

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK BASINÇLI VE SICAK KUYULAR İÇİN
GEÇİRİMSİZ ÇİMENTO HARCİ TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Mustafa Hakan ÖZYURTKAN

Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Anabilim Dalı

Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Programı

NİSAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK BASINÇLI VE SICAK KUYULAR İÇİN
GEÇİRİMSİZ ÇİMENTO HARCİ TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

**Mustafa Hakan ÖZYURTKAN
(505062502)**

Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Anabilim Dalı

Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Gürsat ALTUN

NİSAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505062502 numaralı Doktora Öğrencisi **Mustafa Hakan ÖZYURTKAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**YÜKSEK BASINÇLI VE SICAK KUYULAR İÇİN GEÇİRİMSİZ ÇİMENTO HARCİ TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Gürşat ALTUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Umran SERPEN**
NTU Danışmanlık

Prof. Dr. Hasan ERGİN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İ. Metin MIHÇAKAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Niyazi AKSOY
Dokuz Eylül Üniversitesi

Teslim Tarihi : **6 Şubat 2012**
Savunma Tarihi : **9 Nisan 2012**

Eşime,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde maddi ve manevi desteklerinden dolayı İstanbul Teknik Üniversitesine, Maden Fakültesine, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümüne, TPAO Genel Müdürlüğüne, TPAO Araştırma Merkezi Dairesi Başkanlığına ve çalışmalar sırasında bilgi ve tecrübelerini her zaman benimle paylaşan danışmanım Yrd. Doç.Dr. Gürşat Altun'a, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü elemanlarına, TPAO Araştırma Merkezi Dairesi Başkan Yardımcısı Sayın Mehmet Çelik'e, Sondaj ve Çimento Laboratuvarı Müdürü Sayın Reha Özel'e ve birim çalışanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmamın hiçbir aşamasında benden manevi desteğini esirgemeyen Eşim Aslı K. Özyurtkan'a, Annem Tülay Özyurtkan, Babam Süreyya Özyurtkan, Ağabeyim Fırat Üniversitesi Tıp Fakültesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. M. Oğuzhan Özyurtkan'a ve dostum İ.T.Ü. İletişim Fakültesi Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Berk Canberk'e de teşekkür ederim.

Mayıs 2012

Mustafa Hakan Özyurtkan
Yüksek Petrol ve Doğal Gaz
Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çimentonun Tarihçesi	1
1.2 Çimentonun Üretimi.....	4
1.3 Çimento Hammaddeleri	5
1.4 Çimento Türleri	7
1.5 Çimento Standartları	8
1.6 Petrol Endüstrisi Çimento Standartları.....	9
1.7 Petrol Endüstrisinde Çimento	11
1.8 Petrol Endüstrisinde Çimento İçin Kullanılan Katkı Maddeleri	15
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	17
2.1 Donma Sürecinde Hacimsel Değişim	17
2.2 Gözeneklilik	17
2.3 Reoloji ve Jel Kuvveti	18
2.4 Dayanım.....	20
2.5 Geçirgenlik	21
2.6 Sönümsüz Koruma Borusu Basıncı (SCP).....	25
2.7 Problemin Ekonomik Boyutu.....	28
2.8 Problemin Çözüm Yöntemleri	28
2.8.1 Çimentolama sırasında uygulanan çözüm yöntemleri.....	29
2.8.2 Çimentolama sonrasında çözüm yöntemleri....	29
2.9 Çimento Geçirgenliğini Kontrol Eden Parametreler.....	31
3. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI	33
4. DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ VE MALZEMELER.....	35
4.1 Reoloji	36
4.2 Su Kaybı.....	38
4.3 Kıvamlılık	39
4.4 Basınç Dayanımı	40
4.4.1 Ultrasonik çimento analizörü (UCA) dayanımı.....	41
4.4.2 Tek eksenli pres (TEP) dayanımı.....	42
4.5 Geçirgenlik	43
4.5.1 Geçirgenlik Deneyleri.....	44
4.5.2 Gaz göçü analizörü (GMA) Deneyleri.....	46

5. AKIŞKANLIK, SU KAYBI VE AĞDALILIK DENEYLERİ	51
5.1 Akışkanlık (Reoloji) Deneyleri	51
5.1.1 ARI içermeyen çimento reoloji deneyleri.....	51
5.1.2 ARI içerikli çimento reoloji deneyleri.....	59
5.1.3 ARI ve viskozite kontrol edici içerikli çimento reoloji deneyleri.....	69
5.1.4 ARI ve su kaybı kontrol edici içerikli çimento reoloji deneyleri.....	72
5.1.5 ARI - viskozite ve su kaybı kontrol edici içerikli çimento reoloji deneyleri.....	75
5.1.6 Reoloji sonuçları değerlendirmesi.....	80
5.2 Su Kaybı Deneyleri	81
5.2.1 Su kaybı deneyleri değerlendirmesi.....	84
5.3 Kıvamlılık Deneyleri	86
6. BASINÇ DAYANIM DENEYLERİ	89
6.1 UCA Basınç Dayanım Deneyleri	89
6.1.1 ARI katkılı çimento UCA basınç dayanım deneyleri.....	89
6.1.2 ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento UCA basınç dayanım deneyleri.....	92
6.2 TEP Sıkıştırma Basınç Dayanım Deneyleri	96
6.2.1 ARI katkılı çimento TEP sıkıştırma basınç dayanım deneyleri	96
6.2.2 ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento TEP sıkıştırma basınç dayanım deneyleri.....	98
6.3 Katkılı Çimento TEP Deneyleri Değerlendirmesi	104
7. GEÇİRGENKLİK DENEYLERİ	109
7.1 Gaz Geçirgenliği Deneyleri.....	109
7.1.1 ARI katkılı çimento gaz geçirgenlik deneyleri.....	110
7.1.2 ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento gaz geçirgenlik deneyleri.....	111
7.2 GMA Deneyleri.....	114
7.2.1 Katkısız çimento GMA deneyleri.....	114
7.2.2 ARI katkılı çimento GMA deneyleri.....	117
7.2.3 ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento GMA deneyleri.....	124
8. SONUÇLAR.....	127
KAYNAKLAR.....	135
EKLER	139
ÖZGEÇMİŞ	257

KISALTMALAR

ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute)
API	: Amerikan Petrol Enstitüsü (American Petroleum Institute)
ASTM	: American Society for Testing and Materials
Bc	: Bearden Birimi
BP	: İngiliz Petrol Şirketi (British Petroleum)
BWOC	: Çimento Ağırlığınca Yüzde (By weight of cement)
CFR3	: Çimento Viskozite Kontrol sağlayıcı katkı (cement friction reducer)
ÇİSAN	: Çimento Sanayii
EN	: Avrupa Normları (European Norms)
GMA	: Gaz Göçü Analizörü (Gas Migration Analyzer)
GOM	: Meksika Körfezi (Gulf of Mexico)
HLD9	: Çimento Su Kaybı Kontrol sağlayıcı katkı (HALAD9)
ISIC	: Uluslararası Standart Sanayii Tasnifi
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
MMS	: Mineral Yönetim Servisi (Mineral Management Services)
SCP	: Sönümsüz Koruma Borusu Basıncı (Sustained Casing Pressure)
TEP	: Tek Eksenli Pres
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
TS	: Türk Standartları
UCA	: Ultrasonik Çimento Analizörü (Ultrasonic Cement Analyzer)
WOC	: Çimento Bekleme Süresi (wait on cement)
W/C	: Çimento Su Oranı
YSYB	: Yüksek Sıcaklık Yüksek Basınç

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Çimento bileşenlerinin kil içeriğine göre sınıflandırılması.....	6
Çizelge 1.2 : API tarafından sınıflandırılan çimentoların bileşimleri	12
Çizelge 1.3 : API tarafından sınıflandırılan çimentoların özellikler	13
Çizelge 1.4 : Klinker ana fazları	13
Çizelge 1.5 : Klinker ana fazlarının özellikleri	14
Çizelge 1.6 : Bazı katkı maddelerinin fiziksel özellikleri.....	16
Çizelge 2.1 : Örnekleme X-ray analizi sonuçları.....	19
Çizelge 5.1 : G Sınıf çimento reoloji davranışı deney sonuçları – 10 sn okumaları..	53
Çizelge 5.2 : G Sınıf çimento reoloji davranışı deney sonuçları – 15 sn okumaları..	54
Çizelge 5.3 : G Sınıf çimento örneklerinin jel kuvveti değişimleri.....	54
Çizelge 5.4 : G Sınıf çimento reoloji davranışı - %48 su içerikli.	59
Çizelge 5.5 : G Sınıf çimento kıvamlilik testi sonuçları	87
Çizelge 6.1 : ARI katkılı G Sınıf çimento dayanımı UCA sonuçları	91
Çizelge 6.2 : Katkılı G Sınıf çimento dayanımı UCA sonuçları	94
Çizelge 6.3 : ARI katkılı G Sınıf çimento dayanımı TEP sonuçları.....	97
Çizelge 6.4 : Katkılı G Sınıf çimento dayanımı TEP sonuçları (psi)	99
Çizelge 6.5 : Katkılı G Sınıf çimento dayanımı TEP sonuçları (Mpa).....	101
Çizelge 7.1 : ARI katkılı çimento geçirgenlikleri.....	110
Çizelge 7.2 : ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento geçirgenlikleri	112
Çizelge B.1 : ARI katkılı çimento reoloji okuma değerleri.....	141
Çizelge D.1 : ARI ve CFR3 katkılı G Sınıf çimento reolojisi ölçümleri.....	180
Çizelge D.2 : ARI ve HLD9 katkılı G Sınıf çimento reolojisi ölçümleri.....	186
Çizelge E.1 : ARI, CFR3 ve HLD9 Katkılı G Sınıf çimento reolojisi ölçümleri.....	191
Çizelge E.2 : Değişik oranlarda ARI, CFR3 ve HLD9 katkılı G Sınıf çimento reolojisi ölçümleri	197
Çizelge F.1 : ARI, CFR3 ve HLD9 katkılı G Sınıf çimento su kaybı ölçümleri	206
Çizelge I.1 : Çimento örnekleri gaz geçirgenlik sonuçları.....	240

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Eddystone Deniz Feneri'nin fotoğrafı.....	3
Şekil 1.2: Wakefield Arms binasının cepheden çekilmiş fotoğrafı	3
Şekil 1.3 : Kuru sistem ile klinker üretimi akışı şeması	5
Şekil 1.4 : Farklı kademelerdeki koruma borusu ve çimentolama görseli	11
Şekil 2.1 : Yatay kesiti alınmış çimento ve koruma borusu örneği	19
Şekil 2.2 : Çimentonun zamana bağlı geçirgenlik davranışı	22
Şekil 2.3 : Koruma borusu arkasından gaz akışı oluşumu.....	23
Şekil 2.4 : Gaz göçünün olası sebepleri.....	24
Şekil 2.5 : Hasarlı ve hasarsız çimento örneklerinin fotoğrafları	24
Şekil 2.6 : Çimento içerisinde gaz akış şekilleri.....	25
Şekil 2.7 : SCP oluşum mekanizması.....	26
Şekil 2.8 : GOM'da rastgele seçilen kuyulardaki SCP oluşum istatistikleri	27
Şekil 4.1 : Örnekler için kullanılan kodlama sistemi örneği	36
Şekil 4.2 : Yüksek hızlı blenderın fotoğrafı	37
Şekil 4.3 : Atmosferik konsistometrenin fotoğrafı	38
Şekil 4.4 : Model 35SA viskometrenin fotoğrafı	38
Şekil 4.5 : YSYB basınçlı süzgeç ve parçaları	39
Şekil 4.6 : İkiz basınçlı konsistometre – TPAO Araştırma Merkezi	40
Şekil 4.7 : Chandler firmasının 4262 Model UCA Donanımı	41
Şekil 4.8 : G Sınıf çimento UCA basınç dayanım grafiği	42
Şekil 4.9 : Tek eksenli pres donanımı	43
Şekil 4.10 : Deneylerde kullanılan küp kalıplar	43
Şekil 4.11 : Karotiyer	45
Şekil 4.12 : Gaz geçirgenliği donanımı	45
Şekil 4.13 : Gaz akış debisini bulmak için kullanılan grafiğin daraltılmış hali	46
Şekil 4.14 : Gaz göçü analizörü.....	47
Şekil 4.15 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI)-gaz göçü grafiği	48
Şekil 4.16 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI)-basınç grafiği	48
Şekil 4.17 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI)-sıcaklık grafiği	49
Şekil 5.1 : G Sınıf çimento reoloji davranışı	52
Şekil 5.2 : G Sınıf çimento reoloji davranışı – tekrar 1	53
Şekil 5.3 : G Sınıf çimento reoloji davranışı – bütün tekrarlar – 10 sn	55
Şekil 5.4 : G Sınıf çimento reoloji davranışı – bütün tekrarlar – 15 sn	55
Şekil 5.5 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı.....	56
Şekil 5.6 : G Sınıf çimento reoloji davranışı – %48 su	57
Şekil 5.7 : G Sınıf çimento reoloji davranışı – %53 su	57
Şekil 5.8 : G Sınıf çimento reoloji davranışı – karşılaştırma	58
Şekil 5.9 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı – karşılaştırma	58
Şekil 5.10 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI) – karşılaştırma.....	61
Şekil 5.11 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%1 ARI) — karşılaştırma	61
Şekil 5.12 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI) – %44 su – karşılaştırma...	62

Şekil 5.13 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%1,5 ARI) — karşılaştırma	62
Şekil 5.14 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI) —karşılaştırma	63
Şekil 5.15 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%2 ARI) — karşılaştırma	63
Şekil 5.16 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2,5 ARI) – %44 su – karşılaştırma ...	64
Şekil 5.17 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI) – karşılaştırma	64
Şekil 5.18 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%3 ARI) — karşılaştırma	65
Şekil 5.19 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3,5 ARI) – %48 su.....	65
Şekil 5.20 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%48 Su)	66
Şekil 5.21 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%4 ARI) – %46 su.....	67
Şekil 5.22 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%5 ARI) – karşılaştırma	67
Şekil 5.23 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%5 ARI) — karşılaştırma	68
Şekil 5.24 : Artan ARI içeriğiyle G Sınıf çimento reolojisinin değişimi - %44 su ...	69
Şekil 5.25 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,4 CFR3)	70
Şekil 5.26 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,7 CFR3)	71
Şekil 5.27 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,4 CFR3).....	71
Şekil 5.28 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,7 CFR3).....	72
Şekil 5.29 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,4 HLD9).....	73
Şekil 5.30 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,7 HLD9).....	73
Şekil 5.31 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – HLD9)	74
Şekil 5.32 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%3 ARI – CFR3- HLD9).....	76
Şekil 5.33 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – CFR3-HLD9)	76
Şekil 5.34 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı — (ARI – %0,4 CFR3- %0,4 HLD9)	77
Şekil 5.35 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı — (ARI – %0,7 CFR3- %0,4 HLD9)	78
Şekil 5.36 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı — (ARI – CFR3-HLD9)	78
Şekil 5.37 : G Sınıf çimento reoloji davranışı – jel kuvveti – (%2ARI – CFR3-HLD9 T:150 °F).....	79
Şekil 5.38 : G Sınıf çimento YSYB su kaybı davranışı (%1 ARI – CFR3-HLD9)...	82
Şekil 5.39 : G Sınıf çimento YSYB su kaybı davranışı (%2 ARI – CFR3-HLD9)...	83
Şekil 5.40 : G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%3 ARI – CFR3-HLD9).....	83
Şekil 5.41 : G Sınıf çimento su kaybı davranışı (ARI – CFR3-HLD9) – T: 150 °F	84
Şekil 5.42 : G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%1 ARI – CFR3-HLD9) – 200 °F	84
Şekil 5.43 : ARI Katkılı G Sınıf çimento kıvamlilik testi sonuçları grafiği	88
Şekil 5.44 : %2 ARI, CFR3 ve HALAD9 katkı G Sınıf çimento kıvamlilik testi sonuçları grafiği.....	88
Şekil 6.1 : G Sınıf çimento UCA basınç dayanımı grafiği (%4 ARI) – tekrar	92
Şekil 6.2 : Sünekleşmiş çimento örneği	98
Şekil 6.3 : Sünekleşmiş ve normal kırılmış bir günlük iki numune.....	103
Şekil 6.4 : Bir günlük CFR3 katkı örneklerin karşılaştırma grafiği	104
Şekil 6.5 : Bir günlük CFR3 ve HALAD9 katkı örneklerin karşılaştırma grafiği.	105
Şekil 6.6 : Bir günlük HALAD9 katkı örneklerin karşılaştırma grafiği	106
Şekil 6.7 : Bir günlük ARI, %0,4 CFR3 ve %0,4 HALAD9 katkı örneklerin karşılaştırma grafiği.....	107
Şekil 6.8 : Bir günlük ARI, %0,4 CFR3 ve %0,4 HALAD9 katkı örneklerin karşılaştırma grafiği.....	108

Şekil 7.1 : ARI katkılı çimentonun zamana bağlı geçirgenlik değerleri	111
Şekil 7.2 : 7 günlük ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento gaz geçirgenlikleri	113
Şekil 7.3 : 28 günlük ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento gaz geçirgenlikleri	113
Şekil 7.4 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI) – gaz göçü grafiği	114
Şekil 7.5 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI) – basınç grafiği	115
Şekil 7.6 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI) – sıcaklık grafiği	116
Şekil 7.7 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – gaz göçü grafiği	117
Şekil 7.8 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – basınç grafiği	118
Şekil 7.9 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – sıcaklık grafiği	118
Şekil 7.10 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI) – gaz göçü grafiği	119
Şekil 7.11 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI) – basınç grafiği	120
Şekil 7.12 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI) – sıcaklık grafiği	120
Şekil 7.13 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI) – gaz göçü grafiği	121
Şekil 7.14 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI) – basınç grafiği	121
Şekil 7.15 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI) – sıcaklık grafiği	122
Şekil 7.16 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – gaz göçü grafiği – tekrar-1	122
Şekil 7.17 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – basınç grafiği – tekrar-1	123
Şekil 7.18 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – sıcaklık grafiği – tekrar-1	123
Şekil A.1 : Gaz geçirgenliği ölçümlerinde çıkış debisi hesaplamak için kullanılan grafik	140
Şekil C.1 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su)	143
Şekil C.2 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-1	143
Şekil C.3 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-2	144
Şekil C.4 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-3	144
Şekil C.5 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-4	145
Şekil C.6 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-5	145
Şekil C.7 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-6	146
Şekil C.8 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – karşılaştırma	146
Şekil C.9 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%0 ARI – %44 su)	147
Şekil C.10 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %48 su)	147
Şekil C.11 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %53 su)	148
Şekil C.12 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI) – karşılaştırma	148
Şekil C.13 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%0 ARI) – karşılaştırma	149
Şekil C.14 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %44 su)	149
Şekil C.15 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %44 su) – tekrar-1	150
Şekil C.16 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %44 su) – tekrar-2	150
Şekil C.17 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %44 su) – karşılaştırma	151
Şekil C.18 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%1 ARI) – karşılaştırma	151
Şekil C.19 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %45 su)	152
Şekil C.20 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %45 su) – tekrar-1	152
Şekil C.21 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %45 su) – karşılaştırma	153
Şekil C.22 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %46 su)	153

Şekil C.23 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %46 su) – tekrar-1	154
Şekil C.24 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %46 su) – tekrar-2	154
Şekil C.25 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %46 su) – karşılaştırma ...	155
Şekil C.26 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %48 su)	155
Şekil C.27 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %48 su) – tekrar-1	156
Şekil C.28 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %48 su) – karşılaştırma ...	156
Şekil C.29 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI) – karşılaştırma	157
Şekil C.30 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%1 ARI) – karşılaştırma.....	157
Şekil C.31 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su)	158
Şekil C.32 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su) – tekrar-1	158
Şekil C.33 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su) – tekrar-2	159
Şekil C.34 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su) – tekrar-3	159
Şekil C.35 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su) – tekrar-4	160
Şekil C.36 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su) – karşılaştırma	160
Şekil C.37 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%1,5 ARI) – karşılaştırma.....	161
Şekil C.38 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %44 su)	161
Şekil C.39 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %44 su) – tekrar-1	162
Şekil C.40 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %44 su) – tekrar-2	162
Şekil C.41 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %44 su) – karşılaştırma ...	163
Şekil C.42 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %45 su)	163
Şekil C.43 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %45 su) – tekrar-1	164
Şekil C.44 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %45 su) – tekrar-2	164
Şekil C.45 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %45 su) – karşılaştırma ...	165
Şekil C.46 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %46 su)	165
Şekil C.47 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %46 su) – tekrar-1	166
Şekil C.48 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %46 su) – tekrar-2	166
Şekil C.49 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %46 su) – karşılaştırma ...	167
Şekil C.50 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %48 su)	167
Şekil C.51 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %48 su) – tekrar-1	168
Şekil C.52 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %48 su) – tekrar-2	168
Şekil C.53 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI) – %48 su) – karşılaştırma..	169
Şekil C.54 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI) – karşılaştırma	169
Şekil C.55 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%2 ARI) — karşılaştırma.....	170
Şekil C.56 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2,5 ARI – %44 su)	170
Şekil C.57 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2,5 ARI – %44 su) – tekrar-1	171
Şekil C.58 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2,5 ARI – %44 su) – tekrar-2	171
Şekil C.59 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2,5 ARI – %44 su) – karşılaştırma	172
Şekil C.60 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su)	172
Şekil C.61 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su) – tekrar-1	173
Şekil C.62 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su) – karşılaştırma ...	173
Şekil C.63 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su)	174
Şekil C.64 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su) – tekrar-1	174
Şekil C.65 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su) – karşılaştırma ...	175
Şekil C.66 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %48 su)	175
Şekil C.67 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI) – karşılaştırma	176
Şekil C.68 : G Sınıf çimento reoloji jel kuvveti (%3 ARI) — karşılaştırma.....	176
Şekil C.69 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3,5 ARI – %48 su)	177

Şekil C.70 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%4 ARI – %46 su).....	177
Şekil C.71 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%5 ARI – %56 su).....	178
Şekil C.72 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%5 ARI – %59 su).....	178
Şekil C.73 : G Sınıf çimento reoloji grafiği (%5 ARI) – karşılaştırma.....	179
Şekil C.74 : G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%5 ARI) — karşılaştırma	179
Şekil D.1 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%1 ARI – CFR3)	181
Şekil D.2 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%2 ARI – CFR3)	181
Şekil D.3 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%3 ARI – CFR3)	182
Şekil D.4 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%4 ARI – CFR3)	182
Şekil D.5 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%5 ARI – CFR3)	183
Şekil D.6 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,4 CFR3)	183
Şekil D.7 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,7 CFR3)	184
Şekil D.8 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,4 CFR3)	184
Şekil D.9 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,7 CFR3)	185
Şekil D.10 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%1 ARI – HLD9).....	187
Şekil D.11 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%2 ARI – HLD9).....	187
Şekil D.12 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%3 ARI – HLD9).....	188
Şekil D.13 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%4 ARI – HLD9).....	188
Şekil D.14 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%5 ARI – HLD9).....	189
Şekil D.15 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,4 HLD9).....	189
Şekil D.16 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,7 HLD9).....	190
Şekil D.17 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – HLD9).....	190
Şekil E.1 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%1 ARI – CFR3-HLD9).....	192
Şekil E.2 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%2 ARI – CFR3-HLD9).....	192
Şekil E.3 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%3 ARI – CFR3-HLD9).....	193
Şekil E.4 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%4 ARI – CFR3-HLD9).....	193
Şekil E.5 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – CFR3-HLD9)	194
Şekil E.6 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,4 CFR3 - %0,4 HLD9)	194
Şekil E7 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı(ARI – %0,4 CFR3 - %0,7 HLD9).....	195
Şekil E.8 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,7 CFR3 - %0,4 HLD9).....	195
Şekil E.9 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,7 CFR3 - %0,7 HLD9).....	196
Şekil E.10 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI– CFR3-HLD9)	196
Şekil E.11 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%1 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda)	199
Şekil E.12 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%1 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F)	199
Şekil E.13 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%2 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda)	200
Şekil E.14 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%2 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F)	200
Şekil E.15 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%3 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda)	201
Şekil E.16 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (% 3ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F)	201

Şekil E.17 : G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%4 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 ⁰ F).....	202
Şekil E.18 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı(%1 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda)	202
Şekil E.19 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (%2 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda)	203
Şekil E.20 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (%2 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 ⁰ F).....	203
Şekil E.21 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (%3 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda)	204
Şekil E.22 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (%3 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 ⁰ F).....	204
Şekil E.23 : G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (%4 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 ⁰ F).....	205
Şekil F.1 : G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%1 ARI – CFR3-HLD9)	208
Şekil F.2 : G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%2 ARI – CFR3-HLD9)	208
Şekil F.3 : G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%3 ARI – CFR3-HLD9)	209
Şekil F.4 : G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%1 ARI – CFR3-HLD9) – 200 ⁰ F	209
Şekil F.5 : G Sınıf çimento su kaybı davranışı (ARI – CFR3-HLD9)	210
Şekil F.6 : G Sınıf çimento su kaybı davranışı (ARI – CFR3-HLD9) – T: 150 ⁰ F.....	210
Şekil G.1 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi	211
Şekil G.2 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi. (%0,4 CFR3).....	211
Şekil G.3 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%0,7 CFR3).....	212
Şekil G.4 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%0,4 HLD9)	212
Şekil G.5 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%0,7 HLD9)	213
Şekil G.6 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi – tekrar (%0,7 HLD9).....	213
Şekil G.7 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%0,4 CFR3 ve %0,4 HLD9).....	214
Şekil G.8 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%0,4 CFR3 ve %0,7 HLD9).....	214
Şekil G.9 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%0,7 CFR3 ve %0,4 HLD9).....	215
Şekil G.10 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9).....	215
Şekil G.11 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%1 ARI).....	216
Şekil G.12 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%1 ARI, % 0,7 CFR3 ve % 1,0 HLD9)	216
Şekil G.13 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%2 ARI).....	217
Şekil G.14 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%2 ARI, % 0,4 CFR3 ve % 0,4 HLD9)	217
Şekil G.15 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%2 ARI, % 0,4 CFR3 ve % 0,7 HLD9)	218
Şekil G.16 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%2 ARI, % 0,7 CFR3 ve % 0,4 HLD9)	218
Şekil G.17 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%2 ARI, % 0,7 CFR3 ve % 0,7 HLD9)	219
Şekil G.18 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%2 ARI, % 0,9 CFR3 ve % 0,7 HLD9)	219

Şekil G.19 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%2 ARI, % 0,9 CFR3 ve % 0,9 HLD9).....	220
Şekil G.20 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%2 ARI, % 1,0 CFR3 ve % 0,5 HLD9).....	220
Şekil G.21 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi - tekrar (%2 ARI, % 1,0 CFR3 ve % 0,5 HLD9).....	221
Şekil G.22 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi - tekrar (%3 ARI).....	221
Şekil G.23 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%3 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9).....	222
Şekil G.24 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%3 ARI, %0,7 CFR3 ve %1,0 HLD9).....	222
Şekil G.25 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%4 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9).....	223
Şekil G.26 : G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%4 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,8 HLD9).....	223
Şekil H.1 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0 ARI).....	224
Şekil H.2 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0 ARI) – tekrar 1.....	224
Şekil H.3 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%1,5 ARI).....	225
Şekil H.4 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2 ARI) – tekrar 1.....	225
Şekil H.5 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2,5 ARI).....	226
Şekil H.6 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%3 ARI).....	226
Şekil H.7 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%4 ARI).....	227
Şekil H.8 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%4 ARI) – tekrar 1.....	227
Şekil H.9 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%5 ARI).....	228
Şekil H.10 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,4 CFR3)	228
Şekil H.11 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,7 CFR3)	229
Şekil H.12 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,4 HLD9).....	229
Şekil H.13 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,7 HLD9).....	230
Şekil H.14 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,4 CFR3 ve %0,4 HLD9).....	230
Şekil H.15 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,7 CFR3 ve %0,4 HLD9).....	231
Şekil H.16 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%1 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,4 HLD9).....	231
Şekil H.17 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%1 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,7 HLD9).....	232
Şekil H.18 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%1 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,4 HLD9).....	232
Şekil H.19 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%1 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9).....	233
Şekil H.20 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,4 HLD9).....	233
Şekil H.21 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,7 HLD9).....	234
Şekil H.22 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,4 HLD9).....	234
Şekil H.23 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9).....	235
Şekil H.24 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2 ARI, %0,9 CFR3 ve %0,7 HLD9).....	235

Şekil H.25 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2 ARI, %0,9 CFR3 ve %0,9 HLD9)	236
Şekil H.26 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2 ARI, %1,0 CFR3 ve %0,5 HLD9)	236
Şekil H.27 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%3 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,4 HLD9)	237
Şekil H.28 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%3 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,7 HLD9)	237
Şekil H.29 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%3 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,4 HLD9)	238
Şekil H.30 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%3 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9)	238
Şekil H.31 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%4 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9)	239
Şekil H.32 : G Sınıf çimento dayanım davranışı (%4 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9)	239
Şekil J.1 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – gaz göçü grafiği – T: 150 °F	240
Şekil J.2 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – basınç grafiği – T: 150 °F	240
Şekil J.3 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – sıcaklık grafiği – T: 150 °F	241
Şekil J.4 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %1 CFR3 ve %0,5 HLD9) – gaz göçü grafiği – T: 150 °F	241
Şekil J.5 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %1 CFR3 ve %0,5 HLD9) – basınç grafiği – T: 150 °F	242
Şekil J.6 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %1 CFR3 ve %0,5 HLD9) – sıcaklık grafiği – T: 150 °F	242
Şekil J.7 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,7 HLD9) – gaz göçü grafiği – T: 150 °F	243
Şekil J.8 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,7 HLD9) – basınç grafiği – T: 150 °F	243
Şekil J.9 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,7 HLD9) – sıcaklık grafiği – T: 150 °F	244
Şekil J.10 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,9 HLD9) – gaz göçü grafiği – T: 150 °F	244
Şekil J.11 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,9 HLD9) – basınç grafiği – T: 150 °F	245
Şekil J.12 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,9 HLD9) – sıcaklık grafiği – T: 150 °F	245
Şekil J.13 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – gaz göçü grafiği	246
Şekil J.14 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – basınç grafiği	246
Şekil J.15 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – sıcaklık grafiği	247
Şekil J.16 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – gaz göçü grafiği	247

Şekil J.17 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – basınç grafiği	248
Şekil J.18 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – sıcaklık grafiği	248
Şekil J.19 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – gaz göçü grafiği – T:150 °F	249
Şekil J.20 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – basınç grafiği – T:150 °F	249
Şekil J.21 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – sıcaklık grafiği – T:150 °F	250
Şekil J.22 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – gaz göçü grafiği – T:150 °F -tekrar	250
Şekil J.23 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – basınç grafiği – T:150 °F –tekrar	251
Şekil J.24 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – sıcaklık grafiği – T:150 °F –tekrar	251
Şekil J.25 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9) – gaz göçü grafiği – T:150 °F	252
Şekil J.26 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9) – basınç grafiği – T:150 °F	252
Şekil J.27 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9) – sıcaklık grafiği – T:150 °F	253
Şekil J.28 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,8 HLD9) – gaz göçü grafiği – T:150 °F	253
Şekil J.29 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,8 HLD9) – basınç grafiği – T:150 °F	254
Şekil J.30 : G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,8 HLD9) – sıcaklık grafiği – T:150 °F	254

YÜKSEK BASINÇLI VE SICAK KUYULAR İÇİN GEÇİRİMSİZ ÇİMENTO HARCI TASARIMI

ÖZET

Bu çalışma, petrol, gaz ve jeotermal kuyularda kullanılan çimento harcı özelliklerinin ve özellikle geçirgenliğinin önlenmesi için yapılan deneysel çalışmaları kapsamaktadır. Deneyler, İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü Sondaj Akışkanları Laboratuvarlarında, Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarlarında ve Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı Araştırma Merkezi Sondaj Teknolojileri Çimento Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın odak noktası petrol ve doğal gaz sektöründe halâ sıcak bir gündem olan çimento matriks geçirgenliğinin önlenmesi amacı ile uygun çimento kompozisyonu tasarımının yapılmasıdır. Çimento matriks geçirgenliğinin önlenmesi için kod adı ARI olan bir karbonatlı magnezyum karmaşığı ilk defa bu çalışmada çimento katkısı olarak kullanılmıştır. ARI maddesi ile hazırlanan G Sınıf çimento örnekleri üzerinde gaz geçirgenliği ve gaz göçü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Matriks geçirgenliğinin ARI katkısının kullanılmasıyla önlenebildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, ARI ve yaygın olarak kullanılan diğer katkıları ile hazırlanan çimentoların farklı sıcaklık ve basınç koşullarında reoloji, su kaybı, kıvamlılık ve basınç dayanımı özellikleri de incelenmiştir.

ARI maddesinin neden olduğu yüksek çimento viskozite değerleri günümüzde yaygın olarak kullanılan ticarî katkıları ile kontrol altına alınabilmektedir. ARI maddesinin kıvamlılık (consistency) deneylerinde donma zamanını hızlandırıcı bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Bunun olumlu tarafı, çimentonun donması için beklenen süreyi (wait on cement – WOC) düşürmek ve böylece özellikle açık deniz sondaj maliyetlerinin azaltılabilmektedir.

ARI katkısının çimentonun su kaybı üzerinde olumlu veya olumsuz bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. ARI katkısıyla hazırlanan ve donması için küp kalıplara yerleştirilen çimento örneklerinin donma sürecinde çimento küpleri üzerlerinde biriken serbest suyun çok az olduğu veya küpler üzerinde hiç su oluşmadığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, donmuş çimentonun hacminde büzülme nedeniyle bir azalmanın oluşmadığı da görülmüştür. Bu sonuç çimento matriksinden bir akışkan

akışının oluşmaması için literatürde belirtilen hacim değişiminin önlenmesi kriterini sağlaması açısından çok önemlidir.

ARI katkısının çimentonun özellikle kısa dönemdeki dayanım özelliğini geliştirerek, önemli miktarda arttırdığı görülmüştür. ARI içeren çimento örneklerinin, hem kısa dönem hem uzun dönem için gaza geçirgen olmayan bir matriks oluşturduğu hem gaz geçirgenliği, hem de gaz göçü deneylerinde ortaya konmuştur.

DESIGNING IMPERMEABLE CEMENT SLURRY FOR HIGH PRESSURE AND HOT WELLS

SUMMARY

This study consists of experimental work performed to control the slurry properties and particularly the permeability of oil well cement at high temperature and high pressure conditions. The experiments were conducted in the Drilling Fluids Laboratories of Petroleum and Natural Gas Engineering Department and Rock Mechanics Laboratories of Mining Engineering Department of Istanbul Technical University and at the Cement Laboratories of Drilling Technologies of Turkish Petroleum Corporation Research Center.

Mitigation of cement matrix permeability, which is a hot topic in the industry, and designing proper cement composition are the main focus of the study. This is the first implementation of a magnesium complex with carbonate named ARI as a cement slurry additive in order to prevent the cement matrix permeability. Gas permeability and gas migration experiments on Class G cement slurry samples having substance ARI have been carried out. It was determined that the matrix permeability might be prevented by the usage of additive ARI. Furthermore, rheology, water loss, consistency, and strength properties of cement slurries prepared with substance ARI and commonly used commercial additives are also examined at high temperature and high pressure conditions.

The high viscosity values caused by ARI could be controlled by the usage of commercial additives. It is found that substance ARI has an acceleration effect on the consistency property. The benefit of this accelerator effect is that this situation might decrease the drilling costs (especially on offshore) due to waiting on cement (WOC).

The substance ARI has no effect on water loss property. It is determined that the free water accumulated on the top of set cubic cement samples taken out from molds are too few or none. In addition, it is observed that shrinkage effect did not occur at set cement samples. This result is very important due to preventing shrinkage effect criteria stated in literature in order to mitigate fluid flows through cement matrices.

ARI develops extra compressive strength of cement in an important rate, especially at early time periods. It was observed that ARI significantly improves the long term strength properties of cement samples. The gas permeability and gas migration experiments results indicated that cement samples prepared with ARI create impermeable cement matrices for short and long period of times.

1. GİRİŞ

Çimento doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Günümüzde çimento maden arama ve çıkarma, yol, tünel ve yeraltı geçiş inşaatları, zemin yapı ve etütleri ve petrol ve doğal gaz sondaj ve kuyu tamamlama operasyonları gibi çok geniş bir alanda kullanılmaktadır.

Bu bölümde çimentonun tarihçesi, üretimi, hammaddeleri, türleri ve standartları hakkında genel bilgiler verilecektir. Bu bilgilerle beraber petrol endüstrisinde çimento kullanımı, kullanılan çimentonun standartları, özellikleri ve çimentoyla beraber kullanılan katkı maddeleri ile ilgili bilgilerde yer alacaktır.

1.1 Çimentonun Tarihçesi

Farklı sektörler için hayati önem taşıyan ve önemli bir yer tutan çimentonun tam olarak ne zaman, kimler tarafından kullanılmaya başlandığı hakkında resmi kayıtlar bulunmamaktadır. "Çimento" kelimesi, yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince "caementum" kelimesinden türetilmiştir. Daha sonra bu kelime bağlayıcı anlamında kullanılmaya başlanmıştır [1].

Bilinen kayıtlı ilk betonarme yapı 1852 yılında yapılmıştır, fakat bağlayıcı malzemelerin kullanımı çok daha eski dönemlere dayanmaktadır. Kesin olmamakla beraber yapıların kruulmasında bağlayıcı maddeler kullanımının, ateşin bulunmasından hemen sonra, kireç ve alçı kullanımı ile başladığı düşünülmektedir. İlk bağlayıcı madde olarak kireç kullanılmıştır. Elde edilen tarihi bulgu ve kalıntılara göre, mağaralarda ısınmak ve/veya yemek pişirmek için yakılan ateş sonucunda eriyen kireçtaşları yağmur veya rutubetle temas ederek sönmüş kireç haline gelmiş ve kuruduktan sonra elde edilen tozun bağlayıcı özelliğinin farkına varılmıştır. Sönmüş kirecin ilk uygulamaları mağara duvarlarına yapılan resimlerde görülmüştür. Kireç mağaralarda iç ve dış dekorasyon ve sıva yapımında kullanılmaya başlanmıştır. Eski Mısır, Kıbrıs, Girit ve Mezopotamya bölgelerinde kirecin bir yapı malzemesi

olarak kullanılmasına ait örneklerle rastlanmıştır. Eski Yunanlılar ve Romalılar kireci hidrolik bağlayıcı olarak kullanmışlardır [1].

M.Ö. 70-25 yılları arasında yaşamış olan Mimar Vitruvius döneminin çok ötesinde "On Architecture" (Mimarlık) adlı 10 ciltlik bir kitap yazmıştır. Kitabında puzolan ve kireç karışımlarının hidrolik özelliklerinden bahsetmiş, hatta nehir ve deniz kıyısında yapılacak olan yapılarda kullanılabilecek harç için karışım oranı vermiştir [1].

Yapılan çalışmalarda, Anadolu'da Çatal Höyük'teki evlerin yapımında kullanılan sıvanın 7000 yıl kadar eski olduğu ortaya çıkarılmıştır. Tarihte Piramitlerin, Çin Seddi'nin ve değişik zamanlarda yapılan kalelerin yapımında o dönemin medeniyetini simgeleyen birçok değişik bağlayıcı madde kullanıldığı araştırmalar sonucunda anlaşılmıştır [2].

2000 yıl kadar önce, Romalılar söndürülmüş kireci volkanik küllerle ve sonraları, pişirilmiş tuğladan tozlarla karıştırarak bugünkü çimentonun özelliklerine yakın bir hidrolik bağlayıcı olarak kullanmaya başlamışlardır. Eski Yunanlılar Santorin Adasındaki volkanik tüfleri kireçle karıştırarak ve/veya killi kireç taşından elde ettikleri bir tür hidrolik kireçle harç yapmışlardır. Eski Yunanlılar ve Romalılar kireç ve puzolan karışımlarının hidrolik özelliğinin farkına varmış ve bunları birlikte kullanmışlardır [2].

Bağlayıcı malzemelerin kalitesi ve kullanımı konusunda ancak 18.yüzyılda kayda değer gelişmeler gösterilmiştir. 1756 yılında Şekil 1.1'de günümüzde çekilmiş bir fotoğrafı bulunan Eddystone Deniz Feneri'ni yeniden inşa etmekle görevlendirilen John Smeaton kirecin bağlayıcı ve kimyasal özelliklerini ilk anlayan kişidir. Daha sonraları Joseph Parker "Roman Cement" (Roma Çimentosu) adı ile bilinen bağlayıcıyı geliştirmiştir.

1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentinde, Joseph Aspdin isimli duvarcı ustası hazırladığı ince taneli kil ve kalker karışımını pişirdikten sonra öğüterek bağlayıcı bir ürün elde etmiştir. Aspdin, karışıma kum katıldığında zamanla sertleşme olduğunu görmüştür. Sertleşerek ortaya çıkan bu malzemenin İngiltere'nin Portland adasından elde edilen yapı taşlarını andırdığını gören Joseph Aspdin bu karışıma "Portland Çimentosu" ismini vermiştir. Bu bağlayıcı için 21 Ekim 1824 tarihinde "Portland Çimentosu" adı altında patent almıştır. Bu bağlayıcı daha sonraki yıllarda çok büyük gelişmeler gösterse de "portland" ismi aynen korunmuştur. Aslında Joseph tarafından

Üretilen bağlayıcı, üretim sırasında yeterince yüksek sıcaklıklarda pişirilmediği için günümüzde kullanılan portland imento sunun özelliklerine tamamen sahip olmamasına rağmen o dönemde yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Hatta İngiltere Kirkgate İstasyonunun yanında, halen ayakta olan "Wakefield Arms" binası Joseph Aspdin'in yaptığı bağlayıcı ile yapılmıştır [2]. Wakefield Arms binasının günümüzde çekilmiş bir fotoğrafı şekil 1.2'de verilmektedir.



şekil 1.1: Eddystone Deniz Feneri'nin fotoğrafı [3].



şekil 1.2: Wakefield Arms binasının cepheden çekilmiş fotoğrafı [4].

Hammaddelerin yüksek sıcaklıklara kadar pişirilip öğütülmesi ancak 19. Yüzyılın ortalarında geliştirilen bir teknik olmuştur. Isaac Johnson isimli bir İngiliz tarafından ilk defa 1845 yılında bu teknik kullanılmıştır. Daha sonra, ilk imento fabrikası İngiltere'de 1848 yılında kurulmuştur. İlk Alman imento Standardı 1860 yılında oluşturulmuştur. Amerikan Beton Enstitüsü'nün (ACI-American Concrete Institute) kuruluşu ve ilk Amerikan Yönetmeliklerinin oluşturulması 1913 yılındadır [5].

Türkiye’de ise ilk çimento fabrikası 20,000 ton/yıl kapasite ile 1911 yılında İstanbul Darıca’da kurulmuştur. Daha sonra bu fabrika 1923 yılında genişletilerek kapasitesi 40,000 ton/yıl’a yükseltilmiştir [6].

Cumhuriyetle birlikte ülkemizde yeni fabrikalar devreye girmiştir. 1926’da Ankara, 1930’da Kartal ve Zeytinburnu’nda kurulan yeni fabrikalar ile sayı artmıştır. 1943 yılında devlet tarafından kurulan ilk çimento fabrikası Sivas’ta hizmete girmiştir. 23 Ekim 1953 yılında Türkiye Çimento Sanayi T.A.Ş.’nin (ÇİSAN) kuruluşu ile hızlı bir gelişme dönemine girilmiştir. 70’li yıllardan itibaren çimento üretiminde yılda ortalama %7’lik bir büyüme görülmüştür. Özelleştirme uygulamalarının başlatılmasından önce devlet tarafından kurulmuş olan fabrikaların sayısı 22’ye ulaşmıştır. 1987 yılından itibaren başlayan özelleştirme çalışmaları ile devletin elinde bulunan fabrikaların bir kısmı özelleştirilmiştir. Bu dönemden sonra da özel sektör tarafından pek çok fabrika kurulmuştur. Halen kırkın üzerinde çimento fabrikası bulunan Türkiye, üretim açısından Avrupa’da ilk üçte, dünyada ilk yedide yer almaktadır [6].

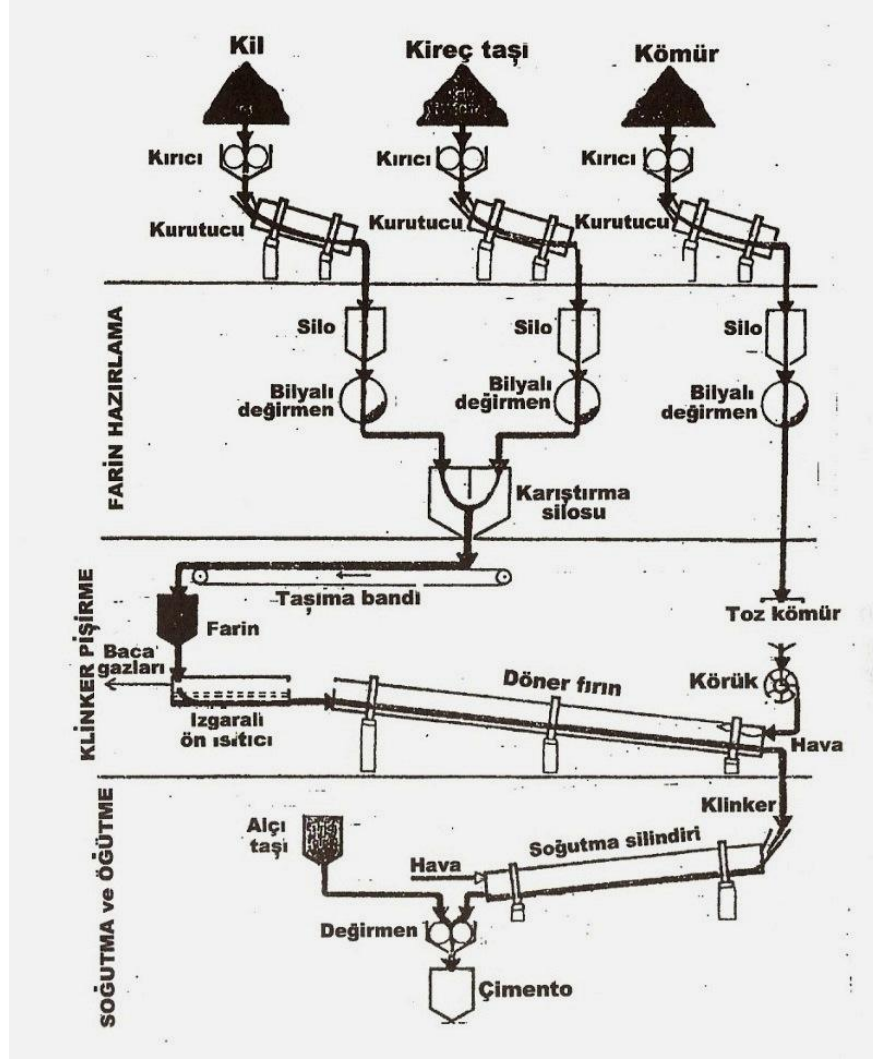
Günümüzde çimento genelde yapı malzemesi olarak kullanılsa da maden arama ve çıkarma, yol, tünel ve yeraltı geçiş inşaatları, zemin yapı ve etütlerinde ve petrol ve doğal gaz sektöründe kuyu içi koruma borusu destekleyicisi ve izolasyon malzemesi olmak üzere çok geniş bir alanda kullanılmaktadır.

1.2 Çimentonun Üretimi

Çimento, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bağlayıcı bir malzemedir. Killi ve kalkerli maddelerin uygun oranlarda karıştırılması ve yaklaşık 1400 – 1500 °C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin, uygun oranda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilir [7].

Çimento yaygın olarak kullanılmadığı dönemlerde yaş olarak üretilmekteydi. Yaş sistemde hammadde karışımı fırına yaş olarak %35 oranında su bulunan cüruf halinde girmektedir. Islak sistemde çimentonun çamur halindeyken homojen bir hale getirilmesi daha rahat olurken ilerleyen teknoloji ile birlikte kuru sistemlerde de homojenlik sağlanmasıyla büyük miktarda enerji tasarrufu sağlanmıştır. 20. yüzyılın ortalarından itibaren ıslak sistemler yerlerini kuru sistemlere bırakmışlardır. Kuru

sistem ile klinker üretimi işlemi Şekil 1.3'te gösterilmektedir. Kuru sistemde esas olarak üretim dört aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada ocaklardan çıkarılan kil ve kalker fabrikalara taşınır. İkincisinde hammaddeler kurutulur ve öğütülerek farin elde edilir. Bunu farinin pişirilerek klinkerin üretildiği aşama izler. Son adım olarakta klinker soğutulur ve öğütülerek çimentoya dönüştürülür [7].



Şekil 1.3 : Kuru sistem ile klinker üretimi akışı şeması [7].

1.3 Çimento Hammaddeleri

Çimento hammaddeleri kil, kireçtaşı (kalker), marn ve alçıtaşıdır. Kırılıp inceltelen kil ve kireçtaşı karıştırılarak silindirik şekilli bir döner fırının içine yüklenerek pişirilir. Meydana gelen ürüne klinker denir. Daha sonra klinkere biraz alçıtaşı (hacimce %2 - 3) katılarak çok ince toz halinde öğütülürse Portland çimento elde edilir [8].

Kalker sedimanter bir kayadır. Kalker doğada kalsit ve aragonit kristallerinden oluşmuş bir kayaç olarak bulunabileceği gibi, çift karbonat şeklinde yani dolomit olarakta bulunabilir. Kimyasal bileşiminde %90'a kadar kalsiyum karbonat (CaCO_3) vardır. Kalkerin sertlik derecesi, Mohr sertlik skalasına göre 3, özgül ağırlığı 2,5-2,7 gr/cm^3 'tür [8].

Kalkerler doğada genellikle saf halde bulunmayıp bileşimlerinde değişik oranlarda magnezyum karbonat, kil mineralleri, demir silikat-oksit ve silis gibi bileşikler içerir. Safsızlığa neden olan bu maddeler üretilen çimentonun kalitesini etkiler. Gerek öğütme gerekse pişirme sırasında sorun yarattığı için kalkerler içinde silisin bulunması istenmez [8].

Çimentonun ikinci derecede temel hammaddesi kildir. Çimentodaki alkalilerin ana kaynağı da kil bileşenleridir. Kil minerallerinin temel özelliği kimyasal bileşiminde alüminyum oksit (Al_2O_3) bulunması ve sulu alüminyum silikattan oluşmasıdır. Çimento bileşenlerinin içerisindeki kil miktarları değişimi Çizelge 1.1'de verilmektedir [7].

Çizelge 1.1: Çimento bileşenlerinin kil içeriğine göre sınıflandırılması [7].

ÇİMENTO BİLEŞENLERİ	CaCO_3 (%)	Kil (%)
Kireçtaşı	96-100	0-4
Marnlı kalker	90-96	4-10
Kireçtaşı marn	75-90	10-25
Marn	40-75	25-60
Killi marn	10-40	60-90
Marnlı kil	4-10	90-96
Kil	0-4	96-100

Çimento hammaddesi karışımında gerekli bir kimyasal oranının yeterli miktarda bulunmaması durumunda düzeltme maddeleri ilave edilir. Genel olarak düzeltme maddeleri silis eksikliği durumunda; kum, yüksek silisli killeri, diyatome toprağı, demir oksit eksikliği durumunda; demir cevheri ve pirit külü, ve alüminyum eksikliği durumunda ise boksittir [7].

Marn %50-70 kalker ve %50-30 kilden oluşmuştur. Özgöl ağırlığı 2,0-2,9 gr/cm³'tür. Çimento sanayisi için, kalker ve kilin beraber bulunduğu tek doğal hammaddedir. Sertliği kalkerin sertliğinden çok düşüktür. Marnın içeriğindeki kil miktarı arttıkça sertliği azalır [7].

Çimento yapımında genellikle %70 kalker ve %30 kil içeren marnlı kalker kullanılır. Marnlı kalker “doğal çimento kayası” olarakta adlandırılmaktadır. Marnlı kalkerin kolay sökülebilir nitelikte yumuşak olmasından dolayı işletme, öğütme ve pişirmede ekonomi sağlaması gibi özellikleri de vardır [8].

Alçıtaşı doğada genellikle iki şekilde bulunur. Bunlardan birincisi iki molekül kristal suyu içeren kalsiyum sülfat mineralinin bir şekli olan “jips” (CaSO₄.2H₂O) ve diğeri ise susuz kalsiyum sülfat anhidrittir. Alçıtaşı yataklarının büyük bölümünü anhidrit oluşturmaktadır. Anhidrite göre ekonomik olmamasından dolayı çimento üretiminde genellikle jips kullanılır. Çimento üretimi sırasında alçıtaşı, prizlenme süresini ayarlamak amacıyla klinker içine ağırlıkça %3-5 oranında karıştırılarak kullanılır [8].

1.4 Çimento Türleri

Farklı kaynaklarda değişik sınıflandırmalar yapılarak adlandırılmış olan çimento türlerine rastlanılabilmektedir. Günümüz endüstrisinde kullanım alanına ve ihtiyaca göre değişik özelliklerde çimento üretilebilmektedir. Çimento türleri portland çimentosu, yüksek fırın cüruf çimentosu, traslı çimento, katkılı çimento ve diğer çimentolar olmak üzere beş farklı sınıfa ayrılmaktadır [7].

Portland çimentosu: Betonarme yapılarda kullanımı en yaygın çimento türüdür. Portland çimentosu belirli oranda kalkertaşı ve kilin karıştırılıp klinkerde pişirilmesinden sonra bilyeli değirmende öğütülmesiyle elde edilir.

Yüksek fırın cüruf çimentosu: Granüle yakın fırın cürufu ile Portland çimentosu klinkeri karışımının az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesi ile elde edilir. Genelde, bu tür çimentolar deniz suyu ve diğer sülfatlı ortamlarda portland çimentosuna kıyasla daha yavaş gelişen ancak nihayetinde daha yüksek bir dayanıma sahip olurlar. Bununla birlikte geçirimsizlikleri daha düşüktür.

Traslı çimentolar: Silisli ve alüminli maddeler içeren volkanik tüflerdir. Kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri olmamasına rağmen, çimentodaki mevcut kireçle bu özelliği kazanırlar. Bu tür çimentolar imalat aşamasında portland çimentosu

klinkerine aktif volkanik tüfler veya benzeri traslar katılarak, bunların      lmesiyle elde edilir. Karışımdaki tras oranı %20 - %40 düzeyinde tutulur. Bu tür çimentoların ge irimsilli i az ve hidrasyon ısıları düşük olduğu için genellikle su yapılarında kullanılırlar [7].

Katkılı  imentolar: Portland  imentosu klinkerinin ağırlıkça en fazla %19'unun puzolanik malzeme ile değiştirilmesi ve alçıtaşı eklenmesiyle elde edilir. Katkılı  imento traslı  imento için belirtilen özelliklere sahiptir, fakat traslı çimentodan farkı puzolan oranının daha fazla olmasıdır.

Diğer  imento türleri de uçucu k ll   imento, süper sülfat  imentosu, sülfata dayanıklı  imento, erken dayanımı yüksek  imento gibi başlıklar altında sınıflandırılabilirler [7].

Petrol ve Doğal Gaz sektöründe kullanılan  imento türleri için Amerikan Petrol Enstitüsü (American Petroleum Institute – API) sınıflandırmalar yapmıştır. Bu sınıflandırmalar ilerleyen bölümlerde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

1.5 Çimento Standartları

Çimento, uluslararası standart sanayi tasnifinde (ISIC), 369 ana grup ve 3692 kod numarası ile sanayide kullanılan esas kimyasal maddeler grubunda yer alır [9].

Türkiye'de  imento üretimine ilişkin ilk geliştirilen standart 1959 yılının 6/640 numaralı standardıdır. Bu standartta değişik portland  imentosu, yüksek fırın cüruf  imentosu gibi  imento türlerine ilişkin üretim standartları belirlenmiştir. 1975 ve 1985 yılları arasında eski standartları iptal eden ve  imento çeşitlerini 6'dan 11'e çıkartarak 6 farklı standart geliştiren Türkiye, 2000 yılında Avrupa standartlarını norm haline getirmiş ve EN 197 standardını benimsemiştir. Bu standart çerçevesinde CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ve CEM V tipleri tanımlanmıştır. Ayrıca yeni katkı maddelerinin standartları ile yeni kimyasal, fiziksel, mekanik test metod ve uygulamaları da EN 197 kapsamındadır [6].

Türk standartları kataloguna göre  imento aşağıda belirtildiği gibi çeşitlendirilir:

Portland  imentoları ve katkılı portland  imentosu (TS EN 197-1 CEM I): Portland  imentoları sondajlarda en çok kullanılan  imentolardır.  inilecek derinliğe ve kuyularda karşılaşılacak sorunlara göre değişik türleri vardır [10].

Yüksek fırın cüruf çimentoları (TS EN 197-1 CEM II/BS – CEM III/A-B): Ani soğutma ile granüle haline getirilmiş bazik yüksek fırın cürufuyla portland çimento klinkeri ve alçıtaşının belirli oranlarda karıştırılarak öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır [11].

Traslı çimento (TS EN 197-1 CEM II/B-P): Traslı Çimento, kütlece 20-40 kısım tras ile karşılıklı olarak 80-60 kısım portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen bir hidrolik bağlayıcıdır [12].

Beyaz portland çimentosu (TS-21): Beyaz Portland çimentosu ise, özel nitelikli kil ile kireçtaşının birlikte pişirilmesi sonucu elde edilen beyaza yakın renkli klinkerin bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesiyle elde edilmektedir [13].

Harç çimentosu (TS-22): En az % 40 portland çimentosu klinkeri ile çözünmeyen kalıntı miktarı en çok % 50 olacak şekilde doğal puzzolanlar ve uçucu kül gibi çeşitli maddelerin bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır [14].

Uçucu küllü çimento (TS EN 197-1 CEM II/A-V – B-V): Uçucu küller silissi veya kalkersi yapıda olabilir. Silissi uçucu külün puzolanik özellikleri vardır. Kalkersi uçucu külün ise hidrolik özelliklerine ilaveten puzolanik özellikleri olabilir. Uçucu külün kızdırma kaybı, kütlece % 5,0'i geçmemelidir [15].

Sülfatlı cüruf çimentosu (TS EN 197-1 CEM III/B-C): Alüminyum içeriği fazla olan yüksek fırın cürufunu % 80, portland çimentosu klinkerini % 5 ve alçıtaşını da % 15 oranlarında içerir [16].

Katkılı çimento (TS EN 197-1 CEM II/A-P): Kütlece en çok 19 kısım puzolanik madde ile karşılıklı olarak en çok 81 kısım portland çimento klinkerinin, bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi ile ortaya çıkmaktadır. Puzolanik maddeler, kendi başlarına hidrolik bağlayıcı olmadıkları halde, ince olarak öğütüldüklerinde rutubetli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellikte bileşikler oluşturan maddelerdir [17].

1.6 Petrol Endüstrisi Çimento Standartları

Petrol endüstrisinde kullanılan standartlar API tarafından belirlenmiş olan API SPEC 10 A “Çimento ve Kuyu Çimentolama Şartnameleri” (Specification for Cements and Materials for Well Cementing Petroleum and Natural Gas Industries—Cements and

Materials for Well Cementing) ve API SPEC 10 B-2 (Recommended Practice for Testing Well Cements Petroleum and Natural Gas Industries—Cements and Materials for Well Cementing—) ve 10 B-5 (Recommended Practice on Determination of Shrinkage and Expansion of Well Cement Formulations at Atmospheric Pressure) “Çimentonun Fiziksel Olarak Test Edilme Prosedürleri” olmak üzere iki standart göze çarpmaktadır. Bu standartlar çimentonun yoğunluk, donma zamanı, su kaybı (filtrasyon), akma (viskozite), basınç dayanımı özelliklerini belirler [18-20].

API petrol endüstrisinde kullanılan çimentoları A’dan H’ye kadar olmak üzere, kullanım şartlarına göre yedi sınıfa ayırmıştır.

A sınıf çimento 1830 metre derinliğe kadar kullanılır. Özel kuyu koşullarında kullanılamayan olağan bir çimentodur. ASTM C150 tip1 ile benzer özelliktedir.

B sınıf çimento da 1830 metre derinliğe kadar kullanılır. A sınıfından farklı olarak, orta yüksek derecede sülfat içeren ortamlarda kullanılabilir. ASTM C150 tip2 ile benzer özelliktedir.

C sınıf çimento da 1830 metre derinliğe kadar kullanılır. Erken dönem yüksek dayanım istenen ortamlarda tercih edilir. B sınıfı gibi orta ve yüksek sülfat direnci nedeni ile sülfat içeren ortamlarda kullanılabilir. ASTM C150 tip3 ile benzer özelliktedir.

D sınıf çimento 1830 ile 3050 metre arası derinliklerde kullanılır. Yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında tercih edilir. Orta ve yüksek derecede sülfat içeren ortamlarda kullanılabilir.

E sınıf çimentonun özellikleri D sınıf ile hemen hemen aynıdır. Fakat 3050-4270 metre gibi daha derin ortamlarda kullanılabilmektedir.

F sınıf çimento 3050-4880 metreye kadar aşırı sıcaklık ve basınç içeren formasyonlarda kullanılır. Sülfat içeren ortamlarda etkilidir.

G sınıf çimento 2400 metre derinliğe kadar kullanılan temel çimento tipidir. Çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak farklı sıcaklık ve basınç durumlarında ve derinliklerde kullanılabilir. Yüksek sülfat içeren ortamlarda da etkilidir.

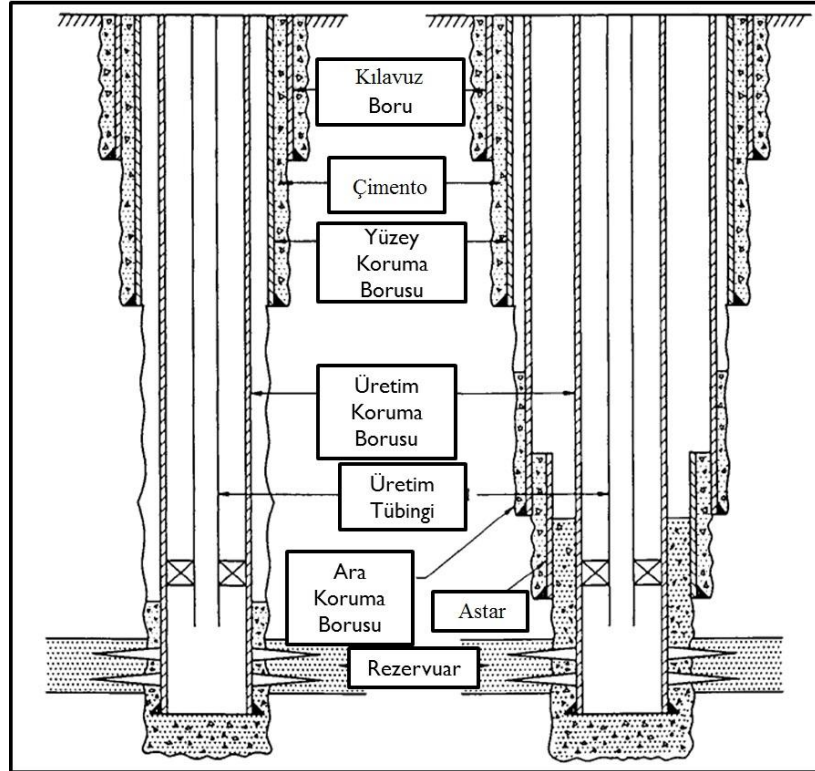
H sınıf çimento 2400 metre derinliğe kadar kullanılır. G sınıf çimento gibi, H sınıfı çimento da çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak farklı sıcaklık ve basınç

durumlarında ve derinliklerde kullanılabilir. Fakat H sınıf çimento sadece orta derece sülfat içeren ortamlarda da etkilidir.

1.7 Petrol Endüstrisinde Çimento

Çimentolama en önemli sondaj ve kuyu tamamlama operasyonlarından birisidir. Çimento petrol, doğal gaz ve jeotermal sektöründe kuyunun sondajı ve tamamlanması sırasında değişik amaçlarda kullanılmaktadır. Kuyuya indirilen koruma boruları ile kayaç yapısı (formasyon) arasındaki halka boşluğa doldurularak dizinin yerleştirilmesinde, çamur kaçaklarını önlemede, kuyudan yüzeye kontrolsüz doğal gaz veya petrol akışını önlemede, kuyu dibini doldurmada, kuyunun terkedilmesinde ve artık üretmeyen delgilerin (perforasyonların) kapatılmasında kullanılır [21].

Kuyuya yerleştirilen koruma boruları indirildikleri derinlik ve indirilme sıralarına göre farklı adlar alabilmektedir. Koruma boruları indirildikleri derinliğe kadar çimentolanır. Örnek olması amacıyla, Şekil 1.4'te farklı derinliklere indirilmiş koruma borusu ve çimentolama yapılmış bölgeler görsel olarak verilmiştir.



Şekil 1.4: Farklı kademelerdeki koruma borusu ve çimentolama görseli, kaynak [22]'den uyarlanmıştır.

Çimento, Trikalsiyum Silikat ($C_3S - 3CaO.SiO_2$), Dikalsiyum Silikat ($C_2S - 2CaO.SiO_2$), Trikalsiyum Aluminat ($C_3A - 3CaO.Al_2O_3$) ve Tetrakalsiyum Aluminoferrit ($C_4AF - 4CaO.Al_2Fe_2O_3$) olmak üzere dört temel bileşikten oluşur. American Petroleum Institute (API) kullanılan formasyonun derinliğine, sıcaklığına ve basıncına bağlı olarak sekiz tip çimento sınıfı tanımlar ve bunları A'dan H'ye kadar sıralandırmaktadır. Bu çimentoların bileşimleri Çizelge 1.2'de verilmektedir.

Önceki bölümde belirtildiği gibi her tip çimentonun özellikleri ve kullanıldıkları derinlikler farklıdır. Bölüm 1.6'da detaylandırılan bu özellikler özet olarak Çizelge 1.3'te verilmiştir. Petrol sektöründe ağırlıklı olarak API tarafından G ve H Sınıfı olarak belirtilen çimentolar kullanılmaktadır. Bununla beraber çimentonun kullanılacağı formasyon yapısına, sıcaklığına veya basıncına göre su veya katkı maddeleri eklenerek istenen özellikler sağlanarak hemen hemen her tür kuyu koşulu için çimentolama yapılabilmektedir.

Çimento hammaddesi karışımındaki diğer önemli bileşenler Magnezyum oksit (MgO), Alkaliler, Kükürt (S), Klorür (Cl), Fosfor (P), su ve karbondioksittir.

G Sınıf çimento, hidratasyona uğrama sırasında üç aşamadan geçer. Bunlardan birincisi ilk donma (initial set) olarak adlandırılan aşamadır. Bu aşamada çimento plastik özelliğini kaybeder. Bu süreci son donma (final set) denilen süreç izler. Son donma süreci çimentonun ilk sertleşmeye kadar geçen süreci kapsamaktadır. Son aşama sertleşme (hardening) aşamasıdır. Bu süreç ilk donmadan sonraki 2-5 saatlik süreçtir [21].

Çizelge 1.2: API tarafından sınıflandırılan çimentoların bileşimleri [21].

Çimento Türü	Bileşim %			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
A	53	24	8	8
B	47	32	3	12
C	58	16	8	8
D-E	26	54	2	12
G-H	50	30	5	12

Çimentonun yapısında dört kristal faz vardır. Hidratlaşmış hammadde klinklerinin başlıca ana fazları Çizelge 1.4’te verilmiştir. Çizelge 1.4’te verilen ana bileşenlerin, çimento hidrasyon ısı ve dayanım değerleri Çizelge 1.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 1.5’te görüldüğü gibi çimentonun dayanımını tayin eden bileşenler, Trikalsiyum Silikat (C_3S) ve Dikalsiyum Silikat (C_2S) olmak üzere kalsiyum silikatlı bileşenlerdir.

Çizelge 1.3: API tarafından sınıflandırılan çimentoların özellikleri [21,23].

Çimento Türü	Su İçeriği (%) (çimento ağırlığına)	Şerbet Yoğunluğu, lbm/gal	Çalışma Derinliği, m	Çalışma Sıcaklığı, °F (°C)	Yüzey Alanı, cm ² /gr
A	46	15,6	0-1830	80-170 (27-75)	1600
B	46	15,6	0-1830	80-170 (27-75)	1600
C	56	14,8	0-1830	80-170 (27-75)	2200
D	38	16,4	1830-3660	170-260 (75-127)	1500
E	38	16,4	1830-4270	170-290 (75-143)	1500
F	38	16,2	3050-4880	230-320 (110-160)	-
G	44	15,8	0-2440	80-200 (27-93)	1800
H	38	16,4	0-2440	80-200 (27-93)	1600

Çizelge 1.4: Klinker ana fazları [21].

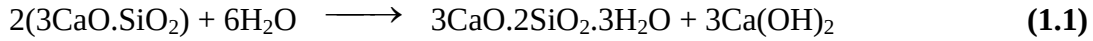
Kimyasal Formülü	Teknolojik Sembolü	Kimyasal Adı	Teknolojik Adı
$3CaOSiO_2$	C_3S	Trikalsiyum Silikat	Alite
$2CaOSiO_2$	C_2S	Dikalsiyum Silikat	Belite
$3CaOAl_2O_3$	C_3A	Trikalsiyum Alüminat	Celite
$4CaAl_2O_3Fe_2O_3$	C_4AF	Tetrakalsiyum Alümina ferit	Millerit

Çizelge 1.5: Klinker ana fazlarının özellikleri [21].

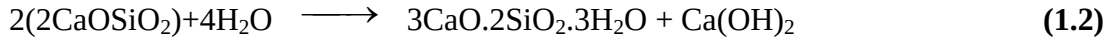
Çimento Özellikleri	BİLEŞENLER			
	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
Reaksiyon hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon ısısı	Orta	Az	Çok	Orta
Erken dayanım	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Geç dayanım	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

Çimentoyu oluşturan dört ana bileşiğin hidratasyon denklemleri aşağıda verilmektedir [24].

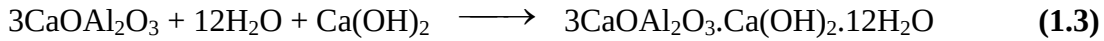
Trikalsiyum Silikat (C₃S): Kalsiyum oksit (CaO) ve silisyum oksitin (SiO₂) kombinasyonlarından oluşur. Çimentonun ana bileşenidir. Geciktirilmiş dayanımlı çimentolarda % 40 – 45, erken dayanımlı çimentolarda % 60 – 65 oranında bulunur ve dayanımın her aşamasında payı vardır. Trikalsiyum silikat için hidratasyon denklemi Denklem 1.1’de verilmiştir.



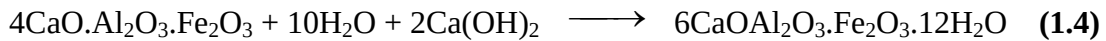
Dikalsiyum Silikat (C₂S): Kalsiyum oksit (CaO) ve silisyum oksitin (SiO₂) kombinasyonlarından oluşur. Çimentonun son dayanım değerlerinde önemli rol oynar. Denklem 1.2’de dikalsiyum silikat için hidratasyon denklemi verilmiştir.



Trikalsiyum Aluminat (C₃A): Kalsiyum oksit (CaO) ve alüminyum oksitin (Al₂O₃) kombinasyonlarından oluşur. C₃A, çimentonun son ve en yüksek dayanım değerinde rol oynamasa da, erken dayanım için önemlidir. Hidratasyonu egzotermiktir. Denklem 1.3’te trikalsiyum aluminat için hidratasyon denklemi verilmiştir.



Tetrakalsiyum Alumina Ferit (C₄AF): 4CaO, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bileşimlerinden oluşur. Basınç dayanıma etkisi yoktur. Denklem 1.4’te tetrakalsiyum alumina ferit için hidratasyon denklemi verilmiştir.



Çimento torbaları açık havada bırakıldığında karbondioksit (CO₂) ve nem ile tepkimeye girerek topaklaşma gözlenir. Bu da çimentonun özelliklerinin bozulmasına ve kullanılmaz hale gelmesine sebep olur. Çimentonun havayla tepkimesi yavaş gelişen bir olaydır.

1.8 Petrol Endüstrisinde Kullanılan Çimento Katkı Maddeleri

Petrol endüstrisinde günümüzde farklı yeraltı koşulları ve çimento tipleri için değişik amaçlarla kullanılan 40'ın üzerinde çimento katkı maddesi vardır. Bu maddelerin çoğu katı halde ve toz şeklindedir ve çimentonun sahaya taşınmasından önce veya sahada çimentoya katılırlar. Özellikle daha yaygın kullanılan G ve H Sınıf çimentolar için geliştirilen katkı maddeleri mevcuttur.

Bu katkı maddeleri kullanım alanlarına göre bir kaç başlık altında toplanabilir. Bu başlıklardan bazıları yoğunluk, reoloji, donma zamanı, su kaybı kontrol katkıları ve alışılmadık problemler için geliştirilen katkılardır. Bu katkıların ikincil etkilediği özellikler de vardır.

Genel olarak katı toz şeklinde olan katkı maddeleri çimentoya eklenirken çimento ağırlığınca (by weight of cement-BWOC) yüzde olarak belirtilerek çimentoya katılır. Sektörde pek çok farklı firmanın değişik isimlerle adlandırdığı katkı maddeleri mevcuttur. Bu katkılardan bazılarının fiziksel özellikleri ve kullanım amaçları Çizelge 1.6'da verilmiştir.

Çizelge 1.6: Bazı katkı maddelerinin fiziksel özellikleri [25].

Malzeme Adı	Yığın Yoğunluğu (lbm/cuft)	Özgül Ağırlık	Özellik
Barite	135	4,23	Ağırlaştırma
Bentonit (jel)	60	2,65	Çimento şerbeti hacmi arttırma ve ağırlığı azaltma
Kalsiyum Klorür (toz)	51	0,84	Hızlandırıcı - Donma zamanı azaltma
Cal-Seal 60	75	2,70	Hızlandırıcı - Donma zamanı azaltma
CFR - 3	38	1,17	Viskozite kontrol
CFR - 6	43	1,3	Viskozite kontrol
HALAD - 9	37,2	1,22	Su kaybı kontrol
HALAD – 322	35,2	1.28	Su kaybı kontrol
HR – 800	48	1,85	Donma zamanı geciktirici
NF – 6	48	0,925	Köpük önleyici
Tuz (NaCl)	71	2,17	Donma zamanı azaltma
Silika Unu	70	2,63	Dayanım arttırıcı

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çimentolama operasyonları petrol endüstrisinde kuyuların başarıyla tamamlanmaları ve üretime konulmaları açısından çok önemlidir. Çimento kuyunun stabilitesinin sağlanması, üretim zonlarının kirlenmemesi ve üretimin sağlıklı bir şekilde devam edebilmesi için hayati önem taşır. Bu nedenle çimentonun kuyu koşullarına göre istenen özelliklere sahip olması istenir.

2.1 Donma Sürecinde Hacimsel Değişim

Portland çimento su ile reaksiyona girdiğinde net hacimde azalma meydana gelmektedir. Hacimdeki azalma, mutlak yoğunluğun ilk yoğunluktan fazla olmasından dolayı, mutlak hacimdeki azalma olarak nitelendirilebilir. Mutlak hacimdeki azalmaya rağmen, donan çimentonun dış boyutları ve/veya kaba hacminde değişim yoktur veya çok az miktarda azalmaktadır ve bunun sonucunda matriksin gözenekliliği artmaktadır [26].

Donma sürecinde gerçekleşen bu hacimsel değişime büzülme etkisi (shrinkage effect) denilmektedir. Büzülme etkisi istenmeyen bir durumdur. Büzülme etkisi sonucunda çimentonun iç kesimlerinde kırılmalar, çatlaklar ve kanallaşmalar oluşabilir. Bu durum da çimentonun dayanımını düşüreceği gibi, geçirgen bir yapıya bürünmesini ve en önemli görevlerinden birisi olan izolasyon ve destekleme görevlerini yerine getirememesine neden olabilir.

2.2 Gözeneklilik

Gözeneklilik çimento için önemli bir faktördür. Çünkü çimentonun geçirgenlik ve sıkıştırma dayanımı gibi fiziksel özellikleri gözenekliliğin değişimine bağlı olarak değişim gösterecektir. Çimentonun gözenekliliğini ölçmek için herhangi bir standart yoktur. Ancak Dowell Schlumberger civa porozimetresi (Mercury Porosimeter) kullanarak elde ettiği sonuçlar ile ilgili herhangi bir sayısal değer vermemiş, sadece gözenekliliğinin düşük olduğunu belirtmiştir [24].

2.3 Reoloji ve Jel Kuvveti

Çimentonun kuyunun koruma borusu ve formasyon arasında kalan boşluğu tamamen doldurması, kuyunun ömrü boyunca işlevlerini yerine getirmesi bakımından hayati önem taşımaktadır. Yüzeyde hazırlanan çimentonun kuyuya etkin ve güvenli bir şekilde doldurulması, çimentonun reolojisine ve yüzeyde bulunan çimento pompasının gücüne bağlıdır. Çimentonun istenen bölgelere ulaşmaya kadar akışkanlığını koruması istenir. Akışkanlığını ne kadar korursa, yüzeyde çimentoyu basmak için gerekli olan pompa basıncı o kadar düşük olacaktır. Çimentonun reolojisi, kıvamlılığı ve yüzeydeki pompanın gücü o çimentonun pompalanabilirliğini belirler.

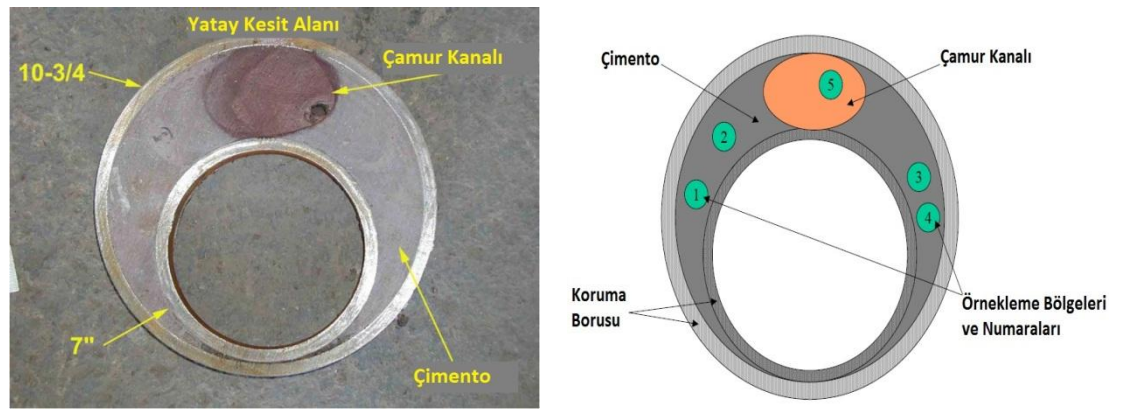
Çimento sıvı fazdan katı faza geçme sürecinde hidrostatik basıncını kaybetmesi ve bu sebeple formasyondan herhangi bir akışkan girişi olması durumunda, bu gaz girişine direnç gösteremeyebilir. Yapılan deneysel çalışmalarda, bu faz dönüşümü sürecinde çimentonun yaklaşık olarak 20 lb/100 ft²'lik bir jel kuvveti geliştirmesinin akışkan girişini engelleyebilecek ölçütlerden birisi olduğu belirtilmektedir [26,27] .

Çimentonun kuyuya türbülanslı akış rejiminde basılması durumunda, anülüsü daha etkin doldurduğu ve bağ oluşturduğu bilinmektedir. Bununla beraber çimentonun yüzeyde homojen olarak karışması ve kuyuya homojenliğini koruyacak şekilde basılması çok önemlidir. Çimento şerbetinin reolojisi ve jel kuvveti istenen değerlerde olmasına rağmen, karışımın homojen olmamasından kaynaklanan sorunlardan dolayı, çimento kuyuda görevlerinin yerine getiremeyebilir [21].

Soter'in 2003 yılında yaptığı doktora tezinde bu durumdan bahsedilmektedir. Soter çalışmasında gerçek sahalardan elde ettiği içerisinde çimento bulunan ve kesilmiş koruma borusu anülüsünden örnekler almıştır. Şekil 2.1'de alınmış örneklerden birinin fotoğrafı ve görseli görülmektedir. Fotoğrafta iki farklı koruma borusu arasında kalmış alanda donmuş çimento görülmektedir. Çimento üzerinde bulunan çamur kolonu çimento içinde kalarak donma gerçekleşmiştir. Çimento içinde kalan bu çamur kolonu bir kanal oluşturarak çimentonun stabilitesini bozmuş ve homojen olması gereken çimentonun heterojen bir yapıda olmasına neden olmuştur. Bu örneğin farklı bölgelerinden örnekleme yapmış ve X-ray yöntemi ile bu örneklere analiz yaparak mineral içeriklerini belirlemiştir. Çizelge 2.1'de X-ray analizi sonucu elde edilen veriler görülmektedir. Aynı derinlikte bulunan çimento için 5 farklı

bölgede de farklı mineral içerik elde edildiği görülmektedir. Bu durum çimentonun homojen bir yapıya sahip olmadığını göstermektedir. Soter tezinde çimentonun homojenliğinin sağlanmaması durumunda, çimentonun donma sürecinde görevlerini yerine getiremeyeceğini belirtmiş ve özellikle gaz içeren formasyonlardan kuyuya girişler olabileceğinden bahsetmiştir [28].

Soter'in çalışmasında bahsettiği durum önemlidir. Çimentonun tasarım aşamasında homojen olarak düşünülmesine rağmen, gerçek uygulamalarda homojenliğin elde edilememesi kuyunun kaybedilmesine neden olabilir.



Şekil 2.1: Yatay kesiti alınmış çimento ve koruma borusu örneği, kaynak [28]'den uyarlanmıştır.

Çizelge 2.1 Örneklemlerin X-ray analizi sonuçları [28].

Mineral	Örnek 1	Örnek 2	Örnek 3	Örnek 4	Örnek 5
Barit	%49	%58	%71	%64	%64
Hematit	%33	%27	%7	%22	%23
Kalsit	%9	%6	%4	%4	%13
Kuartz	%9	%10	%17	%10	%0
Kil	%0	%0	%0	%0	%0

2.4 Dayanım

Petrol ve doğal gaz sektöründe çimentonun optimum dayanım değeri ile ilgili tartışmalar uzun süredir devam etmektedir. En başlarda formasyonun dayanımına yakın dayanıma sahip çimento kullanmak genel bir kural gibi uygulanıyordu. Fakat bu durum, derin kuyularda 20.000 psi (~140 Mpa) basınca sahip kayalara rastlanılmasından sonra tekrar gözden geçirilmek durumunda kalınmıştır. Günümüzde kullanılan çimentolar ile bu değerlere ulaşmak mümkün değildir [29].

Bununla birlikte, çimento operasyonundan sonra sondaja devam etme zamanı açısından çimentonun zamana bağlı dayanımının nasıl değiştiğinin bilinmesi çok önemlidir. Bunun için kabul edilmiş bir kural yoktur. Bazı şirketler sondaj planlamalarını, 24 saat beklemek üzerine yaparken, bazıları 8 saatten fazla beklememeyi uygun görmektedir. Günümüzde, özellikle deniz sondajlarının yüksek günlük maliyetleri sebebiyle çimento için bekleme süresinin mümkün olduğu kadar kısa tutulması tercih edilmektedir. Sektörde ampirik olarak kabul görmüş olan uygulama çimentonun 500 psi sıkıştırma (compressive strength) dayanımı (40 psi'lık bir gerilmeye denktir) geliştirdiği zaman kadar beklenip, sondaja devam edilmesidir.

Yapılan çalışmalarda, 500 psi'lık bir basınç dayanım değerinin, koruma borusunu yeteri kadar desteklediği gözlemlenmiştir. Bu değerden sonra sondaja devam etmenin güvenli olduğu kabul edilmektedir [20,23].

Çimento tasarımı yapılırken kullanılan suyun miktarı da dayanım açısından önemlidir. Yapılan araştırmalar yüksek su miktarıyla hazırlanan çimentonun dayanımının azaldığını ortaya koymaktadır [21,26].

Koruma borusu (casing) arkasındaki çimento, formasyon yüklerine dayanabilmelidir. Bununla birlikte, çimentonun kuyu içinde hidratlaşması, rezervuardan üretim, çimento ve koruma borusu basınç dayanım testleri sırasında oluşabilecek basınç ve sıcaklık değişimleri gibi durumlarda da çimentonun dayanım göstermesi gerekmektedir [30-32].

2.5 Geçirgenlik

Bölgesel izolasyonda çimentonun geçirgen bir yapı gösterip göstermemesi hayati önem taşımaktadır. Başlangıçta donmuş (prizlenmiş) çimentonun geçirgenliği düşüktür. Ancak, zaman geçtikçe çimentonun geçirgenlik değeri artmaktadır [26].

Geçmiş dönemlerde çok fazla üzerinde durulmamış olsa da, günümüzde çimento geçirgenliği değerinin bilinmesi ve giderilmesi büyük önem taşımaktadır. 1990'lı yılların sonundan itibaren bu konu üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiştir. Açıkdeniz (offshore) platformlarında 2000'li yıllarda yaşanan kazaların sebeplerinin çimento tasarımına ve geçirgenliğine dayandırılmış olması, bu konunun ne kadar önemli olduğunu da ortaya koymaktadır.

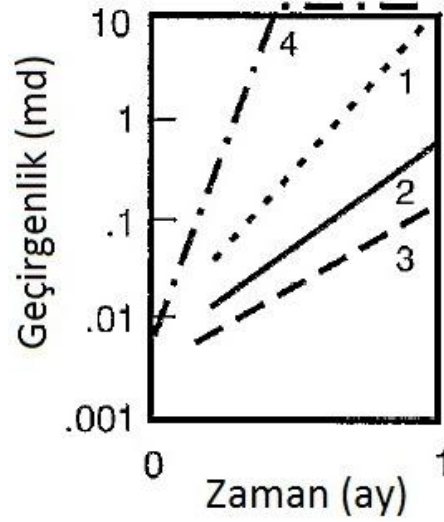
Çimentonun geçirgenliği sıvı ve gaz geçirgenliği olarak ayrı ayrı değerlendirilir. Ancak, donmuş çimentonun sıvı geçirgenliği genellikle üretim yapan formasyonların geçirgenliğinden çok daha düşüktür. Öyle ki, çimento dökülmesinden itibaren geçen yedi günlük süreden sonra, genellikle sıvı geçirgenlik değerleri ölçülemeyecek kadar düşük değerlere ulaşabilir [23].

Çimentonun gaz geçirgenliği, normal olarak sıvıya göre daha yüksektir. Çimentonun geçirgenliği çimentonun tutunması istenen formasyon değerlerinden daha düşük değerlerde olsa da, çimentonun 0,1 md'lik bir geçirgenlik değerine sahip olması, gaz akışı için yeterlidir [23,33].

Katkısız çimentonun geçirgenlik değeri 0,1 md'den daha yüksektir. Çimento geçirgenliği zamanla artar ve koşullara bağlı olarak 10 md seviyelerine çıkabilir. Nelson ve Eliers yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklıklı bir ortamda farklı yoğunluktaki G ve H sınıfı çimentoları bir ay boyunca yaşlandırmışlardır. Çimentonun geçirgenliğinin zamanla artış gösterdiğini ve 10 md seviyelerine çıktığını gözlemişlerdir. Bu durum Şekil 2.2'de verilen grafikte 1 ve 2 numara ile gösterilenler G sınıfı çimento ve 3 ve 4 numara ile gösterilenler H sınıfı çimentoya ait zamana bağlı geçirgenlik değerleri ile gösterilmiştir. Nelson ve Eliers çalışmalarında çimentonun önerilen değer olan 0,1 md değerinin zamanla 10 ile 100 katı arası geçirgenlik değeri geliştirdiğini belirtmişlerdir. Elde edilmiş olan bu geçirgenlikler sıvı geçişi için bile yüksektir [34].

Yüksek basınçlı gaz kuyularında çimentolama sonrası gaz akışını kontrol etmek önemli bir faktördür. Kullanılacak çimento şerbeti tasarımı yanlış yapıldığı zaman,

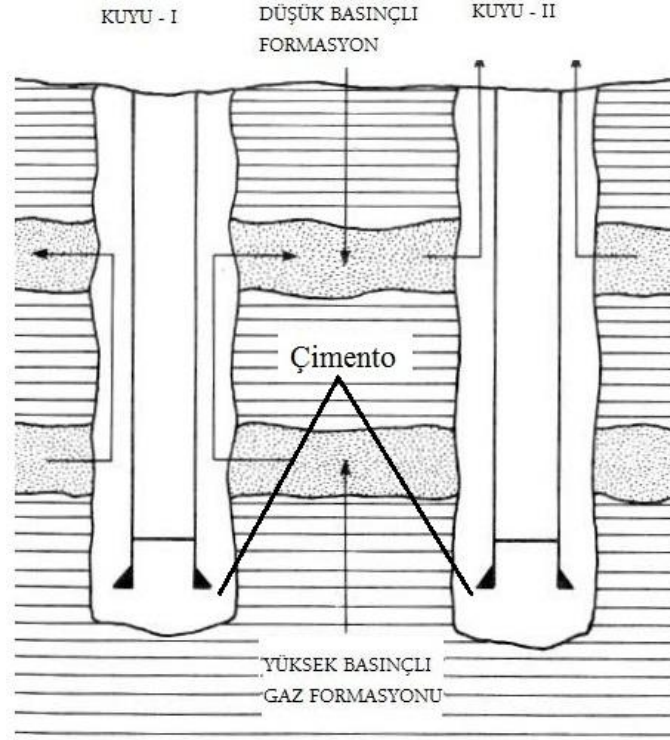
çimentonun donma sürecinde, gaz çimento matriksinden yüzeye doğru akışa geçecektir. Bu akış engellenemediği takdirde, yüzeyde yüksek basınçlara, fişkırmalara (blowout) yani kuyunun kontrolsüz akışına, zayıf bölgesel izolasyonlara, üretim olmayan bölgelere gaz kaçaklarının olmasına ve üretim kayıplarına neden olacaktır [26] .



Şekil 2.2: G sınıfı (1,2) ve H sınıfı (3,4) çimentoların zamana bağlı geçirgenlik davranışları [34].

Kuyudaki çimento geçirimli bir yapıdaysa, kuyu çevresinde bulunabilecek yüksek basınçlı bir gaz formasyonundan doğrudan yüzeye ve/veya kuyunun daha sıkı bölgelerinde bulunan daha düşük basınçlı bir formasyona gaz geçişi olabilir. Bu duruma gaz göçü (gas migration) denmektedir. Şekil 2.3'te Nelson ve Guillot'un bu durumu temsili olarak görselleştirdikleri çizim görülmektedir. Yüksek basınçlı gaz formasyonundan çıkan oklar, gazın çimento içerisindeki akışını göstermektedir [26].

Formasyondan koruma borusu arkasındaki çimento gaz geçişi olmasının pek çok nedeni olabilir. Bu nedenler yoğunluk farkı, zayıf çamur keki kaldırımı (removal), erken jelleşme veya köprü oluşumu (bridging), yüksek su kaybı, yüksek geçirgenlikli çimento, hacim kaybeden ve büzülen çimento, basınç dayanım kayıpları ve yüzeyler arası bağ sorunları olabilir. Şekil 2.4'te Pafitis ve Bonett'in bu durumları temsili olarak görselleştirdikleri çizim görülmektedir. Şekilde mavi renk ile gösterilen oklar akışkan akışı olan bölgeyi ve akışın yönünü vermektedirler [37].



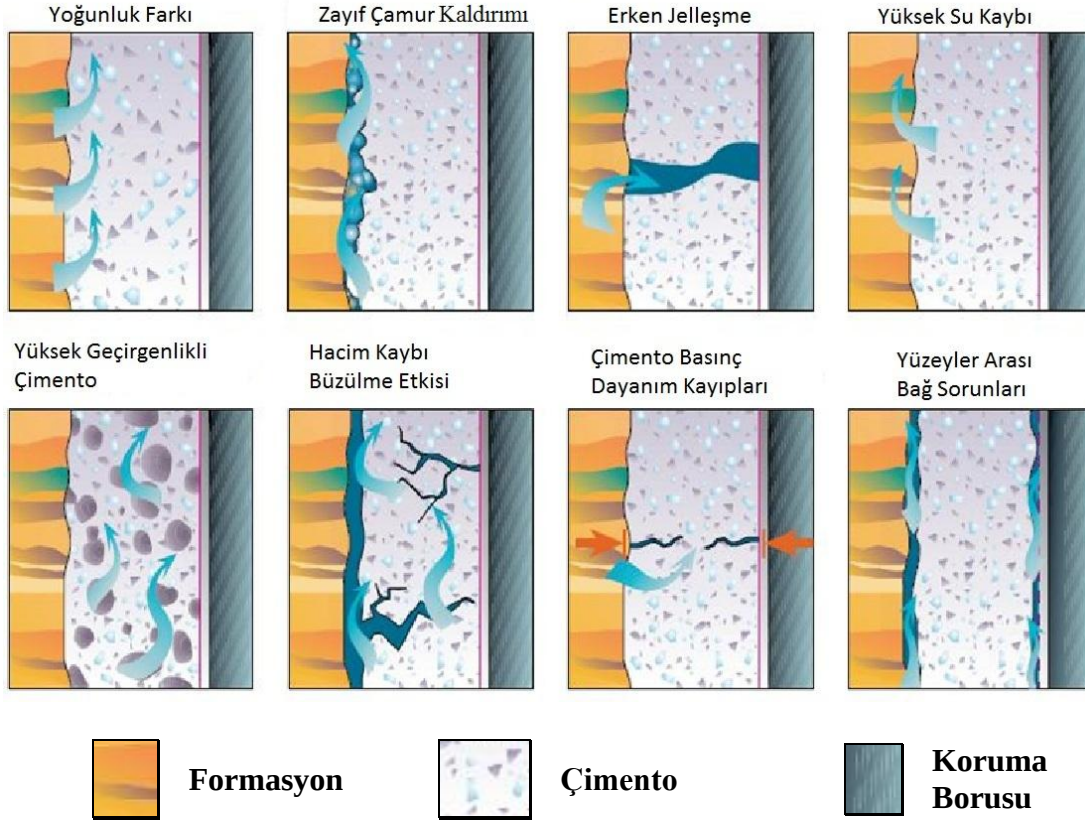
Şekil 2.3: Koruma borusu arkasında gaz akışı oluşumu, kaynak [26]'dan uyarlanmıştır.

Çimento içinde yoğunluk farklılıkları bulunuyor ise, diğer bir deyişle, çimento boyunca özellikler her yerde aynı değilse, çimentonun formasyon basıncına bölgesel direnç gösterememesi durumları söz konusu olabilir. Bu durum, gazın çimento içine göç etmesi ile sonuçlanabilir. Benzer durum erken jelleşme, yüksek su kaybı ve zayıf çamur keki kaldırımı olması durumlarında da gerçekleşebilir.

Çimentonun homojen olmasına rağmen, geçirgenliğinin yüksek olduğu durumda, yine de gaz göçü gerçekleşebilir. Daha önceki bölümde belirtildiği gibi, gazın çimento matriksinden akışı için matriksin 0,1 md değerinde bir geçirgenliğe sahip olması yeterli bir durumdur [26,35,36].

Bunlara ek olarak, daha önceki bölümlerde belirtilen hacim kaybı ve büzülme etkisi nedeniyle, çimento içinde çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar, gazın rahatlıkla göç edebileceği geçirgen ağlar (network) yaratabilirler. Çimento içinde oluşabilecek bu çatlakların akışkan akışına sebep olabileceği Şekil 2.4'te de verilmektedir. Benzer durum çimento basınç dayanımında kayıplar olduğunda da gözlemlenebilir. 2006 yılında Hergesen vd. çimentoda oluşan bu çatlakların yapısı ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada çimento yüzeyinde çatlakların gözle görülemediği, fakat

özel bir ışın ile çimento tarandığında çok ince çatlaklar olduğu ve bu çatlak arası açıklıkların gaz göçü için yeterli olduğu saptanmıştır. Yapılan çalışmada çekilen bir fotoğraf Şekil 2.5'te yer almaktadır. Şekilde sol tarafta çimento karot örnekleri, ortada üzerinde çok ince çatlaklar olan bir çimento örneği ve sağda ise iyi hazırlanmış ve çatlaksız bir çimento örneği görülmektedir [38].



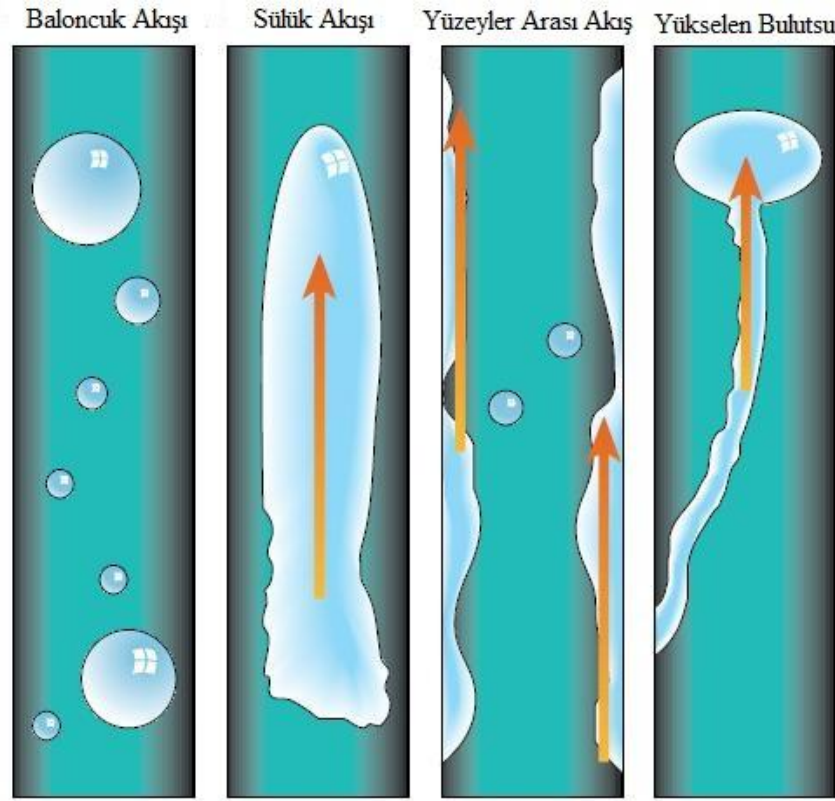
Şekil 2.4: Gaz göçünün olası sebepleri, kaynak [37]'den uyarlanmıştır.



Şekil 2.5: Hasarlı ve hasarsız çimento örneklerinin fotoğrafları [38].

Son olarak yüzeyler arası bağ sorunları olması durumunda, formasyon ile çimento yüzeyi ve/veya koruma borusu ile çimento yüzeyi arasında kanallaşmalar oluşabilir. Bu durumda ise, akışkan formasyondan çimento içerisine ve oradan da yüzeye kadar veya daha düşük basınçlı bir formasyona göç edebilir. Bu durum Şekil 2.4'te görselleştirilmiştir.

Gaz göçü oluşum sebeplerinden hepsi, çimento içerisinde gaza karşı geçirimli bir ortam yaratılmasından oluşmaktadırlar. Çimento içerisine giren gaz çimento içerisinde baloncuk akışı, sülük (slug) akışı, yüzeyler arası akış ve yükseldikçe büyüyen bir bulutsu (plume) şeklinde olabilir. Bu akış şekilleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



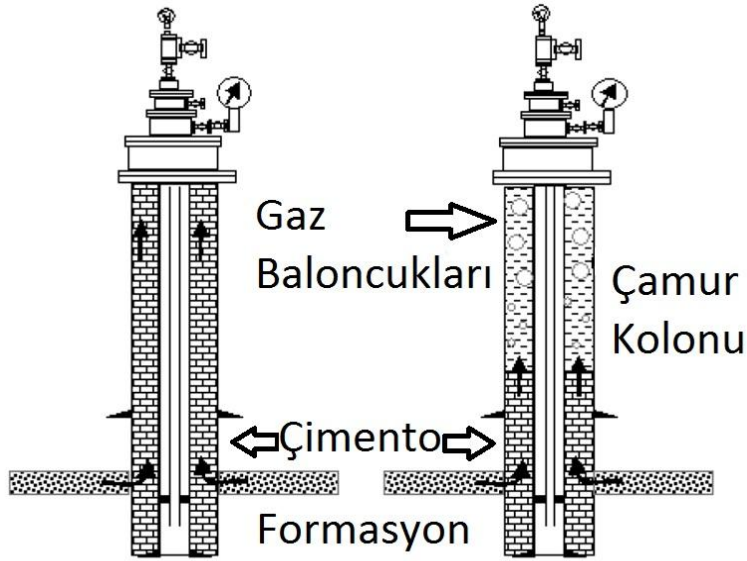
Şekil 2.6: Çimento içerisinde gaz akış şekilleri, kaynak [37]'den uyarlanmıştır.

2.6 Sönümsüz Koruma Borusu Basıncı (Sustained Casing Pressure – SCP)

Çimento içerisinde oluşan bu gaz akışı daha önce de açıklandığı gibi, koruma borusu arkasında kalan bölgede istenmeyen ve beklenmeyen bir basınç birikimine sebep olur. Bu basınç birikimi Sönümsüz Koruma Borusu Basıncı (Sustained Casing Pressure) olarak adlandırılmaktadır. Koruma borusu arkasında biriken basınç bir kaç

psi olabileceği gibi, kuyunun kaybedilmesine yol açabilecek kontrolsüz fişkırmalara (blowout) da neden olabilecek değerlere ulaşabilir. Formasyondan çimentoya giren gazın çimento içinden doğrudan yüzeye kadar ulaşması ve çimentodan (eğer var ise) çamur kolonuna geçerek yüzeye kadar baloncuk olarak gelme durumları Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Her iki durumda başarısız (failed) olmuş çimento ve çimentolama operasyonunun göstergesidir ve istenmeyen bir durumdur [39].

SCP günümüzde halen önemli bir problemdir. SCP ile ilgili olarak Amerika Birleşik Devletleri’nin Mineral Yönetim Servisi (Mineral Management Services – MMS) tarafından düzenlenen bir raporda verilmiş istatistiklere göre, Meksika Körfezi’ndeki (Gulf of Mexico – GOM) 8122 kuyudaki 11498 koruma borusu anülüsünde SCP problemi görülmüştür. Diğer bir deyişle, kuyuların yaklaşık %60-70’inde SCP problemi vardır. Bu istatistik SCP’nin ne kadar ciddi bir problem olduğunu göstermektedir. Bununla beraber MMS istatistiklerine göre oluşan bu SCP’lerin % 90’ı koruma borusu (casing) dayanımları değerleri içerisinde kalmaktadır. Ancak, yine de üretim ve terk etme açısından riskler taşımaya devam etmektedir [40].



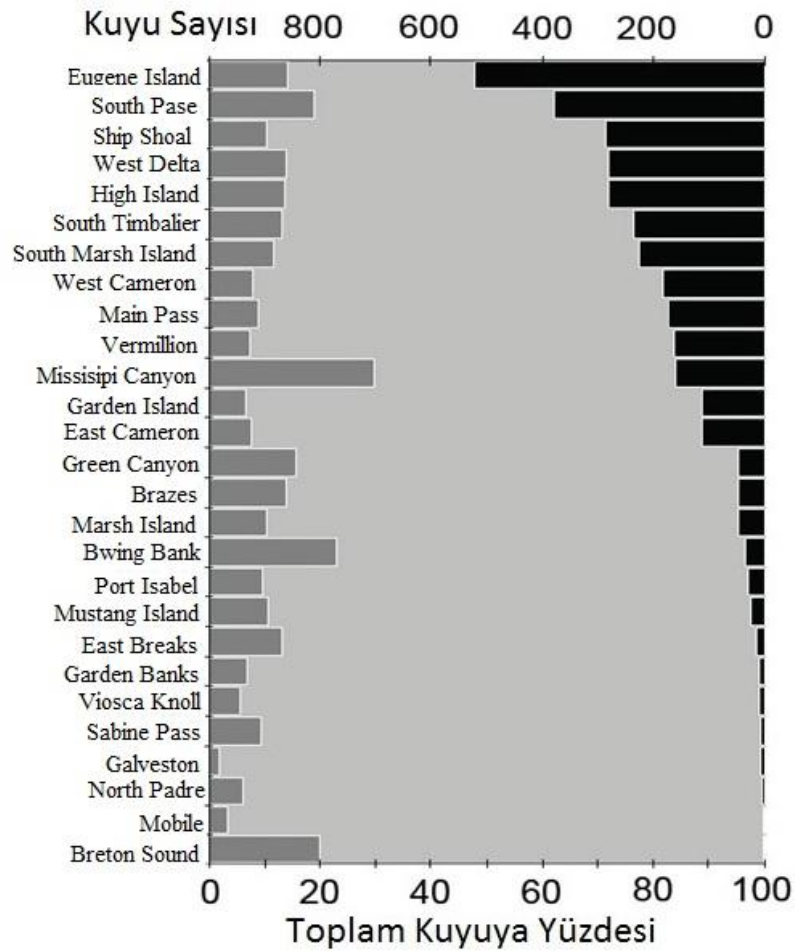
Şekil 2.7: SCP oluşum mekanizması, kaynak [39]’dan uyarlanmıştır.

Şekil 2.8’de Bourgoyne vd. tarafından yapılmış olan çalışmanın sonucunda GOM’da rastgele seçilen kuyulardaki SCP oluşum istatistikleri verilmektedir. Şekilde üstteki yatay ölçek o bölgedeki kuyu sayısını rakamsal olarak, alttaki yatay ölçekte SCP gözlemlenen kuyuların toplam kuyulara oranını yüzde olarak vermektedir. Örnek vermek gerekirse, Mississippi Canyon Bölgesinde yaklaşık olarak 200 adet kuyu

bulunmaktadır. Bu kuyuların %33'ünde SCP problemi görülmüştür. Bir başka örnekte South Pase Bölgesinde 400'e yakın kuyu bulunmaktadır. Bu kuyuların yaklaşık %20'sinde SCP problemi gözlemlenmiştir. O bölgede rastgele seçilen bu sahaların tamamında SCP problemi gözlemlendiği ve bu problemin ortalama olarak sahalarda bulunan kuyuların en az %10'unda oluştuğu belirtilmiştir [40].

ABD'de üretim yapan pek çok kuyuda bu problemle karşılaşılmaktadır. 2011 yılında kuyu sayısının 530000'den fazla olduğu düşünülürse problemin önemi daha iyi anlaşılacaktır [41].

API istatistiklerine göre, GOM'deki kuyu kontrolünün kaybedilmesinin %46'sı çimento operasyonu ile ilgilidir. Bununla beraber GOM'de 2004'te işletilen 14927 kuyunun %45'i SCP sorunu yaratmıştır. Bu SCP sorununun %33'ü doğrudan çimentolama prosesine ilişkilendirilmiştir [42].



Şekil 2.8: GOM'da rastgele seçilen kuyulardaki SCP oluşum istatistikleri, kaynak [40]'tan uyarlanmıştır.

2.7 Problemin Ekonomik Boyutu

Petrol sektöründe ciddi bir problem olan gaz göçü ve SCP sorunu güvenlik ve çevre problemleri teşkil etmektedir. Sondaj bölgesinde çalışanlar her an oluşabilecek bir kaza tehlikesi ile karşı karşıyadırlar. Problemin daha da ileri olduğu durumlarda, kontrolsüz bir fişkırmaya sonucu can kayıpları yaşanabilir. Bununla beraber, yer altında istenmeyen formasyonlara hidrokarbon ve diğer akışkanların geçişi olması sonucunda toprak, su (deniz ve yeraltı suları) ve hava kirlenmelerine sebep olarak yine insan hayatını ve çevreyi tehdit etmektedir.

GOM bölgesinde uzun yıllar tecrübe sahibi olan ve “Oil Drum” dergisinin yazarlarından Art Berman 2010 Mayıs ayındaki yazısında, Amerika Birleşik Devletleri’nin Louisiana Eyaletinde bulunan New Orleans şehri açıklarında bulunan Macondo kuyusundaki 2010 yılı başında meydana gelmiş olan patlamayla ilgili kuyu fişkırmaya önleyicisi (Blowout Preventer –BOP) sisteminin önemli fakat kazadaki etkisinin ikincil dereceden olduğunu; kazanın asıl sebebinin çimentonun görevini yerine getirememiş olması olduğunu belirtmiştir [43].

Kaza ile ilgili inceleme ve araştırmalarda görüldüğü gibi, SCP problemi güvenlik ve çevre problemleri yanında, yüksek maliyet sorunlarını da beraberinde getirmekte ve özellikle petrol fiyatlarının 100 dolarlar mertebelerinde seyrettiği günümüzde, üretim kayıplarına sebebiyet vermesi yönüyle ciddi bir sıkıntı yaratmaktadır. Bununla beraber yeraltı fişkirmaları, kuyu ve platform kayıplarıyla beraber SCP’yi çözmek için yapılan harcama giderleri de hesaba katıldığında, çimento ve çimentolama operasyonu ile ilişkilendirilen bu sorunun petrol ve doğal gaz endüstrisinin her yıl milyarlarca dolarlık ekonomik kayıplara uğramasına yol açtığı ortadadır.

2.8 Problemin Çözüm Yöntemleri

Çimentolama sırasında, ya da sonrası oluşabilen bu ciddi gaz göçü problemi ile başa çıkmak amacıyla günümüzde pek çok farklı yöntem kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntemler, çimentolama sırasında (çimento tasarımı) ve üretim sırasında uygulanan yöntemler olarak iki ana başlık altında ele alınabilir.

2.8.1 Çimentolama sırasında uygulanan çözüm yöntemleri

Çimentolama sırasında en sık kullanılan yöntemlerden birisi, çimentolamanın düşük yoğunluklu çimento ile gerçekleştirilmesidir. Bunu sağlamak amacıyla çimento hazırlanırken köpük gibi yoğunluk azaltıcı malzemeler kullanılır.

Bir diğer yöntem, esnek çimento olarak adlandırılan kauçuk (latex) çimento kullanmaktır. Buna benzeyen ve sık kullanılan diğer bir yöntem de, genişleyen (expandable) çimento kullanmaktır. Bu iki yöntemde de amaç çimentoya belirli bir esneklik kazandırarak formasyondan kuyu içine olabilecek akışlara karşı direncini arttırmak ve gaz göçünü engellemek veya minimize etmektir. Bu yöntemlere ek olarak çimentonun geçirgenliğini azaltıcı ticarî katkı maddeleri kullanılarak gaz geçirgenliğinin azaltılması da sektörde kullanılan bir yöntemdir.

Çimentolama sırasında uygulanan yöntemlerden bir başkası titreşim (pulsation) yöntemidir. Bu yöntemde çimentoya kuyuya yerleştirildikten hemen sonra düşük basınçlı titreşimler göndererek, çimento kalınlaşmaya kadar sıvı halini yani hidrostatik basıncını koruması amaçlanır. Bu yöntemde çimento bir anda donar. Çimento donma sürecinin büyük bölümünde akışkanlık halini koruyan çimento harcı, sağladığı hidrostatik sayesinde kuyu içerisine ve/veya çimento içerisine olabilecek istenmeyen akışkan girişlerini engelleyebilir. Bu yöntem sadece klasik çimento karışımlarına uygulanabilmekte ve içerisinde pek çok kimyasal katkı bulunduran tiksotropik çimentolarda kullanılamamaktadır [44].

2.8.2 Üretim sırasında uygulanan çözüm yöntemleri

Kuyunun hidrokarbon üretimi aşamasında kullanılan yöntemlerden birisi, koruma borusu anülüsüne tuzlu su gibi (brine) ağır akışkan basmaktır. Böylece olası bir gaz gelişi anülüste ters hidrostatik basınç yaratılarak bertaraf edilmeye çalışılır. Ancak bu yöntem gaz akışı durumunda yoğunluk farkı nedeniyle etkisizdir [45].

Bir diğer yöntem, alaşım metali veya çeşitli polimerler kullanılarak anülüs sızdırmazlığının sağlanmasıdır. Bu yöntem de anülüsün bu maddeler aracılığıyla herhangi bir akışkanın kuyuya girişini engellemek amacıyla uygulanır. Bu yöntemde de bazı kısıtlamalar vardır. Sondaj yapılan bölge hakkında daha önceden fikir sahibi olunmayan durumlarda genelde uygulanması tercih edilmez. Bununla beraber, kuyunun tamamına uygulanması çok maliyetli olacağından bölgesel kullanımlar şeklinde uygulanmaktadır [45].

Çimento sokuşturma (squeeze cementing) yöntemi de kullanılan yöntemlerden birisidir. Çimento şerbeti yüksek basınçta pompalanarak kuyunun sorunlu bölgesine sokuşturulur. Bu yöntemde koruma borusu ve formasyon arasında akışkan geçişine sebep olabilecek herhangi bir kanal, çatlak, geçirgen bir yapı vs. oluşmasının engellenmesi amaçlanır. Fakat bir önceki yöntemde olduğu gibi, maliyetinden dolayı bölgesel kullanımlar için tercih edilen bir yöntemdir. Ayrıca bu yöntemde yüksek basınç ile pompalanan çimento harcının formasyonları çatlatması nedeniyle, akış sorunlarına yol açabileceği unutulmamalıdır [45].

SCP oluşumu gözlemlenen ve/veya bahsedilen bu yöntemlerin uygulanmasına rağmen gaz göçünün engellenemediği üretime geçmiş kuyularda, SCP kuyu ve kuyu çevresinde çalışanlar için tehlikeli olmayacak seviyelerde ise, buralarda oluşan basıncın azaltılması için bir sistem kurulur veya bazı kişiler görevlendirilir. Bu kişiler belli dönemlerle kuyuların başında bulunan vana sistemleri aracılığıyla koruma borusu arkasında biriken bu gazın basıncını alarak boşaltım yaparlar. Bu yöntemde de periyodik mekaniksel basınç boşaltımı denir. İnsan sağlığını ve çevreyi tehdit etmesi açısından çok zorunlu olmadıkça tercih edilen bir yöntem değildir.

Çimentolama sonrası gaz göçünü engellemek ve/veya azaltmak için kullanılan yöntemler görüldüğü gibi değişiklikler göstermektedir. Fakat bu yöntemler sondaj ve üretim maliyetlerini ciddi bir biçimde arttırması sebebiyle, kuyuların çoğunda uygulanmamakta ve gaz göçü probleminin göz ardı edilmesine yol açmaktadır. Bununla beraber, bu yöntemler kullanıldığı halde gaz göçünün tamamen giderilemediği durumlarda, gerek insanlar tehlike altında çalışmak zorunda kalmakta ve gerekse toprak, tatlı su akiferi vs. gibi çevresel kirlenmelere yol açılabilmektedir. Bu yöntemlerin bir çoğu, ya maliyetleri yüzünden, ya da gaz göçü problemini tamamen önleyemedikleri için tercih edilmemektedir. Bu yöntemlerin uygulanmaları soruna kısmî bir çözüm getirmekle birlikte, sorunu çözemedikleri için yetersizdirler. Öyle ki, aynı sahadaki kuyulara uygulanan bir yöntemin sorunu bazı kuyularda giderdiği belirlenmişken, bazı kuyularda sorunu kısmen giderdiği veya hiçbir etkisinin olmadığı rapor edilmektedir.

2.9 Çimento Geçirgenliğini Kontrol Eden Parametreler

Literatürde yapılan çalışmalar genellikle koruma borusu arkasından akışın modellenmesi ve/veya sorunun tespit edilmesi ile ilgilidir. Çalışmalarda probleme tam olarak bir çözüm sunulmamaktadır. Ancak gerçekleştirilen testler sonucunda önemli üç önermede bulunulmuştur [28,39].

Buna göre, çimentonun özellikle erken dönemde yüksek jel kuvvetlerine (>20 lb/100ft²) sahip olması, çimento bünyesinde oluşacak olan su kaybının önlenmesi ve/veya minimize edilmesi ve çimentonun hacim değişiminin (shrinkage effect) engellenmesi koşullarının sağlanması durumunda formasyondan çimento matriksine akışkan akışının önlenebileceği öngörülmüştür.

3. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu doktora çalışmasının konusu petrol, gaz ve jeotermal kuyuların çimentolanması sırasında ortaya çıkan çimento geçirgenliğinin önlenmesi ve katkı maddelerinin çimento dayanımı üzerine olan olumsuz etkilerinin azaltılması ve/veya ortadan kaldırılmasıdır. Bu amaca ulaşmak için daha önce çimento ve çimentolama operasyonunda kullanılmamış olan ve bu çalışmada ARI kod adı ile adlandırılan bir karbonatlı magnezyum karmaşığı katkı maddesi olarak kullanılacaktır. ARI katkısıyla hazırlanan çimentonun farklı zaman, yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında özelliklerindeki değişimi deneysel olarak incelenecektir.

Bununla birlikte, geçirgenlik kontrol altına alınırken dayanım, kıvamlılık, reoloji gibi çimento özelliklerinin de korunması ve/veya geliştirilmesi hedeflenecektir. Bu amaca ulaşmak için, başka katkı maddeleri de (örneğin viskozite kontrol ve su kaybı kontrol maddeleri gibi) kullanılacaktır. Dolayısıyla, pek çok ve farklı çimento bileşimi için reoloji, su kaybı, donma zamanı, basınç dayanımı ve gaz geçirgenliği deneyleri yenilenerek gerçekleştirilecektir.

Takip eden üç bölümde deneysel çalışmalar önce reoloji, su kaybı ve donma zamanı, daha sonra basınç dayanımı ve son olarak da gaz geçirgenliği olmak üzere üç bölüm altında verilecektir. Bu bölümlerde önce ARI maddesinin çimentonun özelliklerinin üzerine etkisi incelenecek ve sonra bu özelliklerin nasıl iyileştirilebileceği araştırılacaktır. Çimentonun geçirgenlik değerinin ARI maddesi kullanılarak kontrol altına alınması çalışmanın öncelikli hedefidir.

Petrol, gaz ve jeotermal kuyularında koruma borusu çimento harcı özelliklerinin ve geçirgenliğinin YSYB (Yüksek Sıcaklık ve Yüksek Basınç) koşullarında kontrol edilmesi için uygulanan deneyler, çalışmanın TPAO (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı) ile ortak yürütülen bir proje olması nedeniyle İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü ve Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında ve TPAO Araştırma Merkezi Sondaj Teknolojileri Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Bu deneyler, API (American Petroleum Institute) tarafından belirlenmiş olan API SPEC 10 A “Çimento ve Kuyu Çimentolama Şartnameleri” ve API SPEC 10 B

“Çimentonun Fiziksel Olarak Test Edilme Prosedürleri” isimli standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Standartların oluşmadığı veya standartlarda belirtilmeyen durumlarda TPAO Araştırma Merkezi, Sondaj Akışkanları ve Çimento Laboratuvarı uygulama yönergeleri takip edilmiştir. Özellikle çimento örneklerinin hazırlanması prosedürlerinde, kullanılan katkı maddelerinin konsantrasyonlarının belirlenmesinde TPAO’nun saha uygulamalarından yararlanılarak, gerçek saha koşullarında kullanılan çimento kompozisyonları üzerinde çalışılacaktır.

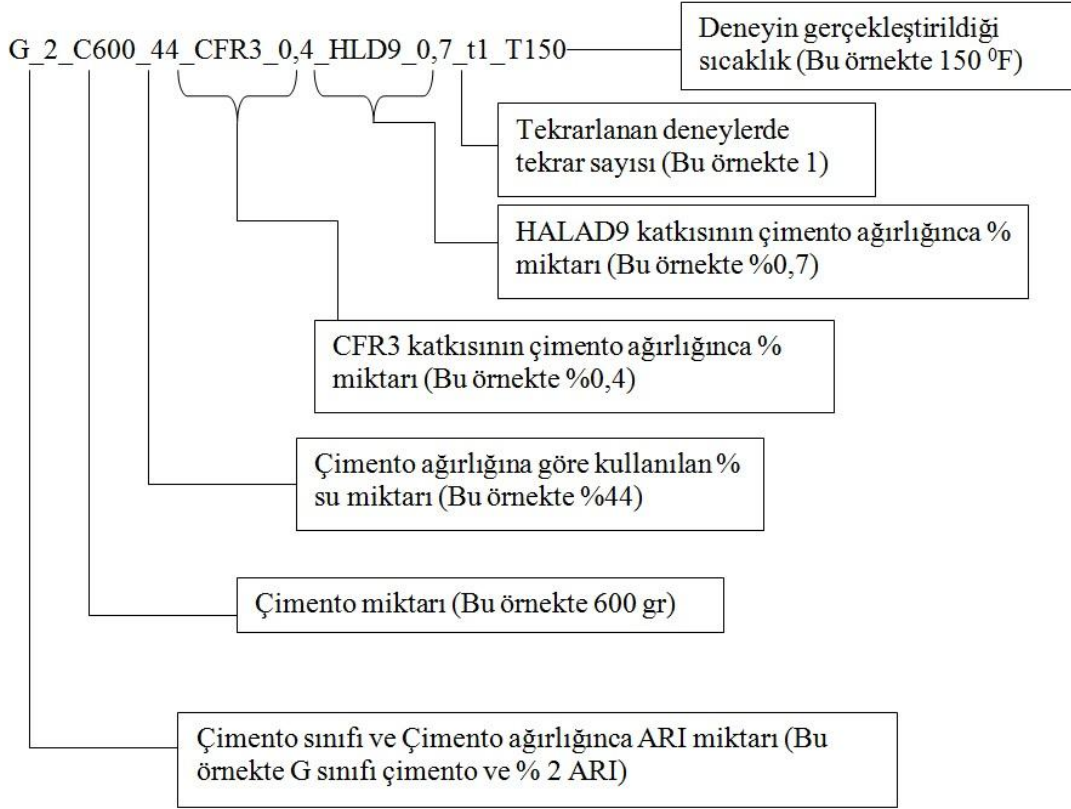
4. DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ VE MALZEMELER

Deneysel çalışma yapılırken belli bir sistematik izlenmiştir. Daha önceden de belirtildiği gibi çalışmanın esas amacı çimento geçirgenliğinin kontrol altına alınmasıdır. Bunu sağlamak amacıyla ARI adı verilen bir karbonatlı magnezyum karmaşığı katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Çimento geçirgenliğinin kontrol altına alınması deneylerinde çimentonun reoloji, su kaybı, basınç dayanımı ve koyulaşma zamanı özelliklerinin incelenmesi ve istenen değerlerde olması sağlanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, özellikleri ilerideki bölümlerde verilen viskozite kontrol (Cement Friction Reducer -CFR3) ve su kaybı kontrol (HALAD9) katkıları da kullanılmıştır.

Pek çok farklı bileşime (veya karışıma) sahip örnekler ile deneyler yürütüldüğünden, öncelikli olarak bir örnek kodlama sistemi geliştirilmiştir. Deneylerde kullanılan çimento, eklenen katkı maddeleri ve oranlarına göre oluşturulan kodlama sistemi için bir örnek Şekil 4.1’de verilmiştir. Buna göre, örnek kodlamasındaki ilk harf ve yanındaki sayı; hangi tip çimento kullanıldığı ve bu çimentoya yüzde olarak ne kadar ARI katıldığı, bunu izleyen harf ve sayı da; o örnek için kaç gram çimento kullanıldığı, bir sonraki gösterimde çimento ağırlığınca yüzde olarak ne kadar CFR3 katkısı katıldığı ve son olarak alt çizgi ile ayrılan bir sonraki gösterimde de yüzde olarak ne kadar HALAD9 katkısı eklendiğini göstermektedir. Deney tekrarlarında kodlamanın sonuna t harfi eklenmektedir. Eğer gerçekleştirilen deney oda koşulları sıcaklığının dışında bir değerde gerçekleştirilmiş ise kodlamanın sonuna T harfi ve yanına da Fahrenheit biriminden hangi sıcaklıkta gerçekleştirildiği verilmiştir.

Çimento şerbetlerinin büyük kısmı 600 gr çimento kullanılarak hazırlanmıştır. Ancak, deneyler arasında 800 gr çimento kullanılarak hazırlanan örnekler de bulunmaktadır. Kullanılan çimento miktarına göre, diğer katkı maddeleri de arttırılmıştır. Bu durum bileşim olarak bir farklılık yaratmamakta, sadece miktar olarak daha fazla çimento harcı hazırlandığını göstermektedir.

Bu bölümde sırasıyla reoloji, su kaybı, koyulaşma, basınç dayanımı ve geçirgenlik deneylerinde kullanılan donanımlar, deney yöntemleri ve malzemeler verilecektir. Çoklu katkı madde içeren çimento karışımlarının deneylerinde aksi belirtilmedikçe izlenecek olan sistematik sırasıyla çimento, ARI'lı çimento, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento ve en son olarak ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento deneylerinin gerçekleştirilmesidir.



Şekil 4.1: Örnekler için kullanılan kodlama sistemi örneği.

4.1 Reoloji

Çimento şerbeti hazırlama yönteminde önce ARI katkı maddesi su ile karıştırılmış, daha sonra sırasıyla CFR3 ve HLD9 katkıları eklenmiş ve sonunda bu çözelti içerisine 600 g çimento 10-15 sn içerisinde eklenerek karışım karıştırıcıda yüksek hızda (18000 – 22000 dev/dak) 45 sn karıştırılarak örnekler hazırlanmıştır. Kullanılan karıştırıcı Fann firmasının iki hızlı karıştırıcısıdır ve Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

Hazırlanan çimento harcı daha sonra, fann firmasının Model 165 AT Atmosferik Konsistometre adı verilen ve istenen sıcaklıkta çimentonun kıvamlılığını belirleyen cihaza konulmuştur. Bu cihazda uyumlaştırma veya şartlandırma 100 dev/dak hızda 20 dakika olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Cihazın ön kısmında yer alan ve içerisinde su bulunan hazneye çimento harcı dökülmüş hücre yerleştirilerek, hücrenin içinde bulunan palet yardımıyla karıştırma yapılmaktadır. Cihazdaki su ısıtılarak istenilen sıcaklıkta şartlandırma yapılabilir. Cihazın fotoğrafı Şekil 4.3'te verilmektedir.

Şartlandırma sonrasında gerekli reoloji ölçümleri Fann firmasının 35SA Model viskometresi ile 6 farklı hızda (600, 300, 200, 100, 6 ve 3 dev/dak) yapılmıştır. Reolojik değer ölçütü viskometre 600 rpm hızında çimento şerbetinin en fazla 300 kadran okuması değerine sahip olmasıdır. Bu değer ne kadar küçükse çimento pompalanabilirliğide o kadar küçük dolayısıyla pompalama enerjiside küçük olacaktır. Kullanılan viskometrenin fotoğrafı Şekil 4.4'te görülmektedir. Diğer katkıların kullanıldığı örneklerde de önce katkı maddeleri su ile karıştırılmış, daha sonra çimento eklenerek deneylerde kullanılan çimento harçları hazırlanmıştır. Çimentonun sıvı fazdan katı faza geçme sürecinde hidrostatik basıncını kaybetmesi ve bu sebeple formasyondan kuyuya doğru akışkan girişi olması durumunda bu akışa direnç gösteremeyebilir. Yapılan literatür çalışmalarında, çimentonun faz geçişi sürecinin erken döneminde yaklaşık 20 lb/100 ft²'lik bir jel kuvveti geliştirmesinin de akışkan girişini engelleyebileceği rapor edilmiştir. Bu nedenle, reoloji ölçümleri yapılırken çimentonun 10 saniye ve 10 dakika için jel kuvveti gelişimi de ölçülmüştür [23,40].



Şekil 4.2: Yüksek hızlı Fann karıştırıcının (blender) fotoğrafı.



Şekil 4.3: Atmosferik konsistometrenin fotoğrafı.



Şekil 4.4: Model 35SA viskometrenin fotoğrafı.

4.2 Su Kaybı

Genel olarak çimentonun su bağlama veya tutma özelliği yoktur. Birkaç yüz psi’lik basınç farkı altında dahi, suyunun neredeyse tamamını bırakır. Çimentonun basınç altında suyunu kaybetmemesi amacıyla, çimento şerbetlerine su kaybı kontrol edici katkı maddelerinin katılması bir zorunluluktur. Bu sebeple çalışmada Halliburton firmasının Halad 9 (HLD9 kodlu) isimli ticari su kaybı kontrol edici katkısı kullanılmıştır. HLD9 su kaybını önlemek (birincil işlev) amacıyla çimentoya katılan bir katkı maddesidir. Bu katkının viskoziteyi (ikincil işlev) arttırdığı da belirtilmektedir [25].

4.3 Kıvamlılık

Koyulaşma zamanı deneyleri TPAO'nun Araştırma Merkezi'nde Sondaj Teknolojileri Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Şekil 4.6'da gösterilen Chandler Engineering üretimi 7025 C10 Model Basınçlı İkiz Konsistometre kullanılmıştır. Çimentonun kıvamlılığı boyutsuz bir nicelik olan Bearden Birimi (Bc) ile belirlenmektedir. Pratik olarak çimentonun pompalanabildiği üst sınır 100 Bc değeridir. Bununla birlikte, genel olarak kabul görmüş olan 70 Bc değeri saha uygulamalarında maksimum pompalanabilirliğin üst sınırı olarak alınır. 70 Bc'ye ulaşma süresi çimentonun koyulaşma zamanını verir. Bu deney donanımı

ile sirkülasyon süresinde oda sıcaklığı ve basıncından kuyu dibi sirkülasyon sıcaklığı ve basıncına ulaşarak, bu sıcaklık ve basınçta kıvamlilik ölçümleri modellenebilmektedir.

Test öncesinde hazırlanan çimento karışımı atmosferik konsistometre ile 20 dakika test sıcaklığında şartlandırılır. Sonra çimento termo kabına konulur, üstündeki kapak kapatılıp gerilim ölçen pin yerleştirilir. Daha sonra, sıcaklık ölçümü yapmak için ısı çifti (thermo couple) aletin haznesine yerleştirilerek hazne kapağı kapatılır, fakat sıkıştırılmaz. Yağ gelişi gözlendiğinde hazne kapağı sıkıştırılır. Cihazın bağlı olduğu bir bilgisayar ve bu bilgisayarda Windows tabanlı çalışan bir veri alma programı bulunmaktadır. Test başlatıldığında bilgisayar programı tarafından isteğe göre 10 veya 20 saniyede bir sıcaklık, basınç ve Bc değerleri kayıt altına alınır. Test, çimento kıvamliliği 70 Bc değerine ulaşınca sonlandırılır.



Şekil 4.6: İkiz basınçlı konsistometre – TPAO Araştırma Merkezi.

4.4 Basınç Dayanımı

Çalışmada çimentonun basınç dayanım deneyleri “Ultrasonik Çimento Analizörü” (Ultrasonic Cement Analyzer -UCA) ve Tek Eksenli Pres (TEP) olarak adlandırılan iki farklı sistemde gerçekleştirilmiştir.

4.4.1 Ultrasonik çimento analizörü dayanımı (UCA)

UCA donanımı çimentonun zamanla geliştirdiği dayanımın ve sondaja başlama süresinin (wait on cement – WOC) belirlenmesi için günümüzde kullanılan en popüler test yöntemidir. Bir hücre içine boşaltılan çimento şerbeti istenilen sıcaklık koşullarında teste tabi tutulur. Hücrenin içerisinden akustik dalgalar gönderilerek, dalga çimento boyunca geçiş hızı kaydedilir. Çimento dalgaları çimento şerbeti hücre içine boşaltıldıktan hemen sonra, bir diğer deyişle çimento sıvı fazda iken geçirilmeye başlar ve çimentonun katı faza geçişi süresince (genellikle 24 saat boyunca) devam eder. Bu ölçümler sonucunda, çimentonun basınç dayanımı değerleri dalga hızlarının geçiş zamanı ile ilişkilendirilerek hesaplanır ve bir grafik üzerinde zamana bağlı olarak dayanım eğrisi çizdirilir. Donanım, artan katılaşma oranına bağlı olarak, sesin birim mesafeyi katetme zamanının azalma ilkesine göre çalışmaktadır [46].

Çalışmada TPAO Araştırma Merkezi Sondaj Teknolojileri Laboratuvarlarında bulunan Chandler firmasının 4262 Modeli İkiz UCA donanımı kullanılarak dayanım belirlenmiştir. Kullanılan UCA sisteminin görseli Şekil 4.7’de verilmiştir.



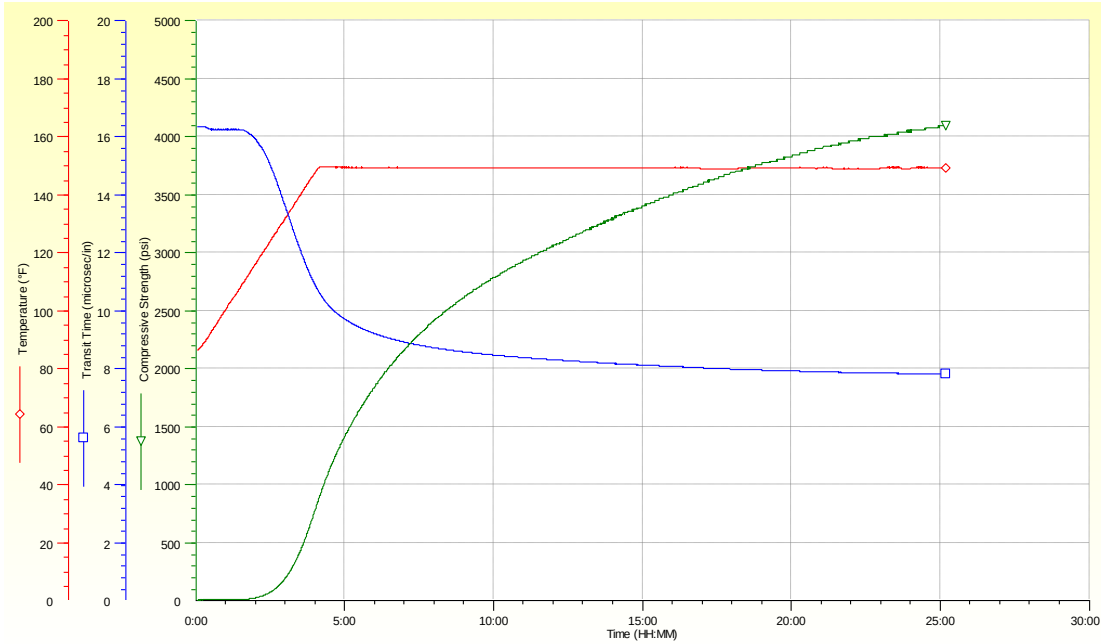
Şekil 4.7: Chandler Firmasının 4262 Model UCA Donanımı – TPAO Araştırma Merkezi.

Windows tabanlı bir bilgisayar programı kullanan UCA sisteminin zamana bağlı verdiği grafik Şekil 4.8’de görülmektedir. Şekil’de elmas (◇) şeklinde gösterilen veriler Fahrenheit birimi olarak örnek sıcaklığını, kare (□) şeklindeki veriler mikro-

saniye/inç birimi olarak geçiş zamanını ve üçgen (Δ) şeklindeki veriler de psi birimi olarak basınç dayanımını vermektedir.

4.4.2 Tek eksenli pres (TEP) dayanımı

TEP ölçüm tekniği malzemenin basınç dayanımının artan yük karşısında tamamen başarız olması veya daha fazla yük taşıyamaması ilkesine dayanmaktadır. Malzeme üzerindeki yük sabit oranda arttırılarak testler yapılır. Bir noktaya kadar dayanım gösteren malzeme, bu noktadan sonra kırılır, çatlar, esner vs. Bunun sonucunda daha fazla yükü üzerine alamaz. Tespit edilen bu noktaya malzemenin taşıyabileceği maksimum yük denir. Uygulanan yük malzemenin sıkıştırılan yüzey alanına bölündüğünde de sıkıştırma basınç dayanımı değeri (compressional strength) elde edilir [47].



Şekil 4.8: G Sınıf çimento UCA basınç dayanım grafiği.

Deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde bulunan tek eksenli pres cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihazın görseli Şekil 4.9'da verilmiştir.

Çalışmada hazırlanan çimento şerbetleri oda sıcaklığında 2 inç'lik (5,08 cm) küp kalıplara dökülerek 1, 7 ve 28 gün yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma süresinin sonunda örnekler kalıplardan çıkartılarak TEP cihazına yerleştirilmişler ve testler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kalıplar görsel olarak Şekil 4.10'da

verilmektedir. Testler standart olarak örneğin 0,3 kN/s'lik yüke tabi tutulmasıyla ve çimento kırılincaya kadar devam ettirilmiştir. Sonuçların geçerliliğini ve birbirleriyle uyumluluğunu test edebilmek amacıyla, deneyler en az üç defa tekrarlanmıştır. Daha sonra, elde edilen maksimum yük değeri, çimento örneğinin prese maruz kalan ve daha önceden ölçülmüş olan yüzey alanına bölünerek basınç dayanım değeri hesaplanmıştır [47].



Şekil 4.9: Tek Eksenli Pres donanımı.



Şekil 4.10: Deneylerde kullanılan küp kalıplar.

4.5 Geçirgenlik

Çimentonun geçirgenliği iki farklı yöntemden belirlenebilir. Birinci yöntem, klasik bir yöntem olarak nitelendirilebilecek olan bir yöntemdir ve dondurulmuş çimento örneklerinden karotiyer kullanılarak alınan karot örneklerinin gaz enjeksiyonu altında geçirgenliğinin belirlenmesi esasına dayanır. İkinci yöntemde ise çimentonun

geçirgenliği Gaz Göçü Analizörü (Gas Migration Analyzer (GMA)) adı verilen donanım ile belirlenir. Donmuş çimentodan alınan karot örnekleri üzerine yapılan deneylerden uzun dönemdeki geçirgenlik değişimi incelenebilmektedir. Her iki sistemden elde edilen sonuçlar sektör için çok önemli olsa da, özellikle GMA'dan elde edilen sonuçlar ilk 24 saatlik periyodu içermesi ve sistemin yeraltını daha iyi simüle edebilmesi açısından önemlidir. GMA'nın en önemli avantajı, çimento geçirgenliğinin donma sürecinde elde edilebilmesine olanak vermesidir.

4.5.1 Geçirgenlik deneyleri

Donmuş çimentodan alınan karotlar üzerinde yapılan enjeksiyon ile gaz geçirgenliğinin belirlenmesi deneyleri İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. 7 cm'lik küp kalıplara dökülen çimento şerbetleri donduktan sonra kalıplardan çıkartılmış ve Şekil 4.11'de fotoğrafı bulunan karot alma cihazı kullanılarak karotlar alınmıştır. Belirtilen her bir kompozisyon için üçer adet örnek hazırlanmış ve gaz geçirgenliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçların geçerliliğini ve birbirleriyle uyumluluğunu test edebilmek amacıyla deneyler en az üç defa tekrarlanmıştır.

Deneylerde kullanılan Hassler tipi gaz geçirgenliği ölçme donanımı Şekil 4.12'de verilmektedir. Silindirik hücreye yerleştirilen karotların yan yüzeylerinden akışı önlemek amacıyla, karotların etrafını saran kauçuk gömleğin üzerine yağ pompası ile 100 psi üst baskı basıncı verilerek karotları sarması sağlanmaktadır. Böylece sadece dairesel şekildeki alt ve üst yüzeyler arasında enjeksiyon ile gaz geçişinin olması sağlanmaktadır. Silindirik hücreye enjekte edilen gaz, her iki uçta da kanallı bir yapı vasıtasıyla verilmiş, böylece gazın karot yüzeyine homojen bir şekilde dağıtılarak geçişi sağlanmıştır. Deneylerde azot gazı kullanılmıştır. Karot yüzeyine 0-110 psi basınç aralığında gaz verilerek geçirgenlik ölçümleri yapılmıştır.

Gaz geçirgenliği Denklem 4.1'de verilen ve Darcy Denklemi olarak bilinen denklemin gaz akışı için geliştirilmiş halinden türetilmiş denklem ile hesaplanmıştır.

$$k = \frac{2 \mu p_2 Q_2 L}{A \left[\left(\frac{\Delta p}{14.65} + p_2 \right)^2 - p_2^2 \right]} \quad (4.1)$$

Burada;

k : Gaz geçirgenliği, Darcy.

μ : Viskozite (Ağdalılık), centipoise.

Q_2 : Gazın ıkış debisi, cm^3/s .

Δp : Gazın giriş ve çıkış basınç farkı, atmosfer.

p_2 : Gazın ıkış basıncı, atmosfer.

L : Karot uzunluğu, cm.

A : Akışa açık kesit alanı, cm^2 .



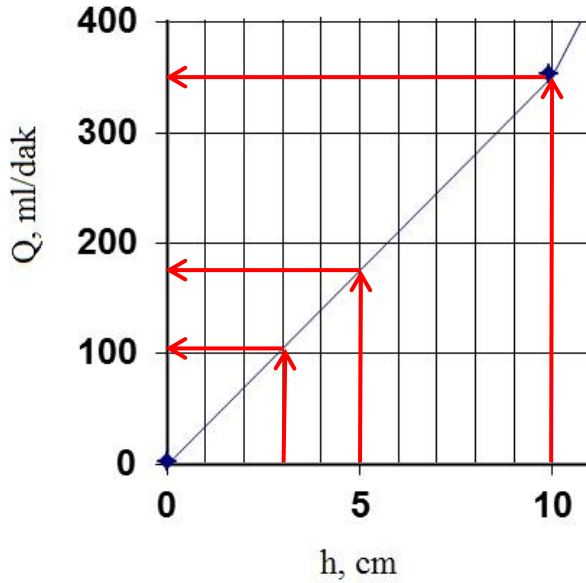
şekil 4.11: Karotiyer.



şekil 4.12: Gaz geçirgenliği donanımı.

Denklem 4.1 kullanılarak akma hızı bilinen bir gazın, basınç ölçerinde okunan Δp basınç farkındaki debide, L uzunluğundaki ve A kesit alanındaki karotun gaz geçirgenliği belirlenebilmektedir.

Çıkış koşullarındaki debi Ek-A'da verilen ve deneylerde kullanılan manometreye özgü grafik aracılığıyla bulunmaktadır. Çıkış koşullarındaki debinin bulunmasının gösterilmesi için Ek-A'da verilen grafiğin daraltılmış bir görüntüsü Şekil 4.13'te görülmektedir. Yapılan ölçümler sonucu basınç ölçerindeki h yükselmelerine (gösterimde 3, 5 ve 10 cm'lik h yükselmelerine karşılık değerlerin nasıl okunduğu verilmiştir.) karşı gelen debi değerleri Şekil 4.13'te kırmızı ok ile gösterilmiştir. Bulunan debi değerleri ve diğer parametreler Denklem 4.1 ile kullanılarak geçirgenlik değerleri elde edilmektedir.



Şekil 4.13: Gaz akış debisini bulmak için kullanılan grafiğin daraltılmış hali.

4.5.2 Gaz göçü analizörü (GMA)

Gerçekleştirilen deneyler TPAO Araştırma Merkezi Sondaj Teknolojileri Laboratuarında bulunan Chandler firmasına ait, Model 7200 Gaz Göçü Analizör'ünde (Gas Migration Analyzer - GMA) yapılmıştır. Kullanılan GMA donanımı Şekil 4.14'te verilmiştir. Hazırlanan çimento şerbeti cihazın sol tarafında bulunan ve dikey bir şekilde görünen hücre içerisine dökülür. Cihaz bir bilgisayara bağlıdır. Bilgisayarda Windows tabanlı bir veri alma programı kullanılarak isteğe göre 10-30 saniye aralıklarında veri toplamak mümkündür.

Her bir çimento örneği için bilgisayar programı toplanan verileri üç farklı grafik üzerinde gösterir. Birinci grafik gaz göçü grafiğidir. Bu grafik üzerinde çimento su kaybı, göç eden akışkan hacmi, hücrenin üzerinde bulunan pistonun hareketi ve son olarak ta çimento içerisine gerçekleşen gaz göçü miktarları, zamana bağlı olarak verilmektedir. Şekil 4.15'te sadece G sınıf çimento ile hazırlanan örneğin gaz göçü grafiği görülmektedir.

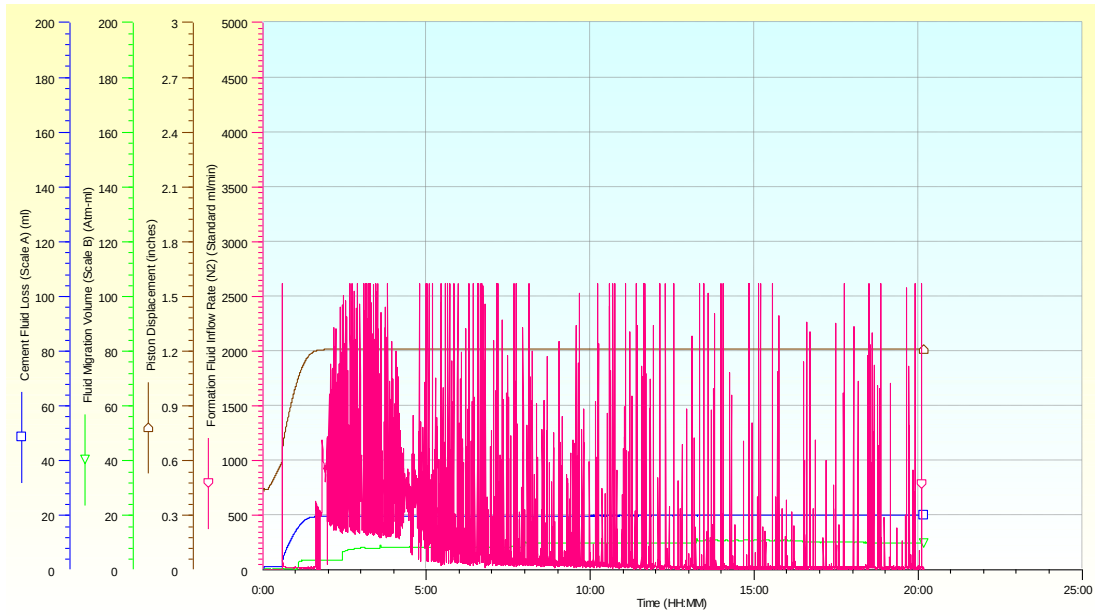


Şekil 4.14: Gaz göçü analizörü (GMA).

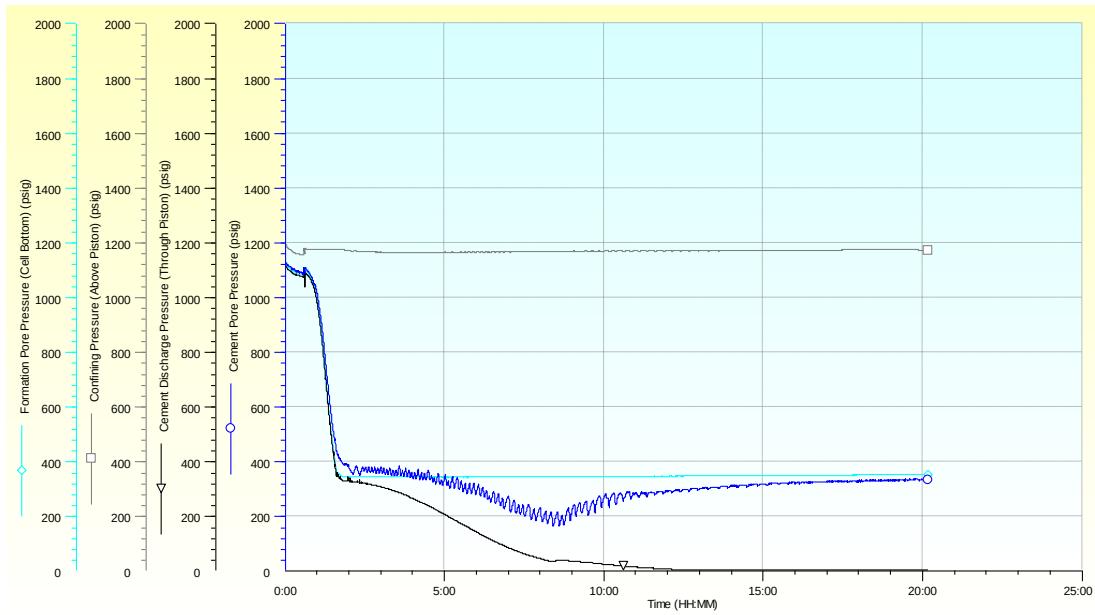
İkinci grafik basınçlar grafiğidir. Bu grafikte formasyon gözenek basıncı, çevrel (confining) basıncı, çimento akma basıncı ve çimento gözenek basıncı değerleri zamana bağlı olarak verilmektedir. Formasyon gözenek basıncı ayarlanırken regülatörlerin çok hassas olmamasından dolayı net bir değerde basınç ayarı yapılamamakta, basınç 1200 psi civarında tutularak deneyler başlatılmaktadır. Bununla beraber, sadece çimento katkısının bulunduğu örnekte, TPAO çalışanlarının tavsiyesi üzerine, çimento yüksek basınç ve gaz girşine dayanamayacağından daha düşük (400 psi) basınç değerinde deney başlatılmıştır. Şekil 4.16'te sadece G sınıf çimento ile hazırlanan örneğin basınç grafiği görülmektedir.

Son grafikte ise, hücrenin ve hücre içerisindeki çimentonun sıcaklıkları yine zamana bağlı olarak verilmektedir. Şekil 4.17'da sadece G sınıf çimento ile hazırlanan örneğin sıcaklık grafiği görülmektedir.

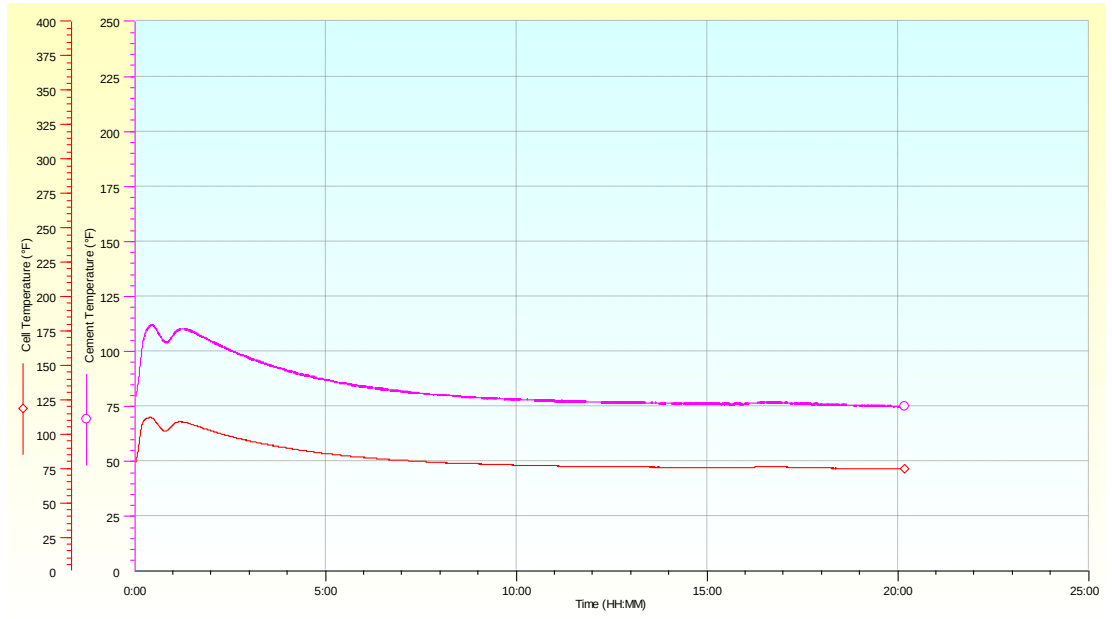
Çimento geçirgenliğinin incelenmesi ve önlenmesi ana konusu olan bu çalışmada, GMA test sonuçlarında özellikle gaz göçü grafiğinde pembe renk ile gösterilen ve çimento içerisine gaz göçü olduğunun ve çimento içerisinde ve/veya yüzeyinde geçirgen bir yapı olduğunu gösteren grafik üzerinde durulacaktır.



Şekil 4.15: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI) – gaz göçü grafiği.



Şekil 4.16: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI) – basınç grafiği.



Şekil 4.17: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI) – sıcaklık grafiği.

5. REOLOJİ, SU KAYBI VE KIVAMLILIK DENEYLERİ

Çalışmada gerçekleştirilen ilk deneylerde farklı bileşimlerdeki çimento harçlarının reolojik, su kaybı ve kıvamlılık özellikleri sınanmıştır. Bu süreçte öncelikle katkısız çimento harcının anılan özelliklerinin değişen akış koşullarına ve zamana bağlı davranışları incelenmiştir. İzleyen süreçte ise, ARI adı ile anılan katkıyı da kapsamak üzere, çeşitli katkıları içeren çimento harçlarının yukarıda anılan özellikleri yine değişen akış koşulları ve zamanın birer işlevi olarak incelenmiştir. Söz konusu incelemelerde, farklı katkıların çimento harcı üzerindeki etkilerinin diğer katkıların varlığında nasıl etkilendikleri de ayrıca sınanmış ve incelenmiştir.

5.1 Reoloji Reoloji Deneyleri

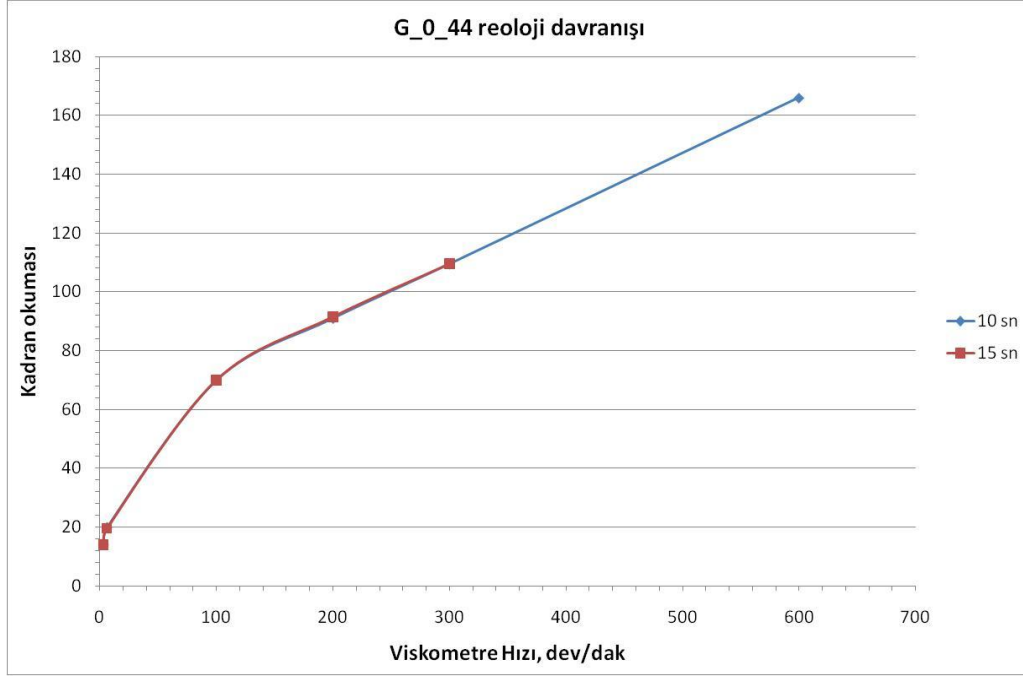
ARI katkısının çimento harcının akışkanlık (reolojik) özelliklerini ne yönde etkilediği incelenmiş, akışkanlığın öngörülen kıstaslar dışına çıkması durumunda ARI ile birlikte viskozite ve su kaybı denetimi sağlayan diğer katkılarda çimento harcına eklenerek istenen akışkanlık özellikleri sağlanmaya çalışılmıştır. Akışkanlık koşulu olarak, TPAO'nun çimento tasarımında kullandığı 600 dev/dk viskometre hızında 300'den küçük kadran okuması kıstas olarak alınmıştır. Burada amaç, hazırlanan çimento harcının kuyuya basılması sırasında pompa basınçlarını düşük tutmak amacıyla uygun viskoziteye sahip çimento şerbeti karışımı hazırlamaktır.

Akışkanlık özellikleri çalışılacak olan çimento harcı örnekleri 1) hiçbir katkı içermeyen, 2) sadece ARI içeren, 3) ARI ve viskozite kontrol edici katkı, 4) ARI ve su kaybı kontrol edici katkı ve 5) ARI, su kaybı ve viskozite kontrol edici katkı çimento olmak üzere beş ana başlık altında hazırlanmış ve incelenmiştir.

5.1.1 ARI içermeyen çimento reolojisi deneyleri

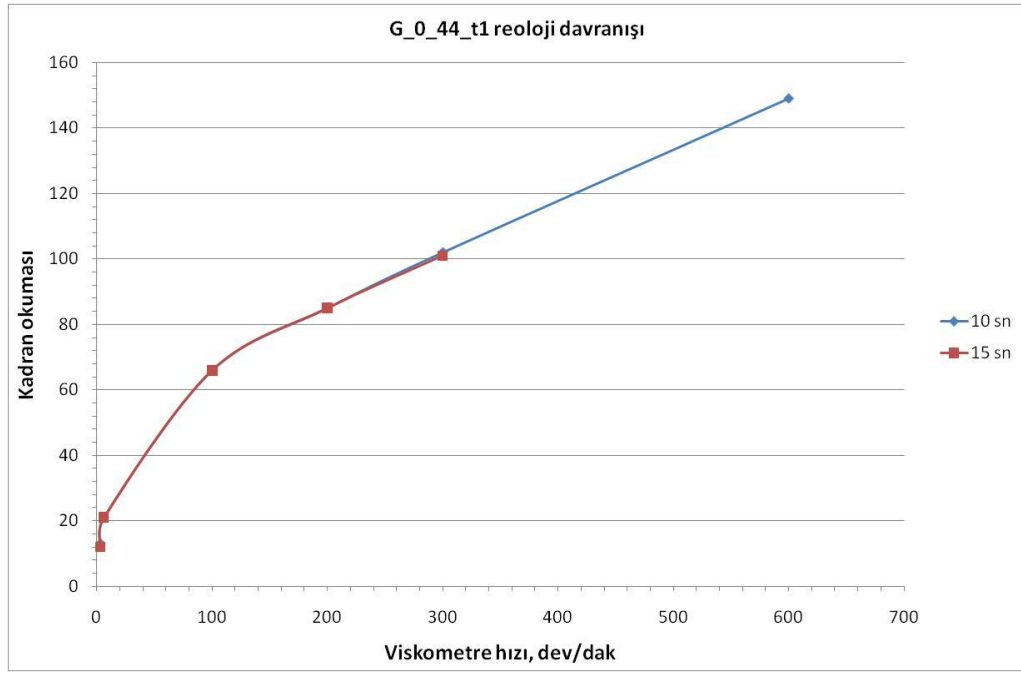
Öncelikle yalnızca G Sınıf çimentonun akışkanlık davranışları belirlenmiştir. Sonuçların geçerliliğini ve birbirleriyle uyumluluğunu sınamak amacıyla deneyler tekrarlanmıştır. Farklı su içeriğinde örnekler hazırlanarak, su içeriğinin çimento akışkanlığını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Çimento ağırlığının %44'ü kadar su ile

katkısız hazırlanan G Sınıf çimentonun akışkanlık davranışı Şekil 5.1’den Şekil 5.9’a kadar verilen grafiklerde gösterilmektedir. Çimento harcının akışkanlık davranışı viskometrede gözlemlenirken, değişik hızlarda viskometre kadran okumaları değerlendirilmiştir. Aynı koşullarda tekrarlanan deneylerde elde edilen sonuçlar, EK-B’de bulunan Çizelge B.1’de sayısal olarak ve EK-C’de Şekil C.1’den Şekil C.13’e kadar grafiksel olarak ayrı ayrı verilmektedir.



Şekil 5.1: G Sınıf çimentonun reoloji davranışı.

İlk deneyi takiben aynı koşullarda altı tekrar daha yapılarak, deneylerin tekrarlanabilirliği de incelenmiştir. Altıncı tekrarın diğerlerinden farkı çimento hazırlandıktan sonra konsistometrede 20 dk yerine 40 dk şartlandırma yapılmasıdır. Bütün bu deneylerde, 600 dev/dk hızda kadran okumaları beklendiği gibi 300’den az elde edilmiştir. Diğer taraftan, değişik hızlarda kadran okuması yapılırken, kadran değişimi sabitlendikten 10 sn ve 15 sn sonra okumalar yapılmıştır. Çimento harcının çok ağıdalı (viskoz) bir özellik göstermesi nedeniyle, hız değiştirildiğinde kadranın dengelenmesi zaman almıştır. Dolayısı ile, kadranın dengelenme değeri en düşük olduğu andan itibaren 10 sn ve 15 sn beklenerek iki farklı okuma yapılmıştır. Genellikle, ilk okuma kadran değişimi dengelendiği veya ihmal edilebilir olduğu zaman yapılmıştır. TPAO önerileri de göz önüne alınarak 45-60 sn beklenerek bu koşulun sağlandığı belirlenmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi, 10 sn ve 15 sn beklemlerinden sonra yapılan okumalarda önemli bir farklılık yoktur.



Şekil 5.2: G Sınıf çimentonun reoloji davranışı.– tekrar 1.

Çimento örneklerinin akışkanlık davranışları deneylerinden elde edilen 10 sn okuma sonuçları ve hesaplanan görünür akma (μ_a) değerleri Çizelge 5.1’de, 15 sn reoloji davranışları okuma sonuçları Çizelge 5.2’de ve jel kuvveti değişimi sonuçları Çizelge 5.3’te listelenmiştir.

Çizelge 5.1: G Sınıf çimento reoloji davranışı deney sonuçları – 10 sn okumaları.

Hız dev/dk	G_0_44	G_0_44_t1	G_0_44_t2	G_0_44_t3	G_0_44_t4	G_0_44_t5	G_0_44_t6	Ortalama	μ _{a_ort}
600	166	149	150	143	143	154	159	150,8	75,4
300	110	102	99	94	94	115	120	102,3	102,3
200	91	85	81	77,5	78	94	100	84,4	126,6
100	70	66	62	60	60	73,5	78	65,3	195,9
6	20	21	19	19,5	19	23	23	20,3	1015
3	14	13	12	13	13	14	15	13,2	1320

Şekil 5.1’de açıkça görülebileceği gibi, çimentonun akışkanlık davranışı doğrusal olmayıp, Newtonian olmayan bir davranış göstermektedir. İlginç olan, viskometrenin 200 dev/dk’dan yüksek hızlarında doğrusal davranışın daha etkin olduğudur. Çizelge 5.1’deki görünür viskozite değerlerine (μ_a) dikkat edilirse, viskometrenin artan hızı ile görünür viskozitenin azalması şeklinde kendini gösteren davranış, akışkanın (çimento harcının) Newtonian olmayan, sanal plastik (pseudo plastic) ve kayma hızı ile incelen (shear thinning) bir reolojik davranış gösterdiğini belirtmektedir.

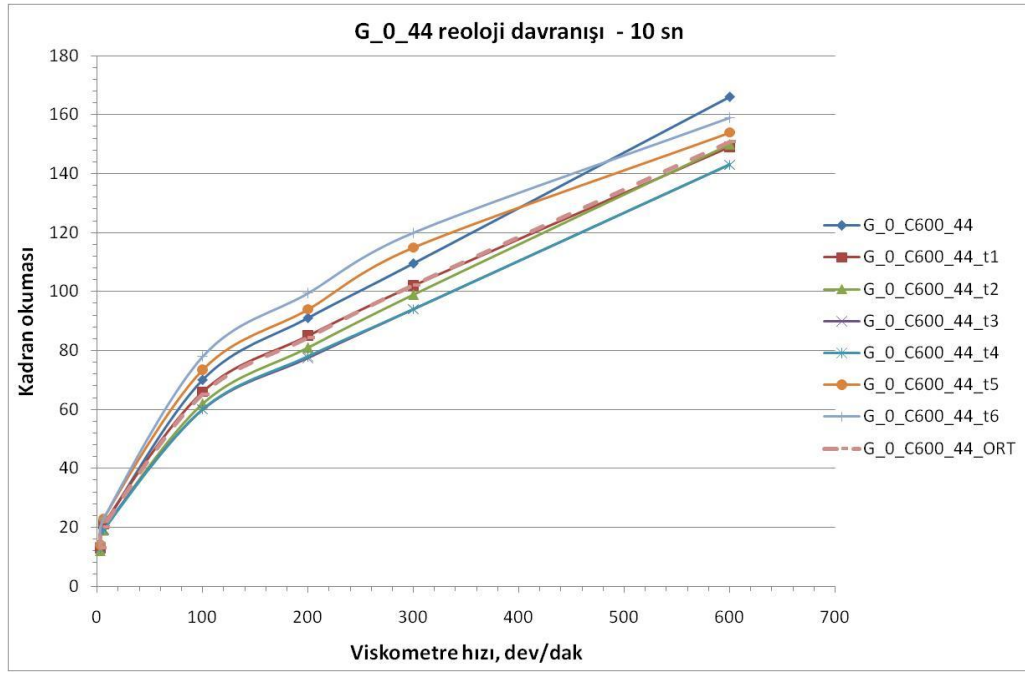
Çizelge 5.2: G Sınıf çimento reoloji davranışı deney sonuçları – 15 sn okumaları.

Hız dev/dk	G_0_C600_ 44	G_0_C600_ 44_t1	G_0_C600_ 44_t2	G_0_C600_ 44_t3	G_0_C600_ 44_t4	Ortalama
300	109,5	101	97	93	94	98,9
200	91,5	85	81	77,5	77	82,4
100	70	66	62	60	60	63,6
6	19,5	21	19	19	18,5	19,4
3	14	12	12	13	12	12,6

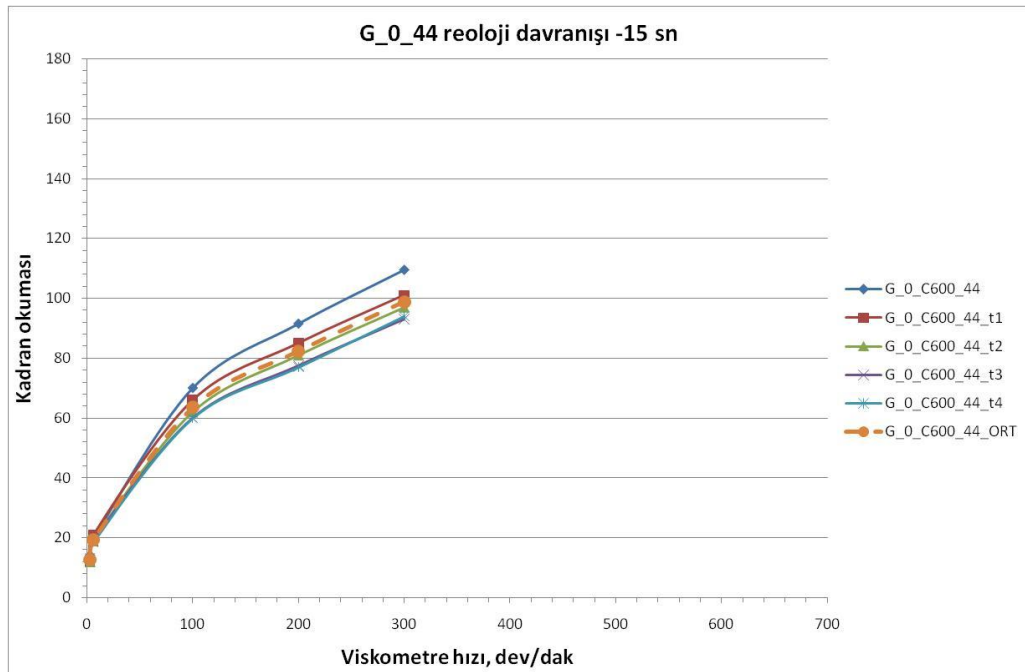
Çizelge 5.3: G Sınıf çimento örneklerinin jel kuvveti değişimleri.

Jel Kuvveti, lbf/100 ft ²	G_0_C600_ 44_t1	G_0_C600_ 44_t2	G_0_C600_ 44_t3	G_0_C600_ 44_t4	G_0_C600_ 44_t5	Ortalama
10 sn	16	15	18	17	17,5	16,7
10 dak	24	22	23	20	26	23

Viskometrenin 3, 6, 100, 200, 300 ve 600 dev/dk hızlarında reoloji değişimi okumaları alınmıştır. Akışkanın önce 600 dev/dk'dan başlayarak, reolojik davranışının viskometre hızıyla değişimi belirlenmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi, aynı hız değerinde tekrarlanan deneylerde, farklı kadran okumaları elde edilmiştir. Bu fark yüksek hızlarda daha belirgindir ve 600 dev/dk hızda tekrarlanan deneylerde fark yaklaşık 20'dir. Bu durum çimento harcı için karakteristik bir durumdur. Aynı koşullarda tekrarlanan deneylerde, reolojik davranışı veren kadran okumalarında, aynı hız için önemli sayılabilecek miktarda bir farklılık gözlenmektedir. Genel olarak, en yüksek viskometre hızında, kadran okumaları arasındaki fark 10 sn ölçümleri için Şekil 5.3'de görüldüğü gibi yaklaşık olarak 145 ile 165 arasında değişmektedir. Tekrarlanan deneylerden elde edilen sonuçların ortalamaları da 10 sn ve 15 sn okumaları için sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te kesikli çizgi olarak gösterilmiştir. Ortalama kadran okuması, 600 dev/dk hızda 150 olarak bulunmuştur. Ortalama kadran değerleri 300 dev/dk hızda 10 sn okuması için 102 ve 15 sn okuması için 100'dür ve aralarındaki fark önemsizdir. 15 sn okumalarına ait karşılaştırmalı şekiller ARI ve diğer katkılı örnekler için verilmeyecektir, ancak yapılan tüm 15 sn okumaları EK-B çizelgelerinde veri olarak ve tek bir test için oluşturulan EK-C şekillerinde grafiksel olarak verilmektedir.



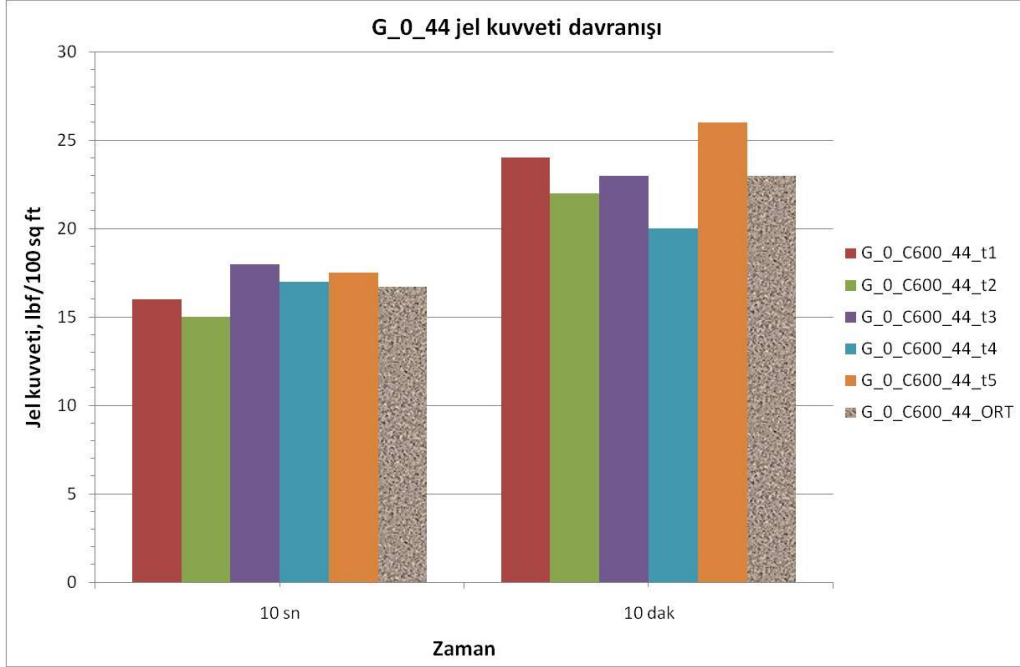
Şekil 5.3: G Sınıf çimentonun reoloji davranışı – bütün tekrarlar – 10 sn.



Şekil 5.4: G Sınıf çimentonun reoloji davranışı – bütün tekrarlar – 15 sn.

Grafiksel olarak EK-C’de Şekil C1-C7 arasında verilen katkısız çimento örneklerinin jel kuvveti davranışları Şekil 5.5’de gösterilmektedir. Beklendiği gibi, jel kuvvetleri artan zamanla birlikte artmaktadır. 10 sn jel kuvveti 15-18 aralığında olup ortalama 17 lbf/100 sqft iken, 10 dk jel kuvveti 20-26 aralığında olup ortalama 23 lbf/100 ft² değerindedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, 10 sn ve 10 dk jel kuvvetleri ölçümleri kendi içerilerinde tutarlıdırlar. 10 sn değerlerinin literatürde belirtilen ve

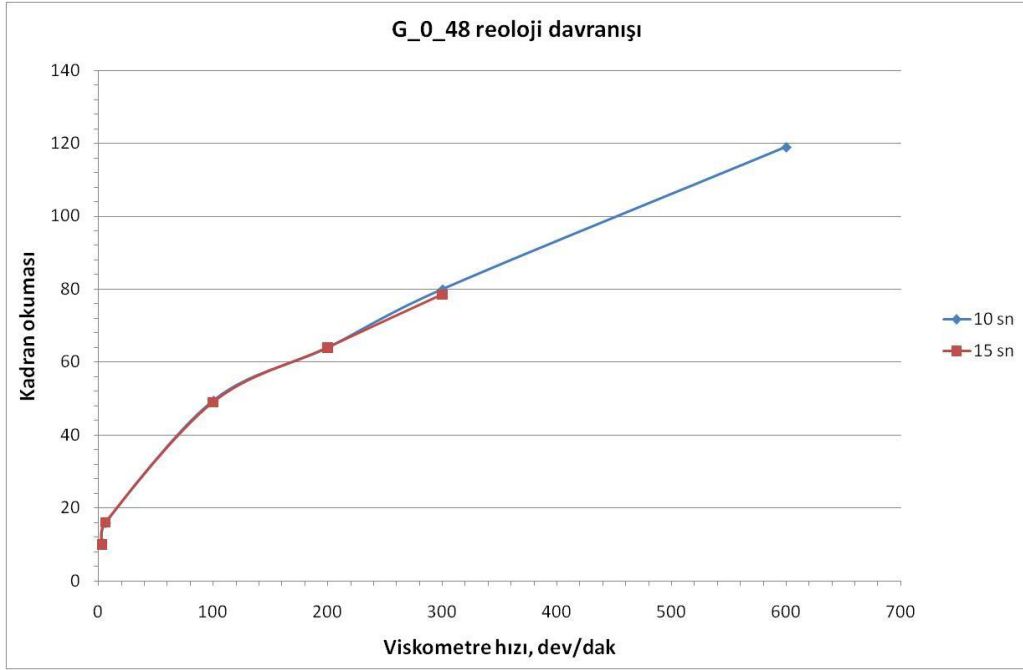
geçirgenliği önleyeceği öne sürülen 20 lbf/ft² değerinden küçük olduğu görülmektedir. 10 dk değerleri için bu durum söz konusu olmamakla birlikte, erken dönemde geçirgen bir yapının oluşması nedeniyle bu özellikte çimentonun kullanıldığı kuyularda bir akış probleminin oluşması olasıdır.



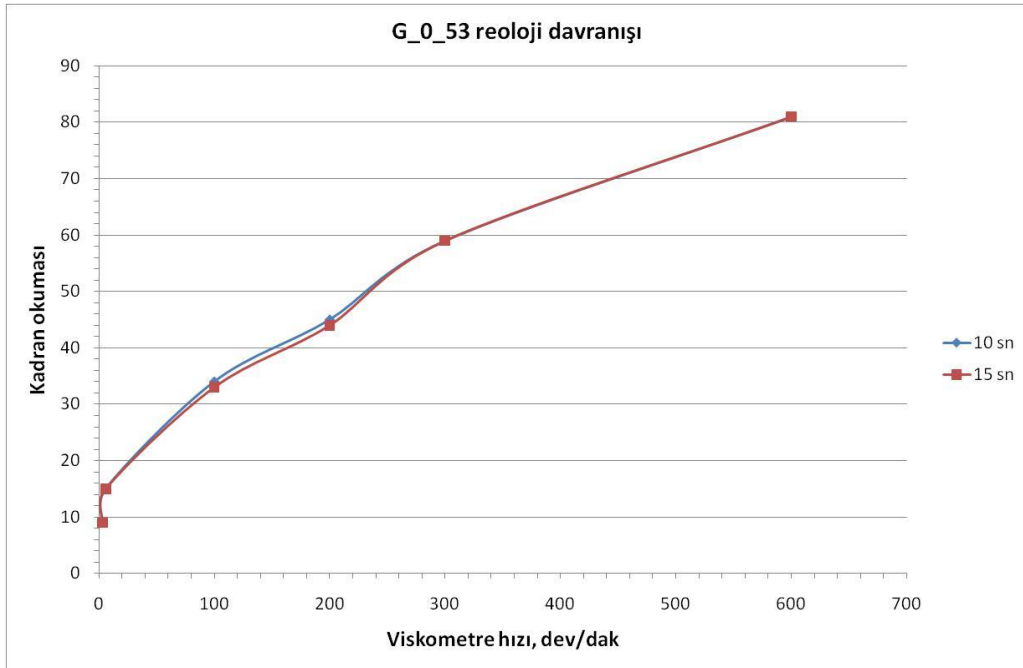
Şekil 5.5: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı.

Deneylerde referans olarak kullanılan suyun çimentoya oranı (W/C), API Standartlarında belirtildiği gibi çimento ağırlığınca %44'tür. Artan su içeriğine bağlı olarak, akışkanlık özelliklerindeki değişimi gösterebilmek amacıyla, deneyler %48 ve %53 su içeriği değerleri için de tekrarlanmıştır. Artan su miktarıyla viskometre kadran okumalarında önemli bir azalmanın olması beklenir ve Şekil 5.6 ve 5.7'de bu durum açıkça gözlenmektedir. Farklı su içerikli G Sınıf çimento harçlarının viskometre hızına bağlı olarak akışkanlık özelliklerindeki değişim, Şekil 5.8'de gösterilmektedir. 600 dev/dak hızda kadran okuması API'nin G Sınıf çimento için tanımladığı %44 su içeriği için ortalama olarak 150 değerinden, %48 su içeriğinde 120 değerine ve %53 su içeriği için ise, 80 değerine düşmektedir. Diğer taraftan, artan su içeriğine bağlı olarak jel kuvvetlerindeki değişim Şekil 5.9'da verilmektedir. Artan su içeriğine bağlı olarak, farklı viskozite hızlarında reolojideki değişimi gösteren kadran okumalarındaki düşmeye karşılık, artan su içeriğinde 10 dk jel kuvvetlerinde bir düşmenin olmadığı gözlenmektedir. 10 sn jel kuvvetinde ise, bir

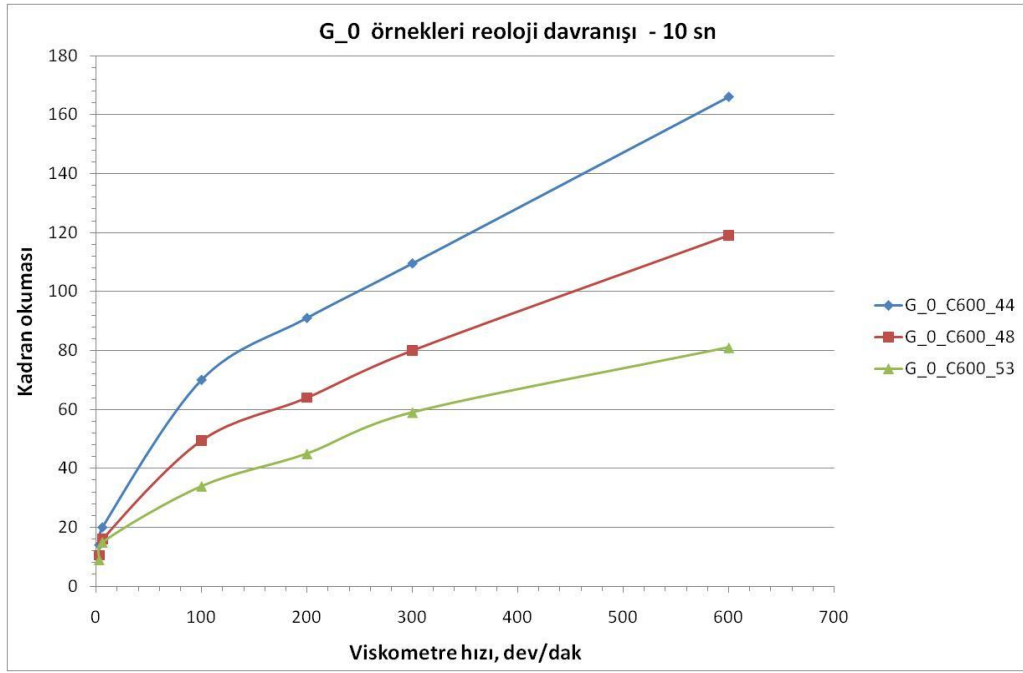
miktar azalım görülmektedir ve bu azalım akışkan akışı sorununu daha da artırıcı yönde olması nedeniyle önemlidir.



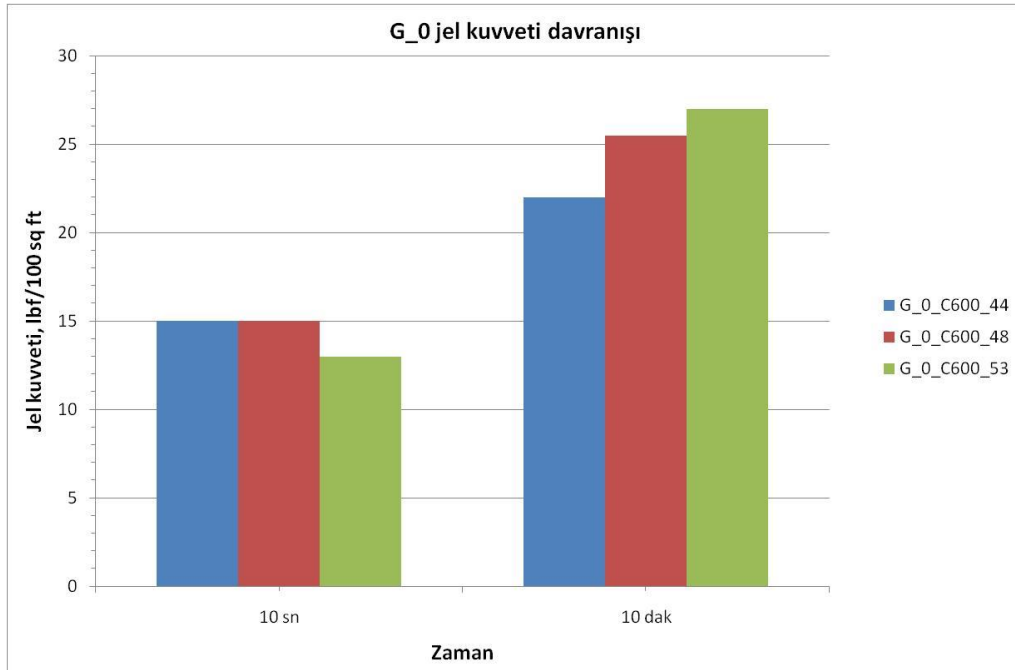
Şekil 5.6: G Sınıf çimento reoloji davranışı – %48 su.



Şekil 5.7: G Sınıf çimento reoloji davranışı – %53 su.



Şekil 5.8: G Sınıf çimento reoloji davranışı – karşılaştırma.



Şekil 5.9: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı – karşılaştırma.

Çizelge 5.4'te %48 su içerikli katkısız çimento için elde edilen ölçüm sonuçları listelenmiştir. Burada da 10 sn ve 15 sn beklemlerinde yapılan viskometre okumaları arasındaki farkın önemli olmadığı anlaşılmaktadır. %53 su içerikli örneğe ait davranış EK-C'de Şekil C.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.4: G Sınıf çimento reoloji davranışı - %48 su içerikli.

Reoloji Testi		
Dev/dak	Kadran okuma (10 sn)	Kadran okuma (15 sn)
600	119	117
300	80	78,5
200	64	64
100	49,5	49
6	16	16
3	10,5	10
10 sn Jel	15	
10 dk Jel	25,5	

Genel bir değerlendirme yapılırsa, katkısız G Sınıf çimento ile hazırlanan örneklerin akışkanlık davranışlarında literatürde yayınlanmış değerlere benzer sonuçlar elde edilmiştir. Katkısız çimento harcının yoğunluğu pratik olarak 1.909 g/cm^3 (15.91 lbm/gal) olarak hesaplanmıştır (çimento yoğunluğu 3.15 g/cm^3 ve su yoğunluğu 1 g/cm^3 alınmıştır).

Tekrarlanan deneylerde çimentonun yapısına bağlı olarak az da olsa farklı kadran okumaları elde edilmiştir. Diğer taraftan, artan su miktarıyla viskometre okumalarında beklendiği gibi, bir düşüş gözlenmiştir. Bütün su içeriklerinde, her hızda kadran okuması 200 değerinin altında gerçekleşmiştir. Ancak, bu durumda, çimentonun yoğunluğu düşerken, dayanımının da azalmasıyla sonuçlanmaktadır. Katkısız olarak hazırlanan çimento örnekleri saha uygulama koşulu olan en fazla 300 kadran okuması kriterini sağlamaktadırlar.

Katkısız çimento örneklerinin akışkanlık davranışlarına ilişkin sonuçlar değerlendirildiğinde, çimento harçlarının Newtonian olmayan bir akışkan davranışı gösterdikleri (farklı hızlarda farklı görünür viskozite sergiledikleri) anlaşılmaktadır. Artan viskometre hızıyla görünür viskozite doğrusal olmayan bir orantı ile azaldığı için (shear thinnig), akışkanın Newtonian olmayan (non-Newtonian) sanal plastik (pseudoplastic) özellik gösteren bir akışkan olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır.

5.1.2 ARI içerikli çimento reoloji deneyleri

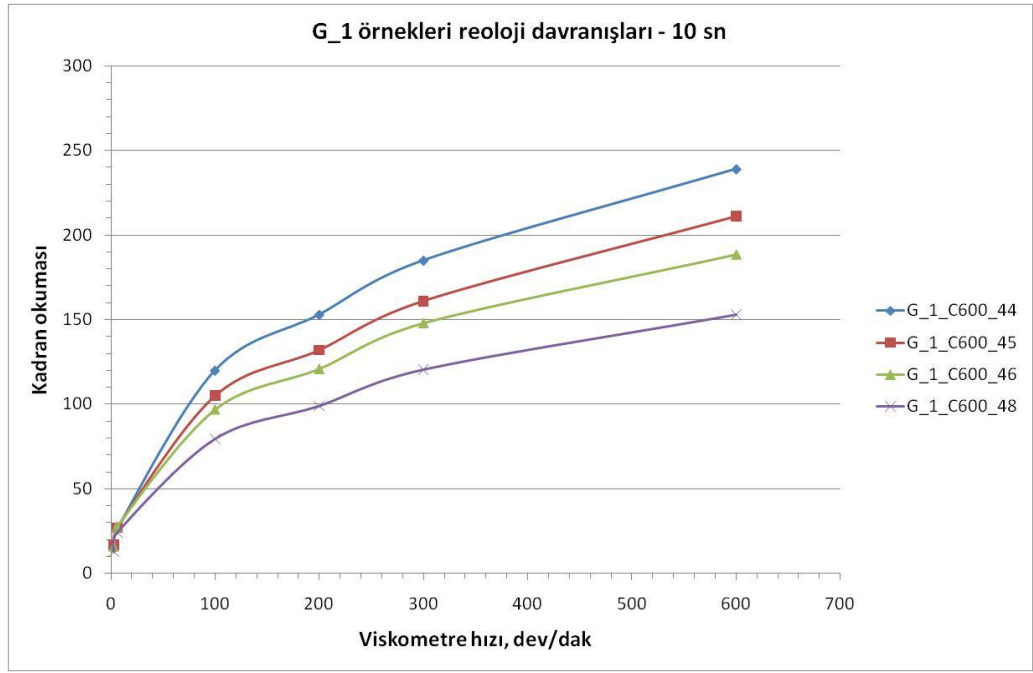
G Sınıf çimentoya ARI maddesi değişik derişimlerde (konsantrasyonlarda) eklenerek çimento harcının akışkanlık davranışındaki değişim incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Çimento ağırlığınca %1-5 aralığında değişik oranlarda ARI içerikli deneyler yapılarak, ARI maddesinin çimentonun reolojisi üzerine etkileri

incelenmiştir. Genel olarak artan ARI konsantrasyonu ile çimentonun viskozitesinde artışların olduğu belirlenmiştir. Aynı koşullarda deneyler (katkısız çimento örneklerinde olduğu gibi) iki veya daha çok yapılarak, sonuçların tekrarlanabilirliği amaçlanmıştır. Bu bölümde aynı ARI konsantrasyonunda sadece tekrarlanan deneylerden birisini içeren, karşılaştırmalı reoloji deney sonuçları verilmektedir. Her bir tekrar deneye ait ölçüm sonuçları EK-B’de Çizelge B.1’de ve bu sonuçlarla oluşturulan grafiklerde EK-C’de Şekil C.14-C.74’te verilmektedir.

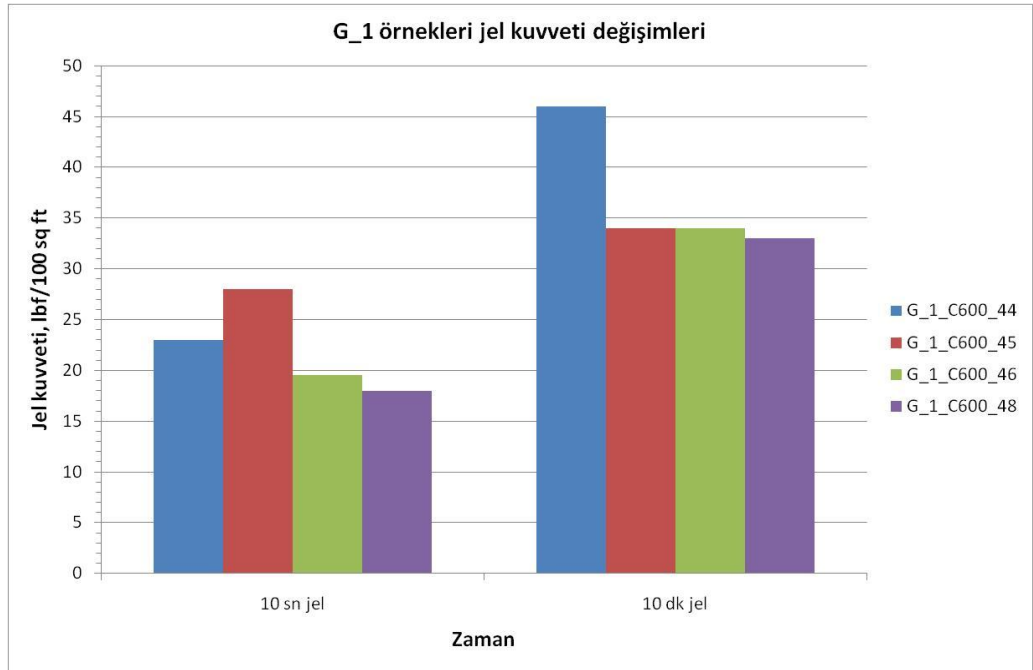
%1-5 ARI içerikli çimento harcı örneklerinin akışkanlık davranışlarını gösteren grafikler Şekil 5.10 ve 5.21 arasında verilmektedir. Farklı ARI içerikleri için verilen deney sonuçları, sırasıyla karşılaştırmalı reolojik davranış ve jel kuvveti değişimlerini göstermektedir.

Şekil 5.10 ile gösterilen % 1 ARI içerikli çimento örneği 600 viskometre hızında 240 kadran okuması vermektedir. Artan su içeriği ile kadran okuması düşmektedir. %44 su içerikli örnekte bile, kadran okuması 300’ün altında olmasına rağmen, aynı su içerikli katkısız çimentonun ortalama 150 olan kadran okumasından oldukça yüksektir. %48 içerikli ARI katkılı çimentonun kadran okuması 150 olarak ölçülmüştür. Diğer bir deyişle, ARI kullanımı sonucu oluşan viskozite artışları çimento harcına su eklenmesini gerektirmektedir. Ancak, daha önce belirtilen ve su miktarının artmasıyla oluşabilecek istenmeyen çimento özelliklerinin de denetim altında tutulması gerekliliği söz konusudur.

Şekil 5.11’de %1 ARI içeren çimentoharcının jel kuvveti değişimi gösterilmektedir. ARI katkısı, jel kuvvetlerinde katkısız çimento sonuçlarını 10 sn için ortalama 17’den 20 lbf/100 ft²’e ve 10 dk için ortalama 23’ten 35 lbf/100 ft²’e artmasına neden olmuştur. ARI katkısının 10 dk jel kuvvetinde yol açtığı değişim daha fazladır; bu durum donma sürecindeki çimento harcının iç bünyesinde oluşan kimyasal reaksiyonların bu süreçte daha etkin olması şeklinde açıklanabilir. Katkısız çimento örneklerinde kendisini gösteren, artan su içeriğine rağmen, jel kuvvetlerinde önemli bir değişimin olmaması, %1 ARI içerikli örneklerde de gözlenmektedir. Ancak %44 su içerikli örneğin 10 sn jel kuvveti değerinin 20 lbf/100 ft²’den büyük olması akış sorununu engelleyebileceği nedeniyle çok önemlidir. Aynı şekilde 10 dk jel kuvvetlerinde de 45 lbf/100 ft² değerlerine varan önemli artışlara yol açmıştır.



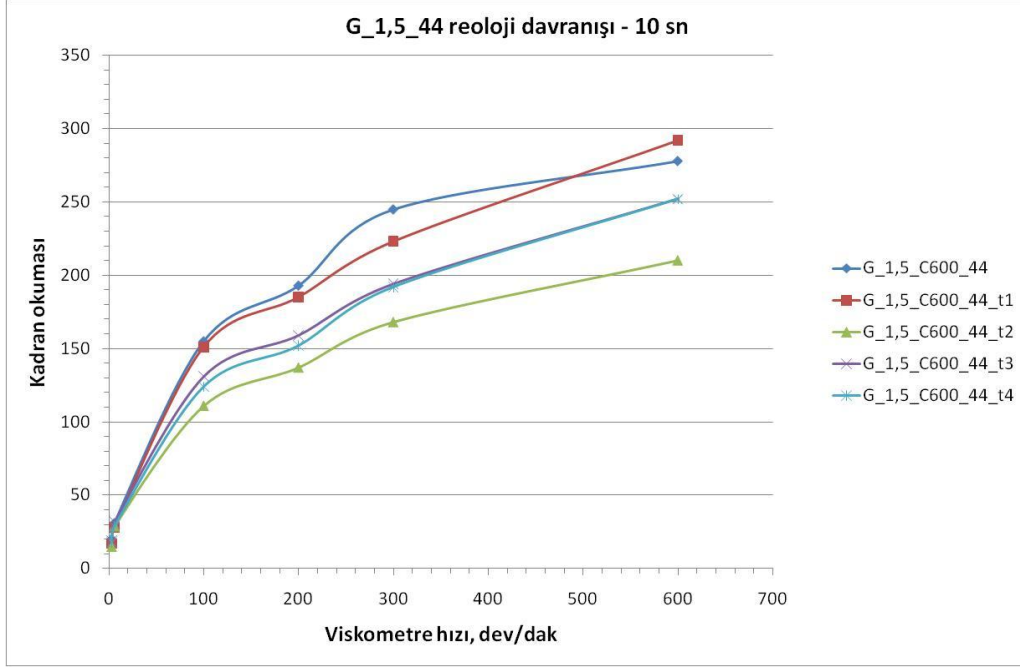
Şekil 5.10: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI) - karşılaştırma.



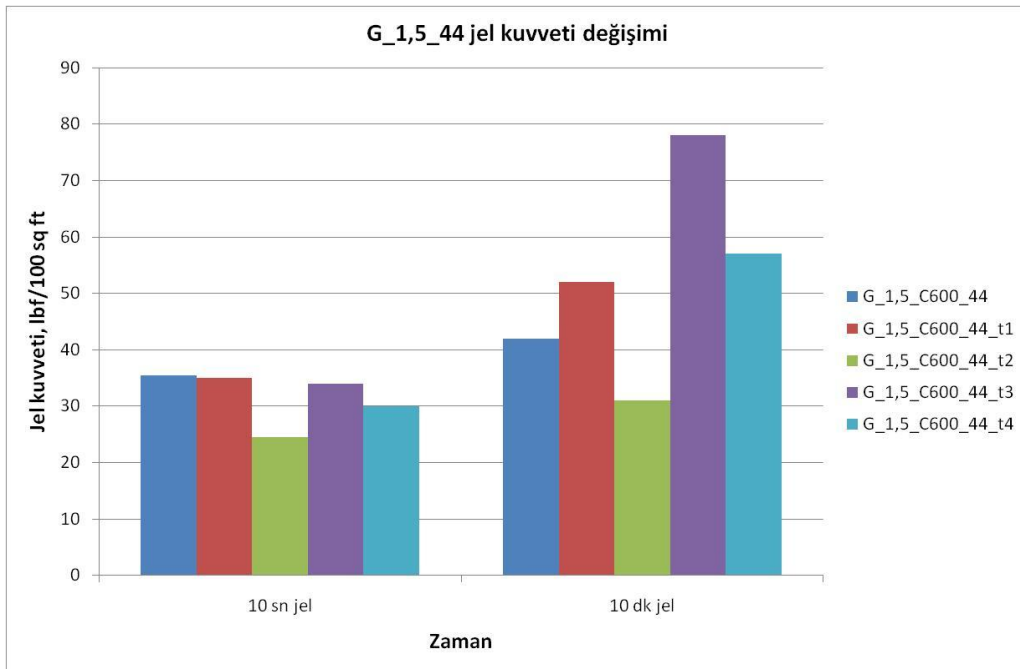
Şekil 5.11: G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%1 ARI) - karşılaştırma.

Şekil 5.12’de %1,5 ARI içeren çimentonun %44 su içeriklerinde aynı koşullarda beş kez tekrarlanarak yapılan deney sonuçları grafiği ve Şekil 5.13’de jel kuvveti değişimi grafiği görülmektedir. Burada da, viskozite ve jel kuvvetlerinde artan ARI miktarıyla artış olduğu gözlenmektedir.

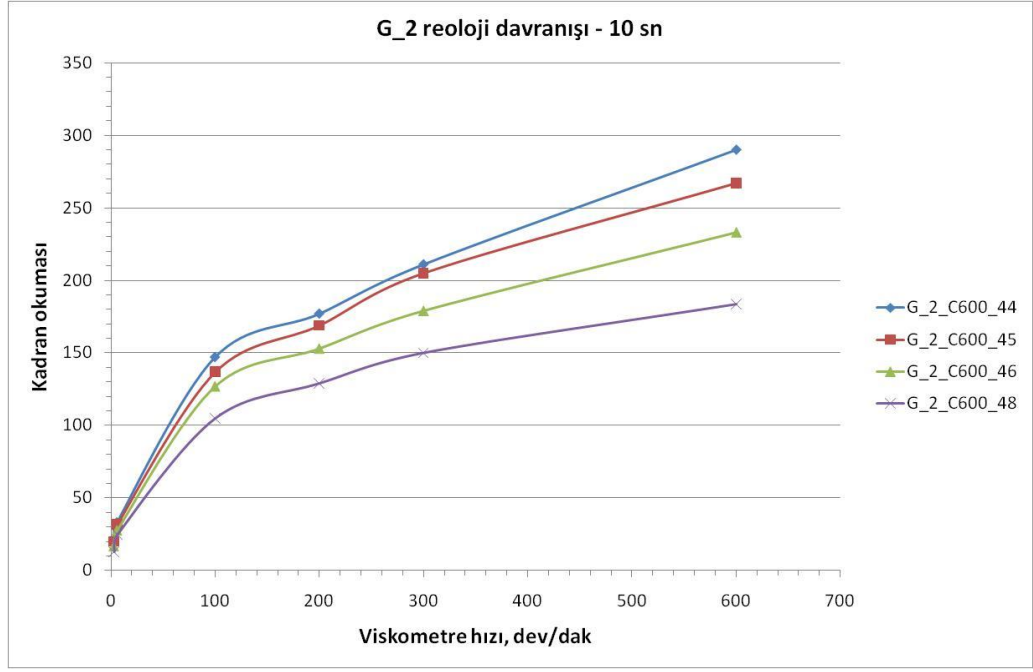
Şekil 5.14 ve 5.15'te %2 ARI içerikli deney sonuçları görülmektedir. %44 su içeriğinde 600 dev/dk hızda viskometre kadran okuması limit değer olan 300'e ulaşmıştır. Artan su içeriğiyle kadran okumaları azalım göstermektedir. %48 su içeriğinde bu değer yaklaşık 180'dir. Jel kuvvetindeki artışın artan ARI içeriğiyle devam ettiği burada da gözlenmektedir.



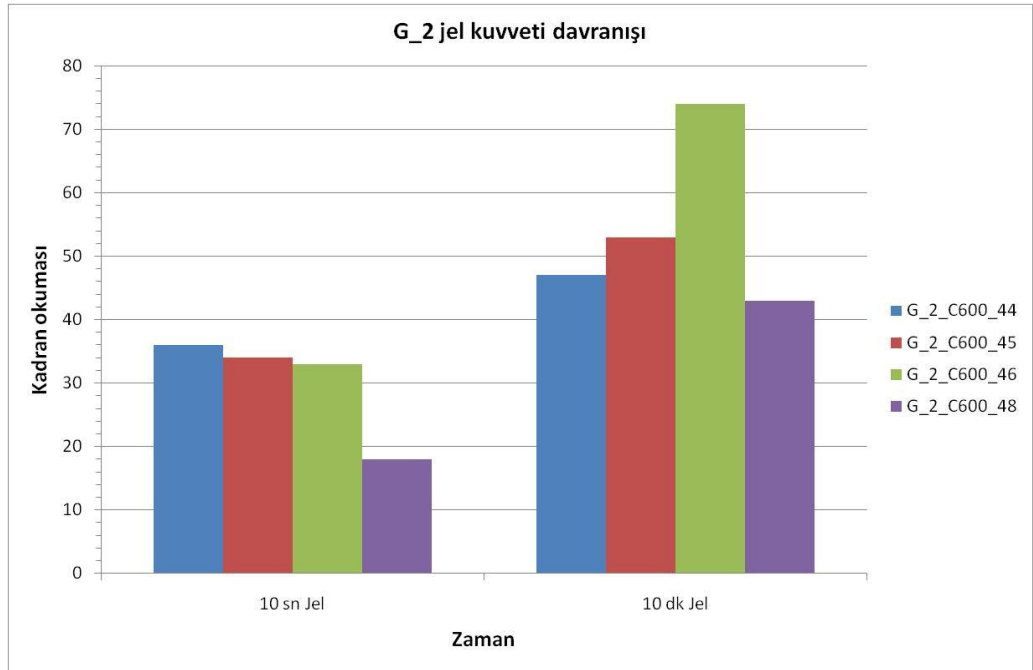
Şekil 5.12: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI) – %44 su - karşılaştırma.



Şekil 5.13: G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%1,5 ARI) - karşılaştırma.



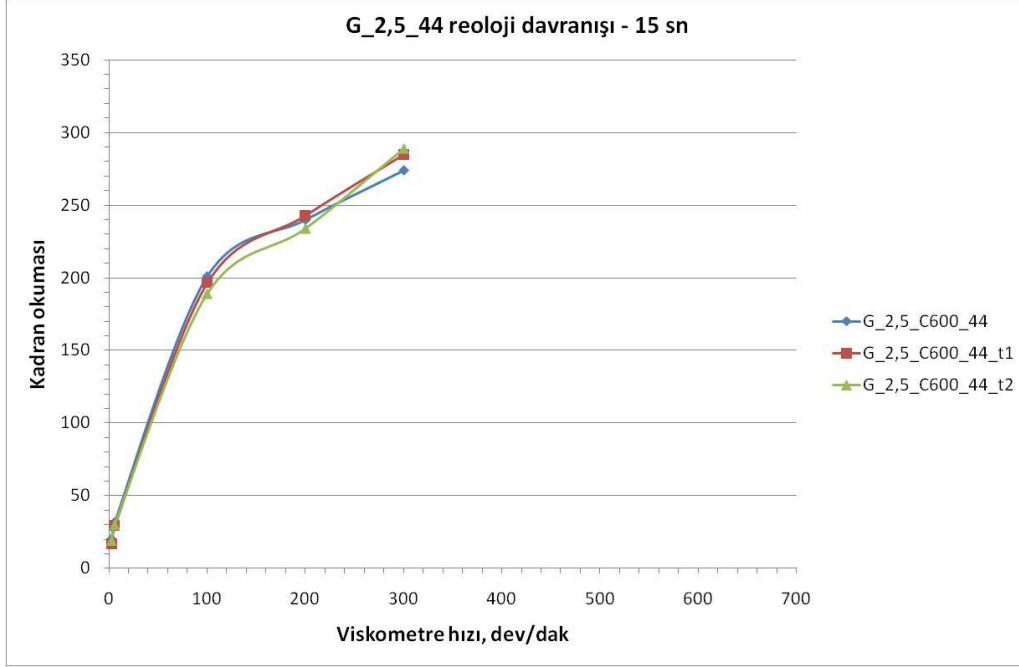
Şekil 5.14: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI) – karşılaştırma.



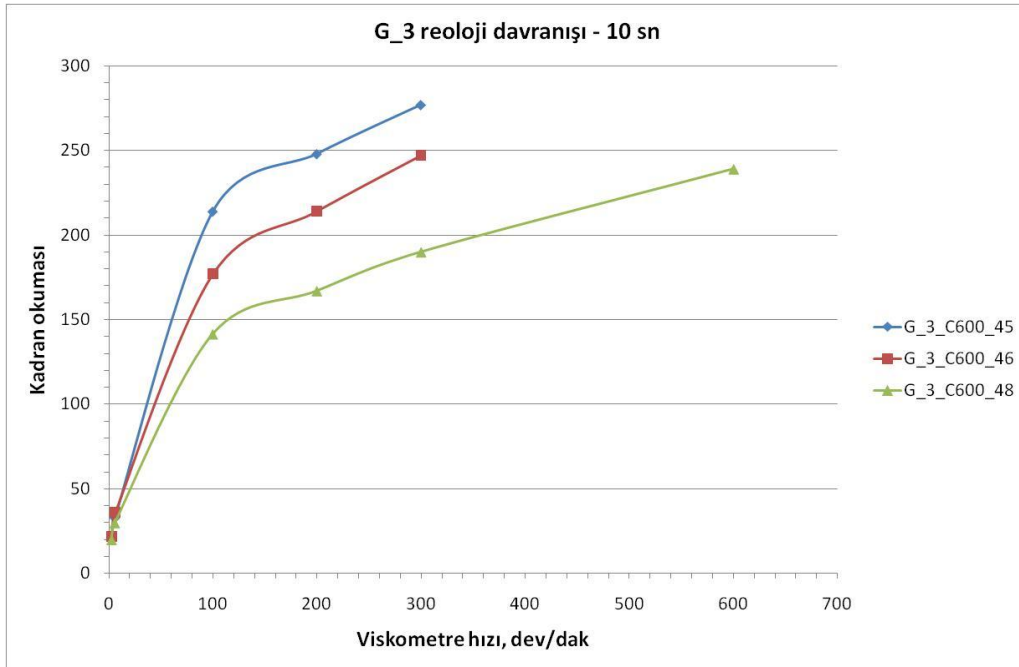
Şekil 5.15: G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%2 ARI) - karşılaştırma.

Özellikle %2,5 ve daha yüksek ARI içerikli çimento örneklerinin viskometerde 600 dev/dk hızda verdiği kadrın okuması değeri 300'ün üzerindedir. Viskometrenin en büyük kadrın değeri 300 olduğu için, yüksek ARI içerikli örneklerin 600 dev/dk hızındaki değerleri belirlenememiştir. Şekil 5.16'da %2,5 ARI içerikli çimentonun ölçüm sonuçları grafik olarak gösterilmiştir. Viskometrenin 300 dev/dk hızında limit kadrın okuması değerine (300) çok yaklaşılmıştır. Bununla beraber, tekrarlanan

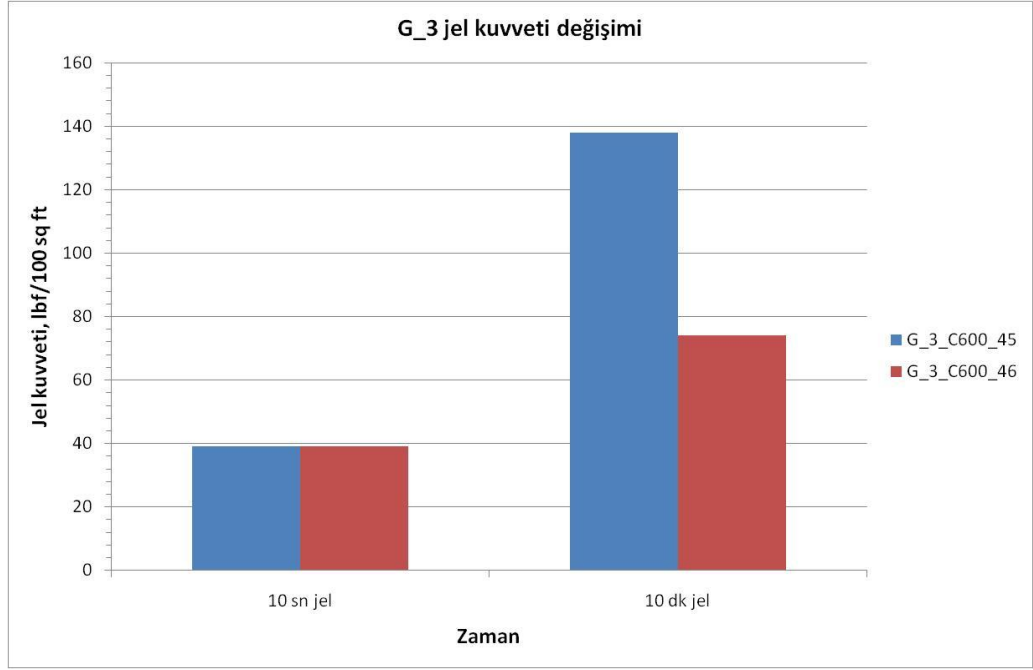
deneylerden yaklaşık aynı sonuçların alındığı, şekilden de görülmektedir. %3 ARI içerikli deney sonuçları Şekil 5.17 ve 5.18’de, %3,5 ARI ve %48 su içerikli çimento deney sonuçları Şekil 5.19’da gösterilmektedir.



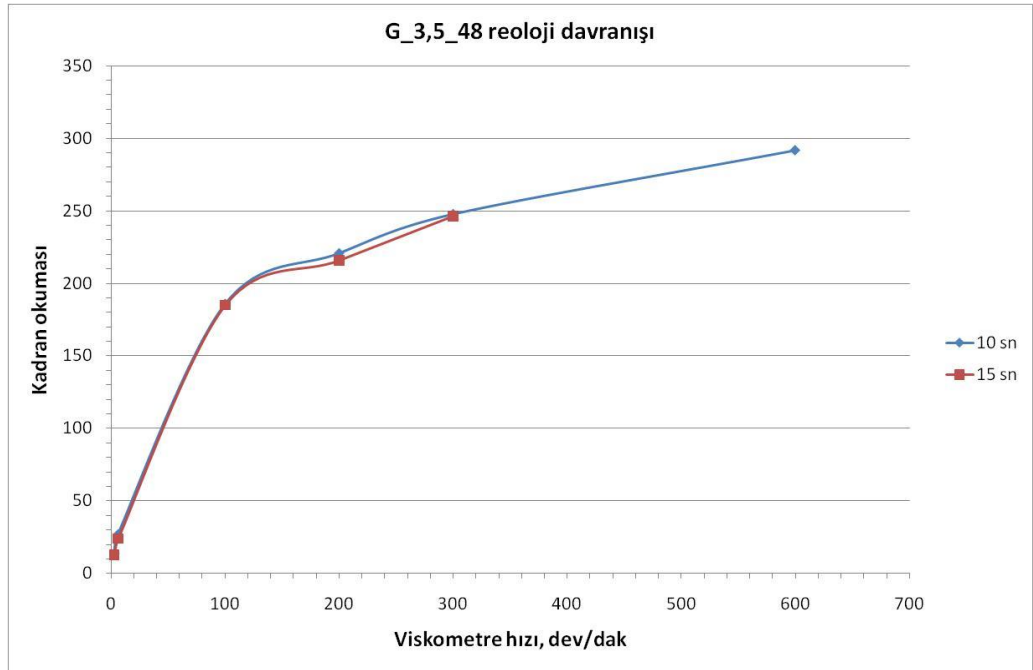
Şekil 5.16: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2,5 ARI) – %44 su – karşılaştırma.



Şekil 5.17: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI) – karşılaştırma.



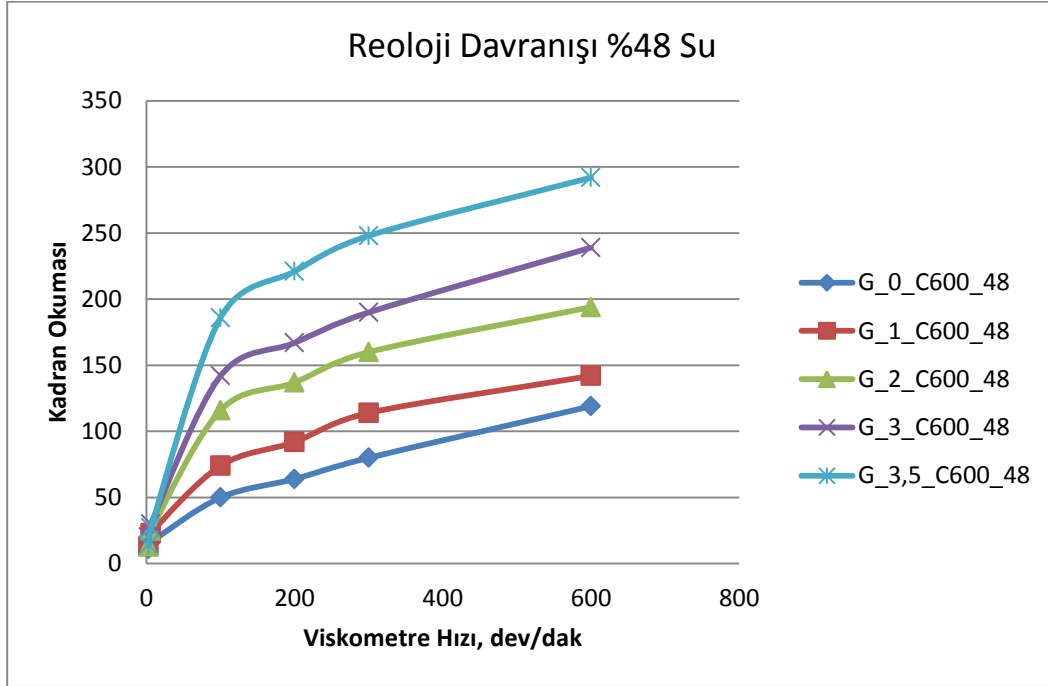
Şekil 5.18: G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%3 ARI) - karşılaştırma.



Şekil 5.19: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3,5 ARI) – %48 su.

ARI'nın etkisini daha iyi görebilmek amacıyla %48 su ve değişik ARI içerikleriyle hazırlanmış olan çimentoların reolojik özellikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.20'de verilmiştir. Artan ARI içeriğiyle %48 su içeren çimento örneklerinde de akışkanlığın arttığı belirlenmiştir. Bütün hızlarda kadran okumalarının 300 değerinin altında olması, kullanılan su miktarının %44 değil %48 olması nedeniyledir. Reolojik olarak

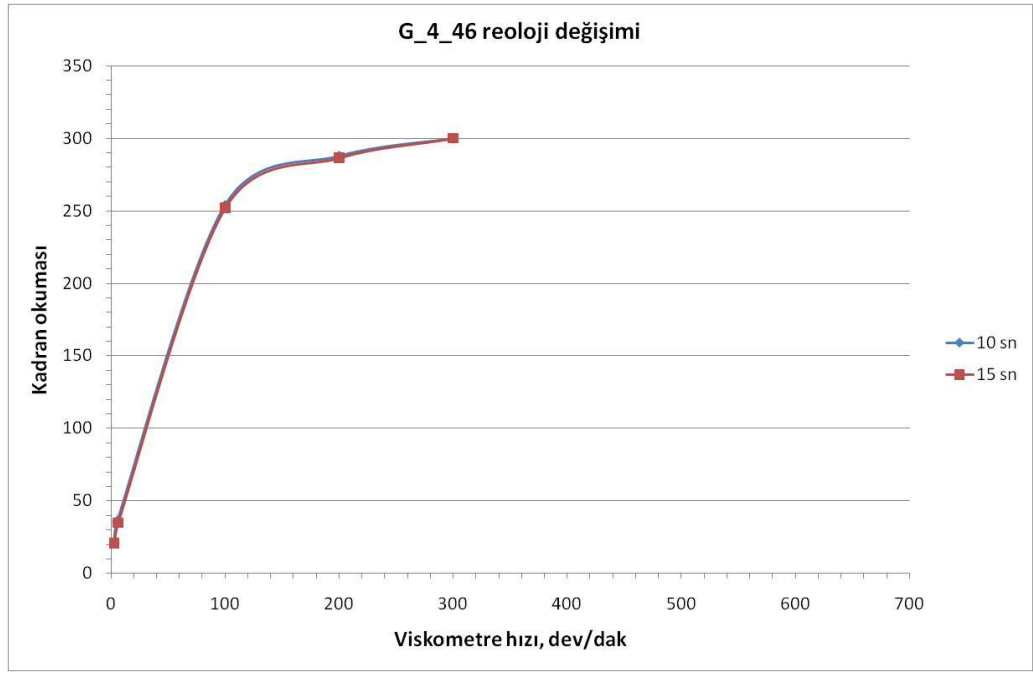
ARI katkılı çimento örnekleri Newtonian olmayan, sanal plastik,ve artan kayma hızı ile incelen (shear thinning) bir davranış modeli göstermektedir.



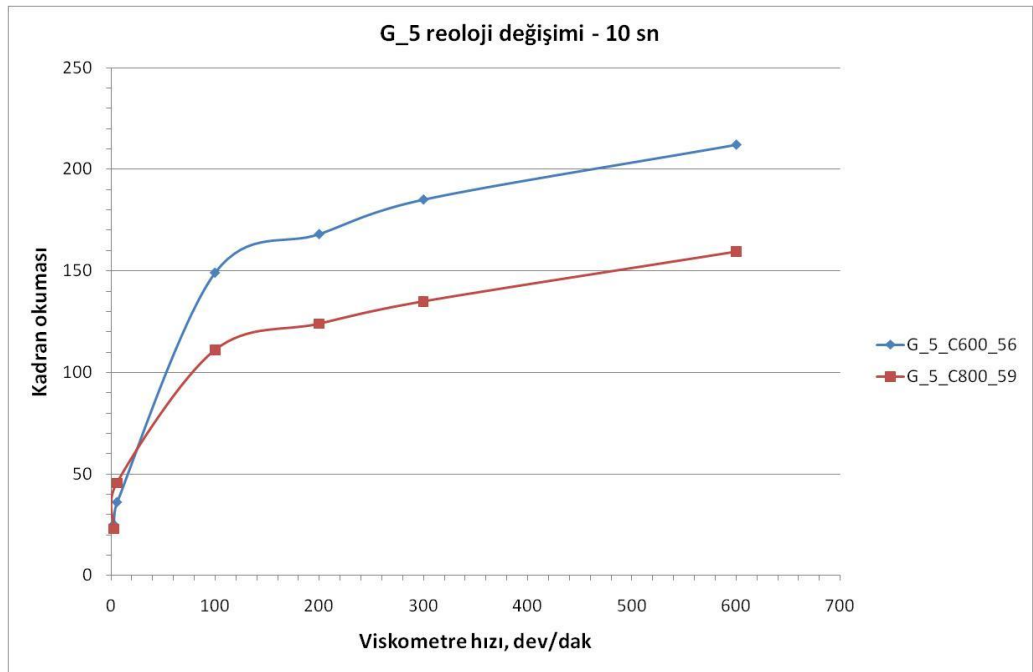
Şekil 5.20: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%48 Su).

%4 ARI ve %46 su içerikli deney sonuçları Şekil 5.21’de; %5 ARI içerikli %56 ve %59 su içerikli deney sonuçları Şekil 5.22’de; jel kuvveti davranışı ise Şekil 5.23’de gösterilmektedir. %4 ve üstündeki ARI içerikli örneklerde akışkanlıktaki aşırı düşüşler, yani aşırı viskozite artışları nedeniyle daha fazla su içeriği kullanılmak zorunda kalınmıştır. Unutulmamalıdır ki su içeriği arttıkça çimentonun donma zamanı artacak ve dayanımı büyük oranda azalacaktır.

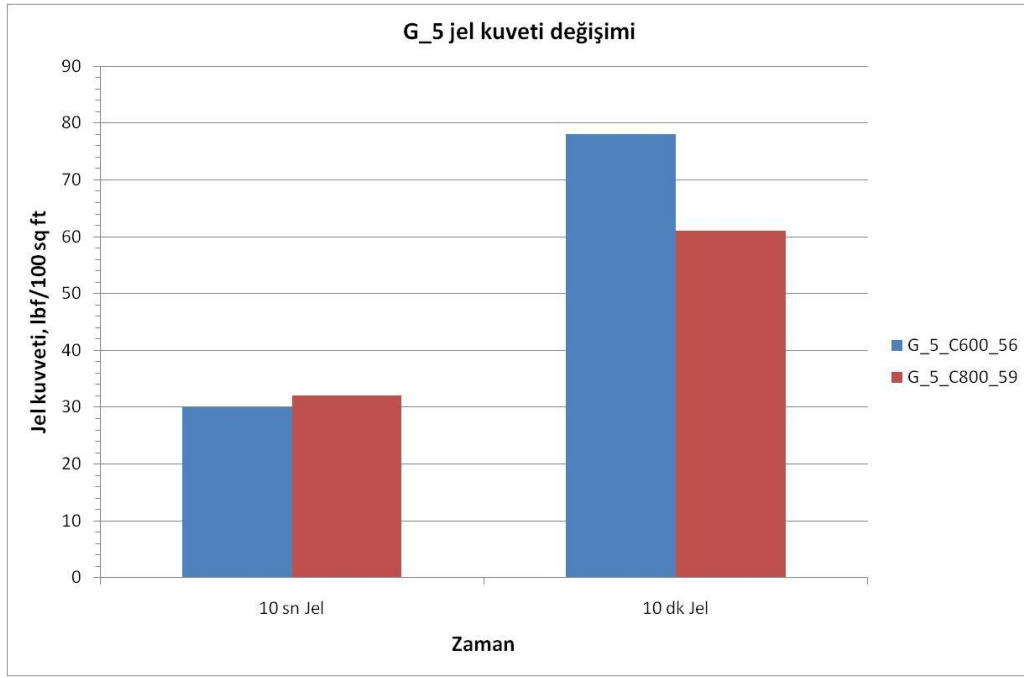
Grafiklerde artan ARI içeriğiyle viskometre kadran okumalarının ve jel kuvvetlerinin daha da arttığı görülmektedir. Bütün bu çimento örneklerinde su içeriği en az %45 kullanılarak hazırlanmış ve artan ARI içeriğine bağlı olarak su içeriği daha da artırılmıştır. En fazla ARI kullanılan %5 içerikli deneylerde, %56 su içeriğinde kadran okumasının yaklaşık olarak 250 civarında olduğu gözlenmektedir. Jel kuvvetlerinde de artan ARI içeriğine göre (artan su miktarlarına rağmen) artışların olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.21: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%4 ARI) – %46 su.

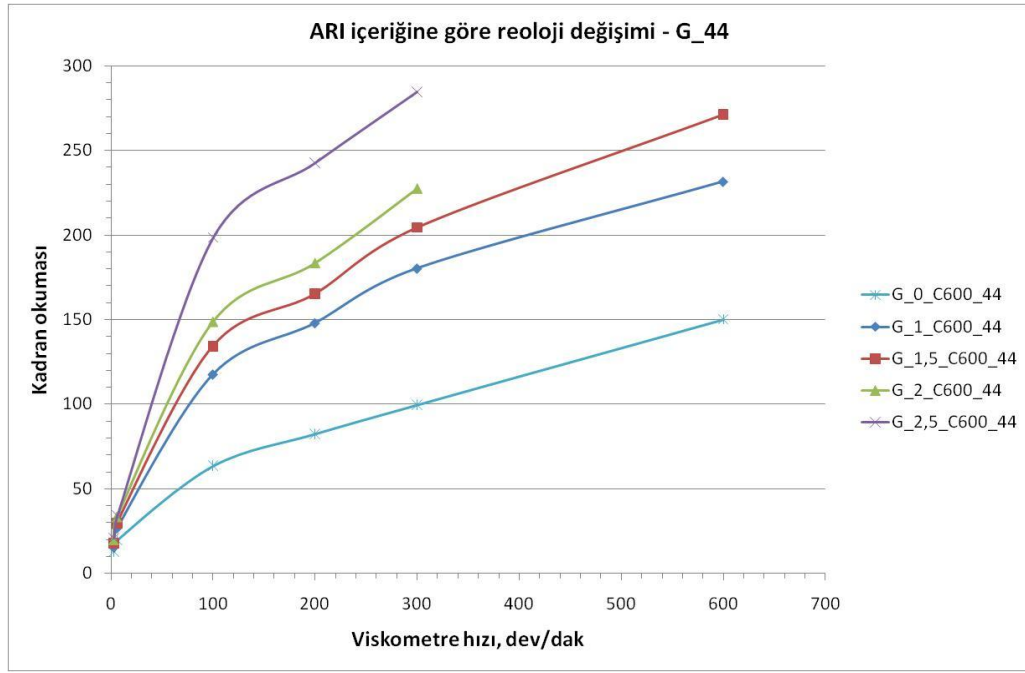


Şekil 5.22: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%5 ARI) – karşılaştırma.



şekil 5.23: G Sınıf imento jel kuvveti grafiği (%5 ARI) - karşılaştırma.

Su miktarının artması imento özelliklerini olumsuz yönde etkilediği için, çalışmada bu aşamadan sonra standart değer olan %44 su içerikli imento harcı örneklerinin reolojisi zerine ARI maddesinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 5.24'te verilmektedir. Artan ARI içeriğine bağlı olarak viskometrenin her hızında kadran okumaları değerlerinde bir artışın olduğu açıktır. Burada %2 ve %2,5 ARI içerikli deneylerde 600 dev/dk hızdaki kadran değerleri viskometreden okuma yapılamadığı için görülememektedir. Tekrarlanan %2 ARI içerikli imento deneylerinde 600 dev/dk hızda 300'e yakın kadran okumaları elde edilmiştir. Bunlara ait sonuçlar EK-B'de izelge B.1'de ve EK-C'de şekil C.31-C.74'te verilmiştir. Oda koşullarında reolojik ölçüt olarak en fazla ARI derişimi %2 olmalıdır denilebilir. Daha yüksek ARI derişimlerinde sınır aşılmakta ve viskozite dşrclerin (incelticilerin) kullanılması gerekmektedir.



Şekil 5.24: Artan ARI içeriğiyle G Sınıf çimento reolojisinin değişimi - %44 su.

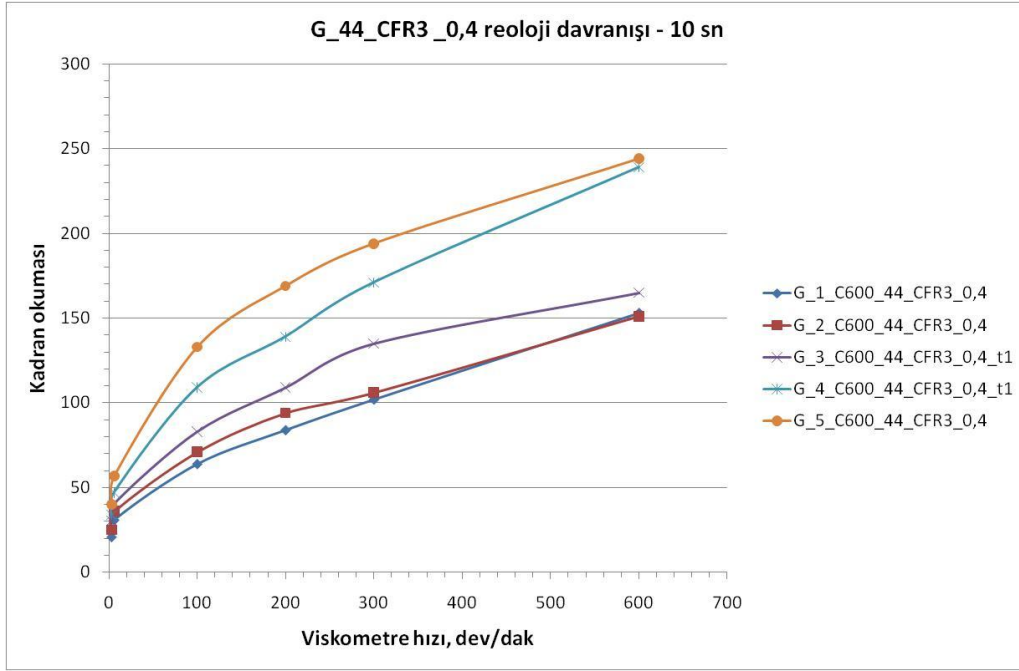
5.1.3 ARI ve viskozite kontrol edici içerikli çimento akışkanlık deneyleri

ARI katkısı nedeniyle çimento harcı viskozitesinde yüksek artışlar olduğundan, akışkanlığın kontrol altına alınması kaçınılmazdır. Bu durumda kullanılacak olan katkı maddesinin seçiminde TPAO'nun deneyimleri ve yönlendirmesi ile Halliburton firmasının CFR3 adlı Viskozite Kontrol Edici (Cement Friction Reducer) maddesinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Genel olarak çimento ağırlığına göre %0,4 ve %0,7 olarak iki farklı konsantrasyon ile, ARI nedeniyle artış gösteren viskozite değerlerinin kontrol altına alınabilirliği bu bölümde incelenmiştir. Her bir deney ve deney tekrarlarından alınan sonuçları gösteren çizelge ve şekiller EK-D'de Çizelge D.1'de ve Şekil D.1-D.9 arasında verilmektedir.

%0,4 ve %0,7 CFR3 katkılı örneklerin akışkanlık davranışları sırasıyla Şekil 5.25 ve 5.26'da verilmiştir. Benzer şekilde %0,4 ve %0,7 CFR3 içerikli örneklerin jel kuvveti değişimleri ise Şekil 5.27 ve 5.28'de gösterilmektedir. %0,4 CFR3 katkılı örneklerde her ARI içeriği için 600 dev/dk viskometre hızında kadran okumaları sınır değer 300'ün altındadır. %3 ARI içeriğine kadar olan örneklerin kadran okumaları, katkısız çimento harcının sergilediği 150 değerine yakındır.

Artan inceltici miktarına bağlı olarak viskozitenin hangi değerlere düşebileceği incelenmiş ve %0,7 CFR3 içeriği için sonuçlar Şekil 5.26'da gösterilmiştir. Bu durumda viskozite azalımı açık bir şekilde görülmektedir. %5 ARI içerikli örneğin

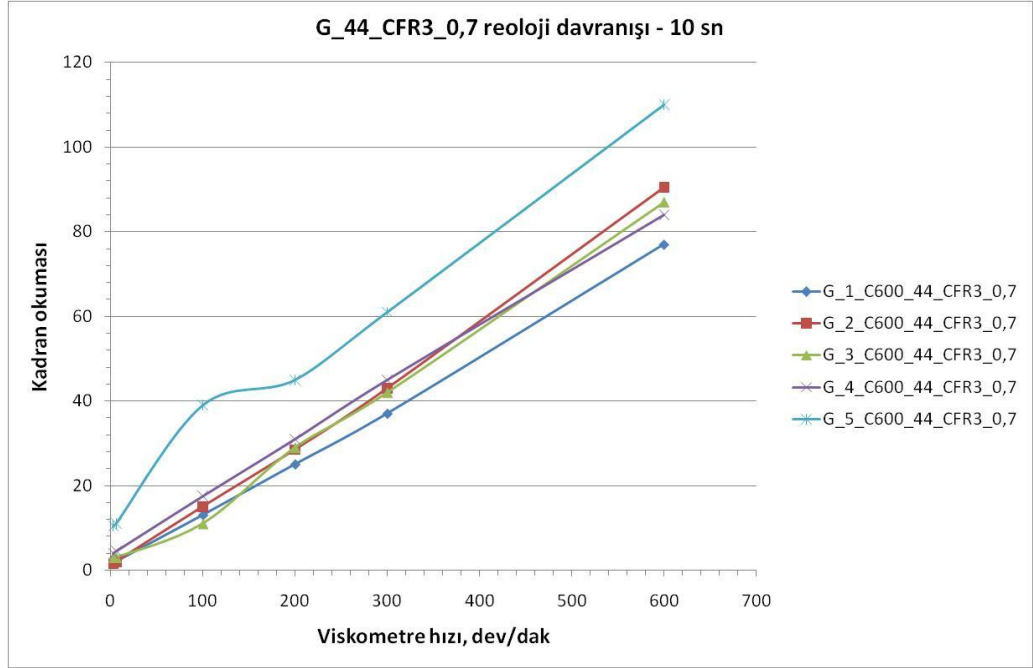
600 dev/dk viskometre hızındaki kadran okuması katkısız çimento harcı örneği değerinden de daha düşüktür ve yaklaşık 110 değerindedir. Burada ilginç olan başka bir durum, şekilden de açıkça görüleceği gibi, %0,7 CFR3 katkılı çimento harcı örneklerinin viskometre hızına bağlı olarak doğrusal bir davranış göstermesidir. Bu davranış Newtonian akışkan davranışına uyumludur ve artan viskometre hızı ile görünür viskozite değişiminin ihmal edilebileceğini belirtmektedir. Diğer bir deyişle görünür viskozite artan CFR3 konsantrasyonu ile durağanlaşma eğilimindedir.



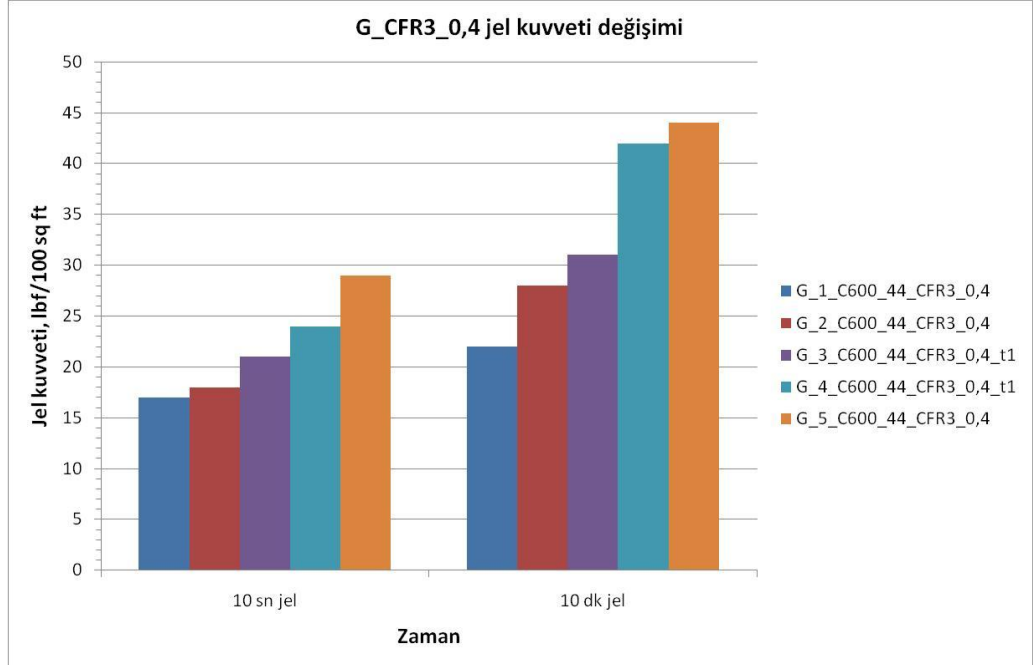
Şekil 5.25: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,4 CFR3).

Artan CFR3 derişimlerinde jel kuvvetleri de artan bir şekilde azalmaktadır. %0,7 CFR3 katkılı örneklerin jel kuvvetleri, katkısız çimento harcı örneklerine göre çok daha küçüktür. %0,4 CFR3 içerikli örneklerin jel kuvvetleri katkısız çimento değerlerinden biraz yüksektir, fakat kabul edilebilir değerlerdedir. ARI katkısı CFR3 ile birlikte kullanıldığında, çimentonun reolojik özelliklerinin kontrol edilebileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. En önemlisi ise, artan CFR3 ile çimento harcının akışa karşı direncinin azalması açık bir şekilde görülmektedir. Eşik değer 20 lb/100 ft² olarak kabul edilirse, %0,7 CFR3 içerikli ve %1 ARI içerikli örneğin 10 sn jel kuvvetinin 2 lb/100 ft² olması akış sorununa yol açacaktır. Diğer taraftan %5 gibi yüksek ARI derişiminin ise CFR3'ün olumsuz etkisini yok edici ve önleyici bir davranış sergilediği gözlenmektedir. Yüksek CFR3 içerikli örneklerde 10 dak jel

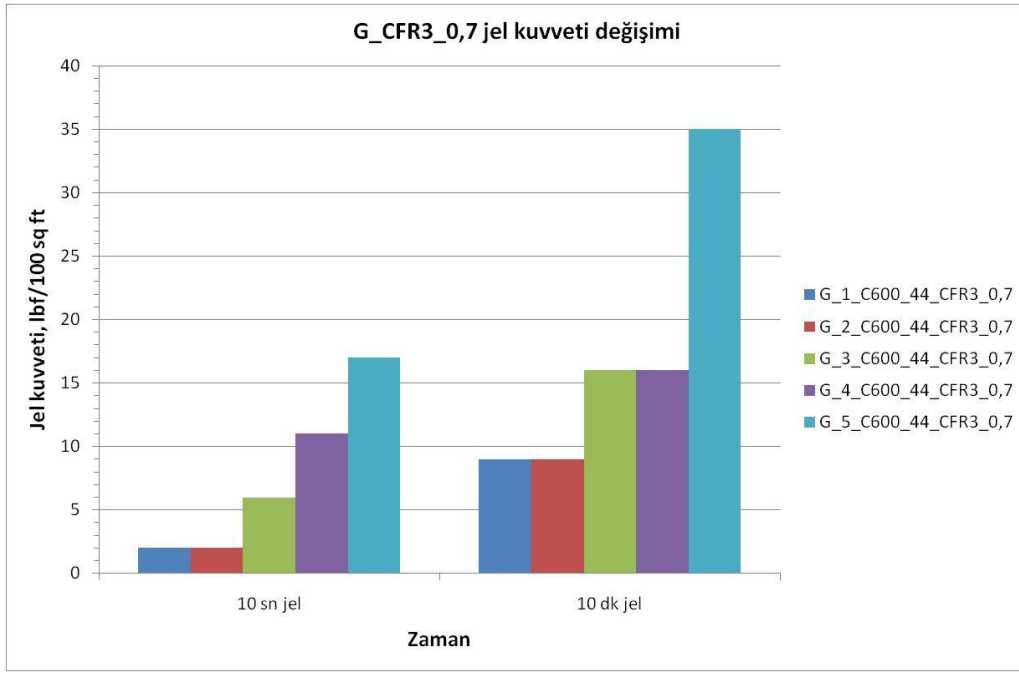
kuvvetlerinin de eşik değerden (%1-4 ARI içerikli örneklerde) düşük olması önemli bir göstergedir ve sorunun %5 ARI ile aşılabileceği açıkça görülmektedir.



Şekil 5.26: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,7 CFR3).



Şekil 5.27: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,4 CFR3).



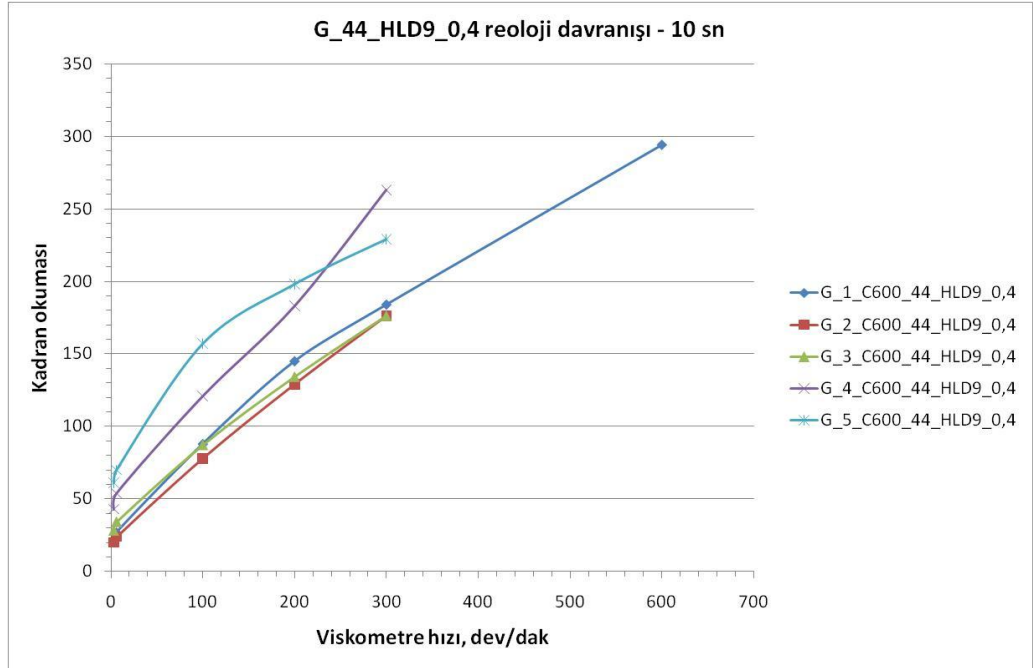
Şekil 5.28: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,7 CFR3).

5.1.4 ARI ve su kaybı kontrol edici içerikli çimento akışkanlık deneyleri

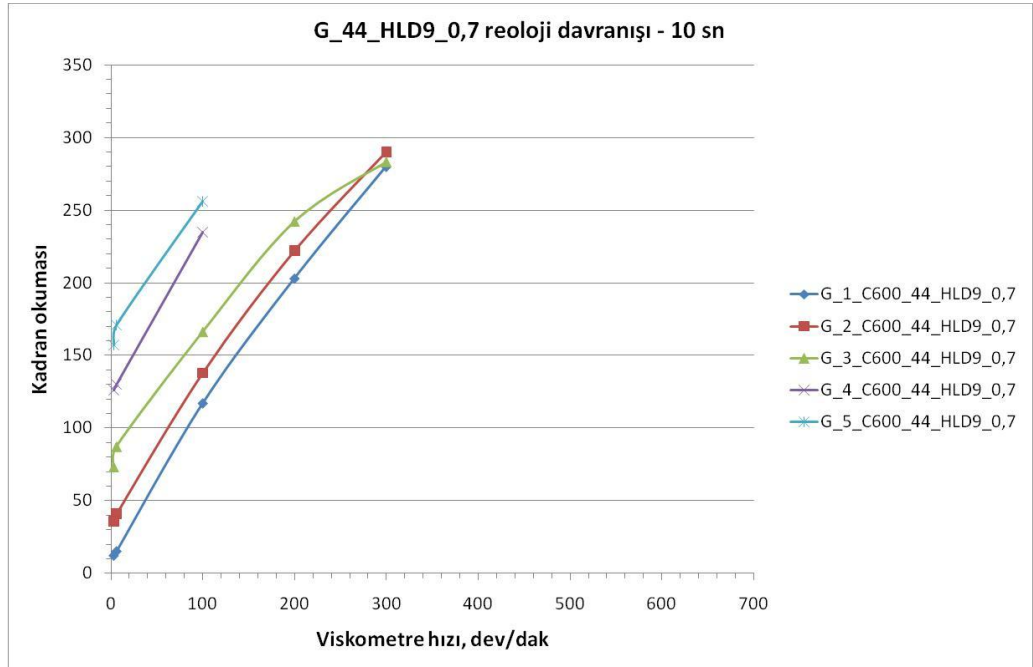
ARI katkısı sonucu çimento harcı ağdalılığındaki (viskozitesindeki) aşırı artışlar nedeniyle, akışkanlığın denetim altına alınması gerektiği ve bu denetimin CFR3 katkısı ile gerçekleştirilebileceği yukarıda Bölüm 5.1.3'te incelenmiştir. Çimento harcının bir diğer istenen özelliği, su kaybının kontrol altına alınarak önlenmesidir. Bu durumda da kullanılacak olan katkı maddesinin seçiminde TPAO'nun deneyimleri ve yönlendirmesi ile, yine Halliburton firmasının katkı maddelerinden HALAD9'un (kod gösterimi HLD9) kullanılması kararlaştırılmıştır. CFR3'te olduğu gibi, çimento ağırlığına göre %0,4 ve %0,7 olarak iki farklı derişimde ARI ile birlikte kullanılarak akışkanlık davranışının değişimi ve kontrol altına alınabilirliği incelenmiştir. Her bir deney ve deney tekrarlarından alınan sonuçlar EK-D'de Çizelge D.2'de ve şekiller Şekil D.10-D.17 arasında verilmektedir. Genel bir değerlendirme olarak, HLD9 su kaybı azaltıcı katkı maddesinin çimento harcının viskozitesini (ağdalılığını) önemli bir oranda ve sınırların ötesinde yükselttiği gözlenmektedir.

%0,4 ve %0,7 HLD9 katkılı çimento harcı örneklerinin akışkanlık davranışları sırasıyla Şekil 5.29 ve 5.30'da verilmiştir. Benzer şekilde %0,4 ve %0,7 HLD9 içerikli örneklerin jel kuvveti değişimleri ise Şekil 5.31'de gösterilmektedir. %0,4 HLD9 katkılı örneklerde %1'e kadar ARI içeren örneklerin 600 dev/dk viskometre

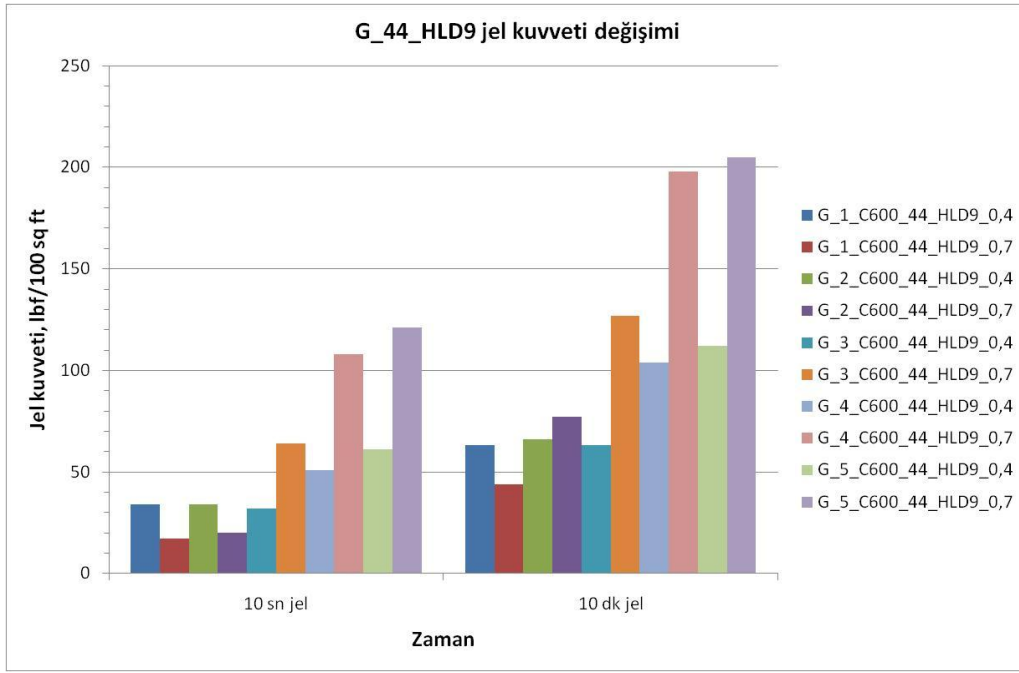
hızında kadran okumaları sınır değer 300'ün altındadır. Ancak %1'den yüksek ARI içerikleri için sınır değeri aşılmıştır.



Şekil 5.29: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,4 HLD9).



Şekil 5.30: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,7 HLD9).



Şekil 5.31: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – HLD9).

Artan ARI içeriğinde yüksek su kaybı azaltıcı miktarıyla, viskozitenin hangi değerlere yükseleceği incelenmiş ve %0,7 HLD9 içeriği için sonuçlar Şekil 5.30'da gösterilmektedir. Viskozitedeki artış burada daha da açık bir şekilde görülmektedir. Bütün ARI içerikleri için örneklerin 600 dev/dk viskometre hızındaki kadran okuması yapılamamıştır; okumalar sınır değer olan 300'den büyüktür. Bu nedenle viskometrenin 300 hızına kadar olan sonuçlar grafikte gösterilebilmiştir. %4-5 ARI içerikli örneklerde viskometrenin 300 dev/dk hızında bile, sınır değer olan 300 aşılmış ve ölçüm yapılamamıştır. CFR3 durumunda olduğu gibi, burada da ilginç bir şekilde %0,7 HLD9 katkılı çimento örneklerinin viskometre hızına bağlı olarak kadran okumalarında daha doğrusala yaklaşan bir davranış gözlenmiştir. Dolayısıyla, davranış Newtonian akışkan davranışına benzerdir ve artan viskometre hızı ile görünür viskozite sabitlenme eğilimindedir.

ARI ve HLD9 katkılı çimento harcı örneklerinin jel kuvveti davranışları Şekil 5.31'de verilmiştir. Artan HLD9 konsantrasyonlarında jel kuvvetleri de doğrusal olarak artmaktadır. Artış değeri çok yüksektir ve %0,7 HLD9 katkılı örneklerin jel kuvvetleri daha da yüksektir. Genel olarak HLD9 kullanılarak ARI ile birlikte hazırlanan örneklerin jel kuvvetleri kabul edilebilir değerlerde değildir ve kontrol edilmelidir. ARI katkısı HLD9 ile birlikte kullanılarak çimentonun reolojik

özelliklerinin kontrol edilemeyeceği veya istenen değerlerin çok üzerine çıkacağı sonucu ortaya çıkmaktadır.

5.1.5 ARI - su kaybı ve viskozite kontrolü katkılı çimento reolojisi deneyleri

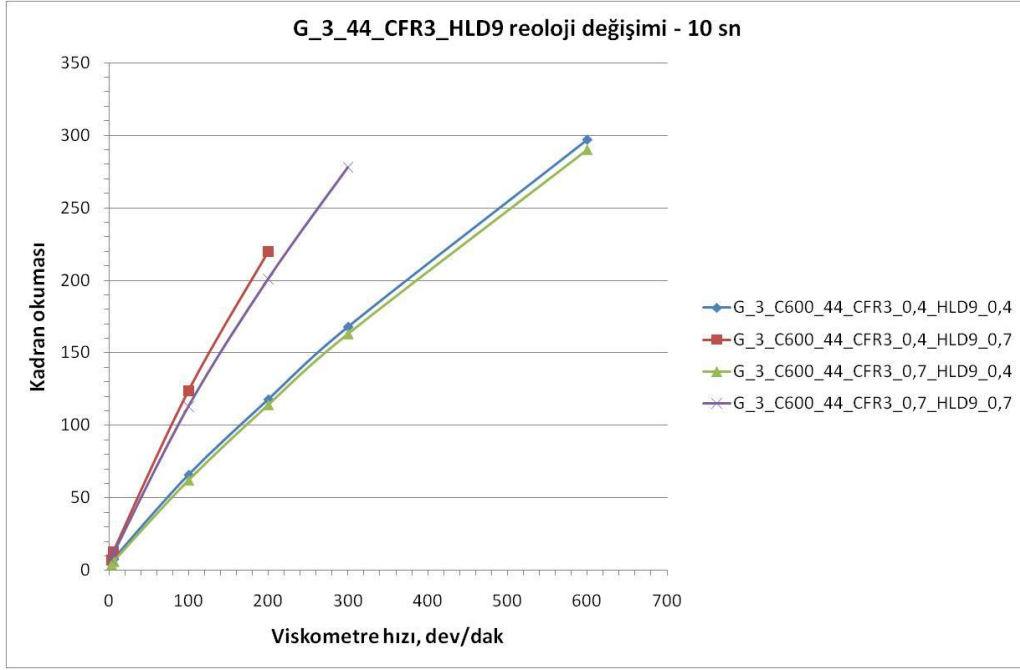
ARI katkısı sonucu çimento harcı viskozitesindeki artışlar nedeniyle, akışkanlığın denetim altına alınması gerektiği ve bu denetimin CFR3 katkısı ile gerçekleştirilebileceği, ancak su kaybı azaltıcı HLD9 katkısı ile birlikte kullanıldığında ise viskozitenin arttığı daha önceki bölümlerde gösterilmiştir. Çimento harcı örneklerinde sadece ARI'nın değil aynı zamanda HLD9'un da viskozite artırma etkisi vardır. Hem ARI'nın, hem de HLD9'un sebep olduğu viskozite artışlarını CFR3'ün kontrol edip edemeyeceği de araştırılmıştır. Dolayısıyla, ARI ile birlikte CFR3 ve HLD9 birlikte kullanıldığında, çimento reolojisindeki değişim incelenmiştir.

İlk olarak, kullanılacak olan CFR3 ve HLD9 katkılarının %0,4 ve %0,7 derişim kombinasyonlarında uygulanması kararlaştırılmıştır. Her bir deney ve deney tekrarlarından elde edilen ölçüm sonuçları EK-E'de Çizelge E.1'de ve şekiller Şekil E.1-E.10 arasında verilmektedir.

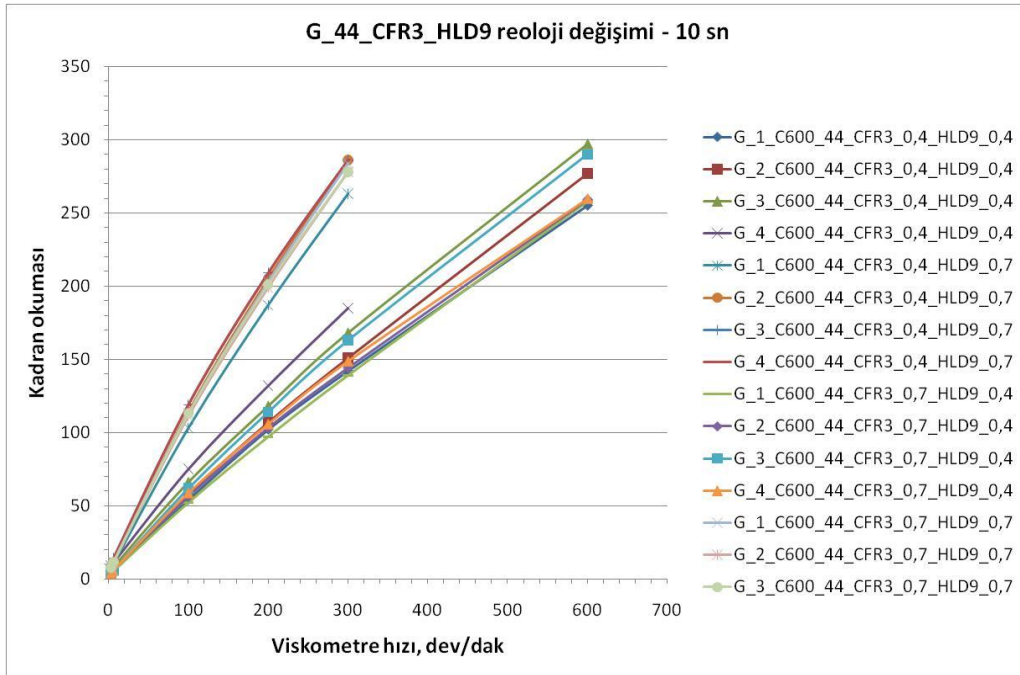
Şekil 5.32'den görüleceği gibi, %0,4 derişiminde HLD9 kullanıldığında, reoloji sınır değer (300 kadran okuması) altında kontrol edilebilmiştir. %0,7 HLD9 kullanılan örneklerde ise viskozite kadran okuması sınır değeri olan 300 değeri aşılmıştır. CFR3 derişimi %0,4 ve %0,7 olan örneklerin viskometre okumalarında yaklaşık aynı değerler gözlenmiştir. Artan CFR3 derişiminin etkinliği hem ARI, hem de HALAD9 tarafından gölgelenmektedir.

Sabit ARI içeriğinde (%3), düşük HALAD9 derişiminde (%0,4) reolojik sınır koşulu sağlanabilirken, HALAD9 içeriğinin (%0,7) artması ile birlikte artan CFR3 içeriğine rağmen, reolojik ölçüt sağlanamamaktadır. ARI ve HALAD9'un birlikte reolojik davranış üzerine gösterdikleri etki, ayrı ayrı gösterdikleri etkiden daha yüksektir. Diğer bir deyişle ARI ve yüksek konsantrasyonda HALAD9'un birlikte kullanılmasının neden olduğu aşırı reolojik artışların yarattığı etki CFR3'ün etkisini gölgelemektedir.

Farklı ARI içeriklerinde elde edilen diğer çimento harcı örneklerine ait sonuçlar ise, Şekil 5.33'te birlikte verilmiştir. Grafikler CFR3 katkısının HALAD9'un neden olduğu viskozite artışlarını kontrol etmekte kısmen başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.32: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%3 ARI – CFR3- HLD9).

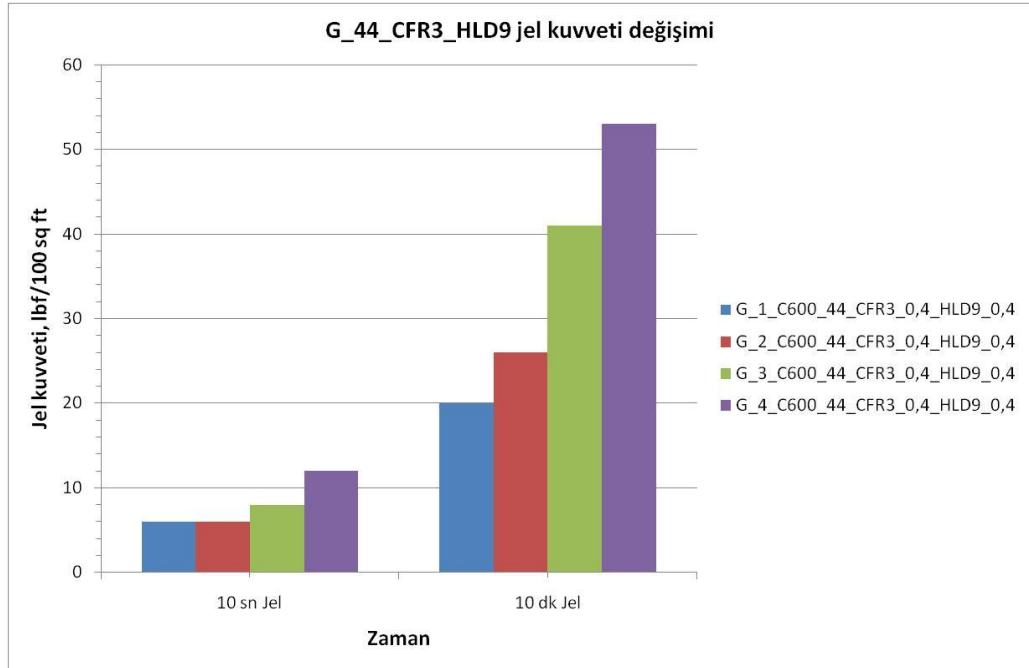


Şekil 5.33: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – CFR3-HLD9).

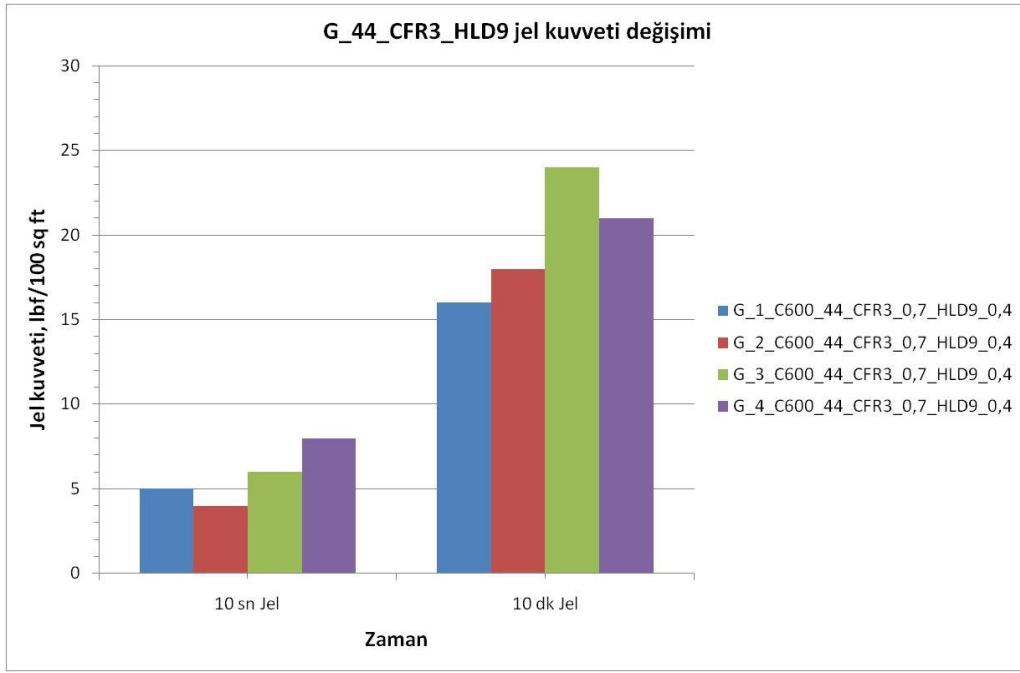
ARI, CFR3 ve HALAD9'un kullanıldığı her kombinasyonda katkılı çimento örneklerinin viskometre hızına bağlı olarak kadran okumaları da doğrusal bir davranış göstermektedir. Burada da davranış Newtonian akışkan davranışına yakındır denilebilir.

Şekil 5.34'te %0,4 konsantrasyonunda CFR3 ve %0,4 konsantrasyonunda HALAD9 katkısı içeren çimento örneklerinin artan ARI oranıyla elde edilen 10 saniye ve 10 dakika jel kuvvetleri verilmektedir. Artan ARI miktarıyla jel kuvvetlerinde artışlar görülse de, yine de bu artış sınır değer olan 20 lb/ft²'den küçüktür.

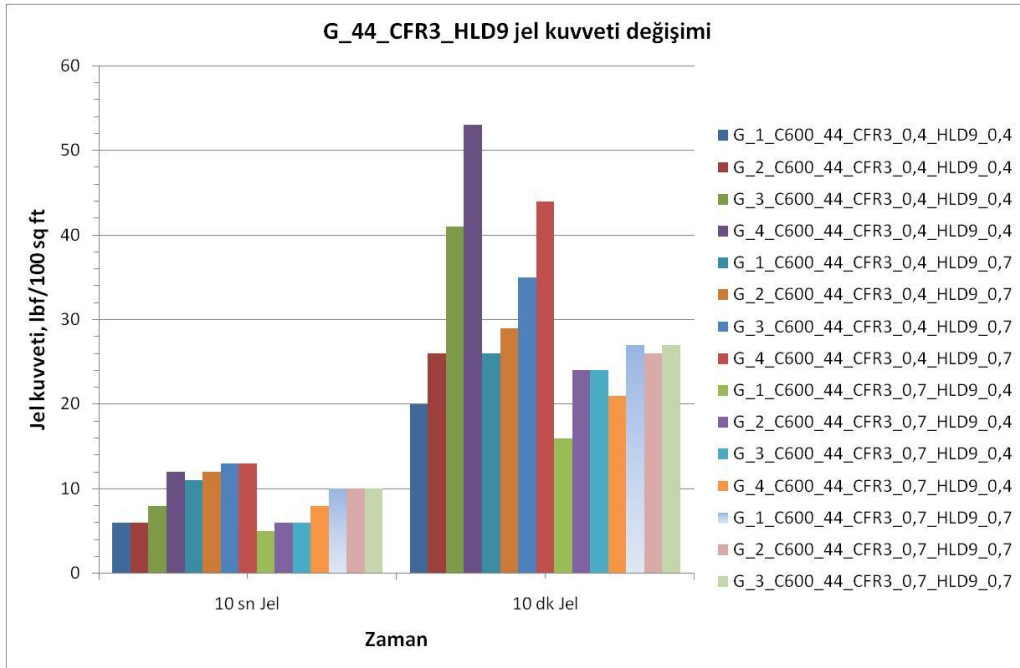
Farklı ARI içerikli örneklerin %0,4 CFR3 - %0,4 HALAD9 ve %0,7 CFR3- %0,4 HALAD9 kombinasyonunu içermesi durumunda, jel kuvveti değişimleri sırasıyla Şekil 5.35 ve 5.36'da gösterilmektedir. Sabit %0,4 CFR3 ve %0,4 HALAD9 kullanıldığında, artan ARI konsantrasyonlarında beklendiği gibi artan jel kuvvetleri gözlenmektedir. Yine de bu artış, sınır değer olan 20 lb/ft²'den küçüktür. Ancak, CFR3 miktarı %0,7'ye çıkarıldığında ise jel kuvvetlerinde de önemli oranda bir azalma gözlenmektedir. %0,7 CFR3 içeren örneklerin jel kuvvetleri, katkısız çimento örneklerinin jel kuvvetlerinden daha küçüktür. Diğer bir deyişle, aynı HALAD9 konsantrasyonunda farklı CFR3 içerikli örnekler viskometre kadran okuması olarak önemli bir fark göstermezken, jel kuvveti açısından olumsuz bir durum söz konusudur ve önemli bir azalım yaratmaktadır. Kısaca, oda koşullarında hazırlanan çimento örnekleri yüksek CFR3 (%0,7) içermesi durumunda, çok düşük jel kuvvetleri gösterdiği için çimento matriksinden olabilecek bir akışkan akışını önlemede başarısız olabilir.



Şekil 5.34: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,4 CFR3- %0,4 HLD9).



Şekil 5.35: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,7 CFR3- %0,4 HLD9).



Şekil 5.36: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – CFR3-HLD9).

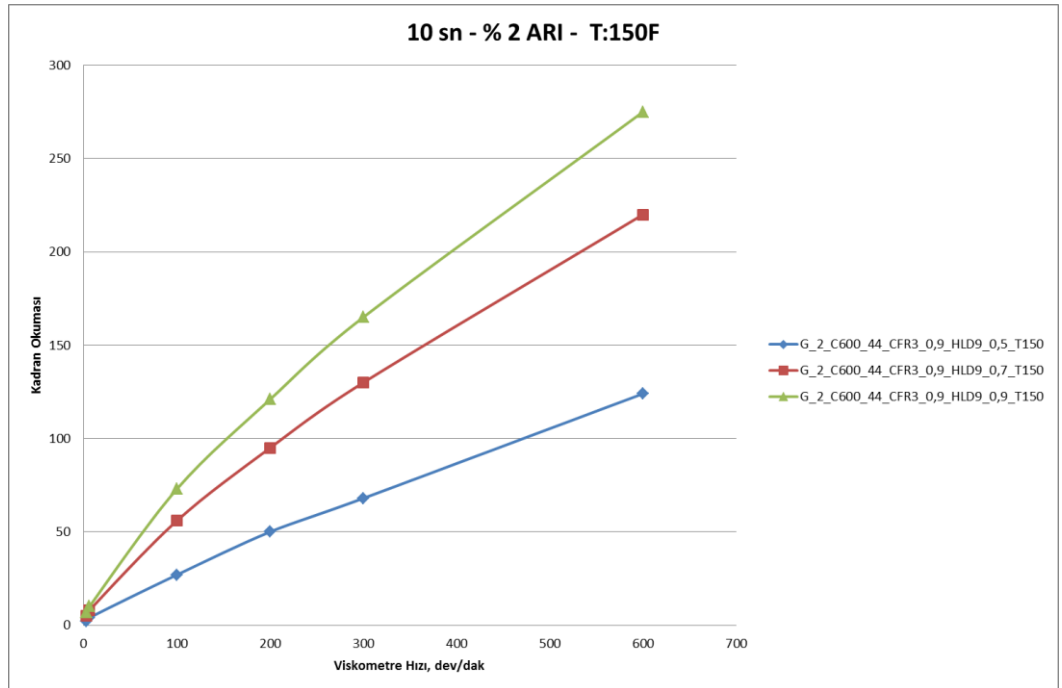
ARI ile birlikte CFR3 ve HALAD9 kullanılarak hazırlanan örneklerin reolojik özelliklerinin özellikle düşük HALAD9 derişimi için kontrol edilebileceği söylenebilir.

Daha önce de belirtildiği gibi, viskozite ve su kaybı kontrol katkıları şimdiye kadar %0,4 - %0,7 oranlarında kullanılmıştı. Bu aşamadan sonra katkı maddeleri bu oranların dışında farklı oranlarda da karıştırılarak reoloji deneyleri yapılmıştır.

Burada amaç, farklı oranlarda ARI maddesi ve diğer katkıları kullanılarak akışkanlığın istenen seviyelerde kontrol edilebilirliğinin gösterilmesidir. Bunlara ek olarak, bazı örnekler için daha yüksek sıcaklıkta da (150 °F) reolojik ölçümler yapılmıştır. Bu örneklerin testlerinin farklı sıcaklıklarda yapıldığının anlaşılması için örnek kodlamasının sonuna T:150F eklenerek belirtilmiştir. Bu deneyler sırasında elde edilen veriler Ek-E’de Çizelge E.2’de ve oluşturulan grafikler Şekil E.11-E.23’te verilmektedir.

Grafikler incelendiğinde yüksek ARI ve HALAD9 içeren örneklerde yüksek viskozite değerleri elde edildiği görülmektedir. CFR3 miktarı artırılarak akışkanlığın istenen değerlere gelmesi sağlanabilmektedir.

Şekil 5.37’de %2 ARI içerikli ve farklı derişimlerde CFR3 ve HALAD9 içeren üç örneğin 150 °F sıcaklıkta yapılan ölçümleri verilmiştir. Oda koşullarında 600 dev/dk’da kadran okuması 300’ün üzerinde olan örneklerin artan sıcaklıkla daha düşük viskometre okuması sergilediği görülmektedir.



Şekil 5.37: G Sınıf çimento reoloji davranışı (%2 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F).

Bununla beraber, artan sıcaklıkla birlikte beklendiği gibi, viskometre değerlerinde düşüşler gözlenmektedir. Yüksek sıcaklıkta daha az miktarlarda CFR3 katkısı kullanılarak istenen reoloji değerlerine ulaşmanın mümkün olduğu görülmektedir. Az miktarda (%0,5’ten az) CFR3 kullanılarak istenen akışkanlığın elde edilebilmesi

önemli bir sonuçtur. İleride “Basınç Dayanımı” bölümünde yer alan sonuçlar ile birlikte değerlendirildiği zaman, CFR3’ün artan miktarıyla dayanım üzerine olumsuz etkilerinin olduğu anlaşılmıştır. Dolayısı ile, yüksek sıcaklıkta daha az miktarda CFR3 kullanılarak, bu katkının çimentonun diğer özelliklerine olumsuz etkisini azaltmanın mümkün olabileceği düşünülmüştür.

5.1.6 Reoloji sonuçları değerlendirmesi

Katkısız, ARI katkılı ve her üç katkının da olduğu örnekler için reoloji deneyleri gerçekleştirilmiş ve ARI katkısının reoloji üzerine etkileri incelenmiştir. Deneyler sonucunda, ARI katkısı çimentonun viskozitesini ve jel kuvvetini artırdığı anlaşılmıştır. Artan ARI miktarıyla, reolojik değerlerdeki artış daha da yükselmektedir. Çimentoya eklenecek fazla su miktarı ile reoloji kontrolü sağlanabilmesine rağmen, yarattığı diğer sorunlar nedeniyle (örneğin dayanımda azalma, geçirgenlik artışı gibi) tercih edilmemektedir. Zorunlu hallerde diğer özellikler kontrol edilebilirse, daha fazla su kullanılabilir. Ancak, reoloji kontrolünü su miktarını arttırmak yerine, diğer katkı maddelerinin kullanılmasıyla kontrol altına alınması endüstrinin tercih ettiği yöntemdir. Deneylerde, TPAO’nun tecrübeleri ve önerisiyle kullanılan CFR3 katkısı, hem ARI’nın hem de çimentoya su kaybını kontrol etmek amacıyla kullanılan HLD9 katkısının neden olduğu viskozite artışlarını başarıyla kontrol edilebildiği gösterilmiştir.

ARI katkılı çimento Newtonian olmayan akış rejimi davranışı gösterirken, CFR3 ve HLD9 katkılarının ayrı ayrı veya birlikte kullanılması durumunda ise, çimento harcı Newtonian reolojik davranışı geliştirmektedir.

Farklı miktarlardaki katkılar ile de çimento harçları hazırlanmış ve oda sıcaklığı ve 150 °F’de ki reolojik davranışı incelenmiştir. Oda sıcaklığında hazırlanan çimento şerbetlerinin reolojilerinin, artan oranlarda CFR3 katkısı kullanılarak kontrol altına alınabildiği gösterilmiştir. Sıcaklık artışında çimentonun viskozitesinde beklendiği gibi ciddi boyutlarda azalmalar olmuştur. Bu durum, ARI ve HLD9 katkısının olumsuz etkisini azaltmak amacıyla çok daha az CFR3 katkısı kullanılabilirliğini göstermiştir. Sıcaklık artışında da çimento şerbetlerinin reolojilerinin kontrol altına alınabildiği gözlemlenmiştir. Bununla beraber, sıcaklıkla beraber jel kuvvetlerinde de azalmalar olduğu belirlenmiştir. Artan sıcaklıkla beraber, CFR3 katkısı farklı oranlarda kullanılarak, çimento şerbetlerinin jel kuvvetlerinin istenen değerlerde

olması gerçekleştirilebilmiştir. Artan sıcaklıklarda CFR3 katkısının daha az kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır ve yüksek oranda CFR3'ün neden olduğu sorunları azaltacağı veya ortadan kaldıracağı bir durum yaratacaktır.

5.2 Su Kaybı Deneyleri

Daha önce de belirtildiği gibi, çimentonun su bağlama yeteneği yoktur. Bu nedenle, çimento harcına su kaybı önleyici katkıların kullanılması bir zorunluluktur. Çalışmada HALAD9 su kaybı önleyici katkısı kullanılmıştır.

Deneyler ilk aşamada %1-3 arasında ARI içeren çimento örneklerine CFR3 ve HALAD9 katkıları %0,4 ve %0,7 kombinasyonunda katılarak, su kaybı değişimi incelenmiştir. Daha sonra, diğer oranlardaki CFR3 ve HALAD9 katkı miktarları ile ek deneyler farklı sıcaklıkları içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her bir deney kombinasyonu için sonuçlar EK-F'de Çizelge F.1'de ve şekiller Şekil F.1-F.6'da verilmiştir.

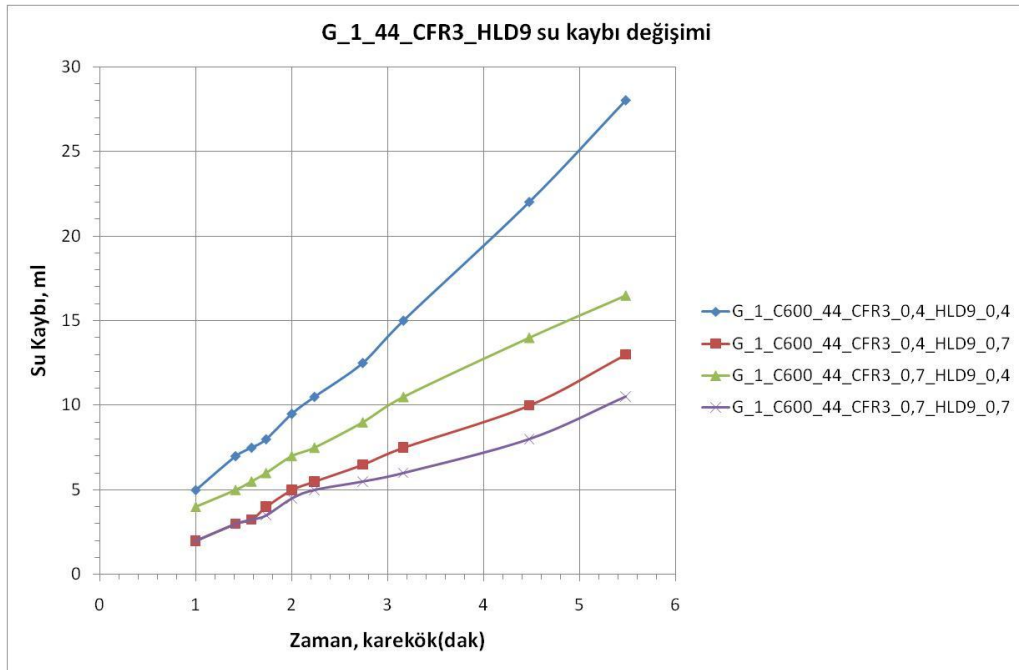
Çimentonun suyu bağlama özelliği olmamasından dolayı, kullanılan katkı maddeleriyle birlikte su kaybının oda koşullarında istenilen düzeyde olması sağlanabilir. TPAO saha deneyimlerine göre, YSYB su kaybı değerinin 50 ml'yi aşmaması uygun görülen bir durumdur.

Şekil 5.38-5.40 arasında su kaybı deneylerinden elde edilen sonuçlar grafiksel olarak verilmiştir. Şekillerden görüleceği gibi, çimento her kombinasyonda artan ARI içeriğine bağlı olarak su kaybı değerlerindeki değişim önemsizdir ve yaklaşık olarak aynıdır. Ancak, özellikle artan HALAD9 içeriği ile su kaybı büyük oranda azalmaktadır. CFR3 katkı maddesi birincil işlev olarak viskozite düşürücü olmasına rağmen, sabit ARI ve HALAD9 değerlerinde artan CFR3 konsantrasyonu ile bir miktar su kaybını azalttığı Şekil 5.38- 5.40'da gözlenmektedir. Örneğin Şekil 5.38'de, %0,4 yerine %0,7 CFR3 kullanıldığında su kaybı 28 ml'den 16 ml'ye düşmektedir. Diğer bir deyişle, CFR3 katkısının çimentodaki ikincil işlevi su kaybını azaltmakta olduğu ortaya çıkmaktadır.

Diğer taraftan, sabit CFR3 değerlerinde HALAD9 konsantrasyonu arttırılırsa, su kaybındaki azalış daha da belirgin olmaktadır. Benzer davranış diğer bütün ARI içerikli deneylerde de gözlenmiştir ve Şekil 5.39 ve 5.40'da açıkça görülmektedir. Her ARI içeriğinde su kaybının 1000 psi basınç altında ve oda sıcaklığında 50 ml/30

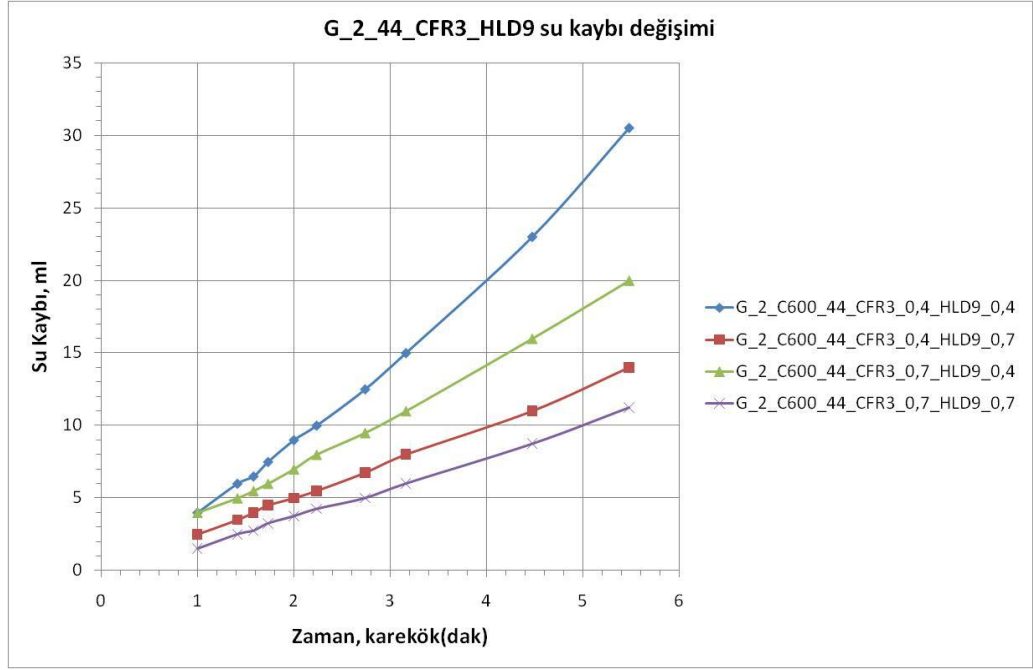
dk'dan düşük olduğu belirlenmiştir. TPAO'nun sınır değer olarak en fazla 50 değerini aldığı düşünüldüğünde, ARI katkılı örneklerden elde edilen sonuçlar olumludur. %0,7 CFR3 ve %0,7 HALAD9 kullanıldığında elde edilen su kaybı değeri çok düşük ve yaklaşık 10 ml civarındadır.

Bu aşamadan sonraki deneylerde CFR3 ve HALAD9 katkılarının %0,4 ve %0,7'den farklı oranlarda kullanılmasıyla, su kaybı davranışı incelenmiştir. Bulunan sonuçlar Ekler bölümündeki Ek-F'de bulunan Çizelge F.1 ve Şekil F.5-F.6'da verilmektedir. Şekillerde değişik HALAD9 miktarıyla hemen her kompozisyon için istenen su kaybı değerlerinin elde edilebildiği belirlenmiştir.

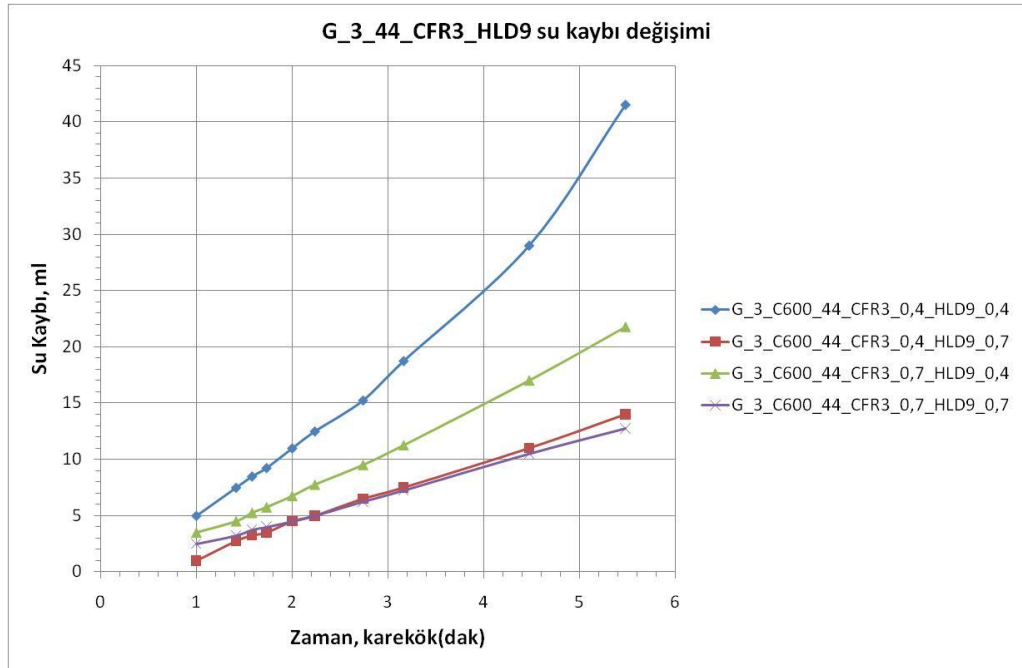


Şekil 5.38: G Sınıf çimento YSYB su kaybı davranışı (%1 ARI – CFR3-HLD9).

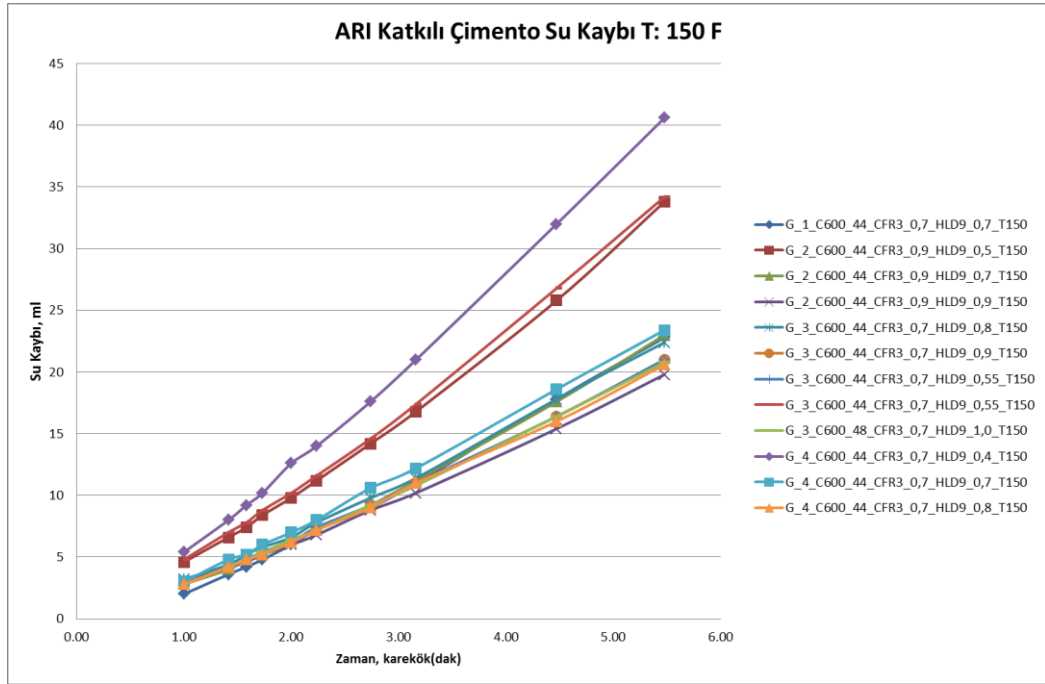
Yüksek sıcaklığın su kaybına etkisi ayrıca incelenmiştir. Bazı örnekler 150 °F sıcaklıkta da test edilmişlerdir. Şekil 5.41'den de görülebileceği gibi, su kaybında artan sıcaklık ile artışlar görülmekle beraber, HALAD9 miktarındaki artışla beraber su kaybı önlenebilmekte ve istenen koşulu sağlayabilmektedir. Bununla beraber, yüksek sıcaklık koşulunda (200 °F) sadece %1 ARI içerikli çimentonun su kaybı değişimi yapılmış ve sonuçlar Şekil 5.42'de grafik halinde gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi, artan sıcaklıkla su kaybında bir artış gözlenmektedir. Aynı içerikli oda sıcaklığında yapılan deneye göre su kaybındaki artış yaklaşık iki kattır. Bu durum beklenen bir sonuçtur.



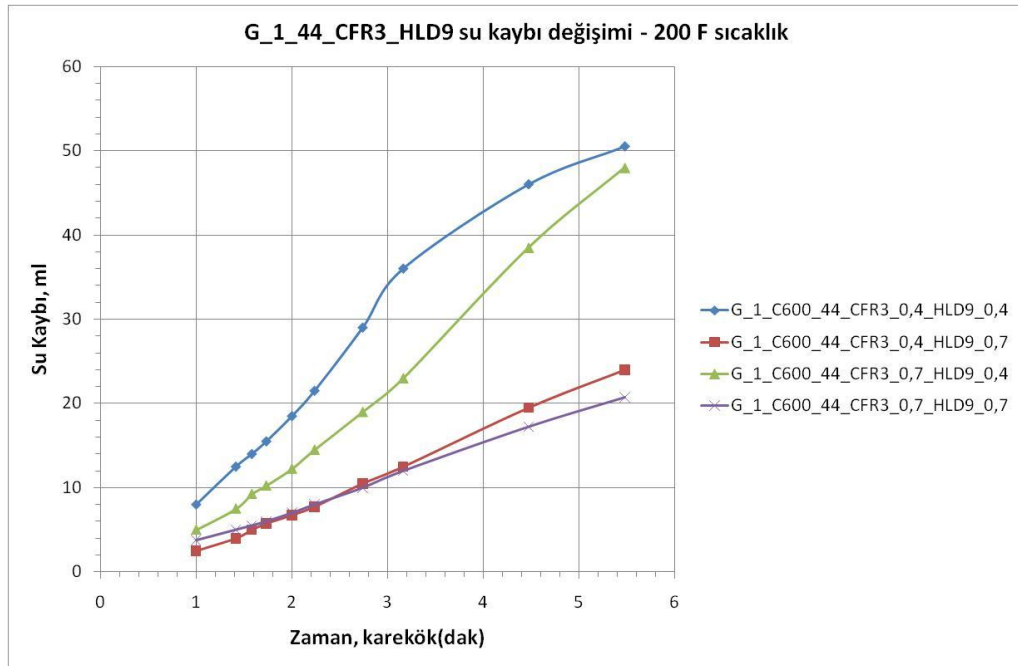
Şekil 5.39: G Sınıf çimento YSYB su kaybı davranışı (%2 ARI – CFR3-HLD9).



Şekil 5.40: G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%3 ARI – CFR3-HLD9).



Şekil 5.41: G Sınıf çimento su kaybı davranışı (ARI – CFR3-HLD9) – T: 150 °F.



Şekil 5.42: G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%1 ARI – CFR3-HLD9) – 200 °F.

5.2.1 Su kaybı sonuçları değerlendirmesi

ARI katkılı çimento örnekleri su kaybı özelliği bakımından değerlendirildiğinde, ARI katkısının su kaybı üzerine olumlu veya olumsuz önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bu sonuç, ARI katkısının çimento harcı karışımının kullanılabilirliği bakımından olumlu bir özelliktir.

Çalışmada su kaybı kontrolü sağlamak için, %0,4 ve %0,7 derişiminde HALAD9 katkısı kullanılarak, çimentonun su kaybı değerin 1000 psi basınç farkında kabul edilebilir sınır içerisinde olduğu belirlenmiştir. Artan HALAD9 içeriğıyle, su kaybında da önemli oranda bir azalmanın olduğu gözlenmiştir.

Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında ise su kayıplarında beklendiğı gibi bir artış olduğu saptanmıştır. Buna karşılık, yüksek sıcaklıklarda %0,4 ve %0,7 değerlerinden farklı derişimlerde HALAD9 kullanıldığında, su kaybının istenen değerlerin altında tutularak kontrol edilebildiğı belirlenmiştir. Bunun yanında, CFR3 viskozite azaltıcı katkısının, aynı zamanda ikincil işlev olarak su kaybını önlemekte yardımcı olduğu sonucuna da ulaşılmıştır.

Yukarıdaki değerlendirmelere ek olarak, su kaybı ile ilişkili olmasından dolayı, ilerleyen bölümlerde anlatılan ve küp kalıplar kullanılarak gerçekleştirilen basınç dayanımı ve geçirgenlik deneylerinde gözlemlenen bazı durumlar bu bölümde su kaybı açısından irdelenmiştir. Bir kalıba yerleştirilmiş çimento harcının donma sürecinde, harcın yapısında bulunan suyun bir kısmı kaybolur ve (Bölüm 2’de bahsedilen) büzölme sonucu hacminde bir azalma meydana gelir. Deneysel gözlemlere göre, ARI katkısı kullanılarak hazırlanan çimento harcı örneklerinin küp şeklindeki kalıplar içindeki donma sürecinde örnek üzerinde, ARI’sız örneklerle göre daha az su toplandığı gözlenmiştir. Başka bir önemli gözlem ise, ARI katkılı çimento kalıplarında çimento harcının donmasından sonra, kalıp halindeki çimentonun yüksekliğinde katkısız örneklerle göre, çok daha az veya hiç azalmanın olmadığıdır. ARI katkılı çimento örneklerinde artan ARI konsantrasyonu ile hacim değışiminin düştüğü, bir çok örnekte boy değışiminin hiç olmadığı gözlenmiştir. Örneğin, 70 mm’lik küp çimento kalıplarında, katkısız çimento örneklerinde 8-10 mm boy azalımı oluşurken, ARI katkılı çimento örneklerinde ARI içeriğine bağılı olarak, boy değışimlerinin 0-2 mm arasında olduğu belirlenmiştir. Bu gözlem, çimentonun donma sürecinde hacim değışimi nedeniyle geçirgen bir çimento yapısının oluşturması sebebiyle önemlidir. Hacim değışiminin olmaması, çimentonun geçirgenlik özelliğinin önlenmesi olarak literatürde yorumlanmaktadır. Bu yönüyle, ARI katkısının önemli bir işlev gördüğü iddia edilebilir.

5.3 Kıvamlılık Deneyleri

CFR3 ve özellikle HALAD9'un kalınlaşma zamanını arttırdığı bilinmektedir. Dolayısıyla, yapılan deneylerdeki asıl amaç, ARI'nın kalınlaşma zamanı üzerine etkisinin incelenmesidir. Deneyler sırasında ARI'nın çok büyük bir etkisi görülmediğinden sistematik bir sıralama yerine diğer deneylerde (reoloji ve su kaybı) daha iyi sonuç vermiş olan kompozisyonların testleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen grafiklerin tamamı Ek-G'de Şekil G.1-G.26'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.5'te verilmektedir.

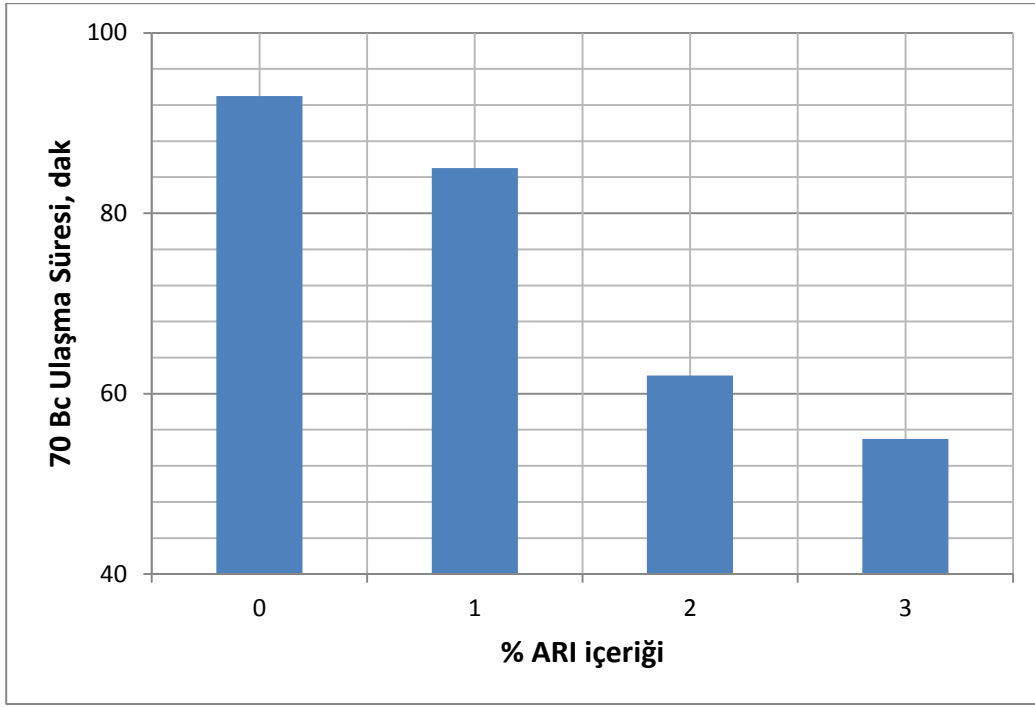
Şekil 5.43'te görüleceği gibi, sadece ARI ile hazırlanmış olan karışımların kalınlaşma zamanına bakıldığında, artan ARI miktarı ile kalınlaşma zamanında düşüşler gözlenmiştir. ARI'sız örneklerde, tek başlarına çimento şerbetine eklendiklerinde artan katkı miktarlarıyla hem CFR3 hem de HALAD9'un kalınlaşma zamanını ciddi oranlarda arttırdığı, iki katkının beraber eklendiği örneklerde ise, artan miktarlarıyla CFR3 katkısından dolayı oluşan artışların HALAD9 katkısından dolayı oluşan artışlara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 5.43'te çizilen karşılaştırmalı grafikte daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.43 irdelenirse; ARI maddesi kalınlaşma süresini, dolayısıyla çimentonun donma zamanını azaltarak hızlandırıcı (accelerator) olarak adlandırılan (örneğin tuzlar) katkıları gibi davrandığı görülmektedir.

Her üç katkının da beraber kullanıldığı örneklerde, kalınlaşma zamanı tayininde asıl belirleyici olan HALAD9 katkısıdır. Buna örnek olarak, Şekil 5.44'te %2 ARI katkılı örneklerin değişik oranlarda CFR3 ve HALAD9 karışımı ile ölçülen kalınlaşma zamanı grafikleri verilmektedir. Şekil 5.44'ten de görülebileceği gibi, HALAD9 katkısının artan oranlarda kullanılmasıyla, kalınlaşma zamanı da artmaktadır. Bununla beraber, CFR3 katkısında kompozisyon içinde artan miktarlarıyla, kalınlaşma zamanını HALAD9 kadar olmasa da arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu iki katkıya göre, ARI'nın kalınlaşma zamanını azaltıcı etkisi olduğu belirlenmiştir.

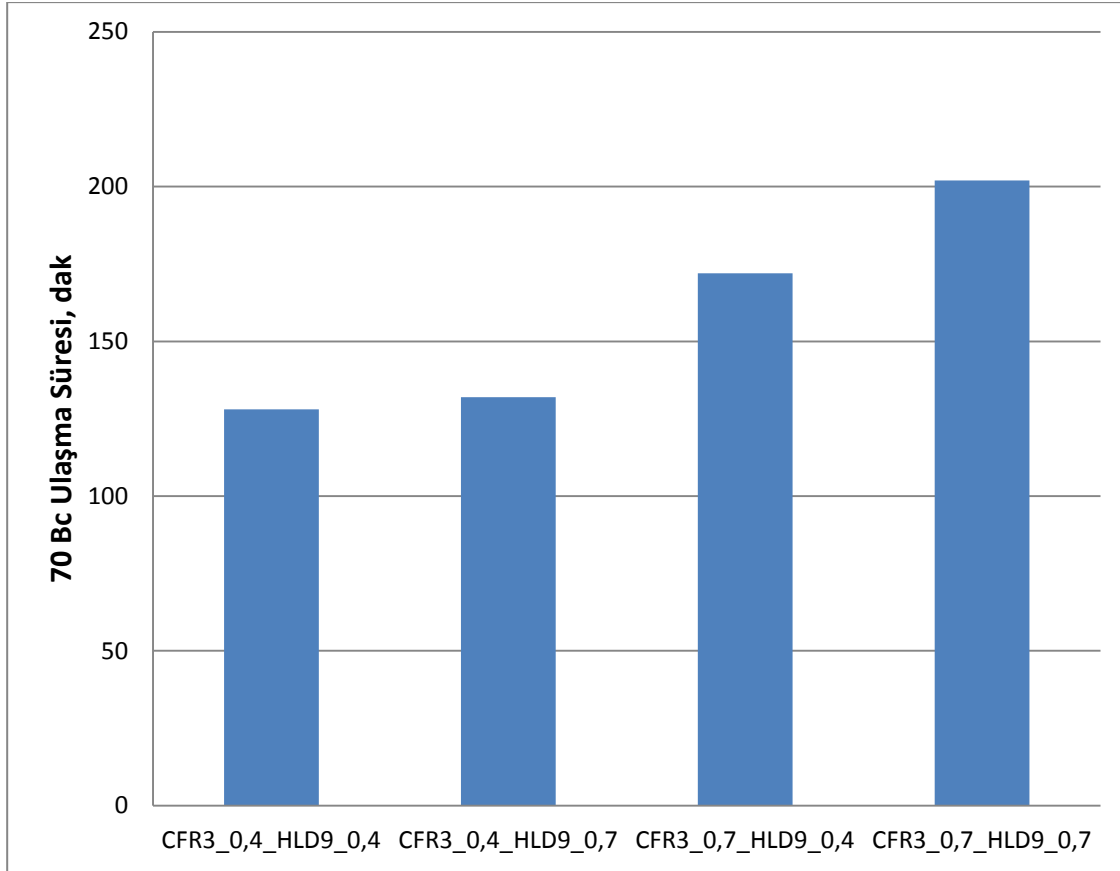
Çimentonun kalınlaşma zamanını azaltmak amacıyla çimentoya farklı tuzlar katkı maddeleri olarak eklenmektedir. Fakat tuzun çimentonun özellikle dayanım gibi diğer özellikleri üzerine olumsuz etkileri vardır. ARI maddesinin çimentonun diğer özellikleri üzerine olumsuz etki göstermeden kalınlaşma zamanını azaltıcı bir etki göstermesi, bu bakımdan önemli bir sonuçtur.

Çizelge 5.5: G Sınıf çimento kıvamlılık testi sonuçları.

	70 Bc Ulaşma Süresi
Örnek Kodu	sa:dk:sn
G_0_C800_44	1:33:50
G_0_C800_44_CFR3_0,4	1:41:40
G_0_C800_44_CFR3_0,7	2:15:20
G_0_C800_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	2:12:20
G_0_C800_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	3:47:40
G_0_C800_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	2:26:20
G_0_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	3:07:00
G_0_C800_44_HLD9_0,4	1:53:00
G_0_C800_44_HLD9_0,7	2:56:00
G_0_C800_44_HLD9_0,7_t1	2:38:20
G_1_C800_44	1:25:20
G_1_C800_48_CFR3_0,7_HLD9_1,0	3:48:10
G_2_C800_44	1:02:30
G_2_C800_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	2:07:50
G_2_C800_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	2:11:40
G_2_C800_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	2:52:20
G_2_C800_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	3:22:20
G_2_C800_44_CFR3_0,9_HLD9_0,7	3:07:40
G_2_C800_44_CFR3_0,9_HLD9_0,9	3:22:50
G_2_C800_44_CFR3_1,0_HLD9_0,5	2:43:20
G_2_C800_44_CFR3_1,0_HLD9_0,5_t1	3:07:30
G_3_C800_44	0:55:20
G_3_C800_44_CFR3_0,7_HLD9_0,55	2:50:30
G_3_C800_48_CFR3_0,7_HLD9_1,0	3:43:20
G_4_C800_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	2:46:40
G_4_C800_44-CFR3_0,7_HLD9_0,8	3:00:50



Şekil 5.43: ARI katkılı G Sınıf çimento kıvamlilik testi sonuçları grafiği.



Şekil 5.44: %2 ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı G Sınıf çimento kıvamlilik testi sonuçları grafiği.

6. BASINÇ DAYANIM DENEYLERİ

Çalışmada ayrıca, katkılı çimento şerbetlerinin ve donmuş çimento küplerinin basınç dayanımları ve ARI katkısının dayanım üzerine etkisi incelenmiştir. Hazırlanan çimento örneklerinin basınç dayanımları UCA (Ultrasonic Cement Analyzer) ve TEP (Tek Eksenli Pres) olmak üzere iki farklı test donanımında sınanmıştır.

6.1 UCA Basınç Dayanım Deneyleri

Çimento harcı hazırlandıktan sonraki ilk 24 saatte dayanım değişiminin incelenmesine olanak sağlayan UCA donanımı, özellikle çimentonun sıvı fazda iken dayanım gelişimini belirleyebildiği için çok önemlidir; bu nedenle, çimento harcının zamana bağlı dayanımının belirlenmesi için, bu çalışmada olduğu gibi, yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada, sırasıyla sadece ARI içeren ve CFR3 ve HLD9 katkıları ile beraber her üç katkıyı da içeren örneklerin dayanımlarının UCA donanımı ile sınanma sonuçları verilmektedir.

6.1.1 ARI katkılı çimento UCA basınç dayanım deneyleri

Katkısız ve farklı ARI konsantrasyonlarında hazırlanan G Sınıf çimento örneklerinin UCA donanımında alınan sonuçları Çizelge 6.1’de verilmektedir. Tüm deneyler 150 °F sıcaklıkta yapılmış ve her 30 sn’de bir örnekleme yapılmıştır.

Çizelge 6.1’de verilen dokuz çimento örneğinden sadece ikisinde, ARI katkısı kullanılmamıştır. Diğer örneklerle %1,5-5 arasında ARI katılarak G Sınıf çimentonun dayanımındaki değişim incelenmiştir. Çizelgede gösterilen örneklerin zamana bağlı dayanımlarındaki değişimleri gösteren grafikler Ek-H’de Şekil H.1-H.9’da verilmiştir.

Çizelge değerlerine göre, ARI katkılı örneklerin 24 saat sonunda gösterdikleri dayanım değerleri artan ARI içeriğiyle önemli bir değişim göstermemektedir. Kullanılan ARI miktarına bağlı olarak dayanımdaki değişim genel bir eğilim sergilememektedir. Bununla birlikte, en yüksek dayanım %3 ARI katkılı örnekte

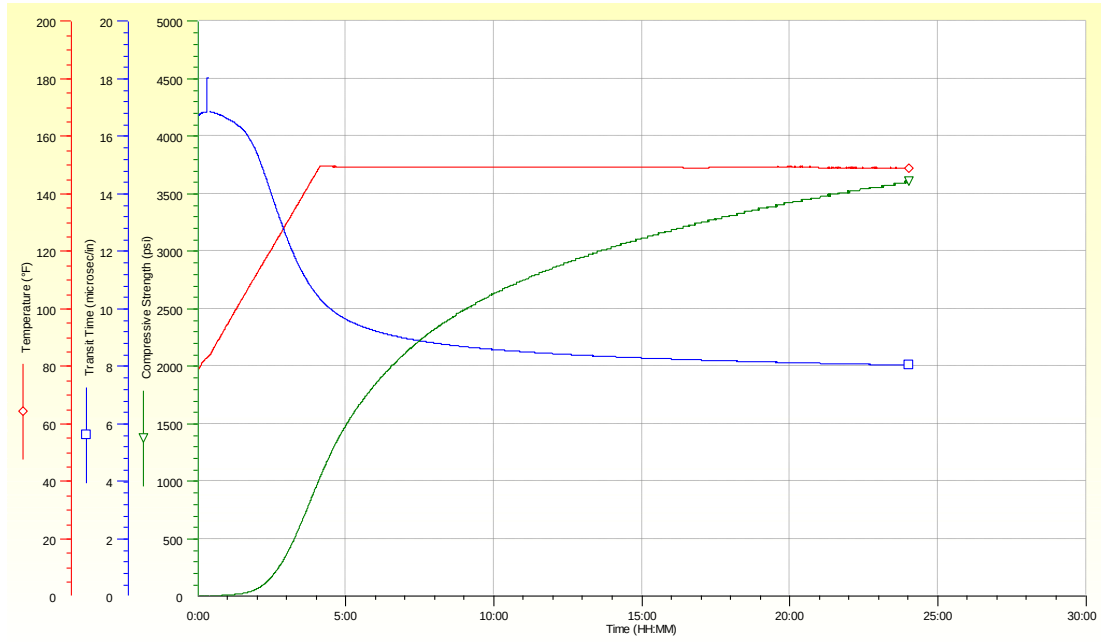
gözlenmektedir. Diğer taraftan, ARI katkısının (referans olarak her iki katkısız çimento sonuçları alınır) sıkıştırma dayanımında önemli bir değişime yol açmadığı da ortaya çıkmaktadır. 50 psi ve 500 psi sıkıştırma dayanımına ulaşım zamanı için, yüksek ARI içerikli (%4 ve %5) örneklerde her iki değerinde de yaklaşık 20 dakikalık azalmalar ölçülmüştür. ARI maddesinin çimento harcının donma zamanını kısalttığı saptanmıştır. ARI maddesinin UCA'da ilk 24 saatlik zaman diliminde dayanımı düşürmemesi olumlu bir sonuçtur. ARI katkısının, özellikle yüksek derişimlerde, hızlandırıcı katkıları gibi davrandığı görülmektedir.

Ayrıca, Çizelge 6.1'de kaydedilen diğer parametreler de listelenmiştir. Örneğin, ultrasonik ses dalgalarının deneyin başlangıcında ve sonunda örnekten microsec/in olarak geçiş zamanı tüm örneklerde yaklaşık aynıdır ve ARI katkısının ses geçiş hızını etkilemediğini göstermektedir. Tüm örneklerde geçiş hızındaki azalım değişimi ilk beş saatte yüksek iken, daha sonra test bitinceye kadar olan yaklaşık 20 saatlik bölümde değişim çok az veya önemsiz olarak görünmektedir.

Ek-H'de Şekil H.1-H.9'da verilen bütün örneklere ait şekiller incelendiği zaman, başlangıç sıcaklığı olan 80 °F'tan deney sıcaklığı olan 150 °F'a ulaşma zamanı yaklaşık olarak dört saattir. Sıkıştırma dayanımındaki gelişim ilk beş saatte bütün örnekler için azami bir artış göstermektedir. Bu durum %4 ARI içeren örneğin tekrar grafiği olan Şekil 6.1'de gösterilmektedir. Şekil 6.1'den de görüleceği gibi, çimento örneğinden ses dalgasının geçiş süresi başlangıçta en yüksek iken, artan zaman ile hızla azalmaktadır. Bu azalım davranışı 4 saat sonunda dengelenmekte ve artan zaman ile azalım miktarı önemsiz olmaktadır. Hem ARI içeren hem de ARI içermeyen örneklerde benzer davranış gözlenmektedir.

Çizelge 6.1: ARI katkılı G Sınıf çimento dayanımı UCA sonuçları.

Örnek Adı	Süre (sa:dk:sn)		Dayanım (psi)			Dayanım (Mpa)			Geçiş zamanı (microsec/in)	
	50 psi	500 psi	8 sa	12 sa	24 sa	8 sa	12 sa	24 sa	Başlangıç	Bitiş
G_0_44	2:21:30	3:36:30	2415	3057	4052	16.7	21.1	27.9	16.32	7.79
G_0_44_t1	2:26:30	3:42:00	2164	2726	3592	14.9	18.8	24.8	16.5	8.01
G_1,5_44	2:28:00	3:46:00	1985	2533	3338	13.7	17.5	23.0	16.71	8.13
G_2_44_t1	2:24:30	3:38:30	2085	2643	3474	14.4	18.2	24.0	16.72	8.07
G_2,5_44	2:16:30	3:34:30	2191	2806	3732	15.1	19.4	25.7	16.74	7.93
G_3_44	2:13:30	3:28:30	2231	2825	3726	15.4	19.5	25.7	16.58	7.94
G_4_44	2:07:00	3:24:30	2121	2668	3492	14.6	18.4	24.1	16.79	8.03
G_4_44_t1	1:54:30	3:15:00	2320	2853	3599	16.0	19.7	24.8	16.69	8.01
G_5_44	2:00:00	3:21:00	2274	2807	3569	15.7	19.4	24.6	16.75	8.01



Şekil 6.1: G Sınıf çimento UCA basınç dayanımı grafiği (%4 ARI) – tekrar.

6.1.2 ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento UCA basınç dayanım deneyleri

Her üç katkının basınç dayanımına olan etkisi incelenmek üzere, CFR3 ve HALAD9 katkıları önce %0,4 ve %0,7 öndeğer oranlarında katılarak farklı örnekler hazırlanmış, sonra bunların daha farklı oranlarda kullanılmasıyla, hazırlanan örneklerin dayanım davranışlarını belirlemek için de UCA testleri yapılmıştır. Her bir örnek için elde edilen grafikler Ek-H’da Şekil H.10-K.32’te verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen basınç dayanım değerleri sonuçları Çizelge 6.2’de verilmektedir. Çizelgede iki örneğin basınç değerleri kaydedilmiş olmasına rağmen, geçiş süreleri cihaz tarafından kayıt edilmediği için boş bırakılmıştır.

Yalnızca CFR3 ve yalnızca HALAD9 katkılarının eklendiği örneklerde, her iki katkının da dayanıma etkisinin olmadığı, ya da ihmal edilebilir olduğu görülmektedir.

ARI katkısı kullandığında, artan ARI miktarıyla 500 psi’ya ulaşma sürelerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, ARI katkılı örneklerde 8 saatten sonra dayanımlarda artış olmaktadır. UCA deneylerinden elde edilen 24 saatlik dayanım sonuçlarına göre ARI katkısının çimento dayanımını arttırıcı veya azaltıcı yönde bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Çizelge 6.2'deki değerlere bakıldığında, hemen hemen bütün örneklerin 8 saat sonunda daha önce sektörde sondaja devam etmek amacıyla kritik değer olarak alınan 500 psi değerinin 2-3 katı kadar daha yüksek basınç dayanımı geliştirdiği görülmektedir. 24 saat sonundaki dayanım değerlerine bakıldığında, neredeyse bütün örneklerin yaklaşık 3000 psi civarında basınç dayanımı geliştirdiği belirlenmiştir.

Çizelge 6.2: Katkılı G Sınıf çimento dayanımı UCA sonuçları.

Örnek Kodu	Geçen Zaman (sa:dk:sn)		Dayanım			Dayanım			Geçiş zamanı	
			(psi)			(Mpa)			(microsec/in)	
	50 psi	500 psi	8 sa	12 sa	24 sa	8 sa	12 sa	24 sa	Başlangıç	Bitiş
G0_C600	2:43:30	3:51:00	1874	2355	3024	12.9	16.2	20.9	16.89	8.26
G0_C600_44_CFR3_0,4	3:10:00	4:10:00	2002	2542	3258	13.8	17.5	22.5	16.5	8.13
G0_C600_44_CFR3_0,7	3:20:00	4:16:00	1830	2292	2749	12.6	15.8	19.0	16.47	8.46
G0_C600_44_HLD9_0,4	3:07:30	4:02:00	1889	2420	2983	13.0	16.7	20.6	16.46	8.32
G0_C600_44_HLD9_0,7	3:39:30	4:32:30	1758	2255	3389	12.1	15.6	23.4	16.48	8.11
G0_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	3:34:30	4:28:30	1799	2419	3227	12.4	16.7	22.3	16.44	8.19
G0_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	3:46:00	4:35:30	1882	2582	3442	13.0	17.8	23.7	16.28	8.07
G1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	3:31:00	4:23:30	1735	2322	3135	12.0	16.0	21.6	-	8.23
G1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	3:48:30	4:48:00	1627	2230	2995	11.2	15.4	20.7	16.09	-
G1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	4:03:00	4:59:30	1483	2100	2922	10.2	14.5	20.2	16.21	8.35
G1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	4:11:00	5:02:00	1455	2078	2880	10.0	14.3	19.9	16.1	8.38
G2_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	3:28:30	4:34:00	1466	1984	2710	10.1	13.7	18.7	16.68	8.5
G2_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	0:03:30	4:45:00	1545	2179	2953	10.7	15.0	20.4	27.22	8.41
G2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	4:01:00	5:05:00	1542	2206	3202	10.6	15.2	22.1	16.18	8.18
G2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	5:05:30	5:45:30	1629	2448	3482	11.2	16.9	24.0	16.14	8.06
G2_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,7	4:41:00	5:48:00	1190	1849	2620	8.2	12.8	18.1	16.4	8.54
G2_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,9	5:01:30	5:59:30	1823	2782	3952	12.6	19.2	27.3	16.11	7.84
G2_C600_44_CFR3_1,0_HLD9_0,5	4:33:30	5:28:30	1553	2276	3170	10.7	15.7	21.9	16.81	8.23

Çizelge 6.2 (devam): Katkılı G Sınıf çimento dayanımı UCA sonuçları.

Örnek Kodu	Geçen Zaman (sa:dk:sn)		Dayanım			Dayanım			Geçiş zamanı	
			(psi)			(Mpa)			(microsec/in)	
	50 psi	500 psi	8 sa	12 sa	24 sa	8 sa	12 sa	24 sa	Başlangıç	Bitiş
G3_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	3:59:00	4:45:00	1883	2561	3489	13.0	17.7	24.1	16.3	8.04
G3_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	4:34:00	5:25:00	1562	2327	3296	10.8	16.0	22.7	16.38	8.13
G3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	4:38:30	5:36:30	1335	2018	2850	9.2	13.9	19.7	16.98	8.42
G3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,55	4:15:30	5:17:00	1437	2132	3005	9.9	14.7	20.7	16.36	8.27
G4_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	4:53:00	5:40:00	1506	2287	3166	10.4	15.8	21.8	16.32	8.22
G4_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,55	4:12:30	5:22:30	1377	2038	2878	9.5	14.1	19.8	16.35	8.38

6.2 TEP Sıkıştırma Basınç Dayanım Deneyleri

Çimentonun sıkıştırma dayanımı, TEP donanımı kullanılarak sırasıyla sadece ARI içeren, CFR3 ve HLD9 katkıları ile beraber her üç katkıyıda içeren ölçümler olmak üzere iki grupta incelenmiştir.

6.2.1 ARI katkılı çimento TEP sıkıştırma basınç dayanım deneyleri

Katkısız, %3 ve %5 ARI içeren G Sınıf çimento örneklerinin TEP donanımında alınan 1, 7 ve 28 gün dayanım sonuçları Çizelge 6.3'te verilmektedir. Pres altında dayanım deney sonuçlarının anlamlı olabilmesi için, her çimento harcı karışımı için en az üç defa testin tekrarlanması gerektiğinden, TEP deneyleri bu kriteri sağlamak amacıyla 1, 7 ve 28 gün için Çizelge 6.3'te görüleceği gibi üçer defa tekrarlanmıştır. Çizelge 6.3'de her bir kompozisyon için yapılan deneylerden elde edilen değerler ve bu deneylerin ortalamaları da verilmektedir.

%3 ARI katkılı örneğin özellikle erken dönemde (1günlük deneylerde) katkısız çimentoya göre yaklaşık üç katı daha fazla basınç dayanımı vermesi, önemli bir sonuçtur. Bununla beraber, %3 ve %5 ARI katkılı örneklerin 7 ve 28 günlük dayanım değerlerinin katkısız çimentonun dayanımına göre değişmediği, bir başka deyişle, dayanımın uzun dönemde de korunduğu gözlenmektedir. Bu çalışmanın ana odak noktası olan akışkan geçirgenliğinin önlenmesi, Literatür Çalışması Bölümü'nde bahsedildiği gibi, çimentonun donma sürecinde özellikle erken dönemde yüksek dayanıma sahip olması, formasyondan çimentoya bir akışın önlenmesi açısından önemlidir. Hem kısa dönemde yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesi hem de uzun dönemde dayanımın uygun değerlerde olması, ARI katkısının dayanım yönünden de olumlu ve çok önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir ve arzulanan bir durumdur.

Çizelge 6.3: ARI katkılı G Sınıf çimento dayanımı TEP sonuçları.

Örnek Kodu	Basınç Dayanım Değerleri, psi									Basınç Dayanım Değerleri, Mpa								
	1 gün			7 gün			28 gün			1 gün			7 gün			28 gün		
G_0_C600	716	671	794	4056	4119	4210	4576	5159	4980	4.9	4.6	5.5	28.0	28.4	29.0	31.6	35.6	34.3
Ortalama	727			4128			4905			5.0			28.5			33.8		
G_3_C600	2483	2628	2773	3509	3966	4393	4338	4579	5047	17.1	18.1	19.1	24.2	27.4	30.3	29.9	31.6	34.8
Ortalama	2628			3956			4654			18.1			27.3			32.1		
G_5_C600	2886	2905	2717	4593	4092	4041	4692	5273	4957	19.9	20.1	18.7	31.7	28.2	27.9	32.4	36.4	34.2
Ortalama	2836			4242			4974			19.6			29.3			34.3		

6.2.2 ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento TEP sıkıştırma basınç dayanım deneyleri

Bütün katkıların birarada kullanılmasıyla hazırlanan G Sınıf çimento örneklerinin TEP donanımında alınan sıkıştırma dayanım sonuçları Çizelge 6.4'te psi biriminde ve Çizelge 6.5'de MPa biriminde verilmektedir. Bölüm 6.2.1'de belirtildiği gibi, her bir kompozisyon için en az üç adet ölçüm yapılmıştır. Çizelgede aynı zamanda üç ölçüm hem ayrı ayrı hem de ortalamaları ile verilmektedir.

Deney sonuçları incelendiğinde, CFR3 ve HALAD9 katkı maddelerinin ayrı ayrı çimento karışımına katılmasının basınç dayanımını arttırdığı görülmektedir. CFR3 katkısının miktarındaki artış hem kısa dönemde, hem de uzun dönemde bu etkisini korurken, HALAD9'un miktarındaki artış basınç dayanımına düşüş olarak yansımaktadır. Özellikle, kısa dönem ölçümlerinde ARI içeriğine bakılmaksızın, yüksek HALAD9 katkılı örneklerin basınç dayanımı gösteremediği, plastik ya da sünekleşme (ductile) özelliği göstererek örneklerin ezildiği ve kalıcı deformasyona uğradığı gözlenmiştir. Şekil 6.2'de basınç dayanımı alınamayan, sünekleşerek ezilen örneğin bir fotoğrafı görülmektedir. Kuyu koşullarında CFR3 ve HALAD9 çimento katkıları nedeniyle sünek bir davranış göstermesi kesinlikle kabul edilemez bir durumdur.



Şekil 6.2: Sünekleşmiş çimento örneği.

Çizelge 6.4: Katkılı G Sınıf çimento dayanımı TEP sonuçları (psi).

Örnek Kodu	Basınç Dayanımı, psi											
	1 gün			Ortalama	7 gün			Ortalama	28 gün			Ortalama
G_0_C600	716	671	794	727	4056	5159	4980	4128	4576	5159	4980	4905
G_0_C600_CFR3_0,4	949	1150	1066	1055	4357	4404	4496	4419	6467	6588	6271	6442
G_0_C600_CFR3_0,7	1273	1194	1379	1282	5778	5778	5911	5822	7696	8079	7784	7853
G_0_C600_HLD9_0,4	1428	1351	1496	1425	6436	6387	6455	6426	6459	6888	6507	6618
G_0_C600_HLD9_0,7	771	897	756	808	5481	5607	5445	5511	6470	6621	6310	6467
G_0_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,4	806	750	811	789	4874	4771	4917	4854	6522	6701	6985	6736
G_0_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,7	Sünme	Sünme	Sünme	Sünme	2496	2464	2630	2530	4966	5117	4893	4992
G_0_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,4	699	593	709	667	1884	2174	2128	2062	6560	6903	6664	6709
G_0_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,7	Sünme	Sünme	Sünme	Sünme	2398	1903	2278	2193	4438	4868	4785	4697
G_1_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,4	1126	987	1253	1122	6386	6443	6212	6347	8890	9428	8805	9041
G_1_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,7	Sünme	Sünme	Sünme	Sünme	5748	5415	5802	5655	6126	5817	6219	6054
G_1_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,4	1149	953	1117	1073	5619	5929	5987	5845	7376	7212	7609	7399
G_1_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,7	Sünme	Sünme	Sünme	Sünme	4768	4912	4729	4803	6370	6228	6617	6405
G_2_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,4	1097	1092	987	1059	6804	5934	6511	6416	7258	7527	6916	7234
G_2_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,7	936	1063	971	990	5335	4892	5749	5325	6320	6650	6973	6648
G_2_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,4	1249	1190	1041	1160	4730	4567	5269	4855	7368	7771	7886	7675
G_2_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,7	1080	1350	1460	1297	5638	5474	5745	5619	5707	5451	5804	5654
G_2_C600_CFR3_1,0_HLD9_0,5	466	527	547	513	4796	4308	4559	4554	10254	9892	9449	9865
G_2_C600_CFR3_0,9_HLD9_0,7	333	348	378	353	4021	3882	3955	3953	4547	4444	4334	4442
G_2_C600_CFR3_0,9_HLD9_0,9	333	348	378	353	3738	3418	3582	3579	2810	2119	2537	2489

Çizelge 6.4 (devam): Katkılı G Sınıf çimento dayanımı TEP sonuçları (psi).

	Basınç Dayanımı, psi											
Örnek Kodu	1 gün			Ortalama	7 gün			Ortalama	28 gün			Ortalama
G_3_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,4	2128	2148	1976	2084	4439	4810	5170	4806	7828	7622	7992	7814
G_3_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,7	1190	1098	1309	1199	3700	4565	4280	4182	6673	6730	6789	6731
G_3_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,4	1125	1572	1500	1399	4127	4463	4290	4293	8374	7787	7680	7947
G_3_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,7	1086	1049	1184	1106	5658	5119	5771	5516	7407	7057	7561	7342
G_3_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,55	1732	1530	1648	1637	5580	5162	6031	5591	6949	5796	6307	6351
G_4_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,4	1443	1445	1297	1395	4629	5206	4740	4858	7273	7215	7399	7296
G_4_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,7	1117	1021	1066	1068	4735	5016	5221	4991	8007	8597	8280	8295
G_4_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,4	1266	1127	1308	1234	4145	3922	4095	4054	8576	7990	8476	8347
G_4_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,7	1364	1243	1437	1348	4637	4318	4125	4360	6369	6712	6443	6508

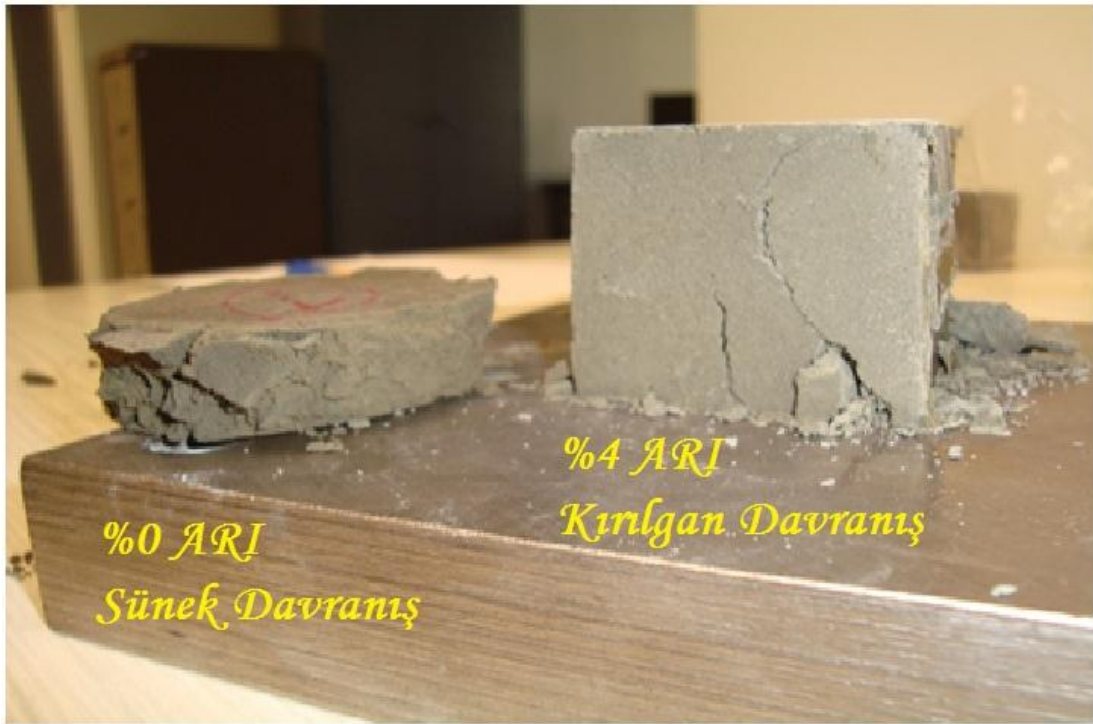
Çizelge 6.5: Katkılı G Sınıf çimento dayanımı TEP sonuçları (Mpa).

Basınç Dayanımı, Mpa												
Örnek Kodu	1 gün			Ortalama	7 gün			Ortalama	28 gün			Ortalama
G_0_C600	4.9	4.6	5.5	5.0	28.0	28.4	29.0	28.5	31.6	35.6	34.3	33.8
G_0_C600_CFR3_0,4	6.5	7.9	7.4	7.3	30.0	30.4	31.0	30.5	44.6	45.4	43.2	44.4
G_0_C600_CFR3_0,7	8.8	8.2	9.5	8.8	39.8	39.8	40.8	40.2	53.1	55.7	53.7	54.2
G_0_C600_HLD9_0,4	9.8	9.3	10.3	9.8	44.4	44.0	44.5	44.3	44.5	47.5	44.9	45.6
G_0_C600_HLD9_0,7	5.3	6.2	5.2	5.6	37.8	38.7	37.6	38.0	44.6	45.7	43.5	44.6
G_0_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,4	5.6	5.2	5.6	5.4	33.6	32.9	33.9	33.5	45.0	46.2	48.2	46.5
G_0_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,7	Sünme	Sünme	Sünme	Sünme	17.2	17.0	18.1	17.4	34.2	35.3	33.7	34.4
G_0_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,4	4.8	4.1	4.9	4.6	13.0	15.0	14.7	14.2	45.2	47.6	46.0	46.3
G_0_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,7	Sünme	Sünme	Sünme	Sünme	16.5	13.1	15.7	15.1	30.6	33.6	33.0	32.4
G_1_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,4	7.8	6.8	8.6	7.7	44.0	44.4	42.8	43.8	61.3	65.0	60.7	62.4
G_1_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,7	Sünme	Sünme	Sünme	Sünme	39.6	37.3	40.0	39.0	42.2	40.1	42.9	41.8
G_1_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,4	7.9	6.6	7.7	7.4	38.8	40.9	41.3	40.3	50.9	49.7	52.5	51.0
G_1_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,7	Sünme	Sünme	Sünme	Sünme	32.9	33.9	32.6	33.1	43.9	43.0	45.6	44.2
G_2_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,4	7.6	7.5	6.8	7.3	46.9	40.9	44.9	44.2	50.0	51.9	47.7	49.9
G_2_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,7	6.5	7.3	6.7	6.8	36.8	33.7	40	36.8	48.6	45.8	48.1	47.5
G_2_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,4	8.6	8.2	7.2	8.0	32.6	31.5	36.3	33.5	50.8	53.6	54.4	52.9
G_2_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,7	7.4	9.3	10.1	8.9	38.9	37.7	39.6	38.7	39.4	37.6	40.0	39.0
G_2_C600_CFR3_1,0_HLD9_0,5	3.2	3.6	3.8	3.5	33.1	29.7	31.5	31.4	70.7	68.2	65.2	68.0
G_2_C600_CFR3_0,9_HLD9_0,7	2.3	2.4	2.6	2.4	27.7	26.8	27.3	27.3	31.4	30.7	29.9	30.7
G_2_C600_CFR3_0,9_HLD9_0,9	2.3	2.4	2.6	2.4	25.8	23.6	24.7	24.7	19.4	14.6	17.5	17.2

Çizelge 6.5 (devam): Katkılı G Sınıf çimento dayanımı TEP sonuçları (Mpa).

	Basınç Dayanımı, Mpa											
Örnek Kodu	1 gün			Ortalama	7 gün			Ortalama	28 gün			Ortalama
G_3_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,4	14.7	14.8	13.6	14.4	30.6	33.2	35.6	33.1	54.0	52.6	55.1	53.9
G_3_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,7	8.2	7.6	9	8.3	25.5	31.5	29.5	28.8	46.0	46.4	46.8	46.4
G_3_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,4	8.5	10.8	10.3	9.9	28.5	30.8	29.5	29.6	57.8	53.7	53.0	54.8
G_3_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,7	7.5	7.7	8.2	7.8	39	35.3	39.8	38.0	51.1	48.7	52.1	50.6
G_3_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,55	11.9	10.6	11.4	11.3	38.5	35.6	41.6	38.6	47.9	40.0	43.5	43.8
G_4_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,4	10	10	9.9	10.0	31.9	35.9	32.7	33.5	50.1	49.8	51.0	50.3
G_4_C600_CFR3_0,4_HLD9_0,7	7.7	7	7.6	7.4	32.7	34.6	36	34.4	55.2	59.3	57.1	57.2
G_4_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,4	8.7	7.8	9	8.5	28.6	27.1	28.2	28.0	59.1	55.1	58.4	57.5
G_4_C600_CFR3_0,7_HLD9_0,7	9.4	8.6	9.9	9.3	32	29.8	28.5	30.1	43.9	46.3	44.4	44.9

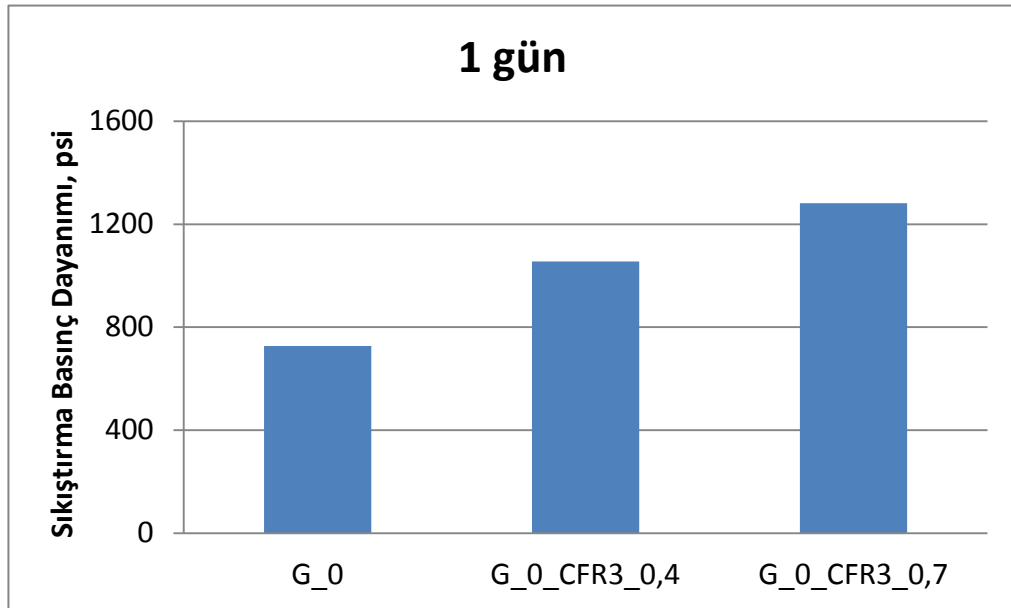
Şekil 6.3'te sol tarafta görülen örnek, ARI içermeyen ve %0,7 CFR3 ve HALAD9 içeren 1 günlük örneğin TEP testinden sonraki sünekleşmiş görüntüsüdür. Fotoğraftan da açıkça görülebileceği gibi, örnek herhangi bir şekilde basınç dayanımı göstermeden sünekleşmiş ve ezilmiştir. Fotoğrafta sağ tarafta görülen örnek 1 günlüktür ve eşit miktarda katkı malzemeleri ve %4 ARI içermektedir. Fotoğrafta görüleceği gibi, %4 ARI içeren örnek yük altında normal (kırılgan) davranış göstererek başarısızlığa uğramıştır. Gerek deney sonuçlarından gerekse fiziksel olarak fotoğraflardan görülebileceği gibi, kullanılan viskozite ve su kaybı kontrol katkılarının erken dönemde (1 günlük) dayanım üzerine olumsuz bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bu iki katkı maddesi de üretici firma tarafından önerilen oranında altında kullanılmasına rağmen, örneklerin plastik ve sünekleşme özelliği göstermelerinin belirlenerek ortaya çıkarılması, önemli bir sonuçtur. Bu konuyla ilgili literatürde herhangi bir açıklama ve yayına rastlanılmamıştır. Bunun yanında, ARI maddesi CFR3 ve HALAD9 katkı maddelerinin basınç dayanımı üzerine olan olumsuz etkilerini gidermiş olması veya önemsiz hale getirmesi de diğer bir önemli bir sonuçtur.



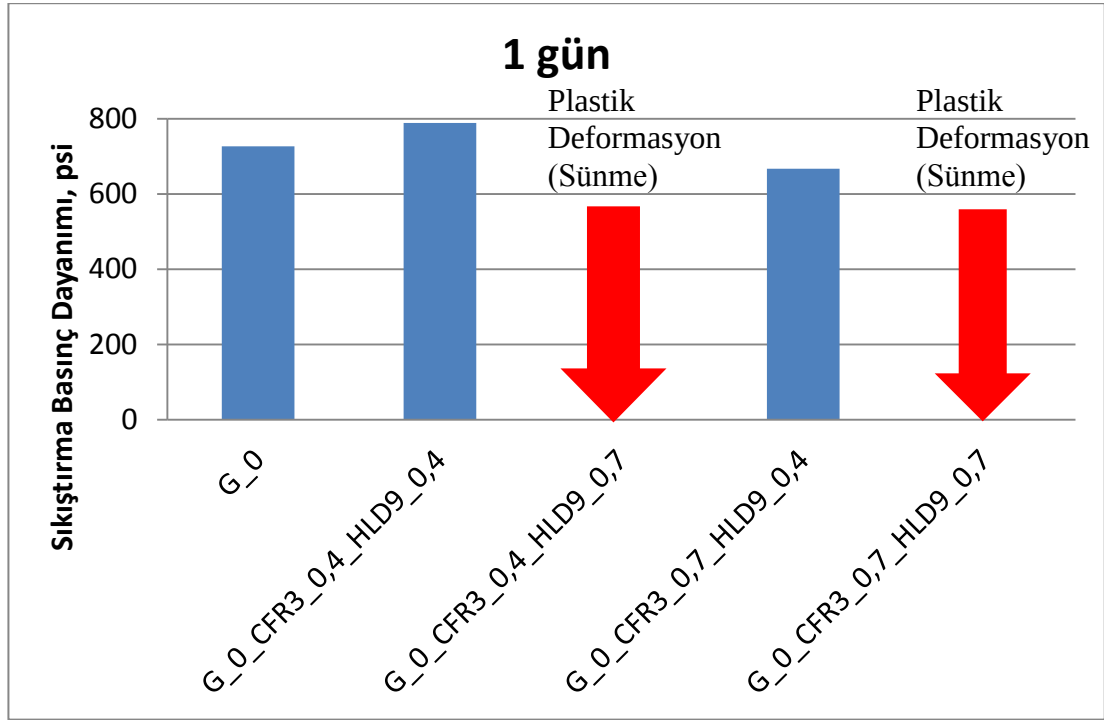
Şekil 6.3: Sünekleşmiş ve normal kırılmış bir günlük iki numune.

6.3 Katkılı çimento TEP deneyleri değerlendirmesi

CFR3 katkısı tek başına kullanıldığında, katkının karışımdaki yüzdesi arttıkça basınç dayanımına arttırıcı etki yapmıştır. Hem kısa dönemde, hem de uzun dönemde en yüksek basınç dayanımları CFR3 katkısının %0,7 oranında olduğu örneklerde görülmüştür. Sadece CFR3 katkısı ile hazırlanan 1 günlük çimento örneklerinin basınç dayanım değerleri Şekil 6.4'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. CFR3 katkısının, kullanım miktarındaki artışla birlikte basınç dayanımına arttırıcı etkisi, %0,4 HALAD9 ile birlikte kullanıldığında yapılan testlerde gözlemlenememiştir. Özellikle kısa dönemde bu düşüş etkisi belirgin bir şekilde görülebilirken, uzun dönemde CFR3'ün artışındaki basınç dayanımını düşürme etkisi daha küçük değerlerde kalmıştır. %0,7 HALAD9 ile birlikte kullanılan CFR3 katkısının miktarındaki artış, tıpkı %0,4 HALAD9 ile birlikte kullanımında olduğu gibi, basınç dayanımını olumsuz etkilememektedir. En düşük basınç dayanımı değerleri, CFR3'ün yüksek miktarda olduğu örneklerde görülmektedir. Çimentoya tek başına CFR3 katkısının basınç dayanımına arttırıcı etkisi gözlenirken, HALAD9 ile birlikte kullanıldığında basınç dayanımını düşürdüğü belirgin bir şekilde gözlenmiştir. %0,4-%0,7 CFR3 ve %0,4-%0,7 HALAD9 katkılarının beraber kullanılarak hazırlandığı 1 günlük çimento örneklerinin basınç dayanım değerleri Şekil 6.5'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



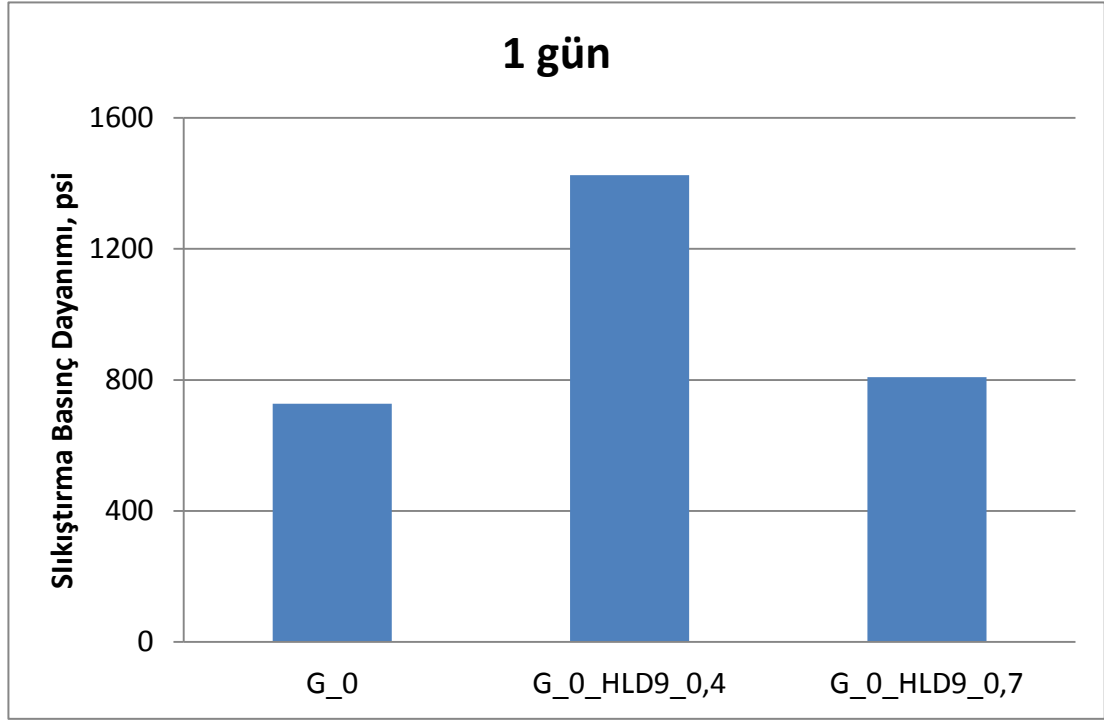
Şekil 6.4: Bir günlük CFR3 katkılı örneklerin karşılaştırma grafiği.



Şekil 6.5: Bir günlük CFR3 ve HALAD9 katkılı örneklerin karşılaştırma grafiği.

HALAD9 katkısı çimento karışımında tek başına kullanıldığında, basınç dayanımını artırıcı etki yaptığı görülmüştür. Fakat, HALAD9'un karışımındaki yüzdesi arttıkça bu etki kendini gösteremezken, basınç dayanımını düşürmüştür. Sadece HALAD9 katkısı ile hazırlanan 1 günlük çimento örneklerinin basınç dayanım değerleri Şekil 6.6'da karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Kısa dönemde bu düşüş daha kolay anlaşılabilirken, uzun dönemdeki etkisi daha küçük oranlardadır. Özellikle uzun dönem ölçümlerinde HALAD9 katkısı, örneğin basınç dayanımını arttırmış, fakat karışımındaki yüzdesinin artışı, HALAD9'un tek başına kullanıldığında görüldüğü gibi, basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. En düşük basınç dayanımları, HALAD9 içeriğinin en yüksek olduğu örneklerde gözlenmiştir. 1 günlük ölçümlerde ise HALAD9 yüzdesinin artışı, örneklerde basınç dayanımı gösterememesine, ezilmesine ve şekil kaybına sebep olmuştur. %0,7 CFR3 içeren örneklerde HALAD9 eklenmesi basınç dayanımını düşürmüştür. En düşük basınç dayanımları HALAD9 içeriğinin en yüksek olduğu örneklerde gözlenmiştir.

%0,4 CFR3 ve %0,4 HALAD9 ile birlikte kullanılan ARI'nın 1, 7 ve 28 günlük ölçümlerde basınç dayanımını arttırdığı görülmüştür. Bu artış sabit olmamakla birlikte, zaman içerisinde ARI içermeyen örneğe göre daha büyük farklılıklar ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda, ARI'nın basınç dayanımı üzerine olumlu etkisinin uzun dönemde daha belirgin olduğu söylenebilir.



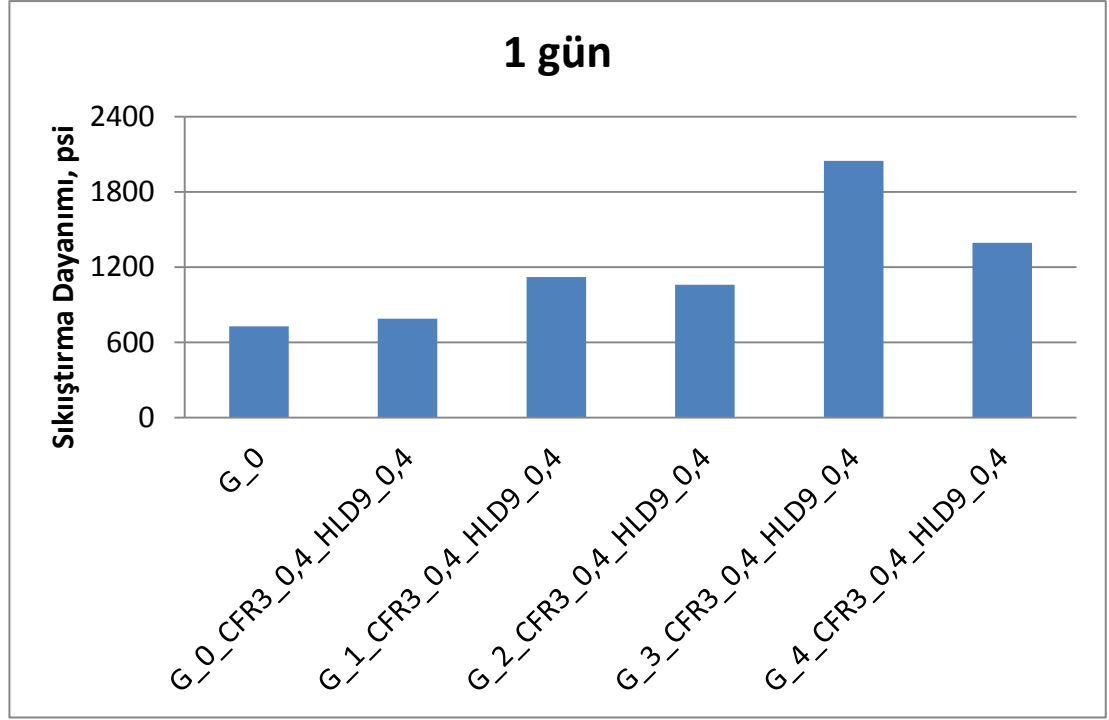
Şekil 6.6: Bir günlük HALAD9 katkılı örneklerin karşılaştırma grafiği.

ARI katkısının basınç dayanımı üzerindeki artırıcı etkisi bu örneklerde de görülmektedir. %1 ARI içerikli çimento örneği 1 günlük testlerde ezilmiş ve basınç dayanımı alınamamıştır. 7 ve 28 günlük dayanımlarda ise ARI içermeyen örneklere göre daha yüksek basınç dayanım sonuçları gözlenmiştir.

CFR3 ve HALAD9 miktarındaki değişim ARI'nın basınç dayanımını arttırmasını değiştirmemiştir. Bir günlük testlerde basınç dayanımı gözlemlenebilmesi HALAD9 miktarının düşürülmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sayede kısa dönemde de ARI katkılı örnek, ARI içermeyen örneğe göre daha yüksek basınç dayanımı oluşturmaktadır. Kısa dönemdeki dayanım artışının, uzun dönemdeki dayanım artışına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. HALAD9 katkısının %0,7'ye getirilmesiyle birlikte 1 günlük dayanım testlerinde örnek %2'ye kadar ARI katkısı içerse de, içermese de basınç dayanımı alınamadığı, sünerek deforme olduğu tekrar görülmüştür.

ARI katkılı bütün örneklerde basınç dayanımı artışı görülmesi, ARI'nın bu yönde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Karışım içerisindeki CFR3 ve HALAD9 miktarlarına bağlı olmaksızın, kompozisyona %1 ARI eklenmesiyle uzun dönem ölçümlerinde yüksek basınç dayanımları gözlenmiştir. Bu durumun

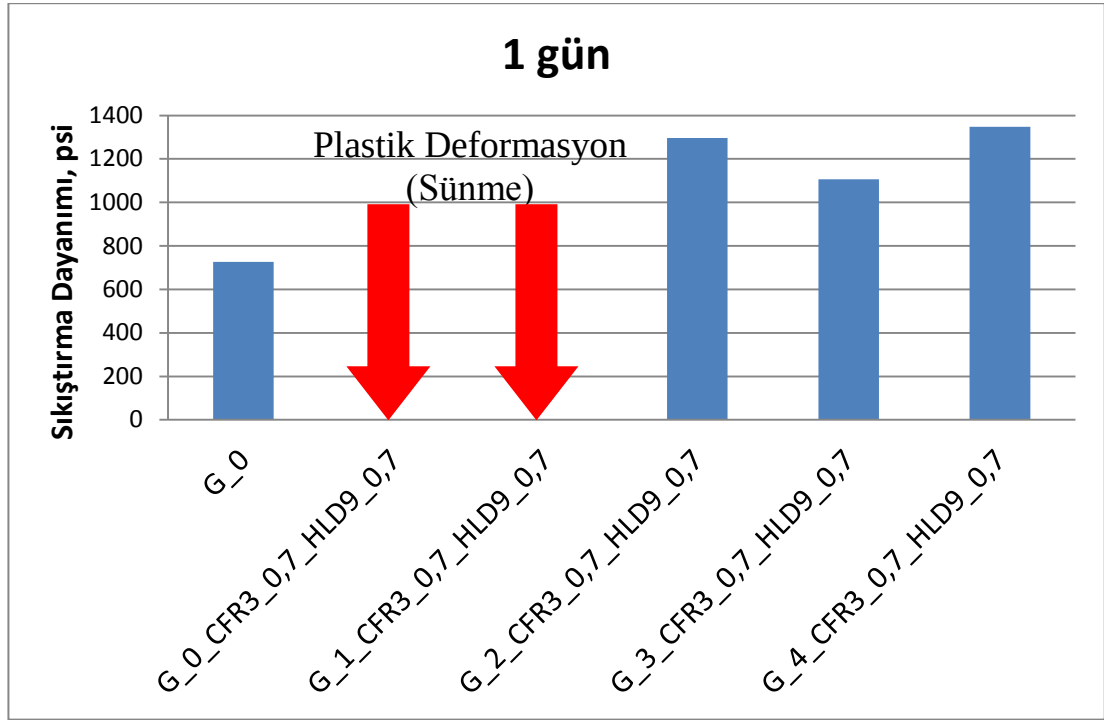
karşılaştırmalı olarak görülmesi için %0,4 CFR3 ve %0,4 HALAD9 ile %0,7 CFR3 ve %0,7 HALAD9 katkılarının beraber kullanılarak hazırlandığı 1 günlük çimento örneklerinin artan ARI miktarıyla değişen basınç dayanım değerleri Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.7: Bir günlük ARI, %0,4 CFR3 ve %0,4 HALAD9 katkılı örneklerin karşılaştırma grafiği.

CFR3 ve HALAD9’un yüksek konsantrasyonlarda kullanıldığı (Örneğin %0,9 gibi) kuyulardaki çimento operasyonlarında sondaja devam etmek için değil 8 saat 24 saat beklense dahi, düşük sıkıştırma dayanımı ve sünekleşmeden dolayı, formasyondan bir akışkan akışın girişinin olabileceği şüpheye yer bırakmayacak bir şekilde görülmektedir.

Genel olarak sonuçlara bakıldığında, ARI’nın %2 ve üzerinde kullanıldığı örneklerde herhangi bir dayanım problem olmadığı anlaşılmaktadır. %2 ve üzerinde kullanılan ARI’nın diğer katkı maddelerinin etkilerini ortadan kaldırılabildiği gözlemlenmiştir. ARI miktarı arttıkça, ARI katılmayan örneklere göre daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Dayanım değerleri ARI arttıkça orantılı bir değer göstermese de, 7 ve 28 günlük örneklerde yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.8: Bir günlük ARI, %0,7 CFR3 ve %0,7 HALAD9 katkılı örneklerin karşılaştırma grafiği.

7. GEÇİRGENLİK DENEYLERİ

Geçirimsiz bir yapıya sahip olması istenen çimentonun çoğu durumda bu özelliği sağlayamamasının nedenleri Literatür Çalışması Bölümünde geniş bir şekilde değerlendirilmiştir. Genel olarak, petrol ve doğal gaz mühendisliği konularındaki gelişmeler ve uygulamalar incelenirse, hemen her operasyonda zamanla araştırmalara dayalı teknolojik yeniliklere bağlı olarak büyük gelişmeler sağlanmasına rağmen, çimentonun geçirimsiz bir yapı oluşturması konusunda yeterince veya istenilen seviyede başarı sağlanamadığı görülmektedir. Üretim kayıplarından, yeraltında diğer geçirgen zonlara akışa; sondaj sırasında çimentonun donmasını beklerken yüzeye olabilecek akış nedeniyle mal ve can kaybından, koruma boruları arasındaki anülüsü doldurarak basınç oluşturmaya dolayısıyla, periyodik olarak bu basıncın alınmasını gerektirecek tekdüze operasyonlara kadar birçok soruna neden olan çimentonun özellikle sahip olması istenen geçirimsizlik özelliğini gerçekleştirmek için birçok firma farklı çözüm öneri ve yöntemleri sunmalarına rağmen, bu konuda kesin bir başarının elde edilemediği bir gerçektir. Literatür çalışması Bölümünde belirtildiği gibi, iyileştirme oldukça maliyetli olabileceği gibi çoğu defa hiçbir başarı sağlanamamaktadır.

Bu bölümde, çimento geçirgenliği iki farklı deneysel yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntemlerden ilki donmuş çimentolardan alınan karot örneklerine yapılan gaz enjeksiyonu deneyleri ve ikincisi ise çimentonun donma sürecinde geliştirdiği geçirgenliğin Gaz Göçü Analizörü (Gas Migration Analyzer – GMA) deneyleri ile belirlenmesi sırasıyla verilecektir.

7.1 Gaz Geçirgenliği Deneyleri

Bu bölümde sadece ARI katkısı ve her üç katkının bulunduğu çimento kompozisyonlarının enjeksiyon ile elde edilen gaz geçirgenliği sonuçları ve değerlendirmeleri verilecektir. Deneylerde her bir kompozisyon için 3 adet farklı karot alınmış ve deneyler tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Gaz geçirgenlik deneylerinin tümü Ek-I'da Çizelge I.1'de verilmektedir. Bu bölüm içindeki

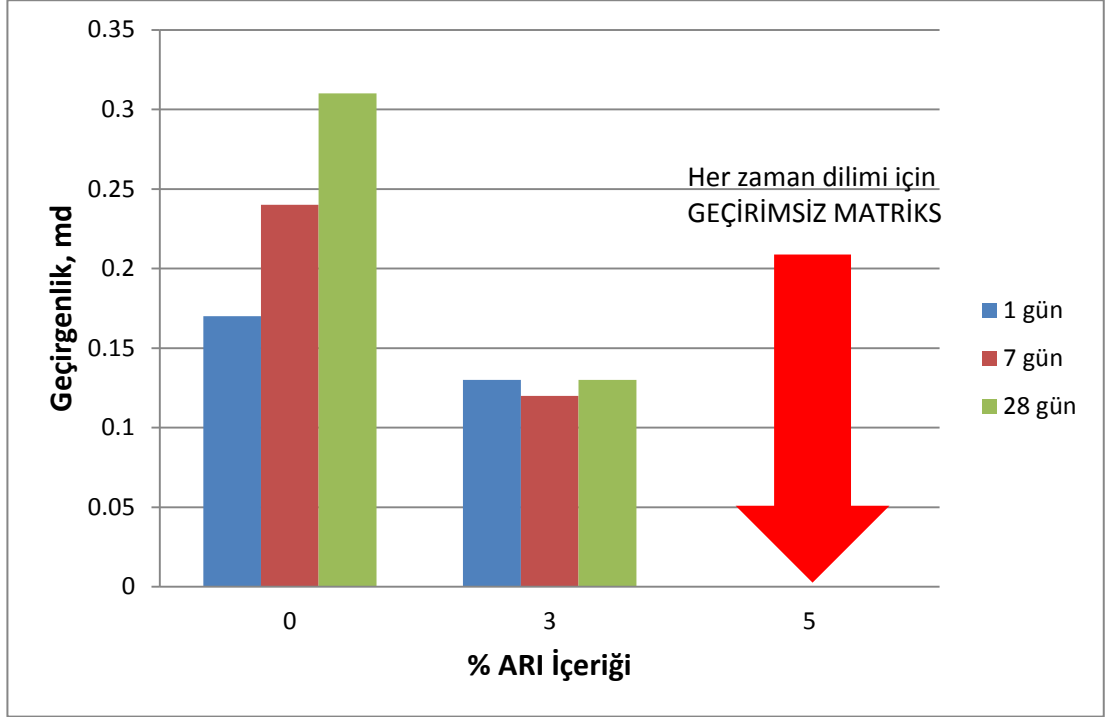
değerlendirme, şekil ve çizelgelerde üç ölçümün ortalama değerleri alınarak yapılmıştır.

7.1.1 ARI katkılı çimento gaz geçirgenliği deneyleri

ARI katkısının geçirgenlik üzerine etkisini incelemek amacıyla bu bölümdeki deneylerde katkısız, %3 ve %5 ARI içeriği ile hazırlanan örnekler kullanılmıştır. ARI katkısı içeren donmuş karot örnekleri üzerinde geçirgenlik ölçümleri 1 gün, 7 gün ve 28 gün sonunda yapılarak, zamanla geçirgenlik değişimi araştırılmıştır. Oda sıcaklığı koşullarında gerçekleştirilmiş olan geçirgenlik deney sonuçlarının her bir kompozisyon için ortalamaları alınarak elde edilen sonuçlar Çizelge 7.1’de verilmektedir. Bu veriler ile çizilen karşılaştırmalı grafik Şekil 7.1’de verilmektedir. Deneyler sonucunda, geçirgenliğin %3 ARI içerikli karotlarda kısmen, %5 ARI içerikli örneklerde ise, zamana bağlı olarak tamamen önlendiği görülmektedir. %3 konsantrasyonda elde edilen geçirgenliklerin katkısız örneklere göre çok daha düşük olduğu da gözlenmektedir. Artan ARI miktarıyla geçirgenliğin düştüğü, %5 ARI içeren örneklerin tamamında oluşan çimento matriksinin gaz geçirgenliğinin olmadığı belirlenmektedir ve bu bulgu önemli bir sonuçtur. Çimento matriksinden gaz geçirgenliğinin oluşabilmesi için kritik geçirgenlik değerinin 0,1 md olduğu Literatür Çalışması Bölümünde ifade edilmişti. Çimentoya artan oranda sadece ARI eklendiği zaman geçirgenliğin bu kritik değer altına çekilebileceği, hatta geçirgenliğin tamamen önlenebileceği görülmektedir. Zamanla katkısız çimentonun geçirgenlik değeri beklendiği gibi artmaktadır. Ancak %3 ARI katılarak hazırlanan örneklerde zamanla artan geçirgenlik değerinin önlenebildiği görülmektedir. Çizelge 7.1’de katkısız çimentonun geçirgenliği artan zaman ile artarken, %3 ARI içerikli örnekte geçirgenliğin zaman ile birlikte değişmemesi ilginç ve önemlidir.

Çizelge 7.1: ARI katkılı çimento geçirgenlikleri.

	Geçirgenlik, md		
Örnek Kodu	1 gün	7 gün	28 gün
G_0_C600	0,17	0,24	0,31
G_3_C600	0,13	0,12	0,13
G_5_C600	0	0	0



Şekil 7.1: ARI katkılı çimentonun zamana bağlı geçirgenlik değerleri.

7.1.2 ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento için gaz geçirgenliği deneyleri

Bu bölümde ARI, CFR3, HALAD9 katkılarının farklı oranlarda kullanılmasıyla hazırlanan çimento örneklerinin gaz geçirgenliği incelenmiş ve bu katkı maddelerinin geçirgenlik üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Burada da, sadece ARI katkılı örneklerde olduğu gibi, her bir kompozisyon için hazırlanan 3 adet örnek 1, 7 ve 28 günlük yaşlandırma süreleriyle geçirgenlik testlerine tabi tutulmuştur. Her bir kompozisyon için elde edilen 3 farklı geçirgenlik değerlerinin ortalamaları alınmış ve sonuçlar Çizelge 7.2’de verilmektedir. Çizelgedeki 7 ve 28 günlük örneklerin ortalama geçirgenlik değerleri ile çizdirilmiş olan karşılaştırmalı grafikler Şekil 7.2-7.3’te verilmektedir.

Gaz geçirgenliği testleri sonucu, kısa dönemde (1 günlük) bütün örneklerin geçirgenliğinin olmadığı, dolayısıyla gaz geçirmediği gözlemlenmiştir. 7 günlük ölçümlerde, 1 günlük testlere göre geçirgenliğin arttığı, genel olarak 28 günlük örneklerde ise geçirgenlik değerlerinin daha da yüksek olduğu ölçülmüştür. ARI içermeyen 7 ve 28 günlük örneklerde geçirgenlik değerlerinin gaz girişlerine izin verecek kritik değer olan 0,1 md değerinden daha yüksek olduğu gözlenmektedir.

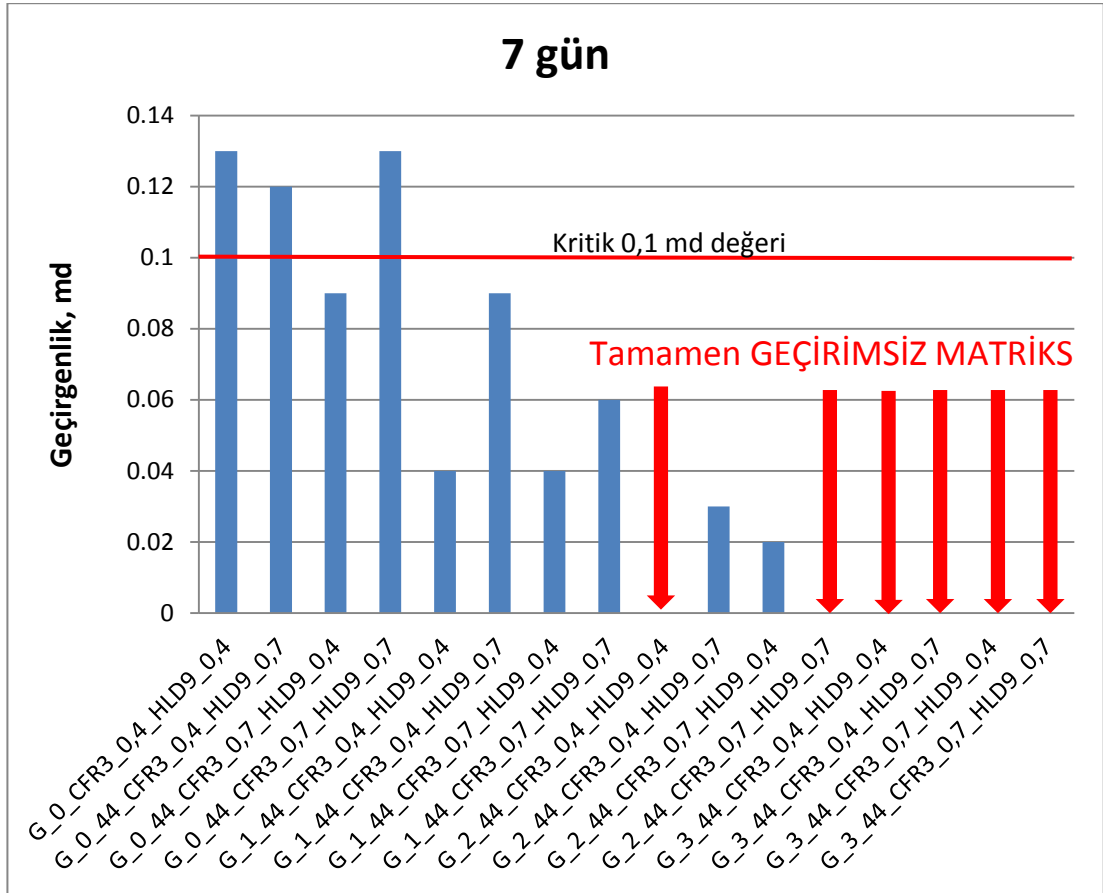
Çizelge 7.2: ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimentonun gaz geçirgenlik değerleri.

Örnek Kodu	Geçirgenlik, md		
	1 gün	7 gün	28 gün
G_0_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	0	0,13	0,14
G_0_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	0	0,12	0,14
G_0_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	0	0,09	0,15
G_0_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	0	0,13	0,15
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	0	0,04	0,09
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	0	0,09	0,06
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	0	0,04	0,05
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	0	0,06	0,06
G_2_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	0	0	0,04
G_2_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	0	0,03	0,04
G_2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	0	0,02	0,04
G_2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	0	0	0,05
G_3_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	0	0	0,01
G_3_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	0	0	0
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	0	0	0,02
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	0	0	0

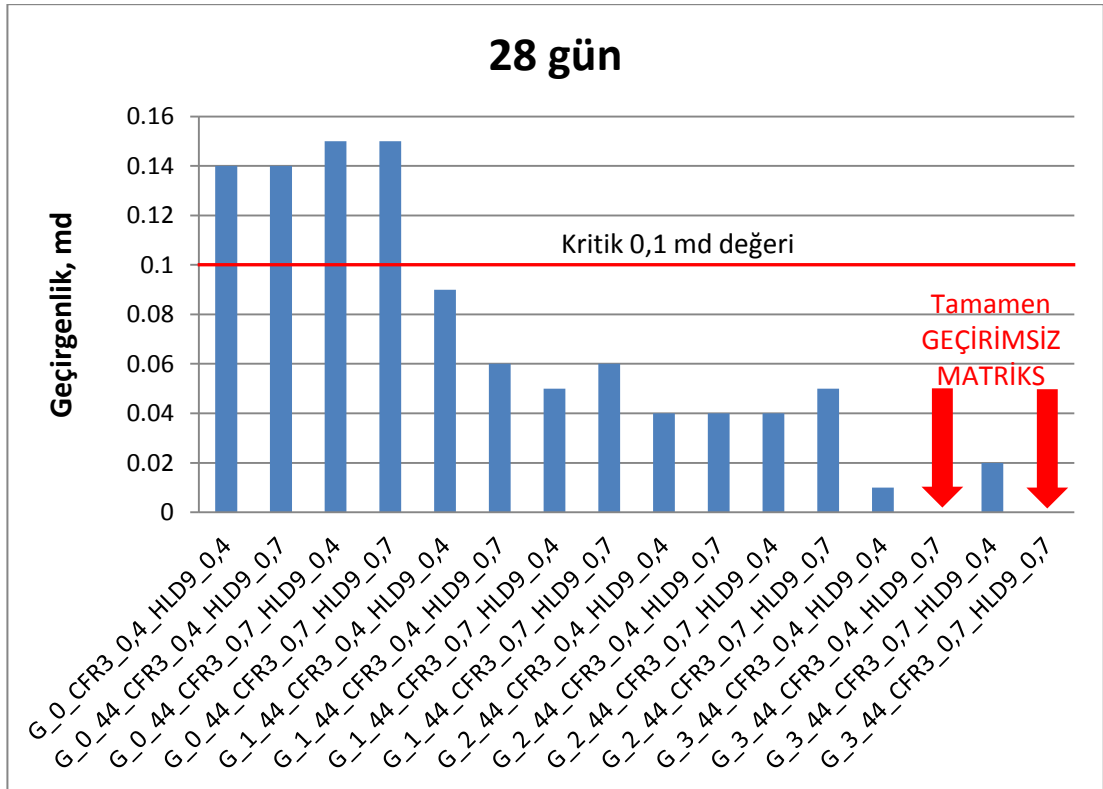
ARI katkılı 7 ve 28 günlük örneklerin geçirgenlik değerlerindeki değişim incelendiğinde, ARI'nın geçirgenliği düşürdüğü belirlenmiştir. %1 ARI katkılı örneklerde ise ARI katkısız örneklere göre geçirgenliklerde azalım olduğu gözlenmektedir. Çimento kompozisyonlarındaki artan ARI miktarıyla 7 ve 28 günlük örneklerde geçirgenlik değerlerinin daha da düştüğü, hatta %3 ARI katkılı örneklerin tamamında, her zaman periyodu için geçirgenlik değerlerinin sıfır olduğu, yani geçirimsiz bir matriks oluştuğu belirlenmiştir.

ARI'nın ve diğer katkı maddelerinin bulunduğu çimento örneklerinde geçirgenliğin önlenmesi, bu tez çalışmasının amacının gerçekleştiğinin göstergesidir. ARI katkılı örneklerin tümünde kritik değer olan 0,1 md değerinin altında geçirgenlik değerleri elde edilmesi, ARI'nın uzun dönemde de çimentoda oluşturduğu geçirimsiz yapıyı koruyabildiğinin bir göstergesidir.

Bundan sonraki bölümde ARI'nın çimentonun donma aşamasında, diğer bir deyişle, sıvı fazdayken, ilk 24 saat boyunca geçirgenliğe olan etkileri GMA test cihazı ile incelenecektir.



Şekil 7.2: 7 günlük ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento gaz geçirgenlikleri.



Şekil 7.3: 28 günlük ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimento gaz geçirgenlikleri.

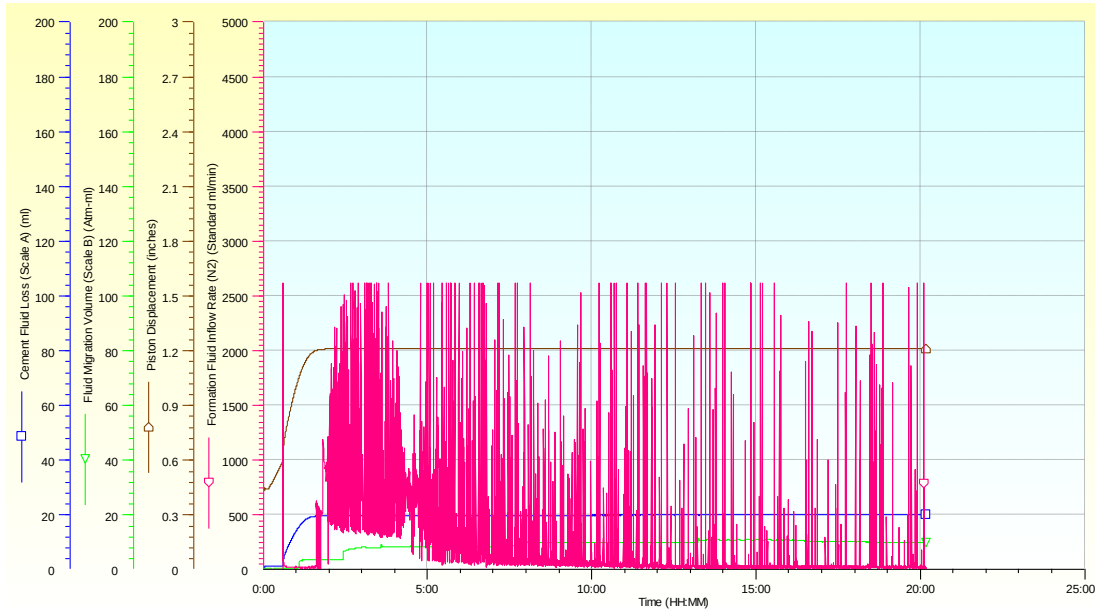
7.2 GMA Deneyleri

Bu bölüm sadece katkısız çimento, ARI katkılı çimento ve her üç katkının da birlikte kullanıldığı çimento Gaz Göçü Analizörü (GMA) deneyleri olmak üzere iki başlık altında incelenecektir.

7.2.1 Katkısız Çimento GMA Deneyleri

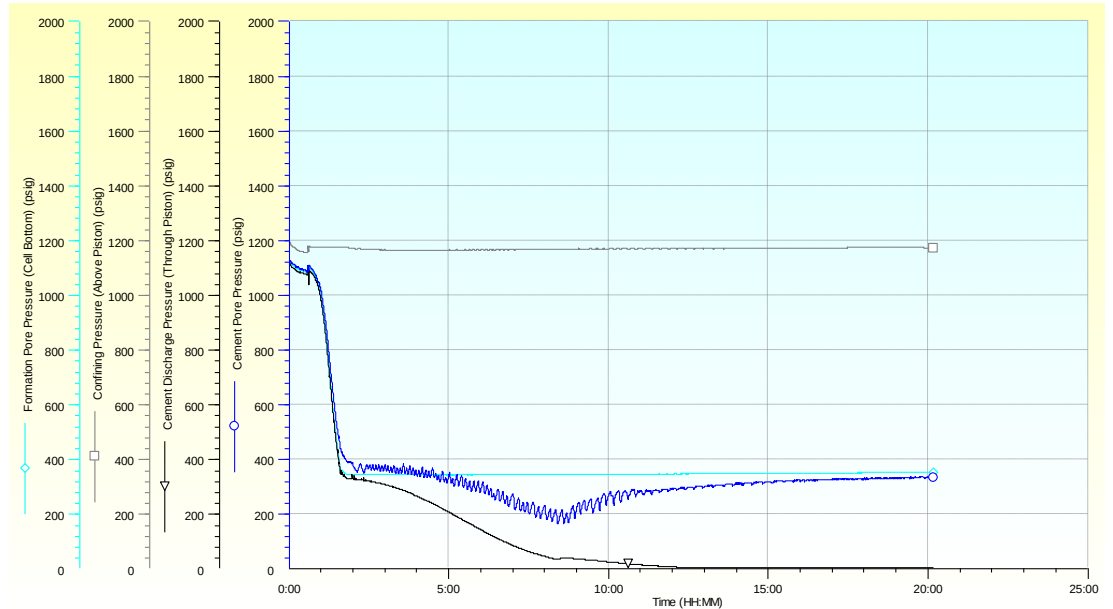
Bu bölümde katkısız çimentonun GMA sonuçları değerlendirilmektedir. Şekil 7.4-7.6'da katkısız çimento için gerçekleştirilen deneyde elde edilen gaz göçü, basınç değişimi ve sıcaklık grafikleri verilmektedir.

Şekil 7.4'ten de görüleceği gibi, katkısız G Sınıf çimento ile yapılan geçirgenlik deneyinde formasyon akışkanı (pembe renkli) çimento bünyesi geçirgen olduğu için örneğin içerisine girmiş ve tam bir gaz göçü oluşarak, gazın rahat bir şekilde geçiş yapabileceği kanallaşma olduğu belirlenmiştir. Kanallaşma o derece yüksektir ki, cihaz uygulama basıncını tam olarak sağlayamamış ve şekilden de anlaşıldığı üzere, basıncı sağlamaya çalışırken bu gaz göçü grafiğinde iniş çıkışlar olarak gözlemlenmiştir. Bu çimentonun kullanıldığı kuyularda hem sondaj sırasında, hem de üretim yapılması durumunda sorun yaşanacağı aşikardır. Bu durum aynı zamanda çimentoyla neden katkı maddelerinin zorunlu olarak kullanıldığının da bir cevabıdır.



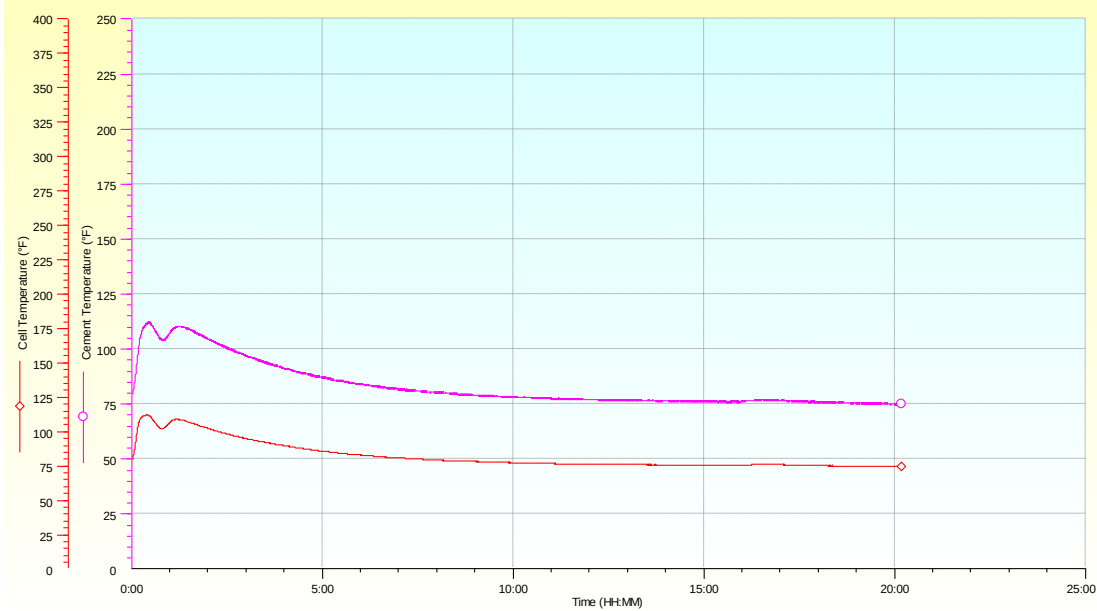
Şekil 7.4: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI) – gaz göçü grafiği.

Şekil 7.5'te test sırasındaki basınç değişimi kaydının grafiği görülmektedir. Test boyunca yaklaşık 1200 psig çevrel basınç (confining pressure) uygulanmıştır. Deneyin başında uygulanan çevrel basınç 1190 psig'dir ve test başladıktan hemen sonra bu değer 1150-1175 psig arasında değişmiş (regülatör ile basınç sabitlenemediğinden), ortalama olarak 1160 psig'de dengelenmiştir. Başlangıçta formasyon basıncı (formation pore pressure) 1121 psig ve çimento gözenek basıncı (cement pore pressure) 1125 psig'dir. Formasyon basıncı açık mavi rekli ve çimento gözenek basıncı ise lacivert renkle gösterilmektedir. Deneyin başlamasıyla birlikte kısa süre içerisinde her iki basınç ta düşmüştür. İkinci saatin sonunda formasyon basıncı 340 psig'ye inerken, çimento gözenek basıncı da formasyon basıncına oldukça yaklaşmıştır. Bu süre içerisinde az da olsa formasyon akışkanının çimentoyu işgal ettiği Şekil 7.4'te görülmektedir. İkinci saatin sonunda, çimento gözenek basıncı değeri formasyon basıncı değerinin altına düşerek, formasyon akışkanının işgali tam olarak başlamıştır ve bu durum deney sonuna kadar devam etmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken konu, iki saatin sonunda çimentonun hala sıvı fazda olması ve bünyesinde geçirgen bir yapı (kanal ağı) oluşturmasıdır. Diğer bir deyişle, çimento formasyon akışkanı için geçirgen bir ortam oluşturmuştur ve formasyon akışkanı çimento bünyesine tamamen girmiştir. Sonuçta, geçirgen bir yapının oluştuğu kolaylıkla söylenebilmektedir.



Şekil 7.5: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI) – basınç grafiği.

Şekil 7.6 deney sırasında çimento hücresinin ve çimentonun sıcaklığını vermektedir. Çimento donması egzotermik bir reaksiyondur; diğer bir deyişle, çimento donarken ortama ısı verir. Bu durum, hem çimentonun hem de çevresinin sıcaklığında bir artış olarak kendisini gösterir. Deneyin başlangıcında çimento sıcaklığı 75 °F ve hücre sıcaklığı 45 °F olarak kaydedilmiştir. Deneyin başlamasıyla, çimentoda meydana gelen egzotermik reaksiyonlar nedeniyle sıcaklık artmış ve maksimum değer olan 110 °F'a bir saat içerisinde ulaşmıştır. Daha sonra sıcaklık azalmış ve orijinal değerine yaklaşık 12 saat sonra düşmüş ve deney sonuna kadar bu sıcaklık korunmuştur. Hücre sıcaklığında da çimentonun ısınması nedeniyle benzer şekilde artış gözlenmiştir. Artış maksimum değeri olan 70 °F'a bir saat sonra ulaşmış, daha sonra başlangıç sıcaklığına 12 saat sonra ulaşmış ve deney sonuna kadar sabit kalmıştır.



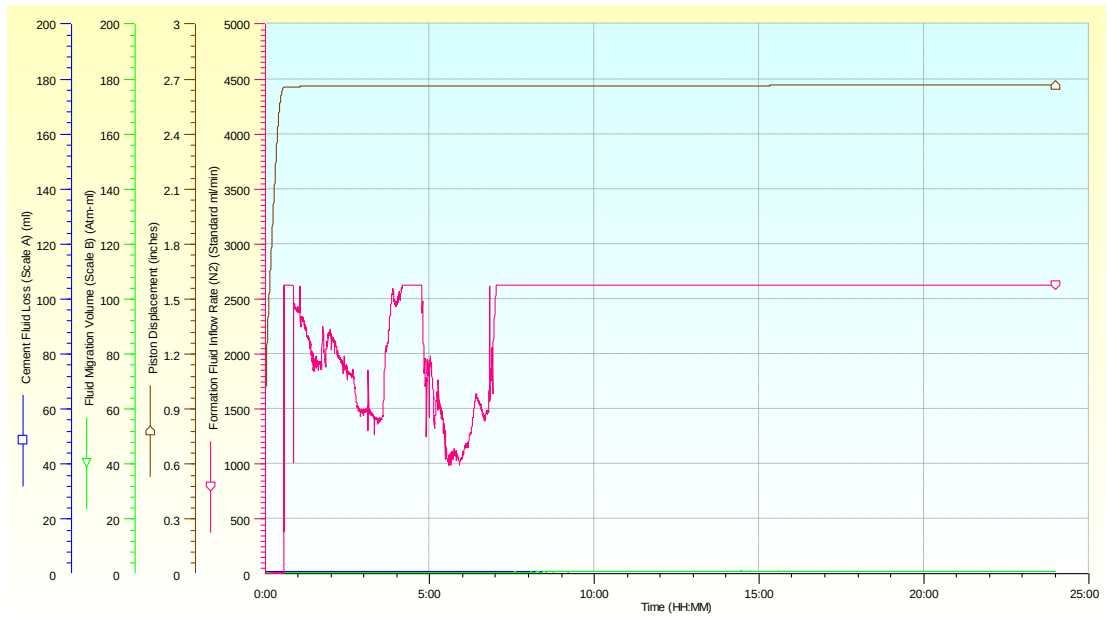
Şekil 7.6: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%0 ARI) – sıcaklık grafiği.

Şekil 7.4-7.6'da grafik olarak verilen davranışlar birlikte değerlendirildiğinde, çimento harcının gösterdiği hidrostatik basınç iki saat sonunda formasyon basıncının altına düşerek, hidrostatik denge kaybedilmiş ve formasyon akışkanı henüz donmamış çimento bünyesine girerek, tam geçirgen bir yapı oluşturmuştur.

7.2.2 ARI katkılı çimento GMA deneyleri

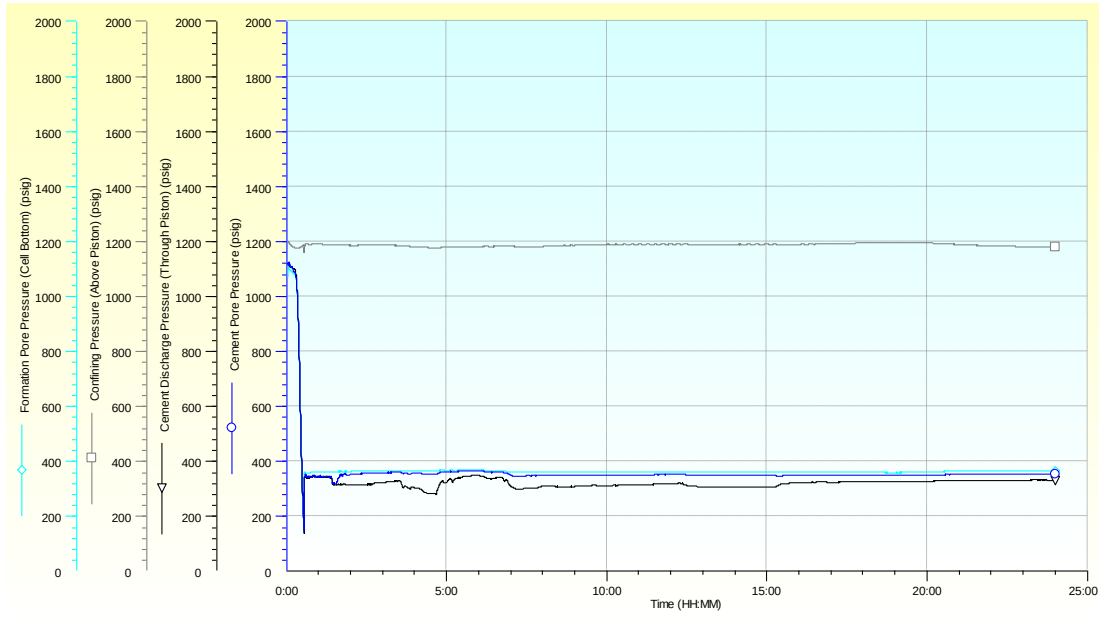
Bu bölümde ARI katkılı çimentonun GMA sonuçları değerlendirilmektedir. Şekil 7.7 ve Şekil 7.18 arasında farklı oranlarda ARI katkılı çimento örnekleri için gerçekleştirilen deneylerde elde edilen gaz göçü, basınç değişimi ve sıcaklık grafikleri verilmektedir.

Şekil 7.7 ve Şekil 7.9 arasında %1 ARI içerikli çimentonun GMA ile yapılan deneyden elde edilen sonuçları grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekil 7.7’den görüleceği gibi, çimento gözenek basıncı bir saatten önce formasyon basıncının altına düşmekte ve formasyon akışkanının işgali Şekil 7.8’de görüldüğü gibi başlamaktadır. Deney sonuna kadar, tam bir geçirgen yapının varlığı (tam bir kanallaşma veya kanal ağları) açıkça görülmektedir. Sürekli bir kanal şeklinde geçirgenlik oluştuğu belirlenmiştir.



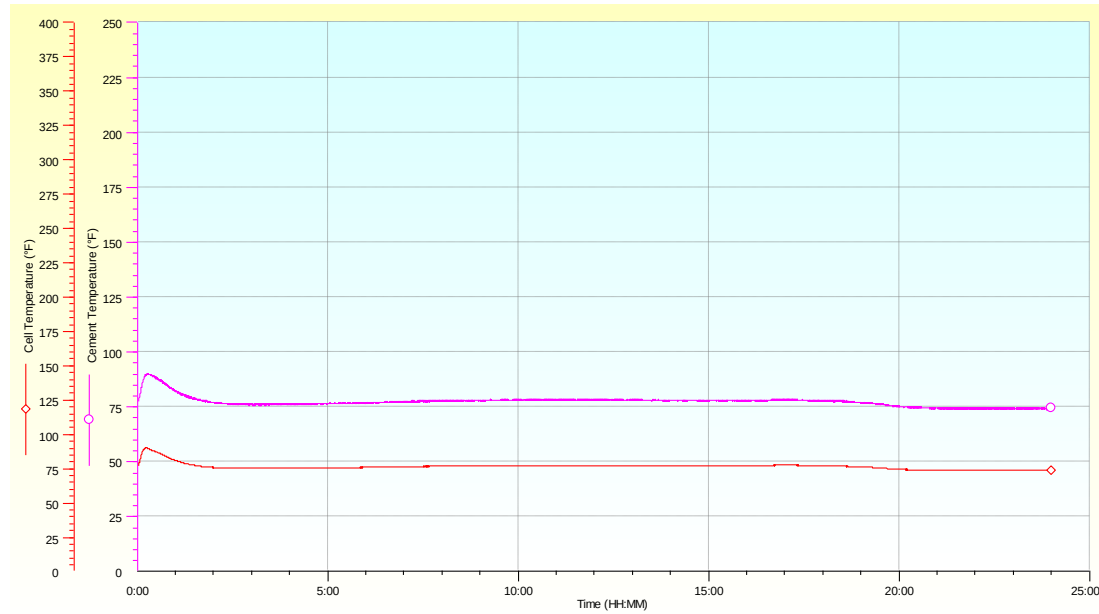
Şekil 7.7: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – gaz göçü grafiği.

Bu örneğin, Şekil 7.9’da verilen sıcaklık grafiğine bakıldığında, davranış olarak katkısız çimento için verilen davranışı takip etmektedir, ancak bu kez ulaşılan maksimum sıcaklıklar daha düşüktür. Egzotermik reaksiyon sonucunda daha az ısının ortama bırakıldığı gözlenmektedir. ARI maddesi çimentonun donma sürecinde oluşan reaksiyonları etkilediği ve/veya değiştirdiği düşünülmektedir. Maksimum çimento sıcaklığı katkısız çimentoda 110 °F iken bu durumda 90 °F’a düşmüş, benzer şekilde hücre sıcaklığı katkısız çimentoda maksimum 70 °F’tan ARI katkılı çimentoda 55 °F’a düşmüştür.



Şekil 7.8: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – basınç grafiği.

Sonuç olarak, %1 ARI katkılı çimento geçirgenliği önleme açısından başarısız olurken, donma sürecinde ortaya çıkan reaksiyonları etkileyerek, ısı çıkmasını azaltmış ve sıcaklığın daha az yükselmesine neden olmuştur.

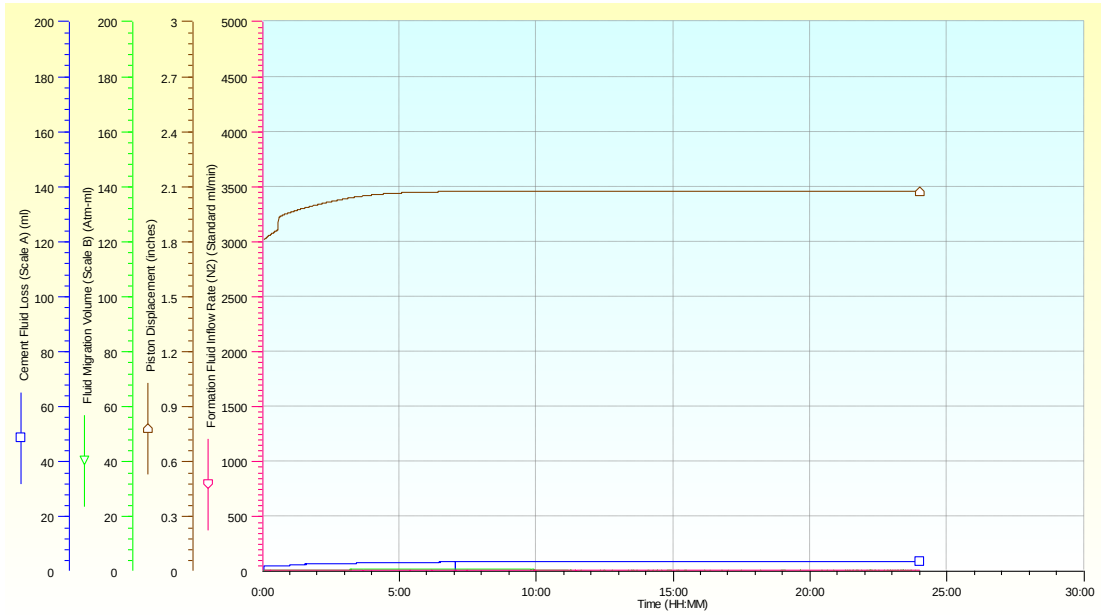


Şekil 7.9: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – sıcaklık grafiği.

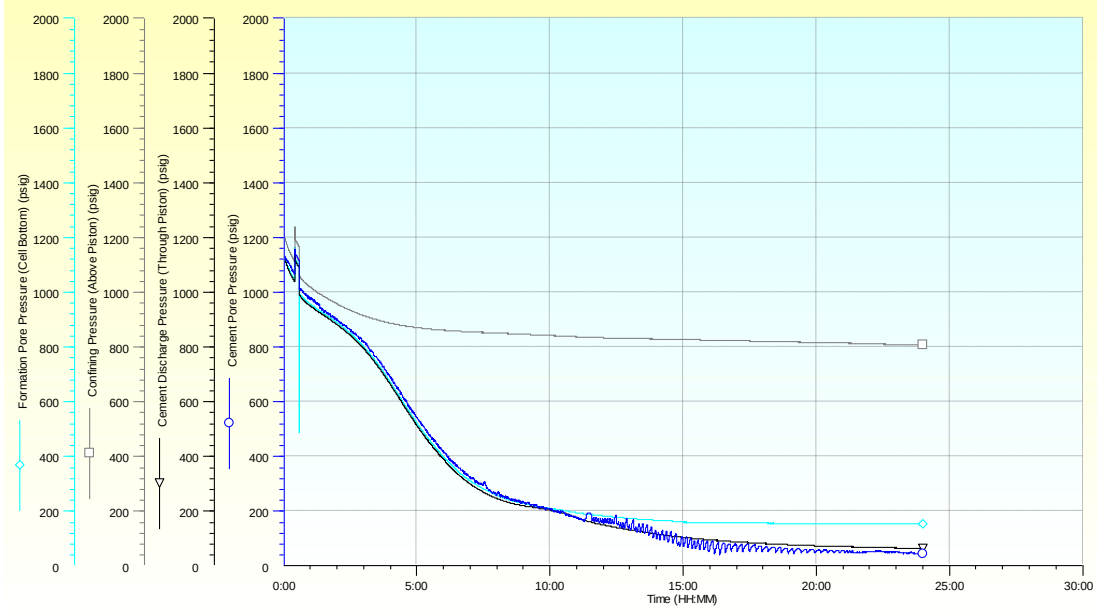
Şekil 7.10 ve Şekil 7.12 arasında %2 ARI katkılı çimentodan elde edilen sonuçlar görülmektedir. Şekil 7.10’da görüldüğü gibi, ARI maddesi çimentonun geçirgenliğini önlemiştir. Deney süresince, formasyon akışkanı hiçbir şekilde çimento bünyesine girmemektedir. Diğer bir deyişle, çimento bünyesi geçirimsiz bir yapıdadır.

Şekil 7.11’de ile verilen basınç grafiği incelenirse, çimento gözenek basıncı deney başladıktan 10 saat sonra formasyon basıncının altına düşmektedir. Bu süre, katkısız çimento örneğinde iki saat olarak gözlenmiştir. Dolayısıyla, ARI katkı maddesi çimento gözenek basıncının formasyon basıncından daha yüksek olduğu süreyi arttırarak, çimentonun donması sürecinde geçirgen olmayan bir yapının gerçekleşmesine yardımcı olmaktadır. Formasyon basıncı çimento basıncını geçtiğinde, çimento yeterince donmuş olduğundan, artık geçirgenlik ve formasyon akışkanının işgali söz konusu değildir.

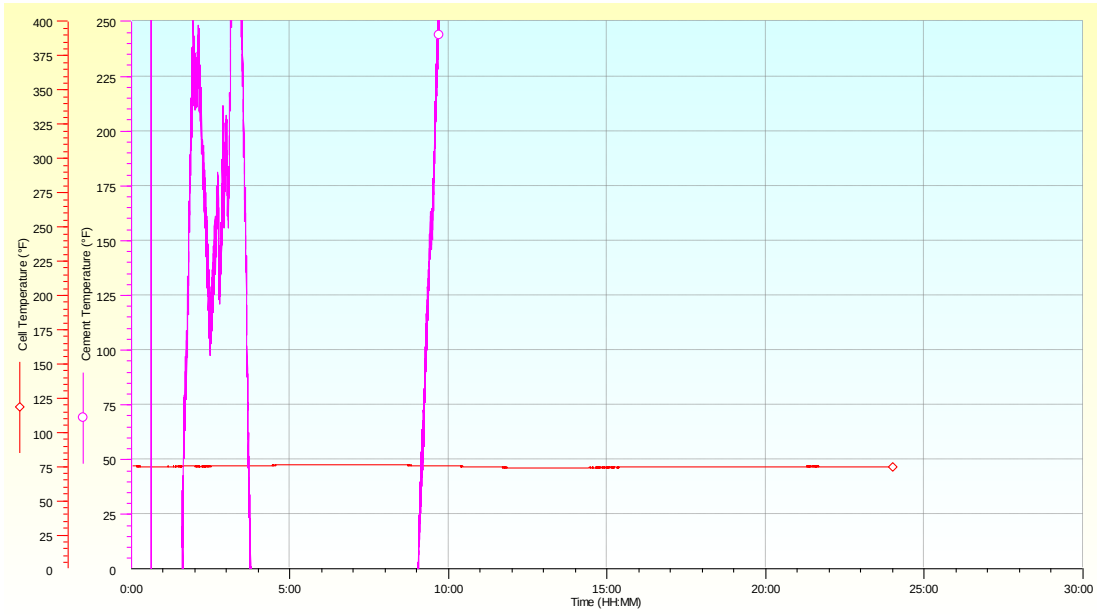
Bu örneğe ait sıcaklık davranışı grafiği Şekil 7.12’de verilmektedir. Daha önce belirtildiği gibi, donanımın çimento sıcaklığını ölçen sistemindeki arızadan dolayı bu deneyin kayıtlarında sıkıntı yaşanmıştır. Ancak, hücre sıcaklığını ölçen sistem çalışmakta ve kayıt yapmıştır. Burada ilginç olan, %1 ARI katkısı kullanıldığında ortama çimento tarafından bırakılan ısı katkısız örneğe göre azalmışken, %2 ARI durumunda hücre sıcaklığında bir değişim kaydedilmemektedir, yani çimentonun ortama bıraktığı ısı ARI maddesinin etkisiyle gözlenmemektedir.



Şekil 7.10: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI) – gaz göçü grafiği.

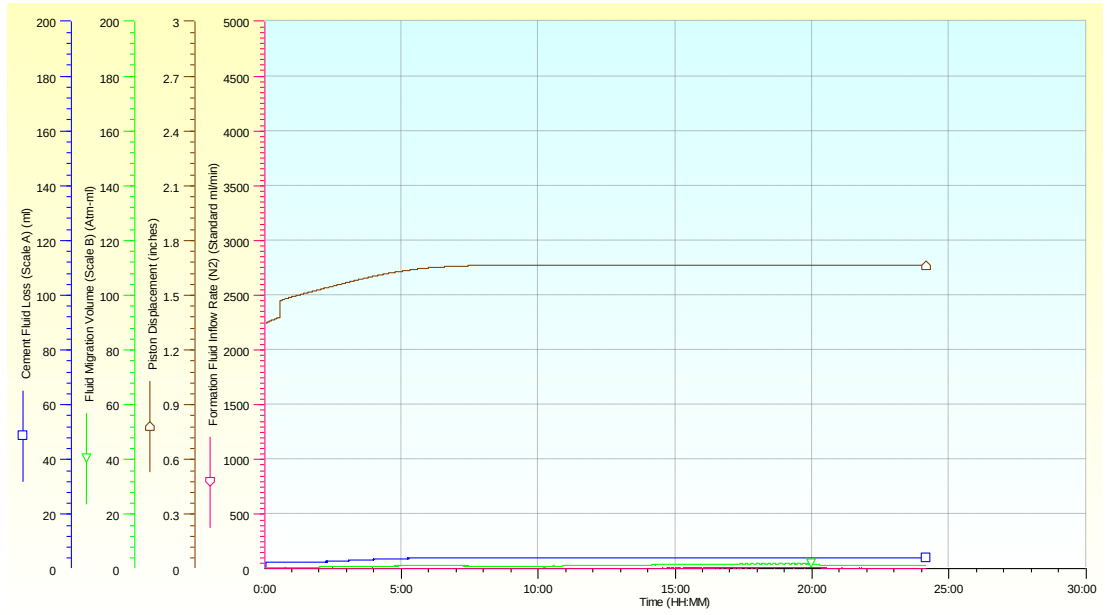


Şekil 7.11: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI) – basınç grafiği.



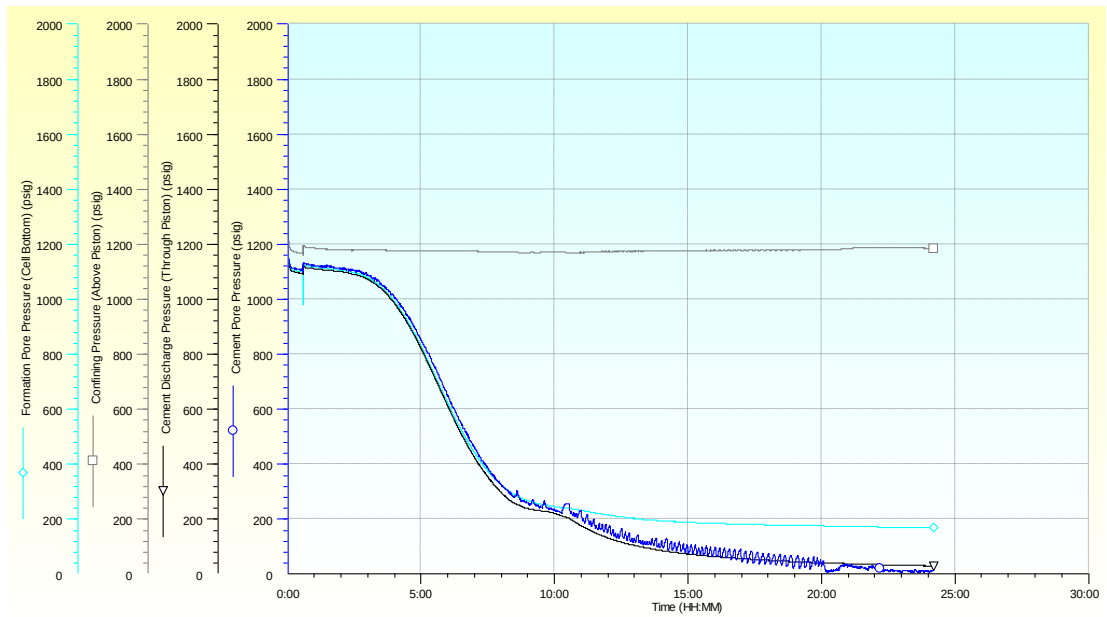
Şekil 7.12: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI) – sıcaklık grafiği.

Şekil 7.13 ve Şekil 7.15 arasında artırılan ARI konsantrasyonunun geçirgenlik üzerine etkisi gösterilmektedir. Bu deneyde kullanılan ARI konsantrasyonu çimento ağırlığına göre %3'tür. Bu durumda da ARI'nın tamamiyle geçirgenliği önlediği gözlenmektedir.



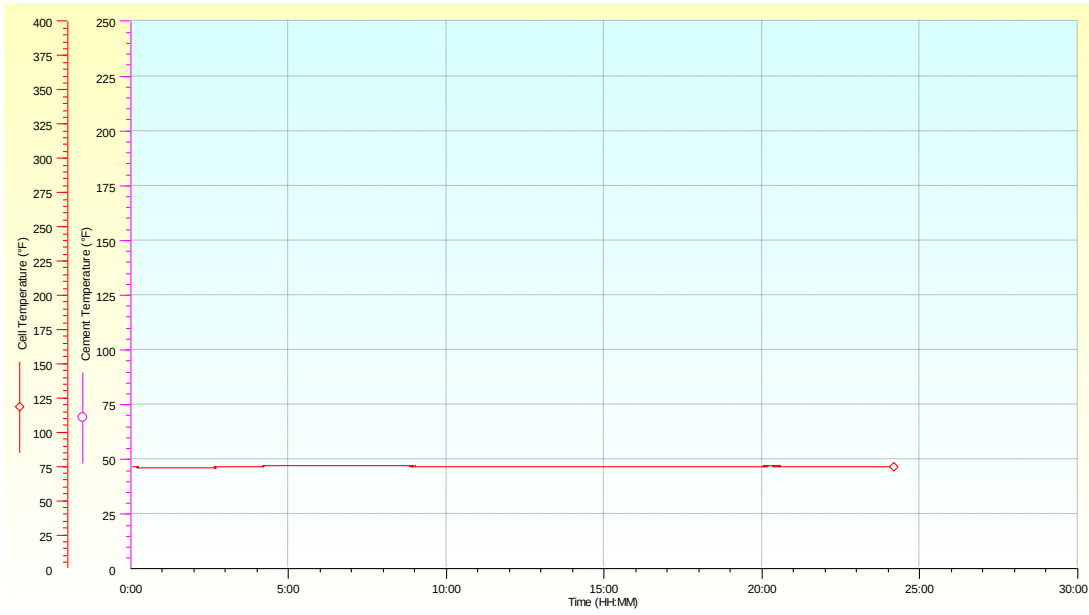
Şekil 7.13: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI) – gaz göçü grafiği.

Şekil 7.14'te artan ARI içeriğiyle çimento gözenek basıncının formasyon basıncının altına düşme süresi daha da (10 saat sonunda) artmıştır. Diğer bir deyişle, donma sürecinde geçirimsiz bir yapının oluşması sağlanmıştır.



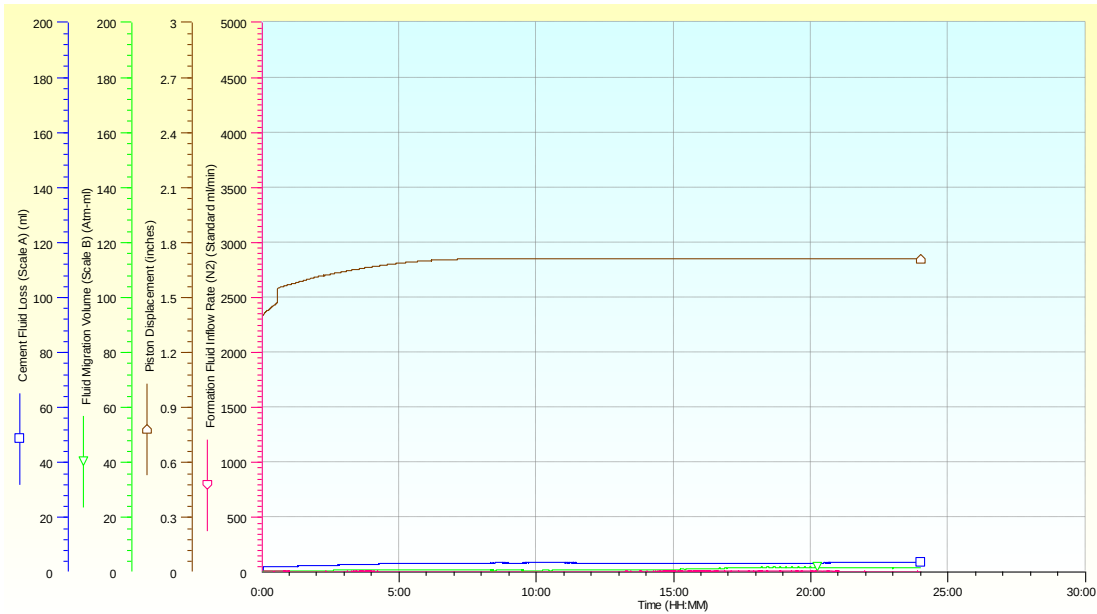
Şekil 7.14: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI) – basınç grafiği.

Şekil 7.15 ile verilen sıcaklık grafiğinde çimento sıcaklığı kaydedilmemiştir. Sadece hücre sıcaklığı kaydı yer almaktadır. Görüldüğü gibi, çimentonun donması sürecinde, ortamda olması gereken sıcaklık artışı burada da gözlenmemektedir.



Şekil 7.15: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI) – sıcaklık grafiği.

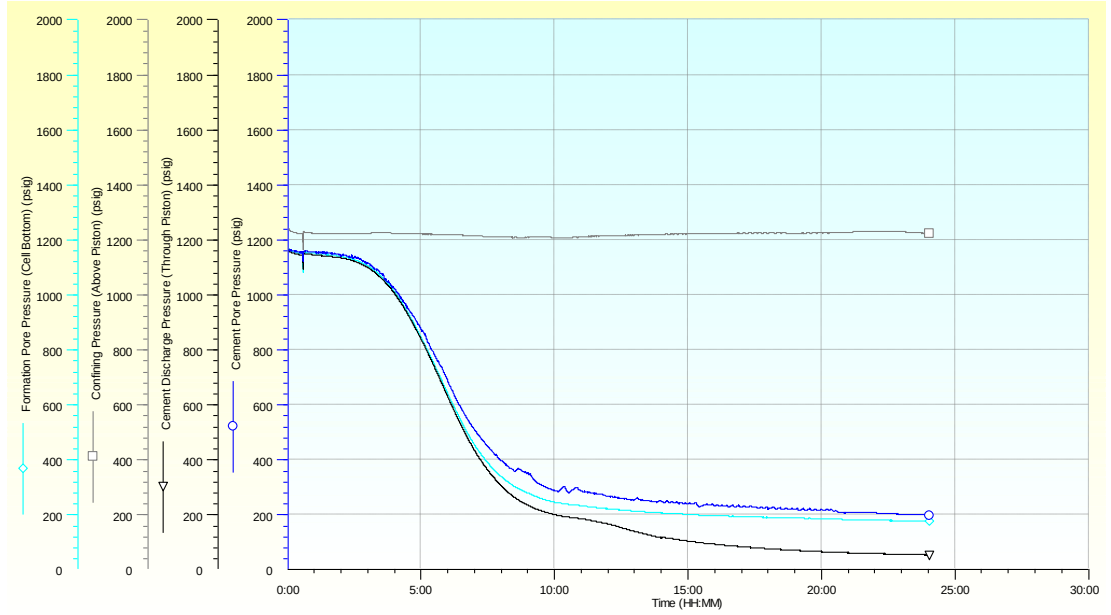
Bu bölümde verilecek olan son örnek, %3 ARI içerikli deneyin tekrarını gösteren sonuçların yer aldığı ve Şekil 7.16 ve Şekil 7.18 arasında grafiksel olarak verilen ölçümlerdir. Bu deneyde de, formasyon akışkanının çimento bünyesine giremediği veya işgal edemediği gözlenmiştir ve bu durum Şekil 7.16’den de görülebilmektedir.



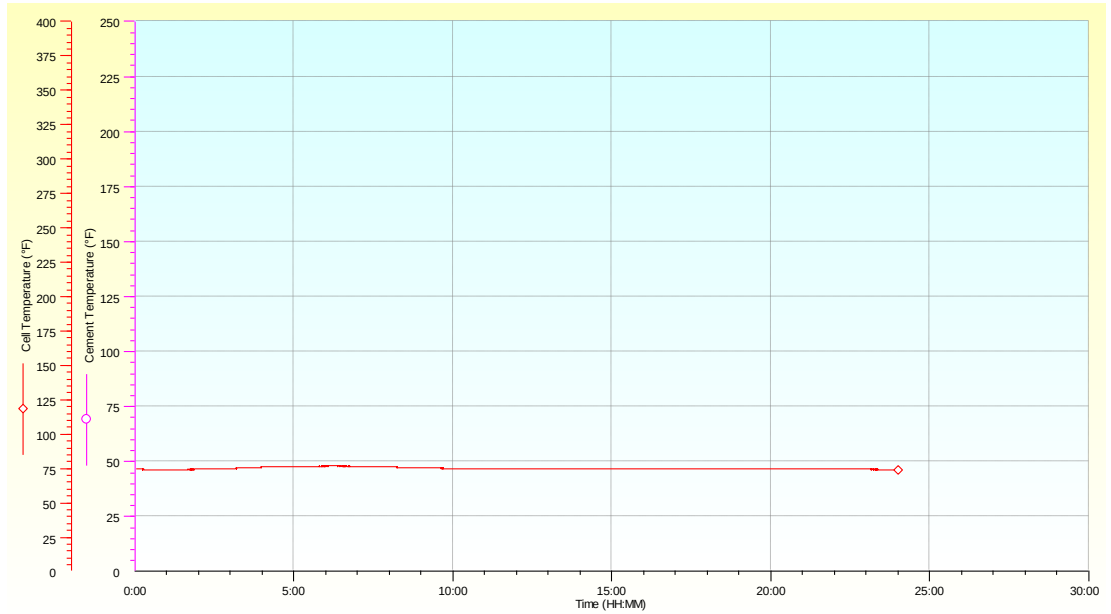
Şekil 7.16: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – gaz göçü grafiği – tekrar-1.

Şekil 7.17’de verilen basınç davranışı incelendiğinde, ARI katkısı çimento gözenek basıncını deney süresi olan 24 saat boyunca formasyon basıncından yüksek olmasını

sağlamıştır. Şekil 7.18’de sıcaklık grafiği görülmektedir. Benzer şekilde, bu deneyde de hücre sıcaklığında bir değişimin olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 7.17: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – basınç grafiği – tekrar-1.



Şekil 7.18: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI) – sıcaklık grafiği – tekrar-1.

ARI katkılı çimento deneyleri birlikte değerlendirildiğinde katkısız çimentonun kanallaşmaya uğrayarak tam geçirgen bir ortam oluşturduğu belirlenmiştir. ARI katkılı deneylerde, %2 ve daha yüksek ARI içerikli örneklerde geçirgenliğin oluşmadığı gözlenmiştir. %1 ARI içerikli örnekte geçirgenlik gözlenmiş, ancak bu

deneyde donma sürecinde hem çimentoda, hem de hücrede katkısız çimento örneği deney sonucuna göre daha az sıcaklık artışlarının olduğu gözlenmiştir. ARI katkısının ortama bırakılan bu ısıyı donma sürecindeki reaksiyonları etkileyerek önlediği yargısına ulaşılmıştır. %2 ve daha yüksek içerikli ARI bulunan örneklerde ise sıcaklık değişiminin oluşmadığı, ortama bırakılması gereken tüm ısının ARI tarafından önlediği gözlenmiştir.

ARI katkısı çimento gözenek basıncının formasyon basıncından yüksek olmasını sağlayarak, artan ARI içeriğiyle daha fazla süre bu dengeyi sürdürdüğü de gözlenmiştir. %2 içerikte, 10 saatlik bir dengeüstü (overbalance) basınç yaratılmasını sağlayarak, bu sırada yeterince donmanın gerçekleşmesini, dolayısıyla geçirimsiz bir yapının oluşmasını sağlamıştır. Artan ARI içeriğiyle, dengeüstü basıncın gerçekleştiği süre daha da artmakta ve geçirimsiz bir yapının oluşması tam olarak sağlanmaktadır.

7.2.3 ARI, CFR3 ve HLD9 katkılı çimento GMA deneyleri

Çalışmanın bu kısmında çimentoya ARI ile beraber viskozite azaltıcı olarak kullanılan CFR3 ve su kaybı azaltıcı olarak kullanılan HALAD9 eklenen ve diğer testlerden de iyi sonuçlar elde edilmiş olan kompozisyonlar gaz geçirgenlik testine tabi tutulmuştur.

Testler çimento ağırlığınca %1 ile %4 oranında değişen miktarlarda ARI, %0,7 ile %1 oranında değişen miktarlarda CFR3 ve %0,5 ile %1 oranında değişen miktarlarda HALAD9 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerden ikisi oda sıcaklığında, diğerleri 150 °F'ta yürütülmüştür. Sonuçlar Ek-J'de Şekil J.1-Şekil J.30 arasında verilmektedir.

Gerçekleştirilen deneylerden %3 ARI katkılı çimentonu örneklerin az da olsa gaz geçirgenliği gösterdiği, diğer hiçbir deneyde çimentoya gaz girişi gözlenmediği belirlenmiştir. Şekil J.19 ve Şekil J.25'te verilen %3 ARI içerikli örneklerin kompozisyonlarına bakıldığında HALAD9 oranının diğer örneklere oranla daha düşük olduğu ve bunun erken dönemde yüksek su kaybına ve formasyon basıncının çimento gözenek basıncının üstünde kalmasına sebep olduğu, dolayısıyla düşük te olsa gaz girişlerine neden olmuştur. Ancak gaz girişi kısa bir zaman diliminde gözlenmiş ve ilerleyen zamanla çimento geçirimsiz yapısını geri kazanarak gaz girişi olmasını tekrar engellemiştir.

Bununla birlikte Şekil J.1'deki grafiğe bakıldığında zaman %1 ARI içerikli olmasına rağmen gaz geçirgenliğinin engellenebildiği görülmektedir. Ayrıca, bu numunede de HLD9 miktarı diğerlerine göre % 0,5 gibi düşük bir seviyede olmasına rağmen, muhtemel su kaybının engellenmesinden dolayı gaz giriş problemi yaşanmadığı görülmektedir. Daha önceki çalışmalarda belirtildiği üzere, viskozite azaltıcı olarak kullanılan CFR3 katkısının ikincil bir etki olarak su kaybını azaltmada etkin olduğu görülmüştü. Bu örnekte HLD9 miktarı düşük bir seviyede iken CFR3 miktarı %1 gibi yüksek sayılabilecek bir değerdedir. Bu durumda CFR3 katkısının ikincil etkisinin görüldüğü ve su kaybını azaltmada etkin rol aldığı ve bunun sonucunda da çimentonun su kaybına uğramadan gaz göçüne karşı stabilitesinin sağlandığı düşünülmektedir.

%1, %2 ve %4 ARI içerikli örneklerde herhangi bir gaz girişine rastlanmamıştır. Daha önce yapılan gaz göçü deneylerinde sadece ARI katkısı kullanılmış ve çimentoya %2 ve üzerindeki değerlerde ARI katkısı eklendiği zaman herhangi bir gaz girişi olmadığı saptanmıştı. %1 ARI katkılı örnekte de gaz girişi gözlemlenmemesinin sebebi olarak, CFR3 ve HLD9 katkı malzemeleri ile çimentonun gaz girişine karşı daha sıkı bir yapı oluşturduğu düşünülmektedir.

Karot alınarak öteleme yapılan deneyler uzun dönem için (1, 7 ve 28 günlük) elde edilen veriler ile GMA test cihazından elde edilen veriler birbirini desteklemektedir. Her iki test cihazı ve farklı koşulları altında uygun oranlarda çimentoya eklenen ARI katkısının çimentonun geçirgenliğini önlediği somut bir şekilde belirlenmiştir.

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada çimento katkısı olarak kullanılan ve ARI olarak adlandırılan bir karbonatlı magnezyum karmaşığının G sınıf çimento üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, çimentonun diğer özelliklerini olumsuz bir şekilde etkilemeden çimento matriksinin akışkan geçirgenliğinin önlenmesidir.

Deneysel çalışma, TPAO Araştırma Merkezi Sondaj Teknolojileri Laboratuvarları ve İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği ve kısmen Maden Mühendisliği Laboratuvarlarında yürütülmüştür.

ARI olarak anılan çimento katkısı, ilk kez bu çalışmada çimento ile birlikte kullanılmıştır. İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliğinde yapılan sınırlı sayıdaki ön çalışmalar hariç literatürde daha önce ARI'nın çimento katkısı olarak kullanıldığına dair herhangi bir çalışma kaydı bulunmamaktadır.

Çimento ARI katkılı deneylerden elde edilen sonuçlar reoloji, su kaybı, kıvamlılık, dayanım ve geçirgenlik başlıkları altında incelenmiş olup, konu başlıkları sırasına göre aşağıda verilmektedir.

G Sınıf çimento ile yapılan reoloji deneylerinden elde edilen sonuçlar:

1. Çimento ağırlığınca %1-5 ARI katkısı kullanılarak deneyler yapılmış, artan ARI içeriğiyle çimento örneklerinin viskozitelerinde artışlar olduğu belirlenmiştir. %2'nin üzerindeki ARI içerikli örneklerde viskometrenin 600 dev/dk hızındaki kadran okuma sınırı olan 300 değeri aşılmıştır. ARI katkılı ve katkısız çimento sonuçları karşılaştırıldığında, ARI katkılı örneklerin kadran okumalarının katkısızlara göre iki kat kadar daha yüksek değerlere ulaştığı gözlenmiştir. Tek başına kullanılan ARI katkısının viskoziteyi arttırdığı belirlenmiştir.
2. Elde edilen kayma hızı ve görünür viskozite grafiklerinde doğrusal olmayan (non-Newtonian) bir ilişki olduğu gözlenmektedir. 200 dev/dk'nın üzerindeki hızlarda ilişki doğrusala daha yakın yalancı plastik ve incelen (shear thinning) olmaktadır.

3. Jel kuvvetleri artan ARI içeriği ve artan zaman ile yükselen bir davranış göstermektedir.
4. Artan ARI miktarıyla jel kuvvetlerinde de artış oluşmaktadır. Çimentonun donma sürecinde 10 saniyede 20 lbf/ft²'den daha yüksek bir jel kuvveti geliştirmesi (priz hızlandırıcı etki) formasyondan kuyuya akışkan girişini engellemesi açısından önemlidir. ARI ile bu kriter rahatlıkla sağlanmaktadır ve ARI'nın çimento katkısı olarak çok olumlu yönlerinden birisidir.
5. Su içeriğinin API standardında G Sınıfı çimento için belirtilen %44'ün üzerinde olması durumunda viskozite ve jel kuvvetlerinde de azalma olmaktadır. Bu nedenle zorunlu olmadıkça standartlarda önerilen su içeriği değerlerinin üzerine çıkılmamalıdır.
6. ARI kullanımı ile artan viskozite, bir viskozite kontrol edici katkı olan CFR3 kullanılarak kontrol edilmeye çalışılmıştır. CFR3 katkısı ARI ile birlikte kullanıldığında, reoloji kontrolünü sağladığı ve kadran okumasının en yüksek ARI içerikli örnekte de 300 değerinin altına düştüğü belirlenmiştir.
7. Su kaybı önleme amacıyla kullanılan HALAD9 katkısının çimentonun viskozitesini çok arttırdığı belirlenmiştir. Hem ARI hem de HALAD9'dan kaynaklanan viskozite artışlarını önlemek için CFR3 katkısının miktarı arttırılmış ve bu uygulama ile viskozitenin kontrol altına alınabileceği belirlenmiştir.
8. CFR3 kullanılan örneklerin jel kuvvetlerinde de büyük azalmalar olduğu, katkısız çimento örneklerinin gösterdiği jel kuvvetlerinin altına indiği gözlenmiştir.
9. Kayma hızı ve kadran okuması arasındaki ilişki CFR3 kullanıldığında doğrusallaşmakta (sabit görünür viskozite) ve Newtonian bir reolojik davranış oluşturmaktadır.
10. CFR3 ve HALAD9 katkısının değişik oranlarda katıldığı çimento harçları hazırlanmış ve oda sıcaklığı ve 150 °F sıcaklıktaki akışkanlık davranışı incelenmiştir. Oda sıcaklığında hazırlanan çimento şerbetlerinin reolojilerinin, değişik oranlarda CFR3 katkısı kullanılarak kontrol altına alınabildiği gözlemlenmiştir. Sıcaklık artışında çimentonun viskozitesi beklendiği gibi

düşmüştür. Bu durum yüksek sıcaklık olan koşullarda daha az CFR3 katkısı kullanılabilirliğini göstermiştir.

11. ARI ile birlikte artan sıcaklıkla beraber jel kuvvetlerinde azalmalar olduğu gözlemlenmiştir. CFR3 katkısı farklı oranlarda kullanılarak, çimento şerbetlerinin jel kuvvetlerinin uygun değerlerde olması sağlanmıştır.

G Sınıf çimento ile yapılan su kaybı deneylerinden elde edilen sonuçlar:

1. Çimentonun su bağlama özelliğinin olmaması nedeniyle çalışmada su kaybı kontrolü sağlamak için HALAD9 katkısı kullanılarak, çimentonun su kaybı değeri 1000 psi basınç farkında kontrol altına alınabilmektedir. Artan HALAD9 içeriğiyle, su kaybının daha da azaldığı belirlenmiştir.
2. ARI katkısının, su kaybı özelliği açısından, olumlu ya da olumsuz yönde önemli bir etkisinin olmadığı ve karışımında eylemsiz bir madde gibi davrandığı gözlenmiştir.
3. CFR3 viskozite azaltıcı katkısının ikincil işlev olarak su kaybını önlemede yardımcı olduğu gözlenmiştir.
4. Sıcaklık artışıyla beraber su kayıplarında beklendiği gibi bir artış oluşmaktadır. Sıcaklık artışı nedeniyle oluşan su kayıplarındaki artış HALAD9 miktarının arttırılmasıyla önlenabilmektedir.
5. %2 ve daha yüksek içerikli ARI katkısıyla hazırlanan ve donması için küplere yerleştirilen çimento örneklerinin donma sürecinde çimento harcı üzerinde serbest suyun çok az veya hiç oluşmadığı, ayrıca donmuş çimentonun hacminde de büzülme etkisiyle bir azalmanın oluşmadığı belirlenmiştir. Bu sonuç çimento matriksinden bir akışkan girişi oluşmaması için literatürde belirtilen hacim değişiminin önlenmesi kriterini sağladığı için çok önemlidir.

G Sınıf çimento ile yapılan kıvamlılık deneylerinden elde edilen sonuçlar:

1. Sadece ARI ile hazırlanmış olan çimento şerbetinin, artan ARI miktarı ile kalınlaşma zamanında azalmalar olduğu belirlenmiştir. ARI katkısı hızlandırıcı bir etki yaratmaktadır.
2. ARI içermeyen ancak, artan oranlarda hem CFR3 hem de HALAD9'un kullanıldığı çimento örneklerinde kalınlaşma zamanının önemli bir şekilde

arttığı gözlenmiştir. Diğer taraftan kalınlaşma zamanının artmasında, HALAD9'un etkisi CFR3'ün etkisinden daha yüksektir. Bu iki katkı çimentoda geciktirici bir etki yaratmaktadır.

3. Her üç katkının da birlikte kullanıldığı örneklerde kalınlaşma zamanında artışların olduğu gözlenmiştir. Ancak burada artan kalınlaşma zamanı için temel belirleyici rolün HALAD9 katkısından kaynaklandığı görülmektedir.

G Sınıf çimento ile yapılan dayanım deneylerinden elde edilen sonuçlar:

1. Ultrasonic Cement Analyzer (UCA) ile yapılmış olan dayanım deneylerinde, ARI katkısının çimentonun 24 saat sonundaki sıkıştırma dayanımında kaydadeğer bir değişime neden olmamıştır. Diğer bir deyişle, UCA deneylerinde ARI katkısı çimentonun dayanım özelliği açısından eylemsizdir ve bir etki göstermemektedir.

2. UCA deneylerinde ARI içeren örneklerde artan ARI miktarıyla 500 psi dayanıma ulaşma sürelerinde bir miktar azalım olduğu gözlemlenmiştir. ARI katkılı örneklerin 8 ve 12 saatlik dayanımlarında az da olsa bir artış olduğu belirlenmiştir.

3. UCA deneylerinde sadece CFR3 ve HALAD9 katkılarının eklendiği örneklerde her iki katkının da dayanıma etkisinin çok düşük veya önemsiz olduğu gözlemlenmiştir.

4. UCA deneylerinde sınanan bütün örneklerin 8 saat sonunda geliştirdikleri sıkıştırma dayanım değerleri, sondaja devam etme kriteri olarak alınan 500 psi değerinin 2-3 katı kadar daha yüksek olmuştur.

5. TEP deneylerinde, ARI maddesinin çimentonun 1, 7 ve 28 günlük sıkıştırma dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. ARI'nın basınç dayanımı üzerine olan olumlu etkisi kısa dönemde (1 günlük) daha belirgindir ve önemlidir.

6. TEP deneylerinde, sadece %0,7 CFR3 ve %0,7 HALAD9 içeren 1 günlük örneklerin herhangi bir şekilde basınç dayanımı gösteremediği ve sünekleşme (ductile) özelliği göstererek yük altında ezildiği belirlenmiştir.

7. Çalışmadaki sünekleşme bulgusu yaygın olarak kullanılan çimento katkı maddelerinin önerilen oran aralığında kullanılmasına rağmen çimentonun en

önemli fonksiyonlarından birisi olan dayanım görevini yerine getirememesini ortaya çıkarması nedeniyle çok önemlidir. Bu katkıların çimentonun dayanımı üzerine olan olumsuz etkilerine yönelik literatürde herhangi bir bilgiye rastlanılmamıştır.

8. TEP deneylerinde, artan ARI içeriğiyle diğer katkı maddelerinin basınç dayanımı üzerine olan olumsuz etkilerinin giderilebildiği gözlenmektedir. %2 ve daha yüksek içerikte ARI kullanılması çimentoda diğer katkıların neden olduğu süneklik özelliğini ortadan kaldırmaktadır. Bu durum ARI katkısının çimentonun dayanım görevini yerine getirmesini sağladığı için çok önemli bir sonuçtur.

9. TEP deneylerinde, yalnız CFR3 ve yalnız HALAD9'un kullanıldığı çimento örneklerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri hem CFR3 hem de HALAD9'un birlikte kullanıldığı örneklerden elde edilen basınç dayanımlarından daha yüksektir.

10. TEP deneylerinde, %0,4 CFR3 ve %0,4 HALAD9 ile birlikte kullanılan ARI'nın 1, 7 ve 28 günlük ölçümlerde basınç dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. ARI'nın basınç dayanımı üzerine olumlu etkisinin uzun dönemde (7 ve 28 gün) daha belirgin olduğu saptanmıştır.

G Sınıf çimento ile yapılan geçirgenlik deneylerinden elde edilen sonuçlar:

1. Gaz geçirgenliği testlerinde katkısız çimentonun gaz geçirgenliğini önleyemediği ve zamanla daha da yükseldiği belirlenmiştir. Ancak geçirgenliğin %3 ARI içerikli örneklerde kısmen, %5 ARI içerikli örneklerde ise tamamen önlendiği (1, 7 ve 28 gün periyotları için) görülmektedir. Bununla birlikte, %3 ARI içerikli örneklerden elde edilen geçirgenlik değerleri katkısız örneklere göre daha düşüktür ve zamanla değişmemektedir.

2. Gaz geçirgenliği testlerinde, CFR3 ve HALAD9'un birlikte bulunduğu 7 ve 28 günlük örneklerde kritik değerden daha yüksek ve zamanla artan geçirgenlikler elde edilmiştir.

3. Gaz geçirgenliği testlerinde, ARI, CFR3 ve HALAD9'un birlikte bulunduğu bütün örneklerin kısa dönemde (1 günlük) geçirimsiz olduğu gözlenmektedir. Diğer taraftan, uzun dönemde (7 ve 28 günlük) zamanla artan bir geçirgenliğin olduğu ancak bu geçirgenliklerin artan ARI içeriğiyle

büyük bir azalım gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, %1 ARI içeren örneklerden elde edilen geçirgenlikler kritik 0,1 md değerinden daha düşüktür. %3 ARI katkılı örneklerin tamamında bütün zaman periyotları için geçirgenlik oluşmamıştır.

4. Gaz geçirgenliği testlerinde, ARI katkısının geçirimsiz bir çimento matriksi oluşturmada etkin olduğu belirlenmiştir. ARI katkılı örneklerin tümünde kritik 0,1 md değerinin altında geçirgenlik değerleri elde edilmesi, ARI'nın uzun dönemde de çimentoda oluşturduğu geçirimsiz yapıyı koruyabildiğinin bir göstergesidir ve çok kritik bir öneme sahiptir.

5. GMA donanımı ile gerçekleştirilen geçirgenlik deneylerinde, katkısız G Sınıfı çimentonun tam geçirgen bir yapı oluşturduğu belirlenmiştir.

6. GMA donanımı ile gerçekleştirilen geçirgenlik deneylerinde, %2 ve %3 ARI içeren örneklerin çimentonun geçirgenliğini önlediği gözlenmiştir. ARI katkısı donma gerçekleşinceye kadar çimentonun gözenek basıncının formasyon basıncından daha yüksek olmasını sağlayarak geçirgenliği önleyebildiği görülmektedir.

7. GMA donanımı ile gerçekleştirilen geçirgenlik deneylerinde, her üç katkının da olduğu kompozisyonlarda, %1, %2 ve %4 ARI içerikli örneklerde herhangi bir gaz girişi gözlenmemiştir. %3 ARI katkılı çimento örneklerinin az da olsa gaz geçirgenliği gösterdiği, diğer hiçbir deneyde çimentoya gaz girişi gözlenmediği belirlenmiştir. Yine de kanallaşmayı, dolayısıyla matriks boyunca gaz geçişini veya geçirgenliği önlemiştir.

8. GMA donanımı ile yapılmış olan geçirgenlik deneylerinde, her üç katkının da olduğu kompozisyonlarda, %3 ARI içerikli örneklerin HALAD9 oranlarının diğer örneklere oranla daha düşük olduğu ve bu sebeple kaynaklanan yüksek su kaybı sebebiyle düşük de olsa gaz girişinin olduğu söylenebilir.

9. GMA donanımı ile yapılmış olan geçirgenlik deneylerinde, her üç katkının da bulunduğu karışımlarda, %1 ARI içerikli örneklerde dahi gaz geçirgenliğinin kısmen engellenebildiği görülmüştür.

10. Karot alınarak öteleme yapılan deneyler uzun dönem için (1, 7 ve 28 günlük) elde edilen veriler ile GMA test cihazından elde edilen veriler

birbirini desteklemektedir. Her iki test cihazında gerçekleştirilen deneyler sonucunda ARI katkısı çimentonun geçirgenliğini tamamen önlemiştir.

Yukarıda ayrı başlıklar altında verilen tüm sonuçları birlikte irdelersek;

1. ARI katkısı viskoziteyi arttırmaktadır. Ancak, CFR3 kullanıldığında viskozite kontrolü sağlanabilmektedir.
2. ARI katkısı jel kuvvetlerini de arttırmaktadır. Ancak bu artış akışkan akışını engelleyeceği için olumlu bir etkidir.
3. ARI katkılı çimento örneklerinde serbest su miktarı ve hacim değişimi yoktur veya önemsizdir. Bu durum geçirimsiz bir çimento matriksi oluşturduğu için çok önemli bir etkidir.
4. ARI katkısının su kaybına bir etkisi yoktur. Eylemsiz bir madde gibi etkisizdir.
5. ARI katkısının çimento kıvamlılığına etkisi (yüksek ARI içeriklerinde) donma sürecini azaltarak hızlandırıcı bir katkı görevi yapmaktadır. Bunun olumlu tarafı çimentonun donmasını bekleme süresini (wait on cement – WOC) düşürerek özellikle açık deniz sondaj maliyetlerini azaltacağı için önemlidir.
6. ARI katkısı çimentonun dayanımını (TEP uzun dönemde) arttırmaktadır. CFR3 ve HALAD9'un çimento dayanımı üzerine olan olumsuz etkilerini azaltmakta veya ortadan kaldırarak çok önemli bir görevi yerine getirmektedir.
7. ARI katkısı çimentonun geçirgenliğini önlemektedir.
8. Dayanım kontrolü için çimentoya en az %3 ARI katılmalıdır. Artan CFR3 ve HALAD9 miktarlarıyla ARI konsantrasyonu arttırılmalıdır.
9. Geçirgenlik kontrolü için çimentoya en az %2 oranında ARI katılmalıdır. Artan CFR3 ve HALAD9 miktarlarıyla ARI konsantrasyonu arttırılmalıdır.

Çimento ağırlığınca %2 ve üzeri oranlarda çimentoya eklenen ARI maddesinin gaz geçirgenliğini hem donma sürecinde hem de uzun dönemde tamamen engellemesi çok önemlidir. ARI'nın çimentonun diğer özelliklerini de koruyarak geçirgenliği önlemesi bu çalışmanın hedefine ulaştığını göstermektedir. Deneyler sonucunda,

ARI katkılı çimento kompozisyonu petrol, gaz ve jeotermal saha uygulamalarına hazır haldedir.

TPAO tarafından desteklenen bu çalışmadaki bulgular neticesinde, ARI katkılı çimento kompozisyonu için tüm dünyada geçerli olacak patent alma çalışmaları TPAO tarafından başlatılmıştır. Bununla beraber, zengin ARI katkısı rezervlerine sahip ülkelerden birisi olan Türkiye için bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre ekonomiye önemli bir katma değer yaratılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Erdoğan, S.T. ve Erdoğan, T.Y.** (2007). Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbinyıllık Tarihi, ODTÜ Yayıncılık, Ankara.
- [2] **Url -1** < <http://www.akcansa.com.tr> >, alındığı tarih: 12.08.2011.
- [3] **Url -2** < <http://www.lighthouse-news.com> >, alındığı tarih: 04.01.2012.
- [4] **Url -3** < <http://www.thewestmorlandgazette.co.uk> >, alındığı tarih: 04.01.2012.
- [5] **Url -4** < <http://www.lafarge-eregli.com.tr> >, alındığı tarih: 17.08.2011.
- [6] **Url -5** < <http://www.tcma.org.tr> >, alındığı tarih: 18.08.2011.
- [7] **Yalçın, H. ve Gürlü, M.** (2006). Çimento ve Beton, Palme Yayınları, Ankara.
- [8] **Hewlett, P.C.** (2004). Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Elsevier Ltd., Oxford, MA, ABD.
- [9] **Url -6** <<http://ekutup.dpt.gov.tr>>, alındığı tarih: 30.09.2011.
- [10] **TS EN 197-1 CEM I** (2004). Portland Çimentosu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [11] **TS EN 197-1 CEM II/BS – CEM III/A-B** (2004). Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [12] **TS EN 197-1 CEM II/B-P** (2004). Portland Pozzolanlı Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [13] **TS-21** (1983). Beyaz Portland Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [14] **TS-22** (1992). Harç Çimentosu, , Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [15] **TS EN 197-1 CEM II/A-V – B-V** (2004). Portland Uçucu Küllü Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [16] **TS EN 197-1 CEM III/B-C** (2004). Yüksek Fırın Cürufu Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [17] **TS EN 197-1 CEM II/A-P** (2004). Portland Pozzolanlı Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [18] **API Spec 10A (ISO 10426-1)** (2005). Specification for Cements and Materials for Well Cementing Petroleum and natural gas industries—Cements and materials for well cementing—Part 1: Specifications, American Petroleum Institute, ABD.
- [19] **API RP 10B-2 (ISO 10426-2)** (2007). Recommended Practice for Testing Well Cements Petroleum and natural gas industries—Cements and materials for well cementing—Part 2: Testing of well cement, American Petroleum Institute, ABD.

- [20] **API RP 10B-5 (ISO 10426-5)** (2005). Recommended Practice on Determination of Shrinkage and Expansion of Well Cement Formulations at Atmospheric Pressure, , American Petroleum Institute, ABD.
- [21] **Bourgoyne, A.T., Chevenert, M.E., Millheim, K.K. ve Young, F.S.** (1991). Applied Drilling Engineering, Richardson, Texas, ABD.
- [22] **Rahman, S.S. ve Chilingarian, G.V.** (1995). Casing Design Theory and Practice, Amsterdam, Hollanda.
- [23] **Smith, D.K.** (1990). Cementing, SPE Monograph, **4**, Richardson, Texas, ABD.
- [24] **Schlumberger, D.** (1984). Cementing Technology, Nova Communications Ltd., London, İngiltere.
- [25] **Url-7** <<http://halliburton.com>>, alındığı tarih: 21.12.2011.
- [26] **Nelson, E. B. ve Guillot, D.** (2006). Well Cementing, Schlumberger Educational Services, Houston, Texas, ABD.
- [27] **Tinsley, J.M., Miller, E.C., Sabins, F.L. ve Sutton, D.L.** (1979). Study of Factors Causing Annular Gas Flow Following Primary Cementing. *Journal of Petroleum Technology, SPE 8257*.
- [28] **Soter, K.** (2003). *Removal of Sustained Casing Pressure Utilizing A Workover Rig* (yüksek lisans tezi). Adres: <http://edt.lsu.edu/>
- [29] **Craft, B.C., Holden, W.R. ve Graves, E.D. Jr.** (1962). Well Design: Drilling and Production, Prentice Hall Inc., New Jersey, ABD.
- [30] **Abbaszadeh, M.** (2008). *Detecting and Modeling Cement Failure in High Pressure/High Temperature Wells, Using Finite Element Method* (yüksek lisans tezi). Adres: <http://edt.tamu.edu/>
- [31] **Ravi, K.** (2007). A Comparative Study of Mechanical Properties of Density-Reduced Cement Compositions. *Journal of Petroleum Technology, SPE Drilling & Completion, 22*, 119-126.
- [32] **Al-Suwaidi, A.S.** (2008). A New Cement Sealant System for Long-Term Zonal Isolation for Khuff Gas Wells in Abu Dhabi, *The 11th International Petroleum Exhibition and Conference*, Abu Dhabi, U.A.E., 3-6 Kasım.
- [33] **Goode, J.M.** (1962). Gas and Water Permeability Data for Some Common Oilwell Cement. *Journal of Petroleum Technology, 14*, 851-854.
- [34] **Nelson, E.B. ve Eilers, L.H.** (1985). Cementing Steamflood and Fireflood Wells – Slurry Design. *Journal of Canadian Petroleum Technology, 24*, 58-63.
- [35] **Garcia, J.A. ve Clark, C.R.** (1976). An investigation of Annular Gas Flow Following Cementing Operations. *Journal of Petroleum Technology, SPE 57016*.

- [36] **Stewart, R.B. ve Shouten, F.C.** (1986). Gas Invasion and Migration in Cemented Annuli: Causes and Cures. *Journal of Petroleum Technology, SPE* 14779.
- [37] **Bonett, A. ve Pafitis, D.** (1996). Getting to the Root of Gas Migration. *Oilfield Review*, 8, 36-46.
- [38] **Helgesen, J.T.** (2006). Zonal Isolation for the Life of the Well. *SPE Bergen One Day Seminar*, Bergen, Norveç, 31 Mayıs.
- [39] **Xu, R.** (2002). *Analysis of Diagnostic Testing of Sustained Casing Pressure in Wells* (doktora tezi). Adres: <http://edt.lsu.edu/>
- [40] **Bourgoyne, A.T., Scott, S.L. ve Manowski, W.** (2000). *A Review of Sustained Casing Pressure (SCP) Occurring on the Outer Continental Shelf (OCS) Final Report*, Mineral Management Services, Baton Rouge, ABD.
- [41] **Url-8** <<http://worldoil.com>>, alındığı tarih: 29.01.2012.
- [42] IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2nd Well Bore Integrity Network Meeting Report, 2006/12, Princeton University, New Jersey, ABD.
- [43] **Berman, A.E.** (2010). What caused the Deepwater Horizon disaster. *The Oil Drum*, 5, 31-42.
- [44] **Url -9** < <http://www.trican.ca>, alındığı tarih: 22.11.2011.
- [45] **Url -10** < <http://www.glossary.oilfield.slb.com>, alındığı tarih: 22.11.2011.
- [46] **Rao, P.P., Sutton, D.L., Childs, J.D. ve Cunningham, W.C.** (1982). An Ultrasonic Device for Nondestructive Testing of Oil Well Cements at Elevated Temperatures and Pressures. *Journal of Petroleum Technology*, 6, 2611-16.
- [47] **Brown, E.T.** (1981). Rock Characterization, Testing and Monitoring—ISRM Suggested Methods, Pergamon, 171–183.

EKLER

Ek A: Gaz enjeksiyonu deneylerinde gaz akış debisini bulmak için kullanılan grafik.

Ek B: ARI katkılı çimentonun reoloji davranış değerleri.

Ek C: ARI katkılı çimentonun reoloji davranışı.

Ek D: ARI ve CFR3 katkılı çimentonun reoloji değerleri ve davranışı.

Ek E: ARI, CFR3 ve HALAD9 katkılı çimentonun reoloji değerleri ve davranışı.

Ek F: Katkılı çimentonun su kaybı değerleri ve davranışı.

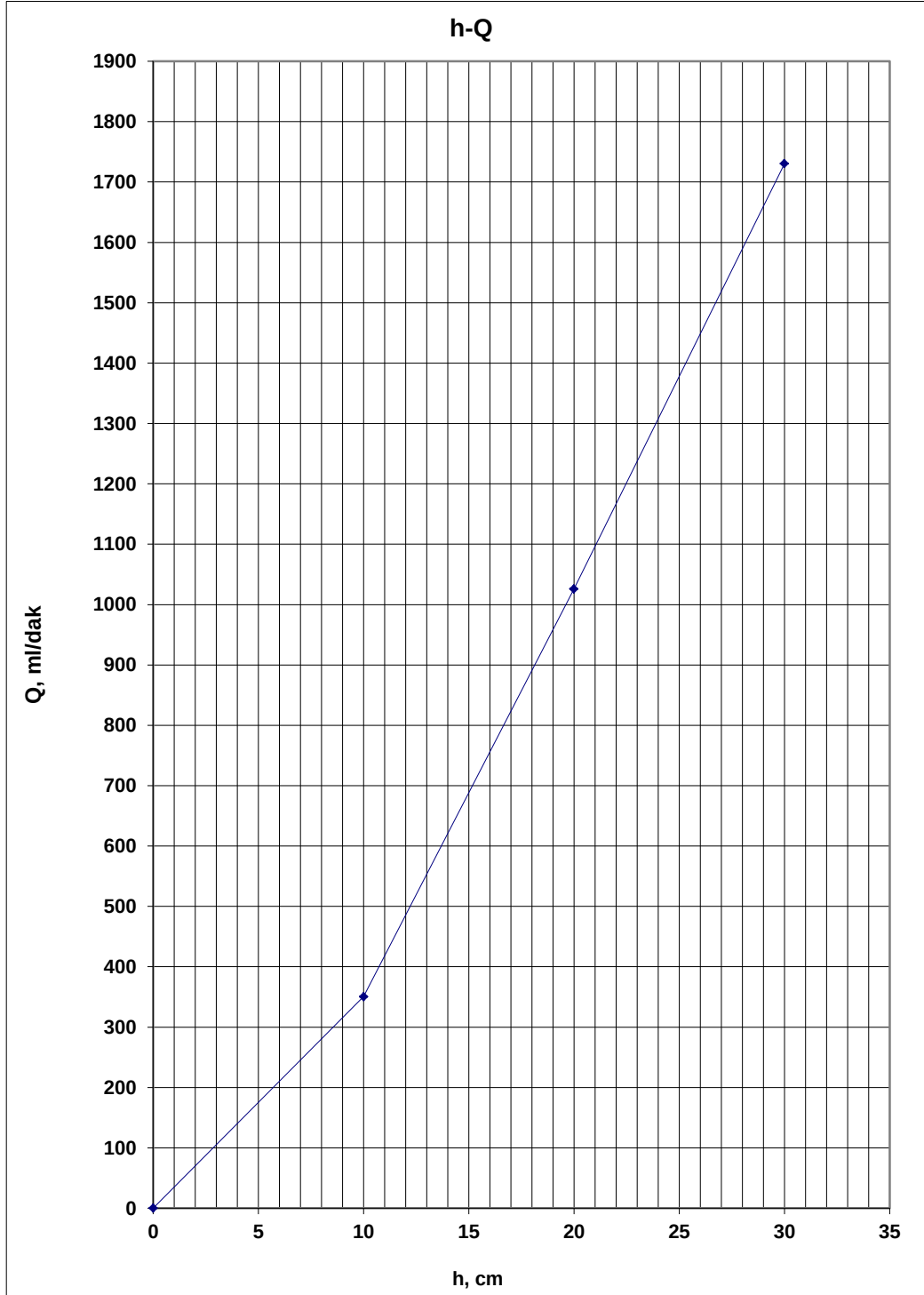
Ek G: Katkılı çimentonun kıvamlilik davranışı.

Ek H: Katkılı çimentonun UCA basınç dayanımı davranışı.

Ek I: Katkılı çimento geçirgenlik deney sonuçları.

Ek J: Katkılı çimentonun GMA geçirgenlik davranışı.

EK A



Şekil A.1: Gaz geçirgenliği ölçümlerinde çıkış debisi hesaplamak için kullanılan grafik.

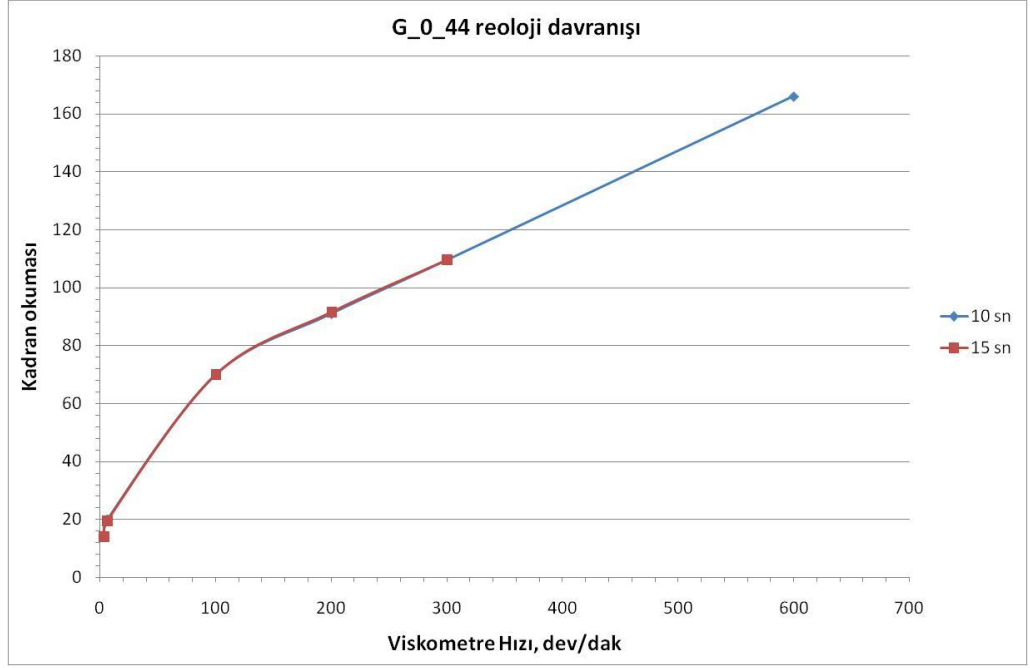
Çizelge B.1 : ARI katkılı çimento reoloji okuma değerleri.

Örnek Kodu	Okuma Değerleri (10sn)						Okuma Değerleri (15sn)					Jel Kuvveti (lb/ft ²)	
	600	300	200	100	6	3	300	200	100	6	3	10 sn	10 dk
G_1_C600_44	239	185	153	120	26	15	183	150	119	26	14	23	46
G_1_C600_44_t1	224	177	145	118	27	16	174	143	116,5	27	15	29,5	51
G_1_C600_44_t2	232	179	146	115	27	15	178	144	115	25	14	28	63
G_1_C600_45	211	161	132	105	27	17	159	130	104	27	17	28	34
G_1_C600_45_t1	197	155,5	130	104	27	17	155	129	108,5	27	15	22	41
G_1_C600_46	188,5	148	121	97	28	16	147,5	121	97	26,5	15	19,5	34
G_1_C600_46_t1	181,5	144	120,5	96	25,5	15	143,5	119,5	96	25	14,5	22	48
G_1_C600_46_t2	184	149	123	98	26	17	148	121	97	25	16,5	23	52
G_1_C600_48	153	120,5	99	79,5	24	13	119	98	79	22,5	11,5	18	33
G_1_C600_48_t1	131	107	85	68	22	12	107	85	68	22	12	18	22
G_1,5_C600_44	278	212	176	143	32	18	-	-	-	-	-	31	55
G_1,5_C600_44_t1	292	223	185	151	28	17	220	183	149	26	16	35	52
G_1,5_C600_44_t2	210	168	137	111	29	15	165	135,5	109	28	14,5	24,5	31
G_1,5_C600_44_t3	252	194	159	131	32	19	191	156	129	29	17	34	78
G_1,5_C600_44_t4	252	192	152	124	29	18	188	150	123	27	17	30	57
G_2_C600_44	290	211	177	147	33	20	209	175	146	32	18,5	36	47
G_2_C600_44_t1	300+	230	183	146	31	19	224	179	144	30	17	34	74
G_2_C600_44_t2	300+	241	190	153	36	20	236	186	151	36	18	33	74
G_2_C600_45	300+	234	185	146	32	19	229	180	146	31	18	33	76
G_2_C600_45_t1	267	205	169	137	32	20	201	165	136	32	18	34	53
G_2_C600_45_t3	262	200	162	133	33	21	197	159	132	32	19	38	64
G_2_C600_46	233	179	153	127	28	17	177	151,5	126	28	16	33	74

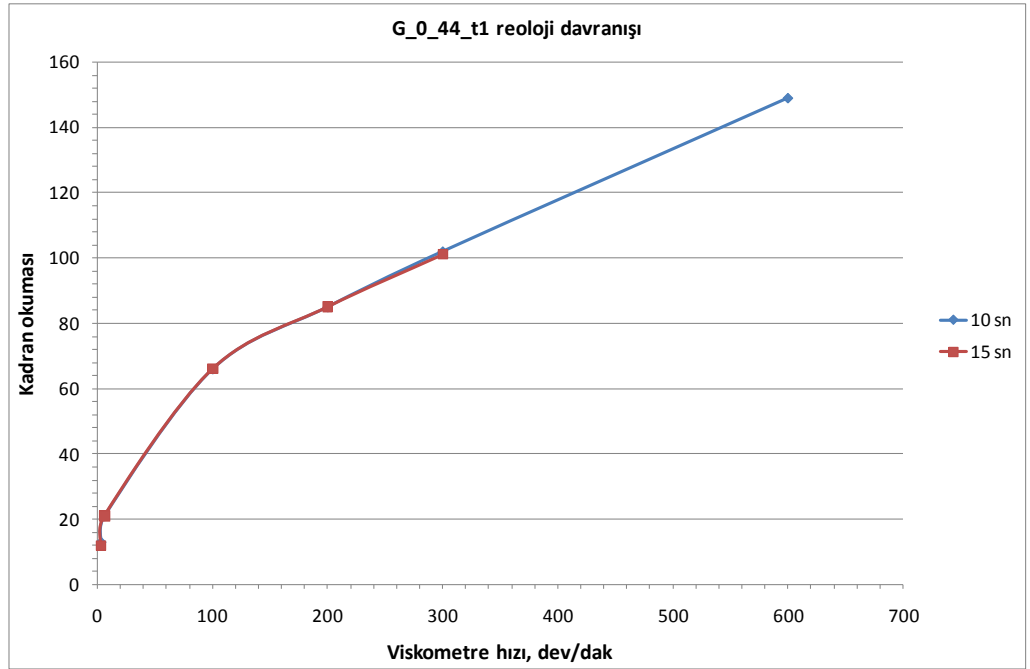
Çizelge B.1 (devam) : ARI katkılı çimento reoloji okuma değerleri.

Örnek Kodu	Okuma Değerleri (10sn)						Okuma Değerleri (15sn)					Jel Kuvveti (lb/ft ²)	
	600	300	200	100	6	3	300	200	100	6	3	10 sn	10 dk
G_2_C600_46_t1	245,5	196,5	169	141	29	16,5	196	168	140,5	27	15,5	32	64
G_2_C600_46_t2	223	177	158	135	26	20	176	157,5	135	26	19,5	28	54
G_2_C600_48	183,5	150	129	105	25	13	150	126	105	24	12,5	18	43
G_2_C600_48_t1	189	152	134	114	26,5	11	152	133,5	113,5	26	9,5	26,5	38
G_2,5_C600_44	300+	274,5	241	208	35	21	274	240	201	32	20,5	39,5	103
G_2,5_C600_44_t1	300+	287,5	246	200,5	33,5	18	285	243	196,5	29,5	16,5	39	81
G_2,5_C600_44_t2	300+	292	241	192	34	24	289	234	189	30	19	26	81
G_3_C600_45	300+	277	248	214	33	21	275	247	213	31	20	39	138
G_3_C600_45_t1	300+	258	220	188	38	26	257	219	187	37	23	37	85
G_3_C600_46	300+	247	214	177	36	22	244	210	176	34	22	39	74
G_3_C600_46_t1	300+	265	231	192	32	19,5	264,5	227	188	29	18	33,5	72
G_3_C600_48	239	190	167	141,5	30	20	189	165,5	141	26	18	-	-
G_3,5_C600_48	292	248	221	186	27	14	246,5	216	185	24	13	28,5	64
G_4_C600_46	300+	300+	288	254	37	21	300+	286,5	252	35	21	48	118
G_5_C600_56	212	185	168	149	36	25	184	167	149	35	23	30	78
G_5_C600_59	159,5	135	124	111	45,5	23	135	124	111	45,5	22	32	61

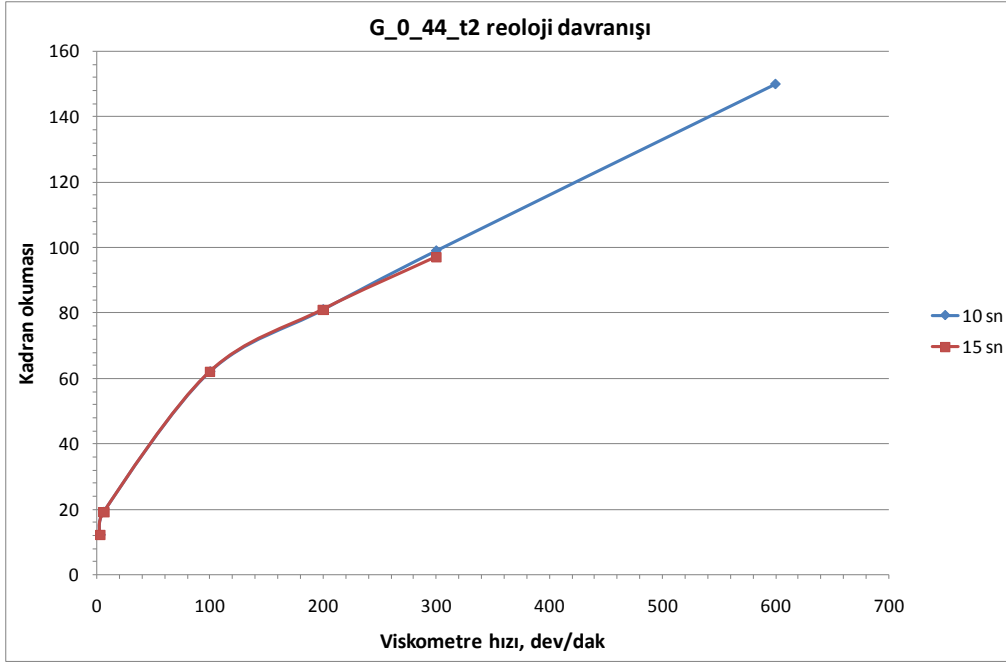
Ek C



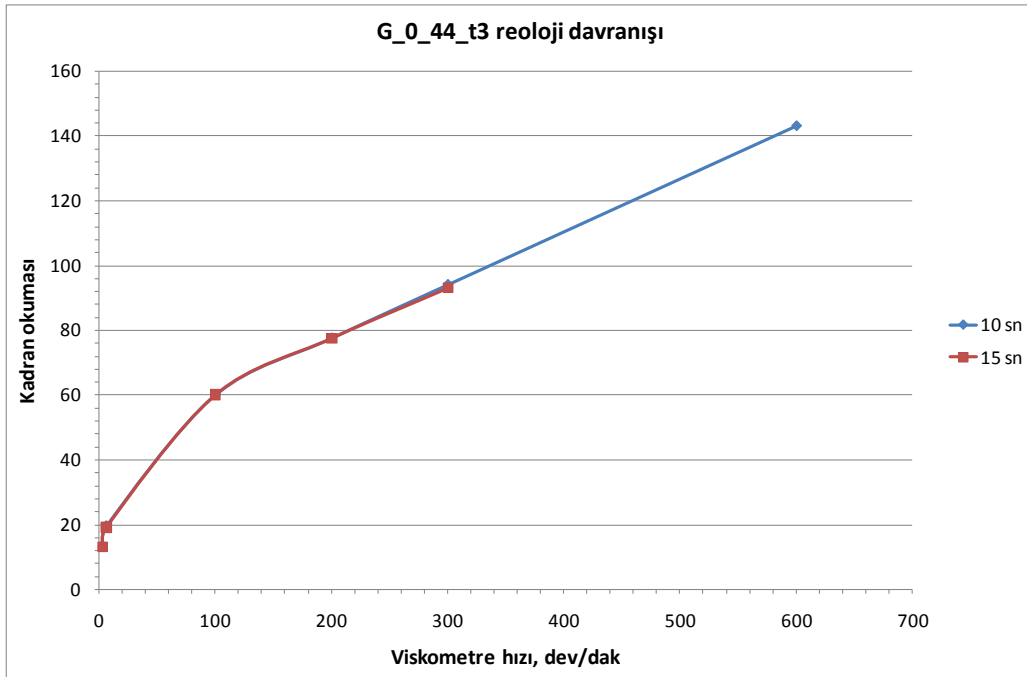
Şekil C.1: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su).



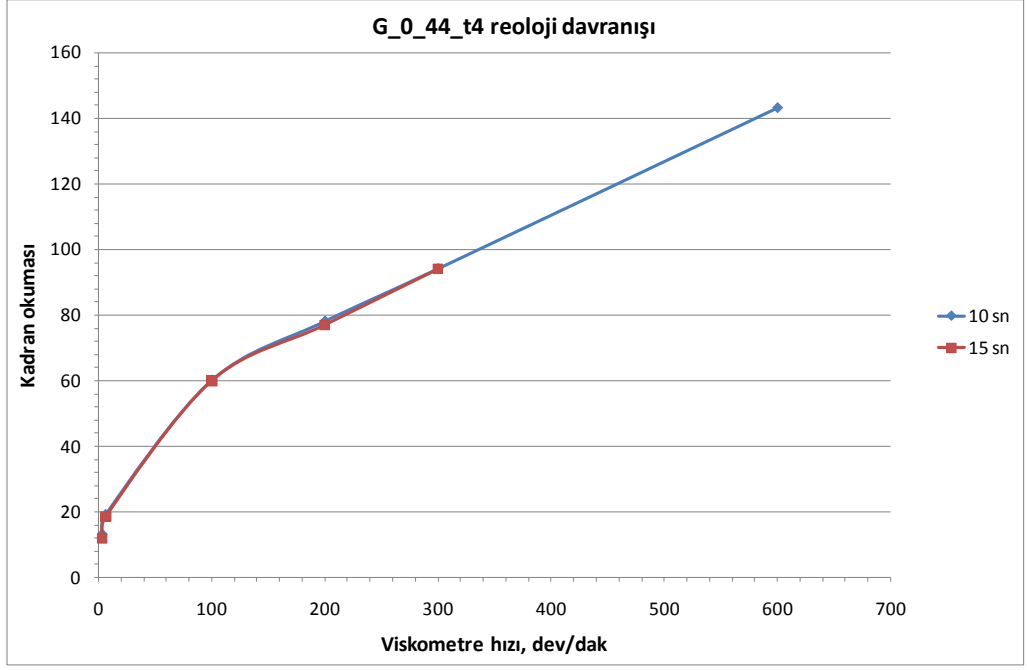
Şekil C.2: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-1.



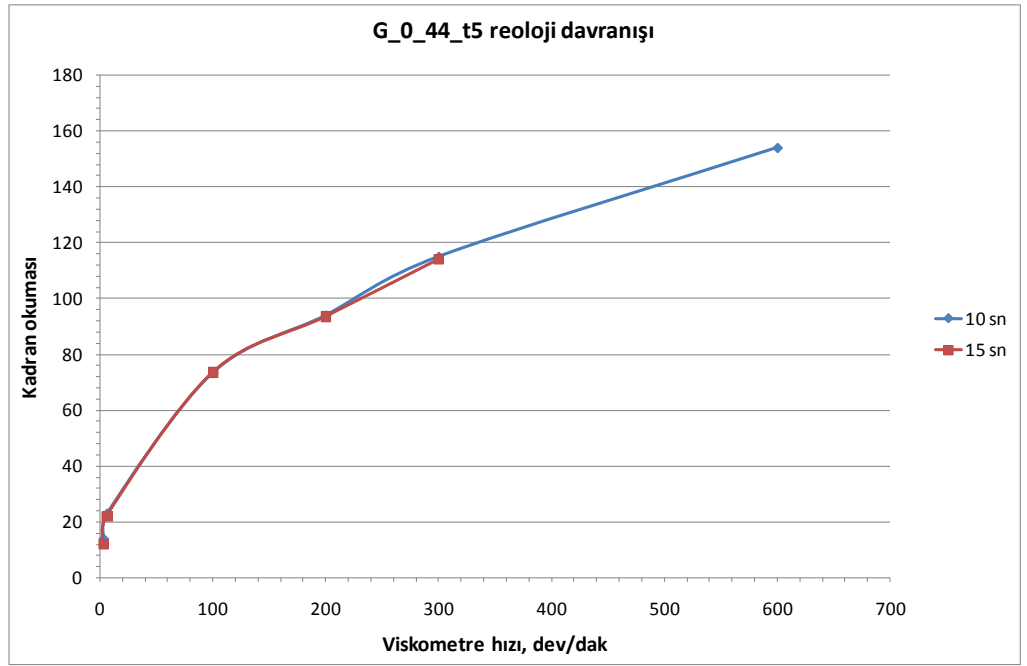
Şekil C.3: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-2.



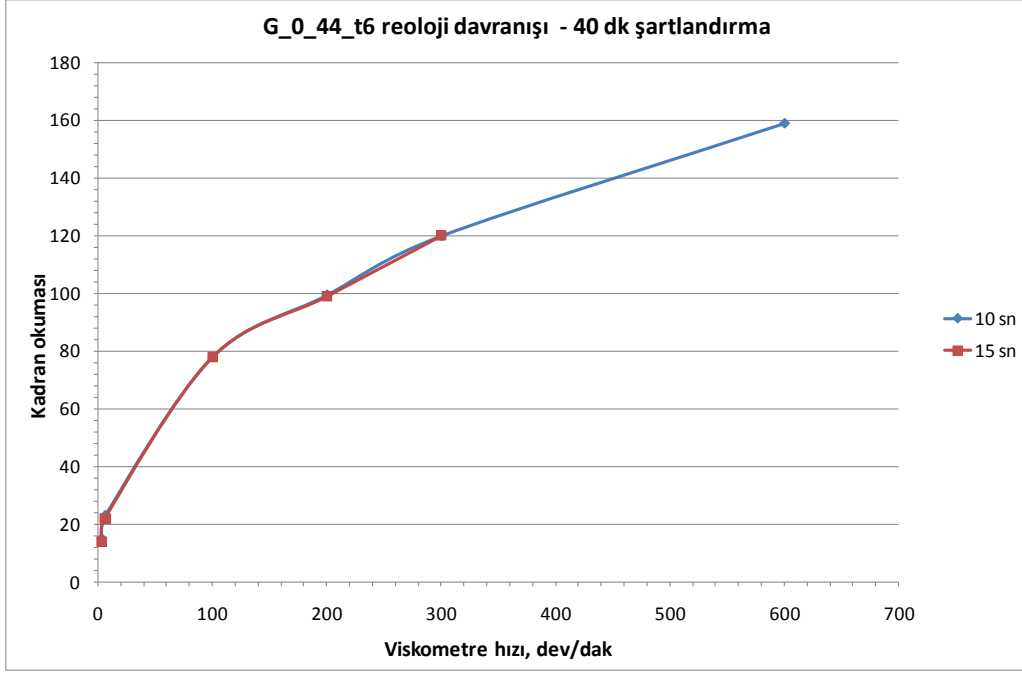
Şekil C.4: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-3.



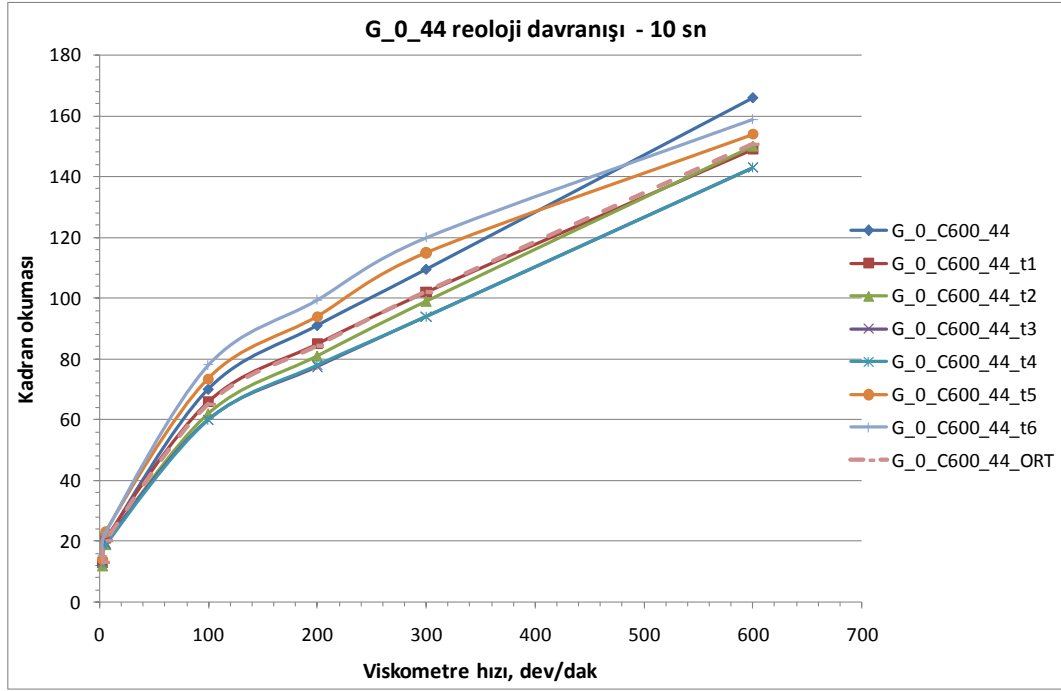
Şekil C.5: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-4.



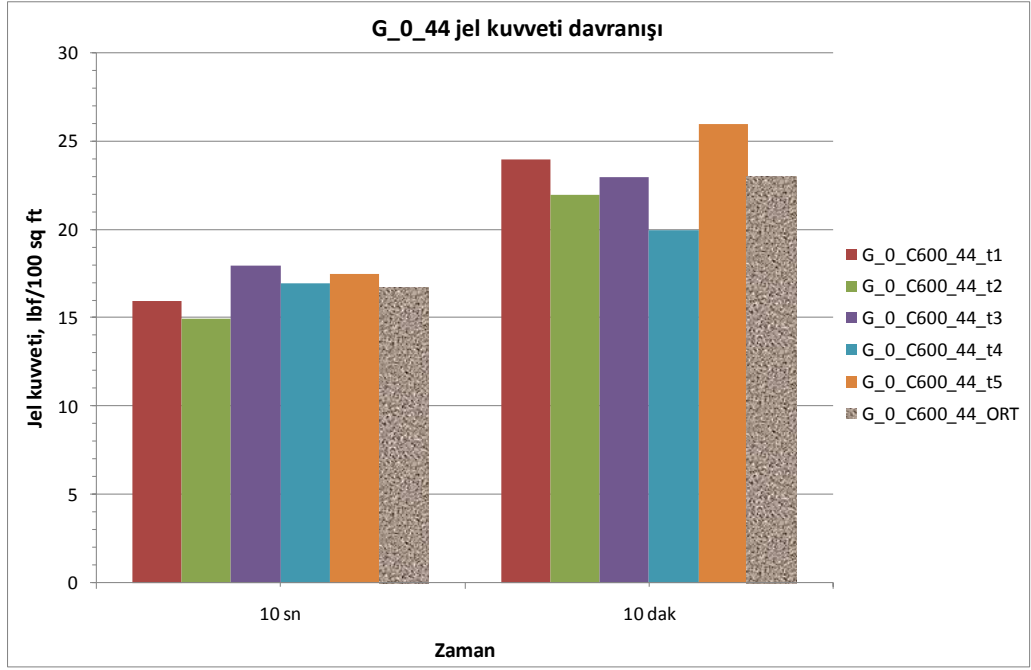
Şekil C.6: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-5.



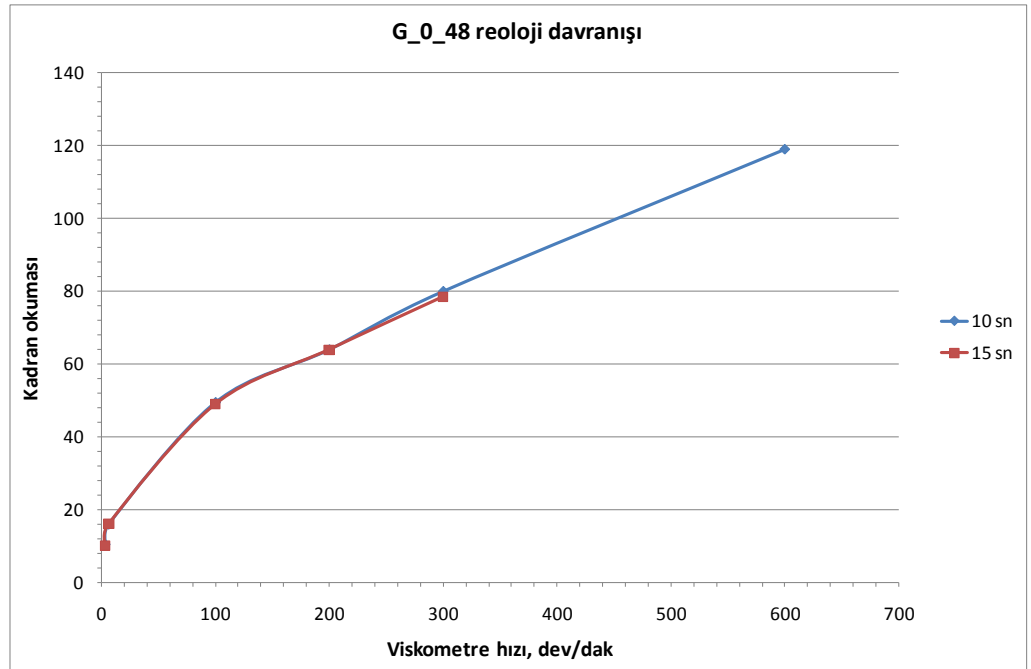
Şekil C.7: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – tekrar-6.



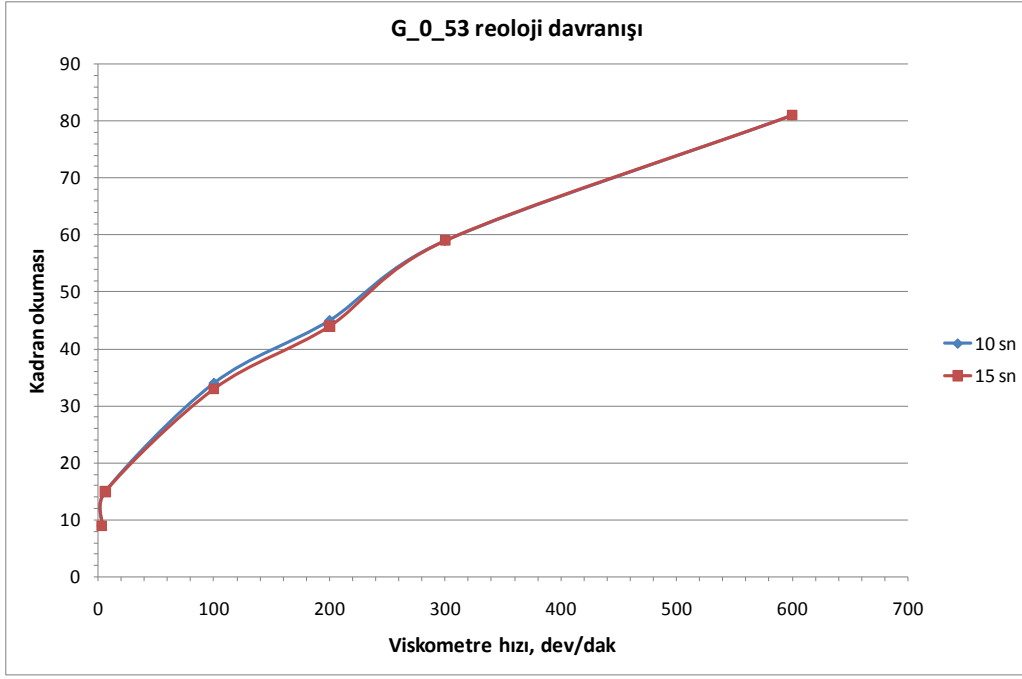
Şekil C.8: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %44 su) – karşılaştırma.



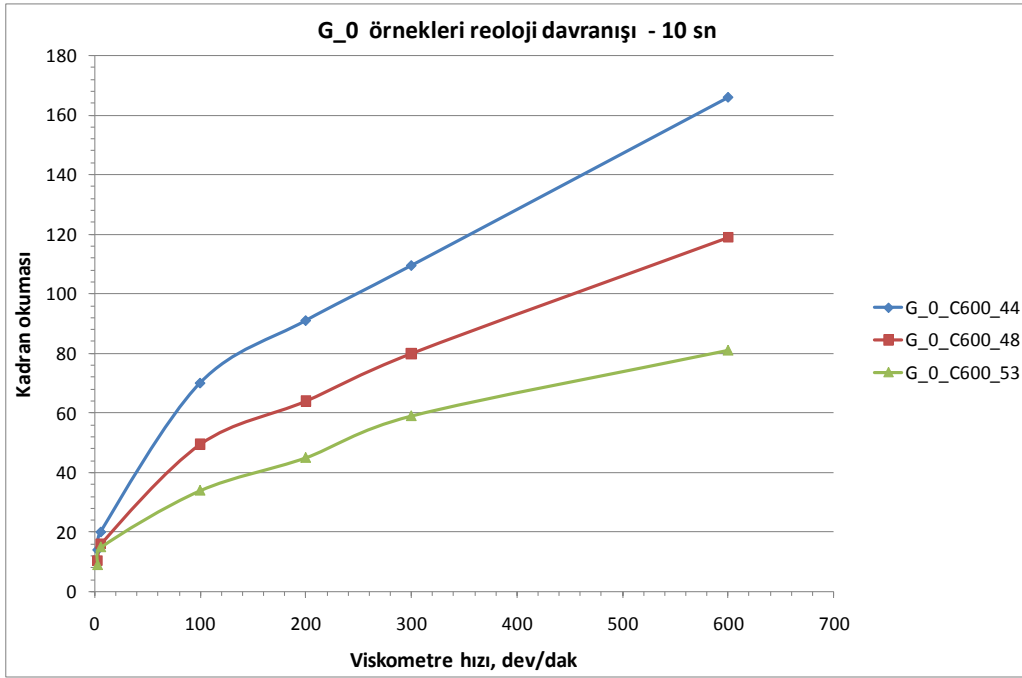
Şekil C.9: G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%0 ARI – %44 su).



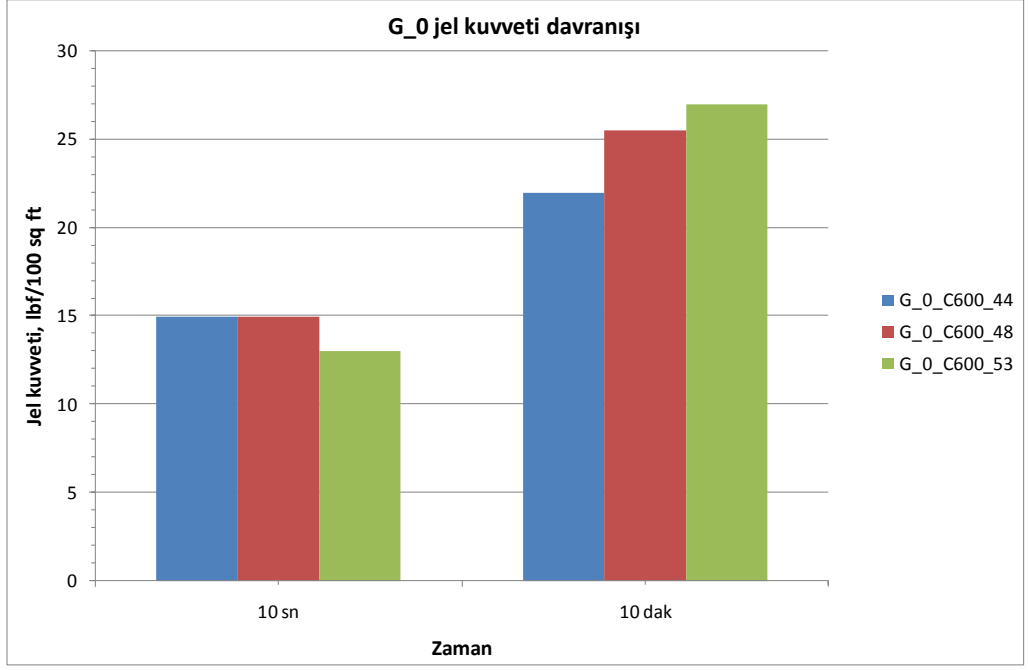
Şekil C.10: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %48 su).



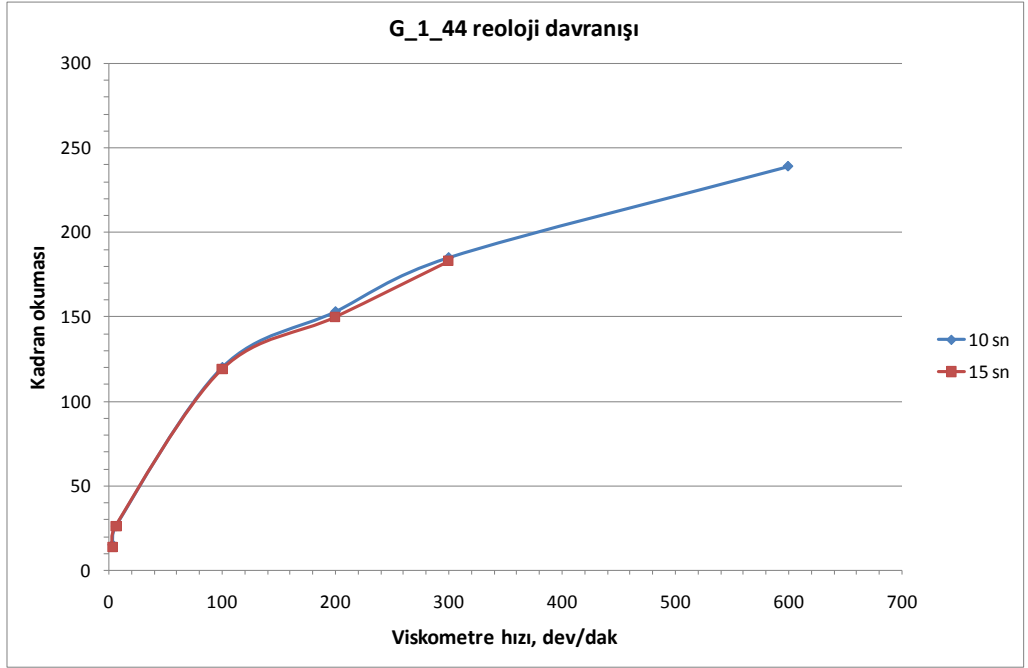
Şekil C.11: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI – %53 su).



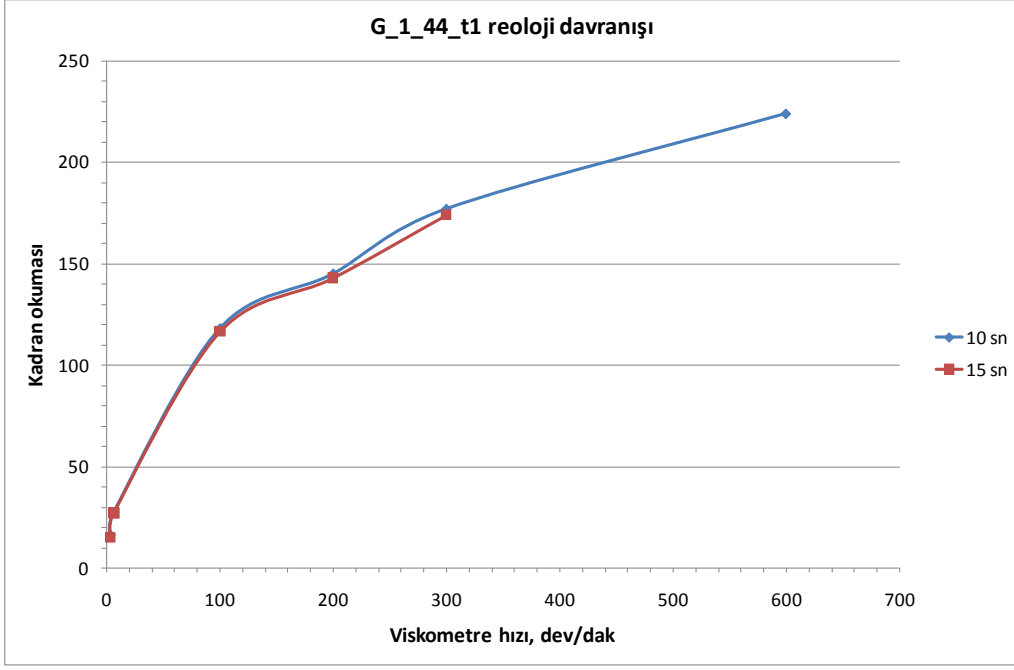
Şekil C.12: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%0 ARI) – karşılaştırma.



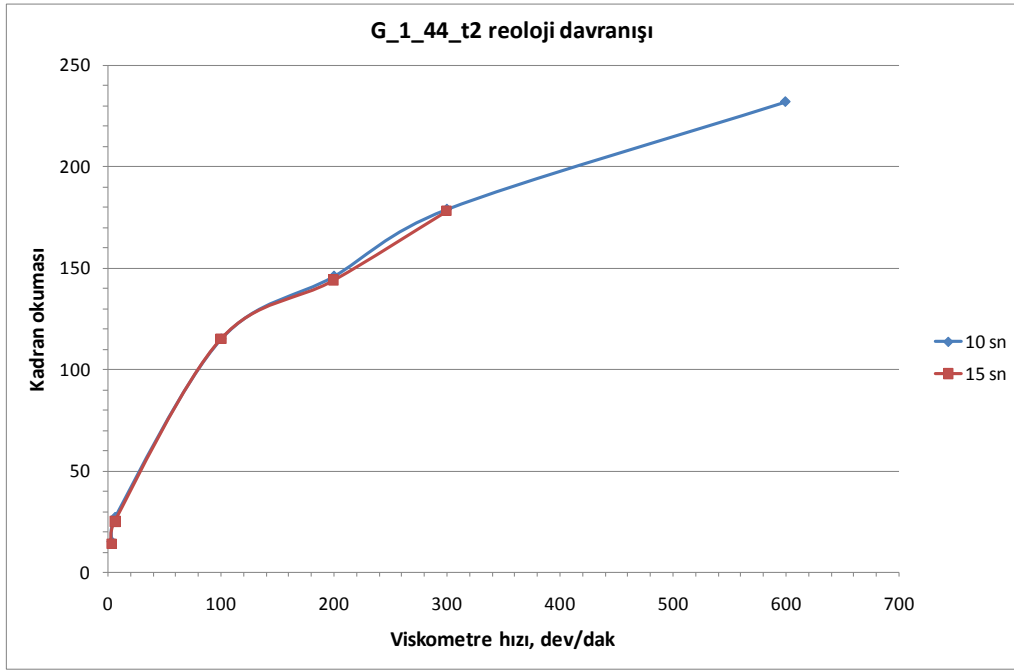
Şekil C.13: G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%0 ARI) – karşılaştırma.



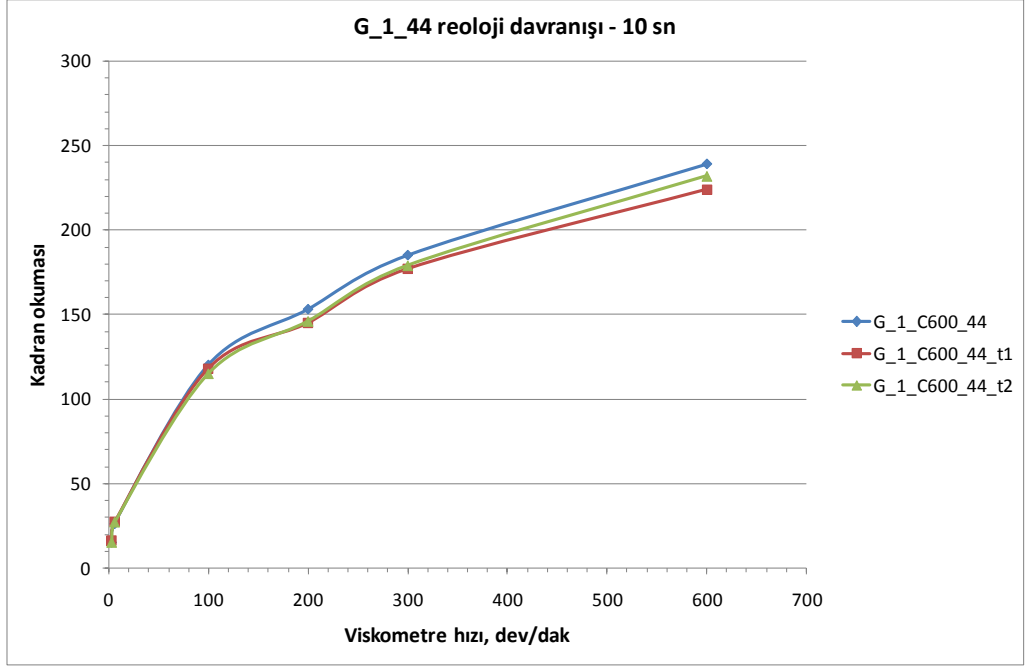
Şekil C.14: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %44 su).



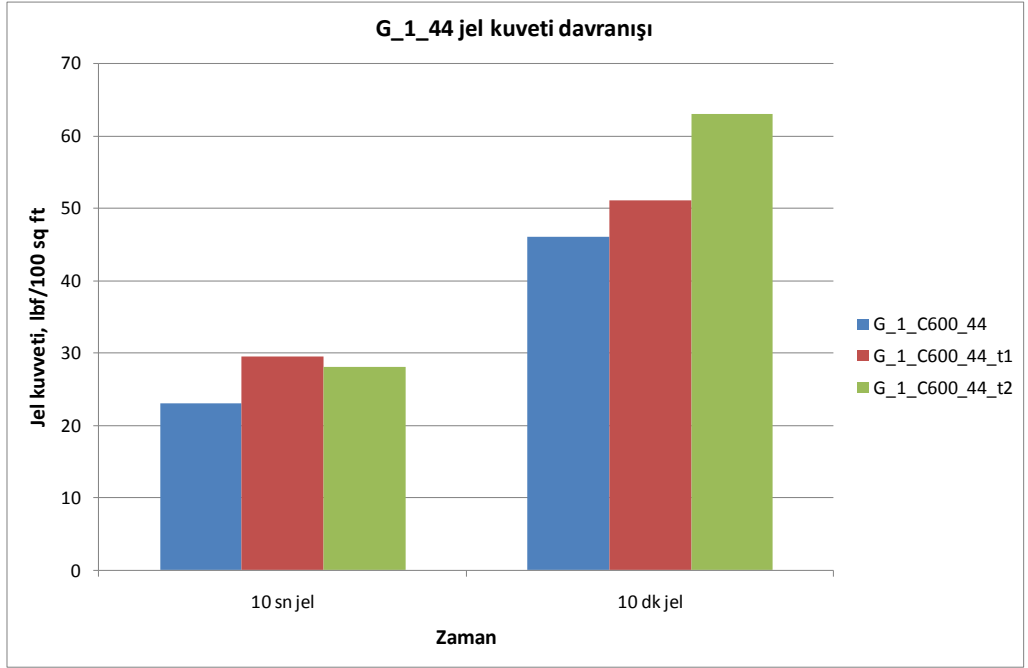
Şekil C.15: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %44 su) – tekrar-1.



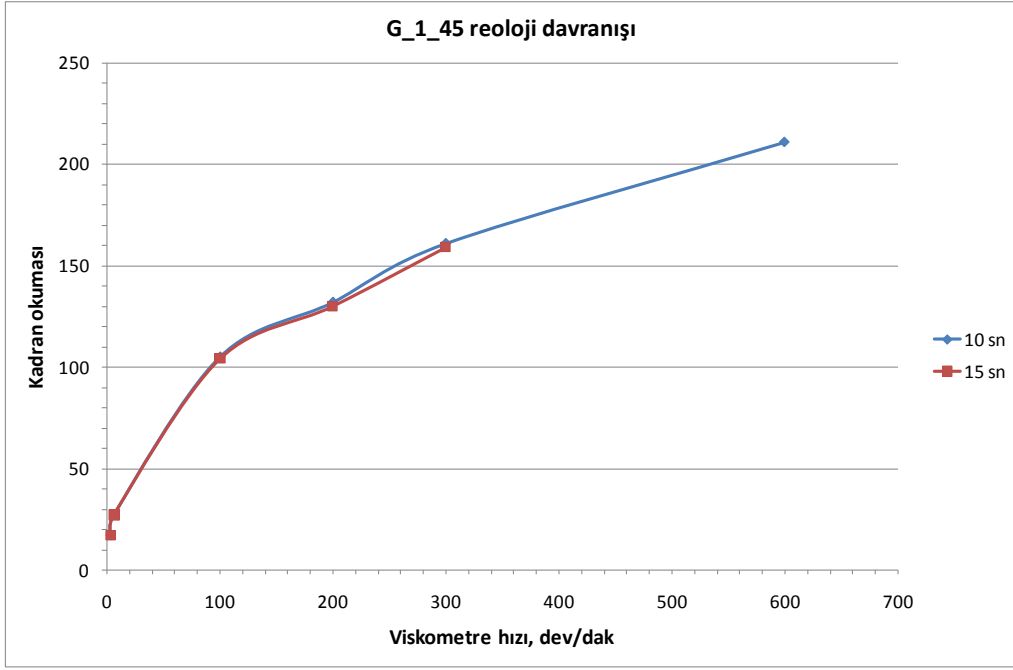
Şekil C.16: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %44 su) – tekrar-2.



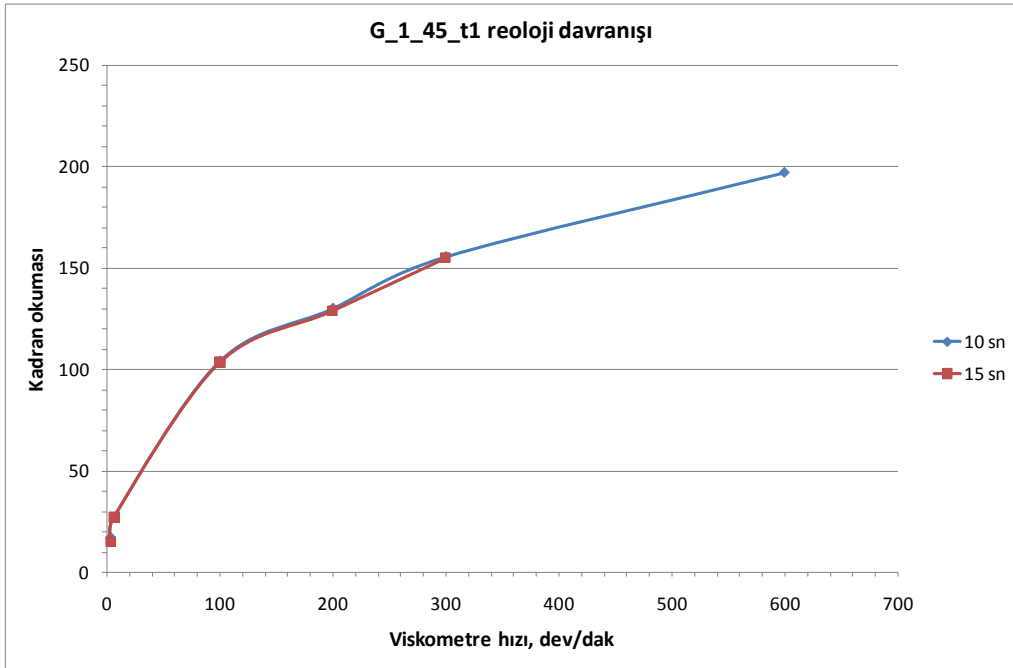
Şekil C.17: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %44 su) – karşılaştırma.



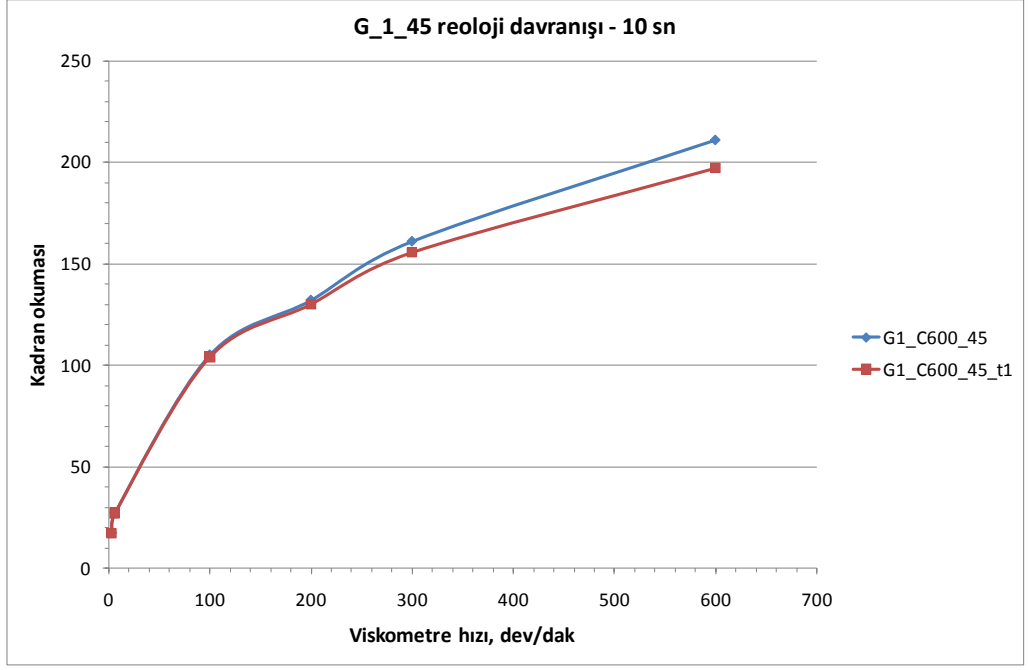
Şekil C.18: G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%1 ARI) – karşılaştırma.



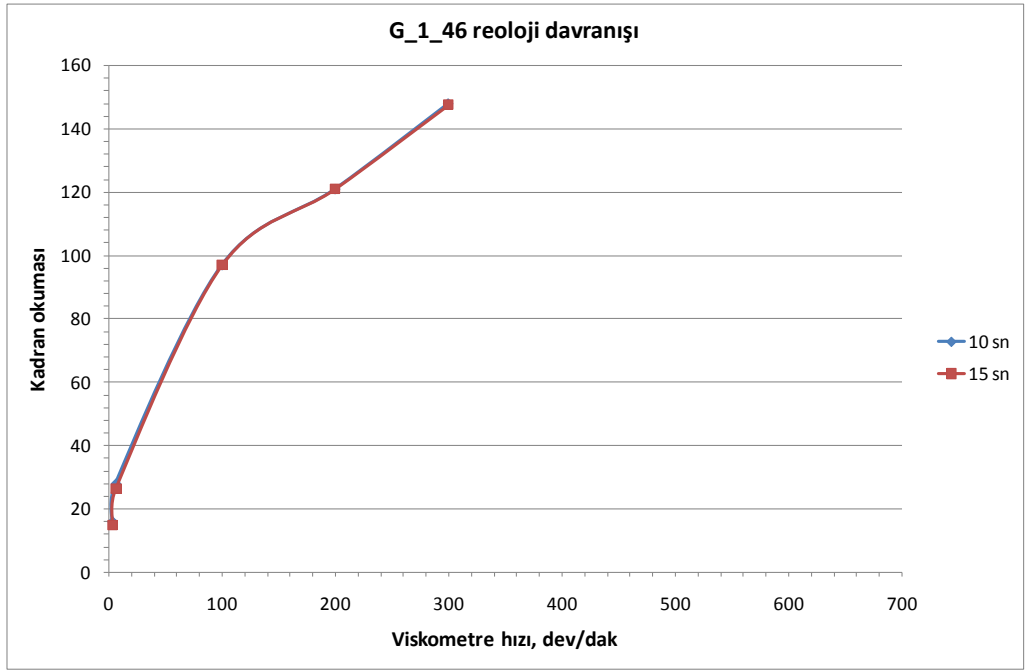
Şekil C.19: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %45 su).



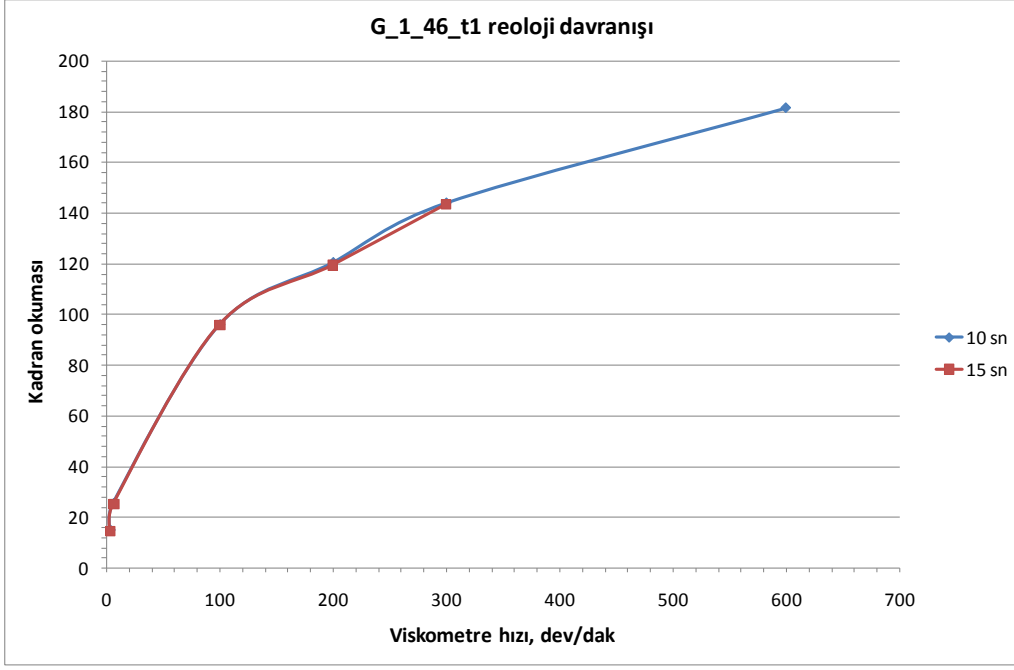
Şekil C.20: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %45 su) – tekrar-1.



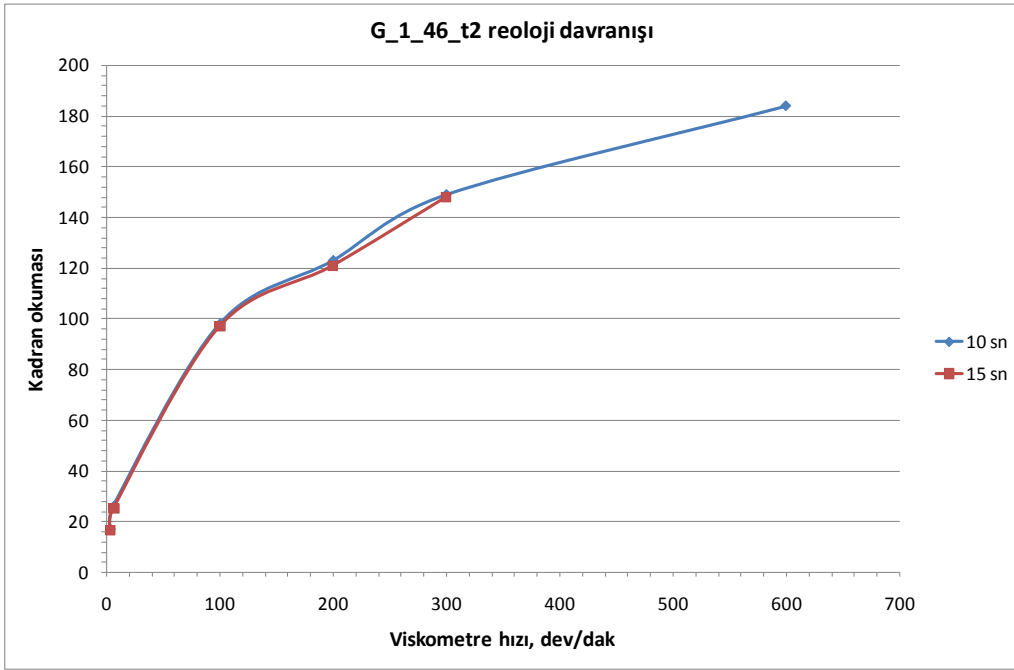
Şekil C.21: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %45 su) – karşılaştırma.



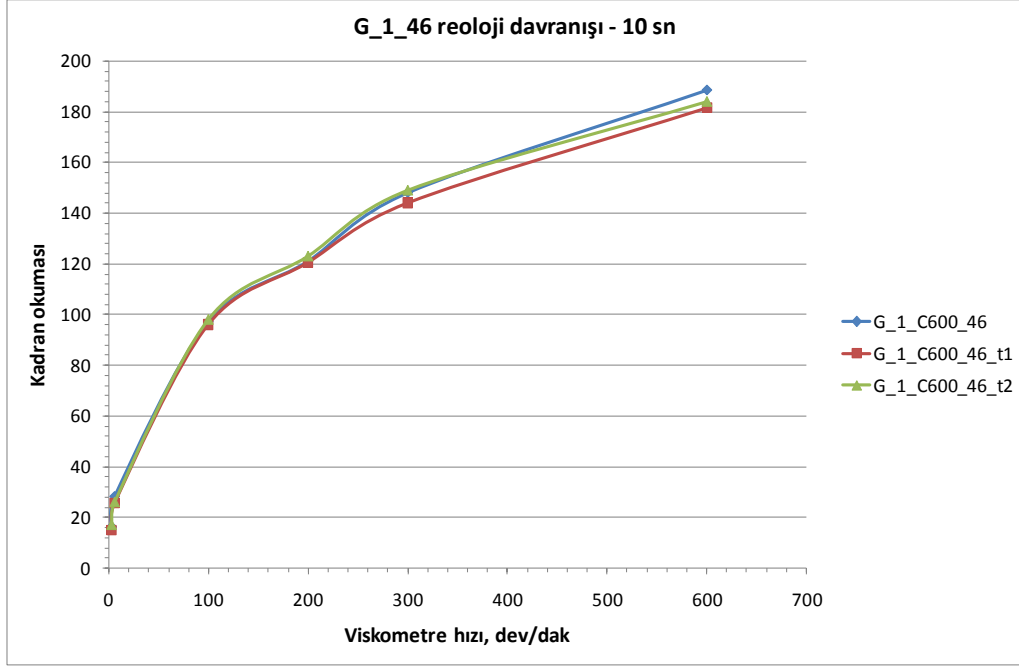
Şekil C.22: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %46 su).



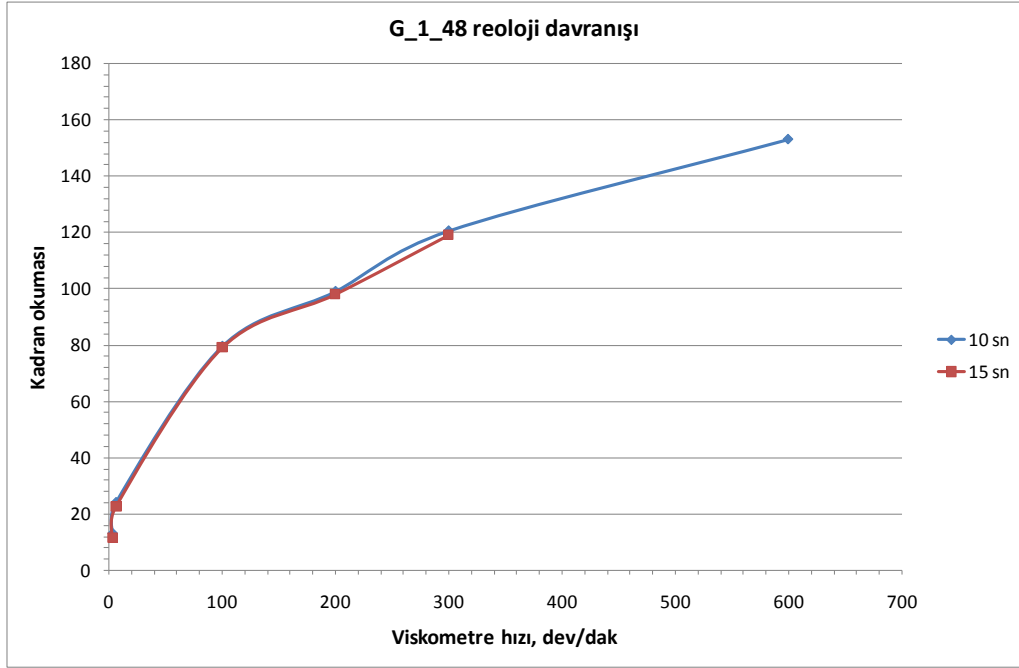
Şekil C.23: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %46 su) – tekrar-1.



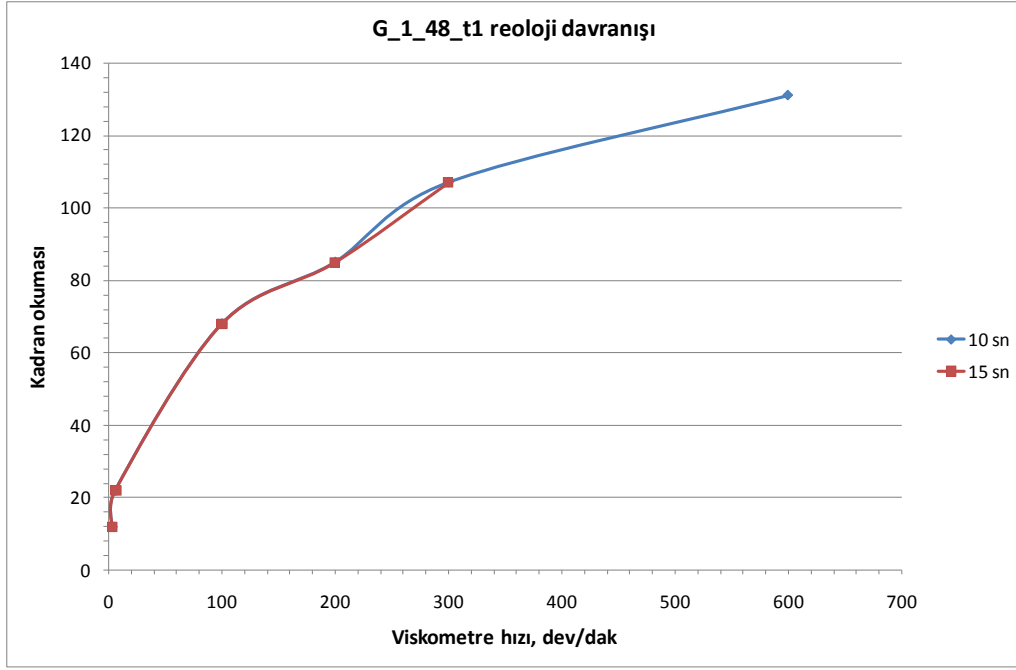
Şekil C.24: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %46 su) – tekrar-2.



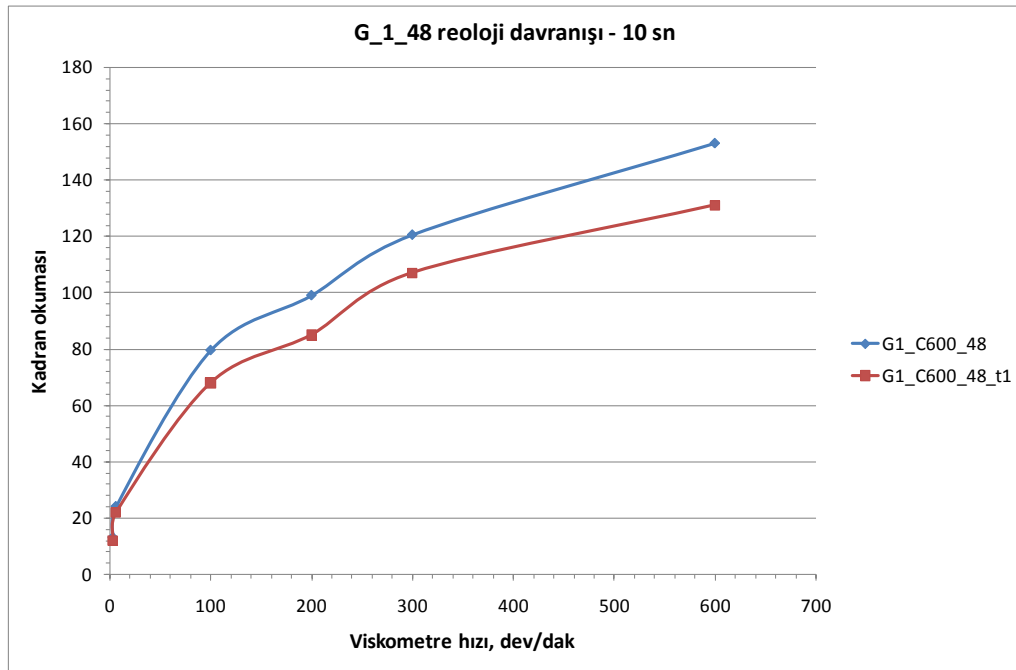
Şekil C.25: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %46 su) – karşılaştırma.



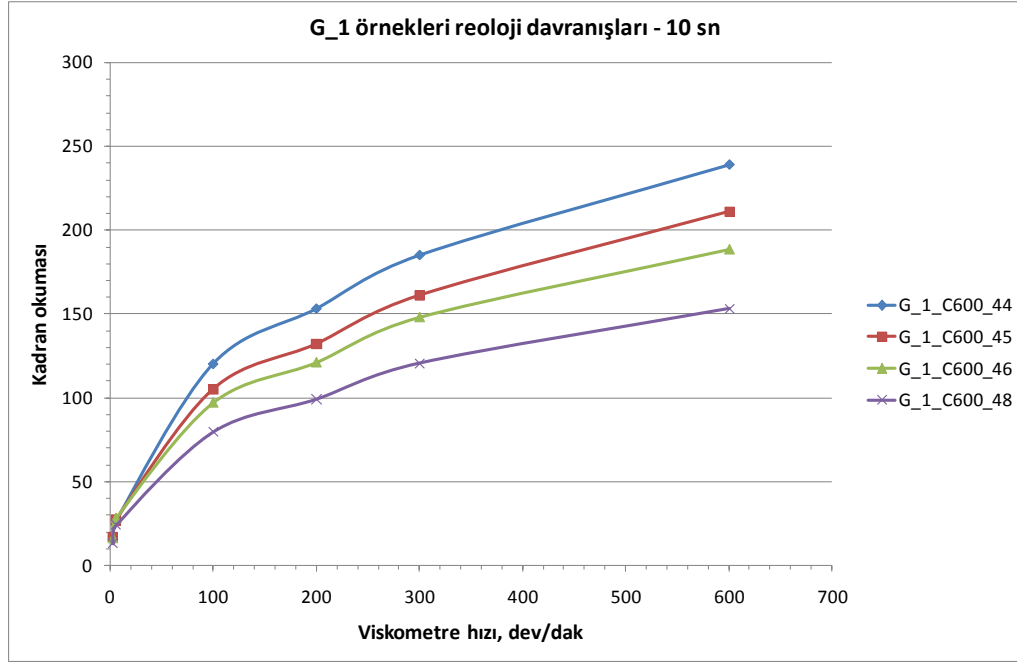
Şekil C.26: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %48 su).



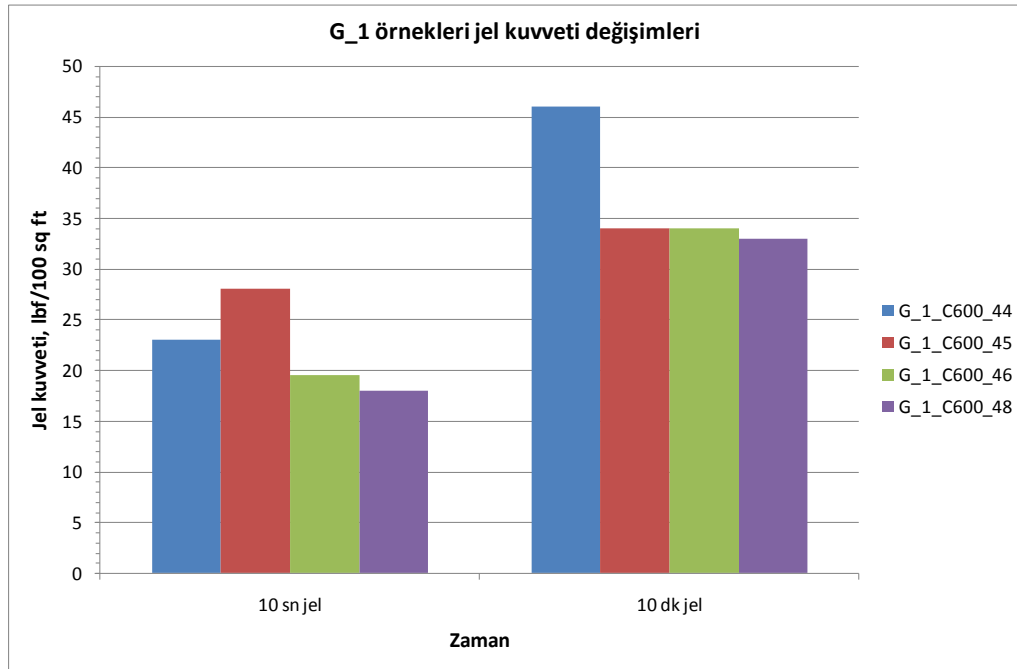
Şekil C.27: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %48 su) – tekrar-1.



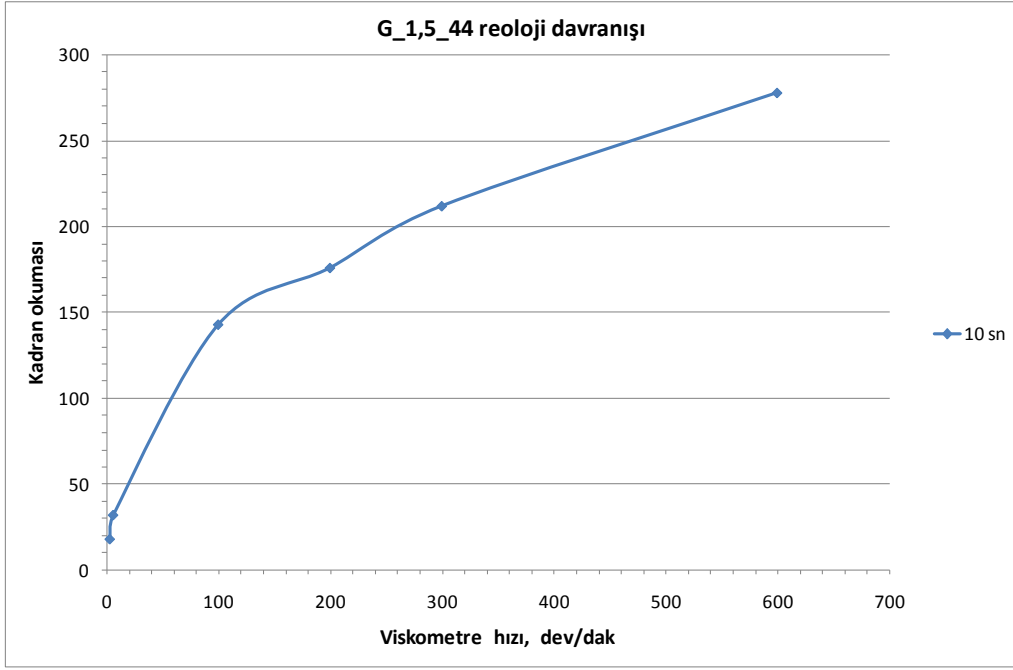
Şekil C.28: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI – %48 su) – karşılaştırma.



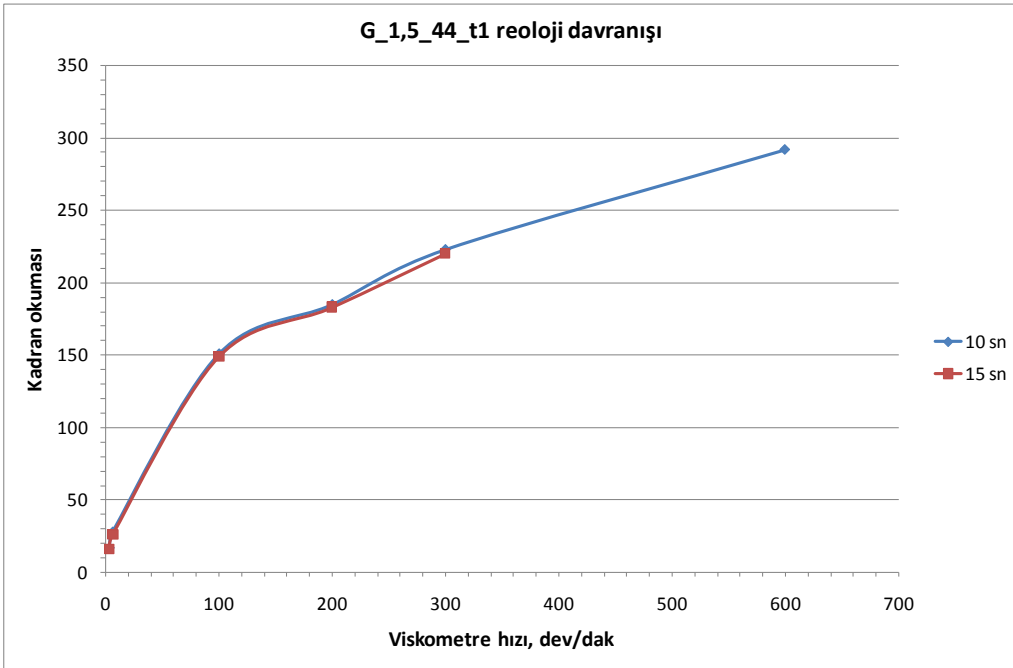
Şekil C.29: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1 ARI) – karşılaştırma.



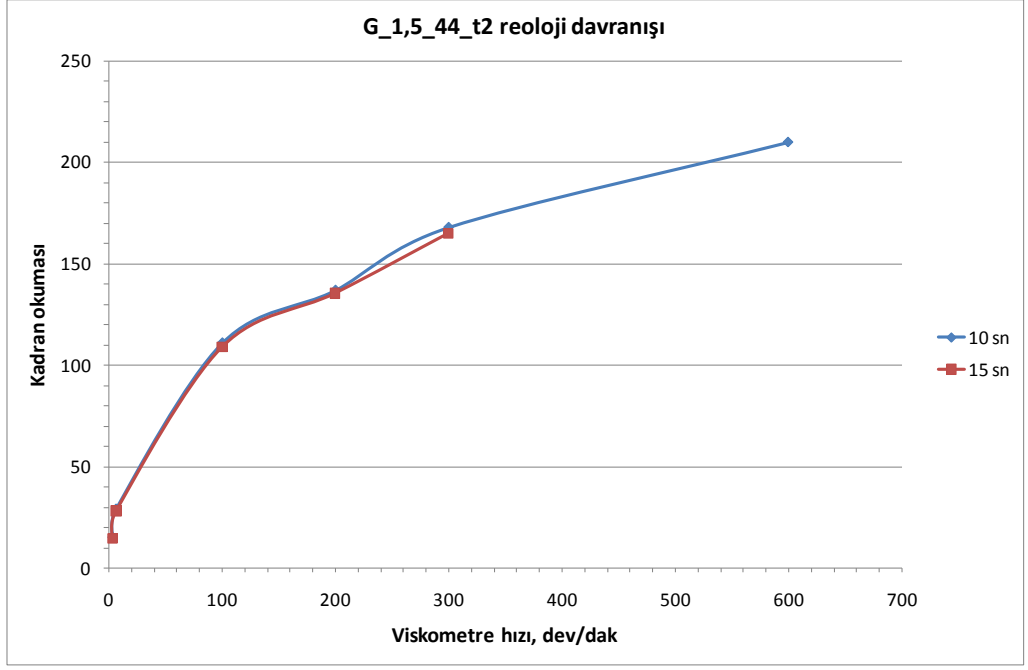
Şekil C.30: G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%1 ARI) – karşılaştırma.



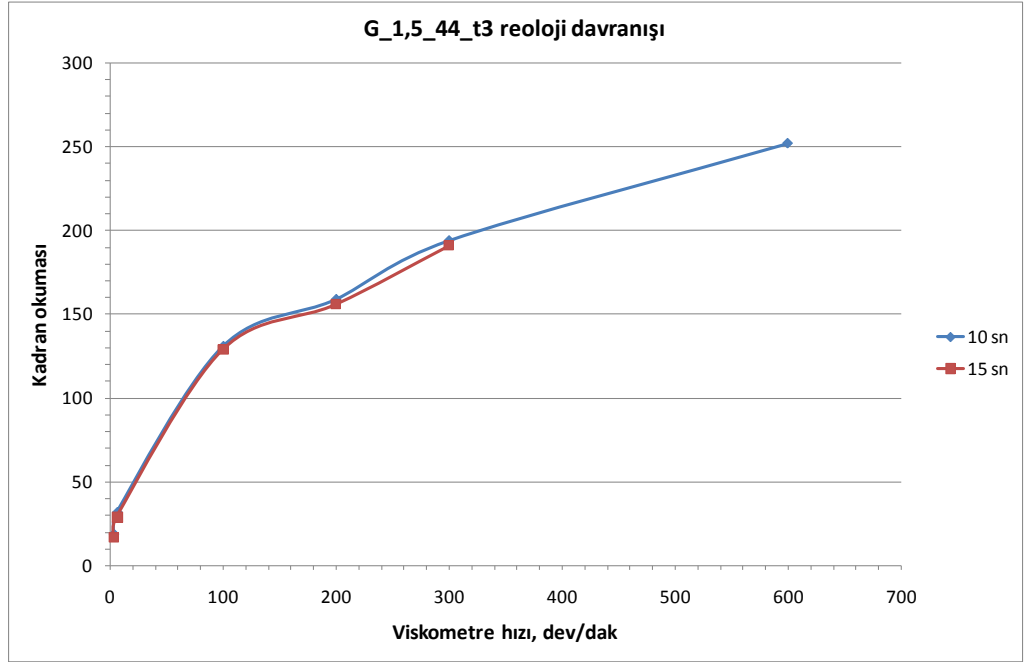
Şekil C.31: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su).



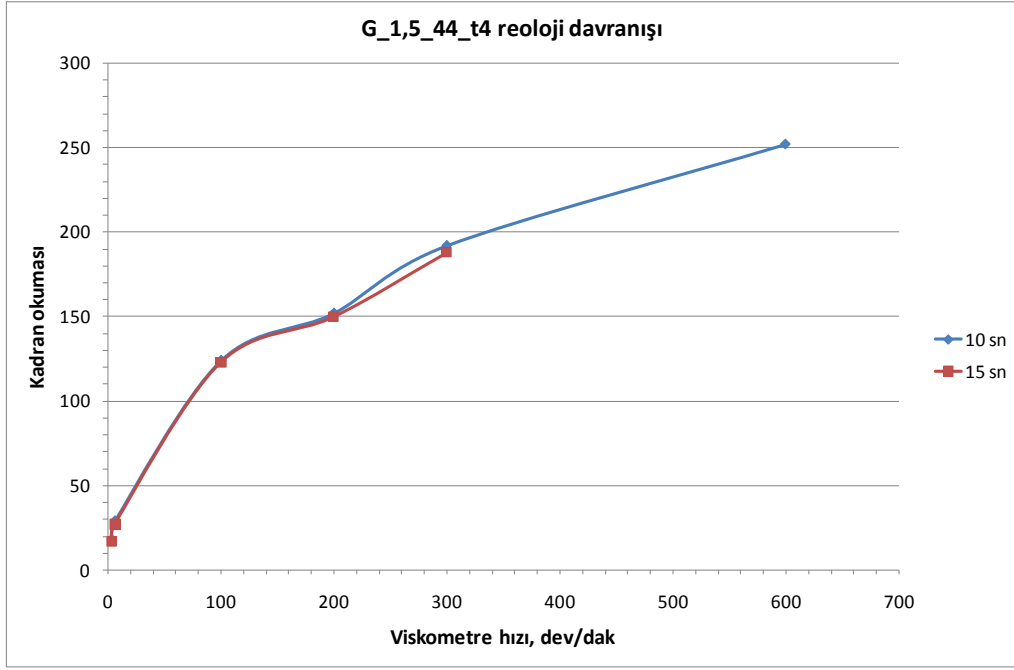
Şekil C.32: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su) – tekrar-1.



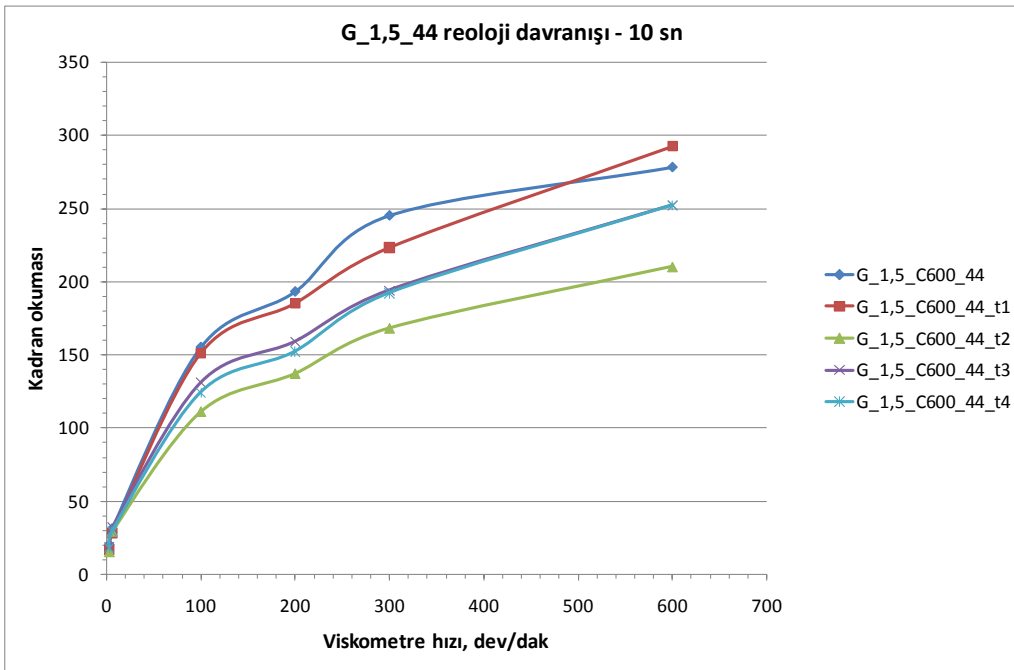
Şekil C.33: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su) – tekrar-2.



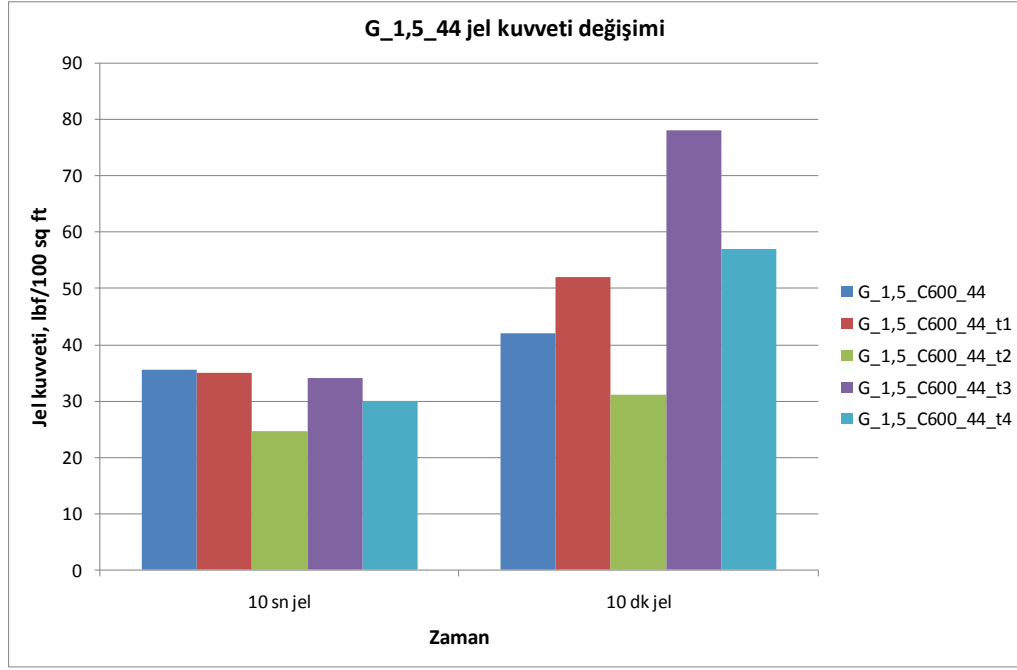
Şekil C.34: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su) – tekrar-3.



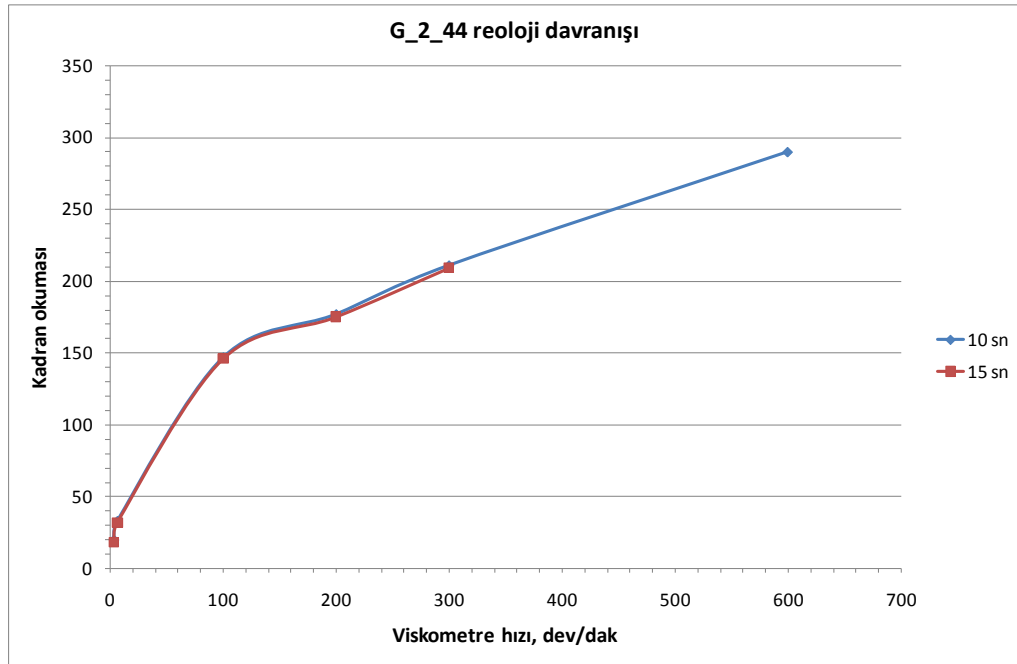
Şekil C.35: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su) – tekrar-4.



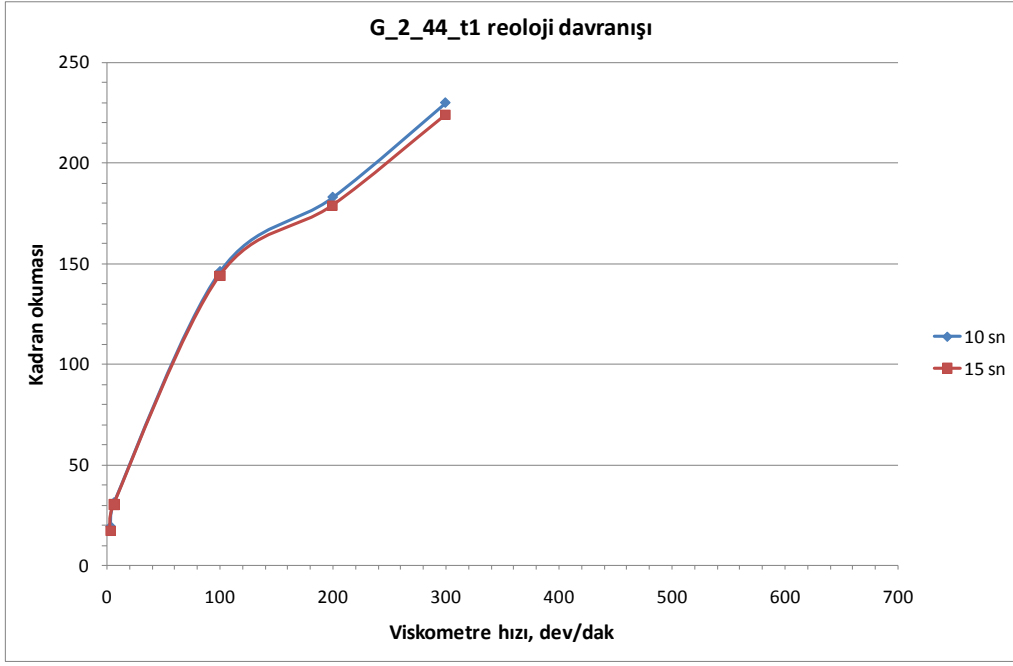
Şekil C.36: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%1,5 ARI – %44 su) – karşılaştırma.



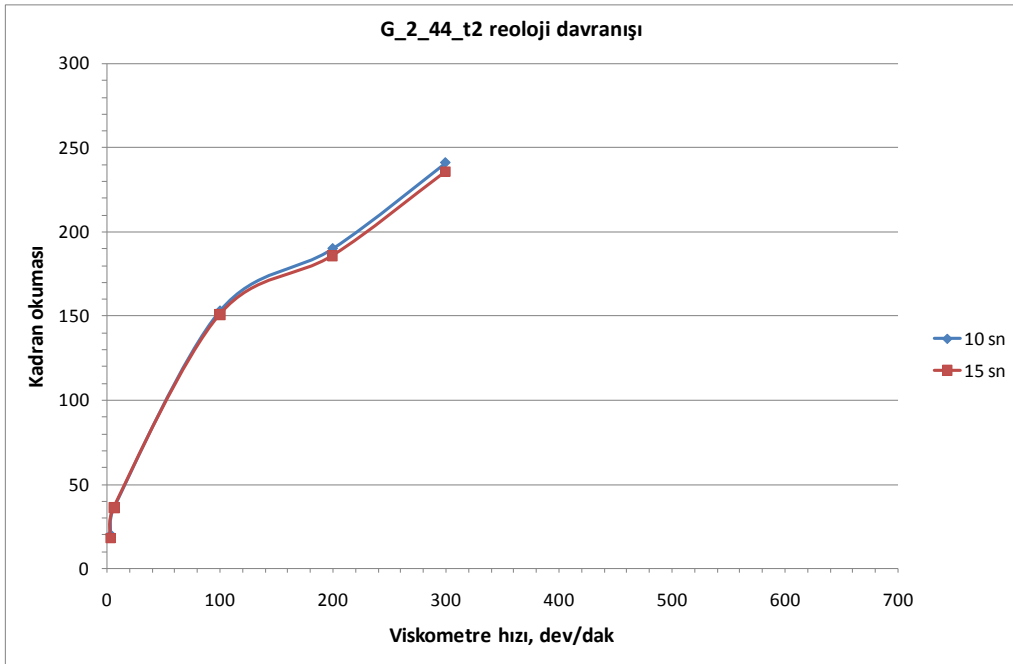
şekil C.37: G Sınıf imento jel kuvveti grafiği (%1,5 ARI) – karşılaştırma.



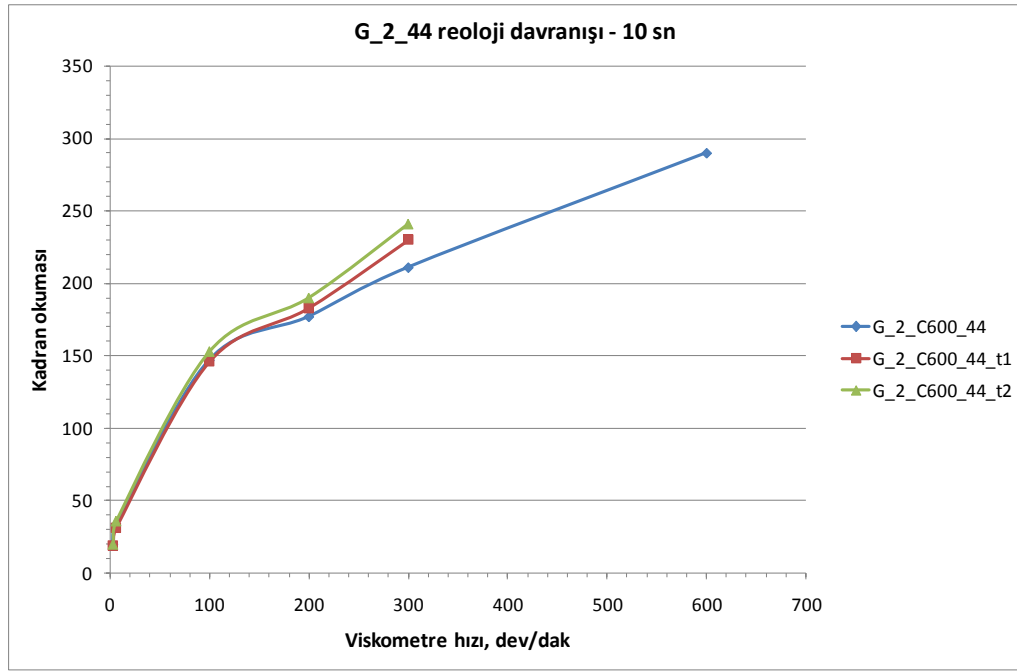
şekil C.38: G Sınıf imento reoloji grafiği (%2 ARI – %44 su).



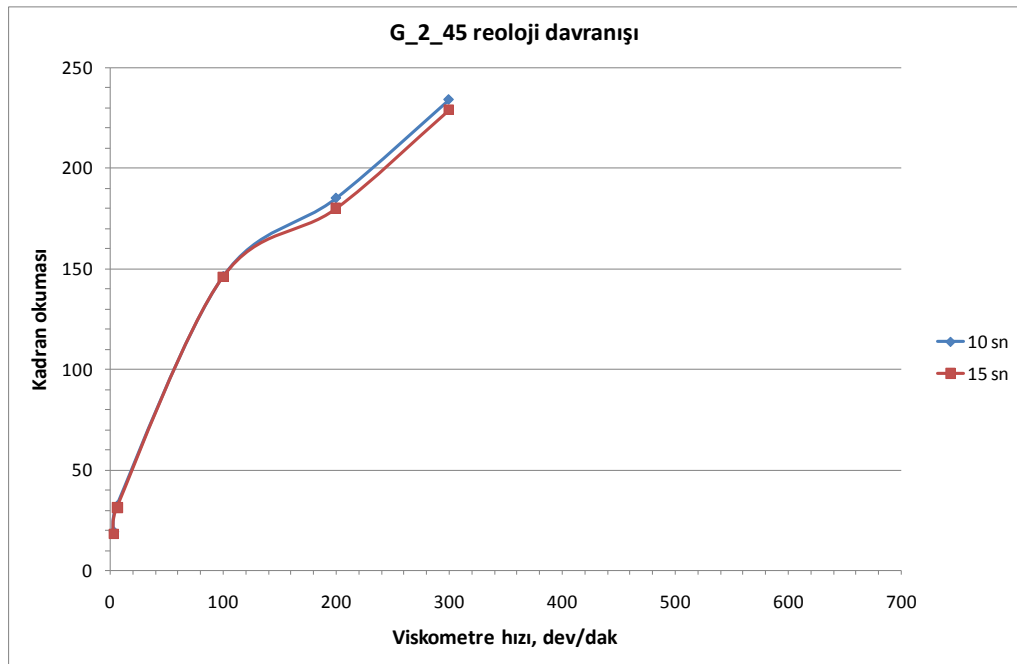
Şekil C.39: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %44 su) – tekrar-1.



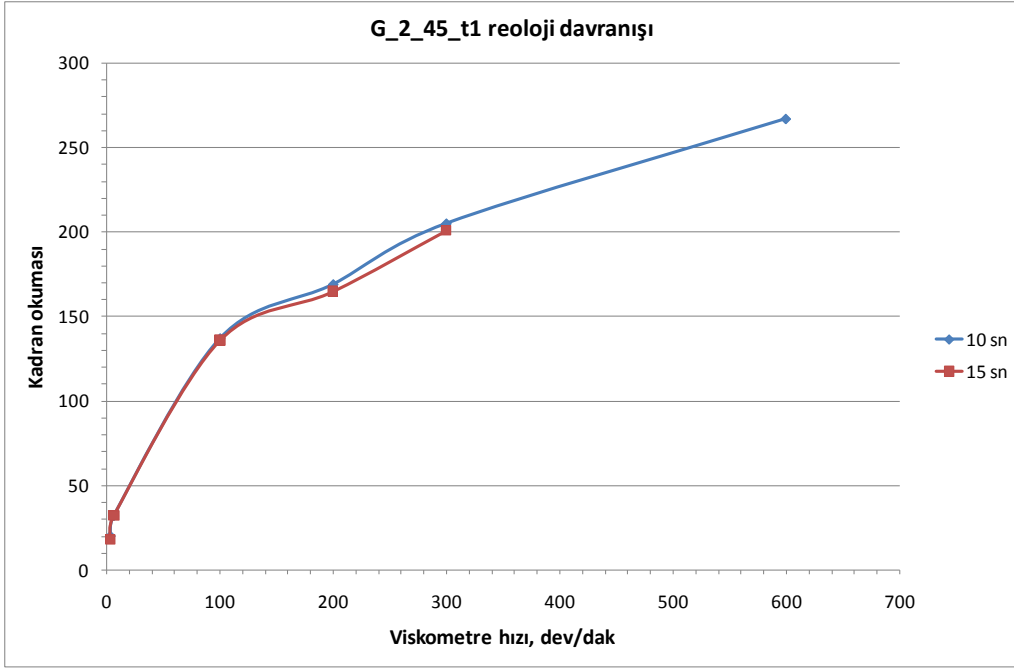
Şekil C.40: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %44 su) – tekrar-2.



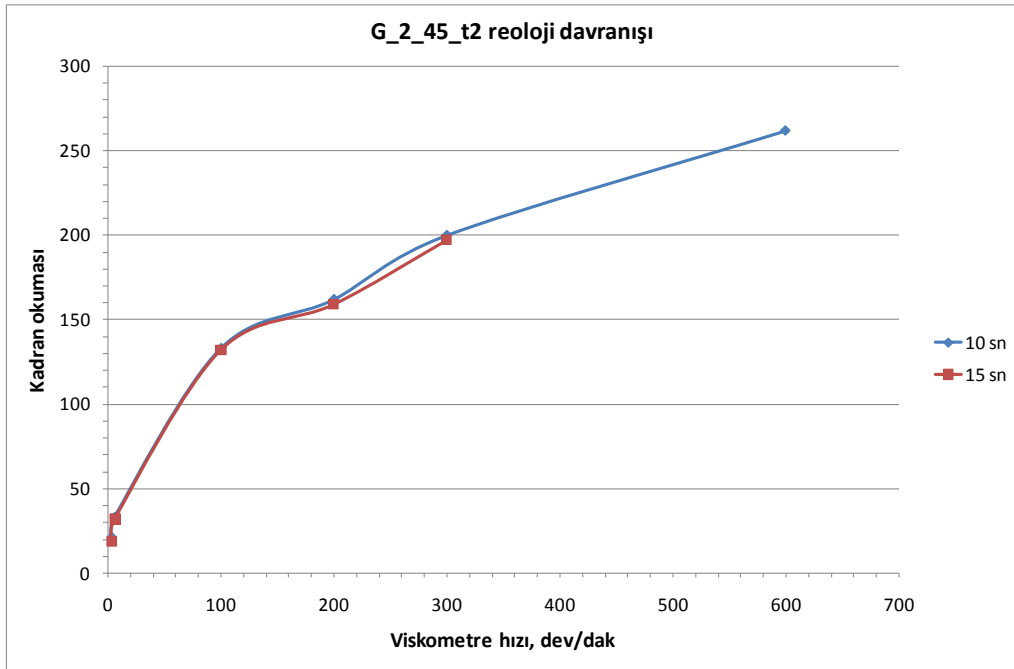
Şekil C.41: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %44 su) – karşılaştırma.



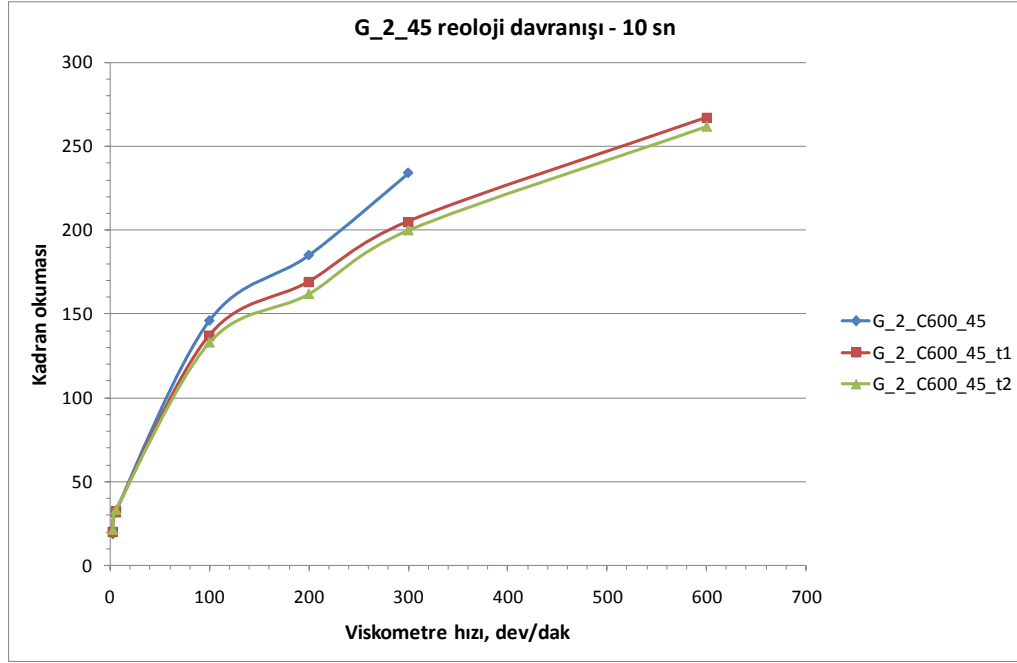
Şekil C.42: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %45 su).



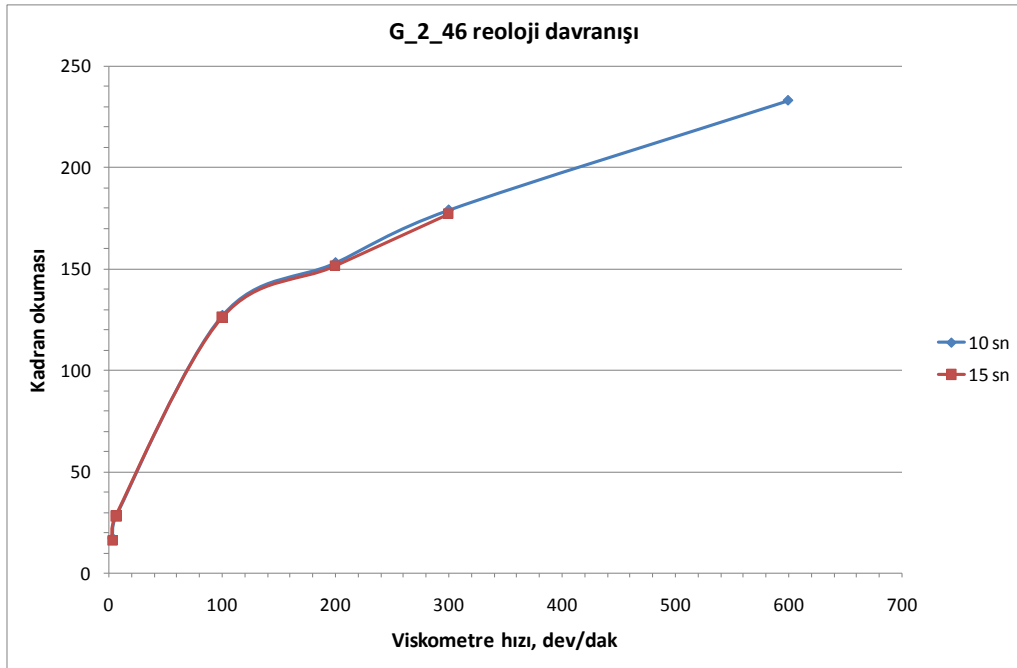
Şekil C.43: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %45 su) – tekrar-1.



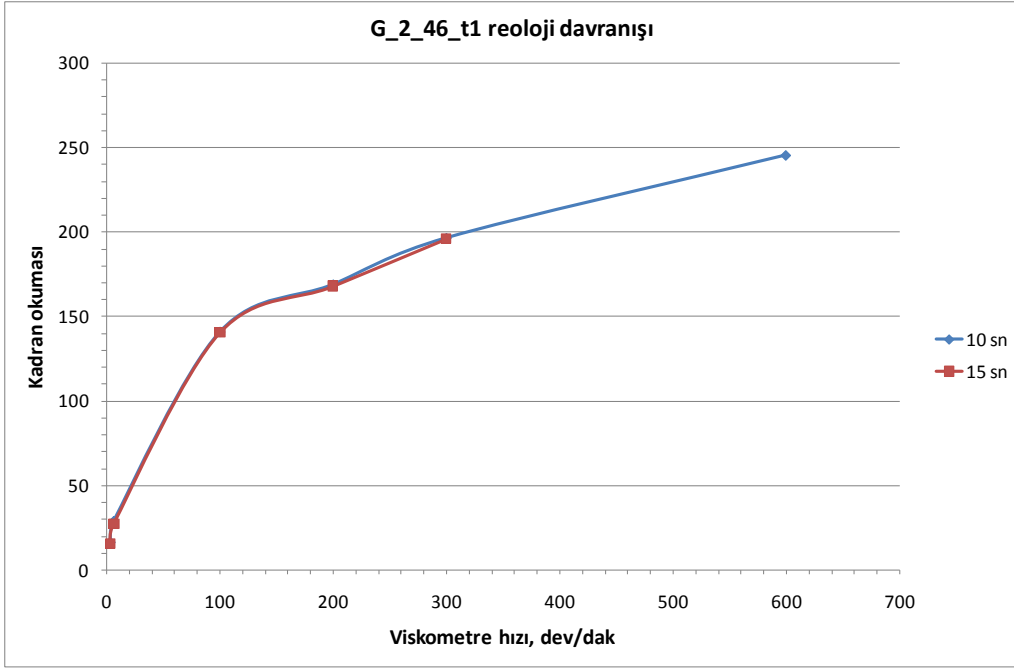
Şekil C.44: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %45 su) – tekrar-2.



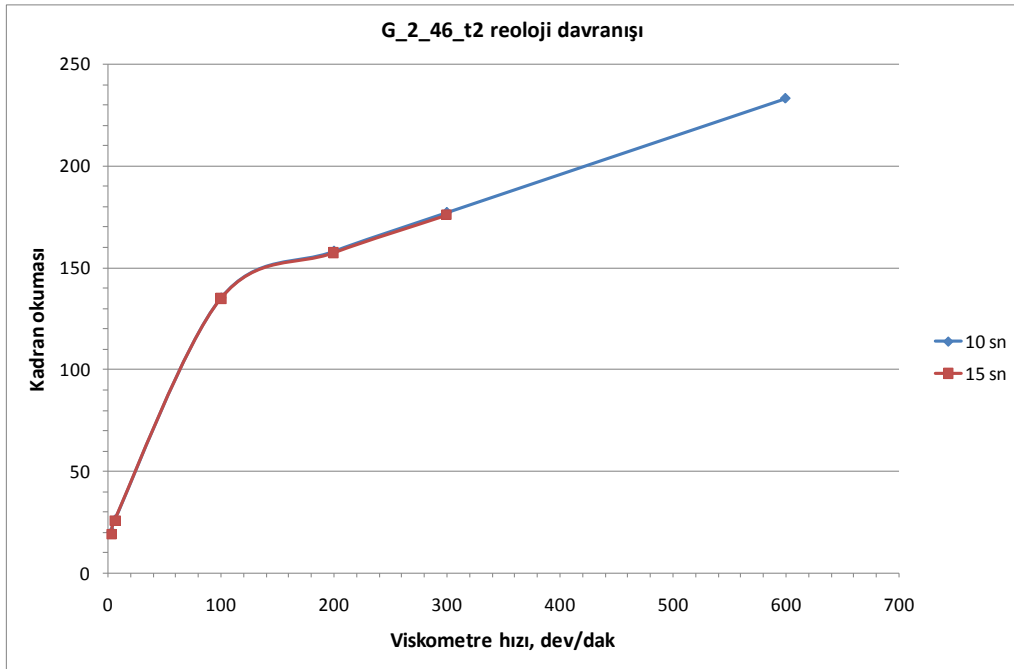
Şekil C.45: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %45 su) – karşılaştırma.



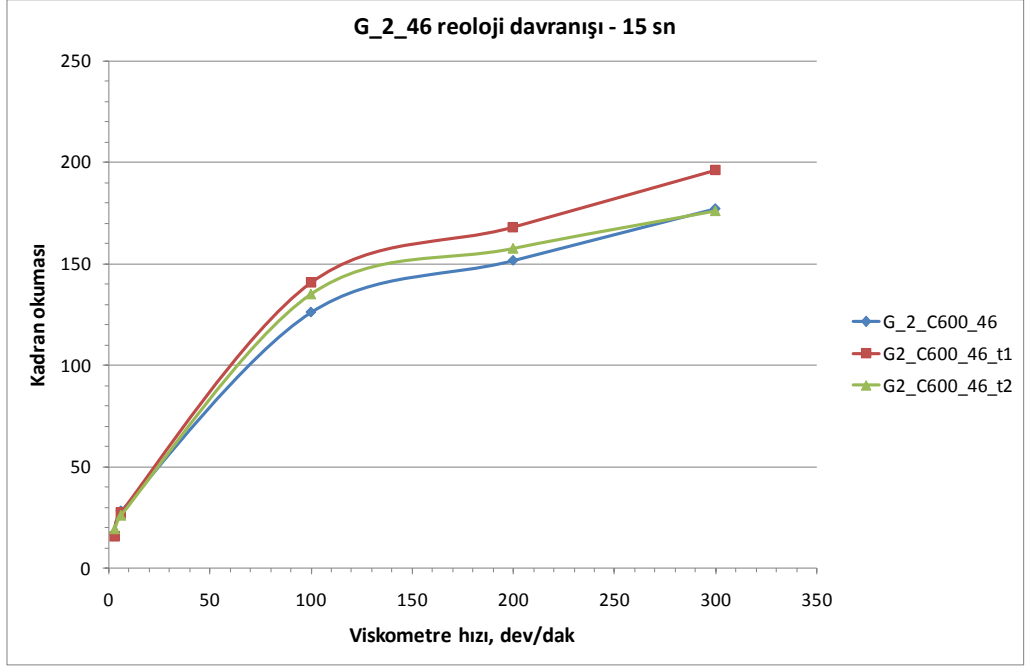
Şekil C.46: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %46 su).



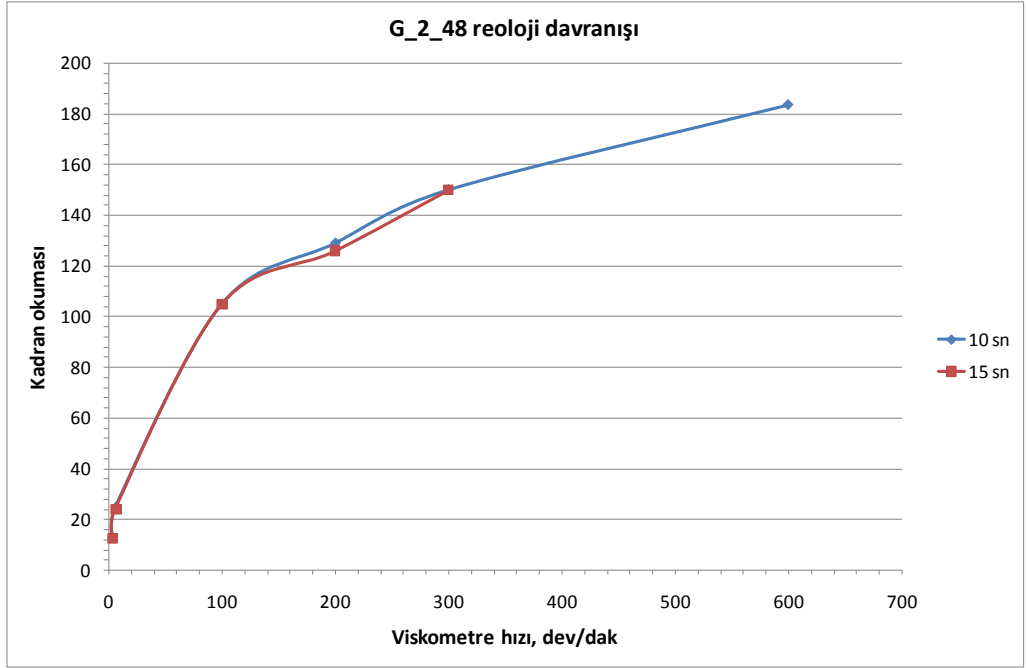
Şekil C.47: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %46 su) – tekrar-1.



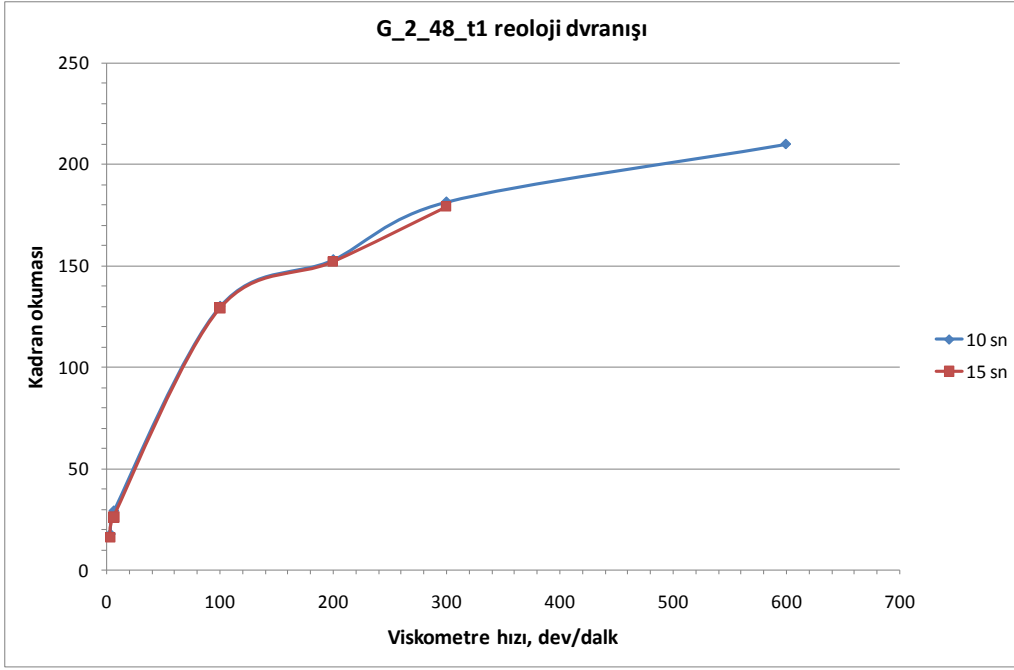
Şekil C.48: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %46 su) – tekrar-2.



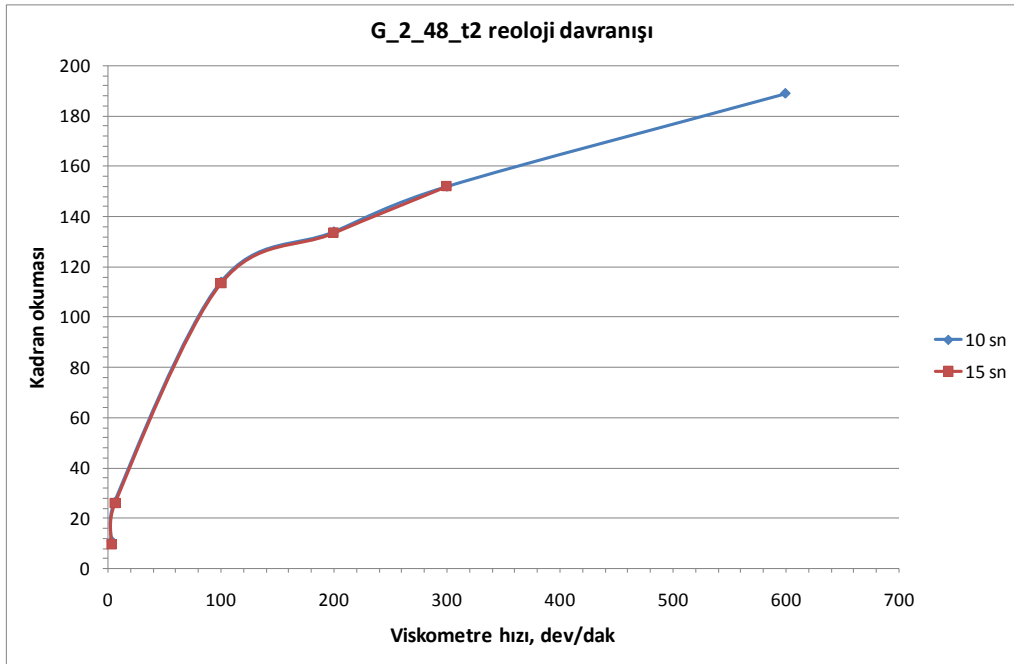
Şekil C.49: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %46 su) – karşılaştırma.



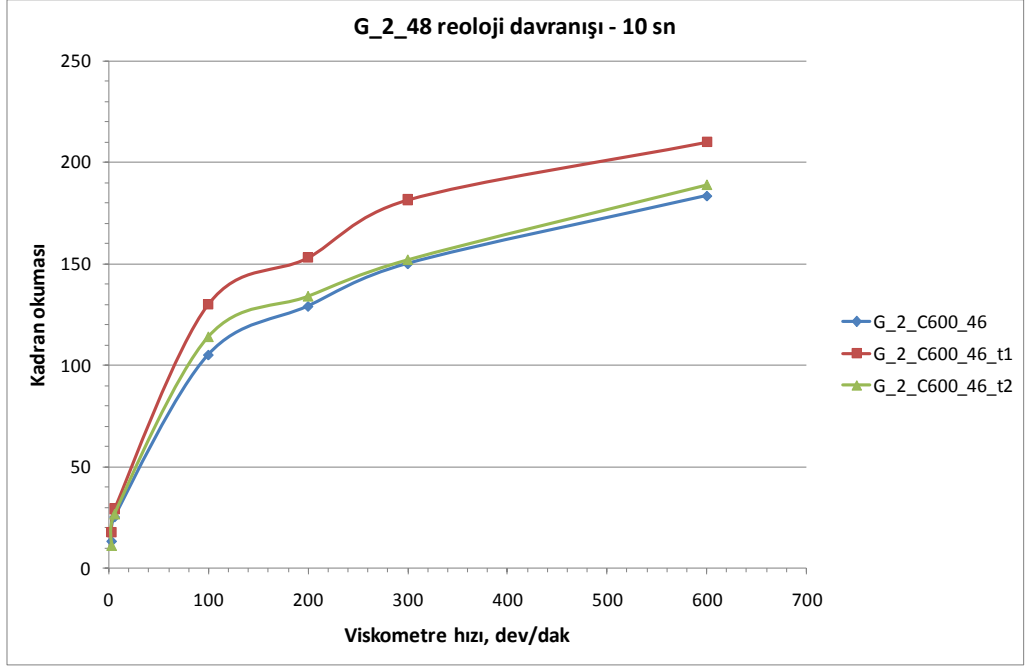
Şekil C.50: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %48 su).



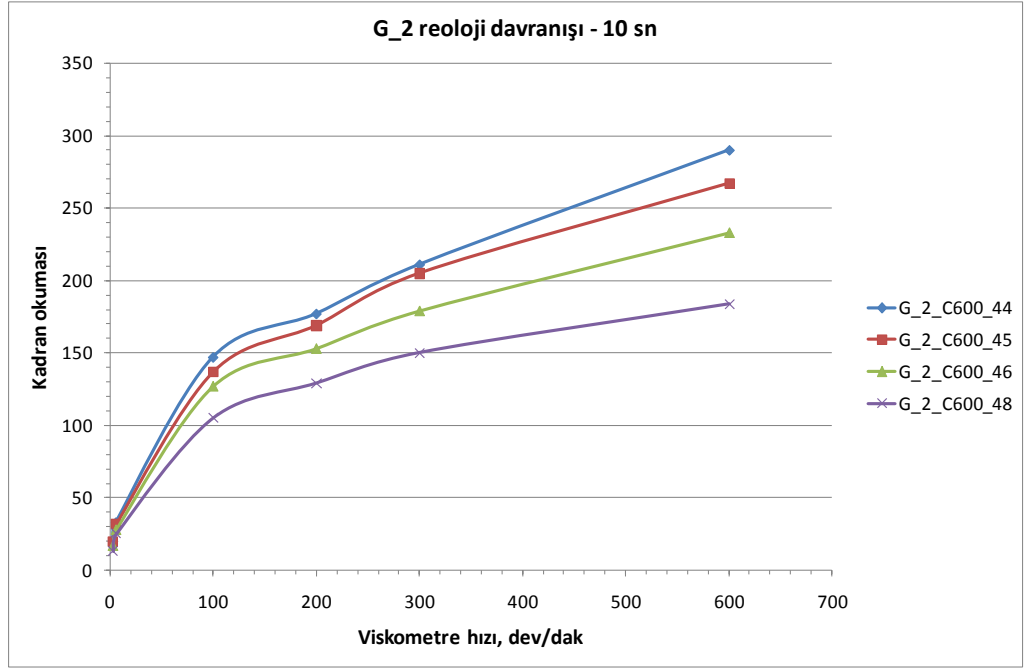
Şekil C.51: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %48 su) – tekrar-1.



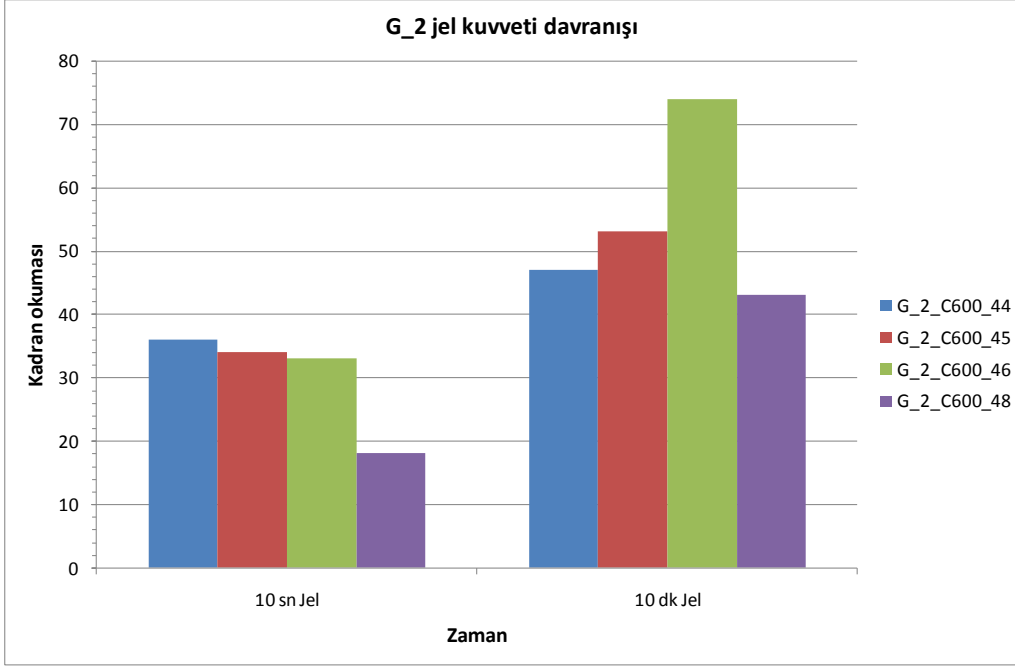
Şekil C.52: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI – %48 su) – tekrar-2.



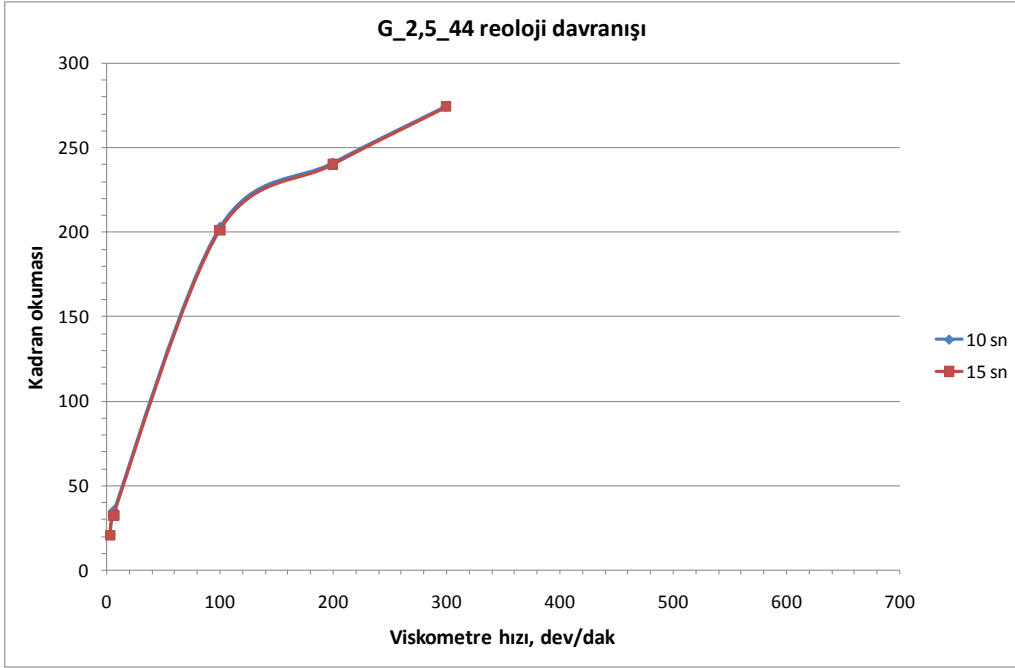
Şekil C.53: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI) – %48 su) – karşılaştırma.



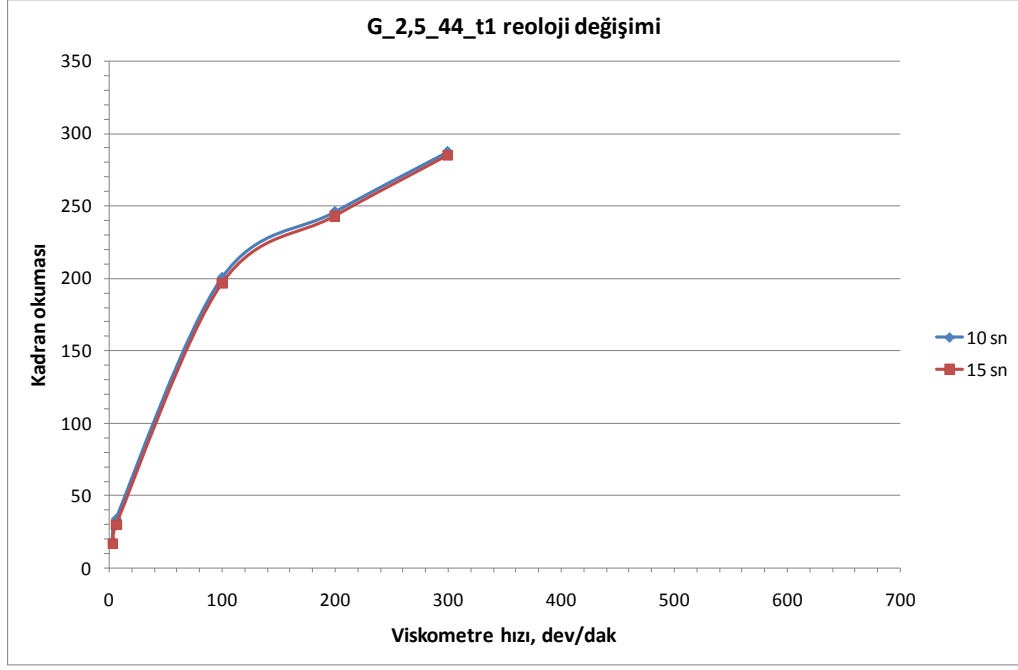
Şekil C.54: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2 ARI) –karşılaştırma.



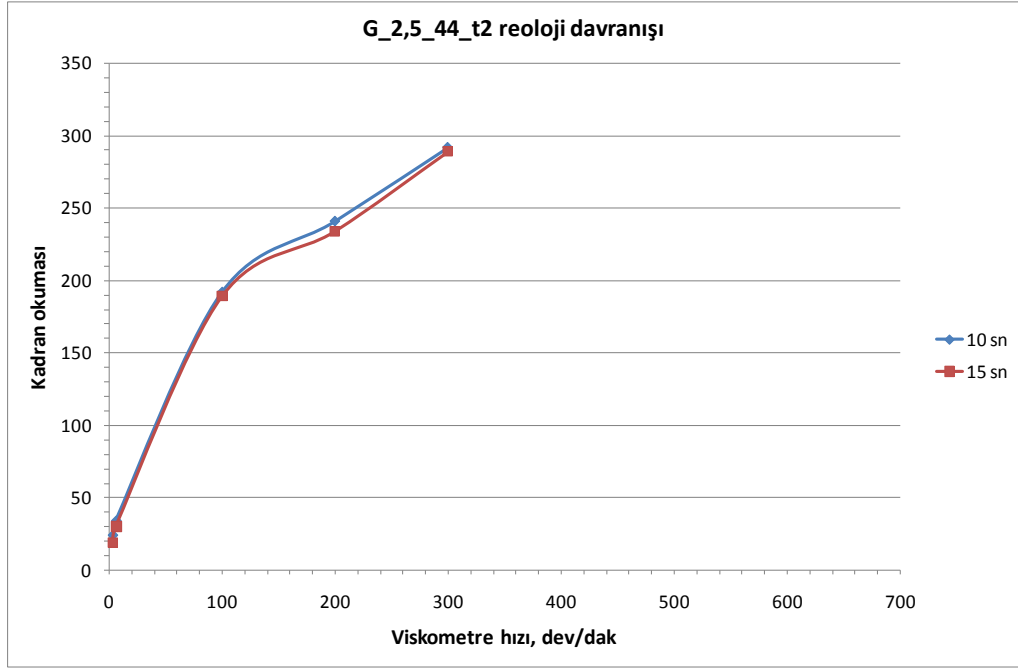
Şekil C.55: G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%2 ARI) – karşılaştırma.



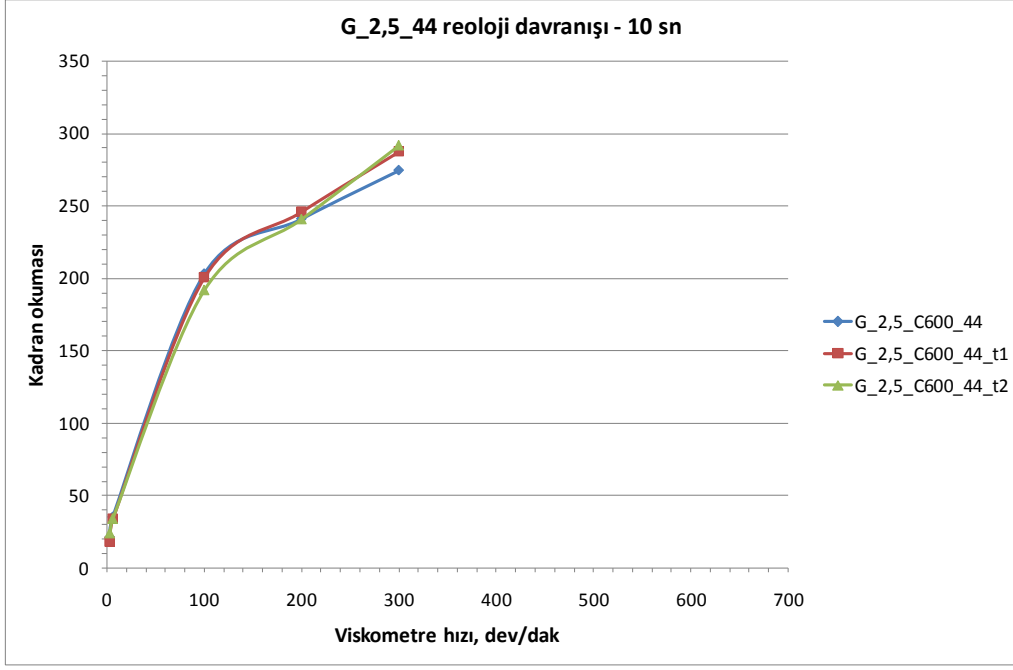
Şekil C.56: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2,5 ARI – %44 su).



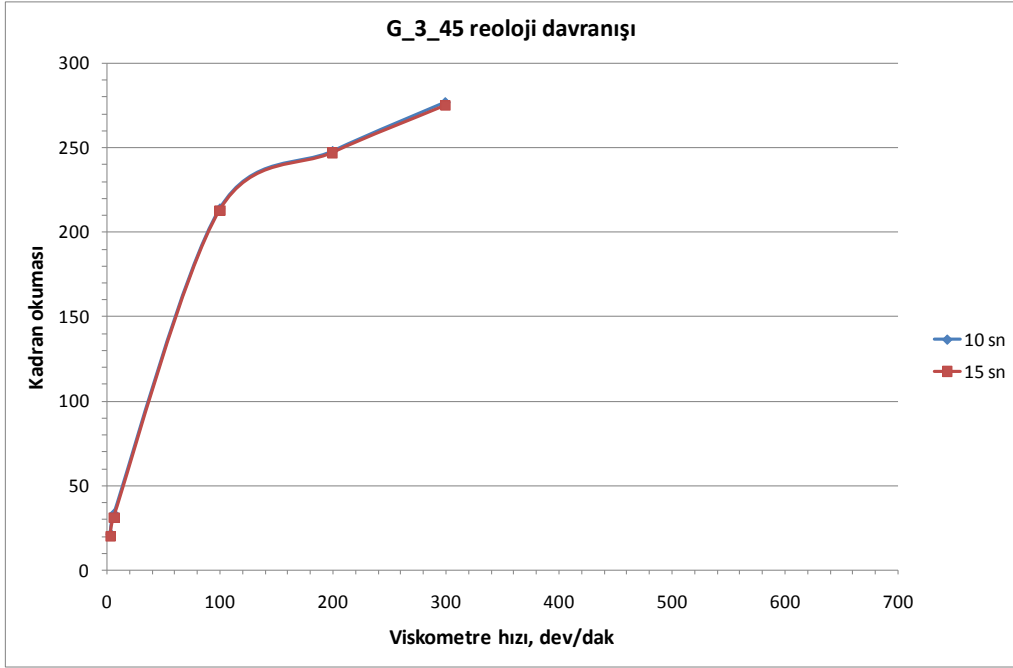
şekil C.57: G Sınıf imento reoloji grafiği (%2,5 ARI – %44 su) – tekrar-1.



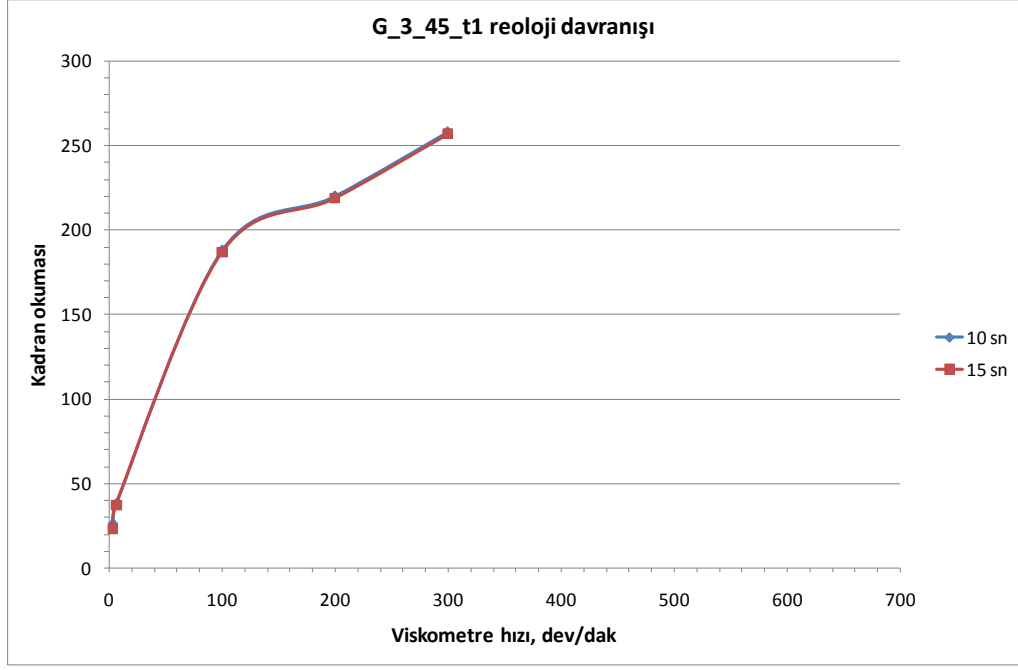
şekil C.58: G Sınıf imento reoloji grafiği (%2,5 ARI – %44 su) – tekrar-2.



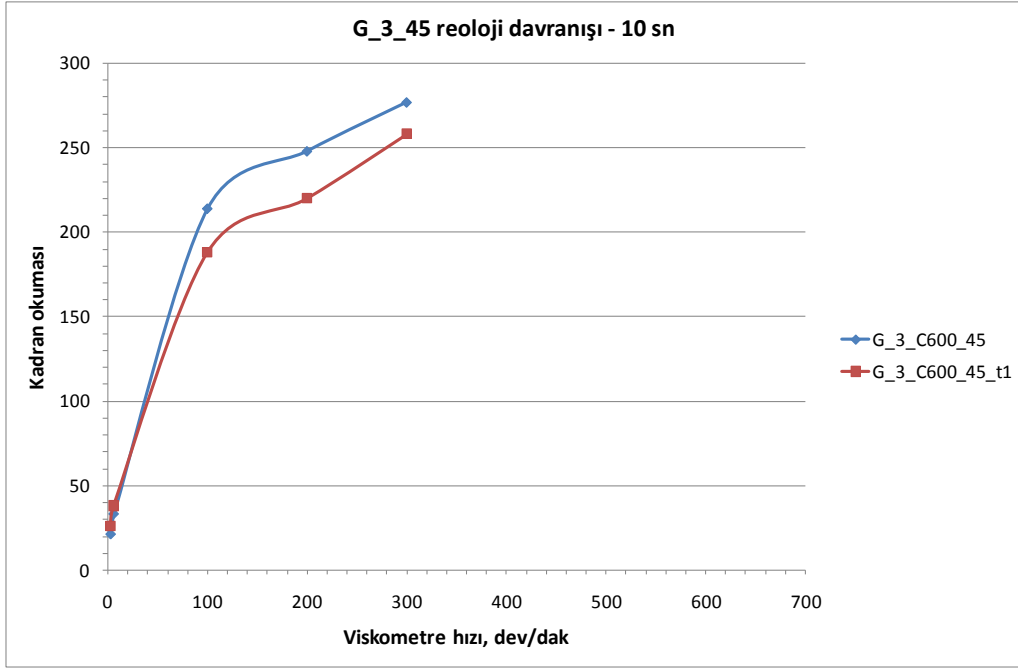
Şekil C.59: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%2,5 ARI – %44 su) – karşılaştırma.



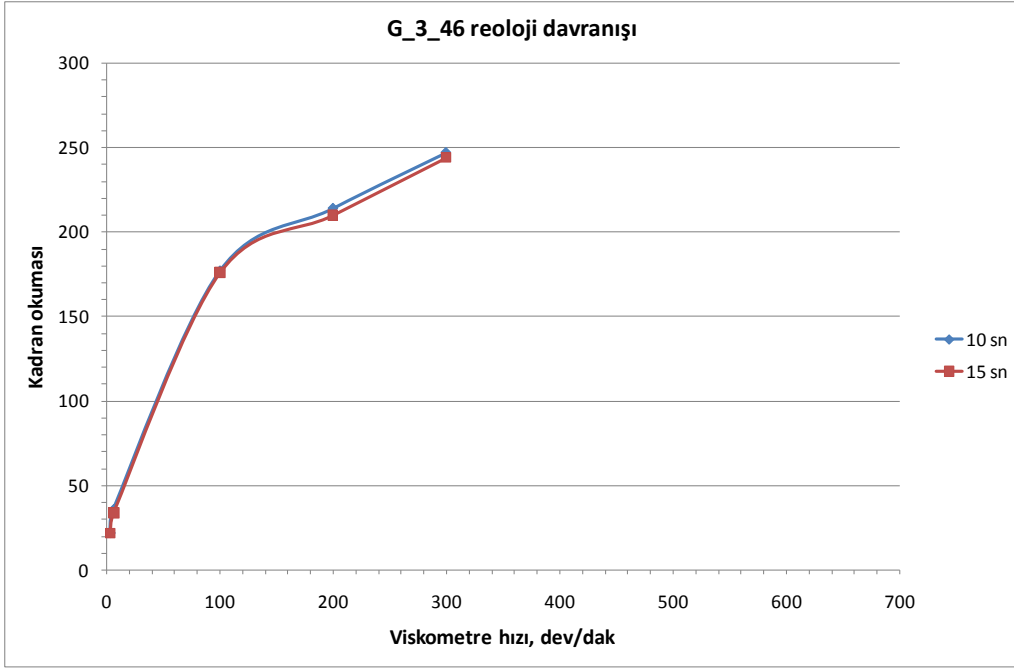
Şekil C.60: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su).



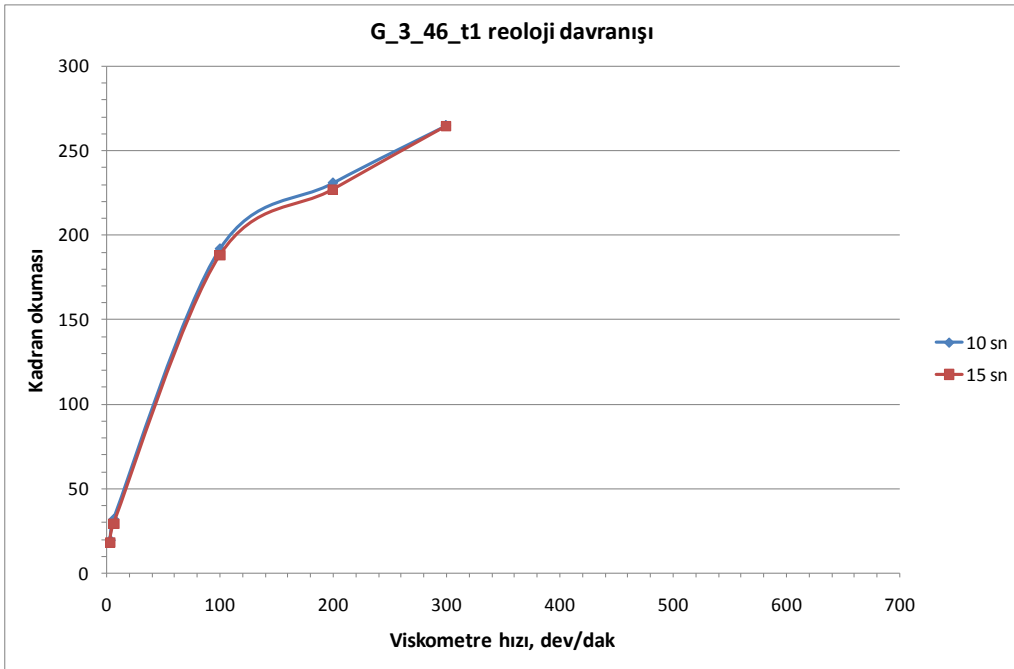
Şekil C.61: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su) – tekrar-1.



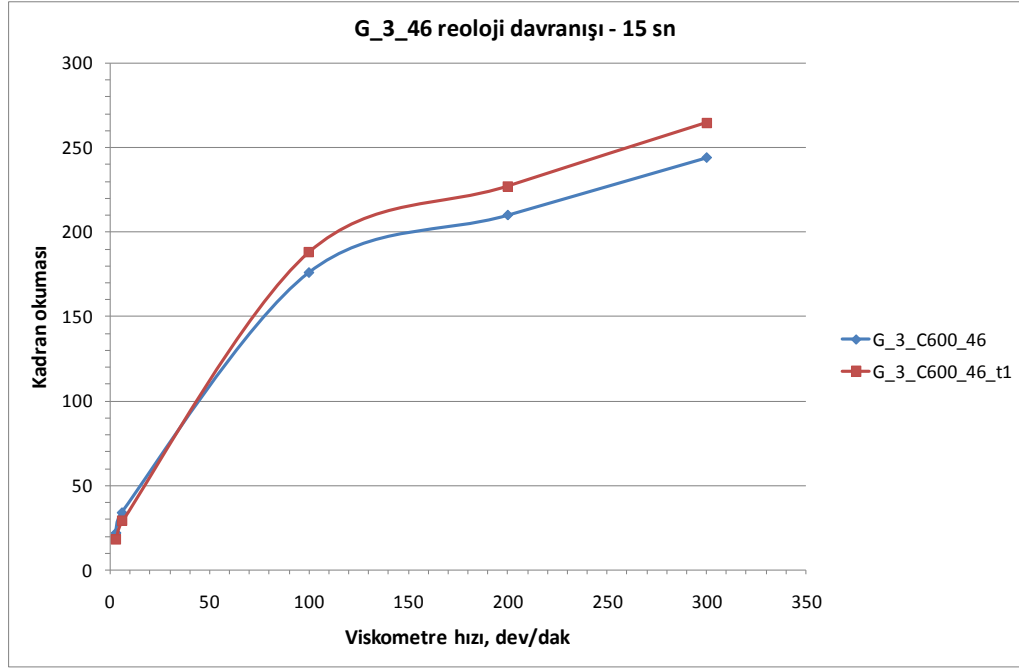
Şekil C.62: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su) – karşılaştırma.



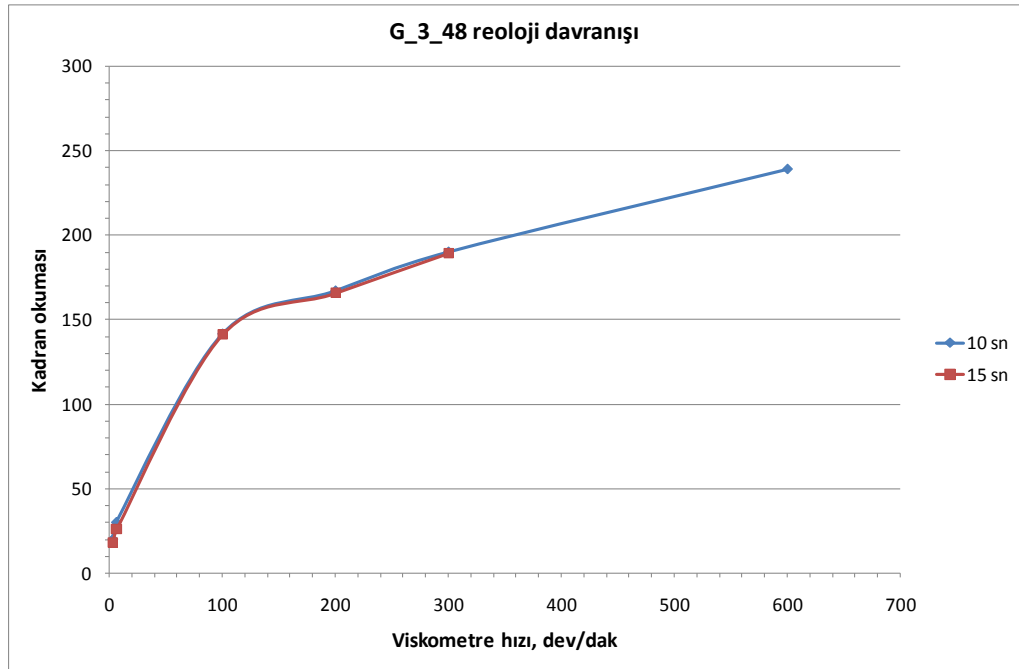
Şekil C.63: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su).



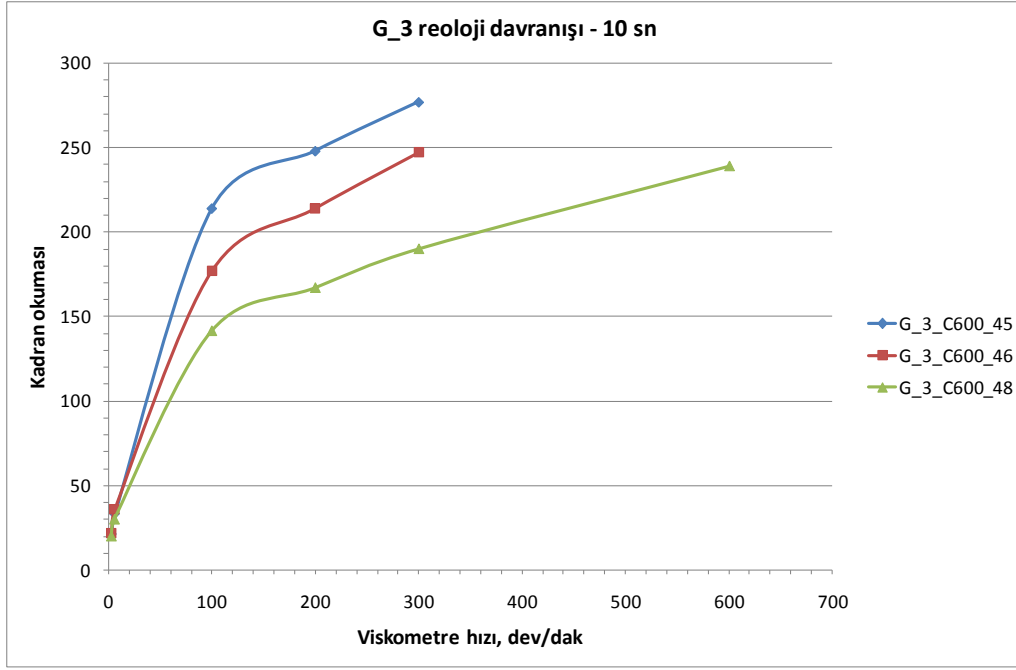
Şekil C.64: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su) – tekrar-1.



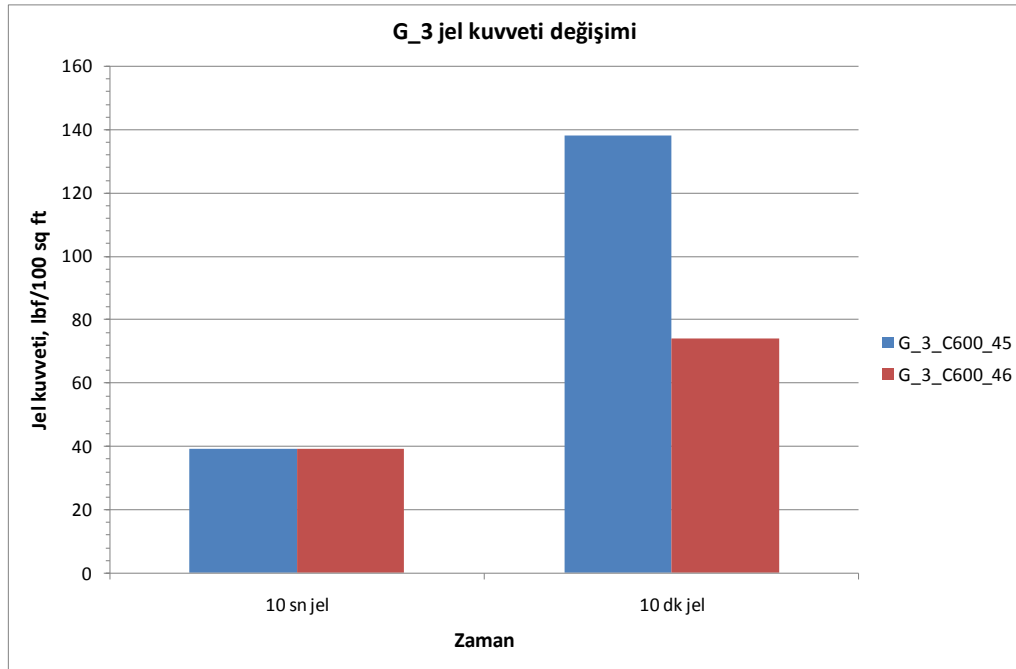
Şekil C.65: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %45 su) – karşılaştırma.



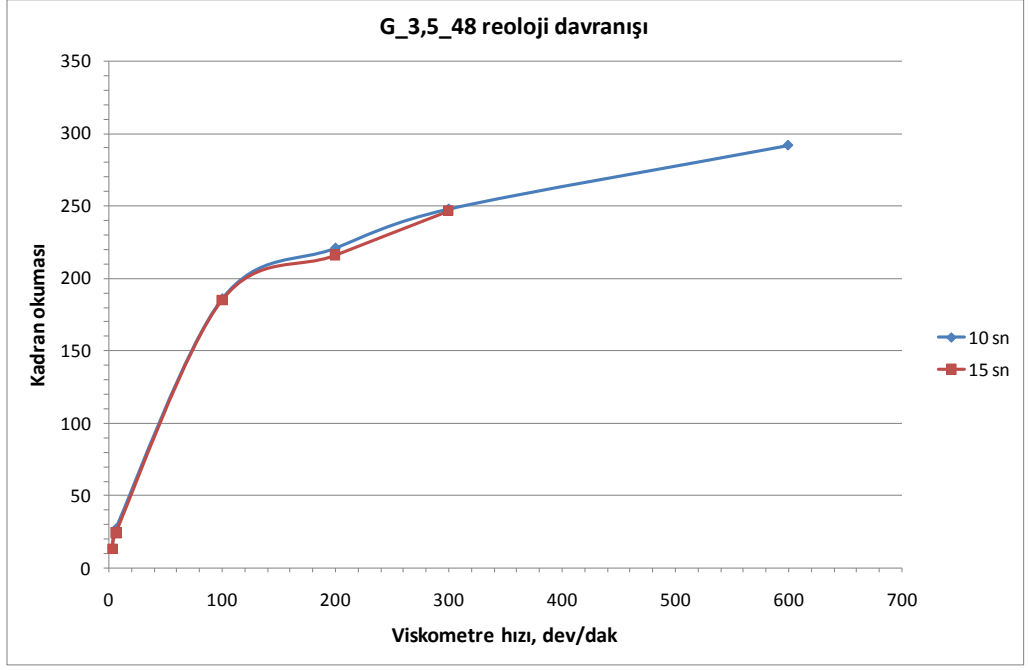
Şekil C.66: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI – %48 su).



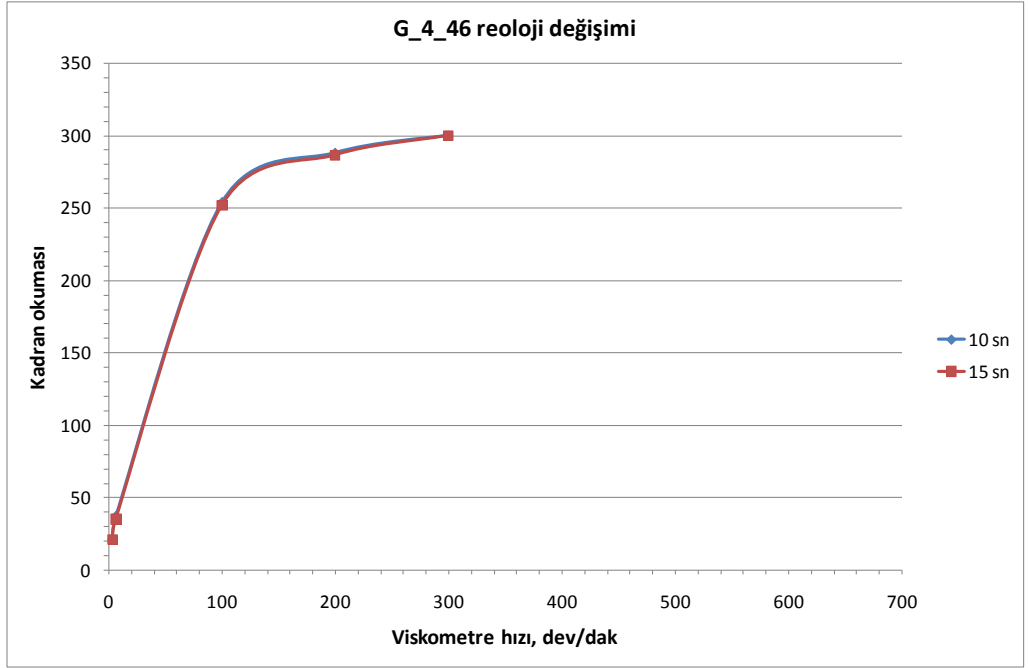
Şekil C.67: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3 ARI) – karşılaştırma.



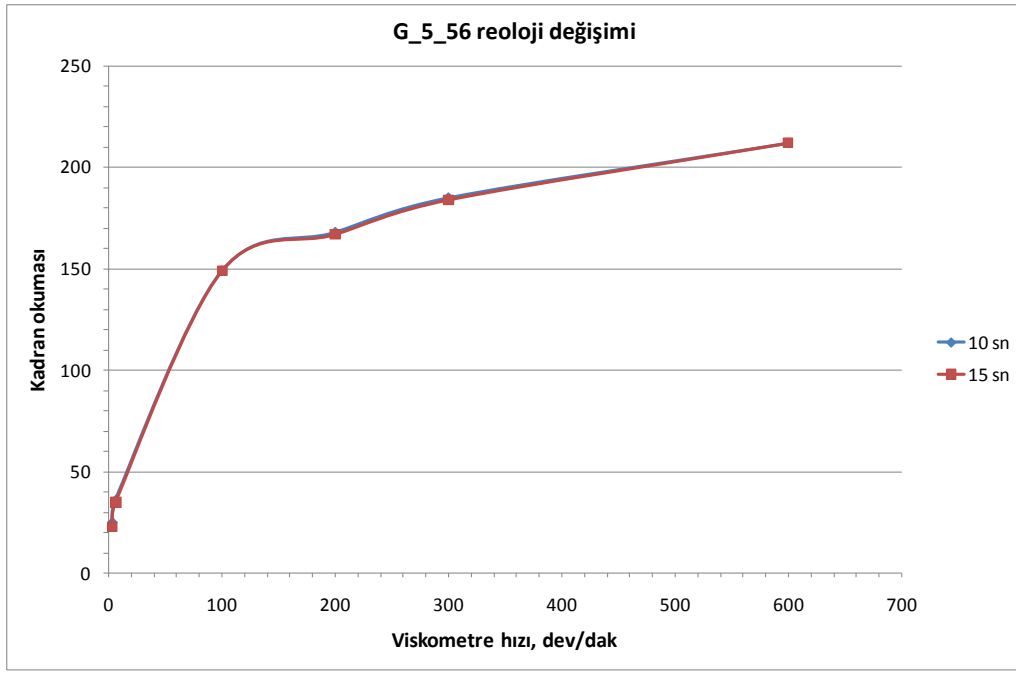
Şekil C.68: G Sınıf çimento jel kuvveti grafiği (%3 ARI) – karşılaştırma.



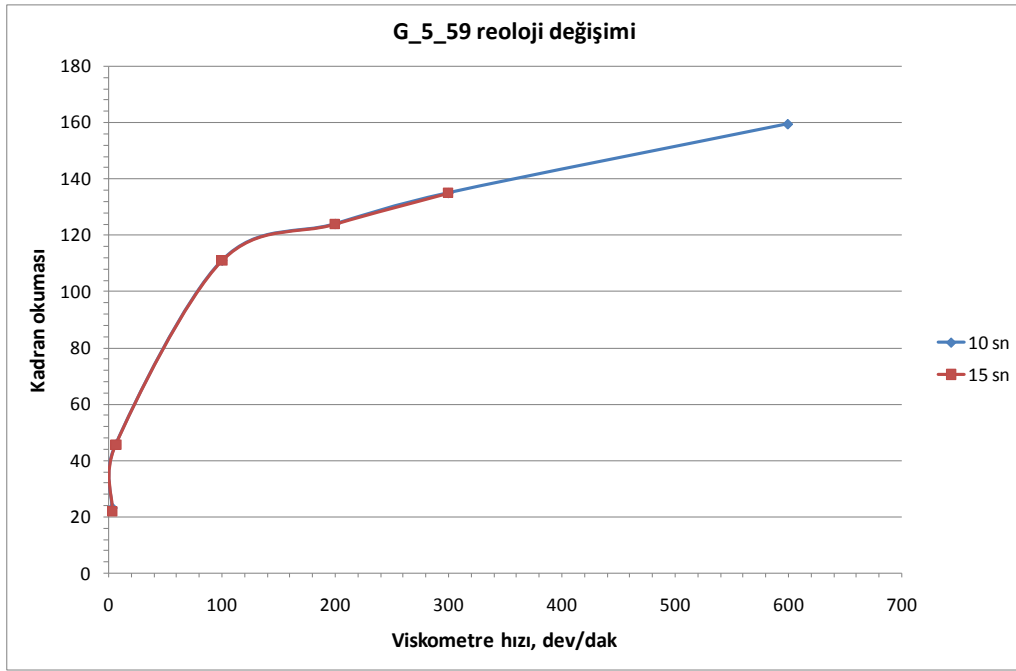
Şekil C.69: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%3,5 ARI – %48 su).



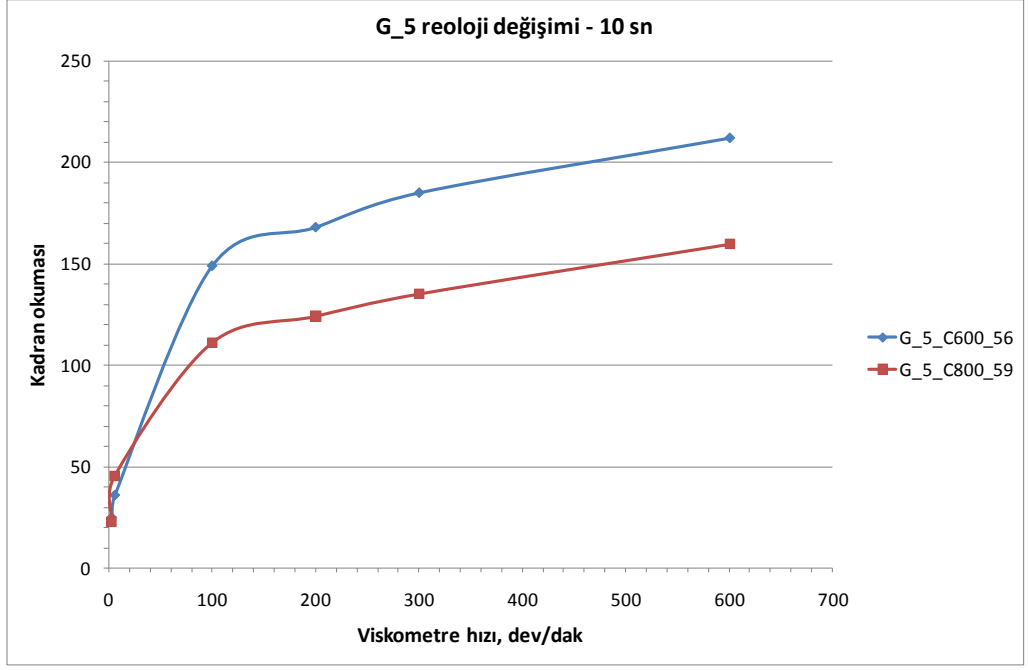
Şekil C.70: G Sınıf çimento reoloji grafiği (%4 ARI – %46 su).



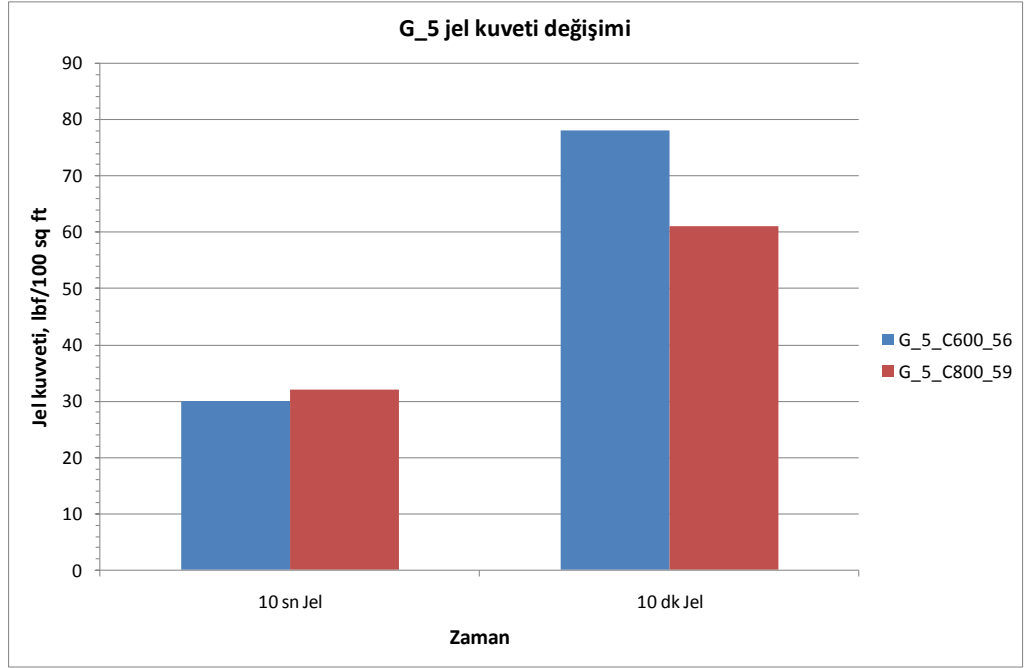
şekil C.71: G Sınıf imento reoloji grafiği (%5 ARI – %56 su).



şekil C.72: G Sınıf imento reoloji grafiği (%5 ARI – %59 su).



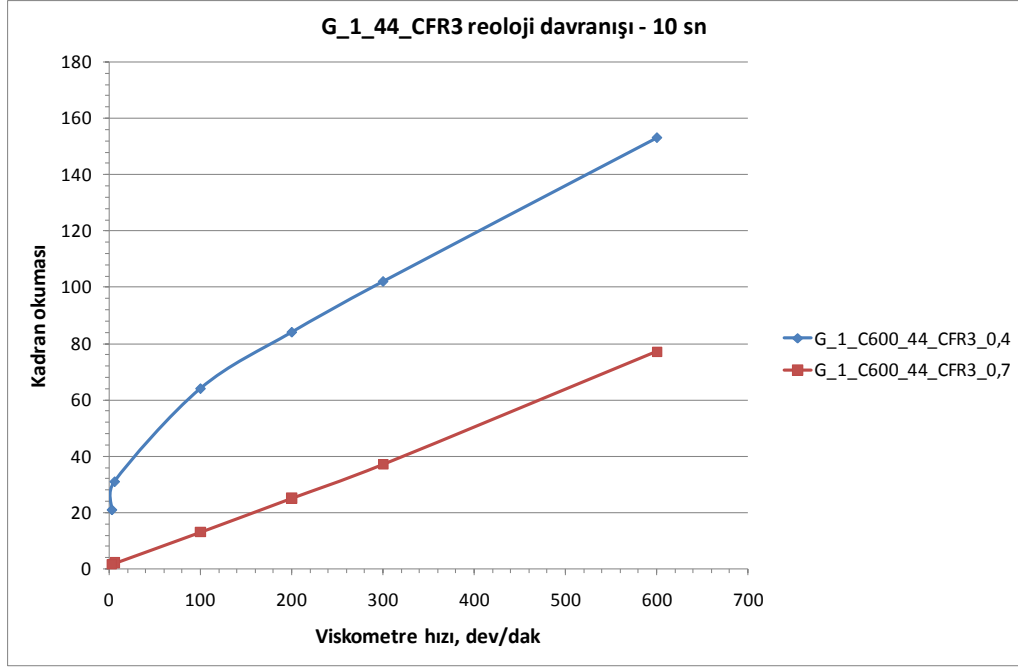
şekil C.73: G Sınıf imento reoloji grafiği (%5 ARI) – karşılaştırma.



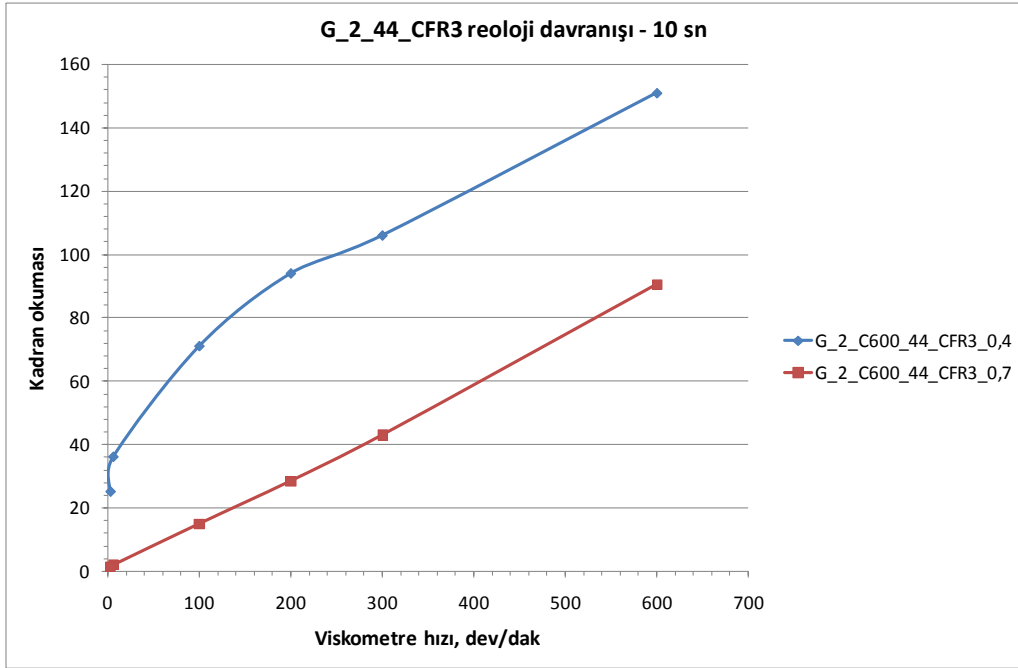
şekil C.74: G Sınıf imento jel kuvveti grafiği (%5 ARI) – karşılaştırma.

Çizelge D.1: ARI ve CFR3 Katkılı G Sınıf çimento reolojisi ölçümleri.

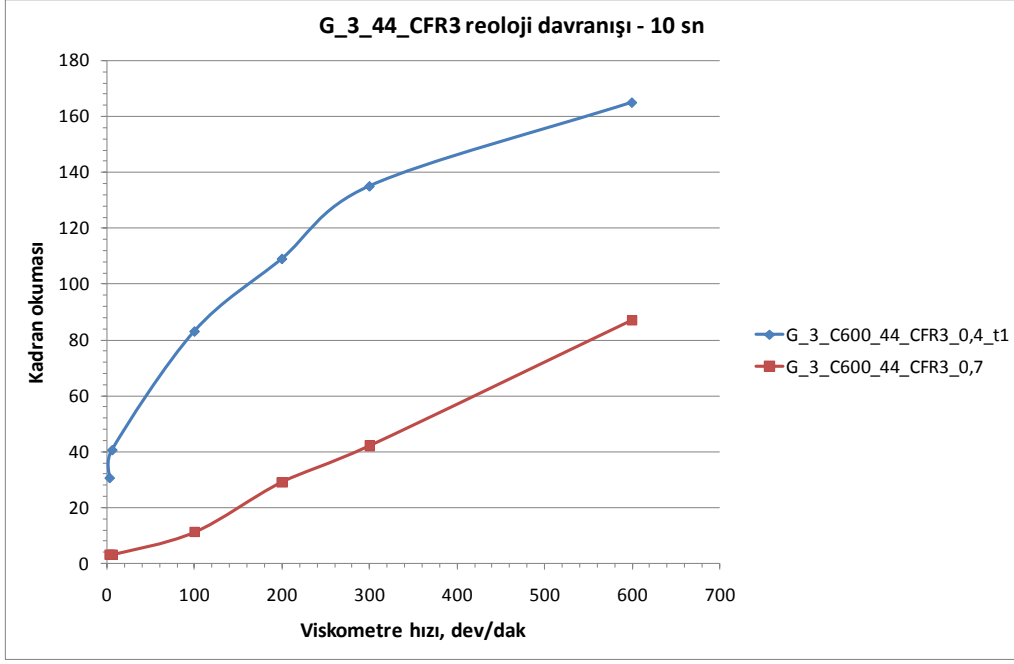
Örnek Kodu	Okuma Değerleri (10sn)						Okuma Değerleri (15sn)					Jel Kuvveti (lb/ft ²)	
	600	300	200	100	6	3	300	200	100	6	3	10 sn	10 dk
G_1_C600_44_CFR3_0,4	153	102	84	64	31	21	101	84	63	30	20	17	22
G_1_C600_44_CFR3_0,7	77	37	25	13	2	1,5	37	24,5	13	2	1,5	2	9
G_2_C600_44_CFR3_0,4	151	106	94	71	36	25	109	94	71	35	24	18	28
G_2_C600_44_CFR3_0,7	90,5	43	28,5	15	2	1,5	43	28,5	15	2	1,5	2	9
G_3_C600_44_CFR3_0,4	165	135	109	83	40,5	30,5	134,5	108,5	83	40	28	21	31
G_3_C600_44_CFR3_0,7	87	42	29	11	3	3	41,5	29,5	11	3	3	6	16
G_4_C600_44_CFR3_0,4	239	171	139	109	47	34	170	137	108	45	32	24	42
G_4_C600_44_CFR3_0,7	84	45	31	17,5	4,5	4	44,5	31,5	17,5	4,5	4	11	16
G_5_C600_44_CFR3_0,4	244	194	169	133	57	40	197	167	130	54	39	29	44
G_5_C600_44_CFR3_0,7	110	61	45	39	11	10,5	61	46	39,5	11	11	17	35



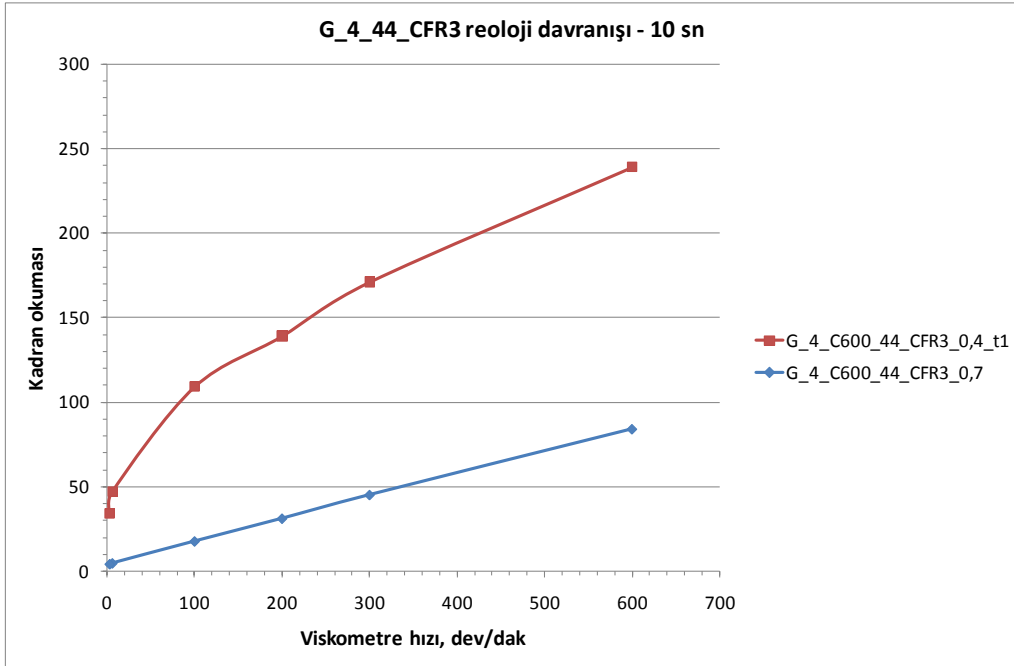
Şekil D.1: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%1 ARI – CFR3).



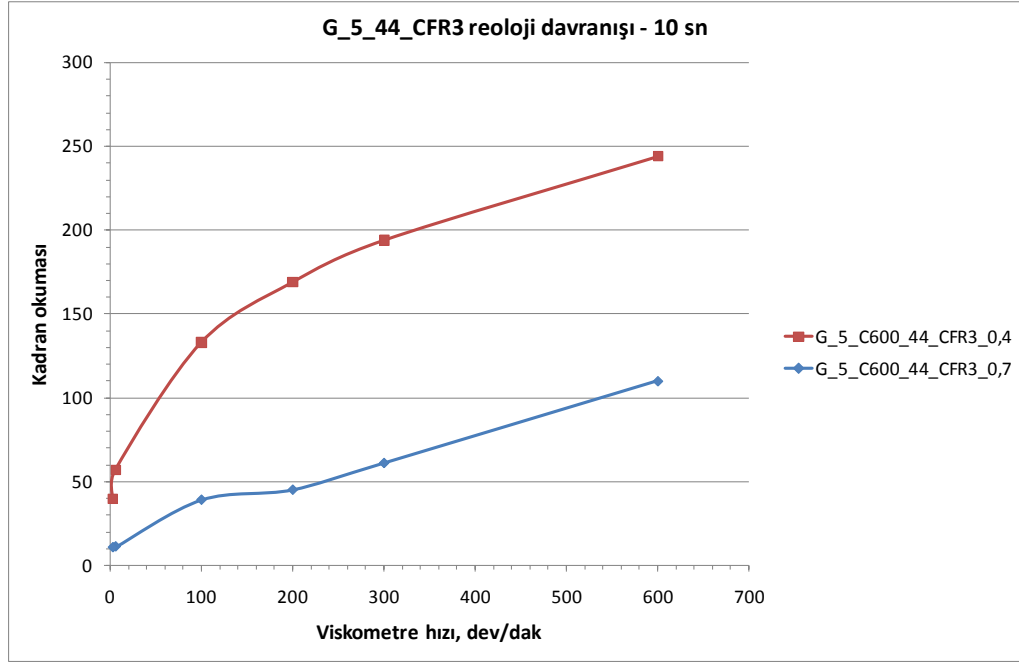
Şekil D.2: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%2 ARI – CFR3).



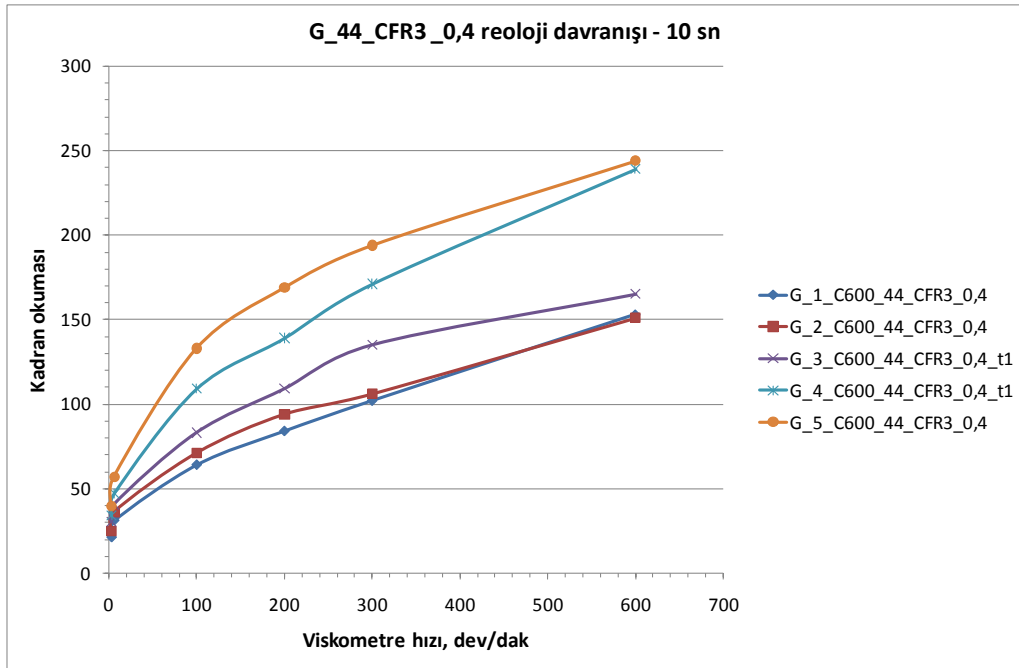
Şekil D.3: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%3 ARI – CFR3).



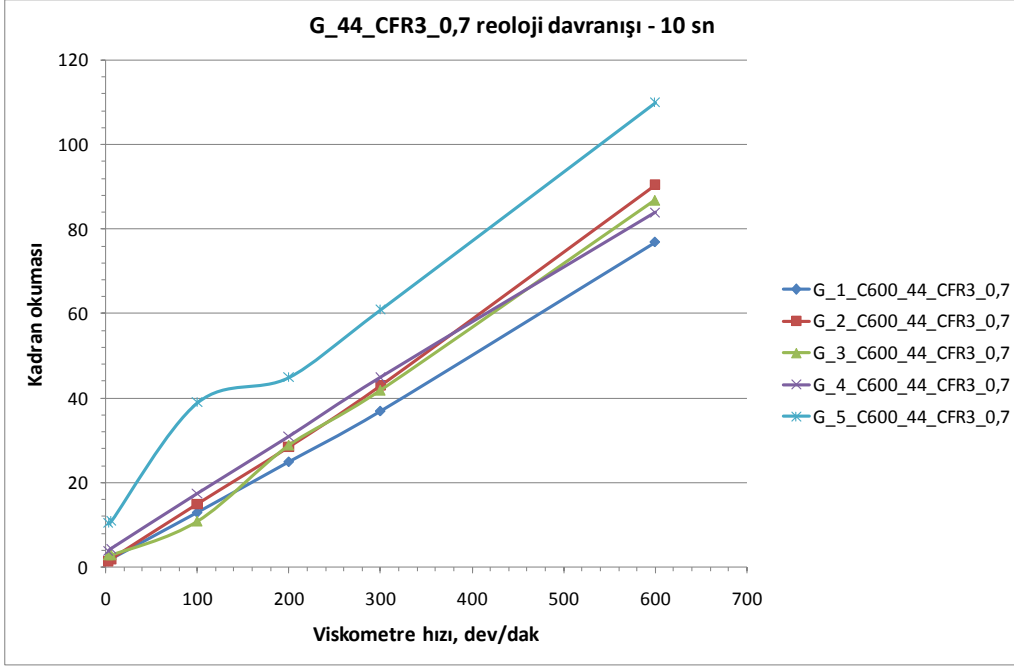
Şekil D.4: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%4 ARI – CFR3).



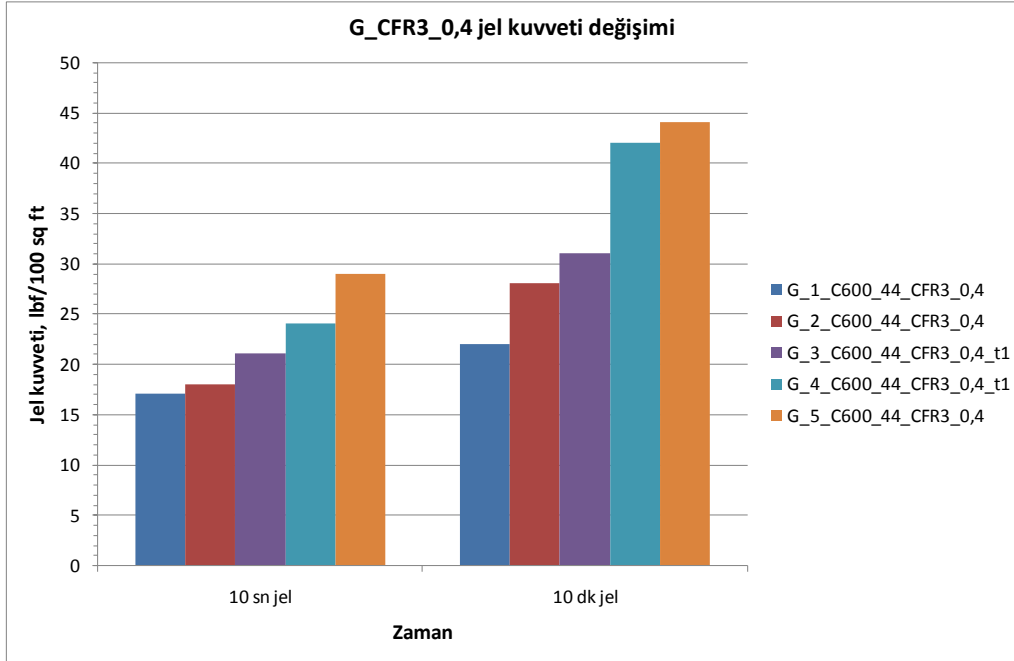
Şekil D.5: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%5 ARI – CFR3).



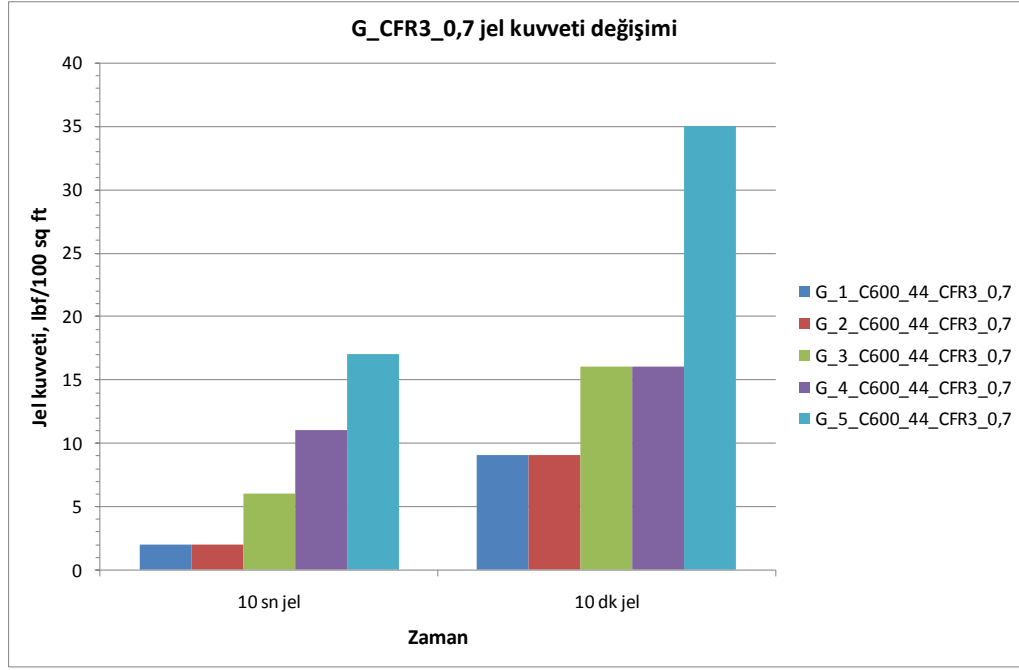
Şekil D.6: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,4 CFR3).



Şekil D.7: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,7 CFR3).



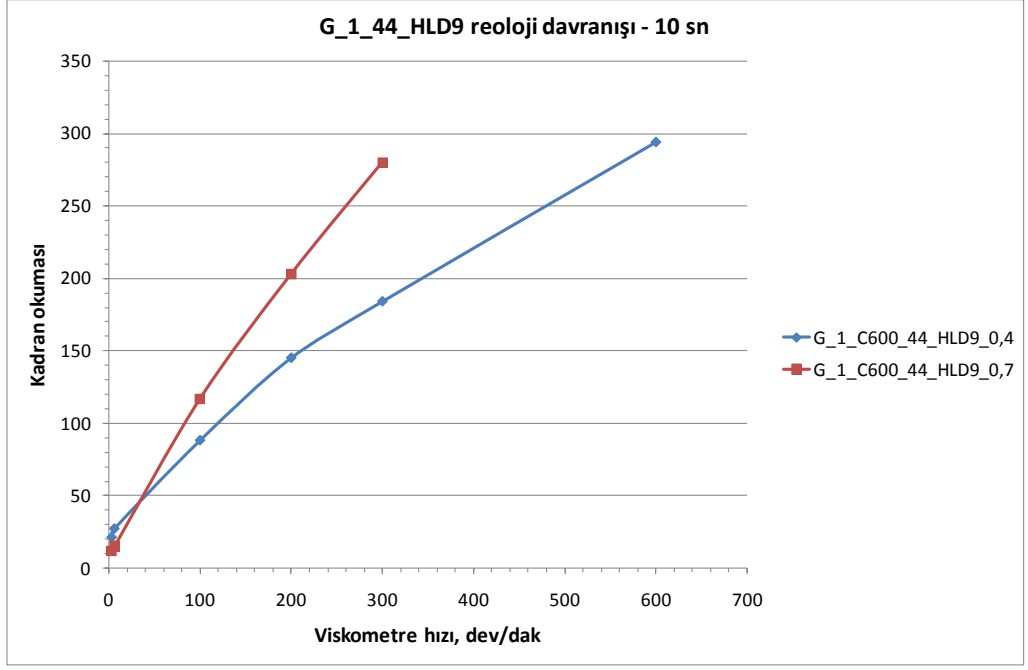
Şekil D.8: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,4 CFR3).



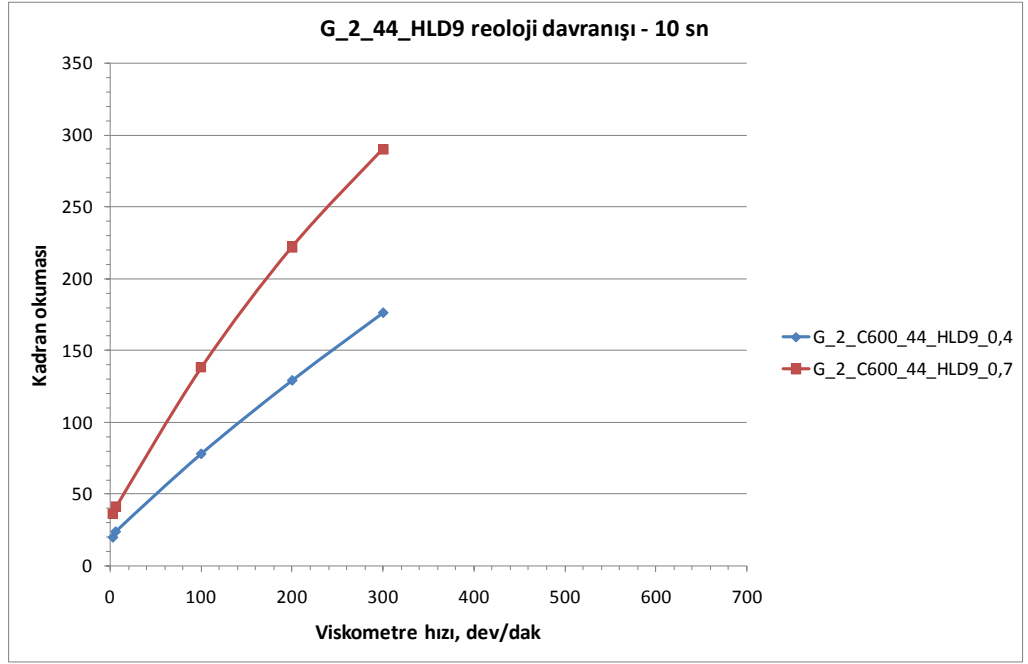
şekil D.9: G Sınıf imento jel kuvveti davranışı (ARI – %0,7 CFR3).

Çizelge D.2: ARI ve HLD9 Katkılı G Sınıf çimento reolojisi ölçümleri.

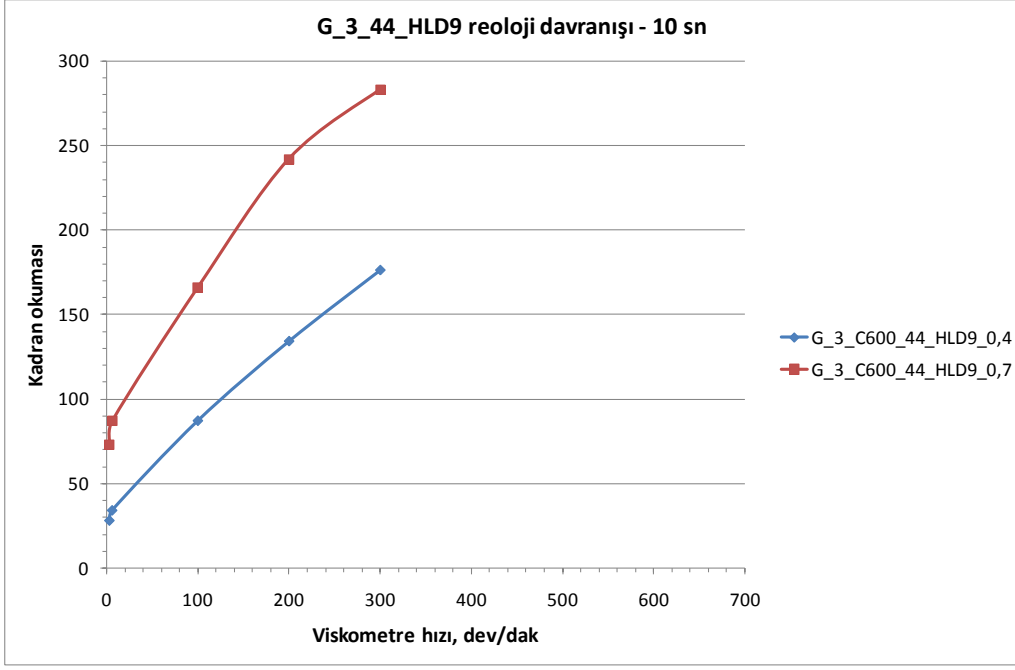
Örnek Kodu	Okuma Değerleri (10sn)						Okuma Değerleri (15sn)					Jel Kuvveti (lb/ft ²)	
	600	300	200	100	6	3	300	200	100	6	3	10 sn	10 dk
G_1_C600_44_HLD9_0,4	294	184	145	88	27	21	184	144	86	26	21	34	63
G_1_C600_44_HLD9_0,7	300+	280	203	117	15	12	279	203	116	15	12	17	44
G_2_C600_44_HLD9_0,4	300+	176	129	78	24	20	176	129	76	24	19	34	66
G_2_C600_44_HLD9_0,7	300+	290	222	138	41	36	292	224	139	41	36	20	77
G_3_C600_44_HLD9_0,4	300+	176	134	87	34	28	177	134	86	33	27	32	63
G_3_C600_44_HLD9_0,7	300+	293	242	166	87	73	292	247	168	84	78	64	127
G_4_C600_44_HLD9_0,4	300+	263	183	121	54	43	252	180	118	53	42	51	104
G_4_C600_44_HLD9_0,7	300+	300+	300+	235	130	126	300+	300+	235	134	125	108	198
G_5_C600_44_HLD9_0,4	300+	229	198	157	70	61	234	200	154	69	58	61	112
G_5_C600_44_HLD9_0,7	300+	300+	300+	256	171	157	300+	300+	259	174	159	121	205



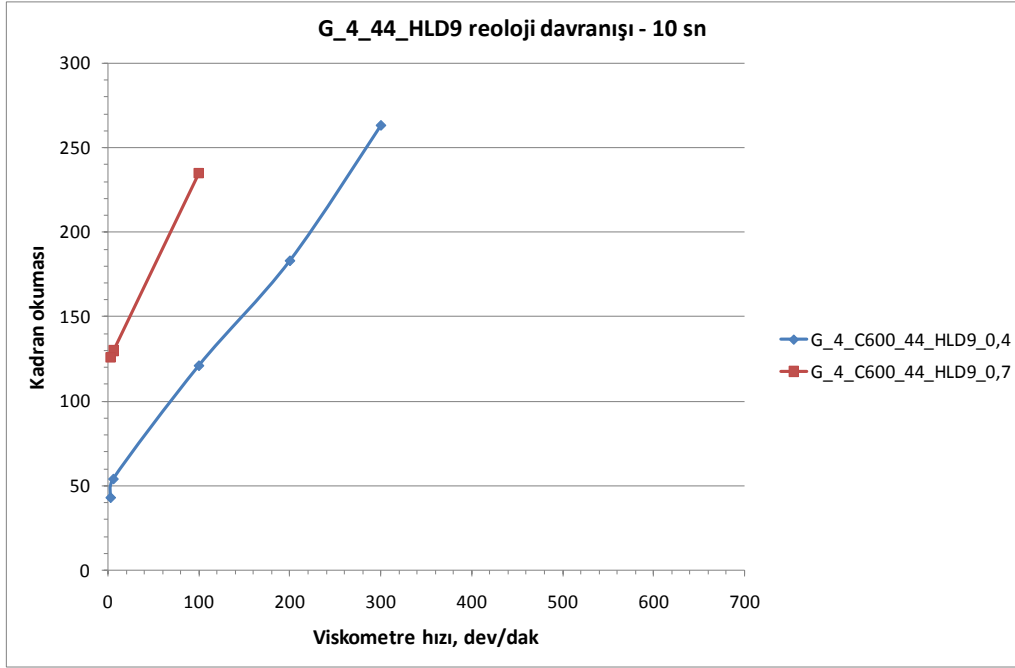
Şekil D.10: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%1 ARI – HLD9).



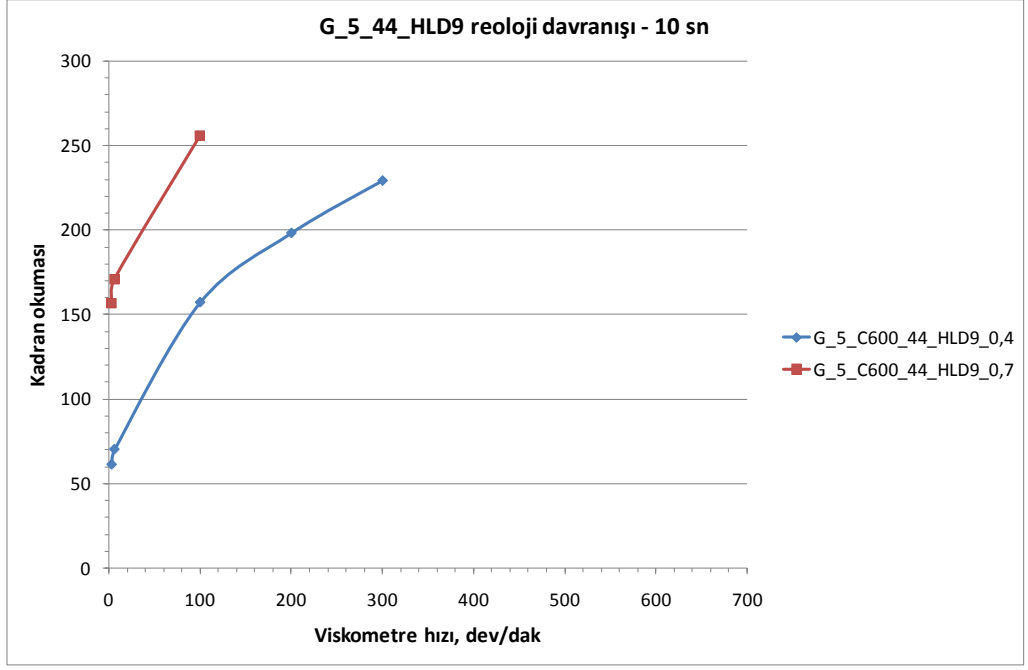
Şekil D.11: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%2 ARI – HLD9).



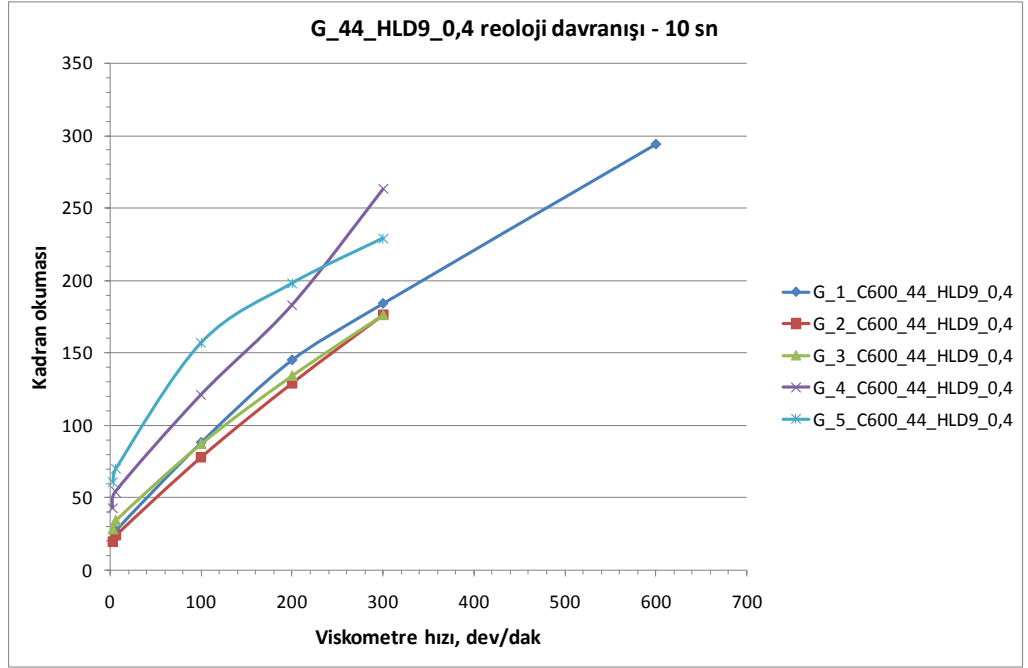
Şekil D.12: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%3 ARI – HLD9).



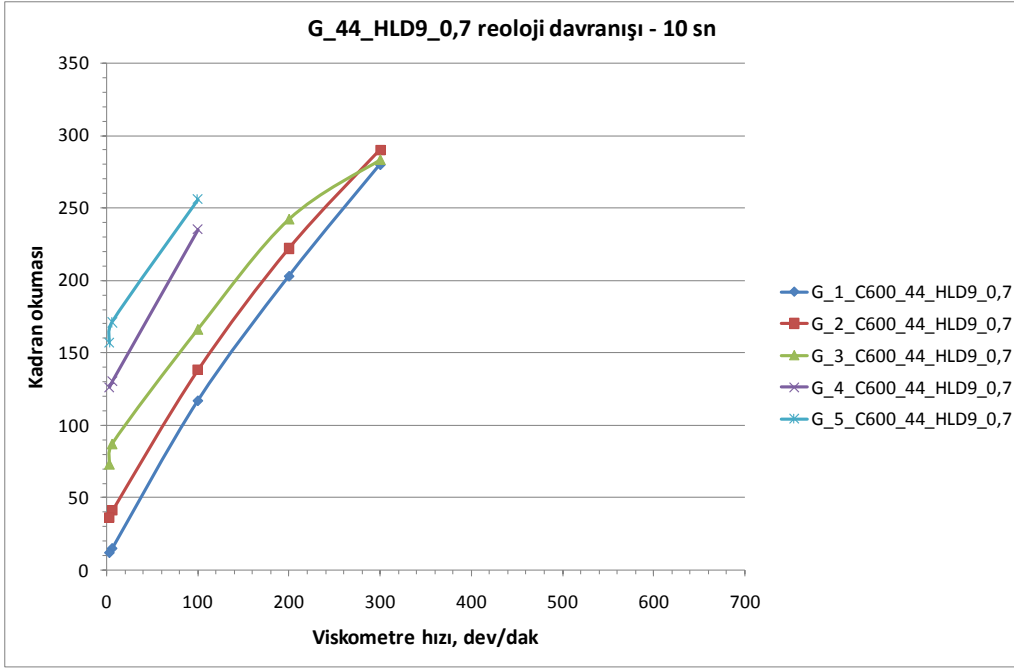
Şekil D.13: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%4 ARI – HLD9).



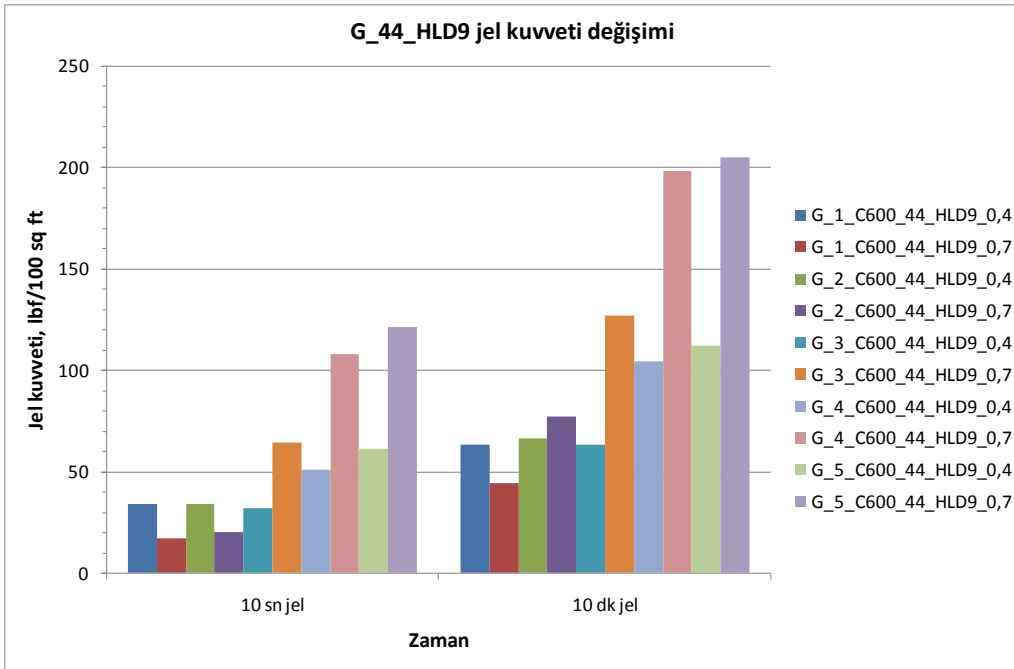
Şekil D.14: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%5 ARI – HLD9).



Şekil D.15: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,4 HLD9).



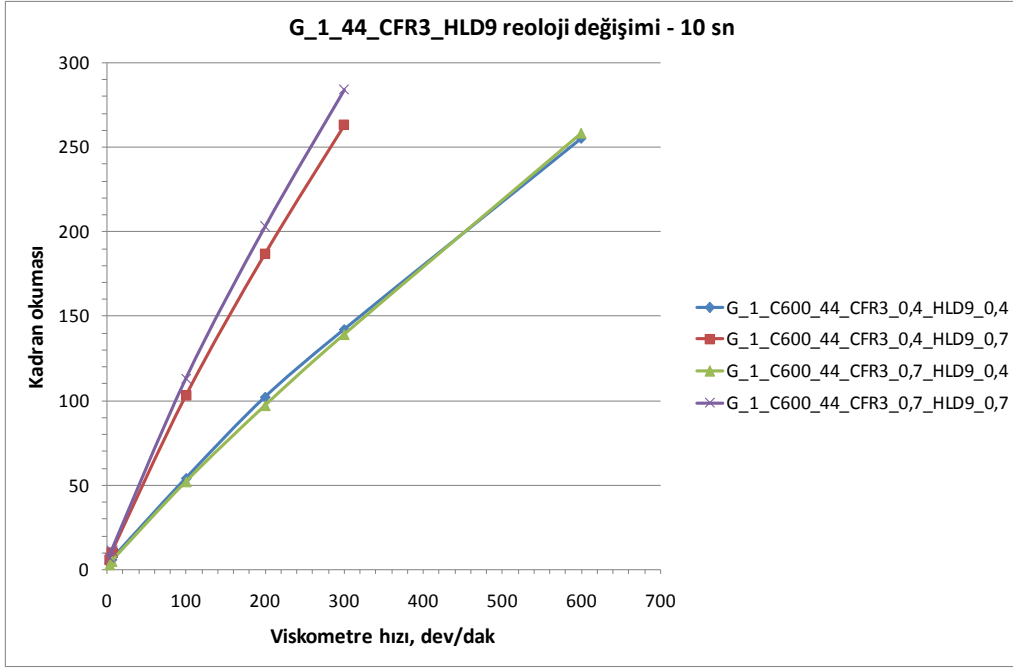
Şekil D.16: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – %0,7 HLD9).



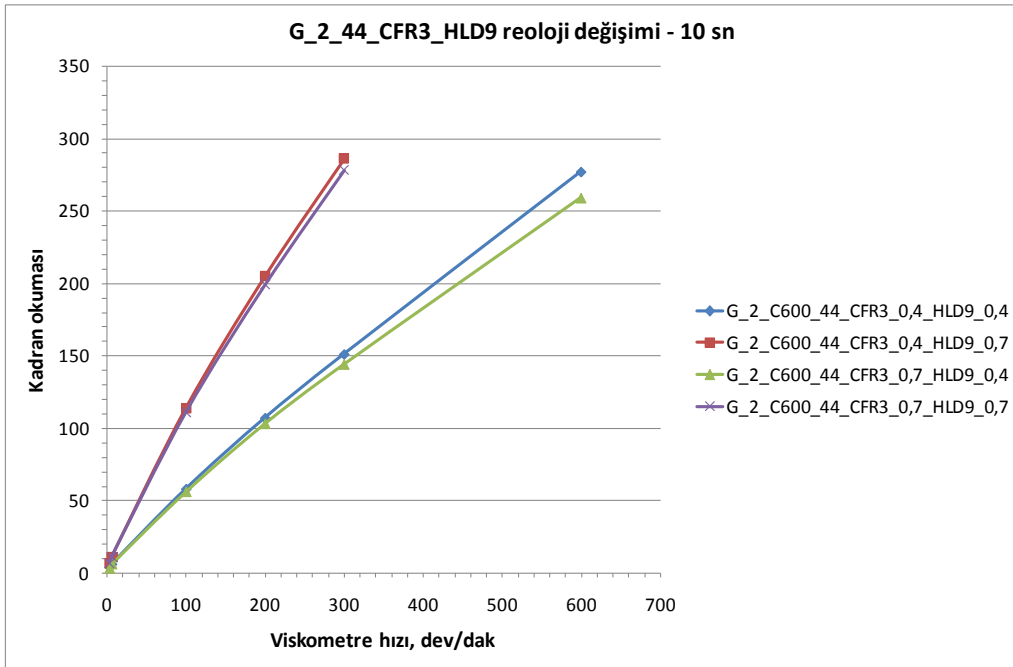
Şekil D.17: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı (ARI – HLD9).

Çizelge E.1: ARI, CFR3 ve HLD9 katkılı G Sınıf çimento reolojisi ölçümleri.

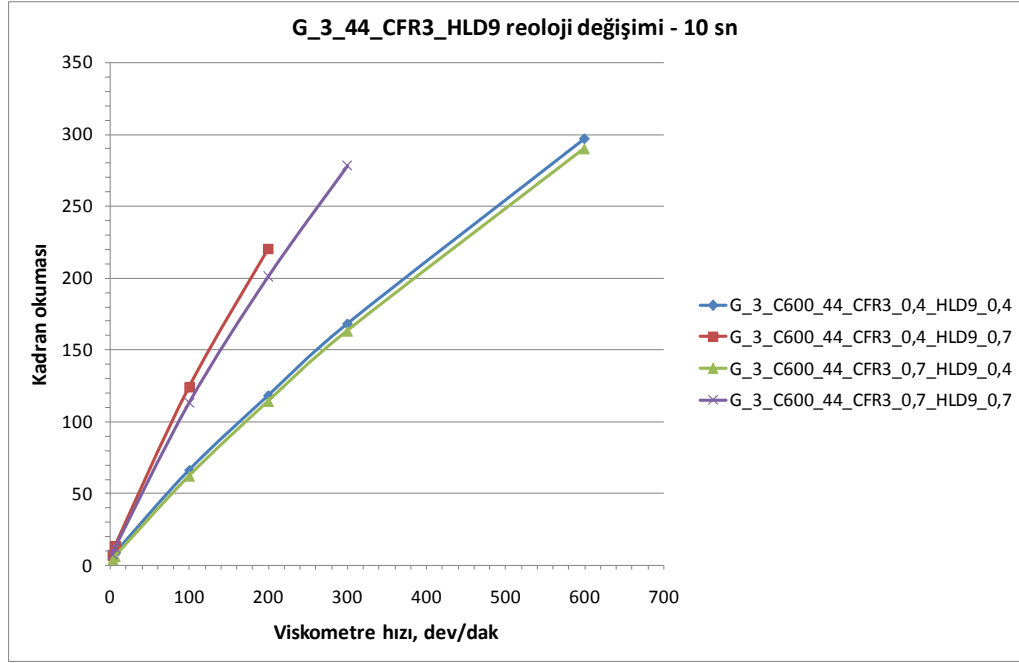
Örnek Kodu	Okuma Değerleri (10sn)						Okuma Değerleri (15sn)					Jel Kuvveti (lb/ft ²)	
	600	300	200	100	6	3	300	200	100	6	3	10 sn	10 dk
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	255	142	102	54	6	3,5	146	100	54	5	3,5	6	20
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	300+	263	187	103	10	6	261	187	103	9	6	11	26
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	258	139	97	52	5	3	138	97	52	5	3	5	16
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	300+	284	203	113	11	7	284	202	113	11	7	10	27
G_2_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	277	151	107	58	6	4	152	107	57	6	4	6	26
G_2_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	300+	286	205	114	11	7	286	204	114	11	7	12	29
G_2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	259	144	103	56	6	3	146	102	55	6	3	4	18
G_2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	300+	278	199	111	11	7	276	198	111	11	7	10	26
G_3_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	297	168	118	66	8	6	168	118	66	8	6	8	41
G_3_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	300+	300+	220	124	13	7	300+	220	124	13	7	13	35
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	290	163	114	62	6	4	165	114	62	6	4	6	24
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	300+	278	201	113	11,5	7,5	278	200	113	11,5	7,5	10	27
G_4_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	300+	185	132	75	11	9	184	132	75	11	9	12	53
G_4_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	300+	286	209	119	14	9	288	209	119	14	9	13	44
G_4_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	260	149	106	59	6	4	152	106	59	6	4	8	21



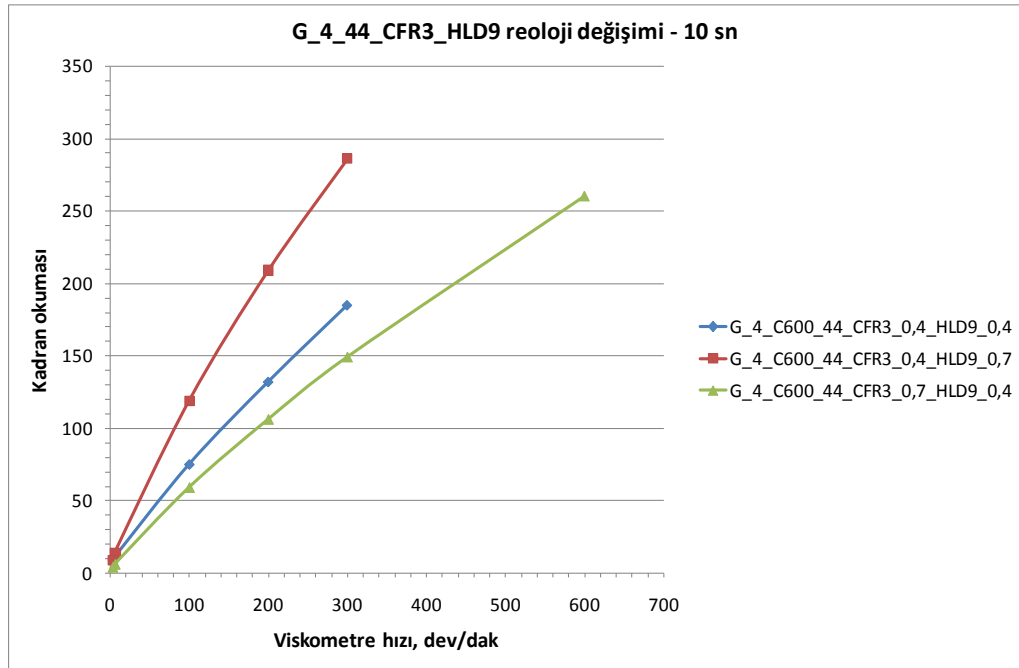
şekil E.1: G Sınıf imento reolojisi davranışı (%1 ARI – CFR3-HLD9).



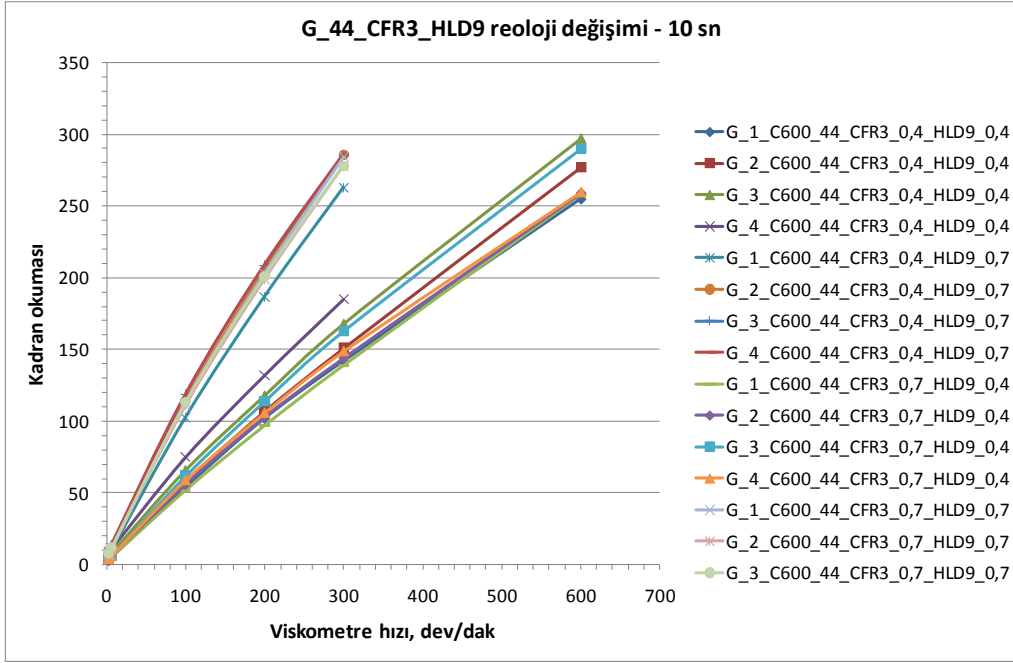
şekil E.2: G Sınıf imento reolojisi davranışı (%2 ARI – CFR3-HLD9).



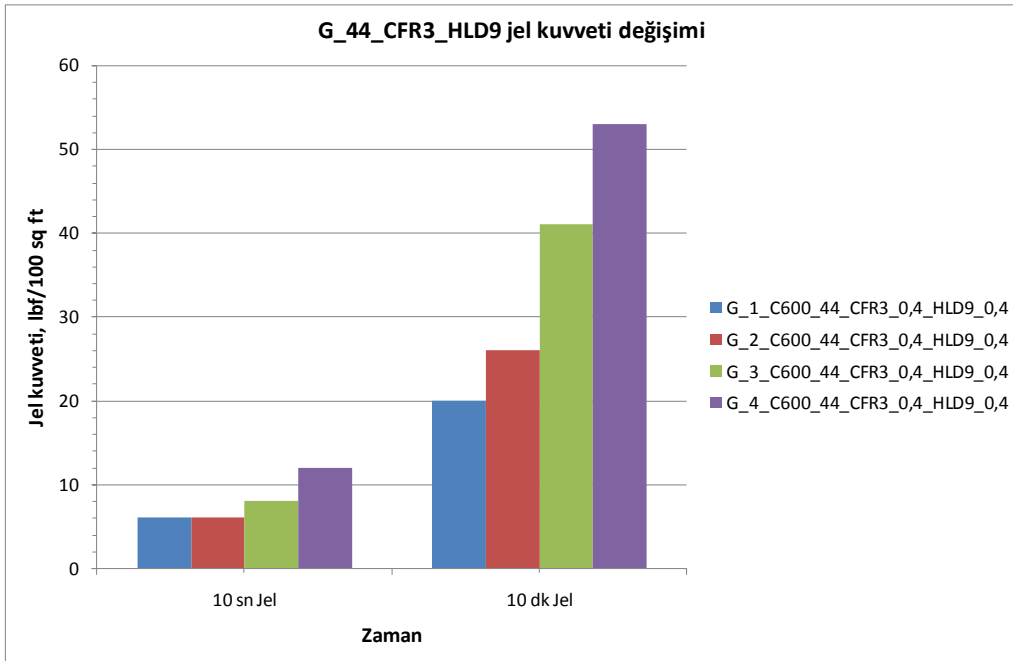
şekil E.3: G Sınıf imento reolojisi davranışı (%3 ARI – CFR3-HLD9).



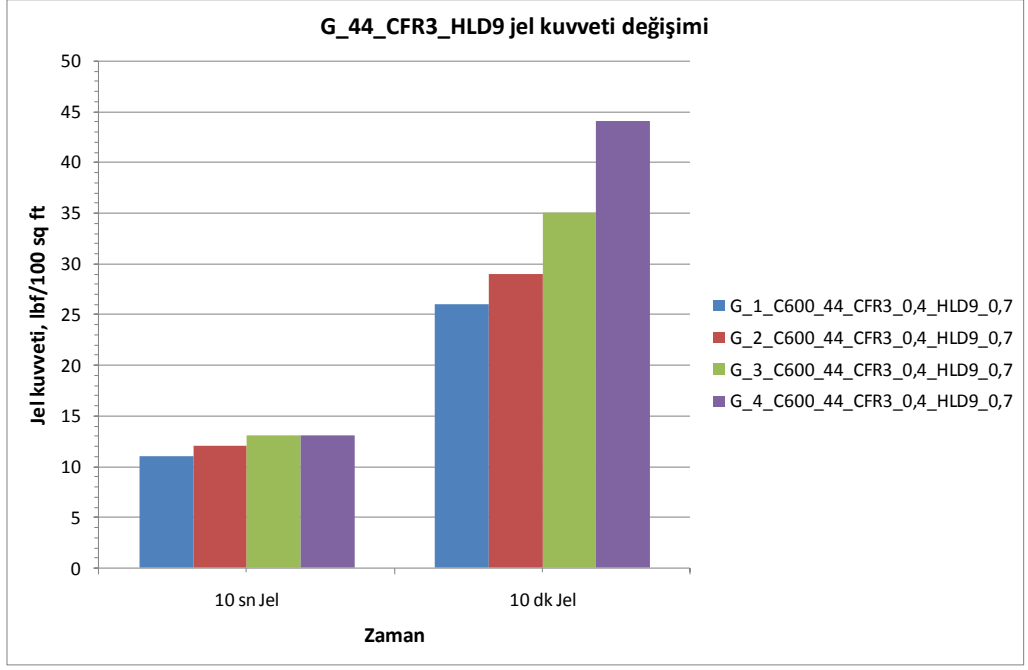
şekil E.4: G Sınıf imento reolojisi davranışı (%4 ARI – CFR3-HLD9).



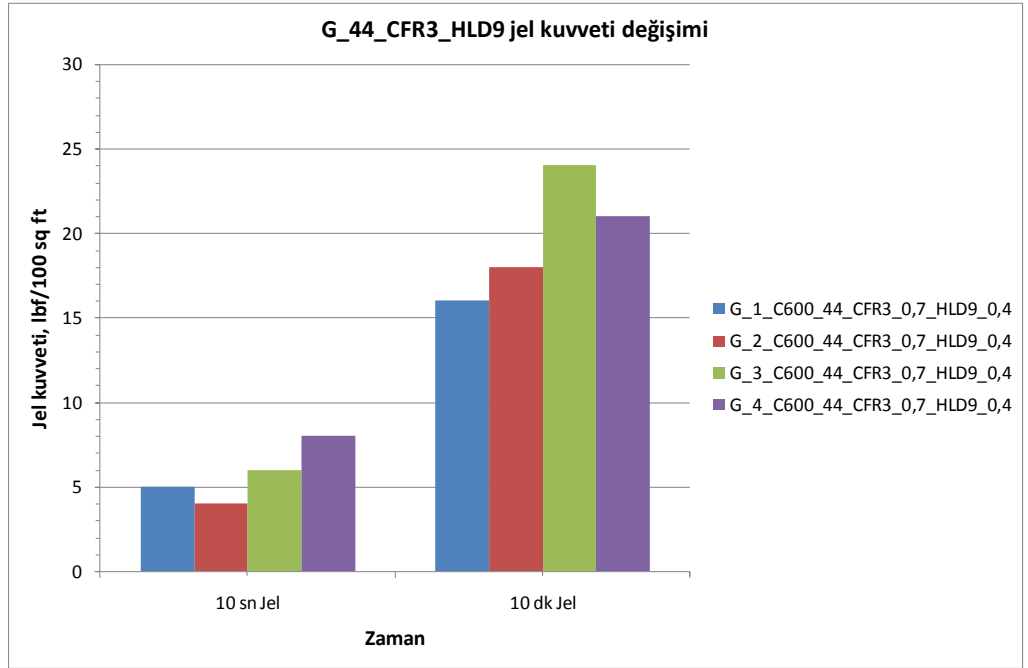
Şekil E.5: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (ARI – CFR3-HLD9).



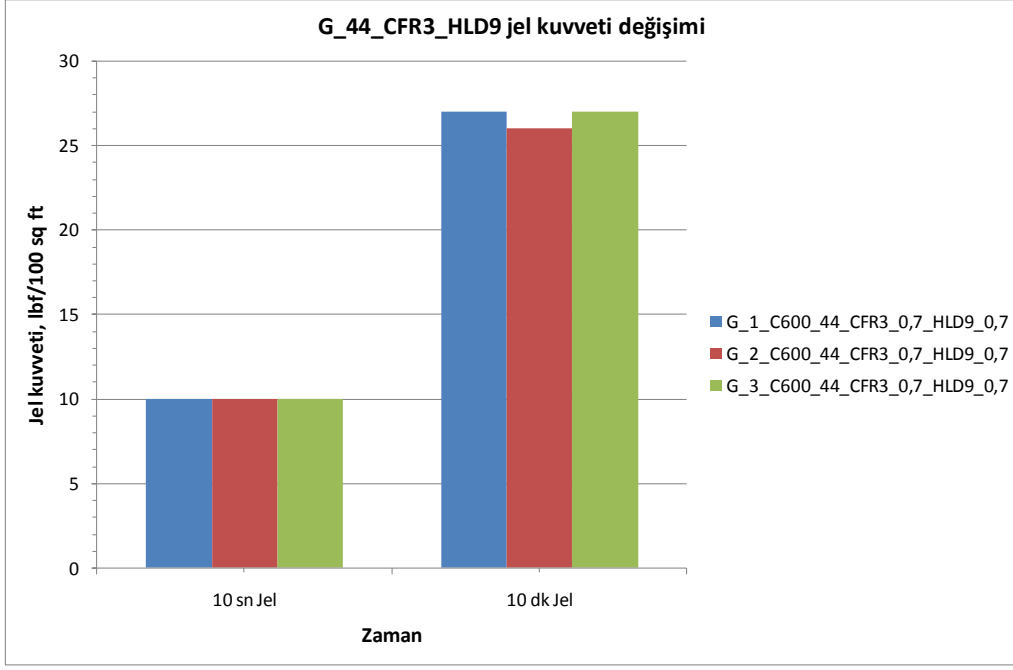
Şekil E.6: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı
(ARI – %0,4 CFR3 - %0,4 HLD9).



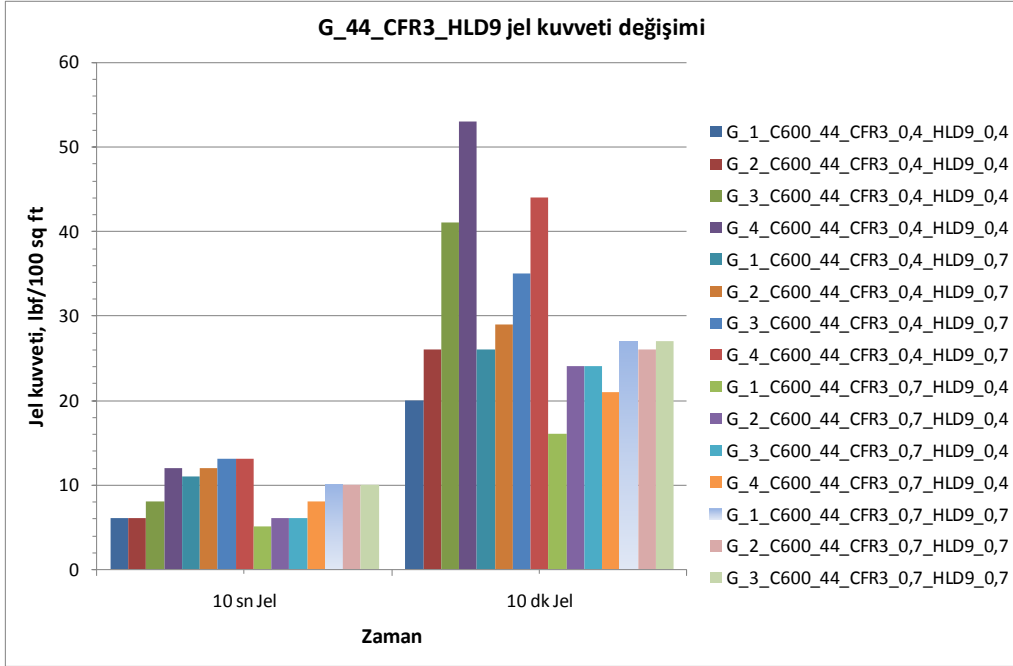
şekil E.7: G Sınıf imento jel kuvveti davranışı
(ARI – %0,4 CFR3 - %0,7 HLD9).



şekil E.8: G Sınıf imento jel kuvveti davranışı
(ARI – %0,7 CFR3 - %0,4 HLD9).



Şekil E.9: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı
(ARI – %0,7 CFR3 - %0,7 HLD9).



Şekil E.10: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı —(ARI– CFR3-HLD9).

Çizelge E.2: Değişik oranlarda ARI, CFR3 ve HLD9 Katkılı G Sınıf çimento reolojisi ölçümleri.

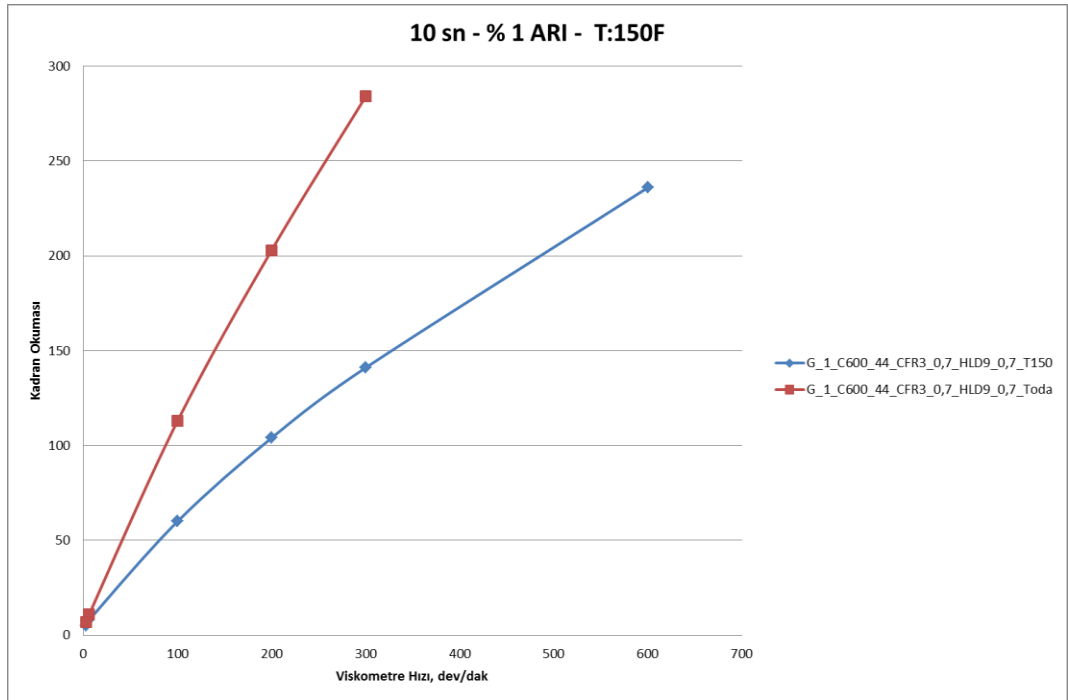
Örnek Kodu	Okuma Değerleri (10sn)						Okuma Değerleri (15sn)					Jel Kuvveti (lb/ft ²)	
	600	300	200	100	6	3	300	200	100	6	3	10 sn	10 dk
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_1,0	300+	300+	300+	250	40	31	300+	300+	250	43	33	37	89
G_1_C600_44_CFR3_0,5_HLD9_0,6	300+	211	154	91	11	8	209	151	87	12	7	8	19
G_1_C600_44_CFR3_0,6_HLD9_0,6	300+	195	154	89	10	7	195	150	87	10	7	1	78
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,5	287	168	124	72	9	5	165	121	68	8	5	8	23
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,6	300+	219	160	94	12	8	217	157	90	11	7	8	24
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7_T150	236	141	104	60	8	5	138	100	56	7	4	6	14
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_1,0	300+	300+	300+	234	41	29	300+	300+	234	41	29	28	63
G_1_C600_44_CFR3_1,0_HLD9_1,0	300+	300+	300+	256	47	36	300+	300+	253	47	36	32	71
G_2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,5	300+	181	134	79	11	7	177	130	76	10	7	9	30
G_2_C600_44_CFR3_0,8_HLD9_0,5	300+	178	131	76	9	6	173	128	74	9	6	7	21
G_2_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,5	293	171	126	74	9	6	169	124	71	9	6	7	23
G_2_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,5_T150	124	68	50	27	4	2	66	46	25	3	2	4	7
G_2_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,7_T150	220	130	96	56	8	3	126	98	53	7	5	7	15
G_2_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,9_T150	275	165	121	73	10	7	164	118	68	9	7	8	17
G_2_C600_44_CFR3_1,0_HLD9_0,5	294	173	126	73	8	5	171	123	71	8	5	7	21
G_2_C600_44_CFR3_1,0_HLD9_0,6	300+	205	153	90	12	8	202	149	86	12	8	8	23

Çizelge E.2 (devam): Değişik oranlarda ARI, CFR3 ve HLD9 Katkılı G Sınıf çimento reolojisi ölçümleri.

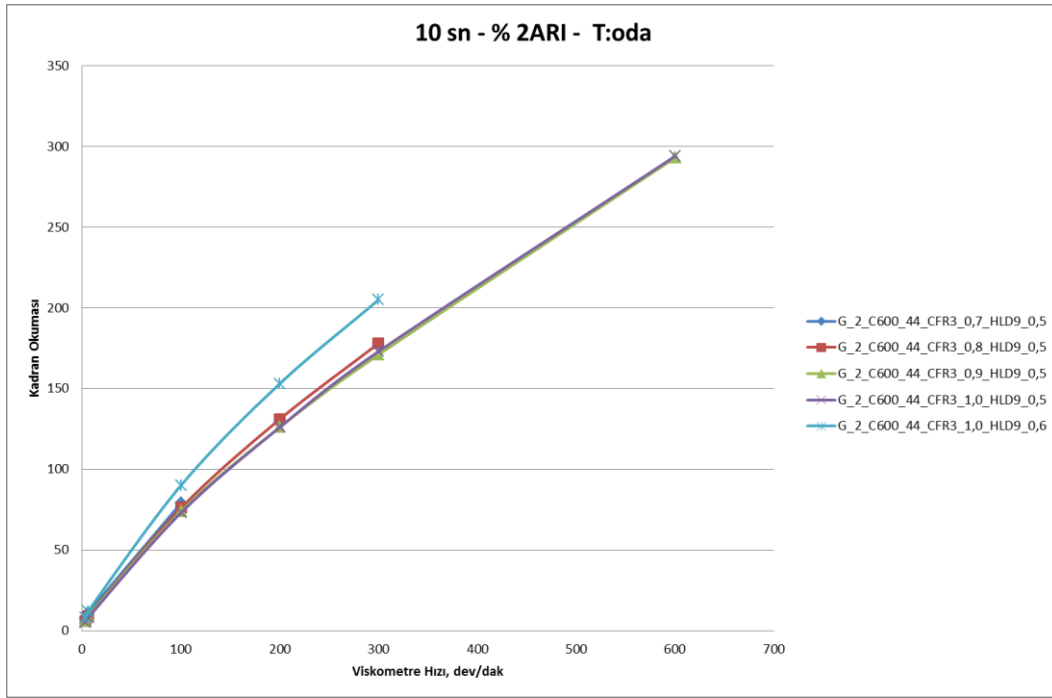
Örnek Kodu	Okuma Değerleri (10sn)						Okuma Değerleri (15sn)					Jel Kuvveti (lb/ft ²)	
	600	300	200	100	6	3	300	200	100	6	3	10 sn	10 dk
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,5	239	145	107	62	9	6	141	103	60	9	6	7	29
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,8_T150	277	172	129	78	11	8	167	126	74	11	8	9	23
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,9_T150	294	180	132	81	11	9	176	127	76	11	8	8	23
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,55	255	149	111	66	8	5	146	108	64	8	5	6	18
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,55_T150	170	99	73	42	5	3	96	68	39	5	3	4	13
G_3_C600_44_CFR3_0,8_HLD9_0,6	300+	191	144	86	12	8	186	141	84	12	8	9	34
G_3_C600_44_CFR3_0,8_HLD9_0,95_T150	300+	208	156	94	15	10	208	153	90	15	10	10	25
G_3_C600_44_CFR3_0,8_HLD9_1,0_T150	300+	206	155	94	13	9	204	151	91	13	9	10	24
G_3_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,6	294	176	131	78	11	7	173	127	74	11	7	8	26
G_3_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,6_t1	300+	197	148	89	13	9	195	146	86	12	9	9	37
G_3_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,95_T150	300+	206	156	94	14	8	204	152	88	14	8	9	25
G_3_C600_44_CFR3_1,0_HLD9_0,6	300+	217	162	97	13	10	216	159	96	13	10	9	37
G_3_C600_44_CFR3_1,0_HLD9_0,6_t1	300+	206	154	94	16	11	204	151	90	16	11	10	42
G_3_C600_44_CFR3_1,1_HLD9_0,6	300+	210	156	93	12	9	206	156	91	12	9	10	36
G_3_C600_48_CFR3_0,8_HLD9_1,0_T150	254	151	112	68	9	6	148	109	63	8	5	6	14
G_4_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4_T150	130	77	57	35	6	4	74	54	32	6	4	5	34
G_4_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7_T150	242	151	115	71	34	11	146	111	67	12	10	9	49
G_4_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,8_T150	274	172	131	84	18	15	169	128	80	18	15	13	66



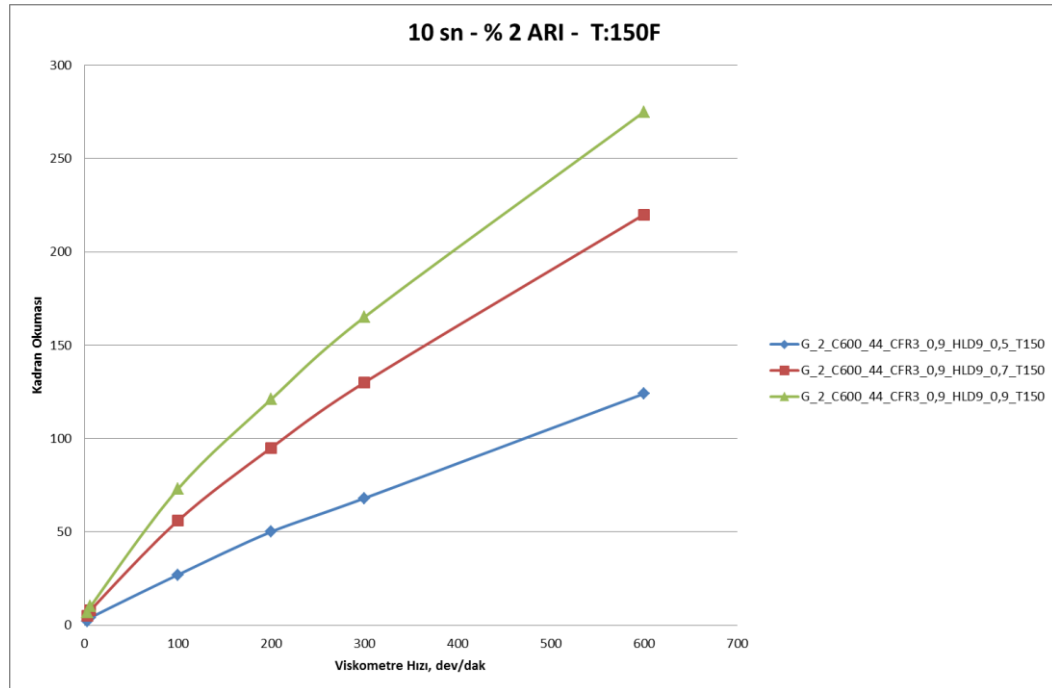
Şekil E.11: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%1 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda).



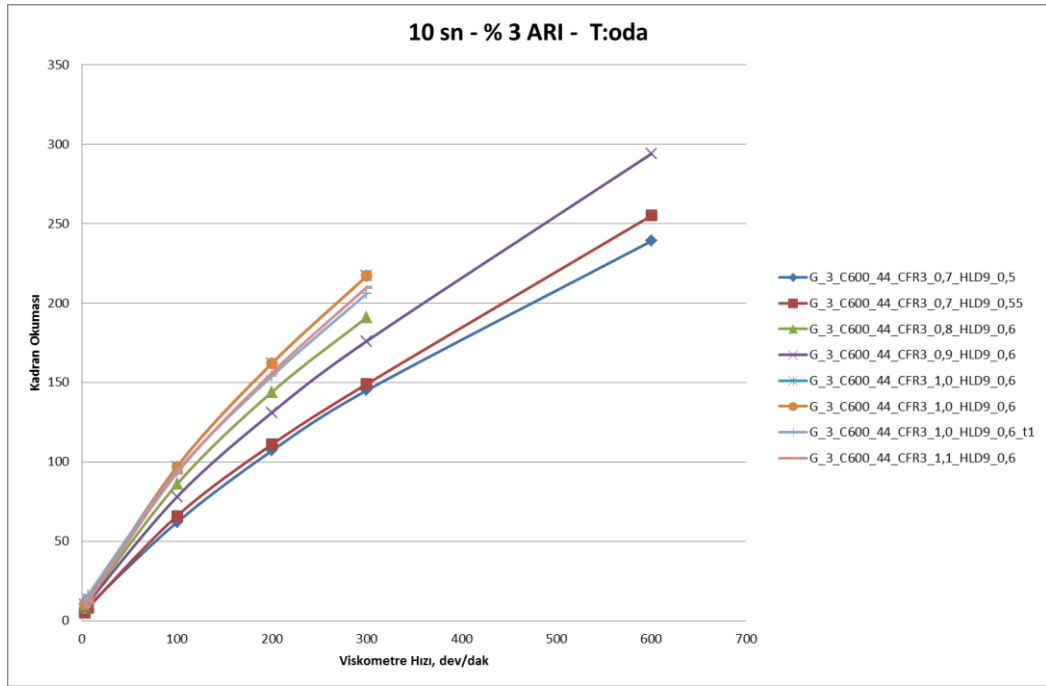
Şekil E12: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%1 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F).



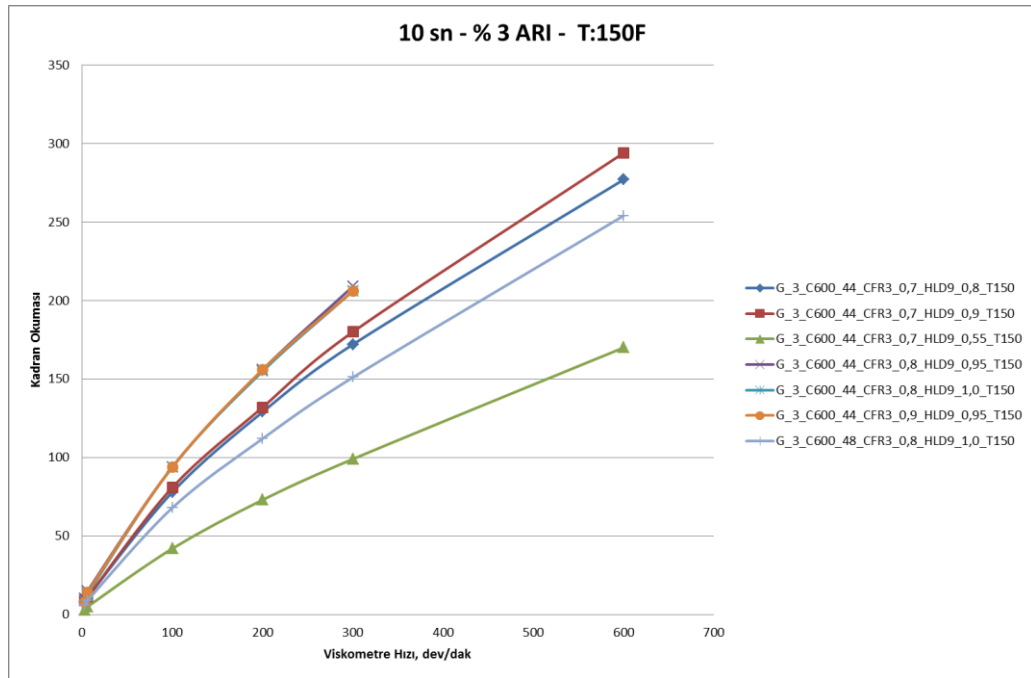
Şekil E.13: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%2 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda).



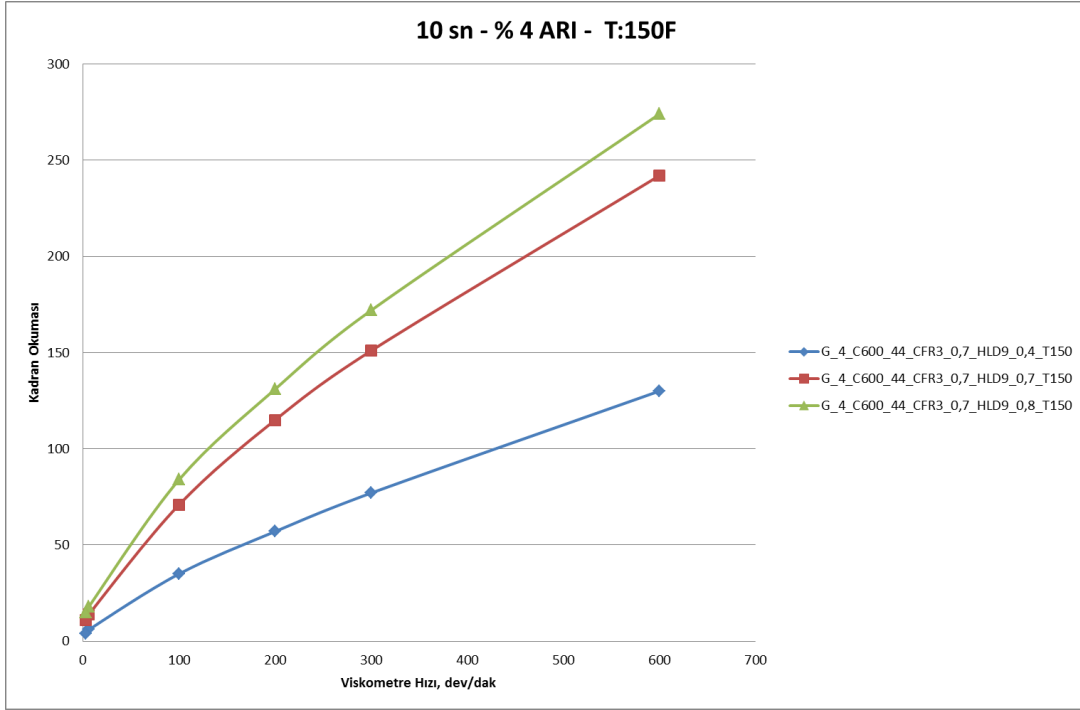
Şekil E.14: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%2 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F).



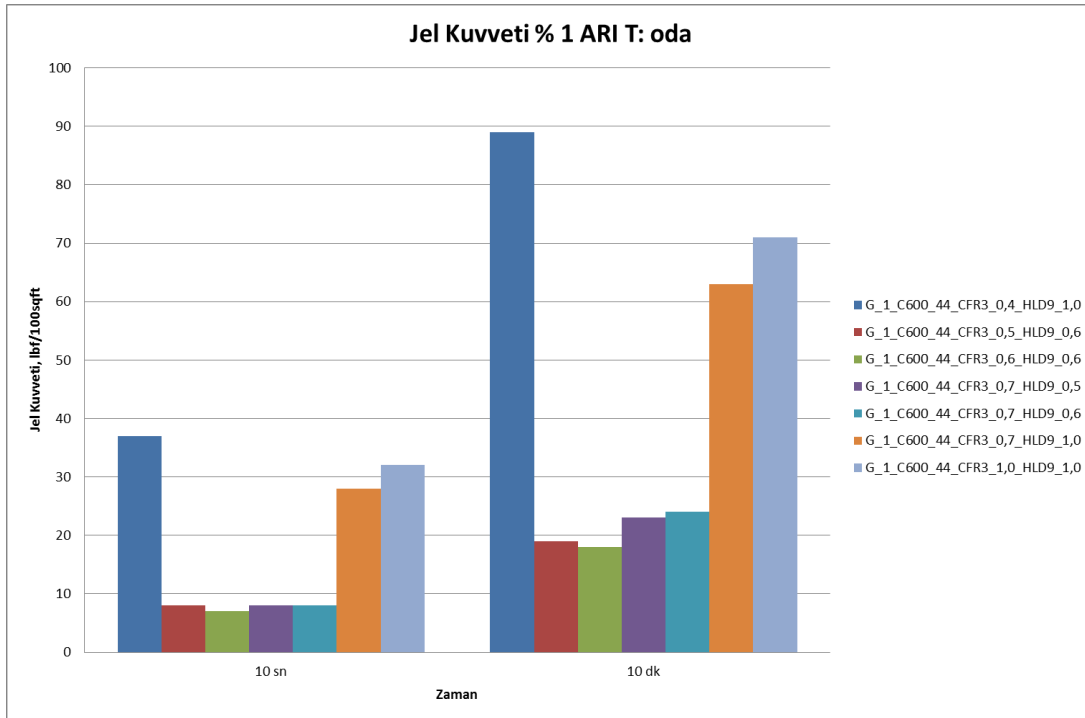
Şekil E.15: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%3 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda).



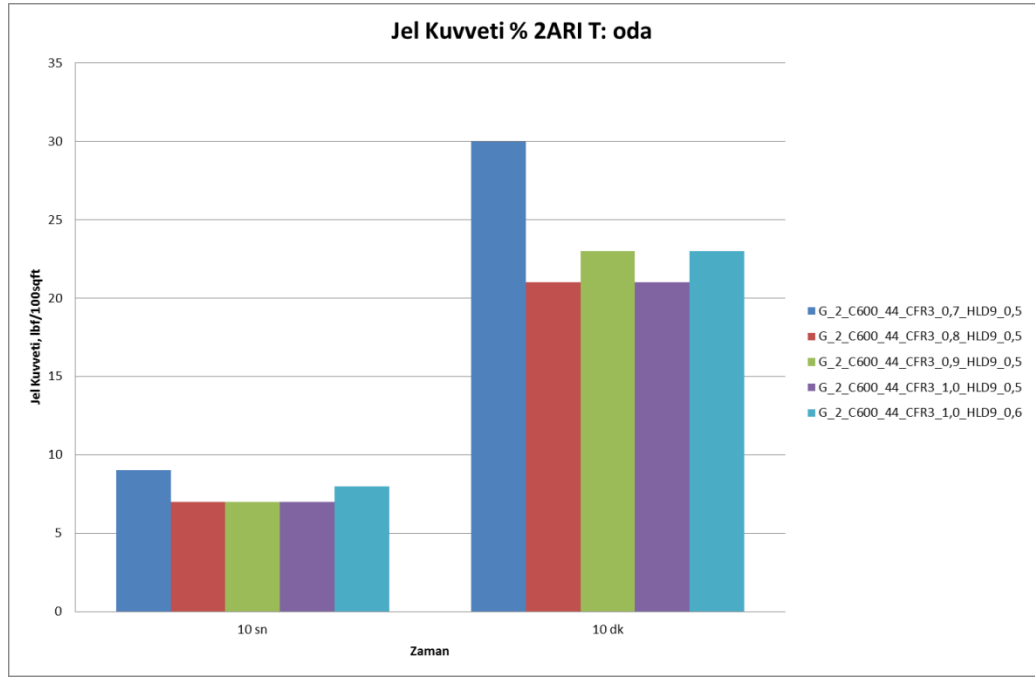
Şekil E.16: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (% 3ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F).



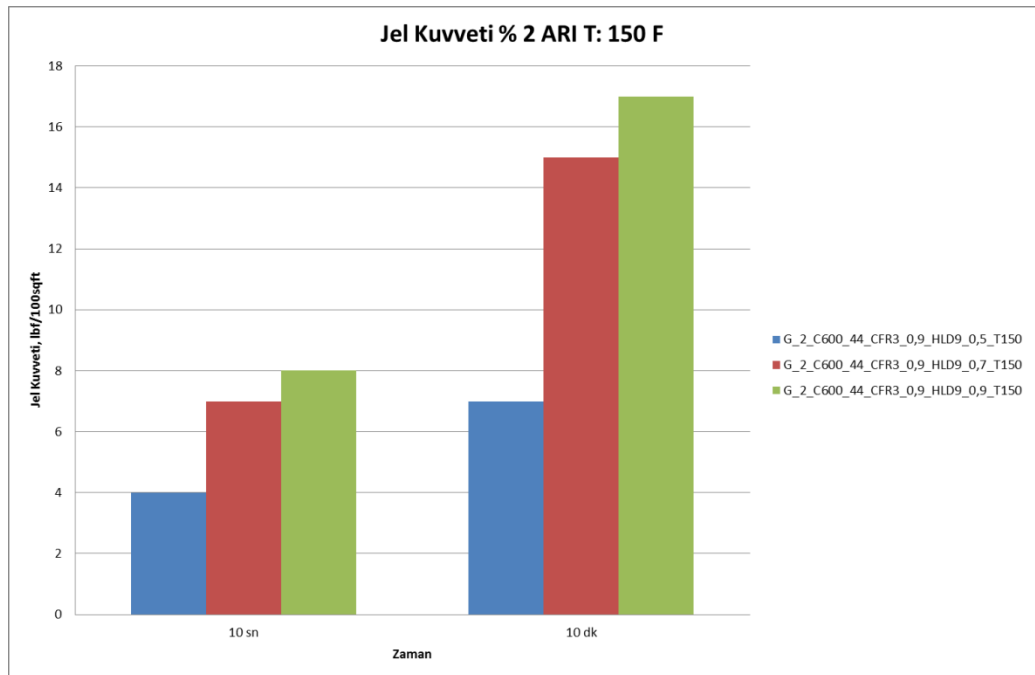
Şekil E.17: G Sınıf çimento reolojisi davranışı (%4 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F).



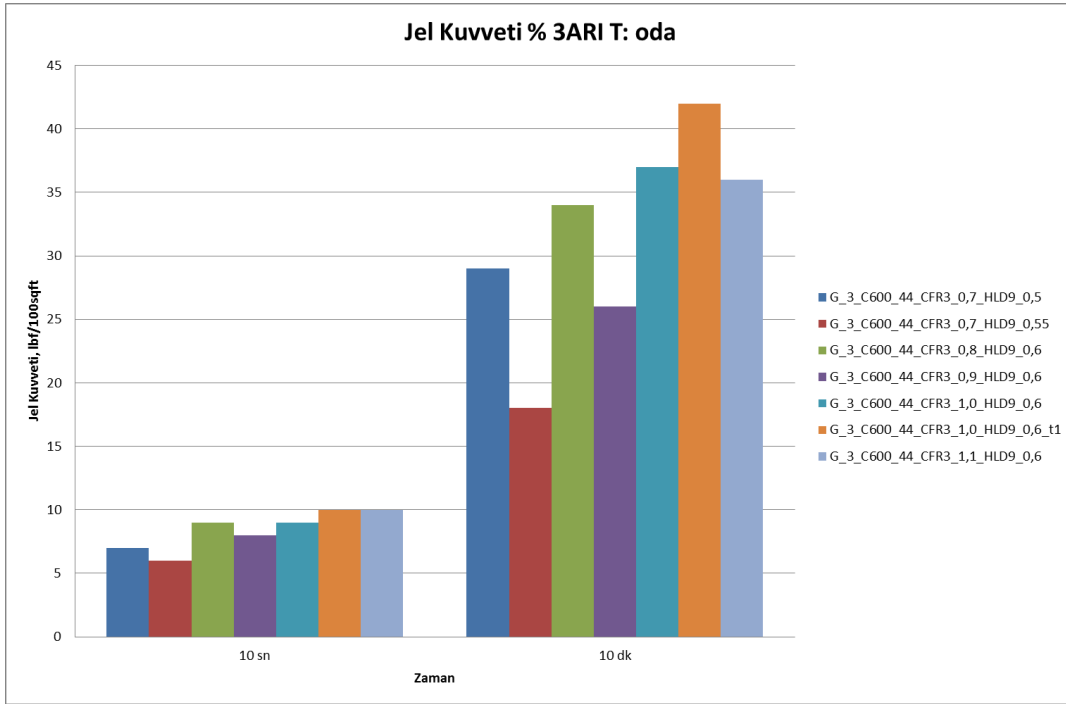
Şekil E.18: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı
(%1 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda).



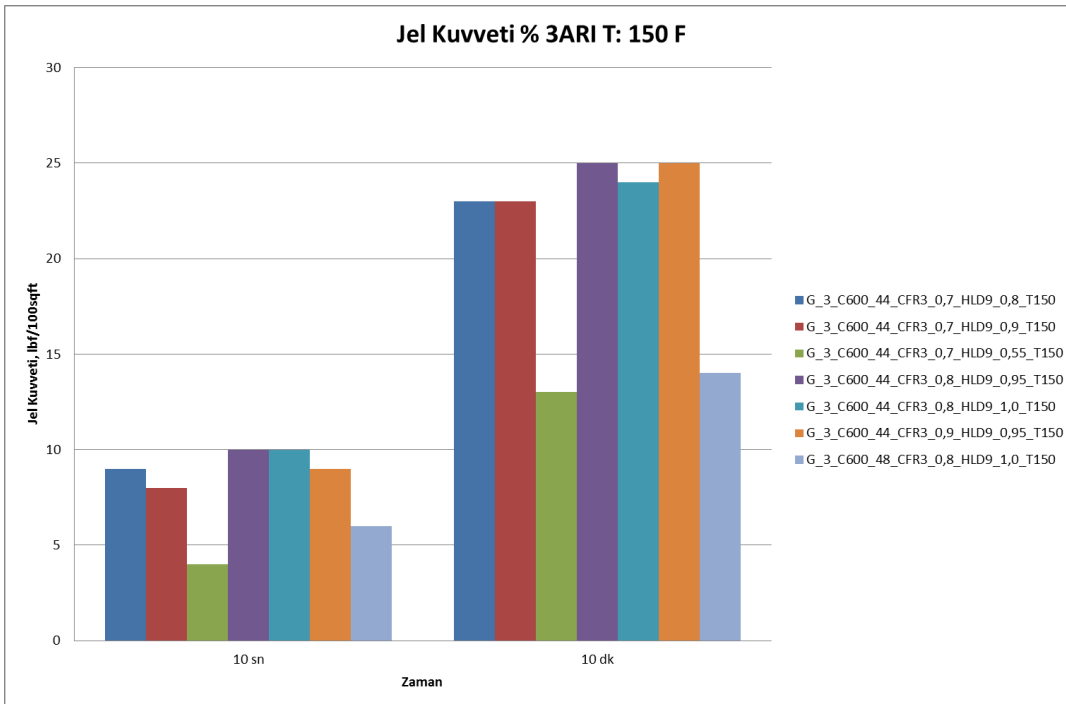
Şekil E.19: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı
(%2 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda).



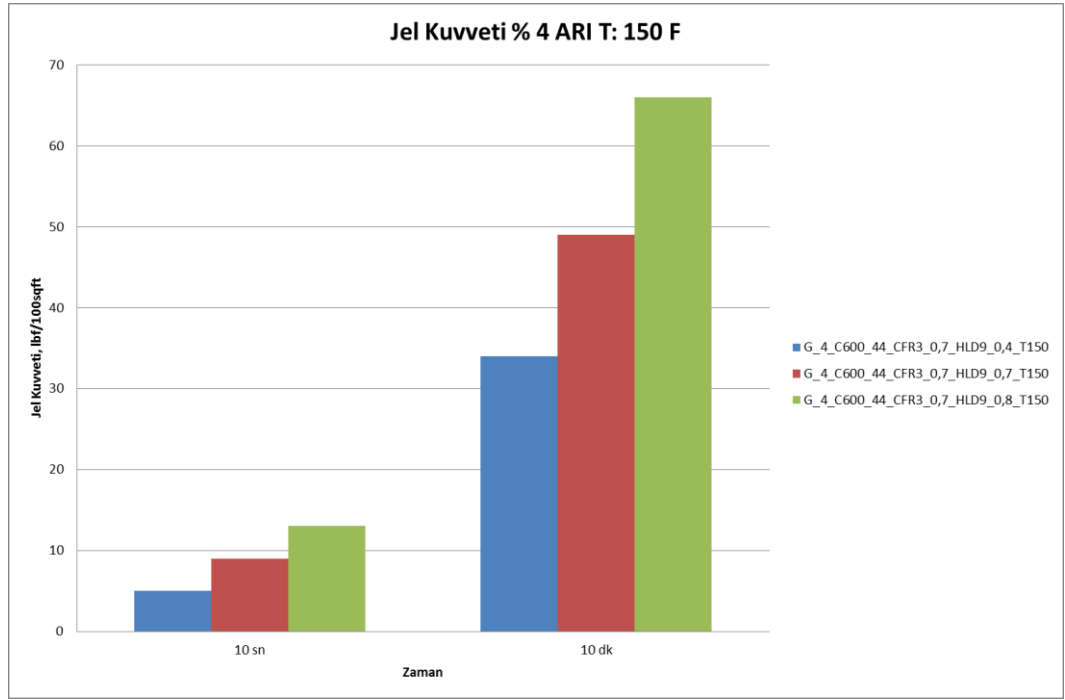
Şekil E.20: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı
(%2 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F).



Şekil E.21: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı
(%3 ARI – CFR3 - HLD9 T:oda).



Şekil E.22: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı
(%3 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F).



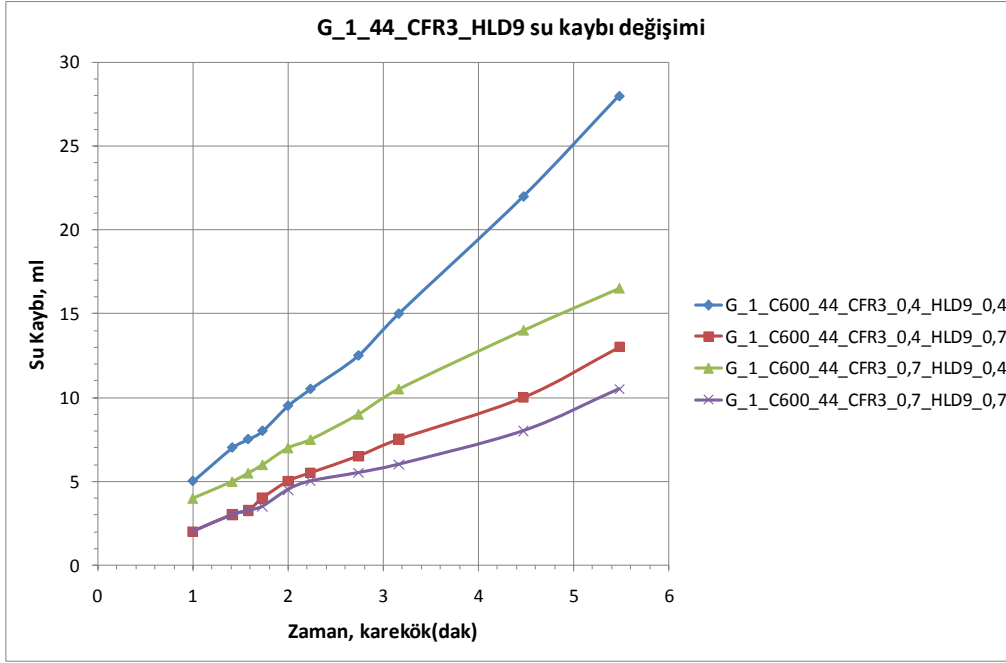
Şekil E.23: G Sınıf çimento jel kuvveti davranışı
(%4 ARI – CFR3 - HLD9 T:150 °F).

Çizelge F.1: ARI, CFR3 ve HLD9 katkılı G Sınıf çimento su kaybı ölçümleri.

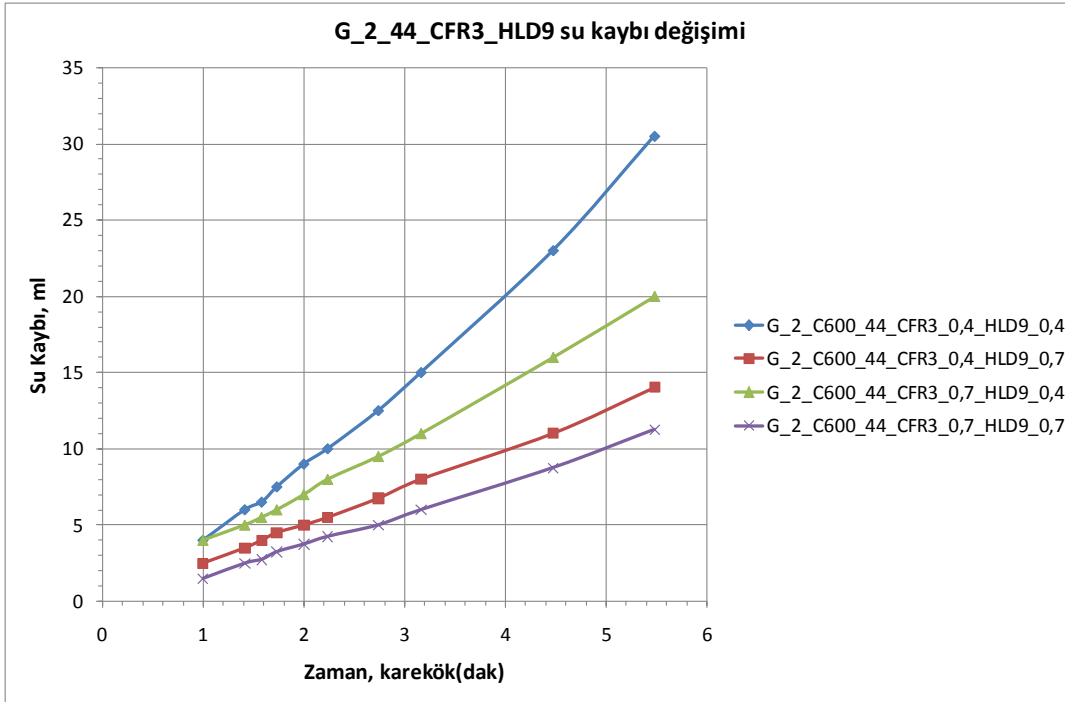
	HTHP Su Kaybı (ml)									
Zaman (dk)	1	2	2,5	3	4	5	7,5	10	20	30
Örnek Kodu										
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	5	7	7,5	8	9,5	10,5	12,5	15	22	28
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	2	3	3,25	4	5	5,5	6,5	7,5	10	13
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	4	5	5,5	6	7	7,5	9	10,5	14	16,5
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	2	3	3,25	3,5	4,5	5	5,5	6	8	10,5
G_2_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	4	6	6,5	7,5	9	10	12,5	15	23	30,5
G_2_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	2,5	3,5	4	4,5	5	5,5	6,75	8	11	14
G_2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	4	5	5,5	6	7	8	9,5	11	16	20
G_2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	1,5	2,5	2,75	3,25	3,75	4,25	5	6	8,75	11,25
G_3_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	5	7,5	8,5	9,25	11	12,5	15,25	18,75	29	41,5
G_3_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	1	2,75	3,25	3,5	4,5	5	6,5	7,5	11	14
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	3,5	4,5	5,25	5,75	6,75	7,75	9,5	11,25	17	21,75
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	2,5	3,25	3,75	4	4,5	5	6,25	7,25	10,5	12,75
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4_T200	8	12,5	14	15,5	18,5	21,5	29	36	46	50,5
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7_T200	2,5	4	5	5,75	6,75	7,75	10,5	12,5	19,5	24
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4_T200	5	7,5	9,25	10,25	12,25	14,5	19	23	38,5	48
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7_T200	3,75	5	5,5	6	7	8	10	12	17,25	20,75
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,5	2,8	3,6	4,2	4,6	5,4	6,4	8	9,4	14	18
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7_t1	2	2,8	3,2	3,5	4,2	4,8	6	7,2	10,6	14
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7_T150	2	3,6	4,2	4,8	6	7,2	9	11	17,8	22,8

Çizelge F.1 (devam): ARI, CFR3 ve HLD9 katkılı G Sınıf çimento su kaybı ölçümleri.

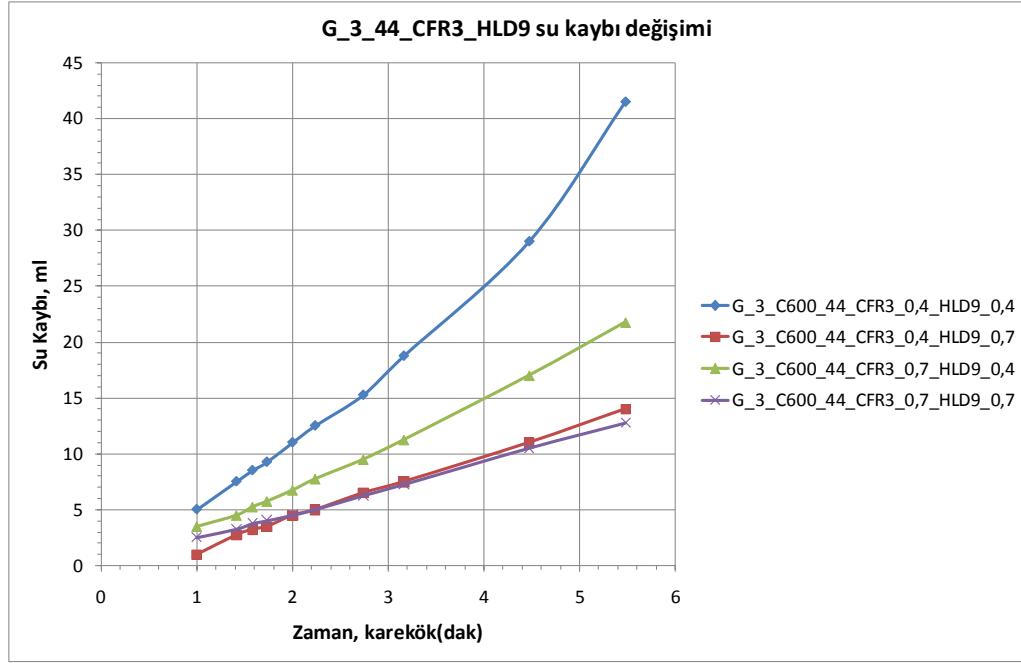
	HTHP Su Kaybı (ml)									
Zaman (dk)	1	2	2,5	3	4	5	7,5	10	20	30
Örnek Kodu										
G_2_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,5	2,4	3,6	4	4,6	5,4	6,2	8	9,4	14,4	18,6
G_2_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,5_T150	4,6	6,6	7,4	8,4	9,8	11,2	14,2	16,8	25,8	33,8
G_2_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,7_T150	2,8	4	4,8	5,4	6,2	7,2	9,2	11,2	17,6	23
G_2_C600_44_CFR3_0,9_HLD9_0,9_T150	3	4,2	4,6	5,2	6	6,8	8,8	10,2	15,4	19,8
G_2_C600_44_CFR3_1,0_HLD9_0,5	2	3,2	3,6	4,2	5,2	5,8	7,4	8,8	13,2	17
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,5	3,2	4,8	5,4	6	7	8	10	11,4	17,2	21,8
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,8_T150	3,2	4,4	5,2	5,8	6,6	7,8	9,8	11,4	17,8	22,4
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,9_T150	2,8	4,2	4,8	5,4	6,2	7,4	9,2	11	16,4	21
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,55	1,8	3,2	3,6	4,2	5	5,8	7,4	9,2	14	18
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,55_T150	4,8	7	7,8	8,8	10,2	11,6	14,6	17,4	26,8	34,2
G_3_C600_48_CFR3_0,7_HLD9_1,0_T150	2,8	4,2	4,8	5,4	6,4	7,2	9,2	10,8	16,4	20,8
G_4_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4_T150	5,4	8	9,2	10,2	12,6	14	17,6	21	32	40,6
G_4_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7_T150	3	4,8	5,2	6	7	8	10,6	12,2	18,6	23,4
G_4_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,8_T150	2,8	4,2	4,8	5,2	6,2	7,2	9	11	16	20,6



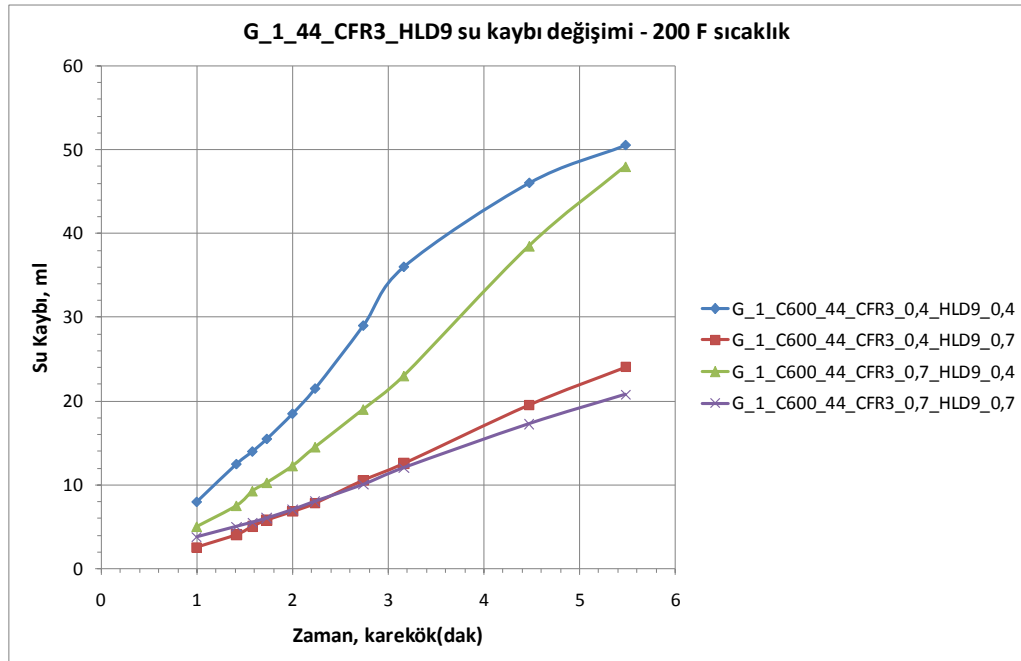
Şekil F.1: G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%1 ARI – CFR3-HLD9).



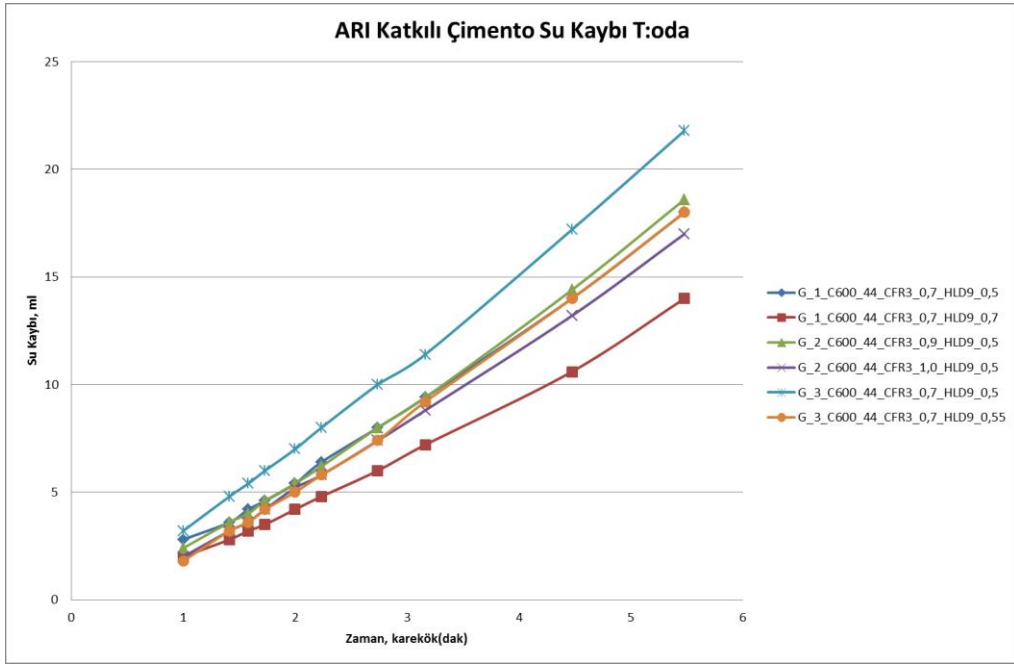
Şekil F.2: G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%2 ARI – CFR3-HLD9).



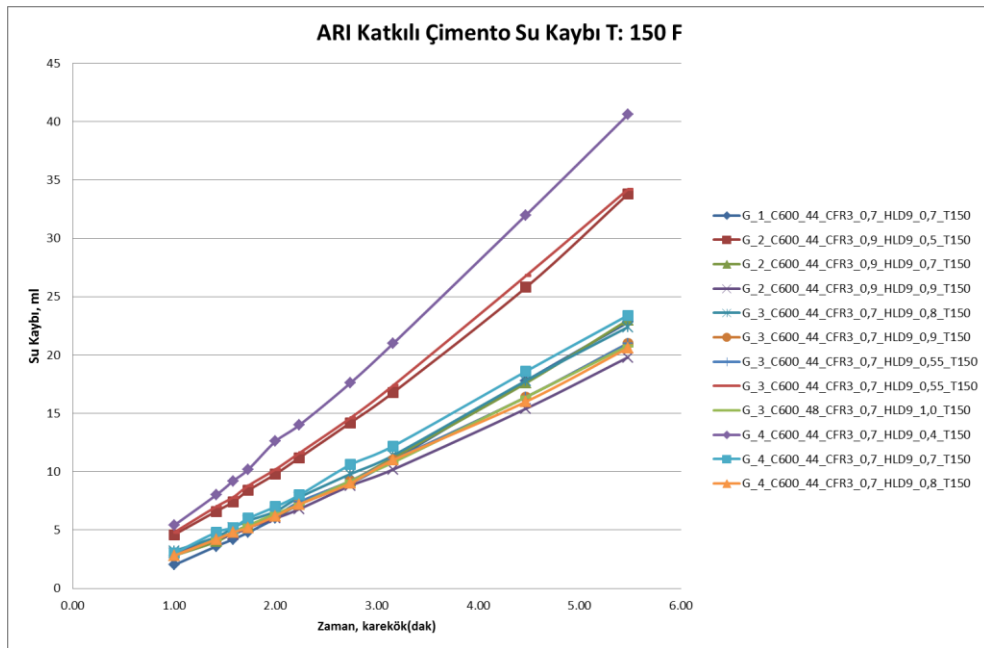
Şekil F.3: G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%3 ARI – CFR3-HLD9).



Şekil F.4: G Sınıf çimento su kaybı davranışı (%1 ARI – CFR3-HLD9) – 200 °F.

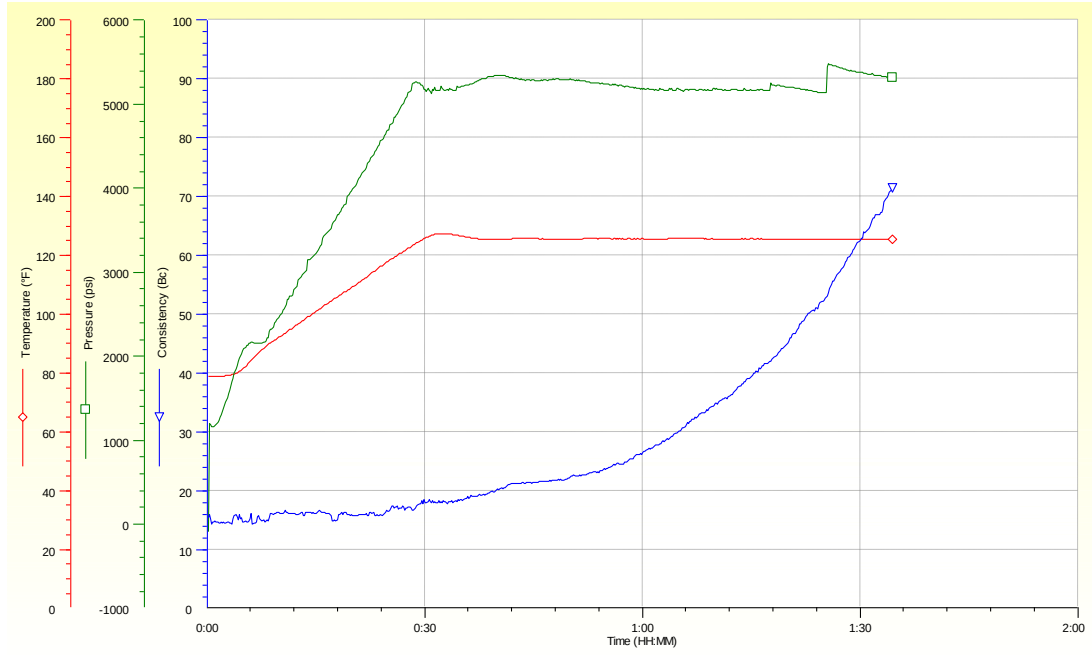


Şekil F.5: G Sınıf çimento su kaybı davranışı (ARI – CFR3-HLD9).

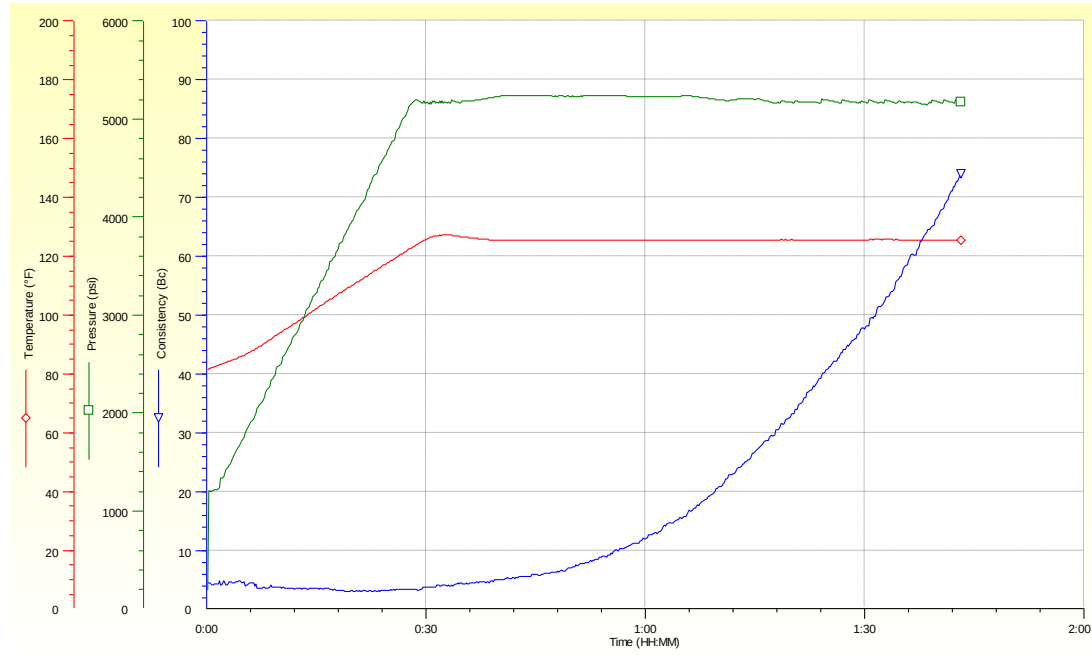


Şekil F.6: G Sınıf çimento su kaybı davranışı (ARI – CFR3-HLD9) – T: 150 °F.

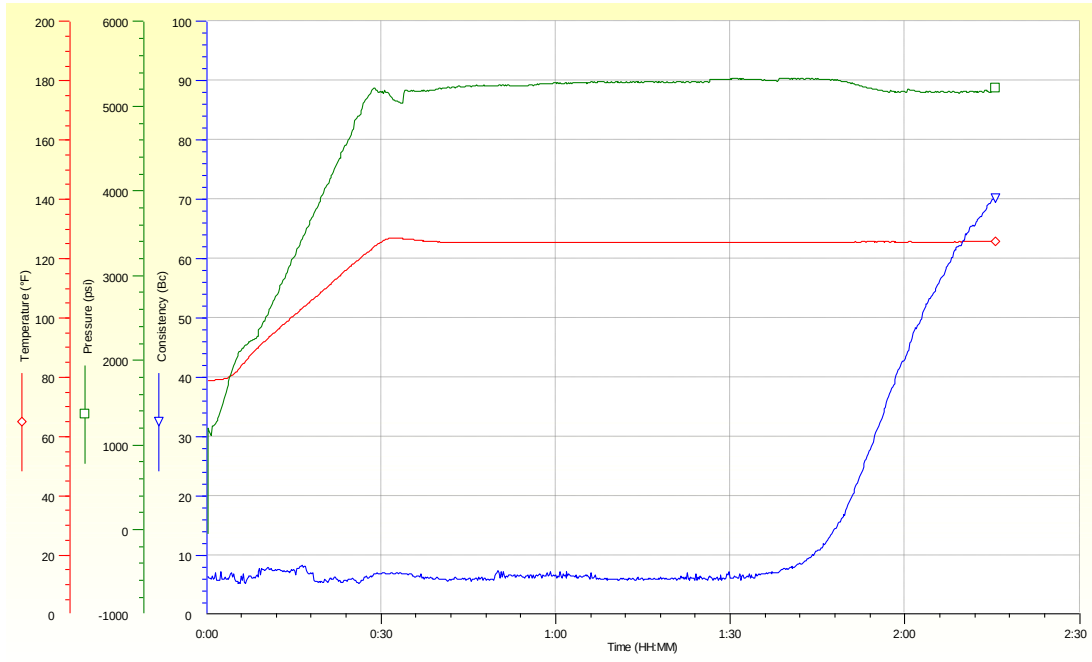
Ek G



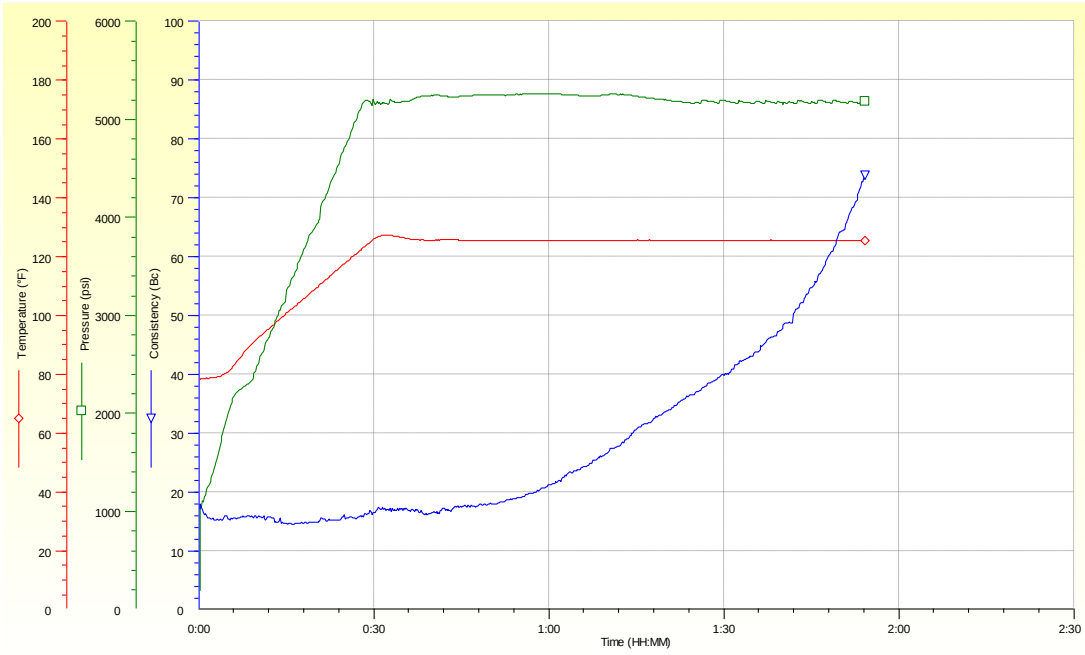
Şekil G.1: G Sınıf çimento kıvamlılık testi.



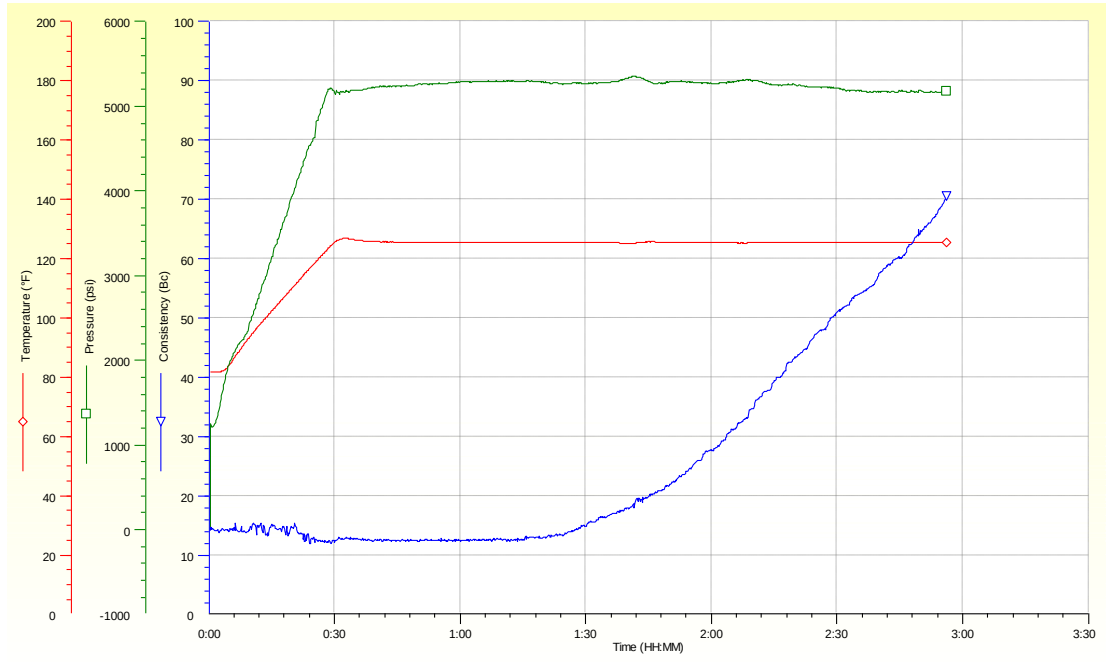
Şekil G.2: G Sınıf çimento kıvamlılık testi
(%0,4 CFR3).



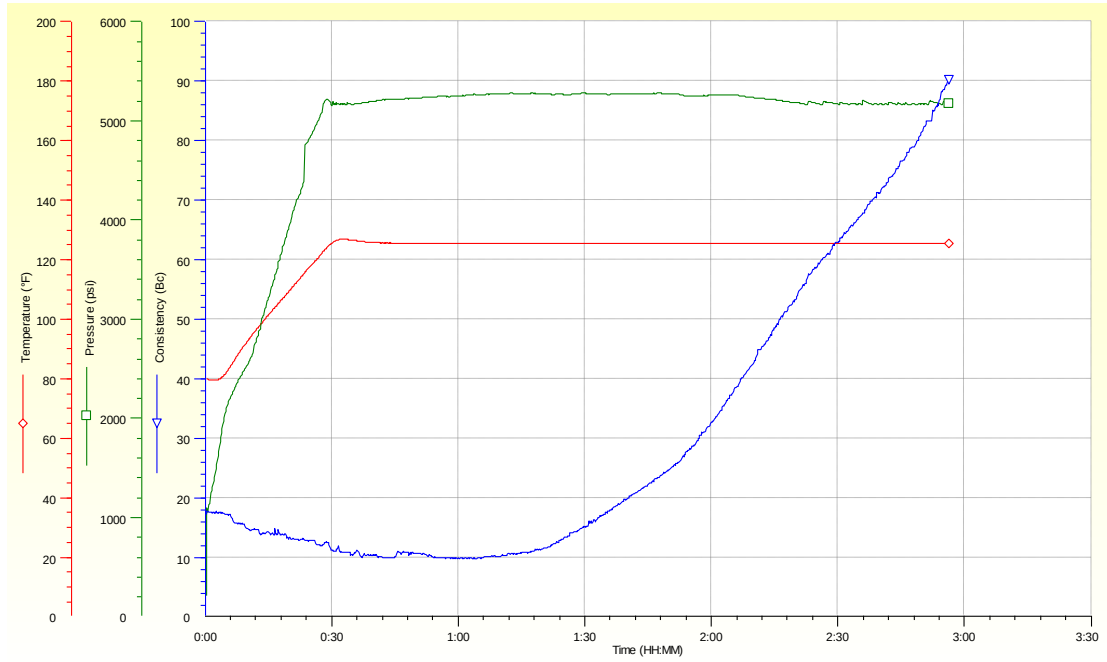
Şekil G.3: G Sınıf çimento kıvamlılık testi
(%0,7 CFR3).



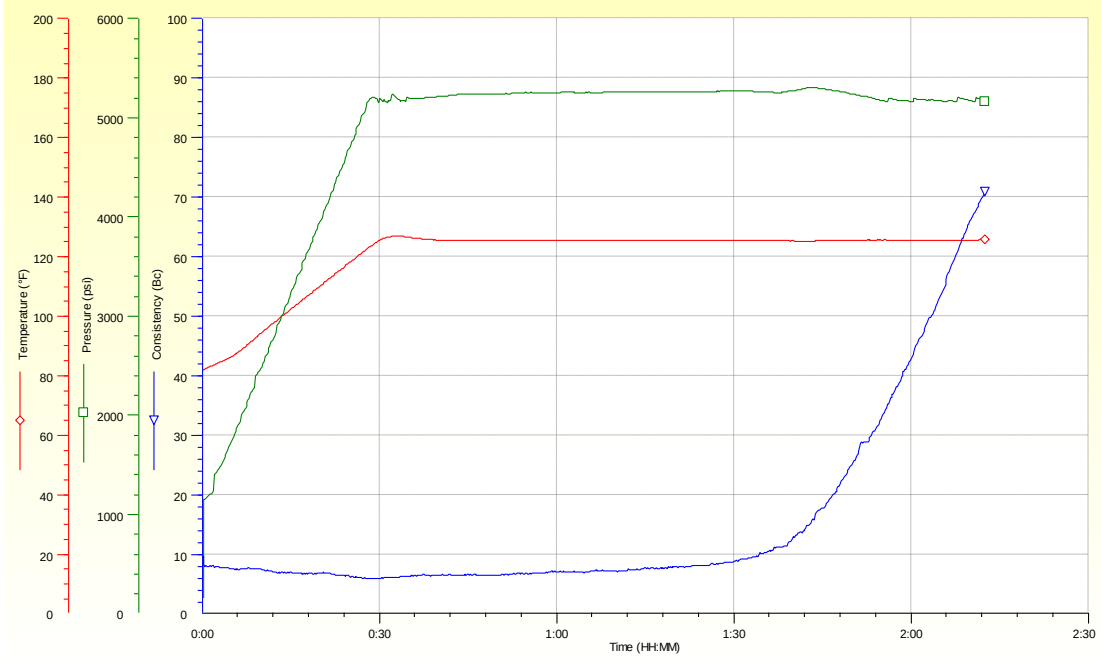
Şekil G.4: G Sınıf çimento kıvamlılık testi
(%0,4 HLD9).



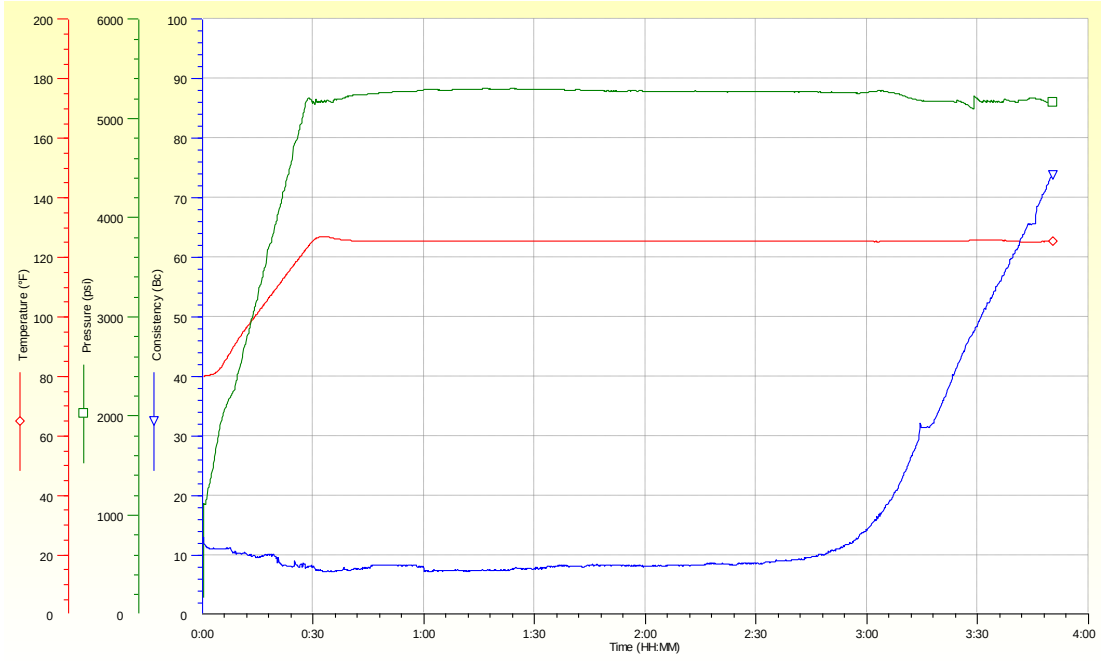
Şekil G.5: G Sınıf çimento kıvamlilik testi (%0,7 HLD9).



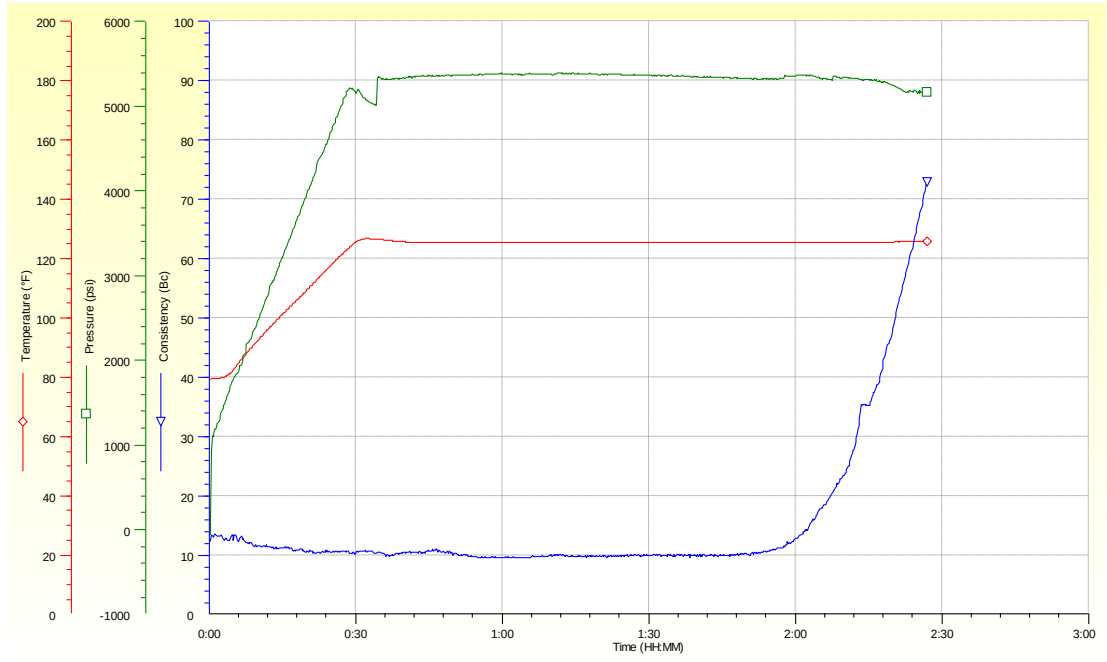
Şekil G.6: G Sınıf çimento kıvamlilik testi – tekrar (%0,7 HLD9).



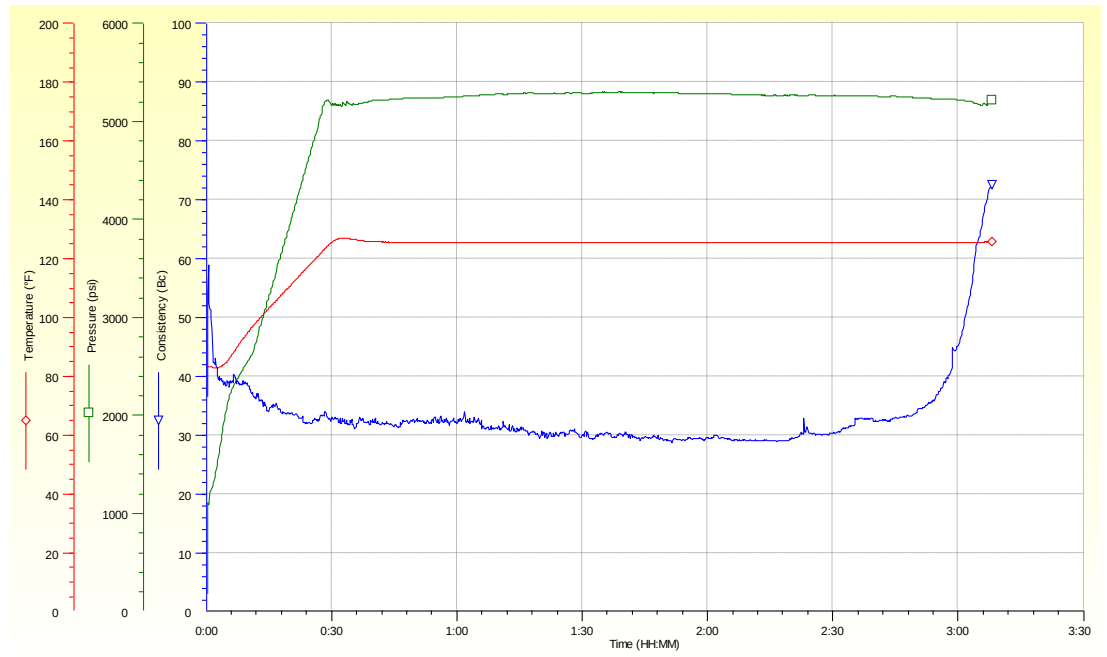
Şekil G.7: G Sınıf çimento kıvamlilik testi (%0,4 CFR3 ve %0,4 HLD9).



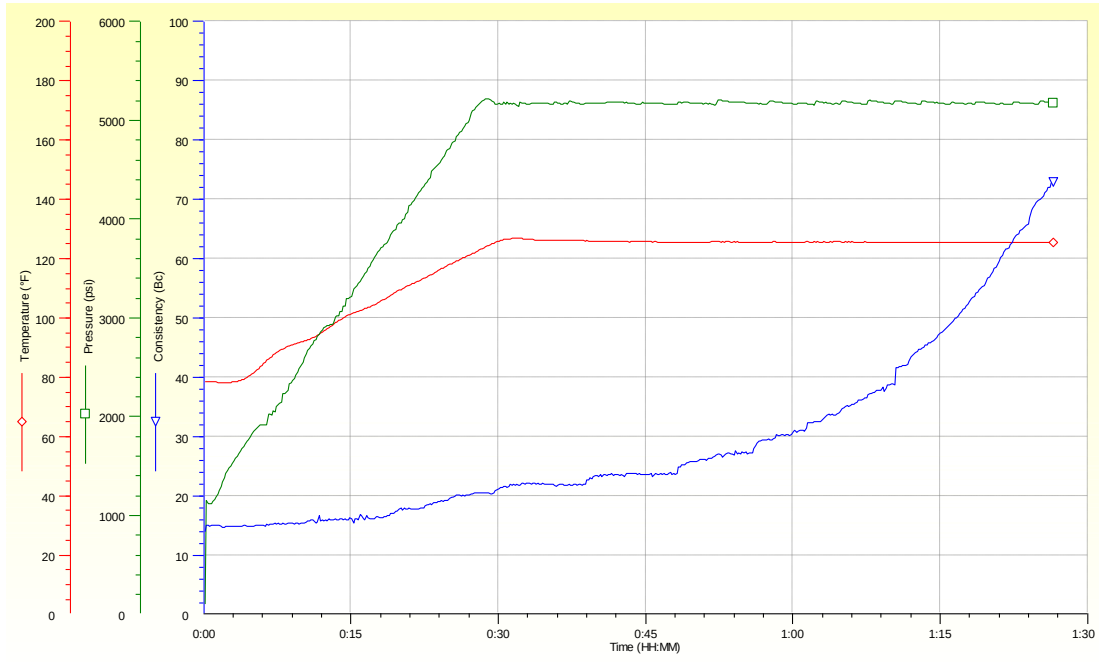
Şekil G.8: G Sınıf çimento kıvamlilik testi (%0,4 CFR3 ve %0,7 HLD9).



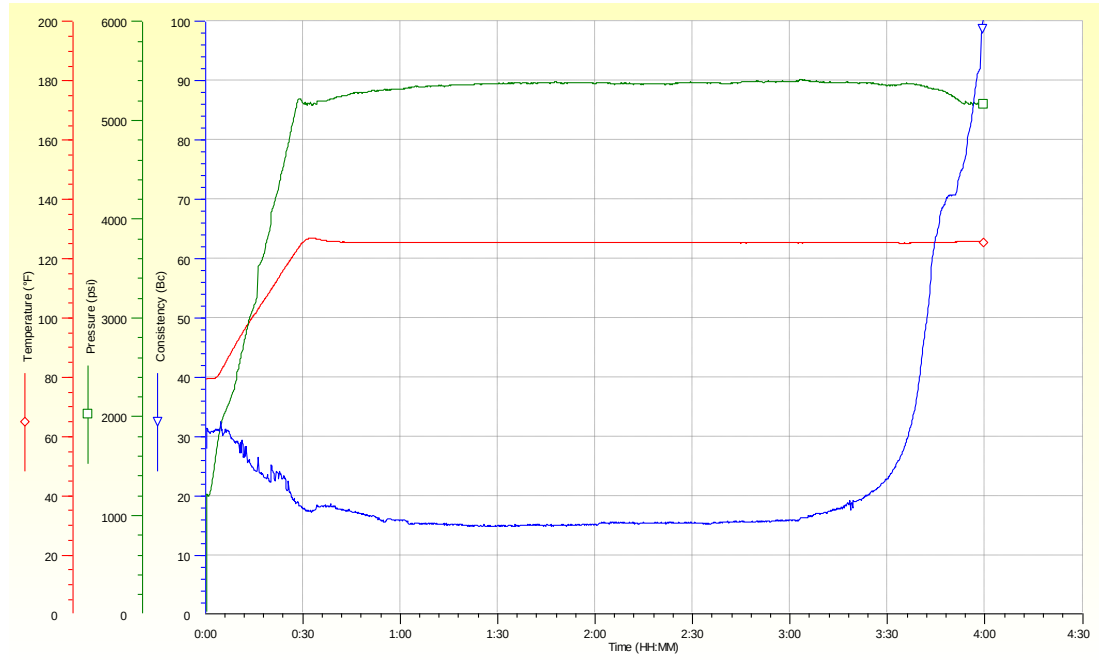
Şekil G.9: G Sınıf çimento kıvamlilik testi
(%0,7 CFR3 ve %0,4 HLD9).



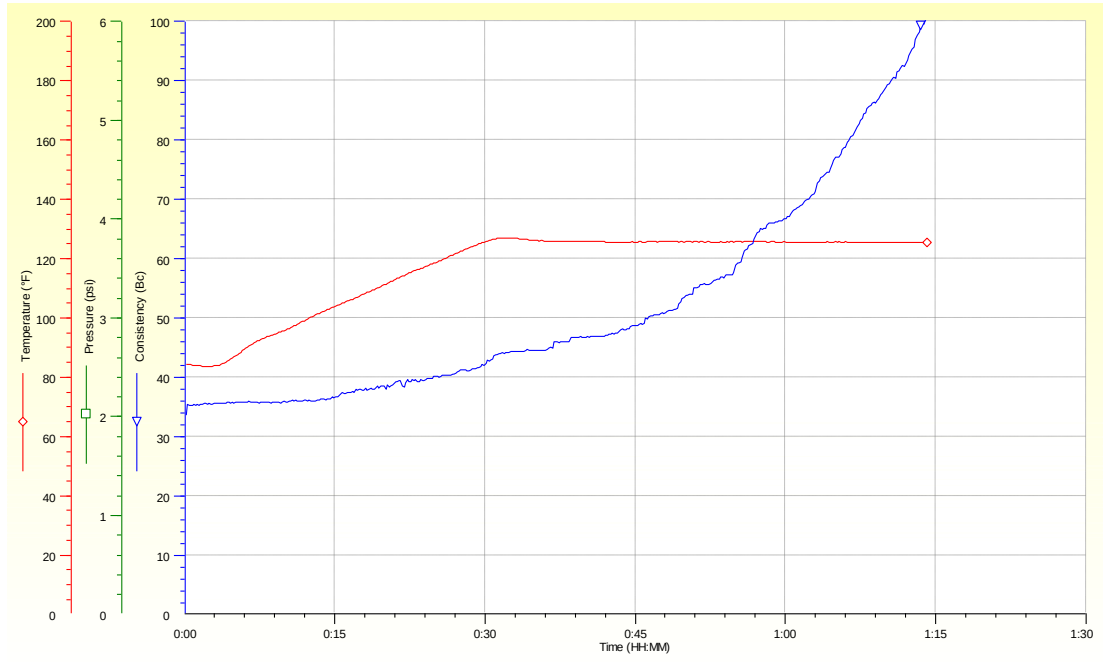
Şekil G.10: G Sınıf çimento kıvamlilik testi
(%0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9).



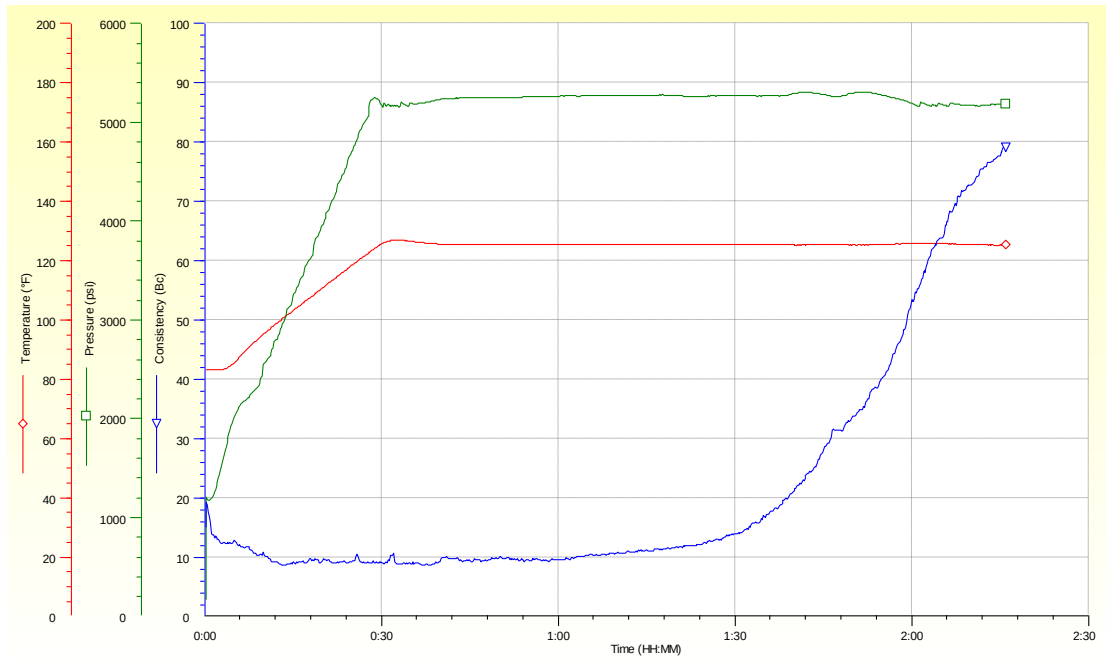
Şekil G.11: G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%1 ARI).



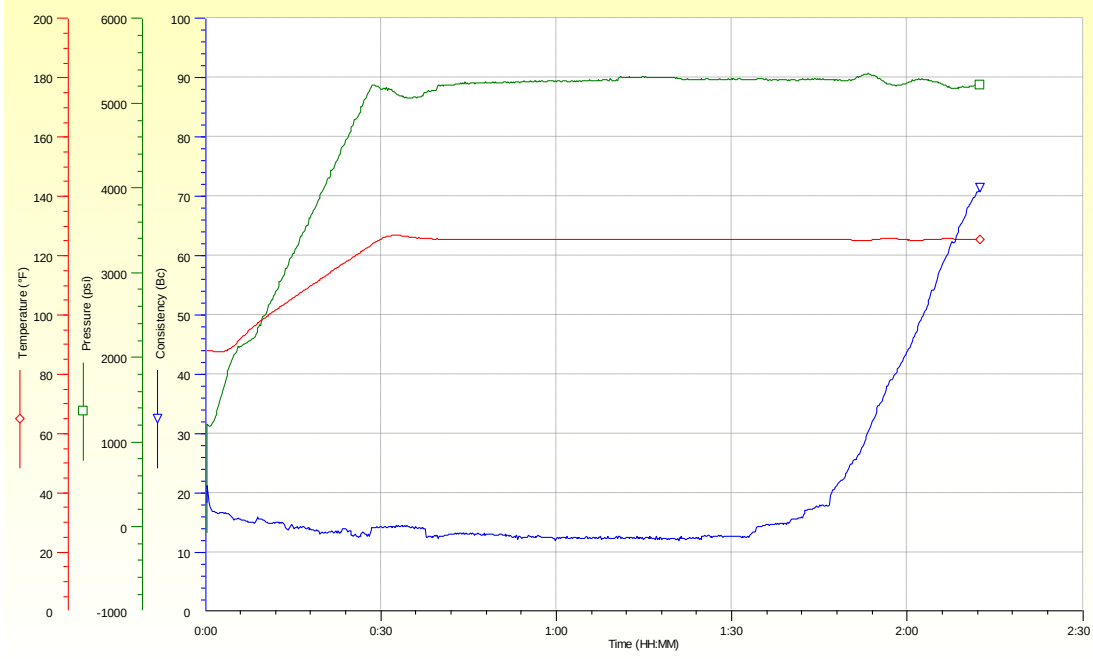
Şekil G.12: G Sınıf çimento kıvamlılık testi (%1 ARI, % 0,7 CFR3 ve % 1,0 HLD9).



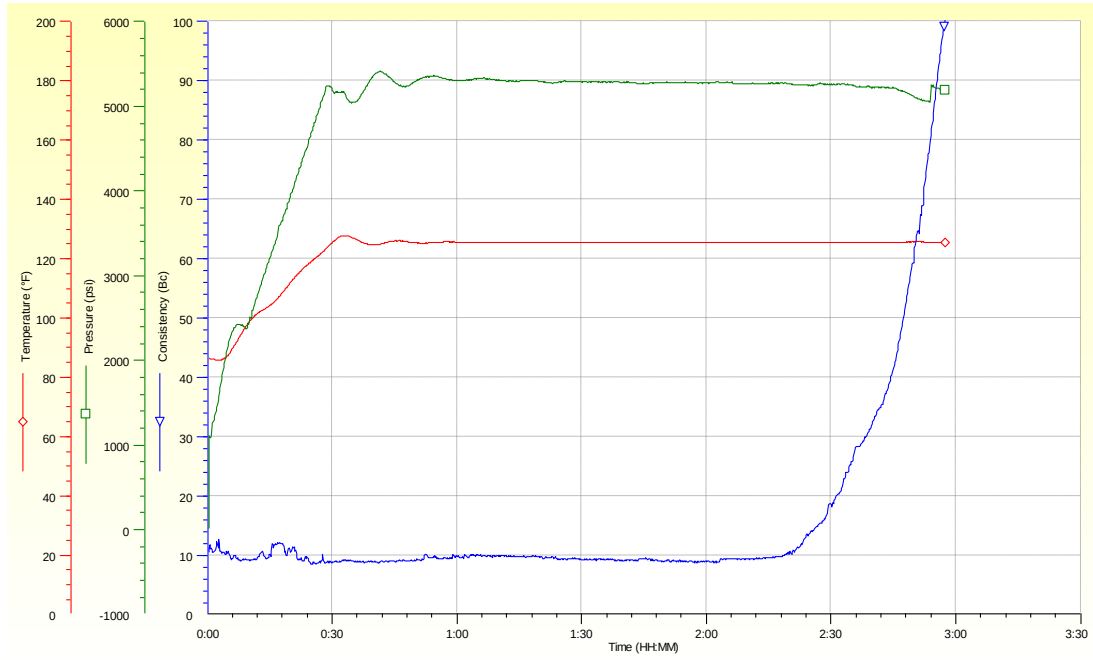
Şekil G.13: G Sınıf çimento kıvamlilik testi
(%2 ARI).



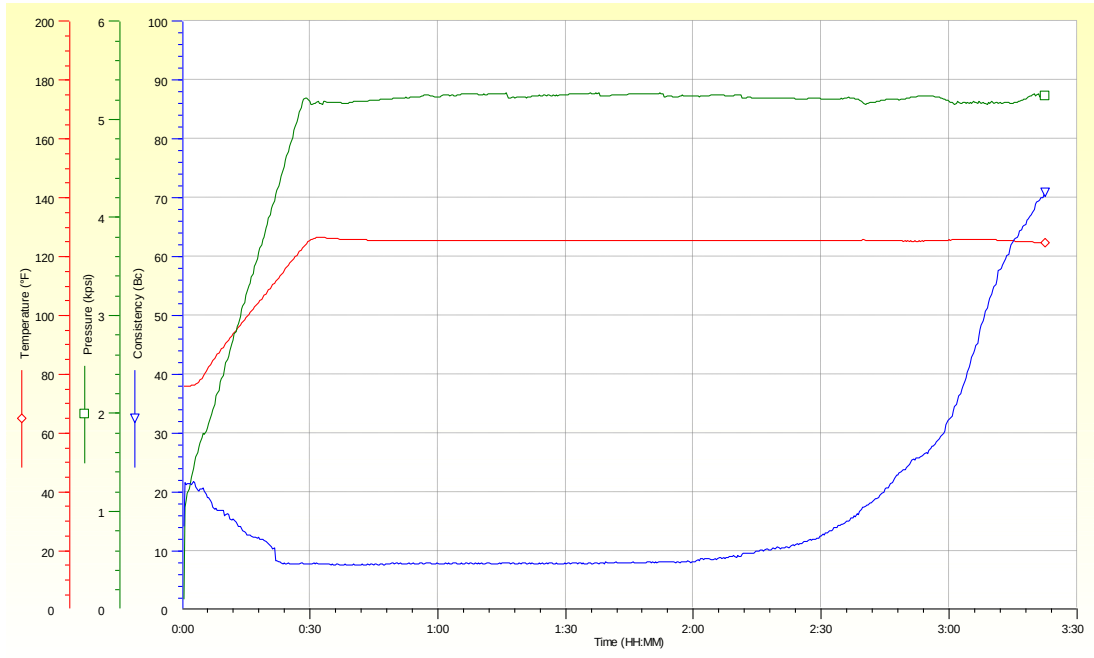
Şekil G.14: G Sınıf çimento kıvamlilik testi
(%2 ARI, % 0,4 CFR3 ve % 0,4 HLD9).



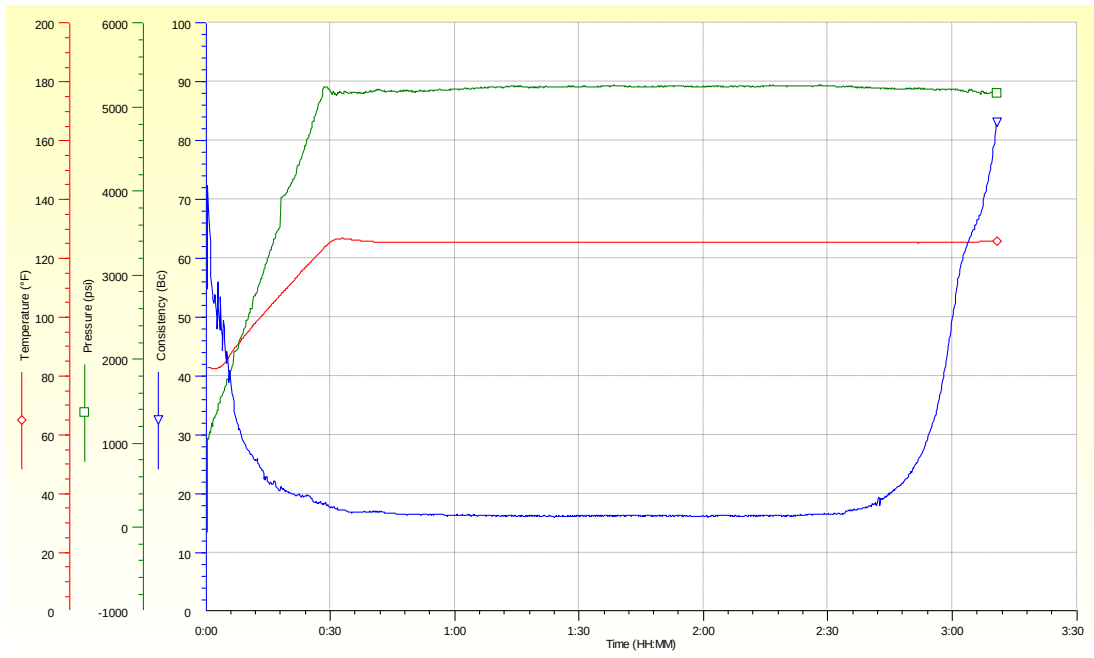
Şekil G.15: G Sınıf çimento kıvamlılık testi
(%2 ARI, % 0,4 CFR3 ve % 0,7 HLD9).



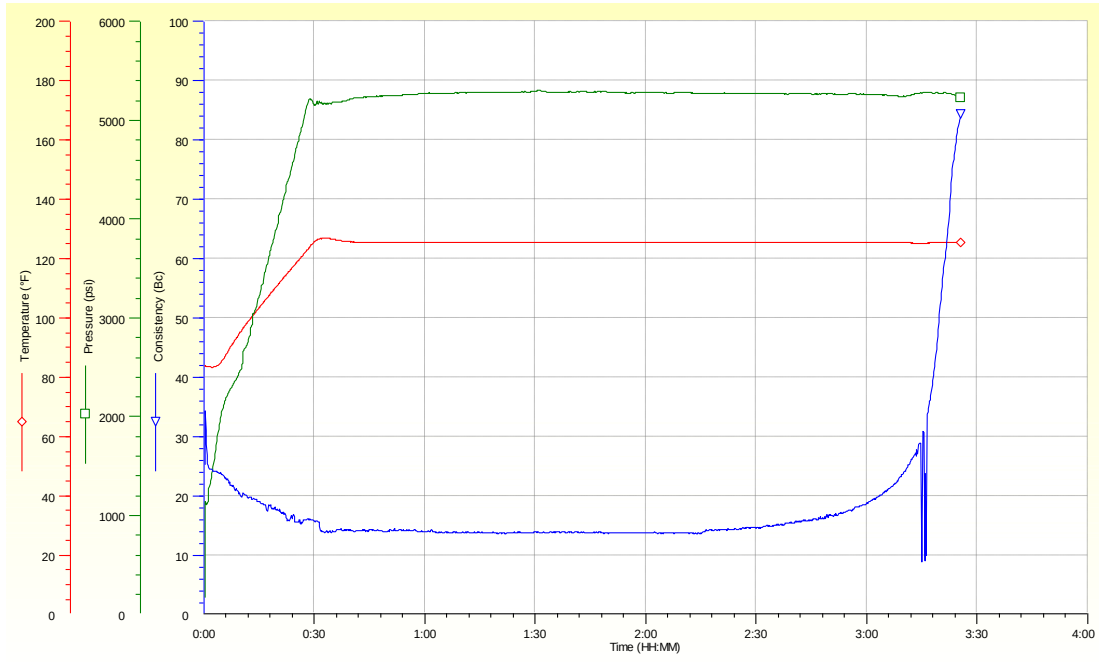
Şekil G.16: G Sınıf çimento kıvamlılık testi
(%2 ARI, % 0,7 CFR3 ve % 0,4 HLD9).



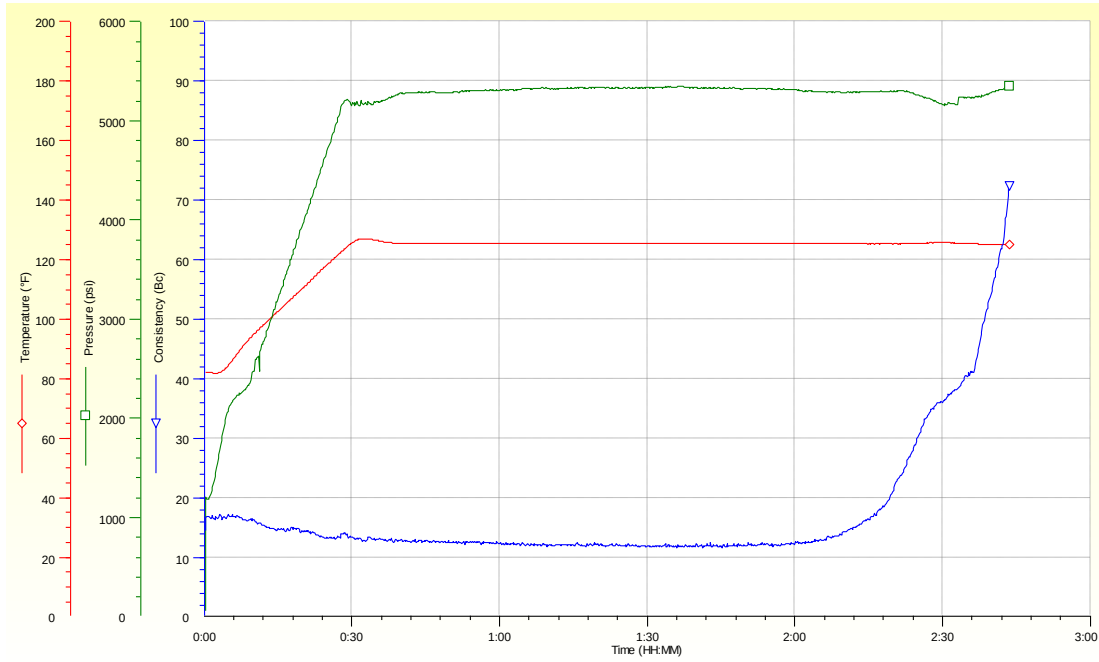
Şekil G.17: G Sınıf çimento kıvamlilik testi
(%2 ARI, % 0,7 CFR3 ve % 0,7 HLD9).



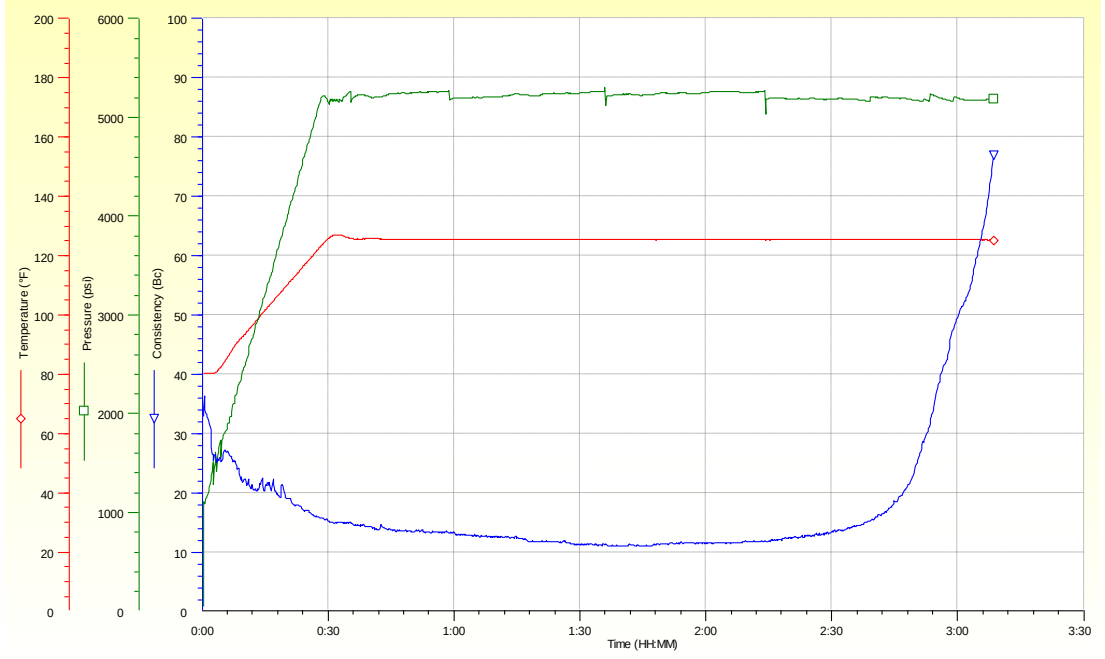
Şekil G.18: G Sınıf çimento kıvamlilik testi
(%2 ARI, % 0,9 CFR3 ve % 0,7 HLD9).



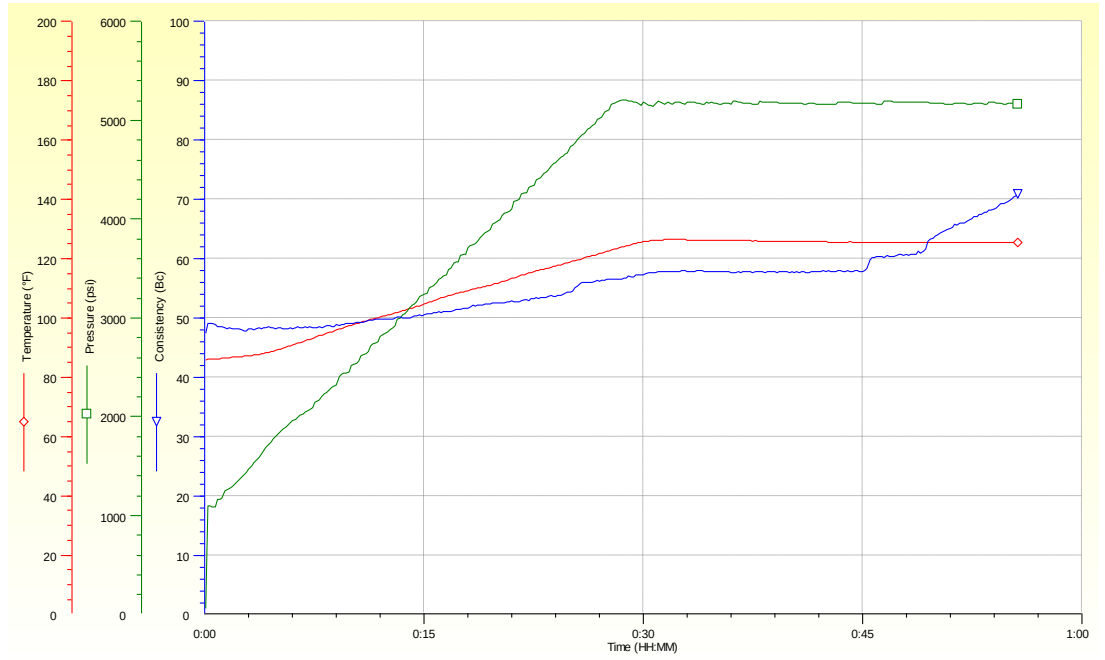
Şekil G.19: G Sınıf çimento kıvamlılık testi
(%2 ARI, % 0,9 CFR3 ve % 0,9 HLD9).



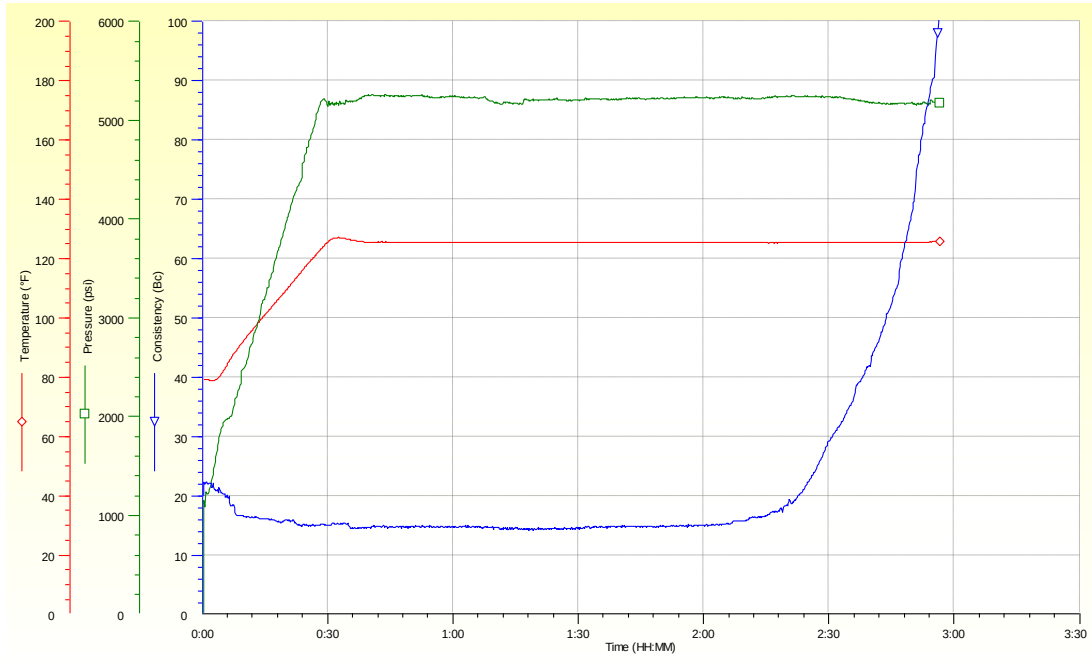
Şekil G.20: G Sınıf çimento kıvamlılık testi
(%2 ARI, % 1,0 CFR3 ve % 0,5 HLD9).



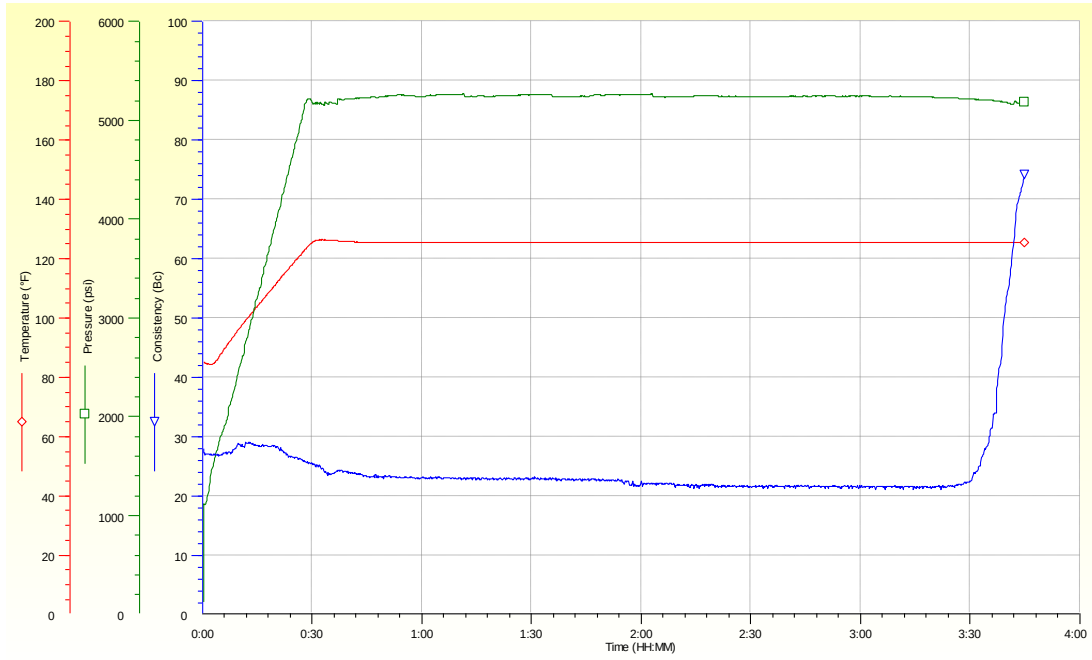
Şekil G.21: G Sınıf çimento kıvamlilik testi - tekrar
(%2 ARI, % 1,0 CFR3 ve % 0,5 HLD9).



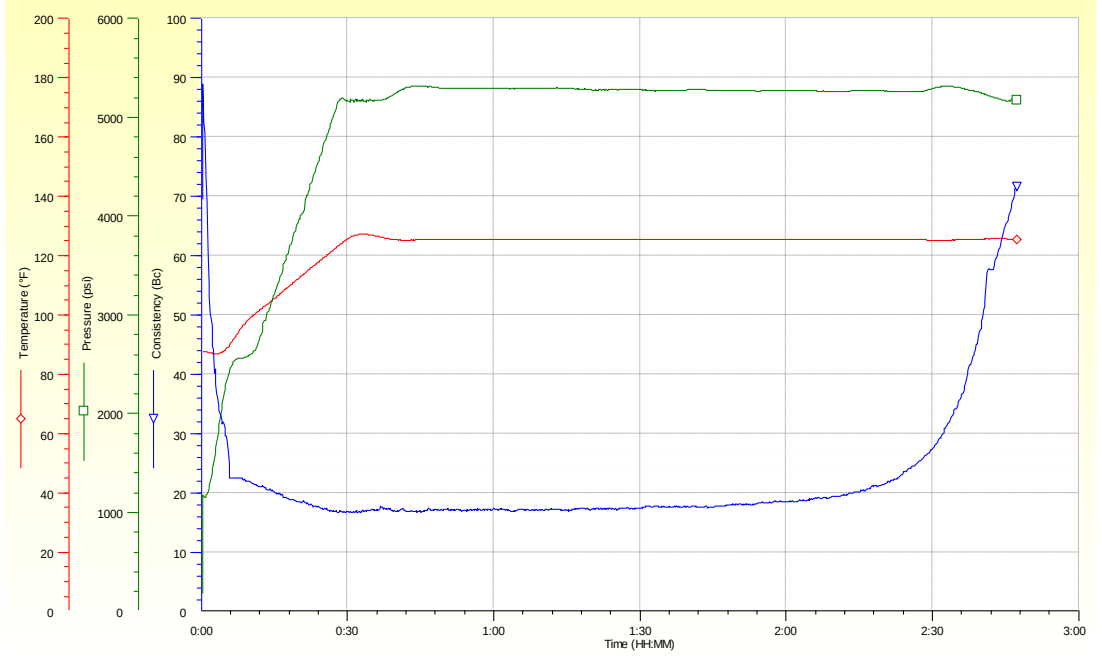
Şekil G.22: G Sınıf çimento kıvamlilik testi - tekrar
(%3 ARI).



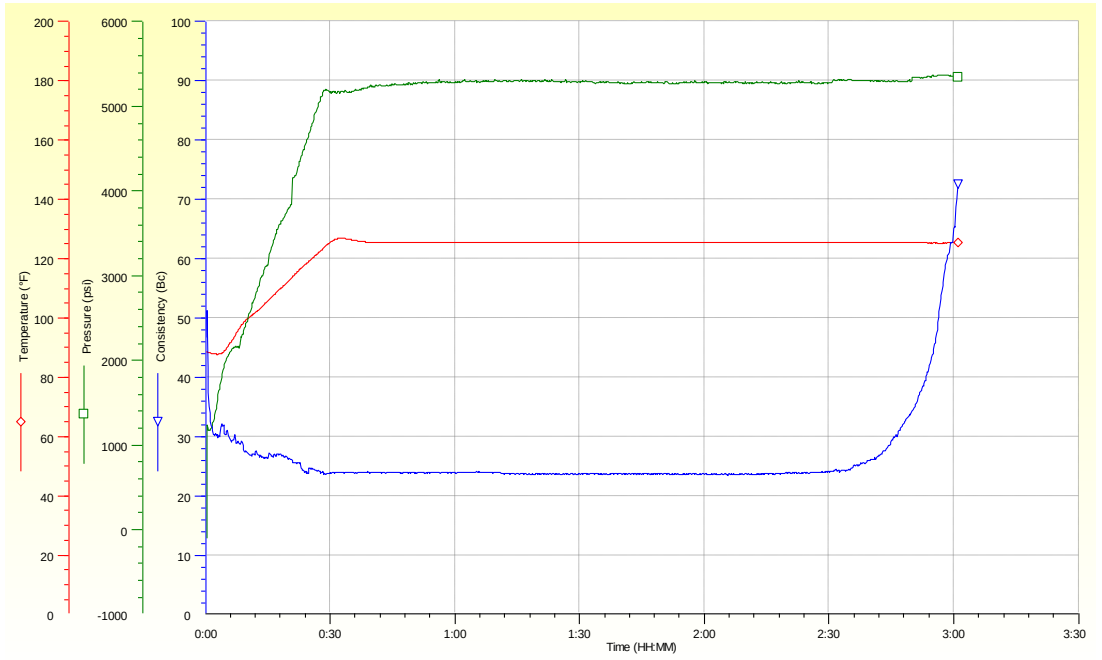
Şekil G.23: G Sınıf çimento kıvamlilik testi
(%3 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9).



Şekil G.24: G Sınıf çimento kıvamlilik testi
(%3 ARI, %0,7 CFR3 ve %1,0 HLD9).

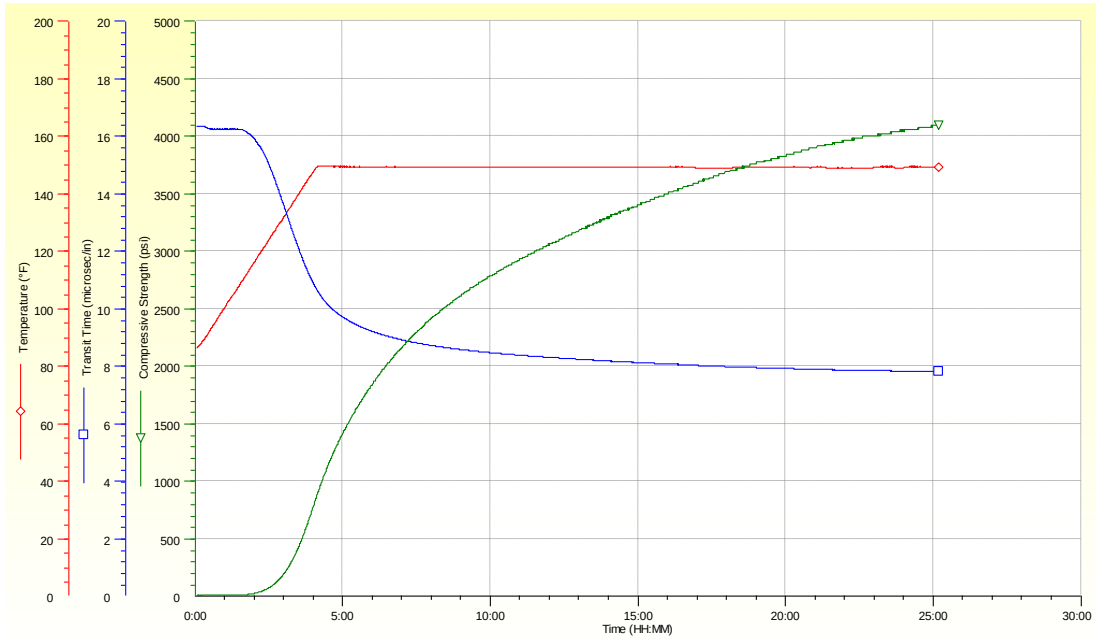


Şekil G.25: G Sınıf çimento kıvamlilik testi
(%4 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9).

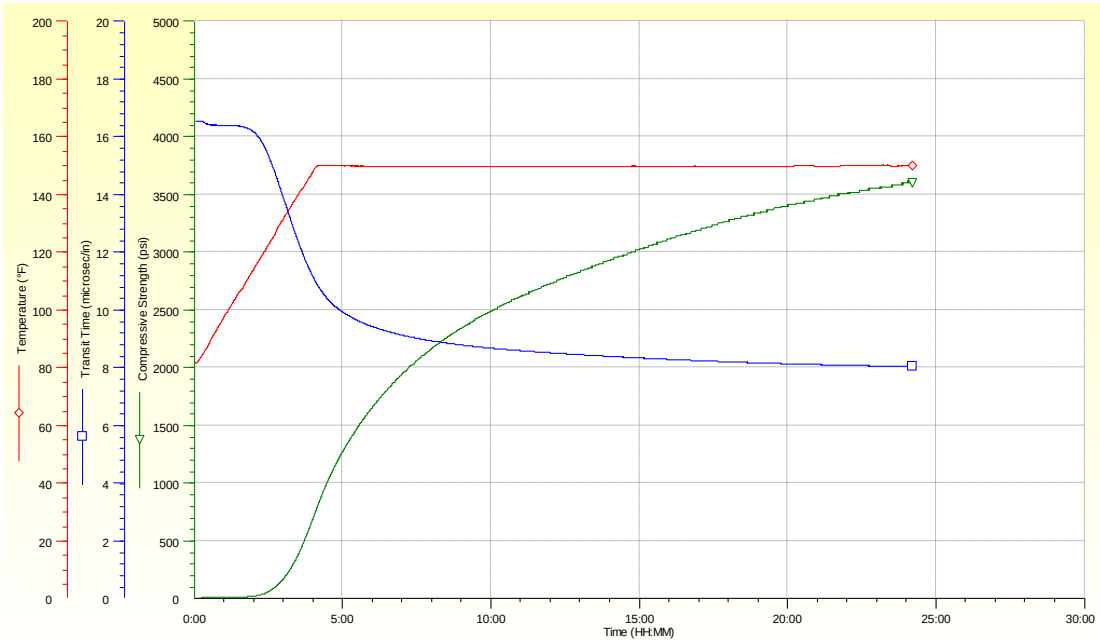


Şekil G.26: G Sınıf çimento kıvamlilik testi
(%4 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,8 HLD9).

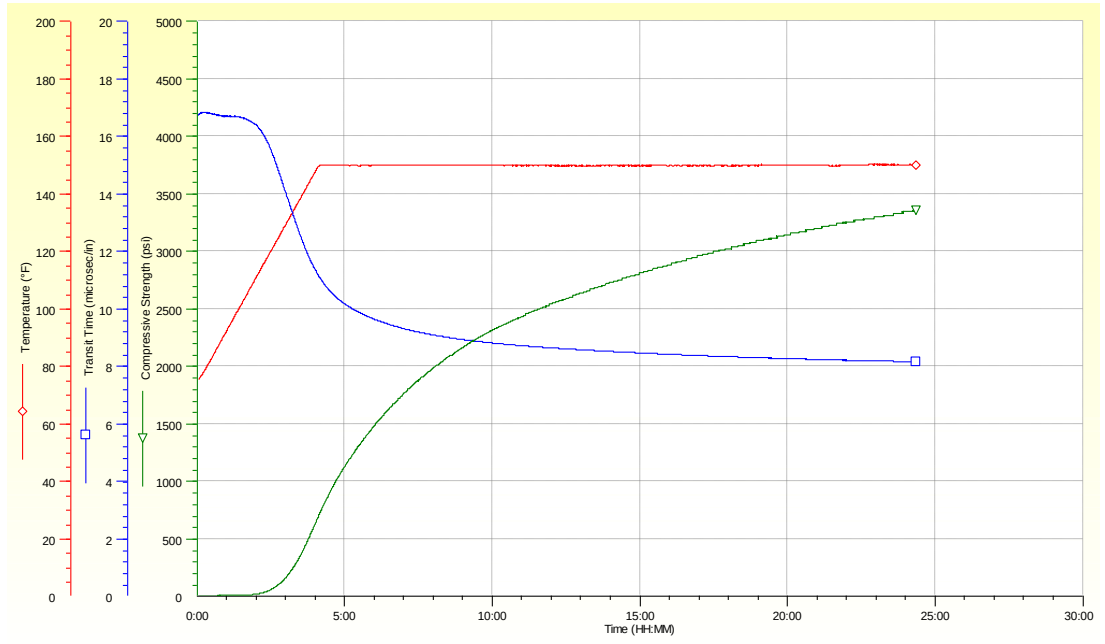
Ek H



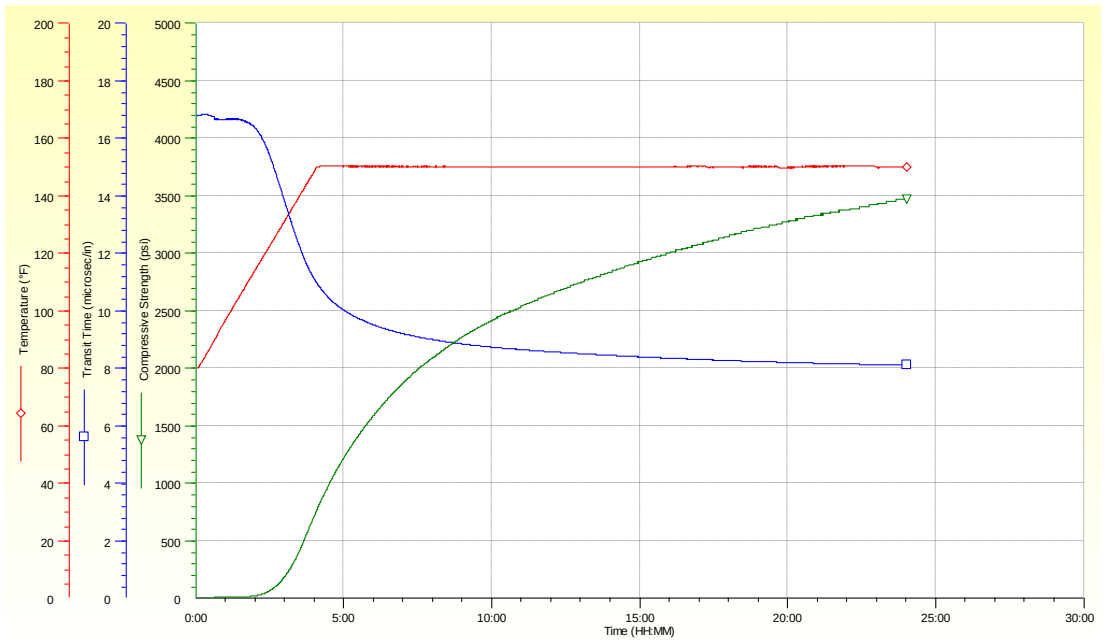
Şekil H.1: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0 ARI).



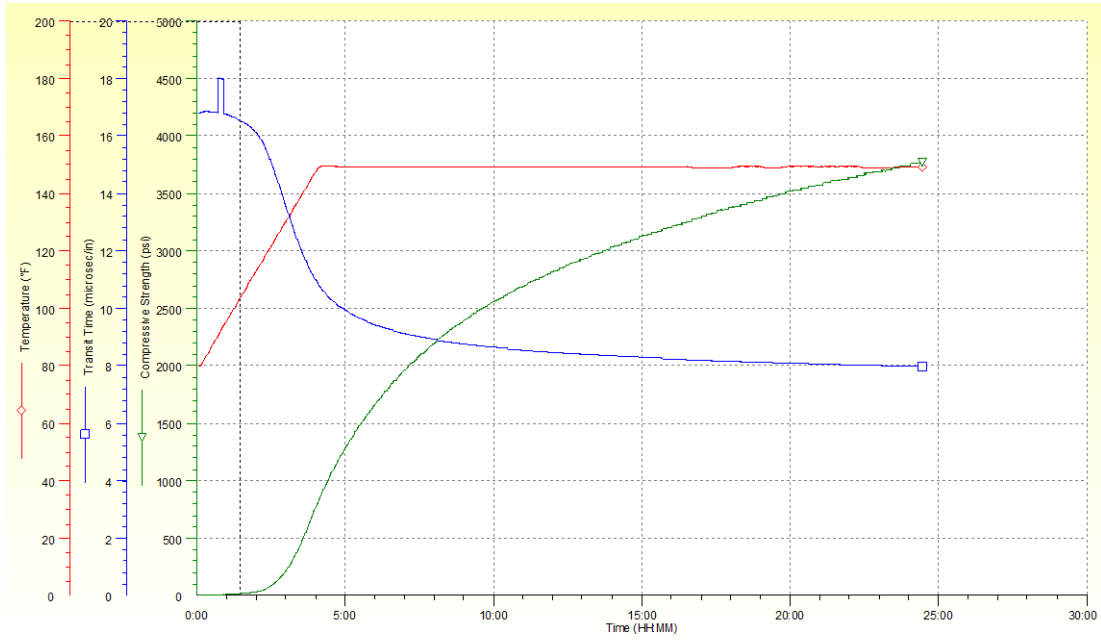
Şekil H.2: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0 ARI) – tekrar 1.



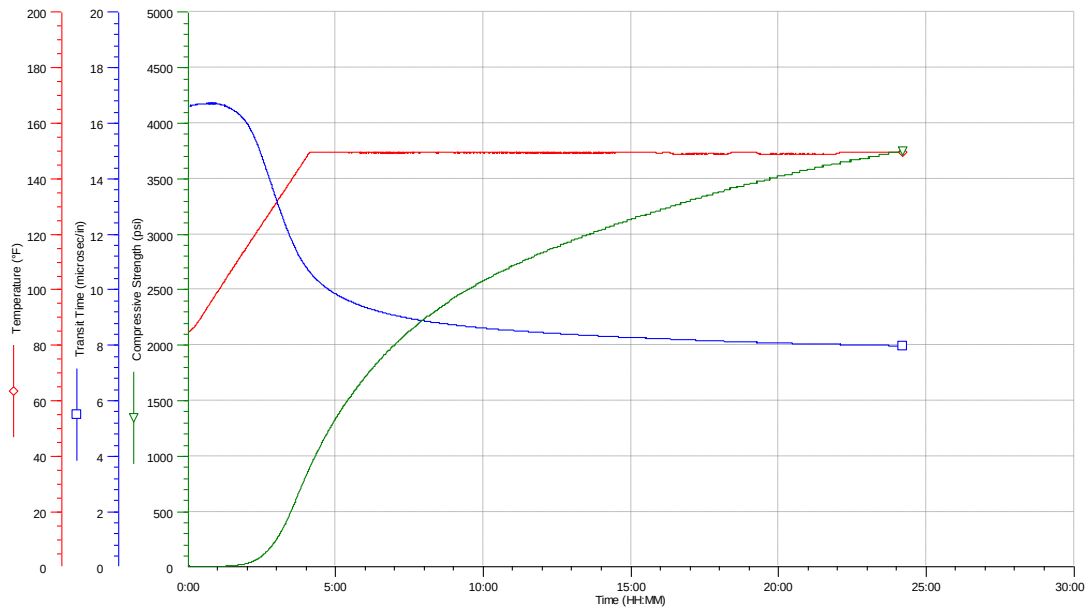
Şekil H.3: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%1,5 ARI).



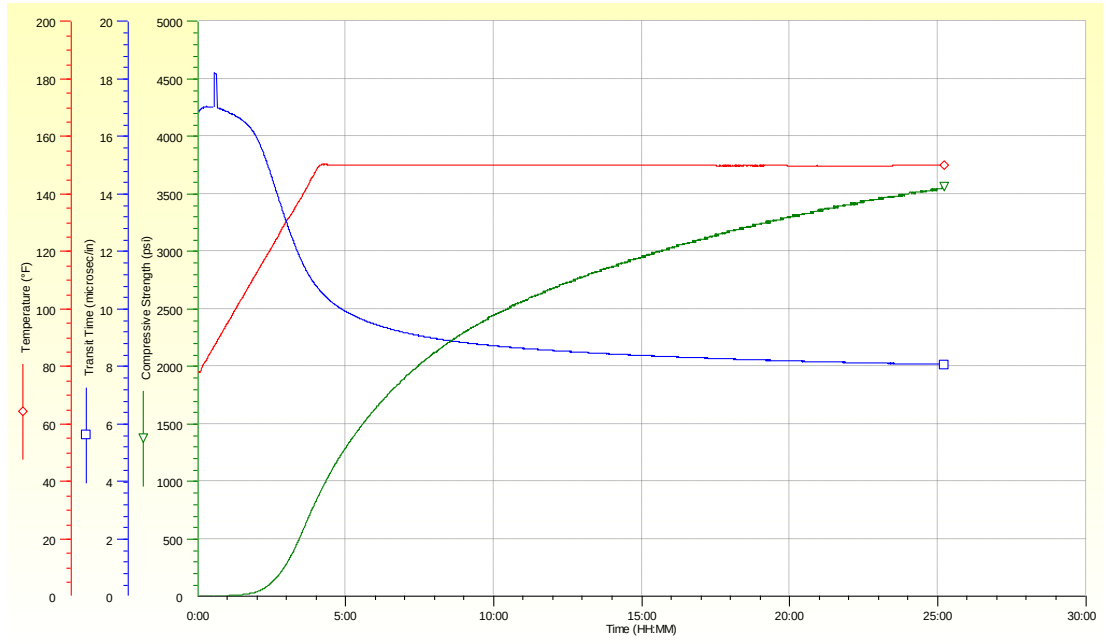
Şekil H.4: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2 ARI) – tekrar 1.



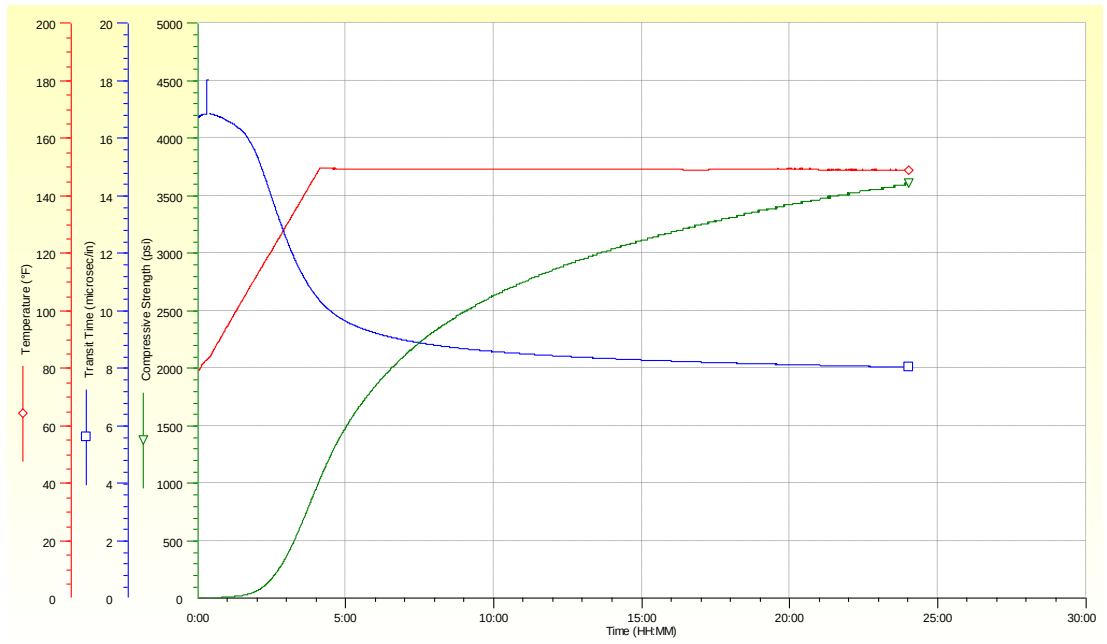
Şekil H.5: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%2,5 ARI).



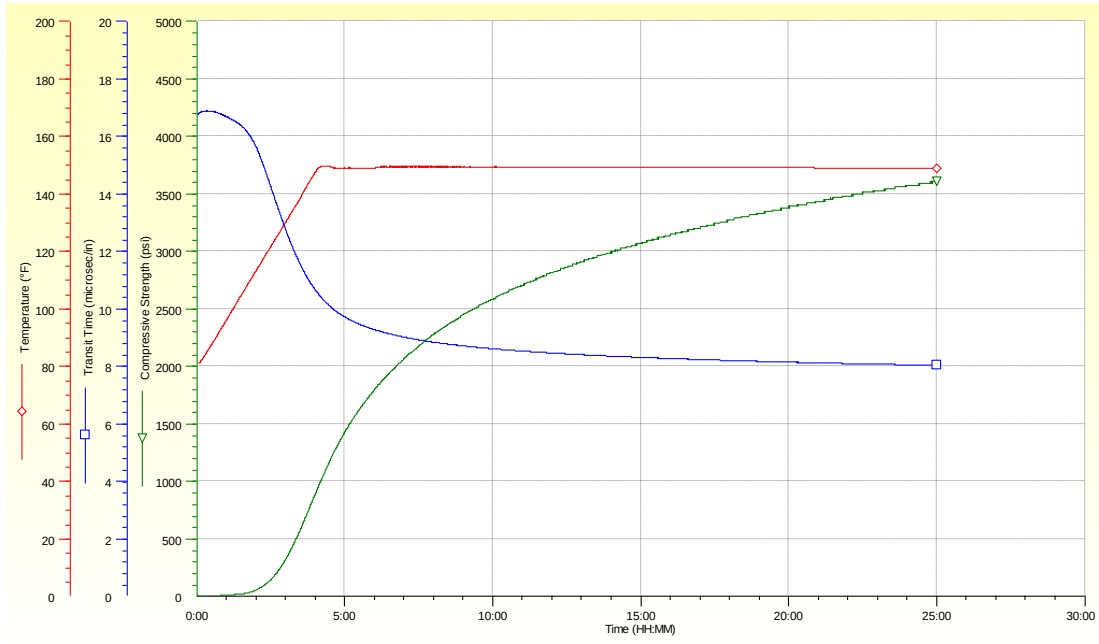
Şekil H.6: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%3 ARI).



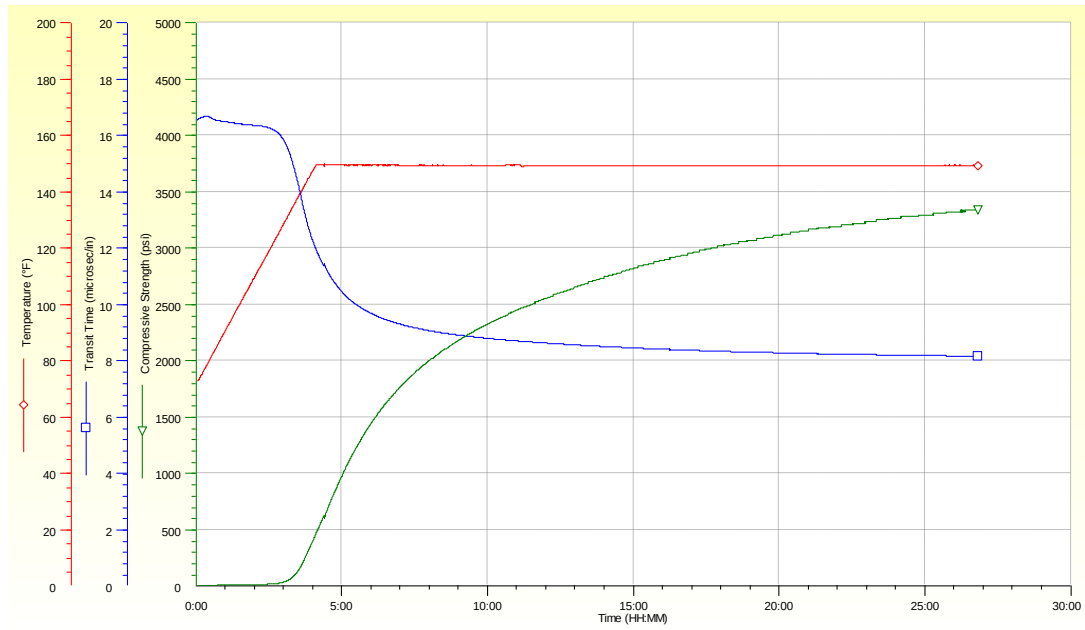
Şekil H.7: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%4 ARI).



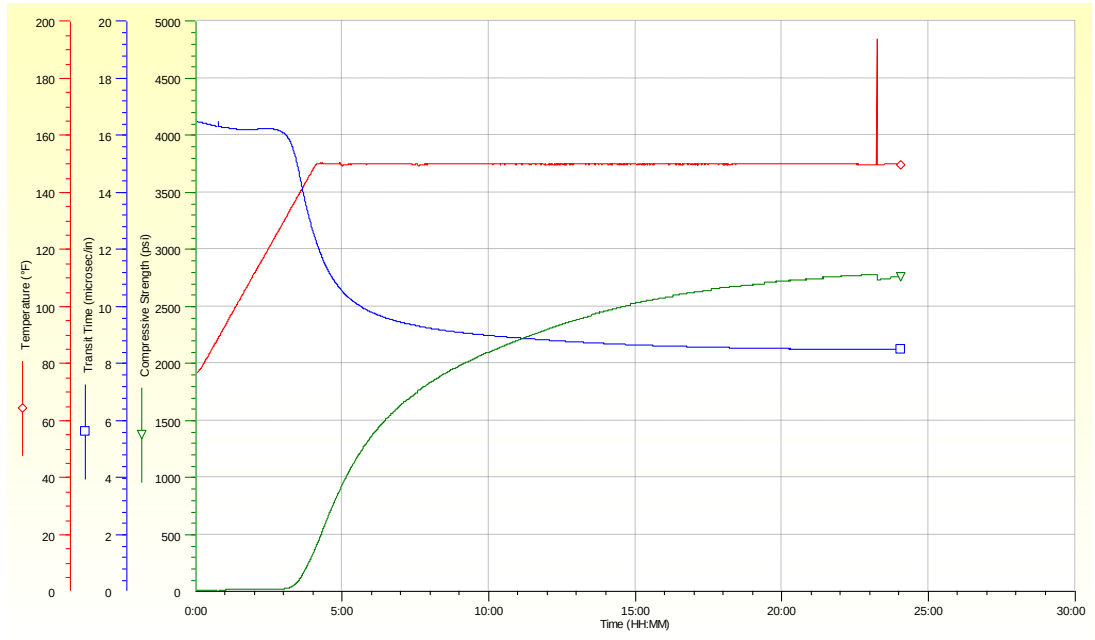
Şekil H.8: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%4 ARI) – tekrar 1.



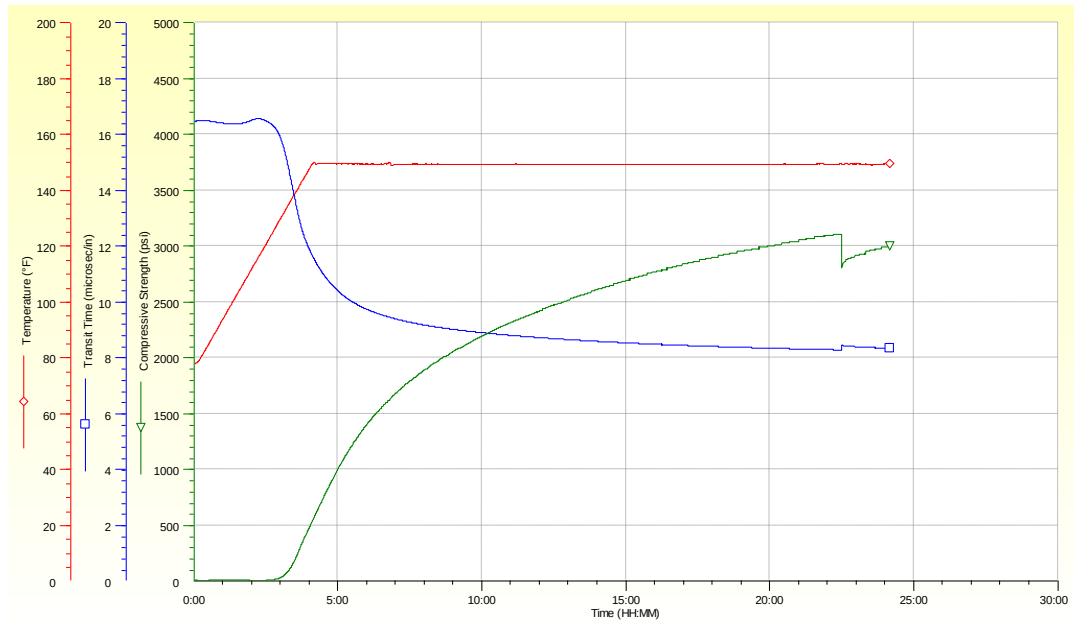
Şekil H.9: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%5 ARI).



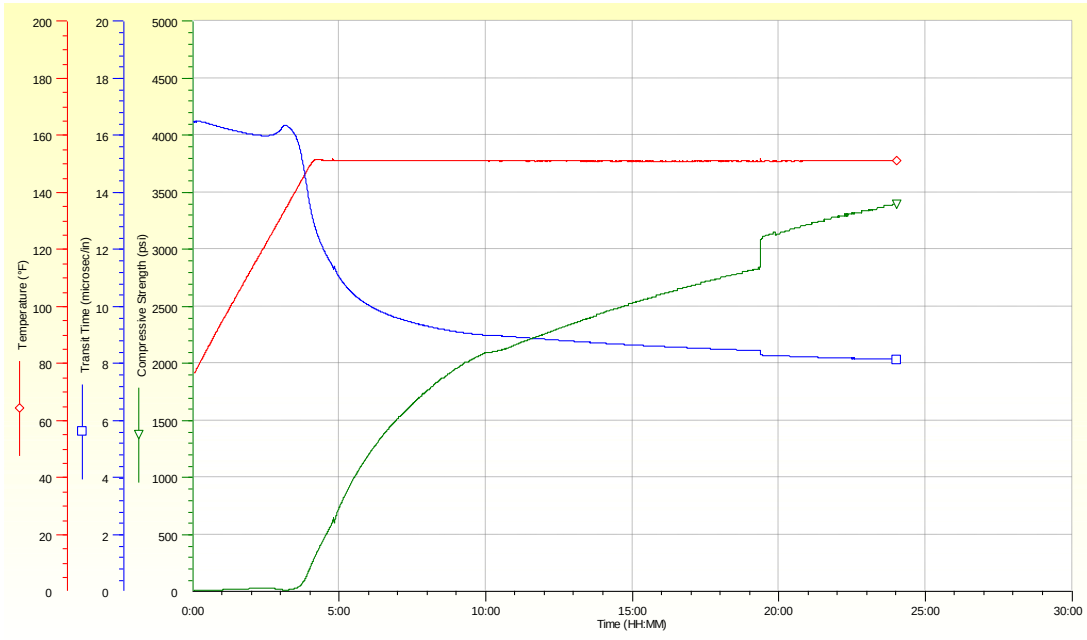
Şekil H.10: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,4 CFR3).



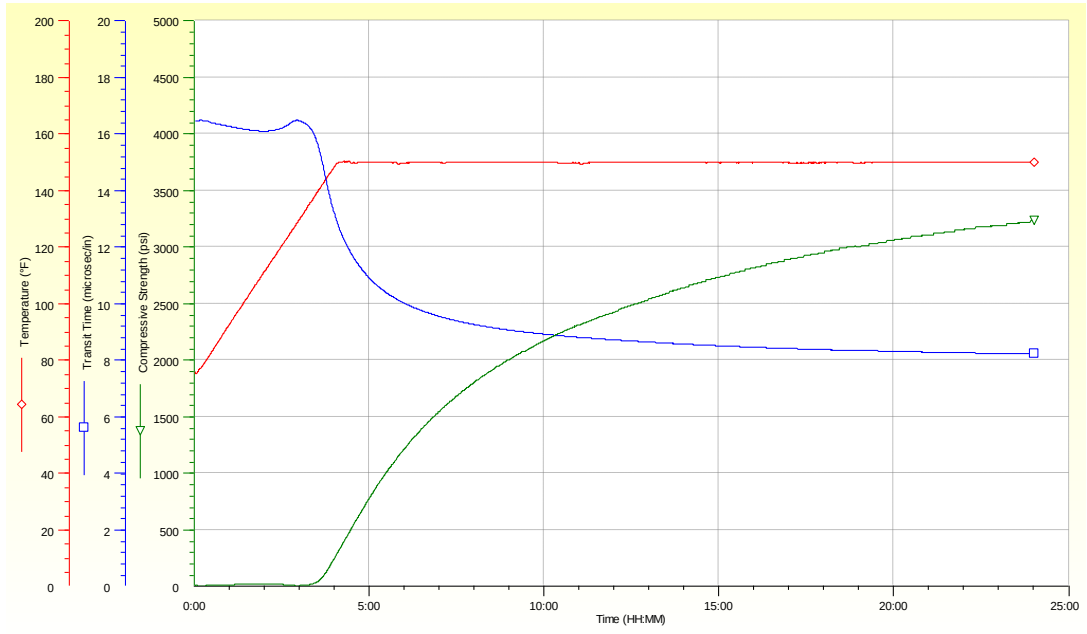
Şekil H.11: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,7 CFR3).



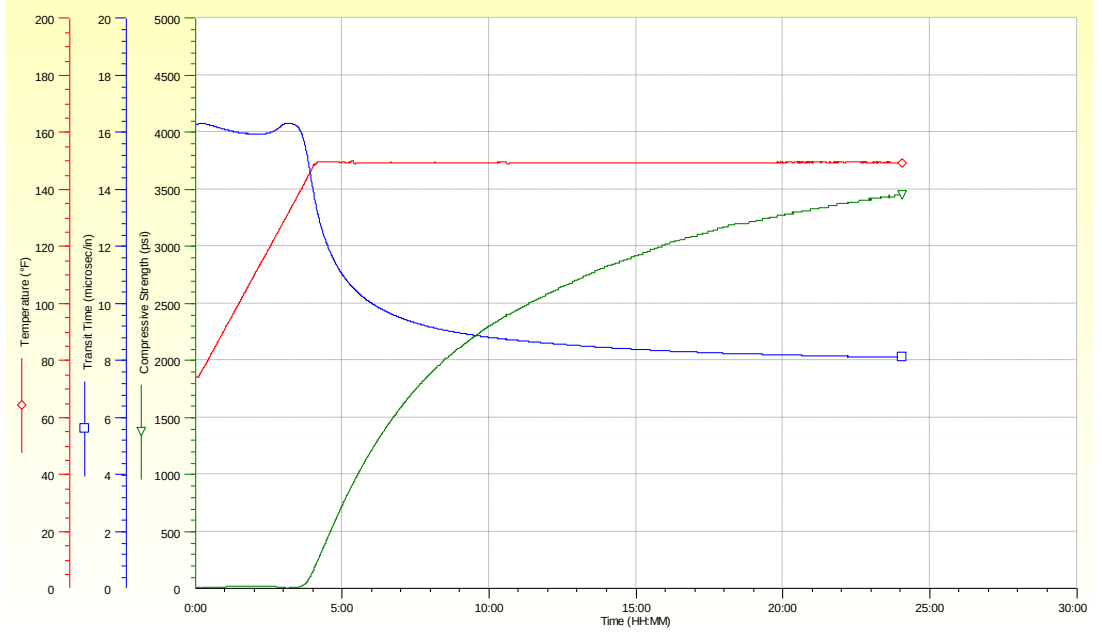
Şekil H.12: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,4 HLD9).



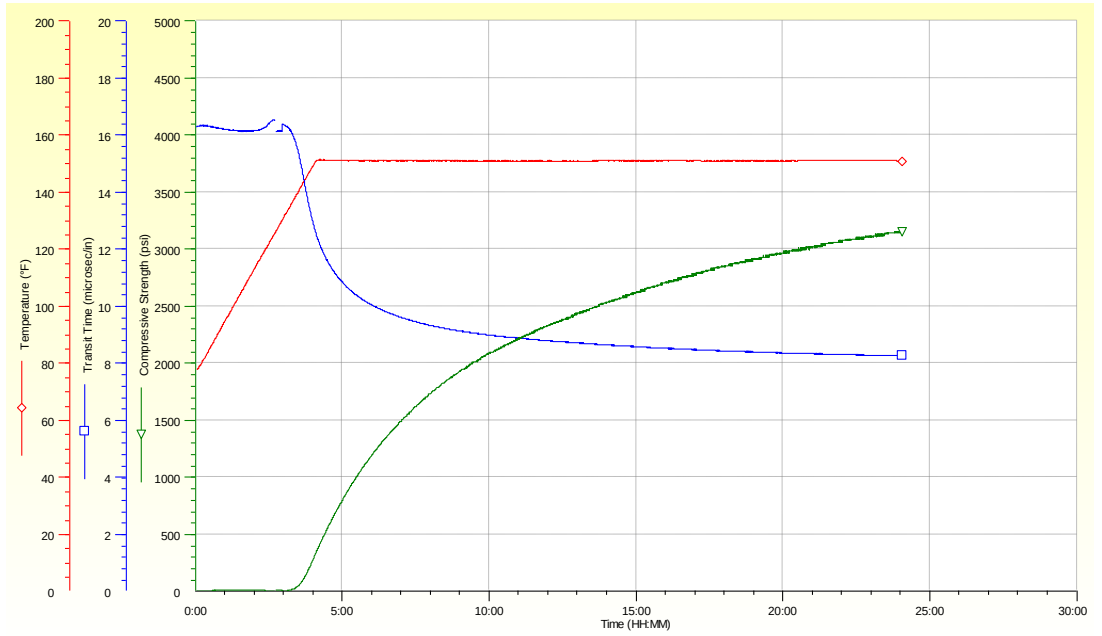
Şekil H.13: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,7 HLD9).



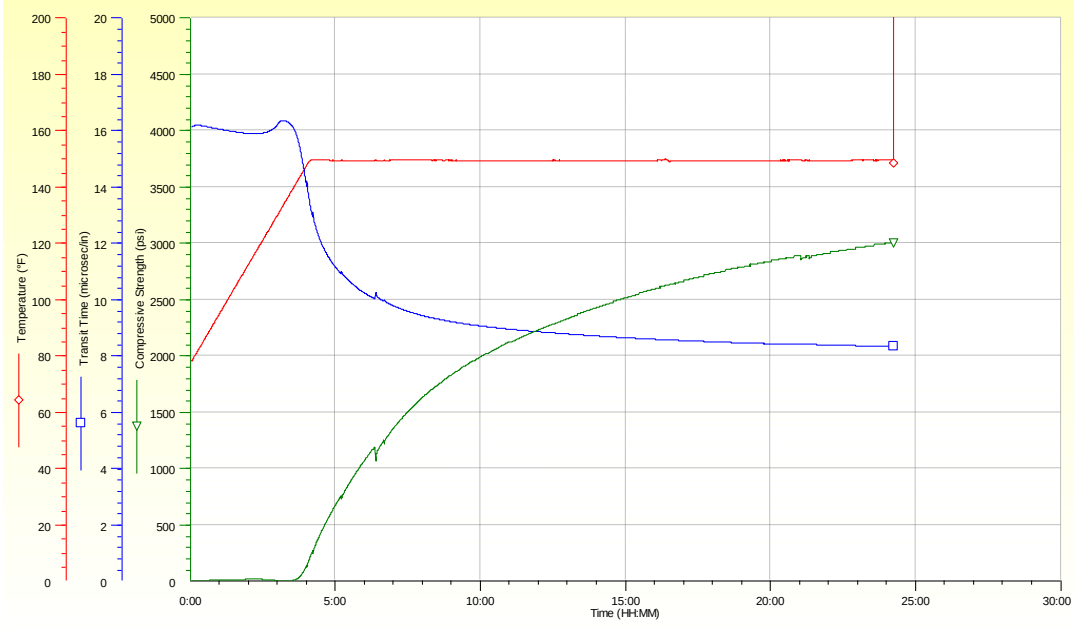
Şekil H.14: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,4 CFR3 ve %0,4 HLD9).



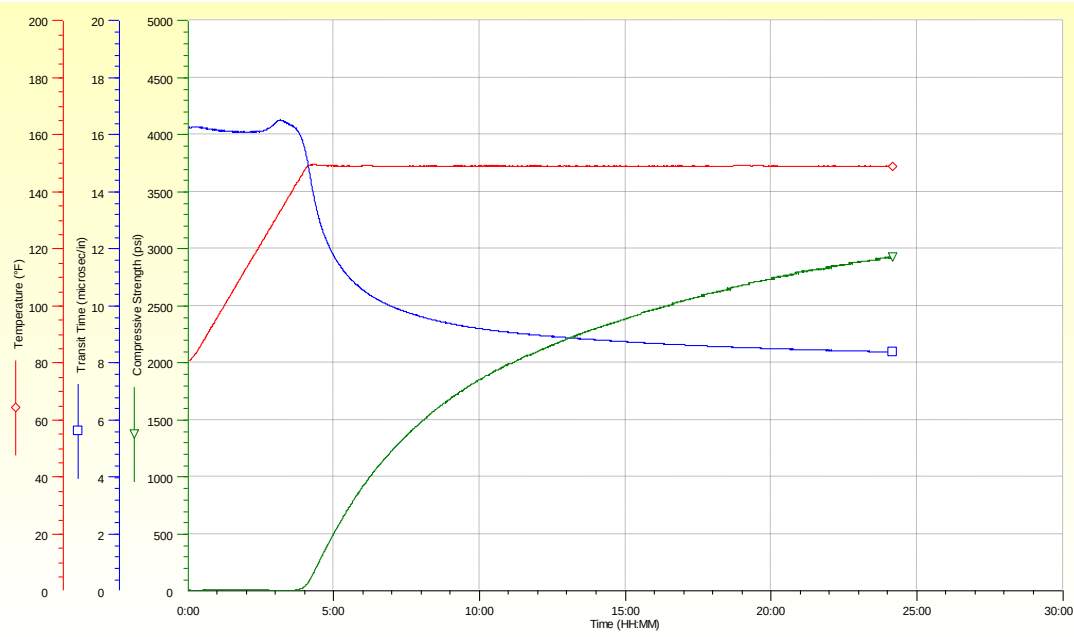
Şekil H.15: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%0,7 CFR3 ve %0,4 HLD9).



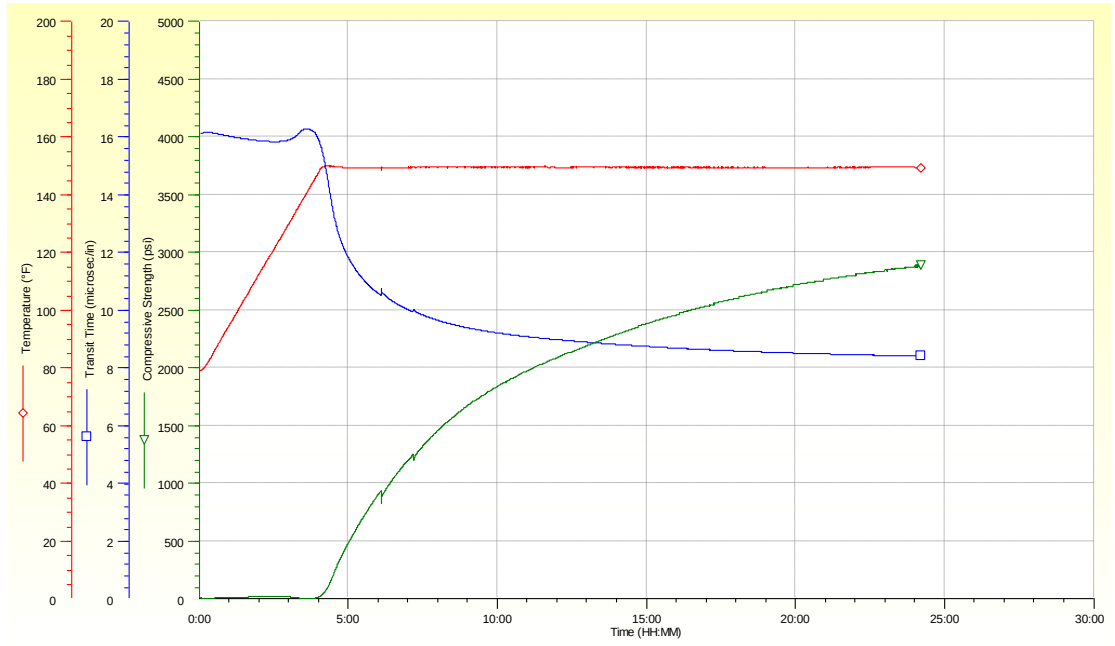
Şekil H.16: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%1 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,4 HLD9).



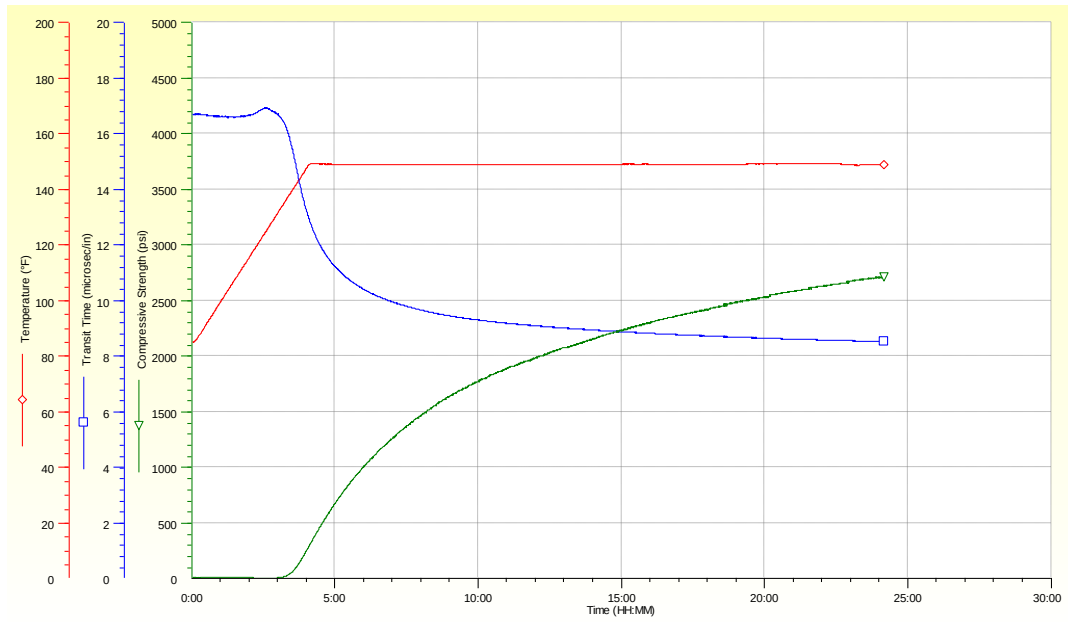
Şekil H.17: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%1 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,7 HLD9).



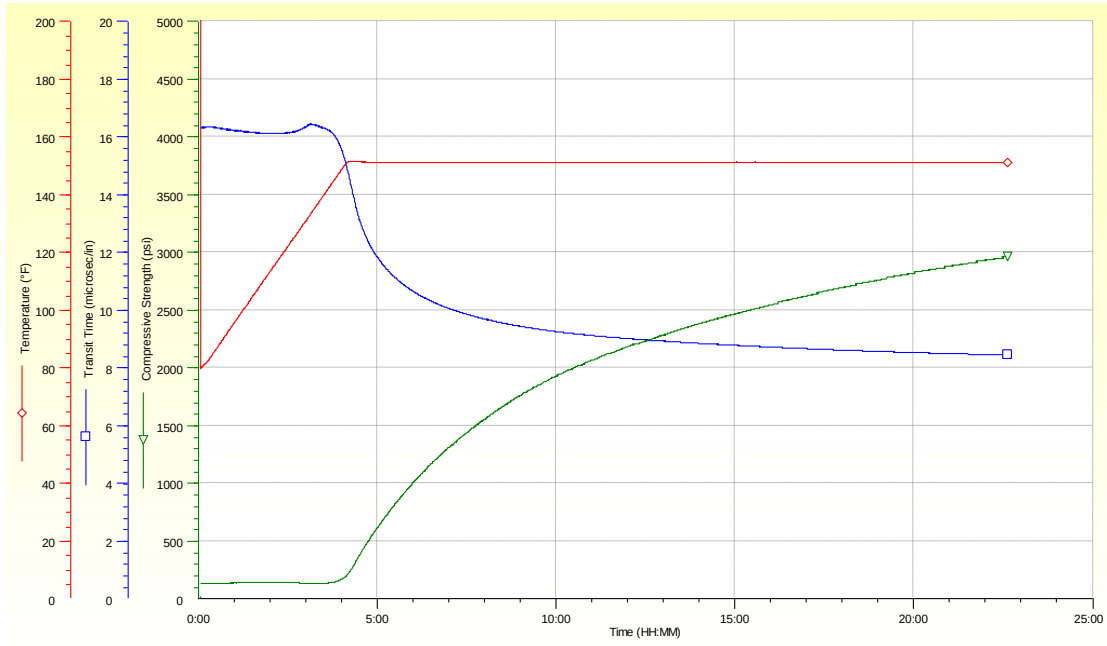
Şekil H.18: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%1 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,4 HLD9).



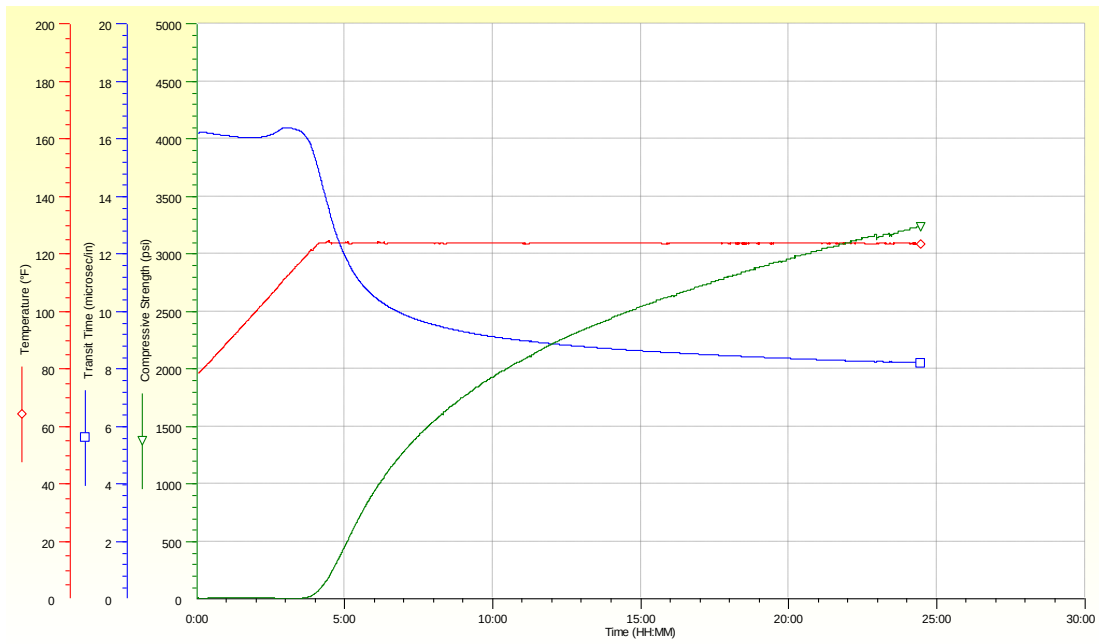
Şekil H.19: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%1 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9).



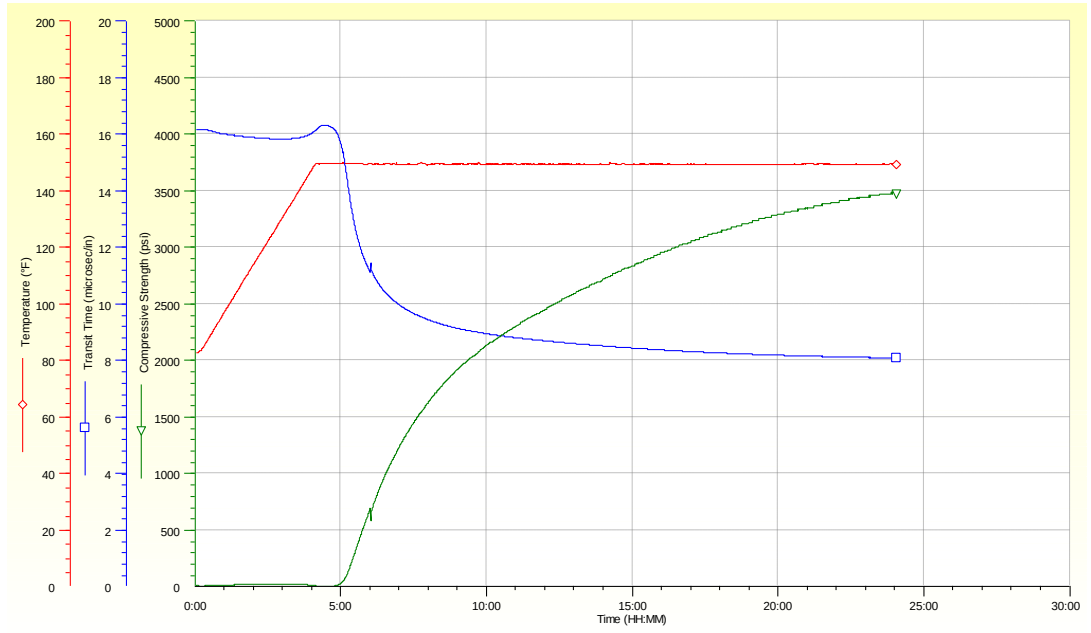
Şekil H.20: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%2 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,4 HLD9).



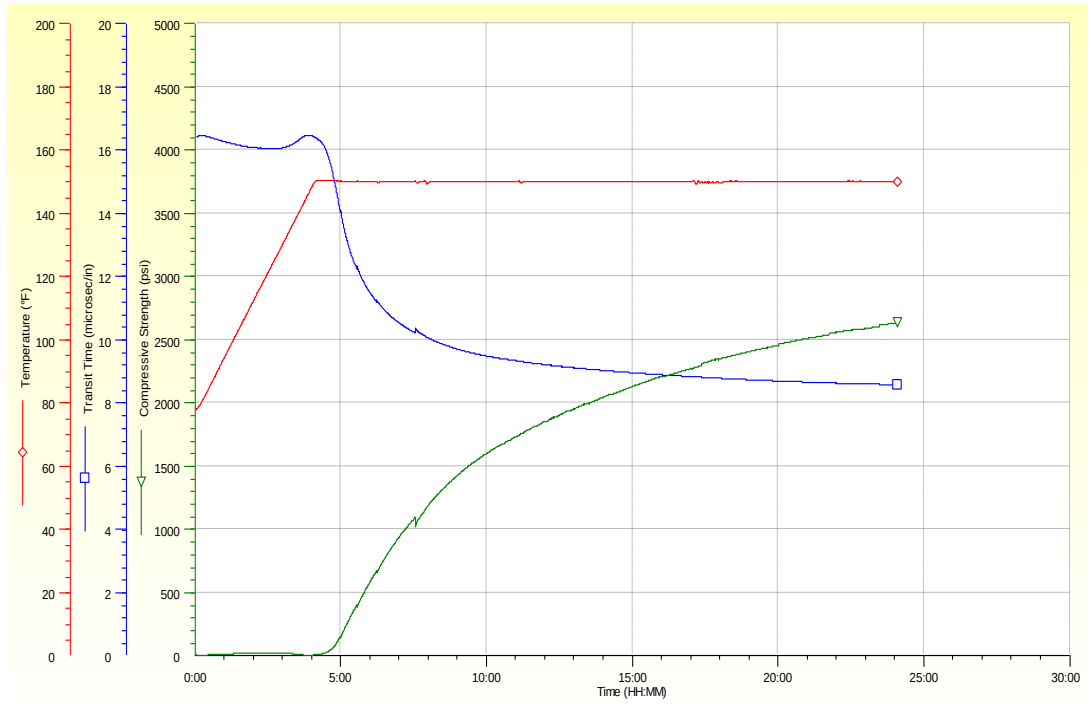
Şekil H.21: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%2 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,7 HLD9).



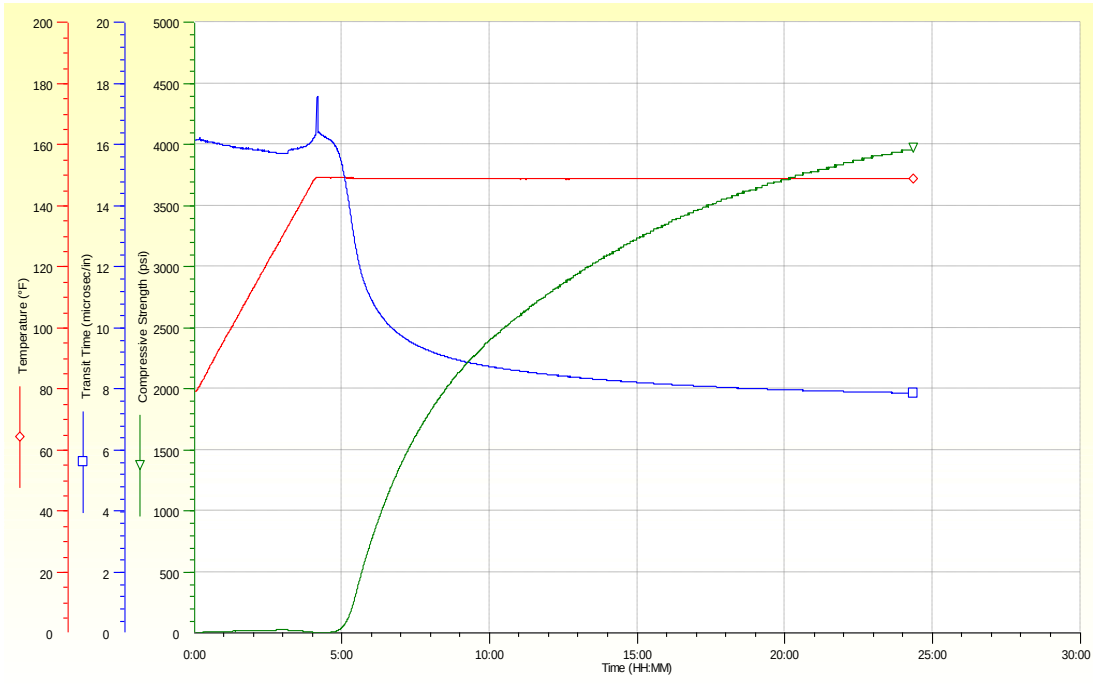
Şekil H.22: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%2 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,4 HLD9).



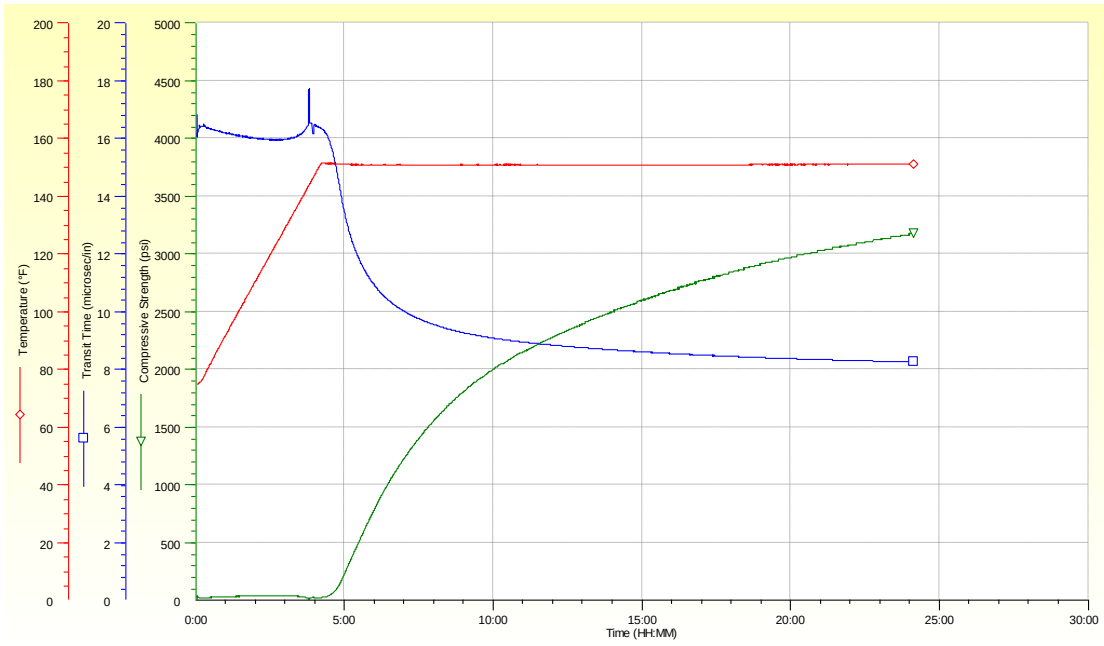
Şekil H.23: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%2 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9).



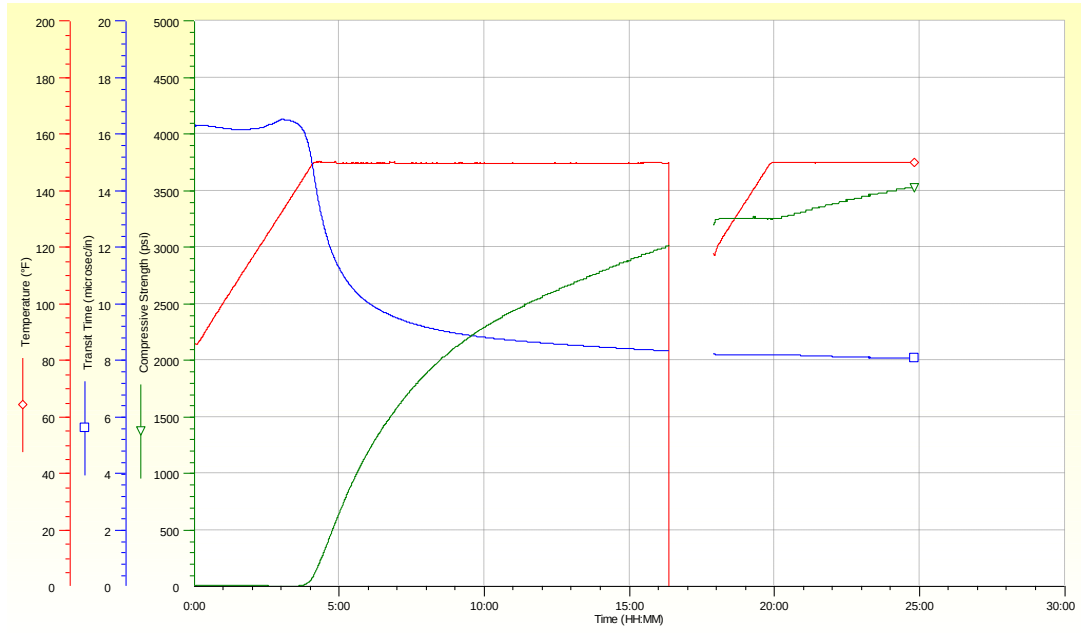
Şekil H.24: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%2 ARI, %0,9 CFR3 ve %0,7 HLD9).



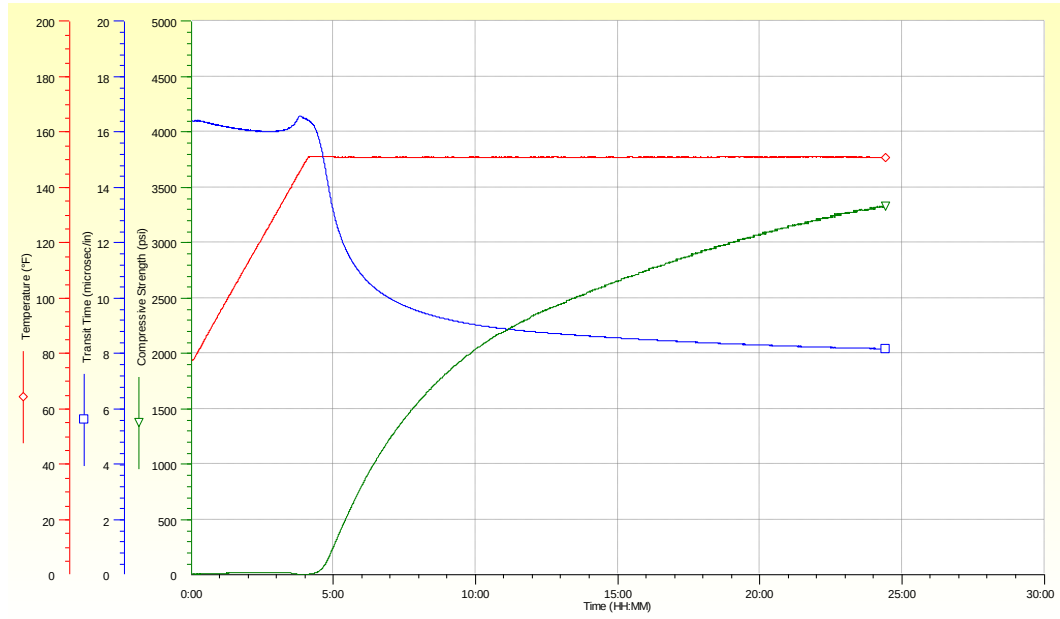
Şekil H.25: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%2 ARI, %0,9 CFR3 ve %0,9 HLD9).



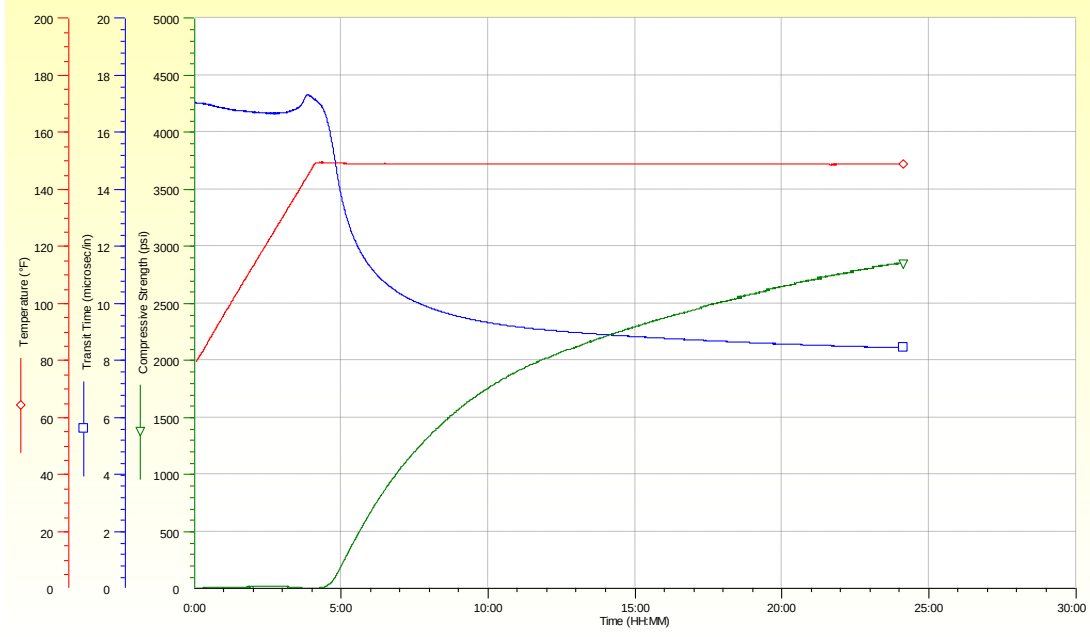
Şekil H.26: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%2 ARI, %1,0 CFR3 ve %0,5 HLD9).



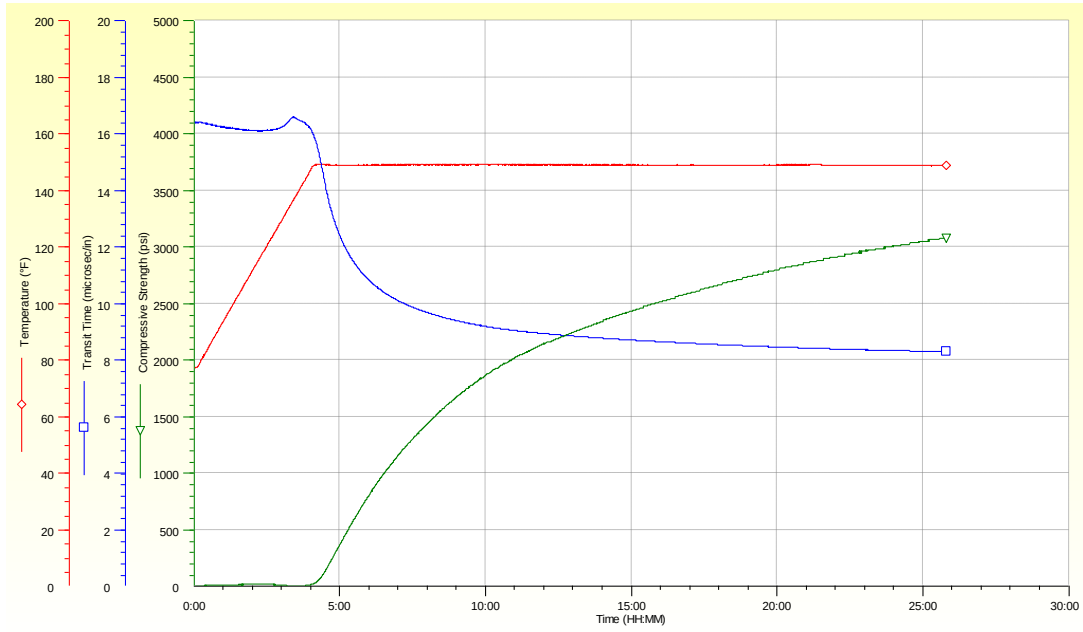
Şekil H.27: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%3 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,4 HLD9).



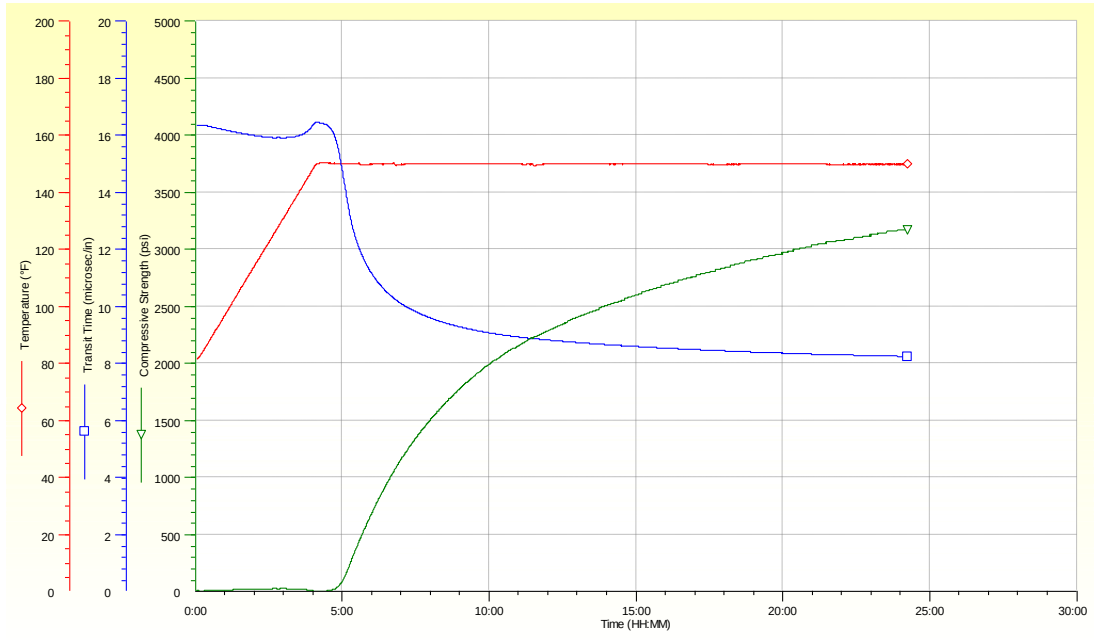
Şekil H.28: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%3 ARI, %0,4 CFR3 ve %0,7 HLD9).



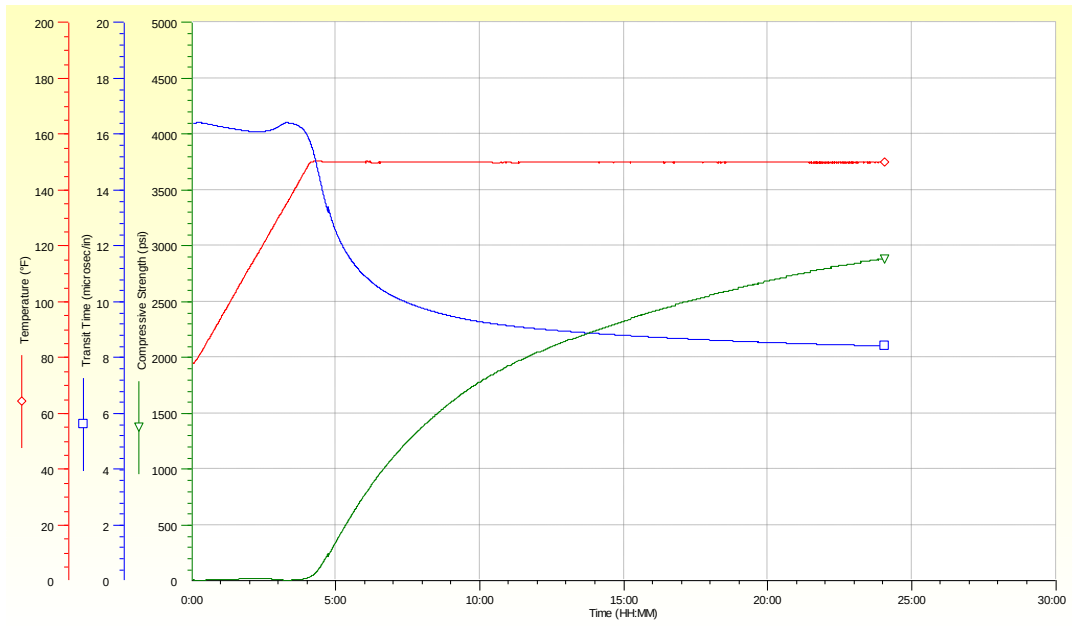
Şekil H.29: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%3 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,4 HLD9).



Şekil H.30: G Sınıf çimento dayanım davranışı (%3 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9).



Şekil H.31: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%4 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9).

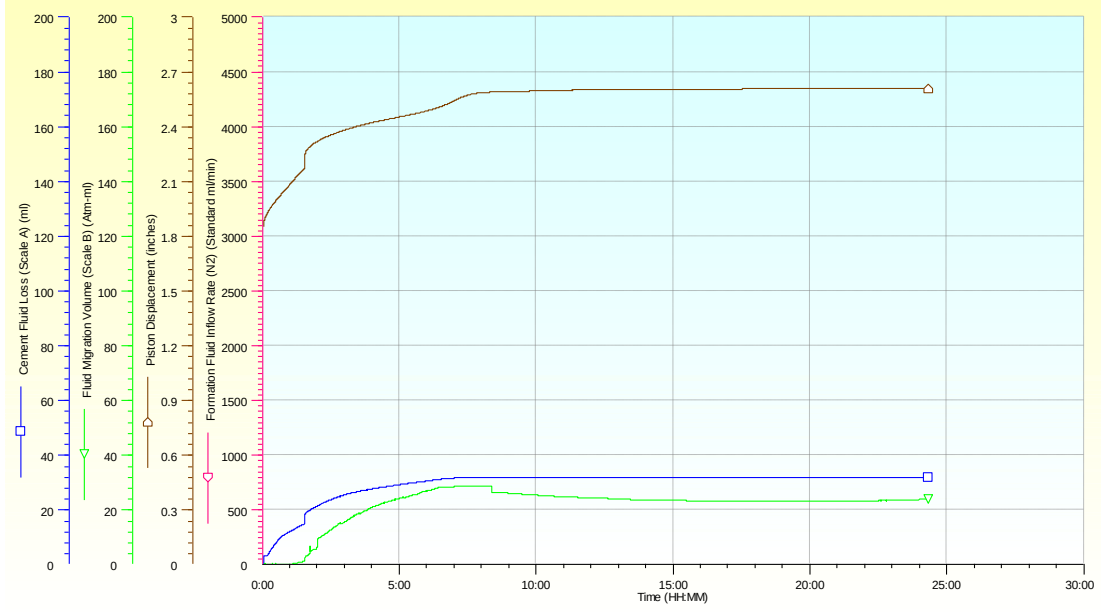


Şekil H.32: G Sınıf çimento dayanım davranışı
(%4 ARI, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9).

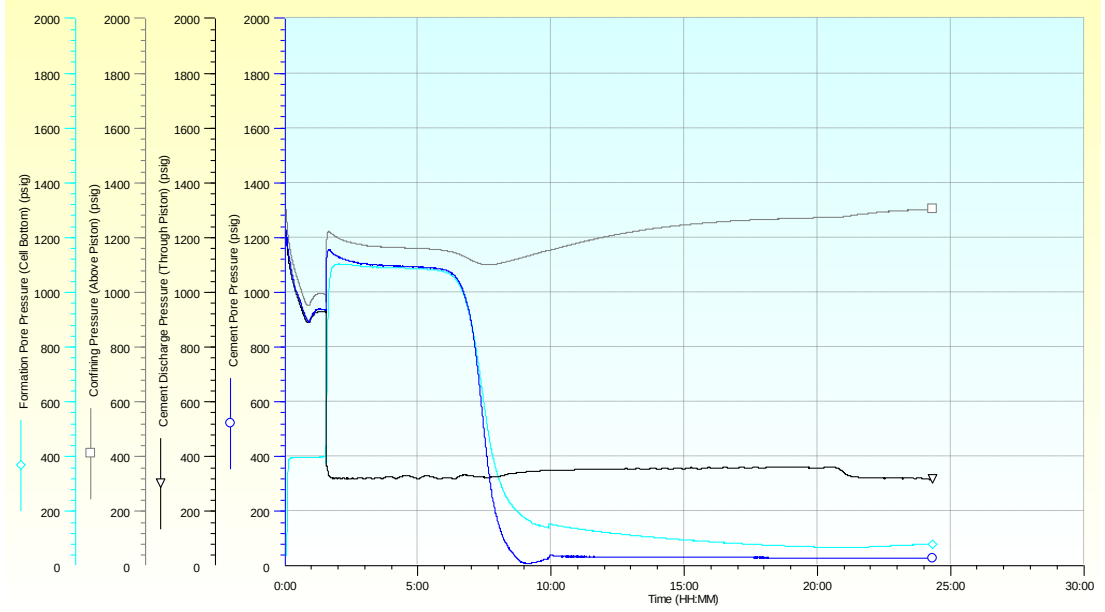
Çizelge I.1: Çimento örnekleri gaz geçirgenlik sonuçları.

Örnek Kodu	Geçirgenlik, md											
	1 gün			ortalama	7 gün			ortalama	28 gün			ortalama
G_0_C600	0,21	0,16	0,14	0,17	0,29	0,22	0,21	0,24	0,33	0,31	0,29	0,31
G_3_C600	0,13	0,12	0,13	0,13	0,11	0,14	0,11	0,12	0,13	0,14	0,13	0,13
G_5_C600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G_0_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	0	0	0	0	0,12	0,13	0,13	0,13	0,17	0,11	0,14	0,14
G_0_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	0	0	0	0	0,12	0,1	0,14	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14
G_0_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	0	0	0	0	0,11	0,08	0,08	0,09	0,19	0,12	0,14	0,15
G_0_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	0	0	0	0	0,13	0,12	0,13	0,13	0,17	0,14	0,15	0,15
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	0	0	0	0	0	0,07	0,05	0,04	0,09	0,09	0,08	0,09
G_1_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	0	0	0	0	0,1	0,08	0,09	0,09	0,04	0,07	0,06	0,06
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	0	0	0	0	0,06	0	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04	0,05
G_1_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	0	0	0	0	0,07	0,04	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06
G_2_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0	0,06	0,04
G_2_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	0	0	0	0	0,4	0,5	0	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04
G_2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	0	0	0	0	0	0,02	0,04	0,02	0,04	0,05	0,04	0,04
G_2_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,06	0,05	0,05
G_3_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,01
G_3_C600_44_CFR3_0,4_HLD9_0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,2	0	0,02
G_3_C600_44_CFR3_0,7_HLD9_0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

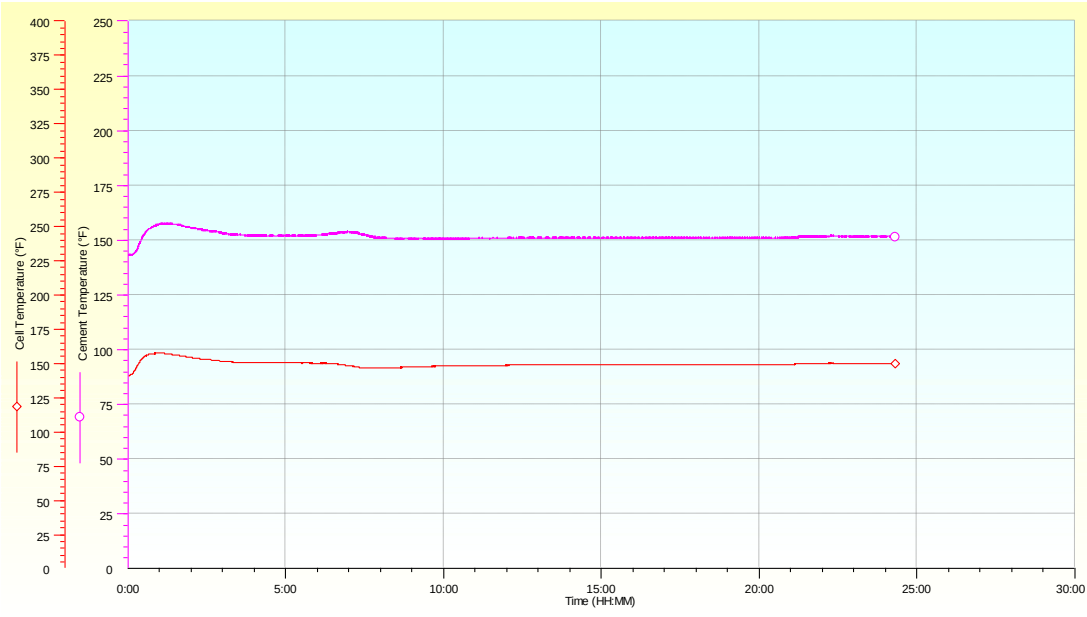
EK J



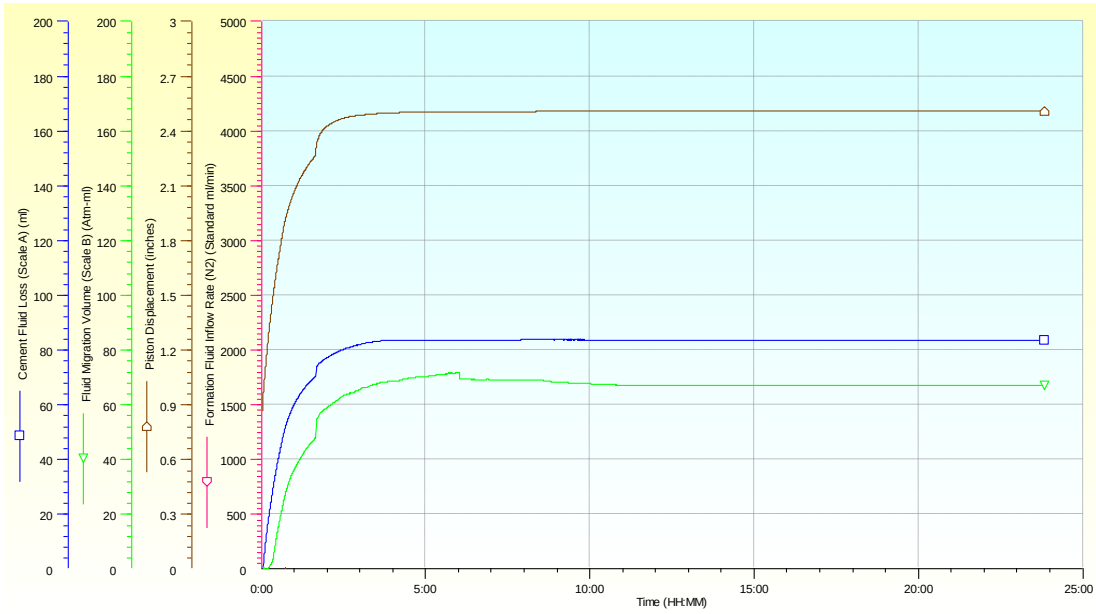
Şekil J.1: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – gaz göçü grafiği – T: 150 °F.



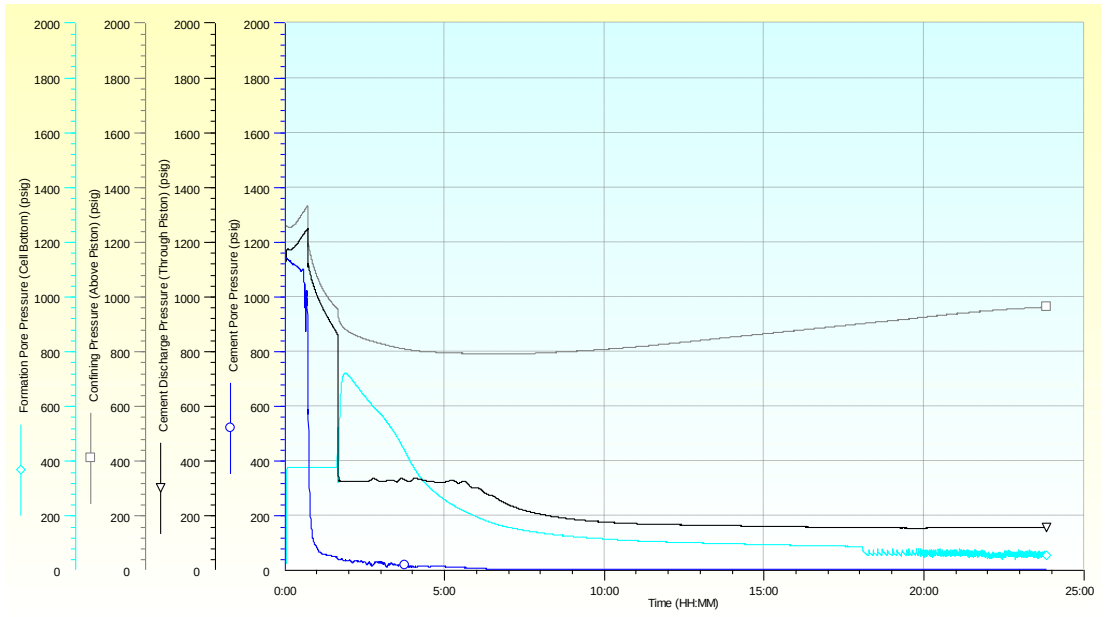
Şekil J.2: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – basınç grafiği – T: 150 °F.



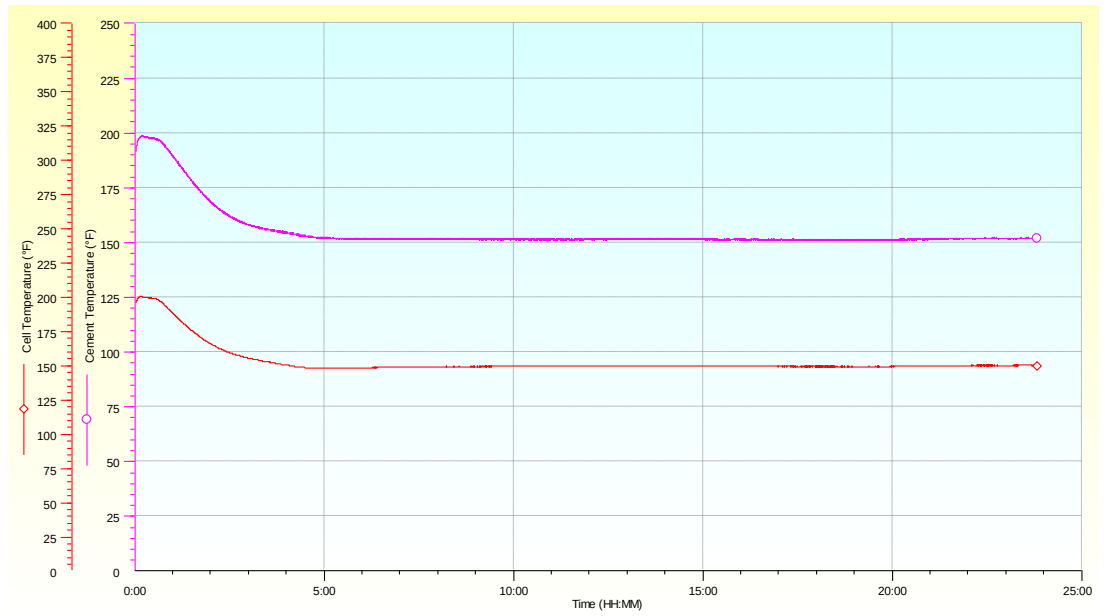
Şekil J.3: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%1 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – sıcaklık grafiği – T: 150 °F.



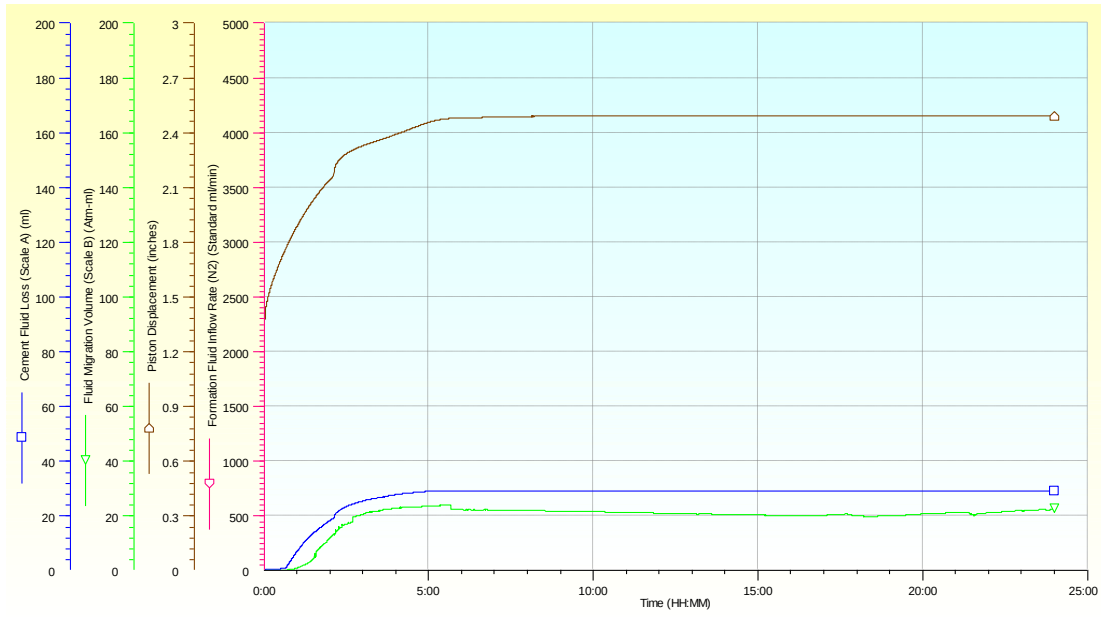
Şekil J.4: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %1 CFR3 ve %0,5 HLD9) – gaz göçü grafiği – T: 150 °F.



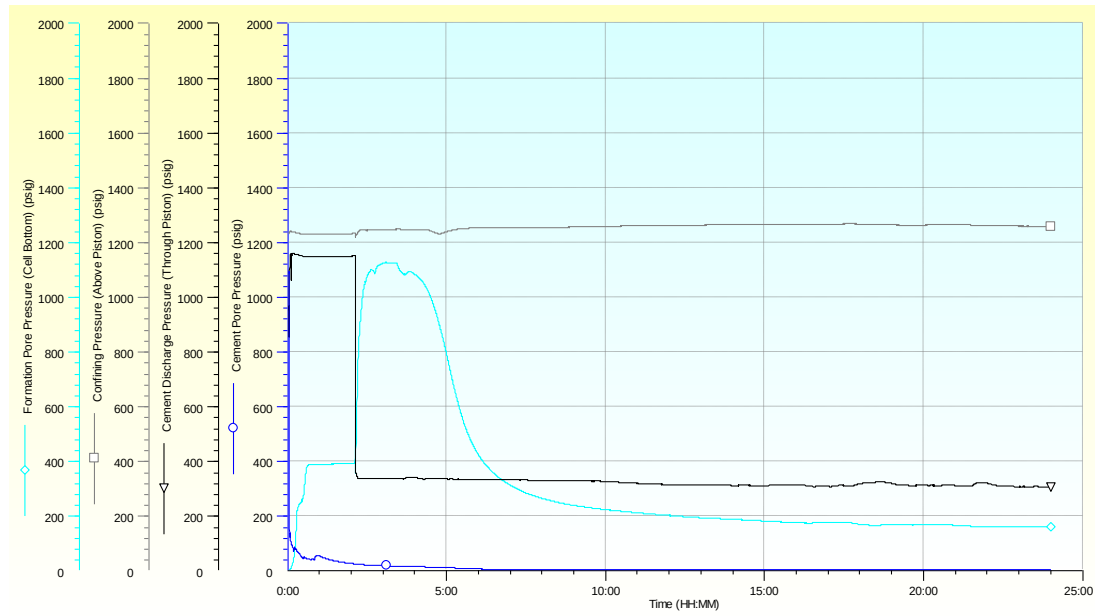
Şekil J.5: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %1 CFR3 ve %0,5 HLD9) – basınç grafiği – T: 150 °F.



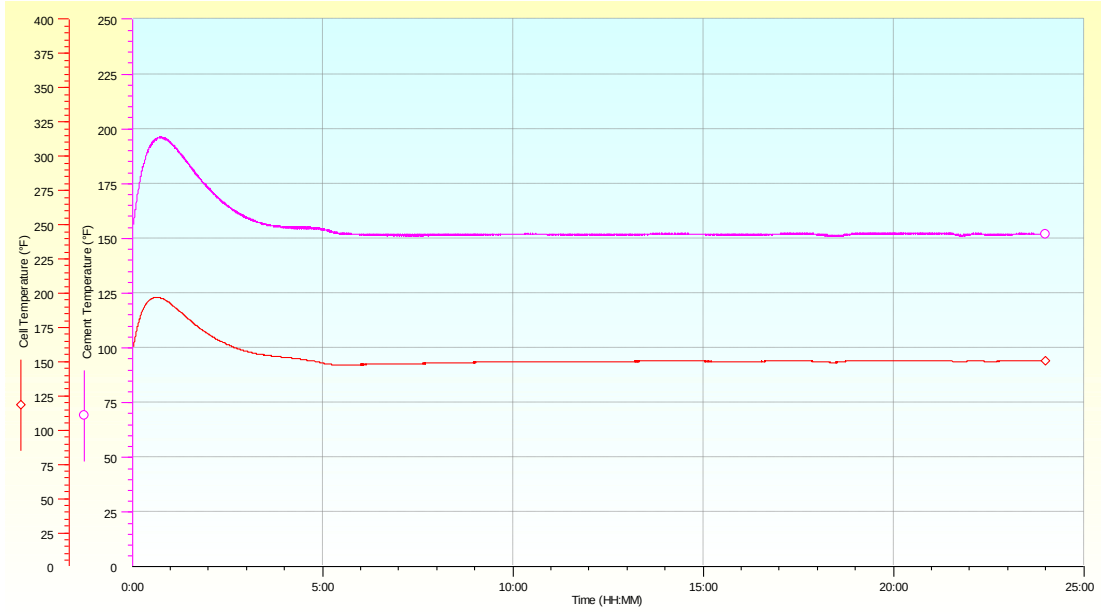
Şekil J.6: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %1 CFR3 ve %0,5 HLD9) – sıcaklık grafiği – T: 150 °F.



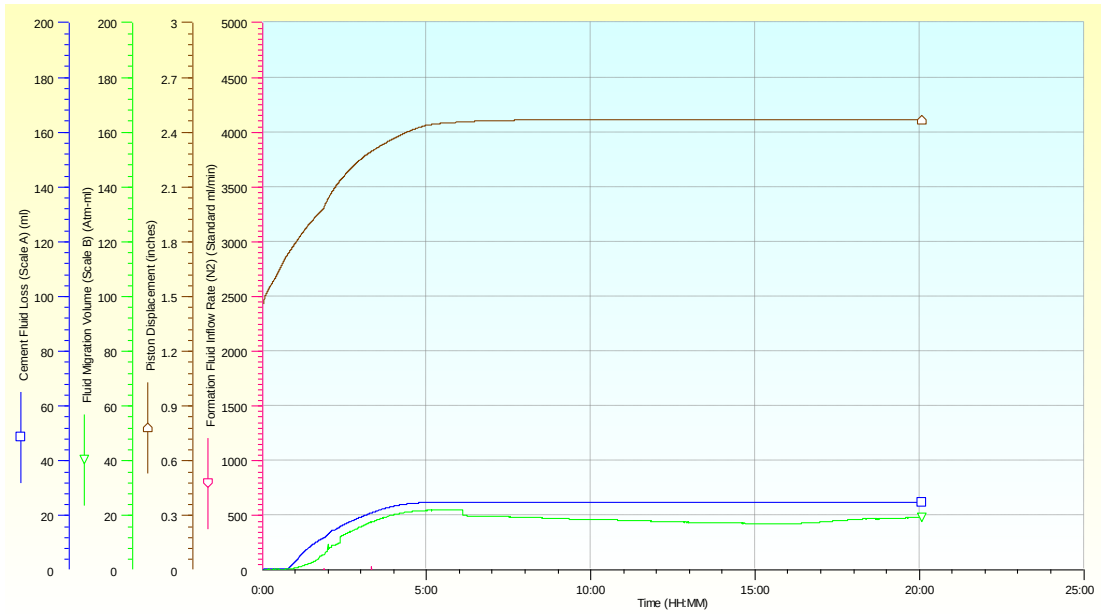
Şekil J.7: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,7 HLD9) – gaz göçü grafiği – T: 150 °F.



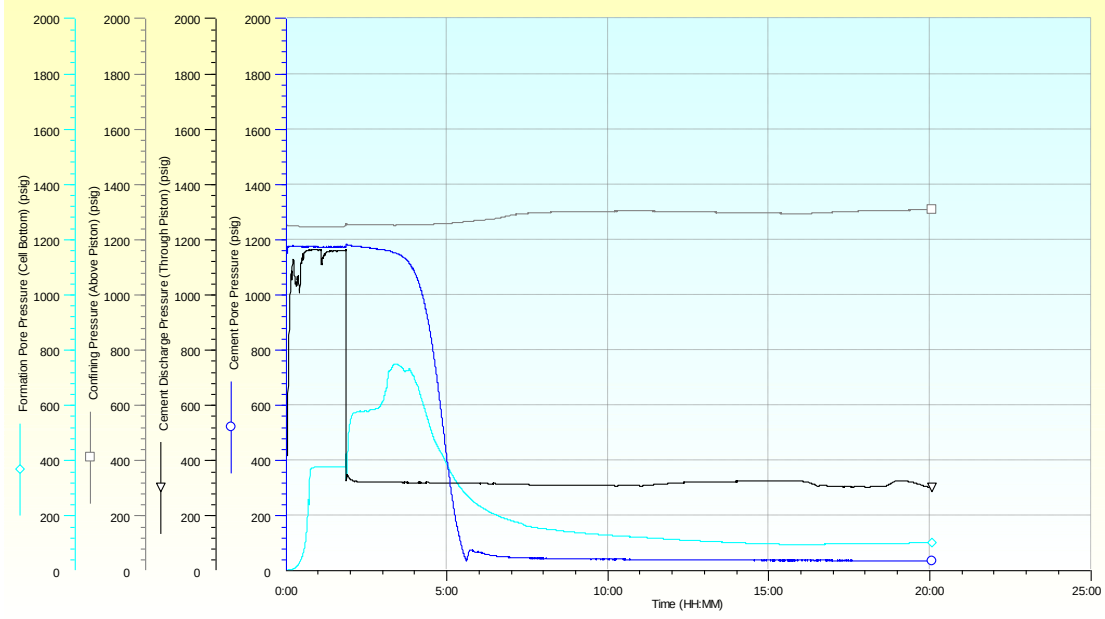
Şekil J.8: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,7 HLD9) – basınç grafiği – T: 150 °F.



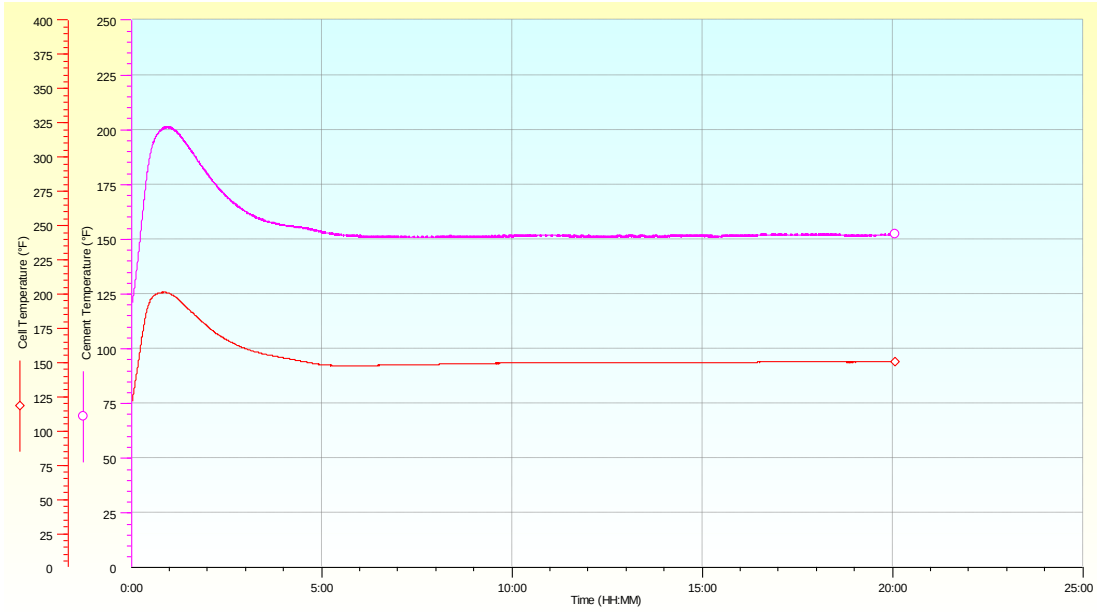
Şekil J.9: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,7 HLD9) – sıcaklık grafiği – T: 150 °F.



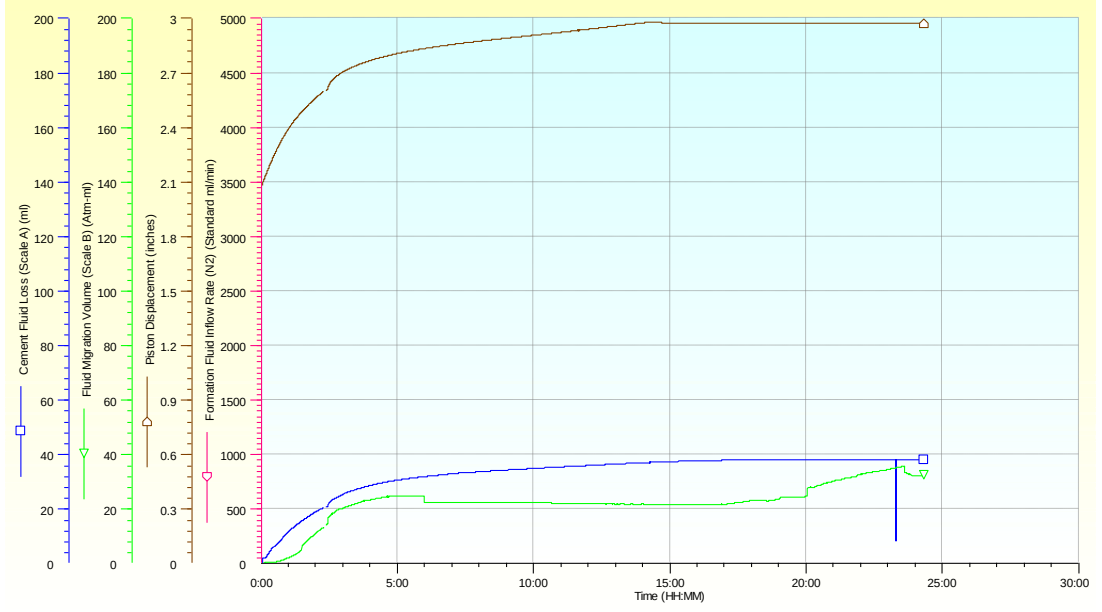
Şekil J.10: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,9 HLD9) – gaz göçü grafiği – T: 150 °F.



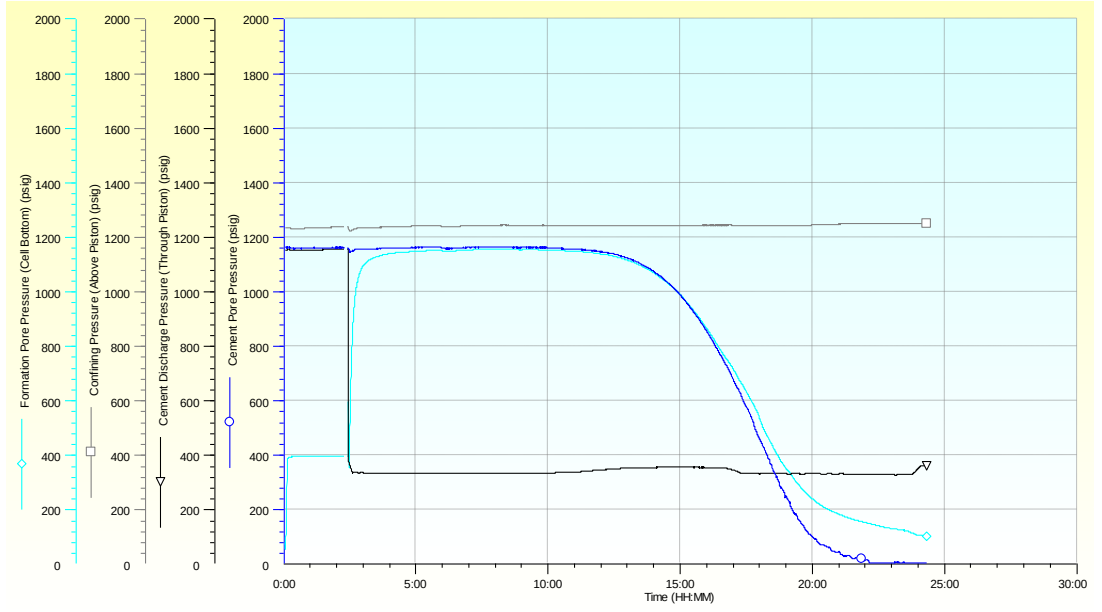
Şekil J.11: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,9 HLD9) – basınç grafiği – T: 150 °F.



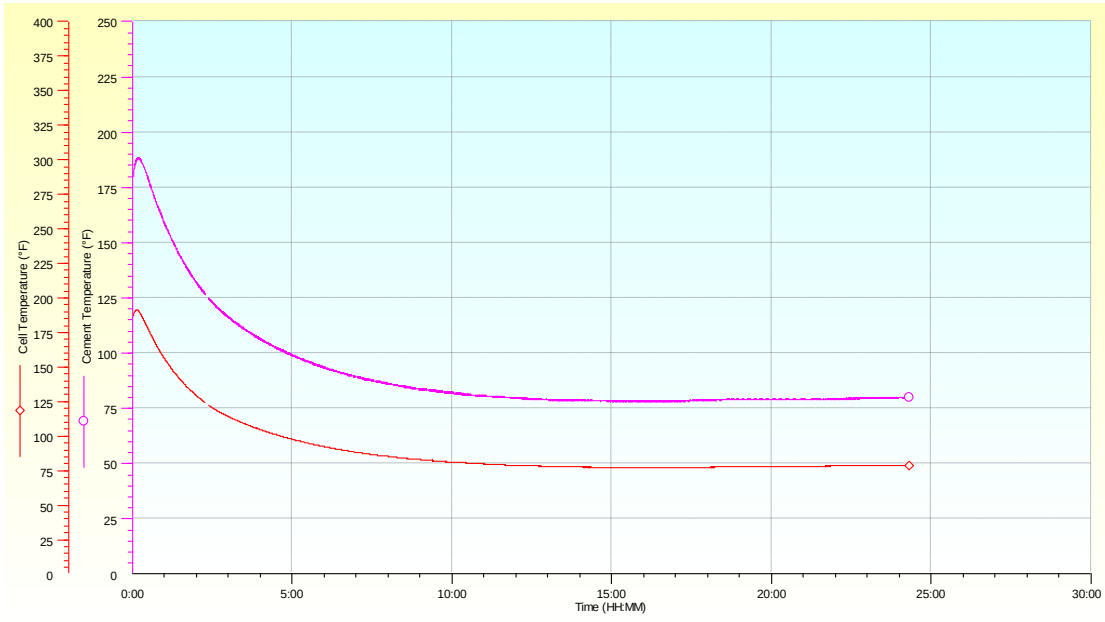
Şekil J.12: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %44 su, %0,9 CFR3 ve %0,9 HLD9) – sıcaklık grafiği – T: 150 °F.



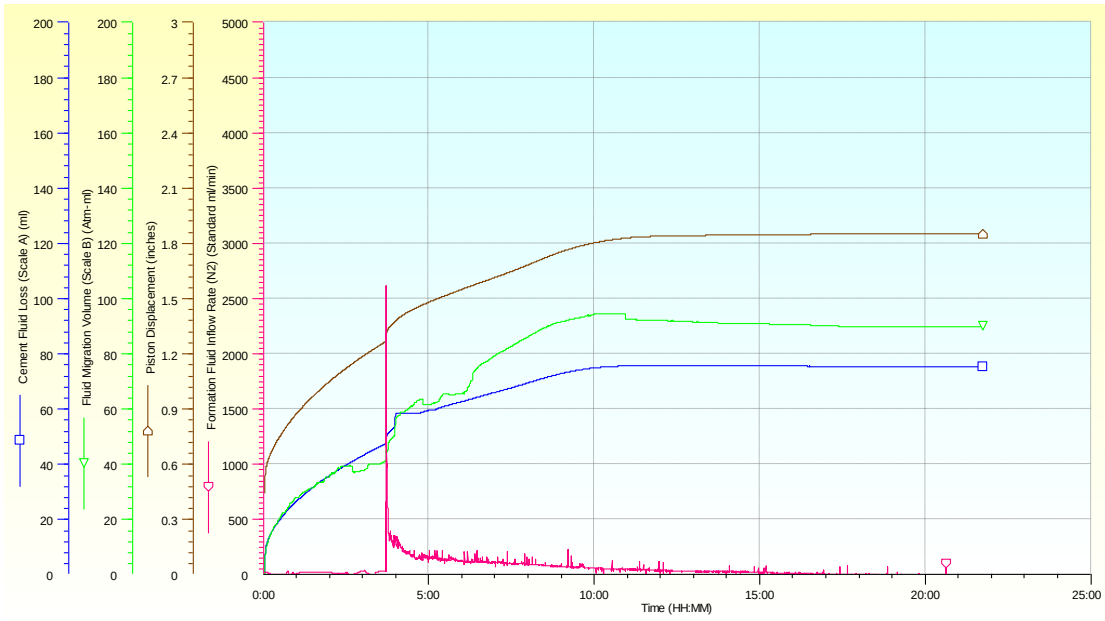
Şekil J.13: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – gaz göçü grafiği.



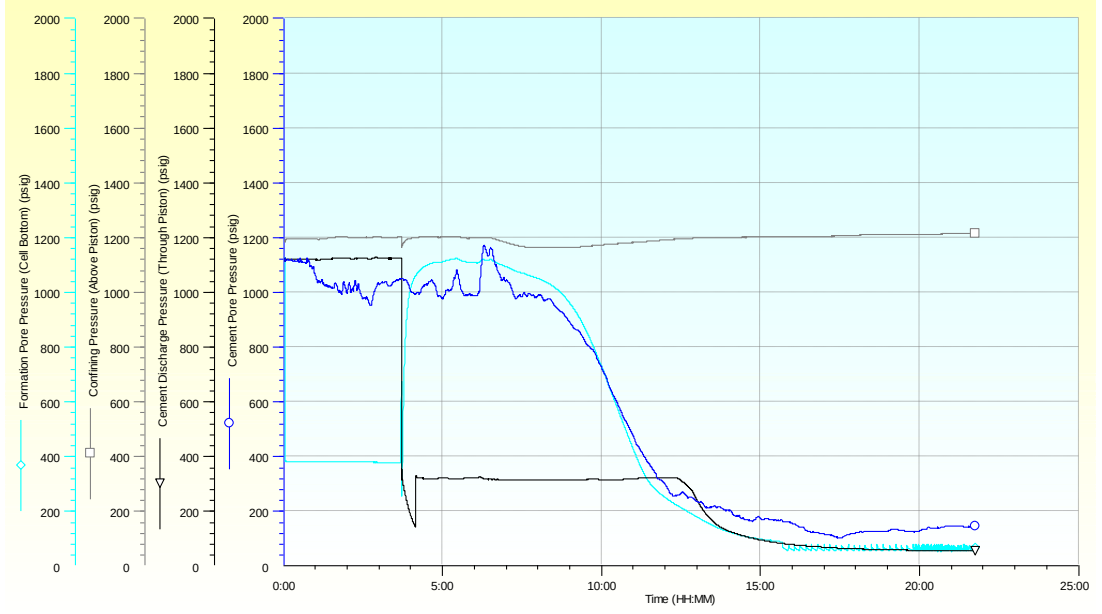
Şekil J.14: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – basınç grafiği.



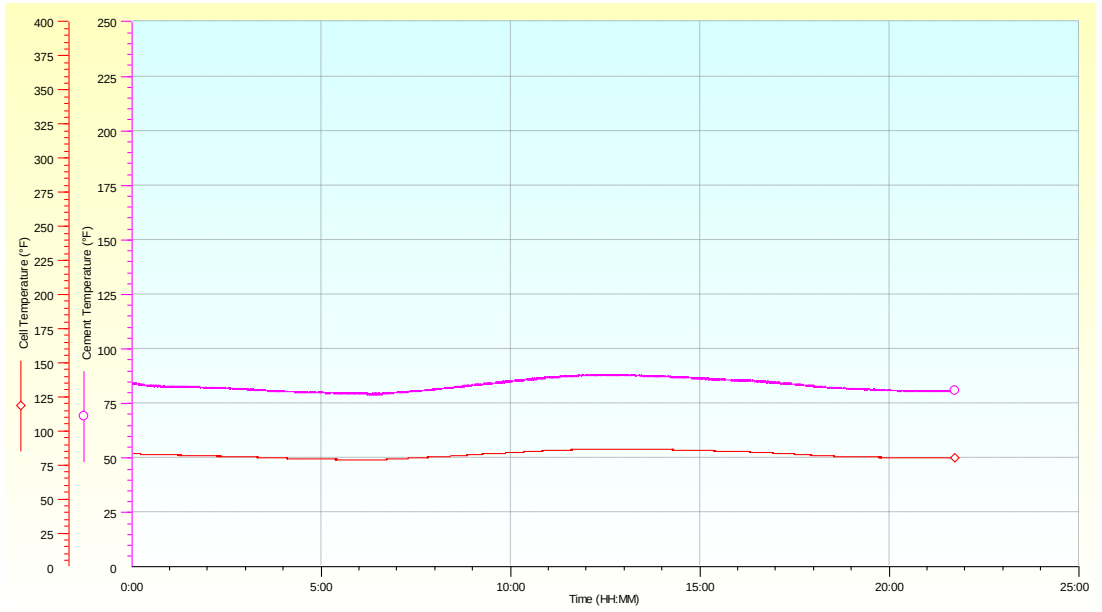
Şekil J.15: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%2 ARI, %48 su, %0,7 CFR3 ve %1 HLD9) – sıcaklık grafiği.



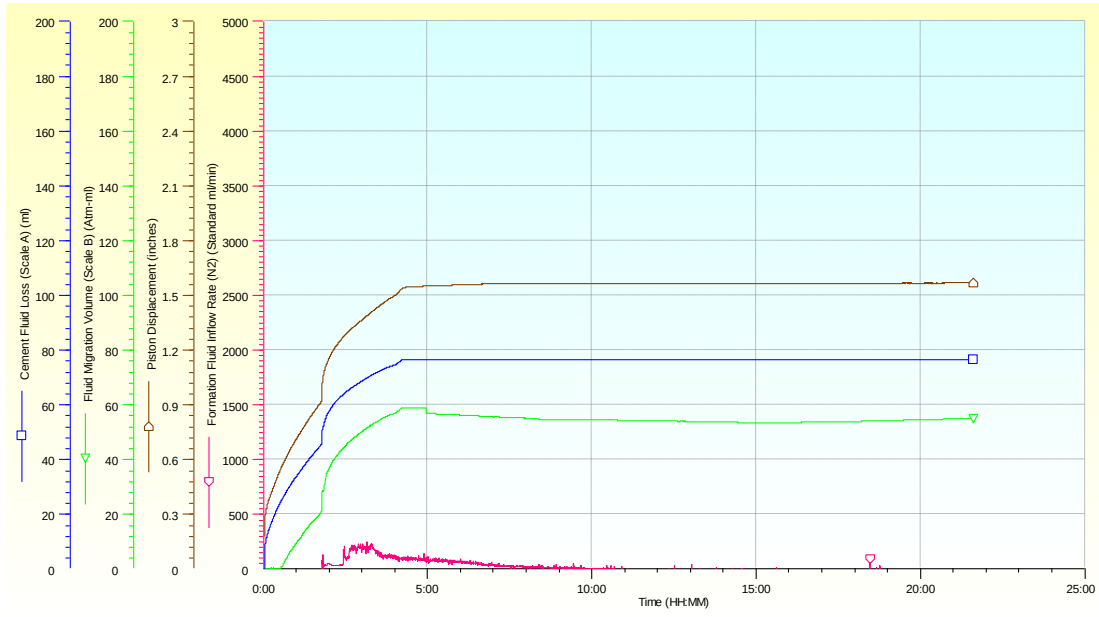
Şekil J.16: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – gaz göçü grafiği.



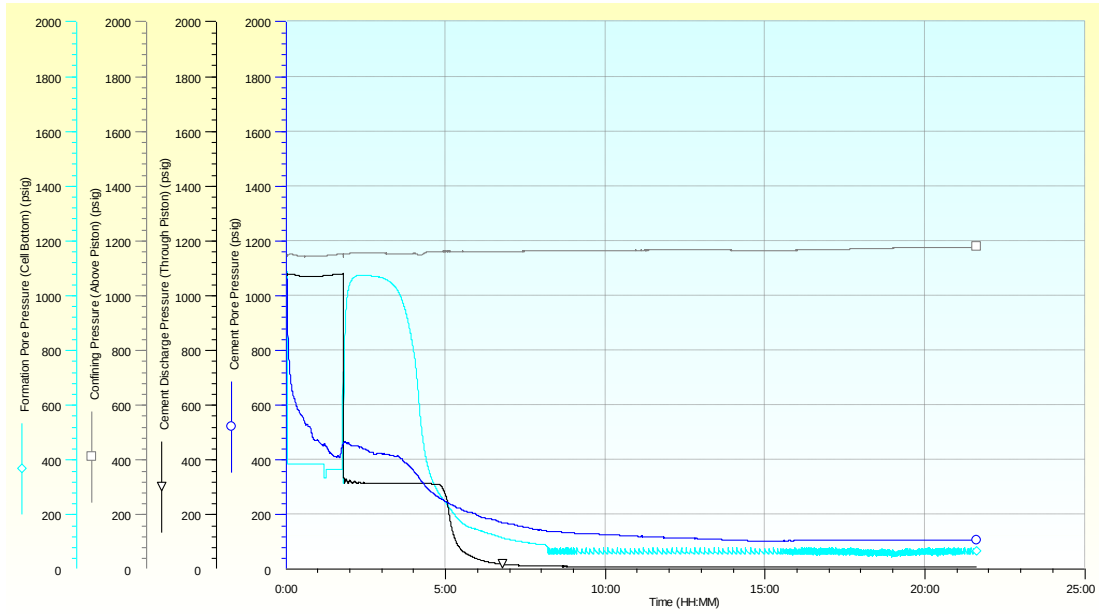
Şekil J.17: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – basınç grafiği.



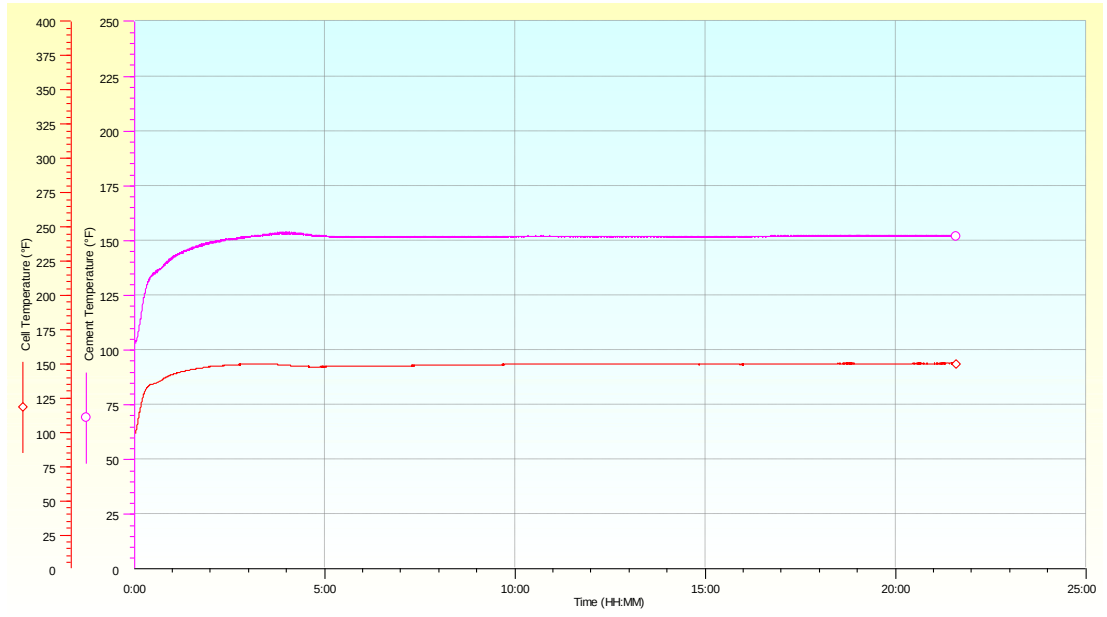
Şekil J.18: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – sıcaklık grafiği.



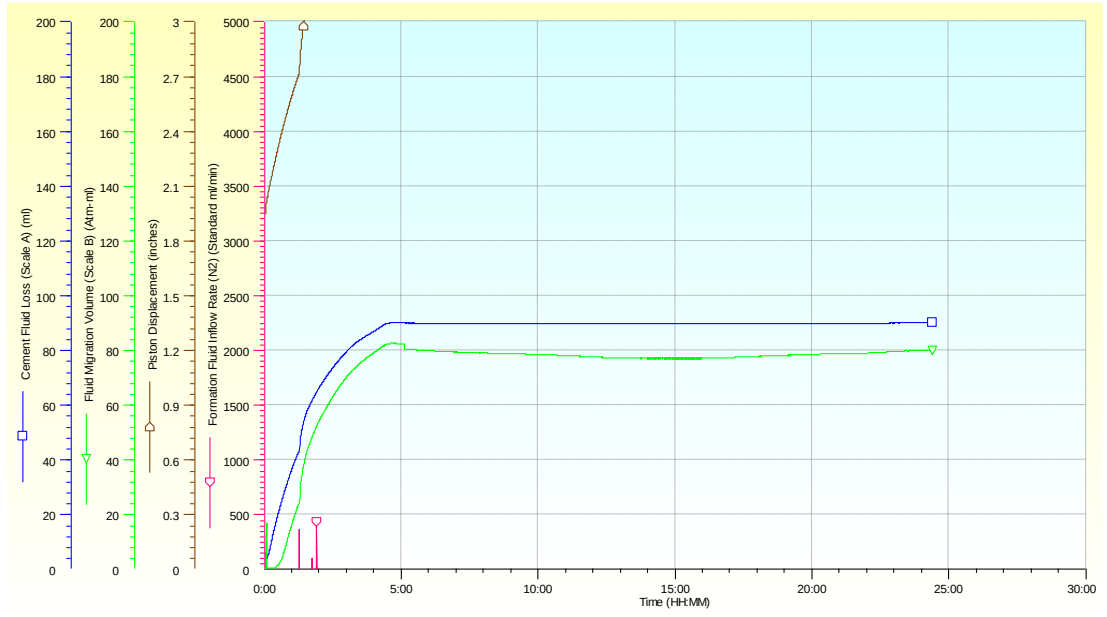
Şekil J.19: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – gaz göçü grafiği – T:150 °F.



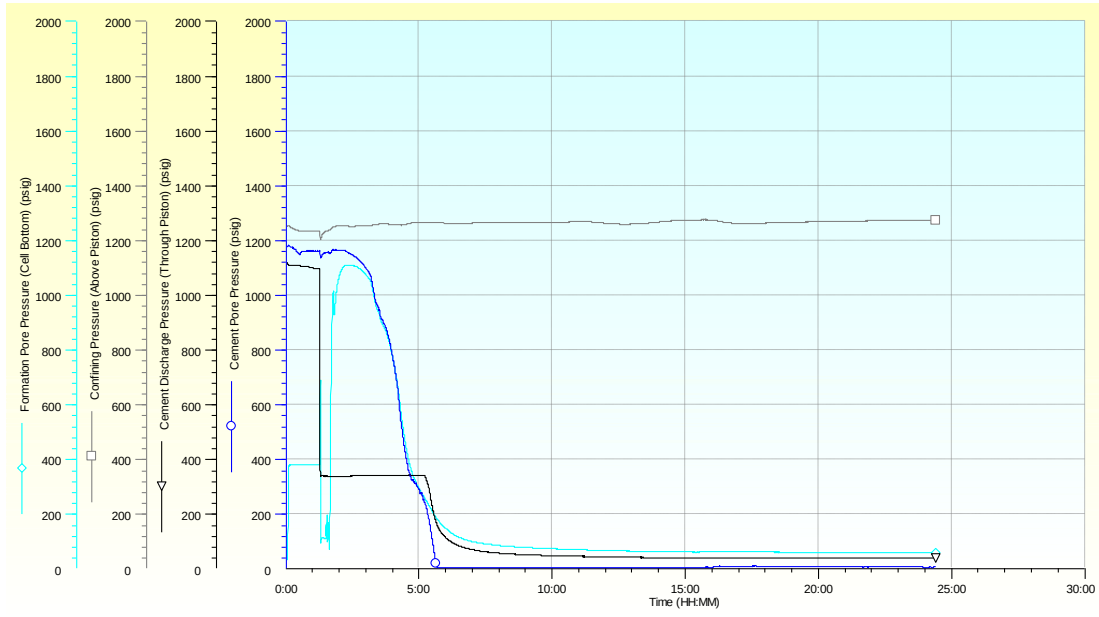
Şekil J.20: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – basınç grafiği – T:150 °F.



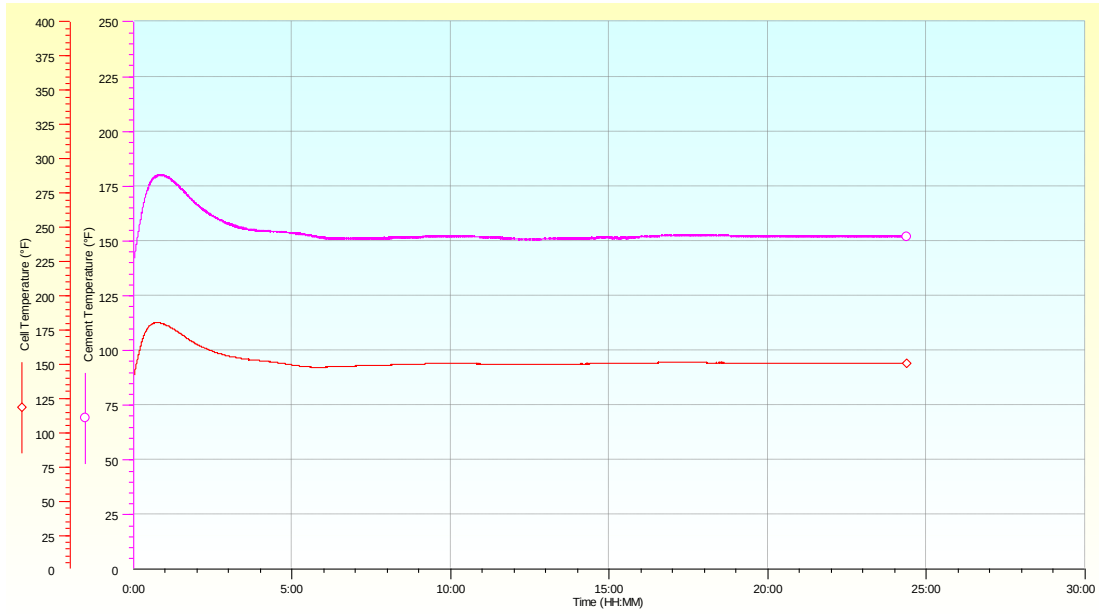
Şekil J.21: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – sıcaklık grafiği – T:150 °F.



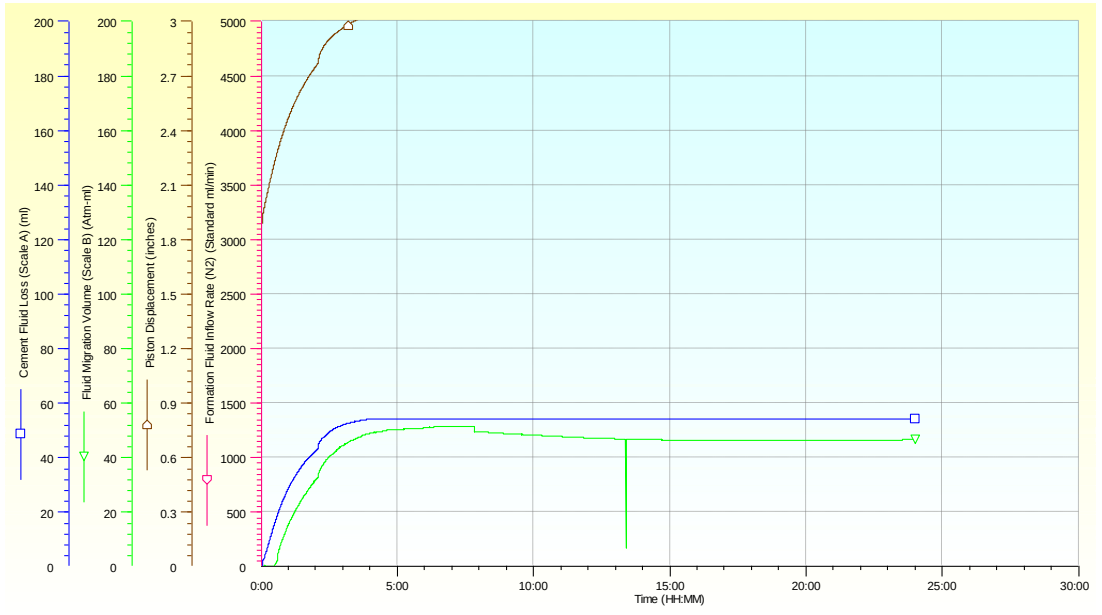
Şekil J.22: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – gaz göçü grafiği – T:150 °F –tekrar.



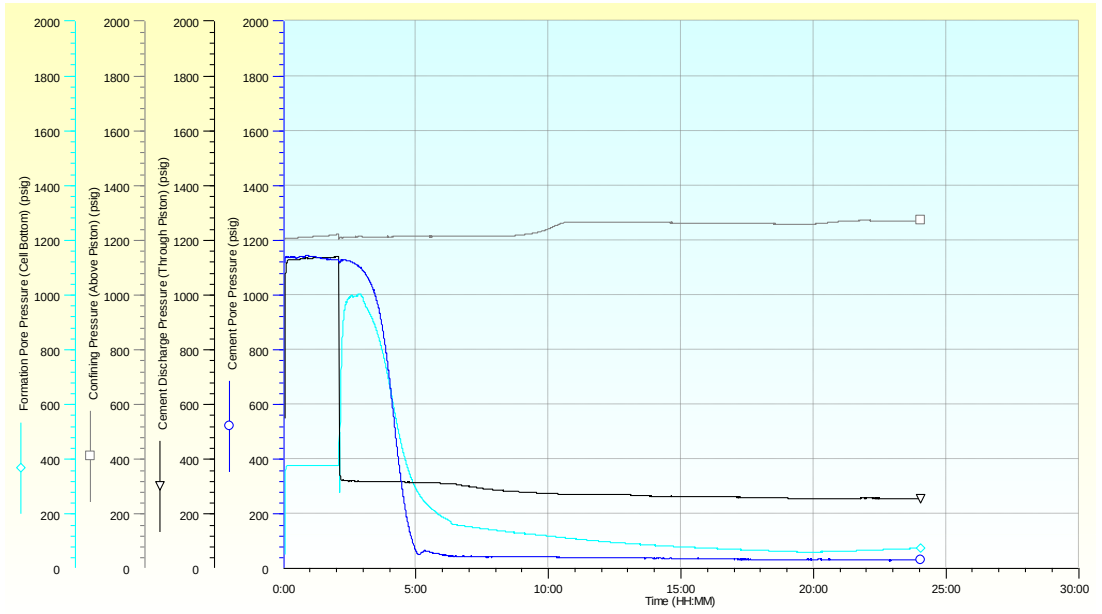
Şekil J.23: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – basınç grafiği – T:150 °F –tekrar.



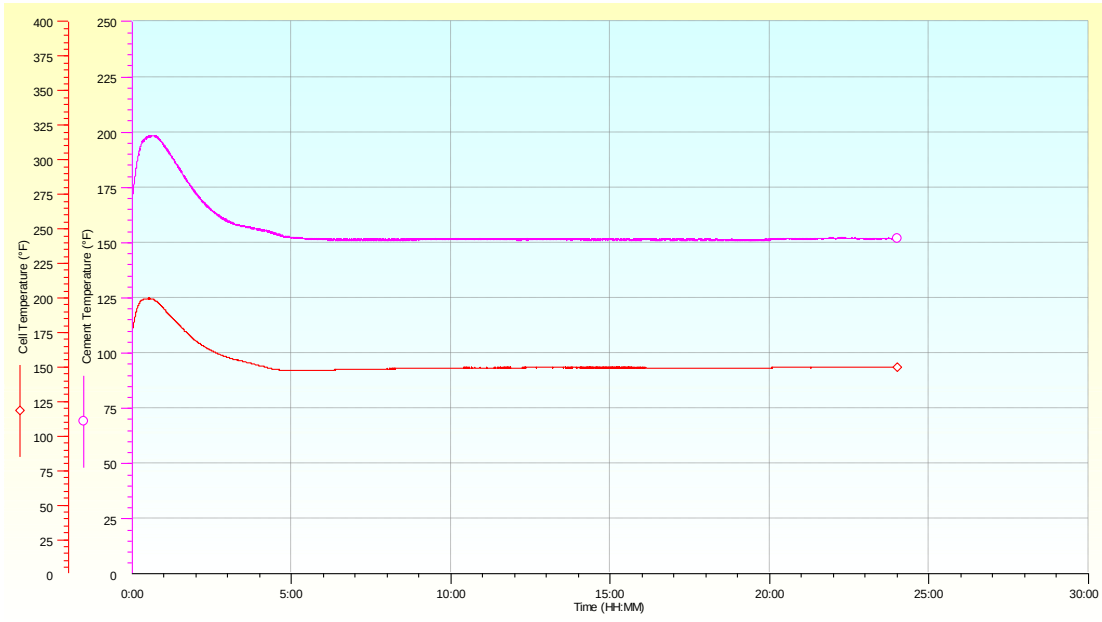
Şekil J.24: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%3 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,55 HLD9) – sıcaklık grafiği – T:150 °F –tekrar.



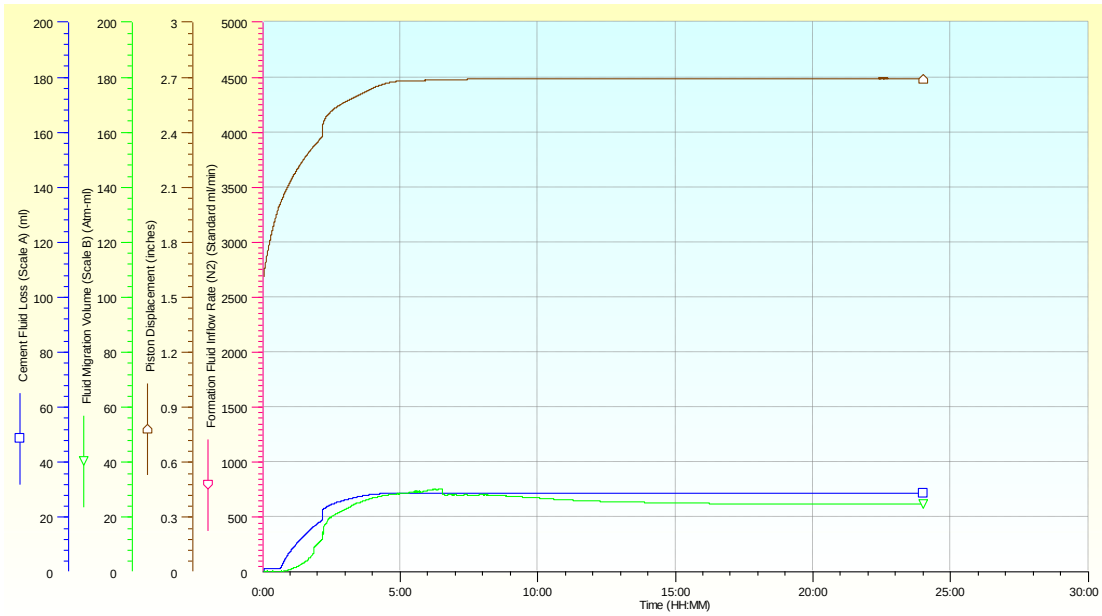
Şekil J.25: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9) – gaz göçü grafiği – T:150 °F.



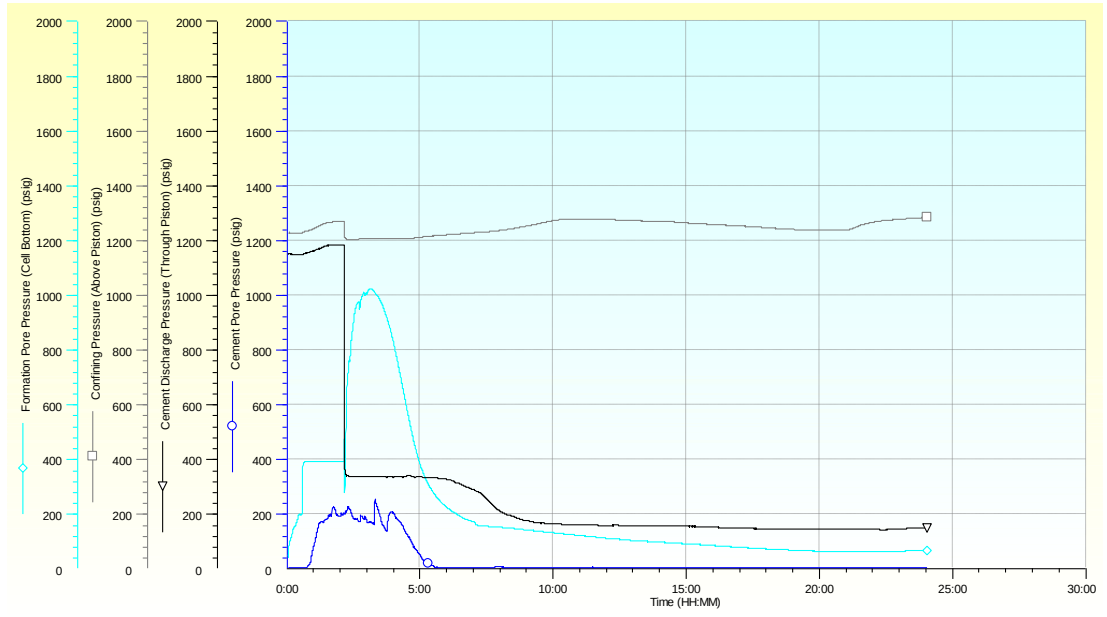
Şekil J.26: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9) – basınç grafiği – T:150 °F.



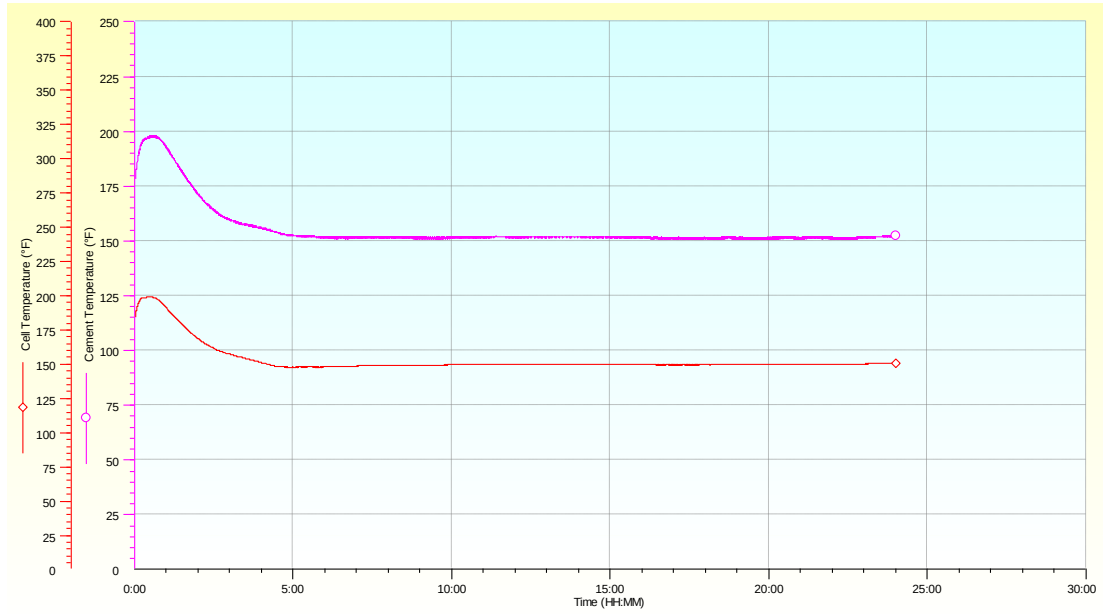
Şekil J.27: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,7 HLD9) – sıcaklık grafiği – T:150 °F.



Şekil J.28: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,8 HLD9) – gaz göçü grafiği – T:150 °F.



Şekil J.29: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,8 HLD9) – basınç grafiği – T:150 °F.



Şekil J.30: G Sınıf çimento geçirgenlik davranışı (%4 ARI, %44 su, %0,7 CFR3 ve %0,8 HLD9) – sıcaklık grafiği – T:150 °F.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mustafa Hakan ÖZYURTKAN

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul / 21.08.1980

Adres: Petrol ve Doğal Gaz Müh. Bölümü, Maden Fakültesi, Ayazağa
Kampüsü, İTÜ, Maslak, İstanbul.

E-Posta: ozyurtkan@itu.edu.tr

Lisans: Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği – İTÜ.

Yüksek Lisans: Enerji Bilimi ve Teknolojileri – İTÜ.

Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği – İTÜ.

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- 2010 Ağustos – 2011 Mart dönemi ziyaretçi araştırmacı – Louisiana Eyalet Üniversitesi (LSU), ABD
- 2010 SPE (Society of Petroleum Engineers) Türkiye Bölümü Lisansüstü Bildiri Yarışması Birinciliği.

