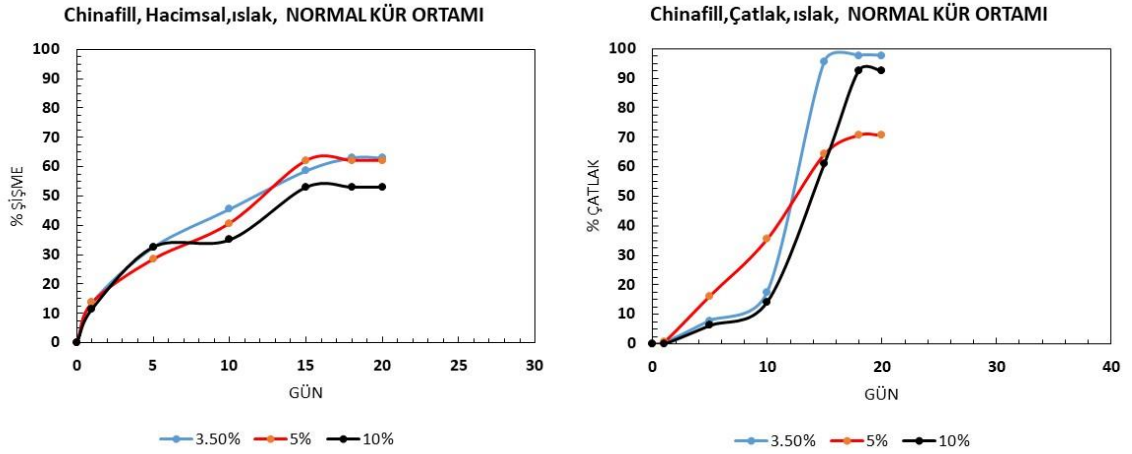
Şekil 4.53: Chinafill kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.



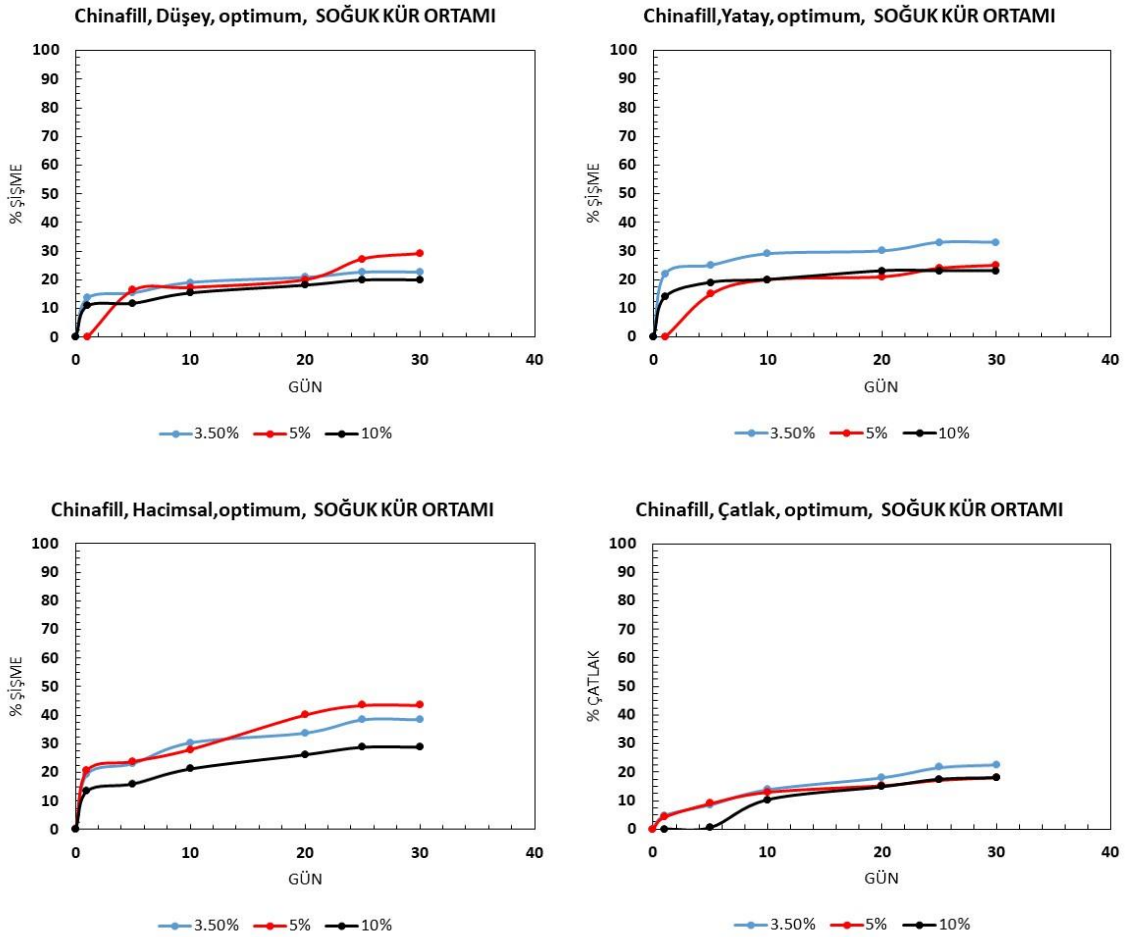
Şekil 4.54: Chinafill kili için kuru su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.



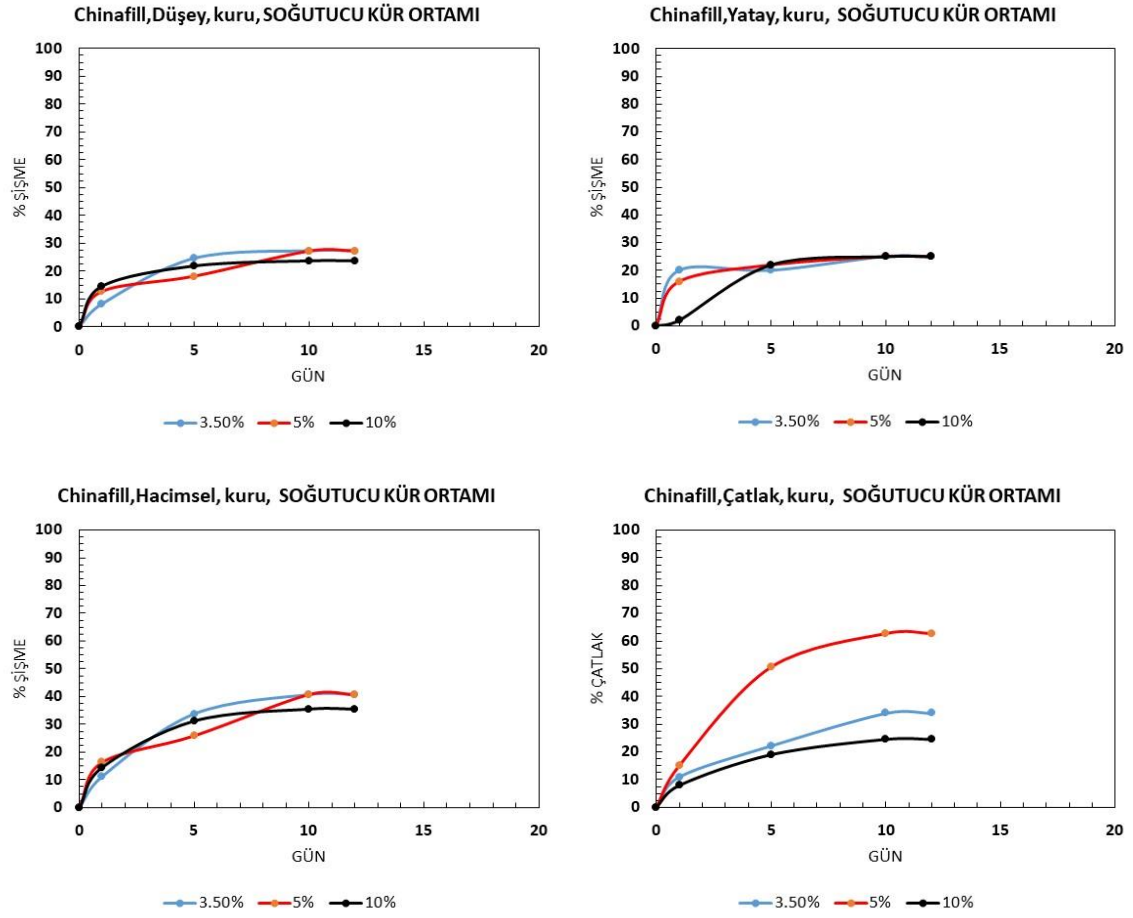
Şekil 4.55: Chinafill kili için ıslak su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.



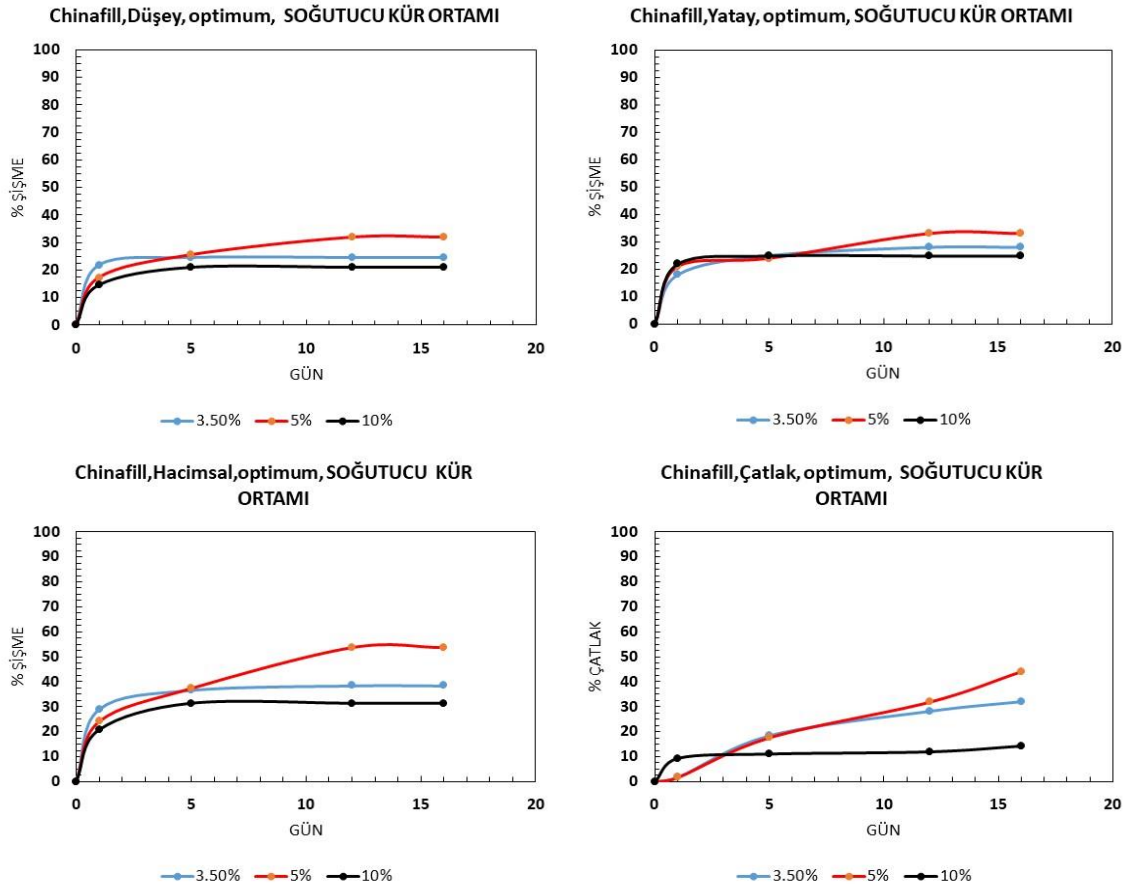
Şekil 4.55(devam): Chinafill kili için ıslak su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.



Şekil 4.56: Chinafill kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan ve dışarıda yapılan soğuk kür ortamında kalan numunelerde yapılan ölçümler.

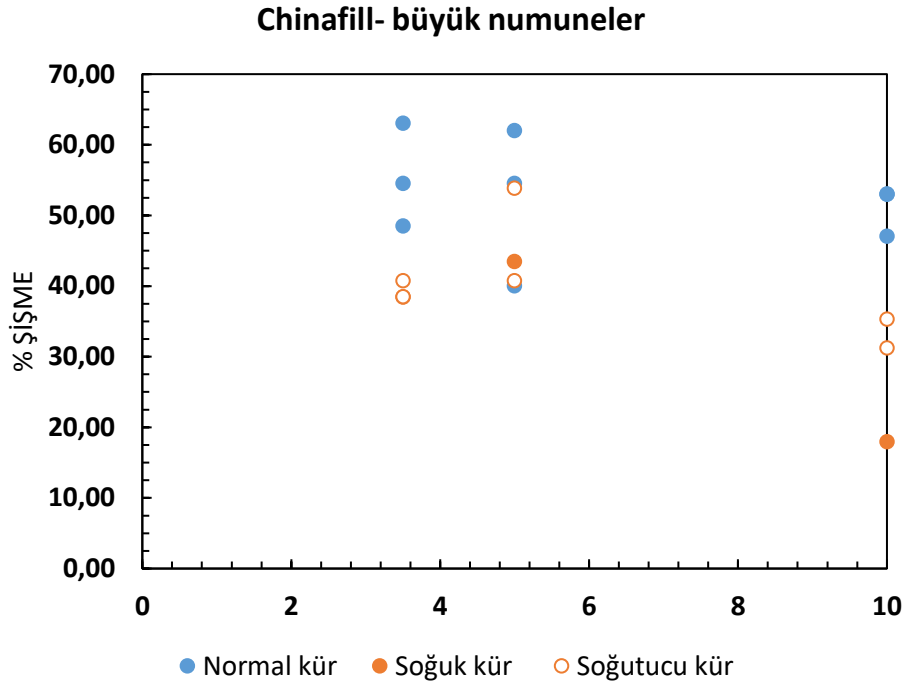


Şekil 4.57: Chinafill kili için kuru su muhtevasında sıkıştırılan ve soğutucu kür ortamından kalan numunelerde yapılan ölçümler.



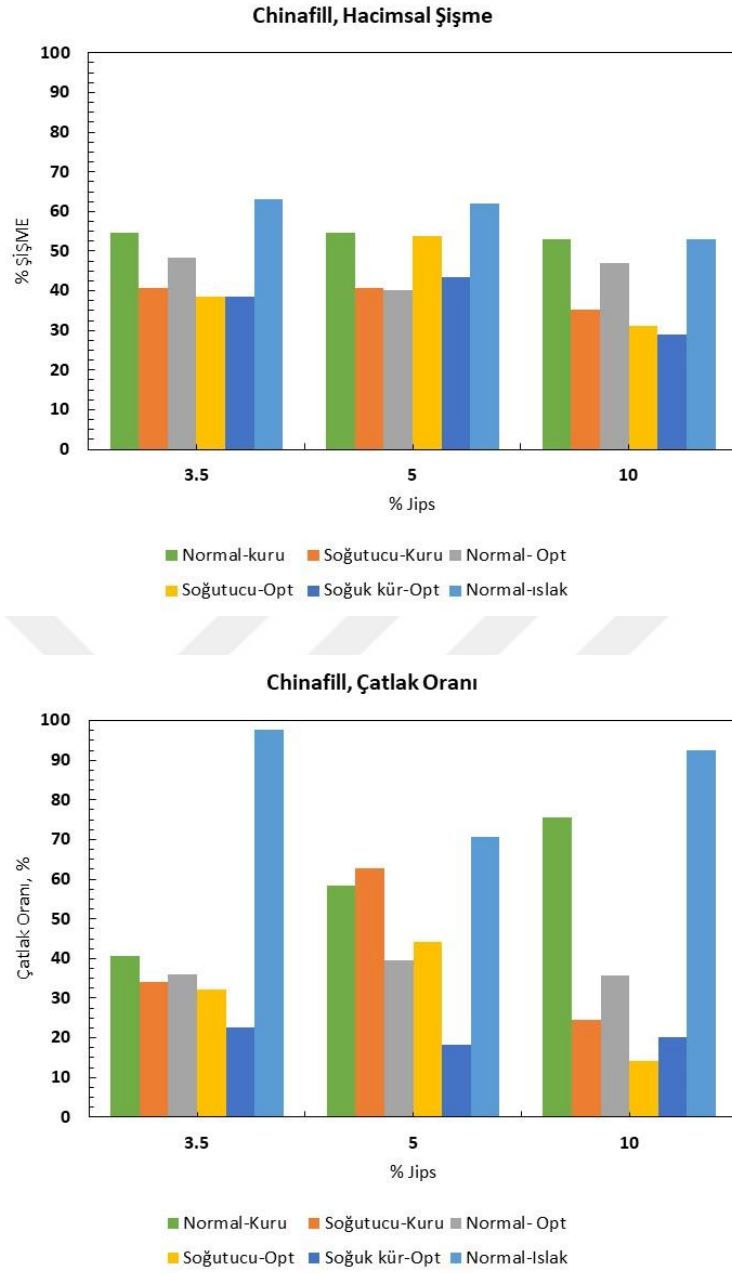
Şekil 4.58: Chinafill kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan soğutucu kür ortamında kalan numunelerde yapılan ölçümler.

Şekil 4.59’da elde edilen nihai değerler karşılaştırılmaktadır. Görüldüğü gibi, Chinafill kili ile hazırlanan numunelerde normal kür sonunda elde edilen değerler, dışarıda (soğuk kür) ve soğutucuda yapılan kür sonuçlarına göre daha yüksektir. Daha soğuk ortamlarda yapılan kür sonucunda şişme değerlerinde azalma olmuş olmakla birlikte, şişme değerleri halen çok yüksektir. Bu nedenle soğuk iklimlerde yapılan imalatlarda da etrinjit nedeniyle şişme riski bertaraf edilmemektedir.



Şekil 4.59: Chinafill kili için büyük numunelerde ölçülen şişme değerleri.

Şekli 4.60'ta görüldüğü gibi, serbest şişme numunelerinde, jips yüzdesine, ya da sıkıştırma su muhtevasına göre hacimsal şişme değerlerinde farklı bir sonuç elde edilememektedir. Tüm numunelerde, benzer olacak şekilde yüksek değerler ölçülmüştür. Islak sıkıştırmada elde edilen yüksek değerler küçük numunedeki davranış ile farklılaşmıştır. Islak numunelerde mukavemetin daha düşük olabileceği ve bu nedenle yapının serbest ortamda daha kolay bozulduğu mümkün olabilecek nedenlerden birisidir.

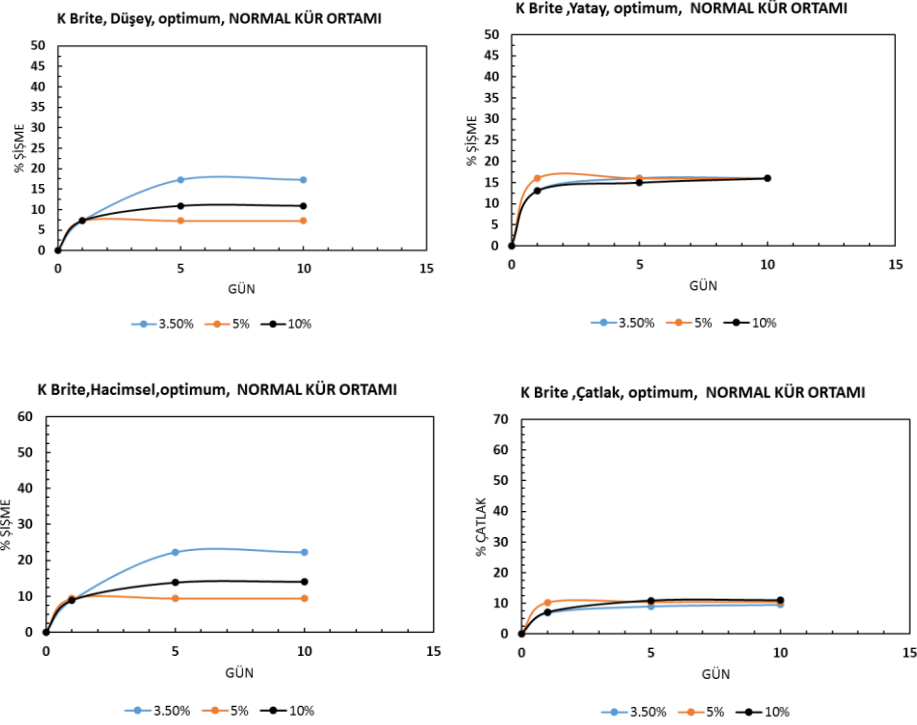


Şekil 4.60: Chinafill kili için farklı jips yüzdeleri için hacimsal şişme ve çatlak oranı değerlerinin karşılaştırılması.

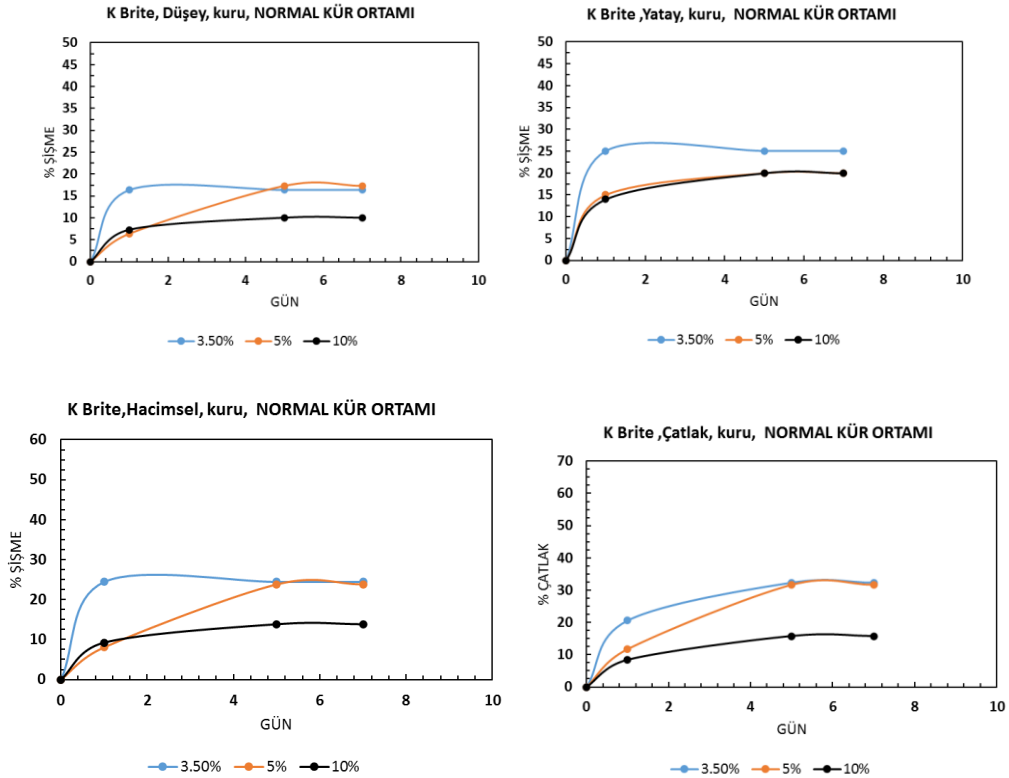
4.6.2. K-Brite ile Yapılan Serbest Şişme Deneylerinin Detaylı Değerlendirmesi

Bu bölümde K-Brite kilinde farklı su muhtevalarında hazırlanan ve farklı kür süreçlerine maruz kalan numunelerde ölçülen değerler sunulmaktadır. Gerek normal kür şartları altında gerekse dışarıda ve soğutucuda yapılan kür süreçleri sonunda yüksek şişme değerlerine ulaşılmıştır. Ancak kürde 2 yıl kadar bekletilen numunelerde, diğerlerine nazaran daha düşük şişme değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerin %15 ve altına inmiş olması, çok uzun süre ile suya maruz kalmayan numunelerde, şişme davranışının daha az etkili olacağını göstermektedir.

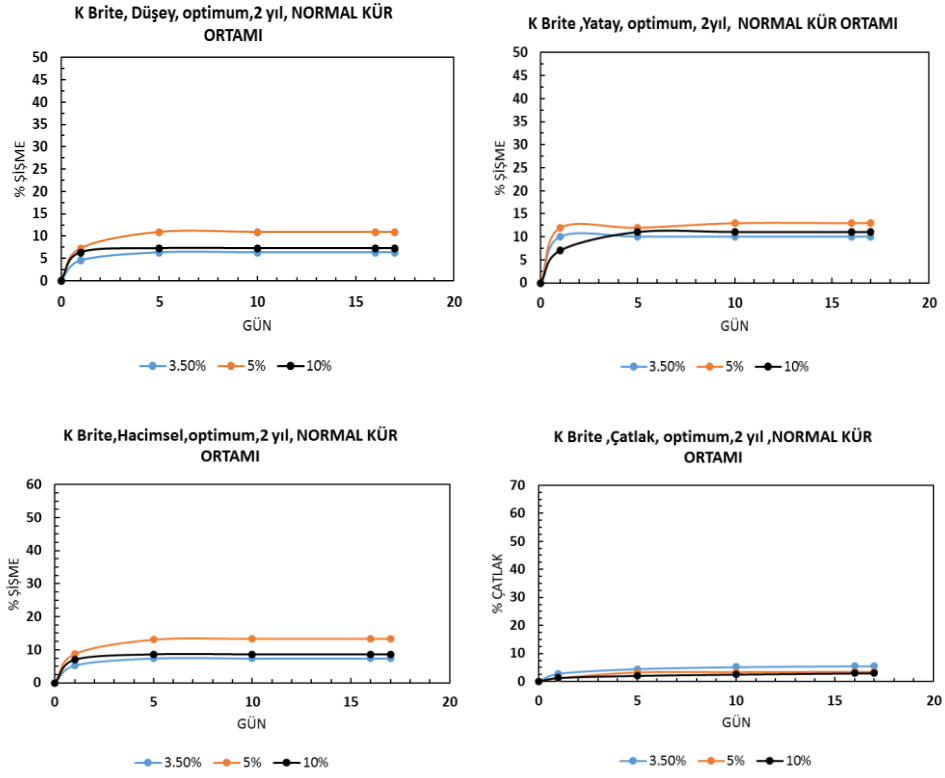
Ancak bu değerler dahi halen çok yüksektir. Soğuk kür ve soğutucu kür sonucunda elde edilen numunelerde şişme daha yüksek bulunmuştur.



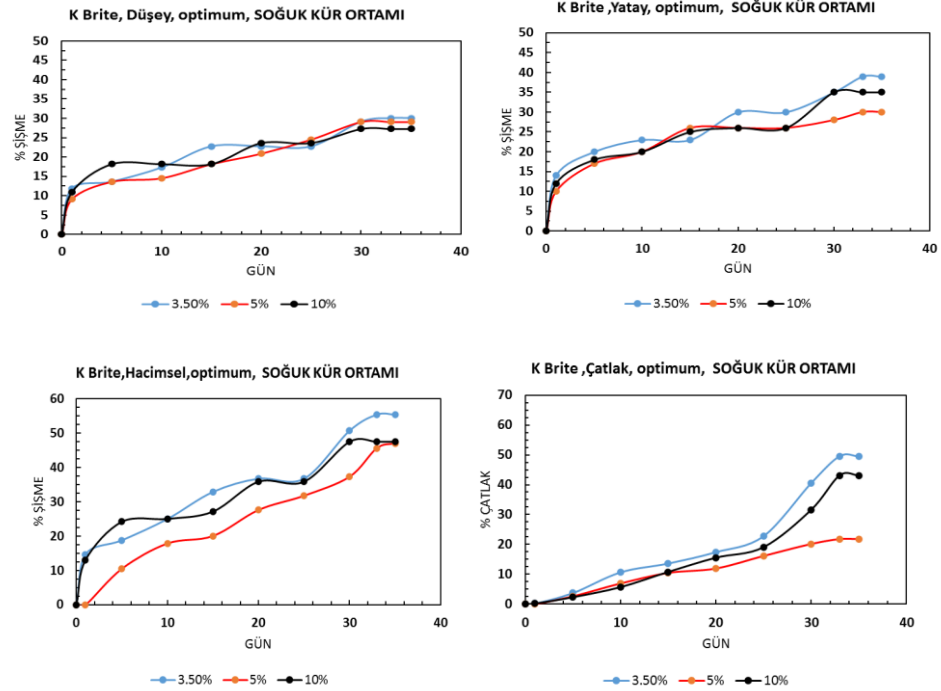
Şekil 4.61: K-Brite kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.



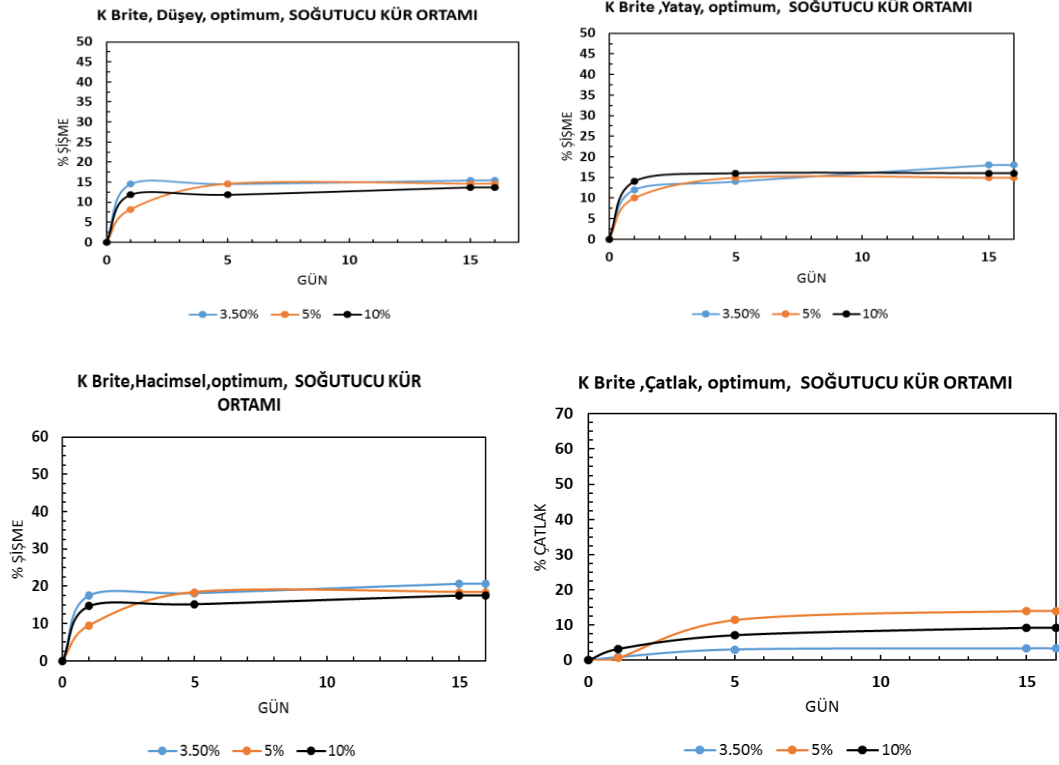
Şekil 4.62: K-Brite kili için kuru su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde yapılan ölçümler.



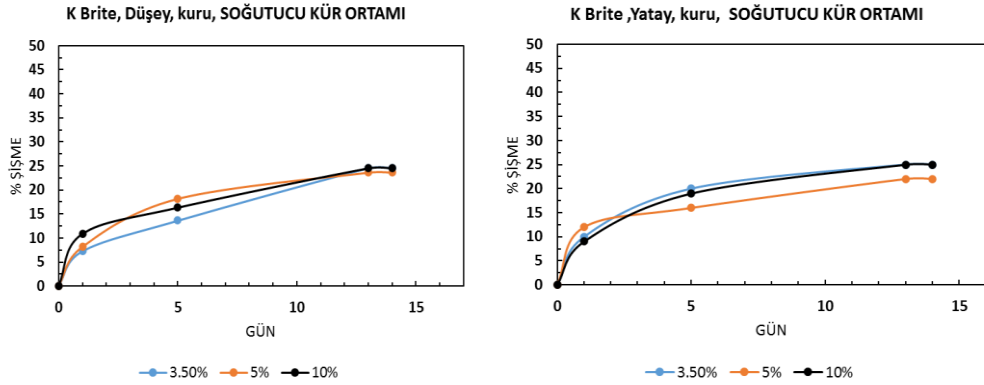
Şekil 4.63: K-Brite kili için optimum muhtevasında sıkıştırılan ve 2 yıl süre ile küre maruz kalan numunelerde yapılan ölçümler.



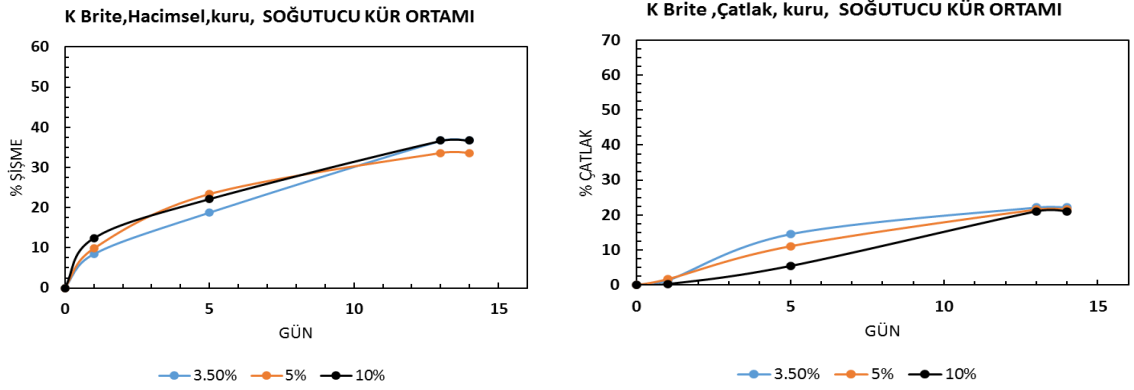
Şekil 4.64: K-Brite kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan ve soğuk kür ortamına maruz kalan numunelerde yapılan ölçümler.



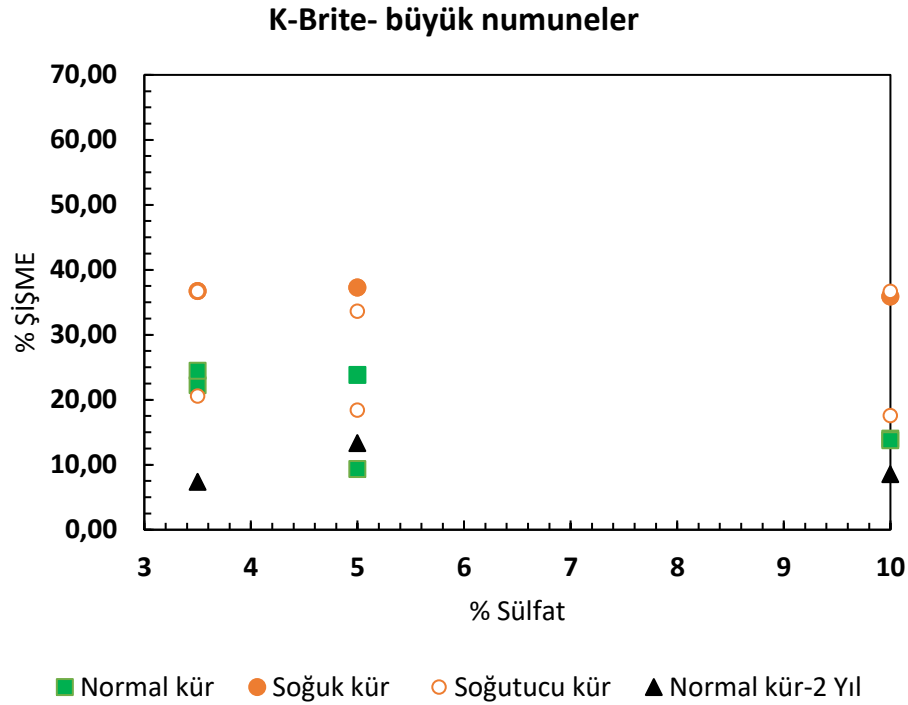
Şekil 4.65: K-Brite kili için optimum su muhtevasında sıkıştırılan ve dışarıda soğuk kür ortamına maruz kalan numunelerde yapılan ölçümler.



Şekil 4.66: K-Brite kili için kuru su muhtevasında sıkıştırılan ve dışarıda yapılan soğuk kür ortamına maruz kalan numunelerde yapılan ölçümler.



Şekil 4.66(devam): K-Brite kili için kuru su muhtevasında sıkıştırılan ve dışarıda yapılan soğuk kür ortamına maruz kalan numunelerde yapılan ölçümler.

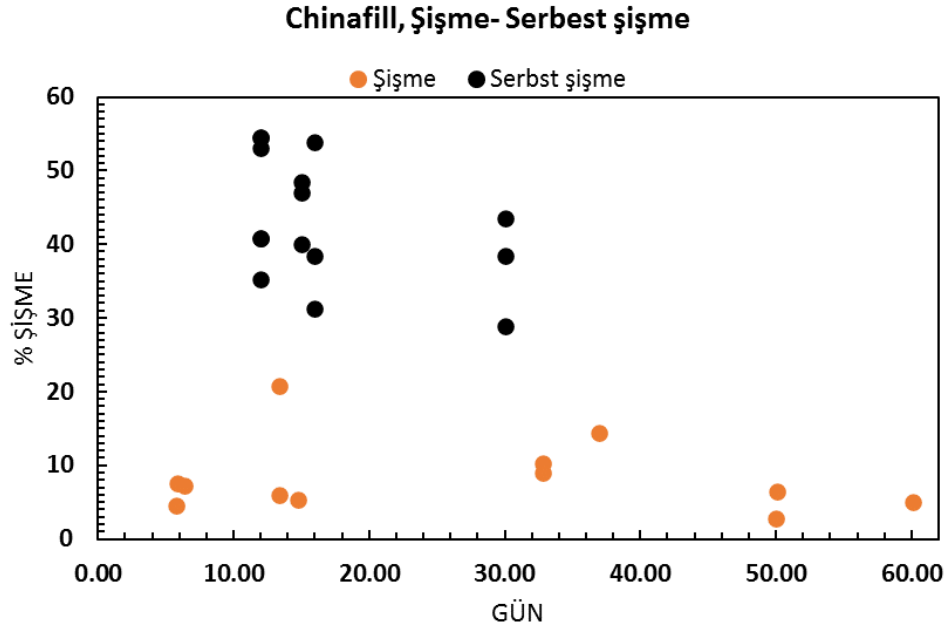


Şekil 4.67: K-Brite kili için büyük numunelerde ölçülen serbest şişme deney sonuçları.

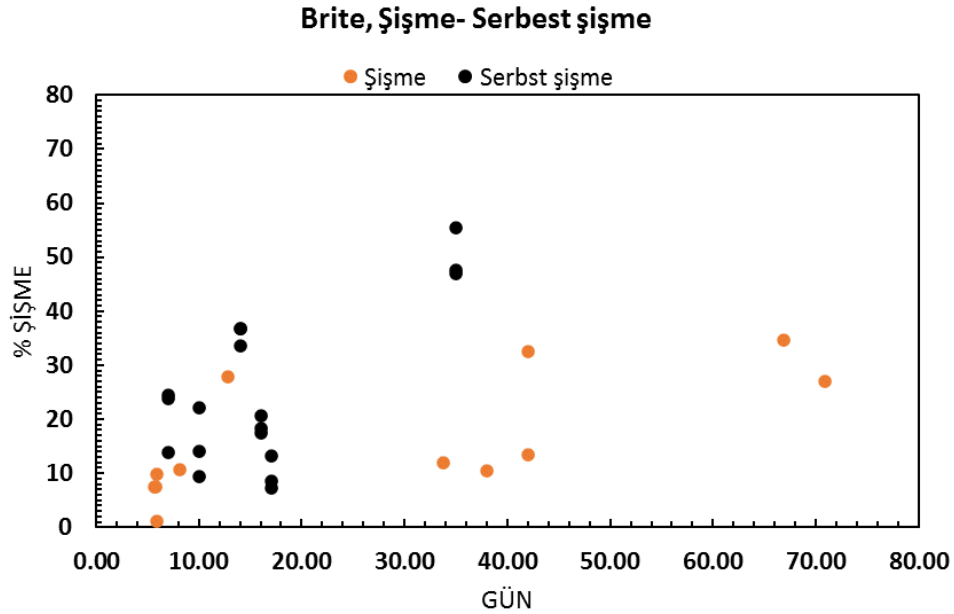
4.7. BÜYÜK VE KÜÇÜK NUMUNELERDE ELDE EDİLEN DEĞERLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Büyük numunelerde ölçülen değerler, küçük numunelerde görülen bazı farklılıkların büyük numunelerde görülemediğini göstermektedir. Her iki yöntemde de ölçülen değerler bakımından her iki deney yöntemi açısından sonuçlarda büyük değişiklikler görülmüştür. Şekil 4.68 ve Şekil 4.69'da görüldüğü gibi büyük numunelerde düşey şişme değerleri Chinafill kili için %30

ila %55 arasında, K-Brite kili için %10 ila %50 arasında oluşmaktadır. Bu değerler konsolidasyon numunelerinde ölçülen değerlerden yüksektir.



Şekil 4.68: Chinafill kili için sonuçların karşılaştırılması.



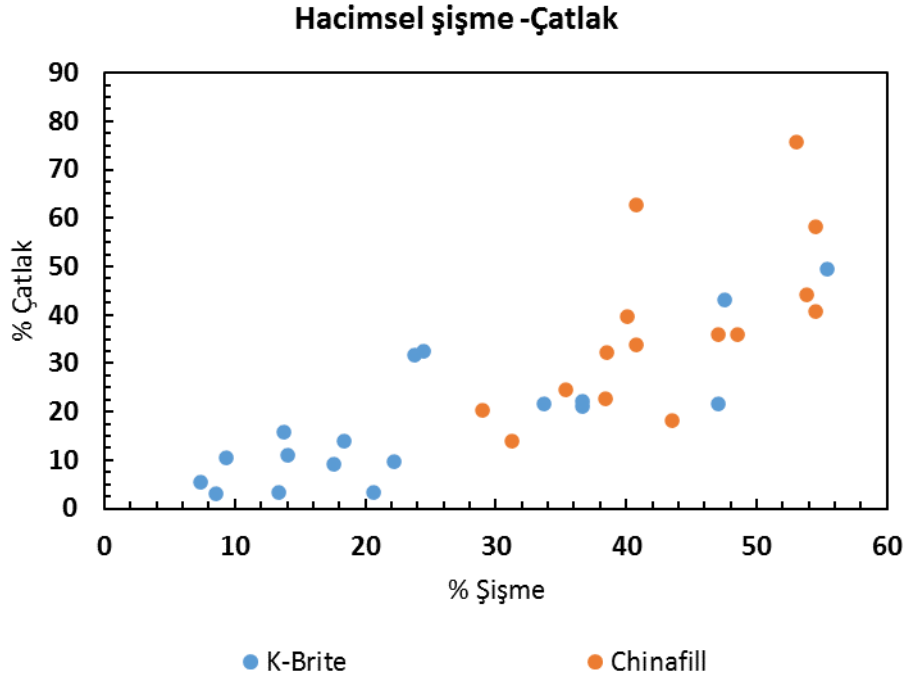
Şekil 4.69: K-Brite kili için sonuçların karşılaştırması.

Her iki deneyin gerek yöntem gerekse elde edilen benzerlikler ve farklılıklar bakımından değerlendirilmesi aşağıda şu şekilde yapılmaktadır;

- Büyük ve küçük numunelerde su ilave edildiği andan itibaren şişme oluşmaya başlamıştır.
- Serbest şişme numunelerinin suya temas ettiği alan, konsolidasyon aletine göre daha fazladır.
- Konsolidasyon şişme numunelerinde poroz taşı kullanılmaktadır ve poroz taşı suyun hızı yavaşlatır ve filtre gibi çalışır. Yani suyun akımı yavaştır. Reaksiyonlar da daha yavaş oluşur. Buna dayanarak suyun akımı yavaş ve kısıtlı olursa şişme oranları azalacağı söylenebilir.
- Numune suya temas ettiği an hemen şişme oluştuğu için, suyun numuneye girdiği ne kadar hızlıysa o kadar hızlı şişme olacaktır, bu yüzden serbest şişme numunelerinde daha fazla şişme görülmektedir. Bu deneyler oluşabilecek maksimum şişme miktarına işaret etmektedir ve en kötü senaryodur.
- Genel olarak, deneyin sonunda serbest şişme numunesinin su muhtevası 100% yakındır ama konsolidasyon şişme numunelerinde en fazla %40 su muhtevasına ulaşmıştır. Şişme numunelerinde, şişen numuneler yumuşak bir yapıya sahiptir. Konsolidasyon numunelerinde ise sıkıştırılma durumuna daha yakındır ve daha serttir.
- Serbest şişme numunelerinde reaksiyon hızlı olduğu ve ölçüm çok hassas olmadığı için (%3.5, %5, %10 sülfat) karışımlarında şişme oranlarının birbirine yakın olduğu düşünülmektedir.
- Arazide suyun akımı kısıtlı ise bu durumu şişme numuneleri temsil eder, arazide su akımı serbest ise bu durumu serbest şişme numuneleri temsil eder.
- Büyük numunelerde genel olarak büyük miktarda şişme değerleri deneylerin ilk bir günde olmaktadır.
- Serbest şişme numuneleri deneyin birinci gününde en az 500 ml litre su tüketmektedir. Bu da etrinjit oluşumuna işaret etmektedir, çünkü etrinjitin oluşması için suya ihtiyaç bulunmaktadır.
- Şişme davranışı oluşup oluşmayacağının anlaşılması bakımından serbest şişme ölçümleri daha basittir ve daha kısa sürede nihayetlenebilir. Ancak bu deney düzeneğinde ölçülen değerleri indeks deney olarak değerlendirmek isabetli olacaktır. Esasen arazideki koşullar daha çok konsolidasyon numunelerindeki gibidir, bu nedenle şişme yüzdeleri için küçük numuneler üzerinde konsolidasyon deney aletinde yapılacak deneyler daha doğru sonuç verecektir.

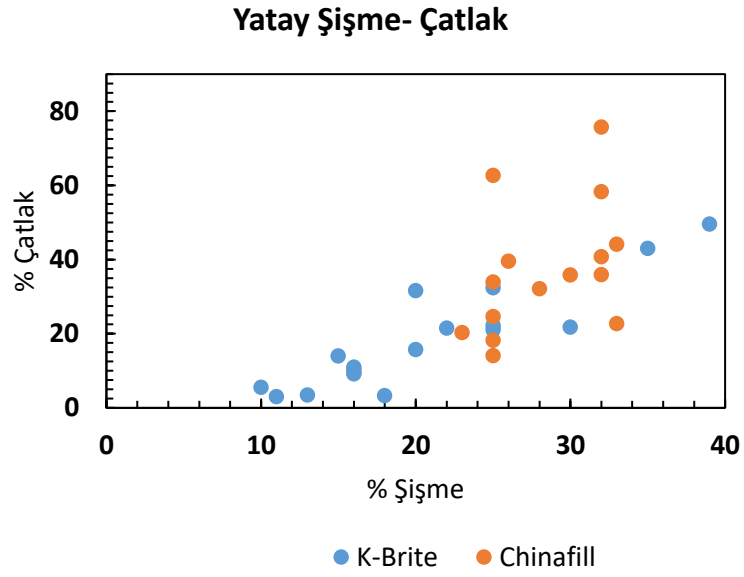
4.8. BÜYÜK NUMUNELER İÇİN HER İKİ KİL BAKIMINDAN YAPILAN DEĞERLENDİRMELER (HACİMSEL ŞİŞME VE ÇATLAK ORANI BAKIMINDAN KARŞILAŞTIRMA)

Her iki kil için büyük numunelerde elde edilen değerler bu bölümde karşılaştırılmaktadır. Şekil 4.70'te görüldüğü gibi, K-Brite numunelerinde, Chinafill numunelerine göre daha düşük hacimsel şişme ve çatlak yüzdeleri görülmektedir. Chinafill numunelerinde benzer hacimsel şişme değerleri, daha yüksek çatlak yüzdeleri ile ilişkilendirilmektedir. K-Brite numunelerinde hacimsel şişme yüzdeleri %10 ila %55 arasında değişmekte olup, çatlak yüzdeleri maksimum %50 seviyesindedir. Chinafill numunelerinde ise, hacimsel şişme değerleri %30 ila %55 arasında değişmektedir. Çatlak %20 ila %80 arasında değişmektedir. Bu durumda, kil mineralojisinin oluşan çatlak yüzdesi ve hacimsel şişme değerleri ile ilişkili olduğu görülmektedir.



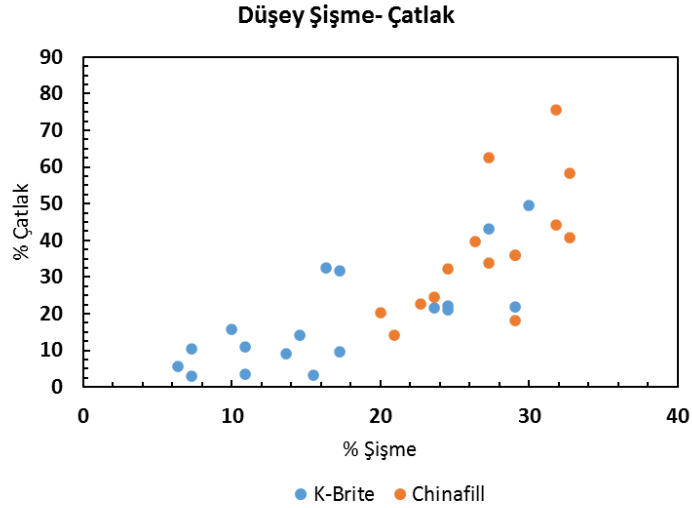
Şekil 4.70: Chinafill ve K-Brite numunelerinin hacimsel şişme ve çatlak oranı bakımından karşılaştırması.

Benzer ilişki yatay yönde şişme ve çatlak yüzdesi bakımından aranmıştır. Şekil 4.71'de görüldüğü gibi, genel olarak K-Brite numunelerinde daha düşük yatay şişme ve çatlak oranları görülmektedir. Chinafill numunelerinde daha yüksek yatay şişme ve çatlak oranları görülmektedir.



Şekil 4.71: Chinafill ve K-Brite kaolin numunelerin yatay şişme ve çatlak oranı bakımından karşılaştırması.

Düşey şişme ve çatlak oranı bakımından karşılaştırma da benzer sonuçlar görülmektedir. Şekil 4.72’de görüldüğü gibi, K-Brite numunelerinde daha düşük düşey şişme ve çatlak oranları görülmektedir. Chinafill numunelerinde daha yüksek hacimsel şişme ve çatlak oranları görülmektedir.



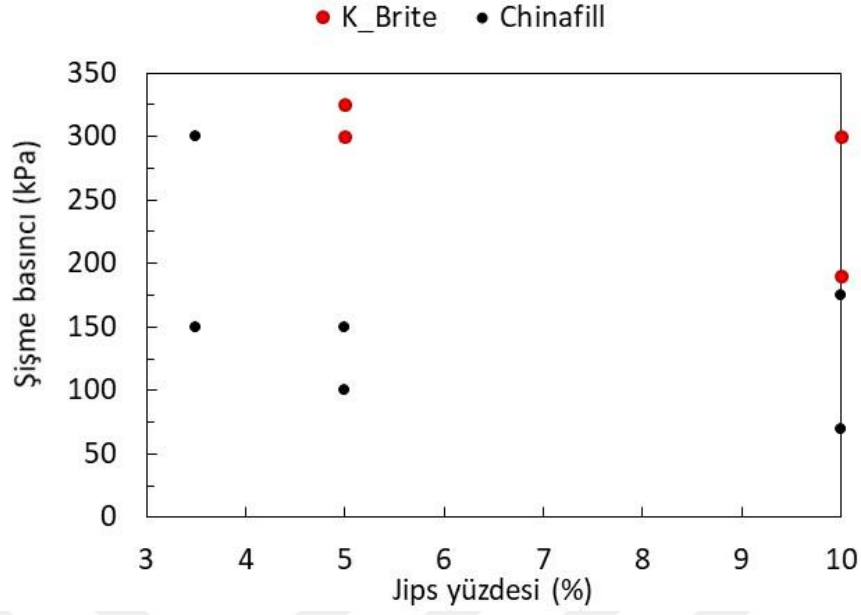
Şekil 4.72: Chinafill ve K-Brite kaolin numunelerin düşey şişme ve çatlak oranı bakımından karşılaştırması.

4.9. ŞİŞME BASINCI DEĞERLERİ

Yüksek seviyelerde oluşan etrinjitin yüksek şişme basıncı değerlerine neden olması beklenir. Bu çalışmada elde edilen şişme basıncı değerleri Tablo 4.3'te görülmektedir. Şekil 4.73'te jips yüzdesi ve şişme basıncı arasındaki ilişki iki farklı kil için görülmektedir. Aynı jips yüzdesi için K-Brite kili ile daha yüksek şişme basıncı değerleri ölçülmektedir. Şişme basınçları farklı kil ve kür süreleri için maksimum 75 kPa ila 325 kPa seviyelerine kadar ulaşmıştır. Bunlar oldukça yüksek şişme basıncı değerleridir. Şişme basıncı değerlerinin genel olarak 150 kPa ila 350 kPa bandında olduğu söylenebilir.

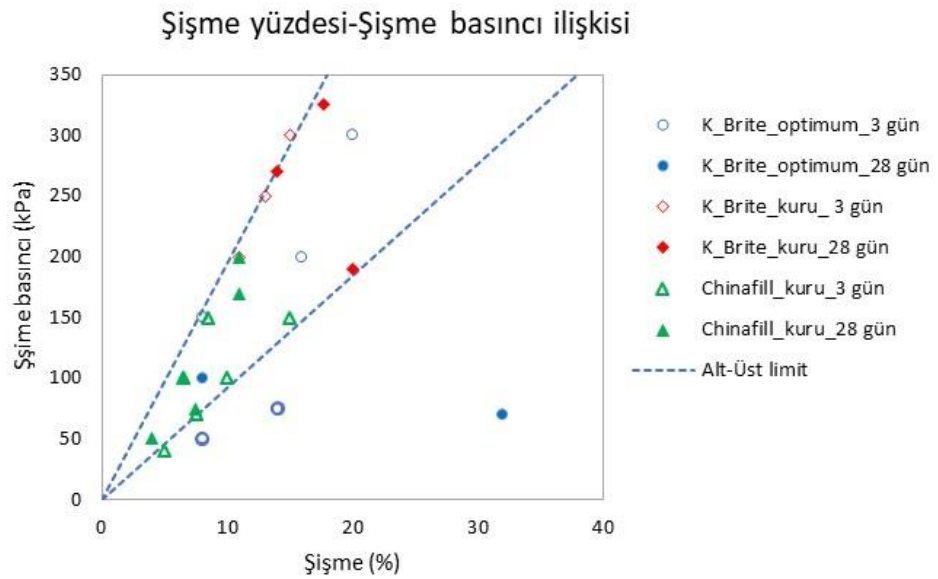
Tablo 4.3: Chinafill ve K-Brite killeri için ölçülen şişme basıncı değerleri (maksimum 20 gün sonunda).

	Sülfat yüzdesi	Su muhtevası	Kür günü	Şişme basıncı
K-brite	5	Optimum	3	285
K-brite	10	Optimum	3	75
K-brite	5	Kuru	3	300
K-brite	10	Kuru	3	300
Chinafill	3.5	Kuru	3	150
Chinafill	5	Kuru	3	150
Chinafill	10	Kuru	3	70
K-brite	5	Optimum	28	100
K-brite	10	Optimum	28	70
K-brite	5	Kuru	28	325
K-brite	10	Kuru	28	190
Chinafill	3.5	Kuru	28	300
Chinafill	5	Kuru	28	100
Chinafill	10	Kuru	28	175



Şekil 4.73: Jips yüzdesi ve şişme basıncı arasındaki ilişki.

İkinci aşamada, şişme yüzdesi-şişme basıncı arasında bir ilişki olup olmadığı aranmıştır. Bu amaçla bu deney sonuçlarının yanı sıra, şişme yüzdesi değerlerinin okunduğu deneyler de kullanılmıştır. Şişme basıncı değerinin eşleniği olarak deneyin bitirildiği güne tekabül eden şişme yüzdesi değeri alınmıştır. Böylelikle sadece son gündeki değerler değil, aradaki değerler de kullanılmıştır. Böylece yaklaşık da olsa bir grafik elde edilmiştir. Bu grafik Şekil 4.71’de verilmektedir.



Şekil 4.74: Şişme yüzdesi ve şişme basıncı arasındaki ilişki.

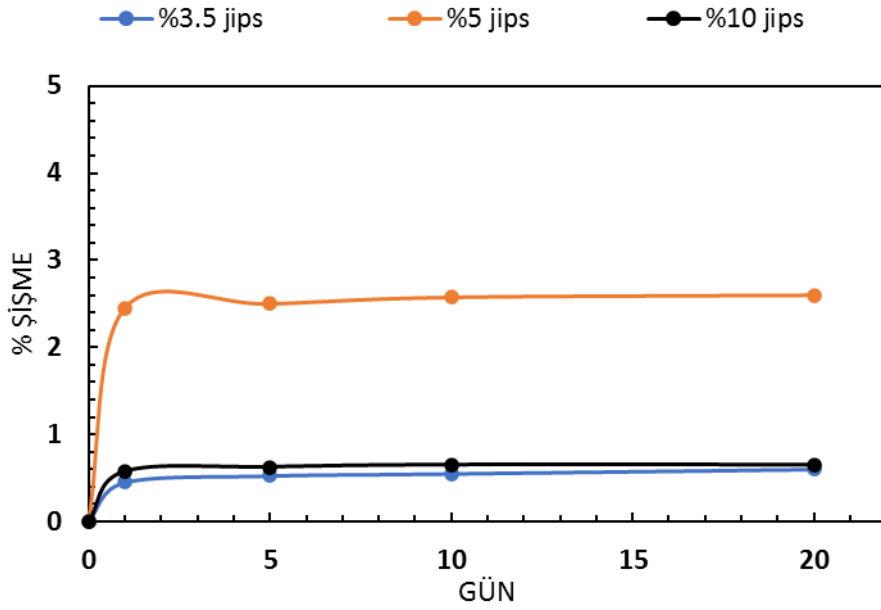
Şekil 4.74'te görüldüğü gibi şişme yüzdesi ve şişme basıncı arasında genel olarak doğrusal bir ilişki olarak görülmektedir. Şişme basıncı değerinin şişme yüzdesinin yaklaşık olarak on katı olarak (kPa) olduğu ifade edilebilir. Chinafill kilinin kullanıldığı numunelerde, şişme yüzdesi ve şişme basıncı, K-Brite kiline göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. 3 gün ve 28 gün kür süreleri sonunda şişme basınçları arasında çok tutarlı bir ilişki görülmemiştir. Bu değerler, şişme basınçlarının oldukça yüksek olduğu, yol üstyapısında mevcut olabilecek gerilmelerin çok üzerinde olduğu ve önlem alınmadığı taktirde çevresindeki yapılarda büyük problemler oluşturacağı görülmektedir.

4.10. ÖNERİLEN YENİ İYİLEŞTİRME YÖNTEMİNİN SONUÇLARI

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda etrinjitin neden olduğu şişme miktarını azaltmak için yeni ve ekonomik bir yöntem önerilmektedir. Bu amaçla, yöntem bölümünde anlatıldığı gibi, sülfat içeren zemin kireç ile karıştırılıp daha sonra su ilavesi yapılmıştır. Su miktarı, optimum değer ıslak tarafında olacak şekilde eklenmiştir. Ancak yol dolgularında ıslak tarafta sıkıştırma yapmak mukavemet ve boşluk yapısı bakımından tercih edilmediği için, karışım optimuma gelene dek kuruması için bekletilmiştir. Olgunlaşma süresi olarak numune üstü kapalı olarak bir gün ve daha sonra bir gün açık olarak bekletilmiştir. Böylece olgunlaştırmanın ve ıslak su muhtevasının etkisi bir arada değerlendirilmiştir. Zemin olarak K-Brite kili kullanılmıştır.

Şekil 4.75'te görüldüğü gibi şişme yüzdelerinde değişkenlik görülmekle birlikte, şişme yüzdelerinin %3'ün altına indiği görülmektedir. Böylelikle aslında oldukça ekonomik bir yöntemle (optimumun ıslak tarafında olacak şekilde su ilavesi ve olgunlaştırma süresi sonunda optimum su muhtevasında sıkıştırma) şişme değerleri azaltılmıştır. Klasik yöntemlerle oluşturulan numunelerde optimum durumda elde edilen değerler %10 ila %30 seviyesinde bulunmuş idi. Uygulanan bu yöntemle, değerler %1 ila %3 arasındaki değerlere düşmüştür. Yani hem optimum tarafta sıkıştırma hedefi var ise bu sağlanmış olmuş, hem de şişme değerlerinde büyük düşüşler olmuştur.

K-Brite, 28 gün, NORMAL KÜR ORTAMI, İYİLEŞTİRME



Şekil 4.75: Önerilen yöntemin şişme değerleri üzerindeki etkisi.

4.11. KİMYASAL ANALİZLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

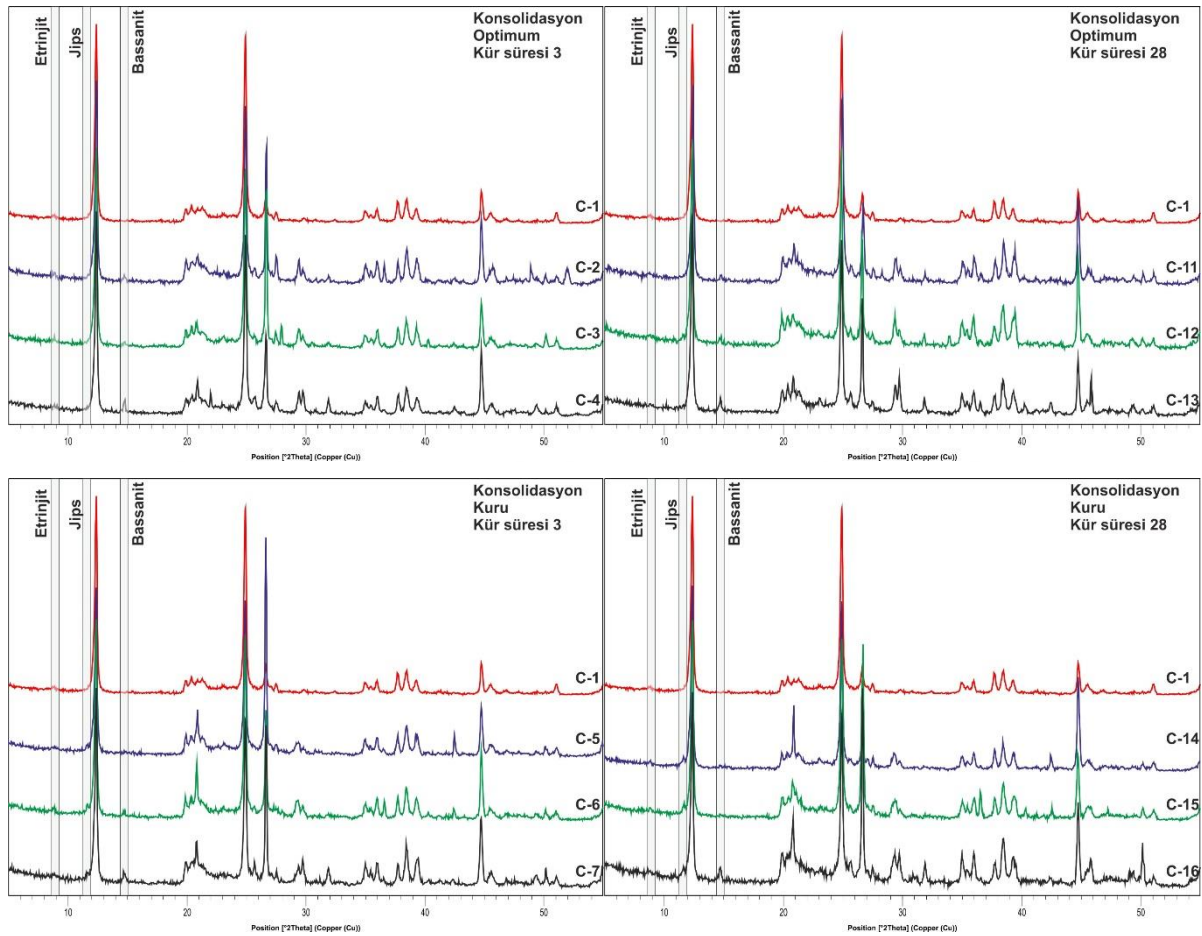
Deneyleri tamamlanan numunelerin bir kısmından numune alınarak Jeoloji Mühendisliği Bölümü Jeokronoloji Bölümü'ne kimyasal analiz için götürülmüştür. Bu laboratuvarında XRD analizleri ve ICP analizleri yapılmıştır. Toplamda 122 adet XRD analizi yapılmıştır.

4.11.1. XRD Analizleri

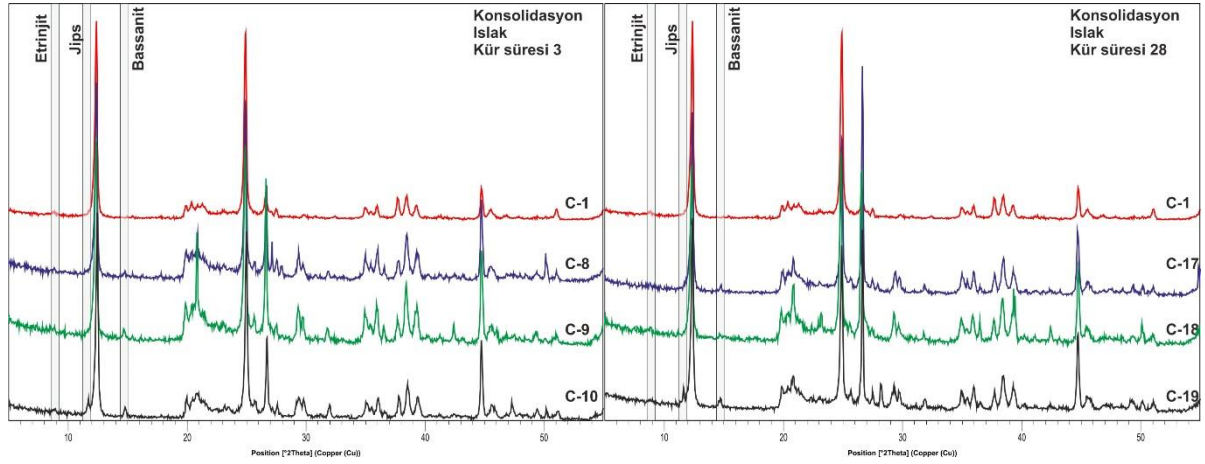
XRD analizleri sonucunda elde edilen XRD sonuçları detaylı olarak Eklerde görülmektedir. XRD analizlerinde asıl olarak etrinjit aranmasına rağmen jips grubu minerallerine de rastlanmıştır. XRD deneyi sonucunda, numunelerde oluşan pikler incelendiğinde, SO_4 'e bağlı olarak farklı mineraller oluşabilir. Bu mineraller,

- Etrinit
- Bassanit
- Jipstir.

Jips, yani alçıtaşı, kalsiyum sülfat dihidrattan oluşan yumuşak bir sülfat mineraldir ve kimyasal formülü $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 'dur. Esasen numune içerisine eklenen sülfatın kaynağı jipstir ve bu nedenle bu hali ile orada olması beklenen bir durumdur. Ancak jipsin içerisine daha çok su alması da görülen bir durumdur bu durumda jipsin de su ile temas ettiğinde nH_2O formuna girerek hacim artışı yapabileceği belirtilmektedir. Bassanit ise yine bir kalsiyum sülfat minerali olup formülü $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 'dur. Bazı numuneler için elde edilmiş olan XRD analizleri Şekil 4.76'da karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. XRD analizlerinde görülen farklı pikler, numunede oluşan mineralleri göstermektedir. Bu çalışmada yapılan analizlerde hem bassanit, hem de asıl aranan mineral olan etrinjite rastlanmıştır.



Şekil 4.76: Karşılaştırmalı XRD sonuçları.



Şekil 4.76 (devam): Karşılaştırmalı XRD sonuçları.

Tablo 4.4: Bu çalışmada yapılan XRD analizi sonuçları.

Numune Tipi	Açıklama	Kalsiyum sülfat(%)	Kür Süresi	Özellik	Kaolinit	İllit	Montmorillonit	Albit (Plajiolklas)	Kalsit	Bassanit	Etringit
Konsolidasyon	%50 Kaolin	3.5			+			+	+	+	+
Konsolidasyon	%25 Kaolin	3.5 Sodyum Sülfat			+	+		+	+	+	+
Serbest basınç- Islak	Montmorillonit	3.5	28	Normal	+				+	+	+
Serbest basınç- Islak	Montmorillonit	1	28	Normal	+			+	+		+
Serbest basınç- Islak	Montmorillonit	3.5	28	Normal	+	+		+	+	+	+
Serbest basınç- Islak	Montmorillonit	1	28	Normal	+	+			+		+
Serbest basınç- Kuru	Montmorillonit	3.5	56	Normal	+			+	+		+
Serbest basınç- Islak	Montmorillonit	3.5	56	Normal	+				+	+	+
Serbest basınç- Islak	Montmorillonit	1	56	Normal	+	+		+	+		+
Serbest basınç- Kuru	Montmorillonit	1	56	Normal	+	+			+		+
Serbest basınç- Kuru	Montmorillonit	1	56	Normal	+	+			+		+
Serbest basınç- Kuru	Montmorillonit	3.5	56	Normal	+				+	+	+
Serbest basınç- Islak	Montmorillonit	3.5	56	Normal	+				+	+	+
Serbest basınç- Islak	Montmorillonit	1	56	Normal	+				+	+	+
Saf numune	ESK-Kaolin				+	+					
Saf numune	Montmorillonit				+	+	+				
Konsolidasyon	%75 Chinefill	3.5	3	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	5	3	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	10	3	Soğutucu	+				+	+	
Konsolidasyon	%75 Chinefill	0	3	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	5	3	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	10	3	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	3.5	28	Soğutucu	+	+			+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	5	28	Soğutucu	BOZUK						
Konsolidasyon	%75 Chinefill	10	28	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	3.5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	10	28	Soğutucu	+				+	+	+

Tablo 4.4 (Devam): Bu çalışmada yapılan XRD analizi sonuçları

Numune Tipi	Açıklama	Kalsiyum sülfat(%)	Kür Süresi	Özellik	Kaolinit	İllit	Montmorillonit	Albit (Plajiolklas)	Kalsit	Bassanit	Etringit
Konsolidasyon	%75 Chinefill	3.5	3	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	5	3	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	10	3	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	3.5	3	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	5	3	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	3.5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	10	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	3.5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	3.5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	10	28	Soğutucu	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	3.5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	5	28	Soğutucu	+	+			+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	10	28	Soğutucu	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	3.5	28	Normal	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	5	28	Normal	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	10	28	Normal	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	3.5	28	Normal	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	5	28	Normal	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	10	28	Normal	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	3.5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	10	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	3.5	28	Olgunlaştırma	+	+			+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	5	28	Olgunlaştırma	+	+			+	+	+
Serbest Şişme	%75 Chinefill	3.5	28	Soğutucu	+	+			+	+	+
Serbest Şişme	%75 Chinefill	5	28	Soğutucu	BOZUK						
Serbest Şişme	%75 Chinefill	10	28	Soğutucu	+				+	+	+
Serbest Şişme	%75 Chinefill	3.5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Serbest Şişme	%75 Chinefill	5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Serbest Şişme	%75 Chinefill	10	28	Soğutucu	+	+			+	+	+
Konsolidasyon	%75 Chinefill	10	3	Olgunlaştırma	BOZUK						
Konsolidasyon	%75 Chinefill	10	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece kür	%75 Chinefill	10	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	3.5	3	Soğutucu	+			+	+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	5	3	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	10	3	Soğutucu	+	+			+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	3.5	3	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	5	3	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	10	3	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	3.5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	10	28	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	3.5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	10	28	Soğutucu	+				+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	3.5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	5	28	Soğutucu	+	+			+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	10	28	Soğutucu	+				+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	3.5	28	Soğutucu	+	+			+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	5	28	Soğutucu	BOZUK						

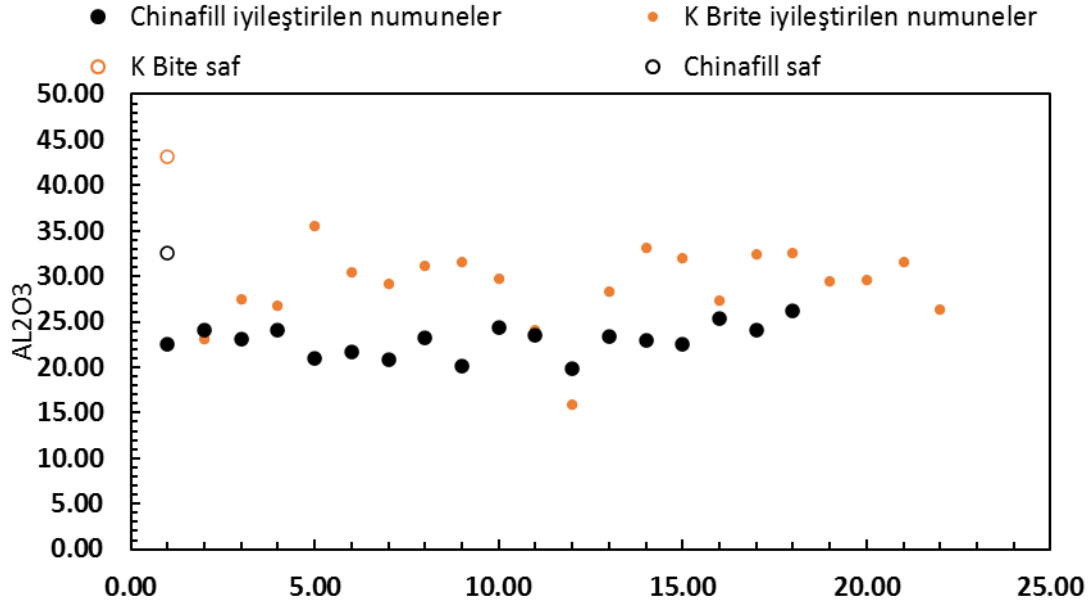
Tablo 4.4 (Devam): Bu çalışmada yapılan XRD analizi sonuçları

Numune Tipi	Açıklama	Kalsiyum sülfat(%)	Kür Süresi	Özellik	Kaolinit	İllit	Montmorillonit	Albit (Plajiolklas)	Kalsit	Bassanit	Etringit
Sadece Kür	%75 K-Brite	10	28	Soğutucu	+	+			+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	3.5	28	Normal	BOZUK						
Sadece Kür	%75 K-Brite	5	28	Normal	+	+			+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	10	28	Normal	+	+			+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	3.5	28	Normal	+	+			+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	5	28	Normal	+				+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	10	28	Normal	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	10	28	Normal	+	+			+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	3.5	28	Soğutucu	+	+			+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	10	28	Soğutucu	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	3.5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	5	28	Soğutucu	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	10	28	Soğutucu	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	3.5	28	Normal	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	5	28	Normal	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	10	28	Normal	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	3.5	28	Normal	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	5	28	Normal	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	10	28	Normal	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	3.5	2 Sene	Normal	+				+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	5	2 Sene	Normal	+	+			+	+	+
Serbest şişme	%75 K-Brite	10	2 Sene	Normal	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	3.5	3	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	3.5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	5	3	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	10	3	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	10	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	3.5	3	Olgunlaştırma	BOZUK						
Konsolidasyon	%75 K-Brite	3.5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	5	3	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	10	3	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Konsolidasyon	%75 K-Brite	10	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	3.5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	10	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	3.5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	5	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+
Sadece Kür	%75 K-Brite	10	28	Olgunlaştırma	+				+	+	+

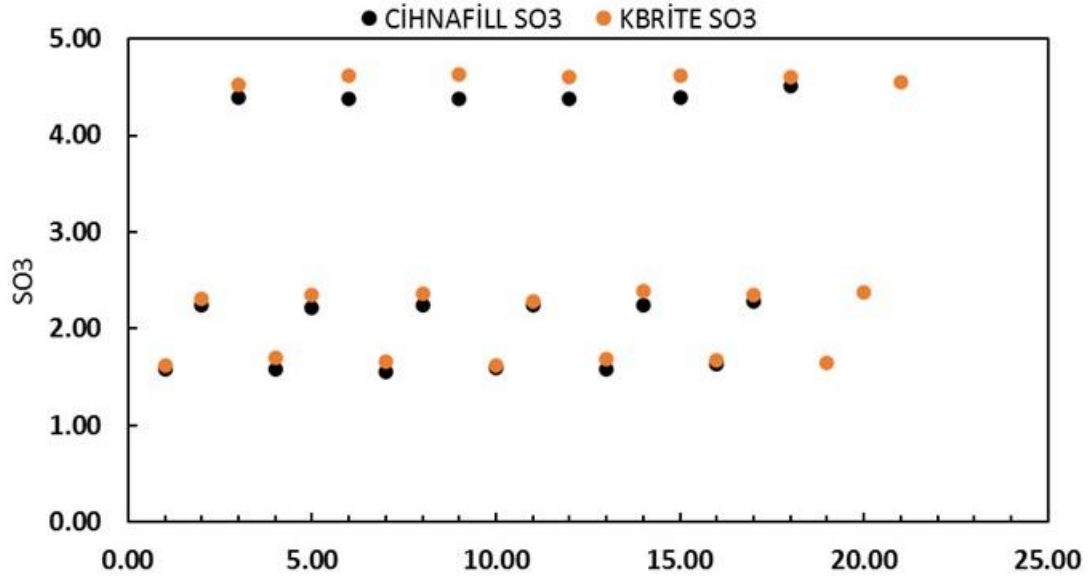
4.11.2. ICP Analizleri

Bu çalışmada ICP deneylerinin yapılmak istenmesinin sebebi oluşan etrinjit miktarlarını hesaplayabilmektir, ancak ICP analizlerinin sayısı yeterli olmadığı için bu mümkün olamamıştır. Ölçülen değerler, Eklerde verilmiştir. ICP analizlerinden elde edilen temel bilgiler bu bölümde değerlendirilmektedir. K-Brite kilinde ICP sonuçları hem saf hem de iyileştirilmiş

numunelerde daha yüksek Al_2O_3 değerleri göstermektedir. Bu değerler, numune için firma tarafından verilen değerler ile uyumludur. İyileştirme sonrasında alüminyum oksit değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir. SO_3 miktarları da Şekil 4.78’de gösterilmektedir.



Şekil 4.77: Her iki kildeki Al_2O_3 değerleri.

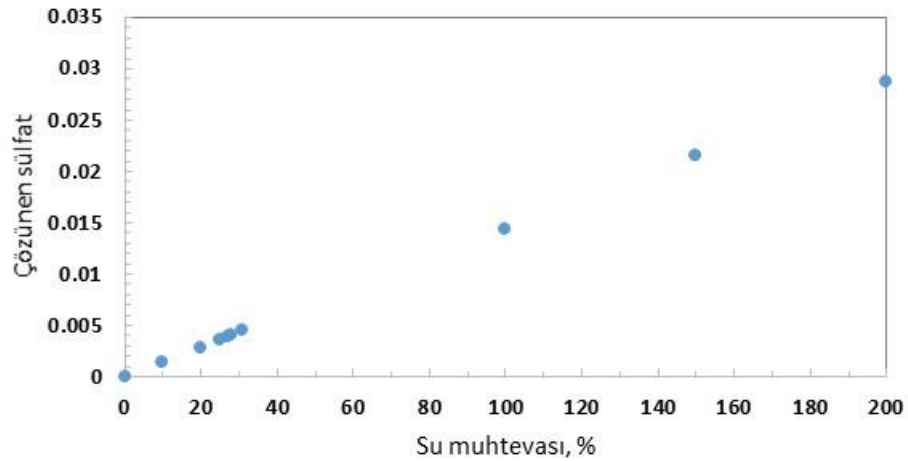


Şekil 4.78: Her iki kildeki SO_3 değerleri.

Şekil 4.77’de görüldüğü gibi K-Brite kilinde daha yüksek miktarda alüminyum oksit bulunmaktadır. SO_3 bakımından ise her iki kildeki değerler yakındır. Etrinit oluşumu için gerekli olan çözünmüş alüminyum tek başına yeterli değildir. Çözünen sülfat miktarının da

yeterli seviyede olması gereklidir. Ortamdaki su miktarı arttıkça çözünen sülfat miktarı da artmaktadır. Şekil 4.79’da görüldüğü gibi, sıkıştırma su muhtevası seviyelerinde (%20-%40) çok miktarda sülfatın çözünmesi mümkün görünmemektedir. Bu nedenle, etrinjit sıkıştırılmadan hemen sadece sıkıştırma su muhtevası ile oluşmaz, bunun için dışarıdan su girişine ihtiyaç vardır. Yüksek su muhtevalarında çözünen sülfat değeri önemli miktarda artmaktadır. Optimumun ıslak tarafında sıkıştırma durumunda da, kuru taraftaki sıkıştırmaya göre biraz daha fazla su ortamdadır, bu nedenle bir miktar daha fazla etrinjit oluşması mümkün olabilmektedir. Bu nedenle ıslak sıkıştırma ile daha sonra su ile temasta şişme seviyeleri daha düşük olmaktadır. Diğer bir faktör de boşluk oranı değerleridir. Islak tarafta sıkıştırmada biraz daha yüksek boşluk oranlarının oluştuğu bilinmektedir. Daha büyük boşluk oranları, oluşan etrinjitin matrise zarar vermesini engelleyebilir. Olgunlaştırma süresi uygulandığında ise etrinjitin olgunlaştırma sürecinde oluşması ve sıkıştırıldıktan sonra oluşarak kabarmasının engellenmesi sağlanabilmektedir.

Çözünen sülfat-su muhtevası ilişkisi



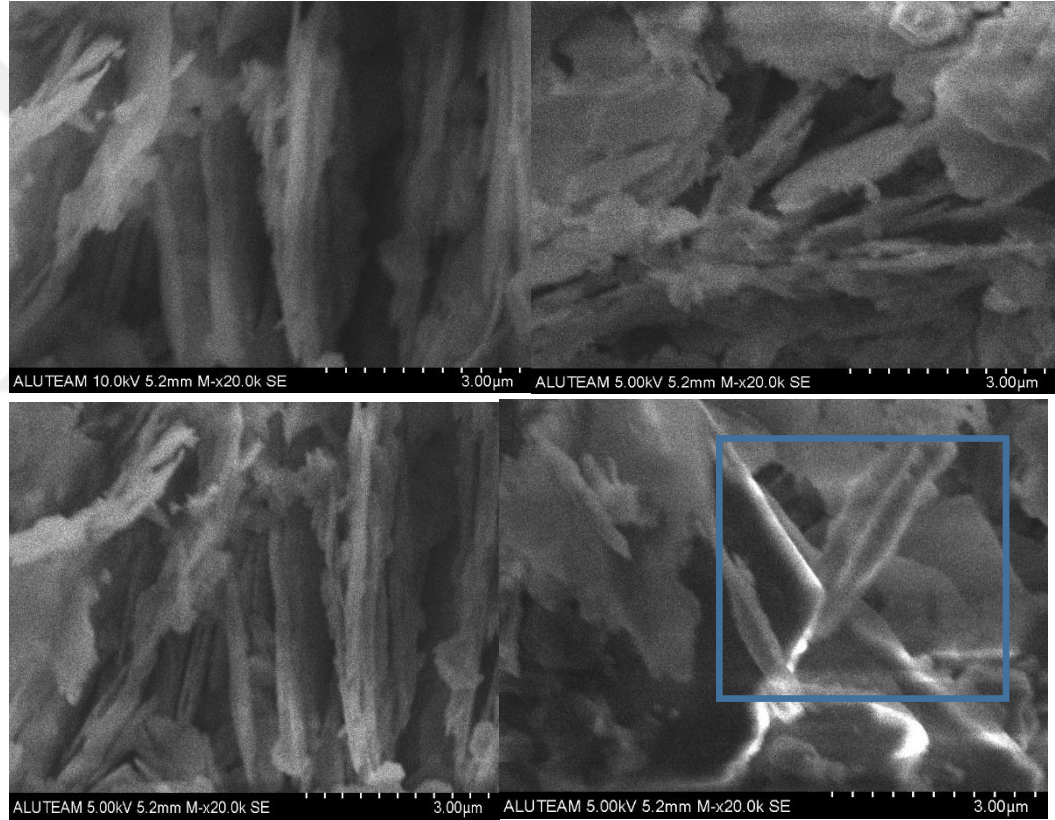
Şekil 4.79: Çözünen sülfat-su muhtevası ilişkisi.

Bu tez boyunca farklı killere yapılan deneyler, alüminyum yüzdesinin etrinjit oluşumunda çok önemli olduğunu göstermiştir. Montmorillonit kilinin Al_2O_3 yüzdesi %2 seviyelerinde olup, kabarmaya neden olan etrinjit oluşumu olmamıştır. Kum içeriği olmayan yani su girişinin çok zor olduğu saf montmorillonit numunelerde ise hiçbir şişme davranışı görülmemiştir. Benzer davranış yine ilk deneylerde kullanılan kaolin killlerinde de görülmüştür. %100 kaolin içeren numunelerde, Alüminyum oranı %20’dir ve şişme oluşmamıştır. Kum içeriği nedeniyle su girişinin mümkün olduğu numunelerde ise bir miktar şişme görülmüştür. Diğer taraftan kum içeriği olan Chinafill numunelerinde yüksek şişme değerleri görülmektedir. En yüksek Al

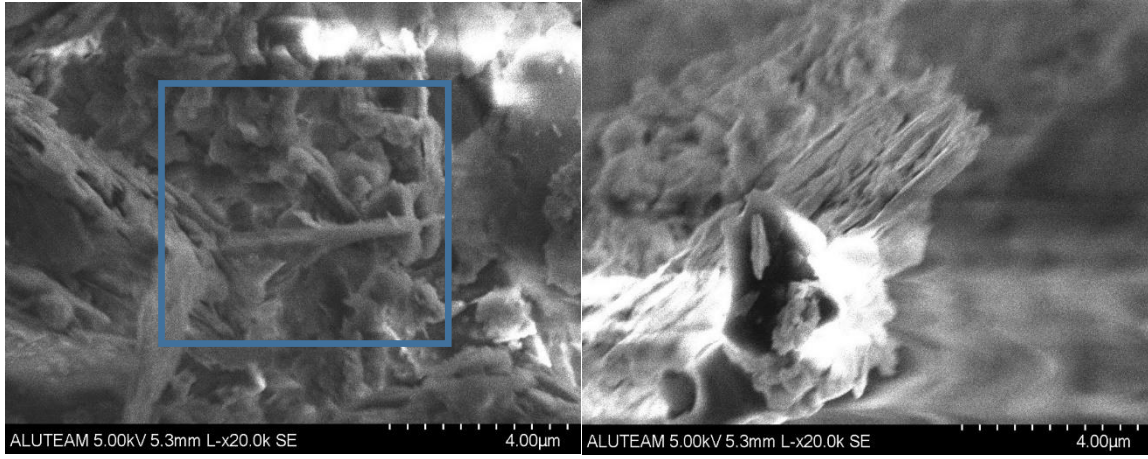
değerlerine sahip olan K-Brite kilinde, etrinji oluşumuna bağlı yüksek şişme değerlerine ulaşıldığını göstermektedir. Böylece hem alüminyum içeriğinin, hem de su girişi için önemli olan permeabilite değerinin etrinjit oluşum için çok önemli olduğu bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda görülmüştür.

4.11.3. SEM Sonuçları

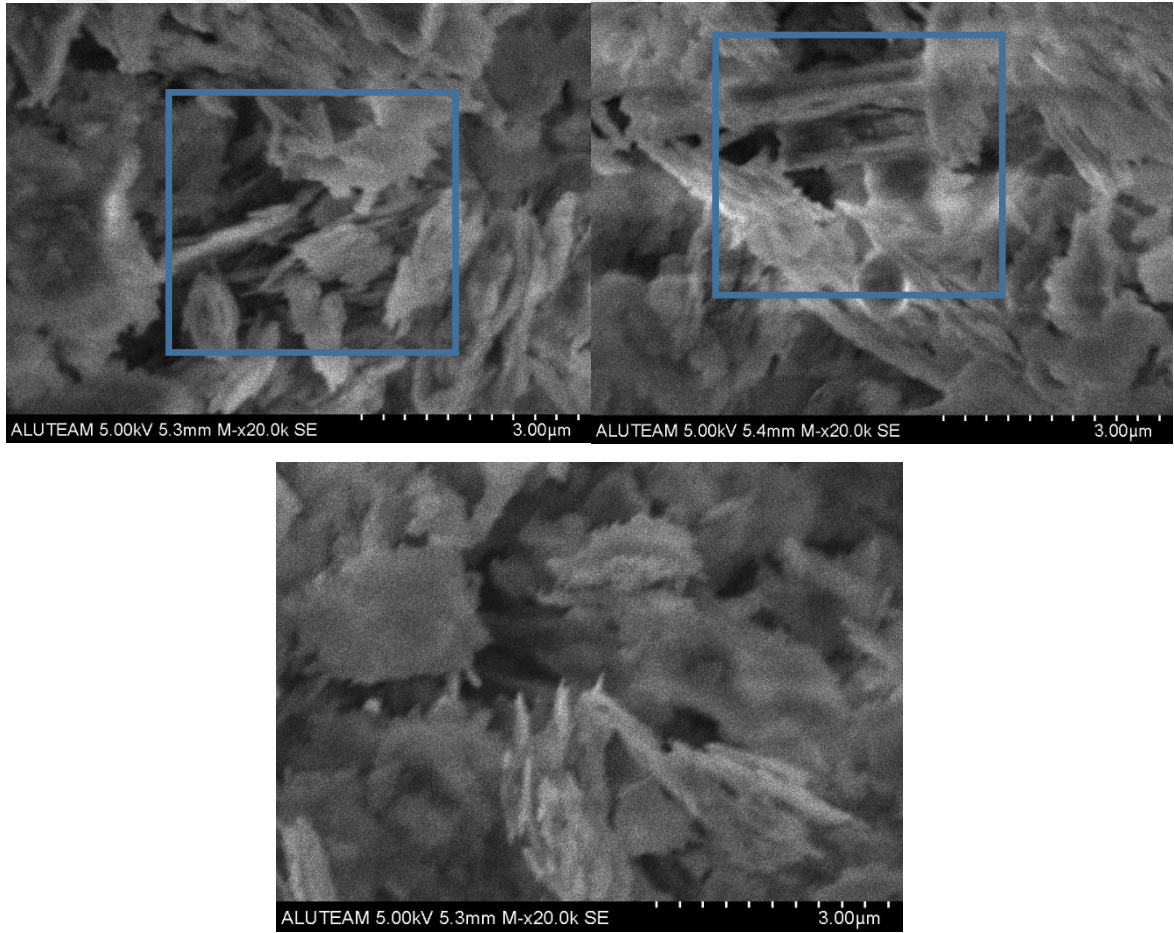
Bu bölümde SEM analizi sonuçları değerlendirilmektedir. Bu analizler Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi'nde yaptırılmıştır. Bazı numunelerde daha belirsiz, bazı numunelerde daha net olmak üzere, iğne şeklindeki etrinjit kristalleri görülmektedir.



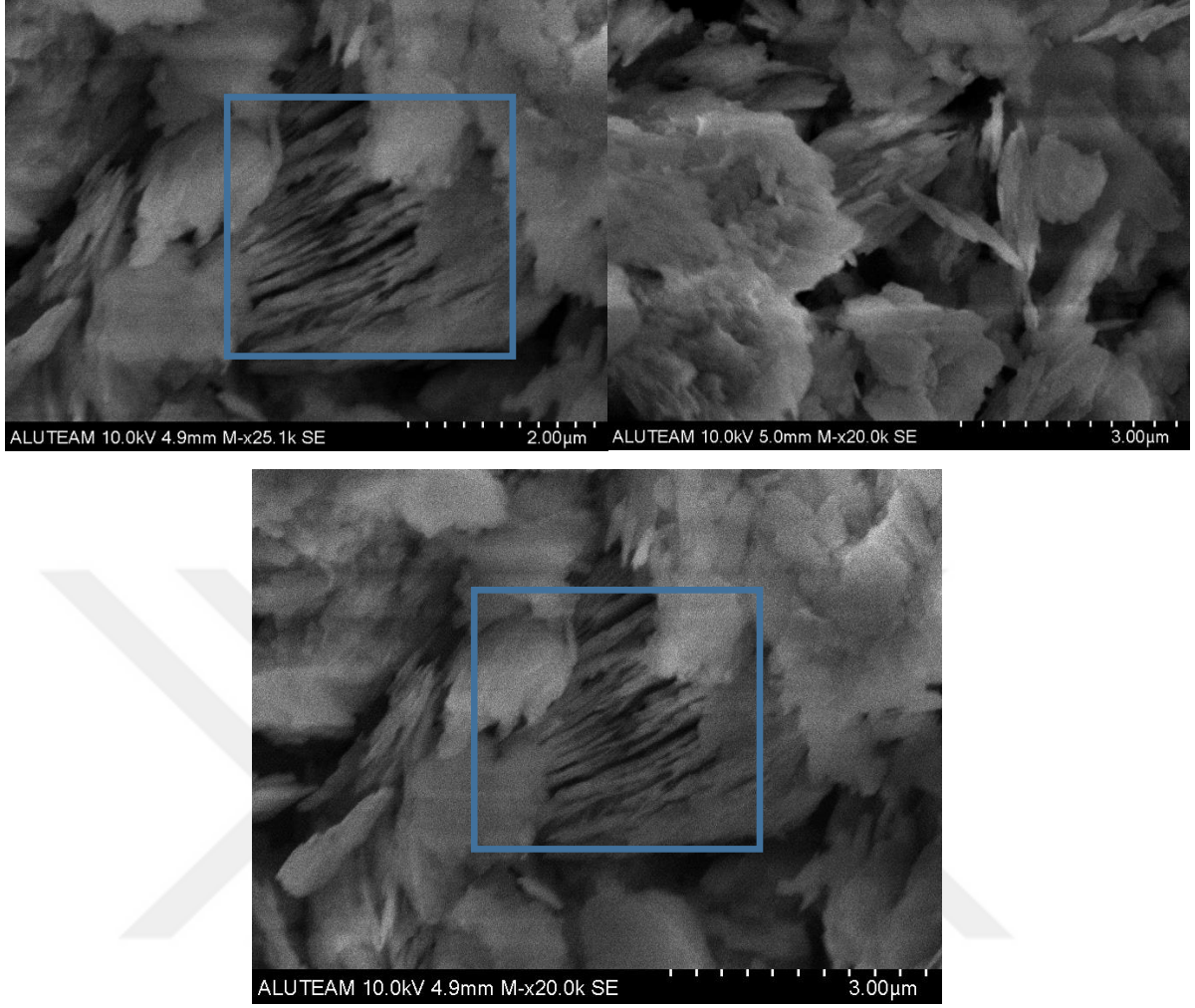
Şekil 4.80: C23, Chinafill, serbest şişme numunesi, %3.5 kalsiyum sülfat, Kuru, Normal kür, 28 gün kür.



Şekil 4.81: C24, Chinafill, serbest şişme numunesi, %5 kalsiyum sülfat, Kuru, Normal kür, 28 gün kür.



Şekil 4.82: B78, K-Brite, serbest şişme numunesi, %5 kalsiyum sülfat, kuru, normal kür, 28 gün kür.



Şekil 4.83: Y01, K-Brite, serbest şişme numunesi, % 5 kalsiyum sülfat, optimum, önerilen iyileştirme yöntemi, normal kür, 28 gün kür.

Şekillerde 4.80 ila Şekil 8.83'te görüldüğü gibi boşluklarda iğne şeklinde etrinjit kristalleri gözlenmektedir. Genellikle küresel etrinjit kristalleri kümeleri, keçe benzeri veya farklı boyutlarda paralel iğneler olarak meydana geldiğini göstermektedir.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada yapılan deneylerde, etrinjit oluşumuna dair önemli bulgular elde edilmiştir. Önemli bulgulardan birisi etrinjit oluşumu için kil, kireç ve sülfatın bir arada olmasının yeterli olmadığıdır. Sülfatın varlığı ve yüzdesi kadar önemli olan diğer bir etken de kilin mineralojisidir. Bu çalışmada kullanılan killer, benzer kireç ve sülfat içeriklerinde farklı seviyede kabarmalara neden olmuştur. Kilin alüminyum içeriğinin etrinjit oluşumu bakımından çok önemli olduğu kullanılan farklı killer ile görülmüştür. Örneğin, alüminyum içeriği düşük olan montmorillonit tipi kilde, XRD analizleri ile etrinjit oluşumu görülmüş olsa dahi şişme oluşmamıştır. Diğer bir önemli etkenin de zeminin permeabilitesi olduğu anlaşılmıştır. Çok düşük permeabiliteye sahip zeminlerde kilin içerisine suyun nüfuz etmesi zaman aldığından, etrinjit oluşumu da kısa bir süre içinde gözlenmemektedir. Laboratuvar şartlarında bu süre yeterli olmayabilir, ancak, arazi şartlarında yeterli suyun sağlanması ile etrinjit oluşumu ve buna bağlı şişme uzun sürede de olsa oluşabilir. Permeabilite değerinin etrinjit oluşma ve yapıya zarar verme süresini etkileyeceği görülmektedir. Bir günlük olgunlaştırma süresinin etkili olabildiği, ancak çok yüksek sülfat içeriklerinde yeterli bir önlem olarak değerlendirilmemesi gerektiği görülmüştür. Soğuk iklimlerde yapılan kür sürecinin de yine aynı şekilde etrinjit oluşumunu önemli miktarda azaltmadığı görülmüştür. Soğuk iklimlerde kür yapılırsa dahi, suya maruz kalındığında etrinjite bağlı kabarmanın başladığı önemli bir bulgu olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak zeminde kabarma oluşumunun miktarının ve hızının, sülfat oranı, kür süresi, kaolin tipi ve kaolin ve kum yüzdesine bağlı olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada büyük numuneler üzerinde yapılan deneylerde, su numunelere temas ettiği andan itibaren numunelerin şişmeye başladığı ve numunelerin yüzeyleri üzerinde çatlaklar oluşmaya başladığı görülmüştür. Çatlaklar üzerinde yapılan görüntü analizleri ile çatlakların gelişimi gözlenmiştir. Genel olarak yüzeyde oluşan çatlak oranının sülfata bağlı değişimi gözlenmemiştir, ölçümlerin hassas olamaması bunun en büyük nedenidir. Benzer şekilde çatlak gelişimine dair yapılan çalışmalar da sülfat yüzdesine bağlı bir ilişki vermemiştir. Ancak bu çalışma ile bu konuda bir veritabanı oluşmuştur, daha sonra daha ileri görüntü değerlendirme teknikleri ile değerlendirilecektir. Çatlakların oluşumunun zamana bağlı değişiminin farklı numunelerde ne şekilde geliştiğinin incelenmesi de potansiyel bir çalışma konusu olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada elde edilmiş olan görüntü analizlerinin daha sonra yapılacak bu çalışmalara altlık oluşturması planlanmaktadır.

Chinafill kili için serbest şişme deneylerinde ölçülen şişme değerleri konsolidasyon aletinde ölçülen şişme değerlerine göre daha yüksektir. K-Brite numunelerinde değerler daha yakındır. Bu sonuçlar, elde edilen şişme değerlerinin deney tipine göre değişebildiğini göstermektedir. Ancak yapılan değerlendirmeler, büyük numuneler üzerinde yapılan deneylerin suya daha kolay ulaşabilen zeminleri temsil ettiği, konsolidasyon aletinde yapılan deneylerin ise, suya daha zor ulaşabilen ortamlarda oluşan etrinjite bağlı kabarmayı temsil ettiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle farklı çalışmalarda yapılan deneylerin sonuçları değerlendirilirken, deney düzeneğe, suya ulaşımın hızlı olup olmadığı gibi etkenler de değerlendirilmelidir. Genel olarak şişme olup olmayacağının değerlendirilmesi için büyük numuneler üzerinde yapılan serbest şişme tipi deneyler, indeks deneyi olarak kullanılabilir.

Kimyasal analizler kapsamında yüz civarında XRD ve daha az sayıda SEM ve ICP deneyleri yapılmıştır. XRD sonuçları numunelerin pek çoğunda etrinjit oluşumuna işaret etmektedir. SEM analizlerinde de etrinjit vb. kristal parçalar açık ve net bir şekilde görülmektedir. Etrinjit kristalleri iğneler olarak kendilerini göstermektedir. ICP sonuçlarını kullanarak, etrinjit miktarını hesaplamaya yönelik çalışmalar güvenilir seviyede sonuçlar vermemiştir. Numuneler üzerinde daha sonra yapılacak daha çok sayıda ICP analizi ile bu çalışmalara tekrar başlanması planlanmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında kireç ile iyileştirilen killi zeminlerde etrinjite bağlı şişmenin hangi şartlarda ve ne seviyede oluştuğunun anlaşılabilmesine yönelik deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmalar başlıca üç bölüme ayrılabilir. Bunlar montmorillonit kili ile yapılan deneyler, laboratuvarında mevcut doğal kaolin ile yapılan deneyler ve işlenmiş iki tip kaolin ile yapılan deneylerdir. Deneylere montmorillonit kili ile başlanmış, bu kilin etrinjit oluşumu için uygun olacağı varsayılmıştır, ancak konsolidasyon deney aletinde montmorillonit ile hazırlanan numunelerde şişme görülmemiştir. Bir sonraki aşamada şişmenin sağlanması için kil tipi değiştirilerek doğal kaolin ile deneylere devam edilmiştir. Bu grup için konsolidasyon aletinde şişme deneyleri yapılmıştır. Bu numunelerde de şişme elde edilemeyince, numunelere farklı yüzdelerde kum ilavesi yapılmış ve numune içerisine daha hızlı su girişinin sağlanması amaçlanmıştır. Son aşamada ise alüminyum içeriği yüksek iki farklı tip kil (Chinafill ve K-Brite) piyasadan temin edilmiş ve çok sayıda kabarmaya yönelik deneyler yapılmıştır. Çalışmada kompaksiyon kalıbında da numuneler hazırlanmış ve büyük boyutlu numuneler olarak tanımlanmıştır. Bu numuneler doymuş kum içerisine yerleştirilmiş, şişme davranışı gözlenmiş ve ölçülmüştür. Bu deneyler sırasında numuneler üzerinde oluşan çatlaklar, düşey ve yatay deplasmanlar fotoğraflanarak kayıt altına alınmıştır.

Montmorillonit ile hazırlanan numuneler üzerinde kısa ve uzun süreli kür sonrasında mukavemet deneyleri yapılmıştır. Suda bırakılan numunelerde sülfat içeriğine bağlı olarak hacim değişikliği gözlenmemiştir. Sülfatın mukavemet bakımından oluşturduğu etkinin kür süresine, kireç ve sülfat yüzdesine bağlı olduğu görülmüştür. Bu numunelerde XRD analizlerinde etrinjit görülmüş olması ancak bunun kabarma ile sonuçlanmamış olması, etrinjitin pozolanik reaksiyonlar ile oluşan yapıyı yenerek bozulmaya ve kabarmaya yol açacak seviyede olmadığı görüşünü oluşturmuştur. 56 günlük küre süresi sonunda suya maruz kalan numunelerde, pozolanik reaksiyonların devam edebildiği, bu nedenle suya maruz kalma ile ilgili mukavemet düşüşü olmadığı görülmüştür. Kür sürecini tamamlayan bir yıllık numunelerde ise, suya maruz kalan ve kalmayan numuneler arasında fark gözlenmiştir. Montmorillonit kili ile yapılan deneylerde şişme oluşmadığı için, bir sonraki deney grubuna laboratuvarında bulunan kaolin kili ile devam edilmiştir. Bu numunelerde de kabarma elde edilememiştir. Kaolin ve montmorillonit kili ile şişme elde edilemediği için, bir sonraki aşamada bu killere kum ilave edilerek, numunelerin permeabilitesinin artması ve su girişinin hızlandırılması hedeflenmiştir. Bu malzemeler kullanılarak, farklı kum yüzdeleri ile numuneler

hazırlanmıştır. Montmorillonit kilinde %50 kum karışımında da şişme elde edilememiştir. Kaolin kiline de kum ilavesi ile elde edilen şişme de sınırlı olmuştur. Genel olarak sodyum sülfat kalsiyum sülfata nazaran daha fazla şişme yapmıştır. Sonuç olarak gerek laboratuvardaki mevcut kaolin kilinin, gerekse montmorillonit içeren kilin etrinjit üretmek için yeterli kimsayal içeriğe sahip olmadığına karar verilmiştir.

Yüksek alüminum içeren Chinafill ve K-Brite killeri ile hazırlanan ve kireç ile stabilize edilen numunelerde su ilave edildiği andan itibaren şişme oluşmaya başlamıştır. Kireç yüzdesi olarak arazide genellikle seçilen %4 kireç yüzdesi kullanılmıştır. Optimumun ıslak tarafında yapılan sıkıştırmanın şişme miktarı üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür, ancak çok yüksek jips içeriğinde ıslak tarafta sıkıştırmanın da yeterli olmayabileceği görülmektedir. Tüm su muhtevaları bakımından, şişme değerleri çok yüksektir ve kabul edilemeyecek seviyededir. Şişme hızları da hesaplanmıştır. Şişme hızlarının olgunlaştırma süresi, sıkıştırma su muhtevası, kür sürecinde maruz kalınan sıcaklık, kür günü ve sıkıştırma su muhtevasına göre değiştiği görülmektedir. Bir günlük olgunlaştırma süresine izin verilmesi ile genel olarak şişme değerlerinde düşüş olduğu görülebilir. Olgunlaştırma sürecine maruz bırakılan ve 28 gün kür süresinden önce suya maruz kalmayan numunelerde şişme davranışı, sülfat yüzdesi çok yüksek değilse makul seviyelerde olabilmıştır, ancak kesin bir çözüm değildir. Olgunlaştırma süresinde etrinjitin bir kısmının oluştuğu, sıkıştırma sırasında bu kristallerin bozulduğu ve numune sıkıştırıldıktan sonra geride kalan sülfatın ise daha düşük miktarda etrinjit üretebildiği düşünülmektedir. Kuru tarafta sıkıştırma yapılmadığı ve çok kür süresinin de çok kısıtlı olmadığı durumlarda, oluşacak olan etrinjitin neden olduğu kabarmanın numunelerin soğuk havada ya normal kür ortamında kür edilmesi ile ilgili olmadığı görülmektedir. Ancak çoğunlukla soğuk havada yapılan kürün oluşan kabarmayı etkilediği söylenebilir. Küçük numunelerde her iki kil için elde edilen değerler karşılaştırıldığında, K-Brite ile daha yüksek şişme değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Tüm deneylerde elde edilen değerlerin yol üst yapısı için büyük çoğunlukla kritik değer olan %3'ün üzerinde olduğu görülmektedir. Chinafill ve K-Brite killeri için şişme basınçları farklı kil ve kür süreleri için 350 kPa seviyelerine kadar ulaşabilmıştır. Şişme yüzdesi ve şişme basıncı arasında genel olarak doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Şişme basıncı değerinin şişme yüzdesinin yaklaşık olarak on katı olarak (kPa) oluştuğu ifade edilebilir. Chinafill kilinin kullanıldığı numunelerde, şişme yüzdesi ve şişme basıncı, K-Brite kiline göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. Şişme basınçlarının oldukça

yüksek olduğu ve önlem alınmadığı takdirde çevresindeki yapılarda büyük problemler oluşturacağı görülmektedir.

Büyük boyutlu numunelerde oluşan şişme değerleri ve yüzeyde oluşan çatlak oranları değerlendirilmiştir. Numunelerde şişme ve çatlaklar numunelerin ilk kurma aşamasında hızlıca oluşmaktadır. Bu düzenekte farklı jips içerikleri için düşeyde ve yatayda farklı ölçümler alınmamıştır. Alınan ölçümlerin çok hassas olmaması ve deney koşulları bunun nedenidir. Ancak çatlak yüzdelерinde ve hacimsel olarak yapılan değerlendirmelerde farklılıklar ölçülmüştür. Dijital analizlerle yapılan çatlak gözlemleri önemli bir altlık oluşturmuştur, daha sonra bu konuda değerlendirmelerin yapılması planlanmaktadır.

Soğuk iklimlerde yapılan imalatlarda da etrinjit nedeniyle şişme riskinin ertaraf edilmediği görülmüştür. Ancak labroatuvar ortamında iki yıl kadar kürde bekletilen K-Brite numunelerde, diğerlerine nazaran daha düşük şişme değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerin %15 ve altına inmiş olması, çok uzun süre ile suya maruz kalmayan numunelerde, şişme davranışının daha az etkili olacağını göstermektedir. Ancak bu değerler dahi halen çok yüksektir. Arazide suya maruz kalmanın her halükarda önlenmesi gerektiği görülmektedir.

Deneyler sürecinde ve sonrasında her gruptan çok sayıda numune için XRD, SEM ve ICP analizleri yapılmıştır. XRD ve SEM analizleri etrinjit oluşumunu göstermektedir, ancak oluşan miktar konusunda kantitatif bir analiz yapamaktadır. ICP analizleri ile bu konuda çalışmalara başlanmıştır. Ancak bu tez kapsamında hedeflenen sayıda ICP analizi yapılamadığı için bu konuda bir öneri getirilememiştir. Ancak bu konudaki çalışmalara devam edilecektir.

Büyük numunelerde ölçülen değerler, küçük numunelerde görülen bazı farklılıkların büyük numunelerde görülemediğini göstermektedir. Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar, küçük ve büyük numunelerin deneylerinin yapıldığı her iki deney düzeneğinin gerek yöntem gerekse elde edilen benzerlikler ve farklılıklar bakımından değerlendirilebilmesini sağlamıştır. Şişme davranışı oluşup oluşmayacağını anlaşılmaması bakımından serbest şişme ölçümleri daha basittir ve daha kısa sürede nihayetlenebilir. Ancak bu deney düzeneğinde ölçülen değerleri indeks deney olarak değerlendirmek isabetli olacaktır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda etrinjitin neden olduğu şişme miktarını azaltmak için yeni ve ekonomik bir yöntem de önerilmiştir. Bu yöntem ile ıslak tarafta sıkıştırmanın ve olgunlaştırma süresine izin vermenin olumlu etkileri bir arada kullanılmıştır. Bu uygulama ile

optimum su muhtevasında yapılan sıkıştırmalarda şişme davranışında önemli seviyede azalma elde edilmiştir.

Bu tez çalışması etrinjit oluşumu nedeniyle oluşan kabarmanın değerlendirilmesine yönelik önemli etkenleri belirlemiştir. Kildeki yüksek alüminyum içeriği ve kuru tarafta yapılan sıkıştırma, etrinjit kaynaklı kabarmayı çok önemli seviyede artırmaktadır. Zeminin permeabilitesinin çok düşük olması durumunda da etrinjit oluşumu laboratuvarda makul süreler içerisinde oluşmamaktadır. Arazide de benzer bir durumun olduğu kabul edilebilir. Yani permeabilite düşük ise, suya maruz kalırsa dahi, kabarmanın gözlenmesi uzun sürebilir. Bu çalışmada, sülfatın ortamda bulunmasının tek başına etrinjit kaynaklı kabarmalar için yeterli olmadığını göstermiştir. Kilin tipi ve buna bağlı kil mineralojisi, sülfat yüzdesi kadar önemlidir. Sülfat içeren zemin ortamının permeabilitesi de etrinjiti oluşup oluşamayacağını ya da hangi süre içinde oluşabileceğini belirlemektedir. Permeabilite çok düşük olduğunda, etrinjit yerine pozolanik reaksiyonların daha hızlı oluşabilmesi neticesinde, oluşan etrinjit kabarma ile neticelenmeyelebilir. Soğuk iklimlerde yapılan kür sonucunda, azalma görülebilmektedir, ancak kil mineralojisinin bunu etkilediği görülmektedir. Her iki kil için aynı sonuçlar elde edilmemiştir. Olgunlaştırma sürecinin olumlu etkileri görülmekle birlikte, buna bağlı iyileşme seviyesi sülfat yüzdesine ve suya maruz kalmadan önceki kür süresine bağlıdır. Şişme hızlarının kür sürecinden ve olgunlaştırmadan etkilendiği göstermiştir. Tanımlamış olan “Şişme Tamamlama Oranı, ŞTO” ile, bu süreçler karşılaştırmalı olarak takip edilebilmiştir. Bu konuda özgün ve literatüre katkı getiren bulgular elde edilmiştir.

Bu çalışma ile etrinjit kaynaklı kabarmalar yönelik kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda ICP'den elde edilen değerler ile oluşan etrinjit miktarı ile kolere edilmesi çalışılması planlanmaktadır. Bu konuda önemli bir altlık hazırlanmıştır ve daha sonraki çalışmalara aktarılabacaktır.

Kireç ile stabilize edilen killi zeminlerde, sülfat içeriğinin muhakkak kontrol edilmesi, sülfat mevcut ise etrinjit oluşumuna dair laboratuvar deneylerinin yapılması ve arazide gerekli önlemlerin alınması şarttır.

KAYNAKLAR

- Abdi, M.R., Wild, S., 1993. Sulphate expansion of lime-stabilised kaolinite: I physical characteristics. *Clay Minerals* 28, 555–567.
- Adams, A. G., Dukes, O. M., Tabet, W., Cerato, A. B., and Miller, G. A. (2008). “Sulfate induced heave in Oklahoma soils due to lime stabilization”. *GeoCongres 2008*, ASCE.
- Alonso, E. E. and Ramon, A. (2013). Heave of a railway bridge induced by gypsum crystal growth: field observations. *Géotechnique* 63, No. 9, 707 – 719, [http://dx.doi.org/10.1680/geot.12.P.034]
- Anagnostou, G., Pimentel, E. & Serafeimidis, K. (2010). Swelling of sulphatic claystones – some fundamental questions and their practical relevance. *Geomechanics and Tunnelling*, 3, No. 5, 567-573
- Basista M, Weglewski W. Chemically assisted damage of concrete: a model of expansion under sulfate attack. *Int J Damage Mech* 2008.
- Beetham, Paul. Enhancing the understanding of lime stabilisation processes. (2015), PHD thesis Department of Civil & Building Engineering, Loughborough University, Loughborough.
- Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), pp. 223-237.
- Berger, E., D. N. Little, and R. Graves, “Technical Memorandum: Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates.” National Lime Association: Arlington, VA (2001) p. 16.
- Brown, P. W., & Taylor, H. F. W. (1999). The role of ettringite in external sulphate attack. In J. Marchand & J. P. Skalny (Eds.), *Materials science of concrete special volume: Sulphate attack mechanisms* (pp. 73–98). Westerville, OH: The American Ceramic Society.
- Buttress, A.J. and Grenfell, J.R.A. and Airey, Gordon (2013) The role of ettringite in the deterioration of artificial lime stabilised soils: a microstructural study. *Road Materials and Pavement Design*, 14 (3). pp. 586-614. ISSN 1468-0629
- Chen, S.S. and Mehta, P.K., (1982). “Zeta potential and surface area measurements on ettringite”. *Cement and Concrete Research*. Vol.12, No.2, pp.257 – 259.
- Chen FH. *Foundations on expansive soils*. 2nd ed. New York: Elsevier Science Publications; 1988.
- Chittoori BCS. Clay mineralogy effects on long-term performance of chemically treated expansive clays [Dissertation]. Arlington, Texas: University of Texas at Arlington; 2008.
- Cohen, M.D., ‘Theories of expansion in sulfoaluminate—type expansive cements: schools of thought’, *Ibid.*, 13 (6) (1983) 809–818.

De Bel R, Correia AG, Verbrugge J-C. Contribution of loamy soil treatment to improve embankments performance. *Geotech Spec Publ* 2009;189:186–91.

Dermatas, D. (1995). "Ettringite-induced swelling in soils: State-of-the art." *Appl. Mech. Rev.*, 48~10!, 659–673.

Eades, J. L., & Grim, R. E. (1966). *A quick test to determine lime requirements for lime stabilisation* (pp. 61–72) (Transportation Research Board, Highway Research Record (139)).

Ehwailat. K.I.A , Ismail.M.A.M, Ezreig,.A.M.A - " Novel Approach for Suppression of Ettringite Formation in Sulfate-Bearing Soil Using Blends of Nano-Magnesium Oxide, Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Rice Husk Ash "), Received: 8 June 2021 / Revised: 9 July 2021 / Accepted: 11 July 2021 / Published: 19 July 2021

Ferris, G.A., Eades, J.L., Graves, R.E., McClellan, G.H., 1991. Improved characteristics in sulphate soils treated with barium compounds before lime stabilization. *Trans. Res. Rec.* 1295, Washington, DC, pp. 45–51.

Gaily.A.H.M., "Engineering behavior of lime treated high sulfate soils." MD Thesis, The University Of Texas At Arlington May 2012

Harris, J. P., S. Sebesta, and T. Scullion. Hydrated Lime Stabilization of Sulfate-Bearing Vertisols in Texas. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1868, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2004, pp. 31–39.

Harris, P. and T. Scullion. Hydrated Lime Stabilization of Sulfate-Bearing Soils in Texas. *TxDOT Research Project 4240-2*, August 2004.

Hunter, D. (1988). "Lime Induced Heave in Sulfate-Bearing Clay Soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, No. 2.

Jones DE, Holtz WG. Expansive soils: the hidden disaster. *Civil Eng, TRB* 1973;43:49–51.

Ish-Shalom, M., and Bentur, A., (1974). "Properties of Type-K cement of pure components I: ydration of unrestrained pastes of pure components: results", *Cement and Concrete Research*, Vol.4, pp.519-532.

Kalousek, G.L. and Benton, E.J., 1970, "Mechanisms of Seawater Attack on Cement Pastes," *ACI Journal*, pp. 187-192.

Kollman, H., and Strubel, G. (1981). "Ettringit-Thaumasit-Mischkristalle von Brenk (Eifel)." *Chemical Erde*, 40, Giessen, Germany, 110-120.

Komurka M. & Scheiber R (1989): *Hydrolytische Gleichgewichte von Hydraten des Portlandzementes 1. Teil*. Oesterreichisches Forschungszentrum Seibersdorf Ges.m.b.H OEFZS-4497.

Little, D. N., and R. E. Graves. Guidelines for Using Lime in Sulfate- Bearing Soils. Chemical Lime Co., Fort Worth, Tex., 1995.

Little DN. Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates, vol. I. Summary of Findings. National Lime Association Publication; 1999.

Little, D.N., Herbert, B., and Kunagalli, S.N. (2005). "Ettringite formation in lime-treated soils: Establishing thermodynamic foundations for engineering practice." *Transportation Research Board 2005 Annual Meeting*, No. 05-2239, Washington, D.C.

Little, D. ve S. Nair, "Recommended Practice for Stabilization of Sulfate Rich Subgrade Soils." Texas Transportation Institute Texas A&M University College Station, Texas, NCHRP 20-07, (2009).

Little, D. N., Nair, S., & Herbert, B. (2010). Addressing sulfate-induced heave in lime treated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 110–118.

Madsen, F.T., Müller-Vonmoos, M., 1989. The swelling behaviour of clays. *Appl. Clay Sci.* 4 (2), 143–156. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(89\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0169-1317(89)90005-7).

Mather, K., 1973. Examination of cores from four highway bridges in Georgia. U.S. Army Eng. Waterways Exp. Stn., Corps Engr., Vicksburg, Miss., Misc. Pap., C73-11:20 pp

Mohamed, A. M. O. (2000). The role of clay minerals in marly soils on its stability. *Engineering Geology*, 57, 193–203.

Moore, A.E. and H.F.W. Taylor (1970) Crystal structure of ettringite. *Acta Cryst.*, 26, 386–393.

Myneni SCB, Traina SJ, Logan TJ, Waychunas GA. Oxyanion behavior in alkaline environments: Sorption and desorption of arsenate in ettringite. *Environ Sci Technol.* 1997;31:1761–1768. doi: 10.1021/es9607594.

Nakamura, T., Sudoh, G., & Akaiwa, S. (1968, October). Mineralogical composition of expansive cement clinker rich in SiO₂ and its expansibility. *Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement*, Tokyo.

National Lime Association (NLA), "Lime-Treated Soil Construction Manual: Lime Stabilization & Lime Modification." Bulletin 326, National Lime Association, VA (2004).

Nelson, D. J. and Miller, J. D. (1992). "Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering," John Wiley & Sons. 259 p.

Newbury.C, Beetham.P, Belton.D ,Al-ameen.Y,"SITE RELEVANT RISK OF SULPHATE SWELL IN LIME STABILISATION"– Nottingham Trent University,2021.

Ogawa, K., D.M. Roy, C4A3S hydration ettringite formation, and its expansion mechanism: I. expansion; Ettringite stability, *Cem. Concr. Res.* 11 (1981) 741–750. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90032-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90032-6)

Ogawa, K. and Roy, D.M., (1982). “C4A3S[−] hydration, ettringite formation, and its expansion mechanism: II. Microstructural observation of expansion”. *Cement and Concrete Research*, Vol.12, Part 1, pp101-109.

P. K. Mehta and A. Klein. Investigations on the Hydration Products in the System 4 CAO-3AL2O3-SO3-CASO4-CAO-H2O. In Special Report 90, HRB, National Research Council, Washington, D.C. . 1966, pp. 328-352.

Pedarla A, Chittoori BCS, Puppala AJ. Influence of mineralogy and plasticity index on the stabilization effectiveness of expansive clays. *J Transp Res Board, Nat Acad Sci, Transp Res Board* 2011;2212:91–9.

Paramora, R., Gratha, E. Mc, Beetham, P., David, B., "Influence of Test Setup on Sulphate Swell Measurements Using low and high sulphate soils to assess swell quantified by different test set ups" Civil Engineering department, Nottingham Trent University, School of Science and Technology, Nottingham Trent University, College Drive, Clifton, NG11 8NS, 2021.

Perrin, L. “Expansion of Lime Treated Clays Containing Sulfates.” *Procedures*, 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, TX, Vol. 1 (1992), pp. 409-414.

Petry TM, Armstrong JC. Stabilization of expansive clay soils. *Transportation Research Record* 1989;vol. 1219. Washington, D.C.: TRB, National Research Council; 1989. p. 103–12.

Petry, T.M. and Little, D.N. (1992), “Update on Sulfate Induced Heave in Lime and Portland Cement Treated Clays: Determination of Potentially Problematic Sulfate Levels,” *Transportation Research Board, Transportation Research Record* 1362, pp. 51-55.

Puppala AJ, Wattanasanticharoen E, Punthutaecha K. Experimental evaluations of stabilization methods for sulphate-rich expansive soils. *Ground Improvement*, 2003, 7, (1): 25–35.

Puppala, A.J., Rupesh, K., Raja, S.M., and Hoyos, L.R. (2006). “Small-Strain Shear Moduli of Chemically Stabilized Sulfate-Bearing Cohesive Soils”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v 132, n 3, p 322-336, March 2006.

Puppala, A.J., and Cerato, A. (2009). “Heave Distress Problems in Chemically- Treated Sulfate Laden Materials”. *Geo-Strata*, March/April, 2009.

Puppala AJ, Chittoori BCS, Talluri N, Le M, Bheemasetti T, Thomey J. Stabilizer selection for arresting surficial slope failures: a sustainability perspective. *ASCE GeoCongress*, 2013, San Diego, California. p. 1465–74.

Puppala, A.J., Talluri, N., Congress, S.S.C., Gaily, A. (2018). “Ettringite Induced Heaving in Stabilized High Sulfate Soils.” *Innovative Infrastructure Solutions*, Springer Publishers, 3:72. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0179-7>.

Quiñónez Samaniego RA, Bruschi GJ, Scheuermann Filho HC, Araújo MT, Festugato L And Consoli NC.(2022)" Effect of extended mellowing on strength and swelling behaviour of a high sulfated soil",.Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement. <https://doi.org/10.1680/jgrim.22.00017>,

Rajasekaran .G. 25 August (2004), ” Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays”, p. 1134-1159.

Ramon, A., Alonso, E., Olivella, S.: Hydro-chemo-mechanical modelling of tunnels in sulfated rocks. *Géotechnique*. 67(11), 968–982 (2017).

Rollings, R., & Burkes, J. P. (1999). Sulfate attack on cement-stabilized sand. *Journal of Geotechnical Engineering and Geoenvironmental Engineering*, 125(5), 364–372.

Schädlich B, Marcher T, Schweiger HF (2013) Application of a constitutive model for swelling rock to tunnelling. *Geotech Eng* 44:47–54.

Schweizer D, Prommer H, Blum P, Butscher C (2019) Analyzing the heave of an entire city: modeling of swelling processes in clay-sulfate rocks. *Eng Geol*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105259>,

Schwiete, H.E., Ludwig, U., and Jager, P., (1966). “Investigations in the System $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaSO}_4 - \text{CaO} - \text{H}_2\text{O}$ ”. Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete. Special Report 90, Highway Research Board, National Research Council, pp. 353 – 367.

Sherwood, P T. The effect of sulphates on cement-and lime-stabilised soils. *Roads and Road Construction*, 40 (470), pp. 34 – 40, (1962).

Snedker, E A and Temporal, J. M40 Motorway Banbury IV Con- 10 tract - lime stabilisation. *Journal of Highways and Transportation*, 37, (12), 1990, 7-8

Soroka, I., (1979). “Portland cement paste and concrete”. Chemical Publishing Company, New York.

Strohbauch, G., Kuzel, H.-J.: Carbonatisierungsreaktion als Ursache von Schäden an wärmebehandelten Betonfertigteilen. *Zement-Kalk-Gips* (1988) 7, pp. 358-360

Talluri .N , Puppala. A J , Chittoori B C.S , Gail. A , and Harris P.(2013), ” Stabilization of High-Sulfate Soils by Extended Mellowing”, p.96-104.

Taylor, H. F. W. (1964), "The Chemistry of Cement", Vol. 1, Academic Press, New York, 460 pages.

TxDOT,(2000).“Technical Memorandum, Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates, Austin White Lime, Chemical Lime, Texas Lime.”

TxDOT. (2005). "Guidelines for Treatment of Sulfate-Rich Soils and Bases in Pavement Structures"

Witherspoon, T.W. and Litke, S. (2000). Residential foundation performance: A Study of Repaired Foundations. ADSC. pp. 156.

Wittke-Gattermann, P. & Wittke, M. (2004). Computation of strains and pressures for tunnels in swelling rocks. *Tunnelling and Underground Space Technology* 19: 422–423.

Wray, W.K. and Meyer, K.T. (2004). "Expansive Clay Soil... A Widespread and Costly Geohazard." *GeoStrata*, Vol. 5, no. 4, pp. 24-28.

Yi Y, Liu S, Puppala AJ. Laboratory modelling of T-shaped soil-cement column for soft ground treatment under embankment. *Géotechnique* 2016;66(1):85–9 [http://dx.doi.org/10.1680/jgeot.15.P.019], ICE Publishers.

URL1, <http://petrol.sci.muni.cz/eng/technolology/thaumasite/conclus.htm> (15.11.2018).

URL2, <https://www.mindat.org/min-1414.html> (20.02.2021).

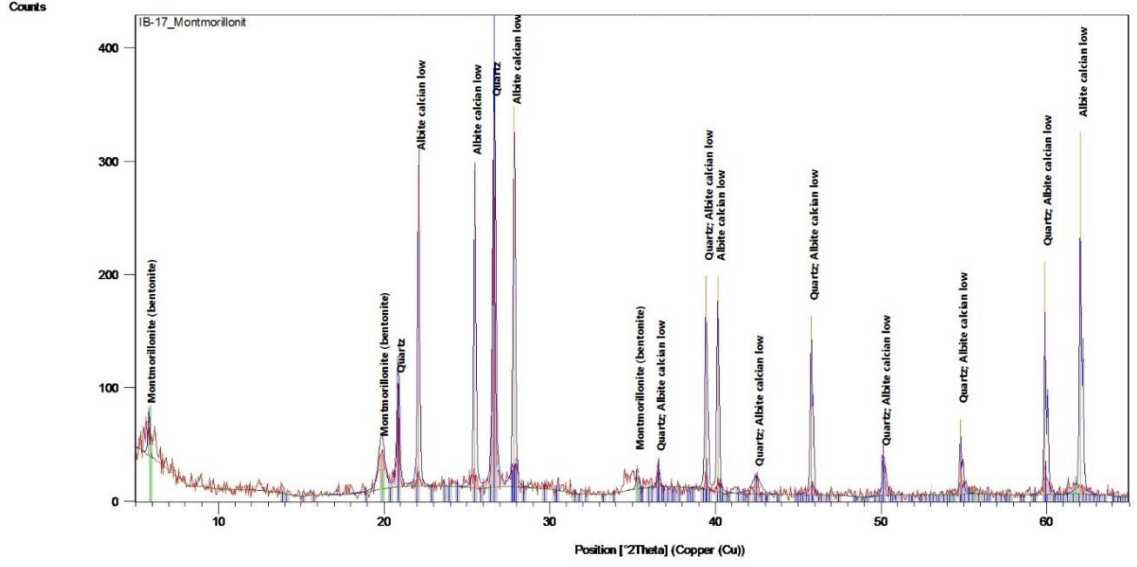
URL3, <https://www.nuhyapi.com.tr/kirecteknik> (17.04.2023)

URL4, <https://www.laboratuar.com/> (01.04.2023)

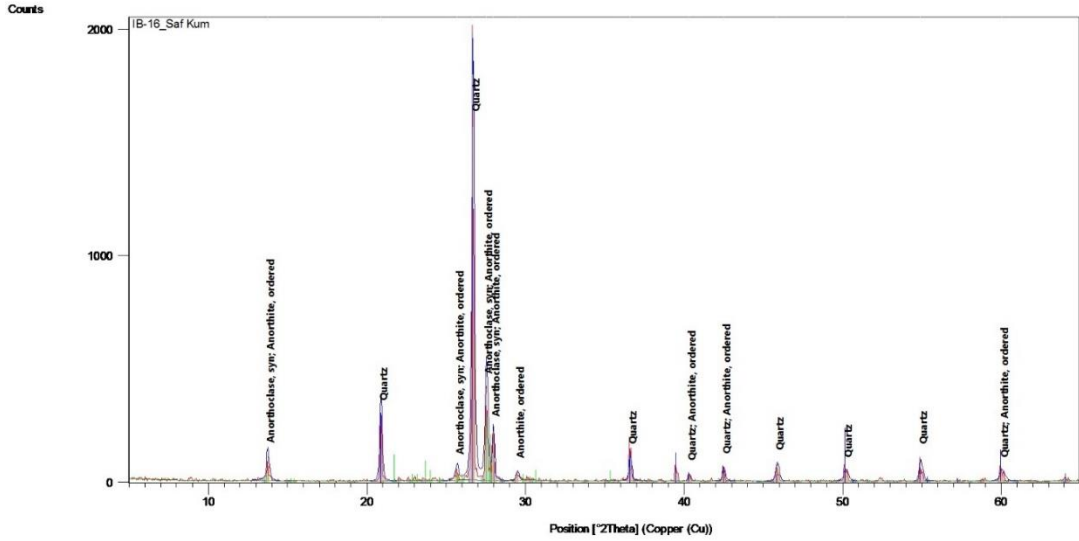
EKLER

Ek1:

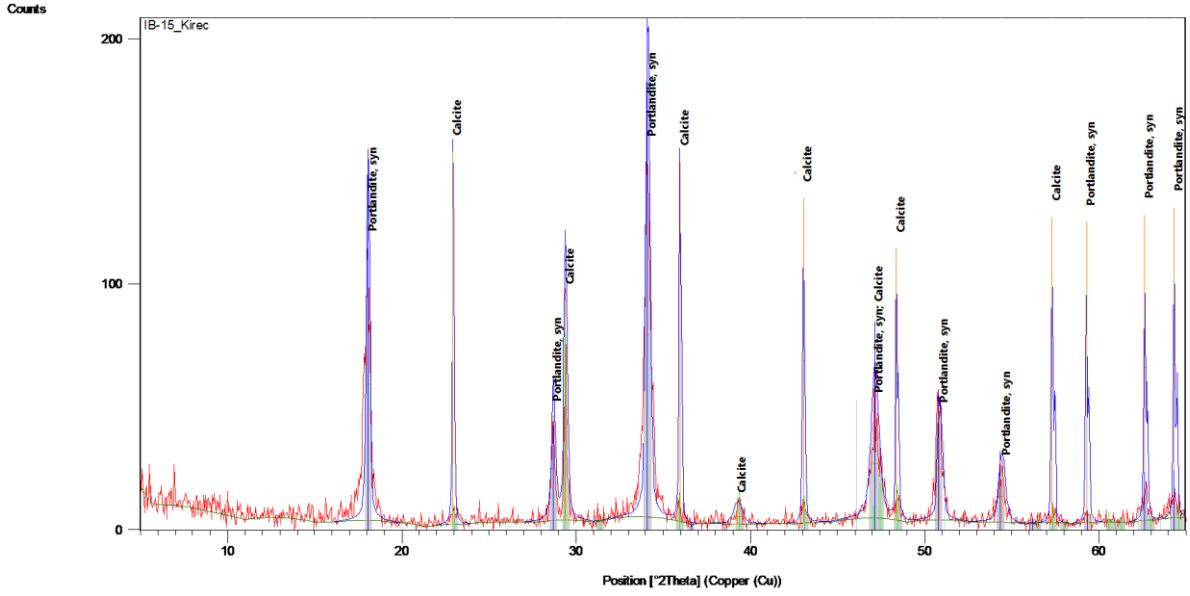
Bu tez çalışmasında boyunca kimyasal analizler yapılmıştır. Bu analizler bu bölümde sunulmaktadır.



Ek 1.1: Montmorillonit kili için yapılan XRD analizi.



Ek 1.2: Kum için yapılan XRD analizi.



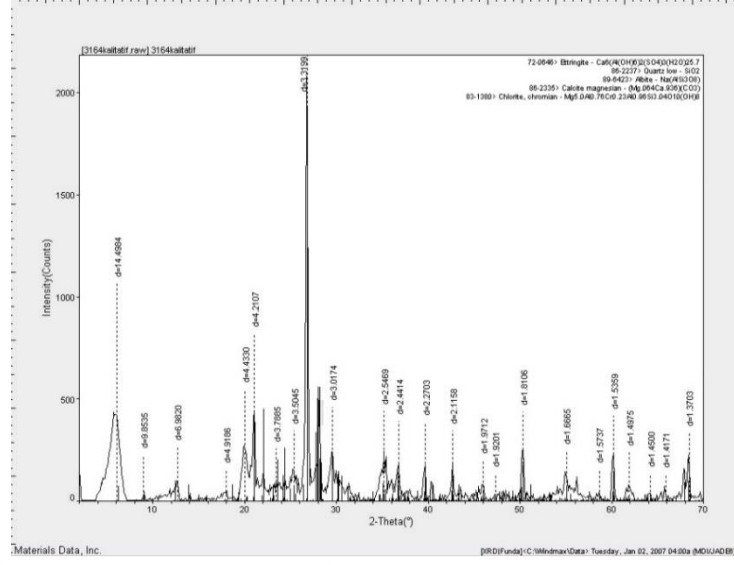
Ek 1.3: Kireç için yapılan XRD analizi.

Ek 2:

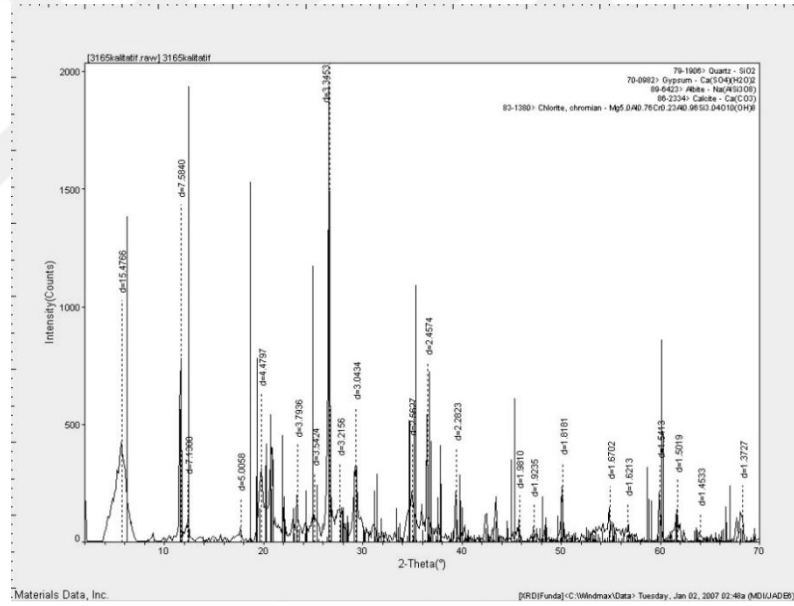
Bu numuneler 56 gün kürde bekletilmiştir. Tam doygun ortamda 30 gün bekletilen sülfatlı numuneler ile XRD analizi ve ICP-MS analizi yapıldı. XRD analiz sonuçları Tablo 1’de ve ICP-MS analiz sonuçları ise Ek2.1 'de verilmektedir. XRD spektrumları Ek 2.1.1 ila 2.1.4’te görülmektedir.

Ek 2.1: XRD analiz sonuçları.

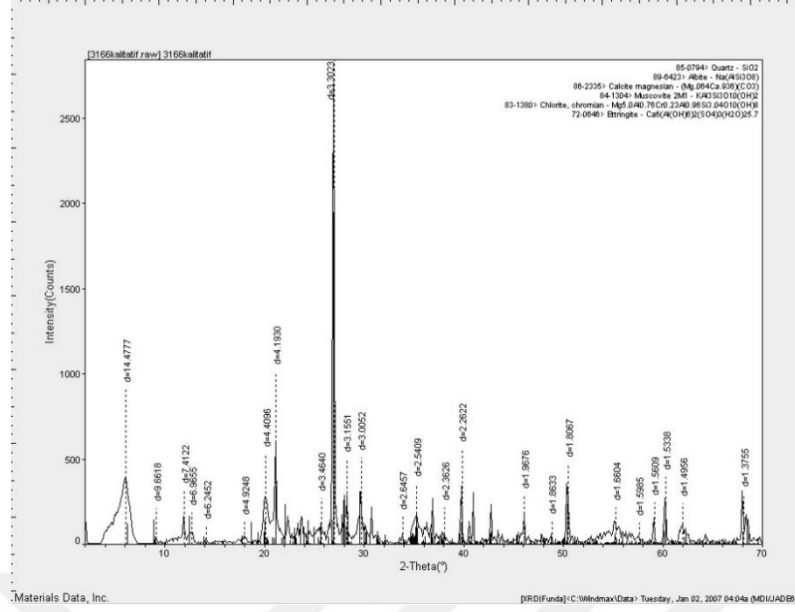
Numune No	Sülfat ve Kireç Oranları	Etrinjit Oluşumu	% w	Serbest Basınç Mukavemeti (kN/m ²)	γ_d (kN/m ³)
1	% 1 sülfat + % 4 kireç	Evet	25.43	506.75	14.45
2	% 3.5 sülfat + % 4 kireç	Gypsum	26.56	684.8	13.88
3	% 3.5 sülfat + % 4 kireç	Evet	20.07	43.85	12.97
4	% 1 sülfat + % 4 kireç	Hayır	26.22	46.07	13.21



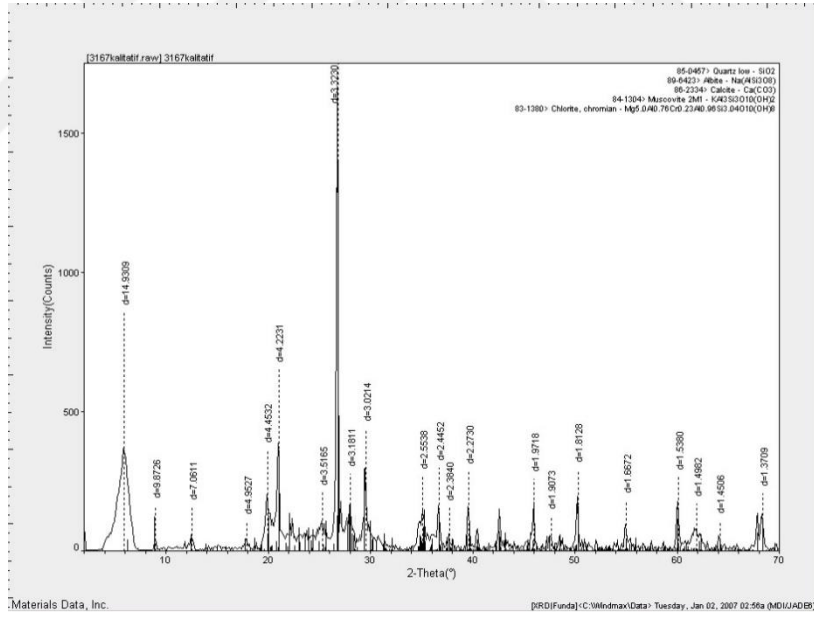
Ek 2.1.1: % 1 sülfat + % 4 kireç oranı ile elde edilen tozun XRD spektrumu



Ek 2.1.2: % 3.5 sülfat + % 4 kireç oranı ile elde edilen tozun XRD spektrumu



Ek 2.1.3: % 3.5 sülfat + % 4 kireç oranı ile elde edilen tozun XRD spektrumu



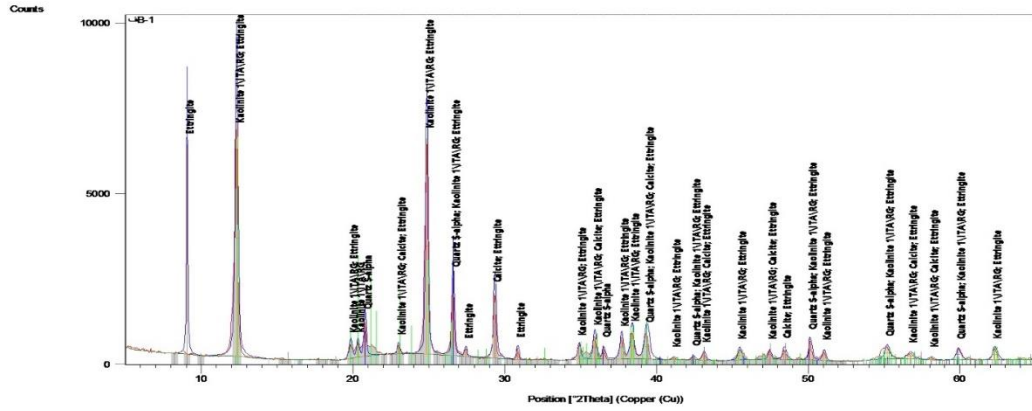
Ek 2.1.4: % 1 sülfat + %4 kireç oranı ile elde edilen tozun XRD spektrumu

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda 1 ve 3 nolu numunelerde etrinjitin oluştuğu görülmüştür (Ek 2.1.1 ila Ek 2.1.4).

Ek3: Mineraloji-Petrografi Anabilim Dalı Laboratuvarlarında yapılan XRD analizleri, kodlamaları ve XRD sonuçları aşağıdaki tabloda ve grafiklerde sunulmaktadır. **(Birinci grup)**

EK 3.1.a: İB1 numunenin açıklaması.

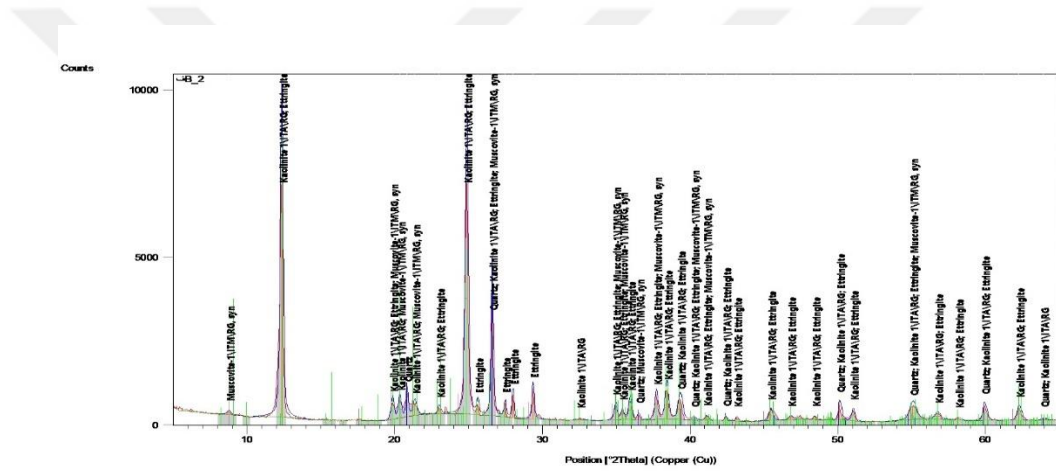
Zemin Tanımı	%75 kum+ %25 kaolin
Kaolin Tipi	Chinefill
Kireç Oranı	%4
Sülfat Tipi	Yok
Sülfat oranı	-
Kür Süresi (Gün)	3
Numune kaynağı	Kompaksiyon
Su muhtevası	Opt
Ettringit	%4



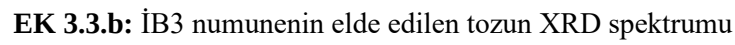
EK 3.1.b: İB1 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu

EK 3.2.a: İB2 numunenin açıklaması.

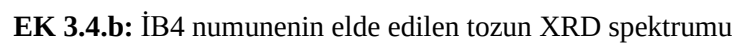
Zemin Tanımı	%50 kum+ %50 kaolin
Kaolin Tipi	Chinefill
Kireç Oranı	%4
Sülfat Tipi	Yok
Sülfat oranı	-
Kür Süresi (Gün)	3
Numune kaynağı	Kompaksiyon
Su muhtevası	Opt
Ettringit	%3

**EK 3.2.b: İB2 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu****EK 3.3.a: İB3 numunenin açıklaması.**

Zemin Tanımı	%100 Montmorillonit
Kaolin Tipi	Montmorillonit
Kireç Oranı	%7
Sülfat Tipi	Kalsiyum sülfat
Sülfat oranı	%3.5
Kür Süresi (Gün)	56
Numune kaynağı	Serbest basınç
Su muhtevası	Opt-3
Ettringit	%6

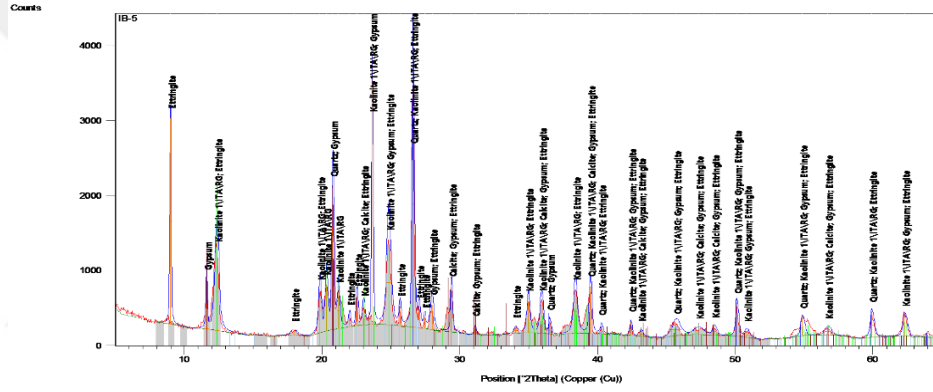


Zemin Tanımı	%25 kum+ %75 kaolin
Kaolin Tipi	Kaolin -K-Brite-hk
Kireç Oranı	%4
Sülfat Tipi	Kalsiyum sülfat
Sülfat oranı	%3.5
Kür Süresi (Gün)	3
Numune kaynağı	Kompaksiyon
Su muhtevası	Opt+%13
Ettringit	%7

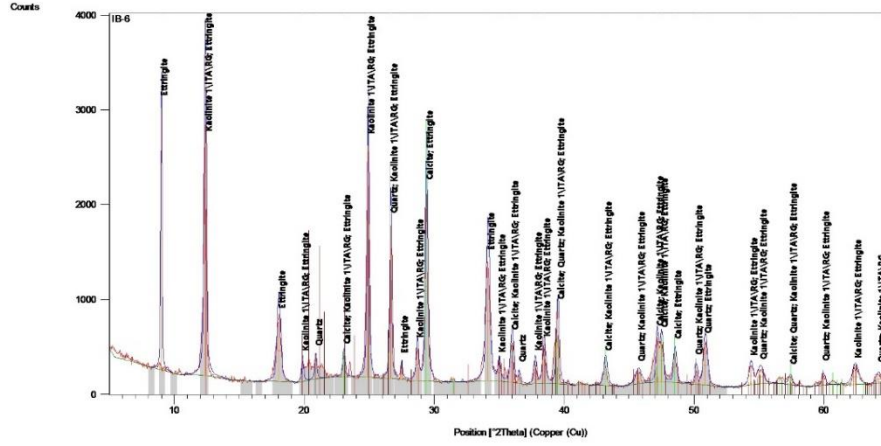


EK 3.5.a: İB5 numunenin açıklaması.

Zemin Tanımı	%75 kum+ %25 kaolin
Kaolin Tipi	Kaolin -K-Brite-hk
Kireç Oranı	%4
Sülfat Tipi	Kalsiyum sülfat
Sülfat oranı	%3.5
Kür Süresi (Gün)	3
Numune kaynağı	Kompaksiyon
Su muhtevası	Opt+%6
Ettringit	%5

**EK 3.5.b: İB5 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu****EK 3.6.a: İB6 numunenin açıklaması.**

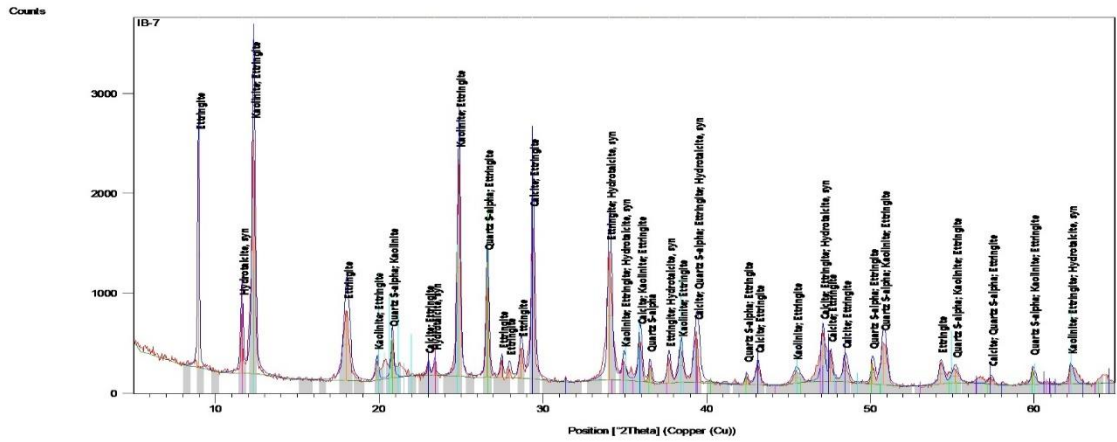
Zemin Tanımı	%75 kum+ %25 kaolin
Kaolin Tipi	chinefill
Kireç Oranı	%4
Sülfat Tipi	Sodyum sülfat
Sülfat oranı	%3.5
Kür Süresi (Gün)	3
Numune kaynağı	Konsolidasyon
Su muhtevası	Opt
Şişme Oranı	% 2.075
Ettringit	%6



EK 3.6.b: İB6 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu

EK 3.7.a: İB7 numunenin açıklaması.

Zemin Tanımı	%75 kum+ %25 kaolin
Kaolin Tipi	Chinefill
Kireç Oranı	%4
Sülfat Tipi	Kalsiyum sülfat
Sülfat oranı	%3.5
Kür Süresi (Gün)	3
Numune kaynağı	Konsolidasyon
Su muhtevası	Opt
Şişme Oranı	% 7
Ettringit	%5



EK 3.7.b: İB7 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu

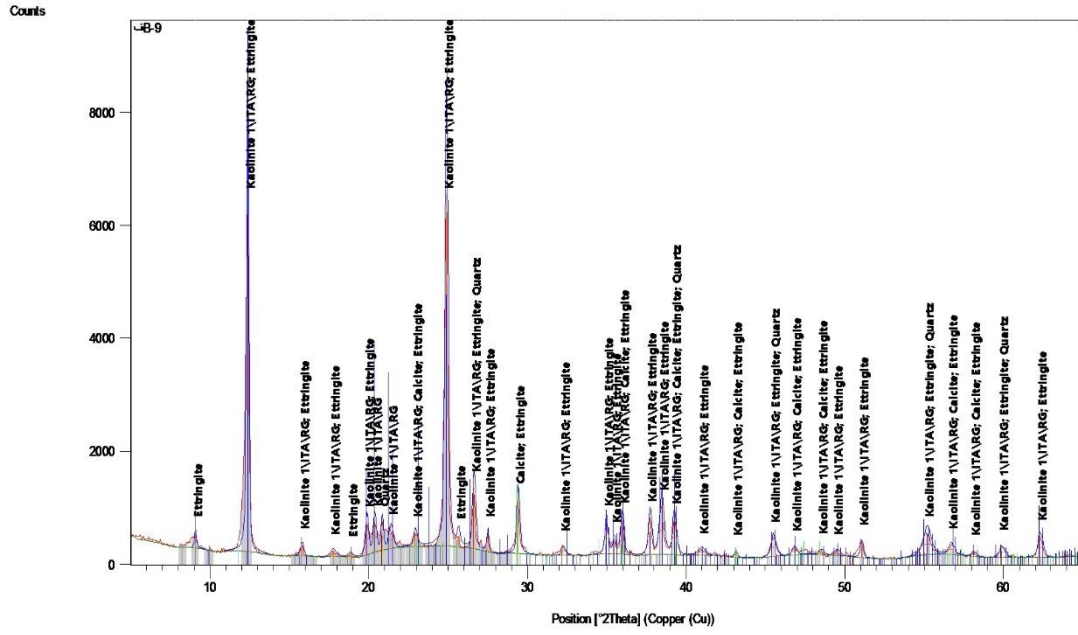
Zemin Tanımı	%25 kum+ %75 kaolin
Kaolin Tipi	chinefill
Kireç Oranı	%4
Sülfat Tipi	-
Sülfat oranı	-
Kür Süresi (Gün)	3
Numune kaynağı	Konsolidasyon
Su muhtevası	Opt
Şişme Oranı	% 3.775
Ettringit	%15



EK 3.8.b: İB8 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu

EK 3.9.a: İB9 numunenin açıklaması.

Zemin Tanımı	%25 kum+ %75 kaolin
Kaolin Tipi	chinefill
Kireç Oranı	%4
Sülfat Tipi	Sodyum sülfat
Sülfat oranı	%3.5
Kür Süresi (Gün)	28
Numune kaynağı	Konsolidasyon
Su muhtevası	Opt
Şişme Oranı	%0.2
Ettringit	%6



EK 3.9.b: İB9 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu

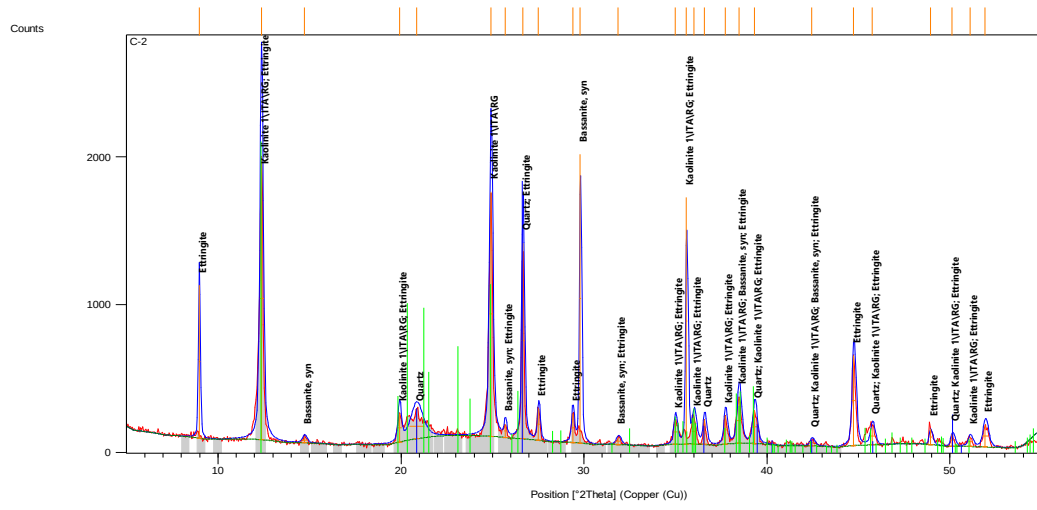
Ek 4: Mineraloji-Petrografi Anabilim Dalı Laboratuvarlarında (%75Chinafill+%25Kum)+ %4 Kireç numuneleri için yapılan XRD analizleri, kodlamaları ve XRD sonuçları aşağıdaki tabloda ve grafiklerde sunmaktadır. **(İkinci grup)**

EK 4.1: Chinafill kaolin numuneleri için XRD analizleri ve kodlamaları.

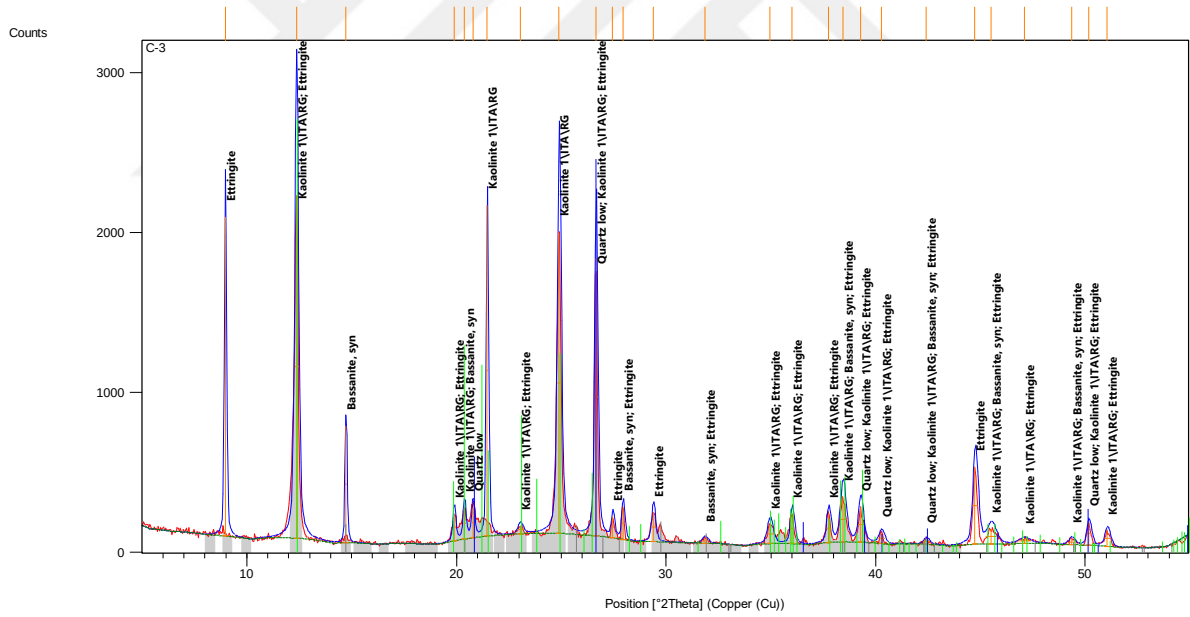
Kod	Numune Tipi	Kalsiyum Sulfat(%)	Su Muh.	Kür (gün)	Kür tipi	Notlar
C1	—	—	—	—	—	
C2	Konsolidasyon	3.5	Opt	3	Normal	
C3	Konsolidasyon	5	Opt	3	Normal	
C4	Konsolidasyon	10	Opt	3	Normal	
C5	Konsolidasyon	3.5	Kuru	3	Normal	
C6	Konsolidasyon	5	Kuru	3	Normal	
C7	Konsolidasyon	10	Kuru	3	Normal	
C8	Konsolidasyon	3.5	Islak	3	Normal	
C9	Konsolidasyon	5	Islak	3	Normal	
C10	Konsolidasyon	10	Islak	3	Normal	
C11	Konsolidasyon	3.5	Opt	28	Normal	
C12	Konsolidasyon	5	Opt	28	Normal	
C13	Konsolidasyon	10	Opt	28	Normal	
C14	Konsolidasyon	3.5	Kuru	28	Normal	
C15	Konsolidasyon	5	Kuru	28	Normal	
C16	Konsolidasyon	10	Kuru	28	Normal	
C17	Konsolidasyon	3.5	Islak	28	Normal	
C18	Konsolidasyon	5	Islak	28	Normal	
C19	Konsolidasyon	10	Islak	28	Normal	
C20	Serbest Şişme	3.5	Opt	28	Normal	Kum Seviyesinden
C21	Serbest Şişme	5	Opt	28	Normal	Kum Seviyesinden
C22	Serbest Şişme	10	Opt	28	Normal	Kum Seviyesinden
C23	Serbest Şişme	3.5	Kuru	28	Normal	Kum Seviyesinden
C24	Serbest Şişme	5	Kuru	28	Normal	Kum Seviyesinden
C25	Serbest Şişme	10	Kuru	28	Normal	Kum Seviyesinden
C26	Serbest Şişme	3.5	Islak	28	Normal	Kum Seviyesinden
C27	Serbest Şişme	5	Islak	28	Normal	Kum Seviyesinden
C28	Serbest Şişme	10	Islak	28	Normal	Kum Seviyesinden
C29	Serbest Şişme	3.5	Opt	28	Soğuk	Kum Seviyesinden
C30	Serbest Şişme	5	Opt	28	Soğuk	Kum Seviyesinden
C31	Serbest Şişme	10	Opt	28	Soğuk	Kum Seviyesinden
C32	Serbest Şişme	3.5	Opt	28	Normal	Üst taraftan -Çatlak yerinden

EK 4.1(devam): Chinafill kaolin numuneleri için XRD analizleri ve kodlamaları.

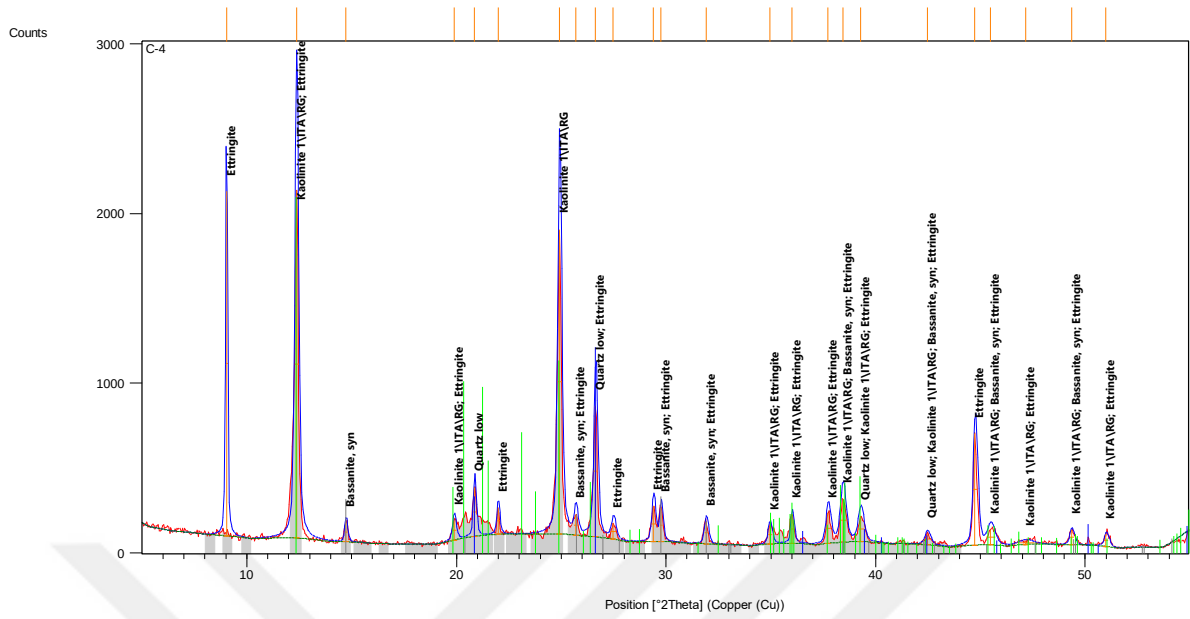
Kod	Numune Tipi	Kalsiyum Sülfat(%)	Su Muh.	Kür (gün)	Kür tipi	Notlar
C33	Serbest Şişme	5	Opt	28	Normal	Üst taraftan -Çatlak yerinden
C34	Serbest Şişme	10	Opt	28	Normal	Üst taraftan -Çatlak yerinden
C35	Serbest Şişme	3.5	Kuru	28	Normal	Üst taraftan -Çatlak yerinden
C36	Serbest Şişme	5	Kuru	28	Normal	Üst taraftan -Çatlak yerinden
C37	Serbest Şişme	10	Kuru	28	Normal	Üst taraftan -Çatlak yerinden
C38	Serbest Şişme	3.5	Islak	28	Normal	Üst taraftan -Çatlak yerinden
C39	Serbest Şişme	5	Islak	28	Normal	Üst taraftan -Çatlak yerinden
C40	Serbest Şişme	10	Islak	28	Normal	Üst taraftan -Çatlak yerinden
C41	Serbest Şişme	3.5	Opt	28	Soğuk	Üst taraftan -Çatlak yerinden
C42	Serbest Şişme	5	Opt	28	Soğuk	Üst taraftan -Çatlak yerinden
C43	Serbest Şişme	10	Opt	28	Soğuk	Üst taraftan -Çatlak yerinden



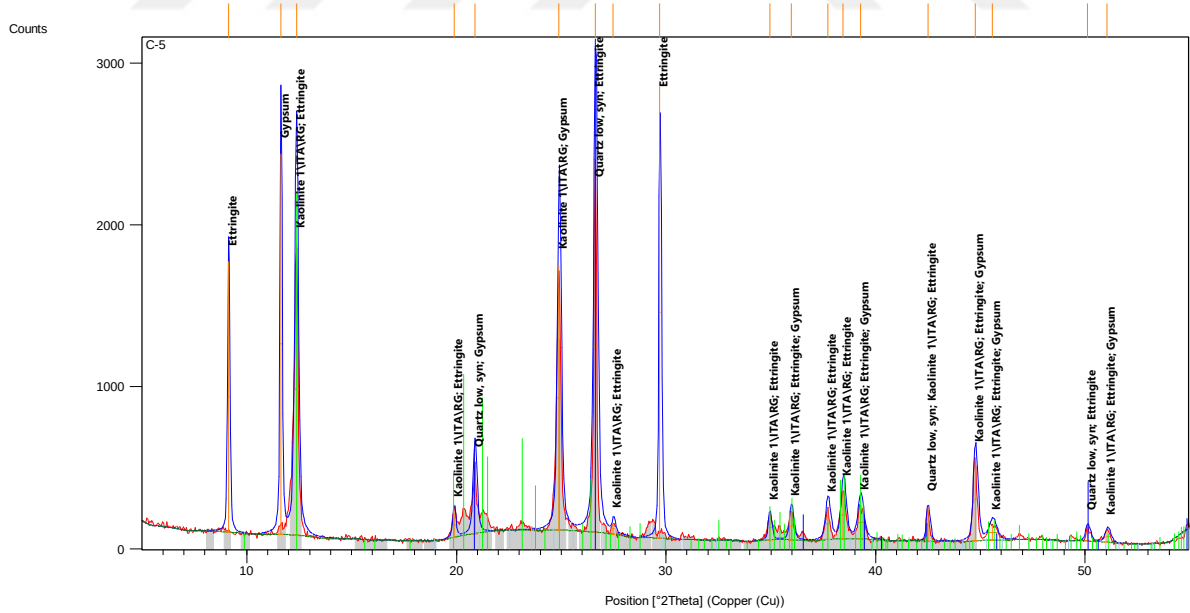
Ek 4.1.1: C2 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



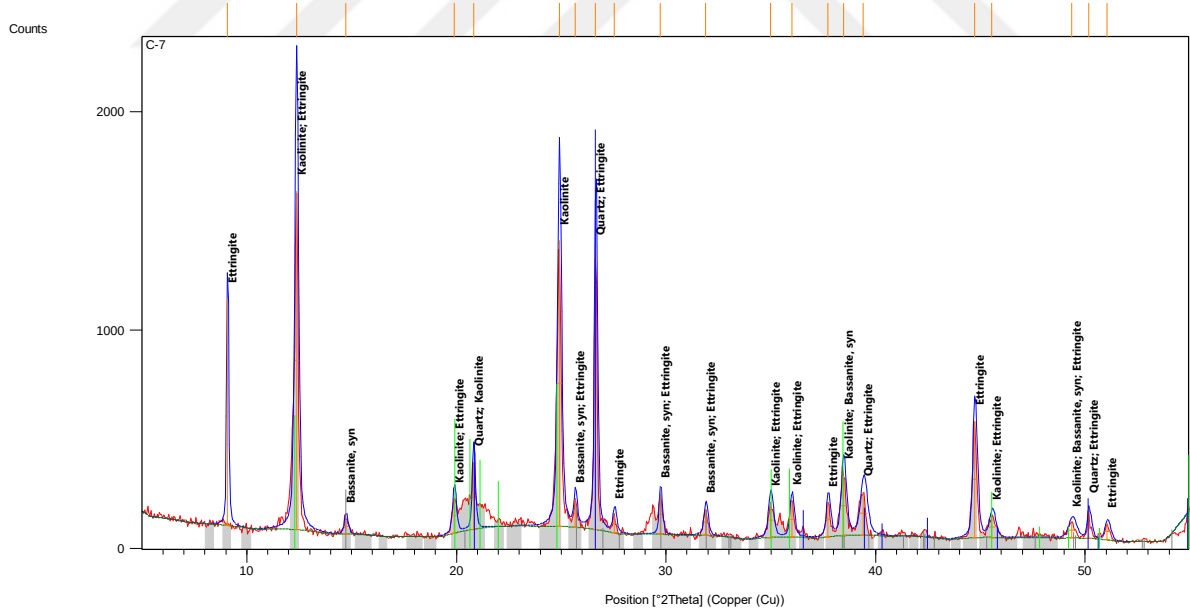
Ek 4.1.2: C3 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

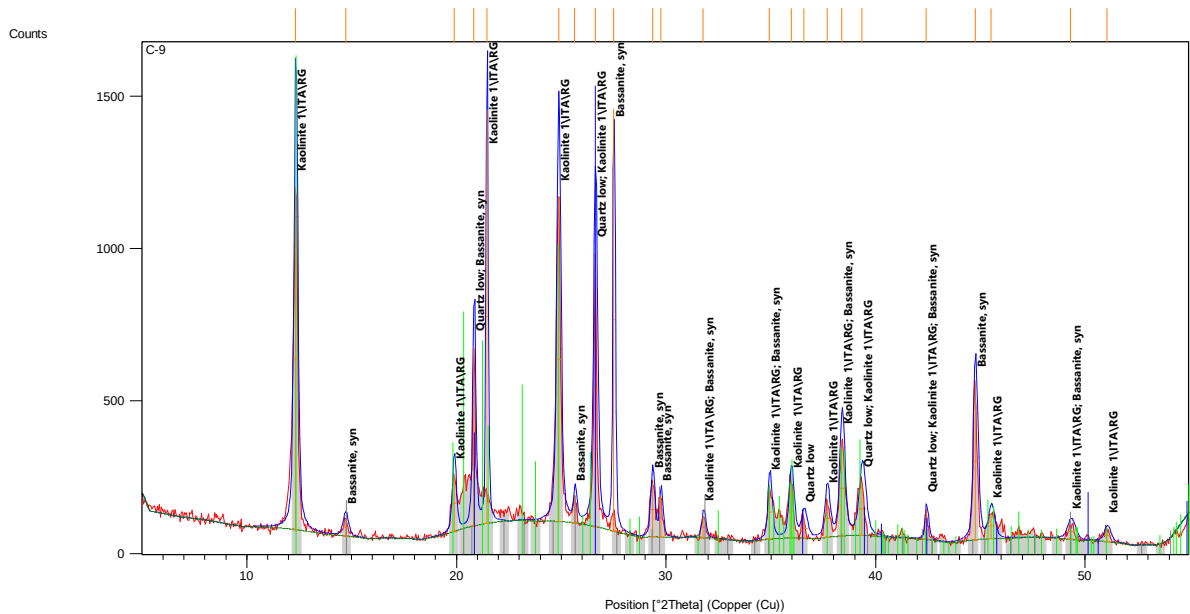


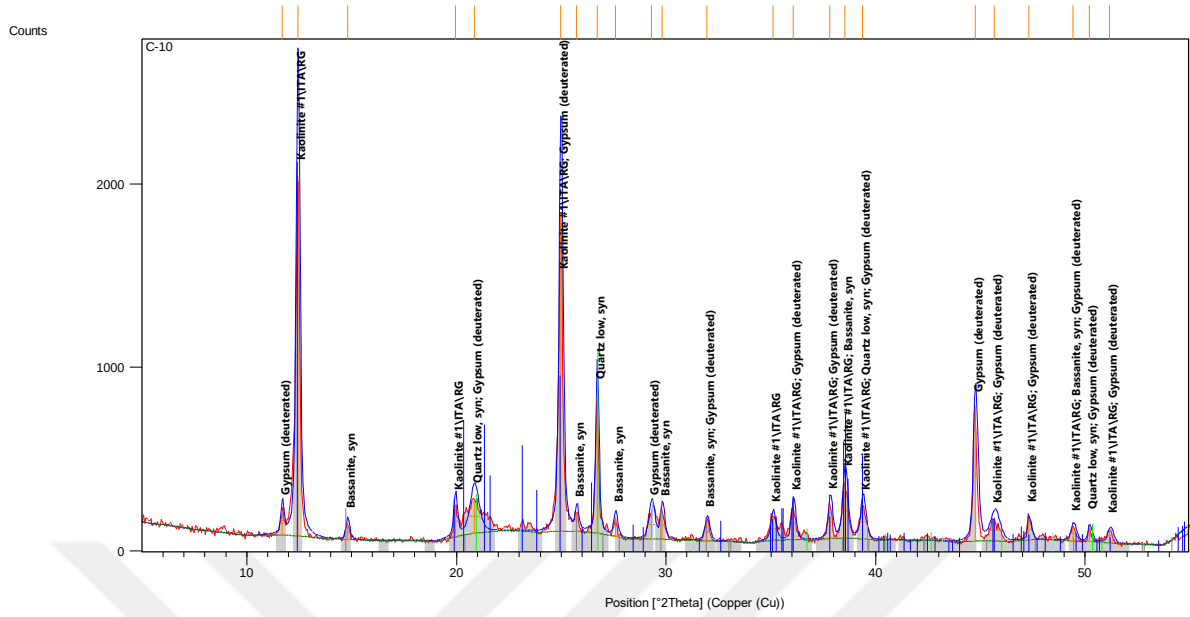
Ek 4.1.3: C4 numuneninin elde edilen tozun XRD spektrumu.



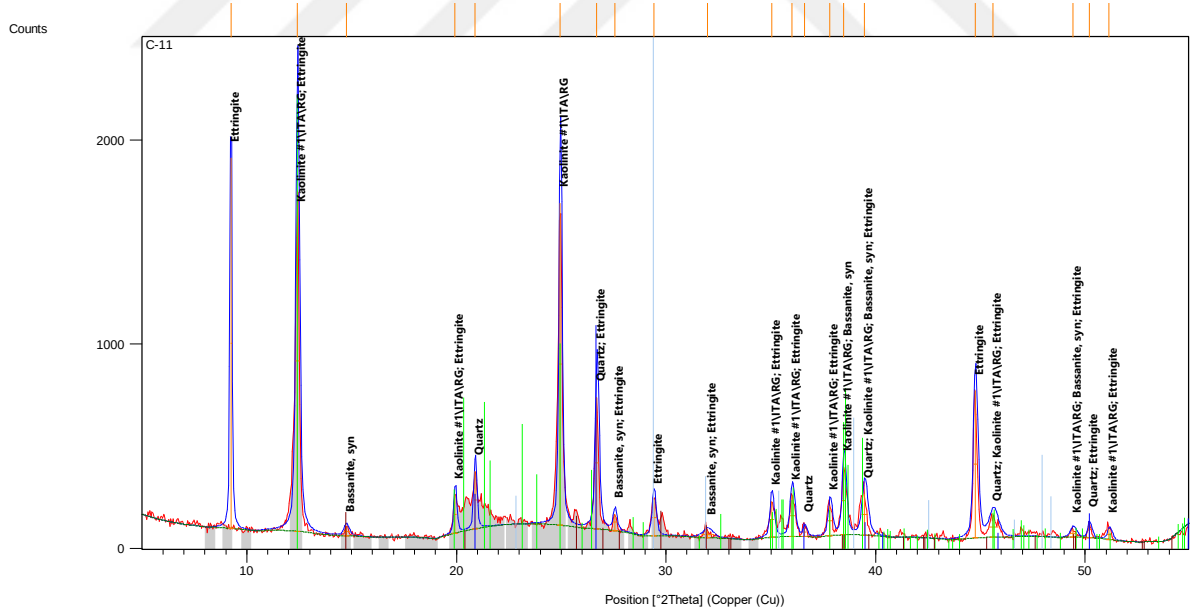
Ek 4.1.4: C5 numuneninin elde edilen tozun XRD spektrumu.



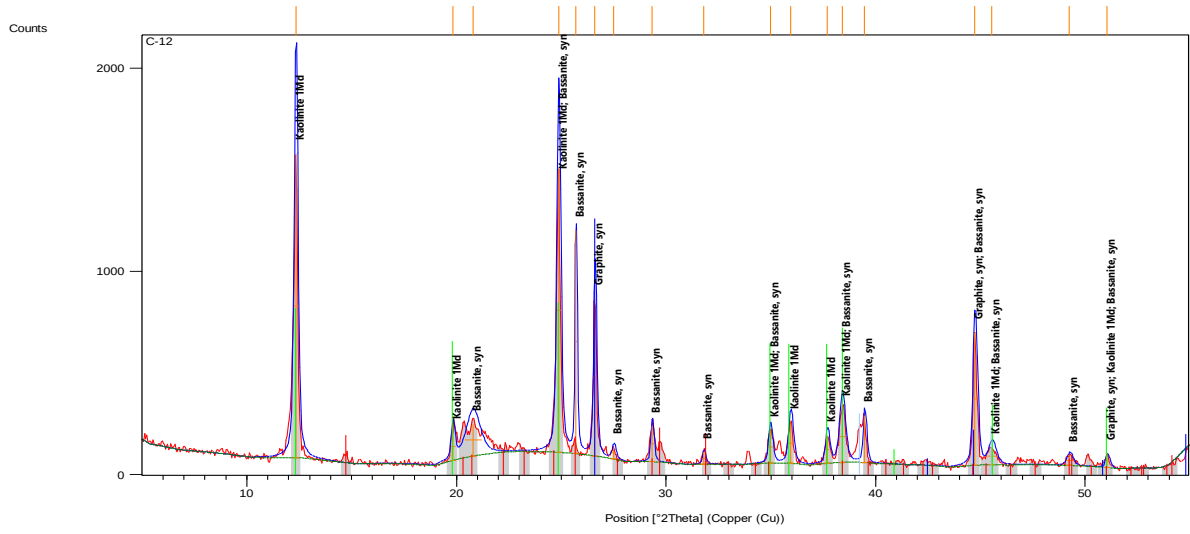




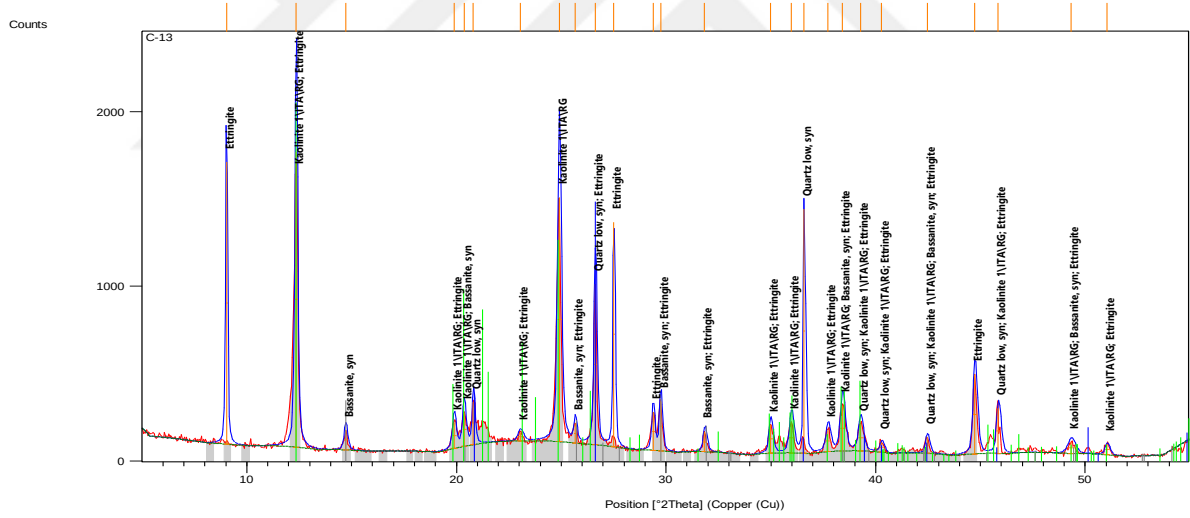
Ek 4.1.9: C10 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



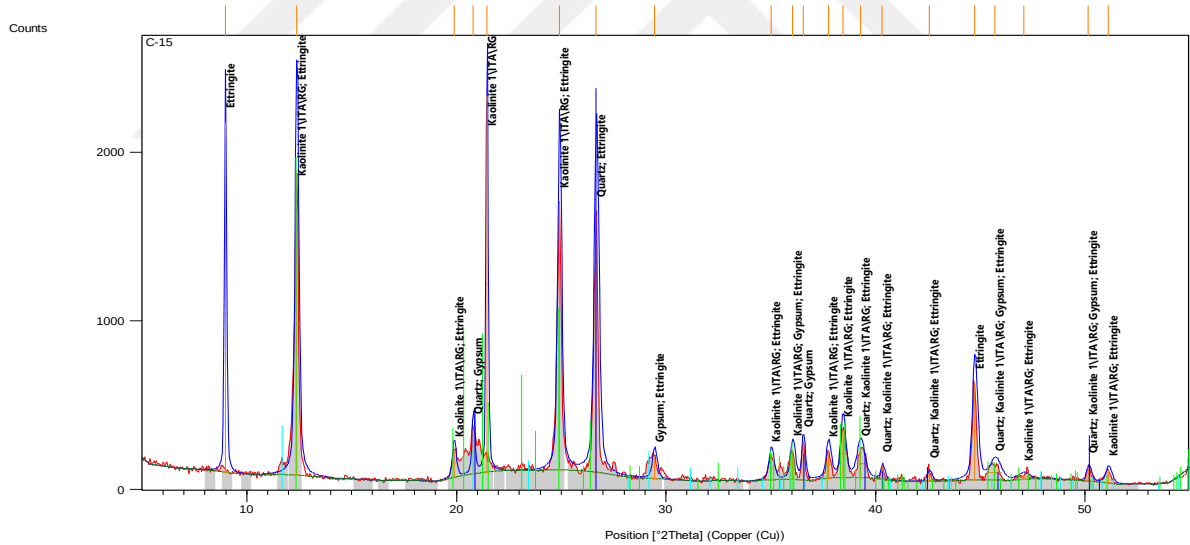
Ek 4.1.10: C11 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

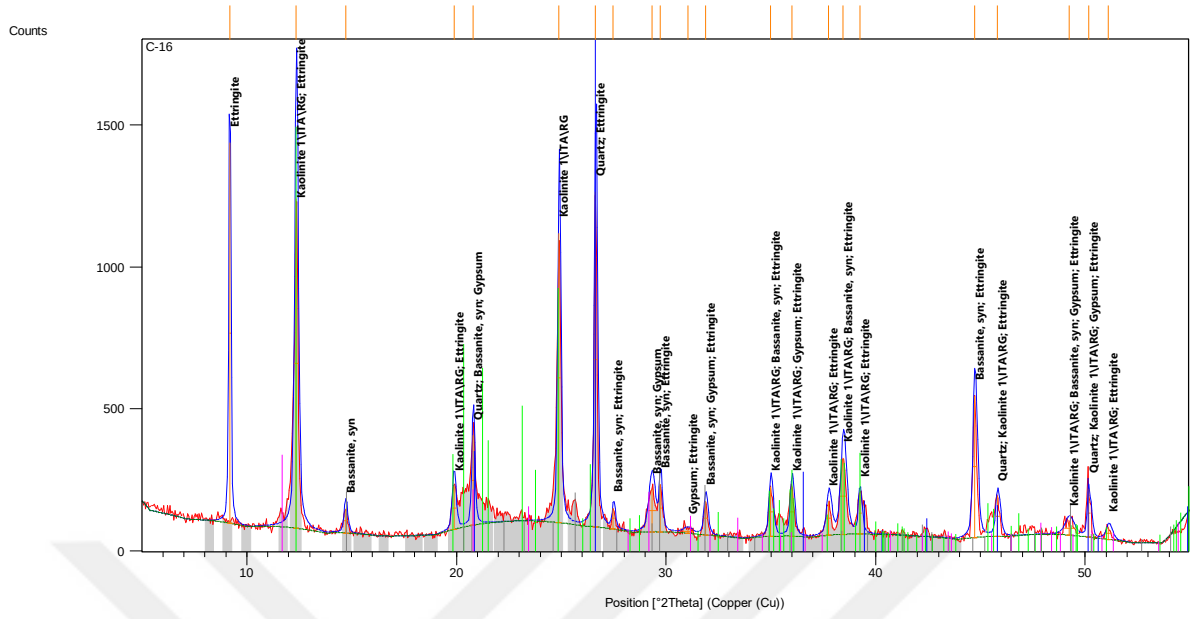


Ek 4.1.11: C12 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

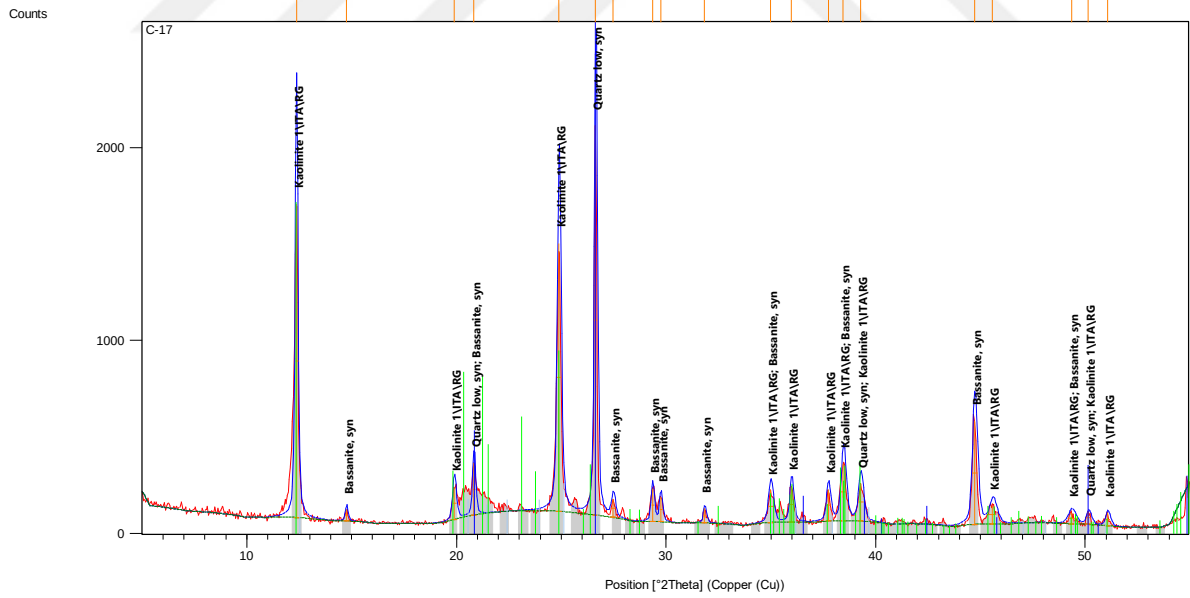


Ek 4.1.12: C13 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

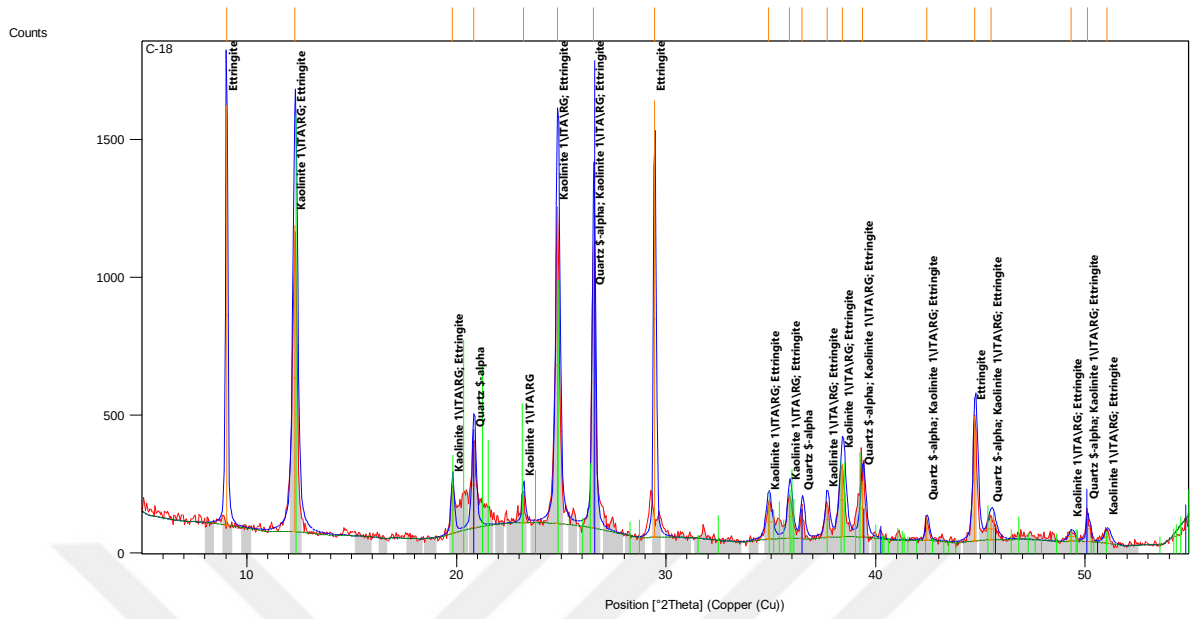




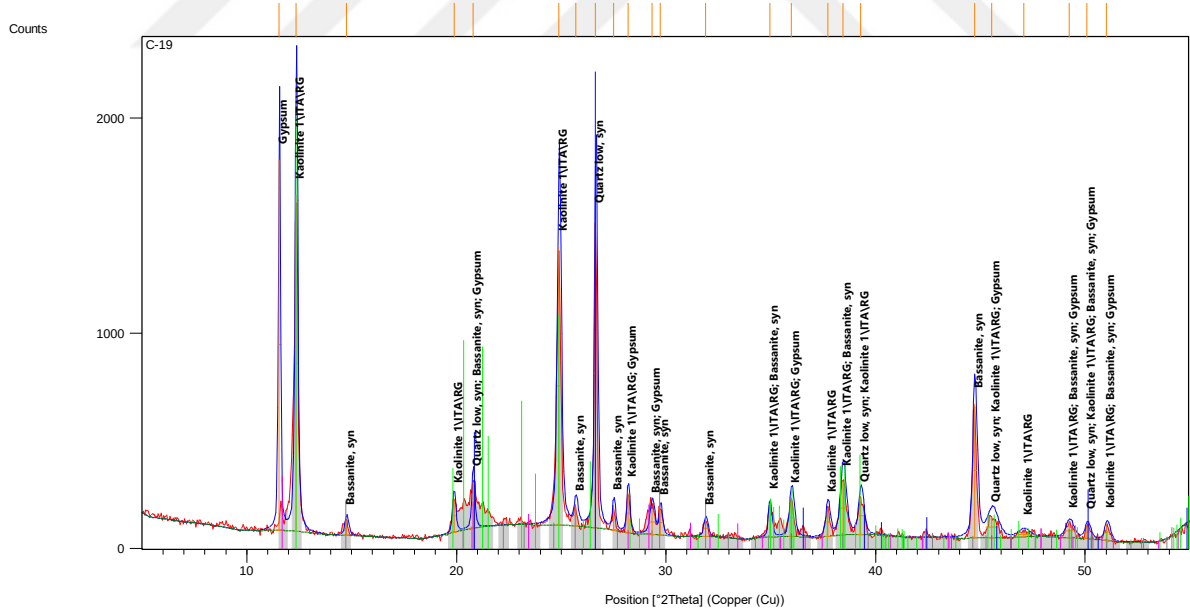
Ek 4.1.15: C16 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



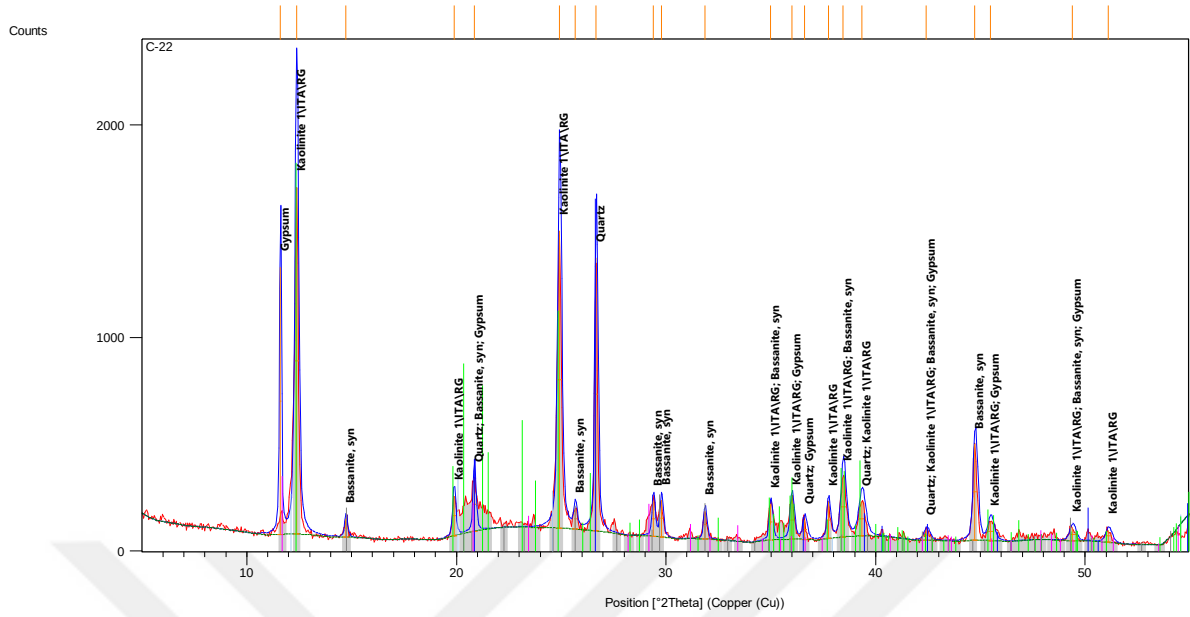
Ek 4.1.16: C17 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



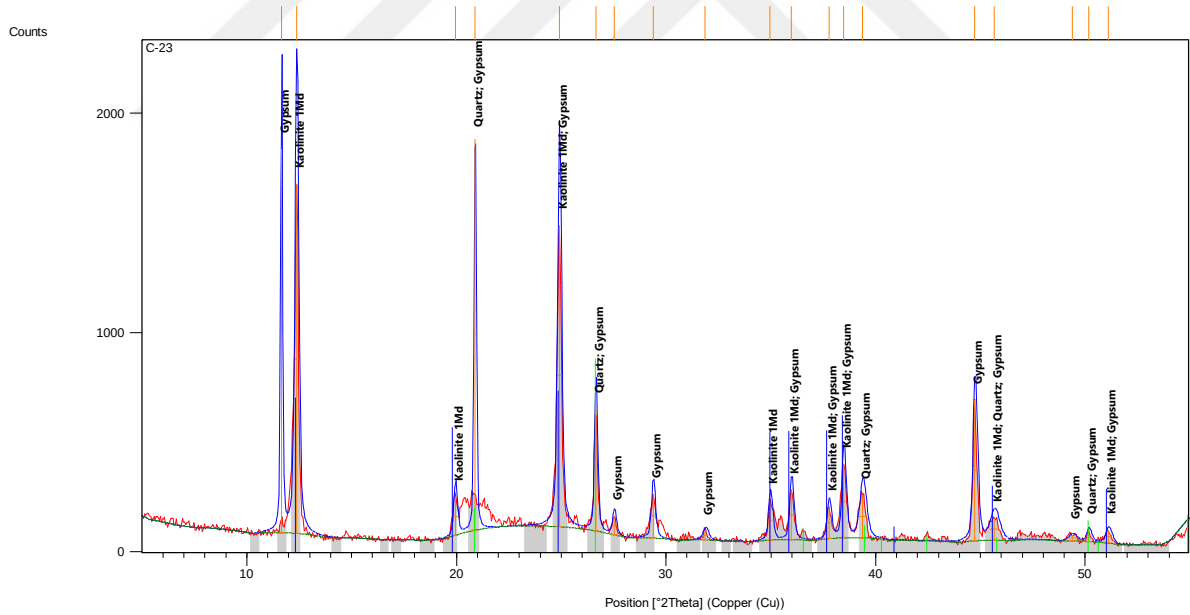
Ek 4.1.17: C18 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



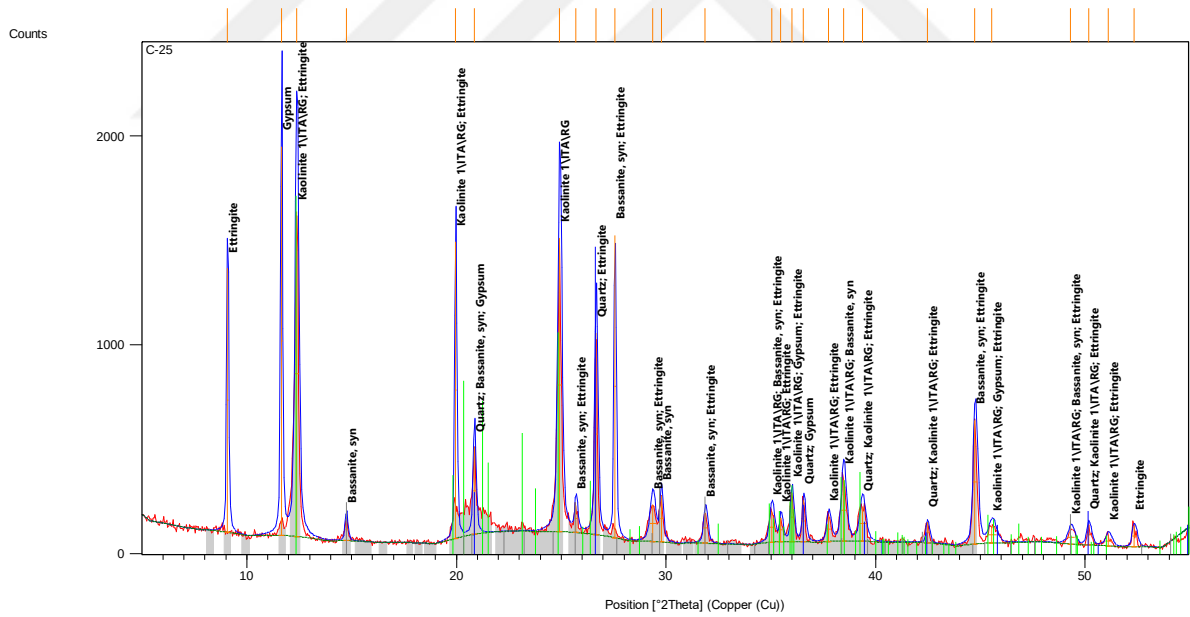
Ek 4.1.18: C19 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

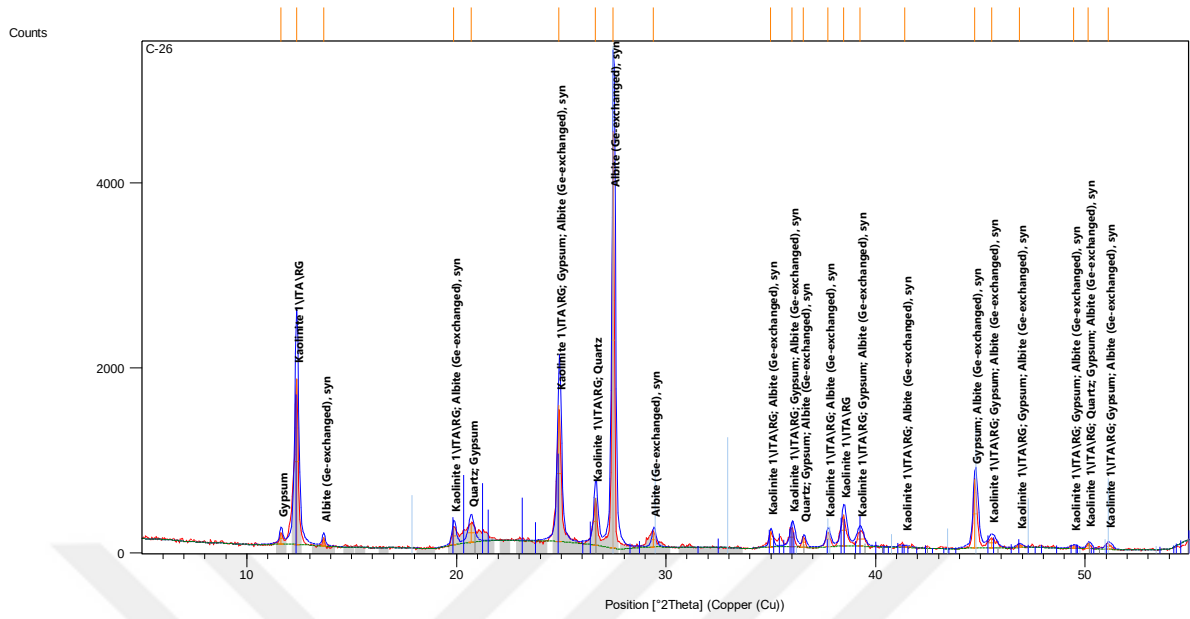


Ek 4.1.21: C22 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

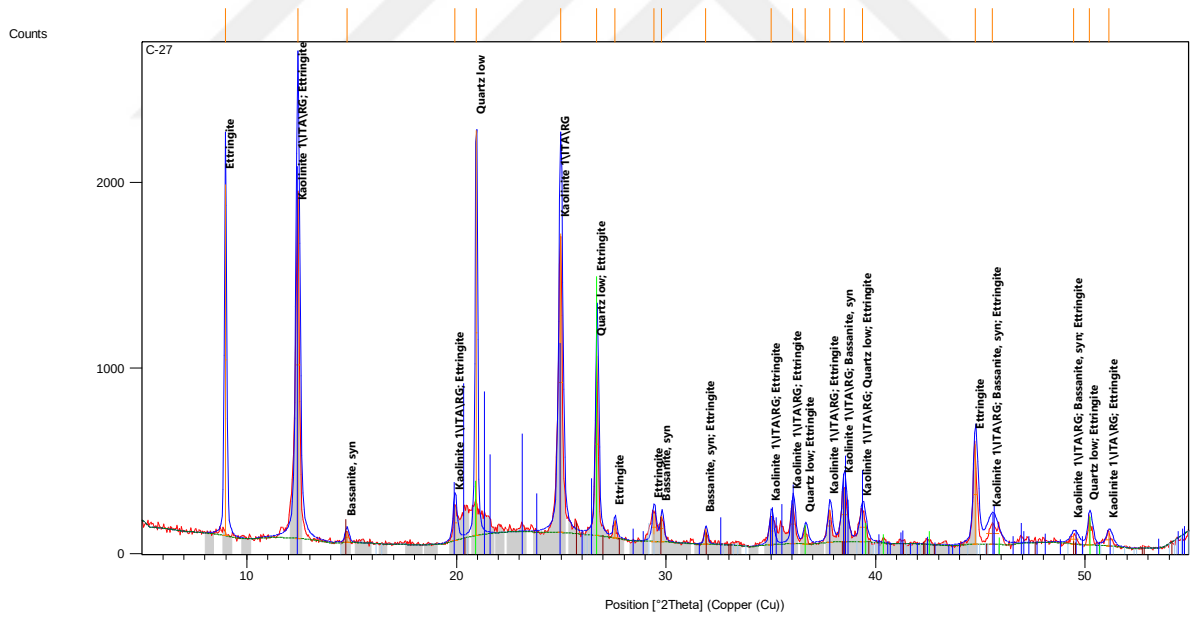


Ek 4.1.22: C23 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

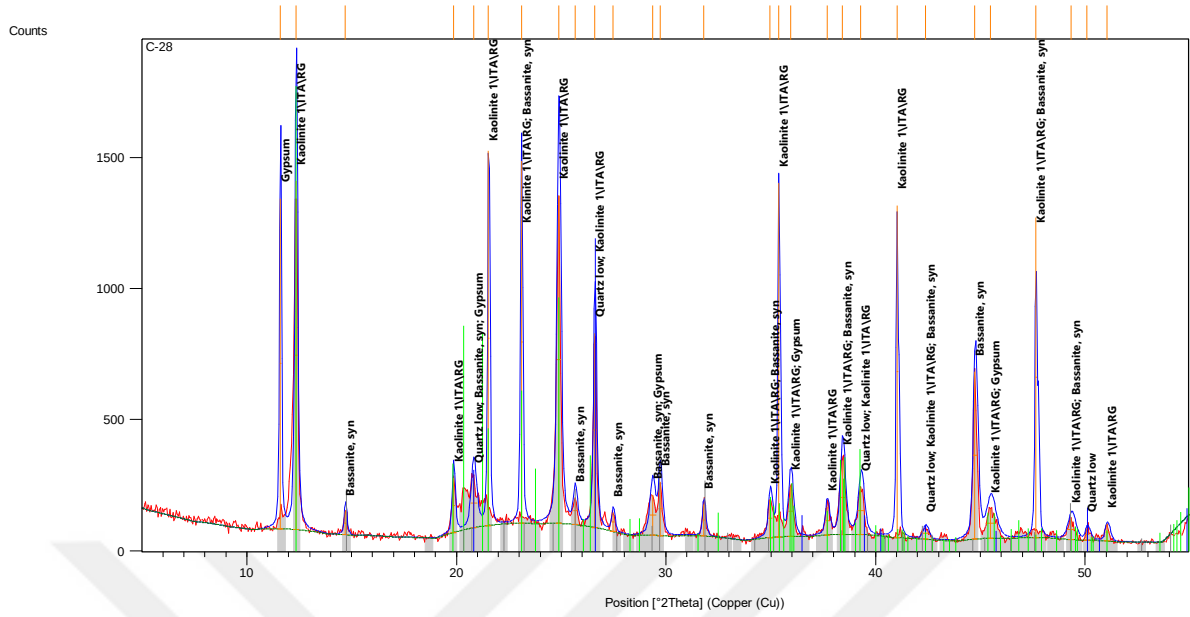




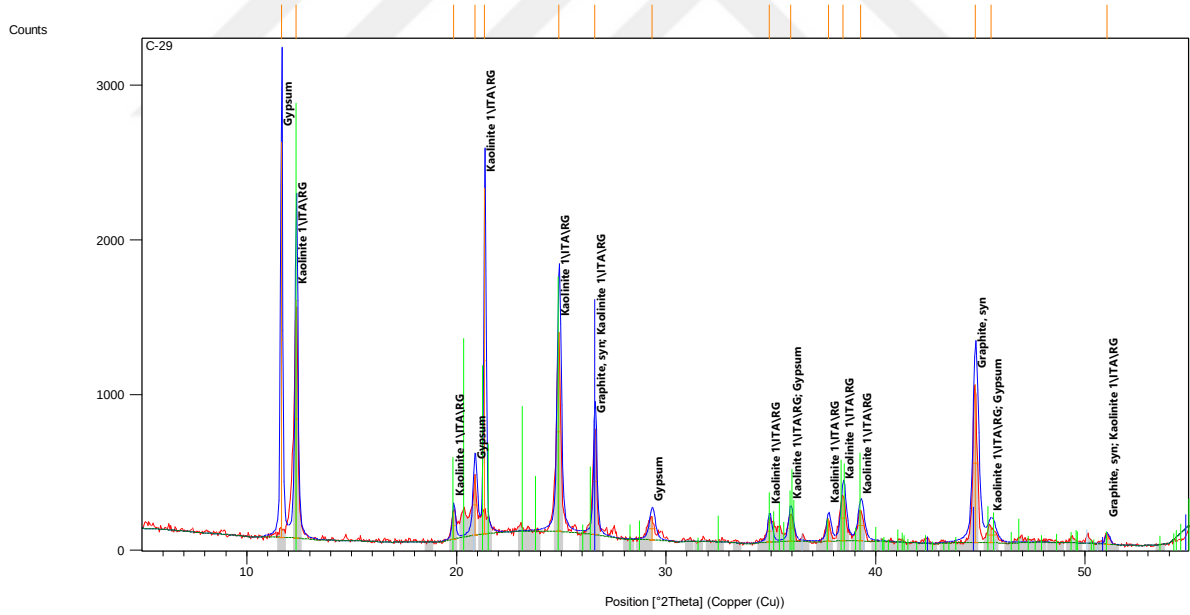
Ek 4.1.25: C26 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



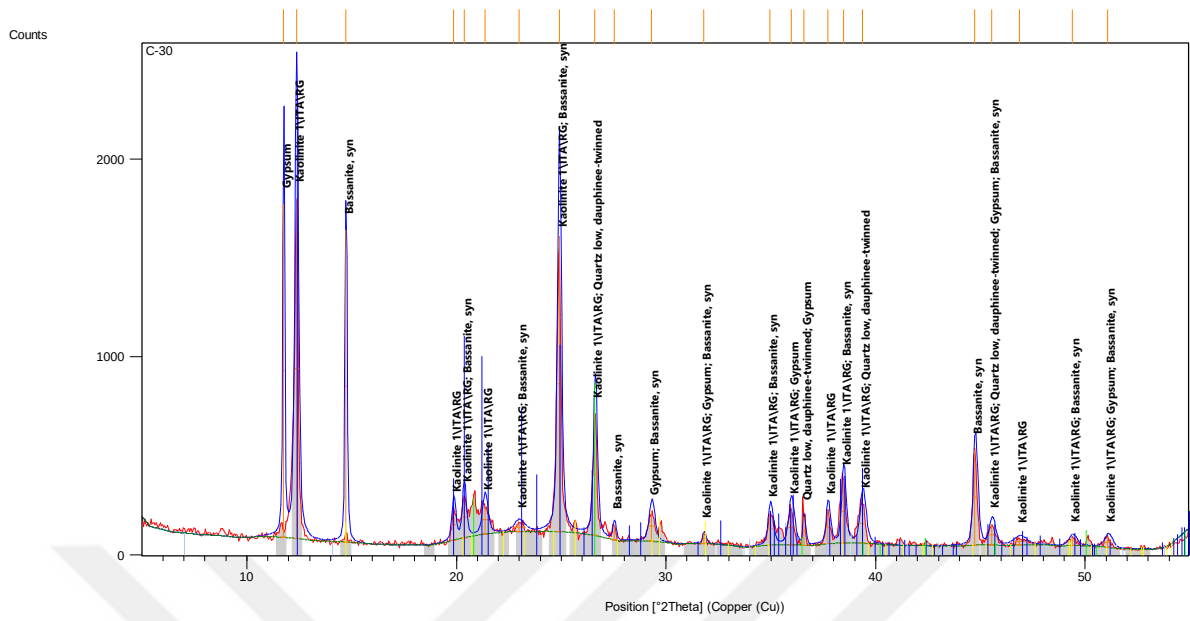
Ek 4.1.26: C27 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



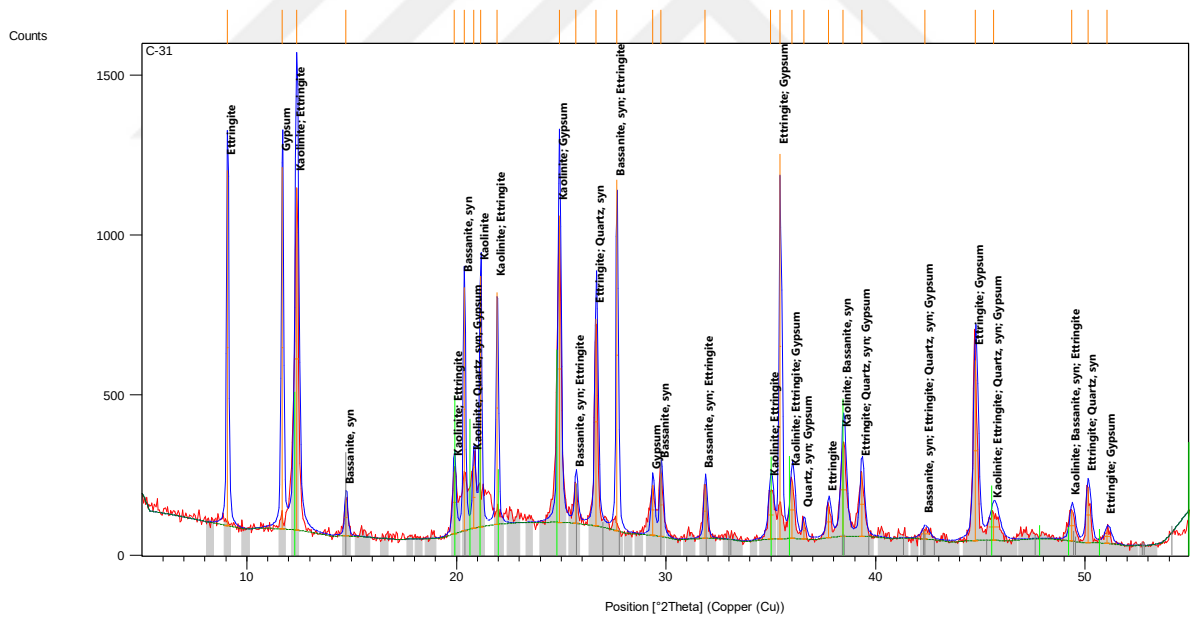
Ek 4.1.27: C28 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



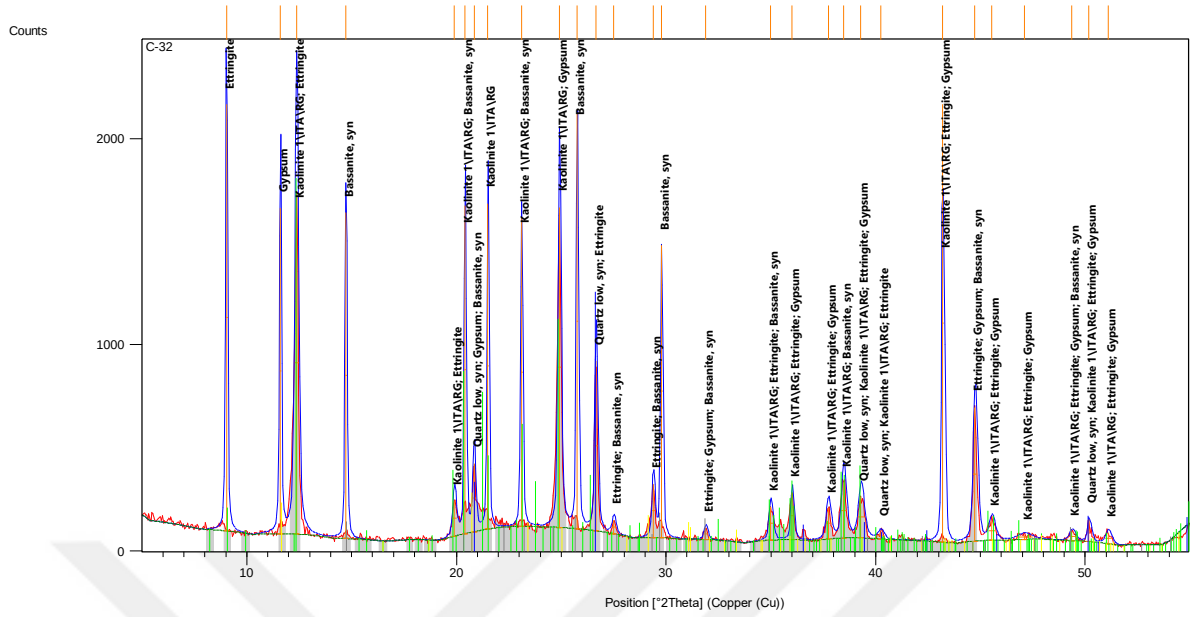
Ek 4.1.28: C29 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



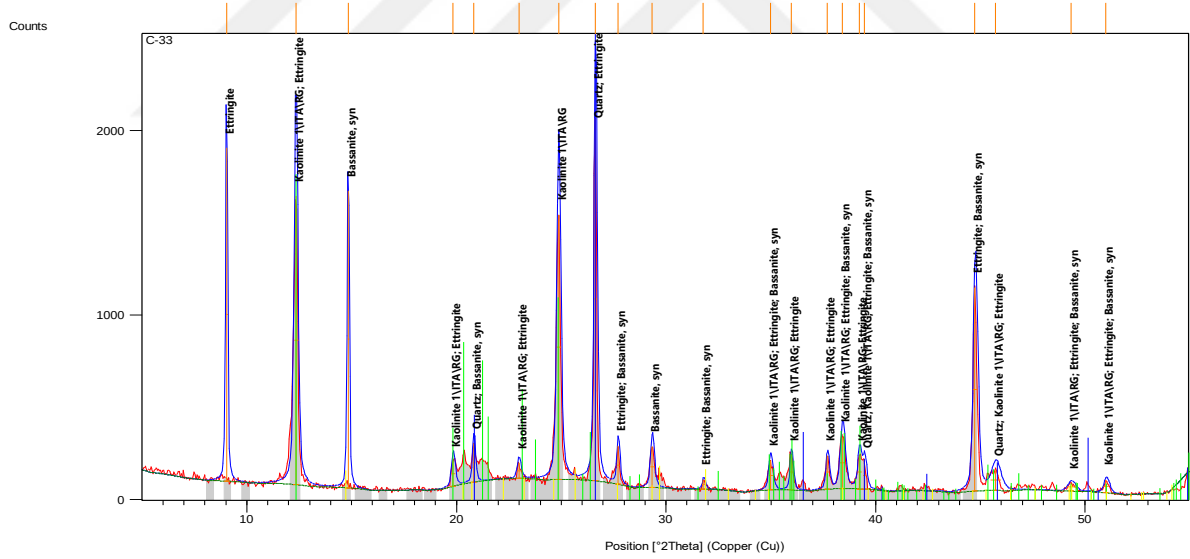
Ek 4.1.29: C30 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



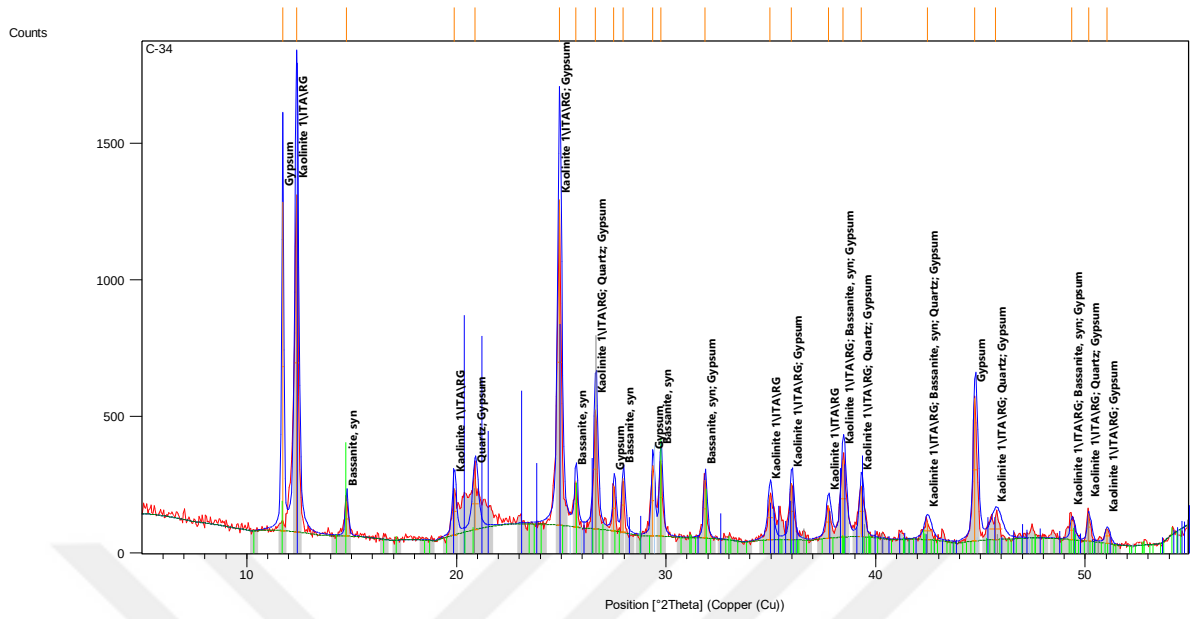
Ek 4.1.30: C31 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



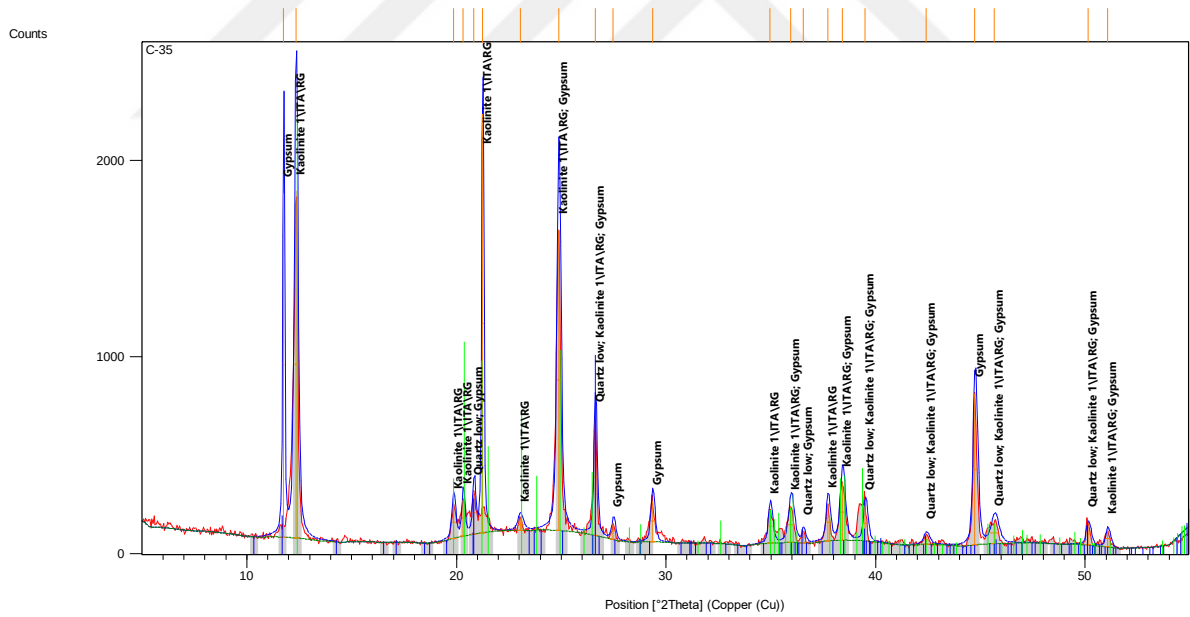
Ek 4.1.31: C32 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



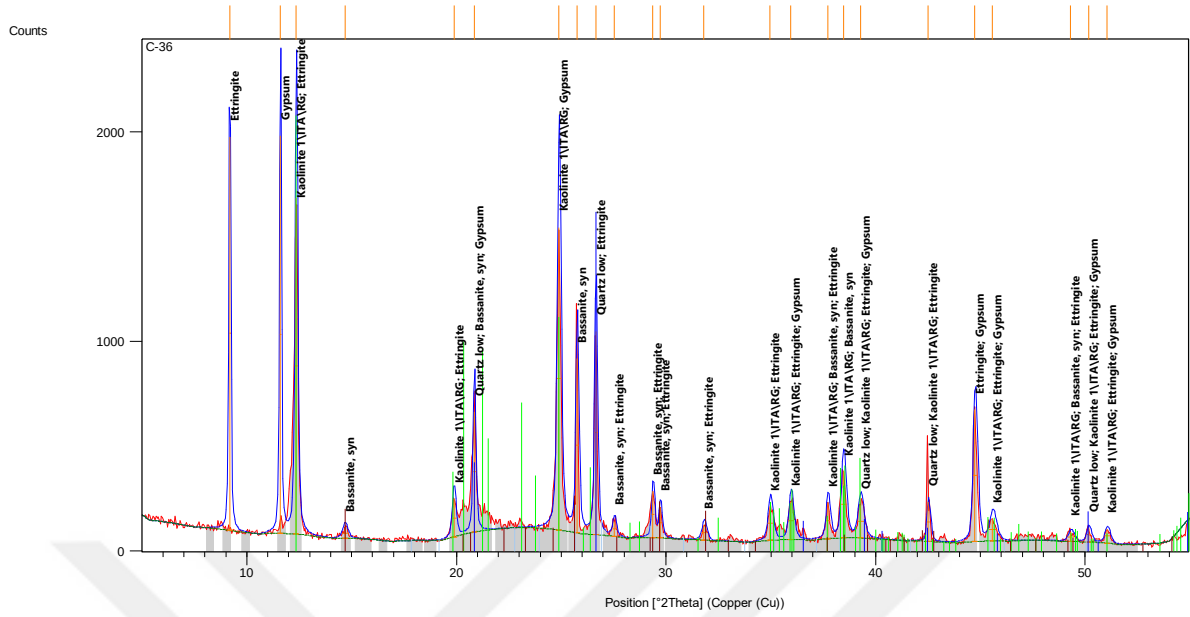
Ek 4.1.32: C33 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



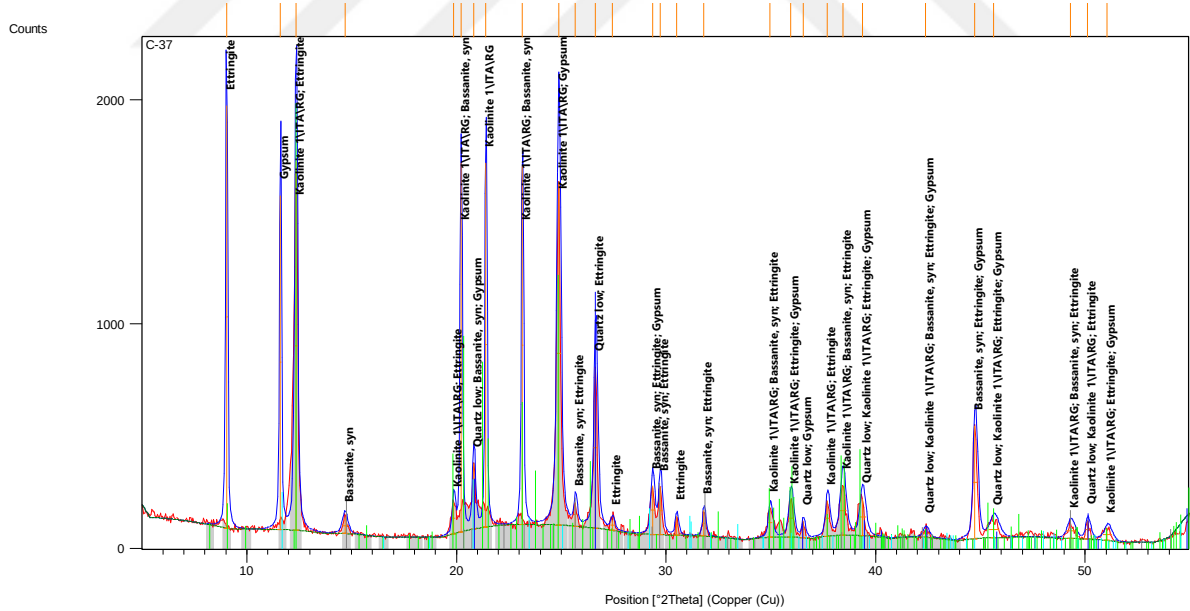
Ek 4.1.33: C34 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



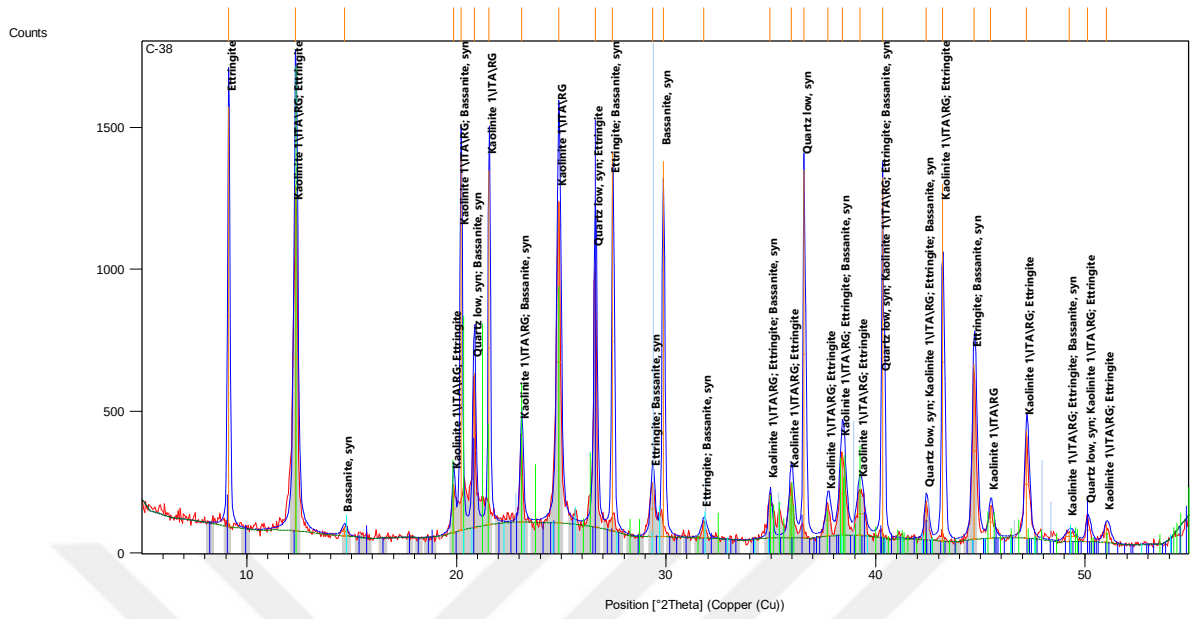
Ek 4.1.34: C35 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



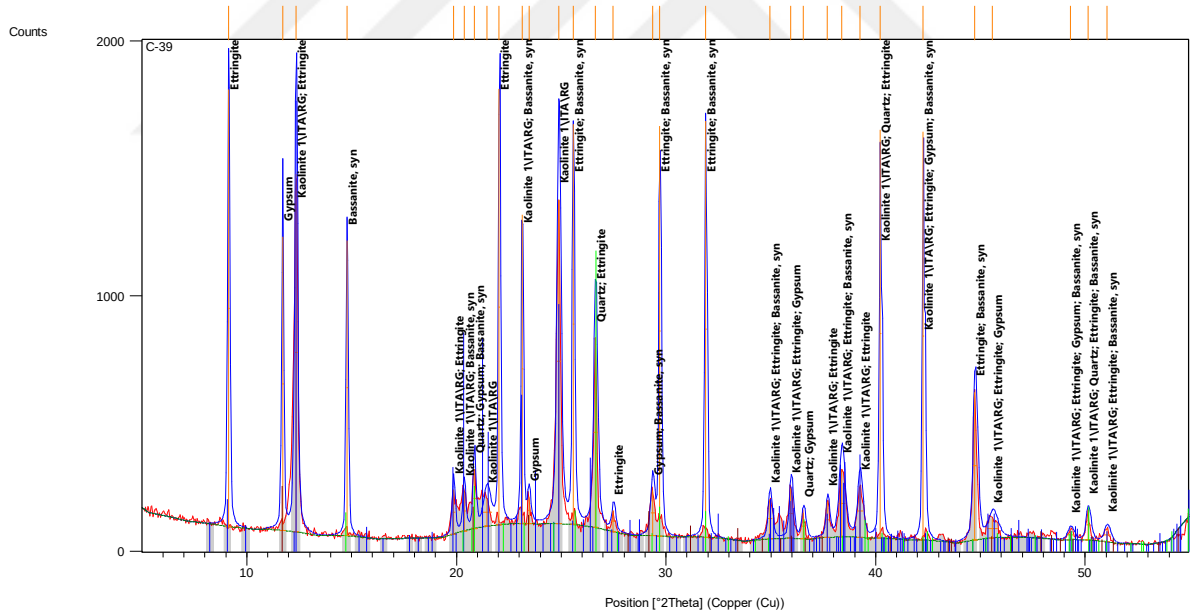
Ek 4.1.35: C36 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



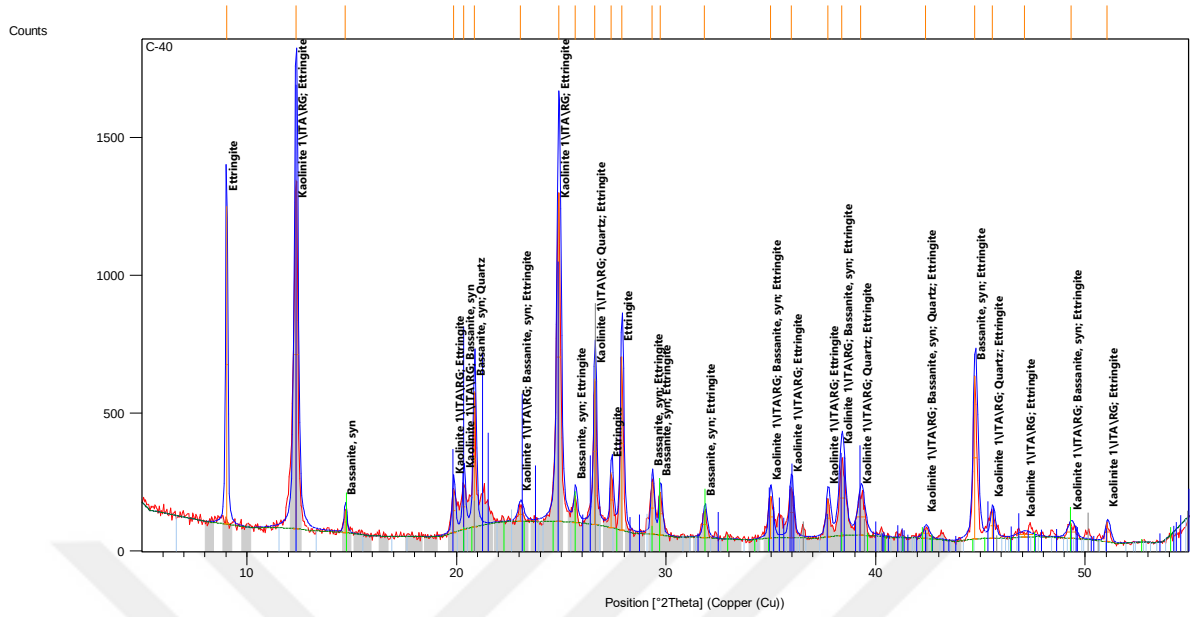
Ek 4.1.36: C37 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



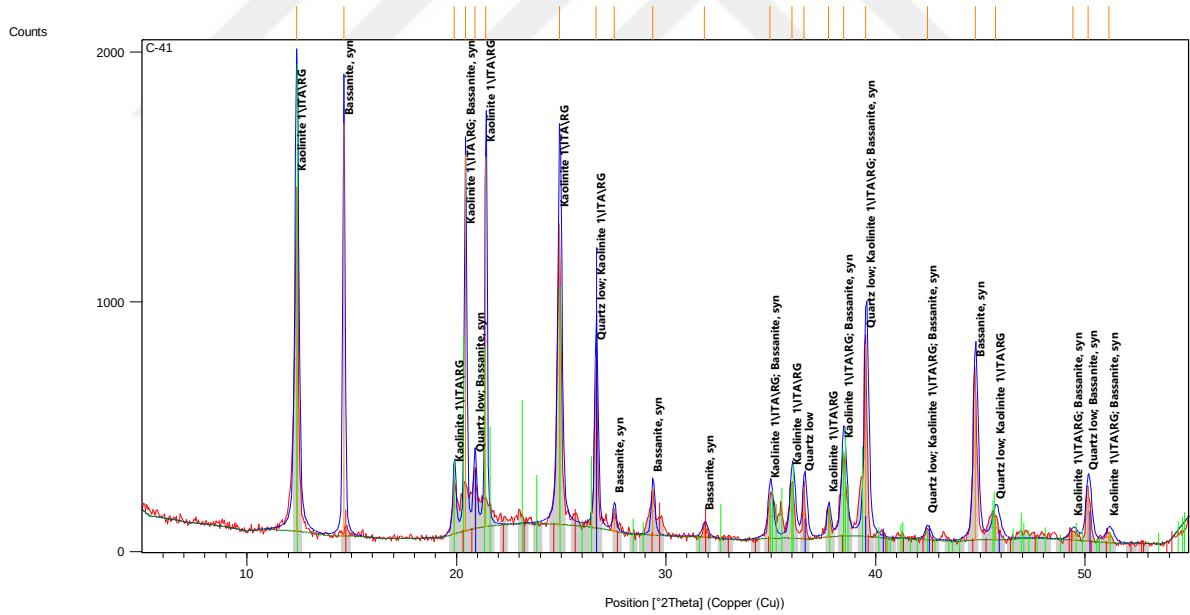
Ek 4.1.37: C38 numuneninin elde edilen tozun XRD spektrumu.



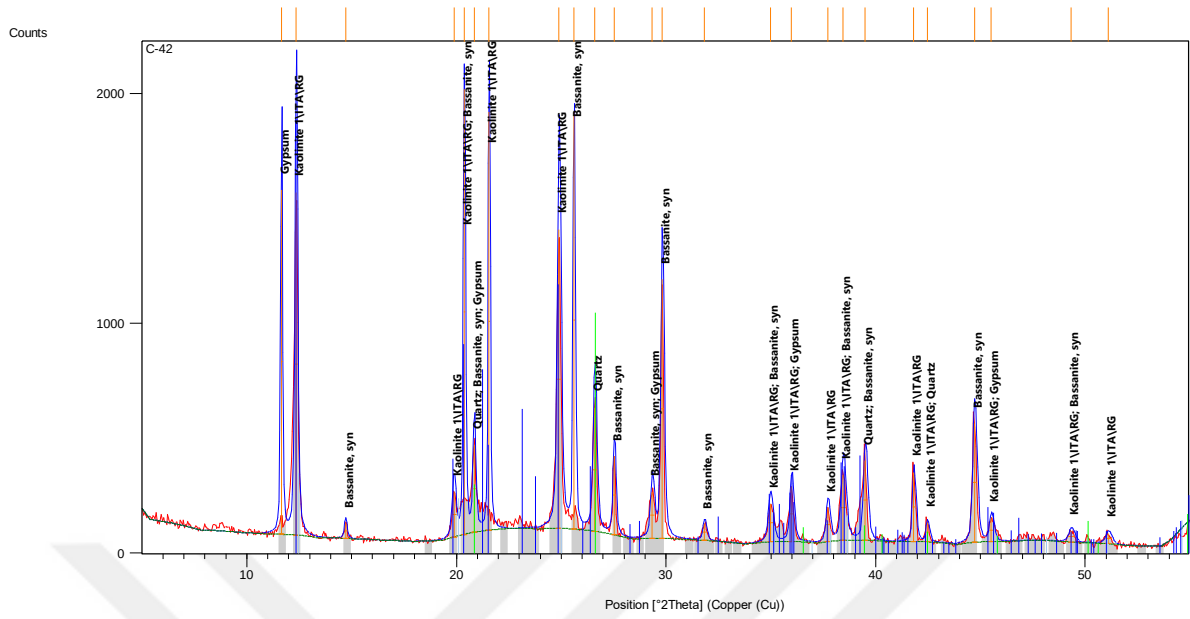
Ek 4.1.38: C39 numuneninin elde edilen tozun XRD spektrumu.



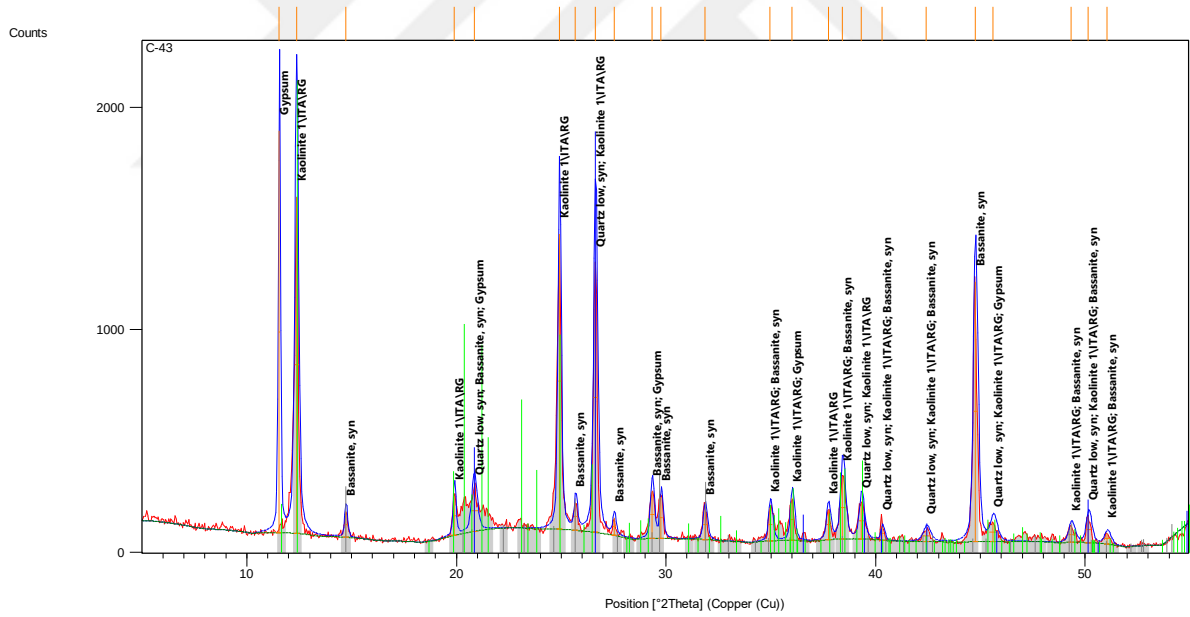
Ek 4.1.39: C40 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



Ek 4.1.40: C41 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



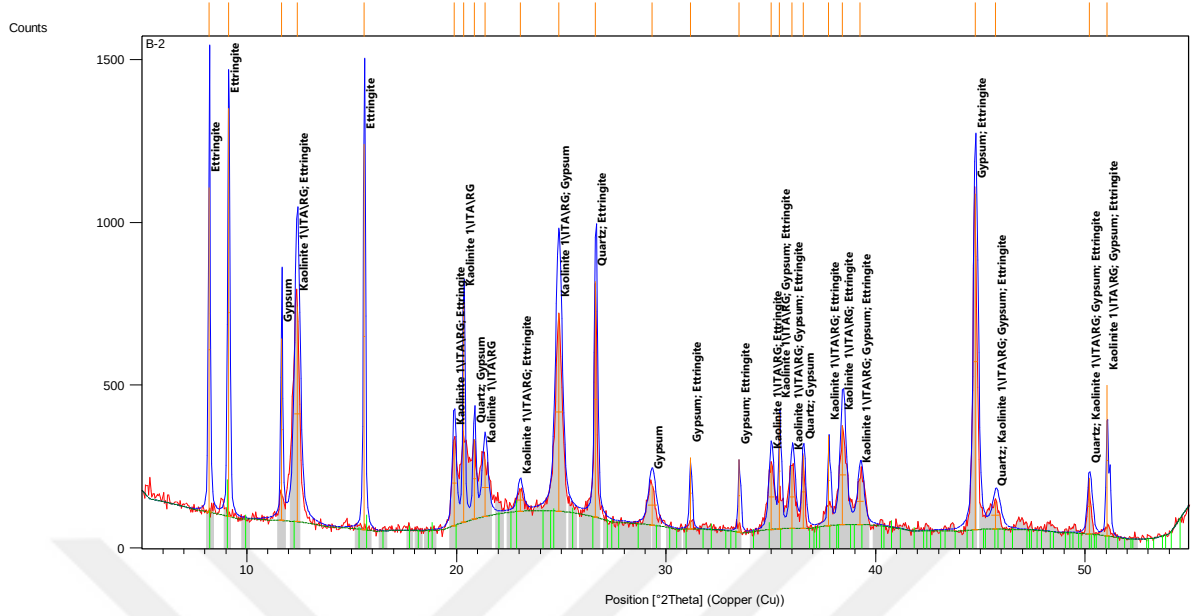
Ek 4.1.41: C42 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



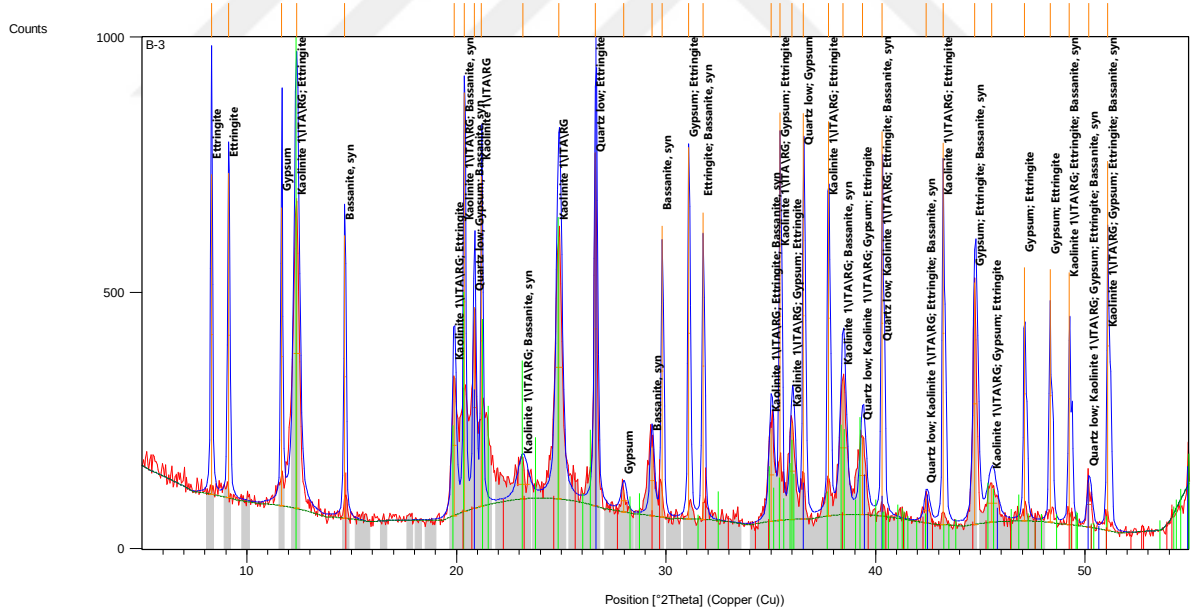
Ek 4.1.42: C43 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

EK 4.2: K-Brite kaolin numuneleri için XRD analizleri ve kodlamaları.

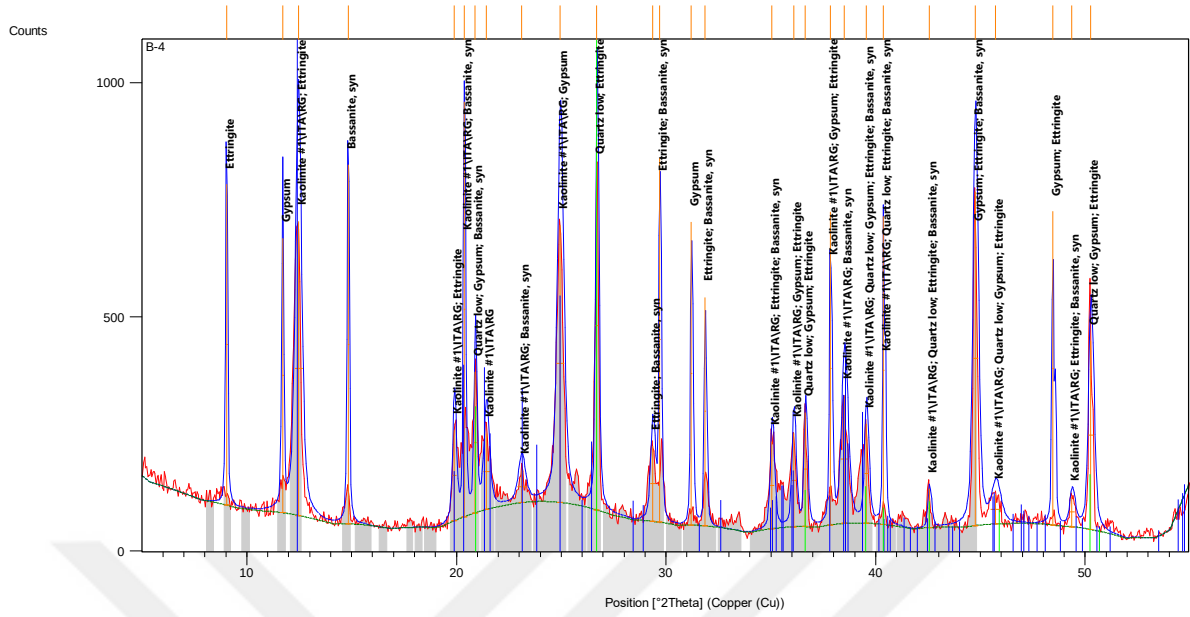
Kod	Numune Tipi	Kalsiyum sülfat(%)	Su Muh.	Kür (gün)	Kür tipi	Notlar
B1	—	—	—	—	—	
B2	Konsolidasyon	3.5	Opt	3	Normal	
B3	Konsolidasyon	5	Opt	3	Normal	
B4	Konsolidasyon	10	Opt	3	Normal	
B5	Konsolidasyon	3.5	Kuru	3	Normal	
B6	Konsolidasyon	5	Kuru	3	Normal	
B7	Konsolidasyon	10	Kuru	3	Normal	
B8	Konsolidasyon	3.5	Islak	3	Normal	
B9	Konsolidasyon	5	Islak	3	Normal	
B10	Konsolidasyon	10	Islak	3	Normal	
B11	Konsolidasyon	3.5	Opt	28	Normal	
B12	Konsolidasyon	5	Opt	28	Normal	
B13	Konsolidasyon	10	Opt	28	Normal	
B14	Konsolidasyon	3.5	Kuru	28	Normal	
B15	Konsolidasyon	5	Kuru	28	Normal	
B16	Konsolidasyon	10	Kuru	28	Normal	
B17	Konsolidasyon	3.5	Islak	28	Normal	
B18	Konsolidasyon	5	Islak	28	Normal	
B19	Konsolidasyon	10	Islak	28	Normal	
B20	Konsolidasyon	3.5	Islak	28	Normal	Sadece Kür(Deneysiz)
B21	Konsolidasyon	5	Islak	28	Normal	Sadece Kür(Deneysiz)
B22	Konsolidasyon	10	Islak	28	Normal	Sadece Kür(Deneysiz)
B23	Serbest Şişme	3.5	Opt	28	Dışarda	Kum Seviyesinden
B24	Serbest Şişme	5	Opt	28	Dışarda	Kum Seviyesinden
B25	Serbest Şişme	10	Opt	28	Dışarda	Kum Seviyesinden
B26	Serbest Şişme	3.5	Opt	28	Soğuk	Üst taraftan -Çatlak yerinden
B27	Serbest Şişme	5	Opt	28	Soğuk	Üst taraftan -Çatlak yerinden
B28	Serbest Şişme	10	Opt	28	Soğuk	Üst taraftan -Çatlak yerinden



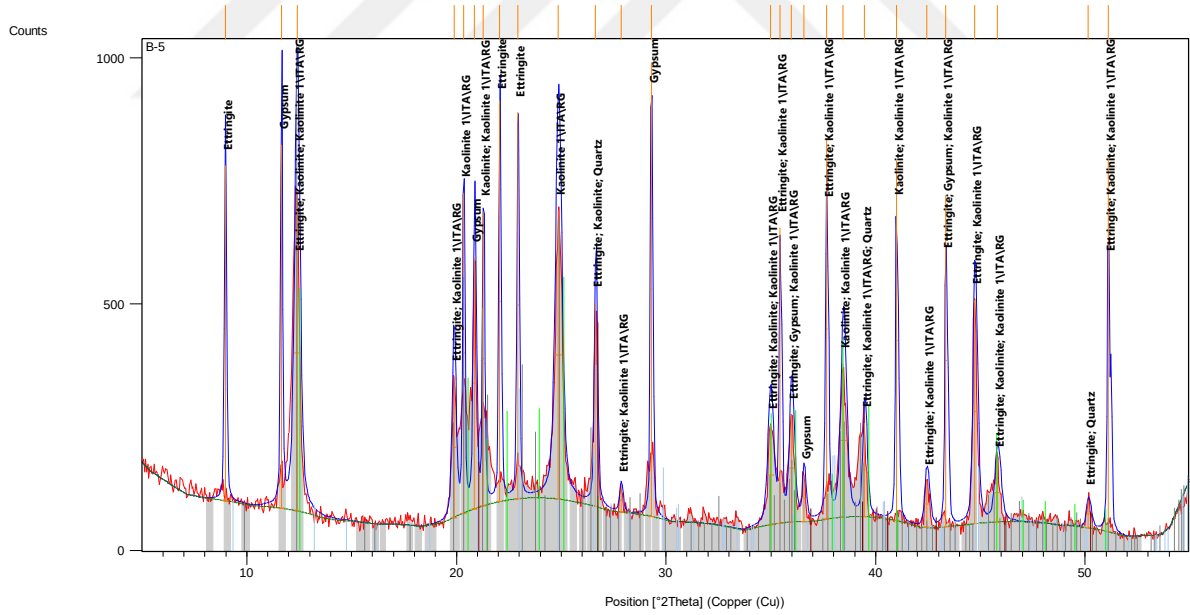
Ek 4.2.1: B2 numuneninin elde edilen tozun XRD spektrumu.



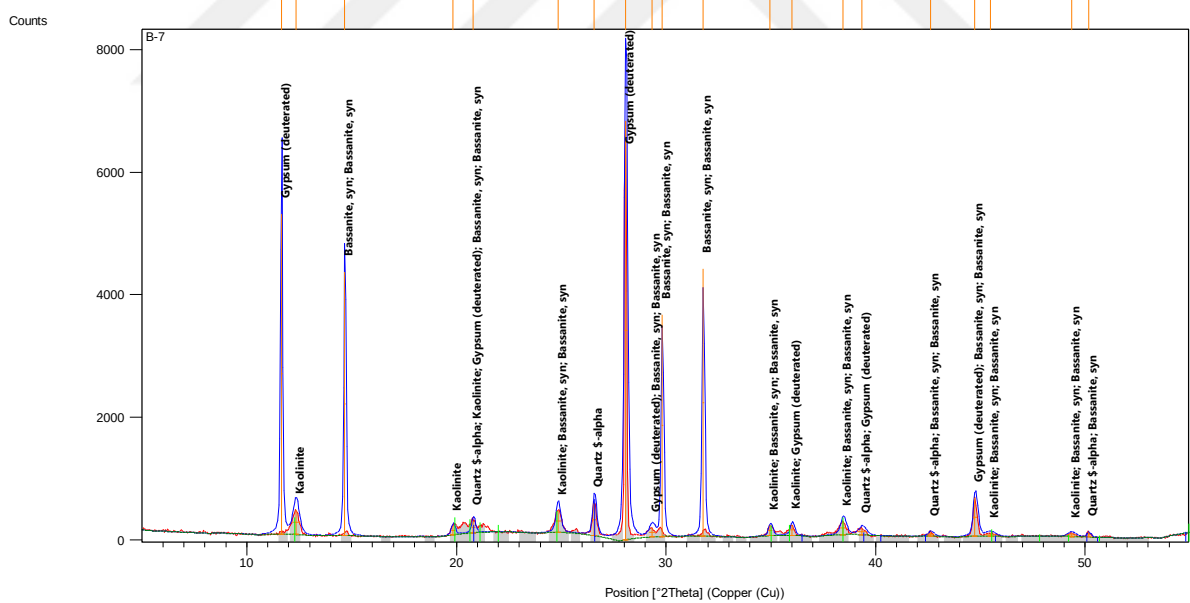
Ek 4.2.2: B3 numuneninin elde edilen tozun XRD spektrumu.

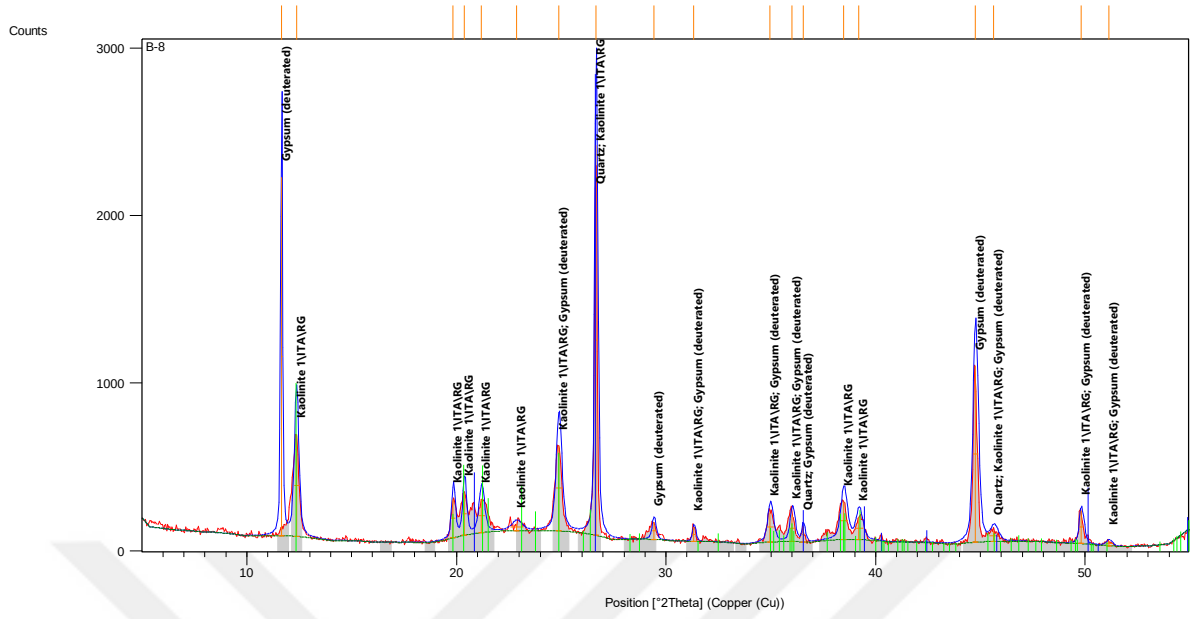


Ek 4.2.3: B4 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

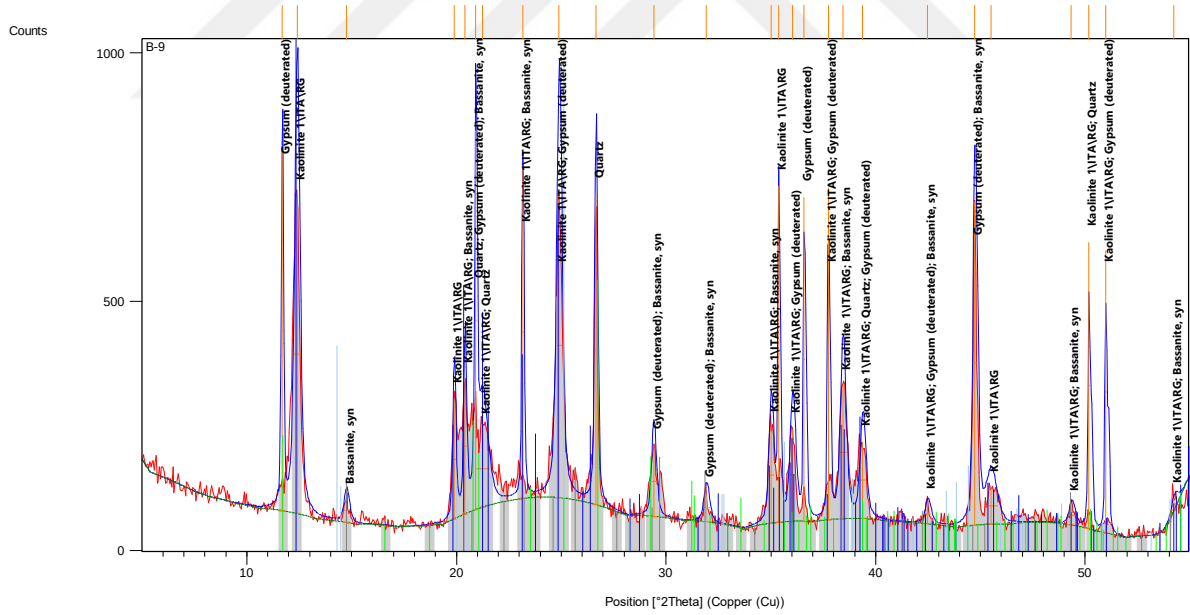


Ek 4.2.4: B5 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

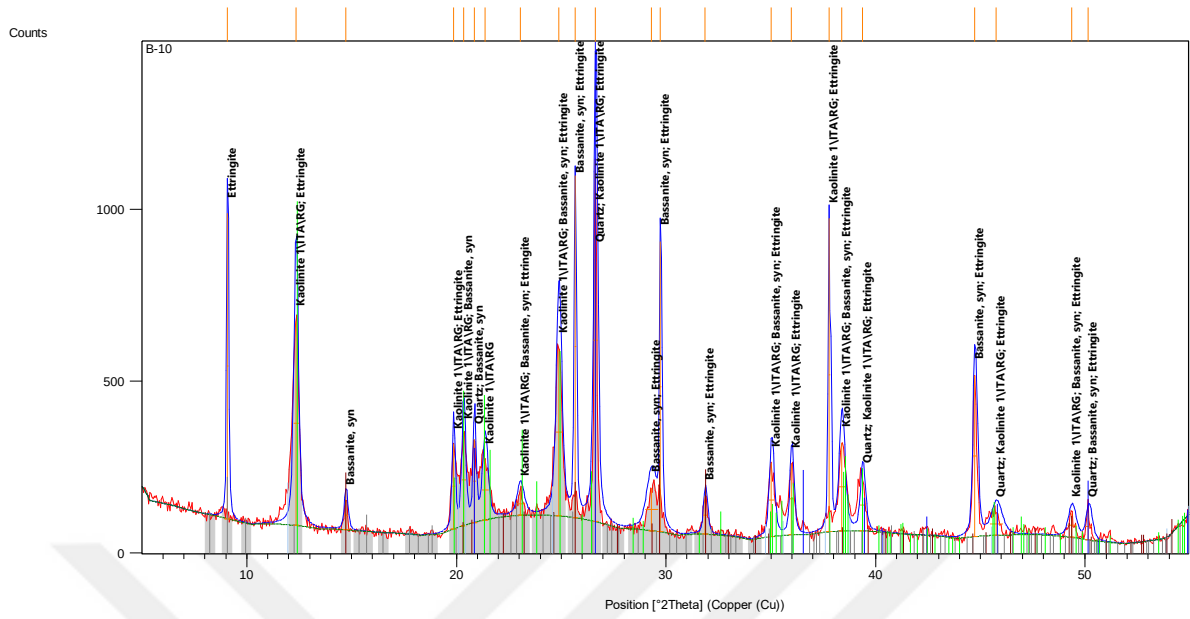




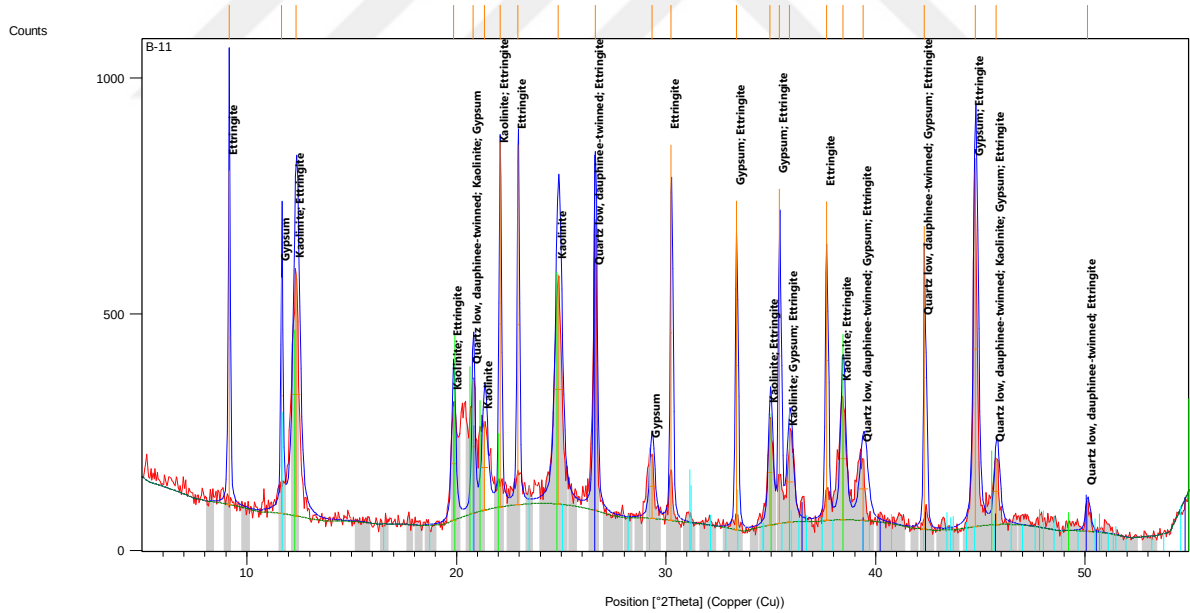
Ek 4.2.7: B8 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



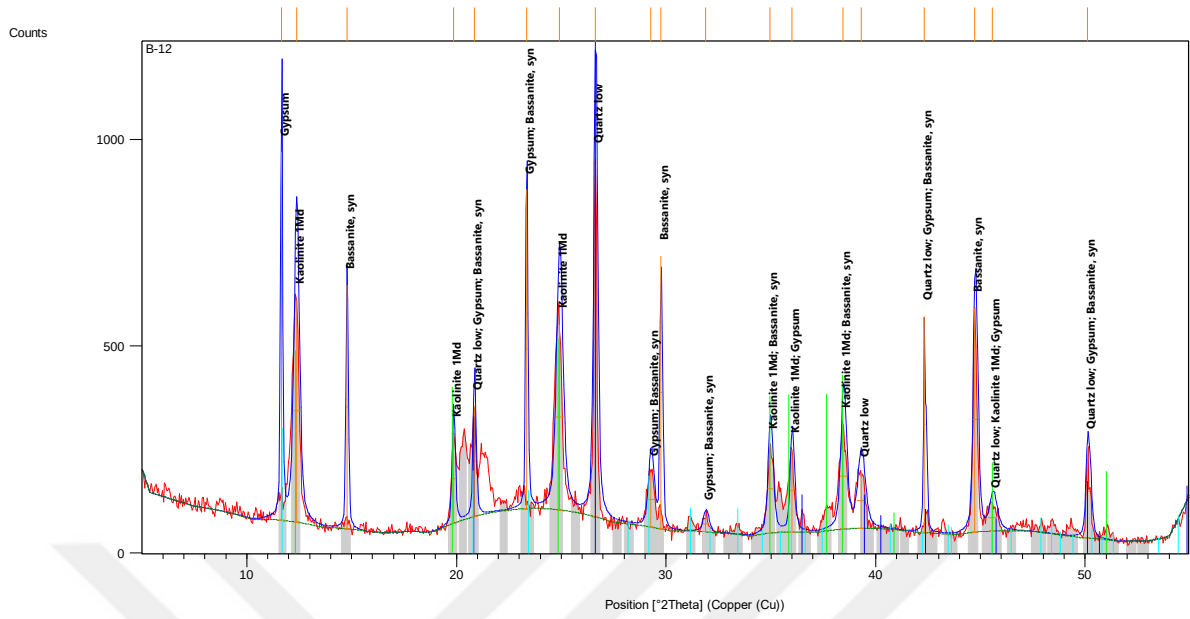
Ek 4.2.8: B9 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



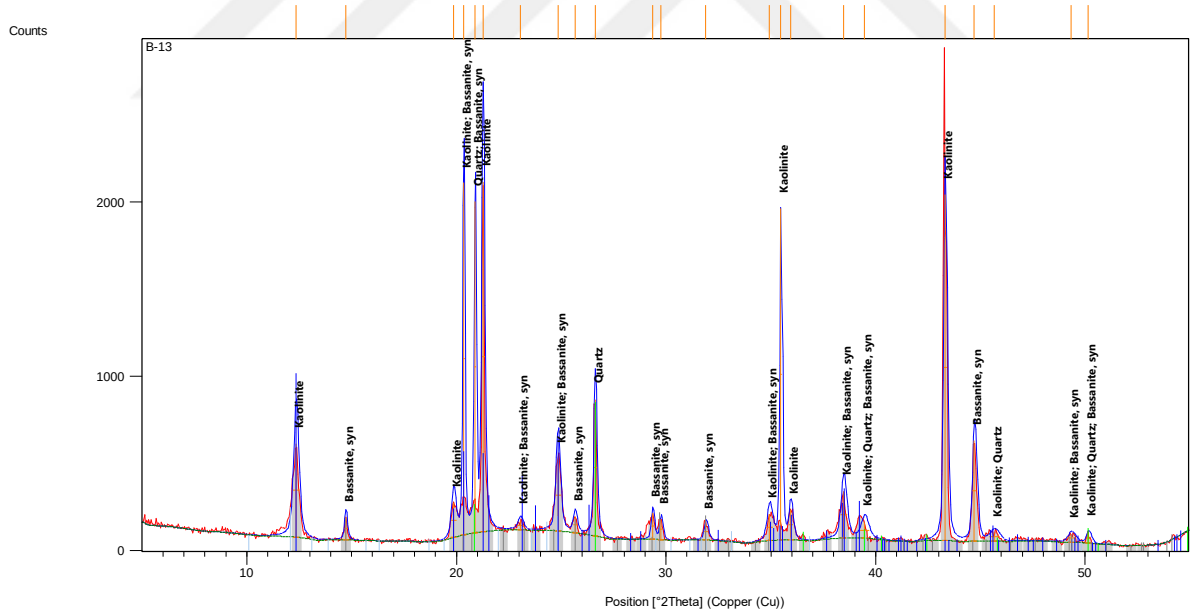
Ek 4.2.9: B10 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.



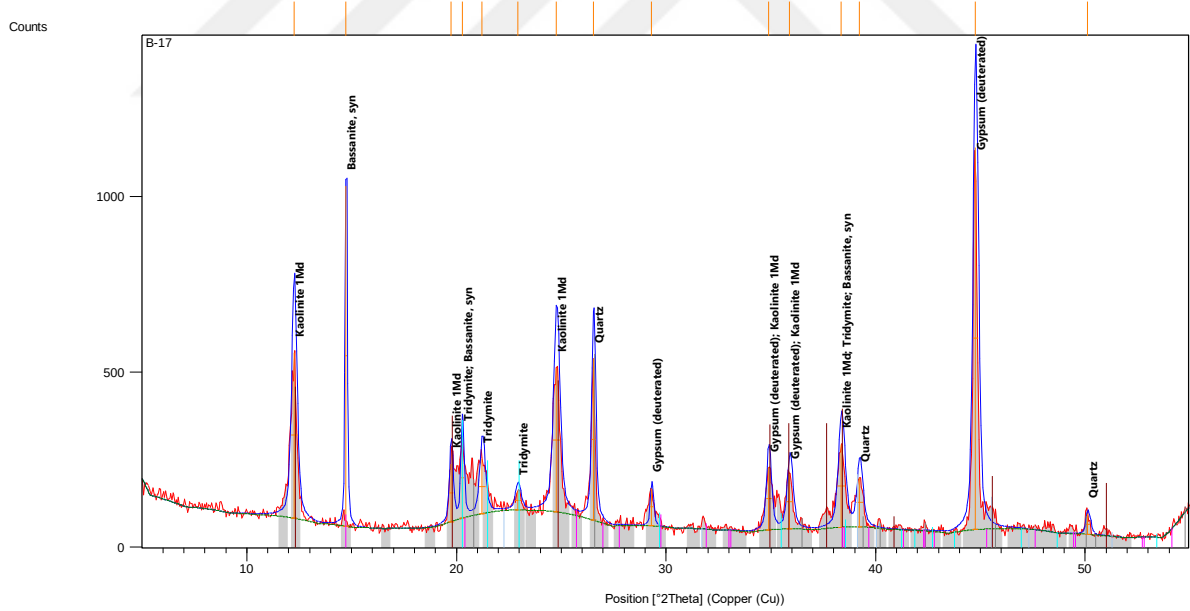
Ek 4.2.10: B11 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

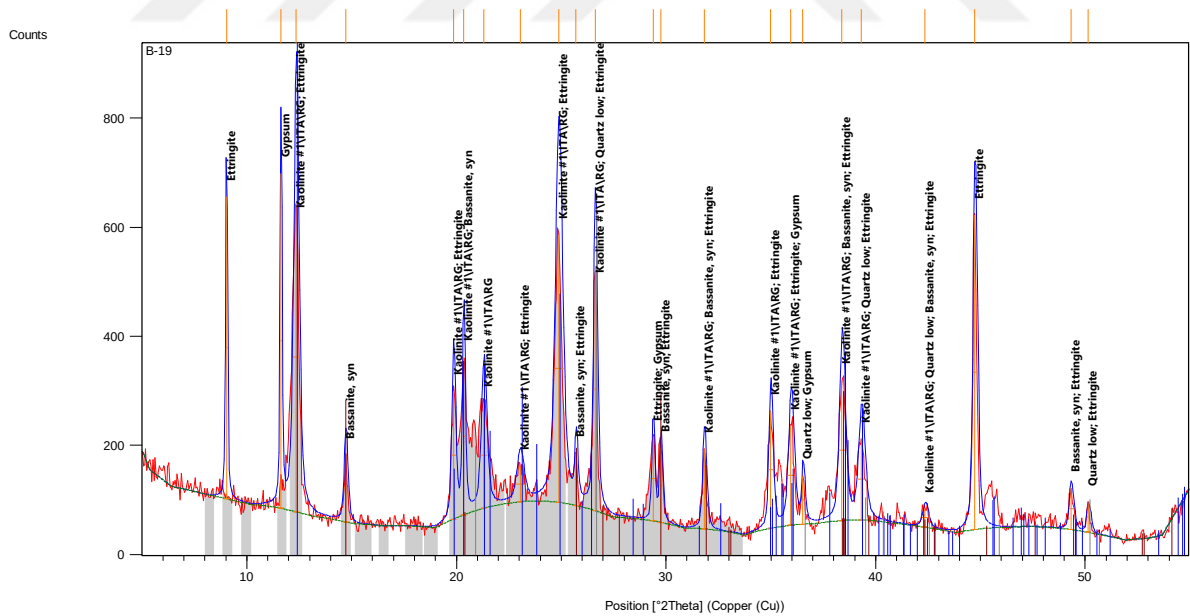


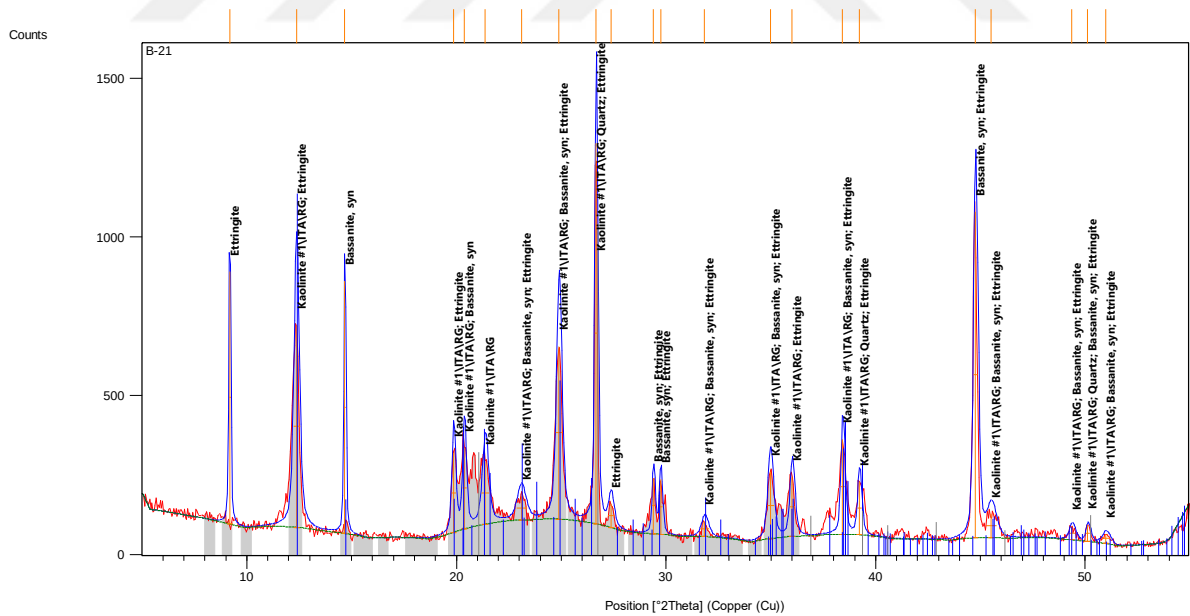
Ek 4.2.11: B12 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

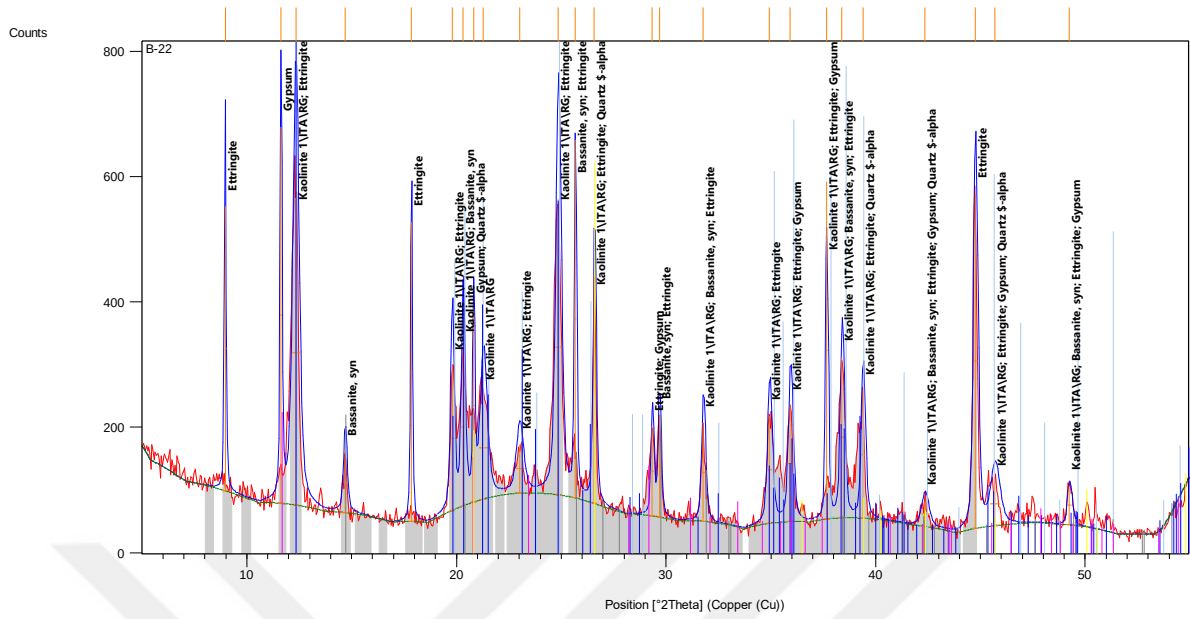


Ek 4.2.12: B13 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

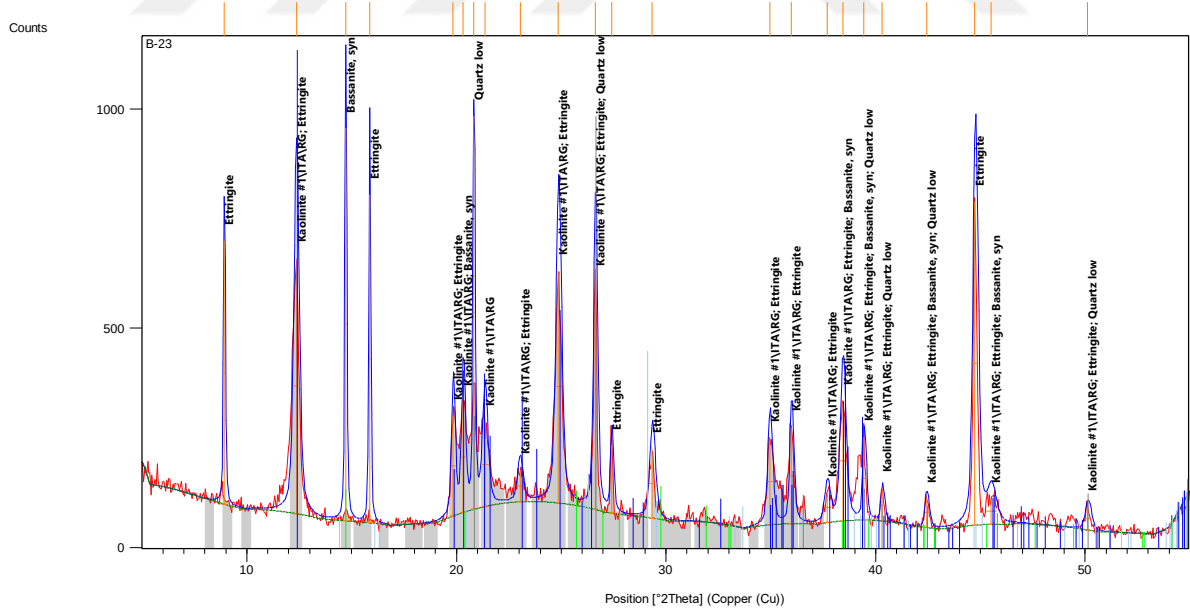




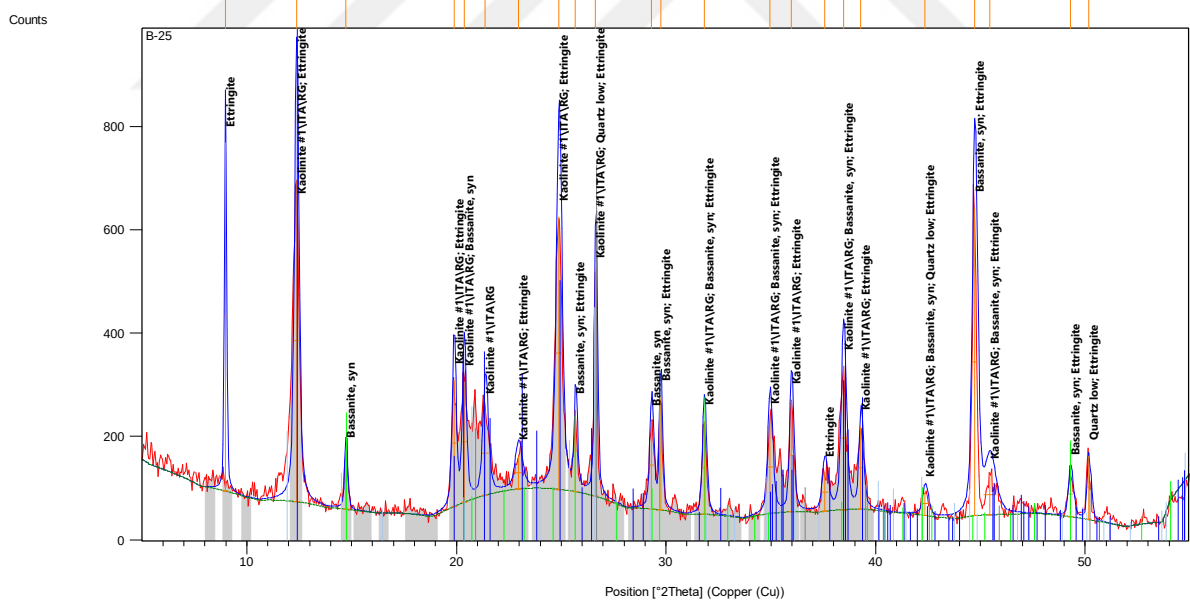


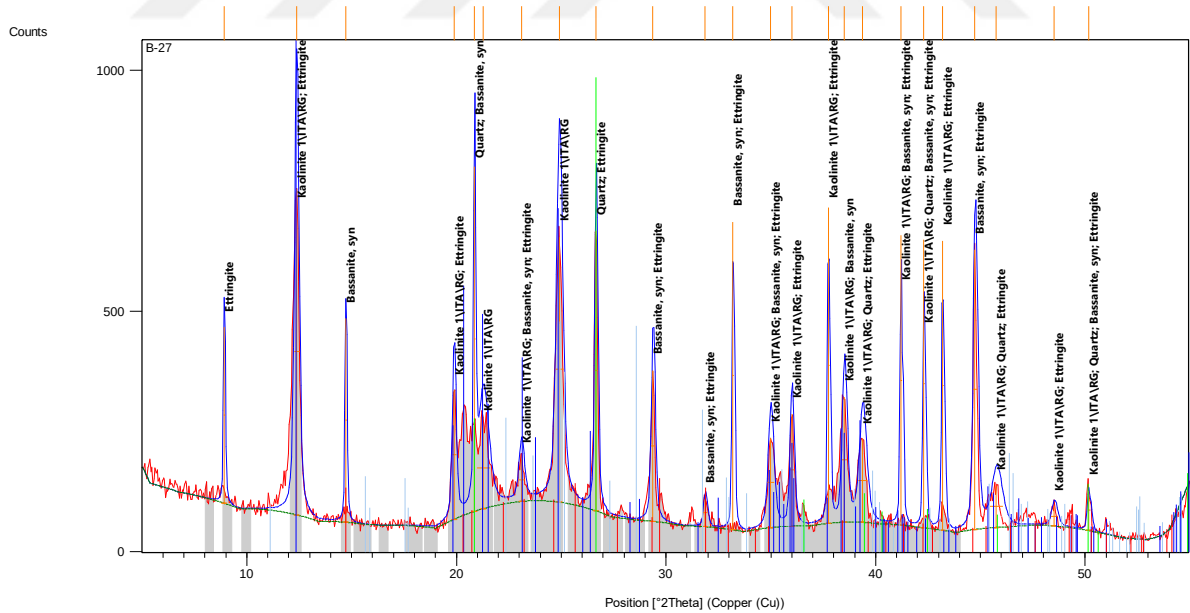


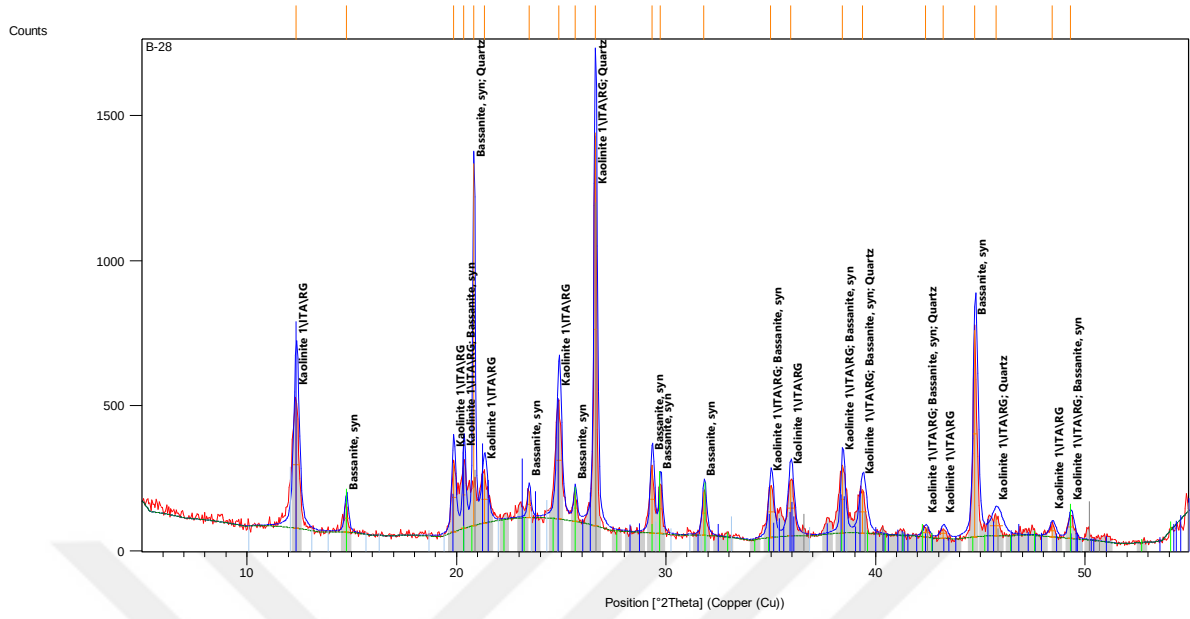
Ek 4.2.21: B22 numuneninin elde edilen tozun XRD spektrumu.



Ek 4.2.22: B23 numuneninin elde edilen tozun XRD spektrumu.







Ek 4.2.27: B28 numunenin elde edilen tozun XRD spektrumu.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

UYARI: Bu bölümde intihal programında çıkan benzerlik yüzdesinin bulunduğu detaylı raporun ilk sayfasının yer alması tüm öğrenciler için zorunludur! Bu uyarıyı okuduktan sonra siliniz!



ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

- ☐ Etik Kurul izni gerekmektedir.
- ☒ Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Nashat SARIKAHYA
(İmza)



KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☒ Kurum izni gerekmemektedir.

Nashat SARIKAHYA
(İmza)

