

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SODYUM BİKARBONAT KATKILI ÇİMENTO
HAMURU VE HARÇLARIN REOLOJİK,
FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Mustafa Bartu TOK

Mart, 2025

İZMİR

**SODYUM BİKARBONAT KATKILI ÇİMENTO
HAMURU VE HARÇLARIN REOLOJİK,
FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemeleri Programı**

Mustafa Bartu TOK

Mart, 2025

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MUSTAFA BARTU TOK tarafından **PROF.DR. BURAK FELEKOĞLU** yönetiminde hazırlanan “**SODYUM BİKARBONAT KATKILI ÇİMENTO HAMURU VE HARÇLARIN REOLOJİK, FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Burak FELEKOĞLU

Danışman

Prof. Dr. Selçuk TÜRKEKEL

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Abdullah Seçkin

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans eğitiminin ilk gününden beri inşaat mühendisliği alanına duyduğu sevgisini ve merakını öğrencilerine de aşlamaya çalışan, sahip olduğu bütün bilgileri ve deneyimleri aktarmaktan hiçbir zaman asla çekinmeyen, bu süreç boyunca da her zaman sorularımı cevaplayıp yanımda olan, inşaat mühendisliği mesleğinin hakkını veren ve bu mesleği bana daha çok sevdirtten çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Burak FELEKOĞLU'na

Doğduğum günden, bebekken attığım ilk adımdan beri bana her zaman destek olan, her zaman başarabileceğimi söyleyen, hayatım boyunca hangi kararı alırsam alayım her zaman arkamda olan annem Serap TOK, babam Mesut TOK ve canım ablam İrem TOK'a

Türkiye Cumhuriyeti Devleti'ni kurarak bizlerin bağımsız bir devlet ve halk olmamızı sağlayan, Türk halkına çağdaş ve doğru yolu gösteren, her zaman izini takip edeceğim Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal ATATÖRK'e

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa Bartu TOK

SODYUM BİKARBONAT KATKILI ÇİMENTO HAMURU VE HARÇLARIN REOLOJİK, FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Küresel ısınma, politikadan tarım sektörüne kadar her alanda neden olduğu zararlardan dolayı konuşulan ve kendisine çözüm aranan bir felakettir. Küresel ısınmayı en çok etkileyen faktörlerden biri karbondioksit gazı salımıdır ve bu nedenle birçok araştırmacı kendi alanında bu emisyonu azaltma yolları aramaktadır. Çimento üretimi küresel anlamda yıllık karbondioksit emisyonunun yaklaşık yüzde sekizinin tek başına kaynağıdır. Portland çimentosunun üretimi sırasında kullanılan malzemelerin ısınmasıyla oluşan kimyasal reaksiyonlar ve ısıtmada kullanılan fosil yakıtlar karbondioksit gazı salımına neden olmaktadır. Yıllar boyunca süren ancak yavaş gerçekleşen karbonatlaşma reaksiyonu sonucu sertleşmiş beton bünyesine karbondioksit gazını bağlamak mümkündür. Birçok araştırmacı karbondioksiti beton içerisine daha hızlı hapsedme hedefiyle farklı yöntemler kullanarak araştırmalar yapmıştır.

Yapılan yüksek lisans tezi kapsamında ise üretimi sırasında karbondioksit gazını katı halde bağlayabilen sodyum bikarbonat tozunun taze haldeki çimento hamuruna ve harcına ilavesinin; reolojik, fiziksel ve mekanik etkileri araştırılmıştır. Yapılan literatür taraması sonucu sodyum bikarbonatın sertleşmiş haldeki betonun basınç ve eğilme dayanımı gibi faktörlere etkisinin araştırıldığı ancak çimento hamuru reolojik davranışına etkisinin detaylı şekilde incelenmediği görülmüştür. Bundan dolayı yapılan çalışma kapsamında sodyum bikarbonatın çimento harcına ilavesinin mekanik ve fiziksel özelliklere etkilerinin yanında çimento hamurunun statik eşik kayma gerilmesi, dinamik eşik kayma gerilmesi, plastik viskozite gibi reolojik parametrelerine etkileri de incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sodyum bikarbonat (NaHCO_3), taze hamur reolojisi, priz süresi, eğilme ve basınç dayanımı

**INVESTIGATION OF THE RHEOLOGICAL, PHYSICAL, AND
MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT PASTE AND MORTARS
WITH SODIUM BICARBONATE ADDITIVE**

ABSTRACT

From politics to agriculture, global warming is a catastrophe that is talked about and sought for solutions due to the damages it causes in every field. One of the factors that most affects global warming is carbon dioxide gas emissions, and for this reason, many researchers are looking for ways to reduce this emission in their own fields. Cement production, which alone accounts for about eight percent of annual carbon dioxide emissions globally. This emission is caused by the carbon dioxide emitted by chemical reactions caused by the heating of the materials used in the production of Portland cement and the fossil fuels used to heat these materials. It is possible to bind carbon dioxide gas to the hardened concrete structure as a result of the carbonation reaction that lasts slowly for years. Therefore, many researchers have conducted research using different methods with the aim of trapping carbon dioxide in concrete more quickly.

Within the scope of the master's thesis, the rheological, physical and mechanical effects of the addition of sodium bicarbonate powder, which is produced in solid form by trapping carbon dioxide gas during its production, to fresh cement paste and mortar were investigated. As a result of the literature review, it was seen that the effect of sodium bicarbonate on factors such as compressive and flexural strength of hardened concrete was investigated, but its effect on the rheological behavior of cement paste was not examined in detail. Therefore, in this study, in addition to the effects of adding sodium bicarbonate to cement mortar on mechanical and physical properties, its effects on rheological parameters such as static threshold shear stress, dynamic threshold shear stress, and plastic viscosity of cement paste were also investigated.

Keywords: Sodium bicarbonate (NaHCO_3), fresh paste rheology, setting time, flexural and compressive strength

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiii
SEMBOLLER	xiv
KISALTMALAR	iii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ	1
1.1 Dünya Üzerinde CO ₂ Salımı ve Farklı Sektörlerin Etkisi	1
1.2 Potland Çimentosunun Üretimi	4
1.3 Portland Çimentosunun Bileşenleri	8
1.4 Portland Çimentosunun Hidratasyon Reaksiyonları	11
1.5 Katkılı Portland Çimentonun Sınıflandırılması	12
1.6 CO ₂ Salımı Açısından PÇ ve Alternatifleri	17
1.7 Sodyum bikarbonatın üretim yöntemleri	21
1.8 Sodyum Bikarbonatın Kullanım Alanları	24
BÖLÜM İKİ - ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	27
2.1 Betonun pH'ı	27
2.2 Betonun Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri	28
2.3 Betonun Basınç Dayanımı	29
2.4 Hidratasyon Sırasında Açığa Çıkan Isı	31
BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR	34
3.1 Malzemeler	34
3.1.1 Çimento	34

3.1.2 Su	35
3.1.3 İnce agrega	36
3.1.4 Süperakışkanlaştırıcı Katkı	36
3.1.5 Sodyum Bikarbonat	37
3.2 Çimento hamuru ve çimento harcı karışım oranları ve hazırlama yöntemi	38
3.3 Deney Yöntemleri.....	42
3.3.1 Taze Hal Deneyleri	42
3.3.2 Sertleşmiş Hal Deneyleri	47

BÖLÜM DÖRT - SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 51

4.1 Taze Hal Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	51
4.1.1 Vicat Deneyi Sonucu elde edilen Priz Süreleri.....	51
4.1.2 Yayılma Tablası Deneyi Sonuçları	52
4.1.3 Reolojik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	56
4.2 Sertleşmiş Hal Deneyleri	61
4.2.1 Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonucunun Değerlendirilmesi	61
4.2.2 Su Emme Tayini Sonuçlarının Değerlendirilmesi	62
4.2.3 Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	63
4.2.4 Maliyet ve Karbon Ayakizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	69
4.3 Sonuç ve Öneriler	73

KAYNAKLAR..... 75

EKLER..... 81

EK 1: 0,5 S/Ç ve %0 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği.	81
EK 2: 0,5 S/Ç ve %2 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği.	81
EK 3: 0,5 S/Ç ve %4 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği.	82
EK 4: 0,5 S/Ç ve %6 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği.	82
EK 5: 0,4 S/Ç ve %0 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği.	83
EK 6: 0,4 S/Ç ve %2 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği.	83
EK 7: 0,4 S/Ç ve %4 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği.	84
EK 8: 0,4 S/Ç ve %6 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği.	84

EK 9: 0,3 S/Ç ve %0 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği.	85
EK 10: 0,3 S/Ç ve %2 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği	85
EK 11: 0,3 S/Ç ve %4 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği	86
EK 12: 0,3 S/Ç ve %6 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği	86
EK 13: 0,5 S/Ç %0 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	87
EK 14: 0,5 S/Ç %2 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	87
EK 15: 0,5 S/Ç %4 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	88
EK 16: 0,5 S/Ç %6 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	88
EK 17: 0,4 S/Ç %0 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	89
EK 18: 0,4 S/Ç %2 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	89
EK 19: 0,4 S/Ç %4 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	90
EK 20: 0,4 S/Ç %6 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	90
EK 21: 0,3 S/Ç %0 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	91
EK 22: 0,3 S/Ç %2 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	91
EK 23: 0,3 S/Ç %4 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	92
EK 24: 0,3 S/Ç %6 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği.	92
EK 25: 0,5 S/Ç ve %0 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	93
EK 26: 0,5 S/Ç ve %2 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	93
EK 27: 0,5 S/Ç ve %4 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	94
EK 28: 0,5 S/Ç ve %6 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	94
EK 29: 0,4 S/Ç ve %0 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	95
EK 30: 0,4 S/Ç ve %2 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	95
EK 31: 0,4 S/Ç ve %4 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	96
EK 32: 0,4 S/Ç ve %6 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	96
EK 33: 0,3 S/Ç ve %0 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	97
EK 34: 0,3 S/Ç ve %2 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	97
EK 35: 0,3 S/Ç ve %4 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	98
EK 36: 0,3 S/Ç ve %6 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği	98
EK 37: 0,5 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu statik ekg değerleri.....	99

EK 38: 0,5 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu dinamik ekg değerleri	99
EK 39: 0,4 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu statik ekg değerleri.....	99
EK 40: 0,4 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu dinamik ekg değerleri	100
EK 41: 0,3 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu statik ekg değerleri...	100
EK 42: 0,3 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu dinamik ekg değerleri	101



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Yıllara göre CO ₂ salım miktarı	1
Şekil 1.2 Atmosferdeki CO ₂ oranının on bin yıllık oranları	2
Şekil 1.3 CO ₂ salımının küresel etkileri	3
Şekil 1.4 Sektörlere göre CO ₂ salım yüzdesi	4
Şekil 1.5 Döner fırının temsili çizimi	8
Şekil 1.6 Çimento bileşenleri	10
Şekil 1.7 Çimento bileşenlerinin basınç dayanımı	11
Şekil 1.8 Su ilavesinin klinker üzerindeki etkisi.....	11
Şekil 1.9 Hidratasyon reaksiyonu süreçleri.....	12
Şekil 1.10 İçinde kalsinleşmiş kil ve kireç bulunan klinkerin bileşen oranları.....	19
Şekil 1.11 Köpük flotasyon kolonunun şematik gösterimi	23
Şekil 1.12 Örneklerin kuvvet ve deformasyon grafiği	26
Şekil 2.1 Örneklerin farklı katkı ilavesindeki pH değerleri	27
Şekil 2.2 NaHCO ₃ oranının priz süresine etkisi	29
Şekil 2.3 NaHCO ₃ oranının basınç dayanımına etkisi	30
Şekil 2.4 NaHCO ₃ 'ün hidratasyon zamanı klinkere etkisi	31
Şekil 2.5 İlk hidratasyon ısı tepesinde NaHCO ₃ oranının etkisi.....	32
Şekil 2.6 İkinci hidratasyon ısı tepesinde NaHCO ₃ oranının etkisi.....	33
Şekil 3.1 Araştırmada kullanılan agreganın dane dağılımı grafiği.....	36

Şekil 3.2 Harç hazırlama sürecinin şeması.....	38
Şekil 3.3 Referans 0,5 S/Ç çimento hamurunun yayılmış hali.....	40
Şekil 3.4 Çimento harçlarının karıştırma işlemi.....	41
Şekil 3.5 Çimento harcının tokmaklanma ve dış vibrasyon işlemi uygulanması..	41
Şekil 3.6 Harçların dökümünden küre konulmasına kadar olan işlemler.....	42
Şekil 3.7 Vicat aleti	43
Şekil 3.8 Yayılma tablası deneyi sonucu yayılan hamur.....	44
Şekil 3.9 Hamurun akma direncini ölçmek için reometreye takılan uç	45
Şekil 3.10 Reoloji ölçümleri için kullanılan reometre	45
Şekil 3.11 Hamurların akma eğrisi için takip edilen prosedür	46
Şekil 3.12 V. aralığın akma eğrisi	47
Şekil 3.13 Harçların kurumması için etüve atılması ağırlıklarının tartılması.....	48
Şekil 3.14 3 noktalı eğilme dayanımı testi uygulanışı.....	49
Şekil 3.15 Basınç makinesinde örneğin basınç altında bırakılması	50
Şekil 4.1 Priz başlama sürelerinin grafiği	51
Şekil 4.2 Priz sonu sürelerinin grafiği	52
Şekil 4.3 Yayılma tablası deneyi sonucunda harçların yayıldığı değerler	53
Şekil 4.4 0,5 S/Ç ve %2 karkılı harcın dökümden 5dk sonra ani katılaşması.....	54
Şekil 4.5 Sodyum bikarbonat ilavesinin hamurların akışkanlığı üzerindeki etkisi	55
Şekil 4.6 0,3 S/Ç ve %4 katkılı hamurun karışım sırasında topaklanması.....	56
Şekil 4.7 Çimento hamurlarının reometrede testi sonucu statik ekg değerleri.....	57

Şekil 4.8 Çimento hamurlarının reometrede testi sonucu dinamik ekg değerleri..	58
Şekil 4.9 Çimento hamurlarının test sonucu plastik viskozite değerleri.....	59
Şekil 4.10 Hamurların Statik EKG-Yayıma Çapı grafiği.....	60
Şekil 4.11 Hamurların Dinamik EKG-Yayıma Çapı grafiği.....	60
Şekil 4.12 Hamurların Dinamik-Statik EKG Grafiği.....	61
Şekil 4.13 Harçların 28 gün sonundaki kbha değerleri	62
Şekil 4.14 Harçların 28 gün sonundaki su emme oranları	62
Şekil 4.15 Harçların KBHA-Su Emme Grafiği.....	63
Şekil 4.16 Harçların 3 günlük eğilme dayanımları.....	64
Şekil 4.17 Harçların 7 günlük eğilme dayanımları.....	64
Şekil 4.18 Harçların 28 günlük eğilme dayanımları.....	65
Şekil 4.19 Harçların 3 günlük basınç dayanımları	66
Şekil 4.20 Harçların 7 günlük basınç dayanımları	66
Şekil 4.21 Harçların 28 günlük basınç dayanımları	67
Şekil 4.22 Harçların Eğilme-Basınç Dayanımı Grafiği.....	68
Şekil 4.23 Harçların Eğilme-Su Emme Grafiği.....	68
Şekil 4.24 Harçların Basınç Dayanımı-Su Emme Grafiği.....	69
Şekil 4.25 Hazırlanan her bir harcın \$ cinsinden maliyeti.....	70
Şekil 4.26 1 MPa eğilme dayanımı için harcanan para.....	71
Şekil 4.27 1 MPa basınç dayanımı için harcanan para.....	72
Şekil 4.28 Her bir harç başına salınan CO ₂ miktarı.....	72

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Döner fırında yaşanan kalsinasyon reaksiyonları	7
Tablo 1.2 Çimento ana bileşenlerinin özellikleri	10
Tablo 1.3 Farklı Çimento sınıfları.....	13
Tablo 3.1 CEM I 42,5 sınıfı Portland çimentosunun kimyasal özellikleri.....	34
Tablo 3.2 Kullanılan suyun kimyasal özellikleri	35
Tablo 3.3 Süperakışkanlaştırıcı katkının fiziksel özellikleri.....	37
Tablo 3.4 Sodyum bikarbonatın kimyasal özellikleri	37
Tablo 3.5 Hamur ve harç serilerinde kullanılan sodyum bikarbonat miktarları.....	40
Tablo 4.1 Harç için kullanılan malzemelerin maliyet ve CO ₂ salım analizi.....	70

SEMBOLLER LİSTESİ

CO₂ : Karbondioksit

mg/L : miligram / litre

°C : Santigrad derece

m : metre

2SiO₂.Al₂O₃.2H₂O: Kaolinit

Al₂O₃ : Aliminyum Oksit

SiO₂ : Silisyum dioksit

H₂O : Su

C₃S : Alit (3CaO.SiO₂)

C₂S : Belit (2CaO.SiO₂)

C₃A : Trikalsiyum alüminat (3CaO.Al₂O₃)

C₄AF : Ferrit (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃)

CaSO₄ : Alçıtaşı

CaCO₃ : Kalsiyum Karbonat

Fe₂O₃ : Demir Oksit

Si : Silisyum

Ca : Kalsiyum

CaO : Kalsiyum Oksit

kal/g : kalori / gram

MPa	: Megapaskal
C ₄ ASH ₁₈	: Etrenjit iğnesi
OH ⁻	: Hidroksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksittir
kg	: kilogram
NaHCO ₃	: Sodyum Bikarbonat
NaCl	: Sodyum Klorür
NH ₄ OH	: Amonyum Hidroksit
(NH ₄) ₂ CO ₃	: Amonyum Karbonat
kW	: Kilowatt
m ² *s ⁻¹	: metrekare bölü saniye
mg*s ⁻¹	: miligram bölü saniye
MgO	: Magnezyum Oksit
K ₂ O	: Potasyum oksit

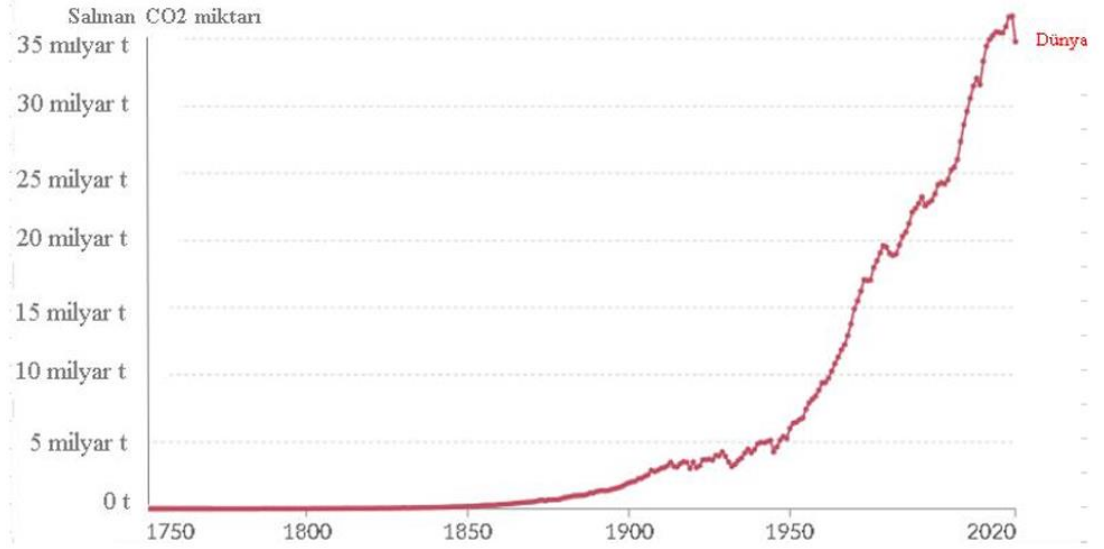
KISALTMALAR

COVID-19	: Korona virüs hastalığı (2019)
NOAA	: Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi
CA	: $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
C	: CaO
CS	: $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
S	: SiO_2
F	: Fe_2O_3
PÇ	: Portland Çimentosu
C-A-S-H	: Etrejit
CH	: Kalsiyum hidroksit
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
PSC	: Portland Cürüflu Çimento
PLC	: Portland Kalkerli Çimento
PCC	: Portland Kompoze Çimento
SB	: Sodyum Bikarbonat
SCM	: Çimento Katkı Maddesi
LC ³	: Kireçli Kalsinleşmiş Kil Çimentosu
C $\bar{\text{S}}$ A	: Sülfoalüminat Çimento
HCM	: Hidrate Magnezyum Karbonatlar
pH	: Potansiyel Hidrojen

BÖLÜM BİR GİRİŞ

1.1 Dünya Üzerinde CO₂ Salımı ve Farklı Sektörlerin Etkisi

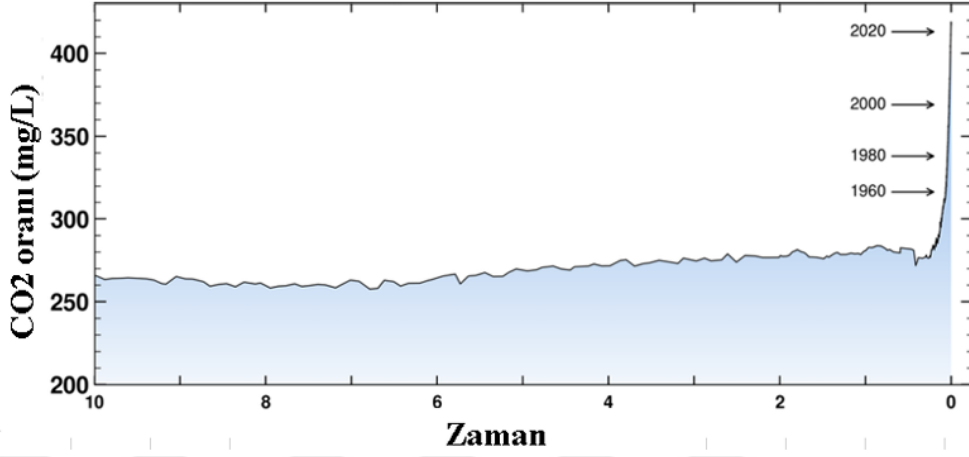
Sanayi Devrimi'nin yaşanmasıyla birlikte insanoğlunun bin yıllardır gerçekleştirdiği CO₂ salımı son 10 senede bilim insanlarını endişelendirecek seviyeye kadar gelmiştir. Şekil 1 incelendiğinde Sanayi Devrimi öncesi CO₂ salımı çok düşük değerlerde iken, devrim sonrasında bunun artmaya başladığı görülmektedir. Fakat 1990 yılına geldiğimizde salınan CO₂ miktarının neredeyse 4 katına çıkıp yılda 22 milyar ton/yıl'a ulaşmıştır. Bu değer günümüzde yaklaşık olarak 34 milyar ton/yıl civarındadır (Şekil 1.1). 2020 yılında ise yaşanan COVID-19 pandemisi nedeniyle yıllık CO₂ salımında yaklaşık olarak %5,4'lük bir düşüş yaşandığı görülmektedir (Friedlingstein vd., 2022).



Şekil 1.1 Yıllara göre CO₂ salım miktarı (Ritchie vd., 2020)

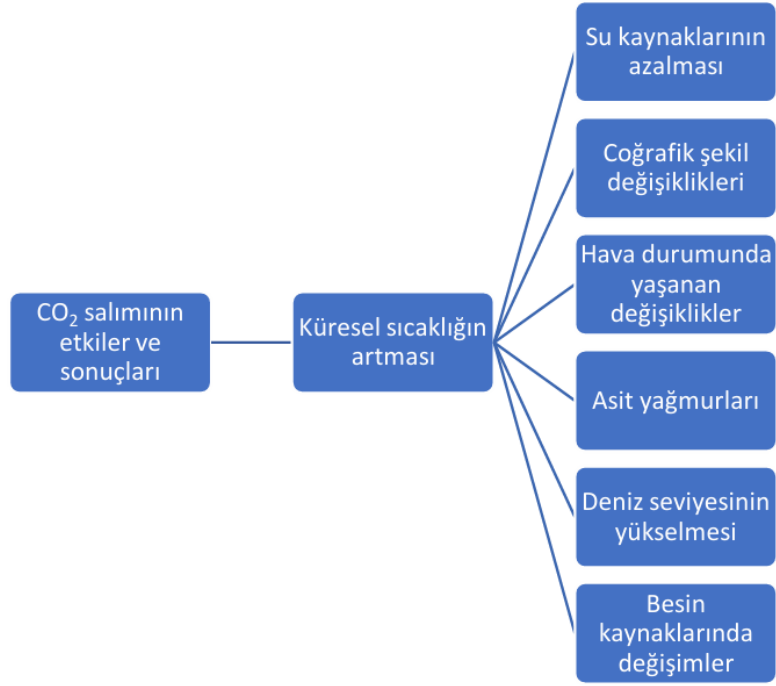
Dünya tarihine bakıldığında ise günümüzdeki bu değerlerin bir rekor olduğunu yapılan ölçümler sayesinde ortaya çıkmıştır. Dieter Lüthi vd. (2008) yaptığı çalışmada, Antartika bölgesinden alınan buz karotlarının önce yaşı hesaplanmıştır. Daha sonra karotların içlerindeki hava baloncuklarının içinde bulunan gazların oranlarına bakılarak farklı değerler elde edilmiştir. Böylelikle toplamda 800.000 yıl önce bile

havanın içinde farklı gazların ne oranda bulunduğu hesaplanabilmiştir. Bu çalışma sonucu elde edilen Şekil 1.2'de son 10.000 yıldaki yani insanoğlunun varlığından beri atmosferdeki CO₂ değişiminin mg/L cinsinden verileri sunulmuştur (Lüthi vd., 2008).



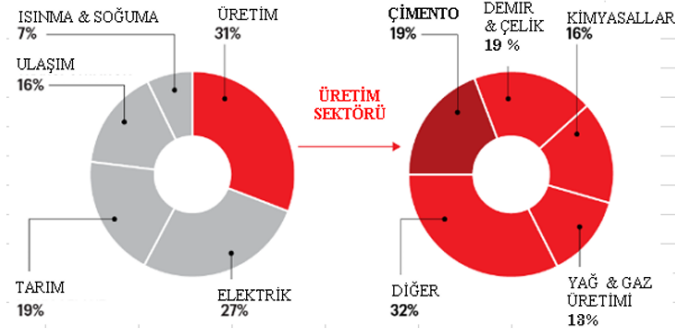
Şekil 1.2 Atmosferdeki CO₂ oranının on bin yıllık oranları (Lüthi vd., 2008)

CO₂ salımının, insanlar ve çevre için önemli ölçüde ciddi etkilere ve sonuçlara neden olabilen küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine katkıda bulunduğu iyi bilinmektedir. CO₂ salımı havada bir örtü görevi görür, ısıyı atmosferde hapseder ve Dünya'yı ısıtır. Bu katman, Dünya'nın soğumasını engeller ve böylece küresel sıcaklıkları yükseltir. Küresel ısınma, çevre koşullarını, yiyecek ve su kaynaklarını, hava durumunu ve deniz seviyelerini etkileyecektir. Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) Küresel İklim Özeti'ne dayanarak, 1880'den beri birleşik kara ve okyanus sıcaklığının her on yılda ortalama 0,07°C oranında arttığını rapor etmiştir. Sıcaklık, 1981'den beri, önceki zamanların iki katı olan ortalama 0,18°C'lik bir oranla artmaya devam etmektedir. Şekil 1.3 ise artan bu sıcaklığın oluşturduğu etkileri göstermektedir (Ahmed Ali vd., 2020).



Şekil 1.3 CO₂ salımının küresel etkileri (Ahmed Ali vd., 2020)

Oluşan bu artış sonucu yayılan CO₂ miktarına ise farklı sektörler etki etmektedir. Bu durum CO₂ ile mücadele için tek veya basit bir çözüm olmadığı anlamına gelir. Tek başına elektriğe, ulaşım, gıdaya veya ormansızlaşmaya odaklanmak yeterli değildir. Fakat sadece belli bir sektördeki salımı azaltmak bile yılda atmosfere salınan CO₂ miktarını tonlarca azaltabilir. Bu sektörlerden birisi de beton ve beton üretimi için gerekli olan malzemelerden biri olan çimentodur. Geleneksel çimento üretiminde her bir 1 ton çimento için atmosfere 1 ton CO₂ salınmaktadır. Şekil 4 incelendiğinde üretim sektörü tek başına bütün salımın %31'ini oluştururken, üretimin %19 gibi büyük bir kısmını çimento üretimi tek başına karşılamaktadır (Şekil 1.3). Bu nedenle doğru bir çözümle beton ve çimento üretimindeki CO₂ miktarını azaltmak yoluyla yılda milyarlarca ton CO₂'nin atmosfere karışması engellenebilir (Dunn K., 2021). Şekil 1.4 yıllık olarak hangi sektörün CO₂ salımı gerçekleştirdiğini göstermektedir.



Şekil 1.4 Sektörlere göre CO₂ salım yüzdesi (Dunn K., 2021)

CO₂ salımını azaltmak için yıllardır yeni teknolojiler ve çözümler ortaya çıksa da elde edilen verilere göre 2020 yılında salınan CO₂ miktarı 2019 yılına göre %1,1 daha fazladır. Bu artışın %0,9'luk kısmı ise fosil yakıt kullanımı ve çimento üretiminden kaynaklanmaktadır (Lüthi vd., 2008). Elde edilen verilerden de yola çıkılarak hala beton ve çimento üzerinde yapılan CO₂ salımını azaltma faaliyetlerinin yeterli verimliliğe ulaşmadığı söylenebilir.

1.2 Potland Çimentosunun Üretimi

Portland çimentosu inşaat sektöründe en yaygın olarak ve beton üretiminde suyla tepkimeye girip, beton içinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Portland çimentosu temel olarak bazı kimyasal bileşenlere sahiptir, fakat bunların yanında çimento üretimi sırasında kullanılan çeşitli yardımcı maddelere göre (mineral katkıları) farklı bileşenlere sahip olabilir. Çimentoyu üretmek için gerekli olan ana hammaddeler kireçtaşı ve kildir. Bunun dışında kullanılacak çimentonun priz özelliğini değiştirmek için alçıtaşı veya demir ihtiyacı için demir cevherleri gibi yardımcı maddeler eklenir ve oranları ayarlanır. Son yıllarda ise doğal kaynak kullanımını azaltmak için alternatif ham madde adı verilen malzemeler çimento üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Genel olarak sanayi atığı veya yan ürünü olan bu maddelerden, çimento hammaddeleriyle aynı kimyasal özellikleri taşıyan malzemeler seçilmeye başlanmış ve söz konusu maddeler kil veya kireçtaşı yerine kullanılmaktadır. Malzemelerin

doğru miktarlarda ayarlanması, çimentonun istenilen özelliklere sahip olması açısından kritik öneme sahiptir.

Portland imentosunun üretimi birkaç farklı aşamadan oluşmaktadır:

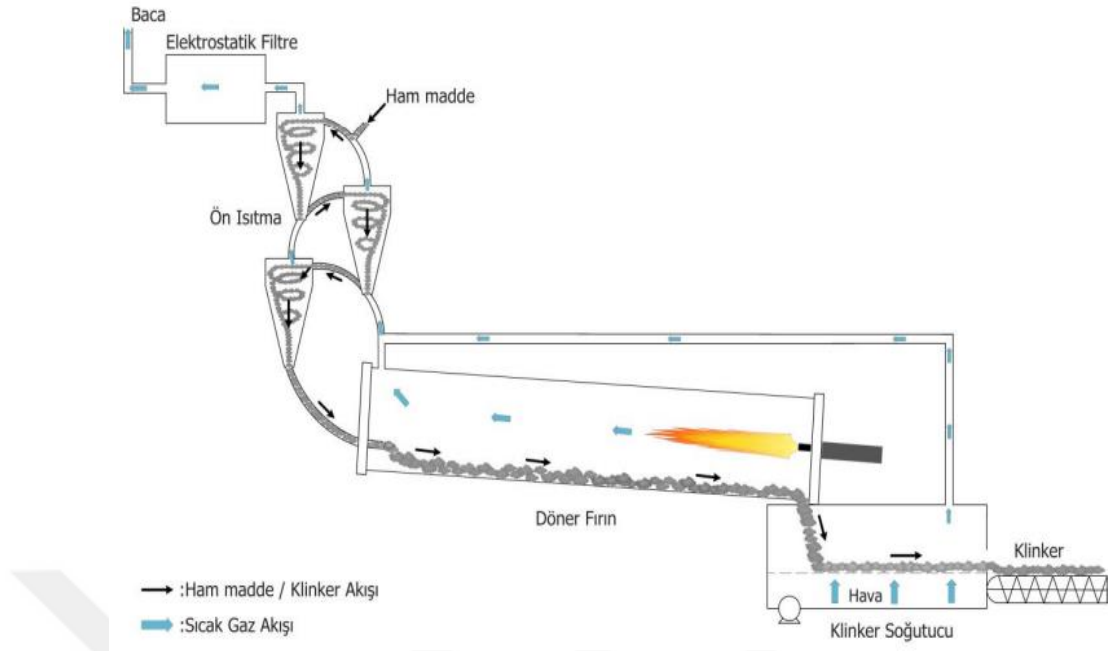
- 1. Hammadde temini:** Portland imentosunun ana malzemeleri kil ve kireçtaşıdır. Bu malzemeleri elde etmek için taş ocaklarında kazı veya delme gibi işlemler kullanılır. Elde edilen büyük kaya parçaları daha sonra araçlara konularak, imento üretiminin yapılacağı fabrikaya sevk edilir.
- 2. Hammadelerin hazırlanması:** İşlem için gereğinden büyük bir çapa sahip olan malzemeler önce büyük bir kırıcıda malzemeleri kırıp ktrken, değirmen olarak adlandırılan ikinci bir kırıcı sayesinde hammaddeler işlem için gerekli kkle kadar gtlr. Değirmende gtlen malzeme toz kadar kk parçalara ayrılır ve elde edilen malzemeye farin adı verilir. Değirmendeki farin içinde birçok farklı hammadde barındırdığından, iyice karıştırılıp homojen bir malzeme elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için farin, farin silosu adı verilen depolama alanına aktarılıp tartılır ve homojen bir malzeme elde edilir. Artık yeterince ufak ve homojen bir yapıya sahip olan farin pişirme işlemleri için siklon adı verilen ön ısıtıcı kulelere pompa yardımı ile gönderilir. Farinin hazırlanma işlemi içerdiği hammaddenin özelliklerine göre kuru ve ıslak işlem olarak ikiye ayrılır. İşlemler boyunca farine gereken miktarda su eklenir. Eğer ki kullanılacak hammaddelerin nem içeriği %20 ve üzerindeyse, bu durumda imento üretimi için yaş işlem tercih edilir.
- 3. Pişirme:** Homojen durumda siklonlar (n ısıtıcı) içinde bulunan farin, döner fırın öncesi yaklaşık 1000° C sıcaklıkta belli bir ön ısıtma işlemine tutulur. n ısıtma işlemi için birden fazla siklon kullanılır. Siklonlardan kademeli olarak aşağı doğru ilerleyen farin, malzeme akış yönünün tersine yukarı doğru çıkan ve döner fırından gelen sıcak gaz ile ısıtılır ve böylece farin neredeyse %90 kalsine olmuş hale gelir. Kil içerisindeki hidroksil grupları yüksek sıcaklıktan dolayı buharlaşır. Farinin n ısıtma işlemine tabii tutulmasının nedeni hali hazırda döner fırının çıkardığı sıcak gazı kullanarak farini önceden yaklaşık

1000 °C'ye getirmek ve fırın içinde daha az farini ısıtmak için daha az yakıt harcamaktır. Ön ısıtma işleminden geçen farin döner fırına aktarılır ve burada yaklaşık olarak 1450°C'ye kadar ısıtılır. Dünya genelinde kullanılan döner fırınların boyutu 3-6 m çapında ve 30-60 m uzunluğundadır. Döner fırını ısıtmak için farinin artık klinker olarak çıkış yaptığı uca bağlı kömür veya doğalgaz gibi benzeri yakıtların kaynak olarak kullanıldığı ısı bacası bulunur. Döner fırın yaklaşık olarak ısı bacasına doğru %3,5'lik bir eğime sahiptir. Bu sayede klinker ekstradan bir yakıt veya kaynak kullanımı olmadan döner fırından çıkabilmektedir. Döner fırında bulunan farin, yüksek sıcaklık dolayısıyla bazı fiziksel ve kimyasal değişimler geçirir. Farinin geçirdiği reaksiyonlar sonucu klinkere dönüşmesine neden olan işlemin ilk aşamasına kalsinasyon denir. Döner fırında sıcaklık arttıkça sıcaklığın etkisiyle farinin içindeki hidrat ve karbonat bileşenleri parçalanır ve oluşan tepkimelerle yeni oksit bileşenleri elde edilir. 100°C'den itibaren malzeme içinde bulunan serbest su buharlaşır. Sıcaklık 400-500°C iken kildeki bilişim suyu kaolinitten ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ayrılır. Oluşan bu ayırım sonucunda amorf silis ve amorf alümin oluşumu gözlemlenir. Sıcaklık 600°C'ye geldiğinde kireçtaşı yavaşça ayrışmaya başlar ve bu ayrışma sıcaklık 900°C'ye geldiğinde iyice hızlanır. Sıcaklık 1200°C'ye vardığında kireçle silisin tepkimesinden silikatlar (C_3S , C_2S), 1500 °C civarı kireç ve alümin tepkimesi sonucu ise alüminatlar (C_3A , C_4AF) ortaya çıkar. Farklı sıcaklıklarda döner fırın içerisinde oluşan tepkimeler aşağıdaki Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1 Döner fırında yaşanan kalsinasyon reaksiyonları (T.C.C.S.B, bt)

Sıcaklık °C	İşlem	Kimyasal Değişim
200	Serbest suyun buharlaşması	
100-400	Absorblaşmış suyun buharlaşması	
400-750	Kil minerallerinin bozunması, Metakaolinit oluşumu	$Al_4[(OH)_8Si_4O_{10}] \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 4H_2O$
600-900	Metakaolinit ve diğer bileşenlerin bozunması ve reaktif oksitlerin karışımının oluşması	$Al_2O_3 \cdot SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$
600-1000	Kireç taşının bozunması C ₂ S ve CA oluşumu	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $3CaO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(CaO \cdot SiO_2) + CaO \cdot Al_2O_3$
800-1300	CS ve CA tarafından kire. Absorbsiyonu C ₄ AF oluşumu	$CS + C \rightarrow C_2S$ $2C + S \rightarrow C_2S$ $CA + 2C \rightarrow C_3A$ $CA + 3C + F \rightarrow C_4AF$
1250-1450	C ₂ S tarafından daha fazla kireç absorpsiyonu	$C_2S + C \rightarrow C_3S$

Döner fırın içerisindeki malzeme sıcaklık etkisiyle sıvılaşmaya başlayıp büyük klinker tanecikleri oluşturur. Döner fırından çıkan iri klinker taneciklerinin sıcaklığı aniden 100 °C'nin altına düşürülür. Bu işlemi mümkün olan en kısa sürede tamamlamak çok önemlidir, çünkü klinker taneleri ne kadar çabuk soğursa çimentonun sertleşmesi için en önemli bileşeni olan alit (C₃S) oluşumu o kadar çok gözlemlenir. Soğutucudan çıkan iri klinker tanelerine burada priz geciktirme özelliğinden dolayı alçıtaşı veya üretilecek çimentonun özelliklerine göre uçucu kül, puzolan, kalker gibi maddeler eklenir. Ek malzemelerde harmanlanmış iri klinker taneleri daha sonrasında son kez olmak üzere öğütücü olarak kullanılan bilyalı değirmenlerden geçip, yaklaşık olarak mevcut boyutlarının üçte birine kadar küçültülür. Farinin ön ısıtıcılardan girip döner fırında pişmesi sonucu klinker olarak çıktığı ve devamında soğutulduğu işlem Şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.5 Döner fırının temsili çizimi (T.C.C.S.B., bt)

4. **Depolama:** Öğütülmüş klinker devamında depolanmak üzere silolara aktarılır ve burada teslimat için gelen taleplere göre dökme olacak veya paketli olacak şekilde bekletilir.

1.3 Portland Çimentosunun Bileşenleri

Portland çimentosu suyla tepkimeye girip, beton içinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Portland çimentosu temel olarak bazı kimyasal bileşenlere sahiptir fakat bunların yanında çimento üretimi sırasında çimentonun kimyasal özelliklerini değiştirmek veya üretimde bazı ayarlamalar yapmak için çeşitli yardımcı maddelerde kullanılabilir. Örneğin öğütme işlemi sırasında eklenen alçıtaşı (CaSO_4) pişirme işlemi sırasında maddelerin sertleşmesini kontrol eder, çimentonun bağlayıcılık özelliğini ve priz süresini artırır. Bunun dışında Portland çimentonun üretiminde bahsedildiği gibi çimentonun içine uçucu kül katılabilir. Uçucu külün çimento üzerinde birden fazla etkisi bulunmaktadır. Bunlara taze betonun işlenebilirliğini artırma, betonun hidratasyon ısısını azaltma, betonun su geçirimsizliğini azaltma veya geç yaştaki dayanımı artırma gibi etkileri sayabiliriz. Fakat neden olduğu olumlu

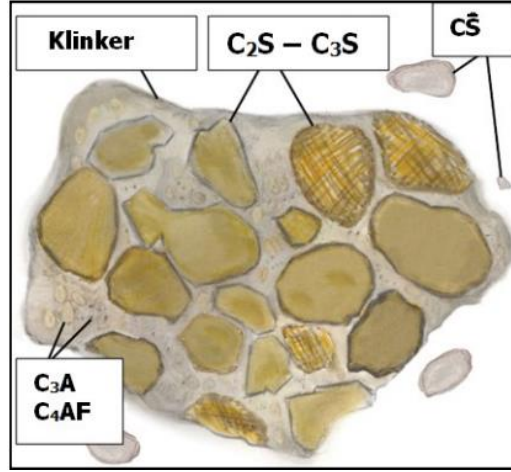
yönlerin haricinde, kullanıldığı zaman bazı negatif etkileri de bulunmaktadır. Betonun priz alma süresini daha uzun hale getiren kül betonun erken yaşta daha düşük dayanıma sahip olmasına neden olur ve bu durum özellikle soğuk havalarda soruna yol açabilir.

Çimento üretimi sırasında kalker ve kildeki temel maddeler birbirleriyle tepkimeye girerek çimentonun ana bileşenleri olan karma oksitleri oluştururlar. Oluşan karma oksitler içerdiği bileşiğe göre farklı gruplara ayrılırlar. Döner fırında kireçtaşından gelen kalsiyum (Ca) ile kilden gelen silisyumun (Si) reaksiyonu ortaya silikat ($3CaO.SiO_2$, $2CaO.SiO_2$) adını verdiğimiz karma oksitleri oluşturur. Bunun yanında kalsiyum ile kildeki alüminyumun reaksiyonu sonucu alüminat ($3CaO.Al_2O_3$, $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) grubu oluşur. Kimyasal formülleri uzun olan bu oksitlerin daha kolay formüle edilebilmesi için kısaltmalar kullanılmış ve özel isimler verilmiştir. Kullanılan kısaltmalar aşağıda görüldüğü gibidir:

- $3CaO.SiO_2$ (C_3S) → Alit
- $2CaO.SiO_2$ (C_2S) → Belit
- $3CaO.Al_2O_3$ (C_3A) → Alüminat
- $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ (C_4AF) → Ferrit

Klasik bir PÇ'nin içinde ise ortalama olarak %50-%70 civarı alit bulunurken, %15-%30 civarı belit bulunur. Geriye kalan kısmı ise %5-%10'luk kısım alüminat doldururken, %5-%15'lik kısmı ferrit doldurmaktadır. Bu karma oksitlerin miktarları aynı zamanda çimentonun öğütülebilirliğini de etkiler. Toplam C_3S ve C_2S miktarı, C_3A ve C_4AF miktarına göre arttıkça çimentonun da öğütülebilirliği bir o kadar fazla olur (Jahagirdar ve arkadaşları, 2019).

Çimento klinkerinin içinde bulunan bu ana bileşenlerin mikroskop altındaki görüntüsü Şekil 1.6'da verilmektedir;



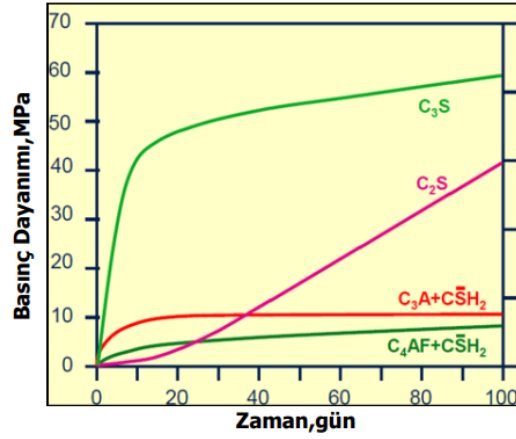
Şekil 1.6 Çimento bileşenleri (Taylor P. vd., 2006)

Çimento üretilirken hammaddelerin özellikleri, çimento üretimi gibi faktörler çimentonun içerdiği karma oksitlerin miktarında değişiklik göstermesine neden olur. Çimentonun içerdiği karma oksitlerin miktarı ve oranları, o çimentonun mekaniksel özelliklerini doğrudan etkiler. Portland Çimentosu'nun içerdiği ana bileşenlerin; reaksiyon hızı, hidrasyon ısı ve bağlayıcılık özelliği gibi betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri Tablo 1.2'de gösterilmektedir;

Tablo 1.2 Çimento ana bileşenlerinin özellikleri (Taylor P. vd., 2006)

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidrasyon Isısı	Orta 120 kal/g	Az 62 kal/g	Çok 207 kal/g	Orta 100 kal/g
Bağlayıcılık Değeri	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
• Başta	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük
• Sonda			Düşük	Düşük

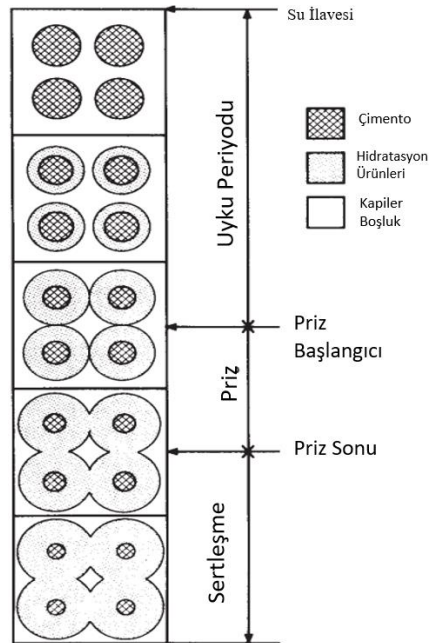
Aynı zamanda PC'deki ana bileşenlerin betonun zamana bağlı basınç dayanımı gelişimine etkisi aşağıda verilen Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Çimento bileşenlerinin basınç dayanımı (Taylor P. vd., 2006)

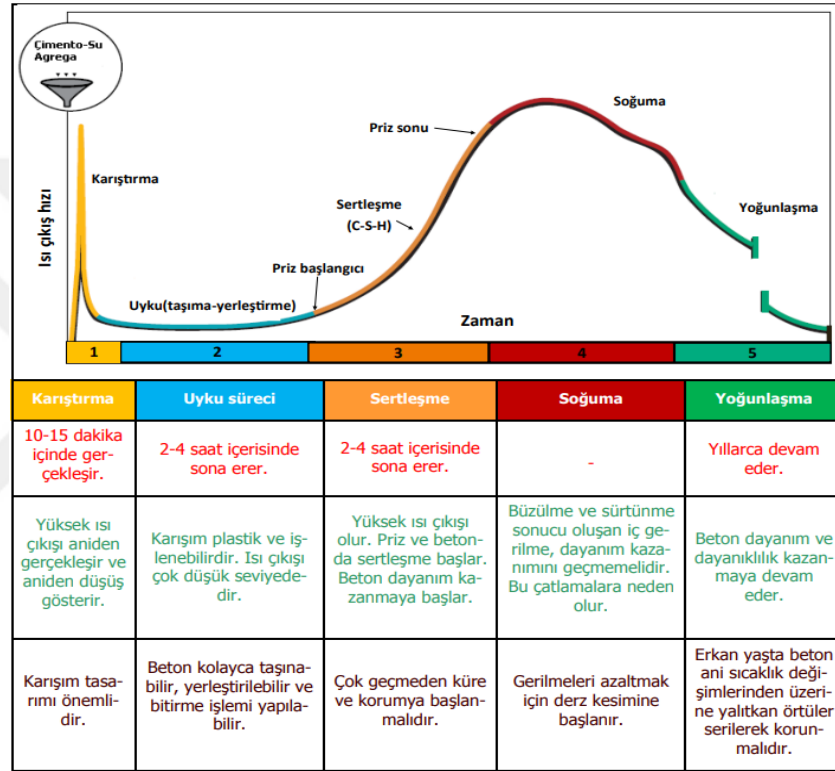
1.4 Portland Çimentosunun Hidratasyon Reaksiyonları

Betonu oluşturan ana malzemeler çimento, su, kum ve iri agrega karışımıdır. Bu malzemeler içerisinde çimento ve su karıştırılmaya başladığı andan itibaren tepkimeye girip reaksiyon oluşturmaya başlarlar. Oluşan bu kimyasal reaksiyona hidratasyon oluşan ürünlere hidratasyon ürünleri adı verilir. Hidratasyon reaksiyonları boyunca oluşan hidratasyon ürünleri ve çimento tanelerinin değişimi Şekil 1.8’de gösterilmektedir.



Şekil 1.8 Su ilavesinin klinker üzerindeki etkisi (Bentur vd., 1993)

Hidratasyon süresince ısı açığa çıkarken, hidratasyon ilerledikçe beton akıcılığını kaybetmeye başlayıp daha katı bir yapıya sahip olmaya başlar. Beton üretiminde kullanılan suyun miktarı ve reaksiyon boyunca açığa çıkan ısı gibi etmenler betonun mekaniksel özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Çimento ve suyun tepkimesi olan hidratasyonu zamana bağlı olarak 5 farklı kategoriye ayırmak mümkündür. Zaman geçtikçe oluşan reaksiyonlar ve açığa çıkan hidratasyon ısı Şekil 1.9'da verilmektedir.



Şekil 1.9 Hidratasyon reaksiyonu süreçleri (Taylor vd., 2006)

1.5 Katkılı Portland Çimentonun Sınıflandırılması

Beton hazırlanırken su ile temas ettiği anda reaksiyon yapmaya başlayan Portland çimentosunun içindeki bileşenlerin yeni hidratasyon ürünleri oluşturması sonucu beton birçok farklı mekaniksel özellik kazanır. Geleneksel Portland çimentosu, çevre koşulları veya yapılacak yapının amacına yönelik performans kriterlerini karşılamada yetersiz kalabilir. Bundan dolayı Portland çimentosuna yardımcı malzemeler ilave edilerek çimentonun ve dolayısıyla betonun mekaniksel özelliklerini geliştirmeye

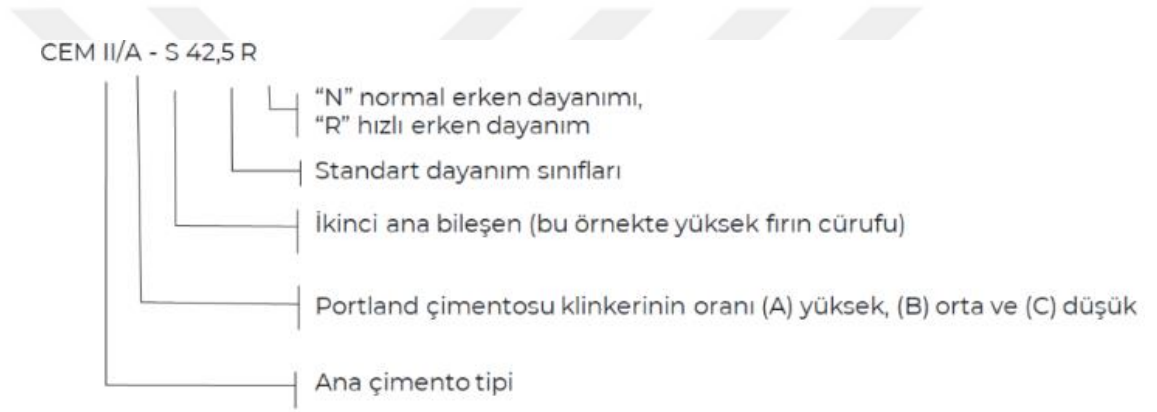
geliştirilebilir. TS EN 197-1:2012 standartına göre şu anda üretilen 5 farklı ana çimento türü bulunmaktadır. Bunların ilki CEM I koduna sahip olan Portland çimentosudur (PÇ). CEM I çimentosu içinde %5 minör bileşen dışında hiçbir ekstra yardımcı madde bulundurmayan ve Portland çimentosunun üretimi kısmında açıklanan şekilde üretilen çimento türüdür. Fakat daha önce de belirtildiği gibi geleneksel PÇ her zaman hedef kriterleri karşılayacak özelliklere sahip olmadığından, üretimi sırasında başka malzemelerin ilavesiyle çimentonun özellikleri geliştirilir. Yardımcı malzemeye sahip PÇ ise CEM II koduna sahiptir. TS EN 197-1 standartında 7 adet farklı CEM II çimentosu bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla Portland-cüruf çimentosu, Portland-Silis Dumanlı Çimento, Portland Puzolanlı Çimento, Portland-Uçucu Küllü Çimento, Portland-Pişmiş Şistli Çimento, Portland Kalkerli Çimento ve Portland Kompoze Çimentodur. Bu çimento türleri ve ortalama olarak sahip oldukları bileşen oranları aşağıdaki Tablo 1.3'te verilmektedir;

Tablo 1.3 Farklı Çimento sınıfları (Türk Standartları Enstitüsü [TSE], 2012)

Çimento Türü	Adı	Notasyon	Ana Bileşenler (Kütlece % olarak)										Minör İlave Bileşenler			
			Klinker K	Yüksek Fırın Cürufu S	Silis Dumanı D	Doğal Puzolan P	Endüstriyel Puzolan Q	Silissi Uçucu Kül V	Kalkersi Uçucu Kül W	Pişmiş Şist T	Kalker (Kireç Taşı) L	Kalker (Kireç Taşı) LL				
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
CEM II	Portland Cürufu Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5		
	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5		
	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5		
	Portland Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5		
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5		
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5		
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5		
Portland Kompoze Çimento	CEM II/A-M	80-94	12-20										0-5			
	CEM II/B-M	65-79	21-35										0-5			
CEM III	Yüksek Fırın Cürufu Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
CEM IV	Puzolanik Çimento	CEM IV/A	65-89	-	11-35										0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55										0-5	
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30										0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49										0-5

Yukarıdaki tabloda kullanılan kısaltmaların anlamı ise şöyledir; K: Klinker, S: Yüksek Fırın cürufu, D: Silis dumanı, P: Doğal puzolan, Q: Doğal kalsine edilmiş puzolan, V: Silisli uçucu kül, W: Kalkerli uçucu kül, T: Pişmiş Şist, L: Toplam organik karbon içeriği kütlece %0,50 aşmayan kalker, LL: Toplam organik karbon içeriği kütlece %0,20 aşmayan kalker.

Verilen tabloya göre bir çimento üretileceği zaman çimento, sahip olduğu özelliklere göre özel bir koda sahip olur. Örnek vermek gerekirse 42,5 MPa dayanıma sahip, hızlı erken dayanım kazanan, ikinci ana bileşeni yüksek fırın cürufu olan ve klinker oranı yüksek olan çimento için CEM II/A – S 42,5 R kodu kullanılır. Bu kodun tanımını ise şöyledir:



Araştırmanın önceki kısımlarında CEM I tip Portland çimentosunun özelliklerinden bahsedilmiştir. Portland çimentosuna katılan bu yardımcı malzemelerin oluşturduğu yeni tür çimentoların sahip olduğu özellikler şunlardır;

- 1. Portland Cürufu Çimento (PSC):** Geleneksel Portland çimentosuna demir ve çelik sanayisinin yan ürünü olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu ilavesiyle oluşmaktadır. Fırın cürufunun çimentoya sağladığı farklı özellikler bulunmaktadır. Beton hazırlanırken hidrasyon ısısının daha düşük seviyelerde gerçekleşmesine sebep olan PSC, bu çimentoyu sıcak hava koşullarında kullanmayı cazibeli hale getirmektedir. Kullanıldığı betondaki gözenekleri azaltarak betonu daha geçirimsiz hale getirmesi, nihai ve erken dayanımı artırması nedenleriyle; kütle betonları, liman, baraj gibi yapılarda sıkça tercih edilmektedir. Aynı zamanda CEM I tip çimentoya göre daha az

sera gazı salımına neden olması PSC'yi sürdürülebilirlik açısından da öne çıkaran bir faktördür (Martina vd., 2015).

2. Portland Silis Dumanlı Çimento: Silis dumanı, silisyum ve ferrosilikon alaşımının yan ürünü olarak elde edilen çok ince bir tozdur. Sahip olduğu bu incelik ve yüksek silika oranı nedeniyle çimentoya ve dolayısıyla betona birçok farklı özellik katmaktadır. Çok reaktif bir madde olan silika dumanı, hidrasyon sırasında sahip olduğu bu reaktivite ve ince yapı sayesinde çimento ve agrega arasındaki kapiler boşlukları doldurur ve bu durum betona geçirimsizlik ve yüksek dayanım özelliğini sağlar. Bunlara ek olarak silis dumanı fazla olan silis dumanlı çimentoda silis dumanı malzeme içerisinde yüksek bir yüzey alanına sahiptir. Beton içerisindeki serbest su bu silis dumanı tanecikleriyle etkileşime girer ve böylece betondaki terleme (kanama) büyük ölçüde azalır (Chung, 2002).

3. Portland Puzolanlı Çimento: Puzolanlar kendi başlarına bir bağlayıcılık özelliğine sahip değilken, beton yapılırken su ve çimento ile bile birlikte kullanıldığında Ca(OH)_2 ile tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği kazanırlar. Fakat bunları yapabilmeleri için kullanılan puzolanın çimento tanecikleri kadar ince ve amorfumsu bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Geleneksel PÇ'ye göre daha düşük hidrasyon ısı üreten puzolanlı çimento sıcak havalarda tercih edilebilmektedir. Aynı zamanda klorür ve sülfata karşı dirence sahip olan bu çimento, deniz sularının temas ettiği su yapılarında da kullanılabilir. Hidrasyon sıcaklığını azaltmasına rağmen hidrasyonun derecesini, betonun porozitesini ve geçirimsizliği arttırmaktadır. Bunlara ek olarak C-S-H içindeki Ca/Si oranını azaltırken genel C-S-H sayısında artışa sebep olur ve bu da betonun daha fazla dayanıma sahip olması anlamına gelmektedir (Massazza, 1993).

4. Portland Uçucu Küllü Çimento: Elektrik enerji sanayisinde, termik santraller genel olarak elektrik üretimi için pulverize kömür kullanırlar. Kullanılan bu kömürün yanmasıyla birlikte çok küçük ince bir yapıya sahip kül ortaya çıkar.

Hafif ve ince bir yapıya sahip olan bu küller fabrika bacasından uçarak dışarı çıkarlar. Bacada kullanılan filtre sayesinde yakalanan bu uçucu küller yapısı ve içerdiği mineraller sayesinde beton üretiminde oldukça popüler bir ürün olarak kullanılmaktadır. Öncelikle uçucu külün küçük ve yuvarlak bir yapıya sahip olması onun betonun akışkanlığını büyük ölçüde arttırmasında etkiye sahiptir. Uçucu külün aynı zamanda betonun dayanımı ve dayanıklılığı üzerinde de etkisi vardır. Cengiz Duran Atış (2003)'ün yaptığı araştırmaya göre çimentoda klinker yerine %50 uçucu kül kullanıldığında betonun 28 günlük basınç dayanımı CEM I tip çimentona kullanan betona göre daha fazlayken, uçucu külü betonun %30 daha az kuruma büzülmesine sahip olduğunu görmüştür. Shaikh (2014)'in yaptığı araştırmada yüksek oranda çimentonun ağırlığınca uçucu kül kullanımında (%40-60) betonun matriksinde, kontrole oranla daha küçük boşlukların olduğunu görmüştür. Bununla birlikte klörür geçirirliliği ve korozyon derecesinde de azalma olduğunu belirtmişlerdir (Shaikh ve Supit, 2015; Atış, 2003).

- 5. Portland Pişmiş Şistli Çimento:** Şist, doğada bulunan ve içerisinde bolca Al_2O_3 ve Fe_2O_3 minerallerini barındıran bir taş türüdür. Çimento içerisinde kullanılırken genellikle klinker %80-90 gibi bir ağırlığa sahipken, şist %6-20 oranında kullanılır. İçerdiği bileşenler ve çevresel etkileri sebebiyle inşaat sektöründe her geçen gün daha fazla popüler olmaya başlamıştır. Korkmaz ve Hacıfazlıoğlu (2023), şist ilaveli çimentonun daha düşük sıcaklıkta ve daha düşük bütçeyle üretilmesinin hem ekonomisel, hem de çevresel bir olumlu etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Şistin çimento üretiminde kullanımının bir diğer nedeni de sahip olduğu puzolonik aktivitedir. Yapılan bazı çalışmalar çimento içerisinde bulunan şistin, hidratasyon sırasında $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girerek fazladan C-S-H oluşumu sağladığını göstermiştir. Portland pişmiş şistli çimento ile üretilen betonun uzun vadede, CEM I tip çimento kullanılan betona göre daha fazla dayanıma sahip olması söz konusudur (Korkmaz ve Hacıfazlıoğlu, 2023; Mokthari, 2024).

6. Portland Kalkerli Çimento (PLC): Portland kalkerli çimento, sıradan Portland çimentosuna göre karbon ayak izini azaltması sayesinde popülerliği gitgide artmakta olan bir çimento türüdür. Kalkerli çimento üretiminde açığa çıkan CO₂ miktarı ve harcanan enerjinin daha azdır. Kalker katkılı çimentolar betonun reolojik davranışını değiştirmekte ve betonda kanamayı azaltmaktadır (Guo, 2022). Saydığımız bu gibi nedenlerden dolayı PLC'nin işlenebilirliğe ihtiyaç duyulan yapılarda, altyapı çalışmalarında ve karbon ayak izinin az olması istenildiği projelerde kullanılması uygundur (Oguntola vd., 2023; Arowojolu vd., 2022).

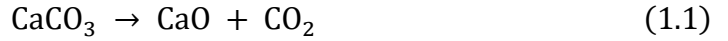
7. Portland Kompoze Çimento (PCC): Şu ana kadar bu bölümde anlatılan bütün çimentolar, geleneksel Portland çimentosunun yanında bir adet yardımcı çimento malzemesi (SCM) kullanılarak üretilen çimentolardı. Bunlardan farklı olarak PCC üretimi için Portland çimentosu üretilirken birden fazla yardımcı madde (cüruf, kalker, silis dumanı, v.b.) kullanılır ve böylece farklı maddelerin getirdiği avantajlar biraraya gelerek sürdürülebilirlik ve mekaniksel açıdan daha iyi bir çimentonun elde edilmesi sağlanır. PCC'nin sıkça tercih edildiği yerlerden biri de çimento üretimi için kaynak sıkıntısı çeken bölgeler olmaktadır. PCC'nin lif veya polimer ile birlikte kullanımının özellikle yüksek sıcaklığa sahip ortamlarda veya fazladan eğilme dayanımı istenen yapılarda avantajlı olduğu görülmüştür (Martinelli ve diğerleri, 2005). Bunların dışında çimento içine eklenen uçucu kül, silis dumanı, kalker gibi maddeler betonun sahip olduğu mikro gözeneklerin boyutunu ve sayısını azaltırken, geçirimsizliği ve dayanımı artırır (Martinelli vd., 2005).

1.6 CO₂ Salımı Açısından PÇ ve Alternatifleri

Çimento üretimi sırasında havaya salınan CO₂ miktarı, yaklaşık olarak tüm dünyada yıllık olarak salınan CO₂ miktarının %7-8'ine tekabül etmektedir. Tek bir işlem için bu kadar büyük miktarda CO₂ salımının yaşanması, araştırmacıların inşaat sektörünü nasıl daha çevre dostu hale getirebiliriz sorusunu sormasına neden olmuştur.

Bu soruya gerekli cevabı verebilmek için her gün yeni bir çözüm alternatifi ortaya atılmaktadır.

Çimento üretiminin yüksek miktarlarda CO₂ salmasının temel nedeni, klinkerin üretimi sırasında kalsine olan kirecin (CaCO₃) yanması ve sonucunda CO₂ gazı açığa çıkmasıdır. Yaşanan bu reaksiyon aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi gerçekleşmektedir;

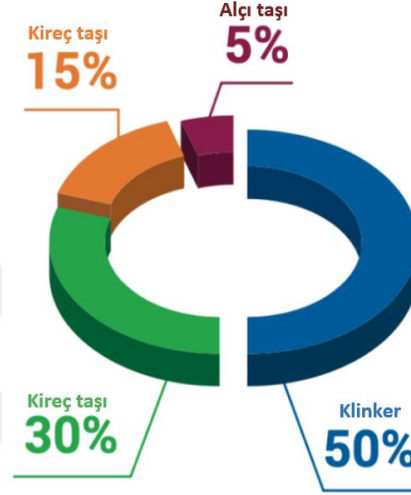


Aynı zamanda farını ısıtıp klinkeri oluşturan döner fırını ısıtmak için genellikle kömür veya doğalgaz kullanılır ve da büyük miktarlarda CO₂ gazının salınmasına neden olmaktadır.

Bulunan en etkili çözümlerden biri olarak sıradan Portland çimentosu üretmek yerine, içerisinde farklı türde malzemeler bulunduran ve oluşturulmaya çalışılan klinker sayısını azaltarak daha az CO₂ emisyonu yaşanmasına neden olan katkı Portland çimento üretimi olmuştur. Araştırmanın bir önceki alt başlığında belirtildiği gibi bu amaç uğruna geleneksel Portland çimentosuna yüksek fırın cürufu, kalker veya şist gibi malzemelerin PÇ'ye katılması, daha az klinker üretimine neden olduğu için çevre dostu yaklaşımında bunun gibi çimento katkı malzemelerini ön plana çıkarmıştır. Kullanılan bu malzemelerin aynı zamanda kullanıldığı betonun teknik özelliklerini de olumlu yönde etkilemesi onları günümüz inşaat sektöründe birer altın değerine getirmektedir. Katkı maddeleri olarak kullanılan bu ürünler genellikle sanayi atığı oldukları veya doğada hazır bir şekilde buldukları için, hazırlanışı sırasında ekstradan bir enerji harcanmasına ve CO₂ salımına neden olmazlar.

1. Kireçli Kalsine Kil Çimentosu (LC³): Katkılı PÇ üretimi için katkı malzemesi olarak uçucu kül veya yüksek fırın cürufu gibi maddeler her coğrafyada bulunamayabilir. Bundan dolayı Dünya üzerinde ulaşılabilmesi daha kolay olan kireç ve kalsine edilmiş kilin katkı maddesi olarak kullanılması ve LC³ çimentosunun inşaat sektöründe kullanılması neredeyse daha 10 yıl önce ortaya atılmıştır (Scrivener, 2012). Çimento üretimi sırasında geleneksel

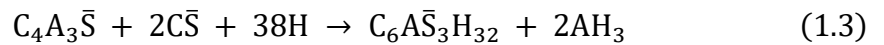
PÇ üretiminde kullanılan klinkerin %50'si yerine kullanılabilen kireç ve kalsinleşmiş kil, kolay ulaşılabilmesi, üretimi sırasında düşük CO₂ salımı yapması gibi nedenlerden ötürü dikkat çekmiş bir çimentodur. Sharma ve diğerlerine (2021) göre LC³'ün üretimi sırasında atmosfere salınan CO₂ miktarı geleneksel PÇ'ye göre %30-40 daha azdır. LC³ üretimi sırasında kullanılan ana malzemelerin oranı Şekil 1.10'da gösterilmektedir;

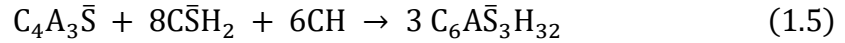
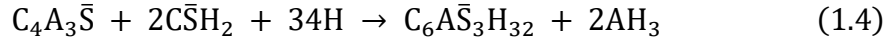


Şekil 1.10 İçinde kalsinleşmiş kil ve kireç bulunan klinkerin bileşen oranları

LC³ üretimi sırasında 600-900 °C civarı ısıtılan kil dehidroksilasyon sonucu kalsine kil halini alır. İçerisinde metakaolin bulunduran kalsine kil, hidrasyon sırasında Ca(OH₂) ile tepkimeye girerek C-A-S-H oluşumuna neden olarak betonun boşluklu yapısı düzenler ve betonun hem dayanımını hem de dayanıklılığını geliştirir (Lu vd., 2023; Scrivener vd., 2018; Sharma vd., 2021).

- Sülfoalüminat Çimento (C \bar{S} A):** C \bar{S} A içerisinde bolca C₄A₃S $\bar{3}$, C \bar{S} , C \bar{S} H₂ ve belit barındıran, karbon ayak izini azaltmak için PÇ yerine tercih edilen bir çimentodur. C \bar{S} A çimentosu içerisinde bulunan kalsiyum sülfat (C \bar{S}) oranına göre hidrasyon sırasında aktiflik derecesi değişmektedir. Hidrasyon sırasında;





Tepkimelerini yapan bileşenler etrenjit ve aliminyum hidroksit oluşturup betonun dayanımını arttırlar. Fakat kullanıldığı betonun priz süresini önemli miktarda kısalır. İnşaat hızlı gerçekleşen şantiyelerde veya küçük ölçekli tamir işlerinde tercih edilebilir. C \bar{S} A'nın geleneksel PÇ'den daha düşük karbon ayak izine sahip olmasının temel nedeni üretimi sırasında daha az sıcaklıkta pişmesidir. PÇ'nin tam olarak pişebilmesi için fırın 1450°C'ye kadar ısıtılırken, C \bar{S} A yapımı için fırın yaklaşık olarak 1250-1350°C arasında ısıtılır. Fırının ısınması için daha az kaynak ve enerji harcandığından Mondal ve arkadaşlarına göre (2023), C \bar{S} A PÇ'ye göre CO₂ emisyonunda %40'a kadar bir avantaj sağlayabilmektedir (Mondal vd., 2023).

- 3. Geopolimer:** İnşaat sektöründe PÇ yerine kullanılmaya başlayan ve çok popüler olan bir diğer bağlayıcı türü geopolimerdir. Geopolimer üretimi sırasında uçucu kül, fırın çürufu gibi genellikle sanayi atığı malzemeler alkaliler ve cam suyu gibi kimyasallarla reaksiyona sokulur. Bu tür sanayi atıklarının kullanımı hem ekonomiyi hem de atıkların yeniden kullanımı yönüyle karbon ayak izi açısından pozitif etkisi bulunmaktadır. PÇ'den farklı olarak aynı zamanda üretimi sırasında PÇ'ye göre 2-3 kat daha az enerji harcanmasına gerek duyulur. Błaszczyński ve Król'e göre (2023) yukarıda sayılan nedenlerden ötürü, geopolimer kullanımı PÇ kullanımına göre toplamda 4-8 kat daha az CO₂ gazı salımına neden olmaktadır. PÇ'ye göre karbon ayak izini azaltmasının yanında kullanıldığı betona 24 içinde yüksek dayanım kazandırması, asit ve sülfat atıklarına karşı direnç göstertmesi ve lif kullanımı ile uyumluluk göstererek betonun eğilme dayanımı arttırabilmesi, geopolimer çimentosunun sadece çevresel amaçla değil mekaniksel amaçla da kullanılabileceğini göstermiştir (Błaszczyński vd., 2015; Assi vd., 2019).

4. Magnezyum Çimentosu: Magnezyum çimentosunun temel maddesi olan magnezyum oksit (MgO) oldukça reaktif bir madde olup, üretimi sırasında döner fırında 700-1000°C arasında pişerken PÇ klinkeri için bu sıcaklığın 1450°C olması magnezyum çimentosunu enerji kullanımını açısından daha cazibeli hale getirmektedir. Magnezyum çimentosunun çevre dostu olmasının tek nedeni üretimi sırasında daha az enerji kullanılması değildir. Beton karıştırılırken magnezyum fazlarıyla CO₂'nin tepkimeye girerek onu beton içerisine hapsedmesi, magnezyum çimentosunu CO₂ salımı açısından avantajlı hale getirmektedir. Magnezyum fazlarıyla CO₂'nin tepkimeleri sonucu hidrate magnezyum karbonatlar (HCM) oluşur. Oluşan bu HCM'ler; pingit (Mg₅(CO₃)₄(OH)₂·5H₂O) ve artinit (Mg₂(CO₃)(OH)₂·3H₂O), magnezyum karbonat (MgCO₃·3H₂O) ve hidromagnezittir (4MgCO₃·Mg(OH)₂·4H₂O). Bu maddeler sadece CO₂'yi beton içerisine hapsedmekle kalmazlar, aynı zamanda betonun dayanım kazanmasına yardımcı olurlar (Frost vd., 2008; Dung vd., 2017).

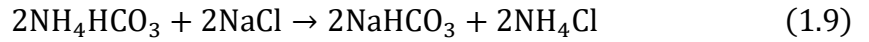
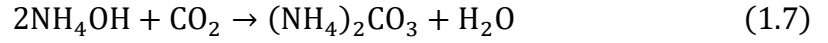
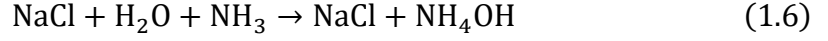
1.7 Sodyum bikarbonatın üretim yöntemleri

Sodyum bikarbonat NaHCO₃ kimyasal formülüne sahip, genel olarak kabartma tozu olarak bilinen ve sanayide farklı işlemlerden geçerek üretilen bir maddedir. Beyaz toz şekline sahiptir ve suda çözünebilen bir maddedir. Oda sıcaklığında 1 lt su içerisinde yaklaşık olarak 100 gram NaHCO₃ çözünebilmektedir.

Sodyum bikarbonatı farklı yöntemlerle üretmek mümkündür. Sodyum bikarbonat üretimi sırasında izlenen yollar şunlardır;

1. Sodyum bikarbonatın üretimi için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri Solvay işlemidir. İşlem için öncelikle amonyak gazı (NH₃), tuz (NaCl) ve su bir arada karıştırılır. Yapılan ilk işlem sonrası tuz katı bir şekilde formunu korurken, amonyak ve su tepkimeye girerek amonyum hidroksit oluşturur (1.6). Elde edilen sudaki amonyum hidroksit (NH₄OH), gaz halindeki CO₂ ile tepkimeye sokularak amonyum karbonat ((NH₄)₂CO₃) ve su elde edilir (1.7). İşlemin devamında ise suda bulunan amonyum karbonat bu sefer gaz haldeki

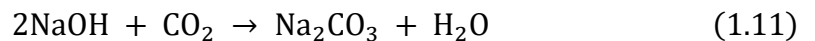
CO₂ ve su ile tepkimeye girerek amonyum bikarbonat oluşturur (1.8). Son işlem olarak suda bulunan 2 mol amonyum bikarbonat, 2 mol NaCl ile reaksiyona girer ve 2 mol sodyum bikarbonat ve 2 mol amonyum klorür oluşturur (1.9). Oluşan bu reaksiyonlar aşağıda verilmektedir;

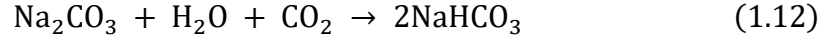


Yıllar içerisinde araştırmacılar sodyum bikarbonat üretimi için çoğunlukla kullanılan Solvay işlemini geliştirerek kendi yorumlarını katmışlardır. Sudibyo ve arkadaşlarının (2022) yaptığı araştırmada (1.6) numaralı denklemde kullanılan gaz haldeki NH₃'ü üretim işleminden komple çıkarıp NaCl'yi direkt olarak CO₂ gazı ve NH₄OH ile tepkimeye sokmuşlardır. Böylece NH₄OH, sodyum siklamat üretimi sırasında bir yan ürün olarak ortaya çıkmakta olup ekstra enerji ve kaynak harcamadan doğru sodyum bikarbonat elde edilmiş olur (Sudibyo vd., 2022). Yapılan araştırmada NaHCO₃ elde etmek için şu işlem izlenmiştir (1.10);

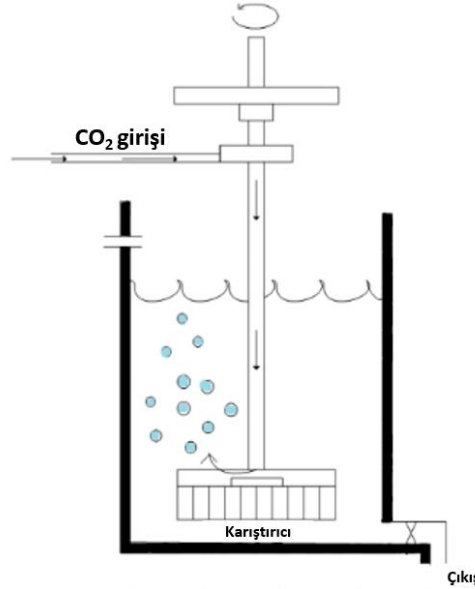


Sodyum bikarbonatın üretimi için izlenen bir diğer yol da sodyum karbonatın karbonatlaştırılmasıdır. Öncelikle katı halde bulunan sodyum hidroksit (NaOH) ile gaz haldeki CO₂ tepkimeye sokularak sodyum karbonat (Na₂CO₃) ve su elde edilir. Elde edilen su içerisinde bulunan sodyum karbonat yüksek yoğunluktaki CO₂ ile tepkimeye sokularak ve ortamda su moleküllerinin de bulunmasıyla birlikte sodyum bikarbonatı meydana getirirler. Söz konusu reaksiyon denklemleri aşağıda verilmektedir (1.11, 1.12);





Son yıllarda, sodyum bikarbonatın üretimi için takip edilen işlemlerde kabarcık flotasyon kolonu adı verilen cihazlar kullanılmaya başlanmıştır. Üreticiler için bu cihaz, yapılan işlemi daha kontrol altında tuttuğu için popüler hale gelmiştir. CO₂ oranı, ortamın sıcaklığı gibi etmenleri mümkün olan en ideal şekilde ayarlayan cihaz, mümkün olan en verimli miktarda sodyum bikarbonat elde edilmesine imkân vermektedir. Mekanizma içerisindeki sıcaklığın artmasıyla birlikte araştırmacılar, oluşan tepkimelerin kinetiğinin ve elde edilen sodyum bikarbonatın çözülebilirliğinin daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu işlem için kullanılan mekanizmanın şeması Şekil 1.11’de görülmektedir.



Şekil 1.11 Köpük flotasyon kolonunun şematik gösterimi (Sudibyo vd., 2022)

Her 2 üretim yönteminde de görüldüğü üzere, NaHCO₃ üretimi için reaksiyonların giren kısmında mutlaka CO₂ bulunmaktadır. Bu durum yapılan işlemler için harcanan enerjiyi göz ardı ettiğimizde, sodyum bikarbonatın üretiminin bile küresel anlamda CO₂ salımını azalttığı söylenebilir.

1.8 Sodyum Bikarbonatın Kullanım Alanları

NaHCO_3 'ün diğerk adı bilindiğı üzere kabartma tozudur. Kabartma tozu uzun yıllardır insanların mutfaklarında özellikle kek türü yemek yaparken faydalandığı bir kimyasal maddedir. Bunun dışında kullanıldığı bazı alanlar kısaca şöyledir;

- Ağızdaki asiti nötrlediğı ve enfeksiyonları önlediğı için gargaralarda,
- İdrarın asitliğı azaltıp böbrekleri ürik asitten kurtardığı için böbrek hastalarına ilaçların içinde katkı olarak verilmektedir,
- Hem asitlerle hem de bazik maddelerle çok kolay bir şekilde reaksiyona girdiğinden, kimyasal laboratuvarlarda nötrleyici madde olarak,
- Tıpta ek olarak yeni karaciğer nakli olan insanların kandaki asit değerini dengelemek için,
- Temizlik maddelerinde nötrleyici etkisi nedeniyle koku ve kir giderici takviye olarak,
- Tarım sektöründe yiyecekler üstüne sıkılan kimyasal maddelerin zehirli etkilerini azaltmak,
- Büyük ve küçükbaş hayvanların yemlerinde mide ve bağırsaktaki pH dengesini korumak için kullanılmaktadır.

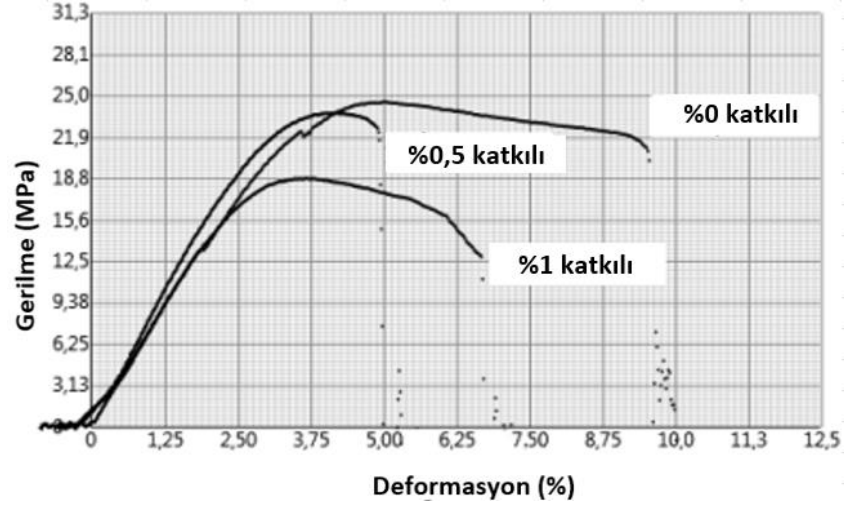
Sodyum bikarbonatın üretimi sırasında içerisine CO_2 'yi hapsettiğini fark eden birçok araştırmacı, NaHCO_3 'ü farklı alanlarda kullanarak hem kendi ürünlerini geliştirmeyi hem de aynı zamanda daha yeşil bir çevreyi hedeflemişlerdir.

Tıp alanında sodyum bikarbonat kullanımını her geçen gün daha da artmaktadır. Renny (2019) yaptığı çalışmada, hastahane de bulunan hastaların serumuna sodyum bikarbonat katılması durumunda, serumun pH'ının arttığını ve bu durumun laktik asidoz veya böbrek yetmezliğı gibi hastalıkları yaşayan hastaların kanındaki pH'ı arttığını ve olumlu bir etki bıraktığını gözlemlemiştir. Ancak bazı araştırmacılar da sodyum bikarbonatın serum veya ilaçlarda kullanmanın tehlikeli olabileceğini öne sürmüşlerdir (Velissaris vd., 2015). Velissaris'e göre sodyum bikarbonatın serum içinde kullanımının hücre içindeki asitliğı çok fazla arttırabileceğini bu da kan zehirlenmesine yol açabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca serum içine katılan sodyum

bikarbonatın serumun pH'ını yükseltmesiyle birlikte trisiklik antidepresan gibi ilaçların birlikte kullanımının aşırı ilaç dozuna neden olabileceğini belirtmişlerdir.

Sodyum bikarbonatın kullanıldığı bir diğer alanda spor dalıdır. Vücut içerisindeki asitlik ve bazlık dengesi üzerindeki etkisinden dolayı, NaHCO_3 spor alanında da ilgi görmekte olan bir maddedir. Sporcularda genellikle egzersiz öncesi ve sonrası NaHCO_3 alımının, sporcuların performanslarının arttığı görülmüştür. Gough vd., (2018), ayrıca Sale vd.,'nin (2011) yaptığı araştırmalarda profesyonel seviyede 15-20 bisikletçiye egzersiz öncesi ve sonrası NaHCO_3 alımının etkileri araştırılmıştır. Araştırmanın sonucunu değerlendirebilmek için bisikletçilerin belli bir hızda yorulana kadar gidebilecek mesafelerini ölçen bir uygulama metodu kullanılmıştır. Uygulama sonucu; NaHCO_3 'ün egzersizden hemen önce alımının sporcuların başarısını %6-16 oranında arttırdığı görülmüştür. Egzersizden 5 dakika sonra sodyum bikarbonat alımında ise kandaki pH'ın ve laktat değerlerinin daha çabuk bir şekilde dengelendiği tespit edilmiştir.

Sodyum bikarbonat aynı zamanda yangın güvenliği alanında da etkili bir madde olarak kullanılmaktadır. Satin vd., (2016), sodyum bikarbonatın polimer bazlı maddelere ilavesi sonucu, polimerin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında ortaya çıkan CO_2 miktarları incelenmiştir. Araştırma için öncelikle %0,5-1 olacak şekilde 2 adet sodyum bikarbonat ilaveli polimer üretilmiştir. Bunların yanında referans olarak sodyum bikarbonat içermeyen polimer bulunmaktadır. Sodyum bikarbonatın mekaniksel özellikler üzerindeki etkisi için malzemeler çekme dayanımı testine tabii tutulmuşlardır. Yapılan deney sonucunda sodyum bikarbonat içermeyen polimer en yüksek çekme dayanımına sahipken, içerisinde %0,5 sodyum bikarbonat bulunan malzeme en yüksek elastisite modülüne sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen çekme gücü ve birim değiştirme grafiği Şekill 1.12'de ki gibidir;



Şekil 1.12 Örneklerin kuvvet ve deformasyon grafiği (Satin vd., 2016)

Araştırmanın devamında malzemelerin tutuşma dayanımını incelemek için koni kalorimetre kullanılmıştır. Belli bir sıcaklığa kadar ısıtılan malzemelerin ne kadar kısa sürede tutuştukları ölçülmüş ve yanma işlemi sırasında açığa çıkardıkları ısı ve CO₂ miktarlarına bakılmıştır. %0 sodyum bikarbonat ilaveli polimerin en uzun tutuşma süresine sahip olduğu görülmüştür. Fakat buna ters olacak şekilde sodyum bikarbonat içeren polimerlerin yanması sırasında daha az ısı açığa çıktığı ve daha az CO₂ salımı yaptıkları not edilmiştir.

Luo vd., (2021), sodyum bikarbonatın daha düşük tutuşma sıcaklığına sahip olmasına rağmen, referans bir malzemeye göre daha az miktarda duman ve CO₂ salımı yapması nedeniyle sodyum bikarbonatın zayıf özelliği olan düşük tutuşma sıcaklığını geliştirmeye çalışmışlardır. Sodyum bikarbonat parçacıklarının üstünü epoksi reçinesi ile kaplayan araştırmacılar, sodyum bikarbonatın sahip olduğu düşük tutuşma sıcaklık eşiğini yukarıya çekmeyi başarmışlardır. Daha sonra araştırmacılar, epoksi reçinesi kaplı sodyum bikarbonatın yangın söndürme amacıyla kullanılabilirliğini test etmişlerdir. Test sonuçlarına göre tutuşma sıcaklığı artık daha fazla olan modifiye edilmiş sodyum bikarbonat, alevlerin üstünde bir katman görevi görüp alevlerin oksijen ile olan temasını kesmektedir. Araştırmacılar modifiye edilmiş sodyum bikarbonatın yangın söndürücü köpük olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

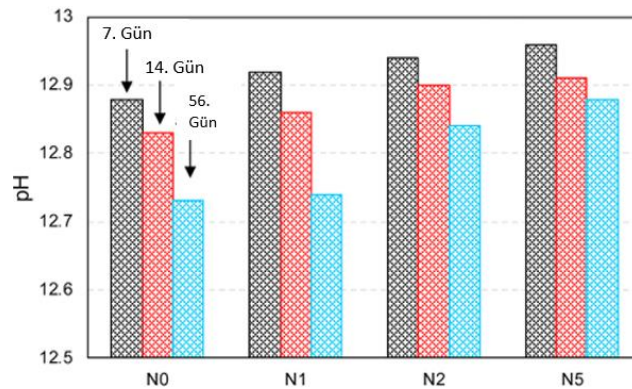
BÖLÜM İKİ

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde sodyum bikarbonatın (NaHCO_3) beton özelliklerini nasıl etkilediği ve beton üretiminde bir katkı maddesi olarak kullanılıp kullanılmayacağı üzerine yapılan çalışmalar derlenmiştir. NaHCO_3 , üretilecek betonun bulunduğu yerin çevresel koşullarından dolayı, farklı priz alma süresi veya farklı basınç dayanımı hedefleri gibi isteklere cevap verebilecek bir kimyasal olarak göze çarpmaktadır. NaHCO_3 'ün betona ilave edildiğinde, etkilediği bazı beton özellikleri şunlardır;

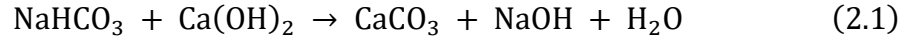
2.1 Betonun pH'ı

Bilinildiği üzere betonarme bir yapıda beton içerisinde ki pH seviyesinin 12 ve üstünde olması istenir. pH söz konusu seviyelerin altına düştüğünde betonarme içerisindeki çeliğin korozyon ihtimali de başlamış olur. Beton içerisine hangi madde eklenirse eklensin, araştırmacıların baktığı şeylerden biri de yapılan işlemin betonun pH'ını nasıl değiştirdiği yönünde olmaktadır. Seo vd. (2021), yaptığı çalışmada önce çimento ve sodyum bikarbonatı 5 dakika boyunca karıştırıp üstüne su ilave etmişlerdir. Bu karışıma, çimento ağırlığının %0-1-2-5 seviyesinde NaHCO_3 eklenmiş ve örnekler kalıplanmıştır. Daha sonra örnekler, 7, 14 ve 56. günde toz hale getirilip sudaki pH değerleri ölçülmüştür. Yapılan çalışma sonucu, aynı yaştaki örnekler kıyaslandığında, karışımdaki sodyum bikarbonat miktarı arttıkça, beton içerisindeki pH seviyesinin de arttığı gözlemlenmiştir. Yaşlanmanın ise sodyum bikarbonat dozajından bağımsız olarak pH seviyesini azalttığı görülmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Örneklerin farklı katkı ilavesindeki pH değerleri (Seo vd., 2021)

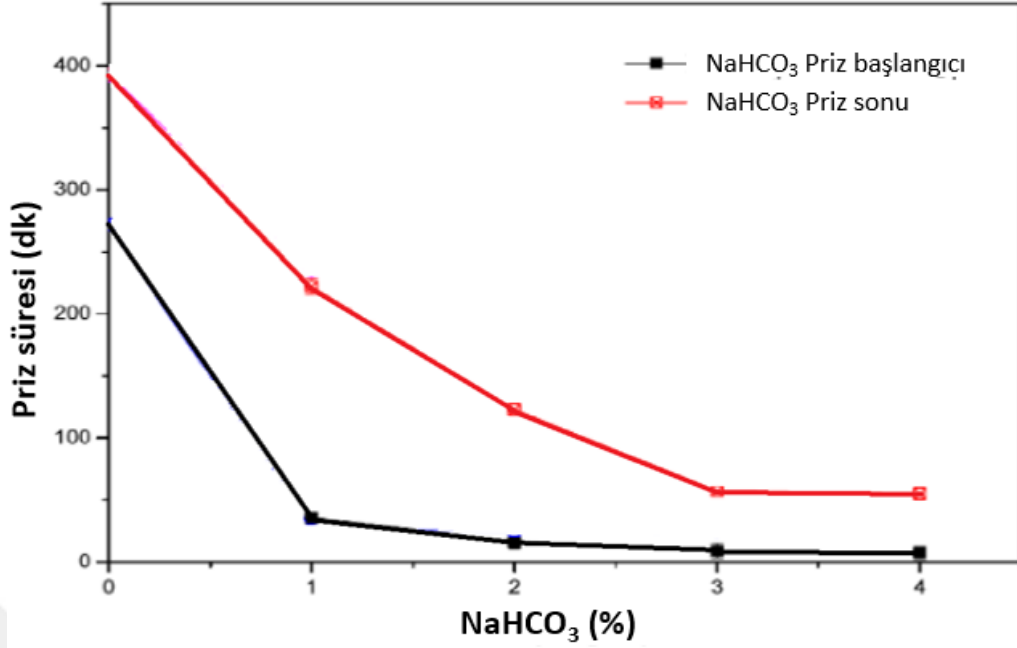
Seo vd. (2021), yaşanan bu artışı şuna bağlamaktadır: Hidratasyon sırasında NaHCO₃'ün sönmüş kireç (portlandit) ile olan tepkimesinden sodyum hidroksit oluşmaktadır. 13.5 pH değerine sahip olan sodyum hidroksitte bu nedenle ortamın pH seviyesini yukarıya çekmektedir. Yaşanan bu tepkime aşağıda verildiği gibi gerçekleşir;



Ayrıca araştırmada hidratasyon sonucu oluşan C-S-H ve C-A-S-H'nin yüksek miktarda Si ile Al içermesi ve HCO₃'ün portlandit ile tepkimesinden oluşan CaCO₃'e dönüşmesi normalde betonun boşluk suyu pH'ını düşürmesi gerektirir. Ancak NaHCO₃'ün oluşturduğu tepkimeler sayesinde bu düşüşün gözlemlenmediği belirtilmiştir (Seo vd., 2021).

2.2 Betonun Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

Sodyum bikarbonatın hidratasyon ürünleriyle yaptığı reaksiyonlardan dolayı betonun priz süresi de etkilenmektedir. Birçok farklı araştırmacı betonda NaHCO₃'ün bir priz hızlandırıcı katkısı olarak kullanılıp kullanılmayacağını araştırmıştır. NaHCO₃ priz alma ve bitiş süresini önemli sürelerde kısaltmaktadır. Wang vd. (2019) çimento ağırlığının %0-1-2-3-4 oranında NaHCO₃ kullanımının priz süresi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. %1-2-3-4 ağırlıkça NaHCO₃ ilaveli betonun priz başlangıç süresinin sırasıyla referans betona göre %87, %94, %97, ve %97 gibi yüksek oranlarda azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 2.2). Sıralamaya göre %1-2-3-4 NaHCO₃ kullanımında betonun priz bitiş süresi de bünyesinde NaHCO₃ bulunmayan geleneksel PÇ kullanan betona göre %44, %69, %86 ve %86 azalmaktadır. %1-2 NaHCO₃ kullanımında priz sonu süresinde büyük bir azalma görülürken, %3-4 gibi daha yüksek dozajlarda artış oranı azalmaktadır.

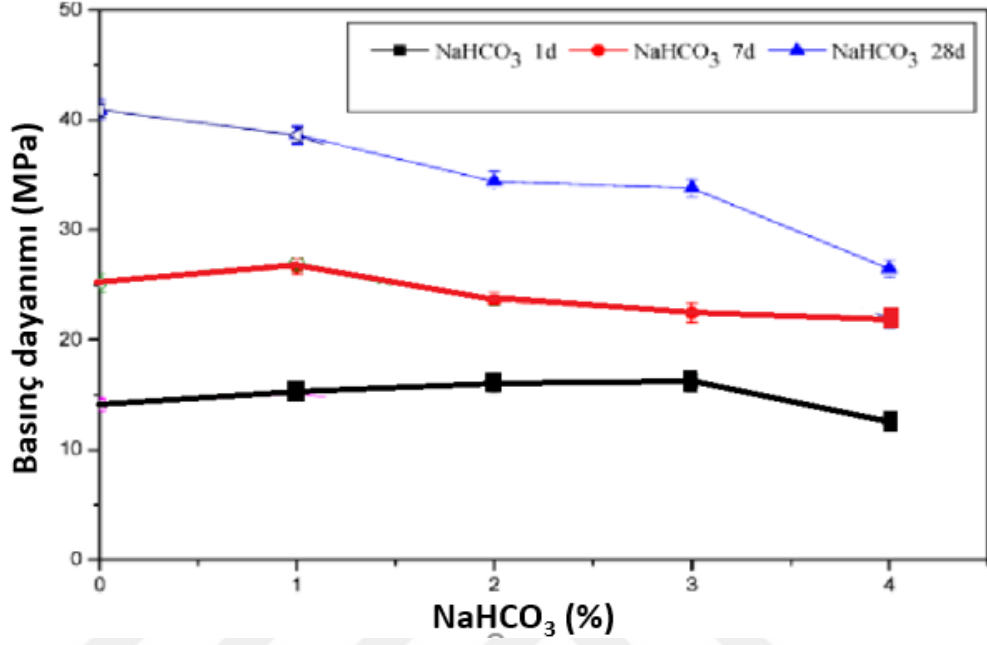


Şekil 2.2 NaHCO₃ oranının priz süresine etkisi (Wang vd., 2019)

2.3 Betonun Basınç Dayanımı

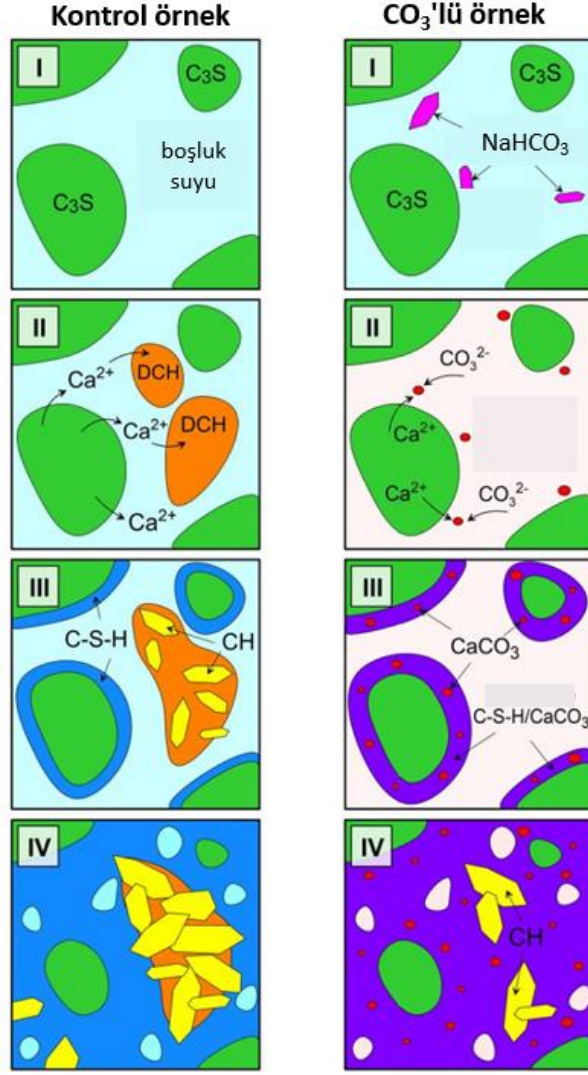
Betonun mekaniksel özelliklerini değiştirirken aynı zamanda hem ekonomik hem de çevresel bir çözüm bulmaya çalışan araştırmacılar NaHCO₃ ilavesinin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. NaHCO₃'ün betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi mevcut literatürde tartışmalı bir konudur. Jang ve arkadaşlarının (2015), çimentonun ağırlığının %1-2'si kadar NaHCO₃ ilavesinin çimentonun hidrasyon hızını ve oranını arttırdığını ve böylece betonun hem eğilme hem de basınç dayanımının arttığını iddia etmişlerdir. Fakat kullanılan NaHCO₃ miktarı %5 seviyelerine ulaştığında ters bir etki yaratarak fazla NaOH oluşumu sebebiyle dayanımın azaldığını belirtmişlerdir. Reddy vd. (2006), yaptığı çalışmada ise beton içerisine katılan NaHCO₃'ün miktarı ne olursa olsun, kontrol betona göre dayanımın her zaman düştüğünü rapor etmiştir. Stefanuik vd. (2023), yaptığı çalışmada ise NaHCO₃ ilavesinin, betonun yaşına ve katkı miktarına göre dayanıma etkisinin çok değişken olduğunu ileri sürmüştür. Yapılan çalışma sonucu elde edilen basınç dayanımı grafiği aşağıdaki gibidir. Erken yaşta %1-2-3 NaHCO₃ katkısı basınç dayanımını arttırırken, %4'lük bir ilave kontrol örneğine göre basınç dayanımını

düşürmüştür. Betonun yaşı 7 ve 28. günlere geldiğinde ise %1'lik NaHCO₃ ilavesi dışındaki bütün dozajlarda betonların basınç dayanımında bir düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 NaHCO₃ oranının basınç dayanımına etkisi (Wang vd., 2019)

Stefanuik vd. (2023)'ne göre referans betonda C₃S yavaş bir şekilde C-S-H ve kristal formda CH'a dönüşmektedir. Sodyum bikarbonat katkılı betonlarda boşluk suyundaki karbonat iyonlarının bulunması amorf haldeki CH'ları amorf kalsiyum karbonata dönüştürürken, bu durum C-S-H'ların oluşumu için bir çekirdeklendirme alanı oluşturmaktadır. Böylece; klinkerin hidratasyonu hızlanıp, kompozit bir CaCO₃/C-S-H fazının oluşması ile betonun erken yaşta mekaniksel özellikleri artmaktadır. Sözü edilen mekanizmanın mikroyapısal şematığı Şekil 2.4'te verilmektedir;



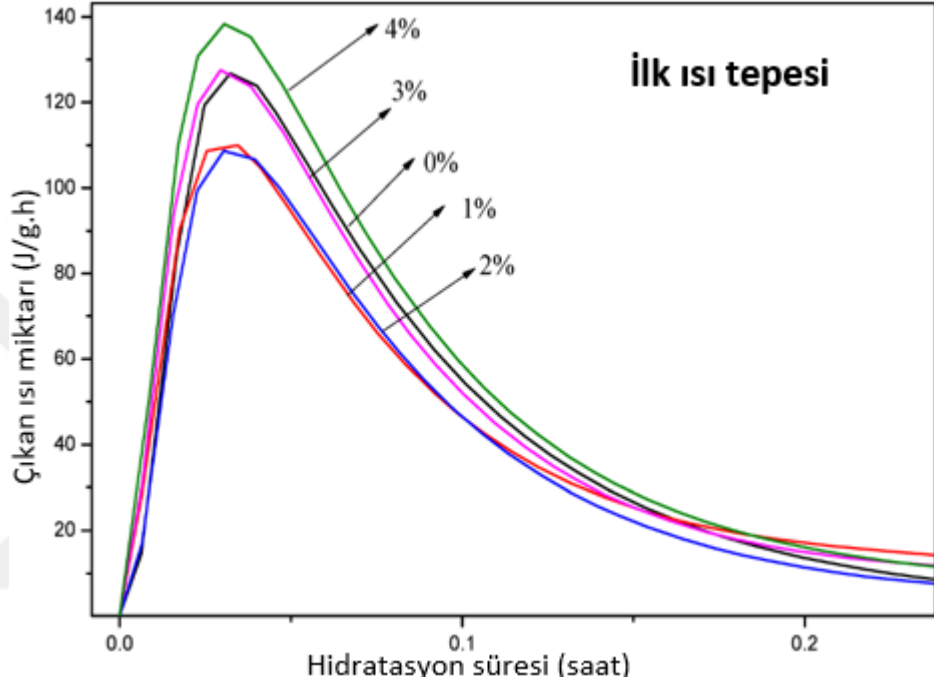
Şekil 2.4 NaHCO₃'ün hidrasyon zamanı klinkere etkisi (Stefanuik vd., 2023)

Taze halde meydana gelen bu reaksiyonlar sonucu oluşan CaCO₃/C-S-H kompozit fazı, kalıcı bir şekilde yaklaşık olarak klinker üretimindeki karbon salımının %15'i kadar CO₂'yi kendi bünyesine hapsedebilmektedir.

2.4 Hidrasyon Sırasında Açığa Çıkan Isı

Wang vd. (2019), yaptığı çalışmada, beton karışımı içerisinde çimento ağırlığınca %1-2-3-4 sodyum bikarbonat ilavesinin etkileri gözlemlenmiştir. İlk ısı tepesi incelendiğinde; %1-2 miktarda sodyum bikarbonat içeren betonların

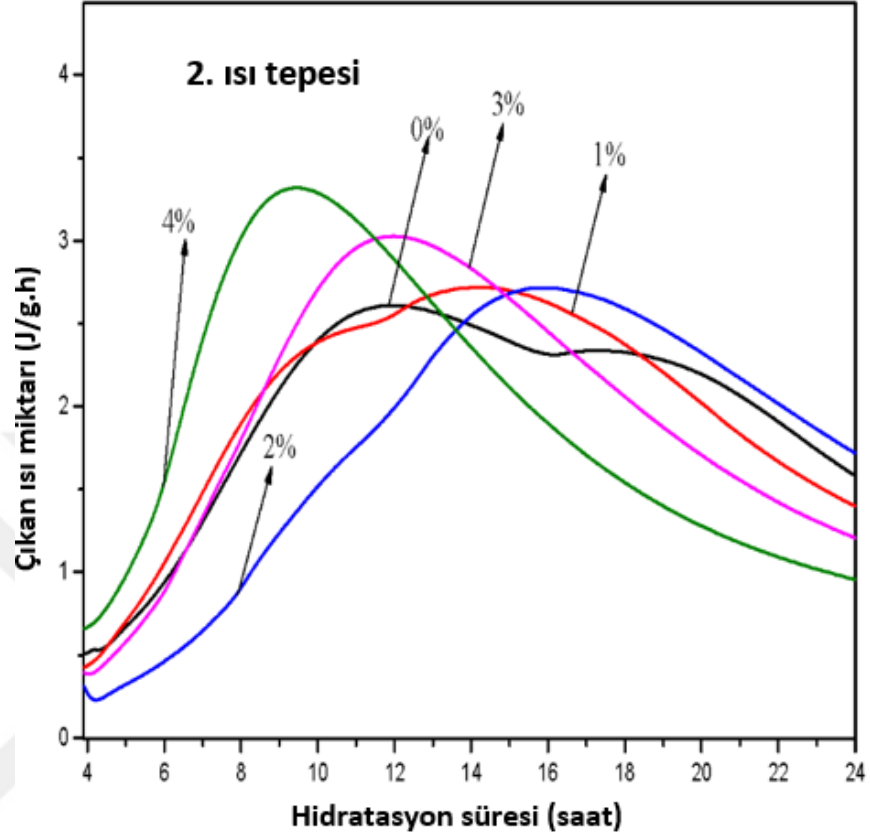
çıkardığı hidrasyon ısı kontrol örneğinden daha düşük olurken, %4 sodyum bikarbonat içeren betonların kontrol örneğinden daha fazla ısı açığa çıkardığı görülmüştür (Şekil 2.5). Araştırmacıları bunun nedenini %1-2 katkıli betonda etrenjit üretiminin yavaşlamasına bağlarken, katkı oranı daha fazla olan betonlarda etrenjit üretiminin kontrol betona göre hızlanmasının hidrasyon ısı artışına neden olduğu iddia edilmiştir.



Şekil 2.5 İlk hidrasyon ısı tepesinde NaHCO₃ oranının etkisi (Wang vd., 2019)

Hidrasyon boyunca devam eden tepkimeler sonucu elde edilen ikinci tepenin verilerine göre şu sonuçlar ortaya çıkmıştır; Çıkan hidrasyon ısının yüksekliğine bakıldığında katkıli betonların hepsinin kontrol betondan daha fazla ısı çıkışı yaptığı görülmüştür. Fakat katkı oranına bağlı olarak ikinci tepe oluşumunun zamanının farklı olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.6). %1-2 katkıli betonun ikinci tepe oluşumu, kontrol örneğe göre daha sonra olurken %3-4 katkı içeren betonlarda ikinci tepe, kontrolden daha erken gerçekleşmiştir. Bilindiği üzere hidrasyon tepkimeleri sırasında alit ve belitin tepkimeleri sonucu ikinci ısı tepesi oluşmaktadır. İkinci ısı tepelerinde yaşanan bu değişimleri araştırmacı %1-2 katkıli betonda NaHCO₃'ün C₃S ve C₂S'in

hidratasyonunu yavaşlatırken, %4 olan katkıli betonlarda NaHCO_3 'ün alit ve belitin hidratasyonunu hızlandırdığı sonucuna varmıştır.



Şekil 2.6 İkinci hidratasyon ısı tepesinde NaHCO_3 oranının etkisi (Wang vd., 2019)

Yapılan araştırmalarda elde edilen sonuçlara göre NaHCO_3 'ün soğuk havada beton dökümlerinde daha yüksek hidratasyon ısı gereksinimi için kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Malzemeler

3.1.1 Çimento

Deneyisel çalışmalarda, İzmir Batıçim Batı Anadolu Çimento San. A. Ş. Fabrikası'nda TS EN 197-1 standardına göre üretilmiş olan CEM I 42,5 sınıfı Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun üretici firmadan temin edilen fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1 CEM I 42,5 sınıfı Portland çimentosunun kimyasal özellikleri

Oksit Kompozisyonu (%)								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
62,87	19,20	5,13	3,33	1,44	2,71	0,36	0,85	0,0128
Karma Oksitler (%)								
C ₃ A		C ₃ S		C ₂ S		C ₄ AF		
7,96		63,07		4,01		10,13		
Yoğunluk(g/cm ³)		Kızdırma Kaybı(%)		Blaine(cm ² /g)		Serbest CaO(%)		
3,11		3,58		3264		2,19		
Basınç Dayanımları (MPa)								
2 Günlük				28 Günlük				
22,4				45,3				

3.1.2 Su

Araştırma boyunca kullanılan su Dokuz Eylül Üniversitesi Tınaztepe Yerleşkesinde kullanılan içilebilir şebeke suyudur. Şebeke suyu, karışımlarda kullanılmadan önce oda sıcaklığına getirilmiştir. Şebeke suyunun kimyasal bileşen içeriği aşağıdaki Tablo 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.2 Kullanılan suyun kimyasal özellikleri

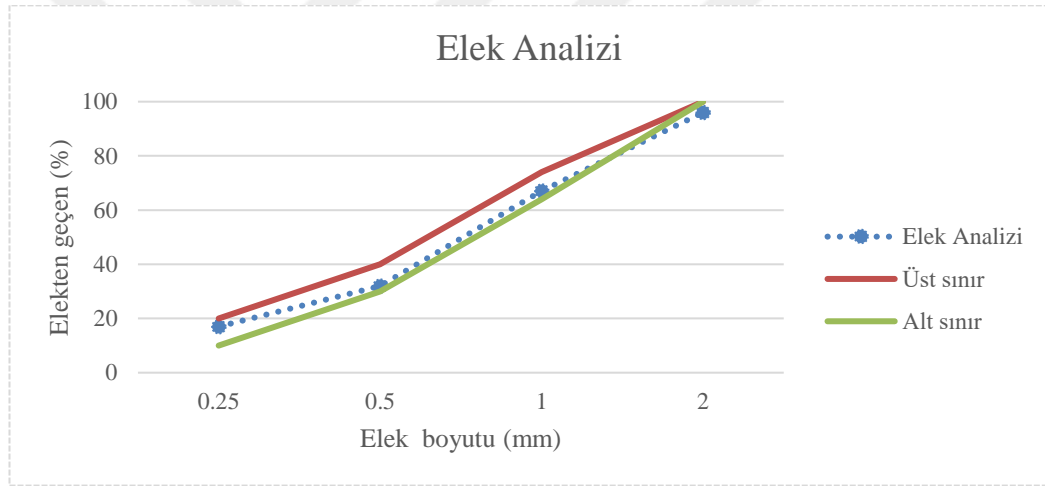
Özellik	Değer	Yöntem
Al	0,02 mg/L	EPA 6020
Çözülmüş Oksijen	7,60 mg/L	SM4500-O C
Fe	0,01 mg/L	EPA6020
Cl	42 mg/L	SM 4500 Cl-B
Mn	< 0,01 mg/L	EPA6020
pH	7,63	SM 4500 Cl+B
Na	16,3 mg/L	EPA6020
SO ₄	107,8 mg/L	SM 4500 SO4-C
İletkenlik	395 µs/cm	SM 2510 B
Bulanıklık	0,70 NTU	SM 2530 B
Toplam Organik Karbon	< 3,5 mg/L	SM 5310 B
NH ₄	< 0,24 mg/L	SM 4500 NH3 B-C
Koku	Doğal	
Tat	Doğal	

Tablo 3.2 devamı

NO ₂	< 0,008 mg/L	SM 4500 NO ₂ +B
Renk	< 5	TS EN ISO 7887

3.1.3 İnce agrega

Kullanılacak çalışmada TS706 EN 12620 + A1 standartına uyulacak şekilde 2 mm elekten geçirilmiş, etüv kurusu hale getirilip paketlenmiş ince agrega kullanılmıştır. İnce agreganın tane boyut dağılımı Şekil 3.1’de verilmiştir. Kırma kireçtaşı kökenli ince agreganın özgül ağırlığı 2,70 g/cm³ ve su emme oranı %1’dir.



Şekil 3.1 Araştırmada kullanılan agreganın dane dağılımı grafiği

3.1.4 Süperakışkanlaştırıcı Katkı

DeneySEL çalışmalarında Grace Yapı Kimyasalları San Ve Tic A.Ş tarafından üretilen ADVA FLOW 505 kodlu süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan katkı maddesinin firma tarafından beyan edilen fiziksel özellikleri aşağıdaki Tablo 3.3’te verildiği gibidir.

Tablo 3.3 Süperakışkanlaştırıcı katkıının fiziksel özellikleri

Özellikler	Açıklama
Yapı	Sıvı
pH	4.8 (20°C)
Yoğunluk	1.083 g/ml)
% Katı Madde	26.8

3.1.5 Sodyum Bikarbonat

Deneysel çalışmalarda 0,95 g/cm³ özgül ağırlığa sahip Hanzade Bitkisel firmasının üretmiş olduğu sodyum bikarbonat (NaHCO₃) kullanılmıştır. İngiliz karbonatı veya kabartma tozu olarak bilinen sodyum bikarbonatın kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Sodyum bikarbonatın kimyasal özellikleri

ANALİZLER	BİRİM	LİMİTLER		FİİLİ SONUÇLAR
		ALT LİMİT	ÜST LİMİT	
NaHCO ₃	%	99,30	-	99,47
Na ₂ CO ₃	%	-	0,50	0,37
Cl	ppm	-	100,00	32,00
Fe	ppm	-	6,00	2,00
SO ₄	ppm	-	100,00	64,00
Suda Çözünmeyen Madde	ppm	-	200,00	104,00
pH		-	8,50	8,20
D50	μ	-	-	152,31
D90	μ	-	-	348,58
D10	μ	-	-	53,38
NaCL	%	-	0,0165	0,0050
Fe ₂ O ₃	%	-	0,00086	0,00030
Ağır Metal Analizleri	Birim	Tespit Limiti	Spesifiaksyon	Fiili Sonuçlar
Hg	mg/kg	-	0,1	Tespit Edilmedi
Pb	mg/kg	-	2	Tespit Edilmedi
Cu	mg/kg	-	1	Tespit Edilmedi
As	mg/kg	-	1	Tespit Edilmedi
Cd	mg/kg	-	0,5	Tespit Edilmedi

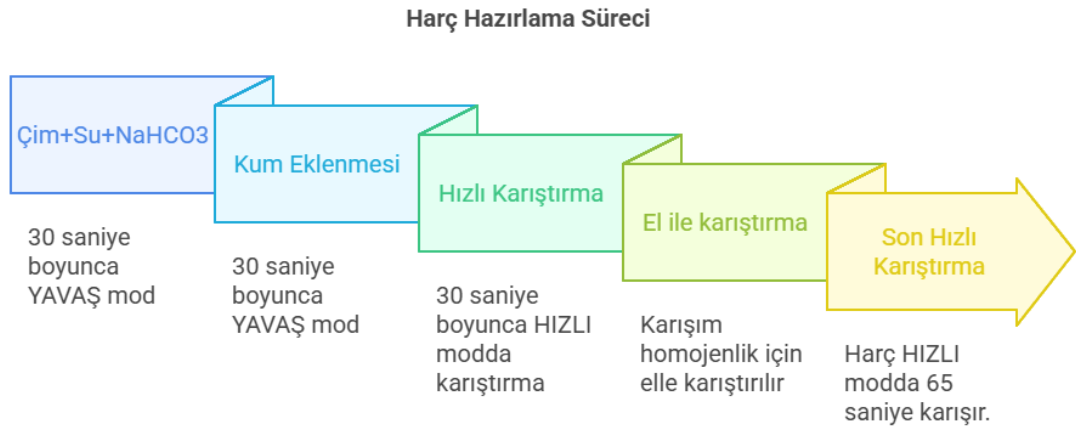
3.2 Çimento hamuru ve çimento harcı karışım oranları ve hazırlama yöntemi

Tüm çimento hamuru ve harç karışımları klima kontrollü harç odasında 20°C’de hazırlanmıştır. Sodyum bikarbonat ilavesinin hem çimento hamuru hem de çimento harcına etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Tüm harç serilerinde kum/çimento oranı 3 olarak sabit tutulmuştur. Çimento hamuru 5 litre hacimli ancak 2 litre etkili karıştırma kapasiteli Hobart mikserde hazırlanmıştır. 2 adet hız seçeneğine sahip olan mikser, yavaş modda kendi etrafında 140 devir/dakika ile dönerken hızlı modda 285 devir/dakika’da dönmektedir.

Çimento harçların hazırlanması toplamda 5 aşamada gerçekleştirilmiştir:

1. İlk aşamada mikser haznesinde çimento, su ve sodyum bikarbonat yavaş bir şekilde 30 saniye boyunca karıştırılmıştır. (0,4 ve 0,3 S/Ç’ye sahip harçlarda süperakışkanlaştırıcı hazneye su ile birlikte eklenmiştir)
2. Ardından karışmakta olan hazneye belirtilen miktarda kum ilavesi yapılmış ve 30 sn boyunca karıştırma yavaş hızda devam etmiştir.
3. Üçüncü aşamada mikser hızlı karıştırma moduna alınmış 30 sn daha bu süreç devam etmiştir.
4. Mikserin dip çeper dibine ulaşamamasından dolayı daha homojen bir karışım elde etmek için mikser durdurulup karıştırma haznesi mikserden çıkartılmış ve 60 saniye boyunca bir kaşık kullanılarak el ile 60 saniye boyunca karıştırılmıştır.
5. Son olarak yerine takılan hazne 65 saniye boyunca hızlı ayarda karıştırılmıştır.

Çimento harcı için yapılan işlem sırasının şematiği Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Harç hazırlama sürecinin şeması

Karışım sürecinden hemen sonra çimento hamuru serilerine taze hal deneyleri uygulanmıştır. Sertleşmiş hal deneyleri sadece çimento harcında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda taze harç 40x40x160 mm ayrıtlı kalıplara 2 kademe 25 kez tokmaktama işlemi ile sıkıştırma uygulanarak yerleştirilmiştir. Son olarak kalıplara doldurulmuş harçlar 5 saniyelik bir dış vibrasyona maruz bırakılıp, harcın kalıp içerisinde harcın iyice oturması sağlanmıştır. Perdahalama sonrasında kalıpların üzeri nem geçirmeyen poşetle kapatılmıştır. 24 saat sonra kalıp sökülerek alınan numuneler $20^{\circ}\pm 2$ sıcaklıktaki kür havuzuna 3-7-28. günlük deneyler için yerleştirilmiştir. Harçların hazırlanma işlemleri Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Sodyum bikarbonat (NaHCO_3) 3 farklı oranda çimento hamuru ve harçlara ilave edilmiştir. Referans olabilmesi için bir seriye hiçbir NaHCO_3 ilavesi yapılmazken, diğer serilere çimento ağırlığının %2-4-6'sı kadar NaHCO_3 ilavesi yapılmıştır. Bu oranlar literatür taraması baz alınarak belirlenmiştir. Seçilen dozajlara literatür taraması ışığında karar verilmiştir. Stefanuik vd. (2023), yaptığı çalışmada %1'lik bir NaHCO_3 ilavesinin basınç dayanımını referans betona göre arttırdığını, %4'lük bir NaHCO_3 ilavesinin ise betonun basınç dayanımını referans betona göre düşürdüğünü rapor etmiştir.

Deneyisel çalışmalarda taranan 2. değişken ise çimento hamuru ve harçların su/çimento (S/Ç) oranıdır. 0,5-0,4-0,3 S/Ç oranlarına sahip 3 farklı seri hazırlanmıştır. Deneyisel çalışmada bütün çimento hamuru ve harç serilerinin aynı işlenebilirlik seviyesine sahip olması için öncelikle 0,5 S/Ç oranında çimento hamuru ve harcın akma tablasında yayılma deneyi yapılmış ve yayılma çapı çimento hamuru ve harç için 220 ± 10 mm (Şekil 3.3) ve 110 ± 10 mm olarak bulunmuştur. Daha düşük S/Ç oranlı serilerde (0,4 ve 0,3) aynı işlenebilirlik için gerekli süperakışkanlaştırıcı ilavesi yapılarak yayılma çapları eşitlenmiştir.

Hazırlanan çimento hamuru serileri için 675 gr çimento, S/Ç oranı 0,5-0,4-0,3 olacak şekilde 337,5-270-201 gr su ve 0,4 S/Ç hamuru için 1,4 gr, 0,3 S/Ç oranlı hamur için 4,7 gr süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Hazırlanan çimento harçları içinse kullanılan çimento miktarı 450 gr, S/Ç oranı 0,5-0,4-0,3 olacak şekilde 225-180-135 gr su, 0,4 S/Ç hamuru için 6,7 gr, 0,3 S/Ç oranlı hamur için 20,2 gr

süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Hazırlanan çimento hamurları ve çimento harçları için kullanılan sodyum bikarbonat oranı ise Tablo 3.5'te gösterilmektedir.

NaHCO_3 'ün erken yaşta çimento hamurundaki etkilerini gözlemleyebilmek için Vicat deneyi ile priz süresi ve rotasyonel reometre ile akış parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tablo 3.5 Hamuru ve harç serilerinde kullanılan sodyum bikarbonat miktarları

Katkı Oranı	Çimento Hamuru	Çimento Harcı
%0	-	-
%2	13,5 gr	9 gr
%4	27 gr	18 gr
%6	40,5 gr	27 gr



Şekil 3.3 Referans 0,5 S/Ç çimento hamurunun yayılmış hali (Kişisel arşiv, 2024)



Şekil 3.4 Çimento harçlarının karıştırma işlemi (Kişisel arşiv, 2024)

Çimento harcı serilerinin eğilme ve basınç dayanımları TS EN 196-1 standardına göre tespit edilmiştir. Ayrıca 28 günlük numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Eğilme deneyi sonrasında açılan yüzeylere phenol-phitaleyn çözeltisi püskürtülerek karbonatlaşma derinliği araştırılmıştır.



Şekil 3.5 Çimento harcının tokmaklanma ve dış vibrasyon işlemi uygulanması (Kişisel arşiv, 2024)



(A)

(B)



(C)

(D)

Şekil 3.6 Harçların dökümünden küre konulmasına kadar olan işlemler. (A) harcın kalıplara dökülmesi, (B) harcın 1 gün sonra kalıplardan çıkarılması, (C) sertleşmiş harçların üstüne kodlama yapılması, (D) harçların su kürü havuzuna yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2024)

3.3 Deney Yöntemleri

3.3.1 Taze Hal Deneyleri

3.3.1.1 Vicat Deneyi

Sodyum bikarbonat ilavesinin çimento hamurunun priz başlangıç ve bitiş süreleri üzerindeki etkisini incelemek için Vicat deneyi yapılmıştır. Deney için TS EN196-3 standartına uygun bir düzenekten yararlanılmıştır. Priz başlangıcı için iğnenin hamura batırıldıktan sonra tabana 3-5 mm uzaklıkta durması, priz sonu

değerlendirmesi içinse iğnenin hamura en fazla 1mm battığı zaman değerlendirilmeye alınmıştır. Malzemelerin hazırlanışı bölümünde belirtildiği şekilde hazırlanan hamurlar Vicat deneyi için bulunan kalıba doldurulmuş ve belli aralıklarla iğnenin numune içerisine kaç mm battığı kaydedilmiştir. Kullanılan Vicat aleti Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Vicat aleti (Kişisel arşiv, 2024)

3.3.1.2 Yayılma Tablası Deneyi

Yayılma çapının belirlenmesi için hazırlanan çimento hamurları TS EN 1015-3 standardı kapsamında deneye tabii tutulmuştur. Çimento hamuru yayılma tablasına dökülmeden önce tabla ve kalıp bir yağ yardımı ile yağlanmıştır. Karıştırıldıktan hemen sonra yayılma tablasına dökülen çimento hamuru 3 saniyede el ile 5 kez sarsılmıştır. Sarsma sonrası tabla üzerine yayılan hamurun çapı, hamurun farklı noktalarından ölçülerek en büyük olan yayılma çapı not edilmiştir. Yayılma testi sonucu yayılan hamur Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Yayılma tablası deneyi sonucu yayılan hamur (Kişisel arşiv, 2024)

3.3.1.3 Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi

Sodyum bikarbonatın çimento hamurunun reolojik etkilerini incelemek için hamurların hazırlandıktan hemen sonra reometre yardımı ile testler yapılmıştır. Deney için kullanılan reometre Anton Paar Physica MCR51 modeli olup, verilerin elde edilmesi ve deneyin yapılabilmesi için Anton Paar RheoCompass uygulaması kullanılmıştır (Şekil 3.9). Cihaz bir bilgisayara bağlı olup, deney boyunca elde edilen veriler uygulama aracılığıyla kaydedilmektedir. Hazırlanan hamurlar reometrenin kendi özel haznesine konulduktan sonra boşluk oluşumunu engellemek için hazne 5 kere sarsılıp 1 dakika içerisinde reometre haznesine yerleştirilmiştir. Hazne içerisindeki sıcaklığın sabit kalması için su banyosu özelliği bulunan reometrenin ucuna hamuru karıştırması için 2 tanesi tabana dik, 2 tanesi tabana 45°

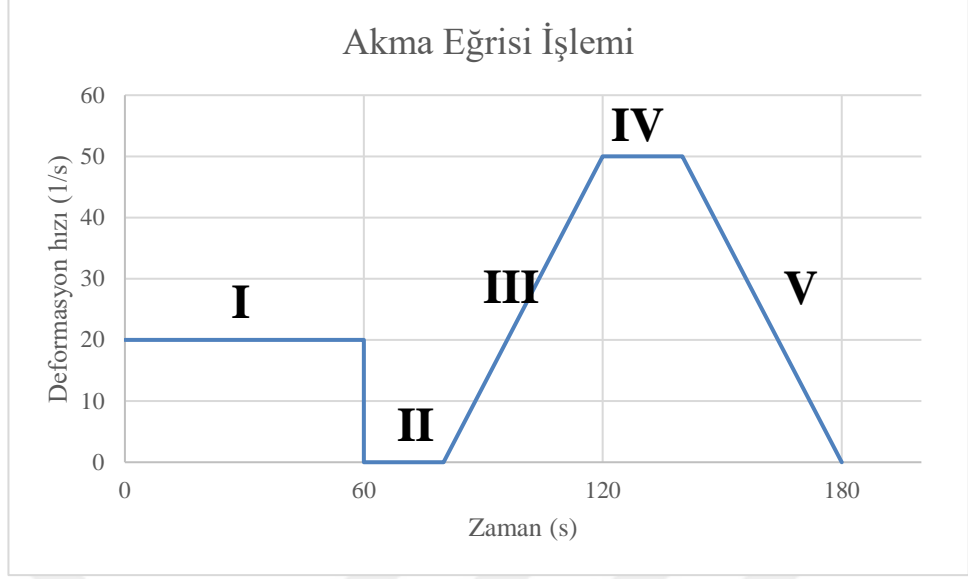
açıyla duran toplamda 4 adet plakanın olduğu ölçüm ucu (spindle) kullanılmıştır (Şekil 3.10). Reometre minimum 250 μNm tork kapasitesine sahipken, maksimum 125 mNm torkuna sahiptir. RheoCompass adlı uygulama ise deney boyunca alınan moment ve dönme hızı verilerini kendi sahip olduğu yazılım sayesinde kayma gerilmesine (τ) ve kayma hızına ($\dot{\gamma}$) dönüştürmektedir. Deney sonrasında elde edilen veriler Bingham denklemi ile modellenmiştir. Hamurların statik ve dinamik eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri Şekil 3.11 ve 3.12’de gösterilen 5 aşamalı yöntem kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 3.9 Hamurun akma direncini ölçmek için reometreye takılan uç (Kişisel arşiv, 2024)



Şekil 3.10 Reoloji ölçümleri için kullanılan reometre (Kişisel arşiv, 2024)



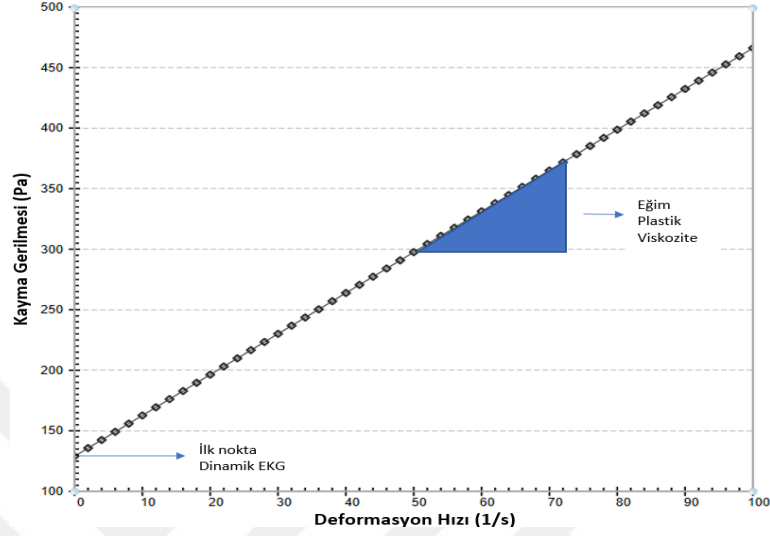
Şekil 3.11 Hamurların akma eğrisi için takip edilen prosedür

I. aralıkta, hazırlanan çimento hamuru 20 1/s'lik deformasyon hızıyla 60 saniye boyunca yukarıda belirtilen uç yardımı ile karıştırılmıştır. Yapılan bu işlem sırasında elde edilen ilk veri bize hamurların statik eşik kayma gerilmesi değerlerini vermektedir. Hazırlanan her bir hamur için elde edilen kayma gerilmesi/zaman grafikleri EKLER kısmında yer almaktadır.

II. aralıkta ise malzeme dinlenmesi için deformasyon hızı 0'a ani bir şekilde düşürülmüş ve bu bekleme işlemi 20 saniye boyunca sürmüştür.

Toplam geçen zaman 80 saniye olduğunda, işlemin III. aralığı başlamış ve reometre ucu kayma hızı 0 1/s'den 50 1/s'ye doğrusal olarak 40 saniye içerisinde çıkarılmıştır. Daha sonrasında IV. aralık olarak uç 20 saniye boyunca sabit 50 1/s kayma hızıyla dönmüş ve en son aşama olarak kayma hızı doğru orantılı azalacak şekilde 50 1/s'den 0 1/s'ye düşürülmüştür. V. aralık boyunca elde edilen kayma gerilmesi/kayma hızı verileri Bingham modeliyle işlenmiştir. Çimento hamurlarının akma eğrilerinden dinamik eşik kayma gerilme değerleri, viskozite/zaman grafiklerine bakılarak ise hamurların plastik viskozite değerleri elde edilmiştir. Her bir hamur için elde edilen bu grafikler EKLER kısmında sunulmuştur. Dinamik eşik kayma gerilmesi hamurun akmaya başlaması için gereken en düşük gerilmeyi temsil ederken, plastik viskozite

hamurun akma sonrası akışa gösterdiği direncin ölçüsüdür. Plastik viskozite aynı zamanda Şekil 3.11’de gösterildiği gibi kayma gerilmesi/kayma deformasyonu grafiğinin eğimine bakılarak bulunmektedir.



Şekil 3.12 V. aralığın akma eğrisi

3.3.2 Sertleşmiş Hal Deneyleri

3.3.2.1 Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi

28 gün su küründe bekletilen numuneler sudan çıkarılıp, kuruması için 1 gün boyunca 110°C’de etüvde bekletilmiştir. 1 gün sonra etüvden çıkarılan numunelerin ağırlıkları tek tek tartılmış ve daha sonra bu ağırlıklar numunelerin hacmine bölünerek kuru birim hacim ağırlık (kbha) değerleri elde edilmiştir. Kullanılan formül denklem 3.1’de verilmiştir;

$$\gamma_k = \frac{W_k}{V_T} \quad (3.1)$$

3.3.2.2 Su Emme Tayini

Numunelerin su emme değerlerinin bulunabilmesi için su küründen çıkartılan numunelerin kuru yüzey doygun ağırlıkları tartılmıştır (KYD). Daha

sonra 1 gün boyunca etüvde bekletilen numunelerin ağırlıkları kaydedilmiştir (Şekil 3.13). Numunelerin yüzdesel olarak su emme miktarını bulmak için aşağıda verilen formül takip edilmiştir;

$$\frac{(\text{KYD ağırlık} - \text{Etüv sonrası ağırlık})}{(\text{Etüvsonrası ağırlık})} * 100 \quad (3.2)$$



Şekil 3.13 Harçların kuruması için etüve atılması ve ağırlıklarının tartılması (Kişisel arşiv, 2024)

3.3.2.3 Eğilme Dayanımı Tayini

Hazırlanan çimento harçlarının eğilme dayanımı deney için TS EN 196-1 baz alınmıştır. Eğilme dayanımı 3 noktalı eğilme yöntemi ile hesaplanmıştır. Numuneler 3-7-28. günlerde su küründe çıkartılmış, daha sonrasında mesnet açıklığı 100 mm'ye ayarlanıp makineye yerleştirildikten sonra, makine deformasyon hızı dakika da 5 mm olacak şekilde numunelere kırılana kadar kuvvet uygulamıştır (Şekil 3.14).

Elde edilen en büyük kuvvet sonucu eğilme dayanımını MPa cinsinden hesaplamak için aşağıda verilen denklem 3.3 kullanılmıştır;

$$\text{Eğilme dayanımı} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (3.3)$$

F: Kırılma kuvveti (N),

l: Mesnet açıklığı (mm),

b: Numune en kesit genişliği (mm),

h: Numune en kesit yüksekliğidir (mm)'dir



Şekil 3.14 3 noktalı eğilme dayanımı testi uygulaması (Kişisel arşiv, 2024)

3.3.2.4 Basınç Dayanımı Testi

Eğilme dayanımı testi sonucu ikiye ayrılan numuneler TS EN 196-1 standardına uygun bir basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. İkiye ayrılan numunelerin parçaları 2447 N/s yükleme hızıyla basınç presinde yüklenmiştir (Şekil 3.15). Numune artık daha fazla basınca dayanamayıp parçalanana kadar makine basınç uygulamaya devam etmekte ve en yüksek kuvveti (P)

kaydetmektedir. Basınç dayanımı P/A denklemi ile hesaplanmıştır. Yükleme yapılan kesit alanı A olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Basınç makinesinde örneğin basınç altında bırakılması (Kişisel arşiv, 2024)

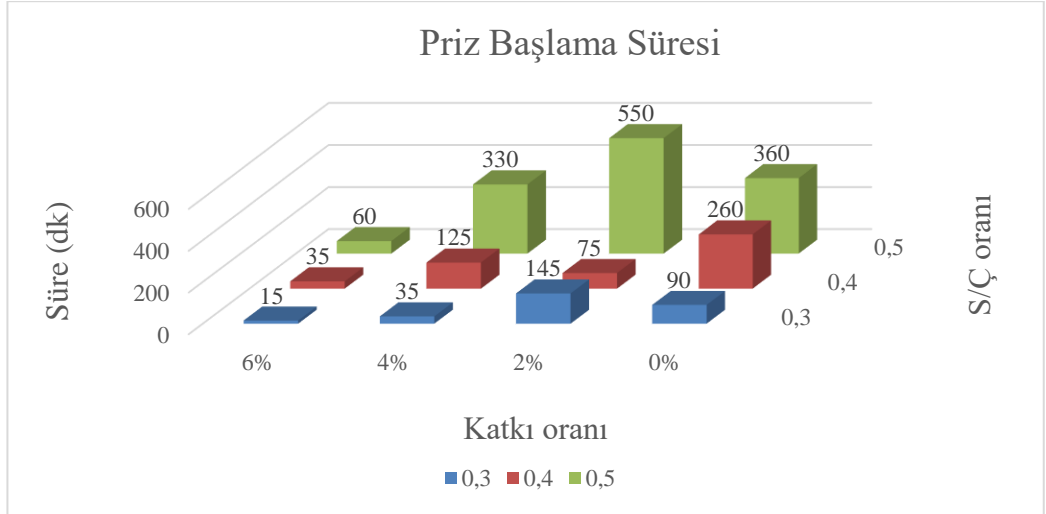
BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 Taze Hal Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.1.1 Vicat Deneyi Sonucu elde edilen Priz Süreleri

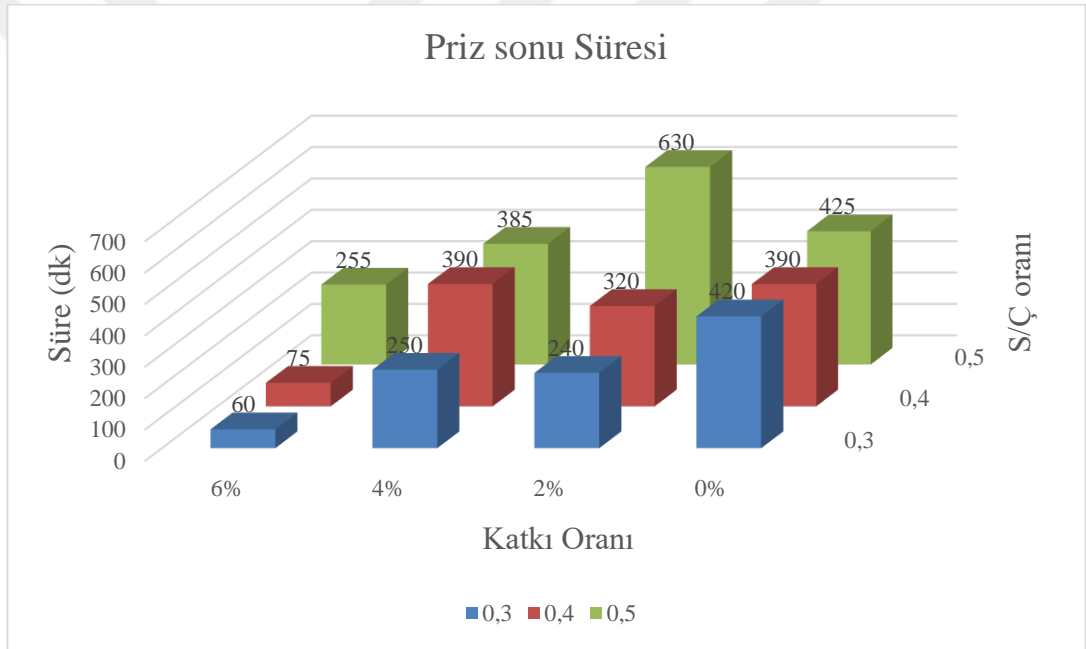
Her farklı S/Ç ve sodyum bikarbonat oranları için ölçülen Vicat priz süreleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Deney sonuçları sodyum bikarbonat ilavesinin, priz başlangıcını dozaja göre farklı şekilde etkilediğini göstermiştir. %2 sodyum bikarbonat içeren serilerde 0,3 ve 0,4 S/Ç oranı için priz başlangıç süresi referans seriye göre artarken, 0,4 S/Ç’ye sahip örnekte prizin referans örneğe göre daha çabuk gerçekleştiği görülmüştür. Katkı oranını daha da arttırdığımızda (%4-6) bütün örneklerde priz başlangıcı, içerisinde hiç katkı bulunmayan örneklerden daha hızlı gerçekleşmiştir. Özellikle %6 sodyum bikarbonat içeren örneklerin priz başlama süresinde S/Ç sırası artacak şekilde %83,3-%86,5-%83,3 oranında kısalma gerçekleştiği belirlenmiştir. Yüksek oranda sodyum bikarbonat kullanımı priz hızlandırıcı etki göstermiştir.



Şekil 4.1 Priz başlama sürelerinin grafiği

Örneklerin priz sonu sürelerine baktığımızda ise bir dalgalanma durumunun mevcut olduğu görülmüştür (Şekil 4.2).

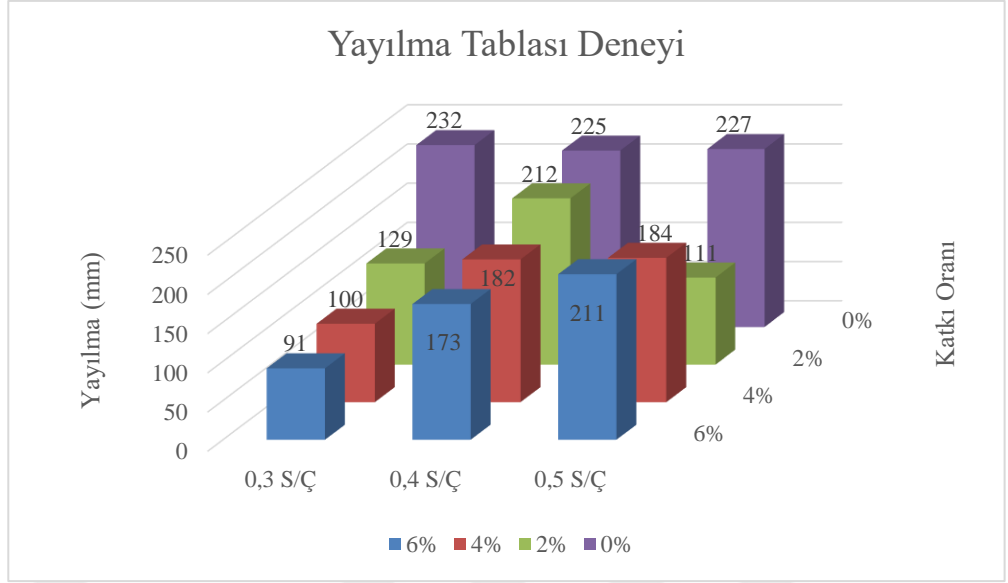
0,5 S/Ç için %2'lik katkı oranı priz sonu süresini uzatırken, katkı oranının %4-6'ya artması priz sonunu referans örneğin altına çekmiştir. Hem priz başlangıç hem de priz sonu süresini 0,5 S/Ç'li hamur için referansın altına düşüren %4 ve %6'lık sodyum bikarbonat ilavesini beton için priz hızlandırıcı katkı olduğunu söyleyebiliriz. 0,4 S/Ç oranına sahip örneklere bakıldığında %4'lük katkı oranının priz sonu süresi kontrol örneğe eşitken, diğer katkı oranlarında bu sürenin kontrol örneğin altına düştüğü gözlemlenmiştir. 0,3 S/Ç'li örneklerde ise katkı kullanımında bütün örneklerin priz sonu süresinde kısalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.2 Priz sonu sürelerinin grafiği

4.1.2 Yayılma Tablası Deneyi Sonuçları

Taze hamurlara sodyum bikarbonat ilavesinin, hamurların yayılma özelliğine olan etkilerini incelemek için önceden belirtilen yöntemler takip edilerek uygulama yapılmış ve Şekil 4.3'te verilen grafikler elde edilmiştir.



Şekil 4.3 Yayılma tablası deneyi sonucunda harçların yayıldığı değerler

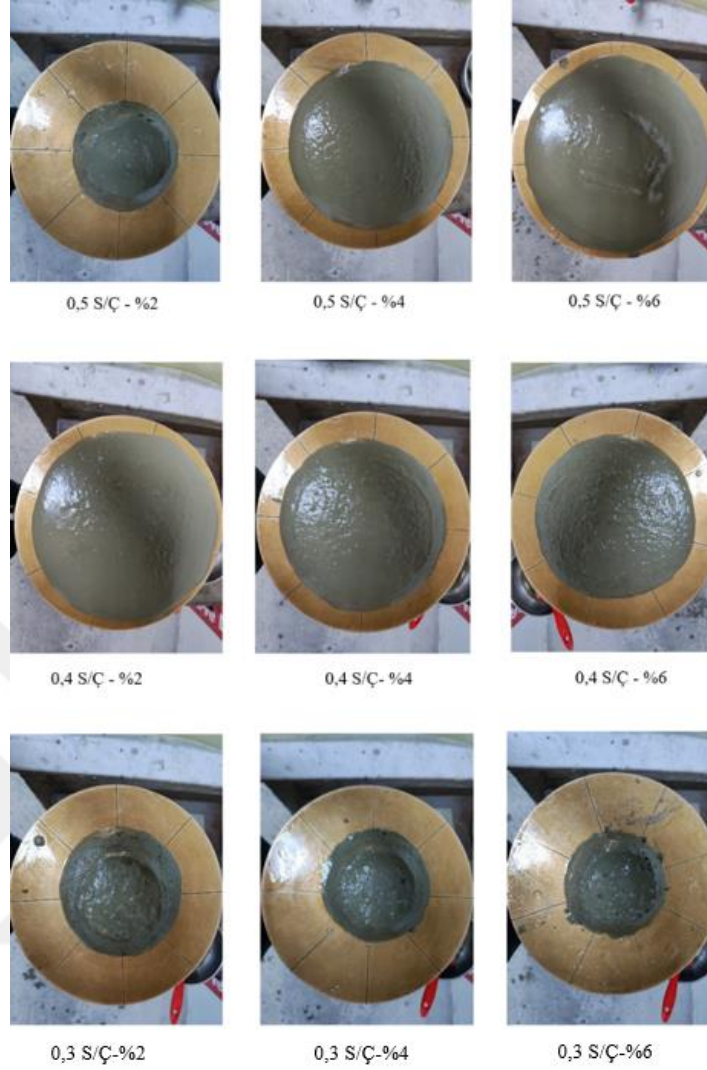
0,5 S/Ç oranında üretilen çimento hamurlarının %2-4-6'lık katkı oranlarıyla sahip olduğu yayılmalar sırasıyla 111-184-211 mm'dir. 0,5 S/Ç oranına sahip hamurların yayılma değerlerine baktığımızda, %2 katkı ilavesinin referans örneğe göre yayılmayı yarıya kadar düşürdüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere 0,5 S/Ç ve %2 katkı oranına sahip hamur yayılma tablasına döküldükten sonra hızlıca katılaşma gösterip 5 dakika içerisinde elle tutulabilir kıvama gelmiştir. %2'lik bir sodyum bikarbonat ilavesi yayılma yarıya düşürüyorken, katkı oranını arttırdıkça elde edilen yayılma çapının yavaş yavaş referans hamura yaklaştığı görülmüştür.



Şekil 4.4 0,5 S/Ç ve %2 karkılı harcın dökümden 5dk sonra ani katılaşması (Kişisel arşiv, 2024)

0,4 S/Ç'ye sahip hamurlara bakıldığında katkı oranı arttıkça yayılma çapının da azaldığı tespit edilmiştir. %2-4-6'lık katkıya sahip hamurların yayılma çapları sırasıyla 212-182-173 mm'dir. Her ne kadar yaşanan azalma 0,5 S/Ç ve %2 katkı içeren hamur kadar yüksek miktarda olmasa da, hamur katkı oranıyla doğru orantılı olacak şekilde yayılma çapını düşürmüştür. Aynı zamanda akıcı bir kıvama sahip olan referans hamur, katkının içine katılmasıyla birlikte akıcılığını kaybetmiştir.

0,3 S/Ç'ye sahip hamura sodyum bikarbonat ilavesinin etkileri, 0,4 S/Ç'ye sahip hamura paralellik göstermektedir. %2'lik bir sodyum bikarbonat ilavesi referans hamura göre yayılma çapını %44,4'lük bir düşüşle 129 mm'ye kadar düşürmüştür. %4 ve %6 katkı kullanımında yaşanan düşüşler bir önceki dozajla karşılaştırıldığında çok büyük farklara sahip olmasa da, katkı oranının artması yayılma çapının gitgide daha düşük değerlere almasına neden olmuştur. Yayılma tablası deneyi sonucu hamurlardan elde edilen görseller Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Sodyum bikarbonat ilavesinin hamurların akışkanlığı üzerindeki etkisi (Kişisel arşiv, 2024)

Sodyum bikarbonat ilaveli hamurlarda görülmüştür ki, S/Ç oranı düşüğe akıcılıkta kayıplar yaşanmaktadır. 0,5 S/Ç'ye sahip hamurları karıştırırken ve yayılma tablası haznesi dökerken hamurlar akıcı bir kıvama sahipken, 0,4 S/Ç'ye sahip hamurlarda bu akıcılık kaybolmuştur. Sarsma deneyi için hazneye dökülmekte zorlanan hamurlar bir metal kaşık yardımı ile yerleştirilmiştir. Katkılı 0,3 S/Ç'ye sahip hamurlar hazırlanırken ve dökülürken en düşük akıcılık gösteren hamur grubu olmuştur. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere 0,3 S/Ç'ye sahip katkıli hamurlar karıştırma sırasında topaklanmış ve döküm işini zorlaştırmıştır. Yaşanan akıcılık kaybı

dolayısıyla da döküm sonrası malzemeyi sıkıştırmak ve yerleştirmek daha da zor hale gelmiştir.



Şekil 4.6 0,3 S/Ç ve %4 katkıli hamurun karışım sırasında topaklanması (Kişisel arşiv, 2024)

4.1.3 Reolojik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

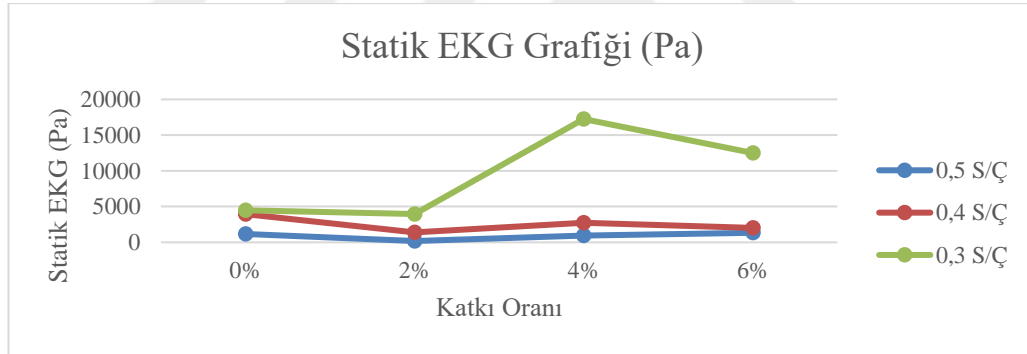
Sodyum bikarbonat ilavesinin taze çimento hamurları üzerindeki reolojik etkisini incelemek için “3.3.1.3 Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi” kısmında açıklanan yöntem takip edilmiş ve bunun sonucunda hazırlanan örneklerin statik, dinamik eşik kayma gerilmeleri ve plastik viskoziteleri elde edilmiştir (Şekil 4.7-4.8-4.9).

0,5 S/Ç'ye sahip hamurlarda statik EKG'ye bakıldığı zaman sodyum bikarbonat ilavesi durumunda başlangıçta referans örneğe kıyasla daha düşük değerler görülmüştür (Şekil 4.7). Katkıya sahip olmayan referans hamur 1551 Pa statik EKG'ye sahipken, %2-4-6 katkıya sahip hamurların değerleri sırasıyla 185-953-1335 Pa olmuştur. Katkı oranı %2 iken statik EKG'de düşüş yaşanmış ve katkı oranı %6'ya

ilerledikçe hamurun sahip olduğu statik eşik kayma gerilmesi gitgide artmış fakat asla referans hamuru geçememiştir.

0,4 S/Ç hamurlarının sahip olduğu statik eşik kayma gerilmesi grafiği aşağıda verilmektedir. Elde edilen veriler incelendiğinde hamurların sahip olduğu değerler katkı oranı %0-2-4-6 olacak şekilde 3944-1394-2752-2028 Pa'dır (Şekil 4.7). %2'lik bir katkı ilavesi statik EKG'yi düşürürken daha fazla sodyum bikarbonat önce bu değeri arttırmış daha sonra tekrar ilave edilmesiyle EKG değerini biraz daha düşürmüştür.

0,3 S/Ç hamurlarının sahip olduğu statik eşik kayma gerilmesi değerleri %0 katkı için 4472, %2 katkı için 3962, %4 katkı için 17250 ve %6 katkı için 12523 Pa çıkmıştır (Şekil 4.7). Başlangıçta %2'lik katkı ilavesi ile düşen viskozite, hamura toplamda %4 katkı katılması ile referansa kıyasla yaklaşık 4 kat daha fazla statik EKG değerine sahip olmuştur.



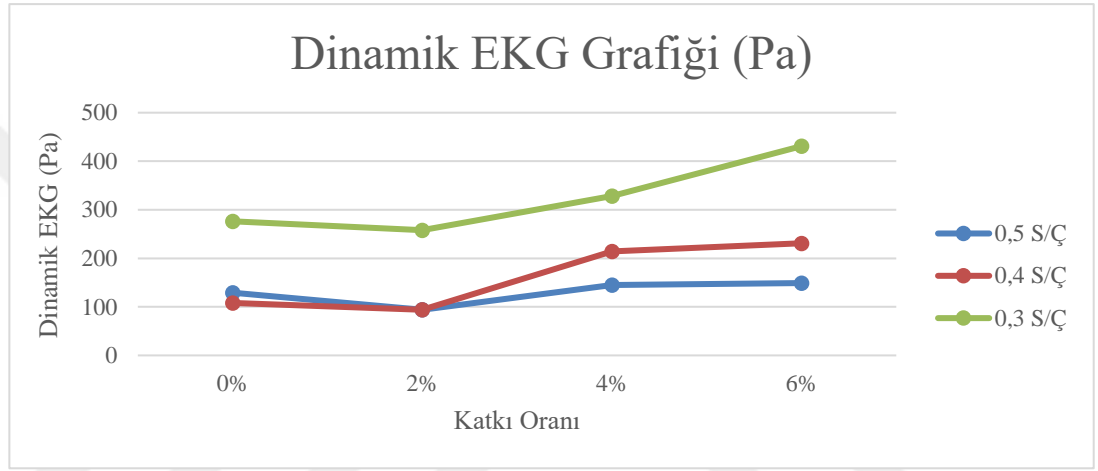
Şekil 4.7 Çimento hamurlarının reometrede testi sonucu statik ekg değerleri

0,5 S/Ç hamurunun dinamik eşik kayma değerleri ise statik eşik kayma değerine benzer şekilde %2'lik katkının katılmasıyla azalmıştır (Şekil 4.8). Referans hamur 129 Pa dinamik EKG'ye sahipken %2-4-6 katkıya sahip hamurların dinamik EKG değerleri sırasıyla 94-145-149 Pa olmuştur.

0,4 S/Ç hamurlarının sahip oldukları dinamik eşik kayma gerilmesi değerleri katkı oranı artacak şekilde sırasıyla 108-94-214-231 Pa'dır (Şekil 4.8). Eklenen katkı %2

seviyesindeyken dinamik EKG’de hafif bir düşüş gözlemlense, katkı oranının artmasıyla birlikte referansa kıyasla dinamik EKG değeri yaklaşık 2 katına çıkmıştır.

0,3 S/Ç için elde edilen dinamik EKG değerleri %0-2-4-6 katkı için sırasıyla 276-258-328-431 Pa şeklinde olmuştur. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi statik EKG ile benzerlik gösteren dinamik EKG değerleri başta %2’lik bir katkı ilavesi ile referansa kıyasla azalmış olsa da %4 veya %6 gibi katkı oranları dinamik EKG’yi referansa göre arttırmıştır.



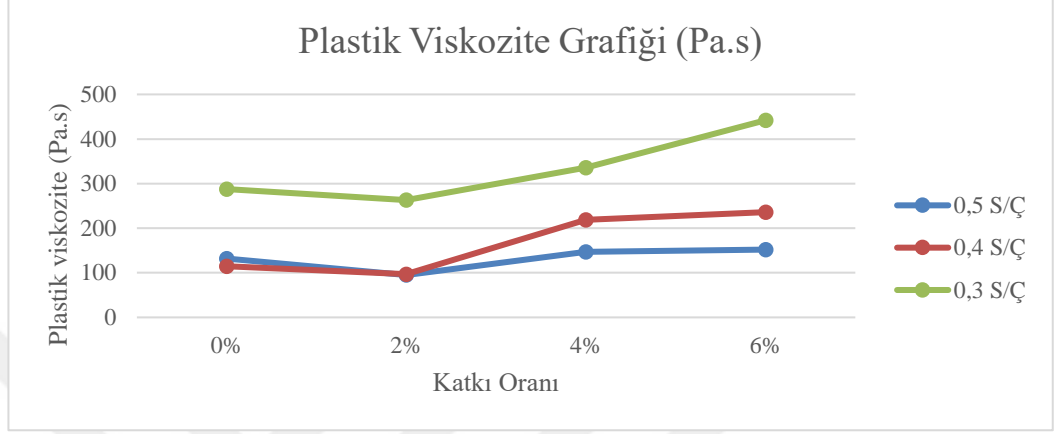
Şekil 4.8 Çimento hamurlarının reometre ile elde edilen dinamik ekg değerleri

0,5 S/Ç hamurunun sahip olduğu plastik viskozite değerlerine bakacak olursak katkı oranları %0-2-4-6 olmak üzere sırasıyla 132-95-147-152 Pa.s’dir (Şekil 4.9).

0,4 S/Ç hamurunda elde edilen plastik viskozite değerleri katkı oranı %0-2-4-6 olacak şekilde sırasıyla 115-97-219-236 Pa.s olmuştur (Şekil 4.9). %2’lik bir sodyum bikarbonat ilavesi plastik viskozitede düşüşe neden olurken katkı oranının %4 ve %6’ya çıkması referansa göre daha büyük viskozite değerleri elde edilmesine neden olmuştur

0,3 S/Ç’nin plastik viskozite değerlerine bakıldığında elde edilen değerler %0-2-4-6 katkı oranı için sırayla 288-263-336-442 Pa.s’dir. %2 sodyum bikarbonat plastik viskoziteyi düşürürken daha fazla sodyum bikarbonat ilavesi ise plastik viskoziteyi yükseltmiştir. 3 farklı S/Ç oranına sahip hamurun bütün katkı oranlarında ki değerlere

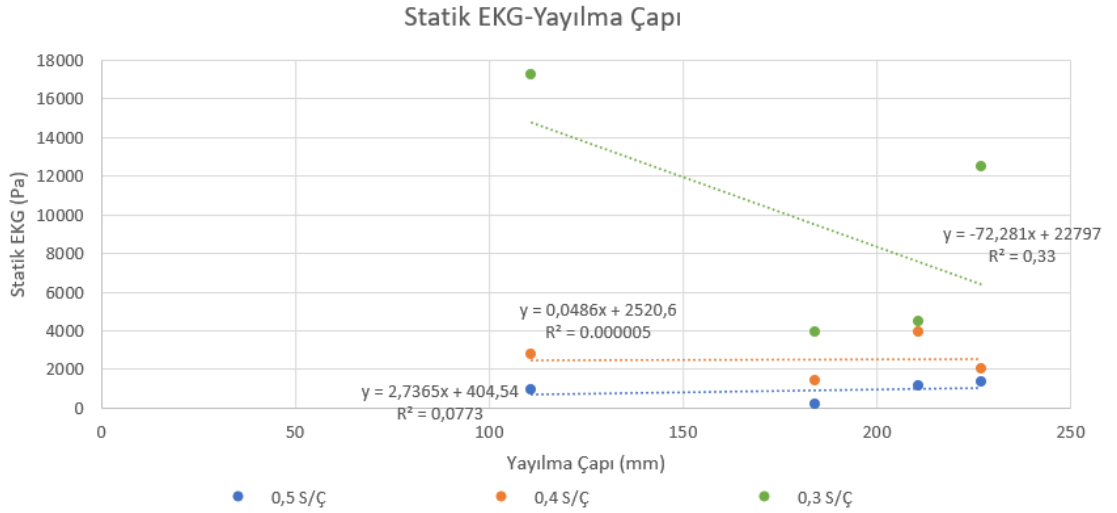
bakıldığında bir minimum viskozite değeri görülmektedir. %2'lik bir sodyum bikarbonat ilavesi plastik viskoziteyi kontrol örneğine göre daha düşük seviyelere getirirken %4 ve %6'lık bir sodyum bikarbonatın plastik viskoziteyi kontrol örneğin sahip olduğundan daha yukarıya çıkardığı dikkat çekmiştir.



Şekil 4.9 Çimento hamurlarının reometrede testi sonucu sahip oldukları plastik viskozite değerleri

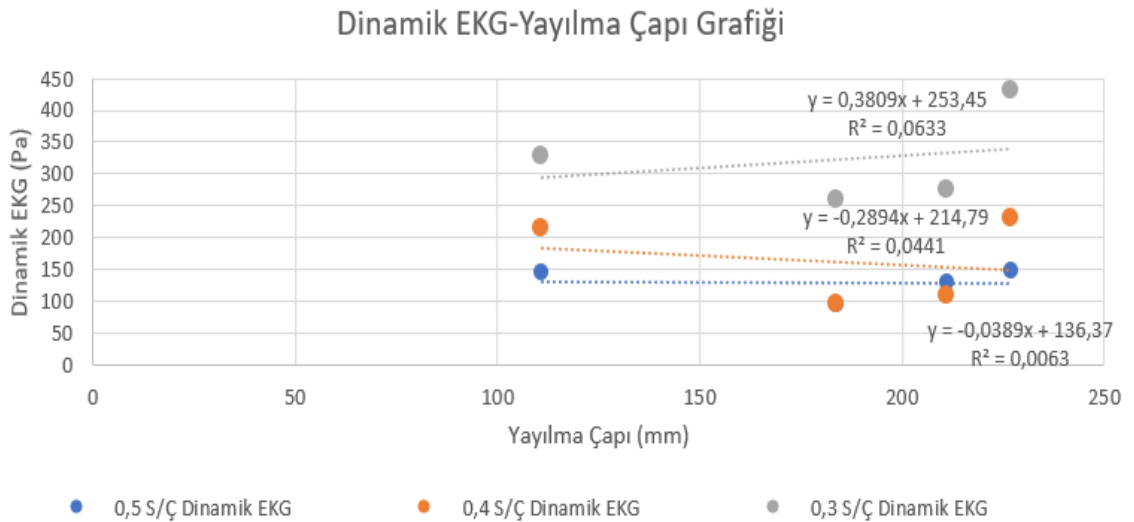
Ayrıca her bir farklı S/Ç'ye sahip hamurlarda hem statik EKG hem de dinamik EKG değerleri incelendiğinde, plastik viskozitede yaşananlara benzer bir şekilde %2 sodyum bikarbonat ilavesinin statik ve dinamik EKG'yi düşürürken, %4-6 katkı ilavesi her iki reolojki parametrenin de üç farklı S/Ç oranlı hamurda artmasına neden olmuştur.

Elde edilen veriler doğrultusunda statik EKG-yayımla çapı, dinamik EKG-yayımla çapı ve dinamik-statik EKG arasında bir ilişki olup olmadığını değerlendirmek amacıyla Şekil 4.10-4.11-4.12'deki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 4.10'da bütün serilerin sahip olduğu R değerleri oldukça küçüktür. Bu bağlamda statik EKG ve yayılma çapı arasında zayıf bir ilişki bulunduğu söylenebilir. Geleneksel bir hamurda statik EKG arttıkça yayılma çapının azalması beklenirken, yapılan araştırmada net bir trend gözlenmemiştir.



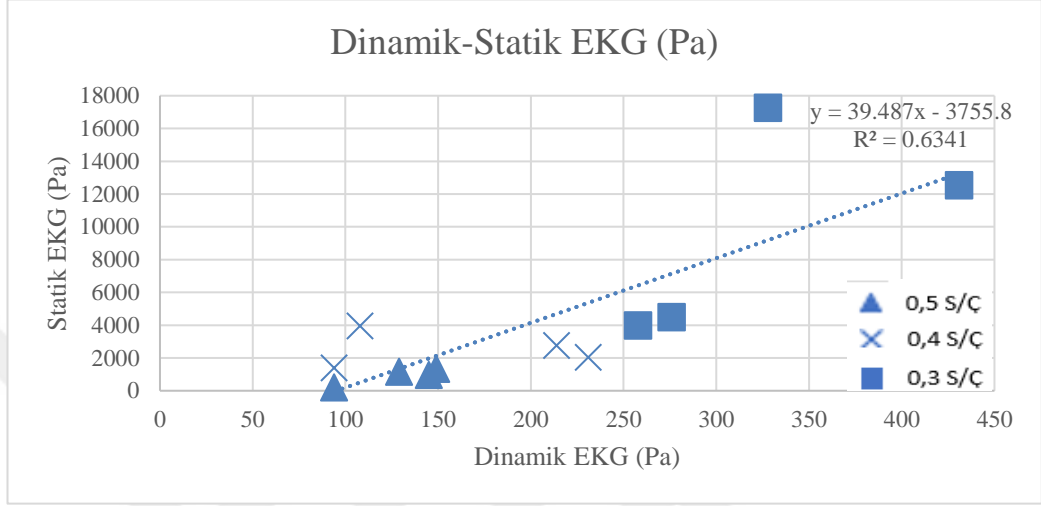
Şekil 4.10 Hamurların Statik EKG-Yayıllma Çapı grafiği

Şekil 4.11 incelendiğinde dinamik EKG arttıkça yayılma çapında düşüş yaşanmış gibi gözüksede, denklemlerden elde edilen R değerinin düşük olmasından anlaşılacağı üzere bu iki veri arasında kuvvetli bir ilişki bulunmamaktadır. Dinamik EKG hamurun akmaya başlaması için gereken en düşük gerilmeyi temsil ettiğinden yayılma çapı ile ters orantılı bir ilişkiye sahip olması beklenen bir durumdur.



Şekil 4.11 Hamurların Dinamik EKG-Yayıllma Çapı Grafiği

Şekil 4.12 incelendiğinde statik EKG ve dinamik EKG arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Genel olarak S/Ç oranı azaldıkça hamurların sahip olduğu hem statik hem dinamik EKG’de artış yaşanmaktadır. Elde edilen grafikte R değeri 0,8 olup, bu ikili arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir.

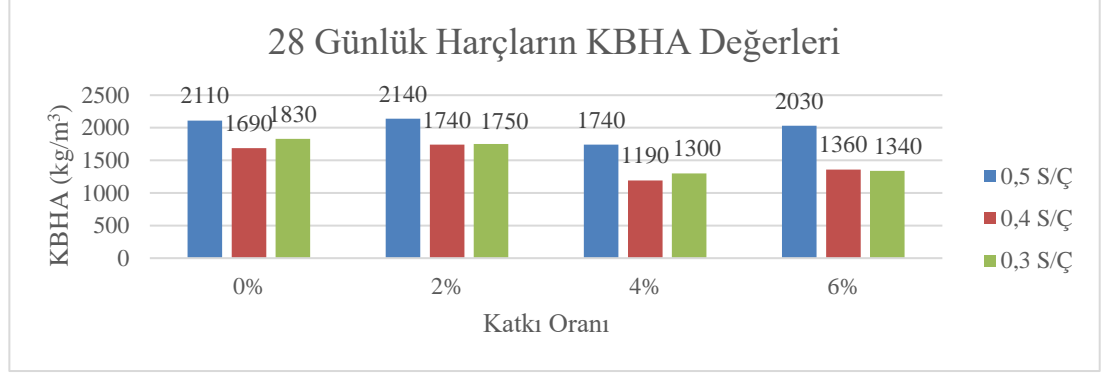


Şekil 4.12 Hamurların Dinamik-Statik EKG Grafiği

4.2 Sertleşmiş Hal Deneyleri

4.2.1 Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonucunun Değerlendirilmesi

Çimento harçlarının KBHA değerleri Şekil 4.13’te referans harçlarla kıyaslamalı olarak verilmiştir. %2’lik bir sodyum bikarbonat ilavesi, tüm S/Ç oranlarında KBHA değerinde çok önemli bir fark yaratmazken, katkı oranı %4-6’ya çıkartıldığında tüm S/Ç oranlarında KBHA değerinde düşüş kaydedilmiştir. Yaşanan en şiddetli düşüş %4 katkı kullanımında tespit edilip, düşüş oranları S/Ç oranı 0,5-0,4-0,3 için sırasıyla %17,5-%29,6-%29 şeklindedir. Sodyum bikarbonat oranının artması özellikle düşük S/Ç oranlarında kuru birim hacim ağırlıkta önemli azalmaya yol açmaktadır. Bu durumun sodyum bikarbonatın taze harç işlenebilirliğini azaltmasından kaynaklandığı ve her numuneye uygulanana sabit sıkıştırma enerjisinin harcın kalıba yerleştirilmesi için yeterli kaldığı düşünülmektedir.

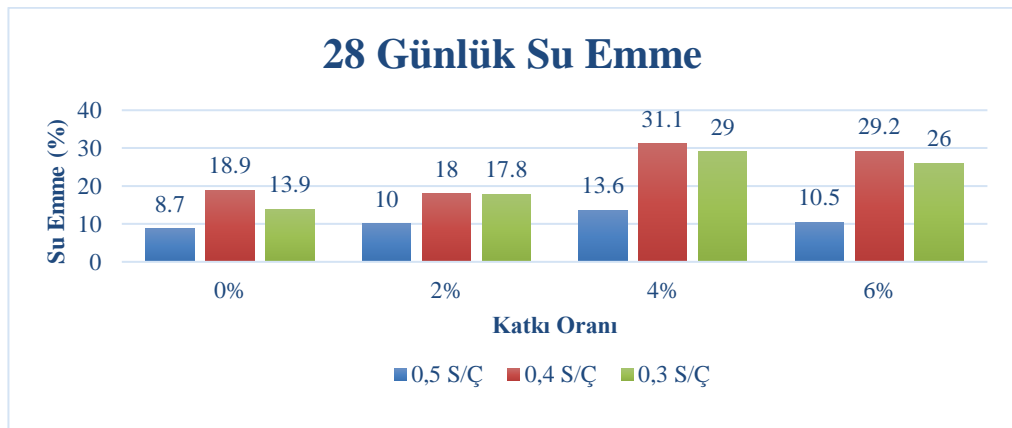


Şekil 4.13 Harçların 28 gün sonundaki kbha değerleri

4.2.2 Su Emme Tayini Sonuçlarının Değerlendirilmesi

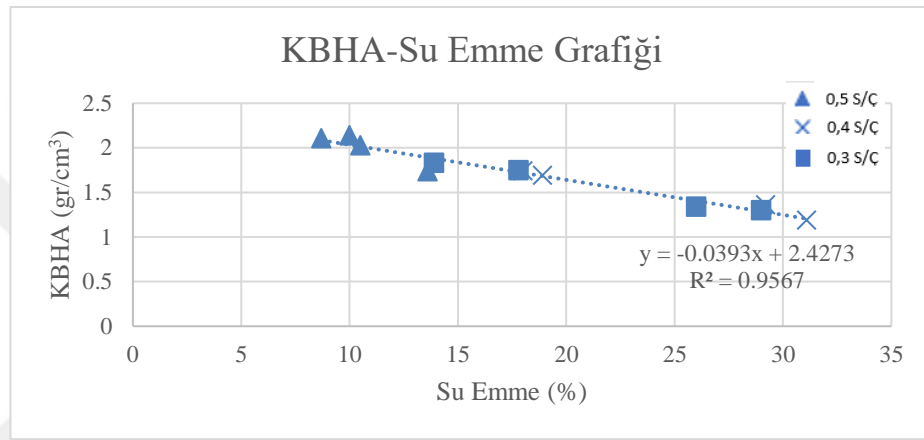
%2 katkılı harçlar arasında büyük bir su emme farkı gözlemlenmezken, 0,4 ve 0,3 S/Ç'ye sahip harçların %4 ve %6 katkı ilavesinde büyük bir su emme artışı olduğu dikkat çekmiştir (Şekil 4.14). Yaşanan en büyük artış 0,3 S/Ç'ye sahip harç olup, bu artış katkı oranı artacak şekilde referans harca göre sırasıyla %28,1-%108,6-%87,1'dir

0,4 ve 0,3 S/Ç'li harçlara %4-6 katkı ilavesinde akışkanlığın kaybolması, harçların döküm sırasında dış vibrasyona dahi tutulsa kalıplar içerisinde yeterince sıkışamamasına ve içerisinde boşluklar kalmasına neden olmuştur. Meydana gelen bu boşluklarda harçların KBHA değerlerini azaltırken, su emme oranlarını da arttırmıştır.



Şekil 4.14 Harçların 28 gün sonundaki su emme oranları

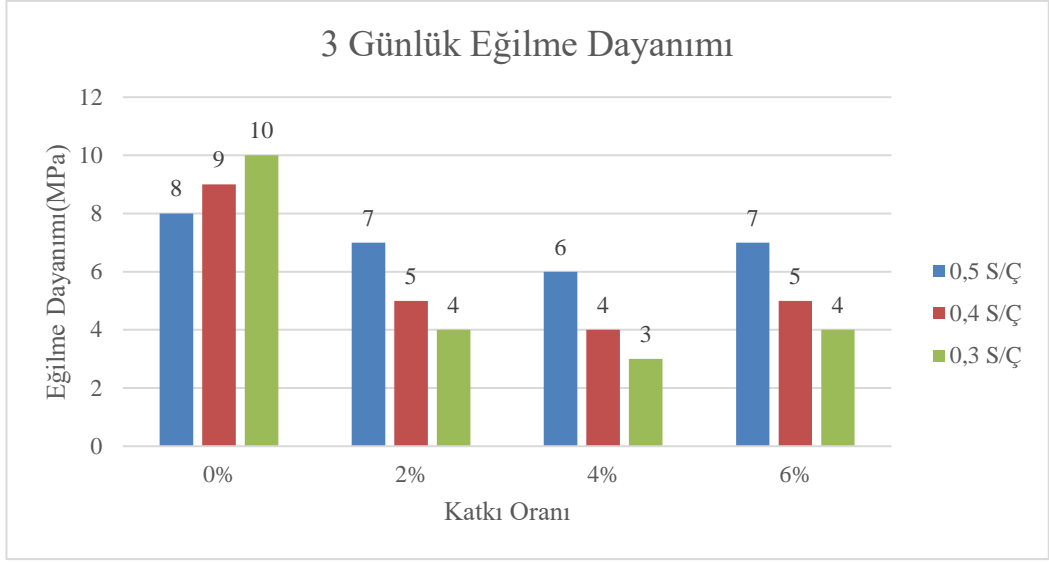
Çimento harçlarının sahip olduğu KBHA-Su Emme ilişkisi incelendiğinde, harçların su emme miktarı arttıkça KBHA değerlerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.15'te görüldüğü üzere düşük S/Ç oranlarında harçların su emme değerleri gitgide artmıştır. Bunun sebebi düşük su oranlarında katkının harcın akışkanlığını keserek boşluklu bir yapıya sahip olmasına neden olmasıdır. Oluşan bu boşluklu yapı nedeniyle harcın su emme özelliği artarken, KBHA değerleri ters orantılı bir şekilde azalmıştır. Elde edilen grafiğin denkleminde R sayısının 0,96 değerine sahip olması da KBHA ve su emme arasındaki ilişkinin ne kadar kuvvetli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.15 Harçların KBHA-Su Emme Grafiği

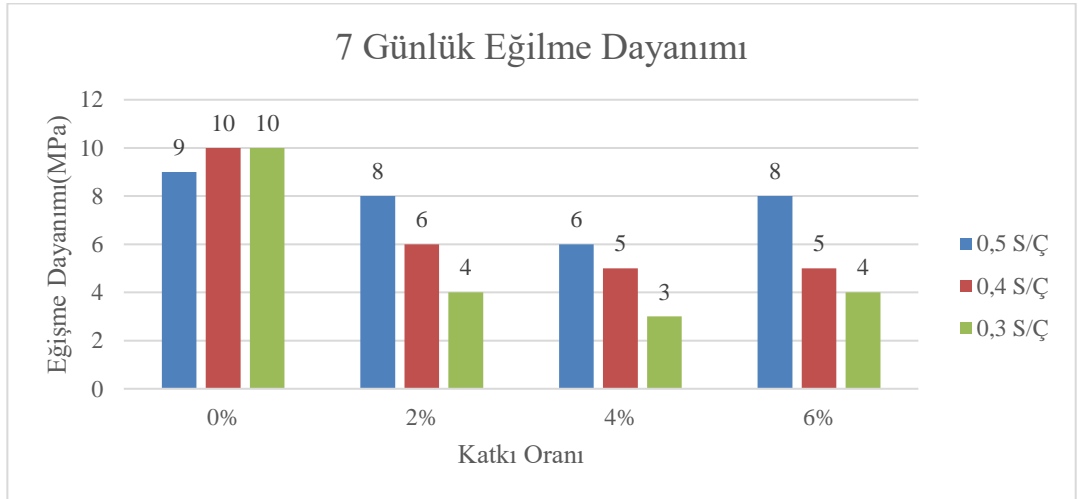
4.2.3 Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

%2 sodyum bikarbonat ilavesi ile harcın sahip olduğu eğilme dayanımı referans örneğe göre 0,5-0,4-0,3 S/Ç harçlar için sırayla %12,5-%44,4-%60 azaltmıştır (Şekil 4.16). Bir kez daha katkı oranının artmasıyla birlikte (%4), her bir harcın dayanımı bir kez daha azalmıştır. Fakat katkı ilavesi %6 seviyesine geldiğinde bütün harçların dayanımında %4 katkı oranına göre az da olsa artış yaşanmıştır.



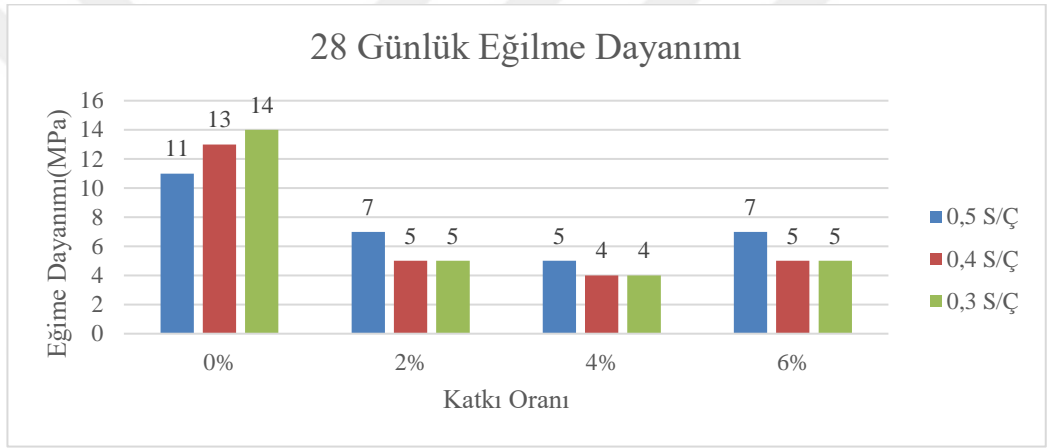
Şekil 4.16 Harçların 3 günlük eğilme dayanımları

Şekil 4.17’de görülen 7 günlük eğilme sonuçlarına bakıldığında görülmüştür ki %2’lik ve %4’lük sodyum bikarbonat ilavesi bir önceki katkı oranına kıyasla dayanımı düşürürken, %6’lık katkı ilavesi bütün harç çeşitlerinde %4 katkı içeren harçtan daha fazla dayanıma sahiptir.



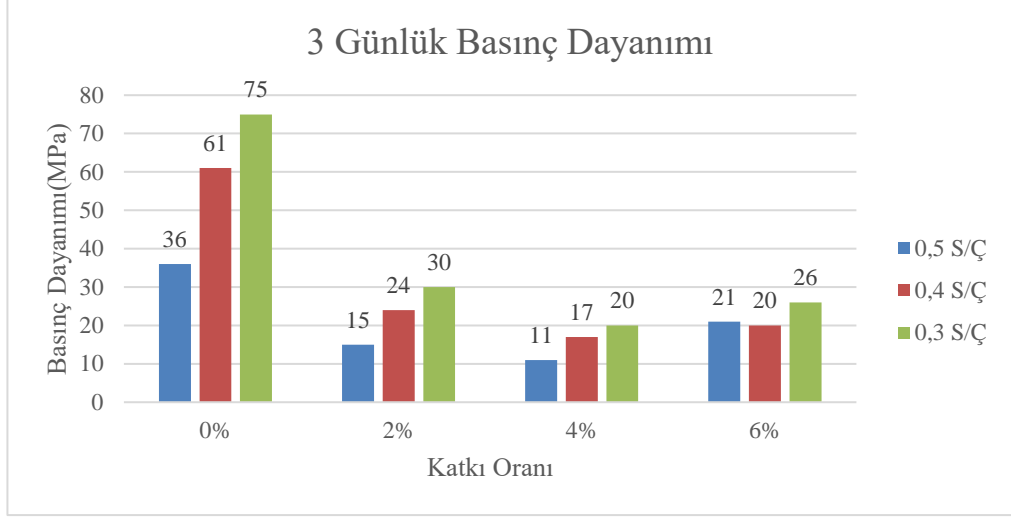
Şekil 4.17 Harçların 7 günlük eğilme dayanımları

28. gün sonuçları incelendiğinde ise sodyum bikarbonat ilavesinin çimento harcının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi artık kendini belli etmiş olmaktadır. 3 ve 7. günlerdeki örüntünün aynısı yaşanmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde oranı ne olursa olsun sodyum bikarbonat ilavesinin eğilme dayanımını referans harca göre her zaman düşürdüğü görülmüştür. Eğilme dayanımına sahip en düşük katkı oranı ise referans harcın neredeyse yarı dayanıma sahip olan %4 katkı oranı olmuştur (Şekil 4.18). Bundan dolayı betona olası bir sodyum bikarbonat ilavesi yapılacağı zaman, lif veya donatı kullanımı çözümler sodyum bikarbonatın neden olduğu bu olumsuz etkiyi nötrleyebilir. Bir diğer çözüm yolu da harcın işlenebilirliğini arttırmak için süperakışkanlaştırıcı katkı dozajını yükseltmektir.

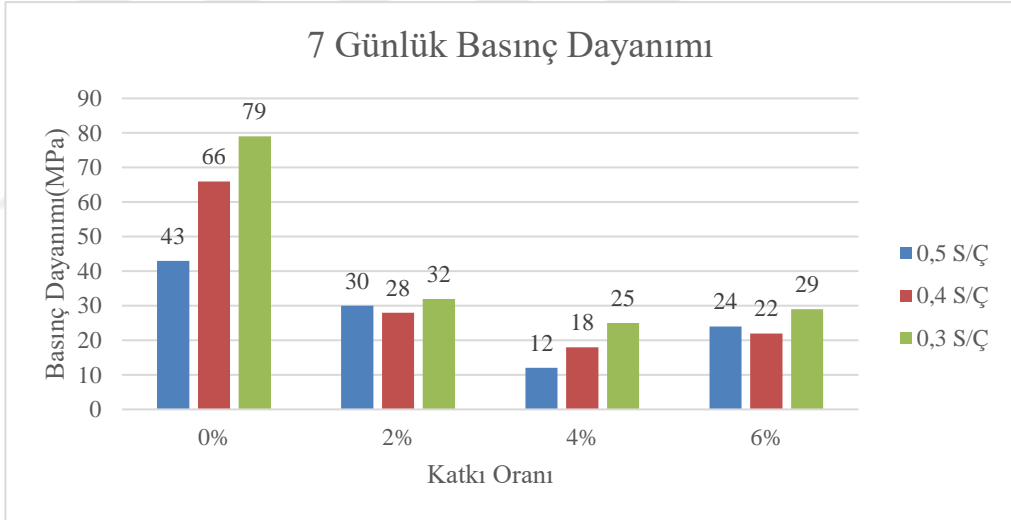


Şekil 4.18 Harçların 28 günlük eğilme dayanımları

Basınç dayanımı verilerine bakıldığı zaman elde edilen örüntü eğilme dayanımında yaşanan örüntüyle paralellik göstermektedir (Şekil 4.19-4.20-4.21). 3 farklı günde de bütün harçlarda %2 ve sonrasında %4'lük bir katkı ilavesi basınç dayanımını azaltırken, %6'luk bir ilave basınç dayanımını %4'e göre fazla duruma getirmesine rağmen referans numunenin altında kalmaktadır.

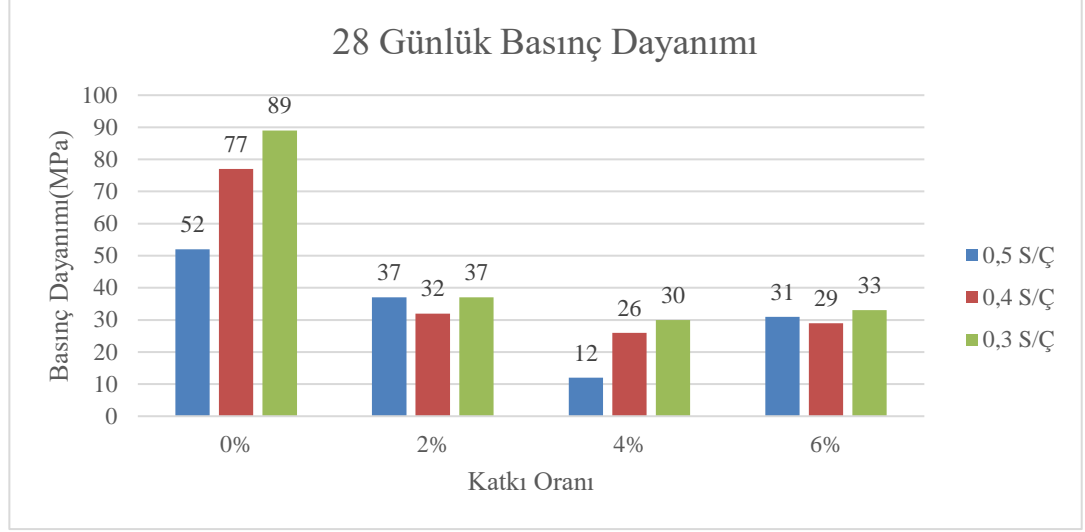


Şekil 4.19 Harçların 3 günlük basınç dayanımları



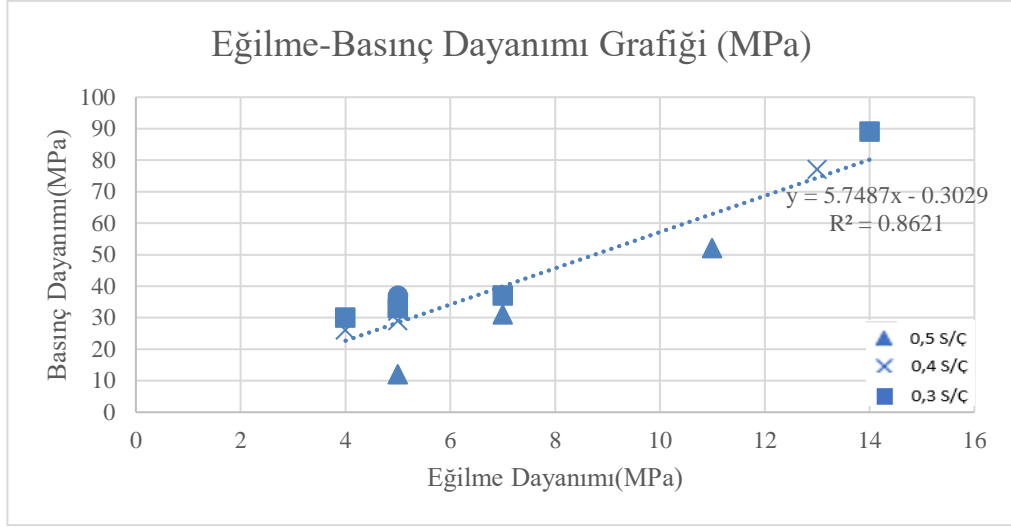
Şekil 4.20 Harçların 7 günlük basınç dayanımları

Basınç dayanımı deney sonuçlarına bakıldığında ise en dikkat çarpıcı etmen harcın içerisindeki su miktarının sonuçlara etkisidir. Su miktarı azaldıkça, sodyum bikarbonatın o harç üzerindeki etkisi daha belirgin olmuştur.



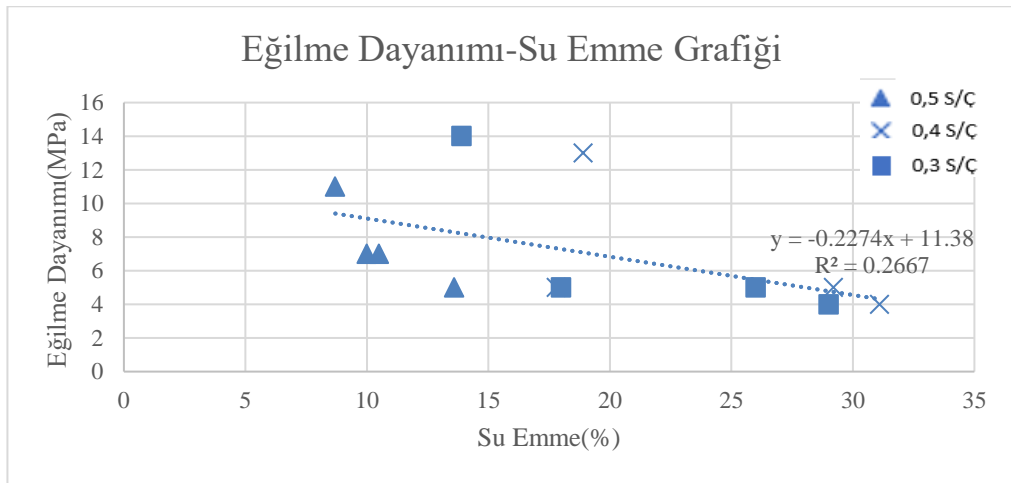
Şekil 4.21 Harçların 28 günlük basınç dayanımları

Harçların eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde, beklenildiği üzere eğilme dayanımı arttıkça basınç dayanımının da doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmüştür (Şekil 4.22). Elde edilen denklemdeki R değerinde 0,93 olması iki dayanım arasındaki ilişkinin ne kadar kuvvetli olduğunu göstermektedir. Fakat her ne kadar geleneksel bir harçta S/Ç oranı azaldıkça harcın sahip olduğu eğilme ve basınç dayanımı değerinin artması beklenilse de sodyum bikarbonat kullanımında tam tersi gözlemlenmiştir. Sodyum bikarbonatın neden olduğu işlenebilirlik kaybı kaynaklı boşluklu yapı dolayısıyla S/Ç oranı azaldıkça harçların sahip olduğu eğilme ve basınç dayanımlarının negatif etkilendiği görülmüştür.

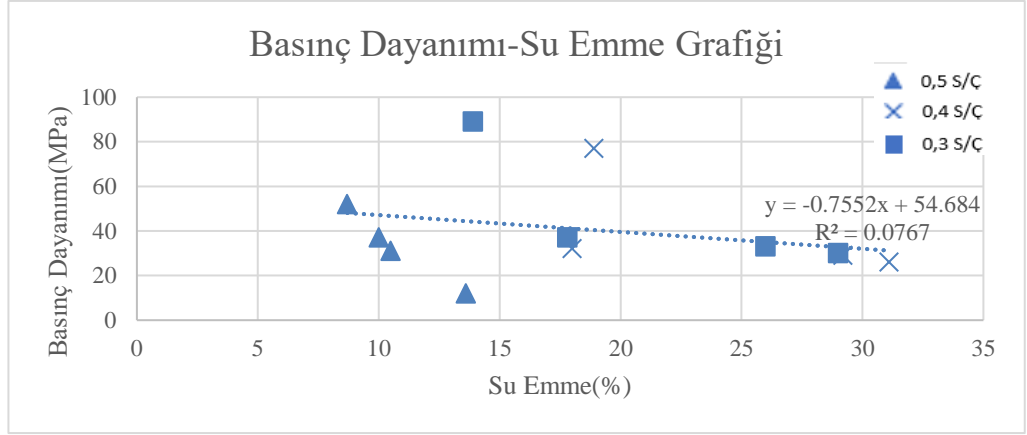


Şekil 4.22 Harçların Eğilme-Basınç Dayanımı Grafiği

Harçların eğilme-basınç dayanımı ve su emme oranı özellikleri incelendiğinde, su emme miktarının artmasıyla eğilme-basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.23, Şekil 4.24). Özellikle S/Ç oranının azalmasıyla oluşan boşluklu yapı harçların su emme miktarlarının artmasına neden olurken eğilme-basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur. Eğilme dayanımı ile su emme arasındaki ilişki $R=0,52$ olduğundan bu faktörler birbirlerini orta seviyede etkileyebilecek iken, basınç dayanımı ve su emme arasındaki ilişkide $R=0,28$ olduğundan kuvvetli bir ilişkiden söz etmek pek mümkün değildir.



Şekil 4.23 Harçların Eğilme Dayanımı-Su Emme Grafiği



Şekil 4.24 Harçların Basınç Dayanımı-Su Emme Grafiği

4.2.4 Maliyet ve Karbon Ayakizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Araştırma kapsamında sodyum bikarbonat katkı kullanımının çimento hamuru ve harcı üzerindeki fiziksel ve mekanik etkilerinin yanı sıra, çevresel etki ve maliyet analizi de yapılmıştır. Harç yapımı için kullanılan malzemelerin fiyatları ve kg başına CO₂ salım miktarı literatürden toplanıp Tablo 4.1’de sunulmuştur

Lee ve arkadaşları (2018), yaptığı araştırmada sodyum bikarbonatın üretimi sırasında daha az CO₂ emisyonu yapması için geliştirdikleri yöntemde, CO₂ gazını önce karbonatlaştırarak mineralize etmekte ve daha sonrasında sodyum bikarbonatı geliştirilmiş bir Solvay işlemi ile üretmeyi denemişlerdir. CO₂’nin karbonatlaşması sırasında üretilen her 1 ton sodyum bikarbonat için direkt ve dolaylı olarak sırasıyla 0,06 ton ve 0,08 ton CO₂ emisyonu açığa çıkarken, işlem boyunca yaklaşık 0,54 ton CO₂ kullanılarak net olarak 0,4 ton CO₂’yi hapsedmeyi başarmışlardır. Devamında geleneksel Solvay işlemi ile 2.74 ton CO₂ açığa çıktığını belirten Lee ve arkadaşları, bu işlem üstünde değişiklikler yaparak açığa çıkan CO₂ miktarını 2.09 ton azaltarak sadece 0.65 ton civarına indirmeyi başarmışlardır. Bu verilerden yola çıkarak sodyum bikarbonatın kg başına CO₂ salımı Tablo 4.1’e işlenmiştir.

Tablo 4.1 Harç için kullanılan malzemelerin maliyet ve CO₂ salım analizi

Malzemeler	Maliyet (\$/kg)	CO ₂ Salım (kg/kg)
Çimento	0,34	0,9 ^a
Su	0,56	0,001 ^b
Süper akışkanlaştırıcı	1,46	0,6 ^c
Sodyum Bikarbonat	2,66	0,65 ^d

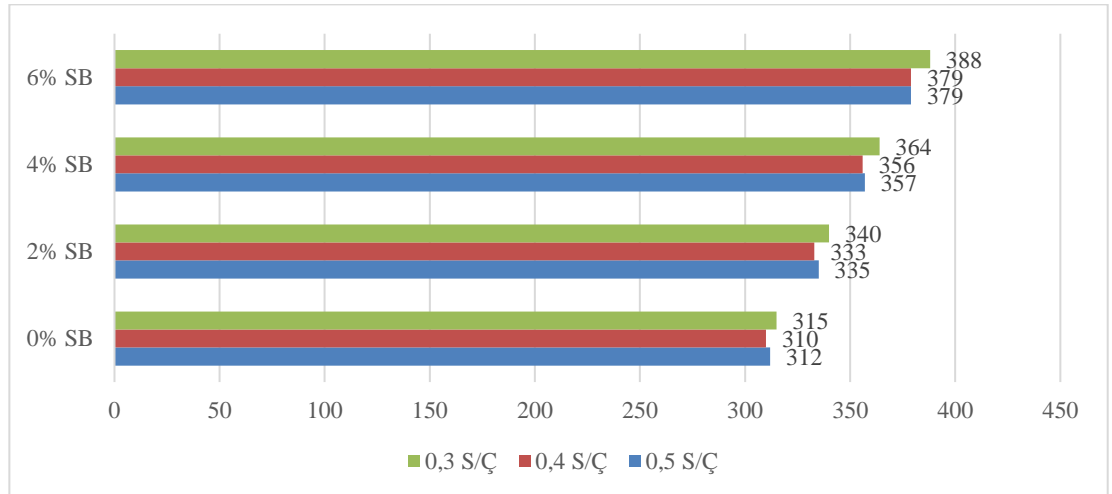
^a Halbiniak Jacek ve arkadaşları (2020)

^b Yu Jing ve arkadaşları (2017)

^c Yu Jing ve arkadaşları (2018)

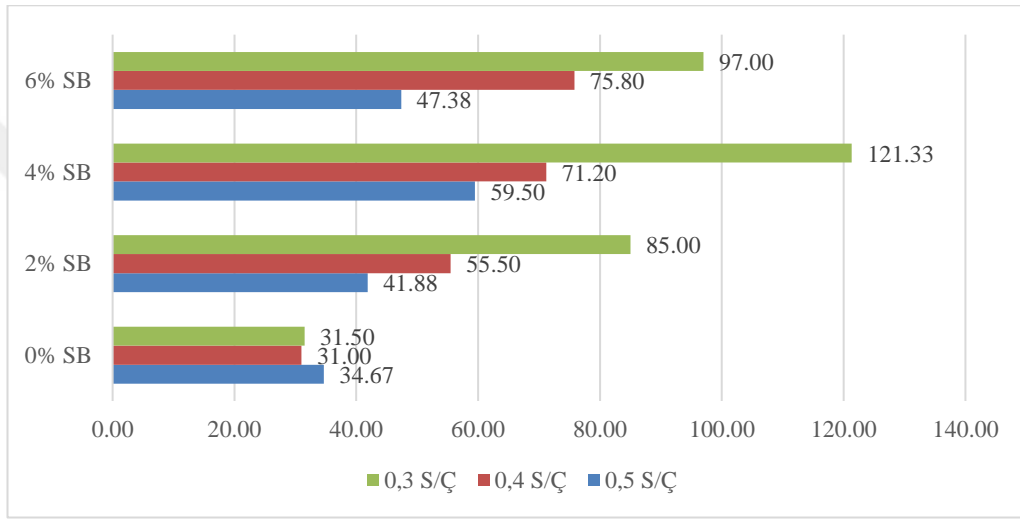
^d Lee J.H. ve arkadaşları (2018)

Sodyum bikarbonat katkısının kullanımının maliyet analizini incelemek için Şekil 4.25'te ki grafik elde edilmiştir. Her bir m³ çimento harcının yapımı için harcanan malzemelerin Amerikan Doları cinsinden maliyeti gözükmetedir. Şekil 4.25'de sodyum bikarbonat katkısı kullanımının oranı arttıkça m³ başına düşen maliyetinde arttığı görülmektedir. Elde edilen bu fiyatlar 2025 yılı Ocak ayı için geçerlidir.



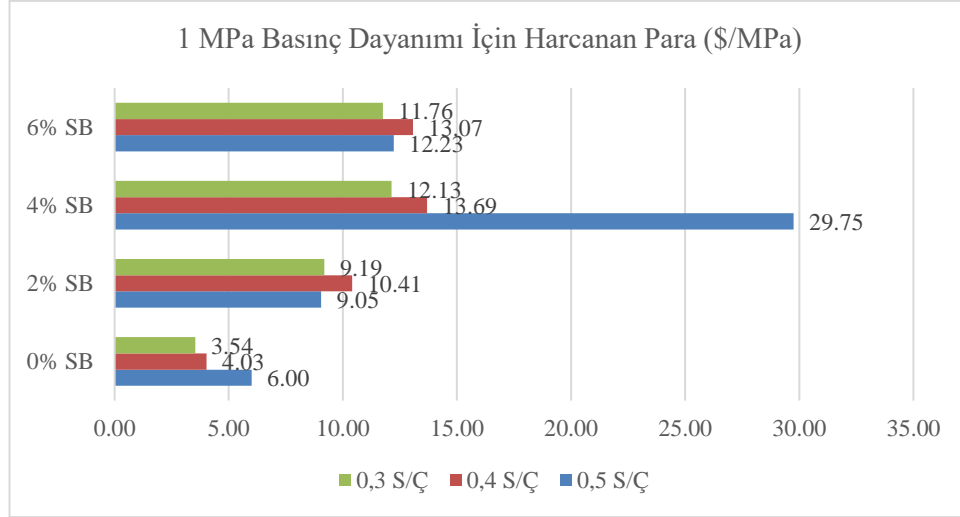
Şekil 4.25 Hazırlanan her bir harcın \$ cinsinden maliyeti (\$/m³)

Araştırma için hazırlanan 1 m³'lük harcın 1 MPa'lık eğilme ve basınç dayanıma sahip olması için gereken maliyet grafikleri Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de verilmektedir. Şekil 4.26 incelendiğinde katkısız çimento harçları hariç aynı katkı oranına sahip harçlarda S/Ç arttıkça 1 MPa'lık eğilme dayanımı için gereken maliyetin azaldığı görülmektedir. Ayrıca aynı S/Ç'ye sahip katkılı harçların, referans harçlara göre maliyetinin arttığı görülmüştür. 1 MPa eğilme dayanımı için en düşük maliyete sahip harç 31,0 \$ ile %0 sodyum bikarbonat ilaveli 0,4 S/Ç'ye sahip harç olmuştur. En fazla maliyet isteyen harç ise 121,33 \$ ile %4 katkı ve 0,3 S/Ç içeren harç olmuştur.



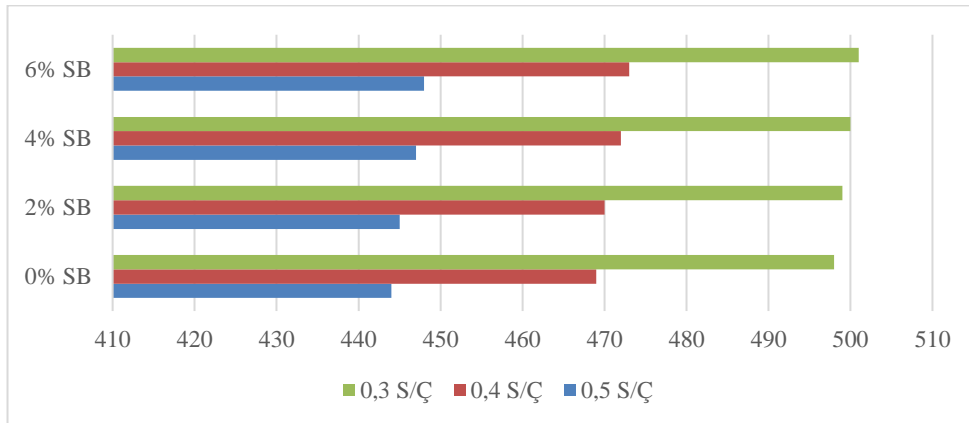
Şekil 4.26 1 MPa Eğilme Dayanımı İçin Harcanan Para (\$/MPa)

Harçların 1 MPa'lık basınç dayanımı için gereken maliyeti gösteren grafik incelendiğinde genel olarak sodyum bikarbonat miktarı arttıkça gereken maliyetinde arttığı görülmektedir. 1 MPa basınç dayanımı için en az maliyete sahip harç 3,54 \$ ile 0,3 S/Ç ve %0 katkı içeren harç olurken, en fazla maliyet gerektiren harç 29,75 \$ ile 0,5 S/Ç ve %4 katkı içeren harç olmuştur.



Şekil 4.27 1 MPa Basınç Dayanımı İçin Harcanan Para (\$/MPa)

Araştırma kapsamında hazırlanan her bir harcın kg cinsinden yaptığı CO₂ salımı Şekil 4.28’de gösterilmektedir. Sodyum bikarbonat kullanımının olmadığı harçlar bütün S/Ç serilerinde en düşük CO₂ salımına sahipken, SB katkı oranının artmasıyla birlikte harçların yaptığı salım miktarı da artmaktadır. SB üretimi ve kullanımı CO₂ salım miktarını azaltmasına rağmen, SB oranı arttıkça harçların kıvamı için daha fazla SA kullanılması toplam CO₂ miktarının artmasına neden olmaktadır. Katkı kullanım oranının artmasıyla eğilme ve basınç dayanımında yaşanan düşüşlerin yanısıra CO₂ salım miktarını da artırması, sodyum bikarbonatın yüksek dozajlarda çimento içerisinde katkı olarak kullanımının fiziksel, mekanik ve çevresel olarak pozitif bir etki yaratmadığını göstermiştir.



Şekil 4.28 Her Bir Harç Başına Salınan CO₂ miktarı (kg CO₂/m³)

4.3 Sonuç ve Öneriler

1. Sodyum bikarbonat ilavesi özellikle %4 ve %6 gibi yüksek doz kullanımında priz başlangıç süresini ciddi mertebede düşürürken, düşük S/Ç'li hamurlarda %6 katkı ilavesi priz bitiş süresini de referans bir hamura göre ortalama %82,5 azaltmıştır. Her ne kadar hızlı katılaşma erken dayanım için avantajlı gibi görülsede, sodyum bikarbonat ilavesinin yarattığı hızlı işlenebilirlik kaybı, harcın kalıba yerleştirilmesinde zorluklara yol açmaktadır.
2. Sodyum bikarbonatın tüm S/Ç oranlarında çimento hamuru ve harç işlenebilirliğini azalttığı görülmüştür. Özellikle 0,3 gibi düşük S/Ç'ye sahip hamurlarda %4-6 sodyum bikarbonat malzemeyi topaklaştırırken, karıştırma ve dökme işlemlerini zorlaştırmıştır ve yayılmayı ortalama %62 azaltmıştır.
3. Reolojik özelliklere baktığımızda yüksek S/Ç'ye sahip hamurlarda sodyum bikarbonat ilavesinin etkisini pek fazla görmüyorken, S/Ç oranının azalmasıyla sodyum bikarbonatın statik EKG, dinamik EKG ve plastik viskozite gibi reolojik parametreleri daha fazla etkilediği görülmüştür. Özellikle %4-6 sodyum bikarbonat ilavesi, bütün reolojik değerlerin referans hamurundan daha yüksek olmasına neden olmuştur. Örneğin %4 sodyum bikarbonat kullanımı 0,3 S/Ç oranına sahip çimento hamurunun dinamik EKG değerinde referans hamura göre %285'lik bir artışa neden olmuştur.
4. %2'lik bir sodyum bikarbonat ilavesi harçların KBH değerlerini önemli mertebede etkilemezken, daha yüksek katkı kullanımında KBHA değerlerinde dikkate değer bir düşüş yaşandığı gözlenmiştir. Yaşanan en şiddetli düşüş %4 katkı kullanımında tespit edilip, düşüş oranları S/Ç oranı 0,5-0,4-0,3 için sırasıyla %17,5-%29,6-%29 şeklindedir.

5. Sodyum bikarbonatın su emme özelliği üzerindeki etkisi incelendiğinde görülmüştür ki, genel olarak sodyum bikarbonat kullanımını çimento harcının su emme oranını arttırmaktadır. Yaşanan en büyük artış 0,3 S/Ç'ye sahip harçta olup, bu artış katkı oranı artacak şekilde referans harca göre sırasıyla %28,1-%108,6-%87,1'dir. Su emme oranı artışı, sodyum bikarbonat kullanımının harçların işlenebilirliğini azaltması ve bundan dolayı harçların kalıplara döküldüğünde daha fazla boşluklu yapıya sahip olmasından kaynaklanmıştır.
6. Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde sodyum bikarbonatın dozaj farketmeksizin harcın eğilme dayanımını düşürdüğü tespit edilmiştir. Bundan dolayı eğilme dayanımını arttıracak lif tarzı ilave maddelerin kullanılması ve işlenebilirlik artırıcı süperakışkanlaştırıcı dozajının artırılması önerilebilir. Eğilme dayanımı kaybı en az olan sodyum bikarbonat oranı referans harcın neredeyse yarı dayanıma sahip olan %4 olarak belirlenmiştir.
7. Sodyum bikarbonat çimento harcı basınç dayanımını da olumsuz etkilemiştir. %2'lik sodyum bikarbonat kullanımında bile harçların basınç dayanımında ciddi düşüş ölçülmüştür. Düşük S/Ç oranı ile üretilen çimento harçlarında sodyum bikarbonat kaynaklı kayıp daha belirgindir. %4'lük bir sodyum bikarbonat kullanımı harçların basınç dayanımını ortalama olarak %70 düşüğe neden olmuştur. İşlenebilirlik kaybıyla oluşan boşluklu yapı nedeniyle sodyum bikarbonat katkılı harç gaz beton gibi taşıyıcı olmayan ısı yalıtımı amaçlı uygulamalarda kullanılabilir.
8. Üretimi sırasında CO₂ gazını kalıcı olarak bünyesine hapsetmesinden dolayı, sodyum bikarbonatın inşaat sektöründe kullanılmasının CO₂ gazı salımını azaltabileceği öngörülmüştür. Ancak, bu tez kapsamında kullanılan sodyum bikarbonat dozajlarında yapılan testler sonucu, çimento harcının taze ve mekanik özelliklerinde olumsuz etki yarattığı ve maliyeti arttırdığı net bir şekilde ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

- Ahmed Ali, K., Ahmad, M. I. ve Yusup, Y. (2020). Impacts, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building sector. *Sustainability*, 12(18), 7427.
- Arowojolu, O., Ibrahim, A. ve McDonald, A. (2022). The effect of including biomass on the rheological and pozzolanic properties of Portland limestone cement—case study. *Sustainable Structures*, 3(1).
- Assi, L. N., Anay, R., Soltangharai, V. ve Ziehl, P. (2019). Effect of partial Portland cement replacement on geopolymerization process and mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*.
- Atiş, C. D. (2003). High-volume fly ash concrete with high strength and low drying shrinkage. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(2).
- Bentur, A., Mindess, S., Mehta, P. K., Soroka, I., Pigeon, M., Pleau, R. ve Aitcin, P. C. (1993). Concrete in hot environments. *Modern Concrete Technology Series*, 1.
- Błaszczczyński, T. Z. ve Król, M. R. (2015). Geopolymers in construction / Zastosowanie geopolimerów w budownictwie. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 16(1), 25–40.
- Chung, D. D. L. (2002). Review: Improving cement-based materials by using silica fume. *Journal of Materials Science*, 37(3), 673–682
- Dung, N. ve Unluer, C. (2017). Development of MgO concrete with enhanced hydration and carbonation mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 103, 160–169.
- Dunn, K. (2021). From concrete to steel, how construction makes up the ‘last mile’ of decarbonization. *Fortune*. <https://fortune.com/2021/02/16/concrete-steel-construction-design-climate/>

- Friedlingstein, P., et al. (2022). Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data*, 14(4), 1917–2005.
- Frost, R. L., Bahfenne, S., Graham, J. ve Martens, W. N. (2008). Thermal stability of artinite, dypingite, and brugnatellite—Implications for the geosequestration of greenhouse gases. *Thermochimica Acta*, 475(1–2), 39–43.
- Gough, L. A., Deb, S. K., Brown, D., Sparks, S. A. ve McNaughton, L. R. (2019). The effects of sodium bicarbonate ingestion on cycling performance and acid-base balance recovery in acute normobaric hypoxia. *Journal of Sports Sciences*, 37(13), 1464–1471.
- Halbiniak, J., Katzer, J., Major, M., & Major, I. (2020). A proposition of an in situ production of a blended cement. *Materials*, 13(10), 2289.
- Jang, D. H., Hoffman, R. S. ve Nelson, L. S. (2012). A case of near-fatal flecainide overdose in a neonate successfully treated with sodium bicarbonate. *Journal of Emergency Medicine*, 44(4), 781–783.
- Jahagirdar, S., Patki V., Metan S. (2019), Evaluation of physical and chemical properties of OPC and PPC cement. . *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8, 840–845.
- Korkmaz, A. V. ve Hacıfazlıoğlu, H. (2023). An alternative raw material for Portland cement clinker preparation: Meta-schist. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2578354/v1>
- Lee, J. H., Lee, J. H., Park, I. K., & Lee, C. H. (2018). Techno-economic and environmental evaluation of CO₂ mineralization technology based on bench-scale experiments. *Journal of CO₂ Utilization*, 26, 522–536.
- Luo, D., Pei, X., Fu, H., Yang, X., Long, S., Zhang, L. ve Gong, W. (2021). Modification of sodium bicarbonate and its effect on foaming behavior of polypropylene. *e-Polymers*, 21(1), 366–376.

- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K. ve Stocker, T. F. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 453, 379–382.
- Martina, K., Adriana, E., Julius, S. ve Alena, L. (2015). The ability of slag-Portland cement composites to withstand aggressive environments. *Solid State Phenomena*, 244, 88–93.
- Martinelli, A. E., Melo, D., Lima, F., Bezerra, U. T., Marinho, E. ve Henrique, D. (2005). Addition of polyurethane to Portland cement. *Materials Science Forum*, 498–499, 401–406. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.498-499.401>
- Massazza, F. (1993). Pozzolanic cements. *Cement and Concrete Composites*, 15(4), 185–214.
- Mehta, P. K. ve Monterio, P. J. M. (2006). *Concrete microstructure, properties, and materials* (3rd ed., pp. 21–42).
- Mokhtari, P., Hassannezhad, K., Bundur, Z. B., Donmez, S., Gulgun, M. A., Kriven, W. M. (2024). Optimization of Ca/Si ratio in schists to enhance the pozzolanic supplementary cementitious material for OPC blending. *Ceramic Engineering Science*, 6(2). <https://doi.org/10.1002/ces2.10206>
- Mondal, S. K., Clinton, C., Ma, H., Kumar, A. ve Okoronkwo, M. U. (2023). Effect of Class C and Class F fly ash on early-age and mature-age properties of calcium sulfoaluminate cement paste. *Sustainability*, 15(3).
- Oguntola, O. ve Simske, S. (2023). Continuous assessment of the environmental impact and economic viability of decarbonization improvements in cement production. *Resources*, 12(8), 95. <https://doi.org/10.3390/resources12080095>
- Ramachandran, V. S., Malhotra, V. M., Jolicoeur, C. ve Spiratos, N. (1998). *Superplasticizers: Properties and applications in concrete*. ISBN 0-660-17393-X.

- Reddy, V. V., Rao, H. S. ve Jayaveera, K. N. (2006). Influence of strong alkaline substances (sodium carbonate and sodium bicarbonate) in mixing water on strength and setting properties of concrete. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 13(2), 123–128.
- Sale, C., Saunders, B., Hudson, S., Wise, J. A., Harris, R. C. ve Sunderland, C. D. (2011). Effect of β -Alanine plus sodium bicarbonate on high-intensity cycling capacity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(10), 1972–1978.
- Satin, L., Likavčan, L., Košík, M., Rantuch, P., & Bílik, J. (2016). Using sodium hydrogen carbonate for foaming polymers. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 24(38), 35–41.
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., et al. (2018). Calcined clay limestone cements. *Cement and Concrete Research*, 114, 49–56.
- Seo, J., Kim, S., Jang, D., Kim, H. ve Lee, H. (2021). Internal carbonation of belite-rich Portland cement: An in-depth observation at the interaction of the belite phase with sodium bicarbonate. *Journal of Building Engineering*, 44, 102907.
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F. ve Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 149, 1–18.
- Shaikh, U. A. F. ve Supit, W. M. (2015). Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). *Construction and Building Materials*, 82, 192–205.
- Stefaniuk, D., Hajduczek, M., Weaver, J. C., Ulm, F. J. ve Masic, A. (2023). Cementing CO₂ into C-S-H: A step toward concrete carbon neutrality. *PNAS Nexus*, 2(3)
- Sudiby, S., Suharto, S., Rarasati, S. A. A., Wulandari, Y. R., Shintawati, S. ve Rohman, F. S. (2022). Optimization of sodium bicarbonate production from ammonium hydroxide using a froth flotation column. *Chemical Engineering & Technology*, 45(11), 1952–1959.

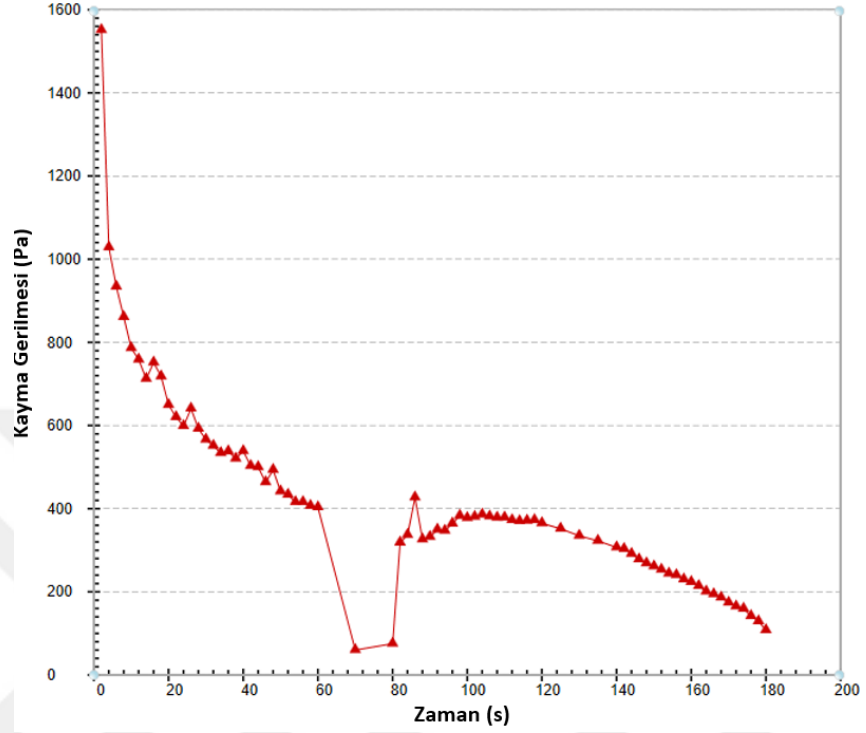
- Şahin, H. K. ve Mardani, A. (2022). Çimento C3A içeriğinin 3B beton karışımlarının bazı taze hal özellikleri ve basınç dayanımı etkisi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27, 1–11.
- Taylor, P. C., Steven, H. K. ve Gerald, F. V. (2006). *Integrated materials and construction practices for concrete pavement: A state-of-the-practice manual*. National Concrete Pavement Technology Center, 1–98.
- Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2024, December 12). Çimento üretimi. Retrieved from <https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/c-mento-uret-m--20200110113349.pdf>
- Türk Standartları Enstitüsü. (2012). *Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri* (TS EN 197-1). Retrieved from https://www.thbb.org/media/2151/uygulamalar1_110.pdf
- Velissaris, D., Karamouzos, V., Ktenopoulos, N., Pierrakos, C. ve Karanikolas, M. (2015). The use of sodium bicarbonate in the treatment of acidosis in sepsis: A literature update on a long-term debate. *Critical Care Research and Practice*. <https://doi.org/10.1155/2015/605830>
- Yu, C., Li, Z. ve Liu, J. (2023). Degradation of limestone calcined clay cement (LC3) mortars under sulfate attack. *Low-carbon Materials and Green Construction*, 1(1).
- Yu, Jing, Lu, C., Leung, C. K. Y. ve Li, G. (2017). Mechanical properties of green 556 structural concrete with ultrahigh-volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 147, 510–518.
- Yu, Jing, Yao, J., Lin, X., Li, H., Lam, J. Y. K., Leung, C. K. Y. ve Shih, K. (2018). Tensile performance of sustainable Strain-Hardening Cementitious Composites with hybrid PVA and recycled PET fibers. *Cement and Concrete Research*, 107, 110-123.

Wang, Y., He, F., Wang, J. ve Hu, Q. (2019). Comparison of effects of sodium bicarbonate and sodium carbonate on the hydration and properties of Portland cement paste. *Materials*, 12(7), 1033.

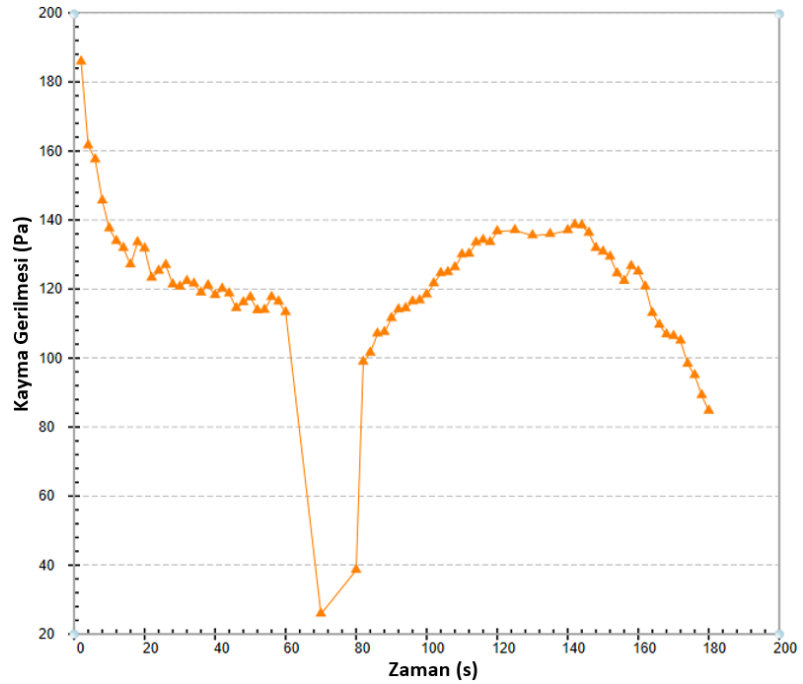


EKLER

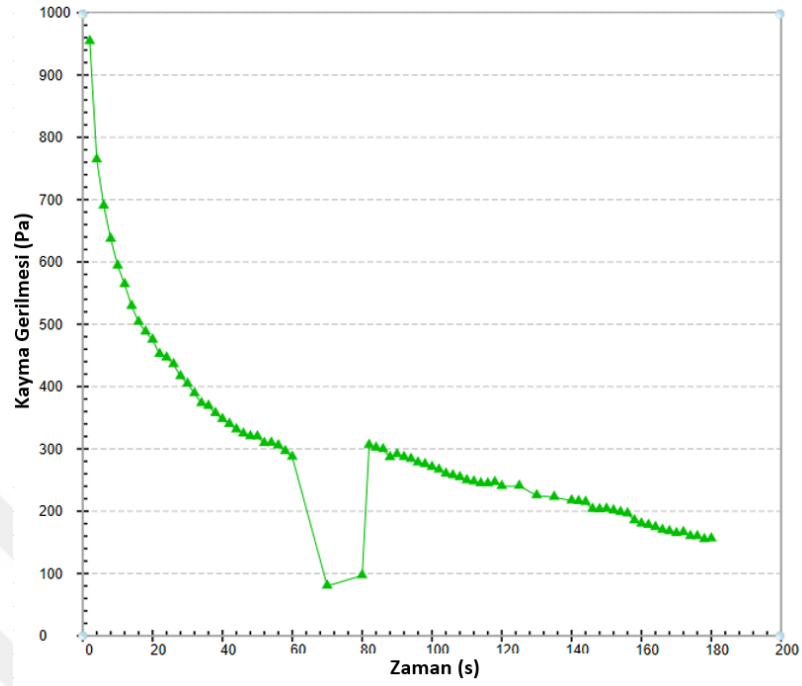
EK 1: 0,5 S/Ç ve %0 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



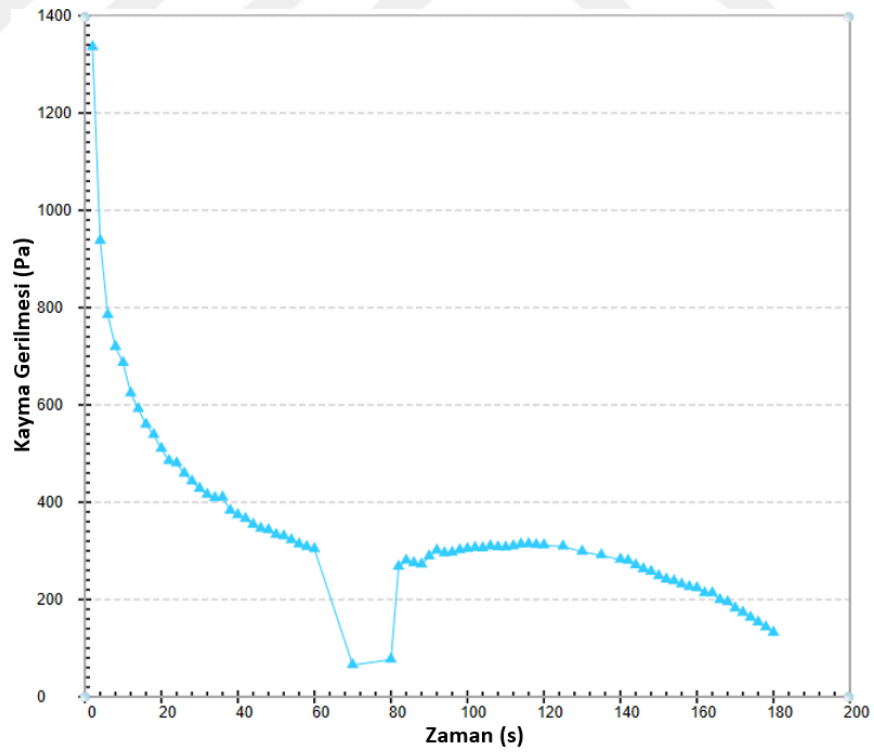
EK 2: 0,5 S/Ç ve %2 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



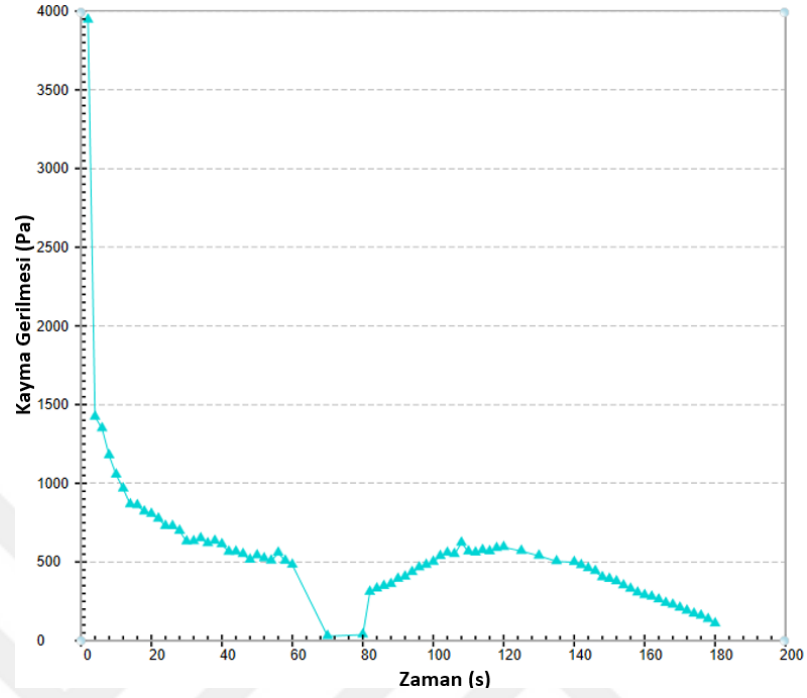
EK 3: 0,5 S/Ç ve %4 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



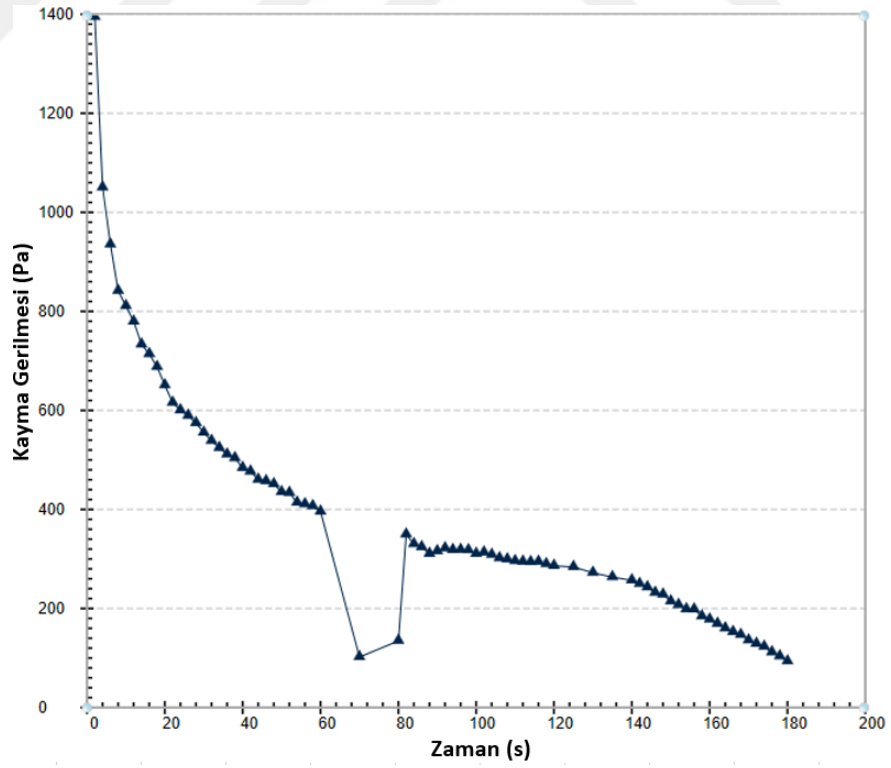
EK 4: 0,5 S/Ç ve %6 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



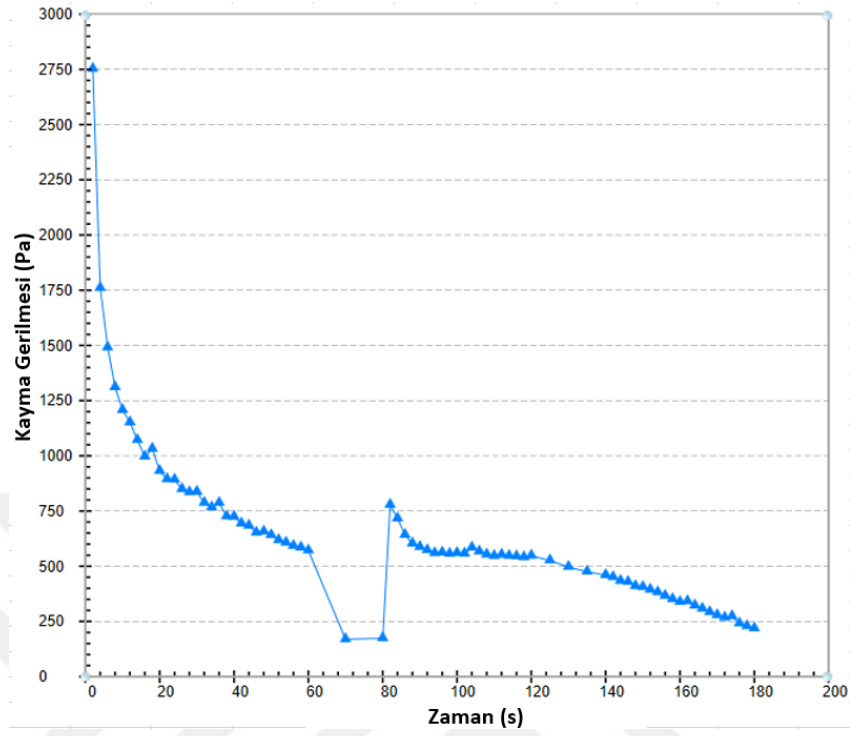
EK 5: 0,4 S/Ç ve %0 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



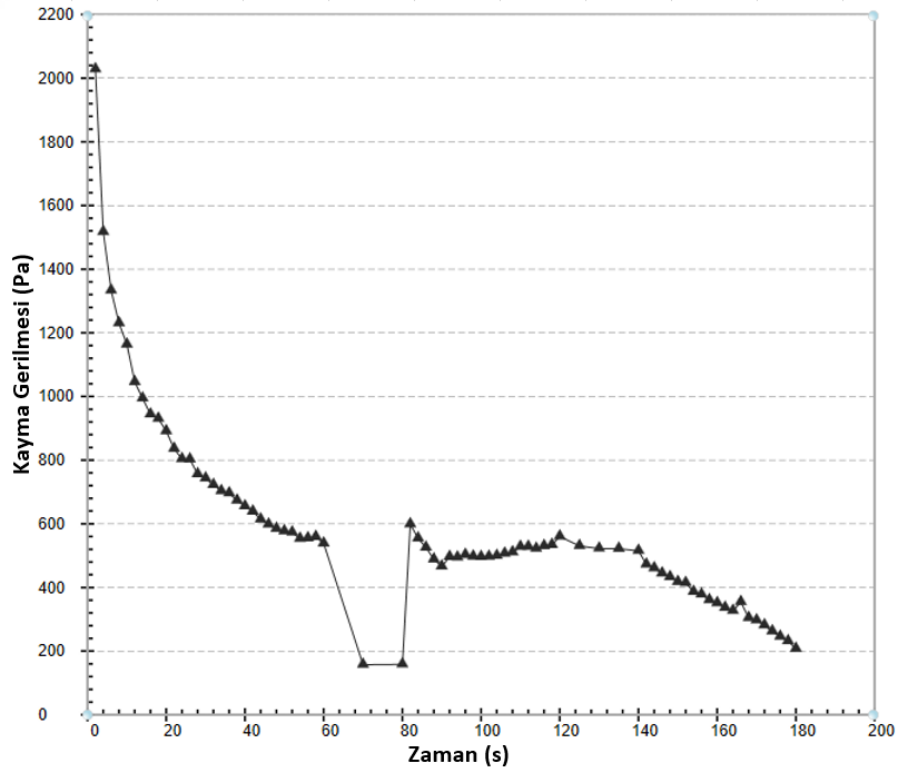
EK 6: 0,4 S/Ç ve %2 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



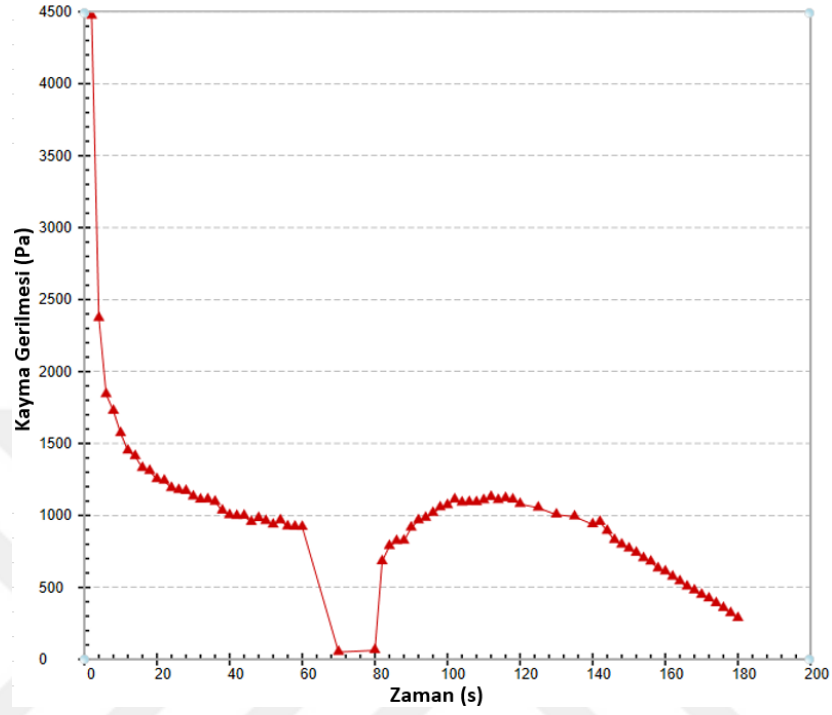
EK 7: 0,4 S/Ç ve %4 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



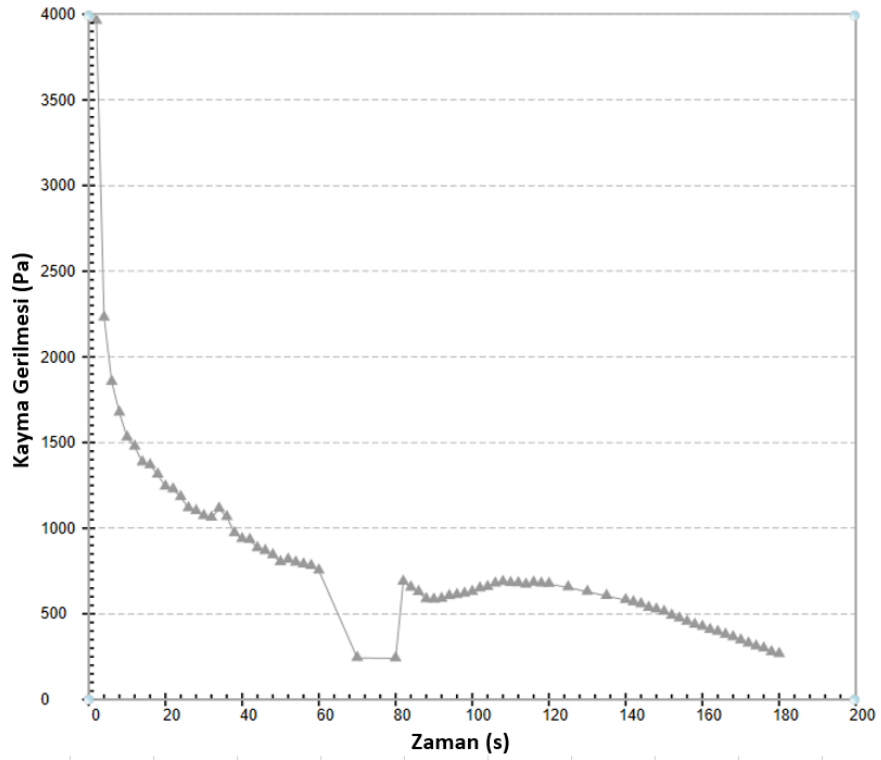
EK 8: 0,4 S/Ç ve %6 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



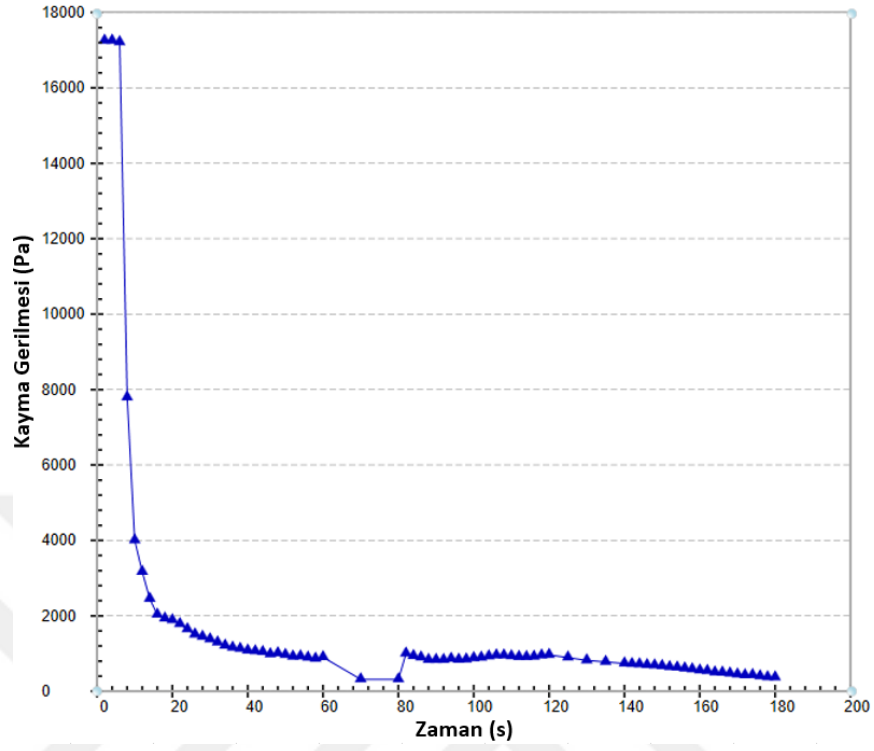
EK 9: 0,3 S/Ç ve %0 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



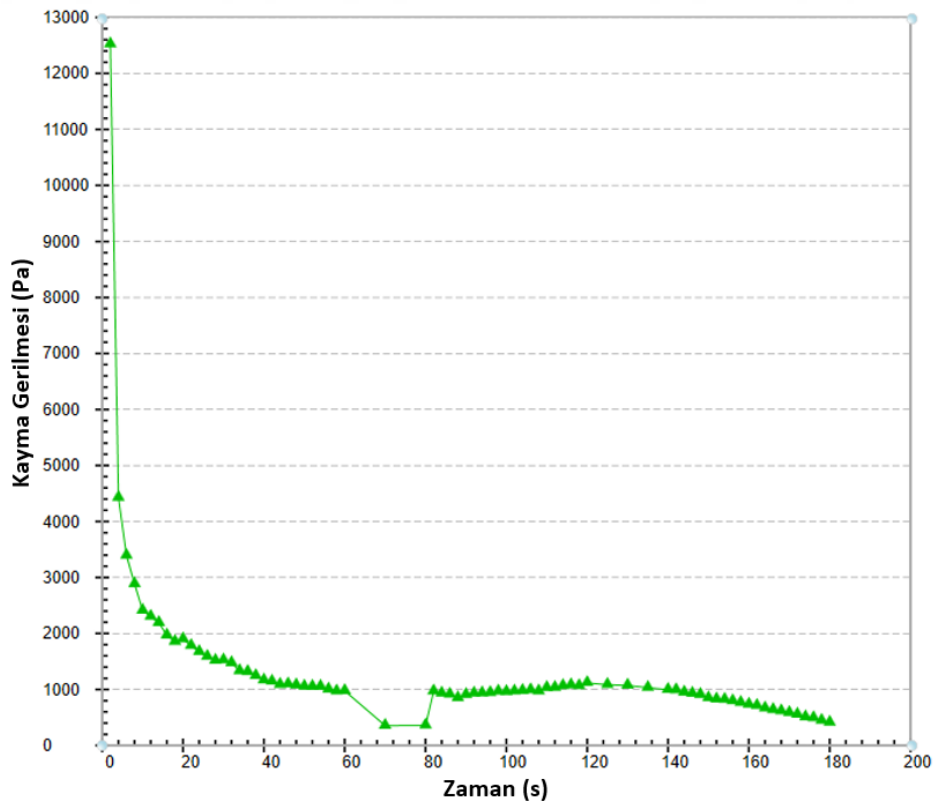
EK 10: 0,3 S/Ç ve %2 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



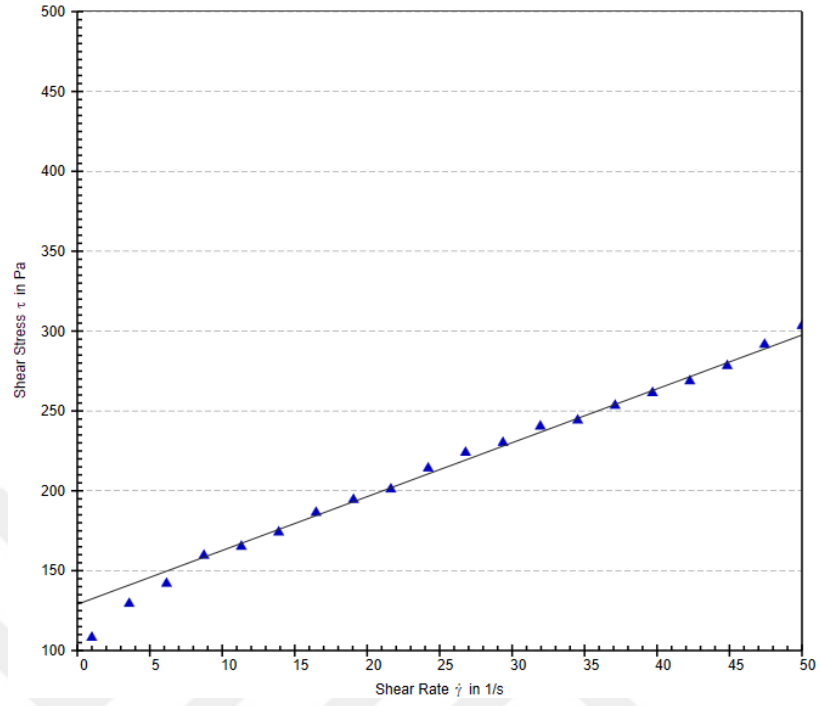
EK 11: 0,3 S/Ç ve %4 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



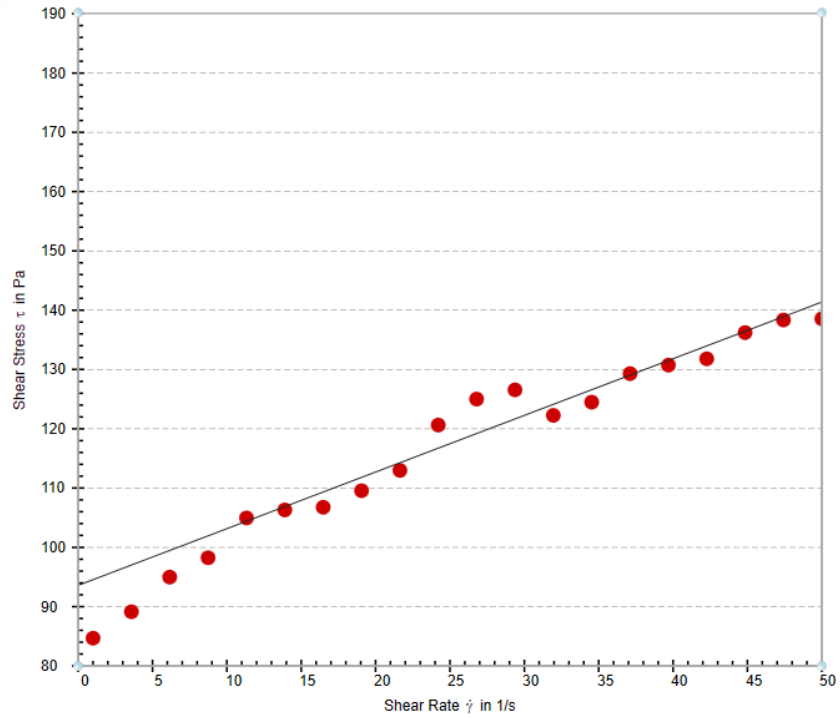
EK 12: 0,3 S/Ç ve %6 katkıya sahip hamurun kayma gerilmesi/zaman grafiği



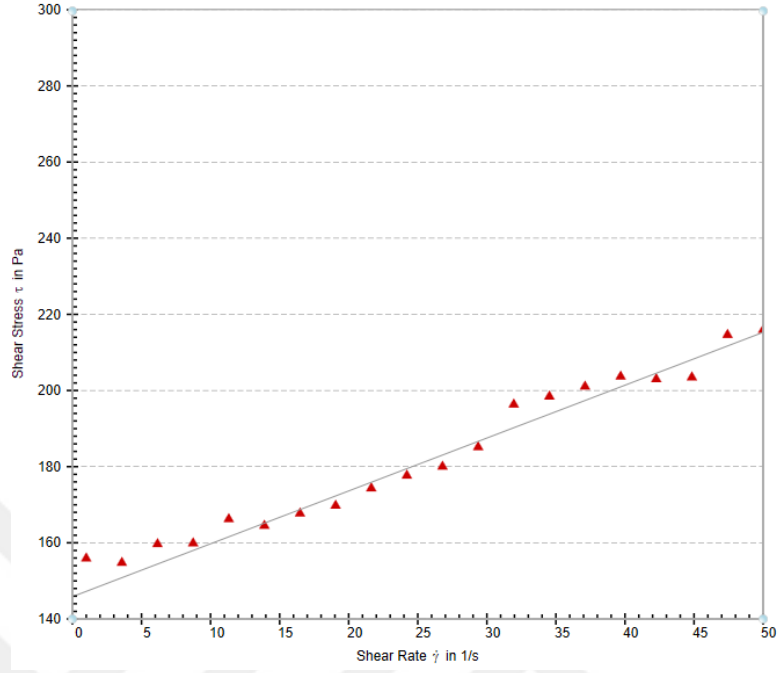
EK 13: 0,5 S/Ç %0 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



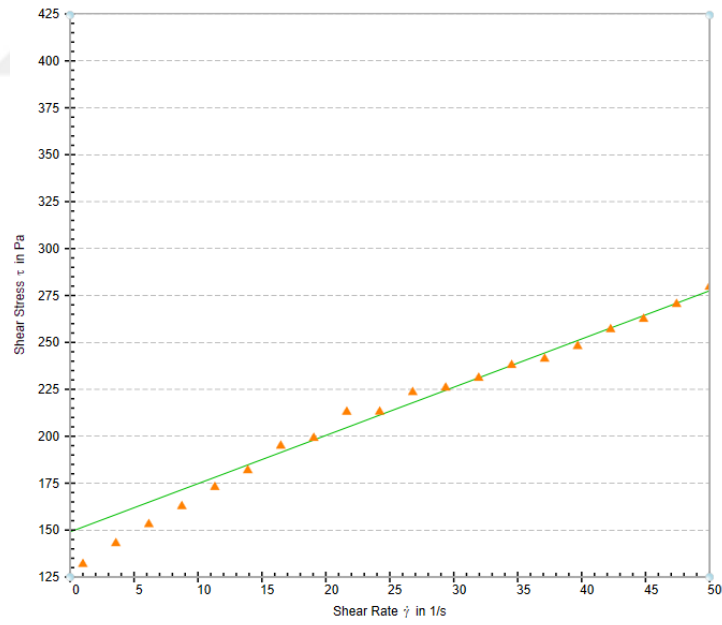
EK 14: 0,5 S/Ç %2 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



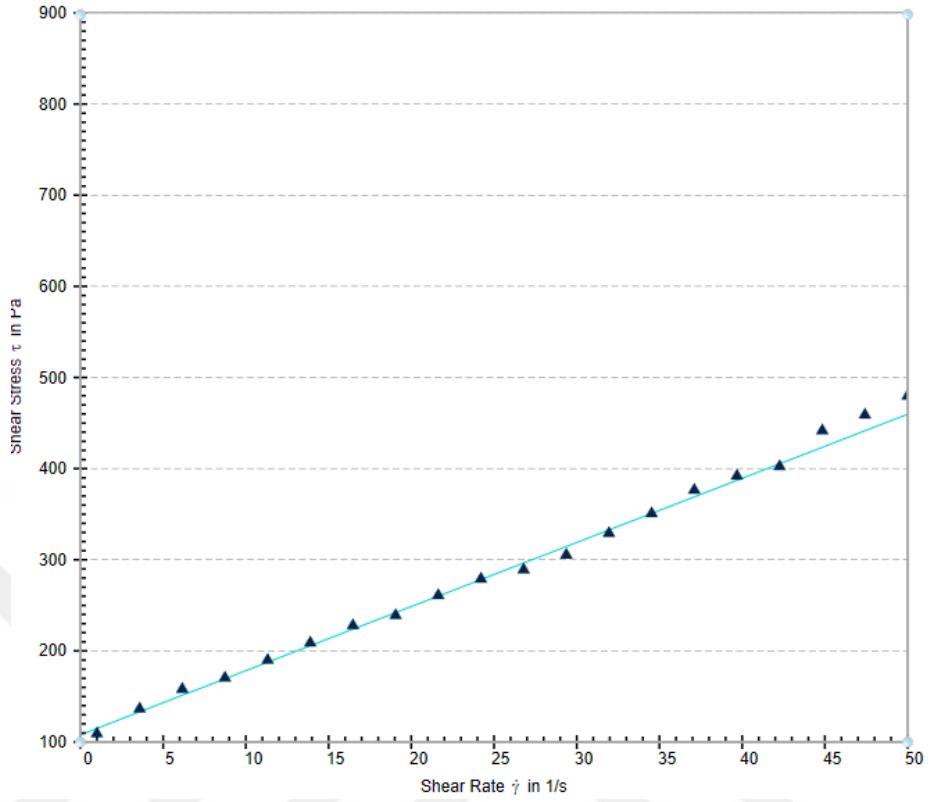
EK 15: 0,5 S/C %4 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



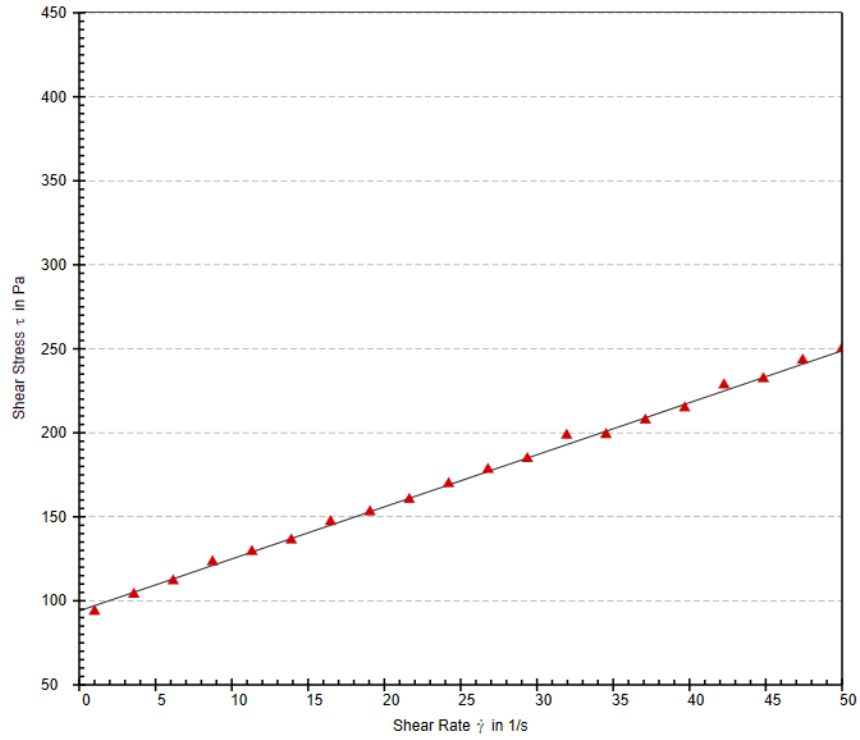
EK 16: 0,5 S/C %6 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



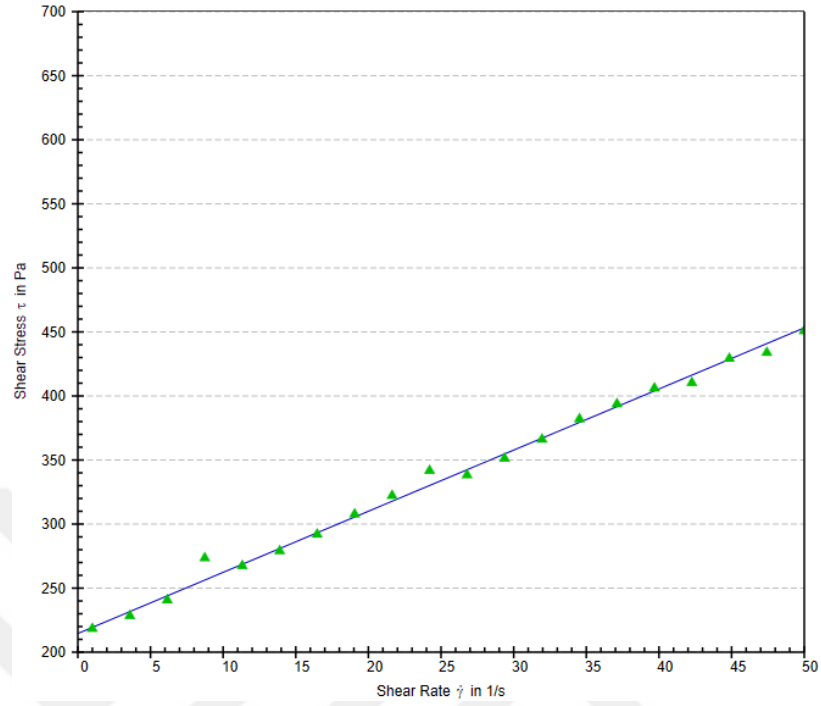
EK 17: 0,4 S/Ç %0 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



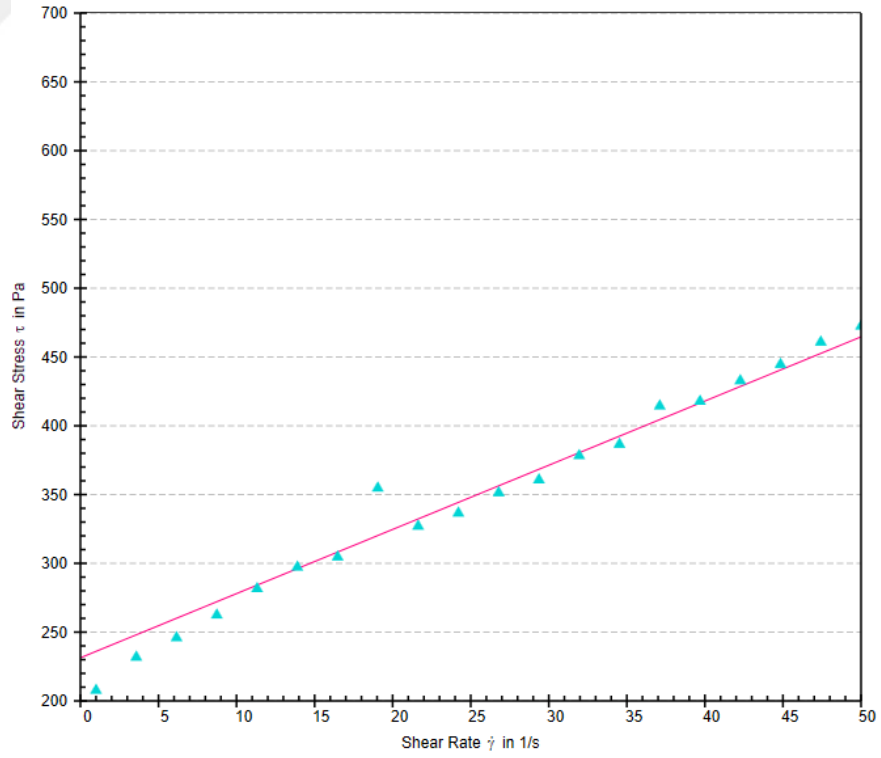
EK 18: 0,4 S/Ç %2 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



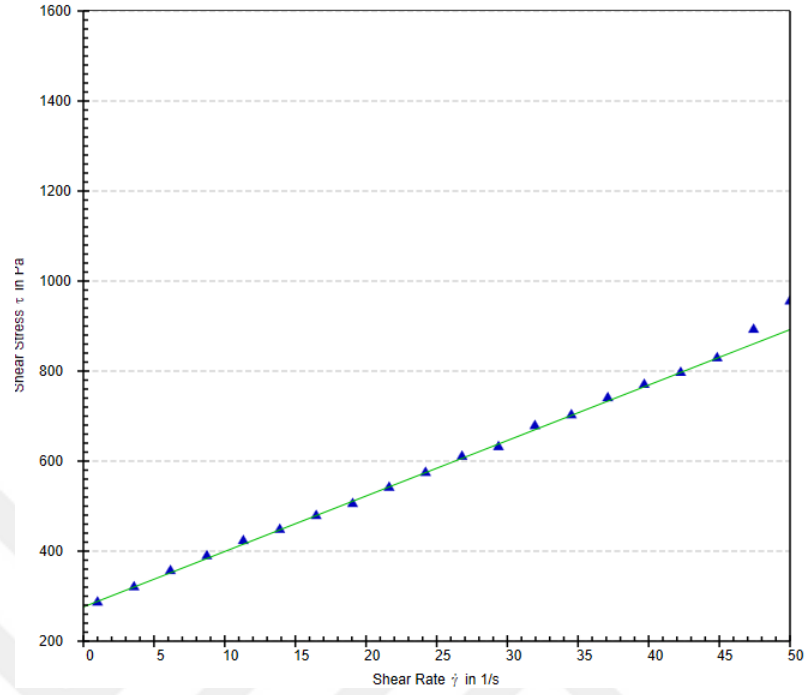
EK 19: 0,4 S/Ç %4 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



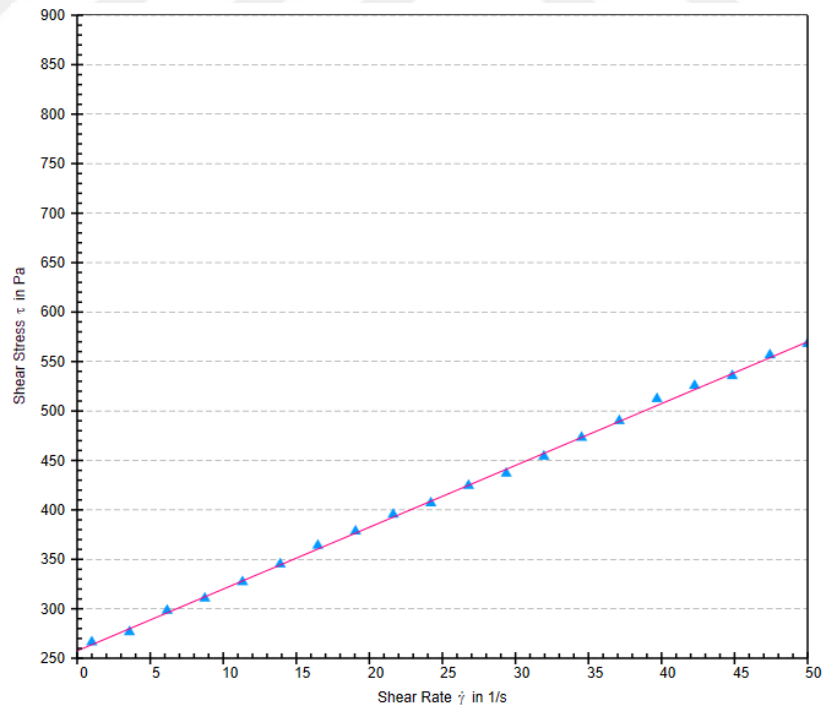
EK 20: 0,4 S/Ç %6 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



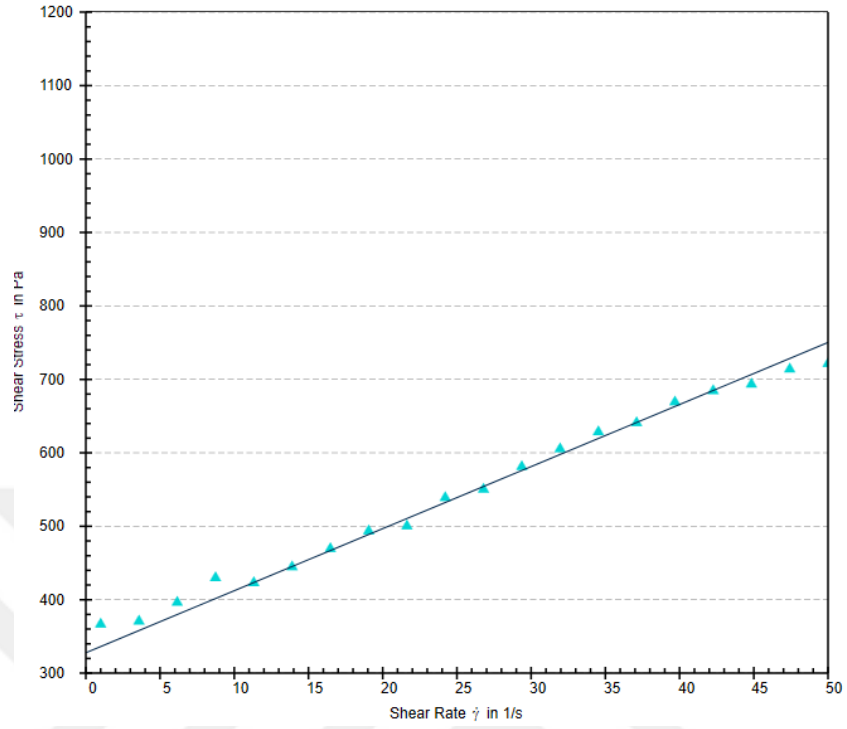
EK 21: 0,3 S/Ç %0 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



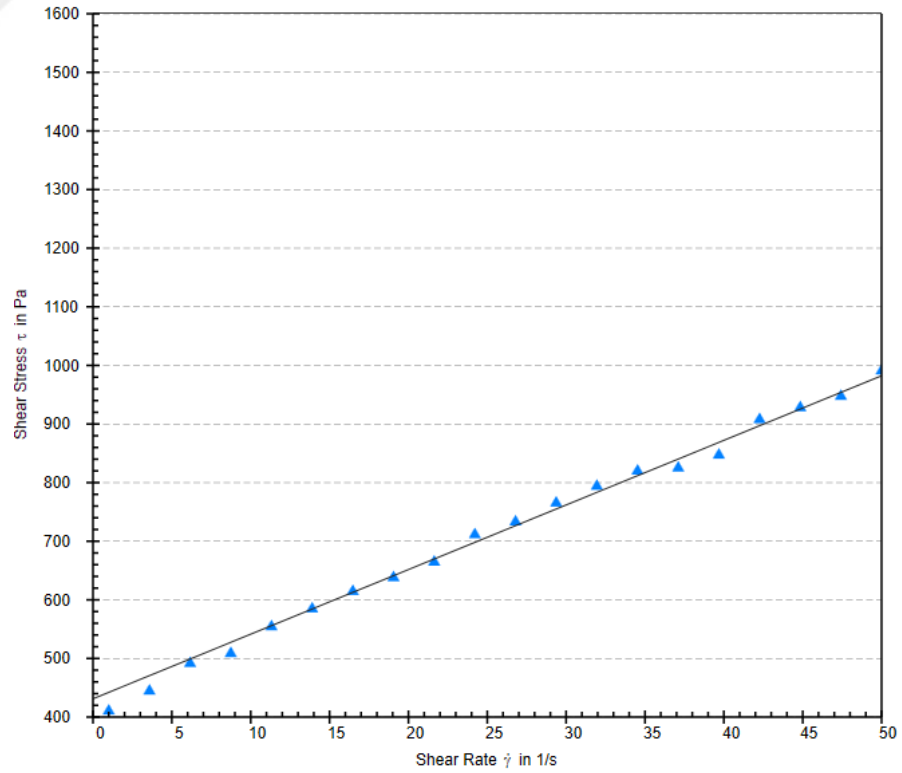
EK 22: 0,3 S/Ç %2 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



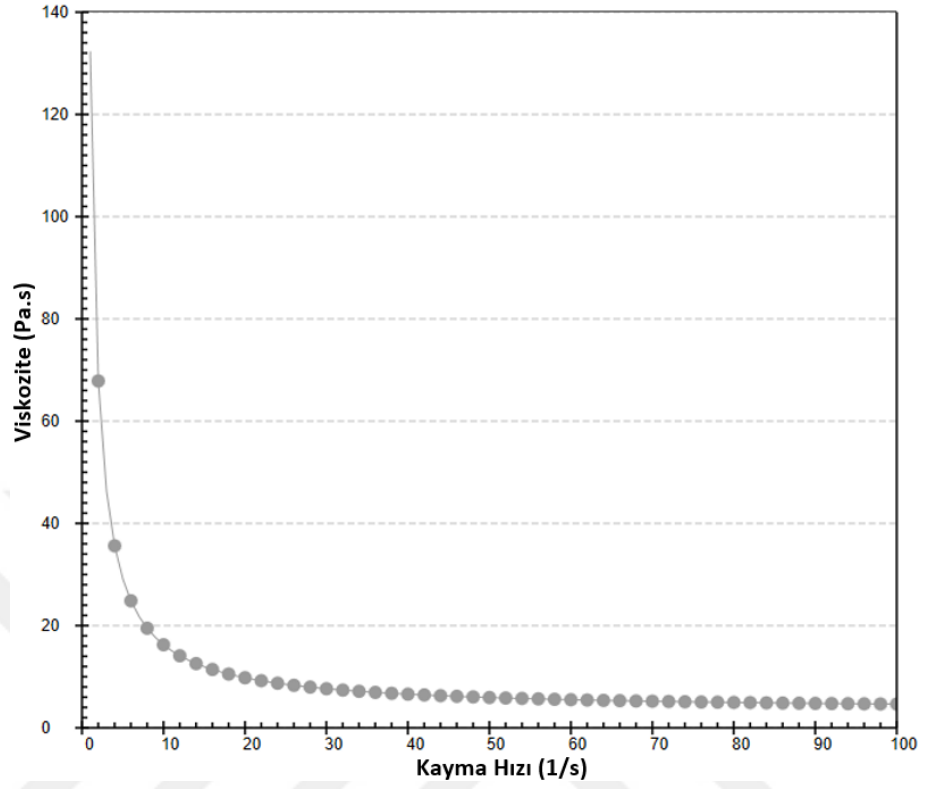
EK 23: 0,3 S/Ç %4 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



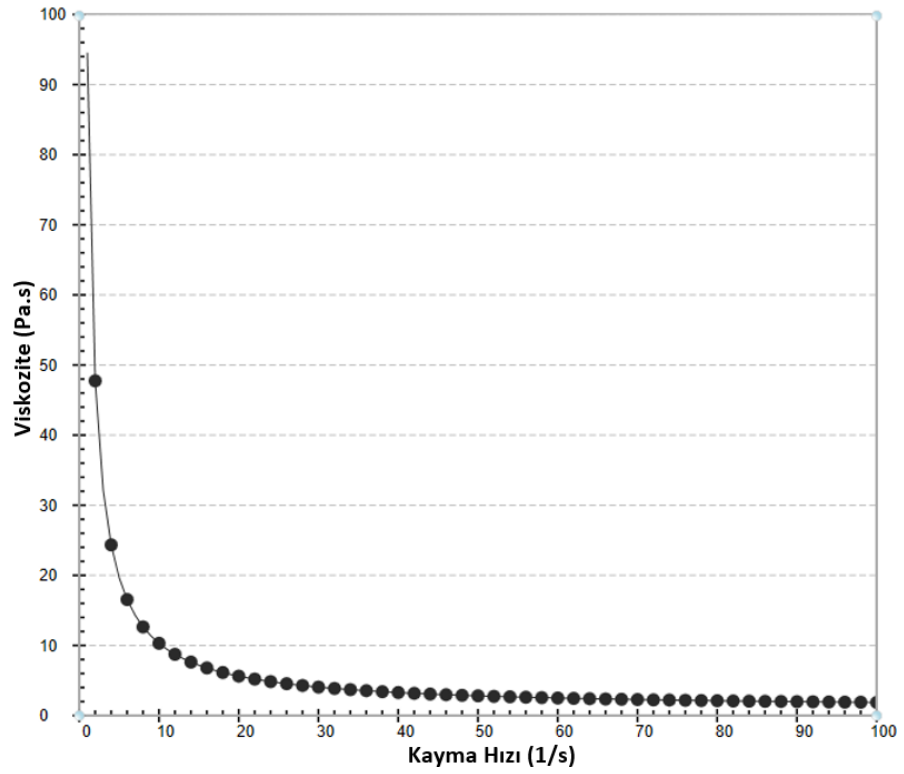
EK 24: 0,3 S/Ç %6 Katkılı Hamurun Kayma Gerilmesi/Kayma Hızı Grafiği



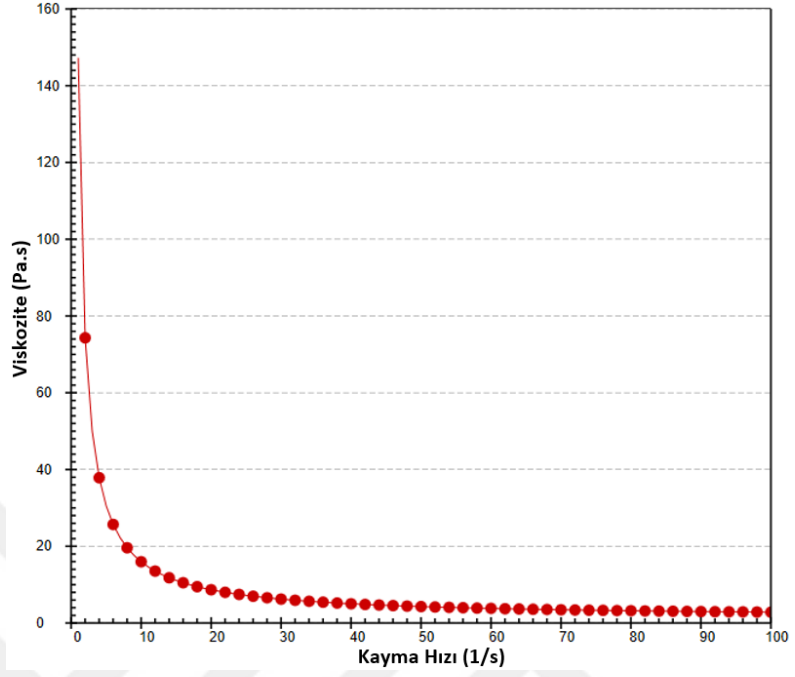
EK 25: 0,5 S/Ç ve %0 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



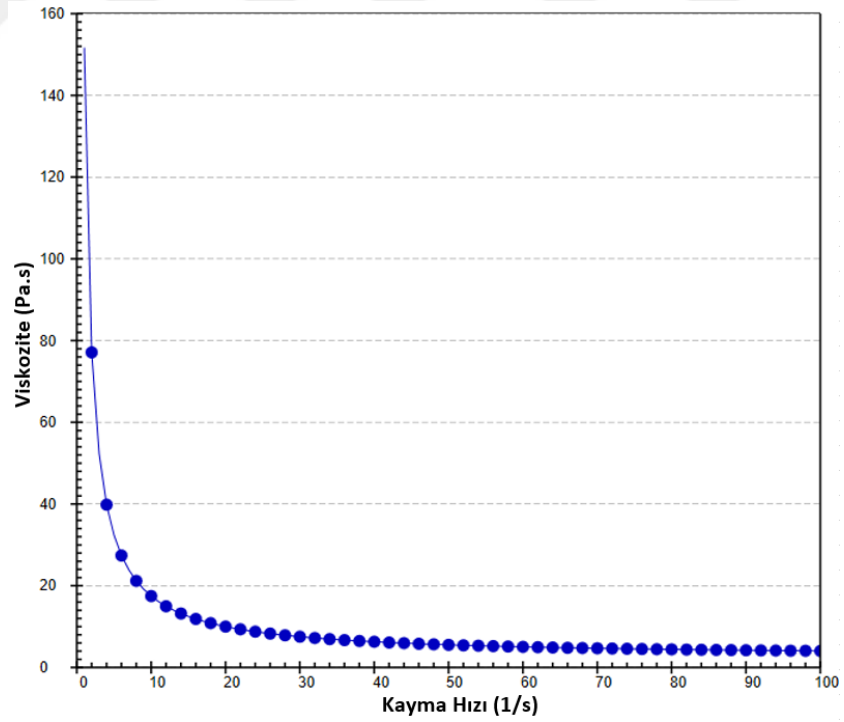
EK 26: 0,5 S/Ç ve %2 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



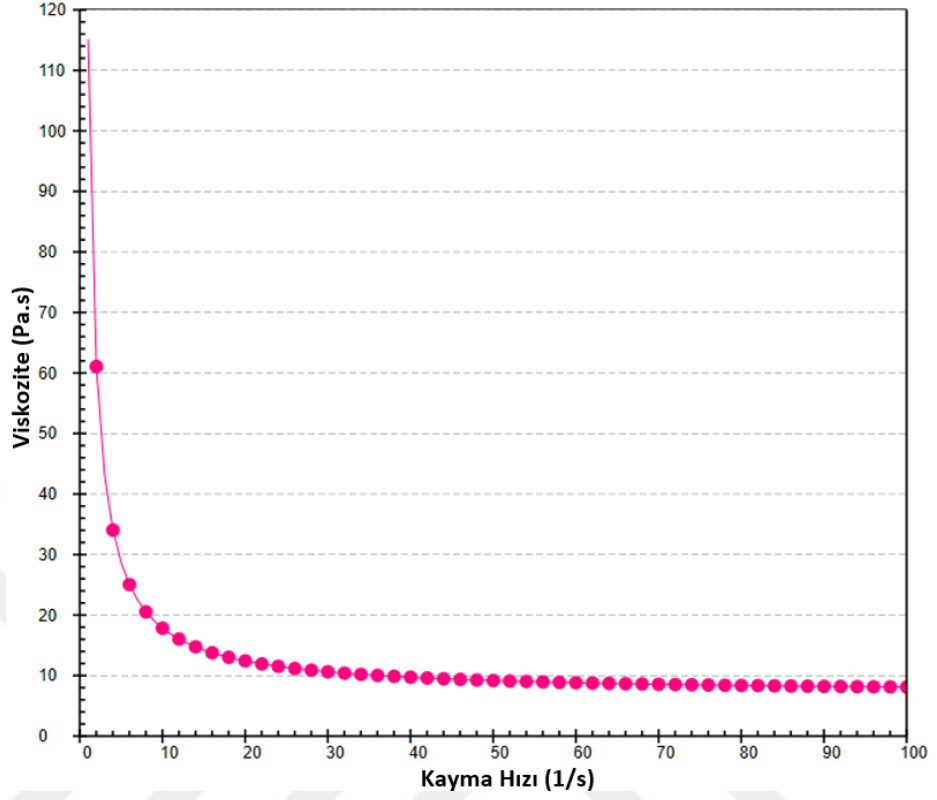
EK 27: 0,5 S/Ç ve %4 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



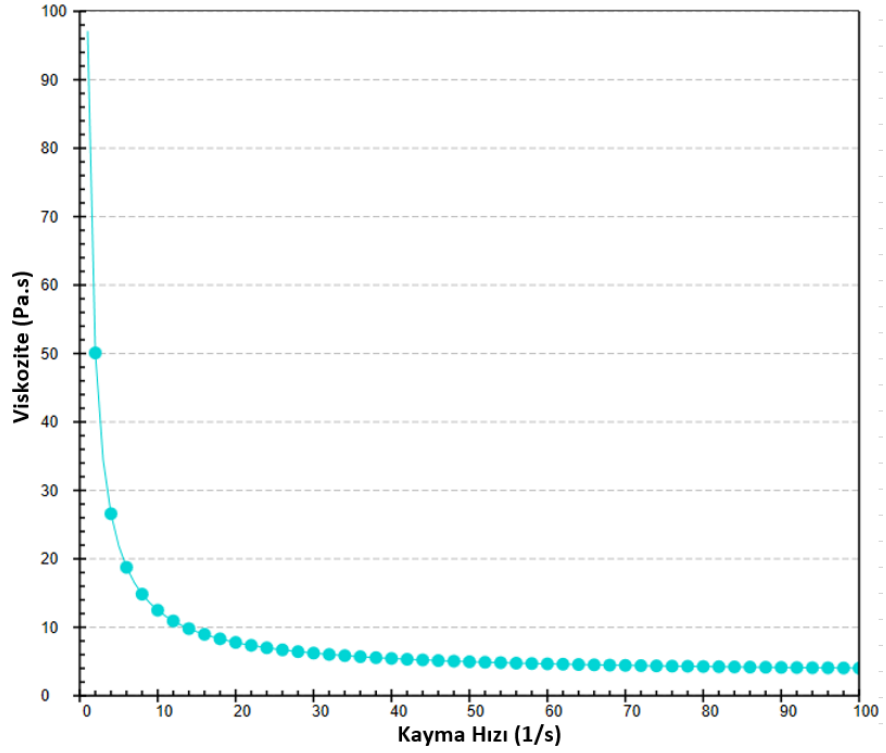
EK 28: 0,5 S/Ç ve %6 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



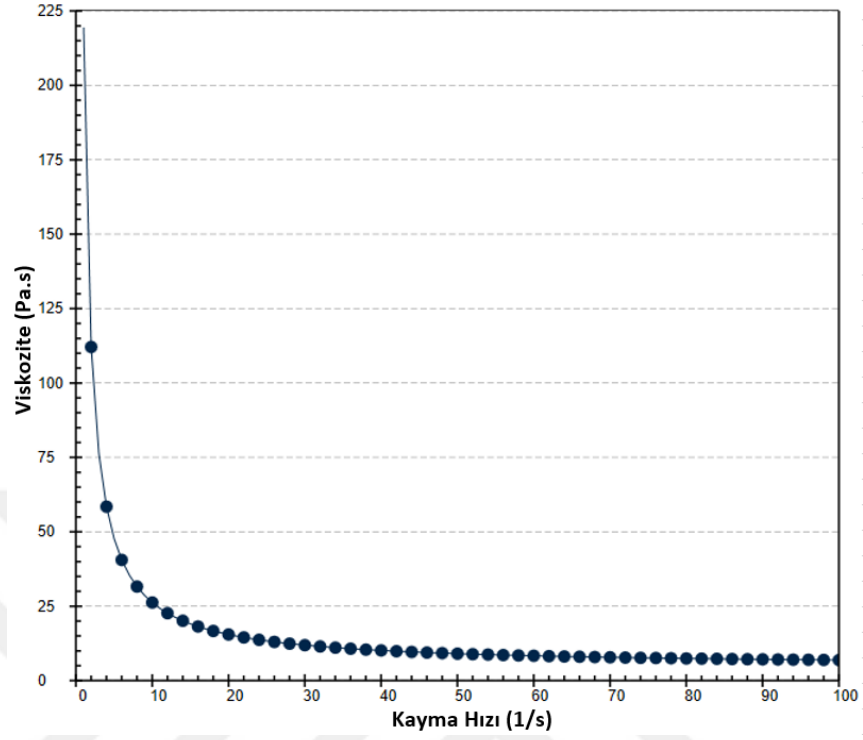
EK 29: 0,4 S/Ç ve %0 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



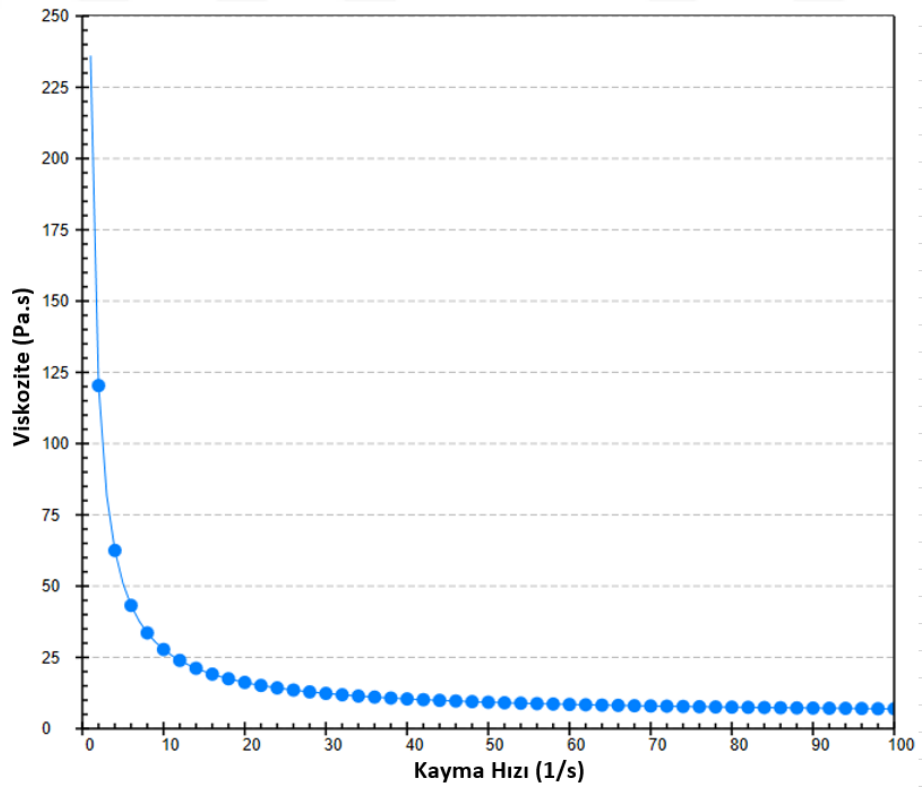
EK 30: 0,4 S/Ç ve %2 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



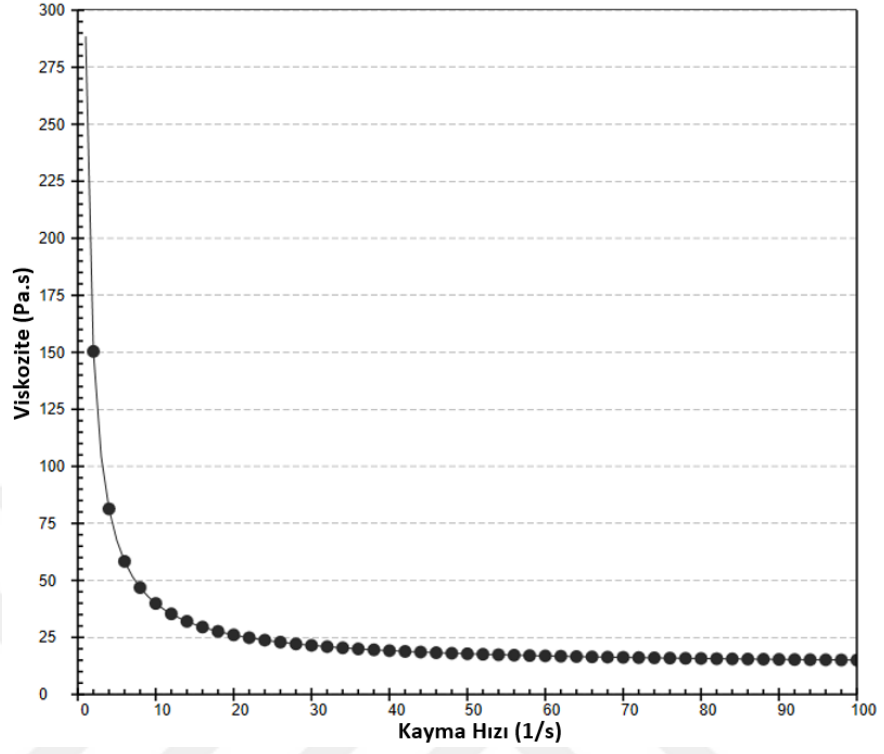
EK 31: 0,4 S/Ç ve %4 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



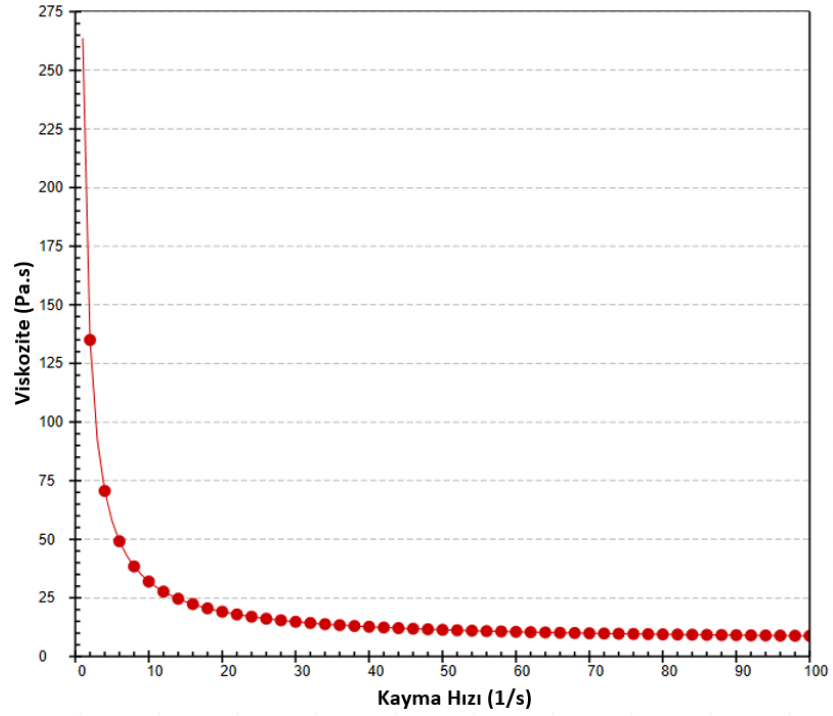
EK 32: 0,4 S/Ç ve %6 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



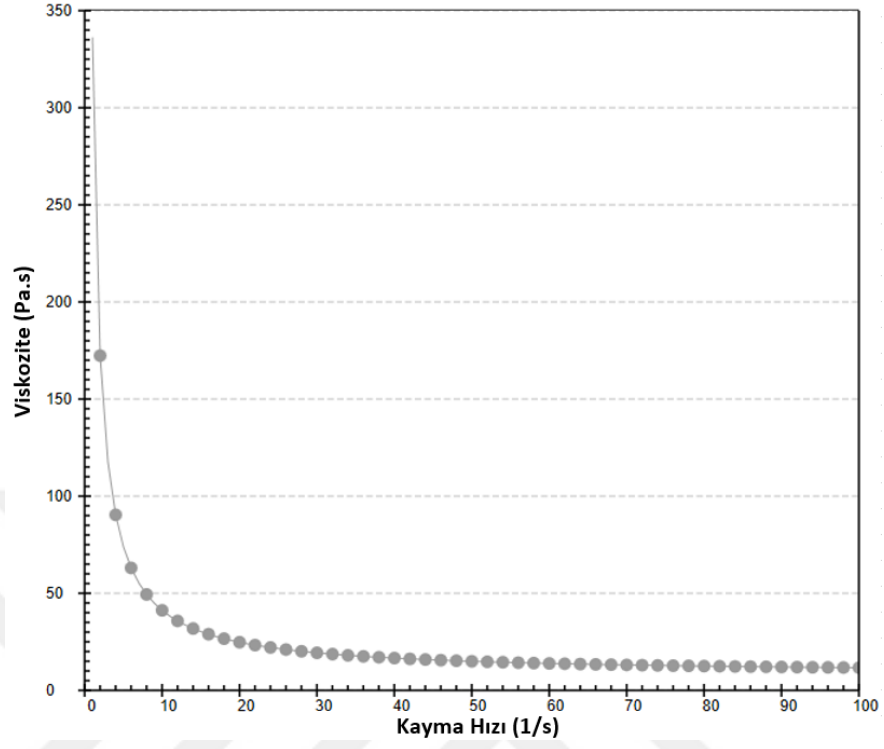
EK 33: 0,3 S/Ç ve %0 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



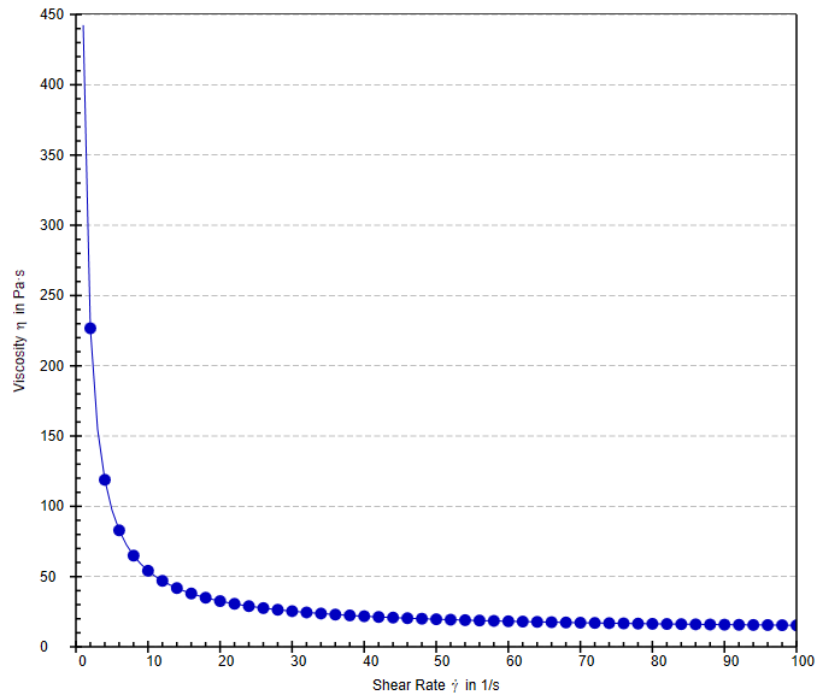
EK 34: 0,3 S/Ç ve %2 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



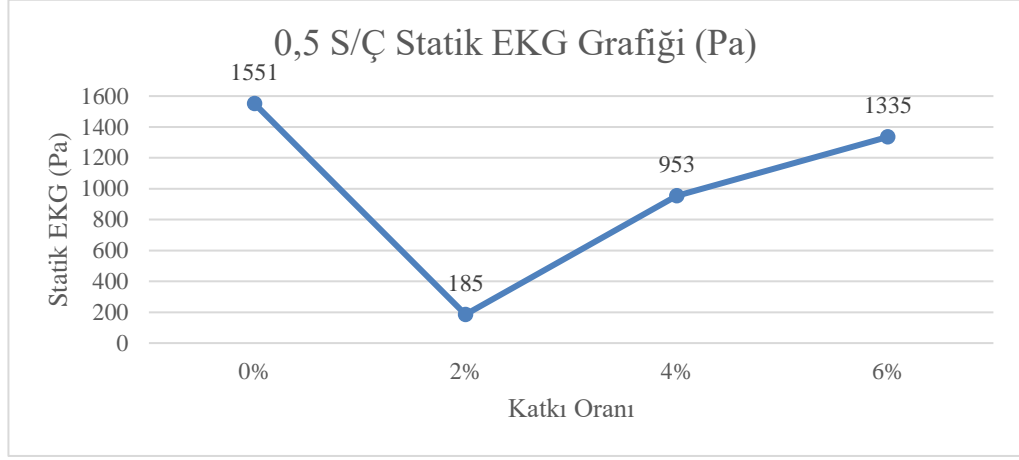
EK 35: 0,3 S/Ç ve %4 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



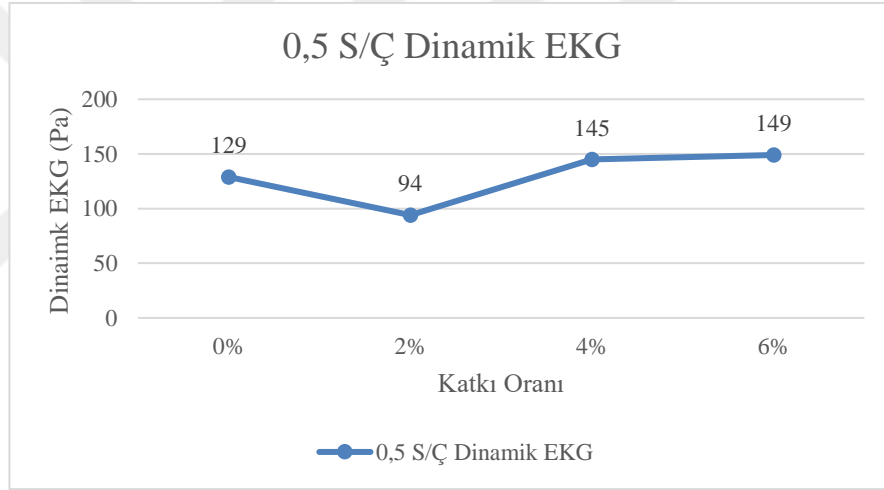
EK 36: 0,3 S/Ç ve %6 katkılı hamurun viskozite/kayma hızı grafiği



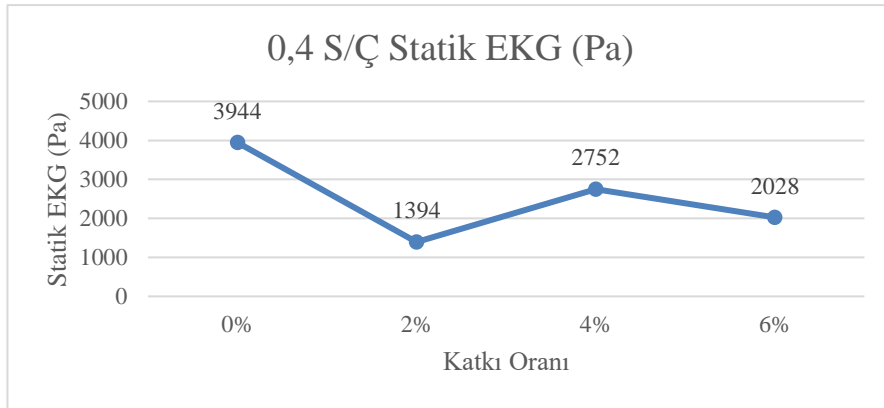
EK 37: 0,5 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu statik ekg değerleri



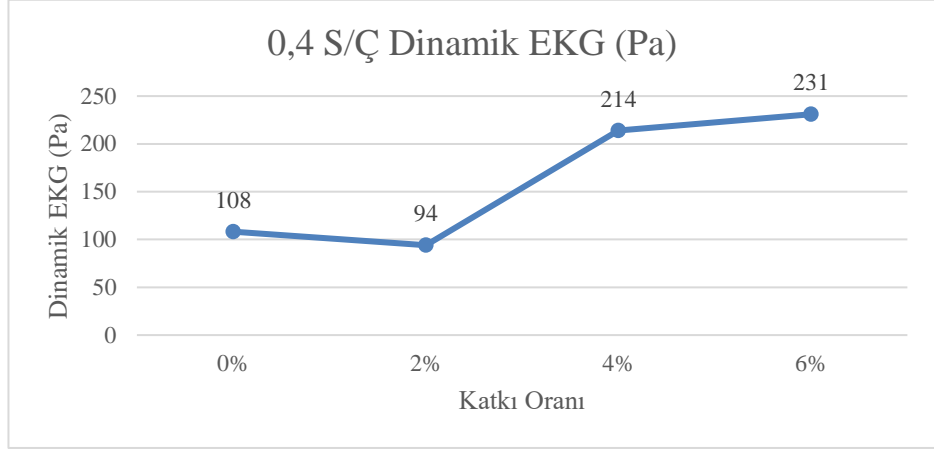
EK 38: 0,5 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu dinamik ekg değerleri



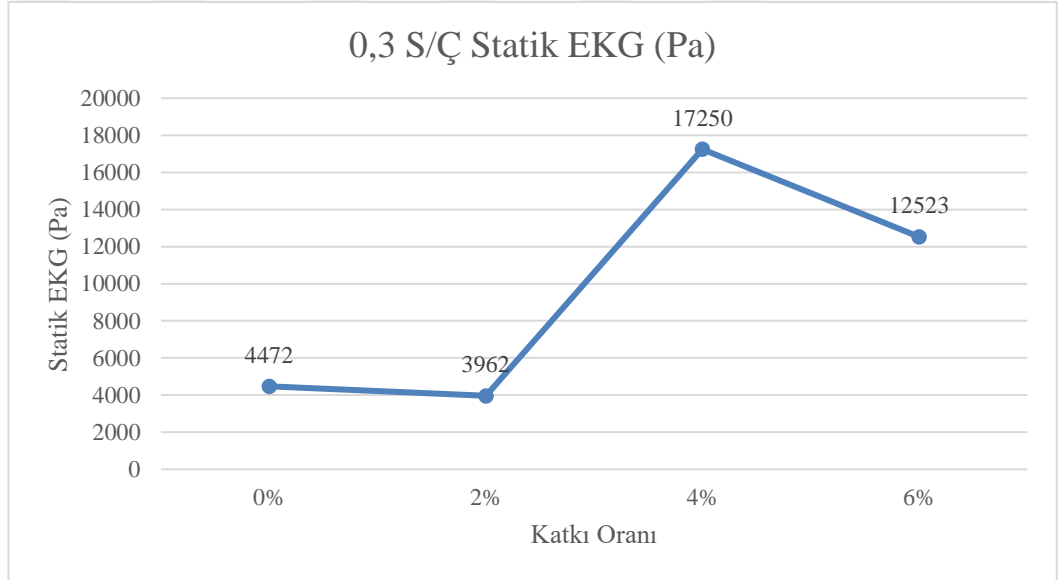
EK 39: 0,4 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu statik ekg değerleri



EK 40: 0,4 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu dinamik ekg değerleri



EK 41: 0,3 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu statik ekg değerleri



EK 42: 0,3 S/Ç hamurunun katkıya göre sahip olduğu dinamik ekg değerleri

