

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**KÜKÜRT VE KÜKÜRT POLİMER BETONLARIN MEKANİK
VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

ONUR ÖZTÜRK

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

KÜKÜRT VE KÜKÜRT POLİMER BETONLARIN MEKANİK
VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ONUR ÖZTÜRK

Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖNER
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Nabi YÜZER
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet KODAL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hasan SESLİ
Jüri Üyesi, Yalova Üniversitesi


.....

.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 17.12.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Gelişen ve büyüyen teknolojiler ile çevre kirliliğinin arttığı son yıllarda geri dönüşüm ve geri kazanım kavramları önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, yapmış olduğumuz çalışmada yoğun bir şekilde üretimde bulunan petrol endüstrisinden açığa çıkan kükürtün yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Kükürde beton teknolojileri içerisinde kullanım alanı oluşturulmasının olumlu anlamda hem ekonomik hem de çevresel etkileri olacağını düşünmekteyiz. Bu çalışmamın, alternatif kullanım alanları ve geri dönüşüm alanında yapılacak diğer çalışmalarla birlikte çevresel ve ekonomik değerlere katkı sağlamasını temenni ederim.

Bu çalışmalar boyunca sabırlı, hakkaniyetli ve insan odaklı yaklaşımıyla motivasyonumu arttıran, birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖNER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme komitemde bulunan ve tez çalışmam süresince desteğini, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ ve Sayın Prof. Dr. Nabi YÜZER'e katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım sırasında bilgi birikimleri, yönlendirmeleri ve laboratuvar desteklerini esirgemeyerek çalışmamda çok büyük katkıları olan Sayın Doç. Dr. Mehmet KODAL ve Sayın Dr. Öğr. Gör. Serap GÜMÜŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Temel TEMİZ, Arş. Gör. Cüneyt YILMAZ ve İnş. Müh. Ramazan SÖZER'e teşekkürlerimi sunarım.

Sadece tez çalışmam süresince değil tüm yaşantım boyunca her daim yanımda olan annem Mürvet ÖZTÜRK, babam Ramiz ÖZTÜRK, ablalarım Işıl TURNALAR ve Betül ÖZTÜRK'e ve teyzem Sibel ARCAN'a tüm çaba ve emekleri için teşekkürü bir borç bilirim.

Sonsuz anlayış ve sabırla yanımda olan beni motive eden eşim Merve ve oğlum Yamaç'a teşekkürlerimi sunarım.

Kasım – 2019

Onur ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
GİRİŞ	1
1. KÜKÜRT ÜRETİMİ VE KULLANIM ALANLARI.....	5
1.1. Kükürt Bağlayıcı Betonlar	10
1.1.1. Kükürt betonlar (KB)	11
1.1.2. Kükürt polimer betonlar (KPB)	13
1.2. Kükürt Bağlayıcı Beton Uygulamaları	31
1.3. Güvenlik ve Çevresel Etki Değerlendirmesi.....	36
2. MATERYAL VE YÖNTEM	41
2.1. Kullanılan Malzemeler.....	41
2.1.1. Kükürt	41
2.1.2. Bitüm.....	42
2.1.3. Asfalt emülgatörü.....	42
2.1.4. Agregası.....	43
2.1.5. Uçucu kül	46
2.1.6. Çimento	49
2.1.7. Kimyasal katkı	50
2.2. Kullanılan Aletler.....	51
2.2.1. Kükürt beton odası	51
2.2.2. Mekanik karıştırıcı	51
2.2.3. Kalıplar.....	52
2.2.4. Etüv	53
2.2.5. Beton mikseri	54
2.2.6. Beton basınç-eğilme deneyi presisi	54
2.2.7. Elastisite modülü ölçü aletleri.....	55
2.2.8. Yayılma tablası.....	55
2.2.9. Uzun dönemli büzülme ölçü aletleri	56
2.2.10. Polarize optik mikroskop (POM).....	57
2.2.11. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC).....	58
2.2.12. X-ışını kristalografisi (XRD)	59
2.2.13. Taramalı elektron mikroskopu (SEM)	59
2.2.14. Donma-çözülme kabini	60
2.2.15. Basınç altında su işleme derinliği aleti.....	61
2.2.16. Aşınma dayanımı (Böhme) aleti	62
2.2.17. Ultrasonik (UPV) hız ölçüm aleti	63
3. KÜKÜRT MODİFİKASYONUNUN BELİRLENMESİ.....	64
3.1. Numune Özellikleri.....	66

3.2.	Yapılan Deneyler	68
3.3.	Deney Sonuçları.....	68
3.3.1.	Polarize optik mikroskop deney sonuçları.....	70
3.3.2.	Diferansiyel taramalı kalorimetri deney sonuçları.....	78
3.3.3.	X-ışını kristalografisi deney sonuçları	85
3.3.4.	Taramalı elektron mikroskopu deney sonuçları.....	88
3.4.	Değerlendirmeler	91
4.	KARIŞIM ORANLARININ BELİRLENMESİ	93
4.1.	Bağlayıcı Oranının Belirlenmesi.....	93
4.1.1.	Numune özellikleri	94
4.1.2.	Yapılan deneyler.....	95
4.1.3.	Deney sonuçları	96
4.1.4.	Değerlendirmeler	97
4.2.	Uçucu Kül Oranının Belirlenmesi	97
4.2.1.	Numune özellikleri	98
4.2.2.	Yapılan deneyler.....	99
4.2.3.	Deney sonuçları	99
4.2.4.	Değerlendirmeler	104
4.3.	Bağlayıcı İçindeki Modifiye Kükürt Oranının Belirlenmesi	104
4.3.1.	Numune özellikleri	105
4.3.2.	Yapılan deneyler.....	106
4.3.3.	Deney sonuçları	107
4.3.3.1.	Basınç dayanımı deney sonuçları	107
4.3.3.2.	Uzun dönemli büzülme deney sonuçları	109
4.3.3.2.1.	ASTM C-157 deneyi sonuçları.....	109
4.3.3.2.2.	ASTM C-531 deneyi sonuçları.....	114
4.3.4.	Değerlendirmeler	120
4.4.	İnce ve İri Agrega Oranlarının Belirlenmesi	122
4.4.1.	Numune özellikleri	122
4.4.2.	Yapılan deneyler.....	124
4.4.3.	Deney sonuçları	124
4.4.4.	Değerlendirmeler	126
5.	BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	128
5.1.	Numune Özellikleri.....	128
5.2.	Taze Beton Özellikleri	132
5.2.1.	Slump (çökme) deneyi.....	132
5.2.2.	Birim ağırlık deneyi.....	133
5.3.	Sertleşmiş Beton Özellikleri	135
5.3.1.	Basınç dayanımı deney sonuçları	136
5.3.2.	Eğilme dayanımı deney sonuçları.....	140
5.3.3.	Yarma dayanımı deney sonuçları	143
5.3.4.	Statik elastisite modülü ve poisson oranı deney sonuçları	146
5.4.	Basınç Dayanımı-Elastisite Modülü Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi....	157
6.	BETONLARIN DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	168
6.1.	Aşınma Dayanımı Deney Sonuçları.....	168
6.2.	Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deney Sonuçları.....	177
6.3.	Donma-Çözülme Deneyi Sonuçları	183
6.3.1.	Donma-çözülme etkisinde basınç dayanımı değişimi	186
6.3.2.	Donma-çözülme etkisinde UPV ve BDEM değişimi	191

6.3.3. Donma-çözülme etkisinde ağırlık değişimi	196
6.3.4. Donma-çözülme sonrası numunelerin hasar durumları	199
7. BETON MALİYETLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	205
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	208
KAYNAKLAR	211
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	230
ÖZGEÇMİŞ	232



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Claus proses akış şeması [2]	6
Şekil 1.2.	Dünya kükürt üretimi dağılımı [4]	6
Şekil 1.3.	Dünya kükürt üretiminin yıllara göre dağılımı [20].....	7
Şekil 1.4.	Dünya kükürt üretiminin ülkelere göre dağılımı, 1994 [20]	8
Şekil 1.5.	Dünya kükürt üretiminin ülkelere göre dağılımı, 2017 [20]	8
Şekil 1.6.	Kükürt depolama türleri (a) granüler, (b) plakalı, (c) erimiş halde.....	9
Şekil 1.7.	PÇB ve KB ağırlıkça karışım oranları	11
Şekil 1.8.	KB karışımının hazırlanması.....	12
Şekil 1.9.	Kükürt modifikasyonu şematik gösterimi	14
Şekil 1.10.	KPB ağırlıkça karışım oranları.....	18
Şekil 1.11.	Chempruf beton şirketi (1982) KPB döküm prosesi.....	28
Şekil 1.12.	Al-Tayyip ve diğ. tarafından önerilen (1988) KPB döküm prosesi	29
Şekil 1.13.	Thylen (1991) tarafından önerilen KPB döküm prosesi	29
Şekil 1.14.	Ekblad tarafından önerilen (1992) KPB döküm prosesi	30
Şekil 1.15.	Chempruf beton şirketi (1994) KPB döküm prosesi.....	30
Şekil 1.16.	Mohamed ve diğ. tarafından (2006) KPB döküm prosesi.....	30
Şekil 1.17.	KPB kolon temeli [50]	32
Şekil 1.18.	KPB prefabrik asit tankı [50]	32
Şekil 1.19.	KPB zemin betonu [50].....	32
Şekil 1.20.	KPB mobil sıcak karışım beton mikseri [50].....	33
Şekil 1.21.	Kükürt bağlayıcı beton uygulama örnekleri [107,111].....	33
Şekil 1.22.	KPB kanalizasyon hattı saha uygulaması, Al Ain, BAE [2].....	34
Şekil 1.23.	Modifiye edilmiş kükürtlü asfalt beton uygulaması [111].....	35
Şekil 2.1.	Saf kükürt	41
Şekil 2.2.	Bitüm.....	42
Şekil 2.3.	Deneylerde kullanılan (a) doğal kum, (b) kırmataş.....	43
Şekil 2.4.	Agregaların granülometri eğrileri.....	44
Şekil 2.5.	(a) İnce agrega özgül ağırlık deneyi ve (b) vakum pompası.....	44
Şekil 2.6.	İri agrega özgül ağırlık ve su emme oranı tayini.....	45
Şekil 2.7.	Deneylerde kullanılan uçucu kül.....	49
Şekil 2.8.	Deneylerde kullanılan portland çimentosu.....	49
Şekil 2.9.	Kükürt beton odası	51
Şekil 2.10.	Mekanik karıştırıcı ve sıcaklık kontrollü termostat.....	52
Şekil 2.11.	Metal küp ve prizma kalıplar	53
Şekil 2.12.	Silindir kalıplar.....	53
Şekil 2.13.	Etüv	53
Şekil 2.14.	Beton mikseri	54
Şekil 2.15.	Hidrolik pres.....	54
Şekil 2.16.	Elastisite modülü ölçüm kafesi.....	55
Şekil 2.17.	Yayıllma tablası.....	55
Şekil 2.18.	Uzun dönem büzülme deney düzeneği (ASTM C-157).....	56
Şekil 2.19.	Sökülebilir mekanik deformasyon ölçer (DEMEC).....	57
Şekil 2.20.	POM	57

Şekil 2.21. Diferansiyel taramalı kalorimetri aleti	58
Şekil 2.22. X-ışını cihazı	59
Şekil 2.23. Püskürtmeli kaplayıcı.....	60
Şekil 2.24. Taramalı elektron mikroskobu	60
Şekil 2.25. Donma-çözülme cihazı.....	61
Şekil 2.26. Basınç altında su işleme derinliği aleti.....	61
Şekil 2.27. Aşınma dayanımı (böhme) deney aleti.....	62
Şekil 2.28. Ultrasonik hız ölçüm deney aleti.....	63
Şekil 3.1. Modifiye edilmiş kükürt.....	67
Şekil 3.2. MK parçalanması ve elenmesi	67
Şekil 3.3. MK ₀ saf kükürde ait görüntü	68
Şekil 3.4. MK ₁ numunesine ait görüntü (a) parçalanmış (b) granüle edilmiş	69
Şekil 3.5. MK ₂ numunesine ait görüntü (a) parçalanmış (b) granüle edilmiş	69
Şekil 3.6. MK ₃ numunesine ait görüntü (a) parçalanmış (b) granüle edilmiş	69
Şekil 3.7. Polarize optik mikroskop [168].....	70
Şekil 3.8. Saf kükürt (MK ₀) krsital yapı faz geçişleri	74
Şekil 3.9. MK ₂ numunesi kristal yapı faz geçişleri	75
Şekil 3.10. MK ₂ numunesi kristal yapı faz geçişleri	76
Şekil 3.11. MK ₃ numunesi kristal yapı faz geçişleri	77
Şekil 3.12. Isı akışlı DSC hücresi şematik gösterimi [182].....	79
Şekil 3.13. Saf kükürt (MK ₀) DSC diyagramı.....	80
Şekil 3.14. MK ₁ DSC diyagramı	81
Şekil 3.15. MK ₂ DSC diyagramı	81
Şekil 3.16. MK ₃ DSC diyagramı	82
Şekil 3.17. MK ₀ numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği	82
Şekil 3.18. MK ₁ numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği	83
Şekil 3.19. MK ₂ numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği	83
Şekil 3.20. MK ₃ numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği.....	84
Şekil 3.21. XRD cihazı şematik gösterimi [187].....	85
Şekil 3.22. Bragg kanunu şematik gösterimi [189]	86
Şekil 3.23. MK ₀ (saf kükürt) numunesine ait x-ışını kırınımı deseni.....	87
Şekil 3.24. MK ₁ numunesine ait x-ışını kırınımı deseni	87
Şekil 3.25. MK ₂ numunesine ait x-ışını kırınımı deseni	87
Şekil 3.26. MK ₃ numunesine ait x-ışını kırınımı deseni	87
Şekil 3.27. SEM şematik görüntüsü [189]	88
Şekil 3.28. Saf kükürt (MK ₀) SEM görüntüsü	90
Şekil 3.29. MK ₁ SEM görüntüsü.....	90
Şekil 3.30. MK ₂ SEM görüntüsü.....	91
Şekil 3.31. MK ₃ SEM görüntüsü.....	91
Şekil 4.1. Deneysel çalışma akış diyagramı	93
Şekil 4.2. Harç karışımı	95
Şekil 4.3. Harç metal kalıpları.....	95
Şekil 4.4. Kükürt miktarı-basınç dayanımı ilişkisi.....	96
Şekil 4.5. Kükürt miktarının 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi	97
Şekil 4.6. Yayılma tablası deneyi.....	100
Şekil 4.7. K/UK oranı-basınç dayanımı ilişkisi.....	101
Şekil 4.8. K/UK oranının 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi.....	102
Şekil 4.9. Kükürt/Uçucu kül oranı ve bağlayıcı miktarının basınç dayanımı üzerine etkisi.....	103

Şekil 4.10. MK oranı-basınç dayanımı ilişkisi	108
Şekil 4.11. MK oranının 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi	108
Şekil 4.12. Uzun dönemli büzülme okuması (ASTM C-157).....	110
Şekil 4.13. MK numuneleri rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-157)	112
Şekil 4.14. 14 günlük rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-157).....	113
Şekil 4.15. 360 günlük rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-157).....	114
Şekil 4.16. Uzun dönemli büzülme okuması (ASTM C-531).....	115
Şekil 4.17. MK numuneleri rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-531)	117
Şekil 4.18. 14 günlük rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-531).....	119
Şekil 4.19. 360 günlük rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-531).....	119
Şekil 4.20. MKO-0 numune yüzeyi.....	121
Şekil 4.21. MKO-3 numune yüzeyi.....	121
Şekil 4.22. MKO-5 numune yüzeyi.....	121
Şekil 4.23. MKO-7 numune yüzeyi.....	121
Şekil 4.24. Farklı DK/K.taş oranlarına göre hazırlanan KPB prizma numuneleri.....	124
Şekil 4.25. DK/K.taş oranı-eğilme dayanımı ilişkisi.....	125
Şekil 4.26. DK/K.taş oranının 28 günlük eğilme dayanımı üzerindeki etkisi	125
Şekil 4.27. DK/K.taş oranı-basınç dayanımı ilişkisi	126
Şekil 4.28. DK/K.taş oranının 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi	126
Şekil 5.1. Etüvde bekletilen malzemeler	129
Şekil 5.2. Etüvde (a) ve oda sıcaklığında bekletilen (b) kalıplardan çıkarılan numuneler	129
Şekil 5.3. Sıcaklık ölçümü data toplama sistemi	130
Şekil 5.4. Merkez sıcaklık-zaman grafiği.....	130
Şekil 5.5. Kür havuzunda bekletilen PÇB numuneleri.....	132
Şekil 5.6. Birim ağırlık kabı ve deneyi.....	133
Şekil 5.7. Beton karışım oranları ağırlıkça yüzdelik oranları.....	134
Şekil 5.8. Beton karışım oranları ağırlıkça agrega yüzdelik oranları	135
Şekil 5.9. KB ve KPB'lerin depolanma koşulları	136
Şekil 5.10. Bir saatlik KPB numunesi	136
Şekil 5.11. Tüm numunelere ait basınç dayanımı-zaman grafiği.....	138
Şekil 5.12. Tüm numunelere ait 28 günlük basınç değişimi grafiği.....	138
Şekil 5.13. Tüm numunelere ait 360 günlük basınç değişimi grafiği.....	139
Şekil 5.14. Bir saatlik KPB prizma numunesi.....	141
Şekil 5.15. Tüm numunelere ait eğilme dayanımı-zaman grafiği	142
Şekil 5.16. Ortalama eğilme dayanımı-zaman grafiği.....	142
Şekil 5.17. Silindir yarma deneyi	143
Şekil 5.18. Tüm numunelere ait yarma dayanımı-zaman grafiği	144
Şekil 5.19. Ortalama yarma dayanımı-zaman grafiği.....	145
Şekil 5.20. Yarma deneyi sonrası silindir yarıma yüzeyi görüntüleri (a) KB, (b) KPB (c) PÇB	146
Şekil 5.21. Elastisite ve poisson oranı deney düzeneği.....	147
Şekil 5.22. KB (1 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği.....	149
Şekil 5.23. KB (7 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği.....	149

Şekil 5.24. KB (28 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği.....	150
Şekil 5.25. KB (360 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği.....	150
Şekil 5.26. KB'lerin şekil değiştirme özelliklerinin zamana bağlı değişimi	151
Şekil 5.27. KPB (1 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği.....	151
Şekil 5.28. KPB (7 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği.....	152
Şekil 5.29. KPB (28 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği	152
Şekil 5.30. KPB (360 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği	153
Şekil 5.31. KPB'lerin şekil değiştirme özelliklerinin zamana bağlı değişimi	153
Şekil 5.32. PÇB (7 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği.....	154
Şekil 5.33. PÇB (28 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği.....	154
Şekil 5.34. PÇB (360 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği.....	155
Şekil 5.35. PÇB'lerin şekil değiştirme özelliklerinin zamana bağlı değişimi	155
Şekil 5.36. 28 günlük şekil değiştirme özelliklerinin beton tipine bağlı değişimi	156
Şekil 5.37. Deneysel elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi.....	157
Şekil 5.38. KB'lerde $E_c - f_c$ ilişkisi grafiği	161
Şekil 5.39. KPB'lerde $E_c - f_c$ ilişkisi grafiği	161
Şekil 5.40. PÇB'lerde $E_c - f_c$ ilişkisi grafiği	161
Şekil 5.41. KB'lerde deneysel ve hesaplanan E_c karşılaştırması.....	162
Şekil 5.42. KPB'lerde deneysel ve hesaplanan E_c karşılaştırması.....	162
Şekil 5.43. PÇB'lerde deneysel ve hesaplanan E_c karşılaştırması.....	162
Şekil 5.44. KB, TS500 ve ACI $E_c - f_c$ ilişkisi	163
Şekil 5.45. KPB, TS500 ve ACI $E_c - f_c$ ilişkisi	163
Şekil 5.46. KB ve CEB-FIP $E_c - f_c$ ilişkisi.....	164
Şekil 5.47. KPB ve CEB-FIP $E_c - f_c$ ilişkisi.....	164
Şekil 5.48. KB ve NS3473 $E_c - f_c$ ilişkisi.....	165
Şekil 5.49. KPB ve NS3473 $E_c - f_c$ ilişkisi	165
Şekil 5.50. KB ve Eurocode 2 $E_c - f_c$ ilişkisi	166
Şekil 5.51. KPB ve Eurocode 2 $E_c - f_c$ ilişkisi	166
Şekil 6.1. Böhme aşınma aleti genel görünümü	170
Şekil 6.2. Aşınma numuneleri	171
Şekil 6.3. Basınç dayanımı deney sonuçları.....	174
Şekil 6.4. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.....	175
Şekil 6.5. Ağırlıkça su emme oranları	176
Şekil 6.6. Böhme aşınma deneyi sonuçları.....	177
Şekil 6.7. Su işleme derinliği deneyi	178
Şekil 6.8. Basınçlı su işleme derinliği (3 gün) (a) KB, (b) KPB ve (c) PÇB	179
Şekil 6.9. KB numunesi su işleme derinliği (3 gün) grafiği.....	180
Şekil 6.10. KPB numunesi su işleme derinliği (3 gün) grafiği.....	180
Şekil 6.11. PÇB numunesi su işleme derinliği (3 gün) grafiği.....	181
Şekil 6.12. Basınçlı su işleme derinliği (36 gün) (a) KB, (b) KPB ve (c) PÇB	181
Şekil 6.13. KB numunesi su işleme derinliği (36 gün) grafiği.....	182
Şekil 6.14. KPB numunesi su işleme derinliği (36 gün) grafiği.....	182
Şekil 6.15. PÇB numunesi su işleme derinliği (36 gün) grafiği.....	182

Şekil 6.16. Otomasyon kontrol ünitesi donma-çözülme aleti	185
Şekil 6.17. Donma-çözülme çevriminin KB basınç dayanımına etkisi.....	187
Şekil 6.18. Donma-çözülme çevriminin KPB basınç dayanımına etkisi.....	188
Şekil 6.19. Donma-çözülme çevriminin PÇB basınç dayanımına etkisi.....	189
Şekil 6.20. Donma-çözülme çevrimi ile basınç dayanımındaki azalma yüzdesi ilişkisi.....	190
Şekil 6.21. UPV deneyi	192
Şekil 6.22. Donma-çözülme çevrim sayısının BDEM üzerindeki etkisi.....	195
Şekil 6.23. Donma-çözülme çevrim sayısının ağırlık değişimi üzerindeki etkisi	197
Şekil 6.24. KB numunesi hasar gelişimi	200
Şekil 6.25. KPB numunesi hasar gelişimi	200
Şekil 6.26. PÇB numunesi hasar gelişimi	200



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. H ₂ S konsantrasyonunun insan üzerindeki etkileri [124].....	37
Tablo 1.2. SO ₂ konsantrasyonunun insan üzerindeki etkileri [124].....	37
Tablo 2.1. Kükürt özellikleri	41
Tablo 2.2. Bitüm özellikleri.....	42
Tablo 2.3. Asfalt emülgatörüne ait fiziksel özellikler	42
Tablo 2.4. Asfalt emülgatörüne ait kimyasal özellikler	43
Tablo 2.5. Kullanılan agregaların granülometrik bileşimleri	43
Tablo 2.6. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri	46
Tablo 2.7. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve standartlara göre değerlendirilmesi	48
Tablo 2.8. Uçucu kül fiziksel özellikleri	49
Tablo 2.9. Portland çimentosu mekanik özellikleri.....	50
Tablo 2.10. Portland çimentosu fiziksel özellikleri.....	50
Tablo 2.11. Portland çimentosu kimyasal bileşimi	50
Tablo 2.12. Kimyasal katkı özellikleri	51
Tablo 2.13. Kullanılan diferansiyel taramalı kalorimetri özellikleri	58
Tablo 3.1. Kükürt modifikasyonu karışım oranları	66
Tablo 4.1. Kükürt bağlayıcı harç karışım oranları	94
Tablo 4.2. Kükürt bağlayıcı harçların basınç deneyi sonuçları.....	96
Tablo 4.3. K/UK oranlarına göre harç numunesi karışım oranları.....	99
Tablo 4.4. Yayılma tablası deney sonuçları	100
Tablo 4.5. K/UK oranlarına göre basınç dayanımı deney sonuçları	101
Tablo 4.6. K/UK1,0 için farklı kükürt oranlarındaki numunelerin karışım oranları	102
Tablo 4.7. K/UK1,0 için farklı kükürt oranlarındaki numunelerin basınç değerleri	103
Tablo 4.8. Modifiye kükürt miktarına göre harç numunesi karışım oranları	105
Tablo 4.9. MK oranlarına göre basınç dayanımı deney sonuçları.....	107
Tablo 4.10. Rölatif boy değişim değerleri (ASTM C-157).....	111
Tablo 4.11. Rölatif boy değişim değerleri (ASTM C-531).....	116
Tablo 4.12. Agregaların oranlarına göre beton numunesi karışım oranları.....	123
Tablo 4.13. DK/K.taş oranları için eğilme ve basınç deneyi sonuçları.....	124
Tablo 5.1. KB ve KPB'lere ait karışım oranları	128
Tablo 5.2. 1 m ³ Portland çimento betonu teorik karışım miktarları.....	131
Tablo 5.3. Çökme (slump) deney sonuçları.....	132
Tablo 5.4. Taze birim ağırlık deney sonuçları.....	133
Tablo 5.5. Betonların hava miktarı ve kompasite değerleri	134
Tablo 5.6. 1 m ³ beton için gerçek karışım miktarları	134
Tablo 5.7. Basınç dayanımı deneyi sonuçları.....	137
Tablo 5.8. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları	141
Tablo 5.9. Yarma dayanımı deneyi sonuçları.....	144
Tablo 5.10. Deneysel elastisite modülü ve poisson oranı değerleri	148

Tablo 5.11. Deneysel ve analitik elastisite modülü değerleri.....	160
Tablo 6.1. KP ve PP imento zellikleri	169
Tablo 6.2. KP ve PP agregalarının granülometrik bileşimleri.....	169
Tablo 6.3. KP ve PP 1 m ³ karışım oranları.....	170
Tablo 6.4. Kp numunelere ait deney sonuçları.....	174
Tablo 6.5. Tüm betonlara ait basınç dayanımı ve su işleme derinliği değerleri	179
Tablo 6.6. KB numunelerine ait basınç deneyi sonuçları.....	187
Tablo 6.7. KPB numunelerine ait basınç deneyi sonuçları	187
Tablo 6.8. PB numunelerine ait basınç deneyi sonuçları.....	188
Tablo 6.9. KB numunelerine ait UPV deney sonuçları	193
Tablo 6.10. KPB numunelerine ait UPV deney sonuçları.....	193
Tablo 6.11. PB numunelerine ait UPV deney sonuçları	194
Tablo 6.12. KB, KPB ve PB numunelerinin BDEM değerleri	194
Tablo 6.13. KB, KPB ve PB numunelerinin ağırlık değişimi değerleri	197
Tablo 6.14. KB numuneleri donma-zlme sonrası hasar durumları.....	202
Tablo 6.15. KPB numuneleri donma-zlme sonrası hasar durumları	203
Tablo 6.16. PB numuneleri donma-zlme sonrası hasar durumları.....	204
Tablo 7.1. Bir m ³ beton maliyetleri	205

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Parke Bloğun Kırılma Alanı, (mm ²)
AlO ₃	: Alüminyum Oksit,
C	: Karbon,
CaO	: Kalsiyum Oksit,
CO ₂	: Karbondioksit,
d	: Kristal Yapı Örgü Aralığı, (nm)
E _c	: Elastisite Modülü, (MPa)
E _{c-KB}	: Kükürt Betonlar İçin Önerilen Elastisite Modülü, (MPa)
E _{c-KPB}	: Kükürt Polimer Betonlar İçin Önerilen Elastisite Modülü, (MPa)
E _{c-PÇB}	: Portland Çimento Betonları İçin Önerilen Elastisite Modülü, (MPa)
f _c	: Karakteristik Silindir Basınç Dayanımı, (MPa)
f _{c-100/200}	: 100 mm Çapında 200 mm Yüksekliğinde Silindir Beton Numunesinin Basınç Dayanımı, (MPa)
f _{c-150/300}	: 150 mm Çapında 300 mm Yüksekliğinde Silindir Beton Numunesinin Basınç Dayanımı, (MPa)
Fe ₂ O ₃	: Demir Oksit,
G	: Ölçüm Boyu, (mm)
H ₂ S	: Hidrojen Sülfür,
H ₂ SO ₄	: Sülfürik Asit,
H ₂ O	: Su,
k	: Parke Taşı Kalınlığı İçin Düzeltme Katsayısı,
KOAF	: Deneysel Numunesi ile Referans Çubuk Arasındaki Okuma Farkı, (mm)
K ₂ O	: Potasyum Oksit,
L	: Deneysel Numunesine Ait Komparatör Boy Okuması, (mm)
L ₀	: Gerçek Boy, (mm)
l	: Parke Bloğun Üst Ve Altından Yapılan İki Ölçmenin Ortalaması Olarak Belirlenen Kesit Uzunluğu Değeri, (mm)
M	: Donma-Çözülme Toplam Çevrim Sayısı,
M _d	: Doygun Kuru Yüzey Ağırlık, (gr)
M _e	: Etüv Kuru Ağırlık, (gr)
MgO	: Magnezyum Oksit,
M _k	: Kuru Ağırlık, (gr)
M _p	: Piknometre Ağırlığı, (gr)
M _{pa}	: Piknometre ve Agregat Toplam Ağırlığı, (gr)
M _{ps}	: Piknometre ve Suyun Toplam Ağırlığı, (gr)
M _{pas}	: Piknometre, Agregat ve Suyun Toplam Ağırlığı, (gr)
M _s	: Su İçindeki Agregat Ağırlığı, (gr)
N	: Belirli P Değerine Karşılık Gelen veya Toplam Çevrim Sayısı,
NaCl	: Sodyum Klorür,
Na ₂ O	: Sodyum Oksit,
n	: Porozite, (%)
n ₀	: Referans Numune (Sıfırıncı Çevrim) Ultrasonik Hız Değeri, (m/s)
n ₁	: C Çevrim Sonrası Ultrasonik Hız Değeri, (m/s)

P	: Bağıl Dinamik Elastisite Modülü, (%)
P _c	: c Çevrim Sonrası Bağıl Dinamik Elastisite Modülü Yüzde Değeri, (%)
P _t	: Kırılma Yüğü, (N)
S	: Kükürt,
S _a	: Ağrlıkça Su Emme Oranı, (%)
S _α	: Ortorombik Kükürt Kristali,
S _β	: Monoklinik Kükürt Kristali,
SO ₂	: Kükürt Dioksit,
SiO ₂	: Silikon Dioksit,
SO ₃	: Kükürt trioksit,
S ₁	: 0,000050 Birim Deformasyon Değeri Karşılık Gelen Gerilme Değeri, (MPa)
S ₂	: En Büyük Basınç Dayanımı Değeri %40'ına Karşılık Gelen Gerilme Değeri, (MPa)
T	: Yarmada Çekme Dayanımı, (MPa)
t	: Parke Bloğun Ortadan ve Diğer İki Uçtan Yapılan Üç Ölçmenin Ortalaması Olarak Kırılma Düzlemindeki Kalınlık Değeri, (mm)
V	: Görünen Hacim, (cm ³)
V _v	: Boşlukların Hacmi, (cm ³)
W _c	: c Çevrim Sonrası Ağrlık Değeri, (gr)
WL	: c Çevrim Sonrası Ağrlık Kaybının Yüzde Değeri, (%)
W _R	: Referans Numune (Sıfırcı Çevrim) Sonundaki Ağrlık Değeri, (gr)
δ _d	: Doygun Kuru Yüzey Özgöl Ağrlık, (gr/cm ³)
δ _g	: Görünen Özgöl Ağrlık, (gr/cm ³)
δ _k	: Kuru Özgöl Ağrlık, (gr/cm ³)
ΔL _x	: Rölatif Boy Değişimi, (%)
Δm	: 16 Çevrim Sonrası Numunede Meydana Gelen Kütle Kaybı, (gr)
ΔV	: 16 Çevrim Sonrası Numunelerin Hacmindeki Azalma, (cm ³ /50cm ²)
ε _{t1}	: S ₁ Gerilme Değeri Karşılık Gelen Yatay Birim Deformasyon Değeri
ε _{t2}	: S ₂ Gerilme Değeri Karşılık Gelen Yatay Birim Deformasyon Değeri
ε ₂	: S ₂ Gerilme Değeri Karşılık Gelen Düşey Birim Deformasyon Değeri
λ	: Dalga Boyu, (nm)
μ	: Poisson Oranı
ρ _r	: Numunenin Yoğunluğu, (gr/cm ³)
ρ _w	: Suyun Özgöl Ağrlığı, (gr/cm ³)
θ	: Kırınım Açısı, (°)

Kısaltmalar

ABD	: United States of America – USA (Amerika Birleşik Devletleri)
ACI	: American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu)
BAE	: United Arab Emirates-UAE (Birleşik Arap Emirlikleri)
BDEM	: Bağıl Dinamik Elastisite Modülü
BSYY	: Binalarda Su Yalıtımı Yönetmeliği

CANMET	: Canada Center for Mineral and Energy Technology (Kanada Mineral ve Enerji Teknolojisi Merkezi)
CEB-FIP	: Comite Euro-Internationale du Beton - Federation Internationale du Beton (Avrupa uluslararası beton komitesi)
DCPD	: Disiklopentadien
DEMEC	: Demountable Mechanical Strain Gauge (Sökülebilir Mekanik Deformasyon Ölçer)
DF	: Dyanıklılık Faktörü
DK	: Doğal Kum
DKY	: Doygun Kuru Yüzey
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
DSC	: Differential Scanning Calorimeter (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri)
DTA	: Differential Thermal Analysis (Diferansiyel Termal Analiz)
EN	: European Norm (Avrupa Standartları)
ENB	: 5-etiliden-2-norbornen Karışımından Oluşan Termonomerin
HSK	: Hava Sürükleyici Katkı
IMO	: International Maritime Organization (Uluslararası Denizcilik Örgütü)
KB	: Kükürt Beton
KDV	: Katma Değer Vergisi
KP	: Kilitli Parke
KPB	: Kükürt Polimer Beton
MK	: Modifiye Kükürt
NRC	: National Research Council of Canada (Kanada Ulusal Araştırma Konseyi)
NS	: Norwegian Standard (Norveç Standardı)
ÖA	: Ölçüm Alınmayan Numune Sonucu (Ölçüm Alınmadı)
PÇB	: Portland Çimento Betonu
POM	: Polarized Optical Microscopy (Polarize Optik Mikroskop)
PP	: Prizma Parke
QSRTC	: Qatar Shell Research and Technology Centre (Katar Shell Araştırma ve Teknoloji Merkezi)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TS	: Türk Standartları
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.
UAE	: United Arab Emirates-UAE (Birleşik Arap Emirlikleri)
UPV	: Ultrasonic Pulse Velocity (Ultrasonik Hız Ölçümü)
USA	: United States of America – USA (Amerika Birleşik Devletleri)
XRD	: X-Ray Diffraction (Kristalografisi X-Işını Kristalografisi)

KÜKÜRT VE KÜKÜRT POLİMER BETONLARIN MEKANİK VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, petrol endüstrisinden elde edilen kükürt kullanılarak hazırlanan kükürt (KB) ve kükürt polimer betonların (KPB) mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

Deneysel çalışmalar; kükürt modifikasyonunun, karışım oranlarının, mekanik özelliklerin ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesini amaçlayan dört adımdan oluşmaktadır. İlk olarak kükürtün, petrol endüstrisinden temin edilen bitüm kullanılarak modifiye edilmesi amaçlandı. Saf kükürt içerisine ağırlıkça %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında bitüm ilave edilerek içyapıdaki değişim polarize optik mikroskop (POM), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), x-ışını kristalografisi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) deneyleri ile incelendi. Saf kükürtün modifikasyonu için gerekli bitüm oranının %2,5 olduğu bulundu. KPB'ler için en uygun karışım oranları mekanik özellikler göz önünde bulundurularak saf kükürt: modifiye kükürt: uçucu kül: doğal kum: kırmataş ağırlıkça oranları sırasıyla %33,95: %1,05: %35: %15: %15 olarak belirlendi. Karışım oranları belirlenen KPB numuneleri üzerinde taze beton özellikleri, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı deneyleri gerçekleştirildi. Aynı zamanda KPB'lerin dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi amacıyla aşınma (böhme), basınç altında su işleme derinliği ve donma-çözülme deneyleri yapıldı. Numunelerin 0, 150, 300, 450, 600 ve 1200 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanımları, ağırlık değişimleri, ultrasonik hızları ve bağıl dinamik elastisite modülü değerlerindeki değişimler belirlendi.

Deneylelerden elde edilen değerler Portland çimento beton (PÇB) numunelerinden elde edilen değerler ile karşılaştırıldı. Deney sonuçları incelendiğinde KB ve KPB'lerin erken dayanımlarının daha yüksek ve priz sürelerinin daha kısa olduğu görüldü. KPB ve KB'lerin PÇB'lere göre daha az böhme aşınma kaybı gösterdiği belirlenirken KPB'lerin KB ve PÇB'lere göre daha düşük su geçirimsizliği ve donma-çözülme etkisine karşı önemli ölçüde yüksek direnç gösterdiği belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Bitüm, Dayanıklılık, Kükürt, Kükürt Polimer Beton, Mekanik Özellikler.

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF SULFUR AND SULFUR POLYMER CONCRETE

ABSTRACT

In this study, it is aimed to investigate the mechanical and durability properties of sulfur (KB) and sulfur polymer concrete (KPB) prepared by using by-product sulfur obtained from petroleum industry.

Experimental studies consist of four steps targeted at determining sulfur modification, mixing ratios, mechanical properties and durability properties. Primarily, it is aimed to modify the sulfur using bitumen obtained from the petroleum industry. 2.5%, 5% and 7.5% by weight of bitumen were added to pure sulfur and the change in the microstructure was investigated by polarized optical microscope (POM), differential scanning calorimetry (DSC), x-ray crystallography (XRD) and scanning electron microscope (SEM). The bitumen content required for the modification of pure sulfur was determined as 2.5%. The mixing ratios for KPBs were determined as %33.95: %1.05: %35: %15: %15 by weight of pure sulfur: modified sulfur: fly ash: natural sand: crushed stone, taking into account mechanical properties. Fresh concrete properties, compressive strength, flexural strength, modulus of elasticity and poisson ratio tests were carried out on KPB samples whose mixing ratios were determined. However, abrasion (böhme), depth of penetration of water under pressure and freeze-thaw tests were performed to determine durability properties of KPBs. Changes in compressive strengths, weight changes, ultrasonic velocities and relative dynamic modulus of elasticity values were determined after the samples exposed to 0, 150, 300, 450, 600 and 1200 freeze-thaw cycles of the samples.

The values obtained from the experimental studies were compared with the values obtained from the Portland cement concrete (PÇB) samples. The test results were examined, it was seen that KB and KPB have higher early strengths and shorter setting time. It was found that KB and KPBs demonstrated less böhme abrasion loss than PÇB, whereas KPBs exhibited lower water permeability and significantly higher resistance to freeze-thaw cycles than KB and PÇB.

Keywords: Bitumen, Durability, Sulfur, Sulfur Polymer Concrete, Mechanical Properties.

GİRİŞ

Enerji, tüm insanlığın toplumsal yaşamlarının devamlılığını sağlayabilmesi için ihtiyaç duyulan temel öge olup sanayi, ulaştırma, konut ve ticarethane gibi alt sektörlerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Günümüzde tüketilen enerji petrol, doğal gaz, kömür, nükleer, hidro ve yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Enerji ihtiyacı ise tüm bu kaynaklar içerisinde %86 gibi oldukça yüksek bir oranla petrol, doğal gaz ve kömür kaynaklarından temin edilmektedir. Ulaştırma sektöründe yoğun olmak üzere petrol; dünya birincil enerji tüketimi içerisinde en büyük paya sahiptir. Enerji kaynağı olarak petrol tüketimi 1990 yılında 63 varil/gün iken 2019 yılı itibariyle bu oran 92 varil/gün seviyesine ulaştığı görülmektedir. Petrol kullanımının günümüzde oldukça yoğunlaşması sonucu bu oran, 2035 yılı için yapılan tahminlere göre 103 varil/gün olarak öngörülmektedir [1].

Enerji kaynağı olarak kullanılan petrol ham olarak temin edilmekte, farklı prosesler sonunda son ürün haline getirilerek kullanıcıya ulaştırılmaktadır. Ham petrol büyük oranda organik kükürt bileşikleri içermektedir. Ham petrol işlendiğinde bu bileşiklerden kükürt ve hidrojen sülfür açığa çıkmaktadır. Claus prosesi adı verilen bir yöntemle hidrojen sülfürün 1/3'ü yanarak kükürt dioksiti (SO₂) oluşturmaktadır. Daha sonra bir katalizör yardımıyla iki gazın etkileşiminden kükürt elementi ve su oluşmaktadır. Ham petrolden kükürtün ayrıştırılması çeşitli çevre koruma kanunları aracılığıyla zorunlu ve denetimli hale getirilmiştir [2-3]. Günümüzde teknolojik gelişmeler ve çevre koruma kanunlarındaki iyileştirmeler ham petrolün içerdiği kükürt yüzdelерinin oldukça küçük miktarlarla sınırlandırılmasına ve açığa çıkan kükürt miktarlarının yoğun bir şekilde artmasına neden olmuştur.

Kükürtün fiziko-kimyasal yapısı ve mekanik özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Devlet Planlama Teşkilatının (DPT) 8 yıllık kalkınma planı ve maden firması CRU grup tarafından yayınlanmış olan raporlarda yer alan rakamlara göre 1992 ve 1997 yılları arasında dünya kükürt üretiminin sadece %24'ünün petrol ve gaz endüstrisinden elde edildiği belirtilmektedir [4-5]. 2012 yılı itibariyle petrol ve

gaz endüstrisinden elde edilen kükürt miktarının toplam üretimin %97'sine ulaştığı görülmektedir. 1991-2012 yıllarında dünya kükürt üretiminin 54 milyon ton/yıl iken 2017 yılı itibariyle bu rakam yaklaşık olarak 73 milyon ton/yıl değerine ulaşmıştır. Petrol endüstrisinin dünya birincil enerji tüketimi içerisinde en büyük paya sahip olması nedeniyle bu rakamda her geçen yıl hızlı bir şekilde artış meydana geldiği bilinmektedir. Özellikle petrol endüstrisinden açığa çıkan kükürt miktarlarında büyük artışların meydana gelmesi sonucunda petrol şirketleri finansmanı aracılığıyla kükürtün alternatif kullanım alanlarının oluşturulması konusunda araştırmalar yoğunlaştırılmıştır [3].

Artan kükürt miktarının değerlendirilmesinde araştırmacıların inşaat sektörü üzerinde durması yeni bir yapı malzemesi olarak kükürt bağlayıcılı betonların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kükürt betonlar (KB), geleneksel Portland çimento betonlarında (PÇB) bağlayıcı olarak kullanılan çimento ve suyun görevini üstlenen kükürtün kullanılarak hazırlandığı beton türüdür. Isı etkisi ile eritilen termoplastik kükürt, agrega ve filler ile birleştirilerek soğuma sonrası sertleşmiş beton elde edilmektedir [6]. Yapılan deneysel çalışmalar ve saha uygulamaları, kükürt bağlayıcılı betonların Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan betonlara göre kimyasal ve mekanik olarak daha üstün özelliklere sahip olduğunu göstermektedir [2, 3, 6-8]. Son yıllarda dünya kükürt rezervlerindeki artış nedeniyle kükürtün yapı malzemesi olarak kullanılmasının amaçlandığı araştırmaların sayısında da artış meydana gelmiştir [2-8].

Bu çalışmada, petrol endüstrisinden elde edilen kükürtün geleneksel Portland çimentosu yerine beton içerisinde kullanılmasının uygunluğu ve kullanılması durumunda PÇB'lere göre mekanik ve dayanıklılık özellikleri açısından avantaj ve dezavantajlarının incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu deneysel çalışmanın üniversitemizde gerçekleştirilmesinin başlıca nedeni dünya kükürt rezervlerindeki artışın petrol endüstrisi kaynaklı olması ve Türkiye Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş. (TÜPRAŞ) tarafından işlenmekte olan toplam petrolün %40'ının üniversitemiz ile aynı il sınırlarında bulunan TÜPRAŞ-İzmit rafinerisinde işlenmesi olarak düşünülmüştür. TÜPRAŞ tarafından 2013 yılında yayınlanan faaliyet raporunda petrol işlenmesi sonrasında elde edilmiş olan toplam kükürt miktarı 86000 ton olarak belirtilmiştir. TÜPRAŞ-İzmit rafinerisinde bu tarihten sonra başlayan büyütme ve kapasite arttırma çalışmaları sonucunda 2014'ten sonra açığa çıkan kükürtün toplam

rakamın iki katına çıkacağı da faaliyet raporu içerisinde belirtilmiştir. TÜPRAŞ'a ait tüm rafinerilerin yıllık ham petrol işleme kapasitesinin toplam 28,1 milyon ton olduğu ve bu işleme kapasitesinin 11 milyon tonunun TÜPRAŞ-İzmit rafinerisinde işlendiği bilinmektedir [11,13]. TÜPRAŞ ham petrol işleme kapasitesinin %40'ı TÜPRAŞ-İzmit rafinerisinde işlenmektedir. Bu rakamlar göstermektedir ki; 172000 ton kükürtün yıllık yaklaşık olarak 70000 tonu Kocaeli ili sınırlarında açığa çıkmaktadır. TÜPRAŞ-İzmit rafinerisi konumu itibari ile büyüyen Kocaeli nüfusu ve genişleyen yerleşim alanı içerisinde kalmaktadır. Bu da asıl hedefi petrol işleme olan rafinerinin içerisinde açığa çıkan kükürtün depolama bölgesi oluşturulması ve depolanması sıkıntılarını da beraberinde getirmektedir. Bu sıkıntılar göz önüne alındığında bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler, petrol endüstrisinden açığa çıkan kükürtün yapı malzemesi olarak alternatif kullanım alanlarının incelenmesini amaçlamaktadır [2-6, 13, 14].

Gösterilebilecek birçok nedenin yanı sıra inşaat sektörü de sera gazı emisyonlarının büyük bir kısmından sorumludur. Dünyadaki toplam karbondioksit (CO₂) emisyonunun %5'inden fazlası çimento üretim sürecinde meydana gelmektedir [6]. Ham petrol işlenmesi sırasında açığa çıkan kükürtün çimento yerine kullanımı çimento üretim miktarlarının azalmasına ve çevresel zararların azaltılmasına destek olacağı açıkça görülmektedir [15].

Çalışmanın hedefi dünyadaki kükürt üretimindeki artış nedeniyle açığa çıkan kükürtün yeni tüketim alanları oluşturularak değerlendirilmesi, Türkiye'de bulunan en büyük petrol işleme tesisinin üniversitemiz ile aynı il sınırlarında olması nedeniyle petrol endüstrisinden elde edilen kükürtün geri dönüşümünün sağlanması, kükürtün stoklanması sırasında oluşan çevresel kirliliğin azaltılması, Portland çimento kullanımının azaltılarak çimento üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ emisyonu miktarının azaltılması olarak özetlenebilir.

Çalışmanın birinci bölümde, kükürt üretimi ve kullanım alanları hakkında bilgi verilmektedir. Dünyadaki kükürt üretimi, kükürt üretiminde petrol endüstrisinin yeri ve kükürt arz-talep dengesi sayısal verilerle açıklanırken; kükürtün yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği ve literatürde yer alan çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir. Aynı zamanda kükürt beton kullanılarak gerçekleştirilen saha uygulama örnekleri ve kükürtün çevresel etki değerlendirmesi de bu bölüm kapsamında açıklanmaktadır.

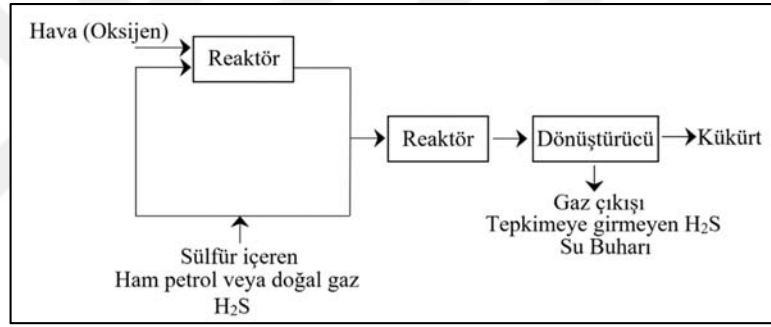
İkinci bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemeler, aletler ve bunların özellikleri özetlenmektedir. Üçüncü bölümde, kükürt modifikasyonuna ait deneysel çalışmalar yer almaktadır. Bu bölümde farklı oranlarda bitüm kullanılarak modifiye edilen kükürt örnekleri üzerinde gerçekleştirilen polarize optik mikroskop (POM), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), x-ışını kristalografisi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) deneylerine ait sonuçlar bulunmaktadır. Bu deney sonuçları değerlendirilerek en uygun bitüm miktarı belirlenmektedir. Dördüncü bölümde, bir önceki bölümde belirlenmiş olan modifiye kükürt oranı kullanılarak ve betonların basınç dayanımları göz önünde bulundurularak, KB ve KPB karışımları içerisindeki saf kükürt, modifiye kükürt, filler, iri ve ince agreganın ağırlıkça katılım oranları belirlenmektedir. Beşinci bölümde, bir önceki bölümde belirlenmiş olan karışım oranları kullanılarak hazırlanan KB ve KPB'lerin; basınç, eğilme ve yarma dayanımları ile statik elastisite modülü ve poisson oranları belirlenmektedir. Elde edilen veriler aynı basınç dayanımına sahip PÇB numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmektedir. Altıncı bölümde, mekanik özellikleri belirlenmiş olan KB, KPB ve PÇB numuneleri üzerinde gerçekleştirilen aşınma (böhme), basınç altında su geçirimsizlik ve donma-çözülme deney sonuçları verilmektedir. Tüm numunelerin 0, 150, 300, 450, 600 ve 1200 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanımları, ağırlık değişimleri, ultrasonik hızları ve bağıl dinamik elastisite modülü değerlerindeki değişimleri belirlenip karşılaştırılmaktadır. Yedinci bölümde, mekanik ve dayanıklılık özellikleri belirlenmiş olan betonların karışım oranları ve kullanılan malzeme fiyatları göz önünde bulundurularak maliyet karşılaştırması yapılmaktadır. Sekizinci ve son bölümde ise KB, KPB ve PÇB'lere ait tüm deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek özetlenmektedir.

1. KÜKÜRT ÜRETİMİ VE KULLANIM ALANLARI

Günümüzde kükürt endüstrisi, kükürtün büyük bir bölümünün petrol endüstrisinden elde edilmesi nedeniyle diğer maden endüstrilerine kıyasla oldukça farklıdır. 20. yy.ın başlarında saf kükürtün tek önemli kaynağı Sicilya idi. Burada, geleneksel metotlarla elde edilen cevher sadece %30-50 gibi düşük bir oranda işlenerek kükürt elde edilebiliyordu. Düşük bir geri kazanım yüzdesinin yanı sıra cevher işleme prosesi sırasında atmosfere SO₂ salınımı da geleneksel metotların olumsuz sonuçlarını teşkil etmekteydi. 1885 yılının başlarında kükürt emisyonunun çevreye verdiği hasar fark edilmiş ve hükümet tarafından cevher işlemeye sınırlandırma getirildi. Kükürt; geleneksel yeraltı yöntemleri, açık çukur yöntemi ve Frasch yöntemi olmak üzere 3 farklı yöntem kullanılarak madenden çıkarılmaktadır. Kükürtün madenden çıkarılma yöntemleri açısından bakıldığında tüm yöntemlerden elde edilen toplam kükürtün %90'ı Frasch yöntemi kullanılarak çıkarılmaktadır. Petrol endüstrisi devreye girene kadar dünya ekonomisi açısından madenden kükürt üretiminin sürdürülebilirliği bir soru işareti teşkil etmemekteydi. Günümüzde kükürt maden işletmeleri kapatıldı. Bu durum, maden yataklarının tükenmesi, verimsizliği veya çevresel hasarlar nedeniyle değil kükürtün petrol rafinerileri ile doğal gaz işleme tesislerinden elde edilmesi sonucunda gerçekleşmiştir [2,3,6-15].

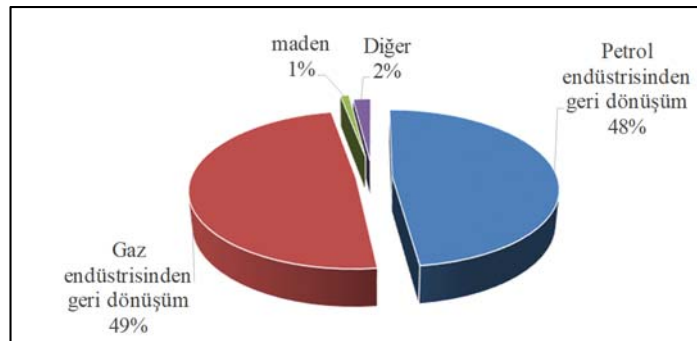
Saf kükürt günümüzde neredeyse sadece fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan SO₂ emisyonlarını azaltmak için doğal gaz ve ham petrol işlenmesi sonucu açığa çıkan bir ürün haline gelmiştir [16]. Doğal gaz değişen miktarlarda zehirli hidrojen sülfür (H₂S) ve diğer sülfürik bileşenleri içermektedir. Aynı şekilde ham petrol de birçok organik kükürt çeşidini, genellikle %1-3 arasında değişen oranlarda ihtiva etmektedir. Birincil proses sonucunda sülfürik bileşenler ayrılır ve takip eden proses ile H₂S saf kükürde dönüştürülür. Ham petrol ve doğal gaz rezervleri büyük ve endişe verici miktarlarda H₂S içermektedir. Ciddi anlamdaki zehirli gazın çevresel emisyonlarının azaltılması için ayrıştırılması ve saf kükürde dönüştürülmesi gerekmektedir [15-17]. Kükürt, ham petrol içerisinde genellikle H₂S formunda bulunur ve H₂S saf kükürde Claus proses adı verilen bir yöntem kullanılarak dönüştürülür. Claus prosesinde, ısı

kazanına bağlı yanma tankı içerisinde yoğunlaştırılmış H₂S yakılır ve bu işlem sonucunda SO₂, su (H₂O) ve kükürt buharı açığa çıkar. Yüksek sıcaklıktaki gazlar, ısı kazanında soğutulur ve kükürt bir kondansatör içerisinde alınır. Prosesin etkinliği, kükürt kondansatöründen çıkan gazların yeniden ısıtılıp katalitik konvertörler ve ilave kondansatörlerden geçirildiği üç ek aşama eklenerek artırılır. Son olarak kükürt içeren tüm gazlar, atmosfere salınmadan önce S₂O'ya dönüştürülmek için yakılır. Proses sonunda kükürt sıvı halde toplanır [2]. Claus proses içerisinde gerçekleşen kimyasal dönüşümler Denklem (1.1) ve (1.2)'de verildiği gibidir. Claus proses aynı zamanda şematik olarak Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Claus proses akış şeması [2]

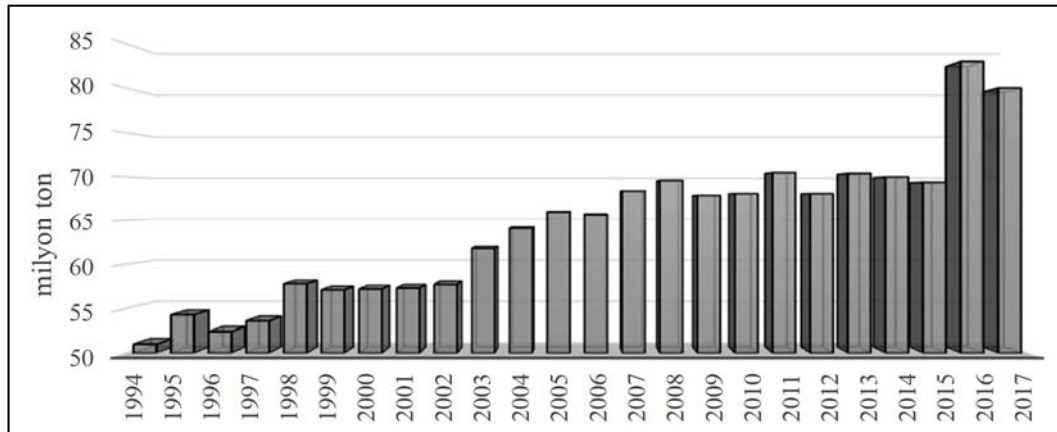
Petrol ve doğal gaz endüstrisinin dünya toplam kükürt üretimi üzerindeki etkisi 2012 yılı verilerine göre Şekil 1.2'de görülmektedir [4]. 1992-1997 yılları arasında Petrol ve doğal gaz endüstrisi dünya kükürt üretiminin yılda ortalama %24'üne etki etmekteydi [5]. Maden ocaklarının sayısındaki azalmanın da etkisi ile bu rakamın 2012 yılında %97 seviyesine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 1.2. Dünya kükürt üretimi dağılımı [4]

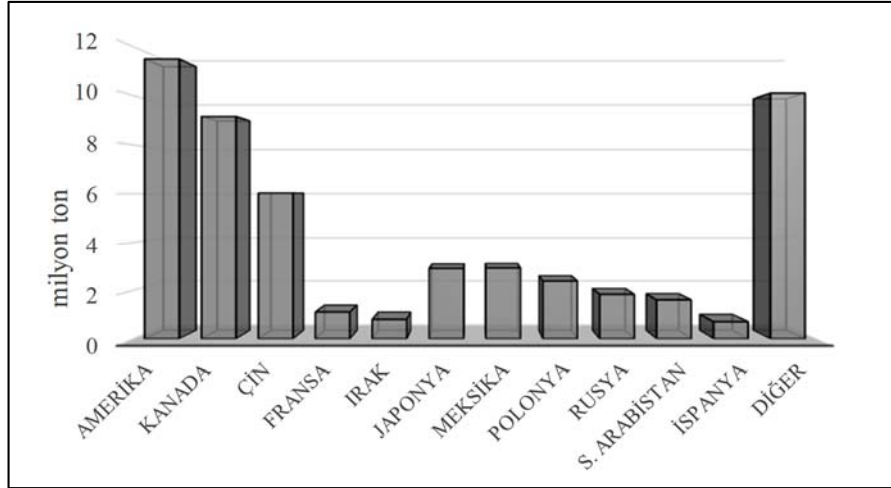
Ham petrol ve doğal gazdan kükürtün ayrıştırılması, çeşitli çevre koruma kanunları aracılığıyla zorunlu ve denetimli hale getirilmiştir. Bundan dolayı ham petrol ve doğal gaz tüketimindeki artış ile kükürt, dünya çapında uluslararası ticareti yapılan en önemli ürünlerden birisi haline gelmiştir [2-3]. Petrol endüstrisinden elde edilen kükürtteki artışın nedeni; sadece petrol kullanımındaki artış olarak değil aynı zamanda getirilen ve zorunlu tutulan çevresel zararların azaltılması kapsamında, yeni çevre kanun ve yaptırımları olarak gösterilebilir. IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü) tarafından getirilen ve 2020 yılında devreye girecek olan yeni düzenleme ile denizcilik yakıtlarında üst sınırı %3,5 olan kükürt oranı %0,5 oranı ile sınırlandırıldı. Bu düzenlemenin mevcut kükürt üretiminde senelik toplam üretimin %6'sı kadar artışa neden olacağı tahmin edilmektedir [15,18].

1994-2017 yılları arasına ait dünya global kükürt üretimi miktarları Şekil 1.3'te verildiği gibidir [4-5,20]. Dünya kükürt üretimi 1994 yılında 51 milyon ton/yıl iken 2017 yılı itibariyle bu değer yaklaşık olarak 80 milyon ton/yıl değerine ulaşmıştır. 2007-2015 yılları arasında ortalama 65 milyon ton/yıl olan dünya üretimi 2016 yılı sonrası çok ciddi bir artış göstererek 80 milyon ton/yıl değerinin üzerine çıkmıştır. 24 yıllık süre aralığı göz önünde bulundurulduğunda bu pazarın yıllık ortalama %2,4 büyüme payı olduğu görülmektedir.



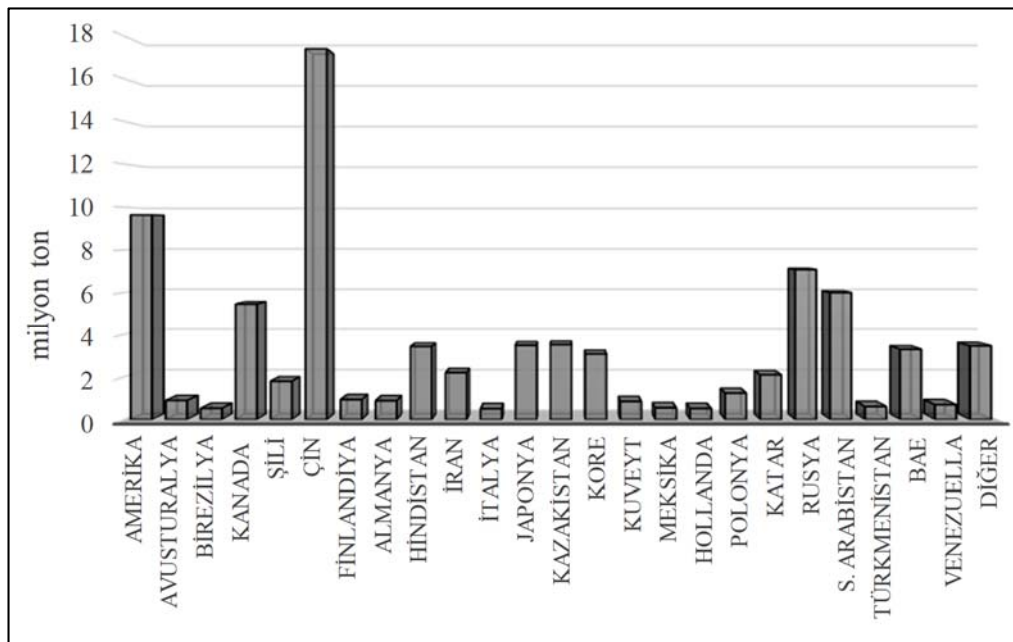
Şekil 1.3. Dünya kükürt üretiminin yıllara göre dağılımı [20]

1994 yılında gerçekleştirilen dünya kükürt üretiminin ülkelere dağılımı Şekil 1.4'te görülmektedir [20]. Bu dönemde yapılan 51 milyon ton üretimin büyük bir kısmının 11 ülke tarafından gerçekleştirildiği bilinmektedir. Toplam kükürt üretiminin %52'si Amerika, Kanada ve Çin olmak üzere üç ülke özelinde gerçekleşmekteydi.



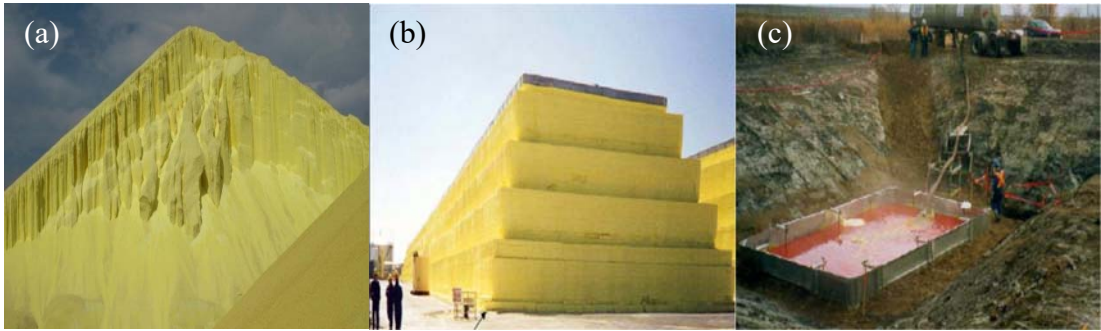
Şekil 1.4. Dünya kükürt üretiminin ülkelere göre dağılımı, 1994 [20]

2017 yılında gerçekleştirilen dünya kükürt üretiminin ülkelere dağılımı Şekil 1.5'te verildiği gibidir [20]. 1994 yılında üretimin büyük bir kısmının 11 ülke tarafından gerçekleştirilirken, 2017 yılında bu rakamın 24 ülkeye ulaştığı görülmektedir. Kükürt üreten ülke sayısındaki artışın temel nedeni dünya petrol endüstrisindeki hızlı yükseliş olarak gösterilebilir. Kükürt maden yataklarında sahip olmayan ve kükürt üretiminde pazar payı bulunmayan ülkelerin de petrol rafinerilerine sahip olması ve petrol işleme tesislerinden geri dönüştürülmüş kükürt elde etmeleri pazar payı içerisinde yer almalarını sağlayan en büyük etkidir.



Şekil 1.5. Dünya kükürt üretiminin ülkelere göre dağılımı, 2017 [20]

Alternatif birçok sektörde kullanım alanı olması nedeniyle kükürtün kullanım alanlarını ana bir başlık altında toplamak oldukça zordur. Ancak gerçekleşen toplam üretim miktarı içinde ticaretin en yoğun gerçekleştiği; yani kükürtün aktif tüketim alanlarının olduğu sektörler gübre, kimya, cevher madenciliği, petrol, ilaç, atık yönetimi, kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisi olarak gösterilebilir. Gübre endüstrisi toplam kükürt üretiminin %60'ının kullanıldığı başlıca tüketim kaynağıdır. Saf kükürt aynı zamanda kimya sektöründe sülfürik asit (H_2SO_4) elde etmek amacıyla kullanılmakla birlikte kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisi, petrol işleme ve sentetik kauçuk üretiminde de saf halde kullanılmaktadır. H_2SO_4 ise birçok sektörde katalizör ve kaplama proseslerinin kimyasal reaksiyonları için genel bir kullanım alanına sahiptir. Mevcut saf kükürt ve sülfürik asit kullanımı nispeten yoğunlaşmakta ancak, artan küresel üretimin tüketilmesi için yalnızca sınırlı kullanım alanları bulunmaktadır [2-19]. Bunun sonucu olarak kükürt endüstrisinde depolama ve arz-talep dengesizliği olmak üzere iki temel problem oluşmaktadır. İlk olarak; artan üretim miktarları ile birlikte tüketim miktarından fazla olan ürünlerin depolanması büyük bir problem yaratmaktadır. Kükürt; granül form, plakalı bloklar veya erimiş halde depolanabilmektedir. Depolama türlerine ait görüntüler Şekil 1.6'da gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Kükürt depolama türleri (a) granüler, (b) plakalı, (c) erimiş halde

Kükürt miktarının fazla olması açık depolama zorunluluğunu beraberinde getirirken, bu durum çevresel koşulları olumsuz yönde etkilemektedir. Kükürt depolaması özenli, dikkatli ve kontrollü bir şekilde yapılmazsa çok büyük çevresel risk teşkil etmektedir [21]. Açık depolama alanlarındaki yağmur suyu akışı düzgün kontrol edilip yönetilemezse kükürtün sülfürik aside oksidasyonu sonucu yer altı suyunda kirlenmeler yaşanabilir. Plakalı bloklar kullanılarak yapılan depolamada, bloğun yapısal bütünlüğü korunamazsa uçucu kükürt tozu da çevresel bir problem haline gelmektedir [22]. Kazakistan'da bulunan TengizChevroil rafinerisinde petrol

işlenmesi sonucunda ortalama 3000 ton/gün saf kükürt açığa çıkmaktadır. Artan üretim sonucunda oluşan Kazakistan kükürt stokları, “kükürt dağları” olarak isimlendirilmekte ve uzaydan uydu aracılığıyla çekilen fotoğraflarda da rahatça görülebilmektedir [23]. Kükürt pazarındaki arz talep dengesinin olmamasının getirmiş olduğu bir diğer problem ise kükürtün alternatif kullanım alanı eksikliği nedeniyle artan arzın karşısında yetersiz kalan taleptir. Talepte artış oluşturmak ve depolanan kükürt miktarının azaltılması amaçlandığından kükürde alternatif kullanım alanlarının oluşturulması amaçlanmıştır. Artan kükürt miktarının değerlendirilmesinde, ivme kazanan inşaat endüstrisi üzerinde durulması kükürt bağlayıcılı betonların ortaya çıkmasına neden olmuştur.

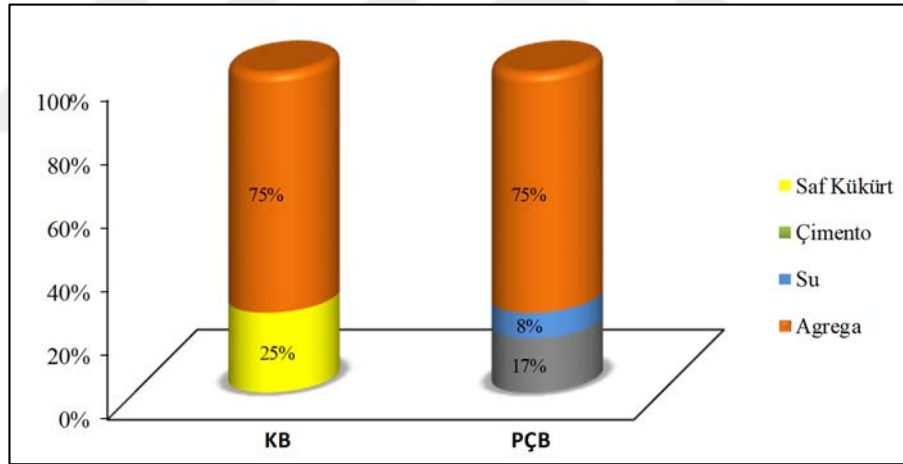
1.1. Kükürt Bağlayıcılı Betonlar

Dünyadaki enerji ihtiyacının her geçen gün hızla artması ve bu ihtiyacın büyük bir bölümünün petrol endüstrisi tarafından karşılanması, petrol endüstrisinden elde edilen kükürt miktarlarının artmasına neden olmaktadır. Petrol işlenmesi sonucunda elde edilen kükürtün artışı sadece petrol kullanımındaki artış değil aynı zamanda çevresel zararların azaltılması kapsamında yeni çevre kanun ve yaptırımlarının da getirilmesi olarak gösterilebilir. Artan kükürt üretimi, kükürtün yeni uygulamalarda kullanılması ihtiyacını temel zorunluluk haline getirmektedir. Günümüzde kükürt, inşaat sektöründeki bazı uygulamalar için iyi bir malzeme alternatifi olarak görülmektedir. Bağlayıcısı çimento olan geleneksel betonlara alternatif olarak, kükürt bağlayıcılı betonlar diğer inşaat malzemeleri arasında yerini almaktadır. Kükürt bağlayıcılı betonlar, bağlayıcı olarak kükürt ve agreganın karıştırılmasıyla hazırlanmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan kükürt ısıtılarak sıvı faza getirilmekte ve böylece geleneksel betondaki çimento+su ihtiyacını kükürt tek başına karşılamaktadır. Bu nedenle kükürt bağlayıcılı betonlar literatürde “waterless concrete - susuz beton” olarak da geçmektedir [12, 24-26]. Karışıma konulan tüm malzemelerin 140-150°C arasındaki sıcaklıklarda karıştırılmasından dolayı kükürt bağlayıcılı betonlar imalat açısından sıcak beton olarak da isimlendirilmektedir. Geleneksel Portland çimento betonlarında bağlayıcı miktarını anlatan dozaj tanımı kükürt bağlayıcılı betonlar için karışıma giren kükürt miktarını tanımlamakta ve bu oran, kullanılan agrega tipi ve oranına göre betonun mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak optimize edilmektedir [27]. Yüksek basınç dayanımı, hızlı priz alması, düşük geçirgenlik ve

asitlere ve tuzlu ortamlara karşı yüksek direnç göstermesi kükürt bağlayıcılı betonların dikkat çekici özelliklerinin başında gelmektedir [14]. Kükürt bağlayıcılı betonlar içerisinde kullanılan kükürtün saf olarak kullanılması veya kimyasal katkı kullanılarak modifiye edildikten sonra kullanılması durumları göz önünde bulundurularak, kükürt beton (KB) veya kükürt polimer beton (KPB) olarak isimlendirilmektedir.

1.1.1. Kükürt betonlar (KB)

Kükürt betonların en genel tanımı, sıcak halde bulunan agrega içerisine erimiş halde saf kükürtün bağlayıcı olarak ilave edilmesi ve karışımın 130 ile 150°C arasında karıştırılması sonucunda hazırlanan beton olarak yapılmaktadır. KB'lerde herhangi bir kimyasal katkı kullanılmadan saf kükürt bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. KB'ler, genellikle ağırlıkça %25 oranında eritilmiş saf kükürt ile %75 oranında önceden ısıtılmış agrega karıştırılarak hazırlanmaktadır. Geleneksel PÇB ile KB'lere ait ağırlıkça karışım oranları Şekil 1.7'de gösterilmektedir.

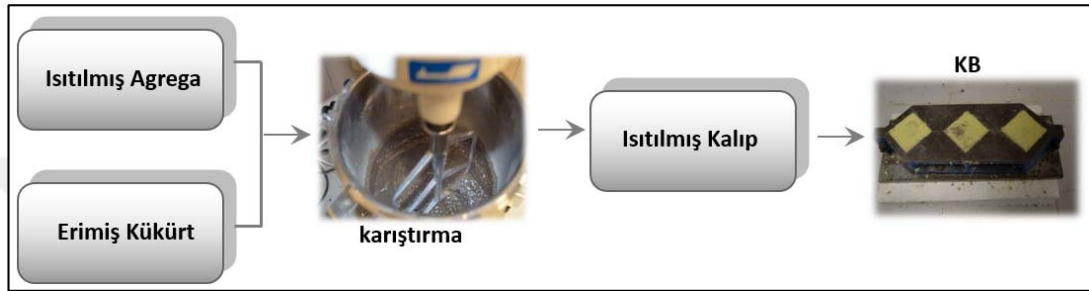


Şekil 1.7. PÇB ve KB ağırlıkça karışım oranları

Önceden ısıtılmış agrega ve erimiş halde bulunan kükürt mekanik bir karıştırıcı içerisine konularak minimum 20 dk süre ile karıştırıldıktan sonra önceden ısıtılmış olan kalıplara yerleştirilir ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılarak KB hazır hale getirilmektedir (Şekil 1.8).

Kükürtün çok eski tarihlerde de bağlayıcılık özelliğinin bilindiği ve kullanıldığı arkeolojik kazılardan ve elde edilen yazılı kaynaklardan anlaşılmaktadır [14, 28, 29]. 17. yy.da eritilen kükürtün soğuma sonrası hızlı katılaşma özelliğinden faydalanılarak

metal çubukların kaya içerisine ankre edilmesi için kullanıldığı ve benzer uygulamaların yine aynı dönemlerde Latin Amerika'da gerçekleştirildiği bilinmektedir [29]. 1. Dünya savaşı bittikten sonra Avrupa ve Amerika'da kükürt kaynaklarında kükürt fazlası oluşmaya başlamış ve bu durum fazla kükürtün tüketilmesi için yeni kullanım alanlarına olan ihtiyacı açığa çıkarmıştır [30]. Kükürt betonların yüksek dayanımı, korozyon dirençleri, su geçirimsizlikleri ve hızlı dayanım kazanma karakteristikleri araştırmacıların bu konuya olan ilgilerini arttırmıştır.



Şekil 1.8. KB karışımının hazırlanması

Fazla kükürtün yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi konusundaki ilk çalışmalar Bacon ve Davis tarafından 1921 yılında gerçekleştirilmiştir. Yapmış oldukları %60 kum ve %40 kükürt karışımından asit direnci ve dayanımı yüksek olan bir malzeme elde etmişlerdir [31]. 1924 yılında kükürt ve kömür kullanılarak hazırlanan karışımların asit dirençlerinin belirlenmesi amacıyla Kobbe tarafından da benzer bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir [32]. Duecker tarafından 1934 yılında gerçekleştirilen araştırmalarda ise termal değişimler ile birlikte hacimsel değişikliğin meydana geldiği ve bundan dolayı eğilme dayanımında düşüş olduğu belirlenmiştir. Duecker aynı çalışma kapsamında olefin polisülfür kullanarak kükürtü modifiye ederek hacimsel değişikliği sınırlandırmayı başarmış ve bunun sonucu olarak dayanım kaybının önüne geçmiştir [33]. 1940 yılında McKinney tarafından kükürt harçların kimyasal dirençlerinin test yöntemleri için önerilen metotlar ASTM (American Society for Testing and Materials-Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu) tarafından kabul edilip "Provisional Method for Testing Sulfur Cement" adıyla standart halinde yayınlanmıştır [34-35]. Dale ve diğ. tarafından 1966 ve 1968 yıllarında kükürtün agregat oranı ve çeşitleri ile ilişkisinin araştırılması amacıyla da çalışmalar gerçekleştirilmiştir [36-38]. 1920'li yıllardan başlayarak 1960'lı yılların sonlarına kadar devam eden çalışmalarda amaç kükürtün alternatif olarak inşaat

endüstrisinde kullanılabileceğinin gösterilmesi idi. 1970'li yılların başından sonra gerçekleştirilen çalışmalar ise kükürten elde edilen yapı malzemelerinin dayanım ile dayanıklılık özellikleri ve kullanım alanlarının tanıtılması amacını içermektedir. Kükürt betonların yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği kabul gördükten sonra betonların mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla 1970 yılında Crow ve diğ. tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda bazalt agregası kullanılarak yüksek dayanımlı kükürt beton elde edilmiştir [39].

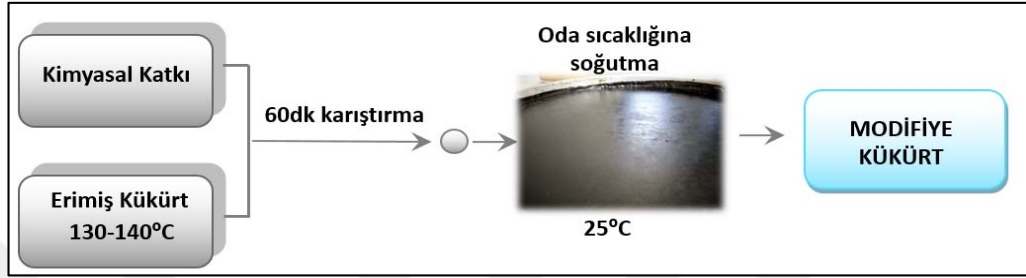
1.1.2. Kükürt polimer betonlar (KPB)

Kükürt polimer betonların en genel tanımı, sıcak halde bulunan agregası ve filler içerisine erimiş halde kükürt bağlayıcı (saf kükürt ve/veya modifiye kükürt) ilave edilmesi ve karışımın 130 ile 150°C arasında karıştırılması sonucunda hazırlanan beton olarak yapılabilmektedir. KPB'lerde saf kükürt bir kimyasal katkı kullanılarak modifiye edildikten sonra beton içerisinde bağlayıcı olarak kullanılmaktadır.

Yapılan araştırmalar sonucunda araştırmacılar, saf kükürt ve agregayı bir araya getirerek yüksek dayanımlı ve korozyon direnci yüksek KB yapılabileceğini göstermelerine karşın bu betonların özellikle nemli ortamlarda ve termal çevrimlere maruz kaldıklarında bir aydan daha kısa sürede ciddi derecede dayanıklılık problemleri yaşadığını belirlemişlerdir [25, 40-42]. Saf kükürt soğumaya bırakıldığında, sıvı durumdaki kükürt ilk olarak 114°C'de %7 hacim azalması göstererek monoklinik kükürt (S_{β}) kristali formunu almaktadır. Soğuma devam ederken sıcaklık 95,4°C'nin altına indiğinde S_{β} kristalleri ortorombik kükürt (S_{α}) kristalleri formuna dönüşmektedir. Bu form aynı zamanda oda sıcaklığında kükürtün sabit formda bulunduğu kristal yapısıdır. Bu geçiş fazları soğuma ile birlikte çok hızlı olarak meydana gelir ve 24 saatten daha kısa bir sürede faz geçişleri tamamlanmaktadır. S_{α} kristal yapısı S_{β} kristal yapısına göre daha yoğundur, bu nedenle kükürt bağlayıcı içerisinde iç gerilmeler oluşur ve bunlar bağlayıcı içerisinde ciddi çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Bu çatlaklar kükürt bağlayıcıda zamanından önce göçme meydana getirmektedir [14, 43]. Bu durumun engellenmesi amacıyla kimyasal veya fiziksel olarak kükürt kristalizasyonu kontrol edilerek saf kükürtün modifiye edilmesi gerekliliği anlaşılmıştır. Saf kükürt formülasyonlarına bir modifiye edici

bileşen eklenerek kükürt bazlı bağlayıcı formülasyonlarında iyileştirmeler sağlanmıştır. Modifiye kükürt (MK) uzun dönemli dayanıklılık

özelliklerinin iyileştirilebilmesi amacıyla içerisinde %95 oranında saf kükürt ve %5 oranında organik modifikatör içeren termoplastik bir bağlayıcıdır. Kükürt modifikasyon işlemi Şekil 1.9'da şematik olarak gösterildiği gibidir.



Şekil 1.9. Kükürt modifikasyonu şematik gösterimi

Kükürtün kimyasal modifikatör kullanılarak modifiye edilmesi ile ilgili ilk kapsamlı çalışma Kanada Ulusal Araştırma Konseyi (NRC) ve McGill Üniversitesinin 1972 yılında ortaklaşa desteklediği proje ile başlamıştır. Bu çalışma kapsamında kükürt betonların dayanıklılık problemlerinin çözülmesi amaçlanmıştır [2]. Aynı dönemlerde başlayan, Kanada Mineral ve Enerji Teknolojisi Merkezi (CANMET) ile Kanada Ulusal Araştırma Konseyi (NRC) tarafından desteklenen diğer bir araştırma projesinde ise kükürt betonların donma-çözülme dayanımlarının, mekanik özelliklerinin ve numune boyutu-basınç dayanımı arasındaki ilişkinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada Malhotra, hızlı ve yavaş çevrim olmak üzere iki farklı donma-çözülme çevrimi etkisini kükürt betonlar için uygulamıştır [44]. Her iki yöntemde de -18 ve +4°C aralığında suda donma-çözülme çevrimleri uygularken birinci yöntem ile ikinci yöntem arasındaki tek fark donma-çözülme çevrim süreleri olarak alınmıştır. Birinci yöntemde günde 8 çevrim uygulanırken ikinci yöntemde günde bir çevrim uygulanmıştır. Modifiye kükürt ve saf kükürt ile hazırlanan betonların performansları karşılaştırılırken aynı zamanda farklı agrega türlerinin etkisi de incelenmiştir. Agrega olarak karışımlarda boşluklu volkanik taş, kalker, çöl kumu ve doğal kum kullanılmıştır. Deneyler sonucunda farklı agrega karışımları kullanılarak hazırlanan tüm kükürt beton numunelerinin oldukça düşük donma-çözülme dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Volkanik taş ve çöl kumunun birlikte kullanıldığı karışım kükürt betonlarda minimum donma-çözülme direnci gösterirken en iyi performans kum ve

kükürtün birlikte kullanıldığı karışımdan elde edilmiştir. Tüm karışım oranlarında kükürt ile modifiye kükürt ikame edilerek hazırlanan numunelerde donma-çözülme dayanımlarında artış meydana geldiği görülmüştür. KPB'lerde ise en iyi donma-çözülme direnci kalker ve doğal kum kullanılarak hazırlanan karışımlardan elde edilmiştir [44, 45]. 1973 yılında Beaudoin ve diğ. tarafından kükürt betonlar üzerinde donma-çözülme deneyleri gerçekleştirilmiş ve Malhotra tarafından elde edilen sonuçlara paralel sonuçlar elde edildiği görülmüştür [46].

1975 yılında Gamble ve diğ., ile Sullivan tarafından kükürtün kaplama, yapı malzemesi ve inşaat mühendisliği uygulamalarındaki yeri hakkında çalışmalar yayınlanmıştır [47, 48]. 1976 yılında Madenciler Birliği ve Kükürt Enstitüsünün desteğiyle McBee ve diğ. tarafından farklı aşındırıcı özelliği yüksek olan endüstriyel ortamlar altında KPB'lerin aşınma performansının incelenmesi amacıyla saha ve laboratuvar uygulamalarını kapsayan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 40 farklı ticari fabrikada 56 farklı aşındırıcı çevresel etkiye sahip ortam içerisinde KPB ile imal edilen depolama tankları, tank temelleri, zemin betonları ve döşemeler gibi yapı elemanlarının uzun süreli (4 ve 6 yıl) dayanıklılık performansları değerlendirilmiştir. Uzun süreli deneyler sonucunda aşındırıcı çevresel etkiye sahip ortamlarda bulunan KPB yapısal elemanlarında herhangi bir korozyon etkisi ve bozunma gözlenmemiştir [49-51].

1978 yılında Lee, Gamble, Jordon, Gillot ve Shwartz tarafından KPB'lerin mekanik ve dayanıklılık performanslarının artırılması amacıyla karışım oranları ve farklı agrega türlerinin de etkisinin göz önüne alındığı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Lee ve diğ. tarafından 1978 yılında KPB'lerin eğilme etkisi altında yorulma dayanımları üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca DCPD ve uçucu kül ilavesinin eğilme dayanımını arttırdığını görmüşlerdir [52]. Gamble ve diğ. 1978 yılında KPB'lerin sünmesinin belirlenmesi amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. KPB'lerin hazırlanma yöntemlerinin ve test yapılarına kadar geçen kürlenme süresinin, betonların sünme dayanımları üzerinde çok aktif rol oynadığını belirlemişlerdir [53]. Kükürt harcı ve betonun özellikleri ile kullanım alanlarının araştırıldığı bir diğer çalışma ise 1978 yılında Jordon ve diğ. tarafından gerçekleştirilmiştir [54]. Gillot ve diğ. tarafından yayınlanan çalışmada karışıma ilave edilen uygun oranlardaki ince malzemenin ayrışmayı önlediği ve işlenebilmeyi

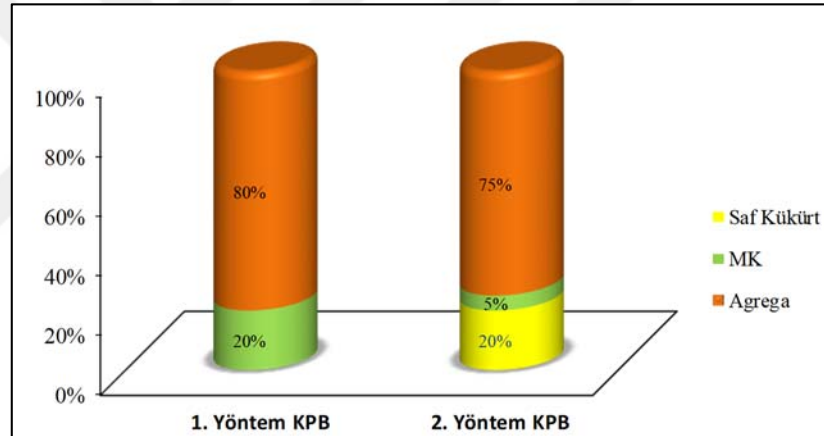
arttırdığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada KPB'lerin benzer dayanımdaki PÇB'lere göre daha gevrek kırılma davranışı gösterdiği görülmüştür [55]. Schwartz ve diğ. tarafından 1978 yılında yapılan deneysel çalışmada kükürde kum ilavesinin harç olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi için basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada %50'den daha düşük kükürt oranına sahip karışımların, matris içerisinde kum oranına göre kükürt miktarının yetersiz kalmasından dolayı daha düşük dayanımlara sahip olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar tarafından, kum dane çapı küçüldükçe artan yüzey alanı nedeniyle bu durumun daha etkin olduğu belirtilmiştir. Yüksek oranlarda kum kullanımının ise kükürt sıvı haldeyken ilave edilen kumun ani katılaşmalara neden olmasından dolayı üniform bir matris oluşumunun önüne geçtiği açıklanmıştır [56].

Gillot ve diğerleri 1980 yılında; kükürt beton, pirit kullanılarak hazırlanan kükürt bağlayıcılı harç ve betonlar üzerinde dayanıklılık deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Hazırlanan numuneler 200 gün süre ile tuzlu su ve deniz suyu içinde bekletilmiştir. Bu numunelere ait sonuçlar havada ve saf su içinde bekletilen referans numunelerine ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tuzlu su ve deniz suyu içinde bekletilen pirotin kullanılarak hazırlanan kükürt bağlayıcılı harç ve beton numunelerde basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinde bir farklılık gözlenmemiştir. Tüm numunelere ait boy değişimi sonuçları birbirlerine yakın sonuçlar verirken hiçbir numunede herhangi bir çatlak oluşumu görülmemiştir. 18 ay boyunca dış ortamda bırakılan numunelerde donma-çözülme çevrim etkisindeki sıcaklık değişimlerinde herhangi bir olumsuz etki de belirlenmemiştir [40].

Tewfik tarafından 1982 yılında, modifiye kükürt ve kum karışımından elde edilen KPB'lerin yoğunluğu, basınç dayanımı, elastisite modülü ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda çalışma kapsamında kalker tozu ilavesinin beton üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda kalker tozu içermeyen KPB'ler için optimum kükürt miktarı %37 olarak bulunmuştur. Karışıma kalker tozu ilave edilmesi bu oranı %20'ye çekerken aynı zamanda basınç dayanımında %20 oranında artış sağladığı belirlenmiştir. 6 ay boyunca 20-50°C sıcaklık ve %90-15 nem oranı değişimine maruz bırakılan numunelerin dayanımlarında herhangi bir kayıp meydana gelmediği görülmüştür. Ancak 3 ay süre ile deniz suyuna maruz kalan numunelerde %10-%20

aralığında değişen oranlarda basınç dayanımı kaybı meydana gelmiştir [57]. 1980’li yıllarda kükürt betonların olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması amacıyla alternatif karışım oranları, hazırlama prosesleri ile mekanik ve dayanıklılık performanslarının belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar Plato (1980), Vroom (1981), McBee ve diğ. (1982, 1983, 1985, 1986), Funke (1982), Gannon ve diğ. (1983), Beaudoin ve diğ. (1984) ve Sullivan (1986) tarafından gerçekleştirilmiştir [49, 58-65]. KPB’lerin karıştırılması ve yerleştirilmesi ile ilgili detayların yer aldığı çalışmaların bu yıllarda yoğunlaşması sonrasında 1984 yılından itibaren Amerikan Beton Enstitüsünde (ACI) “Betonda Polimer” komitesinin (komite 548) “Kükürt Beton” alt komitesi tarafından standartlaştırılmıştır. Kükürt beton komitesi tarafından hazırlanan standart en son hali ise 1993 yılında “ACI 548D-93; Guide for mixing and placing sulfur concrete in construction” adıyla yayınlanmıştır [66]. Bu standartta, kükürt polimer betonların hazırlanmasında, kükürtün modifiye edilmesi için iki farklı yöntem bulunmaktadır. İki yöntemin de amacı kimyasal veya fiziksel olarak kükürt kristalizasyonunun kontrol altına alınmasıdır. ACI 548D-93 standardında önerilen birinci yöntemde kükürt kristalizasyonu kimyasal olarak önlenmeye çalışılmaktadır. Kükürt içerisine katılan farklı kimyasal katkıları ile kükürtün ortorombik faza dönüşmesi engellenmekte ve soğuma sonrası kükürtte kristal oluşumunun baskılanması sağlanmaktadır [14, 66]. Bu yöntemde birçok farklı kimyasal katkı deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Bu katılardan en yaygın olarak kullanılanları disiklopentadien (DCPD) ve farklı oranlarda DCPD, siklopentadien ve dipenten karışımlarıdır. Kükürtün DCPD ile reaksiyonu sonucunda modifiye edilmesi birçok araştırmacı tarafından araştırılmış olmasına rağmen kükürt ve DCPD arasındaki reaksiyonun ekzotermik olması nedeniyle ticari uygulamalarda kullanılması oldukça zordur. Kükürt ve DCPD arasındaki reaksiyon ekzotermik olması ve oldukça kontrollü hazırlanması gerekliliğinin yanı sıra karışım 140°C’nin üstündeki sıcaklıklarda kararsız halde bulunmaktadır. Bu durum, önceden ısıtılmış agrega ile birleştirilen modifiye kükürtün kararsız yapıya geçmesine neden olabilmekte ve beklenmeyen sonuçlarla karşılaşma riskini beraberinde getirmektedir. McBee ve diğ. 1982 yılında yapmış oldukları çalışmalarda kükürt modifikasyonu için bu problemi çözecek yeni bir proses önermişlerdir. Bu proseste araştırmacılar siklopentadienin kontrollü reaksiyonu sonucu betonun karıştırma sıcaklıklarında modifikasyonun kararlı halde kalmasını sağlamışlardır [59-60]. ACI 548D-93 standardında önerilen ikinci yöntemde ise kükürt

kristalizasyonu fiziksel olarak önlenmeye çalışılmaktadır. Kükürt modifikasyonunda saf kükürt, olefin hidrokarbon polimerleri ve uçucu kül gibi fiziksel stabilizatör ile birleştirilmektedir [58, 67-68]. İster kimyasal ister fiziksel metot olsun; standartta yer alan her iki yöntemde de amaç kükürt kristalizasyonunun kontrol altına alınmasıdır. Her iki yöntem kullanılarak hazırlanan kükürt polimer betonların literatürde en çok kullanılan ağırlıkça karışım oranları Şekil 1.10'da verildiği gibidir [66]. 1.yöntem kullanılarak hazırlanan KPB'lerde, MK ile saf kükürt sırasıyla ağırlıkça %20 ve %80 oranında karıştırılarak hazırlanır. 2. yöntem kullanılarak hazırlanan KPB'lerde ise küçük oranlarda kullanılan MK, erimiş haldeki saf kükürt ile uçucu kül belirli bir süre karıştırıldıktan sonra karışıma ilave edilmektedir. Bu betonlarda MK, saf kükürt ve agrega oranları sırasıyla %5, %20 ve %75 civarında kullanılmaktadır.



Şekil 1.10. KPB ağırlıkça karışım oranları

Kükürt modifikasyonu için yapılan birçok deneysel çalışma sonucunda literatürde en çok kullanılan modifikatörler; DCPD, DCPD ve siklopentadien oligomeri, sitren, DCPD ve sitren kombinasyonları, olefinik hidrokarbon polimerleri, bitüm ve 5-etiliden-2-norbornen kombinasyonu olarak özetlenebilmektedir. Modifikasyon için DCPD kullanımı ile ilgili ilk çalışmalar 1974 yılında Currell ve diğ tarafından gerçekleştirilmiştir. DCPD ile kükürtün 140°C'de reaksiyonu sonucunda monoklinik, ortorombik ve kristal yapıda olmayan kükürt karışımını ihtiva eden polisülfür ve serbest saf kükürt karışımı meydana getirdiği araştırmacılar tarafından belirlenmiştir [69]. Sullivan ve diğ. tarafından 1975 yılında modifikasyon için gerekli optimum DCPD oranı, reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığının belirlenmesi amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir [48]. Diehl tarafından 1976 yılında yapılan

deneysel çalışmada, Sullivan tarafından gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmanın sonuçlarına paralel sonuçların bulunmasıyla birlikte 150°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda viskozitede çok ciddi artışlar meydana geldiği ve karışımın bu kondisyon altında kontrolünün çok zor olduğu belirlenmiştir [70]. 1978 yılında Blight ve diğ. ile Bordoloi ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklıklarda kükürt-DCPD karışımlarının yüksek viskozitesinin nedenleri kimyasal açıdan detaylı olarak incelenmiştir [71, 72]. DCPD ile kükürt arasındaki ekzotermik reaksiyon sorunları nedeniyle modifikasyonda DCPD ile siklopentadien oligomeri kombinasyonu kullanılmıştır. Kükürt ve modifikatör arasındaki reaksiyonları teşvik etmek ve tamamlamak için, tepkimeler 120 ile 160°C arasında 1-15 saat süresince gerçekleştirilmektedir. Uygun oligomer ve DCPD kombinasyonu kullanıldığında, kükürt ve siklopentadien arasındaki reaksiyonun ekzotermikliği kontrol edilebilmektedir. Başka bir deyişle, yalnızca DCPD ile kükürt reaksiyonunda sergilenen şiddetli ve ekzotermik kütle reaksiyonu, DCPD ile siklopentadien oligomeri kullanılarak sorunsuz bir şekilde kontrol edilen bir reaksiyon halinde ayarlanabilmektedir [2]. McBee ve diğ. tarafından 1982 yılında DCPD ve siklopentadien oligomeri kombinasyonları ve kimyasal özelliklerinin incelendiği deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiş ve betonun karıştırma sıcaklıklarında modifikasyonun kararlı halde kalması sağlanmıştır [66, 73]. Blight ve diğ. tarafından 1978 yılında yapılmış olan araştırmada DCPD haricinde sadece sitrenin ve sitren ile DCPD kombinasyonlarının kükürt modifikasyonunda kullanılması ile ilgi çalışmalar da gerçekleştirilmiştir [71]. Vroom 1981 yılında yaptığı deneysel çalışmada olefinik hidrokarbon polimerlerinin kükürt modifikasyonunda kullanımı üzerinde durmuştur. Bu amaçla PR220, RP020, CTLA ve Escopol ticari isimleri ile temin edilen hidrokarbon stabilizatörler üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir [58]. Mohamed ve diğ. tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında kükürt modifikasyonu için bitüm kullanılmıştır. Bu proste, bitüm ve belirli bir oranda emülgatör kullanılarak saf kükürt modifiye edilmektedir. Bu modifikasyon prosesinde modifiye edilmiş kükürt soğuma sırasında S_{β} kristali S_{α} kristallerine dönüşmektedir ancak modifiye edilmiş kükürt, kükürt kristalleri arasında plakalı bir yapı halinde yer alır ve bu durum faz dönüşümlerinin oluşmasını engellemektedir [2, 14, 19, 74-76]. 5-etiliden-2-norbornen (ENB) en geniş uygulama alanına sahip termonomer olmasına rağmen oldukça pahalı bir kimyasaldır. Reynhout ve diğ. tarafından 1983 yılında etiliden

norbornen veya 5 vinil norbornenin kükürtün modifikasyonu için kullanımının incelenmesi amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Üretilen modifiye kükürtün siyah, camsı bir katılığa sahip olduğunu ve bu nedenle kükürt bağlayıcı olarak harç ve beton içerisinde kullanımının uygun olmadığını belirlemişlerdir [2].

1980'li yılların sonundan itibaren polimerlerin organik kimyasındaki gelişmelere bağlı olarak kükürt kimyası ve kükürt modifikasyonu konusunda gerçekleştirilen bilimsel araştırmalar ile kükürt özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda önemli bir yol kat edilmiştir. KPB'ler ile ilgili literatürde yer alan yakın tarihli diğer çalışmalar ise aşağıda özetlenmiştir.

Al-Tayyib ve diğ. tarafından 1986, 1988 ve 1989 yıllarında KPB içerisindeki donatının korozyonunun belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk çalışmada KPB ile PÇB'lerin içerisindeki donatının korozyonu karşılaştırmalı olarak yarı hücre potansiyeli ölçüm deneyleri ile incelenmiştir. Deneyler sonucunda KPB içindeki donatının korozyonun PÇB'ye oranla daha uzun sürdüğü belirlenmiştir. Ancak kötü karışım oranına sahip KPB'lerdeki donatının korozyona başladıktan sonra korozyonun çok hızlı ilerlediği belirlenmiştir. Araştırmacılar kullanılan iri agreganın düşük su emme oranına ve şişme potansiyeline sahip olması durumunda korozyon etkisinin oldukça azaltılabileceğini belirlemişlerdir. Gerçekleştirilen diğer çalışmada KPB'lerin elektriksel direnci ve içerisindeki donatı ile ilişkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada 24 farklı KPB karışımı hazırlanmış ve 15 aylık süre boyunca elektriksel direnç ölçümleri gerçekleştirilerek PÇB'ler ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları KPB'lerin korozyon başlangıç sürelerinin PÇB'lere oranla oldukça uzun süre aldığı belirlenmiştir. KPB içerisindeki donatının korozyonu üzerinde benzer bir çalışma da Orłowski ve diğ. tarafından 2004 yılında gerçekleştirilmiştir [77-80].

Abdel-Jawad ve diğ. tarafından 1994 yılında yapılan deneysel çalışma kapsamında su ve sıcaklık etkisinin KPB'lerin basınç dayanımları üzerindeki değişimi incelenmiştir. Üç farklı tipte agrega kullanılarak hazırlanan KPB numuneleri, 1 ile 28 gün arasındaki sürelerde 20, 40 ve 60°C'deki su içerisinde bekletilmişlerdir. Su içerisinde bekletilen numuneler ile referans numunesi olarak oda sıcaklığında bekletilmiş olan numunelerin, 3, 7, 14 ve 28. günde basınç dayanımı değerleri belirlenerek, sonuçlar

karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, deneysel çalışma sonucunda su ve sıcaklık etkisinde kükürt bağlayıcılı betonlarda önemli ölçüde basınç dayanımı kayıplarının meydana geldiğini belirlemişlerdir [25].

Darnell 1996 yılında, KPB'lerin katılması sırasında herhangi bir kimyasal reaksiyonun meydana gelmemesi, sadece soğuma ile katılmanın sağlanması ve geçirimsizlik değerlerinin düşük olması gibi özelliklerini göz önünde bulundurarak, radyoaktif ve zararlı atıkların KPB'lerde kullanılabilirliğini araştırmıştır. KPB karışımlarında içerisinde belirli oranlarda radyoaktif ve zararlı madde içeren uçucu kül kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerin radyoaktif özellikleri Amerikan Çevre Koruma Ajansı ve Nükleer Düzenleme Komisyonu tarafından kabul edilen standartlarda belirtilmiş olan deneylerle belirlenmiştir. Radyoaktif ve zararlı atık içeren uçucu külün %5 oranında kullanılması ile hazırlanan numunelerde cıva, kurşun, gümüş, arsenik, baryum ve krom oranlarının önerilen eşik değerlerin altında kaldığı belirlenmiştir [81].

Iowa Eyalet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Wahshat tarafından doktora tezi kapsamında prefabrik olarak üretilmiş olan beton kanalizasyon borularının uygun maliyetler ile sülfürik asit dayanımlarının artırılması amacıyla 2001 yılında bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Prefabrik olarak hazırlanmış beton boruların saf kükürt ve modifiye edilmiş kükürt harçlar kullanılarak güçlendirilmesi için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Her iki uygulama yönteminin de prefabrik boru üretimine engel olmaması ve üretim sonrası uygulanabilir olmasına önem verilmiştir. İlk yöntemde iç içe geçen iki borunun birleşim noktası geçirimsizlik ve kaçakların önlenmesi amacıyla kükürt bağlayıcılı harçlar kullanılarak takviye yapıldıktan sonra beton boruların iç yüzeyi özel yaptırılan kalıplar kullanılarak kükürt bağlayıcılı harçlar ile kaplanmıştır. İkinci yöntemde ise boru-boru birleşim noktası geçirimsizlik ve kaçakların önlenmesi amacıyla kükürt bağlayıcılı harçlar kullanılarak takviye yapıldıktan sonra mekanik ekipman yardımıyla döndürülen beton boruların iç yüzeyi kükürt bağlayıcı harçların hızlı katılma özelliği kullanılarak kaplanmıştır. Çalışmada beton boruların sülfürik asit dayanımlarının artırılması amaçlanırken aynı zamanda üretim prosesleri üzerine de alternatif öneriler getirilmiştir. Kükürt modifikasyonunda ağırlıkça %5 oranında DCPD kullanılmıştır. KPB'lerin KB'lere oranla daha düşük oranda büzülme eğiliminde olduğu bulunmuştur. Hem KPB hem de KB'lerin PÇB'lere oranla daha yüksek basınç dayanımına sahip oldukları

belirlenmiştir. KPB'lerin sülfürik asit direncinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Önerilen üretim sistemlerinin maliyetleri karşılaştırılarak her iki yöntemde de ekonomik kazanç elde edildiği hesaplanmıştır [82].

Alberta Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Mühendisliği Ana bilim Dalında Dutari tarafından yüksek lisans tezi kapsamında istinat duvarında kükürt beton kullanımının araştırılması amacıyla iki aşamalı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada saf kükürt, kumlu petrol cevheri petrole çevrilirken açığa çıkan atık kum ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan alternatif karışım oranlarındaki numunelerin mekanik özelliklerinin ve donma-çözülme dayanımlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. İstinat duvarlarının maruz kaldığı en önemli çevresel koşullardan birinin donma-çözülme etkisi olması nedeniyle karışımların 50, 100, 200 ve 300 donma-çözülme (ASTM C-666 Prosedür A) çevrimi altındaki performansları değerlendirilmiştir. İkinci aşamada ise mekanik özellikleri belirlenen karışımların, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak istinat duvarı hesaplamaları yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, uçucu kül ilavesinin basınç dayanımı artırırken elastisite modülü üzerinde ise önemli ölçüde etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Tüm karışımlar için hazırlanan KB numuneleri donma-çözülme çevrim sayısı 300'e ulaşmadan göçtükleri görülmüştür. Karışımdaki kükürt oranı %10 ve altında olduğu durumlarda donma-çözülme etkisindeki ortamlarda kükürt betonların kullanılmasının uygun olmadığı belirlenmiştir [83].

Azad ve diğ. tarafından 2003 yılında saf kükürt ve modifiye edilmiş kükürt kullanılarak hazırlanan kükürt bağlayıcılı betonların performanslarının karşılaştırılması amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda iri ve ince agrega olarak sırasıyla kırma kalker ve doğal kum kullanılırken filler olarak iri agrega tozu kullanılmıştır. Her iki beton türü üzerinde basınç ve çekme dayanımı, su emme deneyi ile gaz emisyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda numuneler tekrarlı ıslanma-kuruma çevrimlerine tabi tutularak basınç dayanımı ve su geçirimsizliği kontrolleri yapılmıştır. KPB'lerin KB'lere göre daha yüksek performans ortaya koyduğu görülmüştür. Islanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan numunelerin yapısal bütünlüklerini kaybetmesi sonucu basınç ve su geçirimsizlik deneyleri gerçekleştirilememiştir. Bunun nedeni olarak araştırmacılar kullanılan agrega kalitesinin düşük olmasını göstermişlerdir. Bu deneye ait sonuçların literatürde

verilmiş olan deney sonuçları ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. 60°C'ye kadar ısıtılan KPB numuneleri üzerinde gerçekleştirilen gaz emisyon testleri sonucunda zararlı gaz salınımlarının izin verilen sınırlar altında kaldığı ve insan sağlığına zararlı etkisi olmadığını belirlemişlerdir [84].

2006 ve 2007 yılında yapılan çalışmalar sonrasında kükürt betonların modifikasyonu için Mohamed ve diğ. tarafından alternatif bir proses önerilmiştir. Araştırmacılar saf kükürtün modifikasyonu için olefinik hidrokarbon polimerleri kullanmışlardır. Bu amaçla yapmış oldukları çalışmada 20°C'deki yoğunluğu 1,0289 g/cm³, erime noktası 48,8°C, 135°C'deki kinematik viskozitesi 431 cSt ve kimyasal içeriği C:%79, H:%10, S:%3,3, N:%0,7 olan bitüm kullanmışlardır. Ağırlıkça %97,5 erimiş saf kükürt ile %2,5 bitümü homojen bir karışım elde edebilmek için belirli oranda emülgatör katarak 140°C'de sıcaklık kontrollü olarak 45-60 dakika süre ile karıştırmışlardır. Elde edilen modifiye kükürtün, oda sıcaklığında soğumaya bırakılarak camsı bir görünüm aldığı gözlemlenmiştir. Önermiş oldukları prosesi kullanarak elde etikleri modifiye kükürt ile kum ve uçucu kül kullanarak, KB ve KPB hazırlamışlardır. Bu betonların mekanik özelliklerini karşılıklı olarak incelemişlerdir. Deneylerde modifiye kükürt oranının işlenebilirlik ve mekanik özellikler üzerinde oldukça etkin olduğunu görmüşlerdir. Araştırmacılar önermiş oldukları modifikasyon prosesini kullanarak 2009 yılında KPB'lerin sülfürik asit (H₂SO₄) ve sodyum klorür (NaCl) çözeltisi içerisindeki performanslarını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Deneyler sonucunda, KPB'lerin yüksek basınç dayanımına, düşük hidrolik geçirgenliğe, asit ve tuzlu sulu ortamlara karşı dirençli oldukları belirlenmiştir. Mohamed ve diğ. tarafından 2011 yılında aynı modifikasyon prosesi ile hazırlanan modifiye kükürt içerisine ilave edilen çimento fırın tozu ve kum ile hazırlanan karışımların katılma aşamaları incelenmiştir. Deneyler sonucunda, modifiye kükürt miktarının artması ile betonların basınç dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Karışım için optimum bağlayıcı/agrega oranı 0,8 olarak bulunmuştur. Referans numune ile karşılaştırıldığında hazırlanan betonların basınç dayanımında azalmalar meydana geldiği belirlenmiştir. Bu azalma, araştırmacılar tarafından çimento fırın tozunun kimyasal içeriğinden kaynaklandığı şeklinde açıklanmıştır. Betonların basınç dayanımları düşük olduğundan karışım içerisine %35 oranında cam lif ilave edildikten sonra dayanıklılık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda fiziksel ve kimyasal kararsızlıkları nedeniyle

olumsuz çevresel koşullar altında çimento fırın tozunun kükürt bağlayıcılı betonlar içerisinde agrega olarak kullanılmasının uygun olmadığı belirlenmiştir. Mohamed ve diğ. tarafından KPB'lerin kanalizasyon ortamı içerisindeki performanslarının değerlendirilmesi amacıyla 2014 yılında deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İki farklı modifikatör kullanarak hazırlanmış oldukları KPB betonlarına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması için PÇB ve sülfata dayanıklı çimentolu beton numuneleri de hazırlamışlardır. Çalışmalarda modifikatör olarak bitüm ve 5-etiliden-2-norbornen kombinasyonu kullanılmıştır. Hazırlanan tüm karışımlar BAE'de Al Ain şehrinde seçilen bir kanalizasyonun içerisinde 2 m derinliğe yerleştirilmiştir. Numuneler 3, 6, 10, 18 ve 24 aylık sürelerde çıkartılıp laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin dayanıklılık özellikleri fiziksel görüntüleri, ağırlık değişimleri ile mekanik ve hidrolik özellikleri bakımından değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda her iki yöntemle modifiye edilen KPB'lerin, PÇB ve sülfata dayanıklı çimento betonlarına oranla kanalizasyon ortamında daha dayanıklı oldukları görülmüştür [14, 19, 74-76].

Narmin ve diğ. tarafından 2008 yılında modifiye kükürt kullanılan kükürt harçların hazırlanmasında reaksiyon sıcaklığının ve ısıtma süresinin kükürt harcının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Erimiş kükürt 130-140°C'de olefinik katkı maddesi ile reaksiyona girmiş ve daha sonra önceden ısıtılmış filler ve ince agrega ile karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Reaksiyon süresi olarak 0,5, 1, 2 ve 3 saat seçilmiştir. Reaksiyon süresi uzadıkça basınç dayanımının da arttığı belirlenmiştir. Modifikasyon için 140 ve 160°C olmak üzere iki farklı reaksiyon sıcaklığı belirlenmiştir. Sıcaklık 140°C'nin üzerine çıktığında basınç dayanımında azalma olduğu görülmüştür. İdeal karıştırma sıcaklığı 140°C olarak belirlenmiştir. Harç numunelerin karışım oranları ağırlıkça %32 erimiş kükürt, %10 filler ve %58 ince agrega olarak belirlenmiştir. Filler olarak silika tozu, mika ve karbon kullanılmış ve silika tozunun kükürt bağlayıcılı betonlarda olan koku problemini azalttığı görülmüştür [85].

Pouya ve diğ. 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada; PÇB, silis dumanı katkılı beton, polimer takviyeli silis dumanı katkılı beton ve KPB'lerin tamir betonu olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada çimento ile %7 oranında silis dumanı ikamesi yapılarak silis dumanı katkılı beton hazırlanmıştır. Polimer takviyeli silis

dumanı katkılı beton ise çimento %7 oranında silis dumanı ikamesi yapılarak ve %30 sitren bütadien kauçuk lateks katkısı ile hazırlanmıştır. Tamir betonları Basra Körfezi şartlarında (38°C sıcaklık ve %50±1 nem oranında) kürlenmiştir. Etkin bir tamirat için tamir harcı basınç dayanımının tamir edilecek beton basınç dayanımından yüksek olması gerekmektedir. Bu nedenle tamir betonlarında kürlenme sonrası basınç, eğilme ve yarma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda tamir betonlarının yapışma yüzeyi aderans dayanımları, su geçirimsizlikleri ve kuruma rötreleri de kontrol edilmiştir. Sonuçlar silis dumanı katkılı beton ve polimer takviyeli betonların Basra Körfezi bölgesinde onarım için uygun malzemeler olduğunu göstermiştir. KPB'ler diğer tamir betonları kadar etkin bir performans göstermese de belirlenen bölge şartları için yeterli performans gösterdiği belirlenmiştir [86].

Maraghechi ve diğ. 2011 yılında DCPD kullanarak modifiye ettikleri kükürt ile hazırladıkları harçlar içerisinde kırıntı lastik (kauçuk) parçacıklarının kullanılmasının harçlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Harçlar karışıma hacimce %0, 5, 10 ve 15 oranlarında kırıntı lastik parçası katılarak hazırlanmıştır. Karışıma ilave edilen kırıntı lastik parçası miktarı arttıkça harçların basınç dayanımlarında önemli ölçüde azalmalar olduğu görülmüştür. Kauçuk parçaları KPB harçları içerisine agrega ile konulmuştur. Reaktif karıştırma ismi verilen bir diğer karıştırma yöntemi de çalışmada alternatif yöntem olarak denenmiştir. Reaktif karıştırmada kırıntı lastik parçacıkları, kükürt modifikasyonu sırasında DCPD ile birlikte karışıma atılarak kopolimerizasyon evresinde işleme dahil edilmiştir. Böylece kauçuk parçacıkları ile bağlayıcı matrisin adezyonu sağlanmıştır. Reaktif karıştırma uygulanarak hazırlanan KPB harçlarından elde edilen basınç dayanımlarının geleneksel karıştırma yönteminden elde edilen dayanımlardan yaklaşık %25 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca kırıntı lastik parçacığı tipi ve kauçuk ile kükürt bağlayıcı arasındaki adezyonu kuvvetlendirmek için alternatif katkı kullanılması da çalışma içerisinde araştırılmıştır. Her iki konunun da KPB harçların mekanik özellikleri üzerinde etkin rol oynadığı belirlenmiştir [87].

Geri dönüştürülmüş agrega ve uçucu küllü KPB'lerin kimyasal ortamlar ve kötü hava koşulları altında dayanıklılık özelliklerinin araştırılması amacıyla 2014 yılında Shin ve diğ. tarafından deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan alternatif beton karışımları üzerinde mekanik özellik deneyleri ile birlikte kimyasal etkilere karşı

direnç, donma-çözülme çevrimleri ve termal genleşme katsayısı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada uçucu kül ile modifiye kükürt ikamesi yapılarak basınç dayanımlarında artış elde edildiği belirtilmiştir. Geri dönüştürülmüş agrega kullanımı, rijitliği azaltırken; uçucu kül miktarının artmasının rijitliği arttırdığı görülmüştür. KPB'ler PÇB'lere göre daha yüksek asit direnci gösterirken aynı zamanda geri dönüştürülmüş agrega kullanımının da doğal agrega kullanımına göre asit direncini arttırdığı belirlenmiştir. Ancak geri dönüştürülmüş agreganın yüksek su emme oranı nedeniyle donma-çözülme çevrimleri sonrasında bağıl dinamik elastisite modüllerinin daha düşük değerlerde kaldığı bulunmuştur. Bu çalışmada bulunan sonuçlar 2011 yılında Vlahovic ve diğ. tarafından gerçekleştirilen dayanıklılık deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür [3, 6, 88].

Sülfat açısından zengin elektrolitik mangan kalıntılarının KPB içerisinde değerlendirilmesinin hem geri dönüşüm açısından faydaları hem de KPB fiyatlarında ekonomi sağlanması amacıyla Yang ve diğ. tarafından 2014 yılında deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Elektrolitik mangan kalıntıları KPB içerisinde filler olarak kullanılmış ve mekanik özellikler, içyapı ile dayanıklılık özellikleri açısından kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Hazırlanan betonların yüksek dayanım ve oldukça iyi dayanıklılık özellikleri gösterdikleri belirlenmiştir [89].

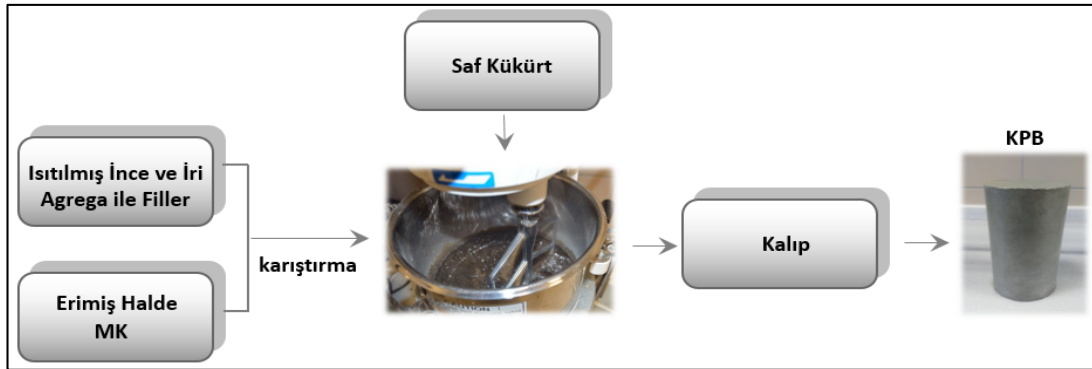
KPB'lerin potansiyel kullanım alanları içerisinde gösterilen prefabrik yol kaplama parkesi olarak kullanılması için uygunluğunun araştırılması ve alternatif karışım oranlarının parke performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla Al-Otaibi ve diğ. tarafından 2018 yılında deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Mohamed ve diğ. tarafından 2006 yılında önerilmiş olan bitüm kullanılarak kükürt modifikasyonu prosesi kullanılmış ve modifikasyonda kullanılan ağırlıkça bitüm yüzdesi %2,5 olarak belirlenmiştir. Saf kükürt, modifiye kükürt ve agreganın döküm prosesinin belirlenmesi amacıyla alternatif döküm prosesleri de denenmiştir. Ağırlıkça %42 iri agrega, %40 doğal kum, %11,5 saf kükürt, %1,2 modifiye kükürt ve %5,3 oranında uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışımdan en iyi mekanik özellikler elde edilmiştir. Kuveyt standartlarında parke taşların kullanılabilmesi için gerekli basınç dayanımı ve su emme değerleri kontrol edilmiştir. Belirlenen optimum KPB karışımı kullanılarak hazırlanan parke ve zemin kaplama taşlarının sınır değerleri sağladığı ve kullanılabilirlik açısından uygun olduğu belirlenmiştir [90].

Dugarte ve diğ. tarafından 2018 yılında gerçekleştirilen deneysel çalışmada, Kolombiya'nın kuzey bölgesinden elde edilen doğal agregalar kullanılarak hazırlanan KPB'lerin performanslarının belirlenmesi amaçlanmıştır. İstatistiki yöntemler kullanılarak optimum karışım oranı katkı/saf kükürt oranı 0,10 olan modifiye kükürt bağlayıcının kullanıldığı durum için %70 agrega ve %30 bağlayıcı olarak belirlenmiştir. Karışımlar üzerinde basınç dayanımı, aşınma dayanımı, yoğunluk, su emme ve kimyasal dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylere ait sonuçlar, KPB numunelerinin sülfürik asit ve sülfat çözeltilerine batırılmasından sonra ağırlıkta ve basınç dayanımında önemli bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Ek olarak, 60 gün boyunca kimyasal tesislerin zeminine yerleştirilen KPB zemin kaplaması numunelerinden de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Nihai sonuçlar, KPB'lerin kimyasal etkilere karşı yüksek dayanım gösterdiğini ve bu özellikleri ile PÇB'lerin yerine geçebilecek yeterlilikte olduğunu göstermiştir [91].

Kükürt; inşaat teknolojileri içerisinde, betonda bağlayıcı olarak kullanılmasının yanı sıra Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan geleneksel betonlarda da kullanım alanına sahiptir. PÇB içinde kullanılacak olan agrega eritilmiş kükürt ile karıştırılarak yüzeyinin ince bir tabaka halinde kükürt tarafından kaplanması sağlanmaktadır. Li ve diğ tarafından 2009 yılında yapılmış olan deneysel çalışmada yüzeyi kükürt ile kaplanmış olan geri dönüştürülmüş agreganın puzolanik tozlar ile kullanılması durumunda betonların slump, basınç ve eğilme dayanımı değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. Yüzeyi kükürt ile kaplanmış olan agregaların PÇB içerisinde kullanımı ile ilgili alternatif çalışmalar Morin (2011), Zhihui (2013) ve Lee (2014) tarafından gerçekleştirilmiştir [92-95]. Kükürt polimer betonların alternatif kullanım alanları üzerinde de çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Kükürtün ay yüzeyinde serbest element olarak bulunması ve ay zemininin ısıtılması işlemi sonrasında elde edilebilir hale gelmesi nedeniyle ayda yapılacak olan inşaat uygulamalarında kullanılması düşünülen yapı malzemelerinin başında yer almaktadır. Kükürt bağlayıcılı betonların soğuma ile katılaşması ve suya ihtiyaç duymaması da uzay uygulamalarında kullanılabilir olması konusunda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Kükürt bağlayıcılı betonların uzayda kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla birçok araştırmacı tarafından ay zemininden kükürtün elde edilebilirliği, darbe dayanımı, uzay radyasyonu gibi uzayda karşılaşılabilecek etkenler göz önünde bulundurularak alternatif deneysel çalışmalar

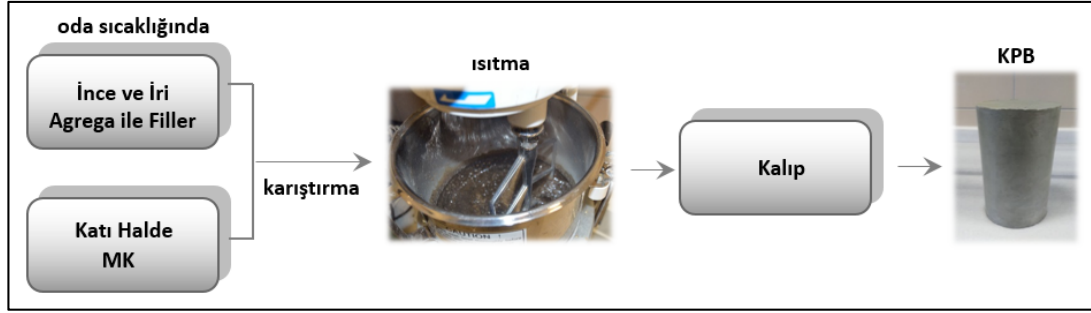
gerçekleştirilmiştir [96-104]. Kükürt bağlayıcılı betonların hızlı dayanım kazanması son yıllarda çok yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanan 3D yazıcı teknolojiler içerisinde de kendine uygulama alanı bulmasını sağlamaktadır. Kükürt bağlayıcılı betonların inşaat imalat teknolojilerinde kullanılan 3D yazıcılarda kullanılmasının uygunluğu Hager ve diğ. tarafından 2016 yılında yapılan çalışmalarda araştırılmıştır [105].

KB ve KP'B'ler üzerinde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalarda araştırmacılar tarafından birçok kükürt bağlayıcılı beton hazırlama prosesi denenmiştir. Literatürde bulunan alternatif döküm prosesleri aşağıda özetlendiği şekildedir. Literatürde günümüze kadar kullanılan birçok alternatif döküm yöntemi olmasına rağmen en temel anlamda KP'B'ler sıcak halde bulunan ince, iri agrega ve filler içerisine erimiş halde kükürt bağlayıcı (saf kükürt+MK) ilavesinin 130 ile 150°C arasında karıştırılması sonucunda elde edilmektedir. Araştırmacılar tarafından yapılmış olan çalışmalarda önerilen KP'B döküm aşamalarının değişim süreci bu bölümde özetlenmektedir. Chempruf Beton şirketi tarafından 1982 ve 1988 yıllarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında hazırlanan KP'B'lerin dökümlerinde Şekil 1.11'de gösterilen döküm prosesi kullanılmıştır. Bu proseste iri ve ince agrega ile filler önceden ısıtılmış ve karıştırılırken erimiş haldeki MK karışıma ilave edilerek karışım tamamlanmıştır [2].



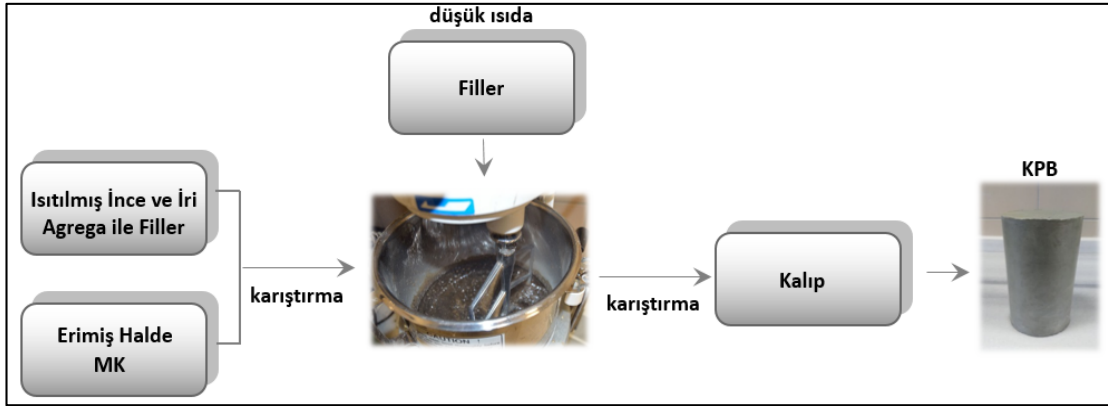
Şekil 1.11. Chempruf beton şirketi (1982) KP'B döküm prosesi

Bir diğer alternatif döküm prosesi Al-Tayyip ve diğ. tarafından 1988 yılında denenmiştir. Bu proseste araştırmacılar tüm karışım bileşenlerini oda sıcaklığında bir araya getirdikten sonra karışım sıvı faza geçene kadar ısıtmışlardır. Bu döküm prosesi şematik olarak Şekil 1.12'de verilmiştir [78].



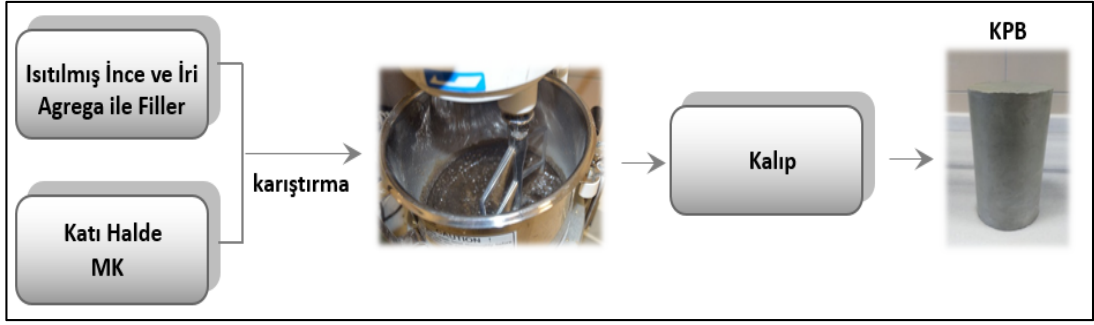
Şekil 1.12. Al-Tayyip ve diğ. tarafından önerilen (1988) KPB döküm prosesi

ACI Komite 548 tarafından 1988 yılında yayınlanan çalışma kapsamında KPB beton içerisindeki bazı olumsuzlukların giderilmesi amacıyla yeni bir döküm prosesi önerilmiş ve bu proses 1991 yılında yapmış olduğu çalışmalarda Tyhlen tarafından da kullanılmıştır. Bu proseste araştırmacılar iri ve ince agregaya ön ısıtma uyguladıktan sonra erimiş MK karışıma ilave edilip karıştırılmıştır. Karışıma daha sonra düşük sıcaklıktaki filler ilave edilerek karışım homojen hale gelene kadar ısıtma devam ederken karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karışıma kükürt katıldıktan sonra filler ilavesinin karışımda tozlanma ve fillerin topaklaşmasına neden olduğu ACI (1988) tarafından açıklanmıştır. Bu döküm prosesi şematik olarak Şekil 1.13'te verilmiştir [2].



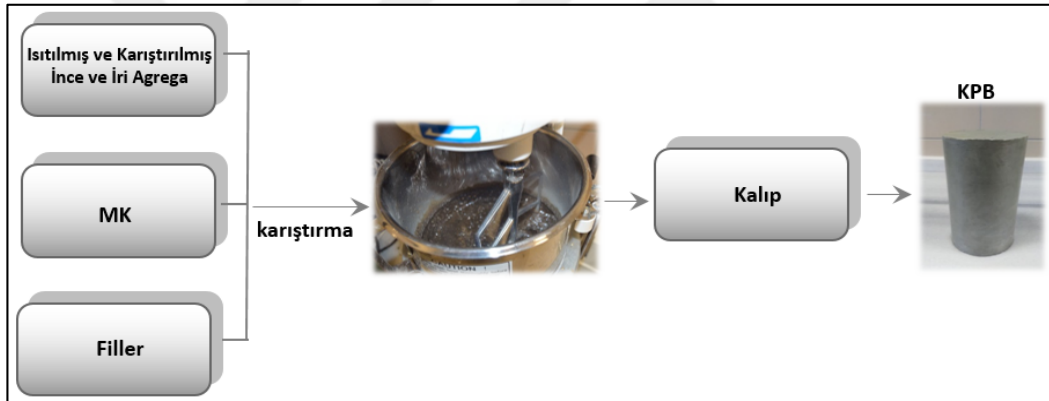
Şekil 1.13. Thylen (1991) tarafından önerilen KPB döküm prosesi

Ekblad tarafından 1992 yılında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda farklı bir döküm prosesi uygulanmıştır. Bu prosede araştırmacılar iri ve ince agregat ile fillerini ön ısıtmaya tabi tutup yüksek sıcaklık seviyelerine kadar ısıttıktan sonra karışıma katı fazda MK ilave etmişlerdir. Bu döküm prosesi şematik olarak Şekil 1.14'te verilmiştir [106].

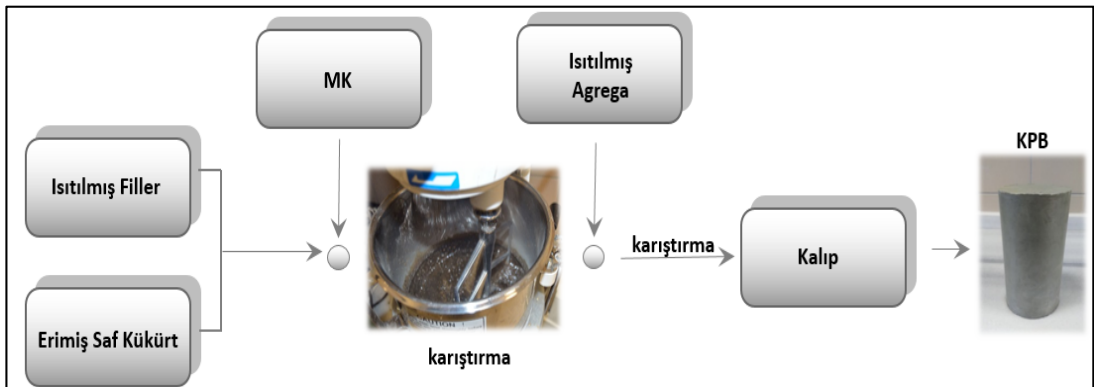


Şekil 1.14. Ekblad tarafından önerilen (1992) KPB döküm prosesi

Chempruf Beton şirketi tarafından 1994 yılında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında 1982 yılında önermiş oldukları döküm prosesine alternatif bir döküm prosesi önermişlerdir. Bu proseste iri ve ince agregaya önceden ısıtılmış ve karıştırılırken filler ile katı haldeki MK karışıma ayrı ayrı ilave edilerek karışım tamamlanmıştır. Bu döküm prosesi şematik olarak Şekil 1.15'te verilmiştir [2].



Şekil 1.15. Chempruf beton şirketi (1994) KPB döküm prosesi



Şekil 1.16. Mohamed ve diğ. tarafından (2006) KPB döküm prosesi

Mohamed ve diğ. tarafından 2006 yılında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında Şekil 1.16'da verilen döküm prosesi önerilmiştir. Bu döküm prosesinde

erimiş saf kükürt içerisine önceden ısıtılmış filler ilave edildikten sonra karışıma MK ilavesi yapılmıştır. Karışım belirli süreler ile karıştırıldıktan sonra önceden ısıtılmış iri ve ince agrega ilave edilerek karışım hazırlanmıştır [2-19].

1.2. Kükürt Bağlayıcı Beton Uygulamaları

Kükürtün tarih içerisinde kendine kullanım alanı bulması, macun ve yapıştırma özelliğinden faydalanılması amacıyla başlayıp çimento bağlayıcı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılmasına kadar geçen bir süreç almıştır. 19. yy.'ın ikinci yarısından 20. yy.'ın kırklarına kadar kükürt kullanılarak modifiye edilmiş mastik ve betona ait uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Ancak bu dönemdeki yüksek kükürt maliyetleri bu uygulamaların yayılmasının önündeki en büyük engel olmuş ve üzerinde çalışılacak bilimsel araştırmaların kısıtlı sayıda kalmasına neden olmuştur. 20. yy.'ın kırklarından başlarına kadar polimerlerin organik kimyasındaki gelişmelere bağlı olarak kükürt kimyası ve kükürt modifikasyonu konusunda gerçekleştirilen bilimsel araştırmalar ile kükürt özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda önemli bir yol kat edilmiştir. Bu dönemde aynı zamanda Amerika, Kanada ve Rusya (eski Sovyetler Birliği) önderliğinde polimerik kükürt modifikasyonu ile etkili yapı malzemeleri oluşturulmaya başlanmıştır. 1975 yılında Sulfurcrete Products şirketi ilk kez kükürt bağlayıcı beton uygulamalarını gerçekleştirmiştir. 1980'li yıllarda Amerika'da bazı alanlarda kükürt bağlayıcı betonların saha uygulaması gerçekleştirilmiştir. 1990'lı yılların sonlarından başlayarak günümüze kadar kükürt bağlayıcı betonların üretimi, özelliklerinin iyileştirilmesi, optimum karışım içeriklerinin bulunması ve patentlerinin alınması gibi konularda oldukça yoğun çalışmalar sürdürülmektedir. Petrol endüstrisinden kaynaklanan kükürt artışı ve bu artışın kükürt fiyatlarında azalmaya neden olması bu çalışmaların yoğunlaşmasının altında yatan esas neden olarak göze çarpmaktadır [107]. Madenciler Birliği ve Kükürt Enstitüsünün desteğiyle McBee ve diğ. tarafından 1977 yılında farklı endüstriyel korozyon ortamları altında KPB'lerin korozyon performansının incelenmesi amacıyla saha ve laboratuvar uygulamalarını kapsayan çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma, 40 farklı ticari fabrikada 56 farklı problemlerle çevresel koşulların içerisinde KPB ile imal edilen depolama tankları, tank temelleri, zemin betonları ve döşemeler gibi yapı elemanlarının uzun süreli (4 ve 6 yıl) dayanıklılık performansları değerlendirilmiştir. Deneyler için hazırlanan yapı elemanlarına ait görüntüler Şekil 1.17, 1.18 ve 1.19'da

verildiği gibidir. Uzun süreli korozif ortamlara maruz bırakılan KPB betonlarının dayanıklılık performanslarının oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [49-50, 61].



Şekil 1.17. KPB kolon temeli [50]

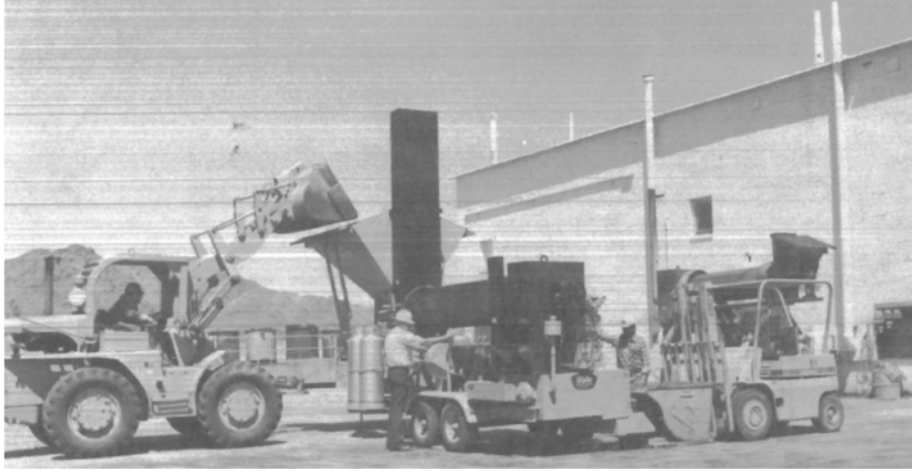


Şekil 1.18. KPB prefabrik asit tankı [50]



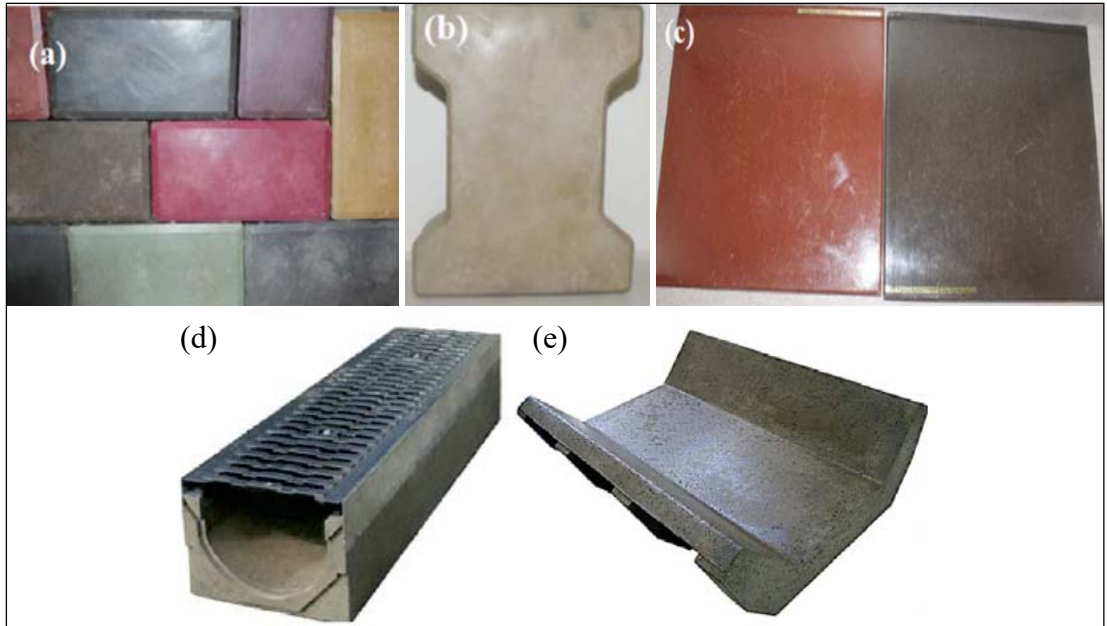
Şekil 1.19. KPB zemin betonu [50]

KPB'lerin saha uygulamaları için gerçekleştirilen beton dökümleri Şekil 1.20'de gösterilen mobil araç üzerine entegre edilmiş sıcak karışım beton mikseri kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 1.20. KPB mobil sıcak karışım beton mikseri [50]

1979 yılı kış aylarında Kanada’da Alberta şehrinin kuzey bölgesinde her biri 1,73 ton ağırlığında olan 750 adet kanalizasyon borusu uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama sırasında ortam sıcaklığı yaklaşık -40°C olduğu ölçülmüştür. 1980 yılında da 107 cm çapında 110 adet KPB doğalgaz borusu dökümü gerçekleştirilmiştir. Dökümü yapılan bu doğal gaz borusu Kanada’da uygulanan en büyük çapa sahip uygulama olmuştur. 1996 yılında hem Güney Amerika Kıta’sında yer alan Şili’de hem de Kanada’nın British Columbia eyaletindeki Trail şehrinde kükürt beton saha uygulamaları gerçekleştirilmiştir [2].



Şekil 1.21. Kükürt bağlayıcılı beton uygulama örnekleri [107,111]

Kükürt bağlayıcı betonlar özellikle prefabrik yapı elemanları olarak saha uygulamalarında kullanılmaktadır. Yürüme yolları, yol kaplama parkeleri, drenaj ve kanalizasyon hatları ile asit tankı imalatları gibi uygulama alanlarına sahiptirler [27, 80, 108-110]. Uygulanmış prizma parke(a), kilitli parke (b), parke zemin kaplaması (c), kapalı (d) ve açık (e) drenaj kanalı elemanlarına ait görüntüler Şekil 1.21’de verildiği gibidir.

Prefabrik parke zemin kaplaması kullanılarak Katar’da ilk saha uygulaması 2008 yılında bir oyun parkı içerisinde 16 m²’lik alanda gerçekleştirildi. Shell Global Solutions ve yerel bir prefabrik yapı elemanları üretici firması ortaklığında üretilen zemin kaplamaları çimento beton kaplamaları ile ilgili Avrupa standartlarına uygun şekilde hazırlandı. Hem çimento bağlayıcı zemin kaplamaları hem de kükürt bağlayıcı beton kullanılarak hazırlanan zemin kaplamaları üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde kükürt bağlayıcı betonların çimento bağlayıcı betonlara oranla daha yüksek eğilme dayanımına ve daha düşük su geçirimsizlik özelliklerine sahip oldukları belirlenmiştir [111].

Tokyo’da bulunan Nippon Petrol Şirketi tarafından 2008 yılında prefabrik olarak kanalizasyon boru ve bacası imalatı gerçekleştirildi. İlk saha uygulaması (Şekil 1.22) aynı yıl içinde Al Ain, Birleşik Arap Emirliklerinde yapıldı [2].



Şekil 1.22. KPB kanalizasyon hattı saha uygulaması, Al Ain, BAE [2]

Modifiye edilmiş kükürtün inşaat endüstrisinde tek kullanım alanı kükürt bağlayıcı betonlarla sınırlı kalmamaktadır. Modifiye edilmiş kükürt kullanılarak hazırlanan asfalt betonu da alternatif kullanım alanları içinde yerini almış ve konu ile ilgili farklı araştırmacılar tarafından da deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir [2, 111-121]. Asfalt betonlarında modifiye edilmiş kükürt kullanılması durumunda, bitüm miktarında %25 oranında azalma meydana geldiği ve aşınmaya karşı direncin arttığı belirlenmiştir [117]. Modifiye edilmiş kükürt kullanılarak hazırlanmış olan asfalt betonuna ait ilk saha uygulaması 2007 yılında Katar'da gerçekleştirilmiştir [111, 117]. Asfalt serim uygulamasına ait görüntü Şekil 1.23'te verildiği gibidir.



Şekil 1.23. Modifiye edilmiş kükürtlü asfalt beton uygulaması [111]

Kanada ve ABD'de gerçekleştirilen farklı birçok laboratuvar ve/veya saha uygulamaları sırasında karşılaşılan sorunlar göz önünde bulundurularak, KPB'lerin belirlenen bir projeye uygunluğu için çevresel etkiler, proje boyutu, yapılabirlik, uygulama takvimi ve amaç gibi ana başlıklar altında toplanabilecek bazı değerlendirmeler önerilmektedir. KPB'nin PÇB yerine kullanılması için uygulanacak olan projenin ağır asit ve mineral tuz etkisine maruz bir bölgede olması önerilmektedir. KPB uygulaması için gerekli ekipmanların özel nitelikli olması nedeniyle sahaya taşınarak kurulumu gerektirmektedir. Bu nedenle KPB'ler için 23 m³'ten daha az beton dökümü gerektiren uygulamaların ekonomik olmayacağı belirtilmektedir. Böyle uygulamalarda KPB'ler yerine polimer betonların tercih edilmesinin uygulamanın

daha ekonomik olmasını sağlayacağı düşünülmektedir. KPB'lerin kısa sürede uygulanması gereken projelerde kullanılması, hızlı dayanım alması yönüyle avantaj sağlarken; döküm yapılan saha koşullarının belirli derecenin altındaki sıcaklıklarda olması betonun ısıtılması gerekliliğini doğuracağından ekonomiklikten uzaklaşmaktadır [122].

1.3. Güvenlik ve Çevresel Etki Değerlendirmesi

Yaşayan her canlının kükürde ihtiyacı bulunmaktadır. Aminoasitlerin (insanların beslenmesinin mutlak gereksinimi) bir parçası olması nedeniyle özellikle insanlar için oldukça büyük önem taşımaktadır. Bir insan ortalama olarak günde, büyük bir kısmı protein formunda olan yaklaşık 900 mg kükürt almaktadır [2].

Saf kükürt zehirli değildir. Erime, karıştırma ve yerleştirme işlemleri sırasında açığa çıkan buharlar çözünmemiş ve reaksiyona girmemiş kükürt içermektedir. Kükürt buharı, hava veya soğuk bir yüzey ile temas ettiğinde ve soğuduğunda, kristalleşmektedir. Böylece kükürt kristalleri rüzgâr tarafından taşınan küçük partiküller haline gelmektedir. Bu partiküllerin giderilmesi için pratik bir uygulama bulunmadığından; hem çevre hem de çalışan personel üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır. Kükürt tozu ile ilgili başlıca sorunun temastan sonra gözlerin tahrişi olduğuna dikkat çekilmektedir. Özellikle katı kükürt partikülleri içerisine yerleştiği göz kapaklarının iç yüzeylerinde tahrişe neden olabilmektedir. Kükürtün zehirli olmamasının yanında havadaki kükürt tozunun solunmasından kaynaklanan bir zehirlenme türüne de rastlanmamıştır. Kükürt tozu aynı zamanda ciltte bir tahriş oluşturmamaktadır. Havadaki kükürt partiküllerinden kaynaklanan en büyük tehlike ise kükürt tozunun yoğunlaşması durumunda tutuşması olarak gösterilmektedir. Bu tehlikenin kükürtün işlenmesi sırasında meydana gelmesi çok düşük bir ihtimaldir. Bu durum, daha çok silo, tank ve ağzı kapalı hava almayan depolarda tehlike teşkil etmektedir [123-125].

Kükürtün yapı malzemesi olarak kullanılması konusundaki en büyük endişe, kükürtün işlenmesi sırasında açığa çıkan H₂S ve SO₂ gibi zehirli gazlardır. H₂S yaklaşık 0,02 ppm gibi düşük konsantrasyon seviyelerinde dahi fark edilebilen bozuk yumurta kokusuna sahip olması ile bilinmektedir. Bununla birlikte, koku iyi bir gösterge değildir, çünkü H₂S koku duyusunun alınmasını zamanla yok eder; bu nedenle daha

yüksek konsantrasyonların fark edilmesi zorlaşmaktadır. Teksas Ulaştırma Enstitüsünde gerçekleştirilen çalışmalarda farklı H₂S seviyelerinin insan üzerinde farklı bölgelerde zehirli etkisinin olduğu belirlenmiştir. H₂S konsantrasyonunun insan üzerindeki etkileri Tablo 1.1’de verildiği gibidir.

Tablo 1.1. H₂S konsantrasyonunun insan üzerindeki etkileri [124]

H ₂ S (ppm)	Etki
0,02	Koku eşiği
0,10	Göz tahrişi
5-10	İzin verilen maksimum seviye
70-150	Uzun süreli temas sonrası hafif belirtilerin başladığı seviye
170-300	Ciddi sonuçlar olmadan bir saat boyunca solunabilen seviye
400-700	30-60 dk içinde tehlikeli seviye
600	30 dk içinde öldürücü seviye

Tablo 1.1 göz önünde bulundurularak, yapımdan sorumlu olan veya tesiste çalışan personel tarafından kullanılan alanlarda H₂S emisyonlarına sürekli maruz kalma durumu için üst limit 5 ppm'lik konsantrasyon değeri olarak gösterilmektedir. 600 ppm ve üzerinde ise 30 dk içerisinde ölümcül etkiler görülebilmektedir [83].

SO₂ renksizdir ve H₂S gibi varlığından haberdar olunabilecek bir kokuya sahiptir. Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü ile İmalat Kimyacıları Birliği SO₂ konsantrasyonu ve insan sağlığı üzerindeki etkileri arasındaki ilişkiyi Tablo 1.2’de verildiği şekilde tanımlamışlardır.

Tablo 1.2. SO₂ konsantrasyonunun insan üzerindeki etkileri [124]

SO ₂ (ppm)	Etki
0,3-1	Tat ile tespit edilebilir
3	Fark edilebilir koku
5	İzin verilen maksimum seviye
6-12	Burun ve boğazda hızlı tahriş
20	Gözlerde tahriş
50-100	30-60 dk içinde tehlikeli seviye
400-500	Yaşamsal tehlike

Tablo 1.2 göz önünde bulundurularak, yapımdan sorumlu olan veya tesiste çalışan personel tarafından kullanılan alanlarda SO₂ emisyonlarına sürekli maruz kalma durumu için üst limit 5 ppm'lik konsantrasyon değeri olarak gösterilmektedir. 400-500 ppm aralığı yaşamsal risk içermektedir [83].

Saylak tarafından 1980 yılında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, kükürt bağlayıcılı betonların imalatı sırasında karışımın sıcaklığı 149°C'nin altında kaldığı sürece H₂S ve SO₂ miktarının Amerikan Endüstriyel Hükümet Hijyenistleri Birliği tarafından izin verilen maksimum konsantrasyon seviyesinin altında kaldığı belirlenmiştir [124]. Kükürt Enstitüsü, Gulf, Shell ve SUDIC gibi birçok farklı kuruluşun destekleri ile gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalar sonucunda araştırmacılar Saylak tarafından elde edilen sonuçlara paralel sonuçlar elde etmişlerdir [113, 126-128].

Kükürt bağlayıcılı betonların imalatı sırasında karşılaşılabilecek problemler dışında imalatı tamamlanmış olan yapıların içinde buldukları çevre ve canlı yaşamı üzerindeki etkilerinin de göz önüne alınması gerekmektedir. PÇB'lerin zehirli bir etkisinin olmadığı genellikle kullandıkları bölgelerdeki yaşam üzerinde fiziksel etkileri haricinde bir etki oluşturmadıkları söylenmektedir. PÇB kullanılarak hazırlanan ve toprakla temas yüzeylerine sahip temellerin ve beton blokların oturdukları zemin üzerinde yapılan araştırmalarda temas edilen toprağın pH seviyesinde artış meydana geldiği belirlenmiştir [2]. Eğer kükürt bağlayıcılı betonlardan kükürt ayrışması meydana gelirse PÇB'lerin etkisinin tersine etki ederek temasta oldukları toprağın pH seviyesinin düşmesine neden olacaklardır. Saf kükürt toprak içerisinde oksitlenmesi sonucu sülfat oluşturur ve sülfat zemin suyuyla reaksiyona girerek sülfürik asit oluşmasına neden olur. Zeminin asitlik derecesi artar ve pH seviyesinde azalma meydana gelir [128-133]. Buna karşın kükürt bağlayıcılı betonların içerisinden kükürtün ayrışması ile ilgili yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. McBee ve diğ. tarafından 1977 yılında başlatılan ve 4 yıllık süreyi kapsayan deneysel çalışma sonucunda farklı çevresel etkilere maruz kalan farklı kükürt bağlayıcılı beton yapı elemanlarının herhangi bir bozunma etkisine maruz kalmadıkları ve hidrolik etkiler altında minimum su geçirgenlikleri gösterdikleri belirlenmiştir [50]. Bu durum da kükürt betonlar içerisinden kükürt ayrışmasının çok düşük miktarlarda gerçekleştiğini ve minimum düzeyde olumsuz çevresel etki yarattığı sonucunu beraberinde getirmektedir [74,134]. PÇB'ler zehirsiz olarak sınıflandırılırsalar dahi tıpkı kükürt buharı ile taşınmakta olan kükürt partiküllerinin etkisi gibi çimento tozunun da insan sağlığı üzerinde olumsuz etkisi bulunmaktadır. Amerikan Endüstriyel Hükümet Hijyenistleri Birliği tarafından yapımdan sorumlu

olan veya tesiste çalışan personel tarafından kullanılan alanlarda izin verilen maksimum çimento tozu seviyesi 10 mg/m^3 olarak belirtilmiştir [2].

Kükürt bağlayıcılı betonlar için en büyük risk, maruz kaldıkları ortam sıcaklığının 96°C 'nin üzerinde çıkmasıdır. Bu sıcaklık seviyelerinde beton dayanımını kaybetmekte ve bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda kükürtün erime noktasının geçilmesi ile bağlayıcı faz erimekte ve beton bütünlüğünü kaybetmektedir [2-13]. Dayanım özellikleri açısından risk teşkil etse de kükürt bağlayıcılı betonların kontrollü olarak eritilmesi ile geri dönüşüm imkânı sağlanabilmektedir [51, 123, 135]. Ancak alevli yanma ve tutuşma açısından kükürt betonlar hem saldıkları zehirli gazlar açısından hem de içten yanmaya devam etme özelliği nedeniyle tehlike arz etmektedir [136]. Bu nedenle kükürt beton uygulamalarında, yapının maruz kalacağı etkiler bu riskler ışığında değerlendirilmelidir.

İnşaat endüstrisi sera gazının en önemli kaynaklarından bir tanesi olarak gösterilmektedir. Beton en çok kullanılan yapı malzemesidir ve insan kökenli CO_2 emisyonlarının %5'inden fazlasını meydana getirmektedir [137]. Portland çimentosu üretiminde ton başına yaklaşık olarak 0,85 ton CO_2 açığa çıkmaktadır. Bağlayıcı olarak kükürt kullanılması ve kükürtün petrol işleme sırasında açığa çıkan bir ürün olarak değerlendirilecek olması nedeniyle Portland çimentosu yerine kullanılarak üretimin azalmasını ve CO_2 emisyonu miktarının düşmesini sağlayacaktır [13].

Kükürt bağlayıcılı betonların dökümleri sırasında alınması gereken önlemler sıcak döküm olması sebebiyle geleneksel asfalt betonlarının dökümlerinde alınan güvenlik önlemleri ile benzerlik göstermektedir. İşçi sağlığı açısından öncelikle imalat sırasında açığa çıkan gazların tehlikeli konsantrasyonun altında kaldığı bilinse dahi karışımın doğrudan solunması önlenmelidir. Bu nedenle özel filtreli tam yüz gaz maskeleri tercih edilmelidir. Tam yüz gaz maskesi, hem döküm sırasında solunabilecek kükürt buharını hem de karışımdan sıçrama ihtimali olan sıvı kükürtün yüzde oluşturabileceği yanıklara karşı koruyacaktır. Tam yüz yerine yarım yüz maskesi kullanılması durumunda mutlaka gözler için koruyucu gözlük kullanılmalıdır. Sıcak döküm olduğu için vücudu koruyacak olan özel tasarlanmış kıyafetler, yüksek sıcaklık eldivenleri ve koruyuculu ayakkabılar da kullanılmalıdır.

Literatürde yer alan tüm çalışmalar göz önüne alındığında bitüm ile modifiye edilen saf kükürt kullanılarak hazırlanan KPB'lere ait araştırmaların sayısının oldukça yetersiz olduğu görölmektedir. Bu amaçla deneysel çalışma kapsamında bitüm kullanılarak modifiye edilen saf kükürt, farklı agrega türleri ve karışım oranları ile hazırlanan KPB'lerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Literatürde, kükürt bağlayıcı betonlar, kendileri ile eşdeğer basınç dayanımına sahip olan PÇB'ler ile karşılaştırılmalı olarak incelenmediğinden ve uzun süreli donma-çözölme deneyleri bulunmadığından çalışma kapsamında literatürde yer alan bu eksikliklerin giderilmesi de amaçlanmaktadır.



2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, deney aletleri ve bunların özellikleri verilmektedir.

2.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri aşağıda özetlendiği gibidir.

2.1.1. Kükürt

Bu çalışmada Tüpraş-İzmit rafinerisinde petrol işleme yöntemi olan Claus prosesi sonucunda açığa çıkan saf kükürt kullanıldı. Rafineriden temin edilen kükürtün saflık oranı % 99,8'dir. Kükürde ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2.1'de verildiği gibidir. Şekil 2.1'de gösterilen ve deneysel çalışmalarda kullanılan kükürt, pul pul (iri taneli) olarak doğrudan rafineriden temin edildi.



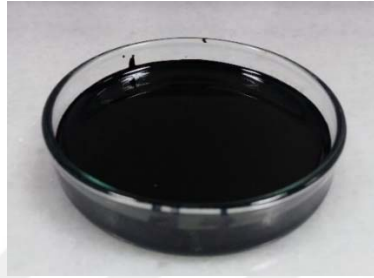
Şekil 2.1. Saf kükürt

Tablo 2.1. Kükürt özellikleri

Özellik	Birim	Değer	Test Metodu
Görünüm		Katı parçacıklı	Gözle muayene
Koku		Kokusuz	
Erime/Donma Noktası	°C	119	ASTM D-97
Kaynama Noktası Başlangıcı	°C	445	ASTM D-86
Bağlı Yoğunluk (15°C'de)	kg/L	2.1	ASTM D-1298
Alev Alma Sıcaklığı	°C	206	ASTM D-93

2.1.2. Bitüm

Bu çalışmada kükürt modifikasyonu için kimyasal katkı olarak Tüpraş-İzmit rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyonlu bitüm (Şekil 2.2) kullanıldı. Kullanılan bitüme ait fiziksel özellikler Tablo 2.2’de verildiği gibidir. Kullanılan bitümde yapılan kimyasal analiz sonucunda % 79 karbon, %10 hidrojen, % 3,3 kükürt ve % 0,7 nitrojen içerdiği tespit edilmiştir.



Şekil 2.2. Bitüm

Tablo 2.2. Bitüm özellikleri

Test	Sonuçlar	Limitler
Penetrasyon (25°C;0,1mm)	55	50-70 (ASTM D5)
Yumuşama Noktası (°C)	49	46-54 (ASTM D36)
Viskozite(135°C) (cSt)	416	-
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1,034	-

2.1.3. Asfalt emülgatörü

Katyonik asfalt emülgatörü, bitümün kimyasal ve mekanik işlemlerde sıvılar ile emülsiyon haline getirilmesindeki en önemli bileşenlerden biridir. Kükürtün modifiye edilmesinde bitüm ile kükürtün homojen bir şekilde karışması gerekmektedir. Bu nedenle kükürtün içerisine bitüm ilave edildiğinde karışımın homojen hale gelmesi ve kükürt ile bitüm arasındaki reaksiyonların meydana gelmesi için karışıma 0,025 gr/100gr katyonik asfalt emülgatörü katıldı. Asfalt emülgatörüne ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2.3 ve 2.4’te özetlendiği gibidir.

Tablo 2.3. Asfalt emülgatörüne ait fiziksel özellikler

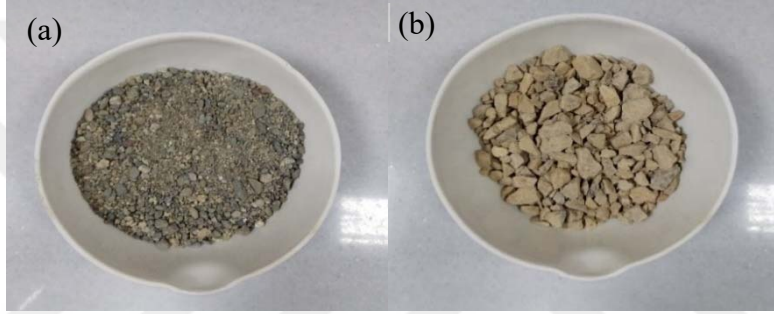
Fiziksel Özellikler	
Durum	Berrak sıvı
Renk	Kehribar
Koku	Amin

Tablo 2.4. Asfalt emülgatörüne ait kimyasal özellikler

Kimyasal Özellikler	
Parlama noktası	121°C
Erime noktası	-2°C
Özgül ağırlık	960 kg/m ³

2.1.4. Agregata

KB, KPİ ve PCB'lerin dökümlerinde iri agregata olarak kırmataş; ince agregata olarak doğal kum kullanıldı. Deneylerde kullanılan ince ve iri agregata Şekil 2.3'te gösterildiği gibidir.



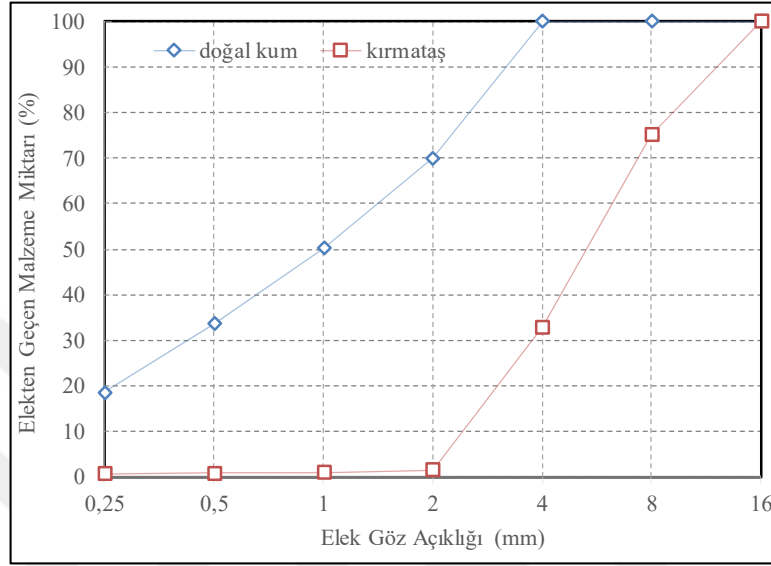
Şekil 2.3. Deneylerde kullanılan (a) doğal kum, (b) kırmataş

Kırmataş ve doğal kumun granülometrik bileşiminin bulunması için TS EN 932-1 (1997) standardına uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde 2,25 – 16 mm elek takımı kullanılarak TS EN 933-1 (2012) standardına uygun olarak elek analizi deneyi yapıldı. Elek analizi sonucunda elde edilen iri ve ince agreganın tane büyüklüğü dağılımı ile hesaplanan incelik modülü değerleri Tablo 2.5'te verildiği gibidir [138-139].

Tablo 2.5. Kullanılan agregaların granülometrik bileşimleri

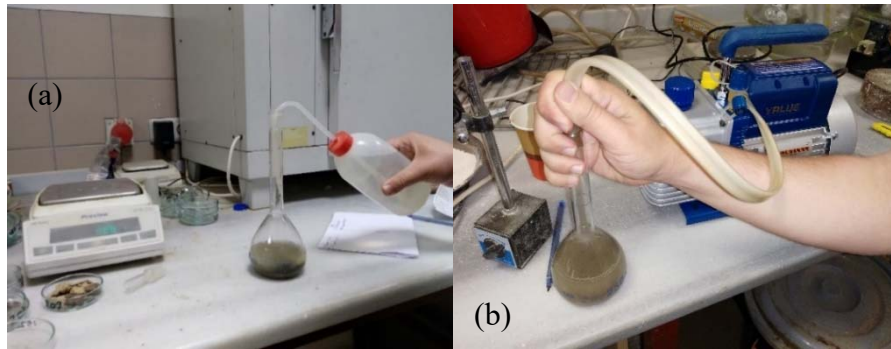
Elek Boyutu (mm)	Elek Analizi Sonuçları	
	Elek Altına Geçen Malzeme (%)	
	Doğal Kum	Kırmataş
16	100	100
8	100	75
4	100	33
2	70	2
1	50	1
0,5	34	1
0,25	19	1
İncelik Modülü	2,28	4,88

Deneylerde kullanılan doğal kum ve kırmataşın incelik modülleri sırasıyla 2,28 ve 4,88 olarak belirlendi. Kükürt polimer beton karışımlarda kullanılan doğal kum ilk olarak 4 mm'lik elekten elenerek maksimum dane çapı 4 mm olacak şekilde ayarlandı. İnce ve iri agregaya ait granülometri eğrisi Şekil 2.4'te verildiği gibidir.



Şekil 2.4. Agregaların granülometri eğrileri

Deneylerde kullanılacak olan ince agreganın özgül ağırlık ve su emme oranlarının belirlenmesi için Şekil 2.5'te gösterilen deneyler ASTM C-128 standardına uygun olarak piknometre ile gerçekleştirildi [140].



Şekil 2.5. (a) İnce agreganın özgül ağırlık deneyi ve (b) vakum pompası

Bu deneyde, alınan doğal kum numunesi ilk olarak 24 saat süre ile su içinde bekletildi ve daha sonra doymuş kuru yüzey (DKY) duruma getirildi. Piknometre içerisine konulan ince agreganın ve piknometrenin tartılarak piknometre ve agreganın ağırlığı (M_{pa}) belirlenirken, piknometre ölçü çizgisine kadar su ile doldurulduktan sonra ise piknometre, ince agreganın ve suyun toplam ağırlığı (M_{pas}) belirlendi. İnce daneli

agregalar arasında hava boşluğunun kalmaması amacıyla vakum pompası kullanılarak piknometre içindeki hava alındı. Daha sonra numune boş bir kaba boşaltılarak ağırlığı değişmez hale gelinceye kadar 105°C’de etüv içerisinde bekletildikten sonra etüv kurusu ağırlığı (M_e) belirlendi. Boş piknometre (M_p) ve içine su doldurulduktan sonra piknometre ve suyun toplam ağırlığı (M_{ps}) belirlendi. Denklem (2.1), (2.2), (2.3) ve (2.4) kullanılarak kuru özgül ağırlık (δ_k), doymuş kuru yüzey özgül ağırlık (δ_d), görünen özgül ağırlık (δ_g) ve ağırlıkça su emme oranı (S_a) hesaplandı. Alınmış olan doğal kum numunesi üzerinde deneyler üç defa tekrar edildi. Bulunan değerlerin ortalamaları alınarak doğal kuma ait fiziksel özellikler belirlendi. Bu özellikler Tablo 2.6’da verildiği gibidir.

$$\delta_k = \frac{M_e}{(M_{pa}-M_p)-(M_{pas}-M_{ps})} \quad (2.1)$$

$$\delta_d = \frac{(M_{pa}-M_p)}{(M_{pa}-M_p)-(M_{pas}-M_{ps})} \quad (2.2)$$

$$\delta_g = \frac{M_e}{M_e-(M_{pas}-M_{ps})} \quad (2.3)$$

$$S_a = \frac{(M_{pa}-M_p)-M_e}{M_e} 100 \quad (2.4)$$

Deneylerde kullanılan iri agreganın özgül ağırlık ve su emme oranlarının belirlenmesi amacıyla ASTM C-127 standardına uygun olarak Şekil 2.6’da gösterilen Arşimet deneyi gerçekleştirildi [141].



Şekil 2.6. İri agrega özgül ağırlık ve su emme oranı tayini

Bu deneyde alınan kırmataş numunesi ilk olarak 24 saat süre ile su içinde bekletildi ve daha sonra doygun kuru yüzey (DKY) duruma getirilerek ağırlığı (M_d) belirlendi. Arşimet terazisinin tel sepeti içine yerleştirilen numuneler, içi su dolu kabın içerisine su yüzeyinden minimum 5 cm aşağıda kalacak şekilde daldırıldı. Su içindeki iri agrega tartılarak ağırlığı (M_s) belirlendi. Daha sonra numune boş bir kaba boşaltılarak ağırlığı değişmez hale gelinceye kadar 105°C 'de etüv içerisinde bekletildikten sonra etüv kurusu ağırlığı (M_e) belirlendi. Denklem (2.5), (2.6), (2.7) ve (2.8) yardımıyla kuru özgül ağırlık (δ_k), doygun kuru yüzey özgül ağırlık (δ_d), görünen özgül ağırlık (δ_g) ve ağırlıkça su emme oranı (S_a) hesaplandı.

$$\delta_k = \frac{M_e}{M_d - M_s} \quad (2.5)$$

$$\delta_d = \frac{M_d}{M_d - M_s} \quad (2.6)$$

$$\delta_g = \frac{M_e}{M_e - M_s} \quad (2.7)$$

$$S_a = \frac{M_d - M_e}{M_e} 100 \quad (2.8)$$

Alınmış olan kırmataş numunesi üzerinde üç defa deney tekrar edildi ve aritmetik ortalamaları alınarak kırmataşa ait fiziksel özellikler belirlendi. Bu özellikler Tablo 2.6'da verildiği gibidir.

Tablo 2.6. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler		
	Doğal Kum	Kırmataş
Su Emme Oranı (%)	1,67	1,02
Kuru Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2,56	2,65
DKY Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2,60	2,68
Görünen Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2,67	2,73

2.1.5. Uçucu kül

Türkiye'deki elektrik üretiminin büyük bir kısmı kömüre dayalı termik santraller kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu santrallerde yakıt olarak kullanılan tozlaştırılmış kömür; kül ve cürufun atık olarak ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Çok ince kül parçacıklarının atmosfere çıkışları elektrofiltre ve siklonlarda tutularak

önlenmektedir. Çağdaş tesislerde bu küllerin %99'undan fazlası tutulmaktadır [142-144]. Bu şekilde atık olarak elde edilen çok ince küle "uçucu kül" adı verilmektedir [145-146]. Uçucu küller alüminli, silisli ve demirli malzemeler olup genellikle gri renkte bulunmaktadır. İçlerinde yanmamış karbon parçacıkları çok miktarda bulunduğu renklere oldukça koyu bir hal almaktadır. Kireçle reaksiyona girdiğinde bağlayıcılık özelliği bulunmaktadır. Silisyum oksit, demir oksit ve alüminyum oksit içeren karmaşık yapıları çoğunlukla küresel taneciklerden oluşmaktadır [147-148].

Uçucu küller kimyasal bileşimleri ve üretildikleri kömür cinsi göz önüne alındıklarında ASTM C-618 standardına göre F ve C sınıfı olmak üzere iki farklı tipte incelenmektedir [149]. F sınıfı uçucu küller genellikle antrasit ve taş kömürünün yakılmasıyla elde edilmektedir. SiO_2 , AlO_3 ve Fe_2O_3 toplamının %70'den büyük olması durumunda "F sınıfı" uçucu kül olarak tanımlanmaktadır. Yapısında serbest kireç bulunmamaktadır. Genel olarak içerisinde %10'dan daha az CaO içerdikleri için düşük kireçli uçucu kül olarak isimlendirilmektedir. Kendi kendine sertleşme özelliğine sahip değildirler. Sulu ortamda kireçle reaksiyona girerek çimentolaşma özelliği göstermektedirler. C sınıfı uçucu küller ise genellikle linyit ve bitüm miktarı düşük kömürlerin yakılmasıyla elde edilmektedirler. Yapılarında SiO_2 , AlO_3 ve Fe_2O_3 toplamının %50'den büyük ve yapılarında %1-3 oranında kireç bulunduğu zaman "C sınıfı" uçucu kül olarak tanımlanmaktadır. Çimentolaşma özelliğine sahip oldukları için kendi kendilerine sertleşebilirler. TS EN 197-1 standardına göre uçucu küller "V" ve "W" olmak üzere iki farklı gruba ayrılmaktadır. V sınıfı "silisli uçucu küller" olarak tanımlanmaktadır. V sınıfı küller esas itibariyle reaktif silika ve alüminiden meydana gelmiş olan, reaktif CaO miktarı %5'in altında, reaktif SiO_2 miktarı %25'in üstünde olan uçucu küller olarak tanımlanmaktadır. W sınıfı uçucu küller "kalkersi uçucu küller" olarak isimlendirilmektedir. W sınıfı küller reaktif CaO, reaktif SiO_2 ve alüminadan oluşan, reaktif CaO miktarı %5'in üstünde olan uçucu küller olarak tanımlanmaktadır [150-151]. Dayanıklı kükürt beton üretimi için viskozite artırıcı ince daneli malzemeler beton içerisinde mutlaka katılmalıdır. Uçucu kül ilavesi kükürt betonun stabilitesini arttırmakla birlikte karışımın daha kıvamlı bir hale gelmesini sağlayarak karıştırma problemlerini engellemektedir. Aynı zamanda uçucu külün kükürt betonların dayanıklılığı üzerinde de önemli etkisi bulunmaktadır [19].

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu kül Çatalağzı Termik Santralinden temin edildi. Kullanılan uçucu külün kimyasal bileşimi Tablo 2.7’de verildiği gibidir. Çalışmada kullanılan uçucu kül ASTM C-618’e göre incelendiğinde SiO₂, AlO₃ ve Fe₂O₃ toplamının %89,39 olduğu belirlenip, bu değer % 70’den fazla ve CaO oranı (%1,47) % 10’un altında olması nedeniyle Çatalağzı termik santralinden temin edilen uçucu kül sınıfının F olduğu belirlenmiştir. Kullanılan uçucu külde bulunan reaktif kireç miktarı %0,22 olduğundan bu miktar TS EN 197-1 (2012) standardında tanımlanan sınır değer %10’un altındadır ve “V” sınıfına girmektedir [152]. Aynı zamanda kullanılan uçucu kül kimyasal ve fiziksel özellikleri, TS EN 450-1 “Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri”, TS EN 197-1 (2012) “Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri” ve ASTM C-618 “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete” standartları göz önünde bulundurularak Tablo 2.7’de özetlenmektedir [149, 153]. Kullanılan uçucu külün Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Uçucu külün fiziksel özellikleri ise Tablo 2.8’de verildiği gibidir.

Tablo 2.7. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve standartlara göre değerlendirilmesi

İncelenen Maddeler	Standart Sınır Değerleri			
	Elde Edilen Değerler (%)	TS EN 450	TS EN 197-1 (V sınıfı)	ASTM C-618 (F Sınıfı)
SiO ₂	57,32	-	-	-
Al ₂ O ₃	25,21	-	-	-
Fe ₂ O ₃	6,86	-	-	-
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	89,39	-	-	>70,00
CaO	1,47	-	-	-
MgO	1,86	-	-	-
SO ₃	0,47	<3,00	-	<5,00
Na ₂ O	0,41	-	-	-
K ₂ O	4,08	-	-	-
Klorür	0,01	-	-	-
Serbest CaO	0,01	<1,00	-	-
Reaktif SiO ₂	41,81	>25,00	>25,00	-
Reaktif CaO	0,22	-	<10,00	-
Kızdırma Kaybı	1,19	<5,00	<5,00	<5,00



Şekil 2.7. Deneylerde kullanılan uçucu kül

Tablo 2.8. Uçucu kül fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	
İncelenen Maddeler	Elde Edilen Değerler (%)
Özgül Yüzey (cm^2/gr)	2765
Hacim Sabitliği (mm)	1
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2,29

2.1.6. Çimento

Bu çalışmada kapsamında hazırlanan kükürt bağlayıcı betonların Portland çimento betonları ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi amacıyla Portland çimento betonu kullanılarak referans numuneler hazırlandı. Geleneksel Portland çimento beton karışımlarında bağlayıcı malzemesi olarak Nuh Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilen CEM I 42,5 Portland çimentosu (Şekil 2.8) kullanıldı. Portland çimentosuna ait mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler sırasıyla Tablo 2.9, 2.10 ve 2.11’de verildiği gibidir.



Şekil 2.8. Deneylerde kullanılan portland çimentosu

Tablo 2.9. Portland çimentosu mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	
Basınç Dayanımları (MPa)	(50x50x50mm küp numuneler için)
7 Günlük	47,5
28 Günlük	58,1

Tablo 2.10. Portland çimentosu fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	
İncelenen Özellikler	Elde Edilen Değerler
Priz Başlangıcı (saat:dakika)	02:59
Priz Sonu (saat:dakika)	03:20
Hacim Sabitliği (mm)	1,05
Özgül Yüzey (cm ² / gr)	3420
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,14

Tablo 2.11. Portland çimentosu kimyasal bileşimi

Kimyasal Özellikler	
İncelenen Maddeler	Elde Edilen Değerler (%)
SiO ₂	22,10
Al ₂ O ₃	4,37
Fe ₂ O ₃	3,30
CaO	65,63
MgO	1,20
SO ₃	2,62
Çözünmeyen Kalıntı	0,68
Kızdırma Kaybı	2,64
Serbest Kireç	1,25
Toplam Alkali (Na ₂ O+0.658 K ₂ O)	0,58

2.1.7. Kimyasal katkı

Bu çalışmada dökümleri gerçekleştirilen Portland çimento betonlarında, özellikleri Tablo 2.12’de verilen Chryso Yapı Kimyasalları firması tarafından üretilmiş olan Chryso Optima 286 süperakışkanlaştırıcı katkı kullanıldı. Beton içerisinde kullanılan kimyasal katkıları karışım suyu içerisinde ilave edilerek karışıma dâhil edildi. Beton karışımlarında katkı maddesi oranı çimento ağırlığının %1,3’ü oranında kullanıldı.

Tablo 2.12. Kimyasal katkı özellikleri

Katkı Adı	Yoğunluk (gr/cm ³)	pH	Katı Madde Oranı (%)	Görünüm	Renk	Esas
Chryso Optima 286	1,08	4,00	25,23	Sıvı	Kahverengi	Polikarboksilat

2.2. Kullanılan Aletler

Deneyleerde kullanılan aletler ve özellikleri bu bölümde özetlenmektedir.

2.2.1. Kükürt beton odası

Deneysel çalışmalarda saf kükürtün modifiye edilerek kükürt bağlayıcı betonların dökümlerinin yapılması amaçlandı. Katı fazda granüler olarak temin edilmiş olan kükürtün, sıvı faza geçerken çıkardığı gazların kontrol altına alınması ile laboratuvar içine yayılmasının engellenmesi ve bu çalışmadaki dökümlerin yapılması amacıyla laboratuvar içerisinde kapalı bir oda (Şekil 2.9) oluşturuldu. Laboratuvar koşullarının kükürt beton dökümleri açısından uygun hale getirilmesi için kükürt beton odası içerisine doğrudan açık hava ile bağlantılı güçlü bir mekanik havalandırma davlumbaz sistemi imalatı yapıldı.



Şekil 2.9. Kükürt beton odası

2.2.2. Mekanik karıştırıcı

Kükürt bağlayıcı betonların dökümlerinde 5 lt kapasiteli 5 farklı hız ayarı bulunan mekanik karıştırıcı kullanıldı. Homojen bir beton karışımı elde edebilmek için

kariştırma sũresince sıcaklık kontrollũ bũyũk ȃnem arz etmektedir. Katı fazdaki kũkũrt 113°C’de sıvı faza dȃnũřũr eğer yũksek sıcaklıklara doğru çıkılırsa ağdalı bir kıvam almaya başlar, 220°C’de ise kararır ve viskozitesi oldukça artarak akışkanlığını kaybeder. Bu nedenle kũkũrt betonların en uygun dȃkũm sıcaklığı 130-135°C arasında olmaktadır. Beton kariştımlarının hazırlanmasında Şekil 2.10’da gȃsterilen mekanik kariştırıcı ve sıcaklık kontrollũ termostat kullanılarak kariştımın sıcaklığının istenilen sıcaklık değerinde sabit tutulması sağlandı



Şekil 2.10. Mekanik kariştırıcı ve sıcaklık kontrollũ termostat

2.2.3. Kalıplar

Deneysel alışma kapsamında hazırlanan kũkũrt bağlayıcı harç ve beton numunelerinin dȃkũmũnde metal kalıplar kullanıldı. Sıcak beton dȃkũmũ yapıldığından betonun kalıba doldurulması sırasında kalıbın sıcaklığı beton sıcaklığı ile aynı olmaması durumunda bağlayıcı faz olan kũkũrt ani soğuma ile hızlı priz almaktadır. Bu durum hem dȃkũm esnasında kıvam ve yerleşme problemlerine yol açmakta hem de hızlı soğuma nedeniyle ciddi termal çatlaklar oluşturmaktadır. Bu olumsuz durumların yaşanmaması için metal kalıplar dȃkũm ȃncesinde 130-135°C arasındaki etũvde 2 saat sũre ile bekletildi. Harç numunelerinde 50x50x50 mm’lik kũp numuneler (Şekil 2.11(a)) kullanıldı. Boy değişimi deneylerinin yapılması amacıyla 25x25x285 mm’lik (Şekil 2.11(b)) kalıplar kullanıldı. Kũkũrt bağlayıcılı betonların mekanik ȃzelliklerinin belirlenmesi amacıyla 75x75x254 mm’lik (Şekil 2.11(c)) prizma kalıplar kullanıldı. Kũkũrt bağlayıcılı betonların silindir numune dȃkũmlerinde kalıplarda ȃn ısıtma yapıldığı için Şekil 2.12 (a)’da gȃsterilen metal kalıplar, Portland imentosu betonu dȃkũmlerinde ise Şekil 2.12 (b)’de gȃsterilen kompozit kalıplar kullanıldı.



Şekil 2.11. Metal küp ve prizma kalıplar



Şekil 2.12. Silindir kalıplar

2.2.4. Etüv

Kükürt bağlayıcı betonların dökümleri 130-135°C aralığında gerçekleştirildiğinden, kullanılan agregaların, tüm karıştırma ekipmanlarının ve döküm yapılan metal kalıpların döküm yapılan sıcaklık aralığına kadar ısıtılarak kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda 150°C'ye kadar belirlenen sıcaklık seviyesinde sabit tutulabilen termostatlı 700 lt hacimli Şekil 2.13'te gösterilen etüv kullanıldı.



Şekil 2.13. Etüv

2.2.5. Beton mikseri

Portland çimento betonlarının dökümleri için Şekil 2.14'te gösterilen 56 litre kapasiteli yatay ile 135° açı yapabilen 25 devir/dak karıştırma hızına sahip laboratuvar tipi düşey eksenli cebri karıştırıcılı beton mikseri kullanıldı.



Şekil 2.14. Beton mikseri

2.2.6. Beton basınç-eğilme deneyi presi

Sertleşmiş beton numunelerinin basınç dayanımları Şekil 2.15'te gösterilen 300 ton kapasiteli hız ayarlı hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirildi.

Eğilme dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerde, üç ve dört noktalı eğilme deneylerinin yapılabildiği ve 300 ton kapasiteli, hız ayarlı hidrolik prese bağlı eğilme deneyi presi kullanıldı.



Şekil 2.15. Hidrolik pres

2.2.7. Elastisite modülü ölçü aletleri

Bu çalışma kapsamında elastisite modülü ölçümleri için dökümleri gerçekleştirilen silindir numuneler üzerine Şekil 2.16’da gösterilen beton presi içerisine yerleştirilmiş şekil değiştirme ölçümlerinin alındığı bir kafes yerleştirildi. Kafes üstünde düşey deformasyonların ölçülmesi amacıyla 2, yatay deformasyonların ölçülmesi amacıyla ise 1 adet dial gauge bulunmaktadır. Beton presi içerisine yerleştirilen yük hücresi (load cell) kullanılarak uygulanan yük değerleri belirlendi. Dial gauge ve yük hücresinden alınan okumalar 8 kanallı data toplama sistemi kullanılarak bilgisayar ortamında kaydedildi. Elastisite modülü ölçüm deneyleri ASTM C-469 standardına uygun şekilde gerçekleştirildi [154].



Şekil 2.16. Elastisite modülü ölçüm kafesi

2.2.8. Yayılma tablası

Bu çalışma kapsamında hazırlanan kükürt bağlayıcı harçlarının kıvam değerleri Şekil 2.17’de gösterilen yayılma tablası kullanılarak belirlendi. Kıvam deneyleri ASTM C-230 standardına uygun şekilde gerçekleştirildi [155].



Şekil 2.17. Yayılma tablası

2.2.9. Uzun dönemli büzülme ölçü aletleri

Bu çalışma kapsamında iki farklı ölçüm yöntemi kullanılarak uzun dönemli büzülme sırasında numunelerde meydana gelen lineer boy değişimleri belirlendi. Birinci ölçüm yönteminde düşey komperatör kullanılarak numunenin lineer boy değişimi belirlenirken ikinci ölçüm yönteminde ise numunenin perdah yüzeyinde meydana gelen büzülme miktarlarının belirlenmesi amaçlandı. Birinci yöntemde ASTM C-157 ve TS3322 standartlarında tanımlanan deney yöntemi uygulandı [156-157]. Bu yöntemde uzun eksen boyunca lineer boy değişimlerinin belirlenmesi amaçlandı. Hazırlanan beton numuneleri, içerisinde uzama okumalarının alınması için metal pimlerin bulunduğu 25x25x285 mm'lik kalıplara yerleştirildi. Belirli kür sürelerinde kalıp içerisinde bekletilen numuneler kalıptan alınarak Şekil 2.18'de gösterilen deney düzeneği kullanılarak ilk boy okumaları gerçekleştirildi. Bu deney düzeneği düşey pozisyonda bulunan 0,001 mm hassasiyetli dijital bir komparatör, referans çubuğu ve metal bir çerçeveden oluşmaktadır. Ölçümler alınmadan önce uçlarında metal uç pimlerinin bulunduğu net uzunluğunun 295 mm (± 3 mm) olan metal referans çubuğu kullanıldı. Bu çubuk, referans noktası belirlenirken el sıcaklığından etkilenmesinin önlenmesi amacıyla kauçuk bir tutacak ile kaplandı.



Şekil 2.18. Uzun dönem büzülme deney düzeneği (ASTM C-157)

Uzun dönemli büzülme ölçümleri için kullanılan bir diğer yöntemde ise ASTM C-531 standardında tanımlanan deney yöntemi uygulandı [158]. Bu deneylerin ölçümlerinde Şekil 2.19'da gösterilen sökülebilir mekanik deformasyon ölçer (Demountable mechanical strain gauge-DEMEC) kullanıldı. Demec ölçüm aleti 0,001 mm hassasiyete sahip dijital komparatör ve bu komparatörün bağlı olduğu 200 mm

açıklıklı iki adet sivri ölçüm uçlarına sahip bir çerçeveden oluşmaktadır. Bu ölçüm yönteminin birinci ölçüm yöntemine göre farkı, numunenin alt ve üst uç noktalarına yerleştirilen uç metal pimleri ile değil, numunenin perdah yüzeyine yerleştirilen yüzey metal pimleri kullanılarak uzun dönemli büzülme ölçümlerinin alınmasıdır. Yüzey metal pimleri perdah yüzeyine güçlü yapıştırıcı ile sabitlendiğinden dolayı bu yöntemde büzülme ölçümlerinin alınması için numunenin kalıptan çıkarılmasına gerek yoktur. Yüzey metal pimlerinin yüzeye yapıştırılması için perdah yüzeyinin prizini almış olması yeterlidir. Bu durumda beton numunelerinin erken yaşta büzülme ölçümlerinin de alınmasına olanak sağlamaktadır. Bu ölçüm yöntemi uç okuması alınamayacak büyük boyuttaki numuneler ve mevcut yapılar üzerindeki çatlak kontrolleri amacıyla da kullanılmaktadır.



Şekil 2.19. Sökülebilir mekanik deformasyon ölçer (DEMEC)

2.2.10. Polarize optik mikroskop (POM)

Deneysel çalışma kapsamında hazırlanan modifiye edilmiş kükürt numunelerinin sıvı kristal davranışlarının incelenmesi amacıyla Kocaeli Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölüm laboratuvarında bulunan ve Şekil 2.20’de gösterilen sıcaklık kontrol ünitesi Nikon Eclipse LV100 marka POM kullanıldı.



Şekil 2.20. POM

Hazırlanmış olan modifiye kükürt numuneleri Linkam marka ısıtma tablası kullanılarak sıvı kristal faza getirildi. Isıtma ve soğutma fazında 0,01°C hassasiyetle -196°C ile 600°C aralığında ölçüm alabilen, istenilen süre ve derecede sıcaklık kontrollü ısıtma tablası kullanıldı.

2.2.11. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC)

Kükürt modifikasyonun gerçekleşip gerçekleşmediğinin belirlenmesi amacıyla modifiye edilmiş kükürt ile saf kükürt numuneleri üzerinde diferansiyel taramalı kalorimetre analizleri gerçekleştirildi. Bu çalışmada örnek olarak alınan numunelerin ısınma sırasındaki faz dönüşümlerinin ısı kapasitesi ölçümleri Kocaeli Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölüm laboratuvarında bulunan ve Şekil 2.21’de gösterilen Mettler Toledo marka DSC 1 Star System diferansiyel taramalı kalorimetre kullanılarak belirlendi. Deneylede kullanılan hem ısıtma hem de soğutma seçeneklerine sahip diferansiyel taramalı kalorimetreye ait bazı özellikler Tablo 2.13’te verildiği gibidir.



Şekil 2.21. Diferansiyel taramalı kalorimetri aleti

Tablo 2.13. Kullanılan diferansiyel taramalı kalorimetri özellikleri

Özellikler	TG/DTA 6200
Sıcaklık Aralığı	Oda sıcaklığı – 700°C
Sıcaklık Hassasiyeti	±0,2 K
Fırın Sıcaklık Çözünürlüğü	±0,00006 K
Sensör Tipi	FRS5
Sensör Mazlemesi	Seramik
Termokupl Sayısı	56

2.2.12. X-ışını kristalografisi (XRD)

Kükürt modifikasyonu sırasında içyapıda meydana gelen değişimlerin belirlenmesi amacıyla modifiye edilmiş kükürt ile saf kükürt numunelerinin kristal yapısındaki değişimlerinin belirlenmesi amaçlandı. Bu deneysel çalışma kapsamında numuneler üzerinde X-ışını kristalografisi analizleri gerçekleştirildi. Bu çalışmada numunelere ait XRD desenleri Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm laboratuvarında bulunan ve Şekil 2.22’de gösterilen Rigaku Dmax 2200 Difraktometre cihazı kullanılarak oda sıcaklığında elde edildi. Bu cihazda Cu kaynaklı X-ışını tüpü ve tüpün ani sıcaklık değişimlerini kontrol eden su soğutucusu bulunmaktadır. Cihazda monokromatize X-ışını elde edilmesini sağlayan Grafit Monokromatör kullanılmaktadır.



Şekil 2.22. X-ışını cihazı

2.2.13. Taramalı elektron mikroskopu (SEM)

İçyapının görüntülenmesi amacıyla hazırlanan numuneler Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm laboratuvarında bulunan ve Şekil 2.23’te gösterilen Bal-Tec SCD 050 otomatik püskürtmeli kaplayıcı cihazı kullanılarak vakumlandı. İçyapının incelenmesi ve yorumlanması amacıyla Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm laboratuvarında bulunan ve Şekil 2.24’te gösterilen JEOL-JSM-6060 markalı taramalı elektron mikroskopu (scanning electron microscope-SEM) kullanıldı.



Şekil 2.23. Püskürtmeli kaplayıcı



Şekil 2.24. Taramalı elektron mikroskobu

2.2.14. Donma-çözülme kabini

Donma-çözülme deneyleri ASTM C-666 “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing” standartına uygun olarak yapıldı [159]. Standart kapsamında A ve B olmak üzere iki farklı deney prosedürü tanımlanmaktadır. Prosedür A, su içerisinde hızlı donma ve çözülme, prosedür B ise havada hızlı donma ve suda çözülme olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında hazırlanan numunelerin donma-çözülme dayanımları, prosedür B’ye uygun olarak otomatik donma-çözülme çevrimi yapan alet kullanılarak gerçekleştirildi. Donma-çözülme çevrimlerinde Şekil 2.25’te gösterilen kabin kullanıldı.

Donma-çözülme cihazı havada soğutma ünitesi ve su deposu olmak üzere iki ana üniteden oluşmaktadır. Soğutma ünitesi içerisinde havada donma etkisine maruz kalan

numuneler su tankından gelen ve istenilen sıcaklığa ayarlanabilen su ile çözülme etkisine maruz kalmaktadırlar. Kabin içerisine yerleştirilen numuneler otomatik kontrol ünitesi sayesinde istenilen sıcaklık derecesine, istenilen adım sayısı ile istenilen sürelerde çevrime tabi tutulabilmektedir.



Şekil 2.25. Donma-çözülme cihazı

2.2.15. Basınç altında su işleme derinliği aleti

Basınç altında su işleme derinliğinin belirlenmesi amacıyla Şekil 2.26’da gösterilen alet kullanıldı. Bu deneysel çalışma TS EN 12390-8 “Basınç altında su işleme derinliğinin tayini” yönetmeliği göz önünde bulundurularak gerçekleştirildi [160].



Şekil 2.26. Basınç altında su işleme derinliği aleti

Deney aleti 6 numune kapasitelidir ve numunelere sisteme bağlı kompresör tarafından maksimum 15 bar’a kadar su basıncı uygulanabilmektedir. Her bir numune, sızdırmaz

o-ring'ler üzerinde oturtularak uygulanan su basıncı altında deney süresince suyun sızdırmazlığı sağlanmaktadır. Numunelerin su basıncına maruz kaldığı yüzeyin perdah yüzeyi olmaması gerekmektedir. Numuneler, su geçiş hattı haricinde yan yüzeylerden herhangi bir şekilde su kaçışının engellenmesi amacıyla yalıtım malzemesi ile kaplanmaktadır. Numunelerin alt yüzeyinden su basıncı uygulanarak suyun çıkış yolunun sadece perdah yüzeyi olması sağlanmaktadır. Standartta belirlenen deney süresi tamamlandıktan sonra numunelerin içerisindeki su derinliğinin belirlenmesi amacıyla numuneler yarma deneyine tabi tutularak ikiye ayrılmaktadır. Bu yüzeylerden su işleme derinlikleri belirlenmektedir.

2.2.16. Aşınma dayanımı (Böhme) aleti

Böhme (Yatay) aşındırma cihazı, doğal taş ve beton gibi malzemelerde aşınma direncinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Aşındırma dayanımı deneyleri TS EN 14157 “Doğal taş-Aşınma direncinin tayini” yönetmeliğine uygun olarak gerçekleştirildi [161]. Deneylerde Şekil 2.27’de gösterilen alet kullanıldı.



Şekil 2.27. Aşınma dayanımı (böhme) deney aleti

Aşındırma aleti, (30 ± 1) devir/dakika hızla dönen 750 mm çaplı yatay aşındırma diski, kaldıraç kolu, numune yükleme ağırlığı, karşı ağırlık ve numune tutucu aparattan oluşmakta ve her 22 devir sonrası dijital sayaç sayesinde sistem otomatik olarak durmaktadır. Metal döner disk üzerine yerleştirilen numune üzerine $0,06 \text{ N/mm}^2$ basınç uygulandığında numunenin aşınma direnci 22 devir – 16 rotasyon sonucunda toplam 352 devir sonucunda belirlenmektedir. Disk üzerinde bulunan sürtünme şeridine, numunenin yüzeyine temas edecek ve aşındırıcı özelliği bulunan korund'tan (kristalize Al_2O_3) oluşan aşındırıcı toz konulmaktadır.

2.2.17. Ultrasonik (UPV) hız ölçüm aleti

Bu çalışma kapsamında ultrases geçiş hızının ve bağıl dinamik elastisite modülünün ölçümleri için Şekil 2.28’de gösterilen Ultrasonic Tester Qust-120+ adlı cihaz kullanıldı. Ultrasonik hız ölçüm deney aleti, alıcı ve verici arasında oluşturulan ultrasonik ses dalgalarının beton içerisindeki geçiş süresinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır.



Şekil 2.28. Ultrasonik hız ölçüm deney aleti

3. MODİFİKASYONUNUN BELİRLENMESİ

Kükürtü plastikleştirmek veya kristal yapı değişikliğinin önüne geçebilmek amacıyla birçok araştırmacı tarafından deneysel olarak farklı çalışmalar yapılmıştır. Pyror tarafından 1962 yılında yapılan çalışmalar sonucunda kükürt-olefin reaksiyonları sonucunda sadece karbon-kükürt (C-S) bağlarının meydana geldiği ve yeni karbon-karbon bağlarının oluşmadığı belirlenmiştir [162]. Araştırmalar göstermektedir ki saf kükürt 90 ile 160°C arasında sıvı fazda olefinler ile reaksiyona girerek çeşitli tiplerde polisülfür ürünleri meydana getirmektedir. Bu etkileşimin sonucu olarak birçok sayıda kükürt atomuna ayrılmış olan dönüşmüş polisülfürün yeni molekülleri elde edilmektedir. Bu reaksiyonların oluşum süresince zayıf kükürt-kükürt (S-S) bağları kopmakta, doymamış bileşiklerin π -bağları ve C-S bağlarından çok daha güçlü yeni S-S bağları oluşmaktadır [2, 163].

Polimer ilavesi, makro kükürt kristallerinin büyümesini önlemektedir. Sıvı kükürt içerisinde, ağırlığının yaklaşık onda biri ağırlığında polimer çözdürülür ve karışım soğumaya bırakılırsa, kükürt kristalleri genellikle bir mikrondan daha küçük olmaktadır. Kükürtün yüksek doğrusal ısıl genleşme katsayısına ($7,4 \cdot 10^{-5}/C$) ve düşük ısıl iletkenliğe ($6,1 \text{ gcal/cm}^2/\text{sn}$) sahip olması nedeniyle bu durum oldukça önemlidir [164]. Bitişik kükürt makro kristalleri içeren bir malzeme sıcaklık değişimlerine maruz kaldığı zaman komşu kristallerden birinin genişlemesi ve diğer komşu kristale temas etmesi nedeniyle makro kristaller arasında bir hareketlilik söz konusu olmaktadır. Bu hareketlenme zamanla bağları kopartarak mikro çatlakların oluşmasına neden olur ve yapı içerisinde birçok güçsüz bölge oluşturarak geniş çatlakların oluşmasına neden olabilmektedir [2].

Beton üretimi için kükürt kullanılan uygulamalar, bağlayıcı olarak modifiye edilmemiş saf kükürt kullanılarak başlamıştır. Yapılmış olan deneysel çalışmalarda saf kükürt kullanılarak hazırlanan betonların mekanik özellikleri oldukça iyi sonuçlar verirken dayanıklılık özelliklerinin oldukça kötü olduğu ve kısa süre sonunda parçalanmalar ve göçmelerin meydana geldiği belirlenmiştir [26]. Kükürt çimento

kullanılarak elde edilen betonlarda soğuma sırasında kristal yapıdaki ani değişiklikler nedeniyle iç gerilmelerin oluşması sonucunda çatlaklar meydana gelmektedir. Saf kükürt ve agrega sıcak karışım olarak hazırlanıp kalıba döküldükten sonra soğumaya bırakıldığında, sıvı durumdaki kükürt ilk olarak 114°C’de %7 hacim azalması göstererek S_{β} kristali formunu almaktadırlar. Soğuma devam ederken sıcaklık 95,4°C’nin altına indiğinde S_{β} kristalleri S_{α} kristalleri formuna dönüşmektedir [3, 165]. Bu form aynı zamanda oda sıcaklığında kükürtün sabit formda bulunduğu kristal yapısıdır. Bu geçiş fazları soğuma ile birlikte çok hızlı olarak meydana gelir ve 24 saatten daha kısa bir sürede faz geçişleri tamamlanmaktadır. Oda sıcaklığında stabil formda gelinen S_{α} kristal yapısının S_{β} kristal yapısına göre daha yoğun olması nedeniyle kükürt bağlayıcı içerisinde iç gerilmeler oluşmakta ve bunlar bağlayıcı içerisinde ciddi çatlakların meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu durumun engellenmesi amacıyla kimyasal veya fiziksel olarak kükürt kristalizasyonu kontrol edilerek saf kükürt modifiye edilmektedir [166].

Kükürt polimer betonların karıştırılması ve yerleştirilmesi ile ilgili detayların yer aldığı çalışmalar 1984 yılından itibaren ACI-Betonda Polimer komitesinin (komite 548) “Kükürt Beton” alt komitesi tarafından standartlaştırılmıştır. Kükürt beton komitesi tarafından hazırlanan standart en son hali 1993 yılında “ACI 548D-93; Guide for mixing and placing sulfur concrete in construction” adıyla yayınlanmıştır. Bu standartta, kükürt polimer betonların hazırlanmasında kükürtün modifiye edilmesi için iki farklı yöntem bulunmaktadır. İki yöntemde de amaç, kimyasal veya fiziksel olarak kükürt kristalizasyonunun kontrol altına alınmasıdır. Birinci yöntemde kükürt kristalizasyonu kimyasal olarak önlenmeye çalışılmaktadır. Kükürt içerisine katılan farklı kimyasal katkıları ile kükürtün ortorombik faza dönüşmesi engellenir ve soğuma sonrası kükürtün monoklinik fazda kalması sağlanmaktadır. Bu yöntemde birçok farklı kimyasal katkı deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Bu katılardan en yaygın olarak kullanılanları, DCPD veya farklı oranlarda DCPD, siklopentadien ve dipenten’den oluşan karışımlardır. İkinci yöntemde ise kükürt kristalizasyonu fiziksel olarak önlenmeye çalışılmaktadır. Kükürt modifikasyonu için kükürt, olefin hidrokarbon polimerleri ve uçucu kül gibi fiziksel stabilizatör ile birleştirilir.

Bu tez kapsamında dökümleri gerçekleştirilen kükürt polimer betonlar içerisinde kullanılan modifiye kükürt ACI 548D-93 standardında yer alan ikinci metot

kullanılarak hazırlandı. Bu çalışmada kükürt modifikasyonu için kimyasal katkı olarak Tüpraş-İzmit rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanıldı. Kükürtün modifiye edilebilmesi için saf kükürt içerisine ağırlıkça %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında bitüm ilave edilerek 3 farklı modifikasyon oranı belirlendi. Modifikasyon için gerekli bitüm yüzdesinin belirlenmesi ve modifikasyonun gerçekleşip gerçekleşmediğinin kontrolünün yapılması amacıyla saf kükürt ve modifiye edilmiş kükürt numuneleri üzerinde POM, DSC, XRD ve SEM deneyleri gerçekleştirildi. Yapılmış olan bu içyapı çalışmaları sonucunda modifikasyon için gerekli saf kükürt-bitüm oranının belirlenmesi amaçlandı.

3.1. Numune Özellikleri

Kükürt modifikasyonunda kullanılan malzeme miktarları Tablo 3.1’de verilmektedir. MK₀ numunesi referans numunesi olup saf kükürt (%0 bitüm) numunesidir. MK₁, MK₂ ve MK₃ numuneleri sırası ile ağırlıkça %2,5, %5 ve %7,5 oranında bitüm katılarak hazırlandı.

Tablo 3.1. Kükürt modifikasyonu karışım oranları

Numune Adı	Saf Kükürt (Ağr. %)	Bitüm (Ağr. %)	Asfalt Emül. (gr/100gr)
MK ₀	100,0	0,0	0,000
MK ₁	97,5	2,5	0,025
MK ₂	95,0	5,0	0,025
MK ₃	92,5	7,5	0,025

Kükürt modifikasyonu için öncelikle granüler halde bulunan saf kükürt 130-135°C arasında ısıtılan sabit sıcaklıktaki mekanik karıştırıcının içine konularak sıvı faza gelene kadar karıştırıldı. Daha sonra belirlenmiş olan miktardaki bitüm sıvı kükürtün içerisine ilave edildi. Bitümün sıvı kükürt içerisinde homojen bir şekilde yayılabilmesi ve kükürt-bitüm reaksiyonlarının tam anlamıyla gerçekleşebilmesi için belirlenen oranda asfalt emülgatörü karışıma ilave edildi. Sıvı fazda bulunan kükürt, bitüm ve asfalt emülgatörü arasındaki reaksiyonun oluşabilmesi için karışım 60 dakika süre ile mekanik karıştırıcı yardımıyla hızlı bir şekilde karıştırıldı. Karıştırma işlemi sırasında sıcaklık 130-135°C arasında sabit tutuldu. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra modifiye kükürt oda sıcaklığında dakikada 7-13°C olacak şekilde soğumaya bırakıldı.

Soğuma sonrası MK Şekil 3.1’de gösterildiği şekilde cama benzer bir parlaklıkta görünüm aldı.



Şekil 3.1. Modifiye edilmiş kükürt

MK beton karışımlarına katı formda ilave edilmektedir ve karışımla birlikte karıştırılarak erimesi sağlanmaktadır. Modifiye kükürt parçalarının rastgele bir dane dağılımına sahip olması karışım içerisinde erime ve eridikten sonra reaksiyon süresinde farklılıkların oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle oda sıcaklığına kadar soğutulmuş olan MK kullanılmadan önce küçük parçalar haline getirildi. Bu parçalar dane boyutu sabitliğinin sağlanabilmesi amacıyla 4 mm’lik elekten elenerek kullanıma hazır hale getirildi (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. MK parçalanması ve elenmesi

3.2. Yapılan Deneyler

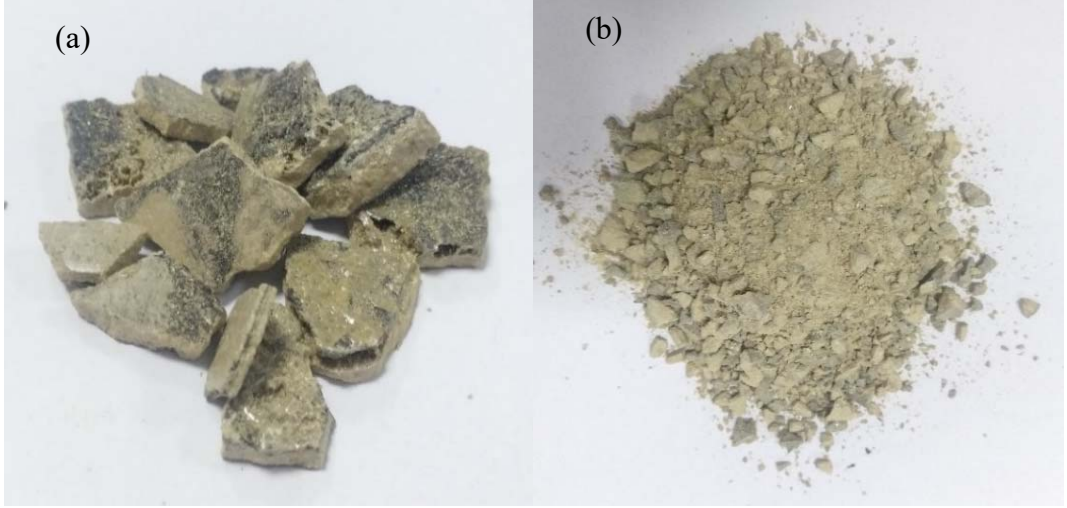
Kükürtün modifiye edilebilmesi için saf kükürt içerisine ağırlıkça %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında 50/70 penetrasyonlu bitüm ilave edilerek 3 farklı modifikasyon oranı belirlendi. Modifiye kükürt faz geçişlerinin tam olarak tamamlandığından emin olunması amacıyla tüm deneyler numunelerin hazırlandıktan 3 ay sonra yapıldı. Modifikasyon için gerekli bitüm yüzdesinin belirlenmesi ve modifikasyonun tam anlamıyla gerçekleşip gerçekleşmediğinin kontrolünün yapılması amacıyla saf kükürt ve modifiye edilmiş kükürt numuneleri üzerinde öncelikle sıvı kristal fazların ve faz geçişlerinin belirlenmesi için standart bir deney yöntemi olan POM gerçekleştirildi. DSC, sıvı kristal faz geçiş çalışmalarında optik yöntemleri tamamlayıcı özellik taşımaktadır. Bu amaçla polarize optik mikroskop deneyleri sonucunda elde edilen faz geçiş bilgilerinin detaylandırılması amacıyla DSC ve XRD deneyleri gerçekleştirildi. Elde edilen içyapıya ait görüntüler SEM kullanılarak elde edildi.

3.3. Deney Sonuçları

Deneylerde kullanılan saf kükürt (MK₀) Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir. Sıvı hale getirilen saf kükürt içerisine belirlenmiş oranlarda bitüm ilave edilen MK numuneleri, parçalandı ve 4 mm'lik elekten geçirildikten sonra granül haline getirildi. Parçalandıktan ve granül hale getirildikten sonraki MK₁, MK₂ ve MK₃ numunelerine ait görüntüler sırasıyla Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6'da verilmektedir. Modifiye kükürt içerisindeki bitüm oranı arttıkça modifiye kükürt çimentosunun daha koyu bir görünüm alıp daha yapışkan ve zor parçalanır bir hale geldiği belirlendi.



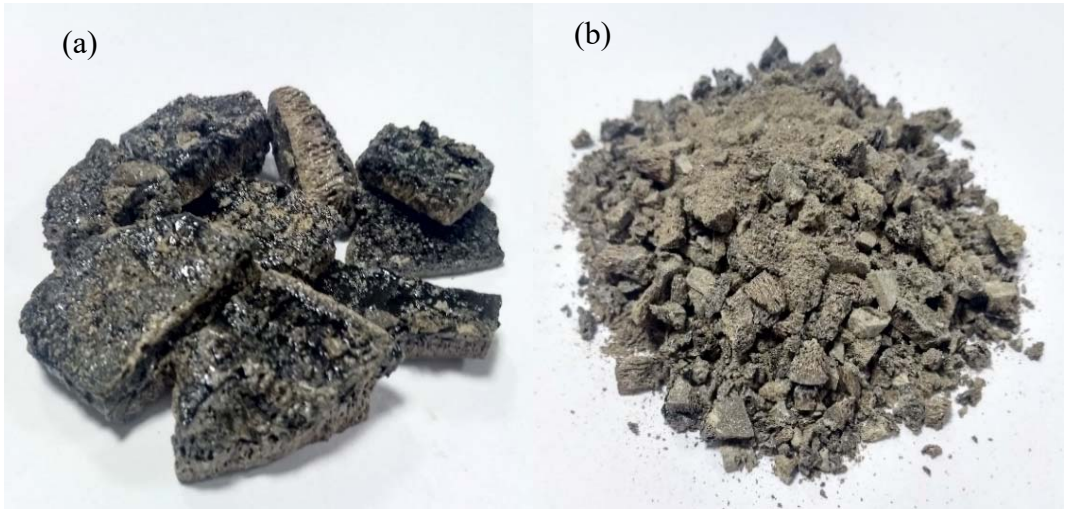
Şekil 3.3. MK₀ saf kükürde ait görüntü



Şekil 3.4. MK₁ numunesine ait görüntü (a) parçalanmış (b) granüle edilmiş



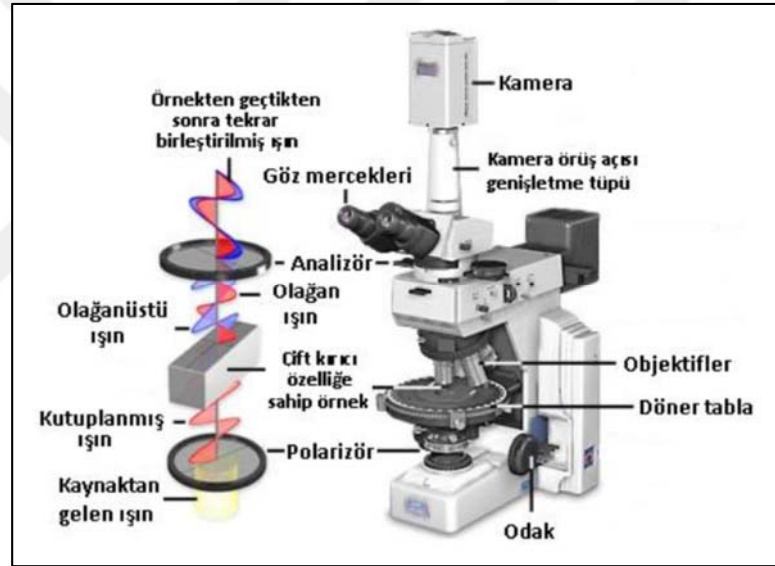
Şekil 3.5. MK₂ numunesine ait görüntü (a) parçalanmış (b) granüle edilmiş



Şekil 3.6. MK₃ numunesine ait görüntü (a) parçalanmış (b) granüle edilmiş

3.3.1. Polarize optik mikroskop deney sonuçları

Polarize optik mikroskop, mikroskop camlarının arasına ince bir şekilde yerleştirilen mezojenik örneğin büyütülerek görünmesini sağlamaktadır. Sıvı kristal moleküller çift kırılma indisli oldukları için üzerlerine polarize ışık gönderildiğinde mikroskop ile gözlenebilmekte ve mikroskopun diğer tüm alanları karanlık görünmektedir. İyi yönlenmiş homojen bir yapı eldesi için cihaza bağlı ısıtma ve soğutma ünitelerinin yardımıyla numune izotropik sıcaklığa kadar ısıtılıp tekrar oda sıcaklığına kadar soğutulurken, tekstürler elde edilebilmekte ve nematik-izotropik faz geçiş sıcaklıkları belirlenebilmektedir. Polarize mikroskopuna ait şematik gösterim Şekil 3.7'de verildiği gibidir [167-169].



Şekil 3.7. Polarize optik mikroskop [168]

Cihaz, üretici tarafından sağlanan karakteristik dalga boyunda beyaz ışık yayan, genellikle halojen ampul biçimindeki ışık kaynağını içermektedir. Bu ışık bir lens içerisinden geçerek bir ayna vasıtasıyla yukarı yansıtılmakta ve levha polarizör aracılığıyla doğrusal olarak polarize hale geçmektedir. Buradaki polarizör 360° döndürülebilir. Beyaz ışık kaynağı için dalga boyuna bağlı deneyler gerçekleştirilecekse bu noktaya bir dalga boyu filtresi yerleştirilebilmektedir. Işık daha sonra kondensöre girmekte ve bu bölüm örneğin en uygun görüntüsünü elde etmeye yardımcı olmaktadır. Kondensör ışık kaynağından ışığı toplayarak numunenin düzgün olarak aydınlanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle iris açıklığının doğru ayarlanması gerekmektedir. Çok geniş bir açıklığa sahip seçim, görüntünün bulanıklaşmasıyla

oluşan kırılmadan kaynaklanan ışık sapmasına yol açabilir ki; bu da kontrastı düşürmektedir [167, 170].

Sıvı kristal araştırmaları için mikroskopların üzerinde genellikle ısıtıcı ve dönebilen bir tabla bulunmaktadır. Bu tabla aynı zamanda numuneyi de içine alır. Işığın yayılma yönüne dik düzlemdeki numunenin kusursuz dönüşü için güvenli bir şekilde tablaya monte edilmelidir. İletilen ışık daha sonra objektifin içinden geçmektedir. Burası da mikroskobun diğer önemli parçalarından biridir; çünkü görüntü kalitesini kesin olarak tayin eden bölüm burasıdır [167]. Tekstür çalışmaları için genellikle üç farklı objektif kullanılmaktadır. Bunlardan x5 (kırmızı) düşük büyütme için, x10 (sarı) ve x20 (yeşil) orta ölçekli büyütme içindir. Bazen x40 (mavi) objektif de küçük yapıları çözümlenmek ya da konoskopik çalışmalar için kullanışlı olabilmektedir. Her durumda geniş çalışma aralıklı objektifler önerilir; çünkü sıklıkla ısıtma tablaları, merceğe çok yakın olan numune tablasının odaklanmasına izin vermemektedir [170]. Objektiften gelen ışık daha sonra analizörden geçmekte ve tekstür çalışmalarında analizör, polarizöre doğru açılarla yönelmektedir. Oküler ya da mercek, görüntüyü daha fazla büyütmeye yardımcı olmaktadır. Oküler aynı zamanda görüş sahasını da ayarlamaktadır [167, 170-171]. Diğer bir seçenek olarak da objektif kapağının açılmasından ya da yarı geçirgen bir aynanın kullanımından sonra görüntü, ayarlanabilir bir tüp vasıtasıyla mikroskoba bağlı kamera üzerine yansıtılabilir. Yüksek kaliteli görüntüler genellikle ince filmler ile kolayca elde edilebilir. Dinamik etkileri çalışmak için zamana bağlı görüntü eldesi gerekli ise yazılım ve donanımla birleşik analog kamera kullanılmaktadır. Bunlar saniyede 25 karelik bir zaman netliği sağlar; fakat bu durum da sadece 760 x 580 piksellik düşük dijital çözünürlüklerde geçerli olmaktadır. Daha ileri bir seçenek dijital CCD kameralarıdır, ancak yüksek dijital çözünürlük ile birleşik zaman netliğinin sağlanması oldukça pahalı olabilmektedir [172-173].

Deneysel çalışmada, hazırlanan saf kükürt ve modifiye edilmiş kükürt numunelerinin sıvı kristal davranışlarının incelenmesi amacıyla sıcaklık kontrol ünitesi Nikon Eclipse LV100 marka POM kullanıldı. Ağırlıkça %0 (referans-saf kükürt), %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında bitüm katılarak modifiye edilen kükürtün ısıtma ile oluşan faz dönüşümleri ısıtma tablalı polarize optik mikroskop deneyleri yapılarak belirlendi. Numuneler toz haline getirilerek mikroskop camlarının arasında ısıtıcı tablasının içerisine yerleştirildi. Çalışmada, numuneler öncelikle oda sıcaklığından 150°C'ye kadar ısıtıldı

(birinci sıcaklık artışı) ve bu sıcaklık seviyesinde 5 dk süre ile bekletildi. Daha sonra bu sıcaklık seviyesinden oda sıcaklığına kadar soğutuldu ve son olarak tekrar ısı yüklemesi uygulanarak oda sıcaklığından 150°C'ye kadar ısıtılarak (ikinci sıcaklık artışı) üç farklı sıcaklık rejimi uygulandı. Tüm ısıl hareketlilik adımları 5°C/dk olacak şekilde ayarlandı.

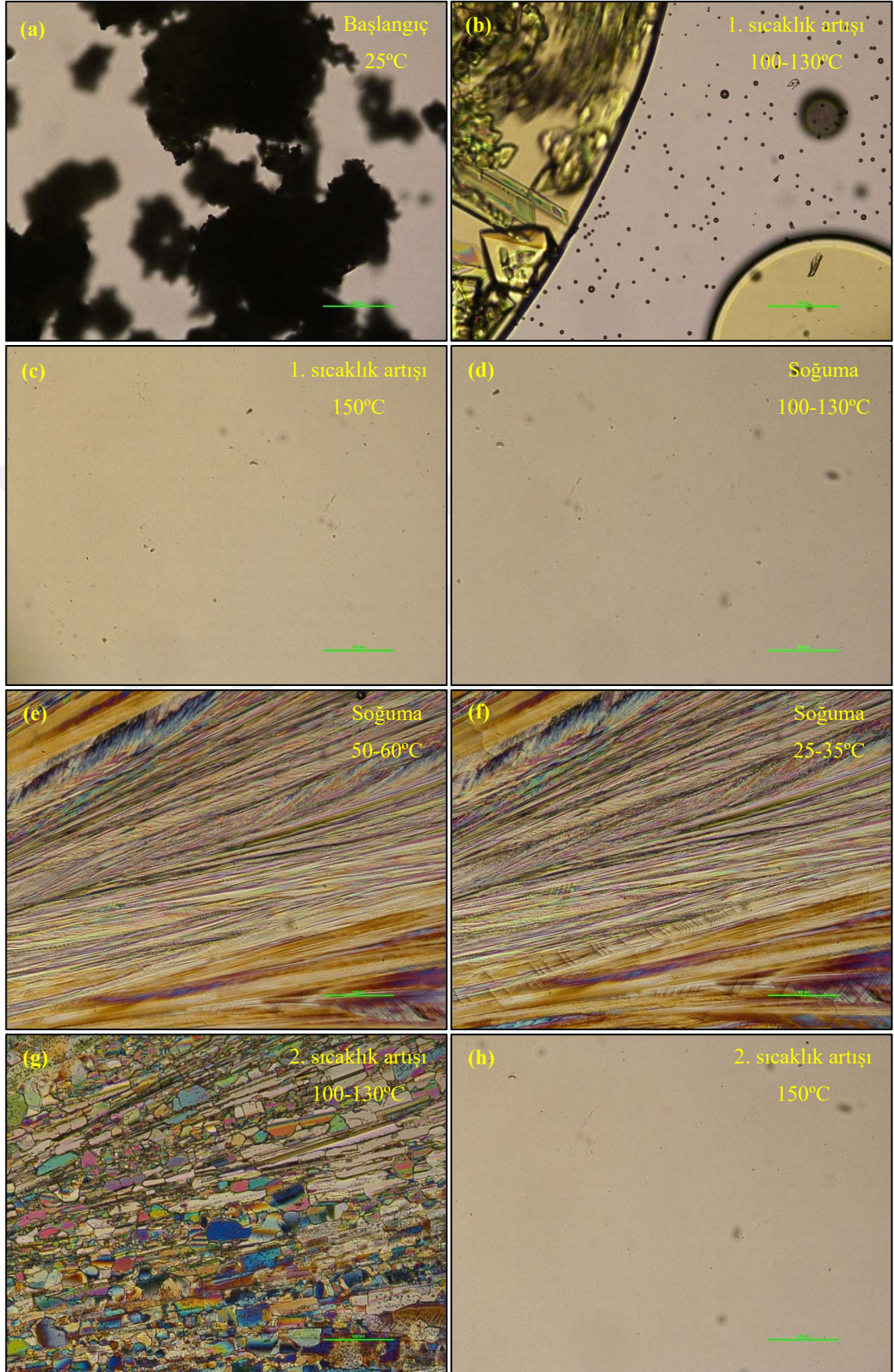
Şekil 3.8'de POM tarafından kaydedilen saf kükürt numunesine ait kristallenme adımları görülmektedir. Saf kükürt numunesine ait 25°C başlangıç sıcaklığındaki görüntü (a)'da verildiği gibidir. Birinci sıcaklık artışı sırasında sıcaklık, başlangıç sıcaklığı olan 25°C'den 150°C'ye çıkarıldı. Numunenin, (b)'de gösterildiği şekilde 100-130°C arasında eridiği görüldü. Numune bu sıcaklık seviyesinde (c) 5 dk süre ile bekletildi. Bu sürenin sonunda numune 150°C'den 25°C'ye soğutulmaya bırakıldı. Soğuma sırasında, numunenin yapısında 100-130°C aralığında (d) herhangi bir değişim gözlenmedi. Numunenin soğuma sırasında 50-60°C arasındaki bir sıcaklık değerinde aniden kristallendiği gözlemlendi. Bu sıcaklık seviyesine ait kristal yapı görüntüsü (e)'de verildiği gibidir. 25°C'ye kadar soğutulan numunenin mevcut kristal yapısında bir değişiklik (f) meydana gelmedi. Numune sıcaklığı 25°C'ye ulaştığında ikinci sıcaklık artışı uygulanarak numune sıcaklığı tekrar 25°C'den 150°C'ye yükseltildi. Numune sıcaklığı 100-130°C arasındaki bir sıcaklık değerinde kristal yapıda erimelerin başladığı (g) görüldü. Numune sıcaklığı 150°C'ye ulaştığında ise kristal yapının tamamen eridiği (h) gözlemlendi.

Şekil 3.9'da POM tarafından kaydedilen %2,5 oranında bitüm ilave edilerek hazırlanan MK₁ numunesine ait kristallenme adımları görülmektedir. MK₁ numunesine ait 25°C başlangıç sıcaklığındaki görüntü (a)'da verildiği gibidir. Birinci sıcaklık artışı sırasında sıcaklık, başlangıç sıcaklığı olan 25°C'den 150°C'ye çıkarıldı. Numunenin, (b)'de gösterildiği şekilde 100-130°C arasında eridiği görüldü. Numune bu sıcaklık seviyesinde (c) 5 dk süre ile bekletildi. Bu sürenin sonunda numune 150°C'den 25°C'ye soğutulmaya bırakıldı. Soğuma sırasında, numunenin yapısında 100-130°C ve 50-60°C aralığında (d ve e) herhangi bir değişim gözlenmedi. Numunenin, soğuma sırasında 25-35°C arasındaki bir sıcaklık değerinde aniden kristallendiği gözlemlendi. Bu sıcaklık seviyesine ait kristal yapı görüntüsü (f)'de verildiği gibidir. Numune sıcaklığı 25°C'ye ulaştığında ikinci sıcaklık artışı uygulanarak numune sıcaklığı tekrar 25°C'den 150°C'ye yükseltildi. Numune sıcaklığı 100-130°C

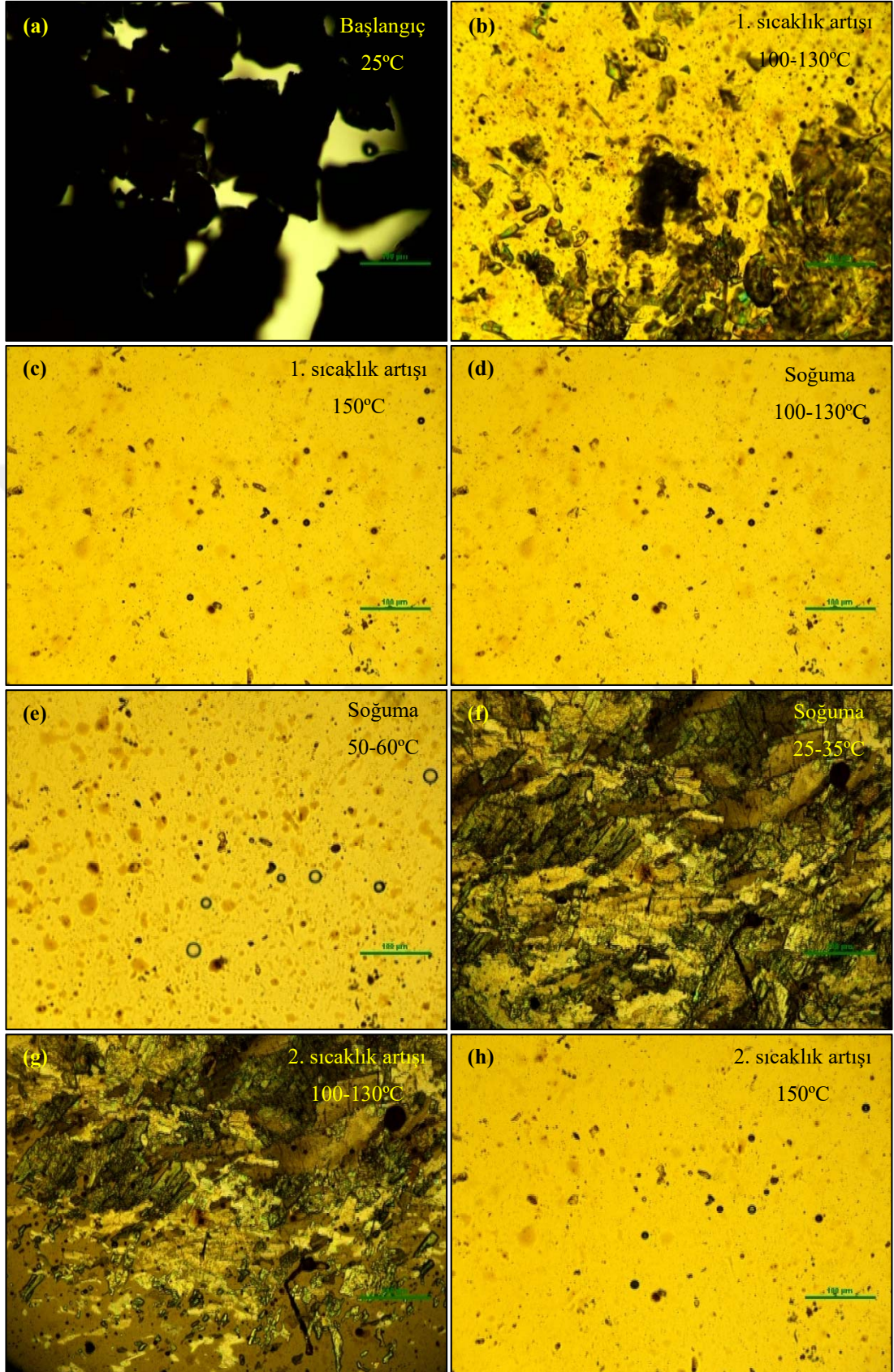
arasındaki bir sıcaklık değerinde kristal yapıda erimelerin başladığı (g) görüldü. Numune sıcaklığı 150°C'ye ulaştığında ise kristal yapının tamamen eridiği (h) gözlemlendi.

Şekil 3.10'da POM tarafından kaydedilen %5 oranında bitüm ilave edilerek hazırlanan MK₂ numunesine ait içyapı değişimleri görülmektedir. MK₂ numunesine ait 25°C başlangıç sıcaklığındaki foto (a)'da verildiği gibidir. Birinci sıcaklık artışı sırasında sıcaklık başlangıç sıcaklığı olan 25°C'den 150°C'ye çıkarıldı ve numune 100-130°C arasında (b) eridi. Numune bu sıcaklık seviyesinde (c) 5 dk süre ile bekletildi. Bu sıcaklıkta içyapı incelendiğinde erimiş olan modifiye kükürt yapısı içerisindeki %5 oranında bulunan bitümün dağılımının büyük bir oranda homojen olduğu görüldü. Bu sürenin sonunda numune sabit hızda 150°C'den 25°C'ye soğutulmaya bırakıldı. MK₂ numunesinde soğuma sırasında herhangi bir kristallenme gerçekleşmediği (d, e ve f) belirlendi. Numune sıcaklığı 25°C'ye ulaştığında ikinci sıcaklık artışı uygulanarak numune sıcaklığı 25°C'den 150°C'ye tekrar yükseltildi. Numune sıcaklığı 100-130°C arasındaki bir sıcaklık değerinde numunede erimelerin başladığı (g) görüldü. Numune sıcaklığı 150°C'ye ulaştığında ise numunenin tamamen eridiği (h) görüldü.

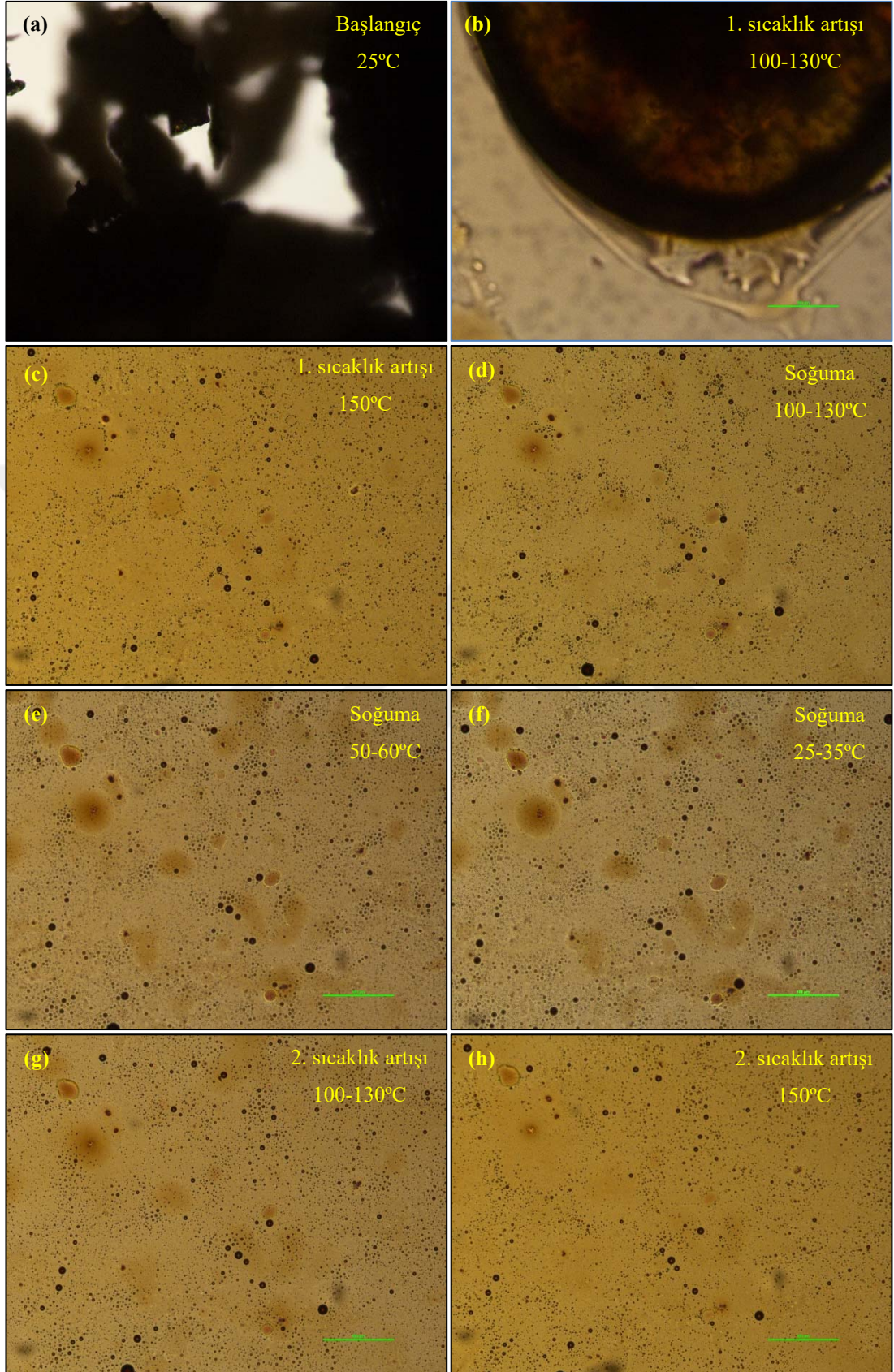
Şekil 3.11'de POM tarafından kaydedilen %7,5 oranında bitüm ilave edilerek hazırlanan MK₃ numunesine ait içyapı değişimleri görülmektedir. MK₃ numunesine ait 25°C başlangıç sıcaklığındaki foto (a)'da verildiği gibidir. Birinci sıcaklık artışı sırasında sıcaklık başlangıç sıcaklığı olan 25°C'den 150°C'ye çıkarıldı ve numune 100-130°C arasında (b) eridi. Numune bu sıcaklık seviyesinde (c) 5 dk süre ile bekletildi. Bu sıcaklıkta içyapı incelendiğinde erimiş olan modifiye kükürt yapısı içerisindeki %5 oranında bulunan bitümün dağılımının büyük bir oranda homojen olduğu görüldü. Bu sürenin sonunda numune sabit hızda 150°C'den 25°C'ye soğutulmaya bırakıldı. MK₃ numunesinde soğuma sırasında herhangi bir kristallenme gerçekleşmediği (d, e ve f) belirlendi. Numune sıcaklığı 25°C'ye ulaştığında ikinci sıcaklık artışı uygulanarak numune sıcaklığı 25°C'den 150°C'ye tekrar yükseltildi. Numune sıcaklığı 100-130°C arasındaki bir sıcaklık değerinde numunede erimelerin başladığı (g) görüldü. Numune sıcaklığı 150°C'ye ulaştığında ise numunenin tamamen eridiği (h) görüldü.



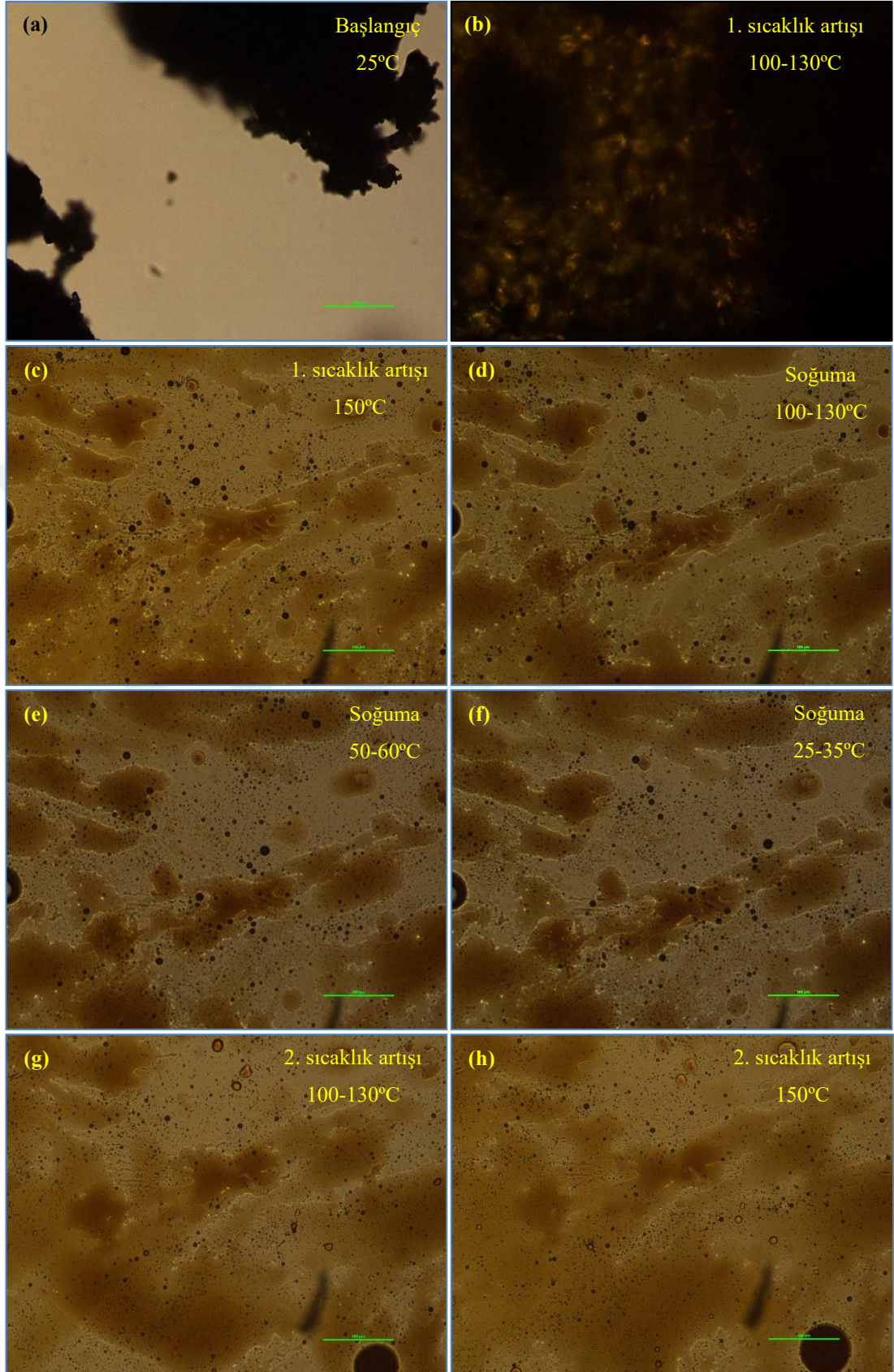
Şekil 3.8. Saf kükürt (MK₀) krsital yapı faz geçişleri



Şekil 3.9. MK₂ numunesi kristal yapı faz geçişleri



Şekil 3.10. MK₂ numunesi kristal yapı faz geçişleri



Şekil 3.11. MK₃ numunesi kristal yapı faz geçişleri

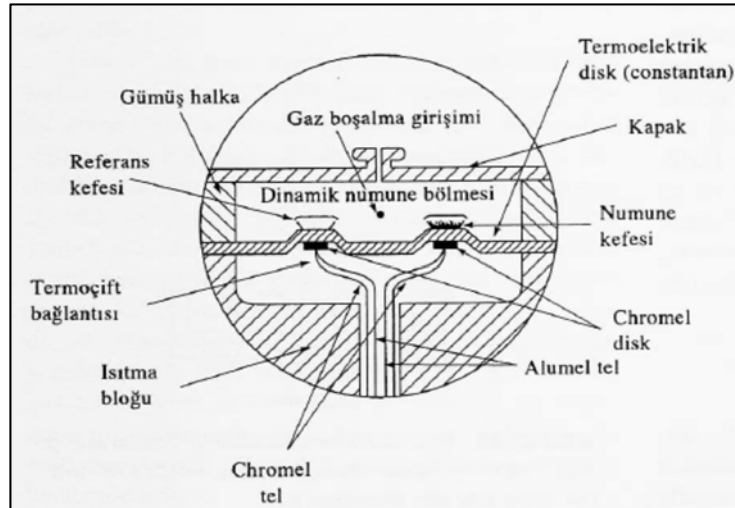
Modifiye edilmiş kükürt kullanılarak, kükürt polimer beton hazırlanması durumunda soğuma sırasında kristal yapıdaki katı-katı faz dönüşümünün (S_{β} - S_{α}) gerçekleşmemesi beton içerisinde oluşacak iç gerilmeleri ortadan kaldırarak çatlak oluşumunun önüne geçilmesini sağlamaktadır [9, 174-176]. Saf kükürt numunelerine ait POM görüntüleri incelendiğinde birinci ısıtma durumu sonrası soğutma periyodunda 50-60°C aralığında ani bir kristallenmenin meydana geldiği gözlemlendi. %2,5 oranında bitüm katılarak hazırlanan MK₁ numunesinde ise kristallenmenin 25-35°C aralığında meydana geldiği belirlendi. MK₁ numunesinde oluşan kristal yapının MK₀ numunesine göre farklı bir kristal yapıda olduğu, erime sıcaklığındaki farklılık göz önünde bulundurularak söylenebilir. Buna karşın %5 ve %7,5 oranlarında bitüm katılarak hazırlanan MK₂ ve MK₃ numunelerinde karışıma dâhil edilen bitümün kristal büyümesinin baskılanması nedeniyle herhangi bir kristallenme gözlenmedi. Bu numunelerde katı-katı faz geçişi gözlenmezken sadece katı-sıvı faz geçişi meydana geldiği görüldü. Kükürt modifikasyonunun gerçekleşip gerçekleşmediğinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan modifiye kükürt numuneleri üzerinde gerçekleştirilen POM deneylerinden kristal yapının oluşma süreçleri izlenerek belirlendi. Deneyde uygulanan birinci sıcaklık artışında numunenin beton karışım sıcaklığına ulaşana kadar gösterdiği iç yapının gözlenmesi amaçlandı. Soğuma sırasında ise numunelerin kristallenme durumlarının belirlenmesi amaçlandı. İkinci sıcaklık artışında ise soğuma sırasında kristallenmenin meydana geldiği numunelerin iç yapısında oluşan değişikliklerin gözlenmesi amaçlandı.

3.3.2. Diferansiyel taramalı kalorimetri deney sonuçları

Isıtılan ya da soğutulan bir madde ile ortam arasında, sabit basınçtaki ısı alışverişinin sıcaklığa bağlı olarak izlenmesine diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) denilmektedir [177]. DSC bir maddenin enerji girdilerini ve kontrollü sıcaklık programına maruz kalan referans materyalin enerji girdilerini ölçmektedir. Pratik olarak, entalpi ve özellikli ısı değişikliklerinin dahil olduğu tüm fiziksel ve kimyasal prosesler ve yoğun faz sistemlerinde DSC uygulanabilir. DSC ölçümleri kantitatifdir. Entalpi değişimi genellikle reaksiyon ekseninin bir lineer fonksiyonudur. Bir DSC ölçümü entalpi değişim oranını vermektedir [178]. DSC ile diferansiyel termal analiz (DTA) hemen hemen birbirlerinin yerine geçebilmektedir. DSC tekniği, sıcaklık sensörleri arasındaki sıcaklık farkını ölçmekteyken DTA'da ise referans materyal aynı

programlı sıcaklık değişimine maruz kalmaktadır [179-180]. DSC ve DTA arasındaki temel fark ise DSC tekniğinde enerji farkının ölçülmesi, DTA tekniğinde ise sıcaklık farkının ölçülmesidir. Sıcaklık programlaması her iki metotta da aynıdır. Günümüzde DSC, termal metotlar arasında en çok kullanılanıdır [181].

DSC, test edilecek örnek ile referans arasındaki sıcaklık farkını sıfır yapmak için gerekli enerjinin zaman ya da sıcaklığa karşı kaydedilmesidir. Bu yöntem entalpi değişimleri hesaplamasında kullanılmaktadır. Bu yöntemde, örnek ve referans madde, farklı ısıtıcı ve sıcaklık ölçerlerle bağlantılıdır. Her iki maddeye, hızı elektronik olarak kontrol edilen enerji verilerek sıcaklıklarının değişmemesi sağlanmaktadır. DSC eğrisinin ordinatı; referans sıcaklığa göre, örnek tarafından soğurulan bağıl enerji hızını göstermektedir. Bu hız numunenin ısı kapasitesine bağlıdır [182-183]. DSC aygıtları ısı akışlı ve güç kontrollü olmak üzere iki ana metot göz önünde bulundurularak imal edilmektedir ve günümüzde üretilen cihazların büyük bir kısmı ısı akışlıdır [184]. Isı akışlı bir DSC hücresi Şekil 3.12’de şematik olarak gösterildiği gibidir. DSC eğrileri, eklenen ısının sıcaklığa karşı çizilmesi ile elde edilen grafiklerdir. Pikin altında kalan alan, tepkimede soğurulan veya açığa çıkan ısı ile doğru orantılıdır [177].

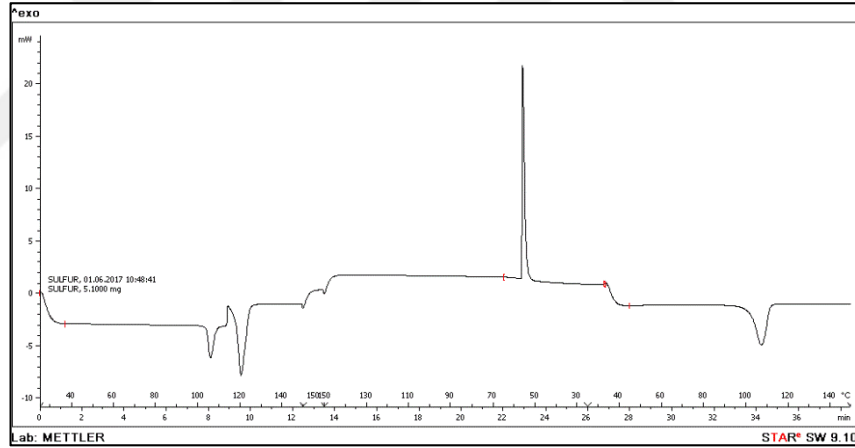


Şekil 3.12. Isı akışlı DSC hücresi şematik gösterimi [182]

Bu çalışma kapsamında ısı akışlı Mettler Toledo marka DSC 1 Star System diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı kullanıldı. Ağırlıkça %0 (referans-saf kükürt), %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında bitüm katılarak modifiye edilen kükürtün ısıtma ile oluşan faz dönüşümünün ısı kapasitesi ölçümü DSC yapılarak belirlendi. Numuneler

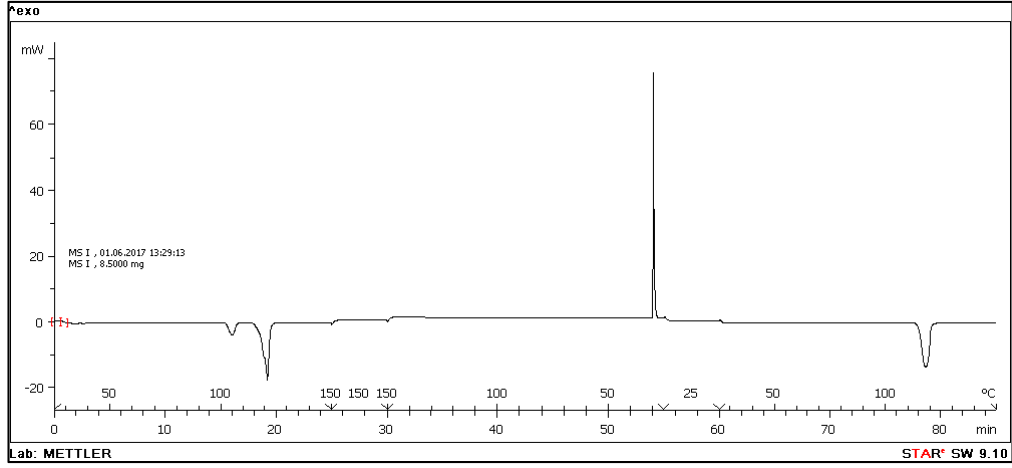
100'lük alüminyum pan içerisinde 10 mg olacak şekilde hazırlandı. Çalışmada, numuneler öncelikle oda sıcaklığından 150°C'ye kadar ısıtıldı daha sonra bu sıcaklık seviyesinden oda sıcaklığına kadar soğutuldu ve son olarak tekrar ısı yüklemesi uygulanarak oda sıcaklığından 150°C'ye kadar ısıtılarak üç farklı sıcaklık rejimi uygulandı. Tüm ısıl hareketlilik adımları 5°C/dk olacak şekilde ayarlandı.

DSC cihazına ait yazılımdan elde edilen, tüm diyagramlar Şekil 3.13, 3.14, 3.15 ve 3.16'da gösterilmektedir. Şekil 3.13'te saf kükürde (MK₀) ait birinci sıcaklık artışı, soğuma ve ikinci sıcaklık artışı sürekli DSC diyagramı üzerinde görülmektedir. Saf kükürte birinci sıcaklık artışı sırasında öncelikle S_α (ortorombik) kristaller daha sonra ise S_β (monoklinik) kristalleri eridi. Sıcaklık 150°C'ye ulaştığında soğuma işlemi başlatıldı. Saf kükürtün sıcaklığı düşmeye başladığında kükürt katılaşmaya başladı ve S_α kristalizasyonunun gerçekleştiği görüldü. İkinci sıcaklık artışı durumunda ise saf kükürte sadece S_α kristallerinin eridiği belirlendi.



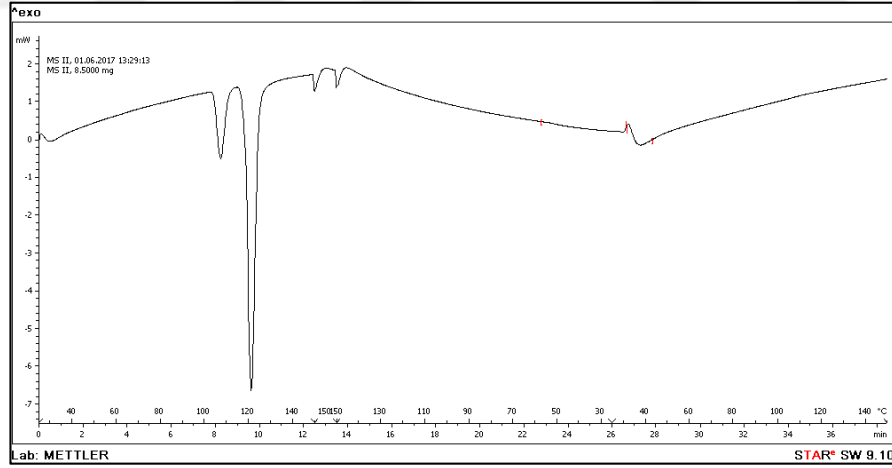
Şekil 3.13. Saf kükürt (MK₀) DSC diyagramı

Şekil 3.14'te %2,5 bitüm katkılı modifiye kükürde (MK₁) ait birinci sıcaklık artışı, soğuma ve ikinci sıcaklık artışı sürekli DSC diyagramı üzerinde görülmektedir. MK₁ numunesinde birinci sıcaklık artışı sırasında ilk olarak S_α kristalleri daha sonra ise S_β kristalleri eridi. Sıcaklık 150°C'ye ulaştığında soğuma işlemi başlatıldı. Numunenin sıcaklığı düşmeye başladığında kükürt katılaşmaya başladı ve S_β kristalizasyonunun gerçekleştiği görüldü. İkinci sıcaklık artışı durumunda ise soğuma sırasında oluşan S_β kristallerinin eridiği belirlendi.



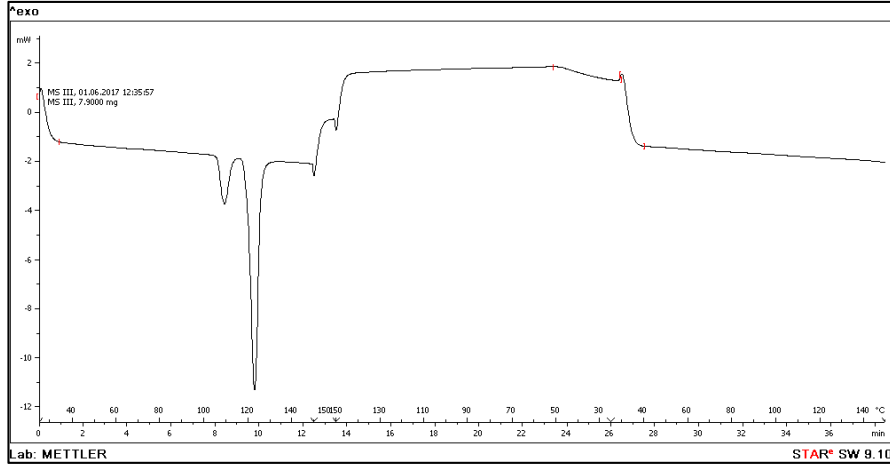
Şekil 3.14. MK₁ DSC diyagramı

Şekil 3.15'te %5 bitüm katkılı modifiye kükürde (MK₂) ait birinci sıcaklık artışı, soğuma ve ikinci sıcaklık artışı sürekli DSC diyagramı üzerinde görülmektedir. MK₂ numunesinde birinci sıcaklık artışı sırasında ilk olarak S_α kristalleri daha sonra ise S_β kristalleri eridi. Sıcaklık 150°C'ye ulaştığında soğuma işlemi başlatıldı ve katılaşma başladığında herhangi bir kristalizasyonun gerçekleşmediği belirlendi. İkinci sıcaklık artışı durumunda ise herhangi bir erime durumu belirlenmedi.



Şekil 3.15. MK₂ DSC diyagramı

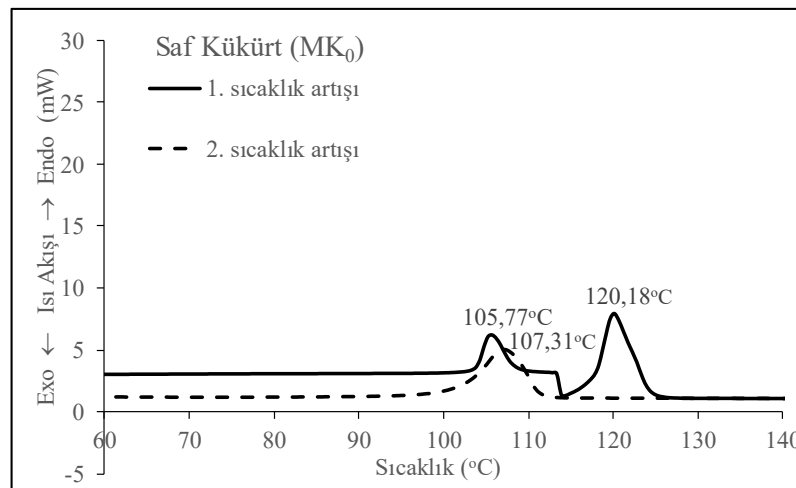
Şekil 3.16'da %7,5 bitüm katkılı modifiye kükürde (MK₃) ait birinci sıcaklık artışı, soğuma ve ikinci sıcaklık artışı sürekli DSC diyagramı üzerinde görülmektedir. MK₃ numunesinde birinci sıcaklık artışı sırasında ilk olarak S_α kristalleri daha sonra ise S_β kristalleri eridi. Sıcaklık 150°C'ye ulaştığında soğuma işlemi başlatıldı ve katılaşma başladığında herhangi bir kristalizasyonun gerçekleşmediği belirlendi. İkinci sıcaklık artışı durumunda ise herhangi bir erime durumu belirlenmedi.



Şekil 3.16. MK₃ DSC diyagramı

DSC diyagram verileri kullanılarak MK₁, MK₂ ve MK₃ numuneleri ile saf kükürt numunesine ait birinci sıcaklık artışı ve ikinci sıcaklık artışı diyagramları aynı grafik üzerinde Şekil 3.17, 3.18, 3.19 ve 3.20’de verildiği gibidir.

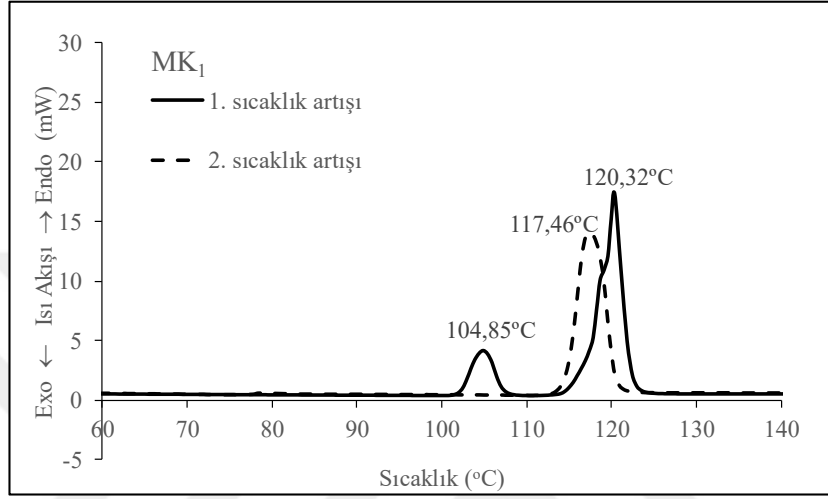
Şekil 3.17’de saf kükürde (MK₀) ait ısı akışı – sıcaklık grafiği görülmektedir. Saf kükürde birinci ısıtma sırasında öncelikle 105,77°C’de S_α kristalleri daha sonra ise 120,18°C’de S_β kristalleri eridi. Sıcaklık 150°C’ye ulaştığında soğuma işlemi başlatıldı. İkinci ısıtma durumunda ise saf kükürtte 107,31°C’de sadece S_α kristallerinin eridiği belirlendi. Bu durum modifiye edilmiş olan kükürtün yapısındaki S_β kristallerinin, soğuma ile S_α kristal formuna dönüştüğünü göstermektedir.



Şekil 3.17. MK₀ numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği

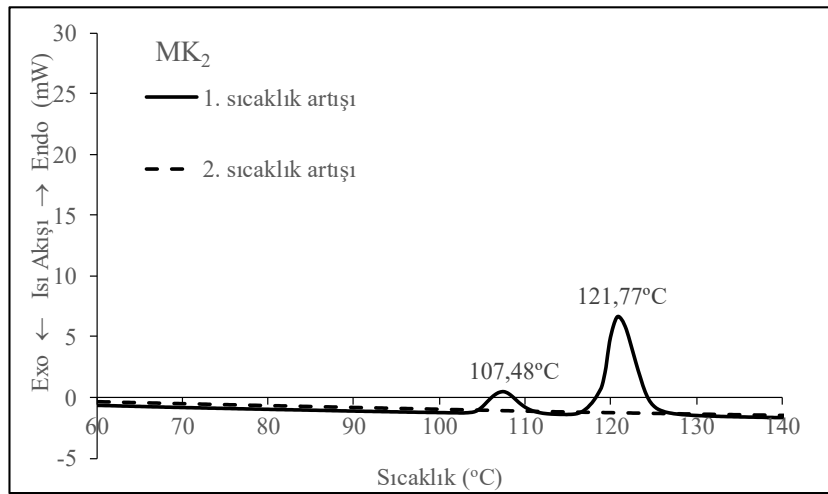
Şekil 3.18’de MK₁ (%2,5 Bitüm) numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği görülmektedir. MK₁ numunesinde birinci sıcaklık artışı sırasında öncelikle

104,85°C’de S_α kristalleri daha sonra ise 120,32°C’de S_β kristalleri eridi. Sıcaklık 150°C’ye ulaştığında soğuma işlemi başlatıldı. İkinci ısıtma durumunda ise numunede 117,46°C’de sadece S_β kristallerinin eridiği belirlendi. Bu durum modifiye edilmiş olan kükürtün S_β kristal formunda sabit kaldığının ve S_α kristal formuna dönüşümün engellendiğinin en önemli göstergesidir.



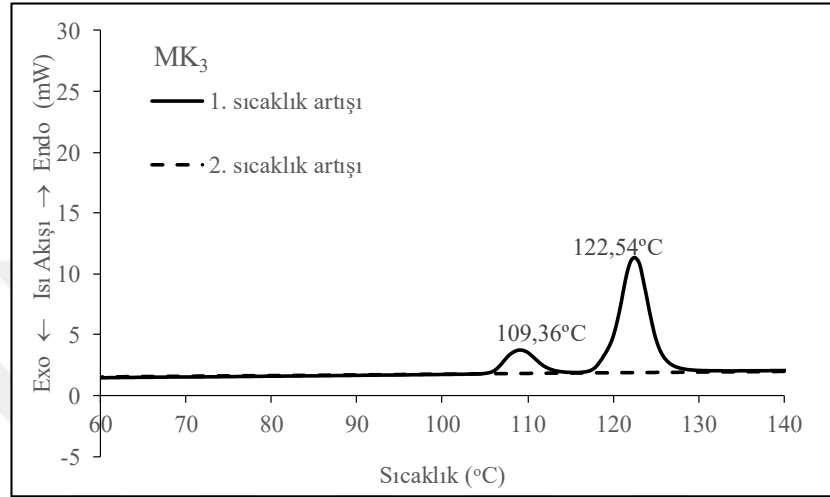
Şekil 3.18. MK_1 numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği

Şekil 3.19’da MK_2 (%5 Bitüm) numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği görülmektedir. MK_2 numunesinde birinci sıcaklık artışı sırasında ilk olarak 107,48°C’de S_α kristalleri daha sonra ise 121,77°C’de S_β kristalleri eridi. İkinci sıcaklık artışı durumunda ise kristal erimesi gözlenmedi. MK_2 numunesinde katı-katı faz geçişi gözlenmezken sadece katı-sıvı faz geçişi meydana geldiği görüldü.



Şekil 3.19. MK_2 numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği

Şekil 3.20’de MK₃ (%7,5 Bitüm) numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği görülmektedir. MK₃ numunesinde birinci sıcaklık artışı sırasında ilk olarak 109,36°C’de S_α kristalleri daha sonra ise 122,54°C’de S_β kristalleri eridi. İkinci sıcaklık artışı durumunda ise kristal erimesi gözlenmedi. MK₃ numunesinde katı-katı faz geçişi gözlenmezken sadece katı-sıvı faz geçişi meydana geldiği görüldü.



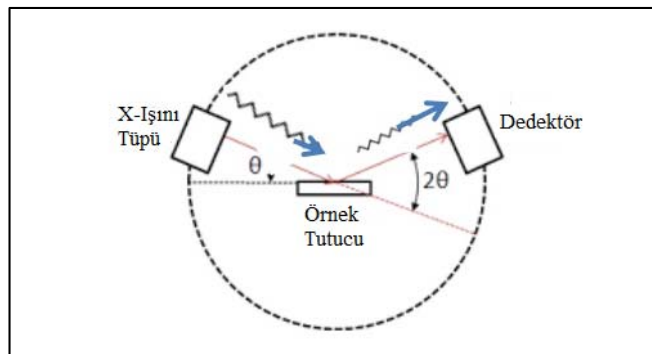
Şekil 3.20. MK₃ numunesine ait ısı akışı – sıcaklık grafiği

Saf kükürt numunesine ait DSC diyagramları incelendiğinde birinci ısıtma durumu sonrası soğutma periyodunda S_α kristalizasyonunun meydana geldiği gözlemlenirken, %2,5 bitüm katılarak hazırlanan MK₁ modifiye kükürt numunesinde S_β kristalizasyonunun meydana geldiği görüldü. Karışıma konulan bitümün, kükürt kristalizasyonunu baskıladığı ve kristallerin büyümesini engellediği için soğuma periyodunda S_β kristallerinin S_α kristallerine dönüşmesini önlediği belirlendi. %5 ve %7,5 oranlarında bitüm katılarak hazırlanan MK₂ ve MK₃ modifiye kükürt numunelerinde bitümün kristal büyümesini tamamen engellemesi nedeniyle kristalizasyon gözlenmedi. Yapılan deneysel çalışma sonucunda farklı oranlarda bitüm katılarak hazırlanan modifiye kükürt numunelerinde, bitümün kükürt kristallerindeki büyümeyi baskıladığı görüldü. Liu ve diğ. tarafından 2008 yılında yapılan çalışmada yüksek oranda modifikatör kullanılmasının kristalizasyonu önlediği ve katı-katı faz geçişi gözlenmezken sadece katı-sıvı faz geçişi meydana geldiği belirlenmiştir [185]. Deneysel çalışma kapsamında hazırlanan MK numunelerinde yüksek miktarda bitüm kullanımının kristal büyümesindeki baskılamayı arttırdığı ve kükürtün kristal

dönüşümünü tamamen engellediği belirlendi ve bulunan sonuçların Liu ve diğ tarafından elde edilen sonuçlarla paralellik gösterdiği görüldü.

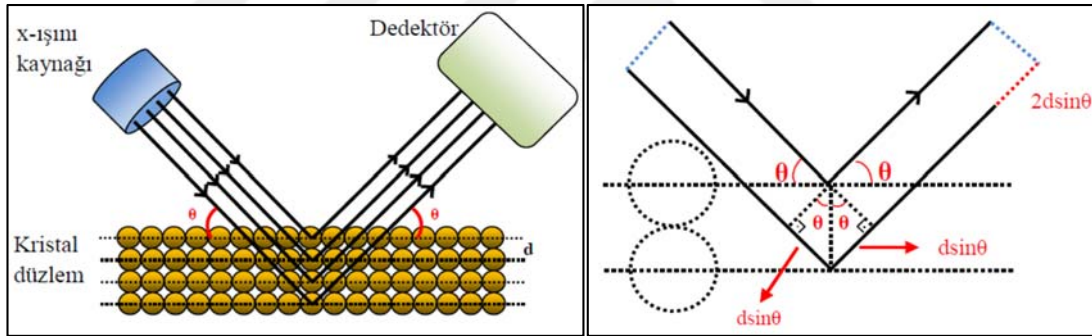
3.3.3. X-ışını kristalografisi deney sonuçları

X-ışını kırınımı yöntemi; “X-Ray Diffraction Spektroskopisi” olarak bilinmekte ve x-ışını kullanılarak yapılan analizi temel almaktadır [186]. XRD; metal, seramik ve kompozit gibi kristal yapıları malzemelerin iç yapısının incelenmesi amacıyla kullanılan tahribatsız ve analitik bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemle, incelenen materyaldeki atomların dizilişinin ve fazların belirlenmesi ile nicel faz analizi yapmak mümkündür [187]. X-ışını teknolojisi yüzyıllar öncesine dayanan tarihi ile modern bilim ve teknolojinin her alanında kullanılmaktadır. Bu yöntem 1895 yılında Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından bulunmuş ve bu keşfi 1901 yılında Nobel ödülü ile onurlandırılmıştır [188]. X-ışınları, kısa dalga boyuna sahip elektromanyetik ışımalarıdır. Dalga boyu ultraviyolenden küçüktür. Dalga boyu tipik olarak 0.1-0.001 nm yani 100-1 pm civarındadır. X-ışınları çoğu cismin içine kolayca girebilmektedir. X ışını, görünmeyen, yüksek penetrasyona sahip, görünür ışıktan daha kısa dalga boylu (yüksek frekanslı) elektromanyetik dalgadır [186]. XRD tekniğinde θ geliş açısı ile materyalin üzerine gönderilen ışın kristal yüzeyine çarpmakta ve yine θ açısı ile yansımaktadır. Yansıyan ışınlar detektör tarafından durdurulmakta ve kaydedilmektedir. Bu yansıyan ışınların uzaysal dağılımı ve yoğunluğu, materyalin yapısı tarafından belirlenen ve materyale özgü olan kırınım desenini oluşturmaktadır [187]. XRD cihazı temel olarak x-ışını tüpü, örnek tutucu ve x-ışını dedektörü olmak üzere üç kısımdan meydana gelmektedir. Bu yapılar odaklama çemberi olarak bilinen çemberin çevresinde yer almaktadır. XRD cihazı şematik olarak Şekil 3.21’de gösterilmektedir.



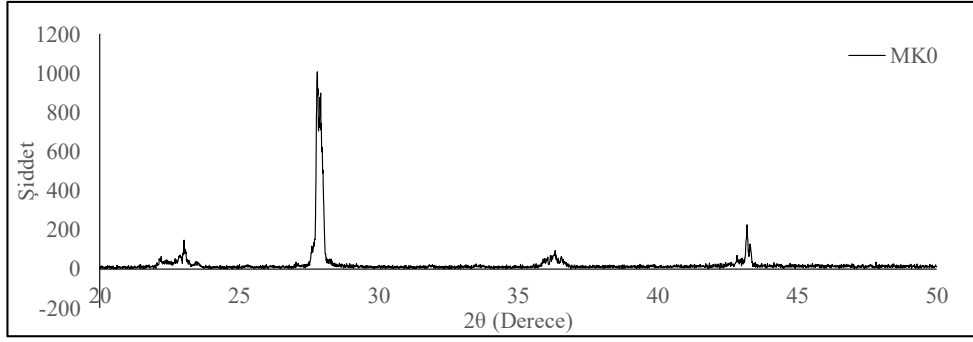
Şekil 3.21. XRD cihazı şematik gösterimi [187]

X-ışınlarının kristal yansımaları ilk olarak Max von Laue tarafından 1912 yılında bulunmuştur [187]. Aynı yıl içinde kırılma durumları Bragg kanunları olarak isimlendirilen basit matematik formları halinde Lawrence Bragg tarafından formülize edilmiştir. Bragg kanunları kristal düzlemlerinden yansıyan x-ışınlarının niçin belirli açılarda gelen x-ışınları için gözlenebildiklerini açıklayan bir bağıntıyı içermektedir. W.L. Bragg kristallerin paralel atom düzlemlerinden oluştuğunu göz önünde bulundurmıştır. Gelen dalgalar her bir düzlemden ayrı ayrı yansımaya uğramaktadır. Birbiri üzerine dizili pek çok “aynadan” yansımaya uğrayan ışık, girişim desenleri oluşturmaktadır. Kırınımına uğramış demetler (yansımalar) Bragg kanunları ile tanımlanan belirli açılarda oluşabilmektedir. Bragg kanununun şematik gösterimi Şekil 3.22’de verilmektedir. Şekilde yer alan sarı daireler kristal düzlem içerisinde yer alan atomların, atomsal dizilimini göstermektedir. İnce yatay çizgiler de kristal düzlemlerini temsil etmektedir. Bu şartlar altında Bragg kırınım kanunu 2. d. $\sin \theta = \lambda$ formülü ile hesaplanmaktadır [187-189].

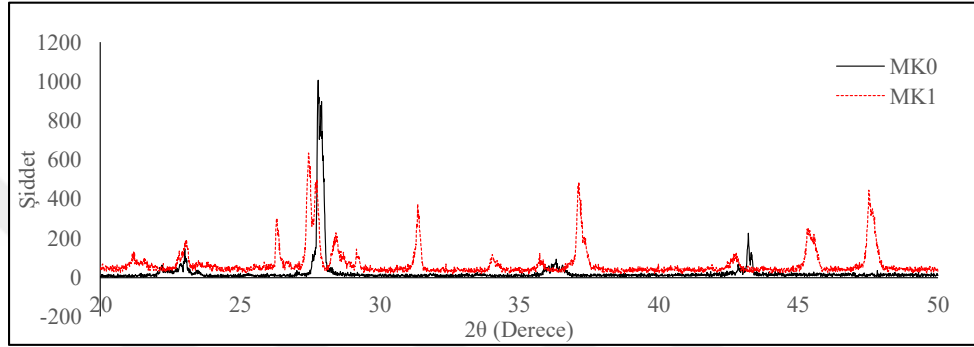


Şekil 3.22. Bragg kanunu şematik gösterimi [189]

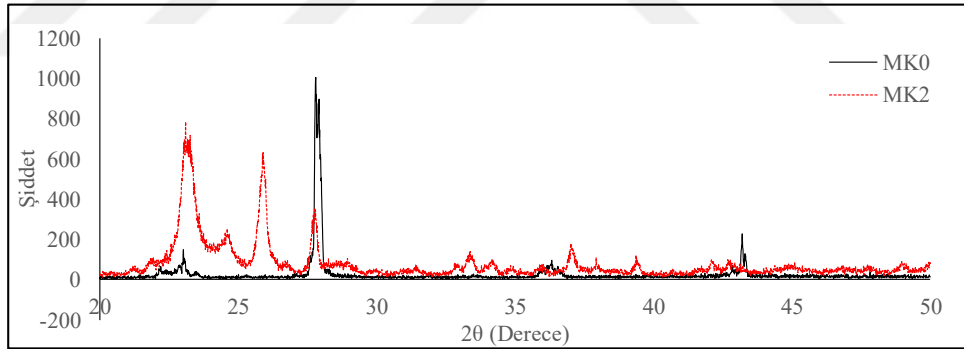
Bu çalışmada numunelere ait XRD desenleri Rigaku Dmax 2200 Difraktometre cihazı kullanılarak elde edildi. Ağırlıkça %0 (referans-saf kükürt), %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında bitüm katılarak modifiye edilen kükürtün içyapısında meydana gelen değişimler XRD yöntemi ile belirlendi. Referans numunesi olarak kullanılan saf kükürtün x-ışını kırınımı deseni Şekil 3.23’te verildiği gibidir. Saf kükürt numunesine ait XRD deseni incelendiğinde en keskin sinyale ait 2θ değerinin 27,80 olduğu belirlendi. MK₁, MK₂, ve MK₃ modifiye kükürt numunelerine ait x-ışını kırınımı desenleri referans numuneye ait desen ile birlikte karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 3.24, 3.25, ve 3.26’da verildiği gibidir.



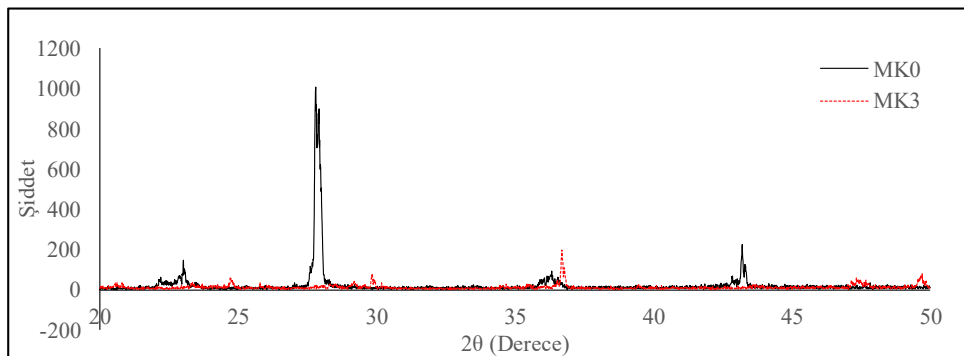
Şekil 3.23. MK₀ (saf kükürt) numunesine ait x-ışını kırınımı deseni



Şekil 3.24. MK₁ numunesine ait x-ışını kırınımı deseni



Şekil 3.25. MK₂ numunesine ait x-ışını kırınımı deseni

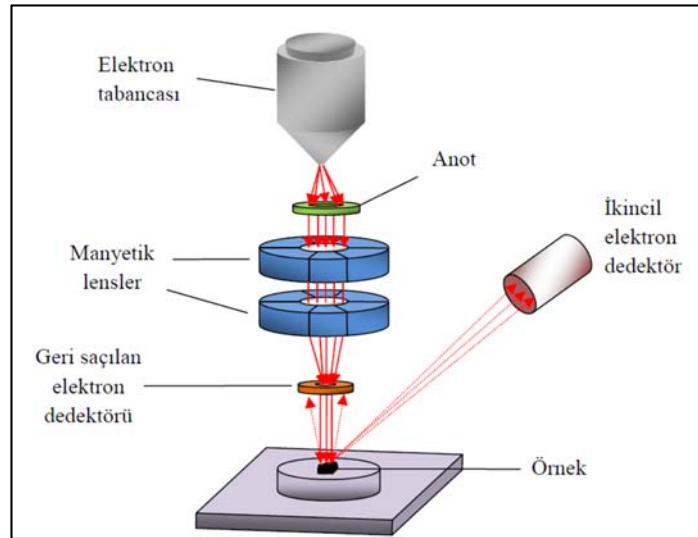


Şekil 3.26. MK₃ numunesine ait x-ışını kırınımı deseni

Modifiye kükürt ve saf kükürde ait XRD desenleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde modifiye edilmiş kükürtün kristal yapısının modifiye edilmemiş saf kükürtün kristal yapısından farklılık gösterdiği görülmektedir. MK₁, MK₂ ve MK₃ numunelerine ait x-ışını kırınımı desenleri incelendiğinde en keskin sinyale ait 2θ değerlerinin sırasıyla 27,46, 26,35 ve 23,10 olduğu belirlendi. Bu durum modifiye kükürt kristalizasyonunda yeni oluşan yapının tane büyüklüğünün saf kükürt kristal yapısından daha ince olduğunun bir göstergesidir. Saf kükürt içerisine konulan bitüm, kükürt kristalize olurken kristal büyümesinin sınırlandırdığından dolayı modifiye kükürt kristal yapıları saf kükürde göre daha ince olmaktadır. MK₃ numunesine ait XRD deseni incelendiğinde keskin bir sinyal belirlenmedi. Modifikasyonda büyük miktarlarda bitüm kullanılması durumunda kükürt kristalizasyonu büyük ölçüde baskılandığından MK₃ numunesine ait XRD deseninde keskin bir sinyal gözlenmedi.

3.3.4. Taramalı elektron mikroskobu deney sonuçları

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), hacimsel örneklerin karakteristik mikro yapılarının incelenmesine ve kimyasal bileşenleri hakkında ayrıntılı bilgi edinebilmeye olanak sağlayan çok yönlü bir sistemdir. Taramalı elektron mikroskobu şematik olarak Şekil 3.27’de gösterilmektedir [189].



Şekil 3.27. SEM şematik görüntüsü [189]

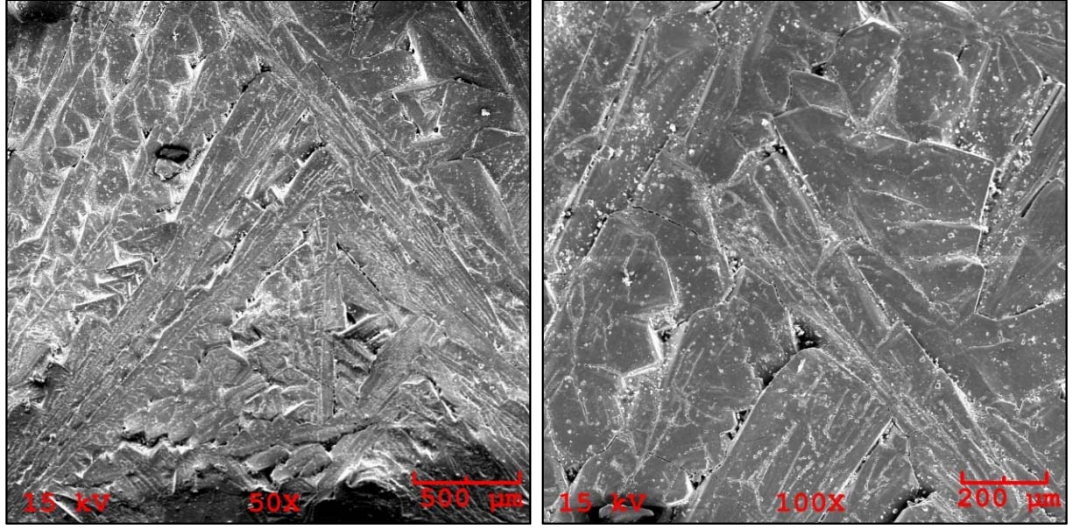
Bu mikroskopların en büyük avantajı, numune hazırlama işleminin çok kolay olması ve yüksek ayırım gücüne sahip olmasıdır. Ayrıca bir enerji ayırıcı x-ışınları detektörü

ile örnek üzerindeki parçacıkların (fazların) kimyasal analizleri yapılabilmektedir [189-190].

SEM görüntüsü; yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması, taratma sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve bu bilgilerin sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir [190]. Taramalı elektron mikroskobunun optik kolunda; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, demeti toplamakta ve yönlendirmekte kullanılan condenser ve objektif mercekleri, demet çapını sınırlamakta kullanılan apertürler ile numune yüzeyini taraması için demeti uygun şekilde saptıran tarama bobinleri bulunmaktadır. Optik kolun alttan numune ocağına açılmaktadır. Burada üç boyutta hareket edebilen numune kızağı ve demet-numune etkileşimi sonucu oluşan değişik sinyallere duyarlı algılayıcılar bulunmaktadır. Mikroskobun elektronik donanımı ise flaman akımı, mercek akımı ve uyarma gerilimini kararlı tutarken, algılayıcılardan gelen sinyalleri işleyerek numunenin değişik özelliklerini yansıtan görüntüler oluşturmaktadır [190].

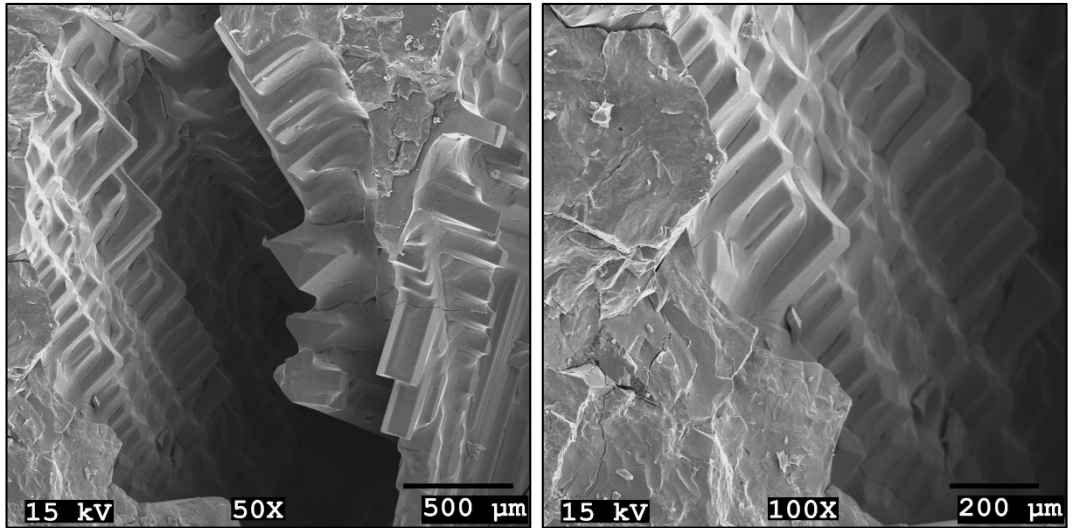
Bu çalışma kapsamında JEOL-JSM-6060 markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Ağırlıkça %0 (referans-saf kükürt), %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında bitüm katılarak modifiye edilen kükürtün içyapısının incelenmesi amacıyla her bir numunenin farklı çözünürlüklerde SEM görüntüleri alındı. Numuneler gerekli iletkenliğe sahip olabilmeleri için SEM görüntüsü alınmadan önce 35 mA'lık akım değerinde 200 sn süre ile vakumlanarak püskürtmeli kaplama cihazında kaplandı. Hazırlanmış olan numuneler taramalı elektron mikroskobunun elektron tabancasına yerleştirilerek görüntüleme gerçekleştirildi.

Saf kükürde ait SEM görüntüleri Şekil 3.28'de görülmektedir. Saf kükürtün kristallenme sonrasında ortorombik kükürt morfolojisine sahip geniş ve yoğun S_{α} kristal yapısında olduğu görülmektedir. Rombik kükürt olarak da bilinen ortorombik kükürt, oda sıcaklığında ve atmosferik basınç altında kükürtün kararlı olduğu yapıdır [2].



Şekil 3.28. Saf kükürt (MK₀) SEM görüntüsü

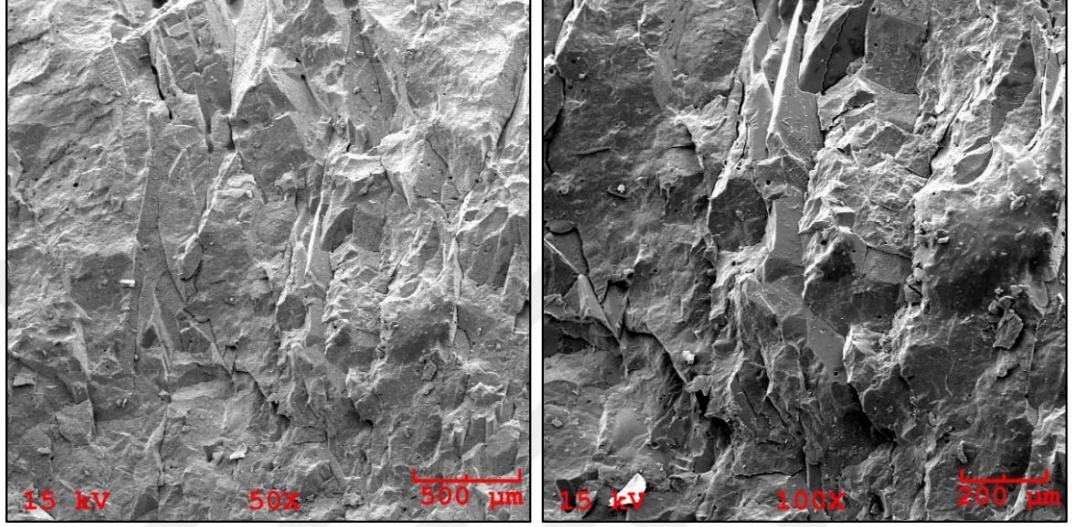
Ağırlıkça %2,5 oranında bitüm ilave edilmiş kükürt numunesine ait SEM görüntüleri Şekil 3.29'da görülmektedir. Saf kükürt içerisine bitüm ilavesi ile birlikte kristal büyümesi bitüm tarafından sınırlandırılarak kontrol altına alınmaktadır. Bunun sonucu olarak, plakalı yapı görünümüne sahip monoklinik faza dönüşen kükürdün ortorombik faza dönüşümü engellenmektedir. Saf kükürde ait yoğun ve geniş ortorombik kristal yapının, bitüm ilavesi ile birlikte plakalı yapıya sahip monoklinik kristal formunda sabit kaldığı ve S_{β} - S_{α} dönüşümünün gerçekleşmediği belirlendi.



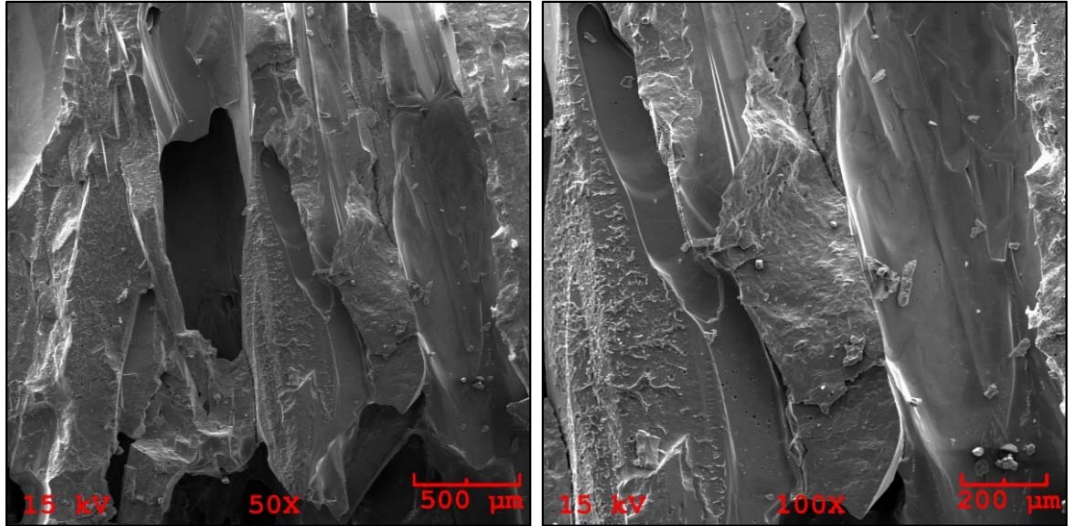
Şekil 3.29. MK₁ SEM görüntüsü

Ağırlıkça %5 ve %7,5 oranlarında bitüm ilave edilmiş kükürt numunelerine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri sırasıyla Şekil 3.30 ve 3.31'de görülmektedir. Bölüm 3.3.1 ve 3.3.2'de sonuçları verilmiş olan POM ve DSC

analizlerinde, MK₂ ve MK₃ nmunelerinde yüksek oranda modifikatör kullanılması sonucunda kristalizasyonun tamamen önlediği ve katı-katı faz geçişi gözlenmezken sadece katı-sıvı faz geçişi meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sonuçlara paralel olarak MK₂ ve MK₃ nmunelerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde herhangi bir kristal yapı oluşumu olmadığı görüldü.



Şekil 3.30. MK₂ SEM görüntüsü



Şekil 3.31. MK₃ SEM görüntüsü

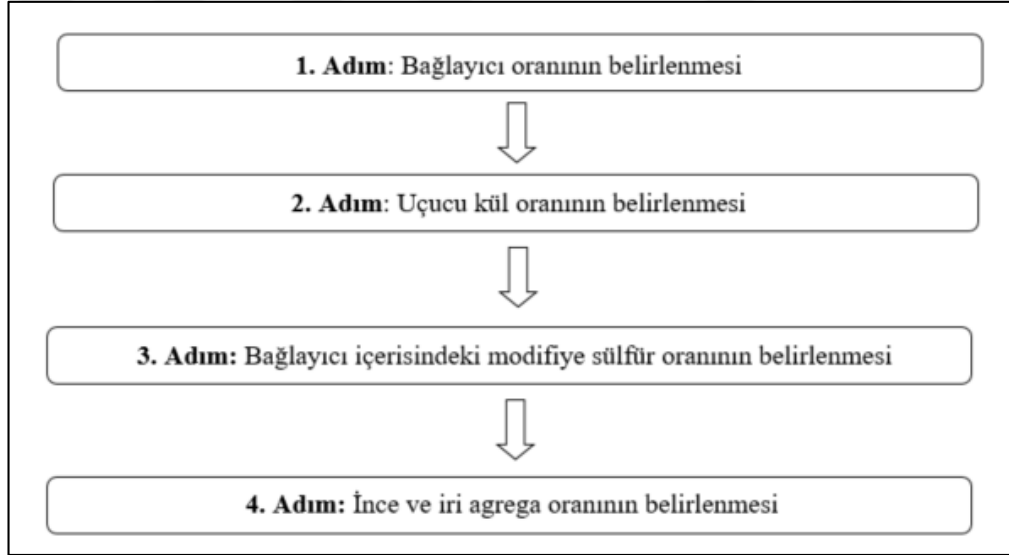
3.4. Değerlendirmeler

Kükürt modifikasyonu için gerekli katkı olarak Tüpraş-İzmit rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanıldı. Kükürtün modifiye edilebilmesi için saf kükürt içerisinde ağırlıkça %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında bitüm ilave edilerek 3 farklı

modifikasyon oranı belirlendi. Modifikasyon için gerekli bitüm yüzdesinin belirlenmesi ve modifikasyonun tam anlamıyla gerçekleşip gerçekleşmediğinin kontrolünün yapılması amacıyla saf kükürt ve modifiye edilmiş kükürt numuneleri üzerinde DSC, POM, XRD ve SEM deneyleri gerçekleştirildi. Ağırlıkça %2,5 oranında bitüm kullanıldığında; saf kükürde ait yoğun ve geniş ortorombik kristal yapının, plakalı yapıya sahip monoklinik kristal formunda sabit kaldığı ve S_{β} - S_{α} dönüşümünün gerçekleşmediği belirlendi. Yapılmış olan içyapıya ait deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda bu çalışma kapsamında kükürt modifikasyonu için gerekli bitüm oranı ağırlıkça %2,5 olarak belirlendi. Deneysel çalışma sonucunda bulunmuş olan modifikasyon için gerekli bitüm yüzdesinin Mohamed ve Al-Otaibi tarafından gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara paralellik gösterdiği görülmektedir [14, 19, 90].

4. KARIŞIM ORANLARININ BELİRLENMESİ

Çalışmanın bu bölümünde KPB'lerin karışım oranlarının belirlenmesi amaçlandı. Karışım oranlarının belirlenmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait akış diyagramı Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilmektedir. Birinci adımda, saf kükürt ve doğal kumun karışım oranının belirlenmesi amaçlandı. İkinci adımda, bağlayıcı oranı sabit tutularak agrega oranı içerisindeki doğal kum ve uçucu kül oranlarının belirlenmesi amaçlandı. Üçüncü adımda, KB harçları içerisine katılacak olan agrega (uçucu kül ve doğal kum) yüzdesi sabit tutulup karışımda bağlayıcı olarak kullanılan saf kükürt içerisine ikame yöntemine göre değişik oranlarda modifiye edilmiş kükürt (MK) katılarak, MK yüzdesinin belirlenmesi amaçlandı. Dördüncü adımda ise KPB içerisine katılacak olan bağlayıcı ve uçucu kül yüzdeleri sabit tutularak karışımda kullanılacak agrega içerisinde yer alan doğal kum (ince agrega) ve kırmataş (iri agrega) oranının belirlenmesi amaçlandı.



Şekil 4.1. Deneysel çalışma akış diyagramı

4.1. Bağlayıcı Oranının Belirlenmesi

Deneysel çalışmada ilk olarak, saf kükürt kullanılarak hazırlanan kükürt bağlayıcı harçların dökümü gerçekleştirildi. Numuneler hazırlanırken saf kükürt ve doğal kum kullanıldı. Çalışmanın bu bölümünde bağlayıcı ile agrega oranının belirlenmesi

amaçlandı ve bu amaçla farklı kükürt ve doğal kum oranları kullanılarak, kükürt miktarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirildi. Hazırlanan numunelerin karışım oranları Tablo 4.1’de verildiği gibidir. Bağlayıcı (kükürt)-agrega oranının belirlenmesi amacıyla saf kükürt ve doğal kumdan oluşan harç karışımlarında ağırlıkça %30, %35, %40, %45 ve %50 oranlarında kükürt kullanılarak, kükürt bağlayıcılı harç numuneleri hazırlandı. Kullanılan saf kükürt katılım oranı için gerekli aralık, yapılan deneme karışımları sonucunda belirlendi. Ağırlıkça %30’dan daha düşük oranlarda kükürt eritilerek hazırlanan numunelerde düşük kıvamlar elde edildi ve sıvı fazın eksikliğinden dolayı karıştırma gerçekleştirilemedi. Ağırlıkça %50’den daha fazla oranda kükürt eritilerek hazırlanan karışımlarda akışkan kıvamlar elde edildiğinden, betonun kalıba doldurulması sırasında bağlayıcı (saf kükürt) ve doğal kumda ayrışmalar meydana geldi. Bu nedenle %30 ve %50 oranları arasında kıvam limitleri tekrarlı dökümler ve gözlemler ile belirlenerek deneyler bu karışım oranları göz önüne alınarak yapıldı.

Tablo 4.1. Kükürt bağlayıcılı harç karışım oranları

Numune Adı	Saf Kükürt (Ağr. %)	Kum (Ağr. %)
K30DK70	30	70
K35DK65	35	65
K40DK60	40	60
K45DK55	45	55
K50DK50	50	50

Numune isimlendirmesinde; “K” kükürtü, yanındaki rakam oranını temsil ederken, “DK” doğal kumu, yanındaki rakam ise harç içerisindeki oranını temsil etmektedir. Kullanılan oranlar ağırlıkça yüzdeler olarak verilmektedir. “K30DK70” numunesi ağırlıkça %30 oranında kükürt ile %70 oranında doğal kum kullanılarak hazırlanan numuneyi temsil etmektedir.

4.1.1. Numune özellikleri

Kükürt bağlayıcılı harçların hazırlanmasında sıcaklık önemli bir etken olduğundan ve kükürtün soğuma sırasında hızlı bir şekilde katılaşmasının göz önüne alınması gerektiğinden; harçların karıştırılması, kalıplara doldurulması ve yüzeyinin düzeltilmesinde kullanılan tüm yardımcı ekipmanlar etüvde 130-135°C arasında 2 saat süreyle ısıtılarak kullanıldı. Sıcaklık kontrollü mekanik karıştırıcı 130-135°C arasında

sabitlendikten sonra saf kükürtün karıştırıcıya konularak, mekanik olarak karıştırılıp sıvı faza gelmesi sağlandı. Saf kükürt tamamen eriyip sıvılaştıktan sonra sıvı kükürtün içerisine etüvde bekletilmiş olan doğal kum ilave edilerek; 5 dakika düşük hızda, 5 dakika yüksek hızda karıştırılıp, karışımın homojen hale gelmesi sağlandı. Şekil 4.2’de gösterilen harç karışımı, etüvde ısıtılan 50x50x50 mm’lik metal kalıplar (Şekil 4.3) içerisine yerleştirildi.



Şekil 4.2. Harç karışımı



Şekil 4.3. Harç metal kalıpları

Metal kalıplara yerleştirilen harç karışımı, plastik tokmak ve yine etüvde ısıtılan demir çubuk yardımıyla şişlenerek yerleştirme işlemleri tamamlandı. Yerleştirme işlemleri tamamlandıktan sonra tüm numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Numuneler 24 saat kalıpta bekletildikten sonra çıkarıldı.

4.1.2. Yapılan deneyler

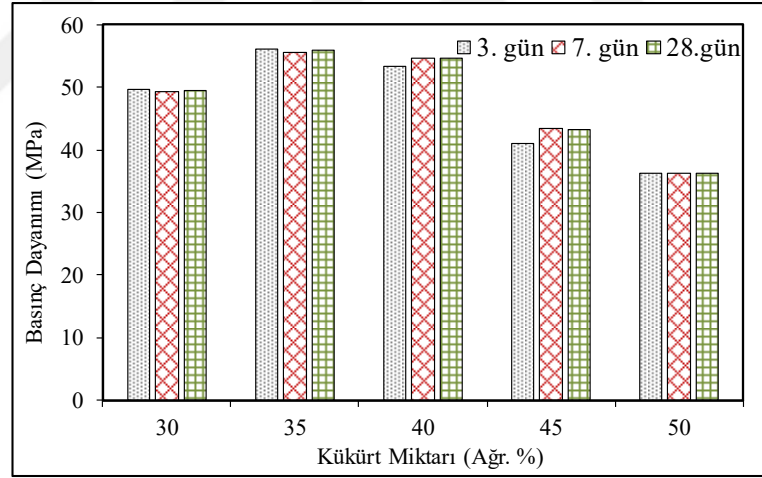
Farklı bağlayıcı-agrega oranlarında, toplam 45 adet 50 mm’lik küp numuneler hazırlandı. Bağlayıcı miktarının belirlenmesi amacıyla; hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi.

4.1.3. Deneş sonuçları

Her kükürt bağlayıcı harç grubu için 9'ar adet olmak üzere, toplam 45 adet numune dökümü yapıldı. 3,7 ve 28. günlerde 3'er adet numunenin basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Deneş sonuçlarının ortalama değerleri, basınç dayanımı değeri olarak belirlendi. Deneşlerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.2'de verildiği gibidir. Deneşlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'te grafik haline getirilerek gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Kükürt bağlayıcı harçların basınç deneyi sonuçları

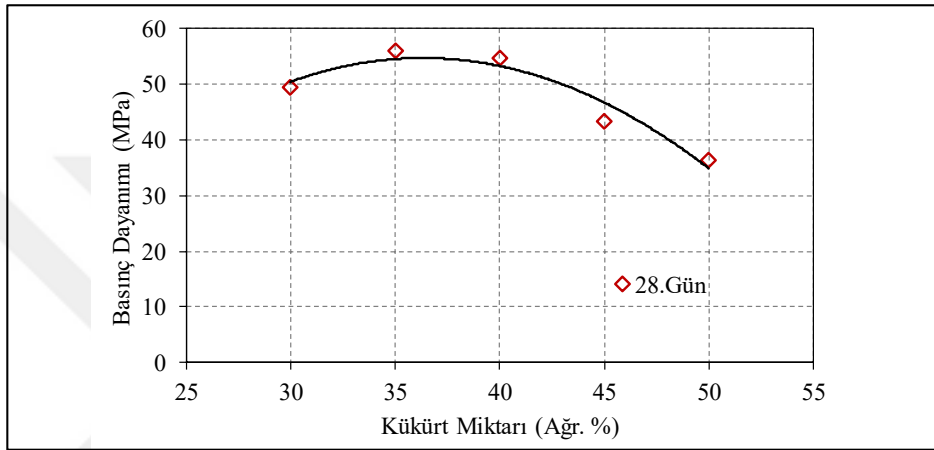
Numune Adı	Basınç Dayanımı (MPa)		
	3 gün	7 gün	28 gün
K30DK70	49,63	49,40	49,44
K35DK65	56,07	55,51	55,91
K40DK60	53,42	54,66	54,63
K45DK55	41,00	43,45	43,33
K50DK50	36,26	36,22	36,24



Şekil 4.4. Kükürt miktarı-basınç dayanımı ilişkisi

Kükürt bağlayıcı harçlarda soğuma ile sertleşme gerçekleştiğinden ve kükürtün 95,4°C'nin altında katılaşma sürecinin başlamasından dolayı sertleşme oldukça hızlı gerçekleşmektedir. Bu nedenle, harçlar, nihai dayanımlarına kısa sürede ulaşmaktadırlar. Bu sebeple, deneşlerden elde edilen sonuçlara göre 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları arasında kükürt bağlayıcı harçlar için ciddi bir değişim gözlenmedi. Bağlayıcı miktarının %30 olduğu durumda; 28 günlük basınç dayanımı değeri 49,44 MPa iken, bağlayıcı miktarının %35 olduğu durumda ise basınç dayanımı değeri %12 oranında artarak 55,91 MPa olduğu belirlendi. Bağlayıcı miktarının fazla

olmasının, çelik kalıp içerisine konan karışımlarda sıvı kükürtün kalıp yüzeyine çıkması ve agreganın aşağı doğru hareket ederek segregasyon problemlerinin oluşmasına neden olduğu belirlendi. Bağlayıcı miktarının %50 oranında kullanılması durumunda, 28 günlük basınç dayanımı değerinin maksimum basınç dayanımı değerine göre %35 oranında azaldığı belirlendi. Şekil 4.5'te karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı değerleri grafik haline gerilerek, kükürt miktarı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Kükürt miktarının 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi

4.1.4. Değerlendirmeler

Çalışmanın bu bölümünde bağlayıcı olarak kullanılan saf kükürt ve agrega olarak kullanılan doğal kumun oranlarının belirlenmesi amaçlandı. Bu amaçla, farklı saf kükürt ve doğal kum oranları kullanılarak, kükürt miktarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirildi. Bu amaçla saf kükürt ve doğal kumdan oluşan harç karışımlarında ağırlıkça %30, %35, %40, %45 ve %50 oranlarında kükürt kullanılarak kükürt bağlayıcılı harç numuneleri hazırlandı. 3, 7 ve 28. günlerde basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Deney sonuçları incelendiğinde KB harçlarında en uygun kükürt miktarının %35 olduğu belirlendi.

4.2. Uçucu Kül Oranının Belirlenmesi

Beton içerisinde filler olarak kullanılan uçucu kül gibi malzemelerin en önemli işlevi boyut ve şekil özelliklerine dayanmaktadır. Küçük parçacıklardan oluşan uçucu kül taneleri, beton içerisindeki agrega taneleri arasında bulunan boşlukları doldurarak betonun yoğunluğunu arttırmakta ve daha az boşluklu bir beton elde edilmesini

sağlamaktadır [3]. Bu durum aynı zamanda uçucu kül ilave edilen KB'lerin dayanıklılık özelliklerinin de iyileşmesini sağlamaktadır. Saf kükürt kullanılarak hazırlanan KB'lerde, uçucu kül gibi ince daneli viskozite arttırıcı malzemelerin beton karışımında kullanılması oldukça önemlidir. Bu ince daneli malzemelerin karışıma ilave edilmesi, karışımın yoğunluğunu arttırarak kıvam ve işlenebilirlik üzerinde oldukça etkindir [14]. Amerikan Beton Enstitüsünde (ACI) kükürt polimer betonların karıştırılması ve yerleştirilmesinin anlatıldığı standartta iki farklı kükürt modifikasyonu tanımlamaktadır. ACI 548D-1993 standardında yer alan ikinci yöntemde, kükürt modifikasyonu için kükürt olefin hidrokarbon polimerleri ve uçucu kül gibi fiziksel stabilizatör ile birleştirilmektedir. Olefin hidrokarbon polimeri kullanılarak kükürtün fiziksel modifikasyonu yapıldığı durumlarda, uçucu kül gibi fiziksel stabilizatör olarak kullanılan filler malzeme ayrıca bir önem arz etmektedir. Karışım oranlarının belirlenmesinde ilk olarak Bölüm 4.1'de agrega ve bağlayıcı (saf kükürt) oranları belirlendi. Mekanik özellikler baz alınarak, bu oranlar ağırlıkça %35 bağlayıcı ve %65 agrega olarak bulundu. Çalışmanın bu bölümünde, uçucu külün agrega oranı içerisindeki miktarının belirlenmesi amaçlandı. Bu amaçla %35 bağlayıcı oranı sabit tutularak %65 agrega oranı içerisindeki doğal kum ve uçucu kül oranlarının belirlenmesi amaçlandı. Uçucu kül miktarı, karışımında bağlayıcı olarak kullanılan saf kükürt miktarı ile ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle hazırlanan numunelerde bağlayıcı/uçucu kül oranları 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 ve 1,5 olarak alındı. Bu oranların belirlenmesinde birçok deneme dökümü ve yayılma tablası deneyi yapılarak uygun işlenebilme aralığındaki değerler belirlendi.

4.2.1. Numune özellikleri

Harçların karıştırılması, kalıplara doldurulması ve yüzeyinin düzeltmesinde kullanılan tüm yardımcı ekipmanlar, etüvde 130-135°C arasında 2 saat süreyle ısıtılarak kullanıldı. Numuneler hazırlanırken bağlayıcı olarak saf kükürt ve agrega olarak uçucu kül ile doğal kum kullanıldı. Sıcaklık kontrollü mekanik karıştırıcı 130-135°C arasında sabitlendikten sonra saf kükürt karıştırıcıya konularak mekanik olarak karıştırılıp sıvı faza gelmesi sağlandı. Saf kükürt tamamen eriyip sıvılaştıktan sonra içerisine etüvde bekletilmiş olan uçucu kül ilave edilerek 10 dakika düşük hızda, 10 dakika yüksek hızda olmak üzere toplam 20 dakika karıştırılarak karışımın homojen hale gelmesi sağlandı. Daha sonra saf kükürt ve uçucu külden oluşan karışımın içerisine etüvde

bekletilmiş olan doğal kum ilave edilerek, karışımın homojen hale geldiğine emin olana kadar minimum 20 dakika süre ile karıştırılması sağlandı. Hazırlanmış olan harç karışımı, etüvde ısıtılan 50x50x50 mm'lik metal kalıplar içerisine dolduruldu. Metal kalıplara yerleştirilen harç karışımı, plastik tokmak ve sıcak demir çubuk yardımıyla şişlenerek yerleştirme işlemleri tamamlandı. Yerleştirme işlemleri tamamlandıktan sonra tüm numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Hazırlanan numunelerde bağlayıcı/uçucu kül oranları 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 ve 1,5 olarak alındı. Hazırlanan numunelerin karışım oranları Tablo 4.3'te verildiği gibidir.

Tablo 4.3. K/UK oranlarına göre harç numunesi karışım oranları

Numune Adı	Saf Kükürt (Ağr. %)	Uçucu Kül (Ağr. %)	Kum (Ağr. %)
K/UK0,9	35,00	38,89	26,11
K/UK1,0	35,00	35,00	30,00
K/UK1,1	35,00	31,82	33,18
K/UK1,2	35,00	29,17	35,83
K/UK1,3	35,00	26,92	38,08
K/UK1,4	35,00	25,00	40,00
K/UK1,5	35,00	23,33	41,67

Numune isimlendirmesinde; “K” kükürtü, “UK” uçucu külü ve sondaki rakam ise harç içerisindeki kükürt/uçucu kül oranını temsil etmektedir. Kullanılan oranlar ağırlıkça yüzdelere olarak verilmektedir. Örneğin “K/UK1,2” numunesi karışımında ağırlıkça kullanılan kükürt/uçucu kül oranı 1,2 olan numuneyi temsil etmektedir.

4.2.2. Yapılan deneyler

Farklı bağlayıcı (saf kükürt)/uçucu kül oranlarında, toplam 63 adet 50 mm'lik küp numune hazırlandı. Uçucu kül ilavesinin işlenebilirlik üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla taze harç numuneleri üzerinde yayılma tablası deneyi gerçekleştirildi. En uygun uçucu kül oranının belirlenmesi amacıyla sertleşmiş harç numuneleri üzerinde ise basınç dayanımı deneyleri yapıldı.

4.2.3. Deney sonuçları

Uçucu külün kıvam üzerinde olan etkisinin belirlenmesi amacıyla taze halde bulunan kükürt bağlayıcılı harç karışımları üzerinde yayılma tablası deneyi gerçekleştirildi. ASTM C-230 standardında Portland çimento harç numuneleri için tanımlanmış olan

deney yöntemi kükürt bağlayıcı harç karışımlarına uyarlanarak, kıvam değerleri belirlendi [155]. Deneylerde kullanılan bağlayıcı/uçucu kül oranlarının limit değerleri, yapılan ön döküm çalışmaları sonucunda elde edildi ve bu değerlerin dışındaki oranlarda uygun işlenebilirlik seviyesinin oluşmadığı belirlendi. Uygun işlenebilirlik seviyesi aralığında kalan oranlar için yayılma tablası deneyleri gerçekleştirildi. Deney düzeneğine ait yayılma tablası, kesik koni şeklindeki kalıp ve metal şiş 130-135°C arasındaki etüvde 2 saat süreyle bekletildi. Etüvden çıkarılan yayılma tablası üzerine yerleştirilen üst iç çapı 70 mm, taban iç çapı 100 mm ve yüksekliği 50 mm olan kesik koni şeklindeki metal kalıba kükürt beton harç numunesi iki tabaka halinde doldurulup, her bir tabaka şişleme çubuğu ile 10 kez şişlendi. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra metal kalıp tam düşey olacak şekilde yukarıya doğru tek bir hamle ile kaldırıldı. Bu işlemi takiben yayılma tablasına 15 saniyede toplam 25 düşüş yaptırılarak, serbest kalan kükürt bağlayıcı harcın yayılması sağlandı (Şekil 4.6). Yayılan harcın çapı ölçülerek ortalaması alındı ve kıvam değeri bulundu. 7 farklı karışım oranına sahip kükürt bağlayıcı harç numunelerine ait yayılma deneyi sonuçları Tablo 4.4'te verildiği şekilde belirlendi.



Şekil 4.6. Yayılma tablası deneyi

Tablo 4.4. Yayılma tablası deney sonuçları

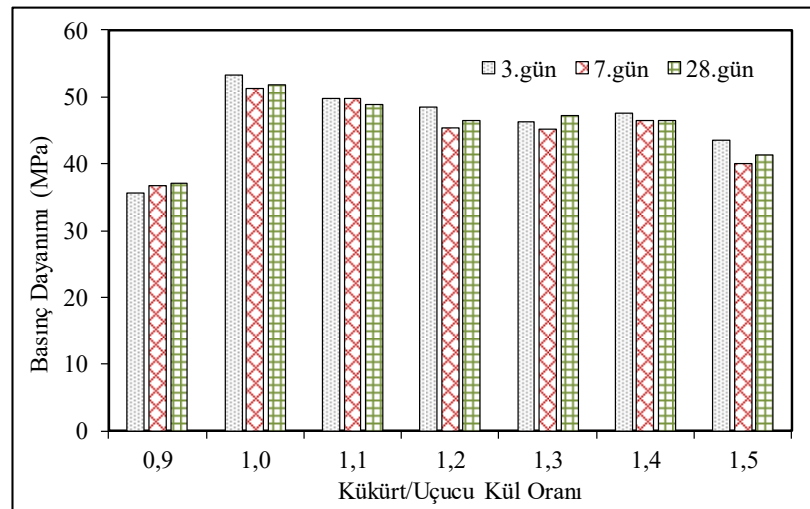
Numune Adı	Yayılma Çapı (mm)
K/UK0,9	233 ± 2
K/UK1,0	254 ± 2
K/UK1,1	256 ± 2
K/UK1,2	257 ± 2
K/UK1,3	261 ± 2
K/UK1,4	275 ± 2
K/UK1,5	283 ± 2

Her grup için 9'ar adet olmak üzere toplam 63 adet 50 mm'lik küp numune dökümü yapıldı. 3. 7. ve 28. günlerde 3'er adet numunenin basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Deneysel sonuçlarının ortalama değerleri basınç dayanımı değeri olarak belirlendi. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.5'te verildiği gibidir.

Tablo 4.5. K/UK oranlarına göre basınç dayanımı deney sonuçları

Numune Adı	Basınç Dayanımı (MPa)		
	3 gün	7 gün	28 gün
K/UK0,9	35,53	36,78	37,11
K/UK1,0	53,24	51,17	51,89
K/UK1,1	49,78	49,84	48,88
K/UK1,2	48,48	45,44	46,54
K/UK1,3	46,33	45,21	47,22
K/UK1,4	47,51	46,48	46,52
K/UK1,5	43,60	39,96	41,30

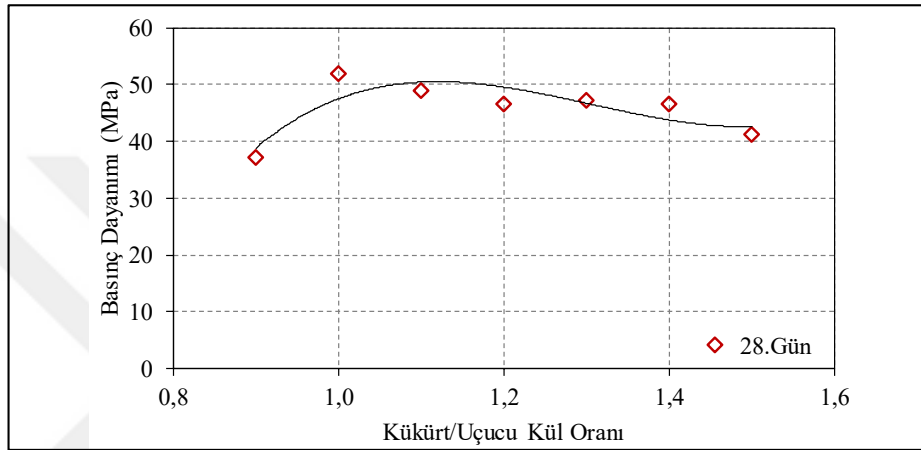
Deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.7 ve 4.8'de grafik haline getirilerek gösterilmektedir. Uçucu kül katkılı kükürt bağlayıcılı harçların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları arasında ciddi bir değişim gözlenmedi. Maksimum basınç dayanımı değeri, kükürt/uçucu kül oranının 1,0 olduğu durumda 28 gün için 51,89 MPa olarak elde edildi. Kükürt/uçucu kül oranının 1,0'ın altına düşmesi durumunda basınç dayanımı değerinin %28 oranında azalma ile 37,11 MPa olduğu belirlendi.



Şekil 4.7. K/UK oranı-basınç dayanımı ilişkisi

Harçların dayanımının, kükürt/uçucu kül oranı 1,0 değerine ulaşana kadar artma eğiliminde ve bu değerden sonra azalma eğiliminde olduğu belirlendi. K/UK oranının 1,0'den büyük seçilmesi durumunda, basınç dayanımı değerinde %3 ile %22 arasında

değişen azalma miktarları belirlendi. Karışımın K/UK oranı 1,0 olduğunda, uçucu kül parçacıkları ince bir kükürt tabakası ile kaplanmaktadır. İnce kükürt tabakası, agrega için iyi bir bağlayıcılık özelliği teşkil etmekte ve basınç dayanımının artmasında önemli bir rol oynamaktadır. Karışımındaki kükürt miktarının artması, karışımda bulunan uçucu kül parçacıklarının etrafındaki kükürt tabakasının kalınlığının artmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak betonun gevrekliği artmakta ve basınç dayanımında azalma gözlenmektedir [19].



Şekil 4.8. K/UK oranının 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi

K/UK oranı, mekanik özellikler üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulduğunda 1,0 olarak bulundu. Harç numunelerinin içerdikleri kükürt miktarı değişiminin, K/UK oranının sabit 1,0 olarak alınması durumunda basınç dayanımı üzerindeki etkisinin belirlenmesi için Tablo 4.6’da verilmiş olan farklı kükürt yüzdesi değerine sahip ek numuneler hazırlandı.

Tablo 4.6. K/UK1,0 için farklı kükürt oranlarındaki numunelerin karışım oranları

Numune Adı	Saf Kükürt (Ağr. %)	Uçucu Kül (Ağr. %)	Kum (Ağr. %)
K30UK30DK40	30,0	30,0	40,0
K35UK35DK30	35,0	35,0	30,0
K40UK40DK20	40,0	40,0	20,0

Numune isimlendirmesinde “K” kükürtü, “UK” uçucu külü ve “DK” doğal kumu temsil etmektedir. Her simgenin yanındaki rakam ise harç içerisindeki katılım oranlarını temsil etmektedir. Kullanılan tüm oranlar ağırlıkça yüzdeler olarak verilmektedir. “K30UK30DK40” numunesi karışımda ağırlıkça kullanılan %30

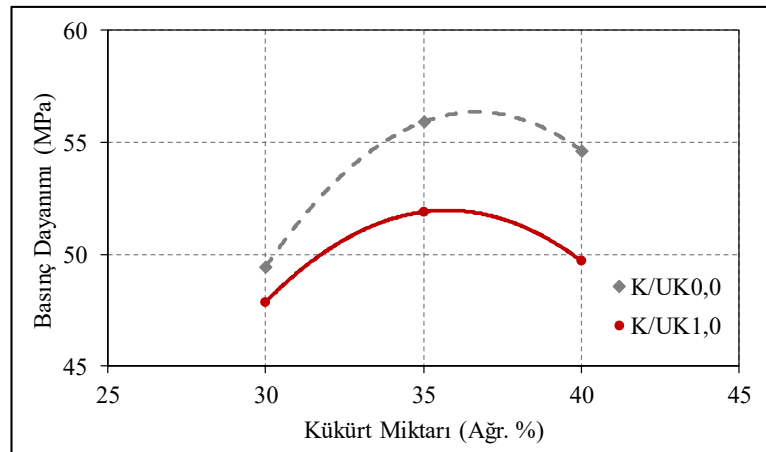
kükürt, %30 uçucu kül ve %40 doğal kum kullanılarak hazırlanan numuneyi temsil etmektedir.

Her grup için 3'er adet olmak üzere toplam 9 adet numune dökümü yapıldı. 28. günde 3'er adet numunenin basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi ve deney sonuçlarının ortalama değerleri basınç dayanımı değeri olarak alındı. Deneylere ait sonuçlar Tablo 4.7'de verildiği gibidir.

Tablo 4.7. K/UK1,0 için farklı kükürt oranlarındaki numunelerin basınç değerleri

Numune Adı	28. Gün Basınç Dayanımı (MPa)
K30UK30DK40 (K/UK1,0)	47,88
K35UK35DK30 (K/UK1,0)	51,89
K40UK40DK20 (K/UK1,0)	49,70

K/UK oranı sabit 1,0 olarak alındığında, kükürt miktarının değişmesinin harçların mekanik özellikleri üzerindeki değişim grafiği Şekil 4.9'da verildiği gibidir. Uçucu kül içermeyen bağlayıcı/agrega (doğal kum) oranına sahip numunelere ait sonuçlarla uçucu kül içeren aynı bağlayıcı/agrega(doğal kum+uçucu kül) oranına sahip numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması amacıyla Şekil 4.9'da verilen grafik, Şekil 4.5'te verilmiş olan değerlerle karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 4.9. Kükürt/Uçucu kül oranı ve bağlayıcı miktarının basınç dayanımı üzerine etkisi

Harçlara uçucu kül ilavesinin basınç dayanımını düşürdüğü belirlendi. Uçucu kül içeren ve içermeyen betonlarda %30, %35 ve %40 kükürt oranı kullanılması durumunda en uygun kükürt/agrega oranının %35 olduğu görüldü. Uçucu kül ilavesinin seçilmiş olan bağlayıcı/agrega oranını değiştirmedeği grafikten belirlendi.

4.2.4. Değerlendirmeler

Çalışmanın bu bölümünde kükürt beton harcı içerisine katılacak olan uçucu külün agrega oranı içerisindeki miktarının belirlenmesi amaçlandı. Bu amaçla %35 bağlayıcı oranı sabit tutularak %65 agrega oranı içerisindeki doğal kum ve uçucu kül oranları belirlendi. Hazırlanan numunelerde bağlayıcı/uçucu kül oranları 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 ve 1,5 olarak alındı ve bu numuneler üzerinde öncelikle yayılma tablası deneyi sonra da 3, 7 ve 28. günlerde basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Kükürt/uçucu kül oranı arttıkça karışıma giren uçucu kül miktarı azalmakta ve bunun sonucu olarak karışımının viskozitesinin azalması ile de yayılma çaplarında artış görüldü. Deneyler sonucunda, ağırlıkça kükürt/uçucu kül oranı 1,0 olarak belirlendi.

4.3. Bağlayıcı İçindeki Modifiye Kükürt Oranının Belirlenmesi

Kükürt beton karışım oranlarının belirlenmesinde ilk olarak Bölüm 4.1’de agrega ve bağlayıcı (saf kükürt) oranları belirlendi. Mekanik özellikler baz alınarak bu oranlar ağırlıkça %35 bağlayıcı ve %65 agrega olarak bulundu. Bölüm 4.2’de ise bağlayıcı oranı %35 olarak sabit tutuldu ve %65 oranında kullanılan agrega içerisindeki doğal kum ve uçucu kül oranları kükürt bağlayıcılı harçların mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak belirlendi. Deneysel çalışma sonucunda ağırlıkça kükürt/uçucu kül oranı 1,0 olarak belirlendi. Karışımda kullanılan kükürt oranı ve uçucu kül oranı bu çalışmalar sonucunda %35 olarak bulunurken karışıma konulması gereken agrega miktarının %30 olduğu belirlendi. Kükürt bağlayıcılı harçların malzeme oranları, kükürt (bağlayıcı): uçucu kül: agrega oranları ağırlıkça 35:35:30 olarak belirlendi.

Bu deneysel çalışma kapsamında ACI 548D-1993 standardında verilmiş olan ikinci yöntemde tanımlanan modifikasyon metodu kullanıldı. Bu yöntem ile hazırlanan modifiye kükürt harçları içerisine konulacak olan modifiye kükürt oranı oldukça büyük önem arz etmektedir. Harç içerisindeki modifiye kükürt oranı betonun işlenebilirliği ve mekanik dayanımı üzerinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır [19, 60].

Deneysel çalışmanın bu bölümünde; kükürt bağlayıcılı harçların içerisindeki uçucu kül ve doğal kum yüzdeleri sabit tutuldu. Karışımda bağlayıcı olarak kullanılan saf kükürt içerisine ikame yöntemine göre değişik oranlarda modifiye edilmiş kükürt (MK)

katıldı. Modifiye kükürt bağlayıcı harçların mekanik özelliklerindeki değişim incelendi. Bağlayıcı olarak kullanılan saf kükürt içerisine konulacak olan modifiye kükürt miktarının belirlenmesi amaçlandı.

4.3.1. Numune özellikleri

Deneysel çalışmanın bu bölümünde uçucu kül %35 ve doğal kum %30 oranında sabit tutularak karışımda ağırlıkça %35 oranında olan toplam bağlayıcı miktarının %0, %3, %5 ve %7 oranlarında modifiye kükürt ile ikame edilerek, MK yüzdesinin belirlenmesi amaçlandı. Karışımdaki MK miktarı harcın işlenebilirliği üzerinde oldukça etkin bir rol oynamaktadır. Yapılan deneme dökümleri sırasında MK oranı %7'den büyük olan karışımlarda, karıştırma ve kalıba yerleştirme zorlukları yaşandı. Karışımın işlenebilirliği ve viskozitesinin belirlenmesi; gözlemler, karışımın karıştırılabilme seviyesi ve kalıba yerleştirilebilmesi temel alınarak yapıldı. Bu nedenle modifiye kükürt yüzdesi bağlayıcı miktarının maksimum %7'si olarak alındı ve referans numunesi olarak sadece saf kükürt ile hazırlanmış olan %0 katkılı numune kullanıldı. Hazırlanan modifiye kükürt bağlayıcı harçlarda kullanılan karışım oranları Tablo 4.8'de verildiği gibidir.

Tablo 4.8. Modifiye kükürt miktarına göre harç numunesi karışım oranları

Numune Adı	Saf Kükürt (Ağr. %)	Modifiye Kükürt (Ağr. %)	Uçucu Kül (Ağr. %)	Kum (Ağr. %)
MKO-0	35,00	0,00	35,00	30,00
MKO-3	33,95	1,05	35,00	30,00
MKO-5	33,25	1,75	35,00	30,00
MKO-7	32,55	2,45	35,00	30,00

Numune isimlendirmesinde “MKO” modifiye kükürt oranını ve sondaki rakam harç içerisinde bağlayıcı olarak kullanılan saf kükürt ile ikame edilen MK'nın ağırlıkça oranını temsil etmektedir.

Kükürt bağlayıcı harçların hazırlanmasında sıcaklık önemli bir etkidir. Kükürtün soğuma sırasında hızlı bir şekilde katılaşma durumunun göz önüne alınması gerektiğinden; harçların karıştırılması, kalıplara doldurulması ve yüzeyinin düzeltilmesinde kullanılan tüm yardımcı ekipmanlar etüvde 130-135°C arasında 2 saat

süreyile ısıtılarak kullanıldı. Kükürt bağlayıcı harç numunesi (MKO-0), Bölüm 4.2.1’de verilmiş olan döküm yöntemine uygun olarak hazırlandı. Bu numunelerde bağlayıcı olarak saf kükürt, filler olarak uçucu kül ve agrega olarak doğal kum kullanıldı. MKO-3, MKO-5 ve MKO-7 (modifiye kükürt bağlayıcı harç numuneleri) numunelerinin hazırlanmasında aşağıda detayları verilen döküm yöntemi kullanıldı. Sıcaklık kontrollü mekanik karıştırıcı 130-135°C arasında sabitlendikten sonra saf kükürt karıştırıcıya konularak mekanik olarak karıştırılıp sıvı faza gelmesi sağlandı. Saf kükürt tamamen eriyip sıvılaştıktan sonra içerisine etüvde bekletilmiş olan uçucu kül ilave edilerek 10 dakika düşük hızda, 10 dakika yüksek hızda olmak üzere toplam 20 dakika karıştırılarak, karışımın homojen hale gelmesi sağlandı. Uçucu kül ve saf kükürt arasındaki reaksiyonların tam olarak sağlandığından ve karışımın homojen hale geldiğinden emin olunduktan sonra bu karışıma belirlenmiş olan oranda modifiye kükürt ilave edildi. Katı halde bulunan modifiye kükürde önceden bir ısıtma veya etüvde bekletme işlemi uygulanmadı. Karışım sıcaklığının 149°C’nin üstüne çıkmamasına özen gösterildi. Bu sıcaklığın üzerinde modifiye kükürt işlenebilirlik seviyesinin üstünde bir viskozite değerine ulaşmakta ve tüm özelliğini kaybetmektedir [12]. Kükürt polimer betonlarda modifiye kükürt, saf kükürtün içerisine doğrudan atılmamaktadır. Saf kükürt sıvı faza getirildikten sonra, öncelikle uçucu kül ile karıştırılmalı ve saf kükürt ile uçucu kül arasındaki reaksiyon tam anlamıyla gerçekleştiğinden emin olunduktan sonra modifiye kükürt karışıma ilave edilmektedir [14, 19, 74]. Parçalanmış ve 4mm’lik elekten elenen MK, harç karışıma ilave edildikten sonra 10 dk süre ile karıştırma işlemine devam edildi. Daha sonra saf kükürt, modifiye kükürt ve uçucu külden oluşan karışımın içerisine etüvde bekletilmiş olan doğal kum ilave edilerek karışımın homojen hale geldiğine emin olana kadar minimum 20 dakika süre ile karıştırılması sağlandı. Hazırlanmış olan harç karışımı etüv içerisinde ısıtılan 50x50x50 mm’lik ve 25x25x285 mm’lik metal kalıplar içerisine dolduruldu. Metal kalıplara yerleştirilen harç karışımı plastik tokmak ve sıcak demir çubuk yardımıyla şişlenerek yerleştirme işlemleri tamamlandı. Tam olarak yerleştirme işlemleri tamamlandıktan sonra tüm numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı.

4.3.2. Yapılan deneyler

Saf kükürt içerisine ikame yöntemine göre konulacak olan MK miktarının belirlenmesi amacıyla, basınç dayanımı deneyleri için toplam 24 adet küp numune ile uzun dönemli

büzülme deneyleri için toplam 24 adet prizma numunesi hazırlandı. MK oranının belirlenmesi için hem basınç hem de uzun dönemli büzülme deneyleri yapıldı.

4.3.3. Deney sonuçları

Hazırlanan numuneler üzerinde MK'nın etkisinin belirlenebilmesi için basınç dayanımı ve uzun dönemli büzülme deneyleri yapıldı. Uzun dönemli büzülme deneyleri, ASTM C-157 ve ASTM C-531 standartları göz önünde bulundurularak, iki farklı ölçüm tekniğine göre gerçekleştirildi [156, 158].

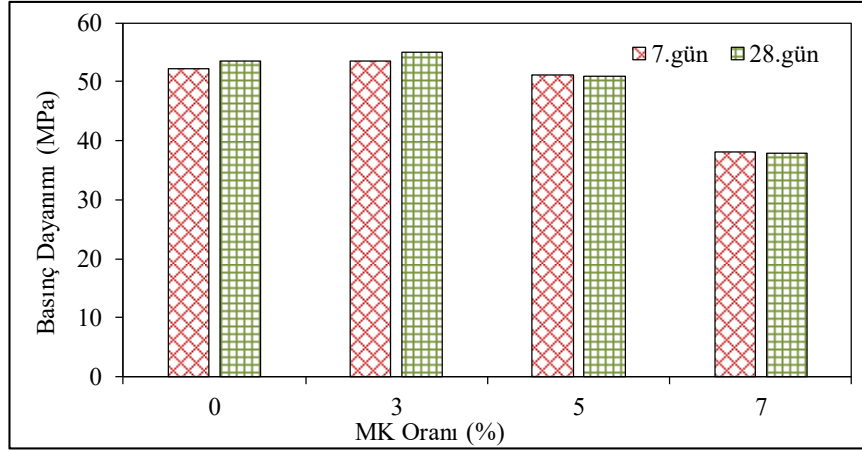
4.3.3.1. Basınç dayanımı deney sonuçları

Deneyisel çalışmada, modifiye kükürt oranına göre 4 farklı grup oluşturuldu ve her bir grup için 6 adet olmak üzere toplam 24 adet basınç numunesi hazırlandı. 7 ve 28. günlerde 3'er adet numunenin basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Deney sonuçlarının ortalama değerleri basınç dayanımı değeri olarak belirlendi. Deneylerden elde edilen bu sonuçlar Tablo 4.9'da verildiği gibidir.

Tablo 4.9. MK oranlarına göre basınç dayanımı deney sonuçları

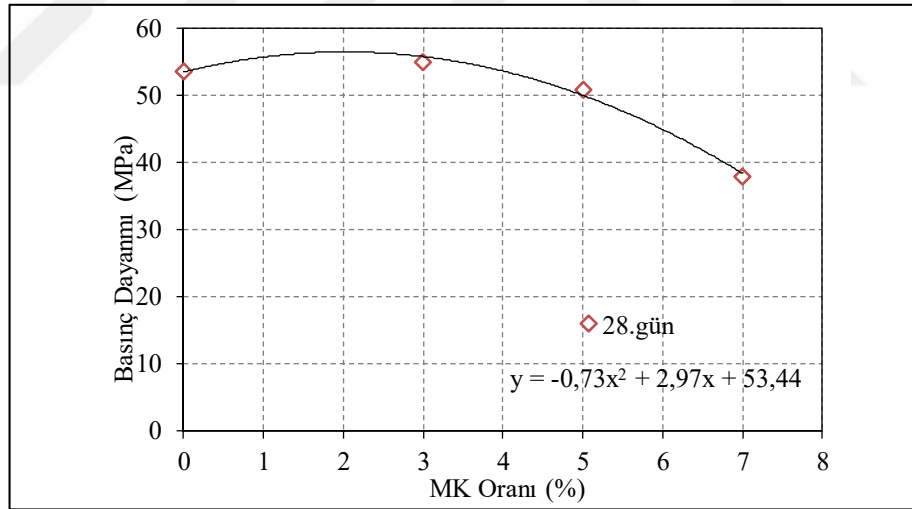
Numune Adı	Basınç Dayanımı (MPa)	
	7 gün	28 gün
MKO-0	52,25	53,62
MKO-3	53,41	54,96
MKO-5	51,16	50,91
MKO-7	38,03	37,98

Kükürt bağlayıcılı harç (MKO-0) ve modifiye kükürt bağlayıcılı harçların (MKO-3, MKO-5 ve MKO-7) 7 ve 28 günlük basınç dayanımları arasında maksimum basınç dayanımı değeri; MK miktarının toplam bağlayıcı miktarı içerisinde %3 olduğu durumda elde edildi. MK oranının %3 olduğu durumda, basınç dayanımları 7 gün sonunda 53,41 MPa ve 28 gün sonunda 54,96 MPa olarak bulundu. Kükürt bağlayıcılı harç ve modifiye kükürt bağlayıcılı harçların 28 günlük basınç dayanımlarında 7 günlük basınç dayanımlarına göre önemli ölçüde bir değişim meydana gelmediği belirlendi. Deneylerden elde edilen sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.10'da verildiği gibidir.



Şekil 4.10. MK oranı-basınç dayanımı ilişkisi

Kükürt bağlayıcılı harç içerisinde %3 oranında MK ilave edilmesi durumunda basınç dayanımında düşüş gözlenmedi. Ancak daha büyük miktarlarda (%5 ve fazlası) MK ilavesinin kükürt bağlayıcılı harçların basınç dayanımlarının azalmasına neden olduğu görüldü. MK ilavesinin basınç dayanımı değişimi üzerine etkisi Şekil 4.11’de grafik haline getirilerek, en uygun MK oranının belirlenmesi amaçlandı.



Şekil 4.11. MK oranının 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Kükürt bağlayıcılı harçlara modifiye kükürt ilave edilmesi, kükürtün kristalizasyonunu kısmi olarak engellemesi nedeniyle basınç dayanımında azalmaya neden olmaktadır. Küçük katılım oranlarının basınç dayanımına çok fazla etkisi olmaz iken; bu oranın %5’i geçmesi durumunda, basınç dayanımında hızlı düşümlere neden olduğu belirlendi. Vroom tarafından 1981 ve Mohamed tarafından 2006 ve 2007 yıllarında yapılan deneysel çalışmalarda da aynı sonuçlar ortaya çıkarılmıştır [14, 19, 58]. Saf kükürt ile

yapılan kükürt betonlar daha yüksek akışkanlığa sahipken; karışıma MK ilavesi, viskoziteyi arttırarak karışımın akışkanlık düzeyini oldukça düşürmektedir. Viskozitesi yüksek olan bir karışım içerisinde kristallerin büyümesi hem zor hem de oldukça yavaştır ve bunun sonucu olarak basınç dayanımında azalmalar meydana gelmektedir [74].

4.3.3.2. Uzun dönemli büzülme deney sonuçları

Saf kükürt soğumaya bırakıldığında, sıvı durumdaki kükürt ilk olarak %7 hacim azalması göstererek S_{β} kristali formunu almaktadır. Soğuma devam ederken S_{β} kristalleri S_{α} kristalleri formuna dönüşmektedir. Kükürt bağlayıcı harçlarda soğuma sırasında kristal yapıdaki ani değişiklikler nedeniyle büzülme meydana gelmektedir. Büzülmeden dolayı oluşan iç gerilmeler, bağlayıcı içerisinde ciddi çatlakların oluşmasına neden olmaktadır [3, 6, 190-196]. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, farklı MK oranlarına sahip numunelerde meydana gelen uzun dönemli büzülme ölçümlerinin belirlenmesinin, modifiye kükürt miktarının belirlenmesinde önemli bir ölçüt haline geldiği görülmektedir. Deneysel çalışmanın bu bölümünde MK ilavesinin, harçların uzun dönemli büzülme miktarı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlandı. Uzun dönemli büzülme ölçümlerinde ASTM C-157 ve ASTM C-531 standartlarında anlatılan iki farklı ölçüm yöntemi esas alınarak deneysel çalışma gerçekleştirildi.

4.3.3.2.1. ASTM C-157 deneyi sonuçları

Birinci ölçüm yöntemi olarak ASTM C-157’de ve TS 3322’de anlatılmış olan deney yöntemi kullanıldı. Bu yöntemde numunenin uzun eksenini boyunca meydana gelen rölatif boy değişimlerinin okunması amaçlandı. Bölüm 4.3.1’de anlatılan döküm yöntemine göre hazırlanan kükürt bağlayıcı harçlar ve modifiye kükürt bağlayıcı harç numuneleri içerisinde uzama okumalarının alınması için metal uç pimlerin bulunduğu 25x25x285 mm’lik kalıplara yerleştirildi. Numuneler, 130-135°C arasındaki etüvde 2 saat süre ile bekletilmiş olan kalıplara doldurularak sıkıştırma işlemleri gerçekleştirildikten sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Bu ölçüm yönteminde 3 saat süre ile kalıp içerisinde bekletilen numuneler, bu saat sonunda kalıptan alınarak Şekil 4.12’de gösterilen deney düzeneği kullanılarak ilk boy okumaları gerçekleştirildi. Bu deney düzeneği; düşey pozisyonda bulunan 0,001 mm

hassasiyetli dijital bir komparatör, referans çubuğu ve metal bir çerçeveden oluşmaktadır. Ölçümler alınmadan önce uçlarında metal uç pimlerinin bulunduğu net uzunluğunun 295 mm (± 3 mm) olan metal referans çubuğu kullanıldı. Bu çubuk, referans noktası belirlenirken el sıcaklığından etkilenmesinin önlenmesi amacıyla kauçuk bir tutacak ile kaplandı. Her okumadan önce referans çubuğu kullanılarak dijital komparatör sıfırlanarak numunenin lineer boy değişim miktarı okumaları alındı.



Şekil 4.12. Uzun dönemli büzülme okuması (ASTM C-157)

Her bir harç grubu için 3 adet büzülme numunesi hazırlandı ve bu numunelerin ortalama boy değişim miktarları belirlendi. Boy değişim miktarları Denklem (4.1) kullanılarak belirlendi.

$$\Delta L_x = \left[\frac{\text{KOAF} - \text{ilk KOAF}}{G} \right] 100 \quad (4.1)$$

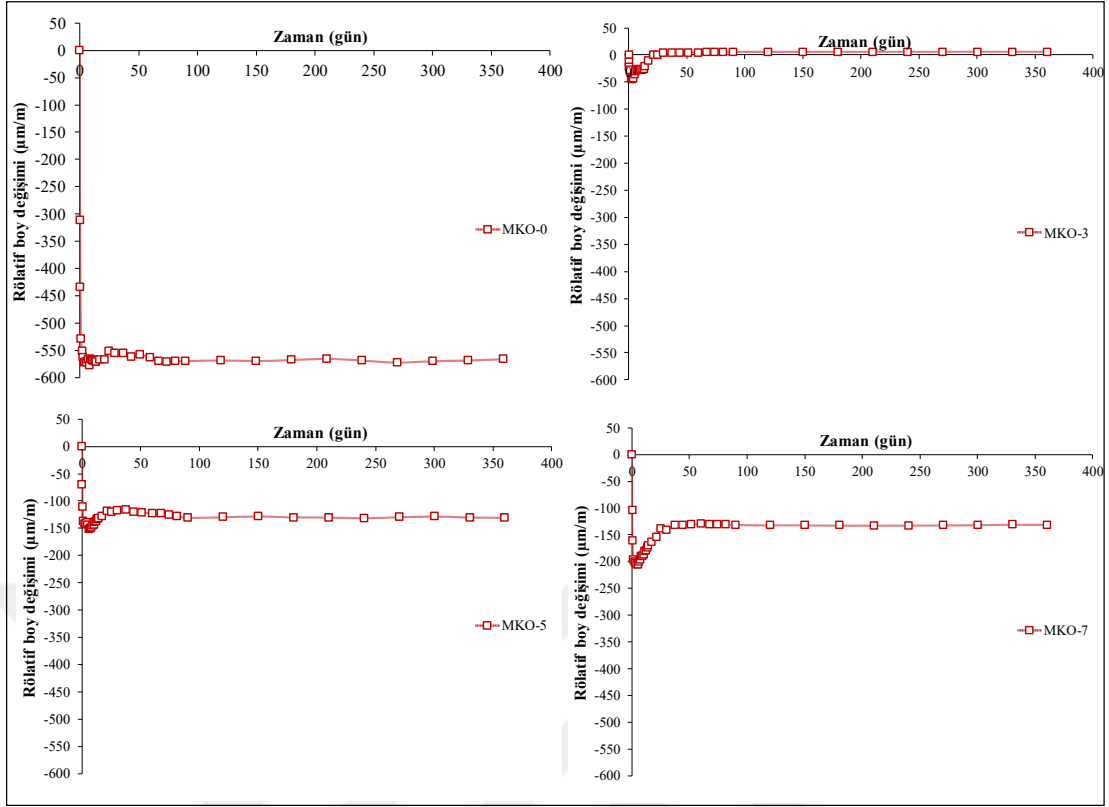
Burada; ΔL_x herhangi bir yaştaki deney numunelerinin rölatif boy değişimi (%), KOAF herhangi bir yaştaki deney numunesi ile referans çubuktaki komparatör okuma farkı ve G ölçüm boyu (285 mm) dir. Tüm numunelere ait ortalama boy değişim miktarları kullanılarak hesaplanan ΔL_x değerleri Tablo 4.10’da özetlendiği gibidir. İlk okumalar 3 saatlik kalıp süresi sonunda kalıptan çıkarılan numuneler üzerinde yapıldı. 3, 12 ve 24 saatlik birinci gün okumaları alındıktan sonra 2 hafta süre ile her 24 saatte bir boy değişim okumaları alındı. İlk üç ay süresince haftada bir kez olmak suretiyle

ayda 4 okuma alındı. Bu süreçten sonra ayda bir olmak suretiyle 1 yıllık uzun dönemli büzülme okumaları gerçekleştirildi.

Tablo 4.10. Rölatif boy değişim değerleri (ASTM C-157)

Zaman (gün)	Rölatif boy değişim miktarı (µm/m)			
	MKO-0	MKO-3	MKO-5	MKO-7
0 saat	0,000	0,000	0,000	0,000
1				
3 saat	-311,047	-13,568	-69,125	-103,475
12 saat	-433,018	-22,456	-110,278	-160,426
24 saat	-528,070	-28,070	-136,483	-196,491
2	-550,877	-43,860	-142,105	-200,877
3	-563,158	-44,260	-140,456	-203,070
4	-571,930	-43,860	-139,482	-205,263
5	-570,786	-35,481	-143,982	-205,263
6	-571,930	-30,461	-150,877	-200,877
7	-566,667	-27,807	-149,911	-196,491
8	-577,105	-27,003	-149,123	-190,003
9	-561,912	-28,070	-145,491	-189,719
10	-566,672	-27,227	-143,860	-187,702
11	-568,421	-27,070	-138,762	-180,051
12	-569,281	-27,057	-136,863	-178,947
13	-570,175	-26,316	-132,701	-174,561
14	-570,175	-21,053	-131,579	-170,175
17	-566,667	-10,526	-128,316	-163,158
21	-566,193	0,000	-118,772	-154,386
25	-550,877	0,000	-126,491	-138,597
30	-554,386	3,509	-108,772	-145,614
37	-554,386	3,509	-115,789	-131,579
44	-561,404	3,509	-120,281	-131,484
51	-557,895	4,386	-121,674	-130,847
60	-563,458	4,522	-122,375	-129,231
67	-569,244	4,961	-123,152	-130,526
74	-570,965	5,236	-124,737	-130,255
81	-570,007	5,288	-127,481	-131,007
90	-569,298	5,327	-130,614	-131,404
120	-568,112	5,241	-129,715	-132,108
150	-569,093	5,307	-128,158	-131,846
180	-567,447	5,311	-129,953	-132,307
210	-565,447	5,402	-130,222	-133,102
240	-568,372	5,399	-131,418	-132,563
270	-571,995	5,411	-129,561	-132,007
300	-569,534	5,429	-128,296	-131,748
330	-568,296	5,388	-129,993	-130,951
360	-565,822	5,402	-130,744	-131,263

Saf kükürt ve modifiye edilmiş kükürt kullanılarak hazırlanan tüm harçlara ait rölatif boy değişimi-zaman grafiği Şekil 4.13'te verildiği gibidir.

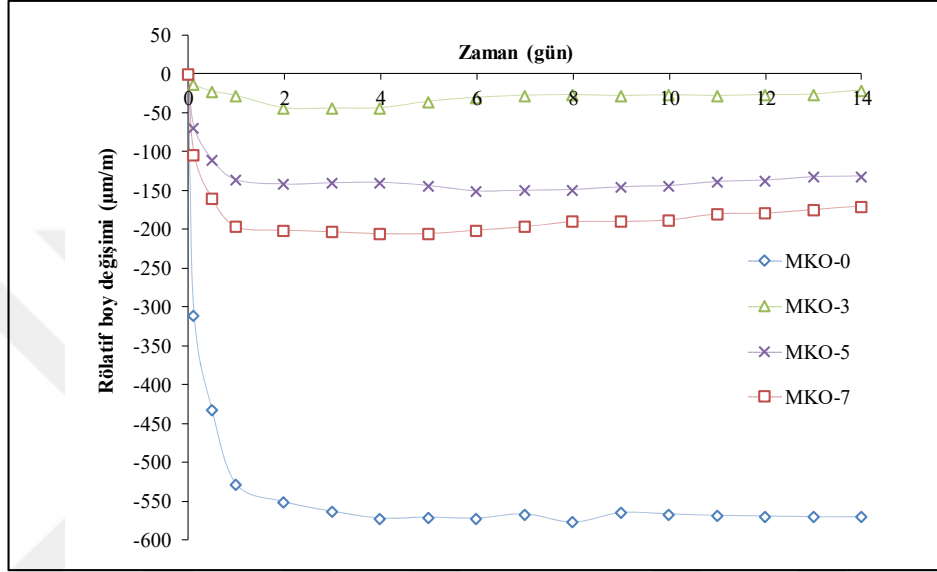


Şekil 4.13. MK numuneleri rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-157)

Bağlayıcı olarak sadece saf kükürt kullanılarak hazırlanan numunelere ait 360 günlük okuma miktarları göz önünde bulundurulduğunda; MKO-0 numunelerinde uzun dönemli rölatif boy değişim miktarı ortalama $-566 \mu\text{m/m}$ olarak, maksimum rölatif boy değişim miktarı ise $-577,105 \mu\text{m/m}$ olarak bulundu. Bu numunelerin ilk 24 saat içerisinde toplam rölatif boy değişim miktarının %93'üne ulaştığı belirlendi. Kükürt kristal yapısındaki S_{β} - S_{α} faz dönüşümleri yaklaşık olarak bir günden daha kısa süre içinde gerçekleşmektedir [87]. Bu nedenle saf kükürde ait rölatif boy değişiminin büyük bir kısmı, bu sürede sıcaklığın hızla azalması da göz önünde bulundurulduğunda, ilk 24 saat içerisinde gözlemlendi. MKO-3 numunelerinde ilk 4 günlük rölatif boy değişim ortalaması $-40 \mu\text{m/m}$, maksimum rölatif boy değişim miktarı ise $-44,260 \mu\text{m/m}$ olarak bulundu. İlk 4 günlük okumalarda, numunelerde büzülme meydana geldiği ve bu süreden itibaren numunelerde genleşmenin meydana geldiği gözlenmeye başlandı. Numunelerin rölatif boy değişimleri 21 günlük süreden itibaren ortalama $4 \mu\text{m/m}$ olarak bulundu. MKO-5 numunelerinde rölatif boy değişim miktarı ortalama $-139 \mu\text{m/m}$ olarak, maksimum rölatif boy değişim miktarı ise $-150,877 \mu\text{m/m}$ olarak bulundu. Bu numunelerin ilk 24 saat içerisinde toplam rölatif boy değişim miktarının %98'ine ulaştığı belirlendi. MKO-7 numunelerinde rölatif boy

değişim miktarı ortalama $-130 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak, maksimum rölatif boy değişim miktarı ise $-205,263 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak bulundu. Bu numunelerin ilk 24 saat içerisinde toplam rölatif boy değişim miktarının %99'una ulaştığı belirlendi.

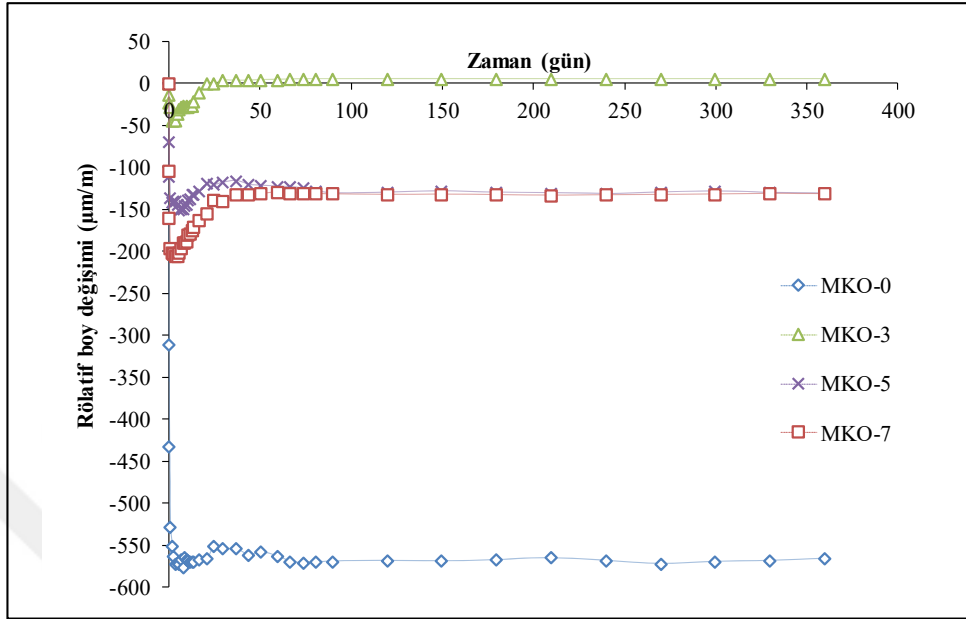
Tüm numunelere ait ilk 14 günlük ortalama boy değişimi-zaman grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 4.14'te aynı grafik üzerinde verilmektedir.



Şekil 4.14. 14 günlük rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-157)

Saf kükürt kullanılarak hazırlanan MKO-0, sırasıyla %3, %5 ve %7 oranlarında modifiye kükürt katılarak hazırlanan MKO-3, MKO-5 ve MKO-7 numunelerinin tamamında büzülme davranışı gözlemlendi. Numuneler üzerinde 14 günün sonunda alınan okumalar MKO-0, MKO-3, MKO-5 ve MKO-7 numuneleri için sırasıyla $-570,175$, $-21,053$, $-131,579$ ve $-170,175 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak bulundu. İlk 14 günlük okuma değerleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, MKO-0 numunesinin rölatif boy değişim miktarı ortalama $-566 \mu\text{m}/\text{m}$ iken; saf kükürt içerisine %3 oranında modifiye kükürt katılması (MKO-3) durumunda, bu değer %95 oranında azalarak ortalama $-31 \mu\text{m}/\text{m}$ seviyelerine kadar azaldığı belirlendi. Bağlayıcı içerisine %5 oranında modifiye kükürt katılması (MKO-5) durumunda MKO-0 numunesine ait ortalama rölatif boy değişim miktarı %75 oranında azalarak ortalama $-142 \mu\text{m}/\text{m}$ seviyelerine kadar azaldığı belirlenmiştir. Bağlayıcı içerisine %7 oranında modifiye kükürt katılması (MKO-7) durumunda, MKO-0 numunesine ait ortalama rölatif boy değişim miktarı %66 oranında azalarak ortalama $-191 \mu\text{m}/\text{m}$ seviyelerine kadar azaldığı belirlenmiştir.

Tüm numunelere ait uzun dönemli (360 günlük) ortalama boy değişimi–zaman grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 4.15’te aynı grafik üzerinde verilmektedir.



Şekil 4.15. 360 günlük rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-157)

360 günlük okuma değerleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde; MKO-0 numunesinin ortalama rölatif boy değişim miktarı $-566 \mu\text{m/m}$ seviyesinde sabit olarak kalırken, saf kükürt içerisinde %3 oranında MK katılması durumunda bu değer %99 oranında azalarak ortalama $3 \mu\text{m/m}$ seviyelerine kadar geldiği belirlendi. Saf kükürt içerisinde %3 oranında MK ilave edildiğinde numunelerde uzun dönemli büzülme miktarının çok küçük mertebelerde sınırlandırıldığı belirlendi. %5 ve %7 oranında modifiye kükürt kullanılarak hazırlanan numunelerin uzun dönemli rölatif büzülme miktarlarının birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görüldü. MKO-5 numunesine ait ortalama rölatif boy değişimi miktarı MKO-0 numunesine göre ilk 14 günde %75 oranında azalmışken, uzun dönemli değerler incelendiğinde bu oran %80 değerine kadar arttığı belirlendi. MKO-7 numunesine ait ortalama rölatif boy değişimi miktarı MKO-0 numunesine göre ilk 14 günde %66 oranında azalmışken uzun dönemli değerler incelendiğinde bu oran %75 değerine kadar arttığı belirlendi.

4.3.3.2.2. ASTM C-531 deneyi sonuçları

İkinci ölçüm yöntemi olarak ASTM C-351 standardında anlatılmış olan deney yöntemi kullanıldı. Bu yöntemde numunenin yatay eksen boyunca perdah yüzeyinde meydana

gelen rölatif boy değişimlerinin okunması amaçlandı. Bölüm 4.3.1’de anlatılan döküm yöntemine göre hazırlanan kükürt bağlayıcı ve modifiye kükürt bağlayıcı harçlar 25x25x285 mm’lik kalıplara yerleştirildi. Numuneler 130-135°C arasındaki etüvde 2 saat süre ile bekletilmiş olan kalıplara doldurularak sıkıştırma işlemleri gerçekleştirildikten sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Bu ölçüm yönteminde 3 saat süre ile kalıp içerisinde bekletilen numuneler bu sürenin sonunda kalıptan alındı ve büzülme okumalarının alınması için yüzey metal pimleri numunenin perdah yüzeyine sabitlendi. Numuneler kalıptan alındıktan sonra perdah yüzeyinde herhangi bir pürüzlülüğün olmaması için pimlerin sabitleneceği bölge belirlenerek metal törpü yardımıyla düzeltildi. Pimler özel bir yapıştırıcı kullanılarak, perdah yüzeyine ölçü boyu 200 mm olacak şekilde ölçülerek sabitlendi. Bu ölçüm yönteminde 4 saat süre ile kalıp içerisinde bekletilen numuneler kalıptan alınıp yüzey metal pimleri sabitlendikten sonra 20 dakika süre ile özel yapıştırıcının kurumması beklenildi ve daha sonra Şekil 4.16’da gösterilen deney düzeneği kullanılarak ilk boy okumaları gerçekleştirildi.



Şekil 4.16. Uzun dönemli büzülme okuması (ASTM C-531)

Bu deney düzeneğinde sökülebilir mekanik deformasyon ölçer (Demountable mechanical strain gauge-DEMEC) kullanıldı. DEMEC ölçüm aleti, 0,001 mm hassasiyete sahip dijital komparatör ve bu komparatörün bağlı olduğu 200 mm açıklıklı iki adet sivri ölçüm uçlarına sahip bir çerçeveden oluşmaktadır. Her bir döküm grubu için 3 adet büzülme numunesi hazırlandı ve bu numunelerin ortalama boy değişim miktarları belirlendi. Boy değişim miktarları Denklem (4.2) kullanılarak belirlendi.

$$\Delta L_x = \left[\frac{L_0 - L}{L_0} \right] 100 \quad (4.2)$$

Burada ΔL_x herhangi bir yaştaki deney numunelerinin rölatif boy değişimi (%), L_0 gerçek boy (pimler arası mesafe) ve L herhangi bir yaştaki deney numunesine ait komparatör okumasıdır. Tüm numunelere ait ortalama boy değişim miktarları kullanılarak hesaplanan ΔL_x değerleri Tablo 4.11’de özetlendiği gibidir. İlk okumalar 3 saatlik kalıp süresi sonunda kalıptan çıkarılan numuneler üzerinde yapıldı. 3, 12 ve 24 saatlik birinci gün okumaları alındıktan sonra 2 hafta süre ile her 24 saatte bir boy değişim okumaları alındı. İlk üç ay süresince haftada bir kez olmak suretiyle ayda 4 okuma alındı. Bu süreçten sonra ayda bir olmak suretiyle okuma alınarak 1yıllık uzun dönemli büzülme okumaları gerçekleştirildi.

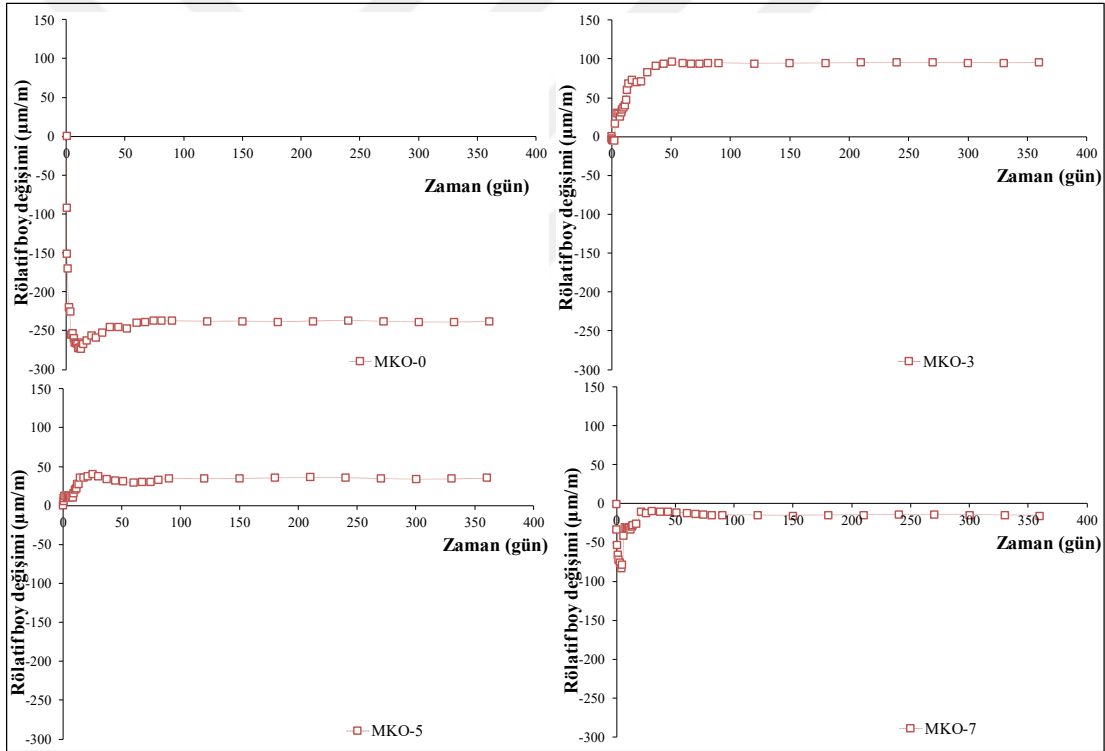
Tablo 4.11. Rölatif boy değişim değerleri (ASTM C-531)

Zaman (gün)	Rölatif boy değişim miktarı ($\mu\text{m}/\text{m}$)			
	MKO-0	MKO-3	MKO-5	MKO-7
0 saat	0,000	0,000	0,000	0,000
1 3 saat	-92,263	-2,666	5,932	-32,785
12 saat	-151,245	-4,673	9,127	-52,462
24 saat	-170,085	-5,025	11,584	-65,158
2	-220,110	-5,099	12,531	-72,004
3	-225,113	16,613	10,871	-75,377
4	-255,133	30,151	11,268	-82,915
5	-253,877	30,151	11,007	-78,354
6	-249,621	29,467	10,025	-40,967
7	-265,133	25,126	11,416	-30,151
8	-266,384	30,710	10,000	-30,861
9	-267,634	34,505	16,011	-30,174
10	-282,644	37,474	20,038	-29,958
11	-291,654	40,201	22,012	-30,523
12	-273,394	47,609	27,491	-32,663
13	-265,133	60,302	27,222	-29,473
14	-267,624	67,915	35,088	-26,866
17	-262,646	72,864	35,076	-25,126
21	-256,626	69,648	37,594	-10,050
25	-259,133	70,839	39,607	-11,588
30	-252,626	82,915	37,594	-9,402
37	-215,108	90,452	33,351	-10,050-
44	-215,108	93,417	31,569	-10,071
51	-247,609	96,181	31,071	-11,189
60	-240,241	94,277	29,143	-12,004
67	-238,826	93,816	30,446	-12,563
74	-237,614	93,618	30,075	-13,552
81	-237,618	93,997	32,716	-14,786
90	-237,629	94,623	35,037	-14,663

Tablo 4.11. (Devam) Rölatif boy değişim değerleri (ASTM C-531)

Zaman (gün)	Rölatif boy değişim miktarı ($\mu\text{m}/\text{m}$)			
	MKO-0	MKO-3	MKO-5	MKO-7
120	-238,103	93,945	34,482	-14,891
150	-238,009	94,001	34,991	-15,109
180	-238,751	94,658	35,466	-14,946
210	-237,842	94,921	36,045	-14,455
240	-237,225	95,089	35,844	-14,022
270	-238,187	95,196	34,521	-13,941
300	-239,004	94,840	34,088	-14,287
330	-239,191	94,588	34,174	-14,813
360	-238,432	95,089	35,075	-15,093

Saf kükürt ve modifiye edilmiş kükürt kullanılarak hazırlanan tüm harçlara ait rölatif boy değişimi-zaman grafiği Şekil 4.17’de verildiği gibidir.



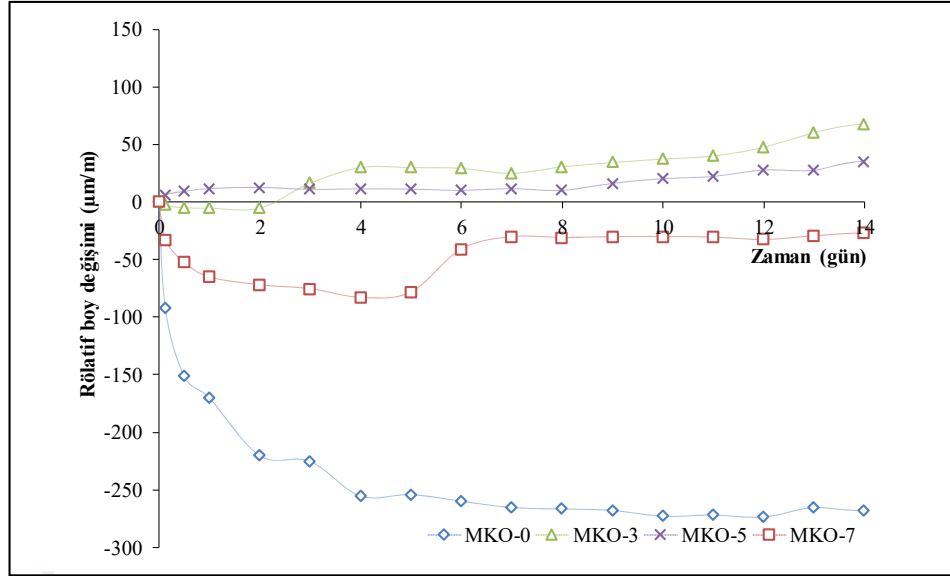
Şekil 4.17. MK numuneleri rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-531)

Bağlayıcı olarak sadece saf kükürt kullanılarak hazırlanan numunelere ait 360 günlük okuma miktarları göz önünde bulundurulduğunda, MKO-0 numunelerinde rölatif boy değişim miktarı ortalama $-250 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak, maksimum rölatif boy değişim miktarı ise $-291,654 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak bulundu. Bu numunelerin ilk 24 saat içerisinde toplam rölatif boy değişim miktarının %67'sine ulaştığı belirlendi. Kükürtün kristal yapısındaki S_{β} - S_{α} faz dönüşümleri yaklaşık olarak bir günden daha kısa süre içinde

gerçekleşmektedir [87]. Bu nedenle saf kükürde ait rölatif boy değişiminin büyük bir kısmı, bu sürede sıcaklığın hızla azalması da göz önünde bulundurulduğunda, ilk 24 saat içerisinde gözlemlendi. MKO-3 numunelerinde ilk 2 günlük okuma miktarları göz önünde bulundurulduğunda ortalama $-4 \mu\text{m}/\text{m}$ 'lik küçük bir büzülme meydana geldiği görüldü. İlk 30 gün boyunca MKO-3 numunelerinde genleşme gözlemlendi. Bu numunelerde 30 günden sonra alınan uzun dönemli okuma ortalaması $90 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak belirlenirken, maksimum genleşme değeri $96,181 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak okundu. MKO-5 numunelerinde büzülme meydana gelmediği ve genleşme durumunun olduğu görüldü. İlk 44 gün boyunca MKO-5 numunelerinde genleşme gözlemlendi. Bu numunelerde 44 günden sonra alınan uzun dönemli okuma ortalaması $34 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak belirlenirken, maksimum genleşme değeri $39,607 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak okundu. MKO-7 numunelerinde ilk 5 günlük okuma miktarları göz önünde bulundurulduğunda ortalama $-79 \mu\text{m}/\text{m}$ 'lik büzülme meydana geldiği görüldü. Maksimum büzülme değeri $-82,915 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak bulundu. Bu değer azalarak uzun dönem sonunda $-13 \mu\text{m}/\text{m}$ 'lik genleşme değerine ulaştığı görüldü.

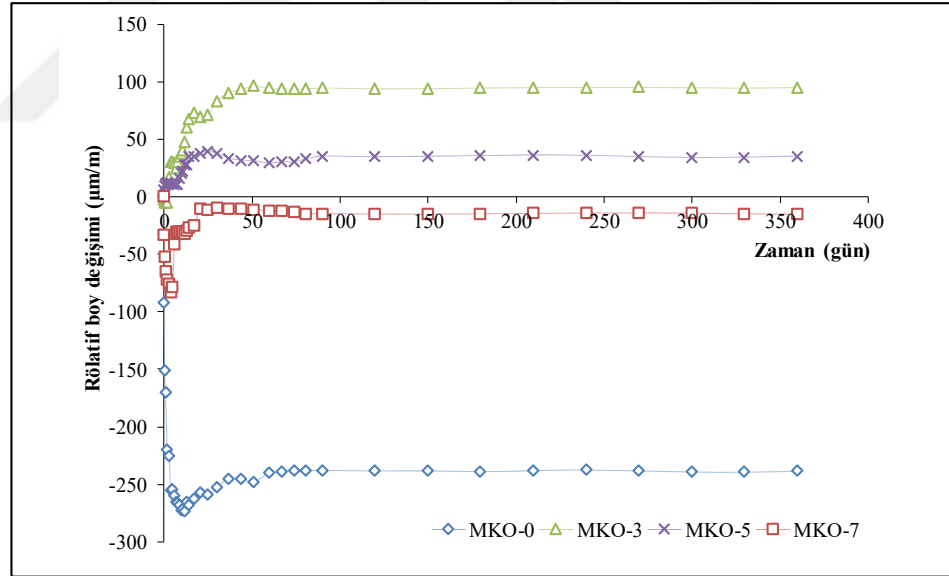
Tüm numunelere ait ilk 14 günlük ortalama boy değişimi–zaman grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 4.18'de aynı grafik üzerinde verildiği gibidir. MKO-0 numunesi ile MKO-7 numunelerinde büzülme, MKO-3 ve MKO-5 numunelerinde ise genleşme davranışı gözlemlendi.

Numuneler üzerinde 14 günün sonunda alınan okumalar MKO-0, MKO-3, MKO-5 ve MKO-7 numuneleri için sırasıyla $-267,624$, $67,915$, $35,088$ ve $-26,866 \mu\text{m}/\text{m}$ olarak bulundu. İlk 14 günlük okuma değerleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde; MKO-0 numunesinin rölatif boy değişim miktarı ortalama $-255 \mu\text{m}/\text{m}$ iken, saf kükürt içerisine %3 oranında modifiye kükürt katılması (MKO-3) durumunda bu değer %115 oranında azalarak ortalama $38 \mu\text{m}/\text{m}$ seviyelerine kadar azaldığı belirlendi. Bağlayıcı içerisine %5 oranında modifiye kükürt katılması (MKO-5) durumunda MKO-0 numunesine ait ortalama rölatif boy değişim miktarının %107 oranında azalarak ortalama $17 \mu\text{m}/\text{m}$ seviyelerine kadar geldiği belirlendi. Bağlayıcı içerisine %7 oranında modifiye kükürt katılması (MKO-7) durumunda MKO-0 numunesine ait ortalama rölatif boy değişim miktarının %82 oranında azalarak ortalama $-47 \mu\text{m}/\text{m}$ seviyelerine kadar geldiği belirlendi.



Şekil 4.18. 14 günlük rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-531)

Tüm numunelere ait uzun dönemli 360 günlük ortalama boy değişimi – zaman grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 4.19’da aynı grafik üzerinde verildiği gibidir.



Şekil 4.19. 360 günlük rölatif boy değişimi-zaman grafiği (ASTM C-531)

360 günlük okuma değerleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, MKO-0 numunesinin ortalama rölatif boy değişim miktarı $-250 \mu\text{m/m}$ seviyesinde sabit olarak kalırken, saf kükürt içerisine %3 oranında MK katılması durumunda bu değer %129 oranında azalarak ortalama $74 \mu\text{m/m}$ seviyelerine kadar azaldığı belirlendi. MKO-5 numunesine ait ortalama rölatif boy değişimi miktarı MKO-0 numunesine göre ilk 14 günde %107 oranında azalırken, uzun dönemli değerler incelendiğinde bu oran

%113 değerine kadar arttığı belirlendi. MKO-7 numunesine ait ortalama rölatif boy değişimi miktarı MKO-0 numunesine göre ilk 14 günde %82 oranında azalmışken uzun dönemli değerler incelendiğinde bu oranın %94 değerine kadar arttığı belirlendi.

4.3.4. Değerlendirmeler

Çalışmanın bu bölümünde kükürt bağlayıcılı harçlar içerisinde konulacak olan uçucu kül ve doğal kum yüzdeleri sabit tutulup, karışımda bağlayıcı olarak kullanılan saf kükürt içerisinde yer değiştirme yöntemine göre değişik oranlarda MK katılarak, modifiye kükürt bağlayıcılı harçların mekanik ve şekil değiştirme özelliklerindeki değişim incelendi. Bağlayıcı olarak kullanılan saf kükürt içerisinde konulacak MK miktarının belirlenmesi amaçlandı. Her iki beton türü ile hazırlanan numuneler üzerinde modifiye kükürtün etkisinin belirlenebilmesi için hem basınç dayanımı deneyleri hem de iki farklı ölçüm yöntemi kullanılarak uzun dönemli büzülme deneyleri gerçekleştirildi. Uzun dönemli büzülme ölçümlerinde ASTM C-157 ve ASTM C-531 standartlarında anlatılan iki farklı ölçüm yöntemi esas alınarak deneysel çalışma gerçekleştirildi. Deneysel çalışmada uçucu kül %35 ve doğal kum %30 oranında sabit tutularak karışımda ağırlıkça %35 oranında olan toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %0, %3, %5 ve %7 oranlarında modifiye kükürt ile yer değiştirilerek hazırlanan harç numuneleri üzerinde 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Basınç dayanımı değerleri göz önüne alındığında en uygun modifiye kükürt oranı ağırlıkça %3 olarak belirlendi. Uzun dönemli büzülme ölçümlerinde ASTM C-157 ve ASTM C-531 standartlarında anlatılan iki farklı ölçüm yöntemi esas alınarak iki farklı deney çalışması gerçekleştirildi. Her iki ölçüm yönteminden sayısal olarak farklı büzülme değerlerine ait sonuçlar elde edilse de davranış olarak birbirlerine paralel sonuçlar vermektedir [198]. Her iki ölçüm yönteminde de saf kükürt kullanılarak hazırlanan kükürt bağlayıcılı harç numunelerinde soğuma sırasında meydana gelen büyük değerlerdeki büzülme miktarlarının MK kullanımıyla sınırlandırıldığı gözlemlenmektedir. Sırasıyla %3, %5 ve %7 oranlarında MK kullanımı büzülme miktarlarını azaltmaktadır. Her iki ölçüm yöntemine göre yapılan uzun dönemli büzülme deneyi sonuçları göz önüne alındığında, MK oranı %3 olarak belirlendi. Karışım içerisinde ilave edilen MK miktarının, modifiye kükürt bağlayıcılı harçların işlenebilirliği üzerinde oldukça etkin bir rol oynadığı bilinmektedir. Modifiye kükürt bağlayıcıların sadece saf kükürtten

oluşan bağlayıcılara göre viskozitesi daha yüksektir [53]. Bu nedenle karışıma ilave edilen MK miktarı arttıkça karışımın işlenebilirliği ve kıvamında azalma meydana geldiği gözlemlendi. Karışıma %0, %3, %5 ve %7 oranlarında modifiye kükürt ilavesinin işlenebilirlik üzerine etkisinin görülebilmesi amacıyla bu karışım oranlarına sahip kükürt bağlayıcılı harç ve modifiye kükürt bağlayıcılı harç yüzeyleri Şekil 4.20, 4.21, 4.22 ve 4.23'te sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 4.20. MKO-0 numune yüzeyi



Şekil 4.21. MKO-3 numune yüzeyi



Şekil 4.22. MKO-5 numune yüzeyi



Şekil 4.23. MKO-7 numune yüzeyi

Bu numunelere ait yüzeyler göz önünde bulundurulduğunda en önemli yerleştirme problemlerinin MK oranı %7 olan numunede olduğu görüldü. Bu orandan daha yüksek karışımlarda, karıştırma ve kalıba yerleştirmede ciddi problemler yaşanması nedeniyle bu karışım oranlarına sahip numune dökümleri gerçekleştirilemedi.

Yapılan deneylere ait sonuçlar ve yerleştirme özellikleri göz önünde bulundurulduğunda bu çalışma kapsamında, MK oranı ağırlıkça %3 olarak belirlendi.

4.4. İnce ve İri Agrega Oranlarının Belirlenmesi

Kükürt beton karışım oranlarının belirlenmesinde ilk olarak Bölüm 4.1’de agrega ve bağlayıcı (saf kükürt) oranları belirlendi. Mekanik özellikler baz alınarak bu oranlar ağırlıkça %35 bağlayıcı ve %65 agrega olarak bulundu. Bölüm 4.2’de bağlayıcı oranı %35 olarak sabit tutulup, %65 oranında kullanılan agrega içerisindeki doğal kum ve uçucu kül oranları kükürt beton harçlarının mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak belirlendi. Bölüm 4.3’te harç basınç dayanımı değeri göz önüne alınarak ağırlıkça kükürt/uçucu kül oranı 1,0 olarak bulundu. Karışımda kullanılan kükürt oranı ve uçucu kül oranı bu çalışmalar sonucunda %35 olarak bulunurken; karışıma konulması gereken agrega miktarının %30 olduğu bulundu. Deneysel çalışmanın bu bölümde, KPB içerisine katılacak olan bağlayıcı ve uçucu kül yüzdeleri sabit tutularak karışımda kullanılacak olan agrega içerisinde yer alan doğal kum (ince agrega) ve kırmataş (iri agrega) oranlarının mekanik özellikler üzerindeki değişimi incelendi. Agrega olarak kullanılacak olan doğal kum ve kırmataş oranlarının belirlenmesi amaçlandı. Doğal kumdan oluşan agrega oranı olan %30’luk oran içerisine doğal kum ile ikame yöntemine göre kırmataş konularak farklı oranlarda karışımlar hazırlandı. Hazırlanan numunelerde kum/kırmataş oranları 1/2; 1/1 ve 2/1 olarak alındı.

4.4.1. Numune özellikleri

Ağırlıkça %30 oranında olan toplam agrega miktarında kum/kırmataş oranı 1/2; 1/1 ve 2/1 olacak şekilde doğal kum ile ikame edilerek kırmataş yüzdesinin belirlenmesi amaçlandı. Bu amaçla hazırlanan KPB’lerin karışım oranları Tablo 4.12’de verildiği gibidir.

Tablo 4.12. Agregada oranlarına göre beton numunesi karışım oranları

Numune Adı	Bağlayıcı (Saf Kükürt+MK) (Ağr. %)	Uçucu Kül (Ağr. %)	Agrega	
			Doğal Kum (Ağr. %)	Kırmataş (Ağr. %)
DK/Ktaş-1/2	35	35	10	20
DK/Ktaş-1/1	35	35	15	15
DK/Ktaş-2/1	35	35	20	10

Numune isimlendirmesinde; “DK” doğal kumu, “Ktaş” kırmataşı ve sondaki rakam beton içerisinde kullanılacak olan kumun kırmataşa olan ağırlıkça oranını temsil etmektedir.

Betonun karıştırılması, kalıplara doldurulması ve yüzeyinin düzeltilmesinde kullanılan tüm yardımcı ekipmanlar etüvde 130-135°C arasında 2 saat süreyle ısıtılarak kullanıldı. KPB numunelerinin hazırlanmasında; bağlayıcı olarak saf kükürt ile MK, filler olarak uçucu kül, agregada olarak doğal kum ve kırmataş kullanıldı. Sıcaklık kontrollü mekanik karıştırıcı 130-135°C arasında sabitlendikten sonra saf kükürtün karıştırıcıya konulup mekanik olarak karıştırılarak sıvı faza gelmesi sağlandı. Saf kükürt tamamen eriyip sıvılaştıktan sonra içerisine etüvde bekletilmiş olan uçucu kül ilave edilerek 10 dakika düşük hızda, 10 dakika yüksek hızda olmak üzere toplam 20 dakika karıştırılarak karışımın homojen hale gelmesi sağlandı. Uçucu kül ve saf kükürt arasındaki reaksiyonların tam olarak sağlandığından ve karışımın homojen hale geldiğinden emin olunduktan sonra bu karışıma belirlenmiş olan oranda modifiye kükürt ilave edildi. Parçalanmış ve 4mm’lik elekten elenen MK, beton karışımına ilave edildikten sonra 10 dk süre ile karıştırma işlemine devam edildi. Daha sonra saf kükürt, modifiye kükürt ve uçucu külden oluşan karışımın içerisine i etüvde bekletilmiş olan doğal kum ve kırmataş ilave edilerek karışımın homojen hale geldiğine emin olana kadar minimum 20 dakika süre ile karıştırılması sağlandı. Beton karışımı etüvde ısıtılan 75x75x254 mm’lik metal kalıplar içerisine dolduruldu. Metal kalıplara yerleştirilen KPB karışımı, plastik tokmak ve sıcak demir çubuk yardımıyla şişlenerek yerleştirme işlemleri tamamlandı. Tam olarak yerleştirme işlemleri tamamlandıktan sonra tüm numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Dökümleri tamamlanmış olan prizma numuneleri Şekil 4.24’te gösterildiği gibidir.



Şekil 4.24. Farklı DK/K.taş oranlarına göre hazırlanan KPB prizma numuneleri

4.4.2. Yapılan deneyler

Agrega olarak kullanılacak olan doğal kum ve kırmataş oranlarının belirlenmesi amacıyla 3 farklı doğal kum/kırmataş oranı göz önünde bulundurularak toplam 12 adet numune hazırlandı. 12 adet numune üzerinde üç noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirildi. Eğilme deneyinden sonra geriye kalan toplam 24 adet numune üzerinde de basınç deneyleri gerçekleştirildi.

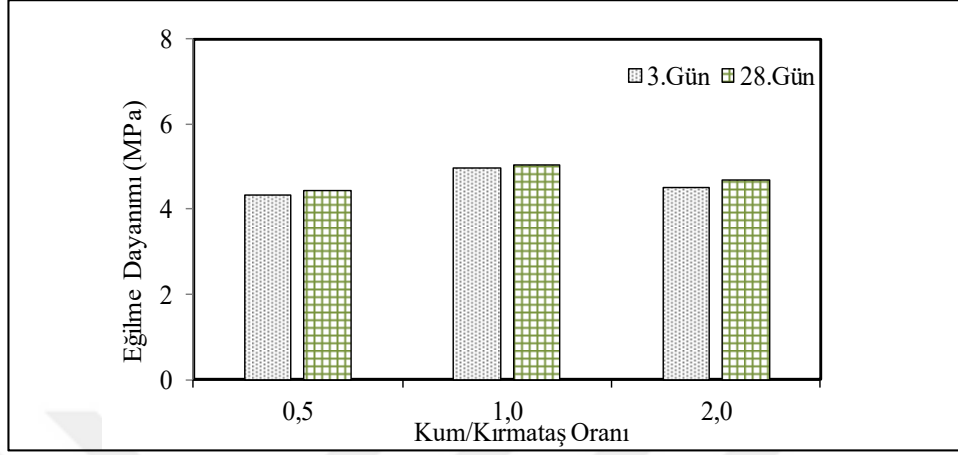
4.4.3. Deney sonuçları

Her grup için 4'er adet olmak üzere toplam 12 adet numune dökümü yapıldı. 3 ve 28. günlerde 2'şer adet numunenin eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirildi ve deney sonuçlarının ortalama değerleri eğilme dayanımı değeri olarak belirlendi. Eğilme deneyleri sonucunda geriye kalan toplam 4 adet prizma numune parçaları köşelerine 75x75 mm'lik plakalar konularak basınç dayanımı değerleri belirlendi. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.13'te verildiği gibidir.

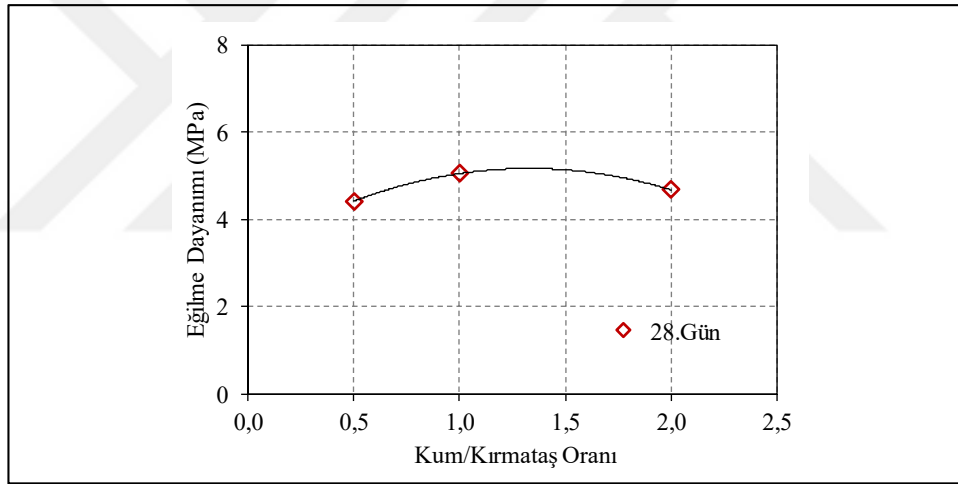
Tablo 4.13. DK/K.taş oranları için eğilme ve basınç deneyi sonuçları

Numune Adı	Eğilme Dayanımı (MPa)		Basınç Dayanımı (MPa)	
	3 gün	28 gün	3 gün	28 gün
DK/Ktaş-1/2	4,34	4,42	47,34	47,66
DK/Ktaş-1/1	4,98	5,05	49,33	51,80
DK/Ktaş-2/1	4,52	4,68	45,81	46,98

Eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.25 ve 4.26'da grafik haline getirilerek gösterilmektedir.



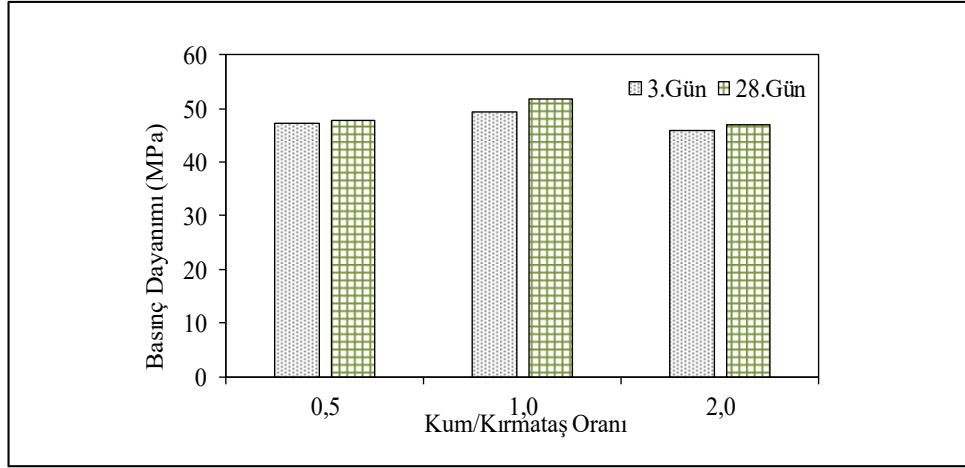
Şekil 4.25. DK/K.taş oranı-eğilme dayanımı ilişkisi



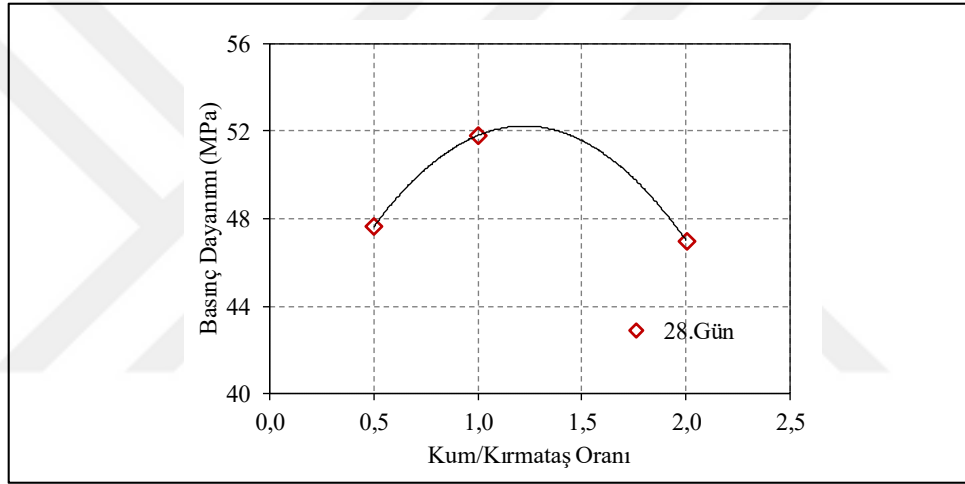
Şekil 4.26. DK/K.taş oranının 28 günlük eğilme dayanımı üzerindeki etkisi

Priz sürelerinin kısa olması nedeniyle kükürt bağlayıcılı betonlar nihai dayanımlarına kısa sürelerde ulaşırlar. Bu nedenle 3 ve 28 günlük eğilme dayanımları arasında KPB'ler için ciddi bir değişim gözlenmedi. Doğal kum/kırntaş oranının 1/2(0,5) olduğu durumda 28 günlük eğilme dayanımı 4,42 MPa iken, bu oranın 1/1(1,0) olduğu durumda eğilme dayanımını %14 oranında arttırdığı belirlendi. Doğal kum/kırntaş oranının 2/1(2,0) olduğu durumda ise eğilme dayanımı değeri %8 oranında azalarak 4,68 MPa oldu.

Basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.27 ve 4.28'de grafik haline getirilerek gösterildiği gibidir.



Şekil 4.27. DK/K.taş oranı-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.28. DK/K.taş oranının 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Priz sürelerinin kısa olması nedeniyle kükürt bağlayıcılı betonlar nihai dayanımlarına kısa sürelerde ulaşırlar. Bu nedenle 3 ve 28 günlük basınç dayanımları arasında kükürt betonlar için ciddi bir değişim gözlenmedi. Doğal kum/kırmtaş oranınının 1/2(0,5) olduğu durumda 28 günlük basınç dayanımı 47,66 MPa iken bu oran 1/1(1,0) olduğu durumda basınç dayanımı %9 oranında arttığı belirlendi. Doğal kum/kırmtaş oranınının 2/1(2,0) olduğu durumda ise basınç dayanımı değeri %10 oranında azalarak 46,98 MPa oldu.

4.4.4. Değerlendirmeler

Çalışmanın bu bölümde kükürt beton içerisine katılacak olan ince ve iri agrega oranının belirlenmesi amaçlandı. Bu amaçla bağlayıcı %35 ve uçucu kül %35 oranında sabit tutularak karışımda ağırlıkça %30 oranında olan toplam agrega miktarının

kum/kırmataş oranı 1/2; 1/1 ve 2/1 olacak şekilde doğal kum ile yer değiştirilerek kırmataş yüzdesi belirlendi. Doğal kum/kırmataş oranının belirlenmesi amacıyla, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Basınç ve eğilme dayanımı değeri göz önüne alınarak ağırlıkça doğal kum/kırmataş oranı 1,0 olarak belirlendi.



5. BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu bölüm kapsamında; basınç dayanımları, işlenebilme ve kıvam özellikleri göz önünde bulundurularak, Bölüm 4'te karışım oranları belirlenen KPB'lerin mekanik özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi amaçlandı. Karşılaştırma amacıyla saf kükürt kullanılarak üretilen KB'ler ve Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan PÇB'ler kullanıldı.

5.1. Numune Özellikleri

KPB'lerin hazırlanmasında Bölüm 4'te belirlenmiş olan karışım oranları kullanıldı. KB'lerin hazırlanmasında ise KPB'lerin karışım oranları alınarak bağlayıcı olarak saf kükürt ve modifiye kükürt yerine aynı oranda saf kükürt kullanıldı. KB ve KPB'lere ait karışım oranları Tablo 5.1'de gösterildiği gibidir.

Tablo 5.1. KB ve KPB'lere ait karışım oranları

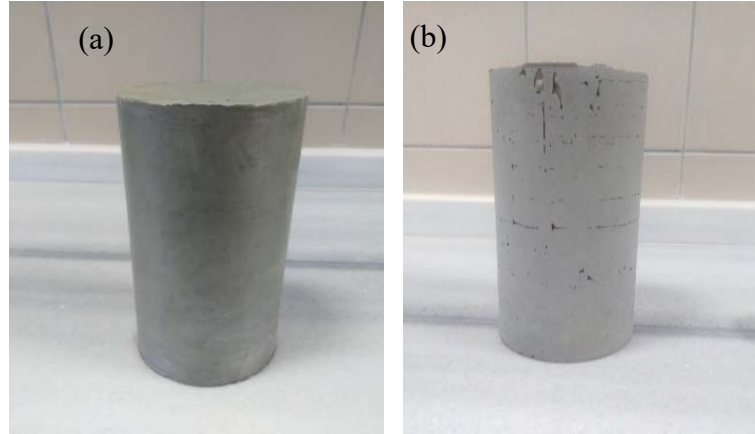
	Bağlayıcı (Ağr. %)		Uçucu Kül (Ağr. %)	Agrega (Ağr. %)	
	Saf Kükürt	Modifiye Kükürt		Doğal Kum	Kırmataş
KPB	33,95	1,05	35,00	15,00	15,00
KB	35,00	0	35,00	15,00	15,00

KB ve KPB'lerin dökümlerinde Bölüm 4.1.1'de tarif edilen döküm prosesi uygulandı. Hazırlanmış olan beton karışımları etüv içerisinde 2 saat süreyle 130-135°C arasında ısıtılan 75x75x254 mm'lik prizma ve 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir metal kalıplar içerisine dolduruldu. Tüm beton dökümlerinde kullanılan malzemeler, ekipmanlar ve kalıplar 130-135°C arasındaki etüvde 2 saat süre ile Şekil 5.1'de gösterildiği gibi bekletildi. Döküm yapılacak kalıbın sıcaklığı ile hazırlanmış olan beton karışımı arasındaki sıcaklık farkının yüksek olması, kükürt bağlayıcılı betonlarda ani priz ve buna bağlı olarak soğuk derz problemleri oluşturabilmektedir. Deneysel çalışma kapsamında, 135°C ve oda sıcaklığında bekletilmiş olan iki farklı kalıp kullanılarak gerçekleştirilmiş olan beton dökümlerine ait görüntüler Şekil 5.2'de

gösterildiği gibidir. Etüvde ısıtılmış olan kalıp kullanılarak gerçekleştirilmiş olan dökümde yerleşme problemleri gözlenmez iken, oda sıcaklığında bekletilmiş olan kalıptan çıkarılan betonda ani prize bağlı yerleşme ve soğuk derz sorunlarının meydana geldiği açıkça görülmektedir.



Şekil 5.1. Etüvde bekletilen malzemeler



Şekil 5.2. Etüvde (a) ve oda sıcaklığında bekletilen (b) kalıplardan çıkarılan numuneler

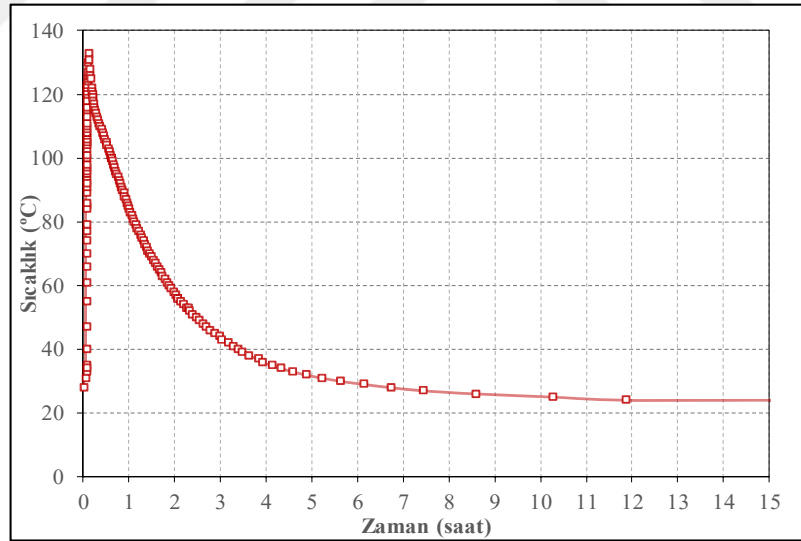
Dökümleri gerçekleştirilen kükürt bağlayıcılı betonların soğuma ve priz alma sürelerinin belirlenmesi amacıyla beton dökümü sırasında silindir numune kalıbı içerisine yerleştirilen termokupl ile numunenin sıcaklık değişimi Şekil 5.3'te gösterildiği gibi data toplama sistemi kullanılarak kayıt altına alındı. Döküm sırasında

100/200 mm'lik silindir kalıbın orta noktasına yerleştirilen termokupl ile sıcak döküm gerçekleştirilen beton numunenin merkez sıcaklığının değişim grafiği elde edildi. Betonun merkez sıcaklığının oda sıcaklığına geldiği ve bu sıcaklıkta sabit kaldığının belirlenmesi amacıyla yaklaşık 15 saat boyunca data kaydı alındı.



Şekil 5.3. Sıcaklık ölçümü data toplama sistemi

Kükürt bağlayıcılı betonların merkez sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.4'te gösterildiği gibidir.



Şekil 5.4. Merkez sıcaklık-zaman grafiği

Döküm sıcaklığı olan 130-135°C arasındaki sıcaklık değerine ulaşan betonun, yaklaşık 12 saat sonunda tamamen oda sıcaklığına geldiği belirlendi. Bölüm 3.3.1'de verilmiş olan POM sonuçları göz önüne alındığında; kükürtün tam olarak kristalize olmasının yani kükürt bağlayıcılı betonların prizini almasının 50-60°C arasında gerçekleştiği belirlenmiştir. Kükürt bağlayıcılı betonların merkez sıcaklıkları, kükürtün

kristalizasyon sıcaklığının altına düştüğünde dökümü gerçekleştirilen beton numunenin prizini tamamladığı düşünülebilmektedir. Bu çalışma kapsamında mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesinde 100/200 mm'lik silindir numunelerin kullanılması nedeniyle sıcaklık okumaları bu numune boyutları için geçerli olup bu boyuttaki silindir numuneler için gerçekleştirildi. POM sonuçları ve soğuma grafiği birlikte değerlendirildiğinde dökümleri gerçekleştirilen 100/200 mm'lik silindir kükürt bağlayıcılı beton numuneleri için priz süresinin 2-2,5 saat aralığında olduğu görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında öncelikle KP'B'lerin dökümleri gerçekleştirilerek 28 günlük basınç dayanımları belirlendi. Aynı basınç dayanım özelliklerine sahip olan PÇB'ler ile karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, belirlenmiş olan basınç dayanımı değeri PÇB'lerin hedef dayanımı olarak seçildi. Bu dayanımı sağlayabilmek amacıyla gerekli karışım oranları belirlendi. Bu karışım oranları kullanılarak deneme dökümleri gerçekleştirildi ve hedef dayanım sağlanana kadar karışım oranlarında düzenlemeler gerçekleştirildi. PÇB'lerde, Kükürt bağlayıcılı betonlarda kullanılan agregalar kullanıldı. Bu betonlara ait karışım oranları Tablo 5.2'de verildiği gibidir.

Tablo 5.2. 1 m³ Portland çimento betonu teorik karışım miktarları

	Su/Çimento Oranı	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Doğal Kum (kg/m ³)	Kırmataş (kg/m ³)	Kimyasal katkı (%)
PÇB	0,50	400	200	673,7	1041,7	1,3

PÇB üretiminde 56 litre kapasiteli, düşey eksenli cebri karıştırıcılı betoniyer kullanıldı. İlk olarak doğal kum, kırmataş ve çimento betoniyere konularak kuru halde karıştırıldı. Karışım suyunun yarısı, kuru karışım yapıldığı sırada betoniyere ilave edildi ve karıştırma işlemine devam edildi. Karışım suyunun kalan kısmına kimyasal katkı ilave edilip betoniyerdeki beton karışımına ilave edildi. Karıştırma işlemi betonun homojen olarak karıştığına emin olunana kadar sürdürüldü. Karışımı tamamlanan numuneler 75x75x254 mm'lik metal prizma ve 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir kompozit kalıplar içerisine dolduruldu. Priz süresi olarak 24 saat süre ile kalıp içerisinde bekletilen PÇB numuneleri bu süre sonunda kalıptan çıkartılarak Şekil 5.5'te gösterildiği gibi deney yapılacağı zamana kadar kür havuzunda bekletildi.



Şekil 5.5. Kür havuzunda bekletilen PÇB numuneleri

5.2. Taze Beton Özellikleri

KB, KPB ve PÇB karışımları hazırlanarak silindir ve prizma numuneleri dökümleri gerçekleştirildi. Bu betonların taze beton özelliklerinin belirlenmesi amacıyla slump ve taze birim ağırlık deneyleri gerçekleştirildi.

5.2.1. Slump (çökme) deneyi

PÇB’lerde kıvam değerinin belirlenebilmesi için çökme (slump) deneyleri yapıldı. Slump deneyleri TS EN 12350–2 standardına uygun olarak gerçekleştirildi [199]. Deneylerde üst çapı 100 mm, alt çapı 200 mm ve yüksekliği 300 mm olan kesik Abrams konisi kullanıldı. Kesik koni düz ve su emmeyen bir yüzeye konularak içine eşit yükseklikte 3 tabaka halinde Portland çimento betonu dolduruldu. Her tabaka çelik çubuk yardımıyla 25 defa şişlenerek sıkıştırıldı. Koni tamamen doldurulduktan sonra üstü mala ile düzlendi ve koni düşeyde tek bir hareket ile sarsılmadan yukarıya çekilerek beton koniden ayrıldı. Kesik koninin üst noktası ile çökmüş olan beton yığını üst noktası arasındaki mesafe belirlendi. Slump deneyi sadece PÇB’lerde uygulandı, sıcak döküm olarak hazırlandığı için KB ve KPB’lerde slump deneyleri gerçekleştirilemedi. Elde edilen slump değerleri Tablo 5.3’te verildiği gibidir.

Tablo 5.3. Çökme (slump) deney sonuçları

Beton Türü	Çökme(cm)
KB	-
KPB	-
PÇB	19-21

5.2.2. Birim ağırlık deneyi

KB, KPB ve PÇB'ler üzerinde birim ağırlık deneyi gerçekleştirildi. Birim ağırlık deneylerinde Şekil 5.6'da gösterilen 3 lt'lik birim ağırlık kabı kullanılarak TS EN 12350-6 ve ASTM C-138 standardına uygun olarak gerçekleştirildi [200-201].



Şekil 5.6. Birim ağırlık kabı ve deneyi

PÇB karışımları hazırlandıktan sonra birim ağırlık kabına 2 kademeli olarak ve her kademede 25 kez şişlenerek yerleştirildi. Kabın darası, su ile dolu ağırlığı ve beton ile dolu ağırlığı belirlendikten sonra taze birim ağırlığı hesaplandı. KB ve KPB'lerin taze birim ağırlıklarının belirlenmesi için birim ağırlık kabı etüv içerisinde 2 saat süreyle 130-135°C arasında bekletildikten sonra bu betonlar için taze birim ağırlık ölçümleri yapıldı.

Taze birim ağırlık deneyi, her bir beton türü üç kere tekrar edilerek bu değerlerin ortalamaları alındı. Bulunan değerler Tablo 5.4'te gösterildiği gibidir.

Tablo 5.4. Taze birim ağırlık deney sonuçları

Beton Türü	Birim Ağırlık (kg/m ³)
KB	2288
KPB	2287
PÇB	2343

Taze beton deneylerinden elde edilen taze birim ağırlık değerleri kullanılarak beton içerisindeki hava miktarı ve kompozite hesaplandı. KB, KPB ve PÇB'ler için hesaplanan değerler Tablo 5.5'te gösterildiği gibidir.

Tablo 5.5. Betonların hava miktarı ve kompasite değerleri

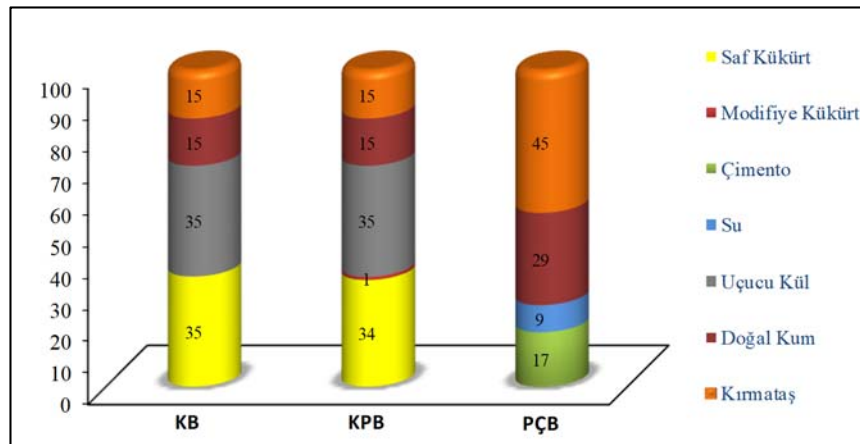
Beton Türü	Hava (%)	Kompasite (m ³)
KB	0,3	0,610
KPB	0,4	0,609
PÇB	1,1	0,783

KB, KPB ve PÇB'ler için taze birim ağırlık değeri, hava miktarı ve kompasite değerleri göz önünde bulundurularak Tablo 5.6'da verilen 1 m³ beton için gerçek karışım oranları hesaplandı.

Tablo 5.6. 1 m³ beton için gerçek karışım miktarları

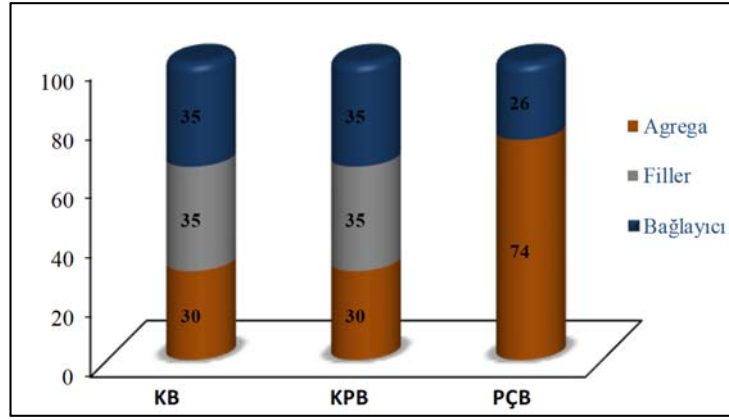
Malzeme	KB	KPB	PÇB
Saf Kükürt (kg/m ³)	800,8	776,4	-
Modifiye Kükürt (kg/m ³)	-	24,0	-
Su/Çimento Oranı	-	-	0,50
Çimento (kg/m ³)	-	-	403,9
Su (kg/m ³)	-	-	201,9
Doğal Kum (kg/m ³)	343,2	343,1	680,2
Kırmataş (kg/m ³)	343,2	343,1	1051,7
Uçucu Kül (kg/m ³)	800,8	800,5	-
Kimyasal katkı (%)	-	-	1,3

KB, KPB ve PÇB'lerde kullanılan malzemelerin ağırlıkça oranlarının karşılaştırması Şekil 5.7'de grafiksel olarak verildiği gibidir.



Şekil 5.7. Beton karışım oranları ağırlıkça yüzdeler

Kükürt bağlayıcılı betonlar ile çimento olan betonlarda kullanılan agrega oranlarının karşılaştırması Şekil 5.8’de verildiği gibidir.



Şekil 5.8. Beton karışım oranları ağırlıkça agrega yüzdelik oranları

Kükürt bağlayıcılı betonlarda agrega oranı ağırlıkça betonun %30’u oranında kullanılırken; geleneksel çimento betonlarında %74’ü oranında kullanıldı. Buna karşılık KB’lerde %35 oranında filler kullanımı olduğunda; agrega+filler oranları açısından kükürt bağlayıcılı betonlar, toplam beton ağırlığının %65’ini oluştururken, PÇB’lerde bu değer %74’tür. Bağlayıcı ihtiyaçları açısından grafik incelendiğinde; kükürt bağlayıcılı betonlarda bağlayıcı ihtiyacı (saf kükürt+MK) toplam beton ağırlığının %35’i iken, PÇB’lerde bu değer (çimento+su) %26’sı olduğu görülmektedir.

5.3. Sertleşmiş Beton Özellikleri

Dökümleri gerçekleştirilen KB, KPB ve PÇB’ler üzerinde basınç, yarma, eğilme, elastisite modülü ve poisson oranı deneyleri gerçekleştirildi.

KB ve KPB’ler Şekil 5.9’da gösterildiği gibi dökümden sonra deneylerin yapılacağı zamana kadar 23-25°C oda sıcaklığında bekletildi. PÇB’ler kalıptan çıkarıldıktan sonra deneylerinin yapılacağı tarihe kadar kür havuzlarında bekletildi. KB, KPB ve PÇB’lerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla toplam 91 adet silindir numune ve 39 adet prizma numune dökümü gerçekleştirildi.



Şekil 5.9. KB ve KPB'lerin depolanma koşulları

5.3.1. Basınç dayanımı deney sonuçları

KB, KPB ve PÇB'lerden hazırlanan 100 mm çaplı 200 mm yüksekliğindeki silindir numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Tüm beton grupları için 7, 28 ve 360 günlük numuneler üzerinde basınç deneyleri yapıldı. KB ve KPB'ler, PÇB'lere göre oldukça erken dayanım kazanmaktadır. Bu nedenle kükürt bağlayıcılı beton numunelerinde 1 saatlik ve 24 saatlik numuneler için de basınç deneyleri gerçekleştirildi. Şekil 5.10'da 1 saat sonunda kalıptan çıkarılan KPB silindir numunesi görülmektedir.



Şekil 5.10. Bir saatlik KPB numunesi

Basınç dayanımı deneyleri 300 ton kapasiteli hız ayarlı hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirildi. Deneyler ASTM C-39 standardına uygun olarak yapıldı [202]. Basınç deneyinde yükleme hızı 0,35 MPa/sn'lik üniform gerilme artışı sağlayacak şekilde uygulandı. Basınç deneyinden önce tüm silindir beton numunelerinde, yerel gerilme yığılmaların önlenmesi amacıyla kükürt başlıklama yapıldı.

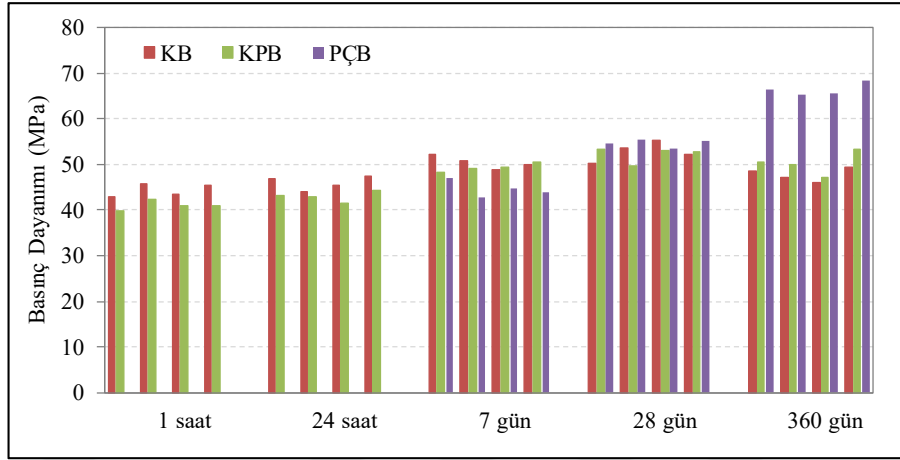
Basınç dayanımı değerlerinin belirlenmesi amacıyla 1 saat, 24 saat, 7 gün, 28 gün ve 360 günlük deneylerin her birinde 4'er adet olmak üzere toplam 40 adet hem KB hem de KPB numunesi üretildi. 7 gün, 28 gün ve 360 günlük basınç dayanımı deneyleri için 4'er adet olmak üzere toplam 12 adet Portland çimento betonu silindir numunesi hazırlandı. Toplam 52 adet silindir numunesine ait basınç dayanımı deney sonuçları ve bunların ortalama değerleri Tablo 5.7'de verildiği gibidir.

Tablo 5.7. Basınç dayanımı deneyi sonuçları

Numune Yaşı	Basınç Dayanımı (MPa)						
	KB		KPB		PÇB		
1 gün	1 saat	42,94	44,40	39,71	41,01	-	-
		45,66		42,31		-	
		43,47		40,93		-	
		45,51		41,10		-	
	24 saat	46,88	45,95	43,32	43,08	-	-
		44,09		43,07		-	
		45,47		41,63		-	
		47,41		44,28		-	
7 gün	52,14	50,44	48,32	49,33	46,91	44,52	
	50,72		49,20		42,68		
	48,87		49,34		44,73		
	50,02		50,46		43,77		
28 gün	50,25	52,80	53,44	52,29	54,59	54,61	
	53,53		49,73		55,33		
	55,23		53,15		53,38		
	52,17		52,84		55,14		
360 gün	48,59	47,68	50,52	50,22	66,36	66,41	
	47,01		49,86		65,22		
	45,88		47,11		65,66		
	49,25		53,40		68,41		

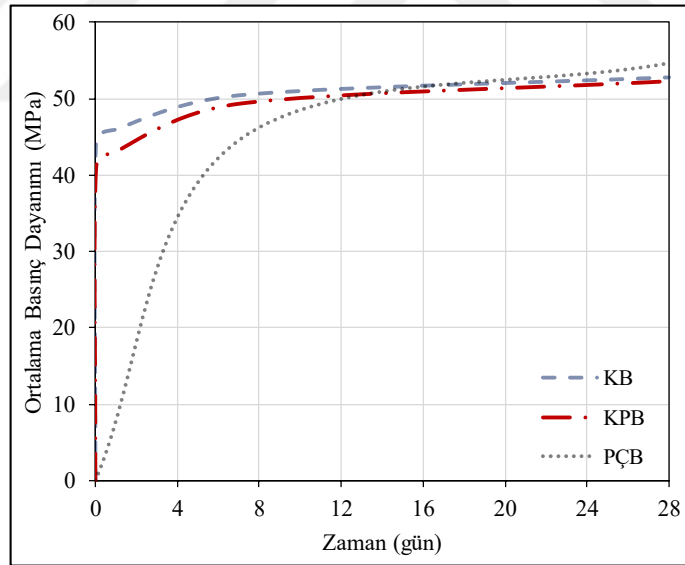
KB, KPB ve PÇB'lerden hazırlanan her bir silindir numuneye ait basınç dayanımlarının zamana göre değişimi Şekil 5.11'de verildiği gibidir. KB ve KPB'lerde ilk 1 saatlik basınç dayanımı sonuçları alındığı için grafikte zaman eksenini birimi saat olarak verildi. PÇB kullanılarak hazırlanan silindir numunelerde 1 saat ve 24 saatlik basınç dayanımı deneyi, priz süresi göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmedi. KPB'ler ve genel amaçlı kullanılan PÇB'lerin karşılaştırmalarının yapılması amacıyla, her iki betona ait karakteristik basınç dayanımlarının aynı olması hedeflendi. Bu amaçla; PÇB'lere ait 28 günlük hedef basınç dayanımı değeri, 28 günlük KPB'lere ait ortalama basınç dayanımı değeri esas alınarak gerekli malzeme katılım oranları belirlendi. 28 günlük basınç dayanımı deneyleri sonucunda 52,29 MPa bulunan KPB

basınç dayanımı değerine karşılık PÇB'lerin 28 günlük karakteristik basınç dayanımları ortalaması 54,61 MPa olarak bulundu.



Şekil 5.11. Tüm numunelere ait basınç dayanımı-zaman grafiği

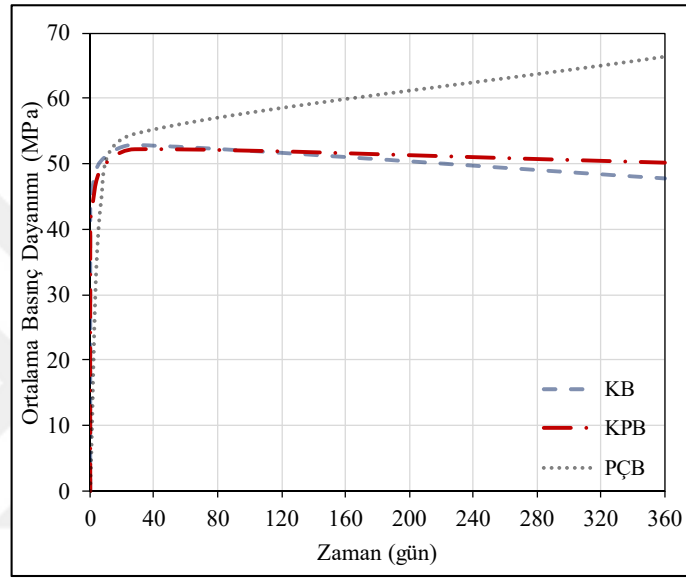
Tüm betonlara ait 28 günlük ortalama basınç dayanımı değişimi grafiği Şekil 5.12'de verildiği gibidir.



Şekil 5.12. Tüm numunelere ait 28 günlük basınç değişimi grafiği

KB'ler 1 saat sonunda 28 günlük basınç dayanımlarının %84'üne ulaşabilirken, KPB'lerin %78'ine ulaşabildiği deneyler sonucunda belirlendi. Kükürt bağlayıcılı betonların 28 günlük basınç dayanımlarının ortalama olarak %85'ine 1 saat sonunda ulaştığı görülmektedir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımları göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma kapsamında hazırlanan PÇB'lerin 7 gün sonunda 28

günlük basınç dayanımlarının %82'sine ulaştığı belirlendi. Aynı oranın KB ve KPB'ler için ise sırasıyla %96 ve %94 olduğu görüldü. 28 günlük basınç dayanımı değerleri KB, KPB ve PÇB'ler için sırasıyla 52,80, 52,29 ve 54,61 MPa olarak bulundu. Modifiye edilmiş kükürt kullanılarak hazırlanan kükürt polimer betonlar ile kükürt betonların 28 günlük basınç dayanımları değerlerinin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. KB, KPB ve PÇB'lere ait 360 günlük basınç dayanımı değişimi grafiği Şekil 5.13'te verildiği gibidir.



Şekil 5.13. Tüm numunelere ait 360 günlük basınç değişimi grafiği

Uzun dönemli basınç değişimi değerleri incelendiğinde; PÇB'lerin 360 gün sonunda, 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımlarının değerlerine göre sırasıyla %33 ve %18 oranında artış gösterdiği görüldü. KB'lerin 360 günlük uzun dönem basınç dayanımı değerleri 1 saatlik basınç dayanımı değerine göre %4 oranında artış gösterirken, 28 günlük basınç dayanımı değerlerine göre %11 oranında azalma belirlendi. KPB'lerin 360 günlük uzun dönem basınç dayanımı değerleri 1 saatlik basınç dayanımı değerine göre %14 oranında artış gösterirken, 28 günlük basınç dayanımı değerlerine göre %4 oranında azalma görüldü. Kükürt bağlayıcılı betonların uzun dönemli basınç dayanımı değerleri incelendiğinde dayanım kaybı meydana geldiği belirlendi. KB'lerin KPB'lere göre ulaştıkları maksimum dayanım değeri göz önünde bulundurulduğunda uzun süreli dayanım kayıplarının daha fazla olduğu bulundu. PÇB'lerde ise uzun süreli dayanım değerlerinde zaman içinde artış meydana geldiği belirlendi.

KB'lerin 28 günlük basınç dayanımlarının, KPB'lerin basınç dayanımı değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. KB'ler içerisinde modifiye kükürt ilavesi betonların basınç dayanımında azalmaya neden olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ve MK oranının, harçların basınç dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmada bu sonuca paralel değerler elde edildi. Saf kükürt kullanılarak hazırlanan betonlara modifiye kükürt ilave edilmesi, kükürtün kristalizasyonunu kısmi olarak engellemesi nedeniyle basınç dayanımında azalmaya neden olmaktadır. Küçük katılım oranlarında basınç dayanımına çok fazla etkisi olmaz iken, bu oranın belirli bir değeri geçmesi durumunda basınç dayanımında hızlı düşümlere neden olduğu belirlendi. Vroom tarafından 1981 ve Mohamed tarafından 2006 ve 2011 yıllarında yapılan deneysel çalışmalarda aynı sonuçlar elde edildiği görülmektedir [19, 58, 75]. Saf kükürt ile yapılan kükürt betonlar daha yüksek akışkanlığa sahipken; karışıma modifiye kükürt ilavesi viskoziteyi arttırarak karışımın akışkanlık düzeyini oldukça azaltmaktadır. Viskozitesi yüksek olan bir karışım içerisinde kristallerin büyümesi hem zor hem de oldukça yavaştır ve bunun sonucu olarak basınç dayanımında azalmalar meydana gelmektedir. KB'lerin KPB'lere göre erken yaşlardaki dayanımı daha yüksek iken; uzun dönemli basınç dayanımı değerlerinde daha fazla dayanım kaybının meydana geldiği görülmektedir. Erken yaşlarda kükürt modifikasyonun etkisi ile KPB'lerin basınç dayanımı değerleri daha düşük olmasına rağmen 28 gün sonunda erken yaş dayanımında %6 oranında dayanım artışı meydana gelmektedir, bu oran KB'lerde %1'dir. Bunun nedeni olarak ilk 24 saat içerisinde KB'lerde meydana gelen kristal yapıdaki değişimlerin olduğu söylenebilir. İyapıda oluşan gerilmeler ve bu gerilmelerin neden olduğu çatlaklar basınç dayanımında azalmalara neden olmaktadır.

5.3.2. Eğilme dayanımı deney sonuçları

KB, KPB ve PÇB'lerden hazırlanan 75x75x254 mm prizma numuneler üzerinde eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Tüm beton gruplarında 7, 28 ve 360 günlük numuneler üzerinde eğilme deneyleri yapıldı. Kükürt bağlayıcılı beton numunelerinde 1 saatlik ve 24 saatlik numuneler için de eğilme deneyleri gerçekleştirildi. Şekil 5.14'te 1 saat sonunda kalıptan çıkarılan KPB prizma numunesi görülmektedir.



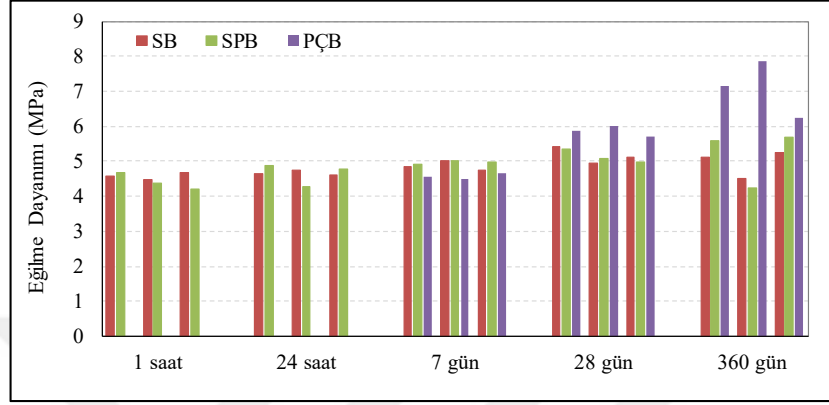
Şekil 5.14. Bir saatlik KPB prizma numunesi

Eğilme dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerde, üç ve dört noktalı eğilme deneylerinin yapılabildiği ve 300 ton kapasiteli, hız ayarlı hidrolik prese bağlı eğilme deneyi presi kullanıldı. Deneyler ASTM C-293 standardına uygun olarak yapıldı [203]. Deneylerde orta noktadan yüklenmiş basit kiriş (3 noktadan yükleme) yöntemine göre eğilme dayanımı belirlendi. Eğilme dayanımı deneyinde yükleme hızı 0,04 MPa/sn - 0,06 MPa/sn arasında üniform gerilme artışı sağlayacak şekilde uygulandı. Eğilme dayanımı değerlerinin belirlenmesi amacıyla 1 saat, 24 saat, 7 gün, 28 gün ve 360 günlük deneylerin her birinde 3'er adet olmak üzere toplam 30 adet hem KB hem de KPB numunesi üretildi. 7 gün, 28 gün ve 360 günlük eğilme dayanımı deneyleri için 3'er adet olmak üzere toplam 9 adet PÇB prizma numunesi hazırlandı. Toplam 39 adet prizma numunesine ait eğilme dayanımı deney sonuçları ve bunların ortalama değerleri Tablo 5.8'de verildiği gibidir.

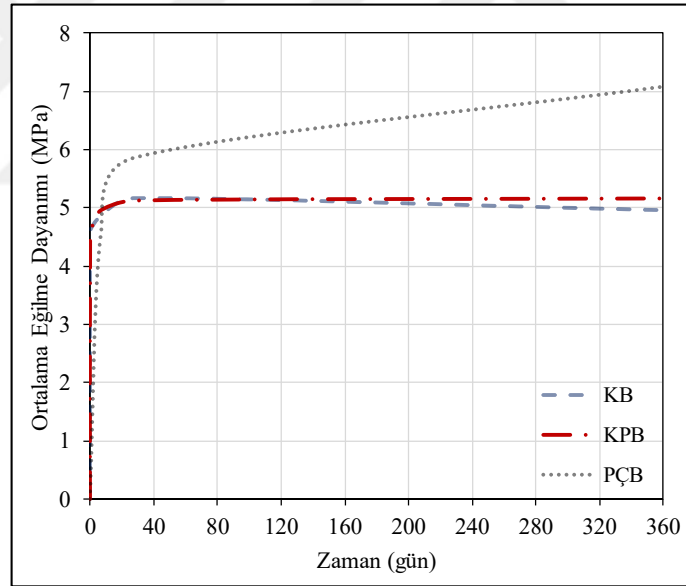
Tablo 5.8. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları

Numune Yaşı	Eğilme Dayanımı (MPa)						
	KB		KPB		PÇB		
1 gün	1 saat	4,59	4,58	4,69	4,42	-	-
		4,47		4,36		-	
		4,69		4,22		-	
	24 saat	4,66	4,67	4,88	4,65	-	-
		4,73		4,27		-	
		4,61		4,79		-	
7 gün	4,84	4,86	4,91	4,97	4,55	4,56	
	5,01		5,01		4,49		
	4,73		4,98		4,65		
28 gün	5,42	5,17	5,34	5,13	5,87	5,86	
	4,96		5,08		6,01		
	5,13		4,97		5,71		
360 gün	5,11	4,96	5,58	5,17	7,14	7,08	
	4,52		5,69		7,86		
	5,26		4,23		6,25		

KB, KPB ve PÇB'lerden hazırlanan her bir prizma numunesine ait eğilme dayanımlarının zamana göre değişimi Şekil 5.15'te verildiği gibidir. KB, KPB ve PÇB'lere ait ortalama eğilme dayanımı ve zaman arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 5.16'da verildiği gibidir.



Şekil 5.15. Tüm numunelere ait eğilme dayanımı-zaman grafiği



Şekil 5.16. Ortalama eğilme dayanımı-zaman grafiği

Kükürt betonlar 1 saat sonunda 28 günlük eğilme dayanımlarının %89'una ulaşabilirken, KPB'lerin %86'sına ulaşabildiği deneyler sonucunda belirlendi. Kükürt bağlayıcılı betonlar 28 günlük eğilme dayanımlarının yaklaşık olarak %87'sine 1 saat sonunda ulaştığı görülmektedir. 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma kapsamında hazırlanan PÇB'lerin 7 gün sonunda 28 günlük eğilme dayanımlarının %78'ine ulaştığı belirlendi. Aynı oranın KB ve KPB'ler için ise sırasıyla %94 ve %97 olduğu görüldü. 28 günlük eğilme dayanımı değerleri;

KB, KPB ve PÇB'ler için sırasıyla 5,17, 5,13 ve 5,86 MPa olarak bulundu. Uzun dönemli eğilme dayanımı değişimi değerleri incelendiğinde; PÇB'lerin 360 gün sonunda 7 günlük ve 28 günlük eğilme dayanımı değerlerine göre sırasıyla %34 ve %17 oranında artış gösterdiği görülmektedir. KB'lerin 360 günlük uzun dönem eğilme dayanımı değerleri 1 saatlik eğilme dayanımı değerine göre %8 oranında artış gösterirken 28 günlük eğilme dayanımı değerlerine göre %4 oranında azalma göstermektedir. KPB'lerin 360 günlük uzun dönem eğilme dayanımı değerleri 1 saatlik eğilme dayanımı değerine göre %4 oranında artış gösterirken 28 günlük eğilme dayanımı değerlerine göre %1 oranında artış göstermektedir. Kükürt bağlayıcılı betonların uzun süreli eğilme dayanımı değerleri, 28 günlük dayanım değerleri ile karşılaştırıldığında önemli bir değişim görülmemektedir. Buna karşın PÇB'lerde ise 28 günlük eğilme dayanımı değerlerinde artışın meydana geldiği görülmektedir.

5.3.3. Yarma dayanımı deney sonuçları

KB, KPB ve PÇB'lerden hazırlanan 100 mm çaplı 200 mm yüksekliğindeki silindir numuneler üzerinde yarma dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Tüm beton grupları için 7, 28 ve 180 günlük numuneler üzerinde yarma deneyleri yapıldı. Kükürt bağlayıcılı beton numunelerinde 1 saatlik ve 24 saatlik numuneler için de yarma dayanımı deneyleri gerçekleştirildi. Yarma dayanımı deneyleri 300 ton kapasiteli hız ayarlı hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirildi. Deneyler ASTM C-496 standardına uygun olarak yapıldı [204]. Silindir numuneler Şekil 5.17'de gösterilen kafes içerisine yerleştirilerek deneyler gerçekleştirildi. Yarma dayanımı deneyinde yükleme hızı $0,25 \pm 0,05$ MPa/sn'lik üniform gerilme artışı sağlayacak şekilde uygulandı.

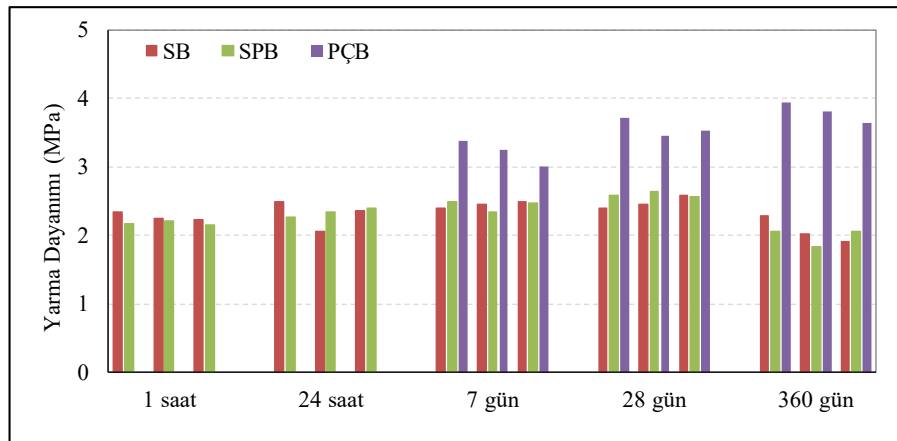


Şekil 5.17. Silindir yarma deneyi

Tablo 5.9. Yarma dayanımı deneyi sonuçları

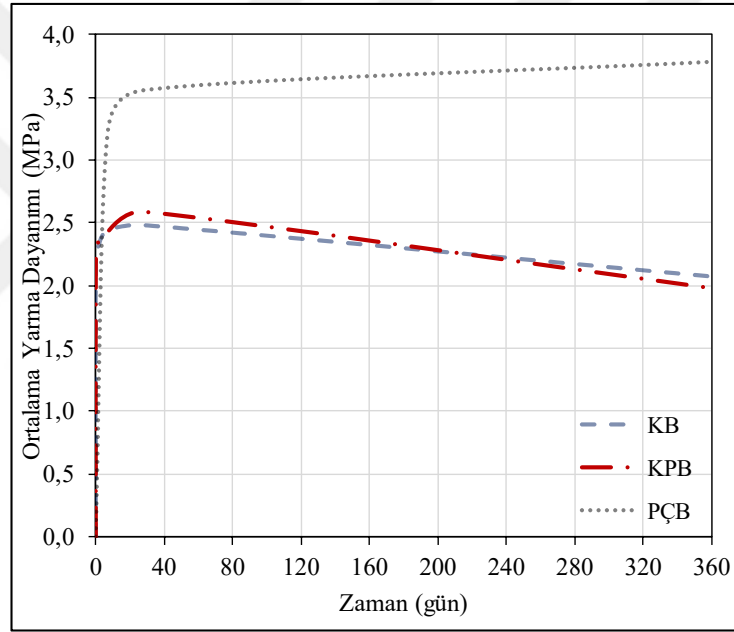
Numune Yaşı	Yarma Dayanımı (MPa)						
	KB		KPB		PÇB		
1 gün	1 saat	2,34		2,17		-	
		2,25	2,27	2,20	2,18	-	-
		2,22		2,16		-	
	24 saat	2,48		2,28		-	
		2,06	2,30	2,34	2,33	-	-
		2,35		2,39		-	
7 gün	2,39		2,49		3,37		
	2,45	2,44	2,33	2,43	3,25	3,21	
	2,49		2,47		3,01		
28 gün	2,40		2,58		3,71		
	2,46	2,48	2,63	2,59	3,45	3,56	
	2,59		2,56		3,52		
360 gün	2,29		2,06		3,93		
	2,02	2,07	1,83	1,98	3,80	3,79	
	1,91		2,05		3,63		

Yarma dayanımı değerlerinin belirlenmesi amacıyla 1saat, 24 saat, 7 gün, 28 gün ve 360 günlük deneylerin her birinde 3'er adet olmak üzere toplam 30 adet hem KB hem de KPB numunesi üretildi. 7 gün, 28 gün ve 360 günlük yarma dayanımı deneyleri için 3'er adet olmak üzere toplam 9 adet Portland çimento betonu silindir numunesi hazırlandı. Toplam 39 adet silindir numunesine ait yarma dayanımı deney sonuçları ve bunların ortalama değerleri Tablo 5.9'da verildiği gibidir. KB, KPB ve PÇB'lerden hazırlanan her bir silindir numunesine ait yarma dayanımlarının zamana göre değişimi Şekil 5.18'de verildiği gibidir.



Şekil 5.18. Tüm numunelere ait yarma dayanımı-zaman grafiği

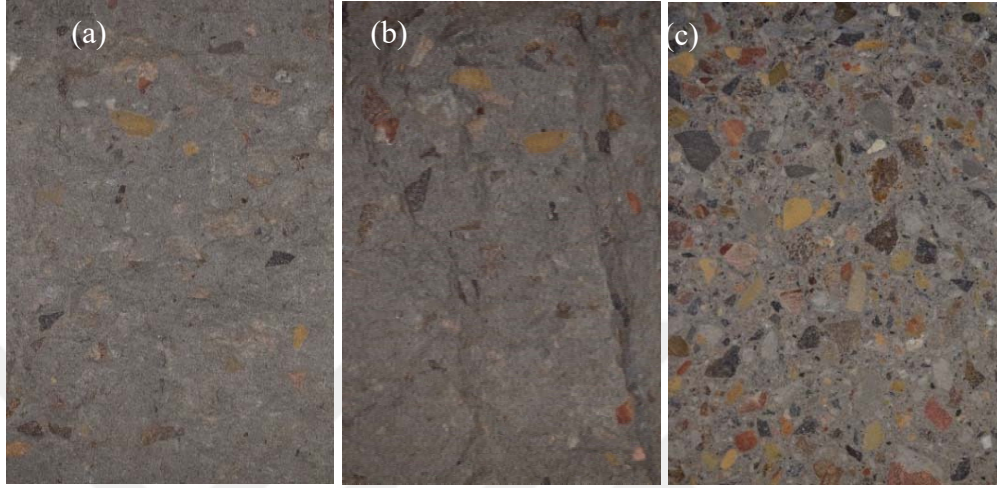
KB'ler 1 saat sonunda 28 günlük yarma dayanımlarının %91'ine ulaşabilirken, KPB'lerin %84'üne ulaşabildiği deneyler sonucunda belirlendi. Kükürt bağlayıcılı betonların 28 günlük yarma dayanımlarının yaklaşık olarak %88'ine 1 saat sonunda ulaştığı görülmektedir. 7 ve 28 günlük yarma dayanımları göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma kapsamında hazırlanan PÇB'lerin 7 gün sonunda 28 günlük yarma dayanımlarının %90'ına ulaştığı belirlendi. Aynı oranın KB ve KPB'ler için ise sırasıyla; %98 ve %94 olduğu görüldü. 28 günlük yarma dayanımı değerleri KB, KPB ve PÇB'ler için sırasıyla 2,48, 2,59 ve 3,56 MPa olarak bulundu. KB, KPB ve PÇB'lere ait ortalama yarma dayanımı ve zaman arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 5.19'da verildiği gibidir.



Şekil 5.19. Ortalama yarma dayanımı-zaman grafiği

Uzun dönemli yarma dayanımı değişimi değerleri incelendiğinde Portland çimento betonlarının 360 gün sonunda 7 günlük ve 28 günlük yarma dayanımı değerlerine göre sırasıyla %15 ve %6 oranında artış gösterdiği görülmektedir. KB'lerin 360 günlük uzun dönem yarma dayanımı değerleri 1 saatlik yarma dayanımı değerine göre %9 oranında azalırken; 28 günlük yarma dayanımı değerlerine göre %20 oranında azalmaktadır. KPB'lerin 360 günlük uzun dönem yarma dayanımı değerleri 1 saatlik yarma dayanımı değerine göre %10 oranında artış gösterirken, 28 günlük yarma dayanımı değerlerine göre %31 azalmaktadır. Kükürt bağlayıcılı betonların uzun süreli yarma dayanımı değerlerinde önemli miktarlarda azalma meydana geldiği

görülmektedir. PÇB’lerde ise uzun süre sonunda zamana bağlı yarma dayanımı artışı olduğu görülmektedir. Yarma dayanımı deneyleri sonrasında ikiye parçalanmış olan KB, KPB ve PÇB silindir numunelerinin iç yüzeylerine ait görüntüler Şekil 5.20’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.20. Yarma deneyi sonrası silindir yarıma yüzeyi görüntüleri (a) KB, (b) KPB (c) PÇB

5.3.4. Statik elastisite modülü ve poisson oranı deney sonuçları

KB, KPB ve PÇB’lerden hazırlanan 100 mm çaplı 200 mm yüksekliğindeki silindir numuneler üzerinde statik elastisite modülü ve poisson oranlarının belirlenmesi amacıyla deneyler gerçekleştirildi. KB ile KPB’lerden alınan 1, 7, 28 ve 360 günlük ve PÇB’lerden alınan 7, 28 ve 360 günlük silindir numuneler üzerinde deneyler yapıldı. Betonların şekil değiştirme davranışlarının belirlenmesi amacıyla, silindir numuneler üzerine şekil değiştirme ölçümlerinin alındığı, deplasman ölçerlerin bağlı olduğu bir kafes yerleştirildi. Kafes üzerinde düşey deformasyonların okunması için 2 adet deplasman ölçer bağlanırken, yatay deformasyonların okunması için kafes orta noktasına 1 adet yatay pozisyonda deplasman ölçer yerleştirildi. Düşey yüklemelerin oluşturulduğu hidrolik pres içerisine yerleştirilen yük hücresi kullanılarak silindir numune üzerinde meydana gelen yük değerleri belirlendi. Bilgisayara bağlı olan 8 kanallı data toplama sistemi kullanılarak yük hücresinden gelen her yük verisine karşılık alınan düşey ve yatay deplasman değerleri kaydedildi. Şekil 5.21’de gösterilen deney düzeneğinden elde edilen veriler kullanılarak silindir numunelere ait elastisite modülü ve poisson oranı değerleri hesaplandı.



Şekil 5.21. Elastisite ve poisson oranı deney düzeneği

Statik Elastisite Modülünün bulunması için yapılan deneylerde yükleme hızı 0,35 MPa/sn olacak şekilde sabit tutuldu. Deneyler ASTM C-469 standardına uygun olarak gerçekleştirildi [154]. Deneyde ölçüm alınmaya başlamadan önce numune üzerine en az iki kere ön yükleme yapıldı. Ön yükleme sırasında silindir numune üzerine bağlanan deplasman ölçer ve yük hücresi okuma değerleri kontrol edildi. Ön yükleme yapıldıktan sonra kayıt işlemi başlatılarak yük kesintiye uğratılmadan tek seferde boyuna şekil değiştirmenin 0,00005 ve en büyük basınç dayanımının %40'ına eşit yük uygulanana kadar data toplama sistemi ile veriler kaydedildi. Data toplama sistemi tarafından elde edilen yatay ve düşey deformasyon değerleri ile gerilme değerleri kullanılarak elastisite modülü ve poisson oranı hesaplandı. Hesaplamalarda elastisite modülü için Denklem (5.1) ve poisson oranı için Denklem (5.2) kullanıldı.

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,000050} \quad (5.1)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0,000050} \quad (5.2)$$

Burada; E_c elastisite modülünü, μ poisson oranını, S_2 en büyük basınç dayanımının %40'ına karşılık gelen gerilme değerini, S_1 0,000050 birim deformasyon değerine karşılık gelen gerilme değerini, ε_2 S_2 gerilme değerine karşılık gelen düşey birim deformasyon değerini, ε_{t1} S_1 gerilme değerine karşılık gelen yatay birim deformasyon değerini ve ε_{t2} S_2 gerilme değerine karşılık gelen yatay birim deformasyon değerini göstermektedir. KB ve KPB dökümlerinin sıcak döküm olması nedeni ile 1 saatlik numunelerde deney aletlerinin yüksek sıcaklık etkisinde hatalı ölçüm alması ve arızalanması durumları göz önünde bulundurularak, elastisite modülü ve poisson oranı

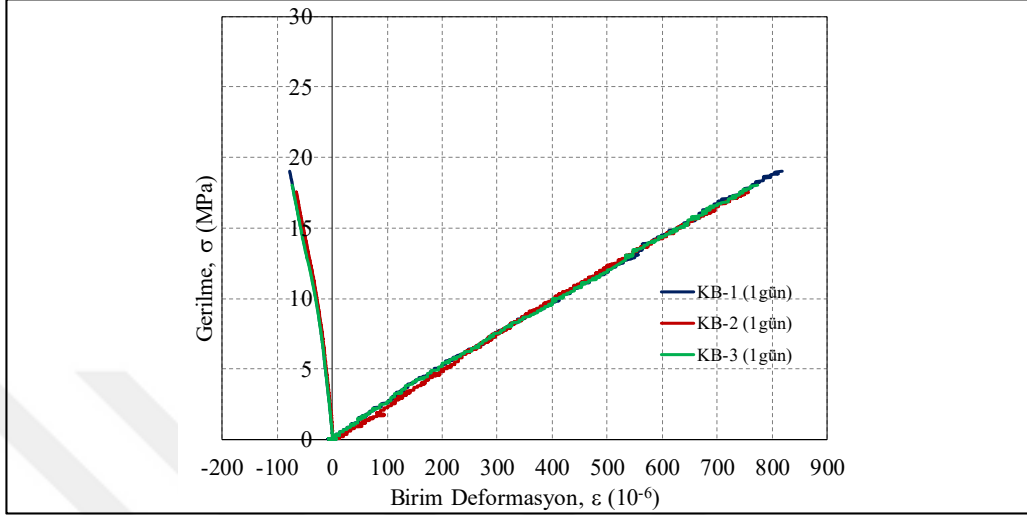
deneyleri gerçekleştirilemedi. Beton silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen statik elastisite modülü ve poisson oranlarına ait deneysel sonuçlar ile bu değerlerin ortalamaları Tablo 5.10’da verildiği gibidir.

Tablo 5.10. Deneysel elastisite modülü ve poisson oranı değerleri

	Numune Adı	Numune Yaşı (gün)	Basınç Dayanımı (f_c , MPa)	Elastisite Modülü (E_c , MPa)	Poisson Oranı (μ)		
KÜKÜRT BETON	KB-1	1	45,47	23657	0,20		
	KB-2	1	44,09	23462	0,21	0,20	
	KB-3	1	46,88	23785	0,20		
	KB-4	7	48,87	24060	0,21		
	KB-5	7	52,14	24713	24426	0,22	0,22
	KB-6	7	50,72	24504	0,22		
	KB-7	28	50,25	24742		0,22	
	KB-8	28	52,17	25075	25043	0,19	0,20
	KB-9	28	53,53	25311	0,20		
	KB-10	360	48,59	23750		0,21	
	KB-11	360	47,01	23562	23540	0,20	0,20
	KB-12	360	45,88	23307	0,20		
KÜKÜRT POLİMER BETON	KPB-1	1	41,63	23125	23658	0,20	0,19
	KPB-2	1	44,28	24083	0,18		
	KPB-3	1	43,32	23766	0,20		
	KPB-4	7	50,46	25913	25760	0,22	0,20
	KPB-5	7	49,20	25829	0,19		
	KPB-6	7	48,32	25538	0,20		
	KPB-7	28	53,44	26431	26193	0,21	0,22
	KPB-8	28	53,15	26132	0,22		
	KPB-9	28	52,84	26016	0,22		
	KPB-10	360	50,52	26275	25785	0,22	0,21
	KPB-11	360	47,11	25064	0,10		
	KPB-12	360	49,86	26015	0,10		
PORTLAND ÇİMENTO BETON	PÇB-1	7	46,91	30011	0,24		
	PÇB-2	7	44,73	30176	30109	0,22	0,23
	PÇB-3	7	43,77	30140	0,23		
	PÇB-4	28	53,38	32400	0,24		
	PÇB-5	28	55,14	33044	32754	0,26	0,25
	PÇB-6	28	55,33	32818	0,24		
	PÇB-7	360	66,36	40304	0,25		
	PÇB-8	360	65,66	39954	39527	0,25	0,25
	PÇB-9	360	65,22	38324	0,26		

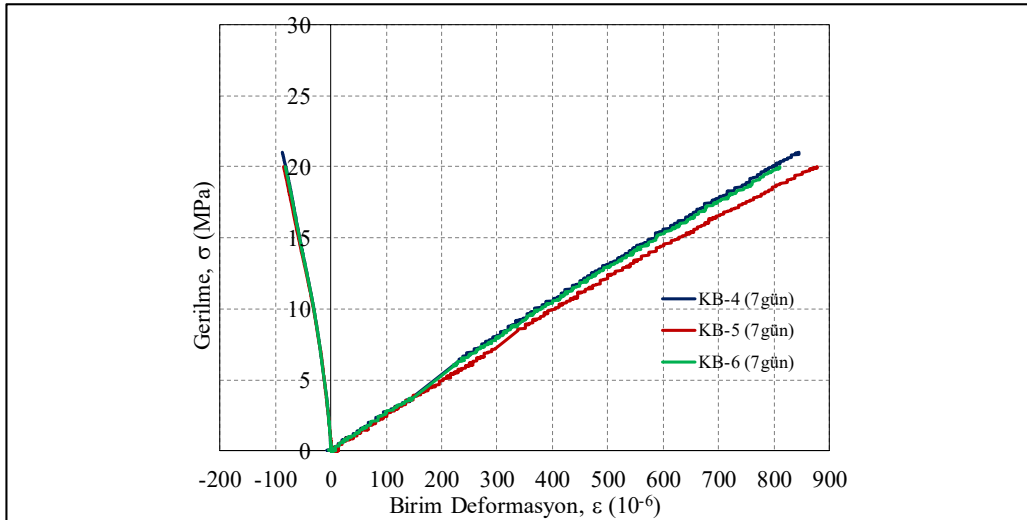
KB kullanılarak hazırlanan 12 adet silindir numune üzerinde bu numunelerin şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler kullanılarak, bu numunelere ait gerilme-birim deformasyon grafikleri oluşturuldu. 1 günlük kürlenme sonrası deneyleri gerçekleştirilen KB-1, KB-2 ve KB-3

numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.22’de verildiği gibidir. 1 günlük KB’lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 23635 MPa ve 0,20 olarak bulundu.



Şekil 5.22. KB (1 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

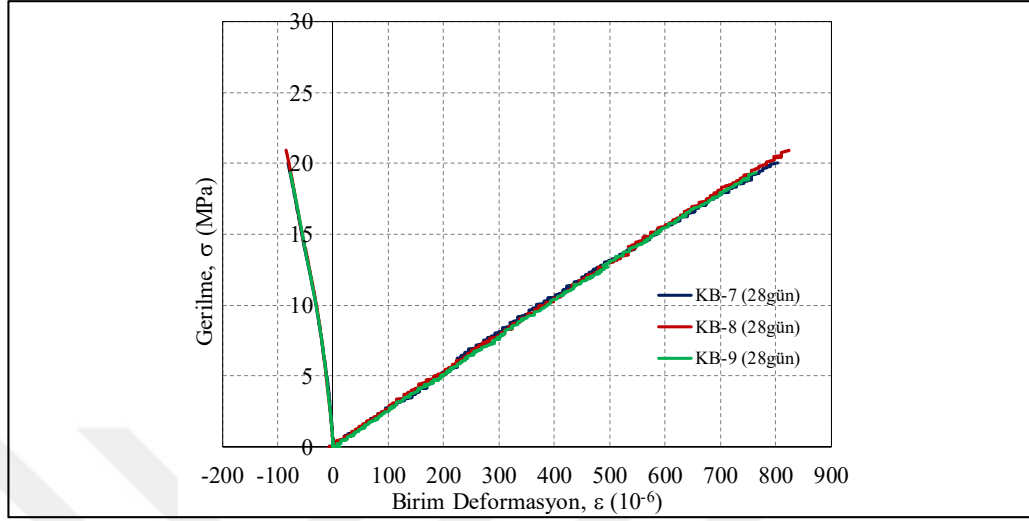
7 günlük kürlenme sonrası deneyleri gerçekleştirilen KB-4, KB-5 ve KB-6 numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.23’te verildiği gibidir. 7 günlük KB’lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 24426 MPa ve 0,22 olarak bulundu.



Şekil 5.23. KB (7 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

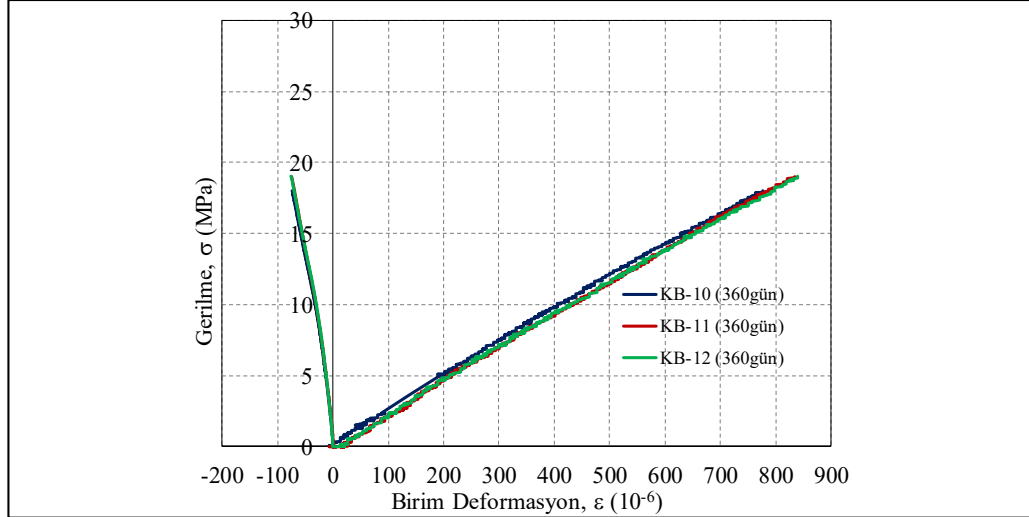
28 günlük kürlenme sonrası deneyleri gerçekleştirilen KB-7, KB-8 ve KB-9 numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil

5.24'te verildiği gibidir. 28 günlük KB'lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 25043 MPa ve 0,20 olarak bulundu.



Şekil 5.24. KB (28 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

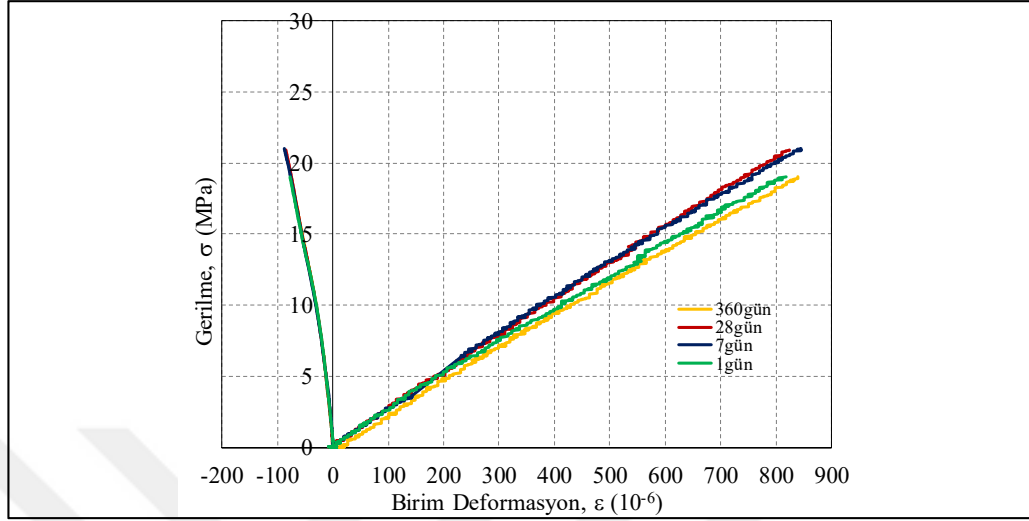
360 günlük kürlenme sonrası deneyleri gerçekleştirilen KB-10, KB-11 ve KB-12 numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.25'te verildiği gibidir. 360 günlük KB'lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 23540 MPa ve 0,20 olarak bulundu.



Şekil 5.25. KB (360 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

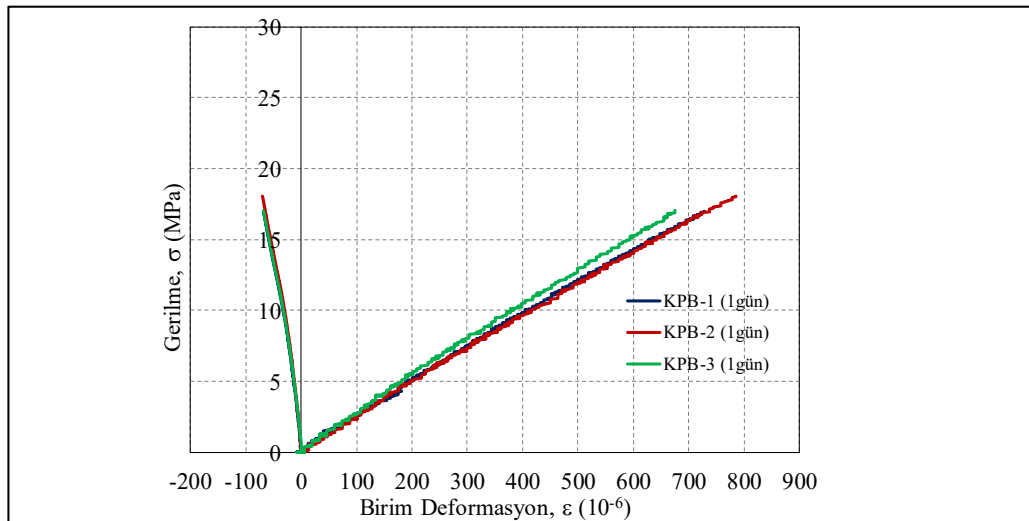
KB numunelerinin şekil değiştirme özelliklerinin zamana göre değişiminin belirlenmesi amacıyla 1, 7, 28 ve 360 günlük kükürt beton numunelerine ait gerilme-deformasyon grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 5.26'da verildiği gibidir. Bu grafikte

her yaş için deneyleri gerçekleştirilen 3 adet silindir numunenin ortalama değerleri alınarak grafik değerleri belirlendi.



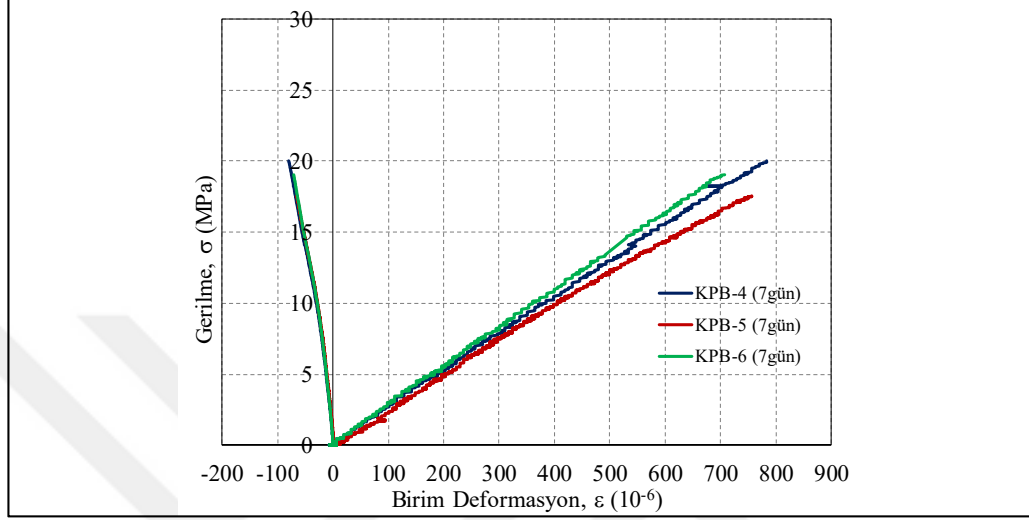
Şekil 5.26. KB'lerin şekil değiştirme özelliklerinin zamana bağlı değişimi

KPB kullanılarak hazırlanan 12 adet silindir numune üzerinde bu numunelerin şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler kullanılarak bu numunelere ait gerilme-birim deformasyon grafikleri oluşturuldu. 1 günlük kürlenme sonrası deneyleri gerçekleştirilen KPB-1, KPB-2 ve KPB-3 numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.27'de verildiği gibidir. 1 günlük KPB'lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 23658 MPa ve 0,19 olarak bulundu.



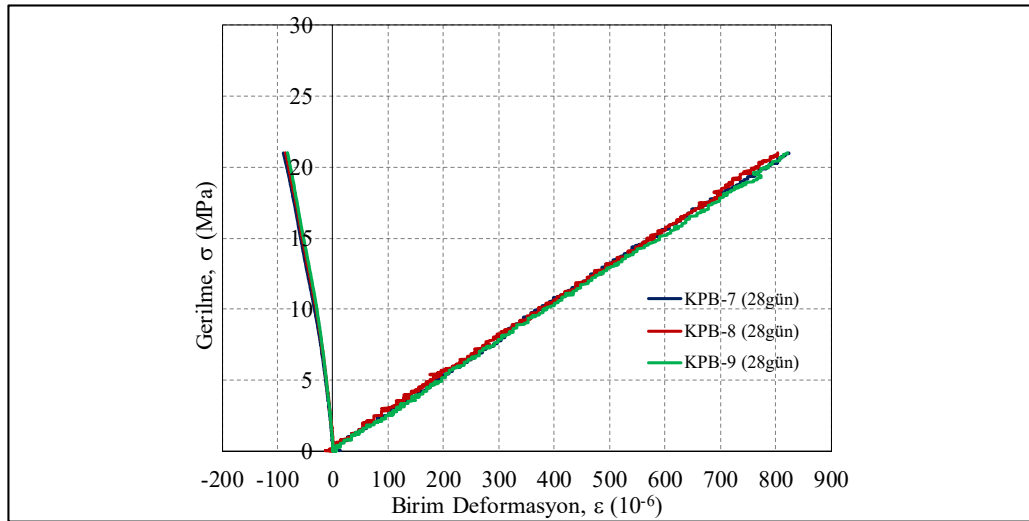
Şekil 5.27. KPB (1 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

7 günlük kürleme sonrası deneyleri gerçekleştirilen KPB-4, KPB-5 ve KPB-6 numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.28’de verildiği gibidir. 7 günlük KPB’lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 25760 MPa ve 0,20 olarak bulundu.



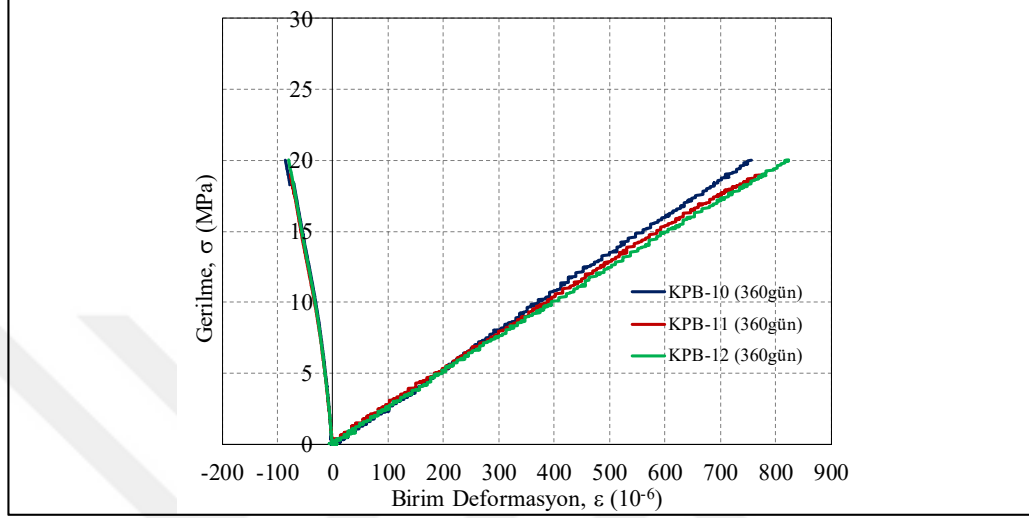
Şekil 5.28. KPB (7 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

28 günlük kürleme sonrası deneyleri gerçekleştirilen KPB-7, KPB-8 ve KPB-9 numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.29’da verildiği gibidir. 28 günlük KPB’lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 26193 MPa ve 0,22 olarak bulundu.



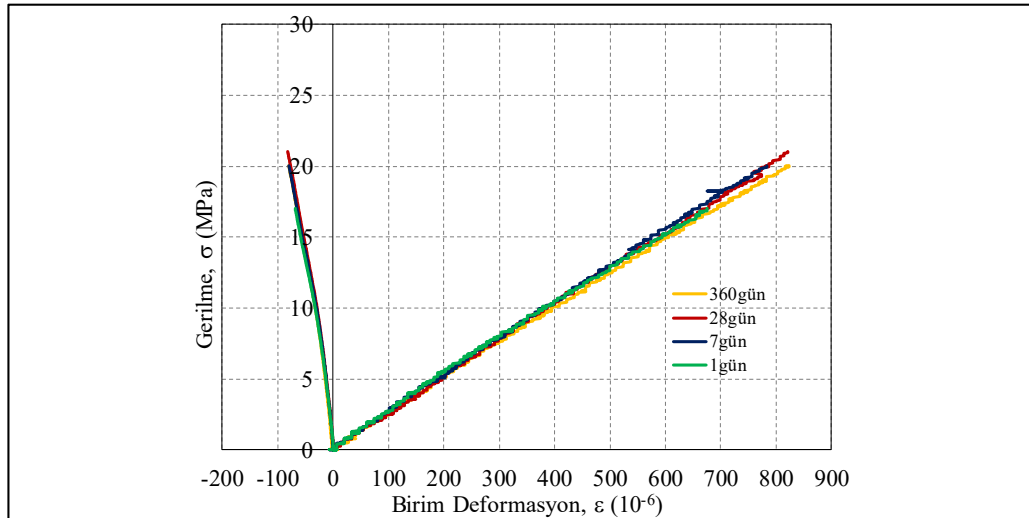
Şekil 5.29. KPB (28 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

360 günlük kürlenme sonrası deneyleri gerçekleştirilen KPB-10, KPB-11 ve KPB-12 numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.30'da verildiği gibidir. 360 günlük KPB'lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 25785 MPa ve 0,21 olarak bulundu.



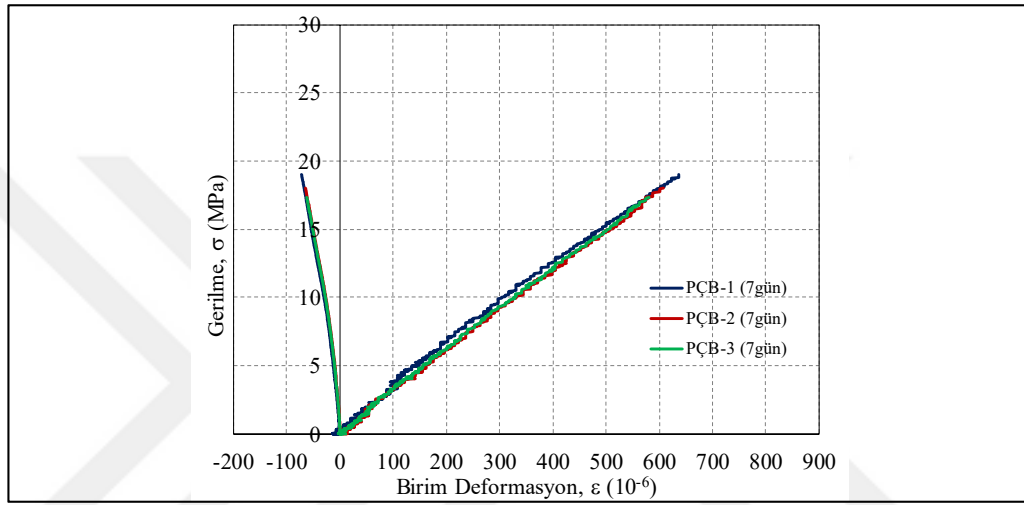
Şekil 5.30. KPB (360 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

KPB numunelerinin şekil değiştirme özelliklerinin zamana göre değişiminin belirlenmesi amacıyla 1, 7, 28 ve 360 günlük KPB numunelerine ait gerilme-deformasyon grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 5.31'de verildiği gibidir. Bu grafikte her yaş için deneyleri gerçekleştirilen 3 adet silindir numunenin ortalama değerleri alınarak grafik değerleri belirlendi.



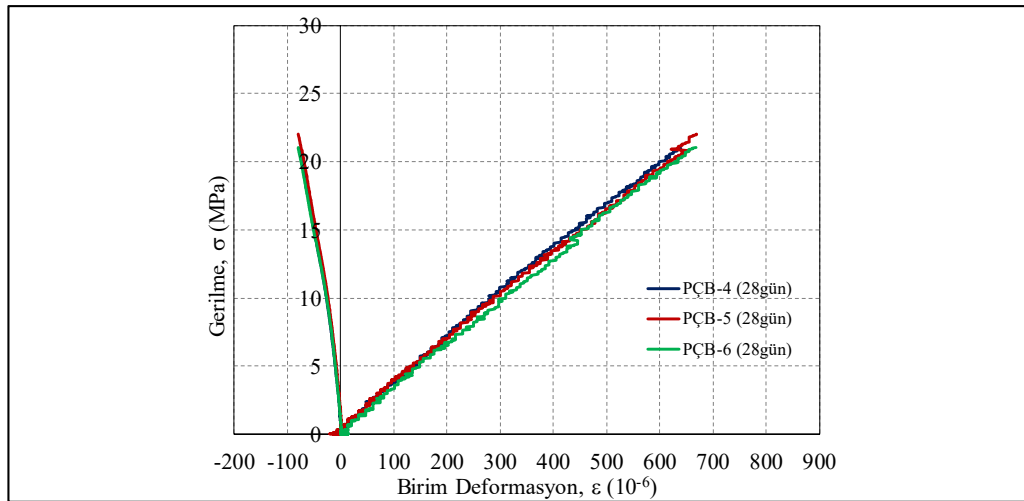
Şekil 5.31. KPB'lerin şekil değiştirme özelliklerinin zamana bağlı değişimi

PÇB kullanılarak hazırlanan 9 adet silindir numune üzerinde bu numunelerin şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler kullanılarak bu numunelere ait gerilme-birim deformasyon grafikleri oluşturuldu. 7 günlük kürlenme sonrası deneyleri gerçekleştirilen PÇB-1, PÇB-2 ve PÇB-3 numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.32’de verildiği gibidir. 7 günlük PÇB’lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 30109 MPa ve 0,23 olarak bulundu.



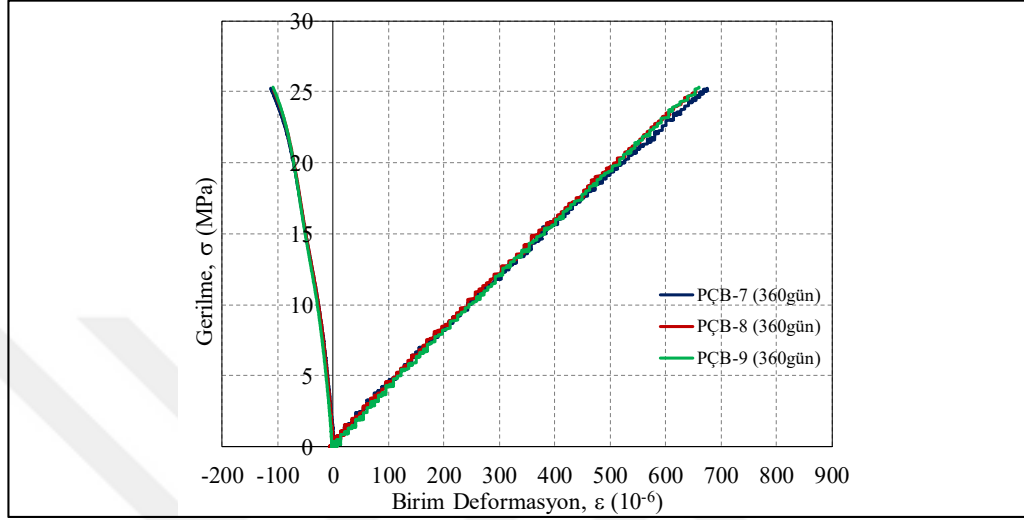
Şekil 5.32. PÇB (7 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

28 günlük kürlenme sonrası deneyleri gerçekleştirilen PÇB-4, PÇB-5 ve PÇB-6 numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.33’te verildiği gibidir. 28 günlük PÇB’lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 32754 MPa ve 0,25 olarak bulundu.



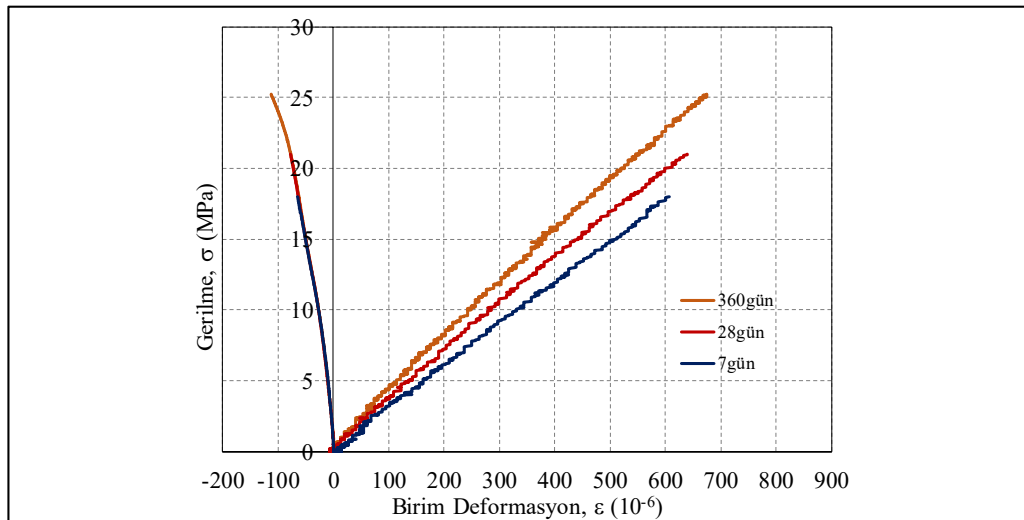
Şekil 5.33. PÇB (28 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

360 günlük kürleme sonrası deneyleri gerçekleştirilen PÇB-7, PÇB-8 ve PÇB-9 numunelerinin gerilme-birim deformasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.34'te verildiği gibidir. 360 günlük PÇB'lerin ortalama elastisite modülü ve poisson oranı değeri sırasıyla 39527 MPa ve 0,25 olarak bulundu.



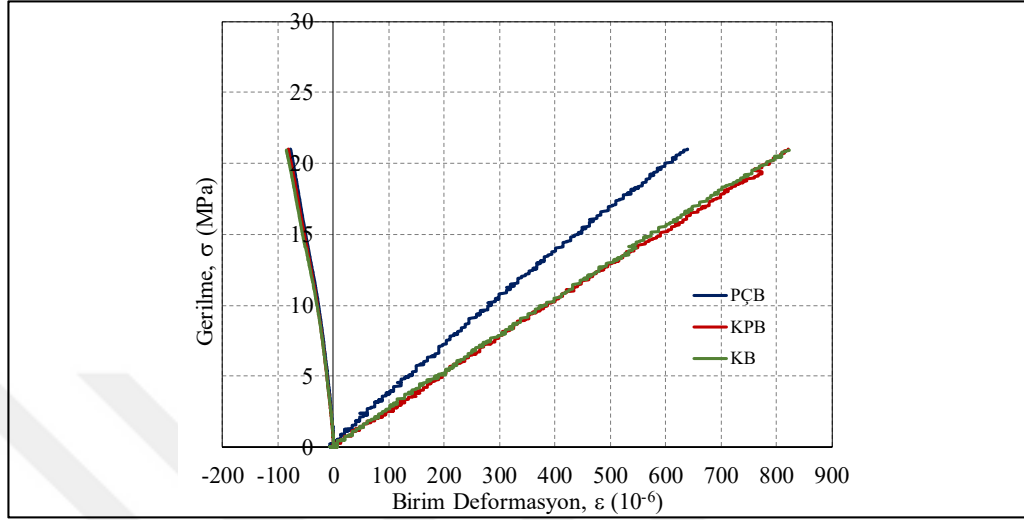
Şekil 5.34. PÇB (360 günlük) gerilme-birim deformasyon grafiği

PÇB numunelerinin şekil değiştirme özelliklerinin zamana göre değişiminin belirlenmesi amacıyla 7, 28 ve 360 günlük PÇB numunelerine ait gerilme-deformasyon grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 5.35'te verildiği gibidir. Bu grafikte her yaş için deneyleri gerçekleştirilen 3 adet silindir numunenin ortalama değerleri alınarak grafik değerleri belirlendi.



Şekil 5.35. PÇB'lerin şekil değiştirme özelliklerinin zamana bağlı değişimi

KB, KPB ve PÇB'lere ait 28 günlük ortalama değerler kullanılarak hazırlanan ve şekil değiştirme özelliklerinin beton tipine göre değişimini gösteren grafik Şekil 5.36'da verildiği gibidir.



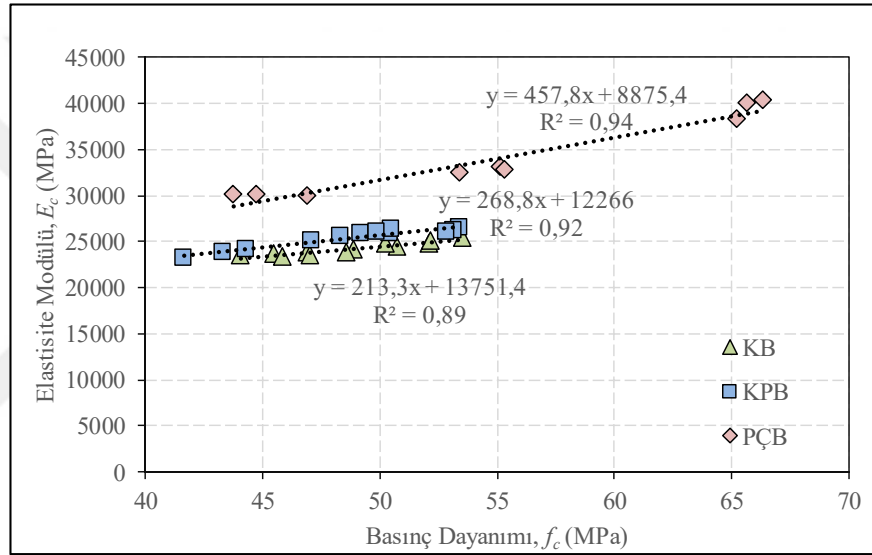
Şekil 5.36. 28 günlük şekil değiştirme özelliklerinin beton tipine bağlı değişimi

Betonlara ait 28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde; en büyük basınç dayanımı değerine PÇB'ler ulaştığı için, elastisite modülü değeri hem KB hem de KPB'lerden yüksek çıktığı belirlendi. Benzer gerilme değerleri altında KPB numunelerinin birim deformasyon değerlerinin, PÇB numunelerinin birim deformasyon değerinden daha büyük seviyelerde kaldığı bilinmektedir [6]. Bu nedenle kükürt bağlayıcılı betonların elastisite modüllerinin, PÇB'lere oranla biraz daha düşük seviyelerde kaldığı bilinmektedir. Kyuhun tarafından 2013 yılında kükürt betonların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. 50 MPa basınç dayanımına sahip KPB numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda, ortalama elastisite modülü değeri 22 GPa olarak bulunmuştur. Bu tez çalışması kapsamında hazırlanan KPB numunelerinin elastisite modülü değeri, Kyuhun tarafından yapılmış olan deneysel çalışma ile paralellik gösterip 26 GPa olarak bulundu. Kyuhun, yapmış olduğu çalışmada KPB betonların elastisite modülü değerinin PÇB'lerin %89'u kadar olduğunu belirtmiştir. Bu tez çalışması kapsamında hazırlanan KPB numunelerinin elastisite modülü değerinin, PÇB'lerinkine oranı %81 olarak bulundu ve literatürde yer alan çalışmalar ile benzer sonuçlar elde edildiği görüldü [6, 88]. Dutari tarafından 2002 yılında kükürt betonların istinat duvarında kullanımının araştırıldığı deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada

hazırlanan kükürt bağlayıcılı beton numunelerinin yapılan deneyler sonucunda poisson oranları 0,15 ile 0,20 arasında bulunmuştur. Bu tez kapsamında hazırlanan kükürt bağlayıcılı betonların poisson oranları 0,19 ile 0,22 arasında bulunarak hem Dutari hem de Hardy tarafından elde edilmiş olan deneysel sonuçlar ile benzerlik gösterdiği görülmektedir [83].

5.4. Basınç Dayanımı-Elastisite Modülü Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

KB, KPB ve PÇB'lerin deneysel olarak belirlenen elastisite modüllerinin basınç dayanımı ile değişimleri Şekil 5.37'de verilmiş olan grafikte görülmektedir.



Şekil 5.37. Deneysel elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi

Kükürt bağlayıcılı betonlarda, bağlayıcı olarak su ve çimento kullanılan geleneksel betonlarda görüldüğü gibi, basınç dayanımındaki artışın elastisite modülünü arttırdığı görülmektedir. KB ve KPB'lerin elastisite modüllerinin, benzer basınç dayanımı değerlerine sahip Portland çimento betonlarına göre daha düşük olduğu görülmektedir.

PÇB'lerde elastisite modülünün bilinmesi; beton, betonarme ve öngerilmeli beton elemanlar kullanılarak imal edilmiş olan yapıların deformasyonlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Yapı elemanlarını oluşturan yapı malzemelerinin elastisite modüllerinin bilinmesi, deformasyonların ölçülerek yapı elemanlarında meydana gelen gerilme miktarlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Portland çimento betonlarında elastisite modülü ve basınç mukavemeti arasında bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişkileri tanımlayan eşitlikler kullanılarak betona zarar vermeden,

hem beton basınç dayanımı hem de elastisite modülü değerleri belirlenebilmektedir [205-208].

Portland çimento betonlarının basınç dayanımları belirlendiğinde elastisite modüllerinin tahmin edilebilmesi için çeşitli standartlar tarafından önerilmiş farklı denklemler bulunmaktadır.

TS 500 (2000)'de elastisite modülü hesabı için Denklem (5.3) önerilmektedir [209].

$$E_c=3520 \sqrt{f_c}+14000 \quad (5.3)$$

Amerikan Beton Enstitüsü tarafında ACI 363R-92 standardında 21 ile 83 MPa arasındaki beton basınç dayanımına sahip betonlar için elastisite modülü ve basınç dayanımı arasındaki ilişki Denklem (5.4)'te verildiği şekilde önerilmektedir [210].

$$E_c=3320 \sqrt{f_c}+6890 \quad (5.4)$$

Avrupa uluslararası beton komitesi (CEB-FIP) tarafından CEB-FIP 1993 standardında elastisite modülü ve basınç dayanımı arasındaki ilişki Denklem (5.5)'te verildiği şekilde önerilmektedir [211].

$$E_c=10000 \sqrt[3]{f_c+8} \quad (5.5)$$

Norveç "Concrete Structures-Design and Detailing Rules" NS 3473 standardında elastisite modülü ve basınç dayanımı arasındaki ilişki Denklem (5.6)'da verildiği şekilde önerilmektedir [212].

$$E_c=9500 (f_c)^{0.3} \quad (5.6)$$

Eurocode 2 tarafından EN 1992-1-1 standardında elastisite modülü ve basınç dayanımı arasındaki ilişki Denklem (5.7)'de verildiği şekilde önerilmektedir [213].

$$E_c=22000 \left(\frac{f_c}{10}\right)^{0.3} \quad (5.7)$$

Yukarıdaki eşitliklerin tamamında; E_c elastisite modülünü, f_c karakteristik silindirik basınç dayanımını göstermektedir ve birimler MPa olarak tanımlanmaktadır.

Son yıllarda petrol endüstrisindeki büyüme ile bu endüstriden açığa çıkan kükürtün alternatif kullanım alanlarının genişletilmesi amacıyla, kükürt beton ve kükürt polimer beton kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır [14, 87]. Kullanım alanlarının oluşturulması ve yaygınlaştırılması sonucunda kükürt bağlayıcılı betonlar farklı standartlarda yer almaya başlamaktadır. Buna karşın Denklem (5.3)'ten (5.7)'e kadar Portland çimento betonları için verilen basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisine esas eşitlikler, kükürt bağlayıcılı betonlar için standartlarda tanımlanmamaktadır. Çalışmanın bu bölümünde Portland çimento betonları için standartlarda tanımlanmış olan basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi ele alınarak kükürt bağlayıcılı betonlar için bu eşitliklerin incelenmesi ve bu çalışma kapsamında üretilen kükürt betonlar için analitik modellerin oluşturulması amaçlandı. Deneysel çalışmalar sonucunda belirlenen elastisite modülü değerleri, standartlar tarafından önerilen analitik modeller kullanılarak hesaplandı ve karşılaştırmalı olarak sonuçlar değerlendirildi. Standartlar tarafından önerilen analitik modellerde 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki standart deney silindirlerinin basınç dayanımları kullanılmaktadır. Bu deneysel çalışma kapsamında 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir beton numuneleri kullanıldı. Gerekli karşılaştırmaların ve değerlendirmelerin yapılabilmesi için deneysel çalışmada kullanılan 100/200 silindir beton numunelerinden elde edilen değerlerin standartlarda önerilen 150/300 silindir numune değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Silindir basınç dayanımı değerlerinin standart deney silindiri değerlerine dönüştürülmesi için Öztekin ve diğ. tarafından 2012 yılında yapılan deneysel çalışmada elde edilen ve Denklem (5.8)'de verilen dönüşüm eşitliği kullanıldı [214].

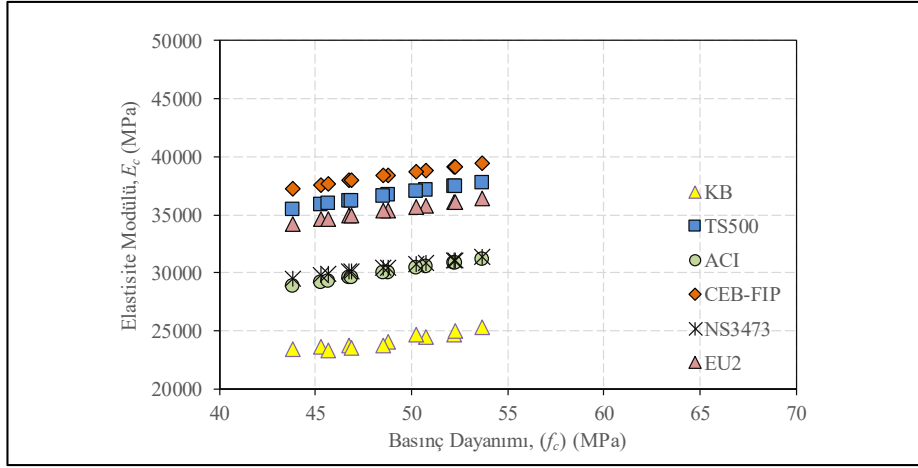
$$f_{c-100/200}=0,9586 f_{c-150/300}+2,0651 \quad (5.8)$$

Burada, $f_{c-100/200}$ 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir beton numunesinin basınç dayanımını ve $f_{c-150/300}$ 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde silindir beton numunesinin basınç dayanımını göstermektedir. KB, KPB ve PÇB'lere ait deneysel olarak elde edilen elastisite modülü değerleri ile yukarıda verilmiş olan analitik modeller kullanılarak hesaplanan sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo 5.11'de verildiği gibidir.

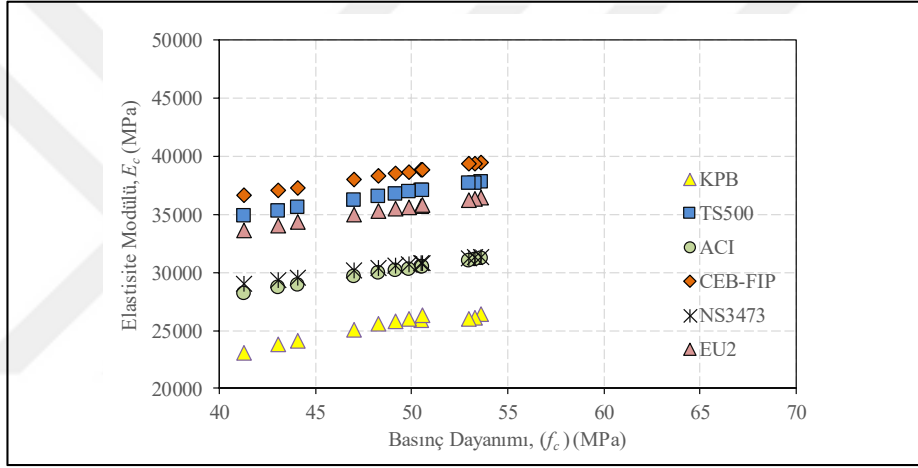
Tablo 5.11. Deneysel ve analitik elastisite modülü değerleri

Numune Adı	f _{c-100/200} (MPa)	f _{c-150/300} (MPa)	Elastisite Modülü (E _c , MPa)						
			Deneysel	TS500	ACI 363R-92	CEB-FIP	NS 3473	Eurocode 2	
KÜKÜRT BETON	KB-1	45,47	45,28	23657	35869	29230	37629	29819	34609
	KB-2	44,09	43,84	23462	35519	28872	37287	29531	34275
	KB-3	46,88	46,75	23785	36222	29560	37972	30106	34943
	KB-4	52,14	42,24	24713	37489	30885	39200	31125	36126
	KB-5	48,87	48,83	24060	36710	30089	38446	30501	35401
	KB-6	50,72	50,76	24504	37154	30543	38876	30858	35815
	KB-7	50,25	50,27	24742	37043	30429	38769	30769	35712
	KB-8	53,53	53,68	25311	37813	31216	39512	31382	36423
	KB-9	52,17	52,27	25075	37497	30893	39207	31131	36132
	KB-10	48,59	48,53	23750	36642	30019	38380	30447	35338
	KB-11	47,01	46,89	23562	36254	29623	38003	30133	34973
	KB-12	45,88	45,71	23307	35972	29336	37729	29903	34707
KÜKÜRT POLİMER BETON	KPB-1	41,63	41,28	23125	34881	28221	36662	29003	33662
	KPB-2	44,28	44,04	24083	35568	28923	37335	29572	34323
	KPB-3	43,32	43,03	23766	35320	28669	37092	29367	34085
	KPB-4	50,46	50,48	26913	37092	30479	38816	30808	35758
	KPB-5	49,20	49,17	25829	36790	30170	38523	30566	35476
	KPB-6	48,32	48,25	25538	36576	29952	38316	30393	35276
	KPB-7	53,44	53,59	26431	37792	31194	39492	31366	36404
	KPB-8	53,15	53,29	26132	37724	31125	39426	31312	36342
	KPB-9	52,84	52,97	26016	37653	31052	39358	31255	36276
	KPB-10	50,52	50,55	26275	37107	30495	38831	30820	35772
	KPB-11	49,86	49,86	26015	36949	30333	38677	30694	35624
	KPB-12	47,11	46,99	25064	36279	29648	38027	30153	34997
PORTLAND ÇİMENTO BETON	PÇB-1	49,91	46,78	30011	36228	29597	37978	30112	34949
	PÇB-2	44,73	44,51	30176	35682	29039	37446	29665	34431
	PÇB-3	43,77	43,51	30140	35438	28789	37208	29465	34198
	PÇB-4	53,38	53,53	32400	37779	31181	39479	31355	36392
	PÇB-5	55,14	55,37	33044	38184	31595	39869	31674	36763
	PÇB-6	55,33	55,57	32818	38227	31639	39910	31708	36802
	PÇB-7	66,36	67,07	40304	40617	34080	42185	33549	38939
	PÇB-8	65,66	66,34	39954	40471	33931	42048	33439	38811
	PÇB-9	65,22	65,88	38324	40380	33838	41961	33370	38731

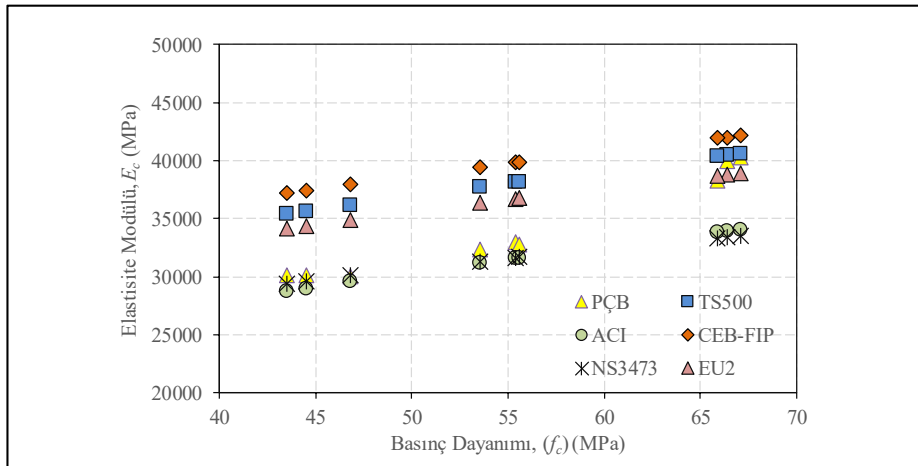
KB, KPB ve PÇB'lere ait deneysel sonuçlar ile standartlar tarafından önerilen analitik modeller kullanılarak hesaplanan elastisite modülü değerlerinin, beton basınç dayanımı değerine göre değişim grafiği sırasıyla Şekil 5.38, 5.39 ve 5.40'ta verildiği gibidir.



Şekil 5.38. KB’lerde $E_c - f_c$ ilişkisi grafiği

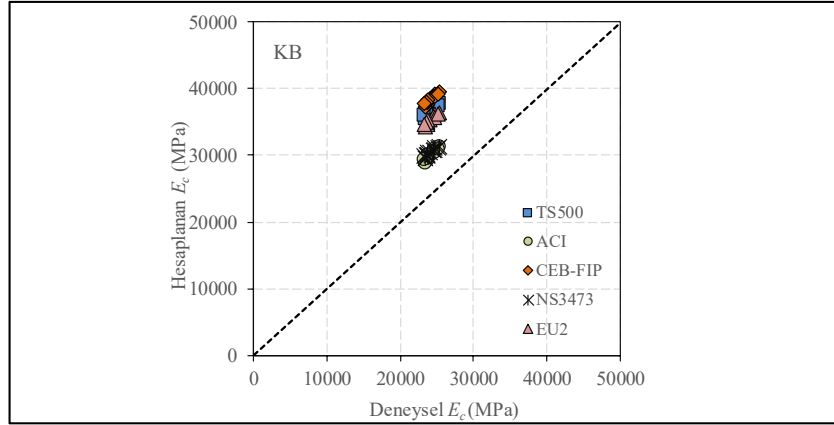


Şekil 5.39. KPB’lerde $E_c - f_c$ ilişkisi grafiği

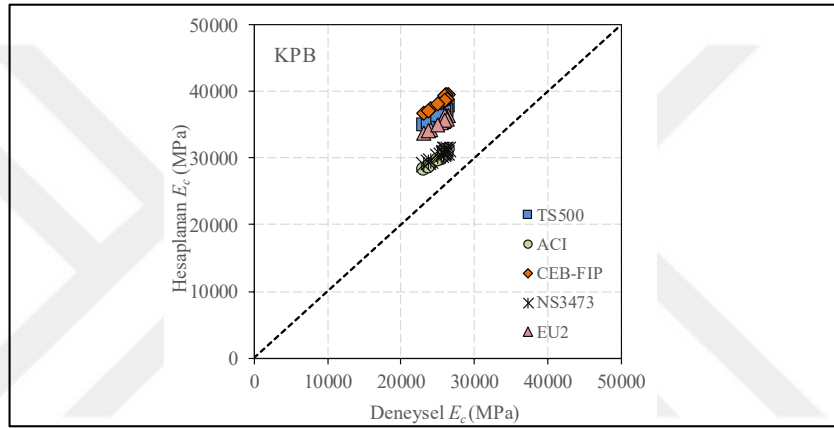


Şekil 5.40. PÇB’lerde $E_c - f_c$ ilişkisi grafiği

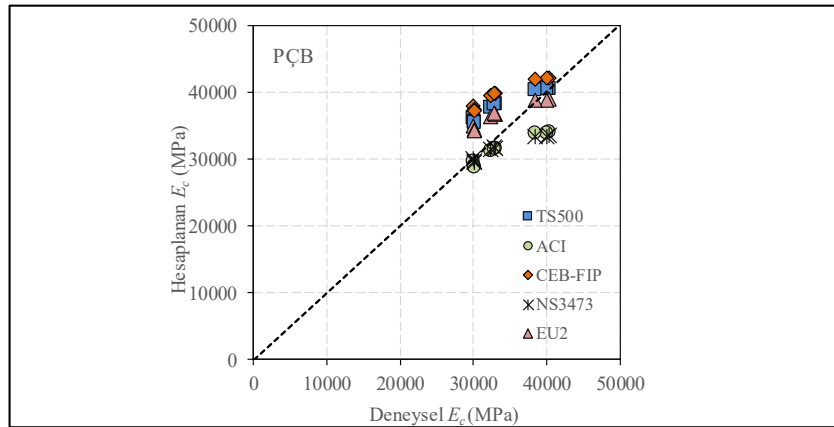
KB, KPB ve PÇB’lere ait deneysel sonuçlar ve hesaplanan sonuçların karşılaştırması sırasıyla Şekil 5.41, 5.42 ve 5.43’te verildiği gibidir.



Şekil 5.41. KB’lerde deneysel ve hesaplanan E_c karşılaştırması



Şekil 5.42. KPB’lerde deneysel ve hesaplanan E_c karşılaştırması

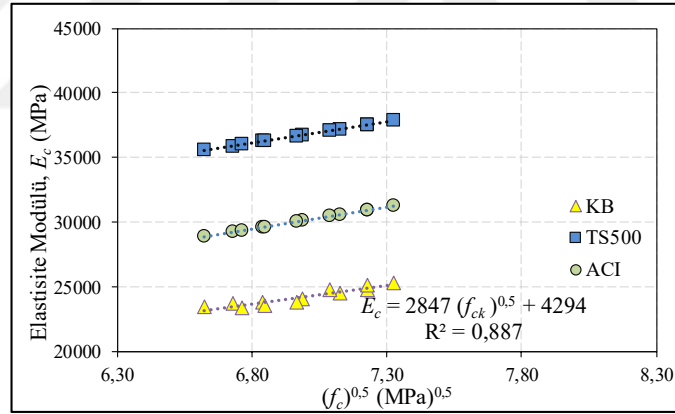


Şekil 5.43. PÇB’lerde deneysel ve hesaplanan E_c karşılaştırması

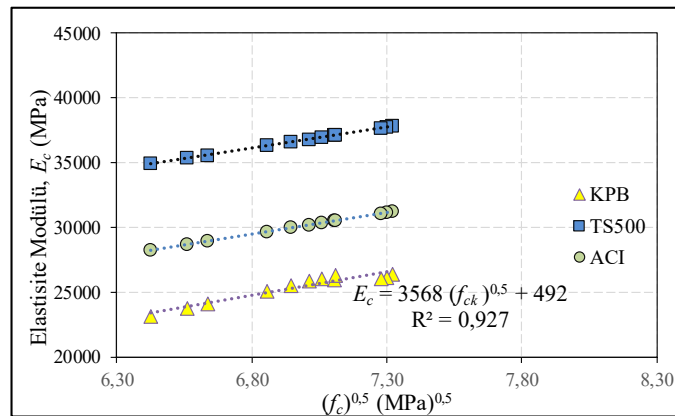
KB, KPB ve PÇB’lere ait deneysel sonuçlar ile standartlar tarafından önerilen analitik modeller kullanılarak hesaplanan elastisite modülü değerlerine ait grafiklerin tamamı göz önüne alındığında; önerilmiş olan analitik modellerin, Portland çimento betonlarında deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verirken, kükürt bağlayıcılı

betonlarda bu modellerin oldukça yüksek sonuçlar verdiği ve deneysel sonuçları temsil edemediği görülmektedir. KB, KPb ve PÇB'lere ait grafiklerin tamamı göz önüne alındığında Norveç standardı NS 3473 ve ACI tarafından önerilen analitik modellerin deneysel sonuçlara en yakın değerleri verdiği görülmektedir. CEB-FIP standardı tarafından önerilen analitik model deneysel sonuçlara göre en büyük sonuçları verirken TS500 ve Eurocode2 tarafından önerilen modeller tarafından hesaplanan elastisite modülü değerlerinin de deneysel sonuçlardan yüksek değerler verdiği görülmektedir. Hesaplanan elastisite modülü değerleri incelendiğinde CEB-FIP, TS500 ve Eurocode2 tarafından önerilen modeller birbirlerine yakın sonuçlar verirken, NS3473 ve ACI tarafından önerilen modeller de birbirlerine yakın sonuçlar verdiği belirlendi.

KB ve KPb'lerden elde edilen deneysel elastisite modülü, TS500 ve ACI tarafından önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan elastisite modülü değerleri ile basınç dayanımı ($f_c^{0,5}$) ilişkisi sırasıyla Şekil 5.44 ve 5.45'te verildiği gibidir.



Şekil 5.44. KB, TS500 ve ACI E_c - f_c ilişkisi



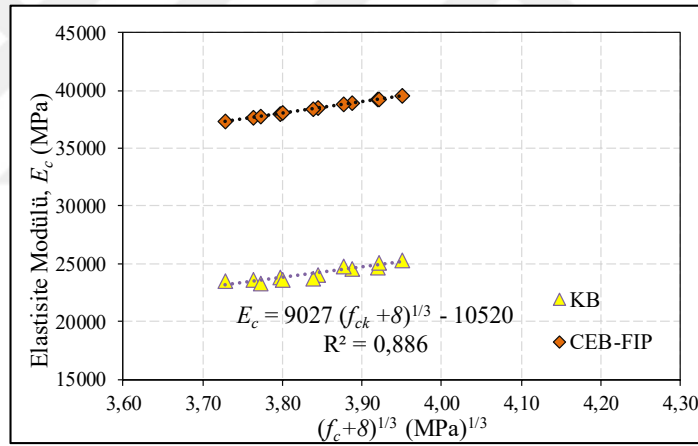
Şekil 5.45. KPb, TS500 ve ACI E_c - f_c ilişkisi

Bu çalışma kapsamında hazırlanan betonlardan elde edilen sonuçlar ile TS500 ve ACI tarafından önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan analitik sonuçlar karşılaştırıldığında, analitik modellerden elde edilen sonuçların kükürt bağlayıcılı betonlarda deneysel sonuçlara oranla daha büyük sonuçlar verdiği görülmektedir. Basınç dayanımı $(f_c)^{0,5}$ ile elastisite modülü arasındaki ilişki KB ve KPB'ler için sırasıyla Denklem (5.9) ve (5.10)'da verilen eşitlikler olarak bulundu.

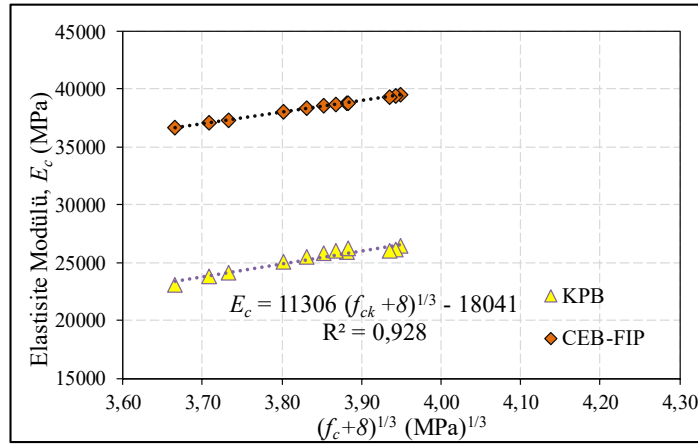
$$E_{c-KB}=2847 (f_c)^{0,5}+4294 \quad (5.9)$$

$$E_{c-KPB}=3568 (f_c)^{0,5}+492 \quad (5.10)$$

KB ve KPB'lerden elde edilen deneysel elastisite modülü, CEB-FIP tarafından önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan elastisite modülü değerleri ile basınç dayanımı $[(f_c+8)^{1/3}]$ ilişkisi sırasıyla Şekil 5.46 ve 5.47'de verildiği gibidir.



Şekil 5.46. KB ve CEB-FIP $E_c - f_c$ ilişkisi



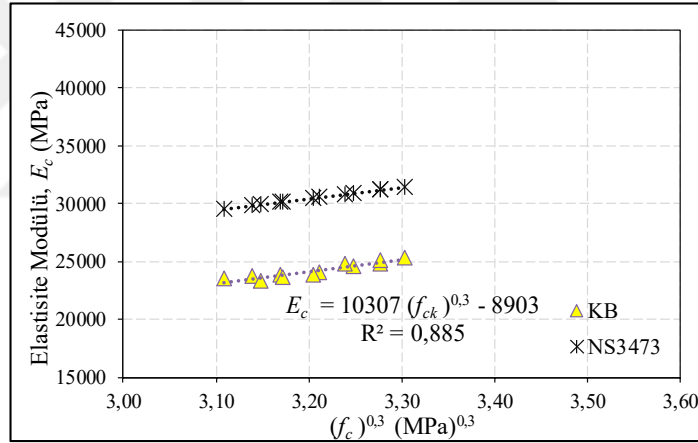
Şekil 5.47. KPB ve CEB-FIP $E_c - f_c$ ilişkisi

Bu çalışma kapsamında hazırlanan betonlardan elde edilen sonuçlar ile CEB-FIP tarafından önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan analitik sonuçlar karşılaştırıldığında analitik modelden elde edilen sonuçların kükürt bağlayıcılı betonlarda deneysel sonuçlara oranla daha büyük sonuçlar verdiği görülmektedir. Basınç dayanımı $[(f_c+8)^{1/3}]$ ile elastisite modülü arasındaki ilişki; KB ve KPB'ler için sırasıyla Denklem (5.11) ve (5.12)'de verilen eşitlikler olarak bulundu.

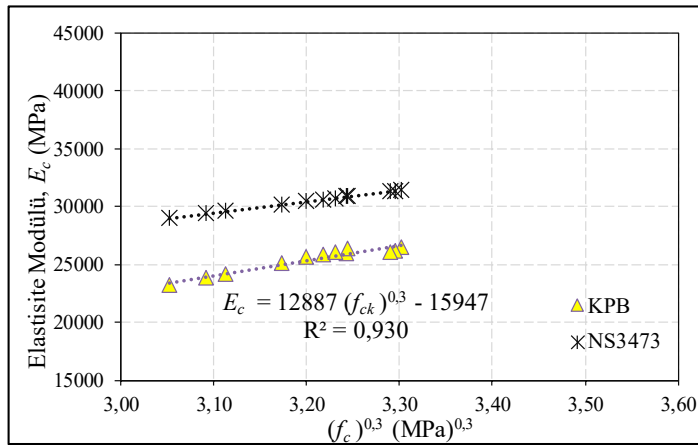
$$E_{c-KB}=9027 (f_c+8)^{1/3}-10520 \quad (5.11)$$

$$E_{c-KPB}=11306 (f_c+8)^{1/3}-18041 \quad (5.12)$$

KB ve KPB'lerden elde edilen deneysel elastisite modülü, NS3473 tarafından önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan elastisite modülü değerleri ile basınç dayanımı $(f_c^{0,3})$ ilişkisi sırasıyla Şekil 5.48 ve 5.49'da verildiği gibidir.



Şekil 5.48. KB ve NS3473 $E_c - f_c$ ilişkisi



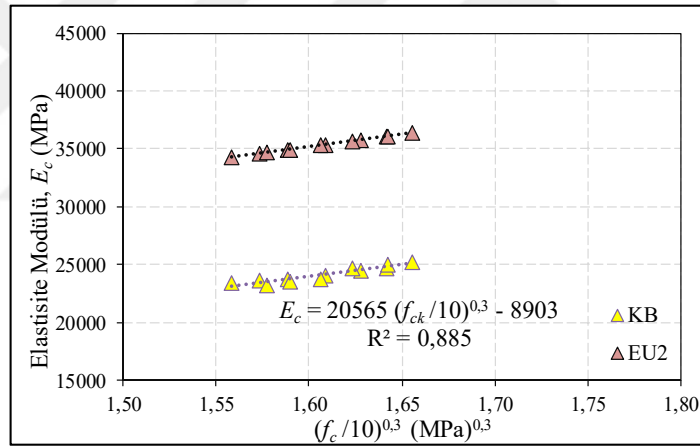
Şekil 5.49. KPB ve NS3473 $E_c - f_c$ ilişkisi

Bu çalışma kapsamında hazırlanan betonlardan elde edilen sonuçlar ile NS3473 tarafından önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan analitik sonuçlar karşılaştırıldığında, analitik modelden elde edilen sonuçların kükürt bağlayıcılı betonlarda deneysel sonuçlara oranla daha büyük sonuçlar verdiği görülmektedir. Basınç dayanımı $(f_c)^{0,3}$ ile elastisite modülü arasındaki ilişki; KB ve KPB'ler için sırasıyla Denklem (5.13) ve (5.14)'te verilen eşitlikler olarak bulundu.

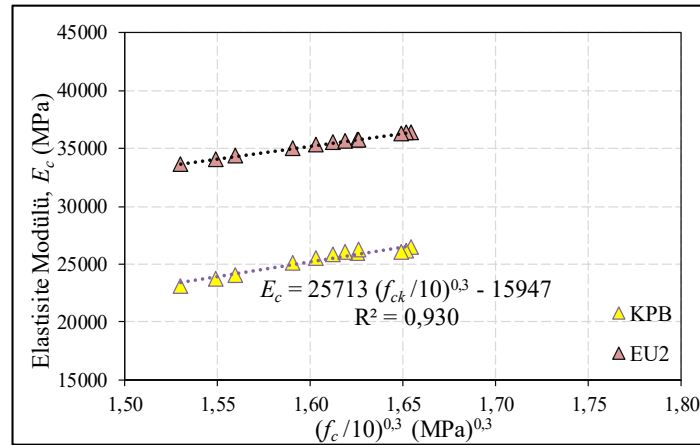
$$E_{c-KB}=10307 (f_c)^{0,3}-8903 \quad (5.13)$$

$$E_{c-KPB}=12887 (f_c)^{0,3}-15947 \quad (5.14)$$

KB ve KPB'lerden elde edilen deneysel elastisite modülü, Eurocode2 tarafından önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan elastisite modülü değerleri ile basınç dayanımı $(f_c/10)^{0,3}$ ilişkisi sırasıyla Şekil 5.50 ve 5.51'de verildiği gibidir.



Şekil 5.50. KB ve Eurocode 2 E_c - f_c ilişkisi



Şekil 5.51. KPB ve Eurocode 2 E_c - f_c ilişkisi

Bu çalışma kapsamında hazırlanan betonlardan elde edilen sonuçlar ile Eurocode 2 tarafından önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan analitik sonuçlar karşılaştırıldığında, analitik modelden elde edilen sonuçların kükürt bağlayıcılı betonlarda deneysel sonuçlara oranla daha büyük sonuçlar verdiği görülmektedir. Basınç dayanımı $(f_c)^{0,3}$ ile elastisite modülü arasındaki ilişki; KB ve KPB'ler için sırasıyla Denklem (5.15) ve (5.16)'da verilen eşitlikler olarak bulundu.

$$E_{c-KB}=20565(f_c/10)^{0,3}-8903 \quad (5.15)$$

$$E_{c-KPB}=25713(f_c/10)^{0,3}-15947 \quad (5.16)$$

6. BETONLARIN DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu bölüm kapsamında; mekanik özellikleri Bölüm 5’te belirlenen KB ve KPB’lerin dayanıklılık özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi amaçlandı. Bu amaç doğrultusunda dökümleri gerçekleştirilen kükürt bağlayıcılı beton numuneleri üzerinde aşınma dayanımı, basınç altında su işleme derinliği ve donma-çözülme deneyleri gerçekleştirildi. Karşılaştırma olarak Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan PÇB numuneleri kullanıldı.

6.1. Aşınma Dayanımı Deney Sonuçları

Yol yapımında kullanılan parke taşları kükürt bağlayıcılı betonlar kullanılarak Katar’da 2008 yılında uygulanmıştır. İlk saha uygulaması yine aynı yılda Ras Laffan Sanayi Şehri’nde 16 m² satranç oyun alanı yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tarihten itibaren özellikle 2005 yılında kurulan Katar Shell Araştırma ve Teknoloji merkezi (QSRTC) kükürt betonların yol kaplamasında prizma ve kilitli parke olarak alternatif kullanımları üzerinde oldukça kapsamlı araştırmalar gerçekleştirmişlerdir [111].

Bağlayıcı kükürt olan betonların yol kaplama malzemesi olarak kullanılmaya çalışılması nedeniyle bu deneysel çalışma kapsamında karışım hesapları gerçekleştirilen KPB’lerin aşınma dayanımı deneylerinin gerçekleştirilmesi amaçlandı. Karşılaştırma amacıyla kükürt beton ve Portland çimentosu betonları kullanıldı. Aynı zamanda 2 farklı firmadan prefabrik olarak temin edilen kilitli parke (KP) ile prizma parke (PP) numuneleri üzerinde de aynı deneyler gerçekleştirilerek karşılaştırma imkânı elde edildi. KP ve PP numunelerinin üretimi; temin edilen fabrikaların standart imalat prosedüründe kullandığı çimento, agrega ve beton karışım oranları kullanılarak, fabrikalarda bulunan parke üretim makinalarında hazırlandı. Numunelerim üstü naylon ile kapatılarak, deneylerin yapılacağı zamana kadar 28 günlük süre boyunca depolama alanında fabrikaların standart kür uygulaması uygulandı. 28 gün sonunda fabrikalardan alınan numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirildi.

KP ve PP'nin temin edildiği firmalarda kullanılan çimentolara ait mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 6.1'de verildiği gibidir.

Tablo 6.1. KP ve PP çimento özellikleri

Kimyasal Özellikler		
İncelenen Maddeler	KP (CEM I 42,5 R)	PP (CEM II B-M 32,5 R)
SiO ₂	22,90	31,37
Al ₂ O ₃	5,57	8,07
Fe ₂ O ₃	3,51	3,49
CaO	63,11	47,31
MgO	2,38	1,58
SO ₃	1,82	2,36
Fiziksel Özellikler		
Priz Başlangıcı (saat:dakika)	3:02	2:63
Priz Sonu (saat:dakika)	3:37	4:15
Özgül Yüzey (cm ² / gr)	3100	4105
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,11	2,95
Mekanik Özellikler		
7 günlük basınç dayanımı	44,7	28,5
28 günlük basınç dayanımı	55,6	36,1

KP ve PP'nin temin edildiği firmalarda kullanılan agregaların granülometrik özellikleri Tablo 6.2'de verildiği gibidir.

Tablo 6.2. KP ve PP agregalarının granülometrik bileşimleri

Elek Altına Geçen Malzeme (%)					
Elek (mm)	KP			PP	
	Kum	K.taş NO.I	K.taş NO.II	Kum	K.taş NO.I
16	100	100	88	100	100
8	100	94	7	100	100
4	98	10	1	99	56
2	68	3	1	94	3
1	32	2	0	78	0
0,5	21	1	0	52	0
0,25	11	1	0	10	0
İncelik Modülü	2,70	4,89	6,03	1,67	4,41

KP ve PP'nin temin edildiği firmalarda kullanılan beton karışım oranları Tablo 6.3'te verildiği gibidir.

Tablo 6.3. KP ve PP 1 m³ karışım oranları

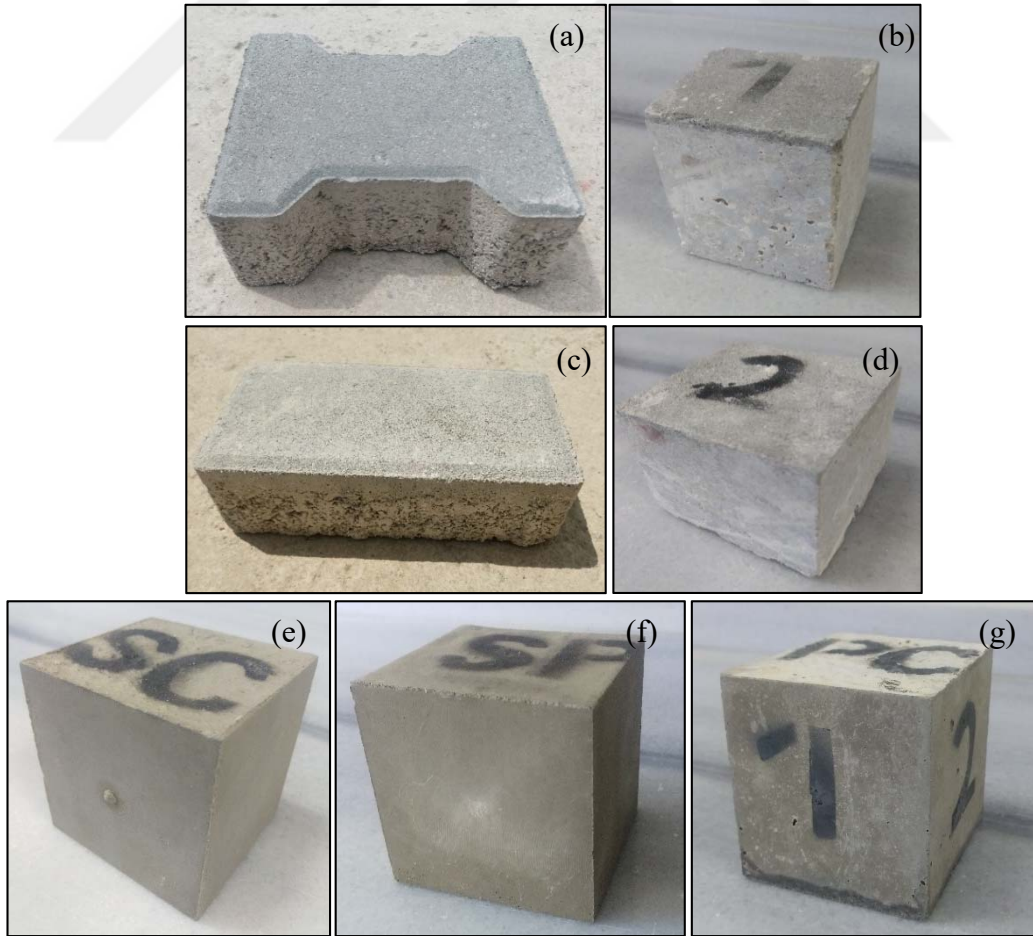
Malzeme	KP	PP
Su/Çimento oranı	0,40	0,46
Çimento (kg)	230	238
Su (lt)	92	109
Kum (kg)	656	906
Kırmataş NO I (kg)	678	913
Kırmataş NO II (kg)	904	-

Aşındırıcı maddeler, yaya ve/veya üzerindeki trafik yoğunluğuna bağlı olarak meydana gelen sürtünmeler nedeniyle yapı malzemesinin yüzeyinde oluşan kayıplara aşınma kaybı denir. Aşınma yavaş süreçler sonunda gerçekleşen fiziksel ve mekanik bir olaydır. Aşınma dayanımı özellikle yol kaplaması olarak kullanılan prefabrik parke taşları için oldukça önemlidir [215-216]. Bu nedenle deneysel çalışma kapsamında hazırlanmış olan kükürt beton, kükürt polimer beton ve Portland çimento betonları ile prefabrik olarak temin edilen kilitli parke ve prizma parke numuneleri üzerinde aşınma deneylerinin gerçekleştirilmesi amaçlandı. Deney numunesinin, aşındırıcı toz dökülen döner bir tambur üzerinde 0,06 N/mm² basınca maruz kaldığı durumda 352 devir (22devir, 16 döngü) döndürüldükten sonra oluşan aşınma sonrası hacminde meydana gelen azalmaya böhme aşınma kaybı değeri denilmektedir [217-219]. Böhme aşınma deneyinde kullanılan alet Şekil 6.1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 6.1. Böhme aşınma aleti genel görünümü

Böhme aşınma kaybının bulunması amacıyla TS 2824 EN 1338'e (Zemin döşemesi için beton kaplama blokları-Gerekli şartlar ve deney metotları) uygun olarak kenar uzunlukları $71 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$ olan KB, KPB ve PÇB'ler için küp biçiminde deney numuneleri hazırlandı [220]. KB, KPB ve PÇB'lerin dökümleri $71 \times 71 \times 71 \text{ mm}$ 'lik aşınma numunesi kalıpları kullanılarak gerçekleştirildi ve dökümler Bölüm 5'te anlatılan döküm prosedürüne uygun olarak yapıldı. Yol kaplaması olarak kullanılan KP ve PP numunelerinin dökümleri ve kütleme işlemleri temin edildikleri fabrikada gerçekleştirildi. 28 gün sonunda prefabrik olarak temin edilen KP ve PP numuneleri temin edildikten sonra boyutları $71 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$ olacak şekilde kristal uçlu mekanik testere yardımıyla kesilerek aşınma deneyleri için gerekli numuneler elde edildi. Tüm beton numunelerine ait görüntüler Şekil 6.2'ye verildiği gibidir. Şekil 6.2 (a)'da kilitli parke genel görünümü ve (b)'de küp numune hali, (c)'de prizma parke ve (d)'de küp numune hali ile (e) KB, (f) KPB ve (g) PÇB numuneler görülmektedir. Her bir grup betondan 15 adet küp numune olmak üzere toplam 45 adet numune hazırlandı.



Şekil 6.2. Aşınma numuneleri

Deneye başlamadan önce deney numunesi 0,1 gr hassasiyetli terazi ile tartılmaktadır. Ayrıca elektronik kumpas yardımıyla tüm boyutlar kontrol edilmektedir. 30 devir/dk. ± 1 devir/dk sabit hızla dönmekte olan 750 mm çapındaki döner disk üzerindeki deney izi denilen bölgeye aşındırıcı zımpara tozu dökülmektedir. Aşındırma tozu olarak F80 (150-212 mikron) tane çapı dağılımına sahip korund (kristalize Al_2O_3) kullanılmaktadır. Döner disk üzerindeki yuvaya yerleştirilen numune çelik manivela aracılığı ile 294 ± 3 N'luk yük ile yüklenmektedir. Alet çalıştırılarak döner diskin dönmesi sağlanır. Üzerinde belirli bir yük bulunan ve deney izi üzerinde bulunan numunede aşındırıcı toz nedeniyle aşınma başlamaktadır. Dönme sırasında deney izi dışarısına çıkan aşındırıcı tozun bir fırça yardımıyla deney izi üzerine toplanması sağlanmalıdır. Döner disk numunenin bir yüzeyinde 22 tur olacak şekilde döndürülür. Döner disk durdurulur diskin üzeri ve özellikle deney izi düzgün bir şekilde temizlenir. Daha sonra numune 90° döndürülerek yuvasına konulur ve deney izi üzerine yeniden $20 \text{ gr} \pm 0,5 \text{ gr}$ aşındırıcı toz dökülerek deney tekrarlanır. Bu işlem numunenin her yüzeyinde 22 devir ve 16 çevrim olacak şekilde toplam 352 devir yapılarak tamamlanır. Böhme aşınma kaybı değerinin bulunmasında deneylere başlamadan önce elektronik kumpas yardımıyla numunelerin boyutları ve 0,1 gr hassasiyetli terazi yardımıyla da numunelerin aşınma öncesi ağırlıkları belirlendi. Aynı işlem 16 çevrim sonrasında aşınan numuneler için de tekrarlanarak numunelerin hacmindeki azalma (ΔV) Denklem (6.1) kullanılarak hesaplandı.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho r} \quad (6.1)$$

Burada Δm 16 çevrim sonrası numunede meydana gelen kütle kaybını, ρr ise numunenin yoğunluğunu temsil etmektedir.

Hazırlanmış olan küp numunelerinin yarmada çekme dayanımları TS 2824-2003'te verilmiş olan Denklem (6.2) ve (6.3) kullanılarak hesaplandı.

$$T = \frac{0,637 k P_t}{A} \quad (6.2)$$

$$A = l t \quad (6.3)$$

Burada A kırılma alanı, l bloğun üst ve altından yapılan iki ölçmenin ortalaması olarak kesit uzunluğu, t bloğun ortadan ve diğer iki uçtan yapılan üç ölçmenin ortalaması olarak kırılma düzlemindeki kalınlık değeridir. Yarmada çekme dayanımı (T) kırılma yükü (P_t) ve kırılma alanının fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Bu formülde kullanılan k ise parke taşı kalınlığı için düzeltme katsayısıdır ve bu değere ilişkin veriler TS 2824 EN 1338'te yer alan Çizelge F.1'den alınmaktadır.

TS 2824 EN 1338'te verilmiş olan beton kaplama bloklarının limit değerlerinin karşılaştırılması ve kükürt bağlayıcılı betonların yol kaplama bloğu olarak kullanılmasının uygunluğunun değerlendirilebilmesi amacıyla ayrıca küp numunelerin ağırlıkça su emme oranları (S_a) ve poroziteleri (n) de belirlendi. Tüm numuneler değişmez kütleye ulaşıncaya kadar suya batırılarak bekletildi. Suda bekletme prosedüründe numuneler arasındaki mesafenin minimum 15 mm ve üstlerindeki su tabakası kalınlığının ise minimum 20 mm olmasına dikkat edildi. Suda bekletme süresi minimum 3 gün olarak alındı. 24 saat arayla arka arkaya yapılan iki tartım arasındaki farkın % 0,1'den daha düşük olması durumunda numunelerin değişmez kütleye ulaştığı kabul edilerek numuneler su havuzundan çıkarıldı. Numunelerin yüzeylerindeki fazla su nemli bir havlu yardımıyla alındıktan sonra numuneler tartılarak doymun ağırlıkları (M_d) belirlendi. Daha sonra numunelerin kuru ağırlıklarının belirlenmesi için numunelerin laboratuvar ortamında beklemeye alındı. Kurutma işlemi için kükürt bağlayıcılı betonlarda bozunmalara sebebiyet verebileceğinden dolayı etüv kullanılmadı. Tüm numuneler ısıtıcı kullanılarak ısıtılmış olan sabit 30°C'deki kapalı bir odada bekletilerek art arda tartımlar ile değişmez kütleye gelinceye kadar beklendi. Numunelerin değişmez kütleye ulaştığı belirlendikten sonra kuru ağırlıkları (M_k) belirlendi. Ağırlıkça su emme oranı ve porozite değerleri Denklem (6.4), (6.5) ve (6.6) kullanılarak belirlendi.

$$S_a = \frac{M_d - M_k}{M_k} 100 \quad (6.4)$$

$$V_v = \frac{M_d - M_k}{\rho_w} \quad (6.5)$$

$$n = \frac{V_v}{V} 100 \quad (6.6)$$

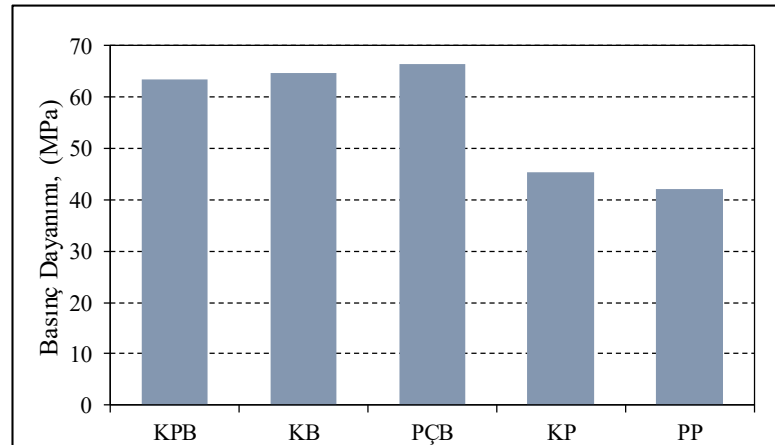
Burada V görünen hacim, V_v boşlukların hacmi ve ρ_w suyun özgül ağırlığıdır.

Tüm beton numunelerine ait mekanik deney, aşınma deneyi ve su emme deneyi sonuçları Tablo 6.4'te verildiği gibidir. Basınç ve yarmada çekme dayanımı değeri 3'er adet, böhme aşınma kaybı deney sonuçları 6'şar adet ve ağırlıkça su emme oranı deneyi 3'er küp numunenin deney sonuçlarının ortalaması alınarak belirlendi.

Tablo 6.4. Küp numunelere ait deney sonuçları

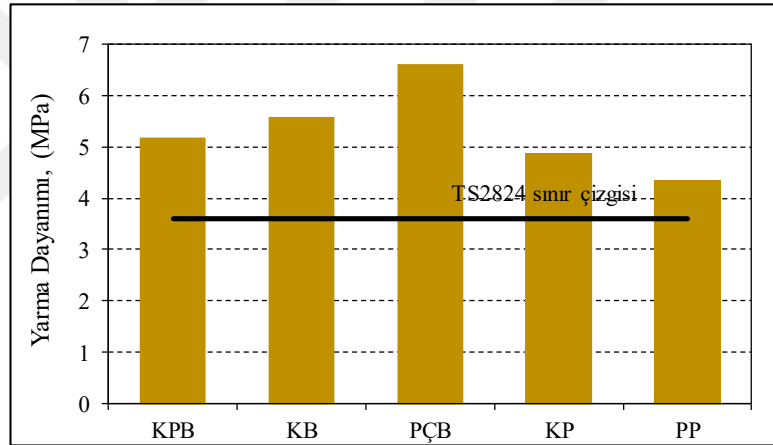
Beton Türü	Basınç Dayanımı (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Hacim Kaybı (cm ³ /50cm ²)	Ağırlık Kaybı (%)	Ağırlıkça Su Emme (%)	Porozite (%)
KB	64,71	5,17	2,65	0,7	1,99	4,45
KPB	63,52	5,57	1,90	0,5	0,21	0,95
PÇB	66,44	6,61	9,82	2,4	1,76	4,14
KP	45,44	4,89	13,16	3,0	2,08	4,77
PP	42,10	4,34	14,04	4,1	2,33	5,33

Tüm beton numunelerine ait basınç dayanımı değerleri incelendiğinde kükürt bağlayıcılı betonların (KB ve KPB) ortalama basınç dayanımlarının prefabrik olarak temin edilen beton parke taşlarının basınç dayanımlarından yaklaşık olarak %30 oranında daha yüksek olduğu görüldü. Ticari olarak temin edilen KP ve PP'nin basınç dayanımı değerleri sırasıyla 45,44 ve 42,10 MPa olarak bulundu. KB ve KPB'lerin basınç dayanımları sırasıyla 64,71 ve 63,52 MPa bulunurken aynı dayanımda üretilmesi hedeflenen PÇB'lerin basınç dayanımı değeri ise 66,41 MPa olarak bulundu. Tüm betonlara ait basınç ve yarmada çekme dayanımı grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 6.3'te verildiği gibidir.



Şekil 6.3. Basınç dayanımı deney sonuçları

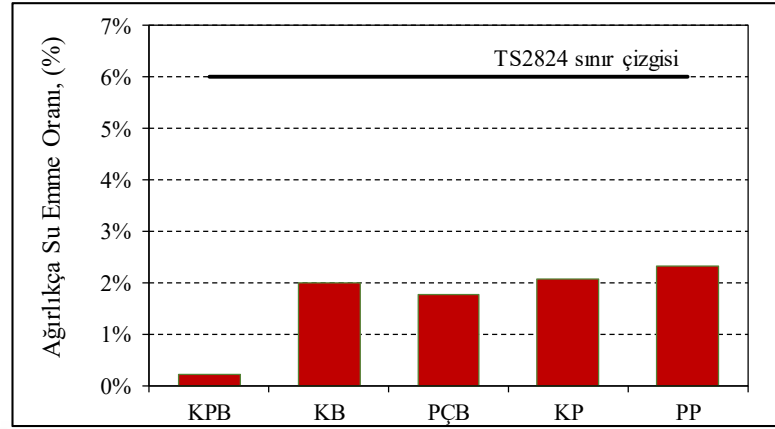
Tüm beton numunelere ait yarmada çekme dayanımı değerleri Şekil 6.4'te verildiği gibidir. KP ve PP'nin yarmada çekme dayanımı değerleri sırasıyla 4,89 ve 4,34 MPa olarak bulundu. KB ve KPB'lerin yarmada çekme dayanımları sırasıyla 5,17 ve 5,57 MPa bulunurken aynı dayanımda üretilmesi hedeflenen PÇB'lerin yarmada çekme dayanımı değeri ise 6,61 MPa olarak bulundu. TS 2824-2003'te beton parke taşlarının yarmada çekme dayanımının grup ortalamasının 3,6 MPa'nın altında olmaması sınır şartı bulunmaktadır. Bu limit değer ve küp beton numunelere ait ortalama grup değerleri göz önünde bulundurulduğunda tüm beton türlerinin şartnamede belirtilen sınır değeri sağladığı görülmektedir. Tüm beton numunelerine ait mekanik özellikler incelendiğinde kükürt bağlayıcılı betonların (KB ve KPB) ortalama yarmada çekme dayanımlarının prefabrik olarak temin edilen beton parke taşlarının yarmada çekme dayanımlarından yaklaşık olarak %14 oranında daha yüksek olduğu görüldü.



Şekil 6.4. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Tüm beton numunelere ait ağırlıkça su emme oranı değerleri Şekil 6.5'te verildiği gibidir. KP ve PP'nin ağırlıkça su emme oranları sırasıyla %2,08 ve %2,33 olarak bulundu. KB ve KPB'lerin ağırlıkça su emme oranları sırasıyla %1,99 ve %0,21 olarak bulunurken aynı dayanımda üretilmesi hedeflenen PÇB'lerin ağırlıkça su emme oranı ise %1,76 olarak bulundu. Laboratuvarda üretilen kükürt betonlar ve Portland çimento betonlarının iki farklı firmadan temin edilen beton parke taşlarına oranla daha boşluksuz olduğu ve su emme oranlarının daha düşük olduğu görülmektedir. TS 2824-2003'te beton parke taşlarının ağırlıkça su emme oranlarının grup ortalamasının %6'nın altında olmaması sınır şartı bulunmaktadır. Bu limit değer ve küp beton numunelere ait ortalama grup değerleri göz önünde bulundurulduğunda tüm beton türlerinin

şartnamede belirtilen sınır değeri sağladığı görülmektedir. En düşük su emme oranı modifiye edilmiş kükürt kullanılarak hazırlanan KPB’lerde elde edildi.

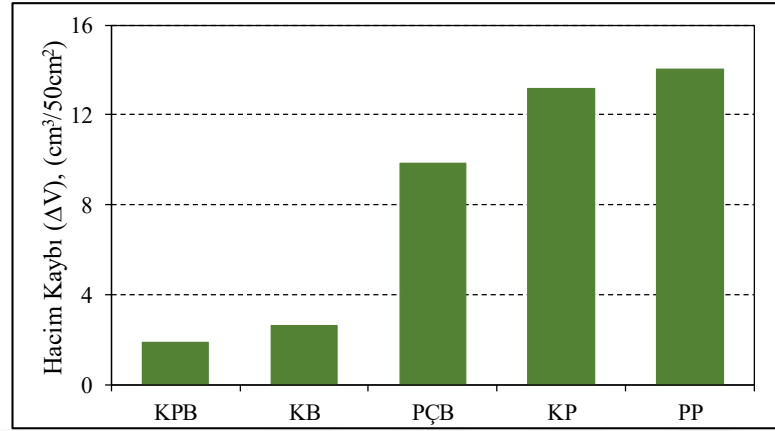


Şekil 6.5. Ağırlıkça su emme oranları

Al-Otaibi ve diğ. tarafından 2018 yılında yapılan kükürt polimer betonların beton blok olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde, üretmiş oldukları kükürt polimer betonların su emme oranlarını %0,28 ve %0,88 aralığında buldukları görülmektedir [90]. Bu deneysel çalışma kapsamında üretilen kükürt polimer betonların ağırlıkça su emme oranları yapılmış olan deneysel çalışma ile paralellik göstererek %0,21 olarak bulundu. KB’lerin su emme oranları %1,76 olarak bulunan PÇB’lerden daha kötü sonuç vererek %1,99 olarak bulundu. Bunun nedeni saf kükürt kullanılarak hazırlanan betonlarda soğuma sırasında kristal yapıdaki ani değişiklikler nedeniyle iç gerilmelerin oluşması ve çatlakların meydana gelmesidir. Yapılmış olan deneysel çalışmalarda saf kükürt kullanılarak hazırlanan betonların mekanik özellikleri oldukça iyi sonuçlar verirken dayanıklılık özelliklerinin oldukça kötü olduğu ve kısa süre sonunda parçalanmalar ve göçmelerin meydana geldiği belirlenmiştir [3, 27, 90].

Tüm beton numunelere ait Böhme aşınma deneyi sonucunda elde edilen hacim kaybı değerleri Şekil 6.6’da verildiği gibidir. KP ve PP’nin aşınmayla hacim kaybı değeri sırasıyla 13,16 ve 14,04 cm³/50cm² olarak bulundu. KB ve KPB’lerin aşınmayla hacim kaybı değeri sırasıyla 2,65 ve 1,90 cm³/50cm² olarak bulunurken aynı dayanımda üretilmesi hedeflenen PÇB’lerin aşınmayla hacim kaybı değeri ise 9,82 cm³/50cm² olarak bulundu. KP ve PP küp numunelerinde meydana gelen aşınmayla hacim kaybı

değerinin KB ve KPB'lerin kullanılması sonucu hacim kaybının yaklaşık olarak %80 oranında azaltılabileceği belirlendi.



Şekil 6.6. Böhme aşınma deneyi sonuçları

KB ve KPB betonların aşınma sonucu yüzeylerinde meydana gelen aşınmaların benzer olduğu deneyler sırasında gözlemlendi. Bunun sonucu olarak her iki beton türünün aşınma sonucunda oluşan hacim kaybı değerlerinin birbirlerine yakın değerler verdiği belirlendi. Bu deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen kükürt modifikasyonunun betonların aşınma yüzeyinde etkin bir sonuç vermediği ama uzun süreli dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği belirlendi.

Bu deneysel çalışma kapsamında yapılmış olan böhme aşınma kaybı ve ağırlıkça su emme kapasitesi deney sonuçları incelendiğinde kükürt beton ve kükürt polimer betonların Portland çimento betonları ve beton parke taşlarına oranla daha düşük su emme kapasitesine sahip olduğu ve aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğu belirlendi. Modifiye edilmiş kükürt kullanılarak hazırlanan kükürt polimer betonların saf kükürt kullanılarak hazırlanan kükürt polimer betonlara göre daha az boşluk ve su emme oranlarına sahip olduğu belirlendi.

6.2. Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deney Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde KB, KPB ve PÇB'lerin basınç altında su işleme derinliklerinin belirlenmesi amaçlandı. Bu nedenle KB, KPB ve PÇB'lerin dökümleri 100/200 mm'lik silindir kalıp kullanılarak gerçekleştirildi. Her bir grup betondan 5'er adet silindir numune olmak üzere toplam 15 adet numune hazırlandı. KB, KPB ve PÇB'lerin dökümleri Bölüm 5'te anlatılan döküm prosedürüne uygun olarak

gerçekleştirildi. PÇB'lerin basınç dayanımlarının KB ve KPB basınç dayanımlarına yakın bir dayanımda çıkması için bu betonların dökümlerinde azami özen gösterildi. KB ve KPB'ler diğer deneyler için uygulanan standart soğuma prosedürü sonrası oda sıcaklığında 28 gün süre ile muhafaza edildi. Portland çimento betonları ise 28 gün boyunca kür havuzlarında bekletildi. PÇB'ler değişmez ağırlığa ulaşarak kontrollü olarak kurutulduktan sonra deneye tabi tutuldu.

Sertleşmiş beton numunelerinde su işleme derinliğinin belirlenmesi amacıyla TS EN 12390-8 standardına uygun olan Şekil 6.7'de gösterilen 6 numune kapasiteli deney aleti kullanıldı [221]. Tüm numunelerin basınca maruz kalacak yüzeyleri deney aletine yerleştirilmeden önce tel fırça ile temizlenerek pürüzlendirildi. Tüm numuneler deney aletine yerleştirildikten sonra 72 saat (3 gün) boyunca (500±50) kPa su basıncına maruz bırakıldı. Deney süresince numuneler gözlem altında tutularak yüzeylerinden su kaçışının gerçekleşmediğinden emin olundu. Deney süresi bittikten sonra numuneler deney aletinden alınarak basınç uygulanan yüzeye dik olarak ortadan ikiye ayrıldı. Parçalanmış numunenin iç kısmına işlemiş olan suyun sınırlarının daha belirgin olarak görülmesi amacıyla bir süre kurumaması beklendikten sonra işlemiş olan suyun sınırları kalemle işaretlendi. Bu sınırlar dijital kumpas yardımıyla ölçülerek suyun işlediği maksimum derinlik ölçüldü [222-224].



Şekil 6.7. Su işleme derinliği deneyi

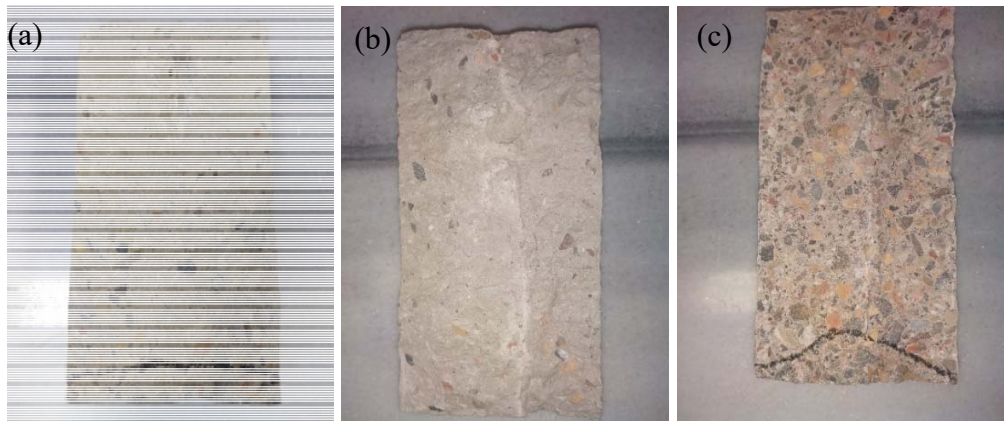
KB, KPB ve PÇB numunelerine ait 28 günlük basınç dayanımı ortalama değerleri ve 3 gün süre ile basınç altında su işleme derinliği deneyleri gerçekleştirildikten sonra her

bir grup numuneye ait maksimum su işleme derinliği ve Tablo 6.5'te verildiği gibidir. Deneysel süresi sonunda KPB numunelerinde su işleme derinliği sıfır olarak belirlendi. KB numunelerinde 23,16 mm su işleme derinliği ölçülürken en yüksek su işleme derinliğinin 27,72 mm olarak Portland çimento numunelerinde olduğu belirlendi. Kükürt bağlayıcılı betonların su işleme derinliğinin geleneksel Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan betonlara göre daha az olduğu belirlendi. KPB numunelerinde TS EN 12390-8 standardında belirtilen 3 gün'lük deneysel süresi içerisinde herhangi bir su girişi olmadığından basınçlı su işleme derinliği deneyleri tüm beton tiplerinden 1'er adet numune için 36 gün boyunca devam ettirildi. Su işleme derinliğinde bir değişim olup olmadığı deneysel süresince ölçü mezüründen okunarak takip edildi. KPB numunesi ölçü mezüründe değişiklik oluştuğunda deneysel süresi sonlandırılarak tüm numunelere ait su işleme derinliği değerleri belirlendi. Bu değerler Tablo 6.5'te verildiği gibidir.

Tablo 6.5. Tüm betonlara ait basınç dayanımı ve su işleme derinliği değerleri

Beton Türü	28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Su işleme derinliği (mm)	
		3 gün	36 gün
KB	51,18	23,16	51,01
KPB	53,24	0,00	5,39
PÇB	56,18	27,72	55,46

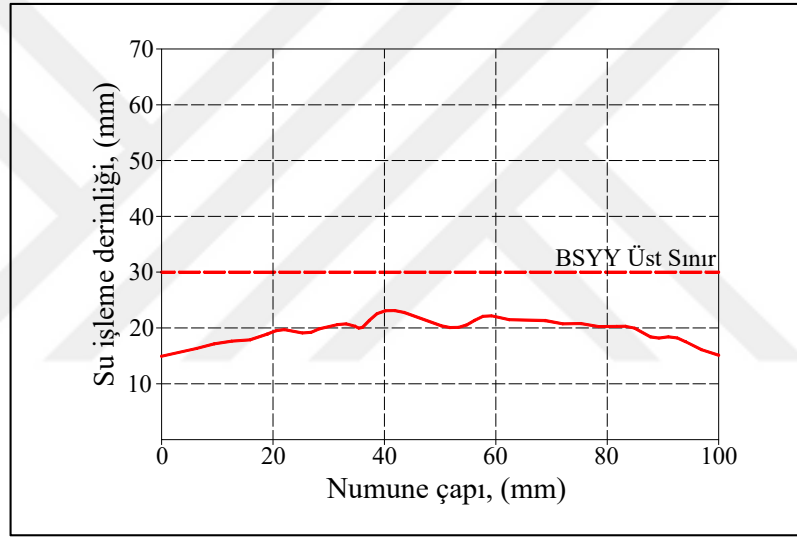
KB, KPB ve PÇB numuneleri üzerinde 3 gün süre ile gerçekleştirilen basınç altında su işleme derinliği deneyleri sonucunda elde edilen maksimum su işleme derinliğine ait görüntüler sırasıyla Şekil 6.8'de verildiği gibidir.



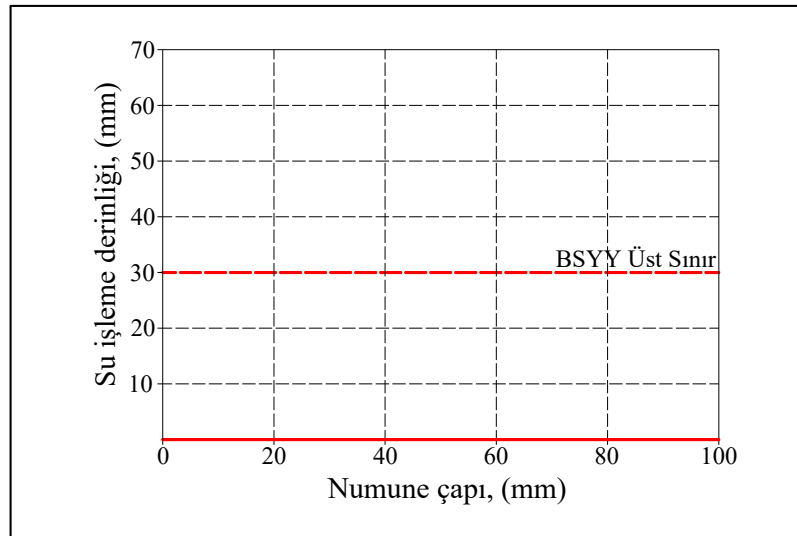
Şekil 6.8. Basınçlı su işleme derinliği (3 gün) (a) KB, (b) KPB ve (c) PÇB

KB, KPB ve PÇB numunelerine ait görüntüler ölçeklendirilerek yüksek çözünürlüklü fotoğraf makinası ile görüntülendikten sonra bilgisayar programı aracılığıyla

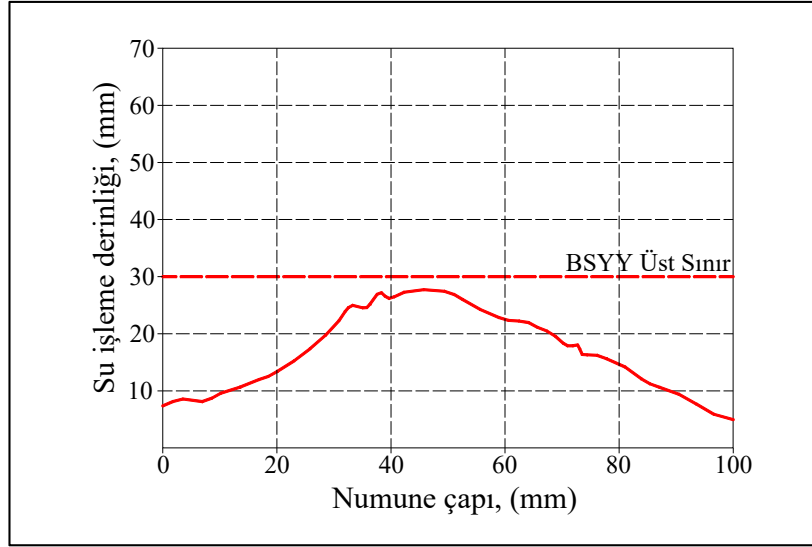
dijitalleştirildi. Görüntü işleme yöntemi kullanılarak su işleme derinliği grafikleri oluşturuldu. KB, KPB ve PÇB'lere ait su işleme derinliği grafikleri sırasıyla Şekil 6.9, 6.10 ve 6.11'de verildiği gibidir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 27 Ekim 2017 tarihinde Resmi Gazete'de yayınlanan ve binalarda su yalıtımını zorunlu kılan "Binalarda Su Yalıtımı Yönetmeliği" (BSYY) kapsamında basınçlı su işleme değeri üst limiti tanımlanmıştır. Yönetmelikte, yapısal yalıtımın sağlanacağı yapılarda TS EN 12390-8 standartına uygun olarak gerçekleştirilen basınçlı su işleme derinliği değerinin en fazla 30 mm olabileceği belirtilmiştir. BSYY kapsamında tanımlanmış olan 3 günlük basınçlı su işleme derinliği üst limiti aşağıda verilen grafiklerde gösterilmektedir [225].



Şekil 6.9. KB numunesi su işleme derinliği (3 gün) grafiği



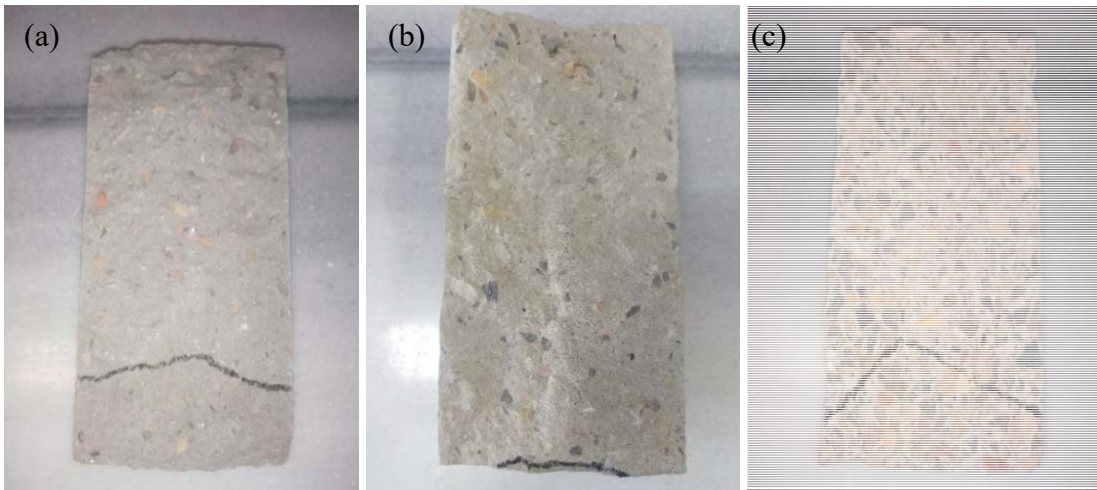
Şekil 6.10. KPB numunesi su işleme derinliği (3 gün) grafiği



Şekil 6.11. PÇB numunesi su işleme derinliği (3 gün) grafiği

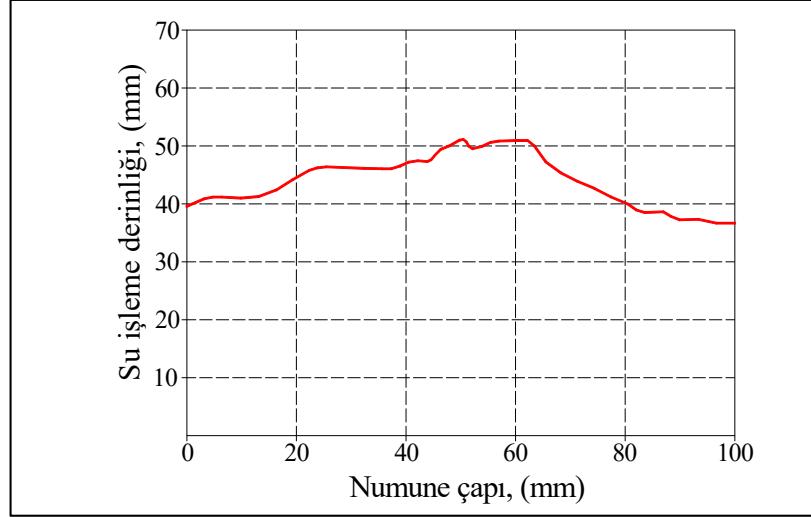
KB, KPb ve PÇB numunelerine ait 3günlük basınçlı su işleme derinliklerinin, BSYY'de sınır değeri olarak tanımlanan 30 mm'nin altında kalarak tüm betonların yönetmeliği sağladıkları belirlendi.

KB, KPb ve PÇB numuneleri üzerinde 36 gün süre ile gerçekleştirilen basınç altında su işleme derinliği deneyleri sonucunda elde edilen maksimum su işleme derinliğine ait görüntüler Şekil 6.12'de verildiği gibidir.

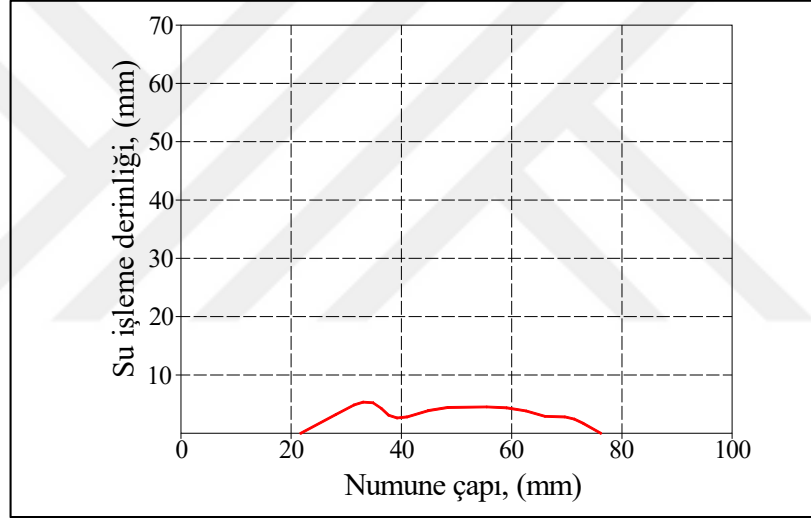


Şekil 6.12. Basınçlı su işleme derinliği (36 gün) (a) KB, (b) KPb ve (c) PÇB

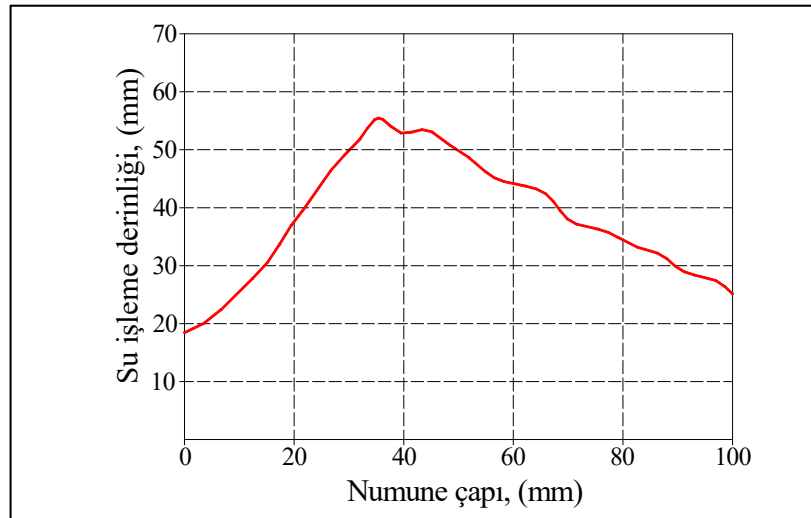
Görüntü işleme yöntemi kullanılarak su işleme derinliği grafikleri oluşturuldu. KB, KPb ve PÇB'lere ait su işleme derinliği grafikleri sırasıyla Şekil 6.13, 6.14 ve 6.15'te verildiği gibidir.



Şekil 6.13. KB numunesi su işleme derinliği (36 gün) grafiği



Şekil 6.14. KPB numunesi su işleme derinliği (36 gün) grafiği



Şekil 6.15. PÇB numunesi su işleme derinliği (36 gün) grafiği

Kısa ve uzun dönemli olarak gerçekleştirilen basınç altında su işleme derinliği tayini deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda Portland çimento betonlarının kükürt bağlayıcılı betonlara göre su geçirgenliğinin daha fazla olduğu belirlendi. KB'lerde su geçirgenliği PÇB'lere göre daha düşük seviyede olmasına karşın modifiye edilmiş kükürt kullanılması durumunda oluşan termal deformasyonların kısıtlanması sonucu KP'Blerin su geçirgenlik seviyesinin oldukça düşük mertebelerde kaldığı belirlendi.

6.3. Donma-Çözülme Deneyi Sonuçları

Tekrar eden donma-çözülme çevrimleri, beton yapıların işlevselliklerini servis ömürleri boyunca bozulmadan koruyabilmelerinin önündeki en büyük fiziksel etkilerden biridir. Özellikle gece gündüz sıcaklık farklarının fazla olduğu bölgelerdeki beton binaların dış cephelerinin açıkta kalan kısımları, barajlar, yol kaplaması olarak kullanılan betonlar, hava alanı pist betonları gibi atmosfer etkilerine açık olan beton elamanlarda donma-çözülme etkisi oldukça önemlidir. Betonun donma-çözülme tekrarları altında tehlike ile karşı karşıya kalmasına neden olan faktör betonun boşluklu yapısı ve geçirgenliği olarak gösterilebilir [226-230].

Donma-çözülme etkisinin betona verdiği zararda su önemli bir rol almaktadır. Beton karışımına başlangıçta konulan su beton bünyesinde tutulmuş veya sertleşmiş beton içerisine sonradan girmiş de olabilir. Donma-çözülme çevrimlerinin meydana getirdiği hasar, beton içerisinde bulunan suyun daha fazla olması dolayısıyla taze beton veya erken yaştaki beton üzerinde daha fazladır. Betonda donma, kademeli olarak gelişmektedir. Betonda ısı transferinin hızı, henüz donmamış olan suda çözülmüş bulunan alkalilerin konsantrasyonlarının artışı ve donma noktasının boşluğun boyutuna göre değişmesi; bu durumun sebepleri olarak göstermek mümkündür. İlk olarak büyük boşluklarda bulunan suda donma başlar ve daha sonra küçük boşluklarda bulunan suya doğru giderek yayılır. Çözülme takip eden yeniden donma sonucunda ilk genleşme miktarı artarak devam eder. Bu nedenden dolayı arka arkaya meydana gelen donma-çözülme çevrimlerinin etkisi, çözülmenin meydana gelmediği uzun süreli don etkisine oranla çok daha etkilidir. Bu tekrarlanan durum, bir önceki donma çevrimi sırasında oluşmuş olan ince bir çatlakın tekrar donma sırasında daha da genişleyip büyümesiyle açıklanabilir. Genleşme sırasında çatlak çevresinde meydana gelen gerilmelerin betonun çekme dayanımı değerini aşması sonucunda betonda

çatlama, parçalanma ve bir adım sonrası olarak kabuk atma şeklinde bozunmalara neden olur [230-232].

Betonun don etkisine karşı dayanıklılığının belirlenmesi amacıyla ASTM C-666 “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing” ve Rilem TC 117-FDC’nin önerdiği CIF-Test “Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-Thaw Test” standartlarında anlatılan yöntemler ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. CIF deneyi, TSE CEN/TR 15177 standardında içyapıda meydana gelen hasarların belirlenmesine yönelik bir donma-çözülme deneyidir. RILEM tarafından önerilen ile TSE CEN/TR 15177’de yer alan CIF deney tanımları benzer olmakla beraber iki standart arasında numune boyutları ve uygulanan deneyler gibi farklılıklar bulunmaktadır. ASTM C-666 standardı kapsamında A ve B olmak üzere iki farklı deney prosedürü tanımlanmaktadır. Prosedür A, su içerisinde hızlı donma ve çözülme, prosedür B ise havada hızlı donma ve suda çözülme olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemlerin her ikisinin de ortak noktası hızlı donma-çözülme çevrimlerinin uygulanmasıdır. Donma sıcaklığı -18°C ve çözülme sıcaklığı 4°C olacak şekilde donma çözülme çevrimleri uygulanmaktadır. Bir donma-çözülme çevrim süresi minimum 2 saat ve maksimum 5 saat olmalıdır. Donma süresi toplam çevrim süresinin %20’sinden daha az olmamalıdır. Beton numunelerinin herhangi bir andaki sıcaklığının donma esnasında -19°C ’den az ve çözülme esnasında 6°C ’den yüksek olmaması gerekmektedir [233-234].

Deneysel çalışmanın bu bölümünde donma-çözülme çevrimlerinin KPB’lerin üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlandı. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması için KB ve PÇB numuneleri kullanıldı. KB, KPB ve PÇB numunelerinin dökümleri 100/200 mm’lik silindir kalıp kullanılarak gerçekleştirildi. KB ve KPB numunelerinin 10 adedi donma-çözülme çevrimine maruz bırakılırken, 10 adedi de referans numunesi olarak kullanıldı. KB ve KPB dökümlerinde kullanılan mikser hacmi nedeniyle dökümler benzer koşulların sağlanması ve benzer basınç dayanımlarının elde edilmesi için azami özen gösterilerek ayrı dökümler halinde gerçekleştirildi. Bu nedenle bu betonlar için ayrı ayrı referans numuneleri alınarak sonuçlar değerlendirildi. Kükürt bağlayıcılı betonlar için toplam 40 adet silindir numune hazırlandı. PÇB numunelerinin 15 adedi donma-çözülme çevrimine maruz bırakıldı. PÇB dökümü monolitik döküm olarak gerçekleştirilebildiğinden dolayı tek döküm için 3 adet

referans numunesi alındı. PÇB'ler için toplam 18 adet silindir numune hazırlandı. Tüm beton türlerinin dökümleri Bölüm 5'te anlatılan döküm prosedürüne uygun olarak gerçekleştirildi ve toplamda 58 adet silindir numune hazırlandı. PÇB'lerin basınç dayanımlarının KB ve KPB basınç dayanımlarına yakın bir dayanımda çıkması için bu betonların dökümlerinde azami özen gösterildi. KB ve KPB'ler diğer deneyler için uygulanan standart soğuma prosedürü sonrası oda sıcaklığında 28 gün süre ile muhafaza edildi. PÇB'ler ise 28 gün boyunca kür havuzlarında bekletildikten sonra değişmez ağırlığa ulaşacak şekilde kontrollü olarak kurutulduktan sonra deneye tabi tutuldu. Bu çalışma kapsamında hazırlanan numunelere ASTM C-666 standardında anlatılan prosedür B'ye uygun olarak havada donma ve suda çözme çevrimleri uygulandı. Donma-çözülme çevrimleri için Şekil 6.16'da gösterilen otomasyon kontrol üniteli donma-çözülme aleti kullanıldı.



Şekil 6.16. Otomasyon kontrol üniteli donma-çözülme aleti

Donma-çözülme aleti; havada soğutma kabini (a), sıcaklık kontrol üniteli harici su tankı (b) ve otomasyon kontrol ünitesinden (c) oluşmaktadır. İstenilen süre ve sıcaklık seviyesine kadar soğutma tankı içerisinde donmaya maruz kalan numunelerin, su tankından soğutma kabini içerisine pompalanan su ile çözülmesi sağlanmaktadır. Donma-çözülme süreleri, sıcaklıkları ve çevrim sayıları ise otomasyon ünitesi tarafından kontrol edilmektedir. Donma-çözülme çevrim sürelerinin belirlenmesi için kalibrasyon numunesi olarak belirlenen beton numune içerisine yerleştirilen termokupl kullanıldı. Kalibrasyon numunesi, soğutma kabininin orta bölgesine

yerleştirilerek donma ve çözülme süreleri içerisinde betonun merkez sıcaklığındaki değişimler sıcaklık kontrol ünitesi (d) vasıtasıyla takip edildi. İlk 5 çevrim, kalibrasyon çevrimi olarak kabul edilerek; kalibrasyon numunesinin orta sıcaklığının donma durumunda -18°C ve çözülme durumunda 4°C olacak şekilde çevrim süreleri ile su tankı ve soğutma kabini sıcaklık dereceleri ayarlandı.

Bu deneysel çalışma için üretilen 3 farklı beton türüne ait 28 günlük numunelerin basınç dayanımı, UPV ve ağırlık ölçümleri yapıldı. Böylece her bir beton türünün 0, 150, 300, 450, 600 ve 1200 donma-çözülme çevrimi sonucunda basınç dayanımı, UPV, ağırlık değişimi ile bağlı dinamik elastisite modülü (BDEM) üzerindeki etkileri incelendi.

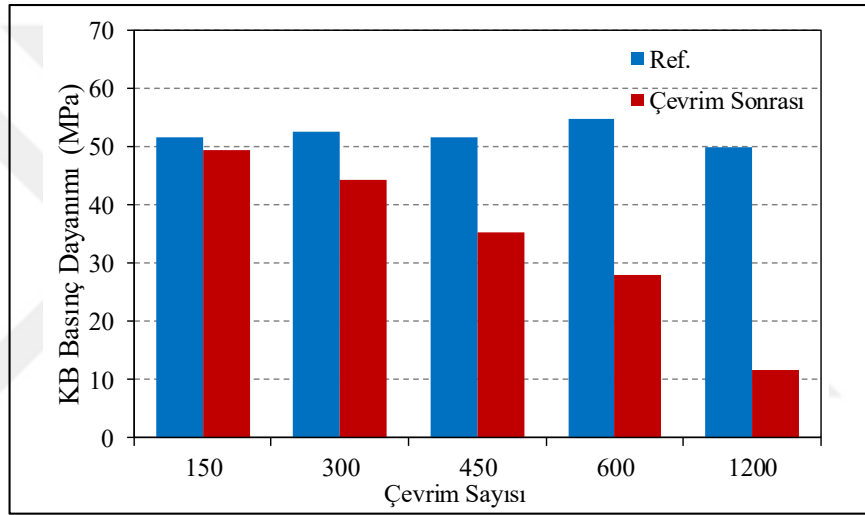
6.3.1. Donma-çözülme etkisinde basınç dayanımı değişimi

KB, KPB ve PÇB numunelerinin 0, 150, 300, 450, 600 ve 1200 donma-çözülme çevriminin basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelendi. 28 günlük kür süresini tamamlayan PÇB numunelerinden üç adet silindir numune üzerinde basınç dayanımı deneyi gerçekleştirildi ve donma-çözülme çevrimleri öncesi (0 çevrim) basınç dayanımları elde edildi. Her çevrim için 3'er adet olmak üzere toplam 15 adet PÇB numunesi üzerinde donma-çözülme çevrimleri uygulandı. 28 günlük kür süresini tamamlayan KB ve KPB numunelerinden 10'ar adet silindir numune olacak şekilde toplam 20 numune üzerinde basınç dayanımı deneyi gerçekleştirildi. Donma-çözülme çevrimleri öncesi (0 çevrim) basınç dayanımları elde edildi. Her çevrim için 2'şer adet olmak üzere toplam 20 adet KB ve KPB numunesi üzerinde donma-çözülme çevrimleri uygulandı. Donma-çözülme çevrimleri tamamlanan silindir numuneler 48 saat süre ile değişmez ağırlığa ulaşınca kadar laboratuvar ortamında bekletilerek kuruması sağlandı. Tüm numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirildi.

KB numunelerine ait donma-çözülme deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.6'da verildiği gibidir. KB'lerin 150'şer çevrim sonucunda yapılan basınç dayanımı deneylerinde dayanım kaybı meydana geldiği belirlendi. 1200 çevrim sonunda ortalama dayanımın $49,83\text{ MPa}$ 'dan $11,71\text{ MPa}$ değerine kadar düştüğü görüldü. Donma-çözülme çevrim sayısının referans numunelere göre basınç dayanımı üzerindeki etkisini gösteren grafik Şekil 6.17'de verildiği gibidir.

Tablo 6.6. KB numunelerine ait basınç deneyi sonuçları

Çevrim Sayısı	Numune Adı	Basınç Dayanımı (MPa)			
		0 Çevrim (Referans)		Donma-Çözülme Sonrası	
150 çevrim	KB-150-1	52,87	51,44	49,98	49,27
	KB-150-2	50,01		48,56	
300 çevrim	KB-300-1	53,24	52,43	45,15	44,22
	KB-300-2	51,61		43,29	
450 çevrim	KB-450-1	49,52	51,61	32,94	35,15
	KB-450-2	53,69		37,36	
600 çevrim	KB-600-1	55,29	54,73	27,19	28,06
	KB-600-2	54,17		28,92	
1200 çevrim	KB-1200-1	51,54	49,83	13,37	11,71
	KB-1200-2	48,11		10,05	



Şekil 6.17. Donma-çözülme çevriminin KB basınç dayanımına etkisi

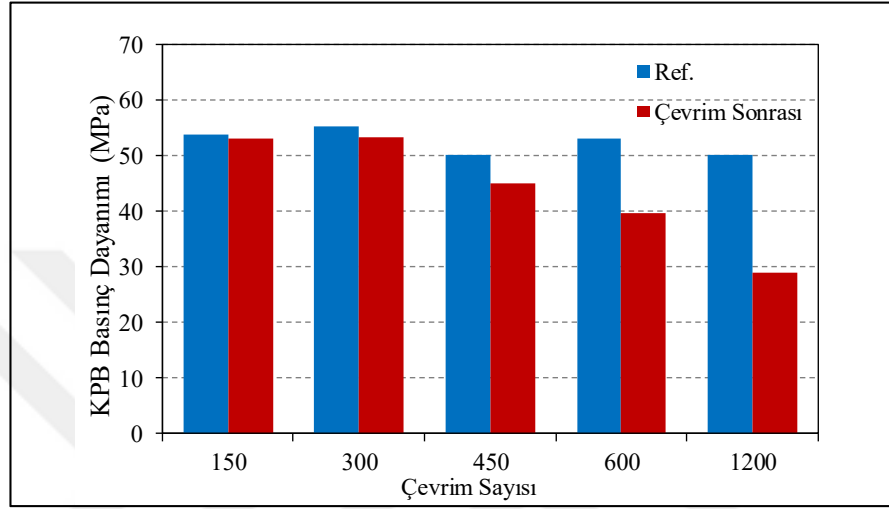
KPB numunelerine ait donma-çözülme deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.7’de verildiği gibidir. KPB’lerin 150’şer çevrim sonucunda yapılan basınç dayanımı deneylerinde düşük miktarlarda da olsa dayanım kaybının meydana geldiği belirlendi. 1200 çevrim sonunda ortalama dayanımın 50,01 MPa’dan 29,04 MPa değerine kadar düştüğü görüldü. Donma-çözülme çevrim sayısının referans numunelere göre basınç dayanımı üzerindeki etkisini gösteren grafik Şekil 6.18’de verildiği gibidir.

Tablo 6.7. KPB numunelerine ait basınç deneyi sonuçları

Çevrim Sayısı	Numune Adı	Basınç Dayanımı (MPa)			
		0 Çevrim (Referans)		Donma-Çözülme Sonrası	
150 çevrim	KPB-150-1	54,18	53,70	53,66	53,12
	KPB-150-2	53,21		52,57	
300 çevrim	KPB-300-1	56,18	55,20	54,73	53,27
	KPB-300-2	54,22		51,81	

Tablo 6.7. (Devam) KPB numunelerine ait basınç deneyi sonuçları

450 çevrim	KPB-450-1	50,68	50,09	45,16	45,04
	KPB-450-2	49,49		44,91	
600 çevrim	KPB-600-1	53,33	53,09	40,06	39,72
	KPB-600-2	52,84		39,37	
1200 çevrim	KPB-1200-1	49,35	50,01	29,14	29,04
	KPB-1200-2	50,67		28,93	



Şekil 6.18. Donma-çözülme çevriminin KPB basınç dayanımına etkisi

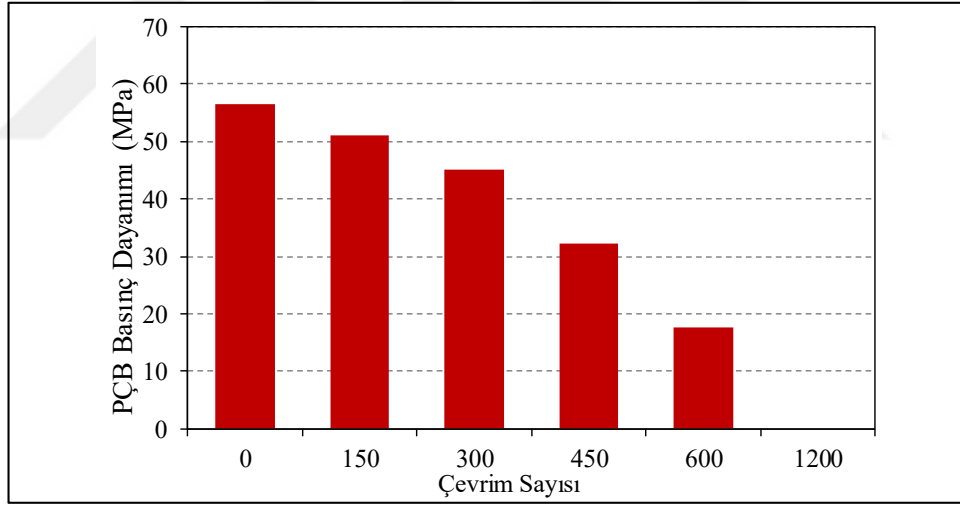
PÇB numunelerine ait donma-çözülme deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.8'de verildiği gibidir.

Tablo 6.8. PÇB numunelerine ait basınç deneyi sonuçları

Çevrim Sayısı	PÇB Basınç Dayanımı (MPa)	
0 çevrim	57,06	56,40
	55,80	
	56,34	
150 çevrim	48,33	51,06
	54,22	
	50,62	
300 çevrim	44,67	46,05
	46,57	
	43,92	
450 çevrim	29,65	32,15
	34,38	
	32,42	
600 çevrim	19,66	17,67
	16,05	
	17,31	
1200 çevrim	ÖA*	ÖA*
	ÖA*	
	ÖA*	

*ÖA: Ölçüm alınamadı.

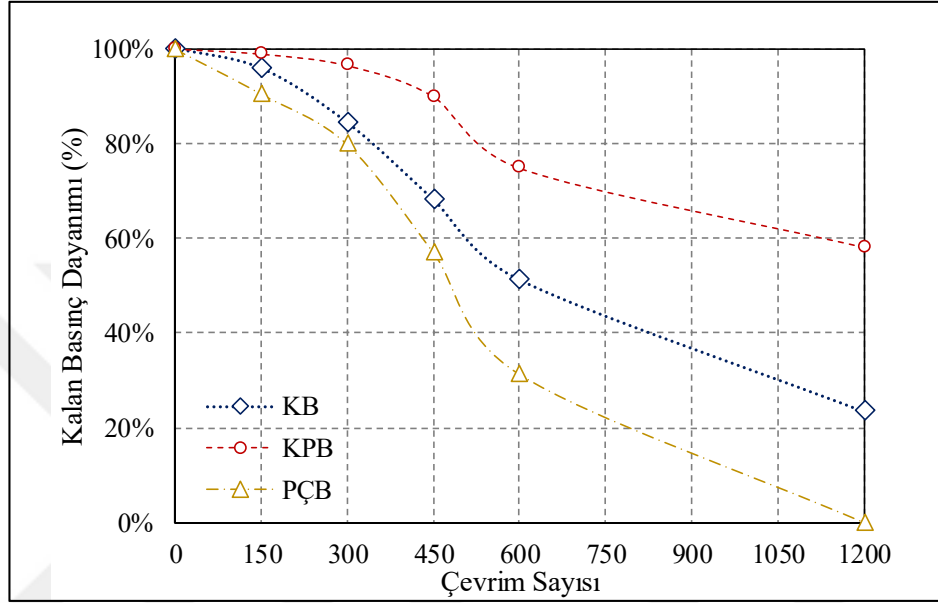
PÇB'ler monolitik döküm olduğu için her bir döküm için ayrı ayrı referans numunesi kullanılmadı. Donma-çözülme çevrimlerinin karşılaştırma numunesi olarak 28 gün sonunda basınç dayanımı değeri belirlenen 3 adet silindir numunenin (0 çevrim) ortalaması kullanıldı. PÇB'lerin 150'şer çevrim sonucunda yapılan basınç dayanımı deneylerinde yaklaşık %10 oranında dayanım kaybının meydana geldiği belirlendi. 1200 donma çözülme çevrimi uygulanan 3 adet silindir numunede büyük oranda bozunma meydana geldiği için yapısal bütünlükleri kayboldu ve basınç deneyi yapılamadı. Tablo 6.8'de ölçüm alınamayan numuneler "ÖA-ölçüm alınamadı" notasyonu ile gösterildi. 0 çevrimde referans numune ortalaması 56,40 MPa iken 600 çevrim sonunda bu değer 17,67 MPa değerine kadar düştüğü ve numunelerin %69 oranında taşıyıcılık özelliğini kaybettiği belirlendi. 1200 çevrim sonunda PÇB numunelerinin taşıyıcılık özelliğini tamamen kaybettiği belirlendi. Donma-çözülme çevrim sayısının basınç dayanımı üzerindeki etkisini gösteren grafik Şekil 6.19'da verildiği gibidir.



Şekil 6.19. Donma-çözülme çevriminin PÇB basınç dayanımına etkisi

KB, KPB ve PÇB silindir numunelerinin donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanımlarındaki azalma oranları Şekil 6.20'de verildiği gibidir. Donma-çözülme çevrim sayısı arttıkça KPB numuneleri ile KB ve PÇB numuneleri arasındaki basınç dayanım kaybı farkının arttığı görülmektedir. KB ve PÇB numuneler donma-çözülme çevrimlerinden oldukça etkilenirken; KPB numunelerindeki basınç dayanımı kaybının bu iki beton türüne göre oldukça düşük seviyelerde kaldığı belirlendi. İlk 150 çevrim sonucunda PÇB numunelerinde dayanım %91'e gerilerken bu oranın KB ve KPB

betonlarında sırasıyla %96 ve %99 olduğu görüldü. 1200 çevrim sonucunda PÇB numunelerinde tamamen dayanım kaybı meydana gelirken, KB ve KPB betonlarında dayanım kaybı oranının sırasıyla %24 ve %58 olduğu görüldü. 1200 donma çözülme çevrimi uygulanan beton türlerinde sadece KPB numunelerinin basınç dayanımlarının %42'den daha az dayanım kaybı ile sınırlı kaldığı belirlendi.



Şekil 6.20. Donma-çözülme çevrimi ile basınç dayanımındaki azalma yüzdesi ilişkisi

Peng ve diğ. tarafından 2007 yılında hava sürükleyici katkının ve puzolanların 50-60 MPa dayanımındaki PÇB'lerin donma direnci üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda araştırmacılar tarafından 60 MPa dayanımında puzolan ve uçucu kül içermeyen beton numunelerin 300 çevrim sonucunda basınç dayanımı kayıplarının %15 olduğunu belirlemişlerdir. Bu tez çalışması kapsamında hazırlanan PÇB numunelerde 300 çevrim sonucunda basınç dayanımı kaybı %10 bulunarak Peng tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarına paralellik gösterdiği görülmektedir. Her iki sonuç arasındaki %5 oranındaki fark ise literatürde yapılmış olan çalışmaların sonuçlarında, su/çimento oranının donma-çözülme üzerindeki etkisi ile açıklanabilmektedir. Su/çimento oranı 0,32'nin altında olan karışımların donma-çözülme dayanımlarının artırılması için herhangi bir hava sürükleyici katkıya (HSK) gerek duyulmadığı ve düşük su/çimento oranına sahip karışımların yüksek donma-çözülme direnci gösterdiği belirtilmektedir [235-237].

McBee ve diğ. tarafından 1983 yılında DCPD ve oligomer kullanılarak modifiye edilen kükürt ile hazırlanan KPB'lerin donma-çözülme çevrimi altında dayanım kayıplarına ait değerler incelenmiştir. KPB numunler üzerinde ASTM C-666 A prosedürüne uygun olarak 300 çevrim gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar %25 oranında oligomer içeren KPB numunelerinin %10 dayanım kaybı oranına sahip olarak 300 donma-çözülme çevrimine dayandığını göstermiştir. Bu tez kapsamında bitüm kullanılarak modifiye edilen kükürt ile hazırlanan KPB'lerin 300 donma-çözülme çevrimi sonunda dayanım kayıpları %3 bulunarak 300 donma-çözülme çevrimine dayandığı ve sonuçların McBee tarafından yapılan çalışma ile yakınlık gösterdiği belirlendi [59-60].

6.3.2. Donma-çözülme etkisinde UPV ve BDEM değişimi

Donma-çözülme çevrimleri sonrasında oluşan hasarın ölçülmesi için değişik yöntemler bulunmaktadır. En çok kullanılan yöntem bağıl dinamik elastisite modülünde meydana gelen değişimlerin belirlenmesidir. Bu yöntem sayesinde gözle görülemeyen mertebedeki içyapı hasarlarının belirlenmesi mümkündür. ASTM C-666 standardında tarif edilmiş olan prosedürler dayanıklılık faktörünün belirlenmesini gerektirmektedir. Dayanıklılık faktörü değeri, 300 donma-çözülme çevrimi sonrası veya dinamik elastisite modülünün orijinal değerinin %60'ına kadar düştüğü değerler kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu iki değerden öncelikle hangisi ilk olarak gerçekleşirse o değer dikkate alınmaktadır [226, 238-240].

Dayanıklılık faktörü Denklem (6.7)'de verilen eşitlik ile tanımlanmaktadır.

$$DF = \frac{NP}{M} \quad (6.7)$$

Burada DF dayanıklılık faktörünü, P bağıl dinamik elastisite modülünü, M toplam çevrim sayısını ve N belirli bir P değerine karşılık gelen ($N < M$) veya toplam ($N = M$) çevrim sayısını göstermektedir. Numunelere ait dinamik elastisite modülü değerleri ise numunelerden alınan UPV ölçümleri kullanılarak hesaplandı. ASTM C-666'da verilen BDEM Denklem (6.8) kullanılarak hesaplandı.

$$P_c = \left(\frac{n_1^2}{n_0^2} \right) 100 \quad (6.8)$$

Burada P_c c çevrim sonrası BDEM'in yüzde değerini; n_0 sıfıncı çevrimdeki ultrasonik hız değerini ve n_1 ise c çevrim sonundaki ultrasonik hız değerini göstermektedir. BDEM değerlerini elde etmek için donma-çözölmeye maruz kalan tüm numuneler üzerinde UPV deneyleri gerçekleştirildi. Titreşim frekansının 20 kHz'den fazla olduğu ses dalgalarına ultrasonik dalga denilmektedir. Ultrasonik dalgalar piezo-elektrik özelliğe sahip olan transdüserler aracılığıyla oluşturulmaktadır. Ultrasonik hız ölçüm deney aleti, alıcı ve verici transdüserleri arasında oluşturulan ultrasonik ses dalgalarının beton içerisindeki geçiş süresinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Ultrasonik sinyallerin beton içerisinde geçiş süresi betonun kalitesine bağlıdır. UPV testi ile betonun homojenliği, boşluk yapısı, içerisinde çatlak olup olmadığı, beton dayanımı ve kalitesi ile ilgili bilgiler elde edilebilmektedir [227-228, 241-242].

Donma-çözölme çevrimleri uygulanan tüm beton türlerine ait numuneler üzerinde UPV deneyleri ASTM C-597 standardına uygun olarak Şekil 6.21'de gösterilen alet kullanılarak gerçekleştirildi.



Şekil 6.21. UPV deneyi

KB ve KPB silindir numuneleri laboratuvar ortamında kürlendiği için UPV deneyleri doğrudan gerçekleştirilirken, PÇB numuneleri kür havuzundan çıkarıldıktan sonra değişmez ağırlığa ulaşınca kadar kurutulduktan sonra deneyler gerçekleştirildi. Ultrasonik dalga üreten verici ve alıcı transdüserlerin beton yüzeyine temas ettikleri bölgelerin temiz ve düzgün olması gerekmektedir. Bu nedenle silindir numunelerin perdah yüzeyinde oturacağı temas bölgeleri zımpara ile düzeltildikten sonra tel fırça ile temizlendi. Transdüser ve temas yüzeyi arasında boşluk kalmaması, beton ile

transdüser arasına ultrason jeli sıkılarak sağlandı. Her bir beton numunesi üzerinde test, 3 tekrarlı olarak gerçekleştirildi ve sonuçların ortalamaları alınarak UPV değeri belirlendi.

KB numunelerine ait referans (0 çevrim) ve donma-çözülme çevrimlerinden sonra alınan UPV sonuçları sırasıyla Tablo 6.9’da verildiği gibidir.

Tablo 6.9. KB numunelerine ait UPV deney sonuçları

Çevrim Sayısı	Numune Adı	UPV (m/s)			
		0 Çevrim (Referans)		Donma-Çözülme Sonrası	
150 çevrim	KB-150-1	3868,5	3834,9	3589,8	3576,5
	KB-150-2	3801,3		3563,1	
300 çevrim	KB-300-1	3875,9	3837,2	3302,6	3284,9
	KB-300-2	3798,4		3267,2	
450 çevrim	KB-450-1	3838,8	3801,7	3112,6	3078,0
	KB-450-2	3764,5		3043,3	
600 çevrim	KB-600-1	3861,3	3842,1	2456,5	2460,6
	KB-600-2	3822,9		2464,7	
1200 çevrim	KB-1200-1	3868,4	3825,9	1849,2	1853,9
	KB-1200-2	3783,3		1858,6	

KPB numunelerine ait referans (0 çevrim) ve donma-çözülme çevrimlerinden sonra alınan UPV sonuçları Tablo 6.10’da verildiği gibidir.

Tablo 6.10. KPB numunelerine ait UPV deney sonuçları

Çevrim Sayısı	Numune Adı	UPV (m/s)			
		0 Çevrim (Referans)		Donma-Çözülme Sonrası	
150 çevrim	KPB-150-1	3952,6	3963,7	3773,0	3778,7
	KPB-150-2	3974,7		3704,3	
300 çevrim	KPB-300-1	3976,5	3958,9	3698,8	3652,2
	KPB-300-2	3941,2		3605,5	
450 çevrim	KPB-450-1	3853,6	3832,5	3319,8	3345,0
	KPB-450-2	3811,4		3370,1	
600 çevrim	KPB-600-1	3906,3	3903,4	3162,6	3192,7
	KPB-600-2	3900,4		3222,8	
1200 çevrim	KPB-1200-1	3929,3	3913,2	2777,3	2789,4
	KPB-1200-2	3897,1		2801,5	

PÇB numunelerine ait referans (0 çevrim) ve donma-çözülme çevrimlerinden sonra alınan UPV sonuçları Tablo 6.11’de verildiği gibidir. 1200 donma çözülme çevrimi uygulanan 3 adet silindir numunede büyük oranda bozunma meydana geldiği için yapısal bütünlükleri kayboldu ve UPV deneyi ölçümleri alınamadı.

Tablo 6.11. PÇB numunelerine ait UPV deney sonuçları

Çevrim Sayısı	UPV (m/s)		
	0 Çevrim (Referans)		Donma-Çözülme Sonrası
150 çevrim	4515,8	4533,8	4172,7
	4545,5		4204,7
	4540,2		4189,3
300 çevrim	4573,0	4556,5	3884,4
	4555,8		3858,7
	4540,7		3803,5
450 çevrim	4511,2	4507,5	3427,2
	4504,5		3462,1
	4506,8		3438,4
600 çevrim	4564,3	4591,3	2301,8
	4514,7		2227,9
	4694,9		2247,3
1200 çevrim	4454,3	4475,7	ÖA*
	4466,5		ÖA*
	4506,2		ÖA*

*ÖA: Ölçüm alınmadı.

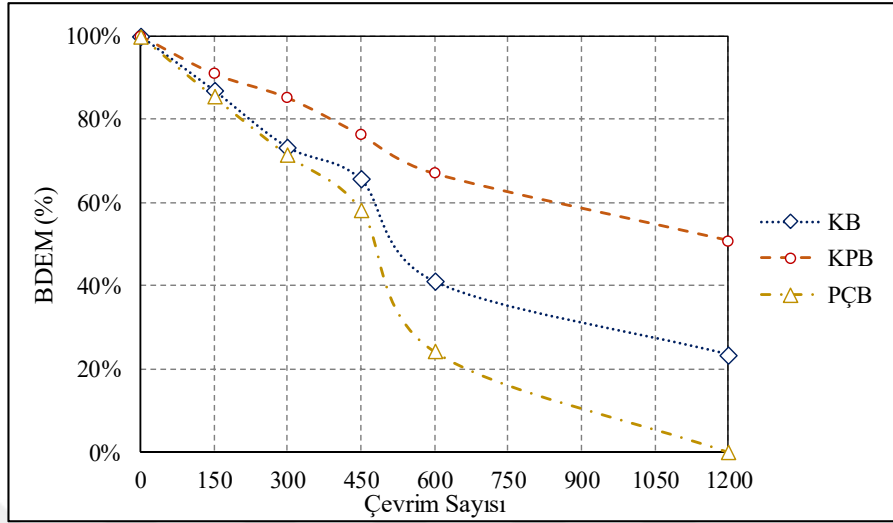
UPV deney sonuçları ve Denklem (6.8)'de verilmiş olan eşitlik kullanılarak 150, 300, 450, 600 ve 1200 donma çevrimi sonrasında hesaplanan BDEM değerleri KB, KPB ve PÇB numuneleri için Tablo 6.12'de verildiği gibidir. ASTM C-666'da BDEM için 300 çevrim sonunda %60'ın altına inmemesi gerekliliği kriteri bulunmaktadır. KB, KPB ve PÇB numunelerinin 300 donma-çözülme çevrimi sonucunda kalan BDEM değerleri sırasıyla %73, %85 ve %71 olarak bulunduğu standartta belirtilmiş olan minimum kriteri sağladıkları görüldü. PÇB'ler 450 çevrim sonucunda %60 değerinin altına inerken, KB'ler 600 çevrim sonucunda KPB'lerin ise 1200 çevrim sonucunda standart değerinin altına indiği belirlendi.

Tablo 6.12. KB, KPB ve PÇB numunelerinin BDEM değerleri

Çevrim Sayısı	BDEM (%)		
	KB	KPB	PÇB
0 çevrim	100	100	100
150 çevrim	87	91	85
300 çevrim	73	85	71
450 çevrim	66	76	58
600 çevrim	41	67	24
1200 çevrim	23	51	0

BDEM, betondaki mikro çatlakların gelişimini yansıtmak için kullanılabilir ve BDEM'de meydana gelen değişiklikler, onu etkileyen donma-çözülme hasarının miktarını temsil eder [243-244]. BDEM'de meydana gelen azalma yüzdelerinin

donma-çözülme çevrim sayısına göre değişimini gösteren grafik Şekil 6.22’de verildiği gibidir.



Şekil 6.22. Donma-çözülme çevrim sayısının BDEM üzerindeki etkisi

KPB numunelerinde 1200 çevrim sonucunda BDEM kaybının %51 olduğu görülürken bu değer KB ve PÇB betonlarda sırasıyla %23 ve %4 olarak bulundu. PÇB numuneleri ağır hasar aldığı ve parçalanmalar meydana geldiği için 1200 çevrim sonucunda BDEM değer kayıplarının oldukça yüksek oranlarda olduğu belirlendi. KB ve PÇB’lerin, 300 donma-çözülme çevrimine kadar benzer içyapı hasar miktarına sahip olduğu görüldü. 600 ve 1200 gibi uzun süreli çevrim sayılarında bu kayıp değerinin PÇB numunelerde KB’ye oranla giderek arttığı belirlendi. McBee ve diğ. tarafından 1985 yılında kükürtün beton içerisinde kullanımı ile yeni kullanım alanlarının oluşturulması amacıyla deneysel bir çalışma yapılmış ve KPB numunelerinin bazı mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. 300 donma-çözülme çevrimi uygulandıktan sonra KPB numunelerinin BDEM değerleri %80 olarak bulunmuştur. Bu tez kapsamında 300 çevrim sonucunda KPB’lerin BDEM değeri McBee tarafından bulunan deneysel sonuçlara paralellik göstererek %85 olarak bulundu. Shin ve diğ. tarafından 2014 yılında KPB’lerin içerisinde geri dönüştürülmüş agrega kullanımının araştırıldığı deneysel çalışma yapılmıştır. Doğal agrega ve geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak hazırlanmış olan karışımlardan elde edilen numuneler üzerinde 300 donma-çözülme çevrimi uygulanmış ve BDEM değerlerindeki değişim incelenmiştir. Doğal agrega kullanılarak hazırlanan numunelerin 150 çevrim sonucunda BDEM kaybı %10-11 civarında iken, geri dönüştürülmüş agrega kullanılan numunelerde bu

değerin %15 civarında olduğu görülmüştür. Bu tez kapsamında alternatif karışım oranları kullanılarak hazırlanan KPB numunelerde ise 150 çevrim için BDEM kaybı %9 olarak belirlendi. Doğal agrega kullanılarak hazırlanan numunelerin 300 çevrim sonucunda BDEM kaybı %15-17 civarında iken, geri dönüştürülmüş agrega kullanılan numunelerde bu değer %23 civarında olduğu görülmüştür. Bu tez kapsamında alternatif karışım oranları kullanılarak hazırlanan KPB numunelerde ise 300 çevrim için BDEM kaybı %15 olarak belirlendi. Wu ve diğ. tarafından 2017 yılında PÇB'lerin içerisinde geri dönüştürülmüş ve doğal iri agrega kullanımının araştırıldığı deneysel çalışma yapılmıştır. Doğal ve geri dönüştürülmüş iri agrega kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin, 125 donma-çözülme çevrimi sonrası BDEM değerleri belirlenmiştir. Doğal agrega kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin BDEM kaybı %8-10 civarında iken, Shin ve diğ. yapmış olduğu çalışmada elde ettikleri sonuca benzer olarak geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak hazırlanan betonların BDEM değer kaybı %50-55 civarında bulunarak doğal agregaya göre daha büyük çıkmıştır. Bu tez kapsamında alternatif karışım oranları kullanılarak hazırlanan PÇB numunelerde ise 150 çevrim için BDEM kaybı %15 olarak bulundu ve Wu ve diğ. tarafından yapılan, doğal agreganın kullanıldığı çalışmaya benzer sonuçların elde edildiği görüldü [6, 61, 245].

6.3.3. Donma-çözülme etkisinde ağırlık değişimi

Donma-çözülme çevrimlerinin sonucunda oluşan tahribatın miktarının belirlenmesinde ağırlık değişiminin ölçülmesi yöntemleri de kullanılmaktadır. Genellikle ağırlık değişimindeki azalma dış yüzeydeki bozunmayı göstermektedir. Donma-çözülme çevrimleri sonucunda betonda oluşan çatlakların açılması ve parçalanması sonucu ağırlık değişiminde azalma oluşmakta ve bu durum betonda oluşan tahribat hakkında fikir sahibi olmaya yaramaktadır [246]. Ağırlık değişimi değeri tüm beton numuneleri için referans numunelerde ve her 150, 300, 450, 600 ve 1200 çevrim sonrası donma-çözülme aletinden alınan numunelerde 0,1 g hassasiyete sahip terazi kullanılarak alınan ağırlık ölçümleri ile belirlendi. Hesaplamalarda Denklem (6.9) kullanıldı. KB ve KPB silindir numuneleri laboratuvar ortamında kürlendiği için UPV deneyleri doğrudan gerçekleştirilirken, PÇB numuneleri kür havuzundan çıkarıldıktan sonra değişmez ağırlığa ulaşınca kadar kurutulduktan sonra deneyler gerçekleştirildi.

$$WL = \left(\frac{W_c - W_R}{W_R} \right) 100 \quad (6.9)$$

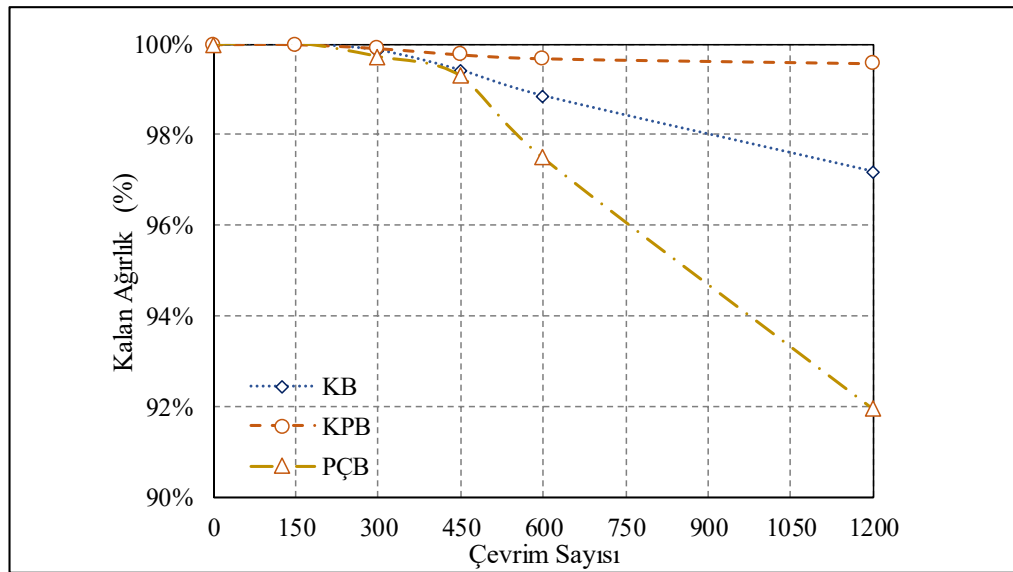
Burada WL, c adet çevrim sonrası ağırlık değişiminin yüzde değerini; W_R sıfırıncı çevrimdeki ağırlık değerini ve W_c ise c çevrim sonundaki ağırlık değerini göstermektedir.

KB, KPB ve PÇB numunelerine ait referans (0 çevrim) ve donma-çözülme çevrimlerinden sonra alınan ağırlık değişimi değerlerine ait ortalama sonuçlar Tablo 6.13'te verildiği gibidir. PÇB numuneleri 1200 donma çözülme çevrimi sonucunda toplam ağırlıklarının %8,03'ünü kaybederken KB numuneleri için bu değer %2,81'dir. KPB numuneleri ise 1200 çevrim sonucunda ağırlık kaybının %1'in altında olduğu görülmektedir.

Tablo 6.13. KB, KPB ve PÇB numunelerinin ağırlık değişimi değerleri

Çevrim Sayısı	Ağırlık Değişimi (%)		
	KB	KPB	PÇB
150 çevrim	0,00	0,00	0,03
300 çevrim	-0,14	-0,09	-0,27
450 çevrim	-0,58	-0,23	-0,70
600 çevrim	-1,14	-0,32	-2,50
1200 çevrim	-2,81	-0,43	-8,03

Donma-çözülme çevrimlerinin KB, KPB ve PÇB numunelerine ait ağırlık değişimi değerleri üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak Şekil 6.23'te verildiği gibidir.



Şekil 6.23. Donma-çözülme çevrim sayısının ağırlık değişimi üzerindeki etkisi

KB, KPB ve PÇB numunelerine ait ağırlık kaybı grafiği incelendiğinde 450 donma-çözülme çevrimine kadar her üç beton türünün de ağırlık kayıplarının %1'in altında kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte 450 çevrim sonrasında PÇB numunelerde çatlak genişliklerinin hızla açılması ve büyük ölçüde parçalanmaların meydana gelmesinden dolayı ağırlık kaybında KB ve KPB numunelere oranla önemli bir artışın meydana geldiği belirlendi. 1200 donma-çözülme çevrimi uygulanan üç adet PÇB numunesinin sadece bir tanesi yapısal bütünlüğünü korurken; diğer iki adet numunenin yapısal bütünlüğünü koruyamayacak şekilde parçalanma ve bozunma etkisinde kaldığı görüldü.

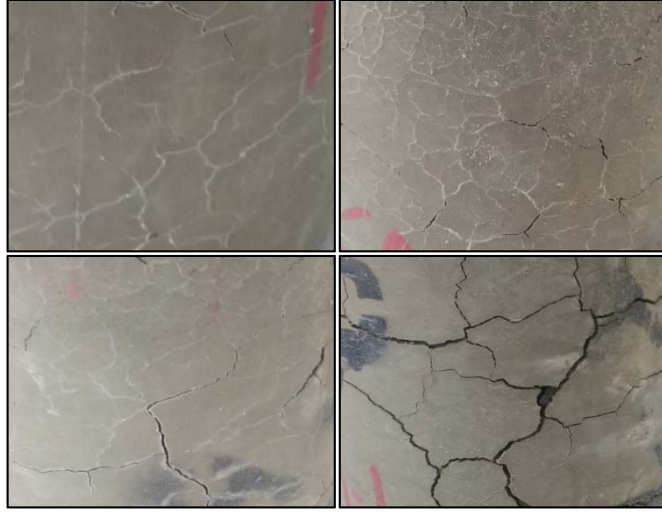
Peng ve diğ. tarafından 2007 yılında hava sürükleyici katkının ve puzolanların, 50-60 MPa dayanımındaki PÇB'lerin donma direnci üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda araştırmacılar tarafından su/çimento oranı 0,32'nin altında olan karışımların donma-çözülme dayanımlarının arttırılması için herhangi bir hava sürükleyici katkıya (HSK) gerek duyulmadığı belirtilmiştir. Su/çimento oranı 0,32'nin üstünde olan karışımlarda uzun süreli donma-çözülme direnci için puzolan ve HSK kullanımının gerekliliği üzerinde durmuşlardır. Pavlenko ve diğ. tarafından 1997 yılında dona dirençli ve düşük geçirimli PÇB tasarımı yapmak amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yüksek donma-çözülme direnci ve düşük su geçirimsizliğine sahip beton için su/çimento oranı 0,30 olan ve uçucu kül ile cüruf ihtiva eden bir beton tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu karışım oranı ve katkı içeriğiyle gerçekleştirilen donma-çözülme deneylerinde PÇB'lerin 1250 çevrime kadar dayanabildikleri görülmüştür [235, 247]. Bu tez kapsamında hazırlanan PÇB'lerin su/çimento oranının 0,32'den oldukça büyük (0,50) olduğu ve karışımda HSK ve puzolan kullanılmadığı göz önünde bulundurulduğunda, donma-çözülme etkisi altında parçalanmaların ve bozunmaların meydana gelmesi Peng ve Pavlenko tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçları ile paralellik göstermektedir. Bogas ve diğ. tarafından 2016 yılında geri dönüştürülmüş ince beton agregası kullanılarak hazırlanan PÇB'lerin donma-çözülme dayanımlarının belirlenmesi amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı 55 ile 80 MPa arasında değişen katkısız beton numunelerine ait ağırlık kaybı değeri 300 donma-çözülme çevrimi sonucunda %0,2 ile %0,6 arasında değişen değerler olarak bulunmuştur. Bu tez

kapsamında hazırlanan PÇB numunelerinin 300 çevrim sonucunda ağırlık kayıpları %0,27 bulunarak Bogas tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçları ile benzerlik göstermektedir [241].

6.3.4. Donma-çözülme sonrası numunelerin hasar durumları

Betonun donma-çözülme tekrarları altında tehlike ile karşı karşıya kalmasına neden olan faktörler, genellikle betonun boşluklu yapısı ve geçirgenliği olarak gösterilmektedir. Ancak betonun donma-çözülme direnci, betonun birçok özelliğine bağlıdır. Mehta ve Monteiro'ya göre, betonun donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılığı sadece çimento ve agrega gibi beton bileşenlerinin özelliklerine bağlı değildir. Aynı zamanda kaçış sınırı konumu (suyun basınç tahliyesi için gitmesi gereken mesafe), gözenek yapısı, gözeneklerin büyüklüğü, sayısı ve sürekliliği, doyumluk derecesi, donma hızı ve betonun çekme dayanımı gibi birçok faktörün birbirleriyle olan etkileşiminden de etkilenir [248]. Beton içerisinde bulunan tüm boşluklar numunenin su içerisinde tutulmasıyla dolmamaktadır. Eğer bütün boşluklar su ile dolsaydı ilk donma sırasında numunede parçalanmalar meydana gelirdi. Suya doymuş betonun sıcaklığı düşerse, çimento hamuru içindeki kılcal boşluklarda bulunan su donarak betonda genişlemeye neden olur. Bu durum tekrarlı bir hale gelirse art arda oluşan donma ve çözülme çevrimleri betonda kalıcı hasar meydana getirir. Yetersiz genişletmeden doğan beton içerisindeki büyük boşluklar ise genellikle hava ile doludur ve bu nedenle betonda meydana gelen donma-çözülme hasarlarında rol oynamazlar. Donma, büyük boşluklar içerisinde bulunan sudan başlayarak küçük boşluklara doğru yayılır. Beton içerisindeki suyun genişlemesinden dolayı oluşan basınç gerilmesi, betonun çekme dayanımı sınırını aştığında betonda hasar meydana gelir. Betondaki hasar, yüzeydeki bozunmalardan başlayarak tabakalar halinde parçalanma ile betonun içine doğru ilerler [249].

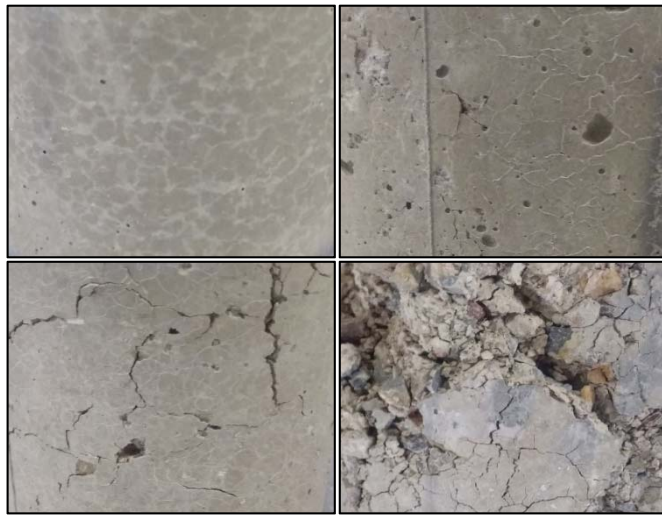
Bu tez kapsamında yapılmış olan donma-çözülme çevrimleri sonucunda KB, KPB ve PÇB'lerde oluşan genel hasar gelişim durumu sırasıyla Şekil 6.24, 6.25 ve 6.26'da verildiği gibidir. Tüm beton türlerinde önce yüzeysel bozunmaların meydana geldiği ve daha sonra suyun numune içine ilerlemesi sonucunda çatlak oluşumu ve çatlak genişlemesi gözlemlendi.



Şekil 6.24. KB numunesi hasar gelişimi



Şekil 6.25. KPÇB numunesi hasar gelişimi













Şekil 6.26. PÇB numunesi hasar gelişimi











Her üç beton türünün de 300 donma-çözülme çevrimine kadar hasar durumlarının benzer seviyelerde olmasına rağmen özellikle PÇB numunelerinde 450 çevrim sonunda çatlak oluşumlarında artış ve 600 çevrim sonrasında mevcut çatlak genişliklerinde hızlı bir artışın meydana geldiği gözlemlendi. PÇB numunelerinin 1200 çevrim sonunda yapısal bütünlüklerini koruyamayacak ölçüde hasar seviyesine ulaştıkları tespit edildi. KPB numunelerinde ilk 300 çevrimde yüzeysel bozunma ve çatlak oluşumu gözlenmedi. 450 çevrim sonrasında bu numunelerde yüzeysel bozunma ince yüzeysel çatlakların başladığı belirlendi. 600 ve 1200 çevrim sonrasında numunelerde çatlakların genişliklerinde küçük miktarda artış olduğu ve hasar durumlarının oldukça düşük seviyelerde kaldığı gözlemlendi. KPB numunelerinde oluşan ilk çatlaklar genellikle numunelerin üst kısımlarında perdah yüzeylerine yakın kısımlarda meydana geldiği görüldü. Numunelerin açık havaya temas eden yüzeyinde hızlı soğumanın meydana gelmesi diğer yüzeylerinde ısıtılmış metal kalıp ile yavaş soğumanın olduğu göz önünde bulundurulduğunda, kükürt bağlayıcılı betonların zayıf noktalarının bu bölge (perdah yüzeyine yakın kısımlar) olduğu düşünülmektedir. KB numunelerinin donma-çözülme performanslarının KPB'lere oranla oldukça düşük seviyede kaldığı ve hasar düzeylerinin oldukça yüksek olduğu gözlemlendi. 300 çevrim sonunda KB betonların havaya açık yüzeylerinde çatlak oluşumlarının meydana geldiği ve özellikle 600 ile 1200 çevrim sonrasında hasar seviyelerinde artışın olduğu belirlendi. Donma-çözülme çevrimlerine maruz kalan KB'lerin dayanıklılığı yoğun bir şekilde incelenmiştir. Laboratuvar sonuçları, kükürt betonların donma-çözülme dayanımının zayıf olduğunu göstermiştir [44-47, 112]. Duecker, kükürtün düşük ısı iletkenliğine sahip olması nedeniyle, ortam sıcaklığı birkaç derece dıştan değiştiğinde, büyük iç sıcaklık gradyanlarının geliştiğini önermektedir. Bu sıcaklık değişimleri, alışılmadık derecede yüksek olan kükürt ısıl genişleme katsayısı ile birleştiğinde yüksek ısıl gerilmeler oluşturmaktadır. Bu gerilmelerin, malzeme içindeki çatlakların veya kırıkların gelişmesinden sorumlu olduğu belirlenmiştir [33, 40]. Deneysel çalışma kapsamında KB'lerde oluşan hasar düzeyi literatürde yapılan çalışmalarla paralellik göstermektedir. KB, KPB ve PÇB beton numunelerinin 0 (referans), 150, 300, 450, 600 ve uzun dönemli 1200 çevrim sonrası hasar durumlarını gösteren görüntüleri sırasıyla Tablo 6.14, 6.15 ve 6.16'da verildiği gibidir. KPB'lerin donma-çözülme çevrimleri sonrasında hasar düzeylerinin KB ve PÇB'lere oranla çok düşük seviyelerde kaldığı, deneysel çalışma sonunda gözlemlendi. Bu durum, McBee ve Yoon

tarafından kükürt polimer betonların sahip olduğu düşük su emme oranından kaynaklanabileceği olarak açıklanmaktadır [61, 250].











Tablo 6.14. KB numuneleri donma-çözülme sonrası hasar durumları

Çevrim Sayısı	0 Çevrim (Referans)	Donma-Çözülme Sonrası
150 çevrim		
300 çevrim		
450 çevrim		
600 çevrim		
1200 çevrim		

Tablo 6.15. KPB numuneleri donma-çözülme sonrası hasar durumları

Çevrim Sayısı	0 Çevrim (Referans)	Donma-Çözülme Sonrası
150 çevrim		
300 çevrim		
450 çevrim		
600 çevrim		
1200 çevrim		

Tablo 6.16. PÇB numuneleri donma-çözülme sonrası hasar durumları

Çevrim Sayısı	0 Çevrim (Referans)	Donma-Çözülme Sonrası
150 çevrim		
300 çevrim		
450 çevrim		
600 çevrim		
1200 çevrim		

7. BETON MALİYETLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Laboratuvarında karışımları ve dökümleri gerçekleştirilen kükürt beton, kükürt polimer beton ve Portland çimento betonlar için gerçek karışım miktarları göz önünde bulundurularak maliyet hesapları yapıldı. Maliyet hesaplarında 2019 yılı malzeme fiyatları baz alındı. Saf kükürt olarak kullanılan granüler kükürtün ve modifikasyon için kullanılan bitümün TÜPRAŞ-İZMİT rafinerisi çıkış fiyatı sırasıyla 501 ₺/ton ve 1608 ₺/ton olarak belirlendi. Çimento, uçucu kül, agrega ve kimyasal katkı temin fiyatları iki farklı firmadan alınan fiyatların ortalaması alınarak belirlendi. Çimento 200 ₺/ton, Çatalağzı Termik Santralinden temin edilen uçucu kül 75 ₺/ton, doğal kum 25 ₺/ton, kırmataş 40 ₺/ton ve kimyasal katkı 5 ₺/kg olarak temin fiyatları alındı. Belirlenmiş olan fiyatlar KDV (katma değer vergisi) hariç fiyatlardır. Kullanılan suyun metreküp birim fiyatı Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından belirlenmiş olan 2019 yılı birim fiyatı 9,81 ₺/m³ olarak alındı. Beton fiyatları belirlenirken proses işlemleri (kükürt bağlayıcılı betonlarda ısıl işlem maliyeti) göz önüne alınmadan sadece malzeme miktarları ve tutar kalemleri göz önüne alınarak betonların m³ birim maliyetleri çıkarıldı. Tüm beton grupları için m³ maliyetleri Tablo 7.1’de verildiği gibidir.

Tablo 7.1. Bir m³ beton maliyetleri

Malzeme	Birim Fiyat	KB		KPB		PÇB	
		(kg/m ³)	(₺/m ³)	(kg/m ³)	(₺/m ³)	(kg/m ³)	(₺/m ³)
Saf Kükürt	501 ₺/ton	800,8	401,2	776,4	389,0	-	-
Bitüm	1608 ₺/ton	-	-	0,6	1,0	-	-
MK Saf Kükürt	501₺/ton	-	-	23,4	11,7	-	-
Çimento	200 ₺/ton	-	-	-	-	403,9	80,8
Su	9,81 ₺/m ³	-	-	-	-	201,9	2,0
Doğal Kum	25 ₺/ton	343,2	8,6	343,1	8,6	680,2	17,0
Kırmataş	40 ₺/ton	343,2	13,7	343,1	13,7	1051,7	42,1
Uçucu Kül	75 ₺/ton	800,8	60,1	800,5	60	-	-
Kim. katkı	5 ₺/kg	-	-	-	-	5,3	26,3
TOPLAM		483,6 ₺/m³		484,0 ₺/m³		168,1 ₺/m³	

Yapılan maliyet hesaplamalarında KB ve KPB'lerin fiyatları sırasıyla 483,6 ₺/m³ ve 484,0 ₺/m³ olarak bulundu. KB ve KPB arasında maliyet farkı yaratabilecek tek malzemenin bitüm olması ancak kullanılan bitüm miktarının oldukça az olması nedeniyle her iki beton için maliyetler yaklaşık olarak aynı bulundu. Geleneksel beton olarak adlandırılan Portland çimento betonun maliyeti ise 168,1 ₺/m³ olarak bulundu. Kükürt bağlayıcılı betonlar ile Portland çimento betonlarında kullanılan agrega ve filler malzeme toplam tutarları sırasıyla 82 ₺/m³ ve 60 ₺/m³ olarak belirlendi. Her iki beton içerisinde kullanılan filler ve agrega maliyetleri birbirlerine yakın olduğundan beton türleri arasındaki fiyat farkı bağlayıcı malzeme maliyetleri arasındaki farktan meydana gelmektedir. TÜPRAŞ-İZMİT rafinerisinden temin edilen kükürtün tonu 501 ₺ iken çimento üretim tesislerinden temin edilen öğütülmüş haldeki çimentonun tonu 200 ₺'dir. Türkiye'de kükürt üretimi başlıca iki kaynaktan gerçekleşmektedir. İlk olarak doğal maden rezervlerinden (Adana, Isparta, Manisa, Van gibi) elde edilen kükürt, bir diğeri ise son yıllarda ivme kazanan ve yüksek miktarlara ulaşan petrol, doğalgaz ve baca gazlarında elde edilen kükürttür [251]. Türkiye'de kükürt elde edilen doğal maden yataklarının büyük bir kısmı atıl işletme veya değerlendirilmeyen rezervlerden oluşmaktadır [12]. Doğal maden yatağı olarak en iyi durumda ve kullanımdaki son rezerv Isparta Keçiborlu işletmesi ise ekonomik olmadığı gerekçesi ile 1995 yılında kapatıldığı bilinmektedir [5, 12]. Ekonomik olmayan kükürt rezervlerinin kapatılması ile doğal kaynaklardan elde edilen kükürt temininin azalması sonucu başta sülfürik asit üretimi olmak üzere kimya, lastik, boya, kâğıt, demir-çelik, tarım ilaçları gibi kükürt ihtiyacı bulunan sektörlerin ihtiyaç duyduğu miktarları petrol endüstrisinden elde edilen kükürt ile karşılamaya zorlamaktadır. Daralan Pazar payı ile birlikte bazı sektörlerde kükürtü ithal etme yoluna da gidilmektedir [12]. Doğal maden yataklarının kapatılması, 1995 yılından itibaren ihtiyaç duyulan kükürtün petrol endüstrisinden karşılanması sonucu TÜPRAŞ-İZMİT rafinerisinden temin edilen kükürtün ton başına düşen fiyatının çimento fiyatının oldukça üstüne çıkmasına neden olmaktadır. Kanada, Çin, ABD, Katar ve Suudi Arabistan gibi kükürt rezervlerinde beklenenin üstünde artış gerçekleşen ülkelerde kükürde alternatif kullanım alanı yaratmak için yapı malzemesi olarak kullanılması üzerine 1970 yılından bu yana araştırmalar gerçekleştirilmektedir.

Türkiye’de kükürt bağlayıcı betonlar üzerine akademik çalışma gerçekleştirilmemesinin ve bu konu üzerine araştırmaların yoğunlaştırılmamasının nedeni kükürt kaynaklarındaki artışların bu ülkeler kadar büyük miktarlarda olmaması olarak düşünülmektedir.

Kükürt fiyatlarındaki önemli artış nedeniyle bağlayıcı olarak kükürt kullanılan betonların maliyetlerinin yüksek olması, bu betonların Türkiye’deki pazar payının Portland çimento betonlarının gerisinde kalmasına neden olmaktadır. Portland çimento betonlarının kükürt betonlara göre yaklaşık %65 daha az maliyetli olması kükürt betonlarda genel kullanıma geçilememesi ve araştırmaların bu konu üzerine yoğunlaştırılmamasının önündeki en önemli engel olarak görülmektedir. Buna karşın bağlayıcı olarak kükürt kullanılan betonların göstermiş olduğu üstün mekanik ve dayanıklılık özellikleri göz önüne alınırsa; maliyet farkının, inşaat mühendisliğinde bazı özel uygulamalar içerisinde bu betonların kullanılmasında göz ardı edilebileceği düşünülmektedir. Bölüm 5’te yapılmış olan deneyler sonucunda kükürt polimer betonların priz sürelerinin 2-2,5 saat arasında olduğu ve bu betonların 1 saat sonunda 28 günlük basınç dayanımlarının %87’sine ulaştığı bilinmektedir. Hızlı kullanım ve acil müdahale gerektiren uygulamalarda Portland çimento betonlarından elde edilemeyen bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda kükürt polimer betonların kullanılması oldukça büyük avantaj sağlayabilmektedir. Portland çimento betonlarında dayanıklılık problemleri çok sık karşılaşılan bir durumdur. Yapıların işlevselliklerini servis ömürleri boyunca bozulmadan koruyabilmelerine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık denilmektedir. Fiziksel, kimyasal, biyolojik ve mekanik etkenler nedeniyle meydana gelen dayanıklılık problemleri yapıların servis ömründe önemli ölçüde azalmaya neden olmaktadır [230]. Bölüm 6.1, 6.2 ve 6.3’te yapılmış olan dayanıklılık deneyleri sonucunda kükürt polimer betonların; aşınma, su geçirimsizliği ve donma-çözülme dayanıklılıklarının, Portland çimento betonlarına göre daha iyi olduğu bilinmektedir. Uzun süreli servis ömrü ve daha durabil bir yapı gerektiren uygulamalarda Portland çimento betonlarından elde edilemeyen bu dayanıklılık özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, kükürt polimer betonların kullanılması oldukça büyük avantaj sağlayabilmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, petrol endüstrisinden elde edilen kükürtün, geleneksel Portland çimentosu yerine beton içerisinde bağlayıcı olarak kullanılmasının uygunluğu ve kullanılması durumunda PÇB'lere göre mekanik ve dayanıklılık özellikleri açısından avantaj ve dezavantajlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlendiği gibidir.

Alternatif bitüm oranlarında hazırlanan MK numuneleri üzerinde yapılan içyapı analizleri değerlendirilerek, modifikasyon için gerekli bitüm oranının bağlayıcı ağırlığının %2,5'i olduğu belirlendi.

Karışımında kullanılan bağlayıcı/uçucu kül oranı basınç dayanımı değerleri göz önünde bulundurularak 1,0 olarak bulundu. Bağlayıcı/uçucu kül oranı artıkça basınç dayanımında düşüşler meydana geldiği görüldü.

Modifiye kükürt bağlayıcılı harçlarda, harç içerisine MK ilavesi ile saf kükürt kullanılarak hazırlanan harçlarda meydana gelen büzülmelerin sınırlandırıldığı belirlendi.

Kükürt bağlayıcılı harç ve beton numuneleri üzerinde gerçekleştirilen basınç, eğilme ve uzun dönemli büzülme deneylerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek; KP'B'ler için karışım oranları saf kükürt: MK: uçucu kül: doğal kum: kırmataş için sırasıyla ağırlıkça %33,95: %1,05: %35: %15: %15 olarak belirlendi.

KB'ler bir saat sonunda 28 günlük basınç dayanımlarının %84'üne ulaşabilirken, KP'B'ler %78'ine ulaşabildiği, deneyler sonucunda belirlendi. PÇB'lerin ise yedinci günde, 28 günlük basınç dayanımlarının %82'sine ulaşılabilirdiği belirlendi.

KB ve KP'B'lerin basınç, eğilme ve yarma dayanımı deneyleri göz önünde bulundurulduğunda; erken dayanımlarının PÇB'lere göre oldukça yüksek olmasına karşın, uzun süreli dayanım değerlerinde azalmaların meydana geldiği görüldü.

KB ve KPB'lerin elastisite modülü değerleri benzer basınç dayanımına sahip PÇB'ler ile kıyaslandığında %75-78 oranlarında daha düşük seviyelerde kaldığı görüldü. TS500, CEB-FIP, Eurocode2, NS3473 ve ACI tarafından PÇB'ler için önerilmiş olan analitik modellerin, KB ve KPB'lerde oldukça yüksek değerler verdiği ve bu modellerin kükürt bağlayıcılı betonlar için uygun olmadığı belirlendi.

KP ve PP küp numunelerinde meydana gelen aşınmayla hacim kaybı değerinin KB ve KPB'lerin kullanılması sonucu yaklaşık olarak %80 oranında azaltılabileceği belirlendi. KB, KPB ve PÇB'nin beton parke taşlarına oranla daha boşluksuz olduğu ve su emme oranlarının daha düşük olduğu görüldü. KPB'lerin parke taşı için kullanılması amacıyla standartlarda belirtilen sınır değerleri sağladığı belirlendi.

KPB'lerde 3 gün sonunda su işleme derinliği değeri 0 olarak belirlenirken; 36 gün sonunda KPB, KB ve PÇB'ler için bu değerin sırasıyla 5,39, 51,01 ve 55,46 mm olduğu görüldü.

KB, KPB ve PÇB'lerde 300 donma-çözülme çevrimi sonucunda basınç dayanımı kaybı sırasıyla %16, %3 ve %20 olarak belirlenirken, bu değerlerin 1200 çevrim sonucunda KB ve KPB için sırasıyla %76 ve %42 olduğu belirlendi. 1200 çevrim sonucunda PÇB numunelerinin parçalanarak yapısal bütünlüklerini kaybettiği görüldü.

KB, KPB ve PÇB'lerde 300 donma-çözülme çevrimi sonucunda BDEM değeri sırasıyla %73, %85 ve %71 olarak belirlenirken, bu değerlerin 1200 çevrim sonucunda %23, %51 ve %0 değerlerine ulaştığı bulundu. KB ve KPB'lere ağırlık değişimi değerlerinde 1200 çevrim sonucunda önemli farklar görülmezken, PÇB'lerin ağır hasar aldığı ve yüzeyinde parçalanmalar meydana geldiği için numunelerde ağırlık kaybı olduğu belirlendi.

KB, KPB ve PÇB'lerin maliyetleri sırasıyla 483,6 ₺/m³, 484,0 ₺/m³ ve 168,1 ₺/m³ olarak hesaplandı. Betonların maliyetleri arasındaki fark, bağlayıcı olarak kullanılan malzemelerin fiyat farkından kaynaklandığı belirlendi. PÇB'lerden elde edilemeyecek yüksek performans beklentisinin olduğu uygulamalarda kükürt bağlayıcılı betonların maliyet gözetilmeksizin kullanılabileceği tarafımızca düşünölmektedir.

Sonuç olarak, bu deney kapsamında hazırlanan KB ve KPB'lerin benzer basınç dayanımı değerlerine sahip PÇB'ler ile karşılaştırıldığında erken dayanımlarının daha yüksek ve priz sürelerinin daha kısa olduğu belirlendi. KB ve KPB'lerin PÇB'lere göre aşınma, su geçirimsizliği ve donma-çözülme etkileri altında daha yüksek performansa sahip olduğu belirlendi. Standartlarda PÇB'ler için önerilmiş olan 300 donma-çözülme çevrim sayısı ve BDEM'in %60 seviyesine ulaşması için gerekli kriterlerin, kükürt bağlayıcılı betonlara ait donma-çözülme performanslarının belirlenmesi için yetersiz olduğu görüldü. PÇB'lere ait standartlar içerisinde yer alan eşitliklerin, kükürt bağlayıcılı betonlar için geçerliliğinin olmadığı ve bu betonların standartlarda değerlendirilebilmesi için daha detaylı laboratuvar çalışmalarının gerçekleştirilmesi gerekliliği tarafımızca düşünülmektedir. Yapılan birçok döküm sonucunda kükürt bağlayıcılı betonların hava koşullarından etkilendiği ve bu betonların prefabrik yapı elemanlarının imalatında kullanımının betonun performans değerlerinde kayıp yaşanmadan kullanılabilirliği açısından daha iyi olacağı tarafımızca önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, 2017 Yılı Ham Petrol ve Doğalgaz Sektör Raporu, *Türkiye Petrolleri Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı*, 4-7, 2018.
- [2] Mohamed A.M.O., El Gamal M.M., *Sulfur Concrete for the Construction Industry*, 1st ed., J. Ross Publishing, Florida, 2010.
- [3] Vlahovic M.M., Martinovic S.P., Boljanac T.D., Jovanic P.B., Volkov-Husovic T.D., Durability of Sulfur Concrete in Various Aggressive Environments, *Construction and Building Materials*, 2011, **25**, 3926-3934.
- [4] Harrison P., Global Sulphur Market Outlook, *CRU Group*, 2012.
- [5] Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, *Devlet Planlama Teşkilatı*, 57-105, 2001.
- [6] Shin M., Kim K., Gwon S.W., Cha S., Durability of Sustainable Sulfur Concrete with Fly Ash and Recycled Aggregate Against Chemical and Weathering Environments, *Construction and Building Materials*, 2014, **69**, 167-176.
- [7] Vlahovic M.M., Savic M.M., Martinovic S.P., Boljanac T.D., Volkov-Husovic T.D., Use of Image Analysis for Durability Testing of Sulfur Concrete and Portland Cement Concrete, *Materials and Design*, 2012, **34**, 346-354.
- [8] Narmin B.A., Mitra M.H., Nahid M.H., Preparation of Sulfur Mortar from Modified Sulfur, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2008, **27**(1), 123-127.
- [9] Contreras M., Gazquez M.J., Garcia-Diaz I., Alguacil F.J., Lopez F.A., Bolivar J.P., Valorization of Waste Ilmenite Mud in the Manufacture of Sulphur Polymer Cement, *Journal of Environmental Management*, 2013, **128**, 625-630.
- [10] Yang C., Lv X., Tian X., Wang Y., Komarneni, S., An Investigation on the Use of Electrolytic Manganese Residue as Filler in Sulfur Concrete, *Construction and Building Materials*, 2014, **73**, 305-310.
- [11] TÜPRAŞ, 2013 Yılı Faaliyet Raporu, https://www.tupras.com.tr/uploads/faaliyet-raporlari/TUP_FRAT_2013_19032014.pdf, (Ziyaret tarihi: 25 Eylül 2015).
- [12] Tunç G., Demirtürk D., Waterless Concrete and Its Status in Turkey, *Hazır Beton Birliği Dergisi*, Mart-Nisan 2016, 69-82.

- [13] Moon J., Kalb P.D., Milian L., Northrup P.A., Characterization of a Sustainable Sulfur Polymer Concrete Using Activated Fillers, *Cement and Concrete Composites*, 2016, **67**, 20-29.
- [14] Mohamed A.M.O., Gamal M.E., Sulfur Based Hazardous Waste Solidification, *Environmental Geology*, 2007, **53**(1), 159-175.
- [15] Wagenfeld J.G., Khalid A.A., Almheiri S., Slavens A.F., Calvet N., Sustainable Applications Utilizing Sulfur, A By-Product from Oil and Gas Industry: A State of the Art Review, *Waste Management*, 2019, **95**, 78-89.
- [16] Ober J.A., Materials Flow of Sulfur, *U.S. Geological Survey Open Files*, 15-22, 2002.
- [17] Eow J.S., Recovery of Sulfur from Sour Acid Gas: A Review of the Technology, *Environmental Progress*, 2002, **21**(3), 143-162.
- [18] International Maritime Organization-IMO, Sulphur Oxides (SO_x) and Particulate Matter (PM)–Regulation 14, [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93Regulation-14.aspx), (Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2017).
- [19] Mohamed A.M.O., El Gamal M.M., Compositional Control on Sulfur Polymer Concrete Production for Public Works, *Development in Arid Regions Research*, 2006, **3**, 27-38.
- [20] USGS National Mineral Information Center, <https://www.usgs.gov/centers/nmic/sulfur-statistics-and-information>, (Ziyaret tarihi: 13 Ağustos 2019).
- [21] Gosselin P., Hrudey S.E., Naeth M.A., Plourde A., Therrien R., Van Der Kraak G., Xu Z., *Environmental and Health Impacts of Canada's Oil Sands Industry*, Royal Society of Canada Ottawa, Canada, 2010.
- [22] Birkham T.K., Hendry M.J., Barbour S.I., Advective and Diffusive Gas Transport Through Fractured Sulfur Blocks, *Vadose Zone Journal*, 2010, **9**(2), 451-461.
- [23] Kalb P.D., Vagin S., Beall P.W., Levintov B.L., Sustainable Development in Kazakhstan: Using Oil&Gas Production by-Product Sulfur for Cost-Effective Secondary End-Use Products, *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology*, Madrid, Spain, September 2004.
- [24] Weber H.H., McBee W.C., New Market Opportunities for Sulphur Asphalt *7th Biennial International Symposium*, Washington, USA, 26-28 March 2000.
- [25] Abdel-Jawad Y., Al-Qudah A., The Combined Effect of Water and Temperature on the Strength of Sulfur Concrete, *Cement and Concrete Research*, 1994, **24**(1), 165-175.
- [26] Yue L., Caiyun J., Yunping X., The Properties of Sulfur Rubber Concrete (SRC), *J. Wuham Univ. Technol. Mater. Sci.*, 2006, **21**(1), 129-133.

- [27] Garcia V., Vazquez E., Carmona S., Utilization of by Produced Sulfur for the Manufacture of Unmodified Sulfur Concrete, *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona, Spain, 8-11 November 2004.
- [28] Sheppard W.L., *Sulfur Mortars*, Corrosion and Chemical Resistance Masonry Materials Handbook, Noyes Publications, Pennsylvania, 1975.
- [29] Rybczynski W., Ortega A., Ali W., Sulfur Concrete and Very Low Cost Housing, *Global Canadian Sulfur Symposium, Waste Treatment and Clean Technology*, Alberta, Canada, May 1974.
- [30] Ali S.Q., A Study of Development and Performance of Sulphur-Based Construction Blocks, Master of Science, University of Petroleum & Minerals, Civil Engineering Department, Saudi Arabia, 1982, 1381103.
- [31] Bacon R.F., Davis H.S., Recent Advances in the American Sulfur Industry, *Chemical and Metallurgical Engineering*, 1921, **24**, 65-72.
- [32] Kobbe W.H., New Uses for Sulfur in Industry, *Industrial & Engineering Chemistry*, 1924, **16**(10), 26-1028.
- [33] Duecker W.W., Admixtures Improve Properties of Sulfur Cements, *Chemical Metallurgical Engineering*, 1934, **41**(11), 583-586.
- [34] McKinney P.V., Provisional Methods for Testing Sulfur Cements, *ASTM Bulletin 96-107*, 1940, 27-30.
- [35] ASTM C287-98, Standard Specification for Chemical-Resistant Sulfur Mortar, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2012.
- [36] Dale J.M., Ludwig A.C., Mechanical Properties of Sulphur Allotropes, *Materials Research Standard*, 1965, **5**(8), 411-417.
- [37] Dale J.M., Ludwig A.C., Feasibility Study for Using Sulfur Aggregate Mixtures as a Structural Material, *Southwest Research Institute*, 1966, Report No: AFWL-TR-66-57.
- [38] Dale J.M., Ludwig A.C., Advanced Studies of Sulfur Aggregate Mixtures as a Structural Material, *Southwest Research Institute*, 1966, Report No: AFWL-TR-68-21.
- [39] Crow L.J., Bates R.C., Strength of Sulfur-Basalt Concretes, *U.S. Bureau of Mines*, 1970, Report No: RI 7349, 21.
- [40] Gillott J.E., Jordaan I.J., Loov R.E., Shrive N.G., Durability Studies of Sulfur Concrete, *Durability of Building Materials and Components*, 1980, 549-559.
- [41] Czarnecki B., Gillott J.E., Stress-Strain Behavior of Sulphur Concrete Made with Different Aggregates and Admixtures, *Engineering Geology*, 1989, **22**, 195-206.

- [42] Czarnecki B., Gillott J.E., Effect of Different Admixtures on the Durability of Sulfur Concrete Made with Different Aggregates, *Engineering Geology*, 1990, **28**, 105-118.
- [43] Lin S.L., Lai J.S., Chian E.S.K., Modification of Sulfur Polymer Cement (SPC) Stabilization and Solidification (S/S) Process, *Waste Management*, 1995, 15, 441-447.
- [44] Malhotra V.M., Mechanical Properties and Freeze-Thaw Resistance of Sulfur Concrete, *Energy, Mines and Resources Canada*, 1973, Report No: IR 73-18, 30.
- [45] Malhotra V.M., Effect of Specimen Size on Compressive Strength of Sulfur Concrete, *Energy, Mines and Resources Canada*, 1974, Report No: IR 74-25.
- [46] Beaudoin J.J., Sereda P.J., The Freeze-Thaw Durability of Sulfur Concrete, *National Research Council-Division of Building Research*, 1973, **53**.
- [47] Gamble B.K., Gillott J.E., Jordon I.J., Loov R.E., Wark M.A., Civil Engineering Applications of Sulphur-Based Materials, *Advances in Chemistry Series*, 1975, **140**(9), 154-166.
- [48] Sullivan T.A., McBee W.C., Blue D.D., Sulfur in Coatings and Structural Materials, *Advances in Chemistry*, 1975, **140**, 55-74.
- [49] McBee W.C., Sullivan T.A., Jong B.W., Corrosion Resistant Sulfur Concretes, *U.S. Bureau of Mines*, 1983, Report No: 8758, 28.
- [50] McBee W.C., Sullivan T.A., Jong B.W., Industrial Evaluation of Sulfur Concrete in Corrosive Environments, *U.S. Bureau of Mines*, 1983, Report No: RI 8786, 15.
- [51] Lee D., Klaiber F.W., Khosrariani S., Fatigue Behaviour of Improved Sulphur Concrete, *International Conference on Sulphur in Construction*, Ottawa, Canada, 12-15 September 1978.
- [52] Gamble B.R., Shrive N.G., Creep in Sulphur, *International Conference, Ottawa, Canada*, 1978, 503-518.
- [53] Jordon I.J., Gillott J.E., Loov R.E., Shrive N.G., Properties and Uses of Sulphur Mortars and Concrete, *International Conference on Use of Waste and By-Products in Civil Engineering*, Paris, France, 1978.
- [54] Gillott J.E., Jordon I.J., Loov R.E., Shrin N.G., Ward M.A., Characteristic of Some Sulphur Bond Civil Engineering Materials, *Advances in Chemistry Series*, 1978, **165**(6), 98-112.
- [55] Schwartz M.A., Llewellyn T.O., Sulphur in Construction Materials, *Advances in Chemistry Series*, 1978, **140**(5), 75-84.

- [56] Tewfik M.F., Mechanical Properties of Sulphur Sand Concrete, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 1982, **7**, 32-35.
- [57] Plato J.S., Sulfur Research and Development, *Sulphur*, 1980,**3**, 18-20.
- [58] Vroom A.H., Sulfur Cements, Process for Making Same and Sulfur Concretes Made There from, 1981, U.S. Patent No. 4,293,463, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [59] McBee W.C., Sullivan T.A., Concrete Formulations Comprising Polymeric Reaction Products of Sulfur / Cyclopentadien Oligomer / Dicyclopentadiene, 1982, U.S. Patent No. 4,348,313, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [60] McBee W.C., Sullivan T.A., Modified Sulfur Cement, 1982, U.S. Patent No. 4,311,826, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [61] McBee W.C., Sullivan T.A., Fike H.J., Sulfur Construction Materials, *U.S. Bureau of Mines*, 1985, Bulletin 678.
- [62] McBee W.C., Sullivan T.A., Fike H.J., *Corrosion-Resistant Sulfur Concretes*, Corrosion and Chemical Resistance Masonry Materials Handbook, Noyes Publications, Pennsylvania, 1986.
- [63] Funke R.H., McBee W.C., An Industrial Application of Sulfur Concretes, *American Chemical Society Symposium Series*, Washington, USA, 1982.
- [64] Gannon C.R., Wombles R.H., Hettinger W.P., Watkins W.D., New Concepts and Discoveries Related to the Strength of Plasticized Sulfur, *ASTM Bulletin 807*, 1983, 84-101.
- [65] Beaudoin J.J. Feldmant R.F., Durability of Porous Systems Impregnated with Dicyclopentadiene Modified Sulfur, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1984, **6**(1), 113-117.
- [66] ACI 584.2R-93, Guide for Mixing and Placing Sulfur Concrete in Construction, *American Concrete Institute*, Michigan, 1993.
- [67] Vroom A.H., Sulfur Polymer Concrete and Its Application, *7th International Congress on Polymers in Concrete*, Moscow, Russia, 1992.
- [68] Nnabuiife E.C., Study of Some Variables Affecting the Properties of Sulfur-Reinforced Sugarcane Residue Based Boards, *Indian Journal of Science and Technology*, 1987, **25**, 363-367.
- [69] Currell B.R., Williams A.J., Mooney A.J., Nash B., Plasticization of Sulfur, *Symposium of New Uses of Sulfur*, Washington, USA, 1974.
- [70] Diehl L., New Uses for Sulfur and Pyrites, *Madrid Symposium: The Sulfur Institute*, Madrid, Spain, 1976.

- [71] Blight L., Currell B.R., Nash B.J., Scott R.A.M., Stillo C., Preparation and Properties of Modified Sulfur Systems, *Advances in Chemistry Series*, 1978, **165**, 13-30.
- [72] Bordoloi B.K., Pierce E.M., Plastic Sulfur Stabilization by Copolymerization of Sulfur with Dicyclopentadiene, *Advances in Chemistry*, 1978, 31-53.
- [73] Currell B.R., The Importance of Using Additives in the Development of New Applications for Sulfur, *Symposium on New Users for Sulfur and Pyrites*, Madrid, Spain, 1976.
- [74] Mohamed A.M.O., El Gamal M.M., Hydro-Mechanical Behavior of a Newly Developed Sulfur Polymer Concrete, *Cement & Concrete Composites*, 2009, **31**, 186-194.
- [75] Mohamed A.M.O., El Gamal M.M., Solidification of Cement Kiln Dust Using Sulfur Binder, *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **192**, 576-584.
- [76] Mohamed A.M.O., El-Dieb A., El Sawy K.M., El Gamal M.M., Durability of Modified Sulphur Concrete in Sewerage Environment, *Environmental Geotechnics*, 2014, **2**(2), 1-9.
- [77] Al-Tayyib A.J., Al-Mana A.I., Khan M.S., A Comparative Study of Steel Corrosion in Sulfur Concrete and in Portland Cement Concrete, *International Symposium & Workshop*, Washington, USA, 1986.
- [78] Al-Tayyib A.J., Khan M.S., Evaluation of Corrosion Resistance of Reinforced Steel in Sulfur Concrete, *International Journal for Housing Science and Its Applications*, 1988, **12**(4).
- [79] Al-Tayyib A.J., Khan M.S., Electrical Resistivity of Sulfur Concrete and Its Relation to Corrosion of Embedded Steel, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 1989, **14**(2), 271-281.
- [80] Orłowski J., Leszczewski M., Margal I., Stability of Polymer Sulfur Concrete with Steel Reinforcement, *Bulletin of Electrochemistry*, 2004, **7**(1), 101-108.
- [81] Darnell G.R., Sulfur Polymer Cement, a Final Waste Form for Radioactive and Hazardous Wastes, ASTM STP 1240, 1996.
- [82] Wahshat T.M., Sulfur Mortar and Polymer Modified Sulfur Mortar Lining for Concrete Sewer Pipe, Doctor of Philosophy, Iowa State University, Civil Engineering Department, Canada, 2001, 3034236.
- [83] Dutari J.F.G., A Sulphur Concrete Retaining Wall, Master of Science, University of Alberta, Civil and Environmental Engineering Department, Canada, 2002, 0-612-81397-5.
- [84] Azad A.K., Ahmad S., Baluch M.H., Evaluation of Sulfur Concrete Technology for Local Applications, *Saudi ARAMCO*, 2003, Report No: CE2231.

- [85] Narmin B.A., Mitra M.H., Nahid M.H., Preparation of Sulfur Mortar from Modified Sulfur, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2008, **27**(1), 123-127.
- [86] Puoya H.S., Ganjian E., Parhizkar T., Zamani A., Properties and Application of Polymer Modified and Sulphur Repair Mortars in Aggressive Environments, *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Ancona, Italy, 28-30 June 2010.
- [87] Maraghechi H., Ahmadi I.F., Motahari S., Effect of Adding Crumb Tire Rubber Particles on the Mechanical Properties of DCPD-Modified Sulfur Polymer Mortars, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2011, **6**(9-10), 1283-1294.
- [88] Kyuhun K., Mechanical Properties of Sulfur Concrete, Master of Science, Ulsan National Institute of Science and Technology, Urban Infrastructure Engineering Program, Korea, 2013.
- [89] Yang C., Lv X., Tian X., Wang Y., Komarneni S., An Investigation on the Use of Electrolytic Manganese Residue as Filler in Sulfur Concrete, *Construction and Building Materials*, 2014, **73**, 305-310.
- [90] Al-Otaibi S., Al-Aibani A., Al-Bahar S., Abdulsalam M., Al-Fadala S., Potential for Producing Concrete Blocks Using Sulphur Polymeric Concrete in Kuwait, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2018, DOI: 10.1016/j.jksues.2018.02.004.
- [91] Dugarte M., Arguelles G.M., Torres J., Experimental Evaluation of Modified Sulfur Concrete for Achieving Sustainability in Industry Applications, *Sustainability*, 2018, DOI: 10.3390/su11010070.
- [92] Li J., Xiao H., Zhou Y., Influence of Coating Recycled Aggregate Surface with Pozzolanic Powder on Properties of Recycled Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 2009, **23**, 1287-1291.
- [93] Morin V., Moevus M., Dubois-Brugger I., Gartner E., Effect of Polymer Modification of the Paste-Aggregate Interface on the Mechanical Properties of Concretes, *Cement and concrete Research*, 2011, **41**, 459-466.
- [94] Zhihui Z., Shoude W., Lingchao L., Chenchen G., Evaluation of Pre-Coated Recycled Aggregate for Concrete and Mortar, *Construction and Building Materials*, 2013, **43**, 191-196.
- [95] Lee S.H., Hong K.N., Park J.K., Ko J., Influence of Aggregate Coated with Modified Sulfur on the Properties of Cement Concrete, *Materials*, 2014, **7**, 4739-4754.
- [96] Khoshnevis B., Yuan X., Zahiri B., Zhang J., Xia B., Construction by Contour Crafting Using Sulfur Concrete with Planetary Applications, *Rapid Prototyping*, 2016, **22**(5), 848-856.

- [97] Grugel R.N., Toutanji H.A., Sulfur “Concrete” for Lunar Applications–Sublimation Concerns, *Advances in Space Research*, 2008, **41**, 103-112.
- [98] Toutanji H.A., Evans S., Grugel R.N., Performance of Sulfur Concrete in Lunar Environments, *Construction and Building Materials*, 2012, **29**, 444-448.
- [99] Grugel R.N., Toutanji H.A., Viability of Sulfur “Concrete” on the Moon: Environmental Considerations, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Nevada, USA, 9-12 January 2006.
- [100] Anyszka R., Bielinski D.M., Sicinski M., Imiela M., Szajerski P., Pawlica J., Walendziak R., Sulfur Concrete–Promising Material for Space–Structures Building, *European Conference on Spacecraft Structures Materials and Environmental*, Toulouse, France, 8-11 August 2016.
- [101] Casanova I., Feasibility and Applications of Sulfur Concrete for Lunar Base Development: A Preliminary Study , *28th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, USA, 17-21 March 1997.
- [102] Omar H.A., Production of Lunar Concrete Using Molten Sulfur, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19980001900.pdf>, (Ziyaret tarihi: 16 March 2019).
- [103] Grugel R.N., Integrity of Sulfur Concrete Subjected to Simulated Lunar Temperature Cycles, *Advances in Space Research*, 2012, **50**, 1294-1299.
- [104] Tautanji H.A., Evans S., Grugel R.N., Performance of “Waterless Concrete”, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100026417.pdf>, (Ziyaret tarihi: 16 March 2019).
- [105] Hager I., Golonka A., Putanowicz R., 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction, *Procedia Engineering*, 2016, **151**, 292-299.
- [106] Ekblad J., Forspanda Spaltgolvselement as Swavelbetonggjutteknik, *Amercing och Egenskaper, Examenarbete 77*, Swedish University of Agricultural Science Division of Research and Education, Swedish, 1992.
- [107] Ciak N., Harasymiuk J., Sulphur Concrete’s Technology and Its Application to the Building Industry, *Technical Sciences*, 2013, **16**(4), 323-331.
- [108] Robert E., Alan H., Vroom A., Michael A., A Sulfur Concrete – A New Construction Material, *PCI Journal*, 1974, 86-95.
- [109] Vedalakshmi B., Parthiban G., Rengaswamy N., Srinivasan S., Balakrishnan K., Sulfur Concrete for Repair Works, *Bulletin of Electrochemistry*, 1990, **6**(2), 211-212.
- [110] Khademi A.G., Sar H.I.K., Comparison of Sulfur Concrete, Cement Concrete and Cement-Sulfur Concrete and Their Properties and Application, *Current World Environment*, 2015, **10**(1), 201-207.

- [111] Al-Ansary M., Innovative Solutions for Sulphur in Qatar, *The Sulphur Institute's (TSI) Sulphur World Symposium*, Doha, Qatar, 12-15 April 2010.
- [112] Sullivan T.A., McBee W.C., Rasmussen K.L., Studies of Sand – Sulfur – Asphalt Paving Materials, *U.S. Bureau of Mines*, 1975, Report No: RI 8087, 19.
- [113] Kennepohl G.J.A., The Gulf Canada Sulphur – Asphalt Process for Pavements, *New Uses for Sulphur and Pyrites Symposium*, Madrid, Spain, 17-19 May 1976.
- [114] Strand D.L., Recycling with Sulphur – Extended Asphalt in Wisconsin, *Sulphur Research and Development*, 1982, **5**, 6-9.
- [115] Mahoney J.P., Liddle W.A., Hicks R.G., Kidwa S., Sulfur Extended Asphalt Pavement Evaluation for Baker River Highway, *U.S. Federal Highway Administration*, 1983, Design and Construction Report: FHWA-DP-54-7.
- [116] Syroezhko A.M., Begak O.Y., Fedorov V.V., Gusarova E.N., Modification of Paving Asphalts with Sulfur, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2003, **76** (3), 491-496.
- [117] Al-Ansary M., Masad E., Stricklan D., Innovative Solutions for Sulphur: Initial Field Monitoring and Performance of Shell Thiopave Trial Road in Qatar, *2nd Annual Gas Processing Symposium*, Doha, Qatar, 10-14 January 2010.
- [118] De Filippis P., Giavarini C., Santarelli M.L., Sulfur-Extended Asphalt: Reaction Kinetics of H₂S Evolution, *Fuel*, 1998, **77**(5), 459-463.
- [119] Souaya E.R., Elkholy S.A., Abd El-Rahman A.M.M., El-Shafie M., Ibrahim I.M., Abo-Shanab Z.L., Partial Substitution of Asphalt Pavement with Modified Sulfur, *Egyptian Journal of Petroleum*, 2015, **24**(4), 483-491.
- [120] Faramarzi M., Golestani B., Lee K.W., Improving Moisture Sensitivity and Mechanical Properties of Sulfur Extended Asphalt Mixture by Nano-Antistripping Agent, *Construction and Building Materials*, 2017, **133**, 534-542.
- [121] Hu X., Zhang H., Bai T., Pan P., Xu P., Walubita L.F., Effects of Using Brake Pad Waste Powder as a Filler Material on the Rheological and Mechanical Properties of a Sulfur Modified Asphalt Mixture, *Construction and Building Materials*, 2019, **198**, 742-750.
- [122] Crick S.M., Whitmore D.W., Using Sulfur Concrete on a Commercial Scale, *Concrete International*, 1998, **20**, 83-86.
- [123] Beal P.W., Neff J.M., Potential Non-Traditional Uses of By-Product E&P Produced Sulfur in Kazakhstan, *Exploration and Production Environmental Conference*, Texas, USA, 7-9 March 2005.

- [124] Saylak D., Environmental and Safety Aspects of the Use of Sulfur in Highway Pavements, *U.S. Federal Highway Administration*, 1980, Report No: FHWA-RD-80/191.
- [125] Saylak D., Deuel L.E., Zahray R., Environmental and Safety Aspects of the Use of Sulfur in Highway Pavements: Part I- Mix Preparation and Construction, *International Conference on Sulphur*, Calgary, Canada, May 1981.
- [126] Izatt J.O., Sulfur – Extended Asphalt Paving Project Highway US 93-95, *Sulphur Institute*, 1977, Construction Report.
- [127] Deme I., Processing of Sand-Asphalt-Sulphur Mixes, *The Association of Asphalt Paving Technologists*, Virginia, USA, February 1974.
- [128] Rennie W.J., *Sulphur Asphalts: The Pronk S/A Emulsion Binder System*, 2nd ed., New Uses for Sulphur Technological Series, Canada, 1978.
- [129] Mohamed A.M.O., Antia H.E., *Preface, Developments in Geotechnical Engineering*, 1998, 82, vii-viii.
- [130] Yong R.N., Mohamed A.M.O., Warkentin B.P., *Principles of Contaminant Transport in Soils*, Elsevier, Netherlands, 1992.
- [131] Warren C.J., Dudas M.J., Acidification Adjacent to an Elemental Sulfur Stockpile: I. Mineral Weathering, *Canadian Journal of Soil Science*, 1992, **72**, 113-126.
- [132] Warren C.J., Dudas M.J., Acidification Adjacent to an Elemental Sulfur Stockpile: II. Trace Element Redistribution, *Canadian Journal of Soil Science*, 1992, **72(2)**, 27-134.
- [133] Ferrenbaugh R.W., Gladney E.S., Soholt L.F., Lyall K.A., Wallwork-Barber M.K., Hersman L.E., Environmental Interactions of Sulflex Pavement, *Environmental Pollution*, 1992, **76**, 141-145.
- [134] Wrzesinski W.R., McBee W.C., Permeability and Corrosion Resistance of Reinforced Sulfur Concrete, *U.S. Bureau of Mines*, 1988, Report No: 605-017/80.001, 13.
- [135] Malhotra V.M., Sulphur Concrete and Sulphur Infiltrated Concrete: Properties, Applications and Limitations, *Energy, Mine and Resources Canada*, 1979, CANMET Report 79-28.
- [136] Dehestani M., Teimortashlu E., Molaei M., Ghomian M., Firoozi S., Aghili S., Experimental Data on Compressive Strength and Durability of Sulfur Concrete Modified by Styrene and Bitumen, *Data Brief 13*, 2017, 137-144.
- [137] Gursel A.P., Masanet E., Horvath A., Stadel A., Life-Cycle Inventory Analysis of Concrete Production: A Critical Review, *Cement and Concrete Composites*, 2014, **51**, 38-48.

- [138] TS EN 932-1, Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler-Kısım 1 Numune Alma Metotları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1997.
- [139] TS EN 933-1, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini-Eleme Yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012.
- [140] ASTM C-128, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2015.
- [141] ASTM C-127, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2007.
- [142] Erdoğan Y.T., Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül Yüksek Fırın Cürufu, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 1993.
- [143] Baykal G., Özturan T., Savaş M., Ramadan K., Uçucu Külün İnşaat Mühendisliğinde Kullanım Olanakları, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 1993.
- [144] Çınar M., An Investigation of Fresh and Hardened Properties of Cementitious Gout Made with Combined Use of Waste Marble Powder and Fly Ash, Master's Thesis, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2019, 547631.
- [145] Kızgut S., Çuhadaroğlu D., Çolak K., Çatalağzı Termik Santral Uçucu Küllerinden Tuğla Üretim Olanaklarının Araştırılması, *Türkiye 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, Ankara, Türkiye, 19-22 Haziran 2001.
- [146] Tokyay M., Betonda Uçucu Kül Kullanımı, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması*, Ankara, Türkiye, 1993.
- [147] Demiröz A., Uçucu Küllerin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı, *Journal of Technical-Online*, 2009, 8(3), 212-221.
- [148] Özbayoğlu U.F., Uçucu Küllerin Bentonit, Kireç ve Çimento Katkılarıyla Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonlarında Kullanımı, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması*, Ankara, Türkiye, 1993.
- [149] ASTM C-618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2005.
- [150] Ünver E., Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül ile İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 2015, 415462.

- [151] Akyüncü V., F ve C tipi Uçucu Küllerin Çimento İkame Edilmesiyle Üretilen Betonların Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin Karşılaştırılarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adapazarı, Türkiye, 2002, 304751.
- [152] TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012.
- [153] TS EN 450-1, Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2013.
- [154] ASTM C-469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2014.
- [155] ASTM C-230, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2008.
- [156] ASTM C-157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2014.
- [157] TS 3322, Beton-Serleşmiş Beton Deneylemi-Çimento Harcı ve Beton Numunelerde Boy Değişiminin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2011.
- [158] ASTM C-531, Standard Test Method for Linear Shrinkage and Coefficient of Thermal Expansion of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2012.
- [159] ASTM C-666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2008.
- [160] TS EN 12390-8, Beton-Sertleşmiş Beton Deneylemi-Bölüm 8: Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.
- [161] TS EN 14157, Doğal Taş-Aşınma Direncinin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2005.
- [162] Pryor W.A., *Mechanism of Sulfur Reactions*, McGraw-Hill, USA, 1962.
- [163] Rylova M.V., Samuilov A.Y., Sharafutdinova D.R., Khrapkovskii G.M., Interaction of Bicyclopentadiene with Elemental Sulfur Initial Stages of the Reaction, *Chemistry and Computational Simulation*, 2002, **43**, 29-32.
- [164] Vroom A., Sulfur Concrete Goes Global, *Concrete International*, 1998, **20**(1), 68-71.

- [165] Spence R.D., Shi C., *Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes*, CRC Press, USA, 2005.
- [166] Weber H.H., McBee W.C., Krabbe E.A., Sulfur Concrete Composite Materials for Construction and Maintenance, *Materials Performance*, 1990, **29**(12), 73-77.
- [167] Erel M.S., Bazı Kloro ve Amino Antrakinin Yapılı Boyarmaddelerin Y-H Tipi Sıvı Kristal Sistemlerde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2012, 323039.
- [168] Pür B., Yeni Asimetrik Ftalosiyanimler, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2011, 300291.
- [169] Ekineker G., Köprülü Dimerik Ftalosiyanimler, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2010, 271535.
- [170] Altındış Abulkadir H., Dispers Turuncu Boya Katkılı Sıvı Kristallerin Yolcu-Hancı Tipi Sistemlerde Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2012, 321684.
- [171] Babacan V., Poli (Etilen Tereftalat), 4-Hidroksifenilasetik Asit ve Asetoksibenzoik Asitle Termotropik Sıvı Kristal Kopoliesterlerin Sentezi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2008, 216643.
- [172] Akkurt F., Kaya N., Alıcılar A., Phase transitions, order parameters and threshold voltages in liquid crystal systems doped with disperse orange dye and carbon nanoparticles, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2009, **17**(6), 616-624.
- [173] Emek M., Faz Dönüşümlerinin Nematik Sıvı Kristallerin Elektro-Optik Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2007, 199952.
- [174] Pickard S.S., Sulfur Concrete for Acid Resistant, *Chemical Engineering*, 1985, **92**(15), 77-78.
- [175] Kalb P.D., Milian L.W., Yim S.P., Dyer R.S., Michaud W.R., Treability Study on the Use of By-Product Sulfur in Kazakhstan for the Stabilization of Hazardous and Radioactive Wastes, *American Chemical Society Symposium on Emerging Technologies in Hazardous Waste Management*, Pittsburgh, USA, 1997.
- [176] Kalb P.D., III J.H., Colombo P., Modified Sulfur Cement Encapsulation of Mixed Waste Contaminated Incinerator Fly Ash, *Waste Management*, 1991, **11**(3), 147-153.

- [177] Yıldız A., Genç Ö., Bektaş S., *Enstrümantal Analiz Yöntemleri*, Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Türkiye, 1997.
- [178] Aksoğan Korkmaz A., Şırnak Asfaltinin Piroлиз Özelliklerinin Termal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, 2007, 177017.
- [179] Flynn, J.H., *Thermogravimetric Analysis and Differential Thermal Analysis, Aspects of Degradation and Stabilization of Polymers*, Elsevier, Netherlands, 1978.
- [180] Ng H.M., Saidi N.M., Omar F.S., Ramesh K., Ramesh S., Bashir S., Thermogravimetric Analysis of Polymers, *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 2018, DOI: 10.1002/0471440264.pst667.
- [181] Gündüz T., *İnstrümantal Analiz*, Gazi Kitabevi, Türkiye, 2005.
- [182] Rogers R.N., Morris E.D., On Estimating Activation Energies with a Differential Scanning Calorimeter, *Analytical Chemistry*, 1966, **38**(3), 412-414.
- [183] Yılmaz N., Azotça Zengin Organik Bazların Pikrat ve Perklorat Tuzların Tasarımı, Sentezi ve Termal Analiz Yöntemleriyle İncelenmesi, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2013, 338120.
- [184] Skoog D.A., Holler F.J., Nieman T.A., *Principles of Instrumental Analysis*, Saunders College Publishing, USA, 2001.
- [185] Liu Y.H., Wang T.J., Qin L., Jin Y., Urea Particle Coating for Controlled Release by Using DCPD Modified Sulfur, *Powder Technology*, 2008, **183**, 88-93.
- [186] Bilgen G., Öğütölmüş Çelikhane Cürufu, Kireç ve Deniz Suyunun Killerin İyileştirilmesinde Kullanımı, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2013, 301637.
- [187] Sadık E., MR Uygulamalarının Dental Amalgamdaki Faz Değişiklikleri ve Cıva Buharlaşması Üzerine Etkilerinin XRD ve XPS Yöntemleri İle İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2011, 294335.
- [188] He B.B., *Two-Dimensional X-Ray Diffraction*, A John Wiley & Sons Inc. Publication, Canada, 2009.
- [189] Yavuz M., Nano Yapılı Şeritlerin ve Tozların Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2010, 285029.
- [190] Egerton R.F., *Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM, and AEM*, Springer, USA, 2005.

- [191] Hammons M.I., Smith D.M., Wilson D.E., Reece C.S., Investigation of Modified Sulfur Concrete as a Structural Material, *U.S. Army Corps of Engineers*, 1993, Report No: CPAR-SL-93-1, 37.
- [192] Makenya A.R., Composition for Durability of a Chempruf-Modified Sulfur Concrete, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Architecture, Stockholm, Sweden, 1997.
- [193] Makenya A.R., Hellers B.G., European Market Opportunities: Sulfur Concrete in Sweden, *The Sulphur Institute's 7th Biennial Symposium*, Washington, USA, 2000.
- [194] Makenya A.R., Industrial Application of Sulfur Concrete an Environmental Friendly Construction Material, Dissertation, Royal Institute of Technology, Department of Architecture, Stockholm, Sweden, 2001.
- [195] Mohamed A.M.O., Gamal M.E., Durability of Sulfur Concrete Manufactured from Recycled Waste Materials, *The 8th UAE University Annual Conference*, Al Ain, UAE, 23-25 April 2007.
- [196] Mohamed A.M.O., Gamal M.E., Sulfur Cement and Concrete Production, *The 9th UAE University Annual Conference*, Al Ain, UAE, 23-25 April 2008.
- [197] Okumara H.A., Early Sulfur Concrete Installations, *Concrete International*, 1998, **20**(1), 72-75.
- [198] Kucharczykova B., Karel O., Danek P., Kocab D., Pössl P., Comparison of Measurements Methods Intended to Determination of the Shrinkage Development in Polymer Cement Mortars, *Procedia Engineering*, 2017, **195**, 17-23.
- [199] TS EN 12350-2, Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.
- [200] TS EN 12350-6, Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 6: Yoğunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.
- [201] ASTM C-138, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2001.
- [202] ASTM C-39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2018.
- [203] ASTM C-293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2016.

- [204] ASTM C-496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, 2017.
- [205] Tangüner R., Uçucu Külü Düşük ve Yüksek Mukavemetli Betonların Elastiklik Modülünün İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007, 223639.
- [206] Tiryaki V.C., Farklı Bileşimli Betonlarda Tekrarlı Yükün Betonun Elastiklik Modülüne Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2016, 441710.
- [207] Çakı S.İ., Ağır Betonların Elastisite Modülünün Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye, 2013, 341594.
- [208] Şaman R., Farklı Beton Türü ve Lif Oranları Kullanılarak Oluşturulmuş Numuneler İçin Dinamik ve Statik Elastisite Modülünün Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat, Türkiye, 2018, 503079.
- [209] TS 500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1984.
- [210] ACI 363R-92, Materials and General Properties of Concrete, *ACI Manual of Concrete Practice Part 1*, Michigan, 1984.
- [211] CEB-FIB, CEB-FIB Model Code for Concrete Structures, *Committee Euro-International du Beton*, Michigan, 1993.
- [212] NS 3473, Concrete Structures - Design and Detailing Rules, *Norwegian Standards*, Norway, 2003.
- [213] EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, *European Committee for Standardization*, Brussels, 2004.
- [214] Öztekin E., Eker Ç., Derin E., Betonun Basınç Dayanımının Ölçülmesinde 150/300 veya 100/200mm Silindir Numune Kullanımı, *Hazır Beton Birliği Dergisi*, Mart-Nisan 2012, 75-78.
- [215] İnce İ., Donma-Çözülme Döngüsünün Kayaçların Mühendislik Parametreleri Üzerine Etkisi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2013, 335279.
- [216] Tekmen T., Kireçtaşlarından Üretilen Kilitli Beton Parke Bloklarının Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2006, 183753.

- [217] Çavdar A., Yetgin Ş., Investigation of Abrasion Resistance of Cement Mortar with Different Pozzolanic Compositions and Subjected to Sulfated Medium, *Construction and Building Materials*, 2010, **24**, 461-470.
- [218] Semiz M., Beton Kilit Taşlarının Fiziksel Özellikleri ve Alternatif Üretiminin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2006, 196703.
- [219] Yüksel İ., Bilir T., Yüksek Fırın Cürufunun Parke ve Bordür Üretiminde Kullanılması, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart 2005.
- [220] TS 2824 EN 1338, Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları-Gerekli Şartlar Ve Deney Metotları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2005.
- [221] TS EN 12390-8, Beton-Sertleşmiş Beton Deneylemleri-Bölüm 8: Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.
- [222] Erdoğan G., Bazalt Lif Katkılı Betonların Mekanik ve Geçirimsizlik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2014, 411538.
- [223] Pekdemir M., Hasankale Pasinler Pomzası ile Üretilen Betonların Bazı Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 2011, 299795.
- [224] Durmuş G., Investigation of Penetration of Water Values of Different Concrete Types, *Journal of Polytechnic*, 2008, **11**(4), 379-383.
- [225] ÇSB 30223, Binalarda Su Yalıtımı Yönetmeliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, 2017.
- [226] Karakoç M.B., Hafif Agreganın ve Hava Sürükleyici Katkı Maddesinin Yüksek Dayanımlı Betonun Donma-Çözülme Dayanıklılığına Etkisinin İncelenmesi ve Modellenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 2010, 255932.
- [227] Sevin S., Polimerle İyileştirilmiş Harçların En Uygun Kür Koşullarının Belirlenmesi ve Donma-Çözülme Etkisi Altında Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane, Türkiye, 2014, 361085.
- [228] Ataş Z., Hava sürükleyici ve lif katkısı içeren çimento harçlarının donma-çözülme etkisi altında mekanik davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane, Türkiye, 2013, 343127.
- [229] Çavdar A., Investigation of Freeze-Thaw Effects on Mechanical Properties of Fibre Reinforced Cement Mortars, *Composites Part B: Engineering*, 2014, **58**, 463-472.

- [230] Baradan B., Yazıcı H., Ün H., *Betonarme Yapılarda Kalıcılık*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Türkiye, 2002.
- [231] Öztütüncü G.H., Ortalama Hafif Agregaya Boyutunun Yarı Hafif Betonların Dona Dayanıklılığı Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 1992, 21992.
- [232] Dursun Ö.F., Değişik Cins Puzolan Katkı İçeren Çimentolarla Üretilen Betonlarda Dona Dayanıklılık Değişiminin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2002, 116694.
- [233] Şahin Y., Hava sürükleyici katkıların karakterizasyonu ve deney koşullarının donma-çözülme hasarına etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2013, 352289.
- [234] Karakoç M.B., Demirboğa R., Türkmen İ., Can İ., Modeling with ANN and Effect of Pumice Aggregate and Air Entrainment on the Freeze-Thaw Durabilities of HSC, *Construction and Building Materials*, 2011, **25**, 4241-4249.
- [235] Peng G.F., Ma Q., Hu H.M., Gao R., Yao Q.F., Lui Y.F., The Effect of Air Entrainment and Pozzollans on Frost Resistance of 50-60 MPa Grade Concrete, *Construction and Building Materials*, 2007, **21**, 1034-1039.
- [236] Hansen M.R., Durability of High Performance Concrete, PhD Thesis, North Carolina State University, Civil Engineering and Construction Department, Carolina, USA, 1993.
- [237] Whiting D., Durability of High Strength Concrete , *International Conference ACI SP-100*, Atlanta, Georgia, 1987.
- [238] Jacobsen S., Gran H.C., Sellevold E.J., Bakke J.A., High Strength Concrete Freeze/Thaw Testing and Cracking, *Cement and Concrete Research*, 1995, **25**(8), 1775-1780.
- [239] Jacobsen S., Sellevold E.J., Self-Healing of High Strength Concrete After Deterioration by Freeze/Thaw, *Cement and Concrete Research*, 1996, **26**, 55-62.
- [240] Jacobsen S., Calculating Liquid Transport into High Performance Concrete During Wet Freeze/Thaw, *Cement and Concrete Research*, 2005, **35**, 213-219.
- [241] Bogas J.A., Brito J., Ramos D., Freeze-Thaw Resistance of Concrete Produced with Fine Recycled Concrete Aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 2016, **115**, 294-306.
- [242] Gesoğlu M., Güneyisi E., Khoshnaw G., İpek S., Abrasion and Freezing-Thawing Resistance of Previous Concretes Containing Waste Rubbers, *Construction and Building Materials*, 2014, **73**, 19-24.

- [243] Mao M., Zhang D., Yang Q., Zhang W., Study of Durability of Concrete with Fly Ash as Fine Aggregate Under Alternative Interactions of Freeze-Thaw and Carbonation, *Construction and Building Materials*, 2019, DOI: 10.1155/2019/4693893.
- [244] Li Z., *Advanced Concrete Technology*, A John Wiley & Sons Inc. Publication, Canada, 2011.
- [245] Wu J., Jing X., Wang Z., Uni-axial Compressive Stress-Strain Relation of Recycled Coarse Aggregate Concrete After Freezing and Thawing Cycles, *Construction and Building Materials*, 2017, **134**, 210-219.
- [246] Soo K.S., Frost Susceptibility of Concrete in Near-Saturated States, PhD Thesis, Iowa State University, Civil Engineering Department, Canada, 1989, 3034236.
- [247] Pavlenko S.I., Permyakov A.A., Aphanasiev V.K., Frost Resisting and Waterproof Fine-Grained Slag Ash Concrete for Roofs of Residential Structures, *International RILEM Workshop on Resistance of Concrete to Freezing and Thawing*, Essen, Germany, 22-23 September 1997.
- [248] Mehta P.K., Monteiro P.J.M., *Concrete Microstructure, Properties and Materials*, McGraw-Hill, USA, 2005.
- [249] Neville A.M., *Properties of Concrete*, Longman, USA, 1995.
- [250] Yoon J.H., An Experimental Study on the Durability of Sulfur Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 2006, **22**(6), 95-102.
- [251] Bozkurt R., *Kükürt*, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları , Türkiye, 1989.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Engin S., **Öztürk O.**, Okay A., Estimation of ultimate torque capacity of the SFRC beams using ANN, *Structural Engineering and Mechanics*, DOI: 10.12989/sem.2015.53.5.939.
- [2] Şenel Ç., **Öztürk O.**, Akçay B., Effect of Curing Condition on The Mechanical Properties of Self Compacting Metakaolin Blend Concrete, *12th International Congress on Advances in Civil Engineering*, İstanbul, 21-23 Eylül 2016.
- [3] **Öztürk O.**, Engin S., Öner A., Baytekin Çiçek G., The Effect of High Temperature on The Flexural Strength of The Mortars Containing Colemanite, *International Symposium on Natural Hazards and Hazard Management*, Karabük, 2-4 Mart 2016.
- [4] Engin S., **Öztürk O.**, Öner A., Üretürk B., Effect of Addition of Steel Fiber to Bonding Strength of Concrete, *International Symposium on Natural Hazards and Hazard Management*, Karabük, 2-4 Mart 2016.
- [5] Engin S., **Öztürk O.**, Öner A., Üretürk B., Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Çelik Lif Katkısının Aderans Dayanımına Etkisi, *Prof. Dr. Hasan Boduroğlu Sempozyumu*, İstanbul, 9-10 Mayıs 2016.
- [6] **Öztürk O.**, Öner A., Determination of the Compressive and Flexural Strength of F Class Fly Ash Partial Replaced Concrete by Using Artificial Neural Network, *11th International Congress on Advances in Civil Engineering*, İstanbul, 21-25 Ekim 2014.
- [7] **Öztürk O.**, Engin S., Temiz T., Opan M., Öner A., Predicting of The Compressive and Flexural Strength of Ground Granulated Blast Furnace Slag Concrete By Using Artificial Neural Network, *9th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Trabzon, 21-25 Ekim 2014.
- [8] Öner A., **Öztürk O.**, Engin S., Fire Performance of Chemical Admixtures in Cement Mortars, *International Earthquake Symposium*, Kocaeli, 17-19 Ağustos 2009.
- [9] **Öztürk O.**, Opan M., Temiz T., Determination of Relationships Between Deflection and Safety Factors for A Concrete Gravity Dam in Earthquake, *International Earthquake Symposium*, Kocaeli, 17-19 Ağustos 2009.
- [10] Engin S., **Öztürk O.**, Öner A., İnşaat İşlerinde Meydana Gelen Kazaların Sebep ve Sonuçlarının İrdelenmesi, *İş Sağlığı ve Güvenliği Sempozyumu*, Sakarya, 13-14 Kasım 2009.

- [11] ukdar A., Meydanlı Atalay H., Akpınar E., Engin S., **Öztürk O.**, Okay F., Özden Ő., Tarihi Kocaeli Savcılık Binası Analiz ve Güçlendirilmesi, *Yapısal Onarım ve Güçlendirme Sempozyumu*, Denizli, 7-8 Aralık 2006.



ÖZGEÇMİŞ

Onur ÖZTÜRK, 1983 Yılında İzmit/Kocaeli’de doğdu. İlköğrenimini İstanbul Medine Tayfur Sökmen İlköğretim Okulu, ortaöğrenimini Tuzla Süper Lisesinde tamamladı. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2007 yılında Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisansını tamamladı ve doktora çalışmasına aynı yıl başladı. 2004 yılında Riva İnşaat ve 2005 yılında Eren Mühendislik firmalarında proje mühendisi olarak çalıştıktan sonra 2006 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen çalışma hayatına devam etmektedir.

