



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

**KRİYOJENİK SICAKLIKLARA MARUZ BIRAKILMIŞ
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

MEHMETCAN YÜKSEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MEHMET EMİROĞLU**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KRİYOJENİK SICAKLIKLARA MARUZ BIRAKILMIŞ
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmetcan YÜKSEK tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hasan SESLİ
Yalova Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ümit YURT
Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 31.07.2019

BEYAN

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

31 Temmuz 2019

Mehmetcan YÜKSEK



Sevgili Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenim ve hazırlanması sürecinde deneyimleri ve değerli fikirleriyle her zaman yol gösteren, insani ve ahlaki değerleri ile birlikte disiplinli ve özverili çalışma anlayışını da örnek edindiğim, yanında çalışmaktan gurur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sınırsız sabırdan dolayı değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na,

Lisans ve Yüksek Lisans eğitim hayatım sürecinde mesleki ve akademik anlamda değerli katkıları ve laboratuvar imkânlarından sonuna kadar faydalanmama olanak sağladıklarından dolayı Yapı Eğitimi Anabilim Dalı ve Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı öğretim üyelerine,

Tez çalışmam boyunca değerli yardımlarını ve fikirlerini benden esirgemeyen çalışma arkadaşım Batuhan AYKANAT, Abdülkerim AYDIN ve Bayram PEKTAŞ'a

Tez çalışmamın yazım ve düzenleme aşamasında yardımlarından ve desteklerinden beni mahrum etmeyen sevgili arkadaşlarım Mine KURTAY ve Ertuğrul KAYA'ya,

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan, tez çalışmalarım sürecinde beni yalnız bırakmayan ve tezimin başarıyla tamamlanmasında büyük katkıları olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, 113M454 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiş ve İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarlarında yürütülmüştür. Tez çalışmasına vermiş olduğu mali destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

31 Temmuz 2019

Mehmetcan YÜKSEK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ŞEKİL LİSTESİ	VIII
ÇİZELGE LİSTESİ	X
KISALTMALAR.....	XI
SİMGELER	XII
ÖZET.....	XIII
ABSTRACT	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1. LİTERATÜR ÖZETİ	3
1.2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON.....	6
1.3. KÜR KOŞULLARI.....	9
1.4. KRİYOJENİK SICAKLIK.....	10
2. MATERYAL VE METOT	12
2.1. MATERYAL	12
2.1.1. Agregası	12
2.1.2. Çimento.....	15
2.1.3. Yüksek Fırın Cürufu	16
2.1.4. Silis Dumanı	16
2.1.5. Uçucu Kül	17
2.1.6. Sıvı Nitrojen	18
2.1.7. Donatı.....	18
2.2. METOT.....	18
2.2.1. Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Taze Beton Deneyleri.....	18
2.2.2. KYB Karışım Miktarı	20
2.2.3. Kriyojenik Çevrimin Uygulanması	20
2.2.4. Dinamik Elastisite Modülü	23
2.2.5. Ultrases Geçiş Hızı Ölçümleri.....	23
2.2.6. Beton Basınç Dayanımı	24
2.2.7. Eğilme Dayanımı.....	25
2.2.8. Donatı Aderansı	26
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	29
3.1. TAZE BETON DENEYLERİ.....	29
3.2. SERTLEŞMİŞ BETON DENEYLERİ	31
3.2.1. Donma Çözülme Etkisi.....	31

3.2.1.1. Ultrases Geçiş Hızı.....	31
3.2.1.2. Dinamik Elastisite Modülü.....	32
3.2.1.3. Eğilme Dayanımı.....	33
3.2.1.4. Yarmada Çekme Dayanımı.....	34
3.2.1.5. Basınç Dayanımı	35
3.3. KRİYOJENİK İŞLEM.....	36
3.3.1. Ultrases Geçiş Hızı	36
3.3.2. Dinamik Elastisite Modülü	38
3.3.3. Basınç Dayanımı	41
3.3.4. Yarmada Çekme Dayanımı.....	44
3.3.5. Eğilmede Çekme Dayanımı.....	44
3.3.6. Aderans Dayanımı	46
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. KYB ile yapılan Akashi-Kaikyo Asma Köprüsü.	7
Şekil 1.2. KYB ile yapılan Los Angeles’ da bir tünel	7
Şekil 2.1. Kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi.	12
Şekil 2.2. Metilen mavisi deneyinden görüntüler.	14
Şekil 2.3. Agregada Darbe Dayanımı (BS 812-Crushing Value) deney görüntüleri.	15
Şekil 2.4. Optimum ince/iri agregada seçimi.	19
Şekil 2.5. Kriyojenik işlemin uygulama görüntüleri.....	22
Şekil 2.6. Rezonans frekans deneyi uygulama görüntüleri.....	23
Şekil 2.7. Ultrases geçiş hızı deneyi uygulama görüntüleri.....	24
Şekil 2.8. Basınç dayanımı deneyi uygulama görüntüleri.	25
Şekil 2.9. Eğilme deneyi uygulama görüntüleri.	26
Şekil 2.10. Donatı aderans numunesi imalat detayı.....	27
Şekil 2.11. Donatı aderans numunesi üretim resimleri.	27
Şekil 2.12. Donatı aderanslı deneyi uygulama görüntüleri.....	28
Şekil 3.1. Taze beton deneylerine ait görüntüler.	29
Şekil 3.2. Numunelere uygulanan örtü kürü.	31
Şekil 3.3. 28 günlük YFC numunelerine ait ultrases geçiş hızı deney sonuçları.....	32
Şekil 3.4. 28 günlük YFC numunelerinin dinamik elastisite modülü deney sonuçları. .	33
Şekil 3.5. 28 günlük YFC numunelerine ait eğilme dayanımı değerleri.	34
Şekil 3.6. 28 günlük YFC numunelerine ait yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.	35
Şekil 3.7. 28 günlük YFC numunelerine ait basınç dayanımı deney sonuçları.	35
Şekil 3.8. 5 Çevrim ardından 28 günlük su kürü uçucu kül numunelerinin görünümü. .	41
Şekil 3.9. 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen basınç dayanımı test sonuçları.	42
Şekil 3.10. Beton basınç dayanımının sıcaklık ile değişimi.	43
Şekil 3.11. 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.	45
Şekil 3.12. 56 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.	45
Şekil 3.13. 90 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.	46
Şekil 3.14. Donatı aderanslı deneyinden bir görünüş.	48
Şekil 3.15. Kullanılan donatı çubuğuna ait gerilme birim uzama eğrisi.....	49
Şekil 3.16. 28 günlük Normal-YFC numunelerine ait aderans-sıyrılma ilişkisi.	50
Şekil 3.17. 28 günlük Normal-YFC numunelerine ait deney sonrası fotoğraflar.....	50
Şekil 3.18. 56 günlük Normal-YFC numunelerine ait aderans-sıyrılma ilişkisi.	51
Şekil 3.19. 56 günlük Normal-YFC numunelerine ait deney sonrası fotoğraflar.....	51
Şekil 3.20. 90 günlük Normal-YFC numunelerine ait aderans-sıyrılma ilişkisi.	52
Şekil 3.21. 90 günlük Normal-YFC numunelerine ait deney sonrası fotoğraflar.....	52
Şekil 3.22. 28 günlük YFC su kürü numunelerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma diyagramı.....	53
Şekil 3.23. 28 günlük su kürü Kriyojenik-YFC numunesinin aderans deneyi sonrası görünüşü.	53

Şekil 3.24. 56 günlük SD hava kürü numunelerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma diyagramı.	54
Şekil 3.25. 56 günlük SD hava kürü numunesinin kriyojenik işlem öncesi ve sonrası hasar durumu.	54
Şekil 3.26. 90 günlük UK su kürü numunelerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma diyagramı.	55
Şekil 3.27. 90 günlük UK su kürü numunesinin kriyojenik işlem öncesi ve sonrasında hasar durumu	55



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. İnce, iri ve karışık agregaya ait elek analizi deney sonuçları.	13
Çizelge 2.2. Gevşek ve sıkışık yığın yoğunluğu deney sonuçları.	13
Çizelge 2.3. Özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları.	15
Çizelge 2.4. CEM I Çimentosuna ait kimyasal özellikler.	15
Çizelge 2.5. YFC' ye ait kimyasal özellikler.	16
Çizelge 2.6. SD' ye ait kimyasal özellikler.	17
Çizelge 2.7. UK'ya ait kimyasal özellikler.	17
Çizelge 2.8. Sıvı nitrojene ait teknik bilgiler.	18
Çizelge 2.9. KYB karışım oranları (1 m ³).	20
Çizelge 2.10. Standart laboratuvar deney numune çeşitleri.	21
Çizelge 2.11. Kriyojenik işlem deney numune çeşitleri.	21
Çizelge 3.1. Slump yayılma ve L-kutusu deney sonuçları.	30
Çizelge 3.2. J-ringi deney sonuçları.	30
Çizelge 3.3. Taze beton birim ağırlık, U-kutusu ve elek segregasyon deney sonuçları.	30
Çizelge 3.4. 28 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.	36
Çizelge 3.5. 56 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.	37
Çizelge 3.6. 90 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.	38
Çizelge 3.7. 28 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen dinamik elastisite modülü değerleri.	39
Çizelge 3.8. 56 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen dinamik elastisite modülü değerleri.	39
Çizelge 3.9. 90 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen dinamik elastisite modülü değerleri.	40
Çizelge 3.10. Numunelere ait yarmada çekme dayanımı deney sonuçları (MPa).	44
Çizelge 3.11. Aderans gerilmesi deney sonuçları.	47
Çizelge 3.12. Donatı aderansı deneyi sonucunda meydana gelen hasar biçimleri.	48

KISALTMALAR

AE	Akustik Emisyon
GPa	Gigapascal
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
LNG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
MPa	Megapascal
Nm ³	Normal Metreküp
NMR	Nükleer Manyetik Rezonans
SD	Silis Dumanı
UK	Uçucu Kül
XRCT	Bilgisayarlı X-Işını Tomografi
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

SİMGELER

°C	Celsius derece
°F	Fahrenheit derece
kg	Kilogram
M	Metre
mm	Milimetre
s	Saniye



ÖZET

KRİYOJENİK SICAKLIKLARA MARUZ BIRAKILMIŞ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmetcan YÜKSEK

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Temmuz 2019, 64 sayfa

Kendiliğinden yerleşen beton, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan teknolojik bir yapı malzemesidir. Yüksek mukavemet ve durabilite özellikleri, bu malzemenin önemli yapılarda kullanılmasının başlıca sebepleridir. Normal koşullarda betonun çok düşük sıcaklıklara maruz kalması beklenmezken, kriyojen sıvıların muhafazası için tasarlanan daha ekonomik ve daha emniyetli bir muhafaza yöntemi olan kriyojenik beton tanklar bu sıcaklıklara maruz kalabilmektedirler. Literatürde düşük sıcaklıkta beton davranışı ile ilgili çalışmalara rastlanmakla birlikte bu sıcaklıkların tekrarlı etkisi altında betonun fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, beton muhafaza tanklarında kullanımı tercih edilen, durabilite ve mukavemet performansları yüksek olan kendiliğinden yerleşen betonların (KYB) kriyojenik sıcaklık etkisi altında fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda numuneler 28, 56 ve 90. günlerde yaklaşık $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki sıvı nitrojen içerisinde 1 saat süreyle donma ve $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki su içerisinde 24 saat süreyle çözme olacak şekilde 5 çevrim donma-çözülme etkisine maruz bırakıldıktan sonra fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, laboratuvar koşullarında elde edilen beton karakteristikleri ile kriyojenik sıcaklıkta elde edilen deneysel sonuçlar ilişkilendirilmiştir. Böylece, yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanı (SD) takviyeli, yüksek mukavemetli KYB tasarımlarının kriyojenik sıcaklıklar etkisi altında uygun fiziksel ve mekanik özellikler sergilediği sonucuna varılmıştır.

Anahtar sözcükler: Fiziksel ve mekanik özellikler, Kendiliğinden yerleşen beton, Kriyojenik sıcaklık

ABSTRACT

INVESTIGATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE EXPOSED TO CRYOGENIC TEMPERATURES

Mehmetcan YÜKSEK

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU

July 2019, 64 pages

Self-consolidating concrete is a technological construction material widely used in the construction industry. High strength and durability properties of this material are the most important reasons for the use of it in critical structures. While concrete is not expected to be subjected to very low temperatures in normal conditions, the concrete cryogenic liquid tank - which is a more economical and safer method of storage for cryogenic liquids - can be exposed to these temperatures. Although there are limited studies about low temperature concrete behaviour in technical literature, these studies do not present information about physical and mechanical properties of concrete under repeated effects of low temperatures. Purpose of this study is to investigate the physical and mechanical properties of self-consolidating concrete, which has high strength and durability performances, preferred in concrete storage tanks under the effect of cryogenic temperatures. Accordingly, the samples were subjected to 5 cycles of freeze-thawing on 28th, 56th and 90th days (For one cycle samples are kept within liquid nitrogen at -196 °C for 1 hour for freezing and within water at +20 °C for 24 hours for thawing), afterwards changes in physical and mechanical properties were determined. At the end of the study, experimental results obtained at cryogenic temperature were correlated with concrete characteristics obtained in laboratory conditions. Thus, high strength self-consolidating concrete designs having blast furnace slag and silica fume during its production is concluded to have suitable physical and mechanical properties under the influence of cryogenic temperatures.

Keywords: Physical and mechanical properties, Self-Compacting concrete, Cryogenic temperature

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü gelişen teknoloji ve artan dünya nüfusunun ihtiyaçlarını karşılamak için sürekli olarak gelişmektedir. Bu gelişmeler ışığında çok yönlülüğü, bulunabilirliği ve ekonomik olması nedeniyle dünya çapında yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden biri olan betonun gelişmesini ve geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir [1]. Beton, düşük maliyeti nedeniyle dünyada en fazla tüketilen inşaat malzemesi olarak kabul edilmektedir [2]. 2018 yılında yapılan araştırmaya göre, küresel olarak yılda 26,8 milyar tondan fazla geleneksel beton üretildiği tespit edilmiştir [3]. Bu devasa üretim, inşaat sektöründe doğal kaynakların kademeli olarak tükenmesi ve bunlara erişimdeki zorluklarla karşı karşıya kalınmasına neden olmaktadır. Çalışmalar beton üretiminin çevresel ve fiziksel etkisinin alternatif malzemeler kullanımıyla azaltılabileceğini göstermektedir [4].

Günümüzde beton üretiminin teknoloji ve artan nüfusa paralel olarak gelişmesi sonucu çimento, agrega ve sudan oluşan ana maddesinin yanında kimyasal ve mineral katkıların eklenmesi ile birlikte betonun özellikleri olumlu yönde gelişmektedir. Kimyasal ve mineral maddeler betonun uygulanabilme alanını genişleterek pek çok olumsuz sorunun çözülmesine de katkı sağlamaktadır [5].

Beton sektörü hazır beton ve onun beslediği alt sektörlerin gelişmesi ile birlikte diğer endüstriyel ve teknolojik gelişmelere ayak uydurmaktadır. Hazır betonun alt sektörlerinden en önemlilerinden biri katkı sektörüdür. Betona katılan katkı maddeleri betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirerek betonu dış ortamın olumsuz koşullarına karşı dayanıklı hale getirmektedir [6]. Betonun işlenebilirliğini arttırmak için yapılan çalışmaların başında yüksek su-çimento oranı denenmiş ve bu uygulama betonun kalitesinde önemli derecede düşüşe neden olduğu için kullanımı tercih edilmemektedir. Son 50 yılda yüksek su-çimento oranının yerine betonun işlenebilirliğini ve diğer özelliklerini arttıran akışkanlaştırıcılar kullanılmaya başlanmıştır [7].

Yapıların servis ömürlerinin ve iyi projelendirilmesinin yanında iklim şartlarının göz önünde bulundurulması, beton ve donatının tasarımında dikkatli olunması sürdürülebilirliği sağlamada en önemli parametreler olarak görülmektedir. Bu

parametreleri karşılayabilen betonlar geçirimsiz özellikli ve boşluksuz bir içyapıya sahip, işlenebilir, durabilitesi ve dayanımı yüksek, kimyasal ve mineral katkılı olan yüksek dayanımlı betonlardır [8]. Yüksek dayanımlı betonların günümüzde en çok kullanılan türü KYB'dir. KYB yüksek akışkanlığa sahip, vibrasyon işlemi gerektirmeden kendi ağırlığı ile yerleşen bir betondur. Düşük su-çimento oranına sahiptir, yüksek dayanım ve durabilitesi olmasının yanı sıra pürüzsüz bir yüzey kesitine sahiptir [9].

Pürüzsüz bir yüzeye sahip olabilmesi için betonarme yapının işlenebilirliğinin ve kararlılığının çok iyi seviyede olması gerekmektedir. Betonarme yapının içerisinde betonun yanı sıra çelik çubuklarda mevcuttur. Çelik çubukların betona iyi kenetlenmesi gerekmektedir. Betonun içerisinde bulunan donatının etkiler karşısında şekil değiştirebilme özelliği mevcuttur. Şekil değiştirme sırasında meydana gelen geçişler gerilmeleri meydana getirmektedir. Bu tür gerilmelerin ortaya çıkmasıyla aderans kavramı ortaya çıkmaktadır [10].

Beton donatıyı kuşatarak fiziksel ve kimyasal etmenlere karşı korumaktadır. Bu yüzden beton ile donatı arasında aderansın oldukça iyi olması gerekmektedir. Aderansı etkileyen en önemli etmenlerin başında donatı ile beton arasındaki kapiler bağ kuvvetleri, sürtünme kuvvetleri ve mekanik dış kuvvetlerdir [11]. Aderans bu etmenlerin yanı sıra pek çok değişkenden etkilenmektedir. Bunlar, çeliğin akma dayanımı, donatı çapı, pas payı, agrega ve katkı malzemelerinin cinsi, betonun çekme dayanımı gibi değişkenlerdir [12]. Betonun sıcaklığa karşı davranışı aderansı önemli derecede etkilemektedir. Yüksek sıcaklıklarda betonun sünme oranı artmaktadır. Bunun yanı sıra betonun elastisitesinde ve kristal yapısında değişimler oluşmak, mukavemetinde azalma görülmektedir [13].

Betonun soğuk ortamlarda özellikle kriyojenik işlemlere maruz kalmış betonun davranışı hakkında çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Günümüzde özellikle kriyojenik sıvıların taşınması ve muhafazasında kullanılan metal nikel alaşım tanklarının yerine daha güvenli ve ekonomik kriyojenik beton tankların kullanımı araştırılmaktadır [14]-[16]. Bu sebeple betonun ve çelik donatının kriyojenik sıcaklıklarda aderans performanslarının incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, durabilite ve mukavemet performansları yüksek olan KYB'nin fiziksel ve mekanik özelliklerini, kriyojenik sıcaklık etkisi altında incelemektir.

1.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Betonarme donatısında akma ve kopma dayanımı önemli parametrelerdir. Düşük sıcaklıklarda bu değerlerde %4 ila %40 arasında artış gözlemlendiği sünekliğinde ise azalma meydana geldiği belirtilmiştir [17]. Düşük sıcaklıklarda betonun nemine bağlı olarak dayanımı artmaktadır. Bunun nedeni düşük sıcaklıkta beton gözeneklerinin içinde mevcut olan nem, buz kristallerine dönüşerek yük taşınmasına neden olduğu için betonun dayanımını arttırmaktadır [18]. Lee ve arkadaşları, +20 ile -70 °C aralığında betonun elastisite modülünü, basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve donatı aderanslarını belirlemek için deneyler yapmıştır. Sıcaklığın azalmasına bağlı olarak elastisite modülünde, yarmada çekme dayanımında ve donatı aderansında artışın meydana geldiği, en fazla artışın ise beton dayanımında görüldüğü rapor edilmiştir [19].

Özkul, KYB'yi; yüksek akışkan özelliğe sahip, üstün performans gösteren, segregasyona uğramadan ve vibrasyona ihtiyaç duymayan beton olarak tanımlamıştır [20]. KYB'ler, toz, birleşik ve viskozite tip olarak üç farklı yöntemle üretilmiştir [21]. Yüksek oranda toz malzeme kullanılan ilk uygulamalarda yüksek çimento içeriğinden ötürü betonda yüksek hidrasyona bağlı büzülme gözlemlenmiştir [22]. Bu gibi olumsuzlukları önlemek, harcın içinde askıda kalan malzemelerin geliştirilmesi için KYB'lerin içerisine Uçucu kül (UK), SD, ince öğütülmüş YFC ve taş tozu gibi malzemeler eklenmiştir [20]. Bunların yanı sıra süper akışkanlaştırıcılar, viskozite düzenleyici kimyasal ve mineraller de kendiliğinden yerleşen betonların yüksek performans göstermesine katkı sağlamaktadır [23].

Sıvı gaz tanklarında ikincil bir bariyer olarak kullanılan yüksek dayanımlı hafif betonların kriyojenik özellikleri oldukça iyi olduğu bilinmektedir. Vandewalle yaptığı araştırmada, 20, -40, -80, -120 ve -180 °C sıcaklıklardaki kür işleminin beton davranışına etkisini yaptığı testlerle incelemiştir. Azalan sıcaklıkla birlikte donatı aderansında gözle görülür bir artma olduğu gözlemlenmiştir [24]. Bir başka araştırmada, hafif betonların düşük sıcaklıklarda dayanım, termal davranış ve deformasyon özellikleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada taşıyıcı hafif betonların dayanımı 45 MPa olarak seçilmiştir. Bu betonların mekanik özellikleri boşluklu agrega yapısının içerdiği nem oranına bağlı olduğu bildirilmiştir [25].

Elices ve arkadaşları, çentikli beton numuneler üzerinde -170 °C'de ve oda sıcaklığında üç noktalı eğilme testi yapmışlardır. Sıcaklığın azalmasıyla birlikte gerilme yoğunluk

faktörü parametresinde belirli bir oranda azalma olduğu rapor edilmiştir [26].

Hanaor, geçirgen akışkan olarak sıvı nitrojen kullanılan beton numuneler üzerinde bir dizi ön testler yapmıştır. Elde edilen sonuçlar, betonun kriyojenik sıcaklıklarda geçirgenliğini düzenleyen mekanizmaların, ortam koşullarında geçerli olanlardan önemli ölçüde farklı olduğunu göstermektedir [27].

Günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, geleneksel betonların kriyojenik sıcaklıklar altındaki davranışı genel olarak sıcaklığın azalmasıyla mekanik özelliklerdeki artış ile ifade edilmektedir. Betonun özellikle kriyojenik koşullarda mekanik performansının belirlenmesine yönelik çalışmalar literatürde çok fazla bulunmamaktadır. Bununla birlikte betonun kriyojenik işlemlerde donma-çözülme etkisi çok fazla incelenmemiştir. Özellikle KYB'nin kriyojenik sıcaklıklarda mekanik özellikleri ve performansı hakkında literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Talbot, laboratuvar ve endüstriyel ortamda duvar olarak kullanılmak üzere üretilen iki farklı KYB karışımından deneyler yapmıştır. KYB'nin toz malzemesinde UK kullanmıştır. Numuneleri 1 saat sıvı nitrojende bekletip 48 saat suda çözülmesini sağlayarak 1 çevrim donma-çözülme etkisini düşük sıcaklıklarda incelemiştir. Sıcaklığın düşmesi ile birlikte beton dayanımının arttığını gözlemlemiştir [28]

Yurt, yaptığı doktora çalışmasında kriyojenik etkiyi oluşturmak için sıvı nitrojen kullanılmış ve donma çözülme etkisi sonrasında dayanım özelliklerinde meydana gelen değişimleri gözlemlemiştir. Bunlara ek olarak betonun içindeki nemin etkisini belirlemek amacıyla numunelere iki farklı kür uygulamıştır. Tasarımı yapılan beton numunelere iki parametrelili kırılma mekaniği test yöntemi kullanarak dayanım parametrelerini belirlemiştir. Kırılma mekaniği parametrelerini belirlemek için üç farklı boyutta ve üç farklı çentik uzunluğunda kırışlar üretilmiş ve mekanik testler uygulanmıştır. Yapılan araştırma sonucunda, hava kürü uygulanan numunelerin su kürü uygulanan numunelere kıyasla kriyojenik çevrime daha dayanıklı olduğu görülmüştür [29].

Kogbara ve arkadaşları, gözenek yapısının kriyojenik işlemler altında farklı beton karışımlarında termal iletkenlik üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) muhafaza yapılarında kullanım için düşük termal iletken malzeme olarak betondan faydalanmışlardır. Sertleşmiş çimento macunu dahil beş beton karışımı, farklı agregalar ve katkıları kullanılarak hazırlanmıştır. Karışımlar, ince agrega olarak nehir kumu ve kaba agrega olarak çakıl ve kireçtaşı içermektedir. Topaksız karışımlar, farklı

miktarlarda YFC ve granül poliüretan köpük talaşı içermektedir. Beton numunelerin gözenekliliği ve gözenek büyüklüğü dağılımı, proton nükleer manyetik rezonans (NMR) kullanılarak farklı ortam ve donma sıcaklıklarında izlenmiştir. Donmuş numunelerin çözülmesi sırasında iki farklı noktada sıcaklık profiline aynı anda uyan yeni bir ters analiz tekniği ile termal iletkenlik tespiti yapılmıştır. Sonuçlar, farklı karışımlar arasında, toplam gözenekliliğin donma sıcaklıklarında ortalama gözenek büyüklüğünden daha fazla termal iletkenliğe sahip olduğunu göstermektedir [16].

Kogbara ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada -165 °C'de betondan yapılmış doğalgaz tankının ısı genleşmesi kapasitesini, nem içeriğini, agrega tipine göre çekme dayanımlarını araştırmışlardır. Kriyojenik işlemin betonun ısıl deformasyonu üzerindeki etkileri hakkında bilgi vermişlerdir. UK gibi hafif puzolanların ve düşük yoğunluklu agregaların kullanılması kriyojenik işlemin etkisini arttırdığını öne sürmüşlerdir [30].

Kogbara ve arkadaşları, agrega tipinin kriyojenik donmaya maruz kalan betonun hasar potansiyeli üzerindeki etkisini de değerlendirmiştir. Amaçları, hasara dayanıklı kriyojenik beton üretmek için tasarım yöntemlerini araştırmaktır. Çalışmada, nehir kumu içeren ince agregadan oluşan dört beton karışımı tasarımı ve farklı ısı genleşme katsayısı değerlerine sahip kaba agregalar kullanılmıştır. Beton küpler su altında en az 28 gün boyunca kürlenmiş ve sonra oda sıcaklığından (20 °C)'den kriyojenik sıcaklığa (-165 °C) dondurulmuştur. Donma esnasında beton küplere akustik emisyon (AE) sensörleri yerleştirilmiştir. Kriyojenik donmadan önce ve sonra beton çekirdeklerin mikro yapısını incelemek için bilgisayarlı X-ışını tomografi (XRCT) cihazı kullanılmıştır. Böylece AE ve XRCT'den elde edilen mikroyapısal evrimin ilgili mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi su ve klorür geçirgenlik testleri ile belirlenmiştir. AE'den belirlenen mikro çatlak yayılımı, geçirgenlikteki değişikliklerle korelasyon göstermektedir. Donma sonrası beton karışımlarının çoğunda gözlemlenebilir çatlak mevcut değildir. Kriyojenik işlemle mikro çatlakların ve geçirgenliğin daha da azaldığı bildirilmiştir [31].

Opara, sıvılaştırılmış doğal gaz depolama tanklarının betondan yapılması konusunda çalışmalar yapmıştır. Kriyojenik işlemin beton üzerinde stres-gerilme tepkisi, elastisite modülü, poisson oranı, ısı genleşme katsayısı, sürtünme ve geçirgenlik üzerindeki etkisi hakkında araştırmalar yapmıştır. Mevcut veriler kriyojenik sıcaklıklarda betonun bu özelliklerinin arttığını gözlemlemiştir. İyileşme derecesinin yüksek oranda nem içeriğine bağlı olduğunu bildirmiştir [32].

1.2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

Son yıllarda gelişen teknoloji ile kimya sektöründe de büyük gelişmeler yaşanmıştır. Özellikle polimer teknolojisinin ilerlemesi ile akışkanlaştırıcı maddeler bulunmuş ve çok yüksek oranda su kaybını engelleme yeteneğine sahip akışkanlaştırıcı madde inşaat sektörüne de girmiştir. Bu kapsamda taze betonun işlenebilir özelliğine katkı yapabilmek için akışkanlaştırıcı bazı polimerler eklenerek betonun donatılar arasında bir kalıba yerleşmesi ve daha iyi sıkışabilmesi sağlanmıştır [33].

1983 yılından sonra Japonya'da beton yapıların dayanıklılıkları ile ilgili bazı sorunların baş göstermesiyle birlikte Japon inşaat endüstrisindeki işçi sayısının da azalması inşaat sektöründe betonun kendi ağırlığı ile bir sıkıştırma gerekmeden kalıplara yerleşmesini gerektirmiştir. KYB ilk olarak 1986 yılında Japon bilim insanı Okamura tarafından literatüre sunulmuş ve ilerleyen yıllarda bu konu hakkında çalışmalar daha da sıklaşmıştır [34]. Yeni nesil polikarboksilik tabanlı süper akışkanlaştırıcı maddeler, viskozite düzenleyiciler ve mineral katkıları ile KYB ortaya çıkmıştır [35].

KYB mekanik bir titreşime ihtiyaç duymadan belirli bir forma yayılan oldukça akıcı bir beton türüdür [36]. KYB'nin en önemli yapı özelliği, bulunduğu alanda dayanıklılığını ve özelliklerini koruyarak beklenen performans gereksinimini karşılamasıdır [37]. KYB ile geleneksel beton arasındaki en önemli fark betonun taze durumdaki davranışıyla ilgilidir. Geleneksel betonun aksine KYB, yoğun donatı miktarına sahip güçlendirilmiş yapı elemanlarında bile yalnızca kendi ağırlığı altında ve sıkıştırma yöntemlerine başvurulmadan kümelenme, sızıntı veya ayrışma olmadan girdiği kalıbı doldurmaktadır [38].

KYB, düşük akma gerilmesine ve kalıp alacağı bölgeye yerleşmesi için yeterli derecede viskoziteye sahip olmalıdır [39]. Yeni nesil süper akışkanlaştırıcılar ayrışma direncinde belirli bir miktarda azalmaya neden olmaktadır [40]. Bu ayrışmanın azalması için ince agrega veya bağlayıcı miktarında artışa gidilmektedir. Bunun yanı sıra viskozite düzenleyici maddelerde KYB'ye katkı olarak katılarak ayrışmayı azaltmaktadır [41].

KYB'nin uygulama alanları gelişen teknoloji ile son yıllarda hızlıca artmaktadır. Özellikle beton dökümü öncesi uygulamalarda veya sahaya yerleştirilmiş betonlarda kullanılabilir [42]. Kendiliğinden yerleşen betonun tasarımında en önemli etkenlerden birisi, kullanılacağı yapıların büyüklüğü ve şeklinin yanı sıra donatı boyut ve yoğunluğu parametreleridir. Kendiliğinden yerleşen beton, mevcut beton teknolojileri ile

mümkün olmayan kalitede beton yapıların dökümünü mümkün kılmıştır [43]. Kendiliğinden yerleşen beton kullanılarak inşa edilen en dikkat çekici projelerden biri Akashi-Kaikyo Asma Köprü'dür (Şekil 1.1) [44]. Bu projede, KYB sahaya bir boru sisteminden 200 metre uzaklıktaki belirtilen noktaya pompalanmış ve inşaat süresini iki buçuk yıldan iki yıla düşürmüştür [45].



Şekil 1.1. KYB ile yapılan Akashi-Kaikyo Asma Köprüsü.

KYB'nin uygulama alanlarından bazıları delinmiş miller, sütunlar, toprak tutma sistemleri, yüksek inşaat demiri ve boru yoğunluğuna sahip alanlardır. Bu alanlarda ise en çok köprü yapımı, yol yapımı ve tünel yapımında kullanılmaktadır [46] (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. KYB ile yapılan Los Angeles'da bir tünel [47].

Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları aşağıdaki maddelerde sıralanabilir [48].

- Vibratör kullanılmayarak kalıp ömrünün uzamasını ve gürültü seviyesini azaltmaktadır.
- Kolay bir şekilde pompalanabilmektedir.
- Ekipman aşınmasını azaltarak sık ve dar kesitli kalıplara kolayca yerleşebilmektedir.
- Proje programını kısaltıp nitelikli iş gücünü azaltmaktadır.
- Güçlendirme projelerinde tek noktadan döküm yapılmasını sağlamaktadır.
- Betonun dayanımını, dayanıklılığını ve yüzey kalitesini artırmaktadır.
- Yapısal bütünlüğü sağlayarak yüksek oranda güçlendirilmiş alanlardaki boşlukları minimuma indirmektedir.
- Yenilikçi ve karmaşık mimari özelliklere izin vermektedir.
- Takviye çeliğine bağlanarak düzgün bir yüzey oluşturmaktadır.

KYB' nin davranış ve performansını etkileyen bazı faktörler vardır. Sıcak hava ve uzun mesafeler betonun akışkanlığını azaltabilmektedir. Bunun yanında KYB üreten şantiyelerdeki gecikmeler beton karışım ve tasarım performansını etkileyebilmektedir. Bunlardan en çok yaşananı ve en önemlisi şantiyede betona ilave edilen suyun her zaman aynı akışkanlıkta ve stabilitede olmamasından kaynaklanmaktadır [49].

Kendiliğinden yerleşen betonun dezavantajları şu şekilde sıralanabilir [49].

- Kendiliğinden yerleşen betonun karıştırıcısının çevresel kirlenme tehlikesinin yüksek olması nedeniyle nakliye aşamasında potansiyel dökülmelere neden olabilmektedir.
- Kalıp, normal betondan daha yüksek olan sıvı beton basıncına maruz kalmaktadır.
- Kendiliğinden yerleşen beton üretimi, geleneksel titreşimli betondan daha fazla deneyim ve özen gerektirmektedir.
- Diğer betonlara göre maliyeti yüksektir.

Gelişmiş ülkelerin çoğu İkinci Dünya Savaşı'ndan sonraki ilk 10 yılda inşaat sektöründe bir patlama yaşamıştır. Günümüzde savaş döneminden sonra yapılan yapıların çoğunun emeklilik yaşı gelmiş ve bakım onarıma ihtiyaç duymaktadır. Bunun yanında gelişen inşaat sektöründeki mimari özgünlük betonun daha dayanımlı olmasını gerektirmektedir. Çevresel sorunların azaltılması için yapılan çalışmalar, inşa edilen yapıların hizmet ömrünün uzatılması, daha dayanıklı yapıların gerekliliği, çimento içeriğinin

sınırlandırılması, ekonomik nedenler kendiliğinden yerleşen betonun geleceğini etkilemektedir. Bu doğrultularda kendiliğinden yerleşen beton daha da iyi özellikler eklenip geliştirilerek gelecekte daha çok uygulama alanında kullanılacaktır.

1.3. KÜR KOŞULLARI

Çimentonun hidratasyonu sağlanması için kendi ağırlığının 1/4-1/3'ü oranında su ihtiyacı söz konusudur. Karışım suyu olarak işlenebilirliğin sağlanması için, agrega yüzeylerinin ıslatılacağı oranda su gerekmektedir. Su oranının belirtilen orandan az veya fazla olması dayanım üzerinde etki yaratacağından dolayı optimum su oranının belirlenmesi önem taşımaktadır. Suyun gerekenden az kullanılması yeterli hidratasyon ve işlenebilmeyi engellemekte; fazla kullanılması ise, beton yapısındaki boşlukları arttırmakta dolayısıyla sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığını azaltıcı yönde rol oynamaktadır [50]. Betonda dayanım ve dayanıklılığın istenildiği oranda sağlanabilmesi beton içerisindeki su ve çimento arasında meydana gelecek hidratasyonun engellenmemesine bağlıdır. Bu yüzden, yerine yerleşen taze betondaki suyun buharlaşarak azalmasını önlemek amacıyla, taze beton belirli bir süre çeşitli kür yöntemlerine tabi tutulmalıdır. Beton yüzeyinin sulanması ya da ıslak bez yardımıyla örtülü tutulması en yaygın kullanılan yöntemdir [50]. Ancak kür uygulamasında kullanılacak sular karışım sularından daha fazla asit, klorit ve sülfürik anhidrit gibi organik/inorganik malzemeler içermektedir. Dolayısıyla kür suyunda kullanılması planlanan su içerisinde betonda istenmeyen kimyasal reaksiyonları meydana getirecek ve beton yüzeyinde lekelenmelere sebebiyet verebilecek yabancı maddelerin olmaması istenmektedir [50]. Ayrıca reçine emülsiyon esaslı, parafin emülsiyon esaslı, hidrokarbon reçine esaslı, zift ve bitüm esaslı, akrilik esaslı kimyasal kür malzemelerinin beton yüzeyine uygulandığı çeşitli yöntemler de mevcuttur [51]. Kür etkisinin yanı sıra imalat süresinin de azalmasını sağlayan bu yöntemler ile farklı olarak sınıflandırılan buhar kürü, bilhassa prefabrik yapıların üretiminde kullanılan elemanlar için tercih edilmektedir. Fakat buhar kürü, priz süresini hızlandırarak beton yapısında sürekli ve büyük boşluğa sahip yapıların oluşmasına neden olmaktadır [52],[53]. Bu yöneme alternatif olarak geliştirilmiş olan priz hızlandırıcı katkı malzemeleri benzer sonuçların elde edilmesini sağlamıştır [54]. Bunlara ek olarak polietilen ve polivinil esaslı plastik kür örtülerinin de beton içerisinde var olan suyun kaybolmasını engellemek amacıyla kullanıldığı bilinmektedir. Ancak kür işleminde kullanılan plastik örtülerin ve

özel kâğıtların uygulanması için gerekli işçilik maliyeti ve rüzgârlı havalarda kullanılamaması gibi dezavantajları mevcuttur [55].

1.4. KRİYOJENİK SICAKLIK

Argon, asetilen, nitrojen, helyum ve oksijen gibi sınai ve tıbbi malzemeler sıvı ya da gaz formunda üretilmektedirler. Örneğin, nitrojen dünya atmosferinin yaklaşık %78'ini oluşturan renksiz, kokusuz, tatsız, toksik ve yanıcı olmayan bir gazdır. Sıvı oksijen, sıvı nitrojen ve sıvı argonun kaynama sıcaklıkları sırasıyla -183 °C, -196 °C ve -186 °C olup hepsi de kriyojenik sıcaklıklar (-150 °C'nin altındaki çok düşük sıcaklık) olarak tanımlanmaktadır. Tüm bu sıvılar özel kriyojenik kaplarda muhafaza edilmek zorundadırlar [56].

LNG (Liquified Natural Gas), doğal gazın atmosfer basıncında soğutulması ile beraber yoğunlaşarak sıvı hale geçmesi durumudur. LNG'nin sıvı faza geçmesi ile beraber depolanma ihtiyacı doğmaktadır. Yaklaşık -162 °C (-260 °F)'de sıvılaşan LNG'nin hacminde yaklaşık 600 kat azalma meydana gelmektedir. Bu durum, LNG'nin taşınma ve depolanma işlemlerinde kolaylık sağlamaktadır [57], [58].

Doğalgaz ihtiyaçlarını terminaller (depolama) kurarak sağlayan birçok ülkenin arasında Fransa, Güney Kore, Japonya ve Türkiye'de bulunmaktadır.

Türkiye' nin doğalgaz terminalleri ile sağladığı yıllık doğalgaz miktarı; Cezayir'den 4 milyar Nm³ ve Nijerya'dan 1,2 milyar Nm³ olmakla beraber toplam 5,2 milyar Nm³ tür. Bu terminaller, Tekirdağ' da bulunan BOTAS LNG Alım Terminali (yıllık 6 milyar Nm³) ile 2001 yılında hizmete giren İzmir Aliağa LNG Alım Terminali (yıllık 10 milyar Nm³)'dir [59].

Doğalgaz, evsel kullanımlarda ısınma amaçlı kullanıldığı gibi sanayi alanında enerji ve hammadde kaynağı olarak kullanılmaktadır. Doğalgazın kullanımında oluşabilecek herhangi bir problem ciddi ekonomik zararlara neden olmaktadır. Bu durumda, doğalgazın depolanması ve ihtiyaç halinde kullanıma sunulması önem taşımaktadır [57], [58].

Kriyojenik Mühendisliği'nin önemli konulardan birisi de doğalgazı soğutma işlemidir. Kriyojeni alanı, -153.15 °C' nin altındaki sıcaklıkları tanımlamakla beraber düşük sıcaklıkların elde edilmesini de incelemektedir. En yaygın kriyojen maddelerden birisi

olan nitrojen, havada gaz haline bulunmakla beraber -196 °C kaynama noktasına sahiptir. Tıbbi ve sınıai uygulamalarında en çok kullanılan kriyojen sıvılar; Nitrojen, Helyum, Argon ve Oksijendir. Ülkemizde bu sıvıların muhafazası için en çok nikel alaşımlı kriyojen tanklar kullanılmaktadır. Bununla beraber kullanımı çok yaygın olmayan ancak uzun süreçte ekonomi ve emniyet konularında avantaj sağlayan kriyojenik beton tanklar da bulunmaktadır. Bu tankların az kullanılma sebeplerinden birisi de kriyojenik sıcaklık etkisi altında beton davranışlarının yeteri kadar bilinmemesidir.

Çift duvarlı çelik tanklar, 1970'li yıllara kadar yaygın olarak kullanılan kriyojenik sıvı muhafaza tanklarıydı. Bu tanklar, iç yüzeyde kriyojenik sıvıya karşı dayanıklı bir alaşımdan ve dış yüzeyde normal çelikten meydana gelmekteydi. Bu tankların güvenlik marjını arttırmak için 1970'li yıllardan sonra çelik katmanların dış yüzeyinde ön germeli beton kullanımı önem kazanmıştır [57].

Kriyojenik sıvıların muhafazası için kullanılan en yaygın tanklar; çift duvarlı metalik tanklar ve çift duvarlı beton tanklardır. Metalik tankların ekonomi açısından avantajı olmasına rağmen, beton tanklar emniyet açısından daha uygundur. Emniyet açısından beton tankların, yerleşim merkezlerinde ve önemli tesis çevrelerinde tercih edilmesi önerilmektedir [60].

Beton, kriyojenik sıvıların muhafazasında başarılı bir sonuç göstermektedir. Beton tanklar sıvının boşaltılma ve doldurulma süreçlerinde donma çözülme etkisine maruz kalmaktadır. Tanklara depolanan kriyojenik sıvı, normalde beton ile temas halinde değildir. Kriyojenik sıvı, tankların iç katmanını oluşturan koruyucu nikel alaşımlı metal yüzey ile temas halindedir. Depolanma sürecinde bu katmanda oluşabilecek herhangi bir sorun, kriyojen sıvı ile betonun temas etmesine neden olabilir. Bu durumda beton tankın kriyojenik sıvıyı boşaltılana kadar güvenle muhafaza etmesi gerekmektedir. Betonarme tankların kriyojenik sıcaklıklara ve termal şoklara, yangın etkisine, burulma ve yorulmalara karşı metal tanklara göre yüksek dirençli olması gibi avantajları mevcuttur. Bununla beraber betonarme tankların yer altında ve yer üstünde kullanılması gibi avantajları da bulunmaktadır [61]-[63].

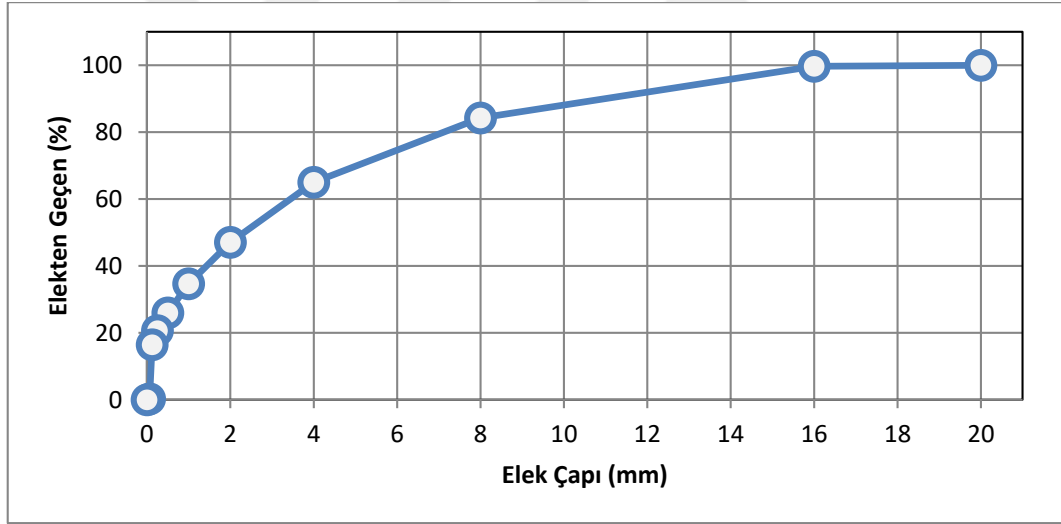
Beton tasarımlarında göz ardı edilen ancak mukavemet kadar önemli olan bir diğer beton özelliği ise durabilitedir. İlave sıvı dolumlarında ve beklenmedik bir kriyojenik sıvı sızıntısında ani sıcaklık değişimleri olabilmektedir. Bu sebeple beton elemanların durabilite özellikleri, başarılı bir tasarım ve uygulama için önem taşımaktadır [64].

2. MATERYAL VE METOT

2.1. MATERYAL

2.1.1. Agrega

Çalışmada Koç Beton A.Ş. firmasının üretmiş olduğu en büyük dane çapı 16 mm olan, Düzce yöresinden temin edilen kireçtaşı kökenli agrega kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan iri ve ince agregalar 24 saat boyunca 105 °C sıcaklıkta etüv kurusu haline getirilmiş ve bu işlemten sonra kapalı kaplarda bekletilerek ilgili deneyler ve beton üretimleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi.

Temin edilen agrega üzerinde yapılan elek analizi [65] deney sonuçları Çizelge 2.1’de verilmektedir. Çalışmada ince ve iri olmak üzere iki agrega kullanılmıştır. Elde edilen gevşek birim hacim ağırlık değerleri analiz edilerek karışımlarda esas alınacak olan ince ve iri agrega oranı sırasıyla %65 ince ve %35 iri agrega olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2.1. İnce, iri ve karışık agregaya ait elek analizi deney sonuçları.

İnce Agregası		İri Agregası		Karışık Agregası (%65 İnce + %35 İri)	
Elek No (mm)	Elekten Geçen (%)	Elek No (mm)	Elekten Geçen (%)	Elek No (mm)	Elekten Geçen (%)
4	100,00	20	100,00	20	100,00
2	72,44	16	99,70	16	99,70
1	53,37	8	54,97	8	84,24
0.5	39,93	4	0,00	4	65,00
0.25	31,83			2	47,09
0.125	25,35			1	34,69
0.063	0,45			0,5	25,96
				0,25	20,69
				0,125	16,48
				0,063	0,29

Agrega üzerinde yapılmış olan gevşek ve sıkışık birim hacim ağırlık [66] deney sonuçları Çizelge 2.2’de yer almaktadır.

Çizelge 2.2. Gevşek ve sıkışık yığın yoğunluğu deney sonuçları.

Numune	Gevşek Yığın Yoğunluğu (kg/m ³)	Sıkışık Yığın Yoğunluğu (kg/m ³)
İnce	1782	1948
İri	1418	1605

TS EN 933-9 standardına uygun olarak yapılan (Şekil 2.2) metilen mavisi deneyi sonucunda ince agreganın metilen mavisi değeri 1 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.2. Metilen mavisi deneyinden görüntüler.

İki farklı boyuttaki agrega için ayrı ayrı ince madde miktarı [67] deneyi yapılmıştır. İnce ve iri agrega için ince madde miktarı sırasıyla %0.596 ve %0.574 olarak tespit edilmiştir. Kullanılacak agreganın özgül ağırlık ve su emme [68] deney sonuçları Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları.

Numune	Görünür Tane Yoğ. (mg/m ³)	Etüv Kurusu Tane Yoğ. (mg/m ³)	Doygun Tane Yoğ. (mg/m ³)	Su Emme (%)
İnce	2,728	2,617	2,658	1,56
İri	2,725	2,702	2,711	0,31

İri agregaya agreganın aşınma [69] deneyi olarak uygulanan Los Angeles deneyi ardından kullanılan agreganın aşınma dayanımı değeri %25.83 olarak tespit edilmiştir. İri agreganın üzerinde yapılan agreganın ezilme dayanımı (crushing value) deneyi (Şekil 2.3) sonucunda ise kullanılan agregaya ait ezilme dayanımı değerinin %28.16 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.3. Agreganın Darbe Dayanımı (BS 812-Crushing Value) deney görüntüleri.

2.1.2. Çimento

Deneylerde Oyak Bolu Çimento Fabrikası A.Ş.'nin üretmiş olduğu CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çimentoya ait kimyasal özellikler Çizelge 2.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. CEM I Çimentosuna ait kimyasal özellikler.

Kimyasal	CEM I 42,5 R
SiO ₂	18,95
Fe ₂ O ₃	4,07
TiO ₂	—
Al ₂ O ₃	5,32
CaO	64,72
MgO	1,35
Na ₂ O	0,16
K ₂ O	0,51
SO ₃	2,9

2.1.3. Yüksek Fırın Cürufu

Tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan YFC, çimento ile birlikte kullanıldığında bağlayıcılık özelliği kazanan bir malzemedir. Betonun, fiziksel ve mekanik özelliklerine olumlu katkısı olmakla beraber çevresel etkilere karşı daha dirençli olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle deniz suyu etkisi, sülfat etkisi, aşınma etkisi ve donma-çözünme etkisi gibi çevresel faktörlerin baskın olduğu yerlerde kullanımı faydalıdır. Ayrıca daha işlenebilir ve geçirimsiz beton tasarımlarına imkân sağlamaktadır. YFC katkılı betonların nihai dayanımları, normal betonlara göre daha yüksektir [70].

Kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında, ince öğütülmüş YFC kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan YFC'ye ait kimyasal özellikler Çizelge 2.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. YFC'ye ait kimyasal özellikler.

Kimyasal	YFC
SiO ₂	40,52
Fe ₂ O ₃	1,10
TiO ₂	0,98
Al ₂ O ₃	14,59
CaO	34,18
MgO	7,29
Na ₂ O	0,58
K ₂ O	1,1
SO ₃	0,16

2.1.4. Silis Dumanı

SD taneleri, boyut olarak çimentoya göre daha ince ve daha küçük bir yapıya sahiptir. Bu durumda, küçük olan bu tanecikler karışım esnasında çimento taneleri arasında girerek mevcut olan boşlukları doldurur ve bu boşlukta sıkışmış olan suyu dışarı doğru iterler. Böylelikle taze beton içerisinde çimento hamurunun kıvamı için etkili olmaya başlarlar. SD katkısının sertleşmiş beton üzerindeki en önemli etkisi basınç dayanımını artırmasıdır. Taze haldeki betonda boşluk oranını minimum seviyeye düşüren SD, aynı zamanda geçirimsizlik özelliğini de azaltmaktadır. Betonda oluşacak olan terlemeyi azaltarak su kaybını engelleyen SD tüm bu etki ve özelliklerinden dolayı betonun basınç dayanımını olumlu yönde etkilemektedir [71].

KYB karışımlarında, SD kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan SD'ye ait kimyasal özellikler Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. SD'ye ait kimyasal özellikler.

Kimyasal	SD
SiO ₂	96,0
Fe ₂ O ₃	0,25
TiO ₂	-
Al ₂ O ₃	0,70
CaO	0,50
MgO	0,60
Na ₂ O	0,25
K ₂ O	0,85
SO ₃	0,50

2.1.5. Uçucu Kül

Kendi başına bağlayıcılık özelliği olmayan UK, çimento hidratasyon ürünü olan Ca(OH)₂ ile tepkimeye girerek dayanımı sağlayan C-S-H jeli oluşturan bir malzemedir. C-S-H oluşumunun faydalı olması ile beraber zayıf bir ürün olan ve dürabilite açısından olumsuz etkiler yaratabilen Ca(OH)₂ miktarının azalması da bir o kadar faydalıdır. UK gibi mineral katkıların kullanılmasındaki en önemli nedenlerden biriside budur.

UK'nın uzun vadede beton dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber UK, yıllardır yapılan çalışmalar ve edinilen tecrübeler sonucunda betonun performansına olumlu katkıları olan bir mineral olduğu kabul edilmiştir. Özellikle arıtma tesisleri, deniz yapıları, kimyasal etkilere maruz yapılarda betonun durabilitesini iyileştirir [72].

KYB karışımlarında, F sınıfı UK kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan UK'ya ait kimyasal özellikler Çizelge 2.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.7. UK'ya ait kimyasal özellikler.

Kimyasal	UK
SiO ₂	58,56
Fe ₂ O ₃	6,51
TiO ₂	1,21
Al ₂ O ₃	23,39
CaO	1,81
MgO	2,02
Na ₂ O	0,53
K ₂ O	4,13
SO ₃	0,0013

2.1.6. Sıvı Nitrojen

Laboratuvar ortamında hedeflenen düşük sıcaklıkların elde edilebilmesi amacıyla sıvı nitrojen kullanılmıştır. Sıvı nitrojenin, nükleer santraller, kimya, boya, gıda, sanayi, tıp, hayvancılık gibi pek çok alanda kullanımı mevcuttur. Sıvı fazda kullanılan nitrojenin teknik özellikleri Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Sıvı nitrojene ait teknik bilgiler.

Fiziksel Hali	Sıvı + Gaz
Koku / Renk Kokusuz,	Renksiz
Molekül Ağırlık	28,01 mol
Kaynama Noktası	- 195,8 °C
Ergime Noktası	- 210 °C
Kritik Sıcaklık	- 147 °C
Gazın Özgül Ağırlığı (Hava = 1)	0,967
Sıvının Yoğunluğu (-195,8 °C, 1 atm.)	0,808 kg/dm ³
Gaz Yoğunluğu	1,25 kg/Nm ³ (0 °C, 1 bar)
Çözünürlük (H ₂ O)	20 mg/l
Diğer Bilgiler	Zehirsiz, Havadan hafif

2.1.7. Donatı

Aderans deneylerinde kullanılan donatılı beton numunelerde 12 mm çapında nervürlü S 420 betonarme çeliği kullanılmıştır. TS 708’e göre bu çeliğin en düşük akma dayanımı 420 MPa, en düşük çekme dayanımı 500 MPa’dır.

2.2. METOT

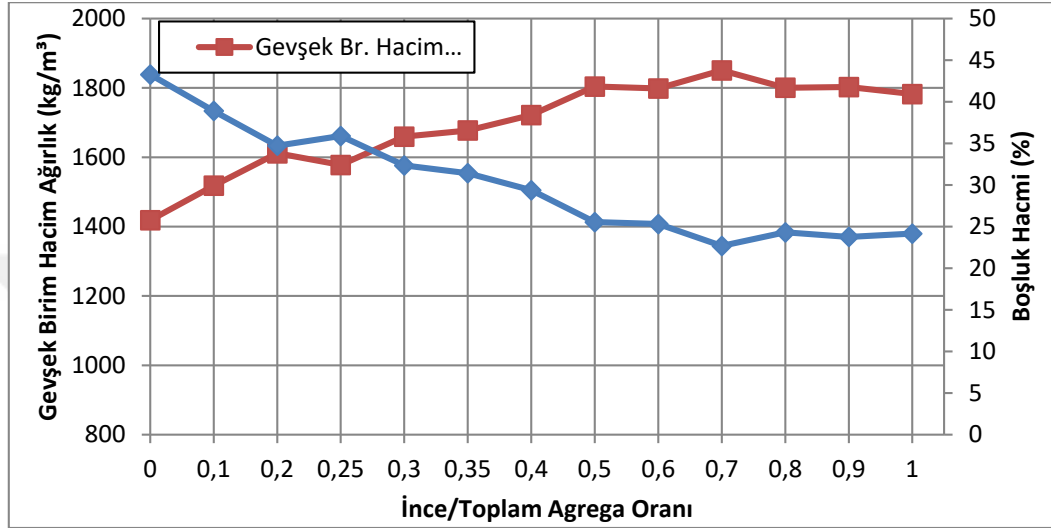
2.2.1. Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Taze Beton Deneyleri

En uygun agrega kompozisyonunun belirlenmesi amacıyla minimum boşluk maksimum birim hacim ağırlığı verecek oran tespit edilmiştir. Bu amaçla ağırlıkça ince agrega/toplam agrega oranı %0 ile %100 olacak şekilde her bir karışım için gevşek birim ağırlık (γ_b) ve boşluk hacmi (e) değerleri sırasıyla Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2 yardımıyla belirlenmiştir [73], [74].

$$\gamma_b = \frac{\text{Agrega Ağırlığı}}{\text{Deney Kabı Hacmi}} \quad (2.1)$$

$$e = \left[1 - \gamma_b \frac{a(\rho_c - \rho_f) + \rho_f}{\rho_c \times \rho_f} \right] \times 100 \quad (2.2)$$

Burada; e, agrega karışımındaki boşluk hacmi yüzdesini, γ_b , karışımın gevşek birim hacim ağırlığını (kg/m^3), a, karışımındaki ince agrega/toplam agrega oranını ρ_c ve ρ_f ise sırasıyla iri ve ince agreganın kuru özgül ağırlıklarını ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.4’de verilmektedir.



Şekil 2.4. Optimum ince/iri agrega seçimi.

Çalışmada üretimi yapılan KYB karışımlarının üretim aşamaları şu şekildedir;

İlk olarak etüv kurusu halindeki ince ve iri agrega, 300 litrelik mikser içerisinde homojen bir dağılım oluşturabilmesi için yaklaşık 1-2 dakika karıştırılmıştır. Ardında bu karışıma, miktarı daha önceden belirlenmiş olan puzolan (YFC, SD, UK) malzeme ilave edilmiş ve homojen bir karışım elde edebilmek için karışım yaklaşık 1-2 dakika karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi devam ederken karışım suyu miktarının yaklaşık %75' i karışıma ilave edilerek 1 dakika karıştırma işlemi devam etmiştir. 1 dakika sonunda geriye kalan karışım suyu hiperakışkanlaştırıcı ile birlikte karıştırılarak devam etmekte olan karışıma ilave edilmiş ve yaklaşık 4 dakika daha karıştırma işlemi devam etmiştir.

Hazırlanmış olan KYB karışımları taze beton deneylerine tabi tutulmuştur. Taze betonun işlenebilirlik, akışkanlık ve geçme kabiliyeti parametrelerini belirleyebilmek için Slump Yayılma, V-hunisi, L kutusu, J-ringi ve U kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kütleme işlemlerinden sonra sertleşmiş beton numuneleri üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, dinamik elastsite modülü, ultrases geçiş hızı ve donatı aderans deneyleri her bir seri için ayrı olarak uygulanmıştır. Tüm deneyler 28, 56 ve 90 günlük kür süreleri

ardından ve kriyojenik çevrim işlemi sonrası gerçekleştirilmiştir.

2.2.2. KYB Karışım Miktarı

KYB karışım oranları EFNARC’de [51] belirtilen ve duvar elemanlarında kullanımının önerildiği SF2 (660–750 mm hedef slump yayılma çapı) akışkanlık sınıfına göre belirlenmiştir. Bunun için YFC, UK ve SD içeren karışımlar hazırlanmış ve sonuç olarak gerekli şartları sağlayan 3 farklı puzolan sınıfına uygun karışım elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan karışım miktarları Çizelge 2.9’da verilmiş ve bu oranlar esas alınarak hazırlanan taze beton numunelerine EFNARC 2005’e göre KYB deneyleri uygulanmıştır.

Çizelge 2.9. KYB karışım oranları (1 m³).

Malzemeler	YFC	UK	SD
Çimento	375	375	495
Uçucu Kül	175	175	55
Toplam Filler	550	550	550
Toplam Su	193	193	215
Akışkanlaştırıcı	7,98	7,98	9,63
İnce Agrega	1077	1085	1045
İri Agrega	580	584	563

Deneyssel süreçte, numunelerin kodlanabilmesi için karışımlardaki katkı malzemelerine göre numunelere YFC (Yüksek Fırın Cürufu), UK (Uçucu Kül), SD (Silis Dumanı) kodları verilmiştir.

2.2.3. Kriyojenik Çevrimin Uygulanması

28, 56 ve 90 günlük kür işleminin ardından normal laboratuvar ortamında deney işlemine tabi tutulacak numuneler ile kriyojenik sıvıya maruz bırakılacak numuneler ayrılmıştır. Numune çeşitleri ve numuneler üzerinde yapılacak olan deney işlemleri aşağıdaki Çizelge 2.10 ve Çizelge 2.11’de belirtilmiştir.

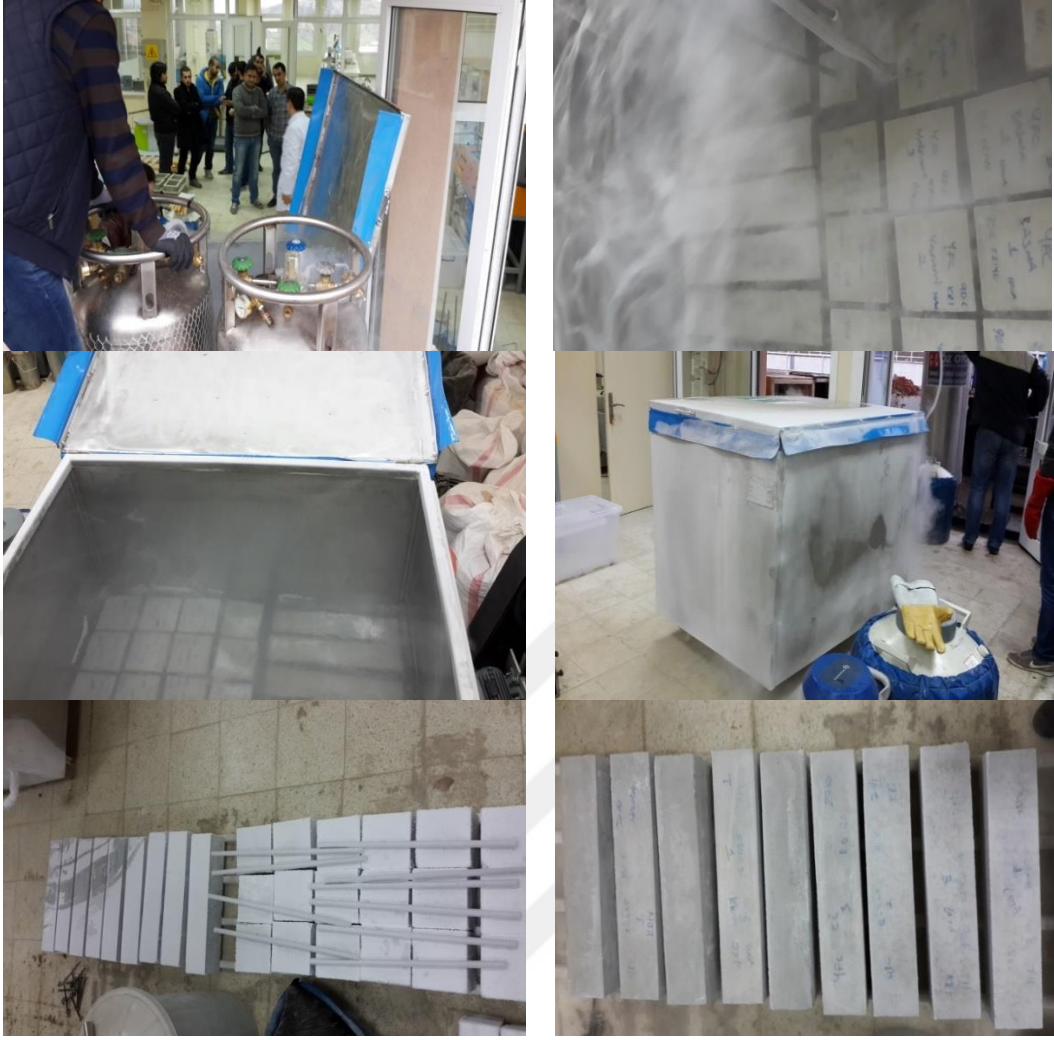
Çizelge 2.10. Standart laboratuvar deney numune çeşitleri

Standart Laboratuvar Deneyleri			
Numara	Ebat (mm)	Numune Türü	Deneyler
1	(150*150*150)	Küp	Basınç Dayanımı, Ultrases Geçiş Hızı, Yarmada Çekme Dayanımı,
2	(100*100*500)	Kiriş	Eğilme Dayanımı Rezonans Frekansı, Ultrases Geçiş Hızı

Çizelge 2.11. Kriyojenik işlem deney numune çeşitleri

Kriyojenik İşlem (5 Çevrim)			
Numara	Ebat (mm)	Numune Türü	Deneyler
1	(150*150*150)	Küp	Basınç Dayanımı, Ultrases Geçiş Hızı, Yarmada Çekme Dayanımı,
2	(100*100*500)	Kiriş	Eğilme Dayanımı Rezonans Frekansı, Ultrases Geçiş Hızı

Basıncılı kaplarla getirilen sıvı nitrojen, firma yetkilileri tarafından 28,56 ve 90 günlük beton numunelerin yerleştirildiği tank içerisine boşaltılmıştır. Boşaltma işlemi sonrasında bir saat süreyle sıvı nitrojen içerisinde bekleyen numunelerde ısı transferi neticesinde kaynama ve buharlaşma meydana geldiği için yaklaşık 20 dakikaya kadar sürekli nitrojen takviyesi gerekmektedir. 20 dakikalık süre zarfında ısı transferi minimum seviye düşmüş ve sıvı yüzeyindeki buharlaşma oldukça azalmıştır. Toplamda 1 saat boyunca kriyojenik işleme tabi tutulan numuneler tanktan çıkarılarak 24 ± 2 saat süresince laboratuvar şartlarında havada çözölmeye terk edilmiştir. Bu süreç 5 çevrim olacak şekilde tekrar edilmiştir. Yapılan işlemlere ait resimler aşağıda sıralanmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Kriyojenik işlemin uygulama görüntüleri.

Her çevrim ardından 100x100x500 mm ebatlarındaki kiriş numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı ile boyuna rezonans frekansı ölçümleri alınarak numunelerin dinamik elastisite modüllerindeki değişim kontrol edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde normal kür ve kriyojenik çevrim sonucunda 28, 56 ve 90. günlerin ardından, ultrases geçiş hızı, rezonans frekansı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımı ve donatı aderansı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca 28 günlük standart su, örtü altında kür ve hava kürü olmak üzere üç farklı kür koşulu altında kür işlemine tabi tutulan ve yüksek fırın cürufu ile üretilen karışımlarda ASTM C 666'ya (Prosedür B) uygun olarak donma çözülme deneyi yapılmış ve bu numuneler üzerinde de ultrases geçiş hızı, rezonans frekansı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2.2.4. Dinamik Elastisite Modülü

ASTM 215'e göre yapılan rezonans frekansı deneyi sonunda dinamik elastisite modülü değerleri belirlenmiştir. Deneyler için 100x100x500 mm boyutuna sahip kiriş numuneler kullanılmıştır. Numuneler 28, 56 ve 90 gün kürlere tabi tutulup dayanım kazandıktan sonra, her bir çevrim sonrasında rezonans frekans ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve değerler Eşitlik 2.3 yardımıyla hesaplanmıştır. Yapılan işlemlere ait resimler aşağıda sıralanmıştır (Şekil 2.6).

$$E=4L^2\rho N^2 \quad (2.3)$$

Eşitlikte; E, dinamik elastisite modülünü, L, numune uzunluğunu, ρ , malzeme yoğunluğunu, N, boyuna rezonans frekansını ifade etmektedir.



Şekil 2.6. Rezonans frekans deneyi uygulama görüntüleri.

2.2.5. Ultrases Geçiş Hızı Ölçümleri

Sertleşmiş beton numunelerinin 28, 56, 90 gün su, hava ve örtü kürlерinde dayanım kazanmalarının ardından, her çevrim sonrasında ultrases hızı ölçümleri yapılmış ve değerler Eşitlik 2.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan işlemlere ait resimler aşağıda

sıralanmıştır (Şekil 2.7).

$$V = \frac{S}{t} \quad (2.4)$$

Eşitlikte; V, ultrases geçiş hızını, S, numune uzunluğunu, t, ultrases geçiş süresini ifade etmektedir.



Şekil 2.7. Ultrases geçiş hızı deneyi uygulama görüntüleri.

2.2.6. Beton Basınç Dayanımı

28, 56, 90 gün su, hava ve örtü kürlerinde dayanım kazanmış olan kenar uzunluğu 150 mm'lik küp numunelere 0, 1 ve 5 çevrim kriyojenik işlem uygulanmış ve sonrasında basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneylerde 300 ton kapasiteye sahip tek eksenli hidrolik pres kullanılmıştır. Beton numunesinin taşıyabileceği maksimum kuvvete ulaşıldığında hidrolik test cihazı otomatik olarak yüklemeyi durdurmuştur.

En büyük kırılma yük değerleri kullanılarak küp numunelerin basınç dayanımları, Eşitlik

2.5 yardımıyla belirlenmiştir. Yapılan işlemlere ait resimler aşağıda verilmiştir (Şekil 2.8).

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{A} \quad (2.5)$$

Eşitlikte; σ , basınç gerilmesini, $P_{\max}$, maksimum uygulanan kuvveti, A , numune yüzey alanını ifade etmektedir.



Şekil 2.8. Basınç dayanımı deneyi uygulama görüntüleri.

2.2.7. Eğilme Dayanımı

Hazırlanan test kirişleri için kırılma mekaniği üç noktalı eğilme deneyi uygulanarak pik yük değerleri kullanılmış ve eğilme dayanımı değerleri Eşitlik 2.6 yardımıyla belirlenmiştir. Yapılan işlemlere ait resimler aşağıda verilmiştir (Şekil 2.9).

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \text{ (MPa)} \quad (2.6)$$

Eşitlikte; σ_f , eğilme dayanımını, P , maksimum kırılma yükünü, L , yükleme yapılan kirişin etkin boyunu, b , kiriş genişliğini, d , kiriş yüksekliğini ifade etmektedir.



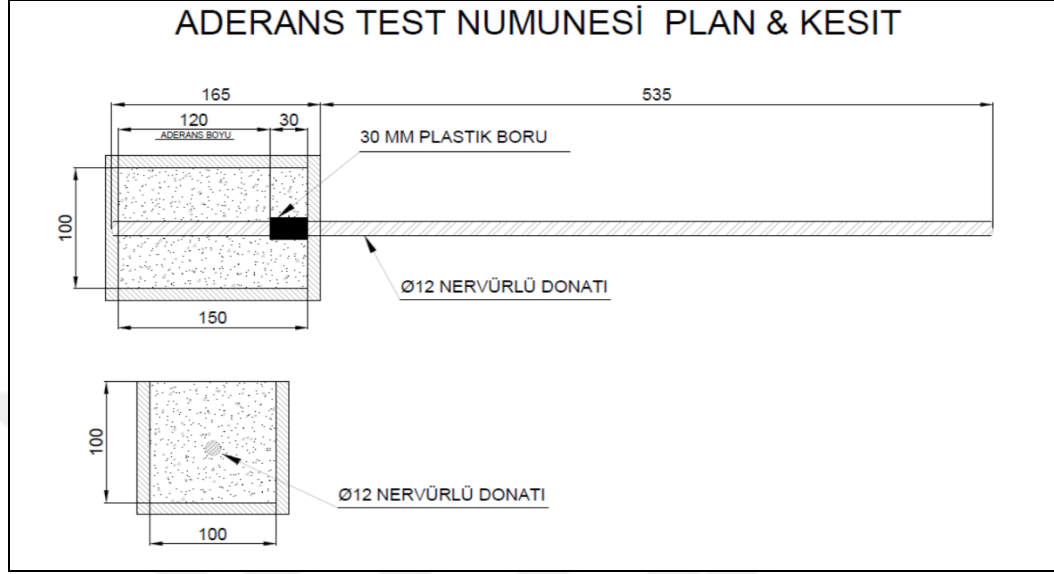
Şekil 2.9. Eğilme deneyi uygulama görüntüleri.

2.2.8. Donatı Aderansı

Kriyojenik çevrim işlemleri tamamlandıktan sonra aderans performansının belirlenmesi için aderans test numunelerine mekanik deneyler uygulanmıştır. Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de görüldüğü gibi aderans performansının belirlenmesinde kullanılan numunelerde tek tip aderans boyu kullanılmıştır. 100x100x150 mm ölçülere sahip olan numunelerde aderans boyu 120 mm olarak belirlenmiştir. Kalıp içerisinde geri kalan 30 mm’ lik donatı boyunun beton ile aderansı plastik bir materyal yardımı ile kesilmiştir. Aderans testi için kullanılan donatı, 12 mm çapında nervürlü inşaat çeliğidir. Hazırlanan tüm numuneler çekme test cihazında aderans testine tabi tutulmuş, beton-donatı arasındaki aderans dayanımları Eşitlik 2.7 ile hesaplanmış ve sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Yapılan işlemlere ait resimler aşağıda verilmiştir (Şekil 2.12).

$$\tau = \frac{\text{Aderans Kuvveti}}{\pi \times \phi \times l} \quad (2.7)$$

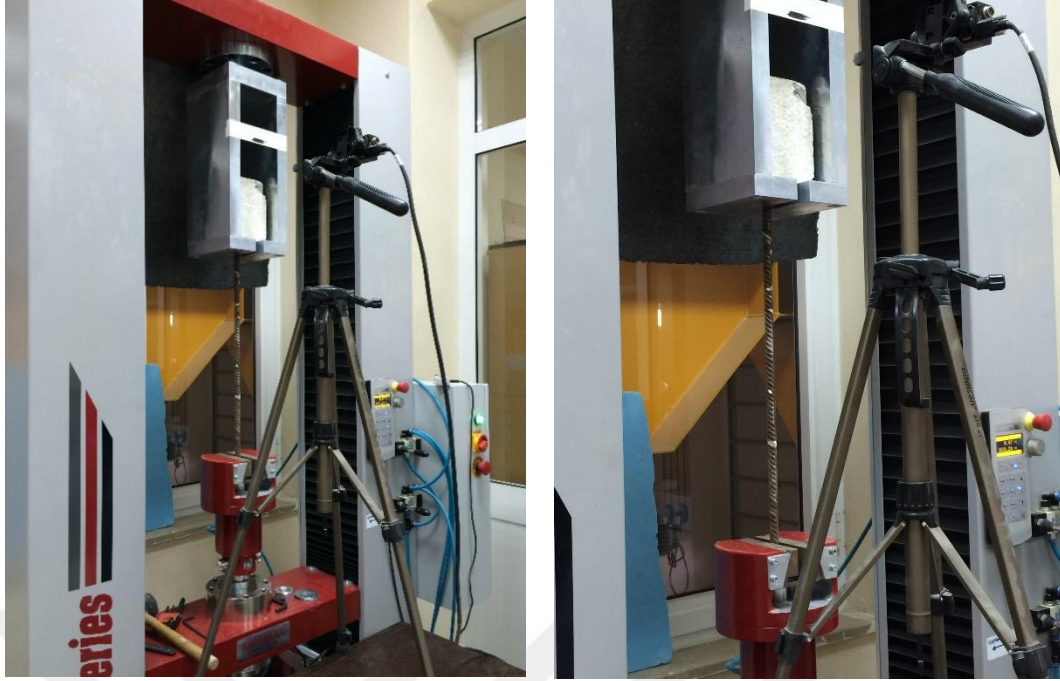
Eşitlikte; τ , Aderans gerilmesini, ϕ , Donatı çapını, l , Aderans boyunu (betona gömülü donatı uzunluğu) ifade etmektedir.



Şekil 2.10. Donatı aderans numunesi imalat detayı.



Şekil 2.11. Donatı aderans numunesi üretim resimleri.



3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. TAZE BETON DENEYLERİ

Çalışmada YFC, UK ve SD kullanılarak hazırlanan KYB numunelere uygulanan deneylere ait görüntüler Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Taze beton deneylerine ait görüntüler.

Taze betona uygulanan Slump yayılma ve L-kutusu deney sonuçları Çizelge 3.1, J-ringi deney sonuçları Çizelge 3.2, U kutusu, elek segregasyon deney sonuçları ise Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.1. Slump yayılma ve L-kutusu deney sonuçları.

Numune Kodu	Slump Yayılma				L-Kutusu				
	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D (mm)	T ₅₀₀ (s)	T ₂₀ (s)	T ₄₀ (s)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₂ /h ₁
YFC	740	735	737,5	4,10	6,20	13,01	80	67	0,84
UK	720	695	707,5	5,00	8,95	19,78	105	85	0,81
SD	750	755	752,5	3,20	2,41	6,56	105	85	0,81

Çizelge 3.1 incelendiğinde Slump deney sonucuna göre YFC için yayılma çapının 740 mm, UK için 720 mm ve SD için 750 mm olduğu görülmektedir. EFNARC standardına göre kriyojenik beton tankların duvarlarında kullanılması planlanan bu karışımın uygunluğu için gerekli olan değer SF2 slump yayılma sınıfında olması gerektiği belirtilmektedir. Elde edilen değerlere bakıldığında slump yayılma çapı değerlerinin SF2 (660-750 mm) sağlandığı görülmektedir. T500 değerleri incelendiğinde ise 500 mm akma çapına YFC için 4.10 s; UK için 5.00 s; SD için 3,20 s sürede ulaşıldığı görülmektedir. Üretilen KYB'nin viskozite sınıfı EFNARC'a göre VS2/VF2 (T500>2 s) olarak belirlenmiştir. Çizelgedeki L-kutusu deney sonuçları incelendiğinde h₂/h₁ oranının YFC için 0,84; UK ve SD için 0,81 olduğu ve dolayısıyla KYB üretimi için uygun olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. J-ringi deney sonuçları.

Numune Kodu	J Ringi Yayılma Çapı / T ₅₀₀				h-h ort. (mm)	Orta Nokta Çökme
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	$\frac{d_1+d_2}{2}$	T ₅₀₀ (s)		
YFC	770	740	755	6,00	5	115
UK	720	710	715	17,00	15	95
SD	685	680	682,5	10,50	10	105

Çizelge 3.3. Taze beton birim ağırlık, U-kutusu ve elek segregasyon deney sonuçları.

Numune Kodu	U-Kutusu			Elek Segregasyon (%)	Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)
	h ₁	h ₂	(h ₂ - h ₁) mm		
YFC	160	165	5	10,27	2372,2
UK	170	145	25	12,25	2352,3
SD	160	150	10	10,62	2313,5

Çizelge 3.3'te yer alan elek segregasyon değerleri incelendiğinde YFC için %10,27; UK için %12,25 ve SD için %10,62 değerlerinin SR2 segregasyon sınıfında (<%15) olduğu

tespit edilmiştir.

SF2 akışkanlık sınıfında üretilen YFC, SD ve UK katkılı beton numuneler, standart su, örtü altında kür ve hava kürü olmak üzere üç farklı kür koşulu altında 28, 56 ve 90 gün süresince bekletildikten sonra ilgili deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir katkı malzemesi, kür koşulu ve kür süresi parametreleri göz önüne alınarak normal laboratuvar koşullarında ve kriyojenik işlem sonrası kullanılmak üzere tüm testler için 3'er adet deney numunesi hazırlanmıştır. Ayrıca donma-çözülme etkisinin incelenmesi amacı ile standart su, örtü altında kür ve hava kürü olmak üzere üç farklı kür koşulu altında bekletilmek üzere 28 günlük YFC katkılı beton numunelerden tüm ilgili deneyler için 3'er adet deney numunesi hazırlanmıştır. Örtü kürü numuneleri Şekil 3.2'de gösterildiği gibi numunelerin etrafı plastik örtülerle kaplanarak sağlanmıştır.



Şekil 3.2. Numunelere uygulanan örtü kürü.

3.2. SERTLEŞMİŞ BETON DENEYLERİ

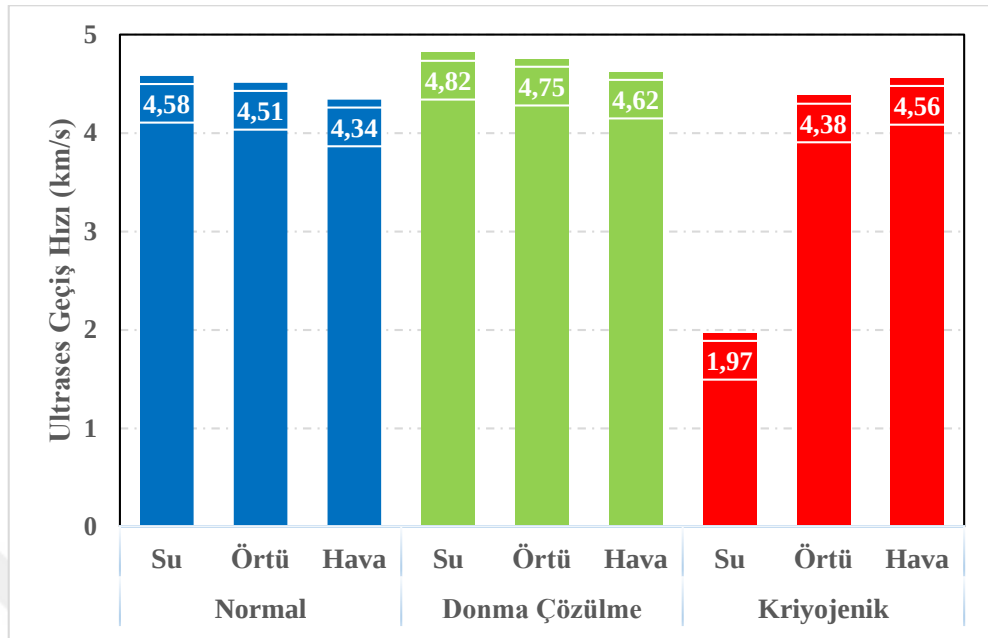
3.2.1. Donma Çözülme Etkisi

ASTM C 666'da belirtilen B prosedürüne göre 28 gün 3 farklı kür işlemine tabi tutulmuş YFC ile üretilmiş KYB'lerin havada donma ve suda çözülme şeklinde 300 adet donma çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Bu numunelerin donma-çözülme etkisi sonrası yapılan ilgili deney sonuçları, standart kür (herhangi bir donma çözülme etkisine maruz kalmamış) ve kriyojenik çevrim ardından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

3.2.1.1. Ultrases Geçiş Hızı

28 gün 3 farklı kür işlemine tabi tutulan ve YFC içeren kendiliğinden yerleşen beton numunelerine ait 300 çevrim donma çözülme ile 5 çevrim kriyojenik işlemin ardından

elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 3.3’de verilmiştir.

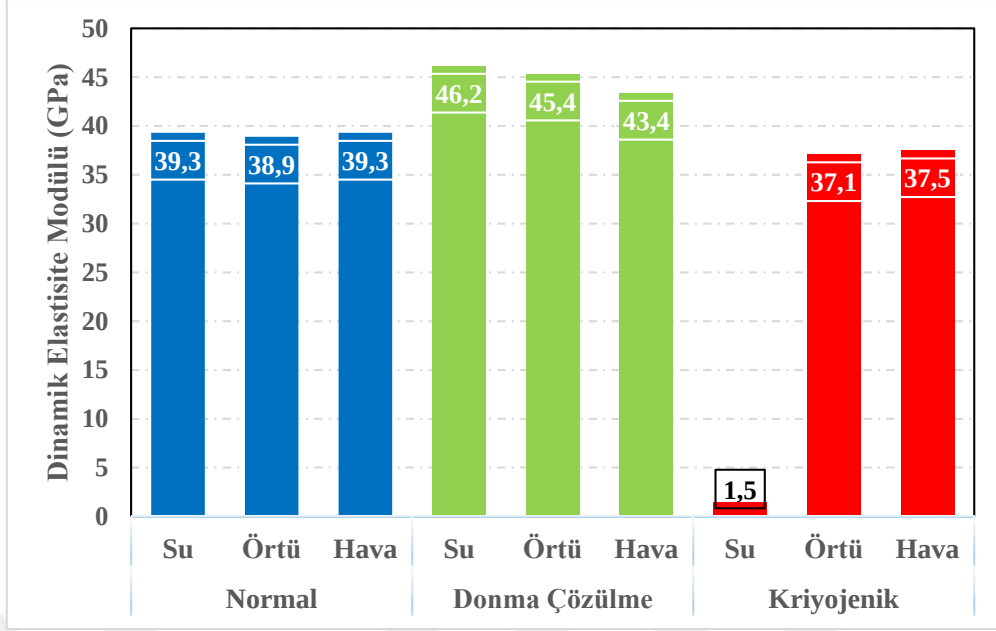


Şekil 3.3. 28 günlük YFC numunelerine ait ultrases geçiş hızı deney sonuçları.

Şekil 3.3 incelendiğinde, normal ve donma çözölme etkisindeki numuneler arasında en yüksek ultrases geçiş hızı değerine su numunelerinde, en düşük değerlere ise hava kürüne maruz bırakılmış numunelerde görölmektedir. Donma çözölme etkisi sonucunda numunelerin ultrases geçiş hızı değerlerinde aşırı bir düşüşe rastlanılmamıştır. Ultrases geçiş hızı değerindeki en sert düşüşün suda kür edilmiş ve kriyojenik çevrime maruz bırakılmış numuneden elde edildiği gözlenmektedir.

3.2.1.2. Dinamik Elastisite Modülü

Normal, donma çözölme ve kriyojenik işlem ardından 3 farklı kür koşuluna tabi tutulan 28 günlük yüksek fırın cürufu içeren kendiliğinden yerleşen betonların dinamik elastisite modülü değerleri Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

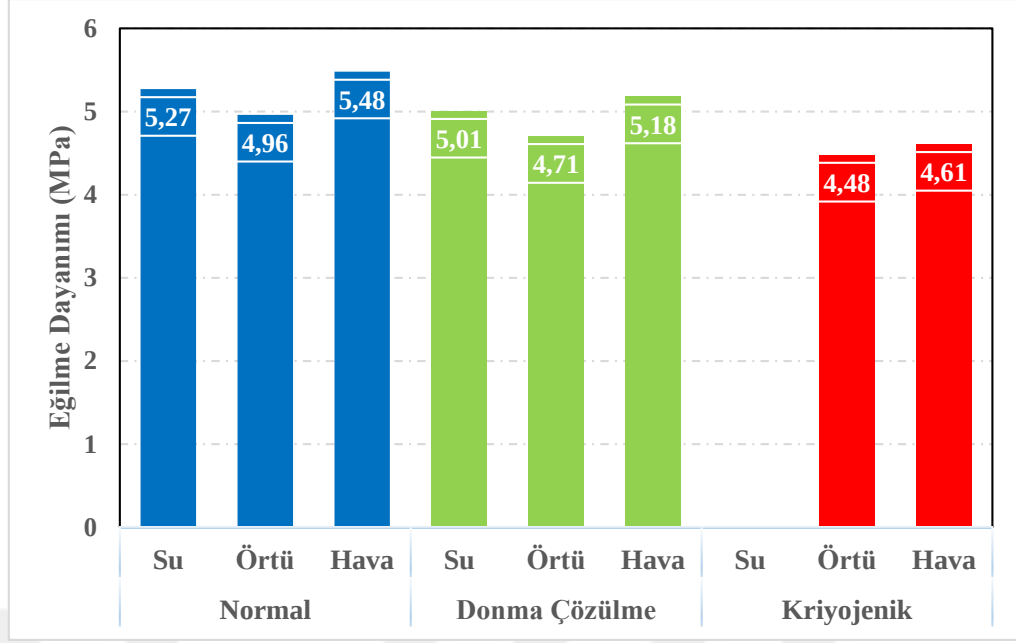


Şekil 3.4. 28 günlük YFC numunelerinin dinamik elastisite modülü deney sonuçları.

Şekil 3.4 incelendiğinde, ultrases geçiş hızı deney sonuçları ile dinamik elastisite modülü deney sonuçlarının uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Normal kür ve donma çözülme etkisi sonucunda en yüksek dinamik elastisite modülü değerleri su kürü numunelerinden elde edilirken en düşük değerler hava kürü uygulanmış numunelerden elde edilmiştir. 300 çevrim donma çözülme etkisi ardından numunelerin dinamik elastisite ve ultrases geçiş hızı değerlerinde artış meydana gelmesi, YFC' nin donma çözülme etkisine karşı oldukça dirençli olduğu ve YFC ile üretilen KYB numunelerinin dayanım kazanmasına devam ettiği şeklinde yorumlanabilir. Su kürüne tabi tutulmuş numunelerde ise 5 adet kriyojenik çevrim ardından dinamik elastisite modülü değerinin %96,18 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu düşüş ASTM C 666'da belirtilen numunelerin dinamik elastisite modülünde olması gereken maksimum %40'lık azalmadan oldukça fazla olarak ortaya çıkmıştır.

3.2.1.3. Eğilme Dayanımı

Normal, donma çözölmeye maruz ve kriyojenik işlem ardından numunelerden elde edilen eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 3.5'de verilmiştir.

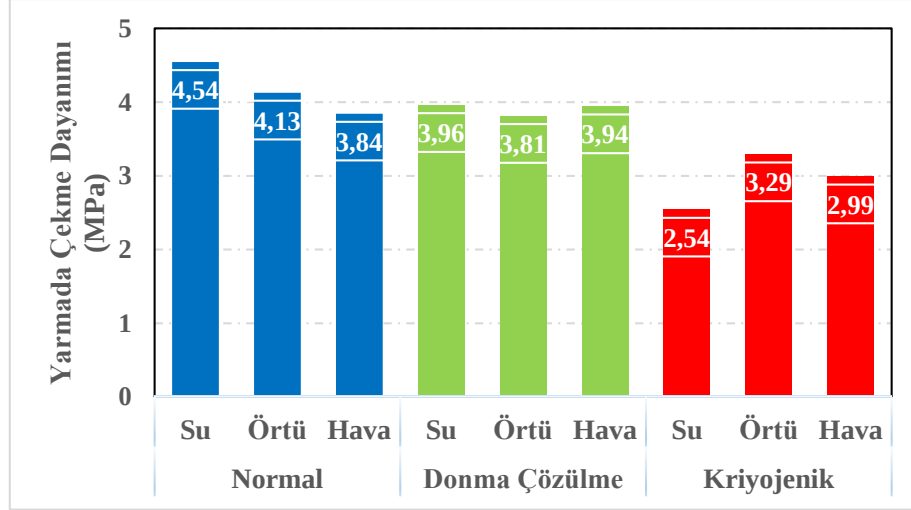


Şekil 3.5. 28 günlük YFC numunelerine ait eğilme dayanımı değerleri.

Şekil 3.5 incelendiğinde hem donma çözülme hem de kriyojenik çevrim sonucunda su, örtü ve hava kürüne tabi tutulan numunelerin eğilme dayanımları normal numunelere oranla azalmıştır. 300 çevrim donma çözülme etkisi ardından su, örtü ve hava kürü uygulanan 28 günlük YFC numunelerinin eğilme dayanımı değerleri sırasıyla %4,93, 5,04 ve 5,47 oranında azalmıştır. Su kürü uygulanmış eğilme kirişi numunelerinde 5 adet kriyojenik çevrim ardından tahribatlı herhangi bir deney yapılmasına müsaade etmeyecek şekilde çatlak oluşumları gözlenmiş ve bu nedenle mekanik deneyler bu numunelerde gerçekleştirilmemiştir.

3.2.1.4. Yarmada Çekme Dayanımı

Normal, donma çözölmeye maruz ve kriyojenik işlem ardından numunelerden elde edilen yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Şekil 3.6'da verilmiştir.

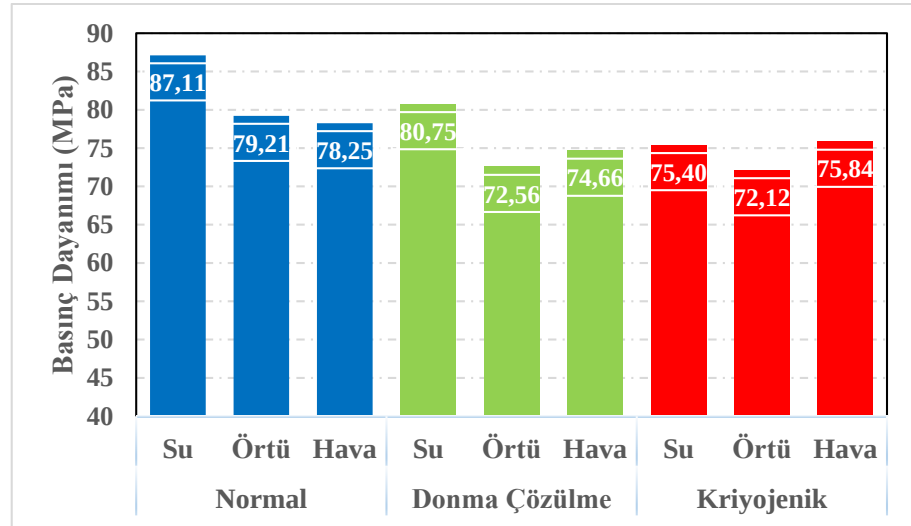


Şekil 3.6. 28 günlük YFC numunelerine ait yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.

Şekil 3.6 incelendiğinde 300 çevrim donma çözölmeye maruz kalmış hava kürü numunesi hariç tüm numunelerin yarmada çekme dayanımları normal numunelere oranla azalma göstermiştir. Normal ve 300 çevrim donma çözölme numuneleri kıyaslandığında su, örtü ve hava kürü uygulanmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri sırasıyla %12,78 ve %7,75 azalma ile +2,60 artış göstermiştir. 5 adet kriyojenik çevrim ardından ise su, örtü ve hava kürü uygulanmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri sırasıyla %44,05, %20,34 ve %22,14 oranında azalma göstermiştir.

3.2.1.5. Basınç Dayanımı

Normal, donma çözölmeye maruz ve kriyojenik işlem ardından numunelerden elde edilen basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. 28 günlük YFC numunelerine ait basınç dayanımı deney sonuçları.

Şekil 3.7 incelendiğinde 28 günlük YFC numunelerinde en yüksek basınç dayanımı değerinin su kürü uygulanmış en düşük basınç dayanımı değerinin ise hava kürü uygulanmış numunelerden elde edildiği gözlenmiştir. Hem donma çözülme hem de kriyojenik çevrim ardından numunelerin basınç dayanımı değerleri azalma göstermiştir. 300 çevrim donma çözülme etkisi ardından su, örtü ve hava kürü uygulanmış numunelerin basınç dayanımı değerleri sırasıyla %7,30, %8,40 ve %4,59 oranında azalma göstermiştir. 5 çevrim kriyojenik çevrim ardından ise su, örtü ve hava kürü uygulanmış numunelerin basınç dayanımı değerleri sırasıyla %13,44, %8,95 ve %3,08 oranında azalmıştır.

3.3. KRİYOJENİK İŞLEM

Sıvı nitrojen kullanarak 1 saat sıvı içerisinde donma ve 24 ± 2 saat laboratuvar koşullarında havada çözülmeye maruz kalacak şekilde 5 çevrim kriyojenik işleme maruz kalmış YFC, SD ve UK ile üretilen kendiğinden yerleşen beton numunelerine ait deney sonuçları verilmiştir.

3.3.1. Ultrases Geçiş Hızı

Çalışmada kiriş numuneler (100x100x500 mm) üzerinde kriyojenik çevrim öncesi ve her kriyojenik çevrim sonunda ultrases geçiş hızı değerleri tespit edilmiştir. Her çevrim sonunda elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri Çizelge 3.4, 3.5 ve 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. 28 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.

Numune	Kür Tipi	Kür Süresi (Gün)	Numune Kodu	P Vel. (m/s)					
				0. Çevrim	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim
YFC	Su	28	1	4579	4390	4026	3536	2789	1969
			2						
			3						
	Örtü		1	4513	4488	4444	4433	4417	4378
			2						
			3						
	Hava		1	4340	4390	4340	4321	4310	4425
			2						
			3						

Çizelge 3.4 (devam). 28 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.

Numune	Kür Tipi	Kür Süresi (Gün)	Numune Kodu	P Vel. (m/s)					
				0. Çevrim	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim
SD	Su	28	1	4355	4378	4336	4266	4209	4237
			2						
			3						
	Örtü		1	4281	4255	4237	4181	4174	4170
			2						
			3						
	Hava		1	4075	4156	4102	4065	4052	4058
			2						
			3						
UK	Su	28	1	4394	4352	4174	3593	3489	3225
			2						
			3						
	Örtü		1	4352	4367	4321	4307	4319	4336
			2						
			3						
	Hava		1	4266	4288	4230	4160	4174	4184
			2						
			3						

Çizelge 3.5. 56 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.

Numune	Kür Tipi	Kür Süresi (Gün)	Numune Kodu	P Vel. (m/s)					
				0. Çevrim	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim
YFC	Su	56	1	4750	4704	4690	4647	4587	4529
			2						
			3						
	Örtü		1	4492	4472	4521	4558	4484	4472
			2						
			3						
	Hava		1	4375	4329	4476	4452	4378	4386
			2						
			3						
SD	Su	56	1	4580	4521	4476	4452	4348	4325
			2						
			3						
	Örtü		1	4455	4429	4421	4421	4390	4371
			2						
			3						
	Hava		1	4290	4284	4355	4344	4230	4216
			2						
			3						
UK	Su	56	1	4435	4401	4367	4230	4191	3879
			2						
			3						
	Örtü		1	4502	4492	4476	4472	4437	4456
			2						
			3						
	Hava		1	4322	4310	4374	4348	4310	4323
			2						
			3						

Çizelge 3.6. 90 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.

Numune	Kür Tipi	Kür Süresi (Gün)	Numune Kodu	P Vel. (m/s)					
				0. Çevrim	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim
YFC	Su	90	1	4600	4376	4106	3946	3927	3698
			2						
			3						
	Örtü		1	4425	4286	4148	4042	4100	4112
			2						
			3						
	Hava		1	3975	3880	3820	3735	3861	3864
			2						
			3						
SD	Su	90	1	4558	4492	4440	4244	4167	4105
			2						
			3						
	Örtü		1	4480	4390	4386	4248	4252	4237
			2						
			3						
	Hava		1	4195	4307	4188	4136	4125	4153
			2						
			3						
UK	Su	90	1	4664	4575	4470	4320	4409	4352
			2						
			3						
	Örtü		1	4440	4464	4448	4355	4352	4409
			2						
			3						
	Hava		1	4255	4378	4303	4281	4265	4259
			2						
			3						

Çizelge 3.4, 3.5 ve 3.6 incelendiğinde genel olarak su, örtü ve hava kürü uygulanmış YFC, SD ve UK numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri her çevrimin ardından azalma eğilimindedir. Su kürü uygulanmış numunelerde, hava ve örtü altında kür uygulanmış numunelere kıyasla daha düşük ultrases geçiş hızı değerlerine ulaşılmıştır. Özellikle 28 günlük su kürü uygulanmış YFC ve UK numunelerinin kriyojenik çevrimler ardından ultrases geçiş hızı değerleri doğrusal bir azalma göstermiştir. 28 günlük kür uygulaması ardından 5 çevrim kriyojenik işleme maruz kalmış YFC numunelerinin ultrases geçiş hızı değerlerinde %56,99 UK numunelerinde ise %26,59 oranında azalma meydana gelmiştir.

3.3.2. Dinamik Elastisite Modülü

Her çevrim ardından kiriş numuneler üzerinden elde edilen dinamik elastisite modülü değerleri Çizelge 3.7, Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.7. 28 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen dinamik elastisite modülü değerleri.

Numune	Kür Tipi	Kür Süresi (Gün)	Numune Kodu	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)					
				0. Çevrim	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim
YFC	Su	28	1	39,3	30,8	18,2	8,5	5,9	1,5
			2						
			3						
	Örtü		1	38,9	37,8	37,5	37,1	36,7	37,1
			2						
			3						
	Hava		1	39,3	37,8	37,5	37,1	37,1	37,5
			2						
			3						
SD	Su	28	1	35,3	33,9	33,2	31,5	31,2	31,2
			2						
			3						
	Örtü		1	35,3	33,9	33,9	32,6	32,6	31,9
			2						
			3						
	Hava		1	34,3	32,9	32,6	31,2	31,2	30,9
			2						
			3						
UK	Su	28	1	35,5	33,4	33,1	22,5	14,7	7,92
			2						
			3						
	Örtü		1	35,5	33,8	33,8	33,4	33,4	33,4
			2						
			3						
	Hava		1	35,1	34,1	33,4	32,1	32,4	32,4
			2						
			3						

Çizelge 3.8. 56 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen dinamik elastisite modülü değerleri.

Numune	Kür Tipi	Kür Süresi (Gün)	Numune Kodu	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)					
				0. Çevrim	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim
YFC	Su	56	1	44,0	43,6	43,2	42,8	42,0	41,2
			2						
			3						
	Örtü		1	41,4	41,2	41,2	40,8	40,5	40,5
			2						
			3						
	Hava		1	40,8	40,5	40,5	40,1	39,3	39,3
			2						
			3						

Çizelge 3.8 (devam). 56 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen dinamik elastisite modülü değerleri.

Numune	Kür Tipi	Kür Süresi (Gün)	Numune Kodu	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)					
				0. Çevrim	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim
SD	Su	56	1	37,1	36,5	36,1	35,4	34,3	33,0
			2						
			3						
	Örtü		1	37,8	37,2	36,8	36,5	36,1	35,4
			2						
			3						
	Hava		1	36,3	35,8	35,4	35,0	34,0	34,0
			2						
			3						
UK	Su	56	1	36,8	36,2	35,1	31,7	29,1	23,3
			2						
			3						
	Örtü		1	38,4	37,6	36,5	36,5	36,2	35,1
			2						
			3						
	Hava		1	37,4	36,9	36,5	36,2	35,8	35,1
			2						
			3						

Çizelge 3.9. 90 günlük numunelere ait 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen dinamik elastisite modülü değerleri.

Numune	Kür Tipi	Kür Süresi (Gün)	Numune Kodu	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)					
				0. Çevrim	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim
YFC	Su	90	1	44,2	37,3	33,2	30,5	28,5	24,9
			2						
			3						
	Örtü		1	40,8	30,3	29,6	29,0	29,0	29,2
			2						
			3						
	Hava		1	34,3	35,0	33,9	33,9	33,9	34,2
			2						
			3						
SD	Su	90	1	38,3	37,5	37,5	32,6	30,9	29,2
			2						
			3						
	Örtü		1	37,2	35,7	35,7	33,6	33,2	32,6
			2						
			3						
	Hava		1	36,1	35,3	33,6	33,6	33,6	33,2
			2						
			3						
UK	Su	90	1	38,7	37,6	37,6	35,1	32,7	30,4
			2						
			3						
	Örtü		1	37,6	36,9	36,9	35,8	35,8	35,5
			2						
			3						
	Hava		1	36,6	35,8	34,8	34,4	34,4	34,1
			2						
			3						

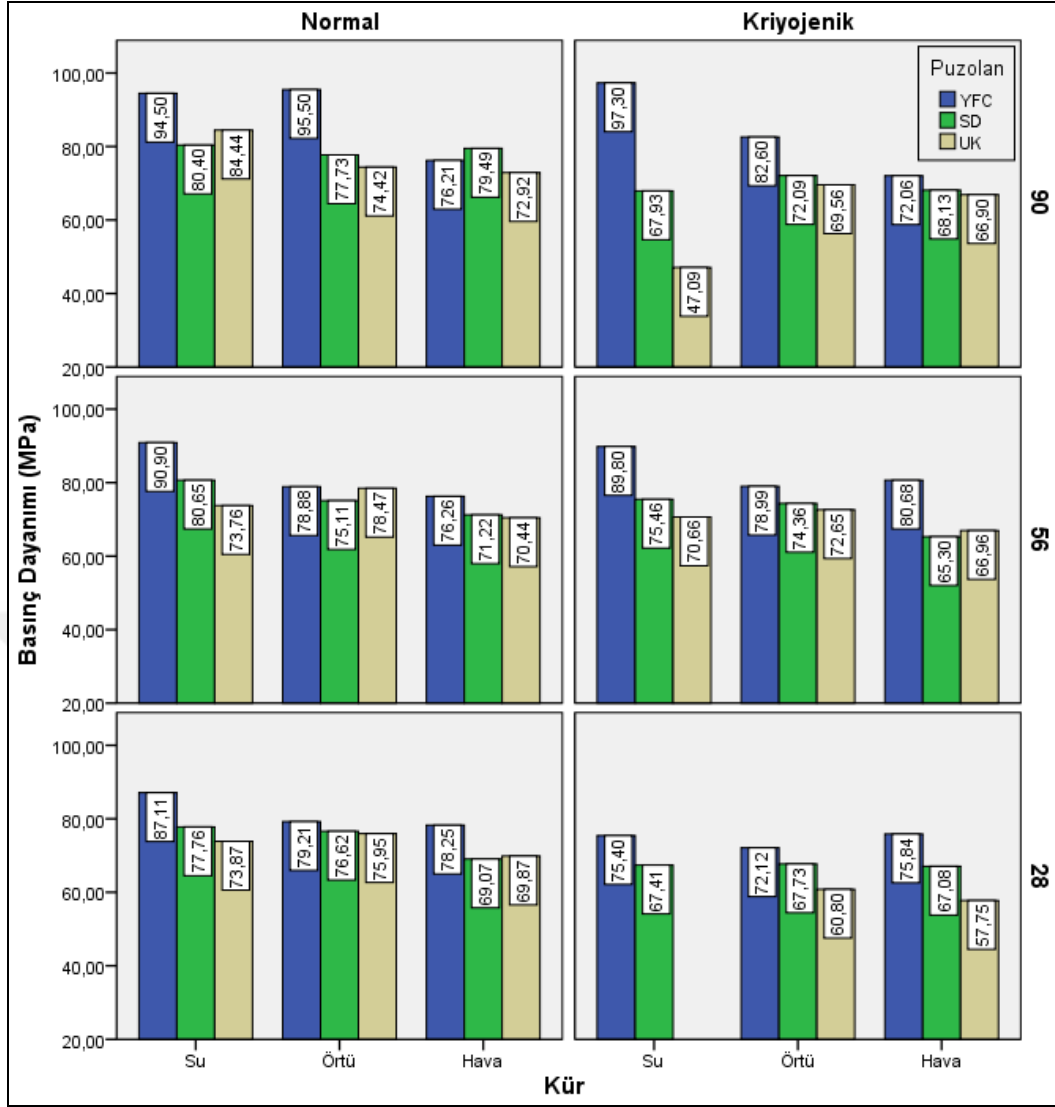
Çizelge 3.7, 3.8 ve 3.9 incelendiğinde dinamik elastisite modülü değerleri ile ultrases geçiş hızı değerlerinin birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenebilir. Genel olarak tüm kür günlerinde kriyojenik çevrime bağlı olarak numunelerin dinamik elastisite modüllerinde azalma gözlemlenmiştir. Tüm kür günleri ve kür metoduna bağlı olarak silis dumana içeren numunelerin dinamik elastisite modülü değerlerindeki değişim sınırlı kalmıştır. Dinamik elastisite modülü değerlerinde en büyük azalmaların su kürü uygulanmış numunelerden elde edildiği görülmektedir. Su kürü numuneleri göz önüne alındığında 28 gün su kürü uygulanan YFC, SD ve UK numunelerin 5 çevrim sonucunda dinamik elastisite modülü değerleri sırasıyla %96,18, %11,62 ve %77,69 oranında azalma göstermiştir. 28 gün su kürü uygulanmış YFC numunelerinde 2. çevrim ardından dinamik elastisite modülü değerinde %53,69 oranında bir azalma meydana gelmiştir. 28 gün su kürü uygulanmış UK numunelerinde ise 3. çevrim ardından dinamik elastisite modülü değerinde %36,62 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

3.3.3. Basınç Dayanımı

5 çevrim kriyojenik işleme maruz bırakılmış numunelere ait basınç dayanımı test sonuçları Şekil 3.8’de verilmiştir. 28 gün su kürü uygulanan UK numunelerinde 5 çevrim kriyojenik işlem ardından numune üzerinde deney yapılamayacak düzeyde bünyesel çatlaklar gözlenmiş ve bu nedenle basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmemiştir.

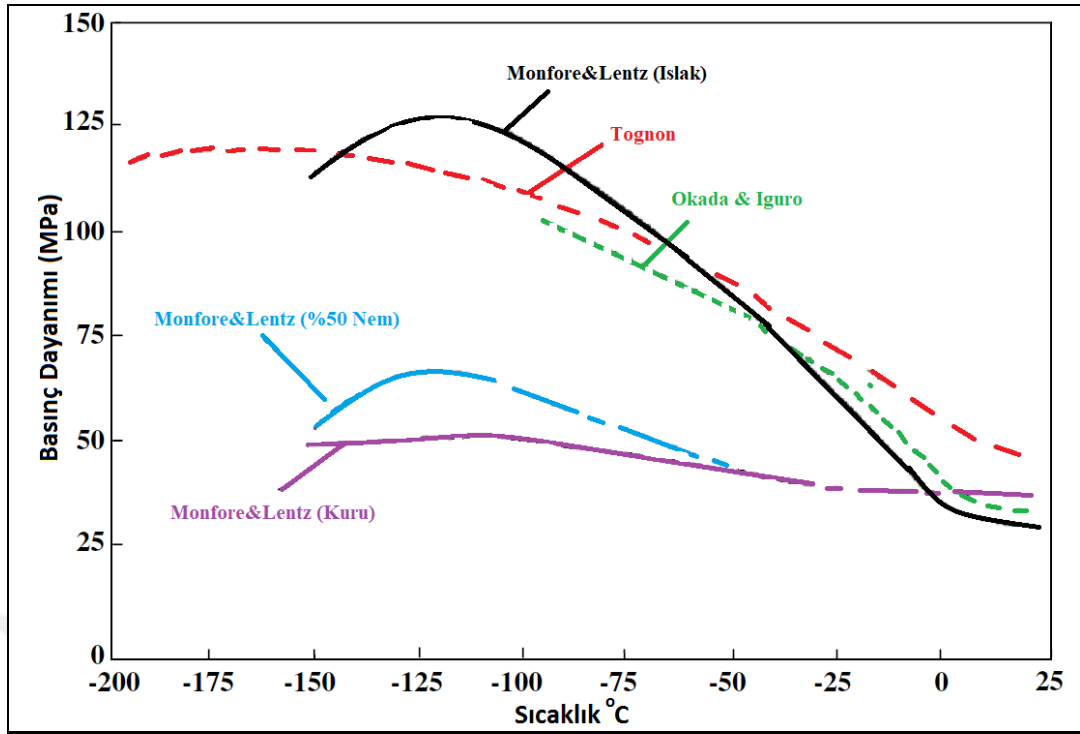


Şekil 3.8. 5 Çevrim ardından 28 günlük su kürü uçucu kül numunelerinin görünümü.



Şekil 3.9. 5 çevrim kriyojenik işlem ardından elde edilen basınç dayanımı test sonuçları.

Şekil 3.9 incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı değerlerinin su kürü uygulanan numunelerden elde edildiği gözlemlenmektedir. Tüm kür günlerinde numunelerin basınç dayanımı değerleri 5 çevrim kriyojenik işlemin ardından azalma göstermiştir. Günümüze kadar düşük sıcaklıklarda ($-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ kadar düşük sıcaklıklarda) beton davranışını araştıran çalışmalara rastlanmaktadır. Sıcaklığın suyun donma derecesinden $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'a kadar düşmesi ile betonun basınç dayanımı oda sıcaklığından daha yüksek değerler almaktadır. Nemli betonun basınç dayanımı bünyesindeki suyun donması ile birlikte 2 ya da üç kat artmakta, hava kurusu betonda ise dayanım artışı oldukça düşük seviyelerde meydana gelmektedir. Islak ve kuru betonun düşük sıcaklıklardaki basınç dayanımında meydana gelen bu farklılık hidrete çimento pastasındaki buz oluşumu ile ilgili olduğu literatürde bildirilmektedir (Şekil 3.10) [75].



Şekil 3.10. Beton basınç dayanımının sıcaklık ile değişimi.

Hafif betonlar üzerine yapılmış bir diğer çalışmada yine nemli numunelerin basınç dayanımlarının kuru numunelere göre düşük sıcaklıklarda daha yüksek olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir [75], [76]. Bahsedilen bu çalışmalarda herhangi bir çevrim söz konusu değildir.

Kriyojenik işlemin 5 adet tekrarını içeren bu çalışmada çevrimler ardından numunelerin basınç dayanımları azalma göstermiştir. Üretilen KYB'lerin basınç dayanımları her üç puzolan kullanımı ile azalma göstermiştir. Basınç dayanımlarında meydana gelen düşüş su kürü uygulanmış numunelerde daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Düşük sıcaklıklarda bünyesinde su bulunan numunelerin basınç dayanımlarının arttığı bilinmesine rağmen, çevrim öncesi numune bünyesinde bulunan suyun 5 adet donma ve çözülme etkisi ardından betonda daha fazla bozulmaya neden olduğu ve dayanımlarını azalttığı görülmektedir. Su kürü uygulanmış numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen azalmanın 28 gün kür süresi ardından daha fazla olduğu gözlenirken kür süresinin artması ile dayanımlarda meydana gelen düşüşler azalmıştır.

Tüm sonuçlar dikkate alındığında en yüksek basınç dayanımı değerlerinin normal ve kriyojenik işleme bakılmaksızın YFC numunelerinde meydana geldiği gözlenmektedir. 28, 56 ve 90 günlük kür süreleri birlikte değerlendirildiğinde hava kürü uygulanmış YFC numunelerinin ortalama %0,91 düşüşle en az dayanımı azalan numune olduğu

görülmektedir. 28 günlük numuneler içerisinde kriyojenik çevrim ardından su, örtü ve hava kürü uygulaması için basınç dayanımında en fazla düşüş UK numunelerinde gözlenmiştir. Yine tüm numuneler göz önünde bulundurulduğunda en fazla düşüş %44,23 ile 90 gün süresince su kürü uygulanmış UK numunelerinde meydana gelmiştir.

3.3.4. Yarmada Çekme Dayanımı

150 mm küp numuneler üzerinde yapılan yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Çizelge 3.10’da verilmiştir.

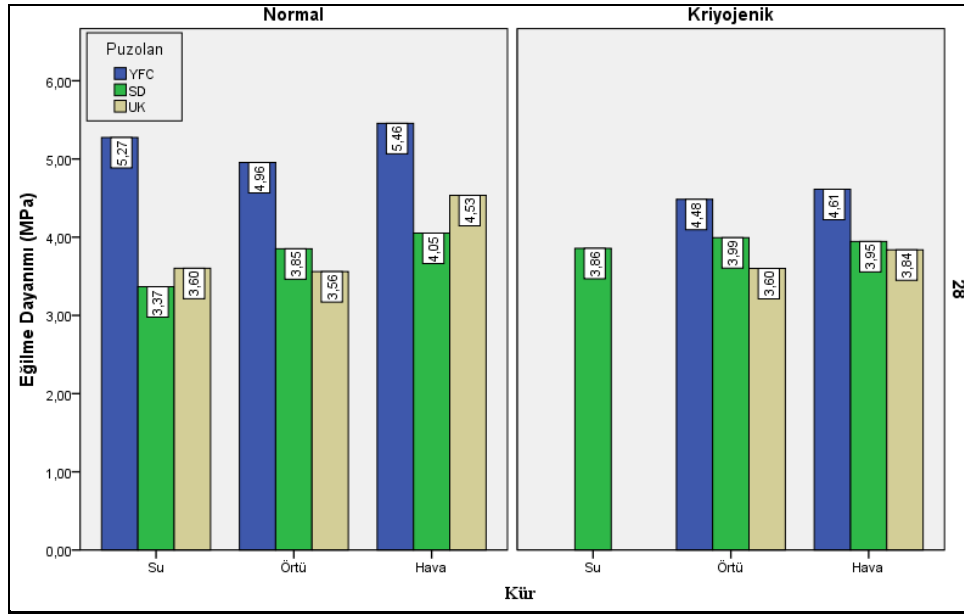
Çizelge 3.10. Numunelere ait yarmada çekme dayanımı deney sonuçları (MPa).

Kür Günü	Puzolan	Normal			Kriyojenik		
		Su	Örtü	Hava	Su	Örtü	Hava
28	YFC	4,54	4,13	3,84	2,54	3,29	2,99
	SD	2,98	3,35	3,54	2,04	2,21	2,52
	UK	3,02	3,12	4,31	2,13	2,27	2,92
56	YFC	2,94	4,24	4,25	2,96	3,40	2,70
	SD	3,33	3,39	3,24	2,81	2,83	2,48
	UK	3,13	3,49	3,46	2,81	2,47	2,49
90	YFC	4,17	3,89	3,80	3,94	3,36	3,83
	SD	2,72	2,83	3,32	2,67	3,09	2,58
	UK	2,83	3,02	3,64	1,75	2,70	2,31

Çizelge 3.10 incelendiğinde, numunelerin yarmada çekme dayanımlarının 5 çevrim kriyojenik işlem ardından azaldığı gözlenmektedir. YFC numunelerinin yarmada çekme dayanımları UK ve SD numunelerine oranla daha yüksek çıkmıştır. Basınç dayanımına benzer şekilde su kürü uygulanan numunelerin yarmada çekme dayanımları kriyojenik işleminden daha fazla etkilenmiştir. Su kürü uygulanmış numunelerde yarmada çekme dayanımında meydana gelen en fazla azalma %44,02 ile YFC numunesinden elde edilmiştir. Örtü kürü uygulanmış numuneler göz önünde bulundurulduğunda, %34,14 değeri ile en yüksek azalma SD numunelerinde gözlenmiştir. Hava kürü uygulanmış numunelerde ise en fazla dayanım azalması %36,52 ile UK numunelerinden elde edilmiştir.

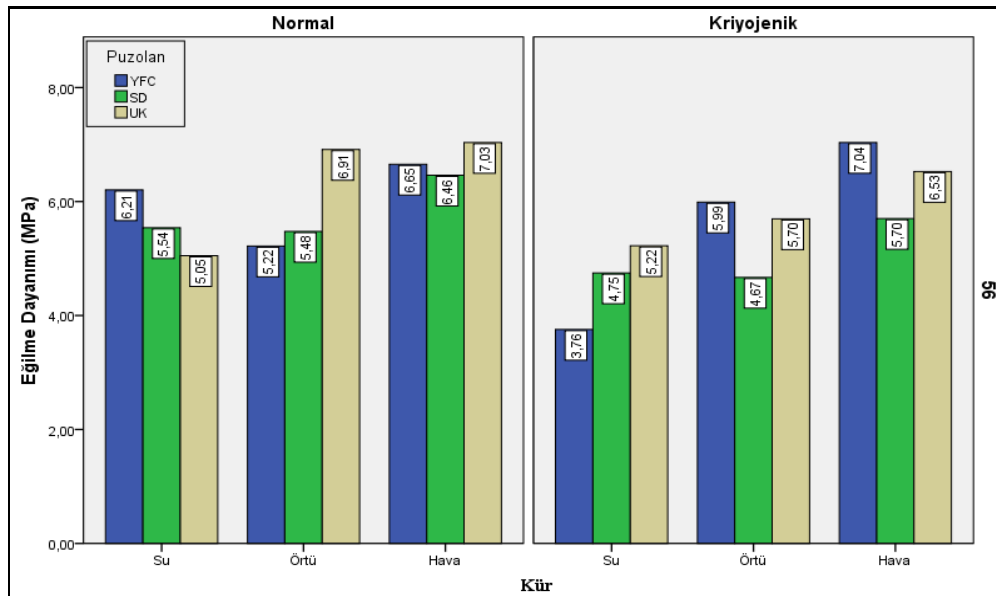
3.3.5. Eğilmede Çekme Dayanımı

Kiriş numuneler üzerinde yapılan eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de verilmiştir.



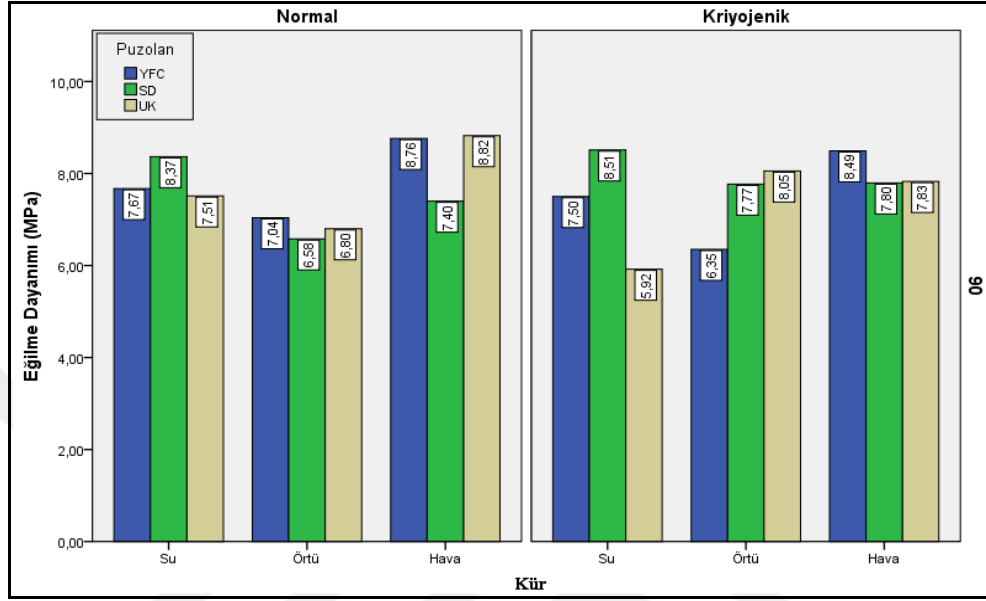
Şekil 3.11. 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.

28 gün su kürü uygulanan numunelerde kriyojenik işlem ardından YFC ve UK kırımlarının bünyelerinde deney yapmaya müsaade etmeyecek makro çatlaklar gözlenmiş olduğundan eğilme dayanımı deneyi yapılmamıştır. Numune bünyesinde bulunan suyun donma çözülme etkisi altında malzemeye hasar verdiği gözlenmiştir. Bu durum 5 çevrim ardından 28 günlük su kürü uygulanmış YFC ve UK numunelerinin dinamik elastisite modülü ve ultrases geçiş hızı değerlerindeki aşırı düşüş ile de uyum sağlamaktadır. Örtü ve hava kürleri dikkate alındığında ise YFC numunelerinin en yüksek eğilmede çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.12. 56 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.

56 gün boyunca kür uygulanan numuneler incelendiğinde, genel olarak kriyojenik işlem ardından eğilmede çekme dayanımları azalmıştır. Ancak örtü ve hava kürü uygulanmış numunelerin dayanımlarının ya az da olsa arttığı ya da az bir azalma gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.13. 90 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.

90 gün kür uygulanmış numunelerin eğilmede çekme dayanım sonuçları dikkate alındığında, su kürü uygulanmış numuneler için eğilme dayanımlarında %21,17 değeri ile en fazla UK numunelerinde azalmıştır. 90 günlük kür ardından örtü kürü uygulanmış YFC, SD ve UK numunelerinin eğilmede çekme dayanımlarında artış olduğu gözlenmiştir. Yine hava kürü uygulanmış silis dumanı numunelerinin eğilmede çekme dayanımlarında düşük de olsa bir artış meydana geldiği görülmektedir.

3.3.6. Aderans Dayanımı

Aderans dayanımı deney sonucunda kırılma yüklerine karşılık gelen aderans gerilmesi deney sonuçları Çizelge 3.11’de verilmiştir. Çizelge 3.11 incelendiğinde numunelerin büyük bir bölümü (kriyojenik işleme tabi tutulmuş 28 günlük su kürü uygulanan YFC ve UK numuneleri ile 90 günlük su kürü uygulanmış UK numunesi dışında) donatının akma sınırı değerini aşmıştır.

Çizelge 3.11. Aderans gerilmesi deney sonuçları.

			Normal				Kriyojenik			
			Max. (MPa)	Min. (MPa)	Ort. (MPa)	Std. Sapma (MPa)	Max. (MPa)	Min. (MPa)	Ort. (MPa)	Std. Sapma (MPa)
28	Su	YFC	14,09	13,58	13,82	0,26	6,94	4,09	5,52	2,02
		SD	13,50	12,93	13,27	0,30	13,71	8,85	12,06	2,78
		UK	13,84	13,39	13,65	0,23	7,63	5,47	6,28	1,18
	Örtü	YFC	13,96	13,51	13,75	0,23	13,95	13,90	13,93	0,04
		SD	13,69	12,68	13,10	0,53	13,90	11,22	12,98	1,53
		UK	14,02	13,66	13,82	0,18	13,94	13,49	13,72	0,23
	Hava	YFC	14,04	13,45	13,83	0,33	13,99	13,62	13,77	0,19
		SD	13,57	4,23	10,34	5,30	14,03	12,48	13,45	0,84
		UK	13,74	13,36	13,59	0,20	13,63	13,46	13,57	0,10
56	Su	YFC	14,22	13,05	13,79	0,64	14,38	13,54	13,83	0,48
		SD	14,17	13,68	13,98	0,27	14,22	13,39	13,75	0,42
		UK	13,83	13,52	13,68	0,16	14,20	13,66	13,84	0,31
	Örtü	YFC	13,83	13,59	13,72	0,12	13,76	13,05	13,47	0,37
		SD	14,06	13,47	13,73	0,30	14,04	13,73	13,86	0,16
		UK	13,76	13,27	13,55	0,25	14,10	10,51	12,90	2,07
	Hava	YFC	14,02	13,32	13,67	0,49	13,90	13,36	13,66	0,28
		SD	13,95	13,79	13,87	0,11	13,90	13,50	13,73	0,21
		UK	13,94	13,19	13,59	0,38	13,98	13,83	13,91	0,08
90	Su	YFC	14,02	13,76	13,90	0,13	13,73	12,10	13,17	0,92
		SD	13,99	13,90	13,93	0,05	13,49	12,48	12,84	0,57
		UK	13,80	13,62	13,71	0,13	11,35	8,86	9,85	1,32
	Örtü	YFC	13,95	13,69	13,83	0,13	14,16	12,59	13,47	0,80
		SD	14,16	13,86	14,00	0,15	13,77	11,79	12,66	1,01
		UK	14,04	13,77	13,94	0,15	14,07	13,77	13,92	0,15
	Hava	YFC	14,15	13,72	13,91	0,22	14,03	13,65	13,83	0,19
		SD	14,02	13,95	13,99	0,05	14,23	13,33	13,78	0,45
		UK	13,87	13,67	13,77	0,14	13,88	13,49	13,69	0,28

Çizelge 3.12’de görüleceği üzere özellikle kriyojenik işlem uygulanmamış numunelerde hasar donatının kırılması şeklinde gerçekleşmiştir. 28 gün kür uygulanmış normal deney sonuçları ile kriyojenik işlem ardından ise numunelerin hasar biçimleri çoğunlukla ya tamamen donatının betondan sıyrılması ya da betonun 2 veya üç parçaya ayrılması şeklinde gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.12. Donatı aderansı deneyi sonucunda meydana gelen hasar biçimleri.

			Normal	Kriyojenik
28	Su	YFC	D	B
		SD	B	B
		UK	D	S
	Örtü	YFC	D	D
		SD	S	B
		UK	D	B
	Hava	YFC	S	B
		SD	S	B
		UK	S	B
56	Su	YFC	D	B
		SD	D	B
		UK	S	D
	Örtü	YFC	D	S
		SD	D	B
		UK	S	D
	Hava	YFC	D	B
		SD	D	B
		UK	S	D
90	Su	YFC	D	D
		SD	D	S
		UK	D	B
	Örtü	YFC	D	D
		SD	D	S
		UK	D	S
	Hava	YFC	D	S
		SD	D	S
		UK	D	S

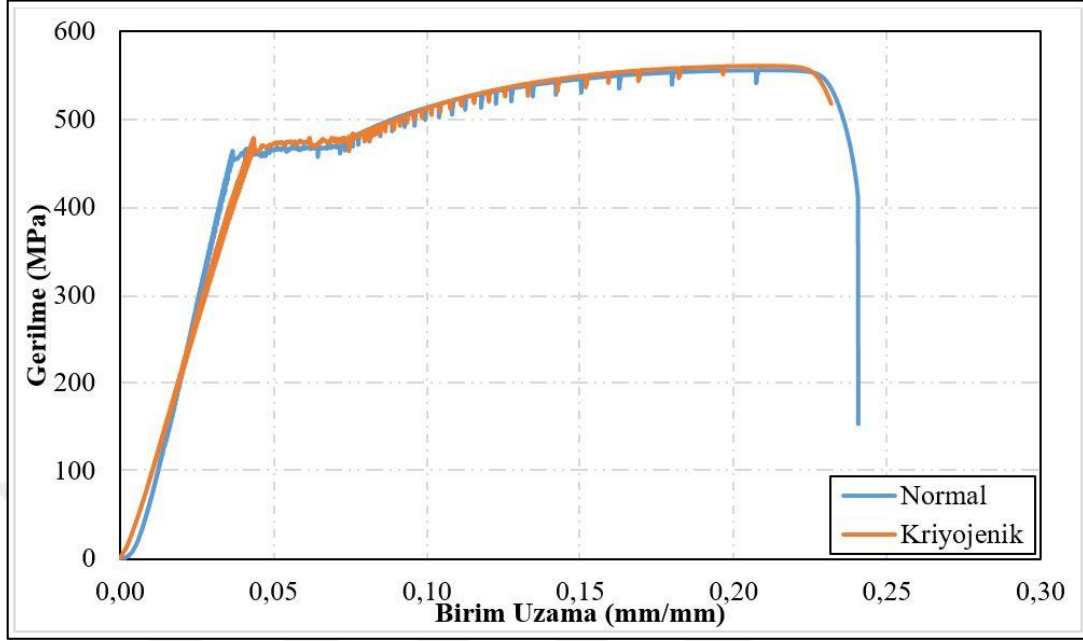
D: Donatı Kopması, **S:** Donatının Betondan Sıyrılması; **B:** Betonun 2 ya da 3 parçaya ayrılması

Şekil 3.14’de verilen deney düzeneği yardımıyla yapılan aderans deneyinde anlık yüke karşılık gelen sıyrılma değerleri videoektansometre yardımıyla 0,001 mm hassasiyetle kaydedilmiştir.



Şekil 3.14. Donatı aderansı deneyinden bir görünüş.

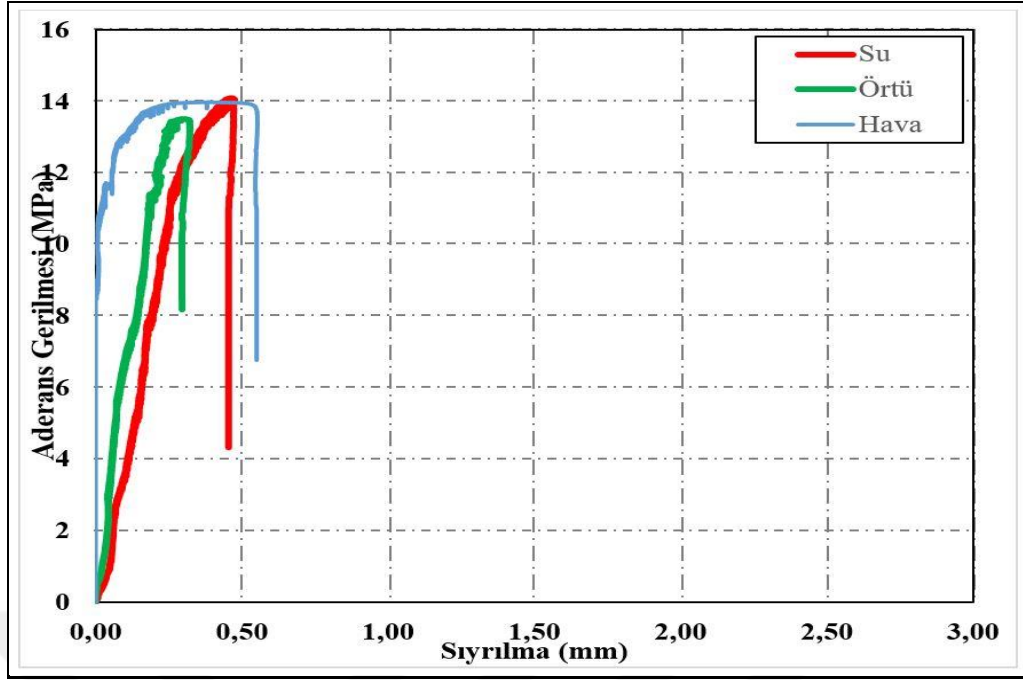
Çalışmada kullanılan donatı çubuğunun yalın halde kriyojenik işlem öncesi ve sonrasında gerilme birim uzama ilişkisini ifade eden eğri Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15. Kullanılan donatı çubuğuna ait gerilme birim uzama eğrisi.

Şekil 3.15 incelendiğinde 5 çevrim kriyojenik işlem öncesi ve sonrasında numunelerin gerilme birim uzama davranışlarında bir değişim olmadığı görülmektedir. Çalışmada aderans gerilmesi ile donatı sıyrılması arasındaki ilişkiyi ifade edecek şekilde diyagramlar elde edilmiş olup aşağıda verilmiştir.

28 günlük kür uygulaması ardından YFC numunelerinin aderans-sıyrılma ilişkisi kür türüne bağlı olarak Şekil 3.16’da verilmiştir. Şekil 3.16 incelendiğinde su, örtü ve hava kürü uygulanan numunelerin donatının akma sınırı olan 420 MPa değerini aştığı görülmektedir. 28 günlük kriyojenik işlem uygulanmamış numunelerde su ve örtü altında bekleyen YFC numunelerinin benzer davrandığı, hava kürü uygulanan numunenin ise başlangıçta daha az sıyrılma göstermesine rağmen çeliğin akma dayanımının aşılması ardından daha fazla sıyrılma göstererek hasara uğradığı gözlenmektedir (Şekil 3.17).

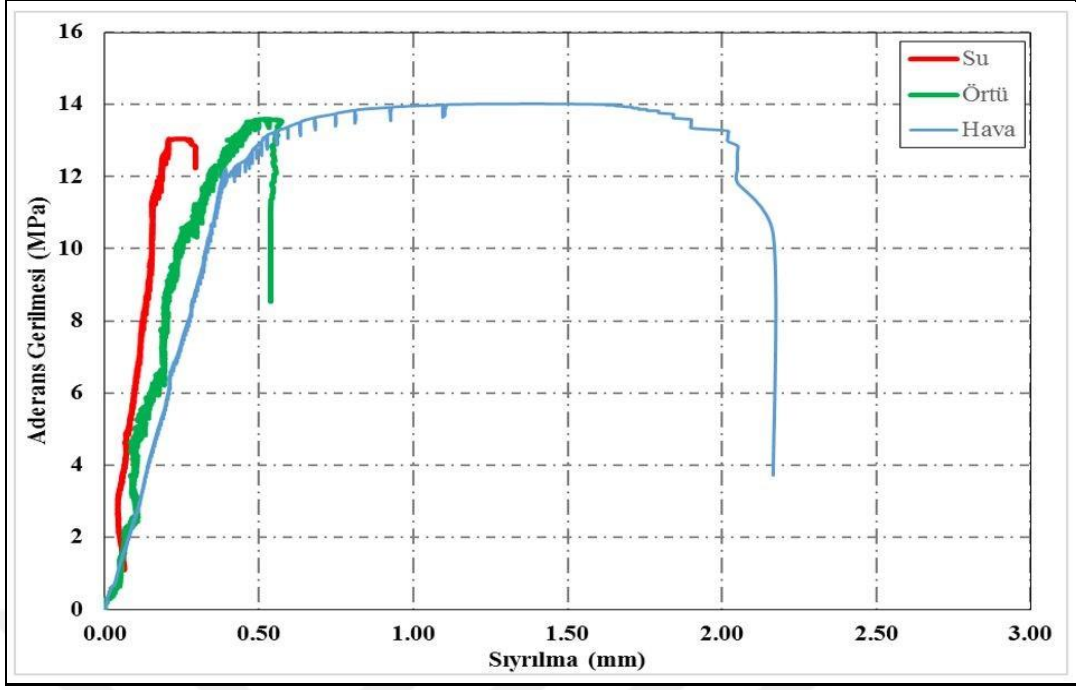


Şekil 3.16. 28 günlük Normal-YFC numunelerine ait aderans-sıyrılma ilişkisi.



Şekil 3.17. 28 günlük Normal-YFC numunelerine ait deney sonrası fotoğraflar.

56 günlük YFC numunelerine ait kriyojenik işlem görmemiş numunelerin aderans-sıyrılma ilişkisi incelendiğinde, 28 günlük numunelere benzer bir durum ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.18). Tüm numuneler donatının akma sınırı üzerinde bir gerilme değerinde hasara uğramıştır. Hava kürü numunesinin donatının akma dayanımı sonrası 2 mm'nin üzerinde sıyrılma göstererek hasara uğradığı gözlenmiştir (Şekil 3.19).

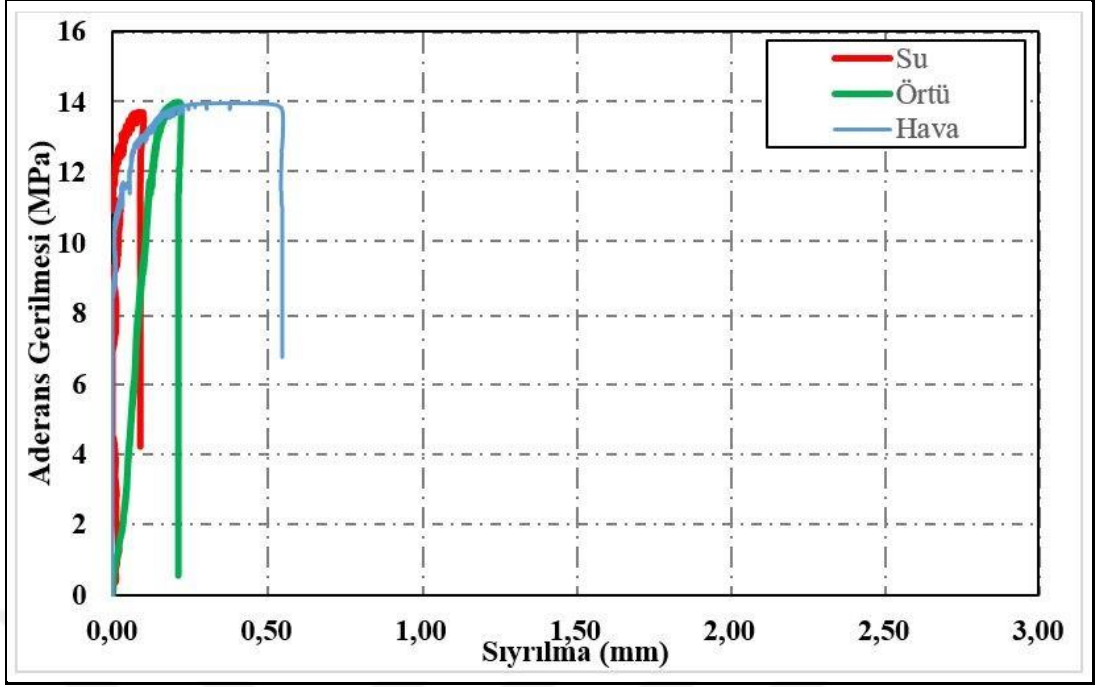


Şekil 3.18. 56 günlük Normal-YFC numunelerine ait aderans-sıyrılma ilişkisi.

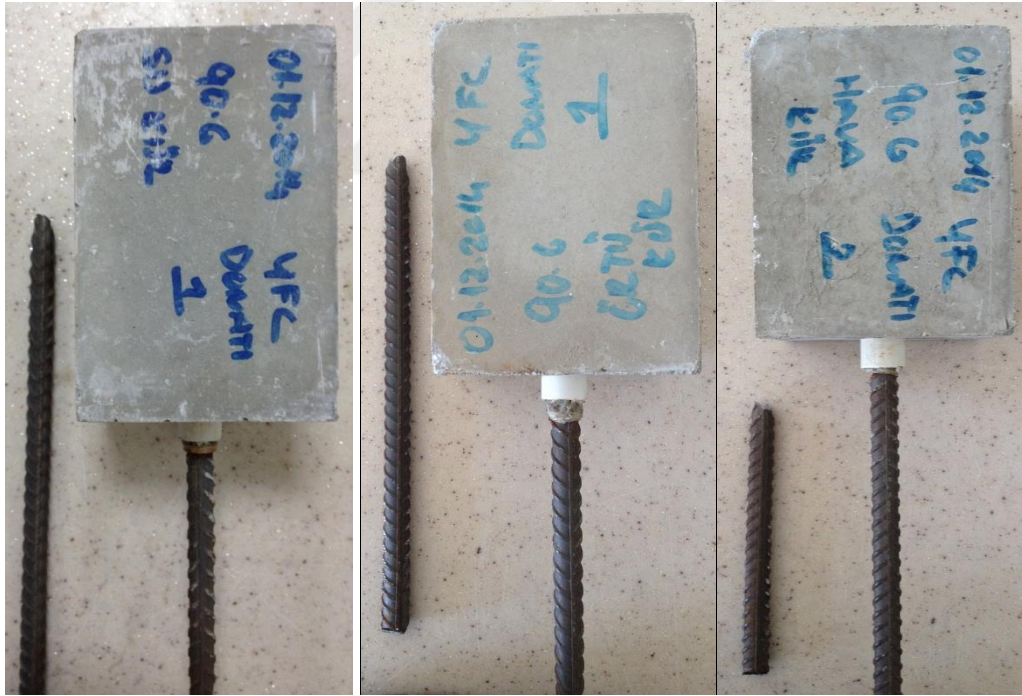


Şekil 3.19. 56 günlük Normal-YFC numunelerine ait deney sonrası fotoğraflar.

90 günlük YFC numunelerine ait aderans-sıyrılma diyagramı incelendiğinde numunelerin kırılma öncesi çok az sıyrılma değerine sahip oldukları gözlenmektedir (Şekil 3.20). Su, örtü ve hava kürü uygulaması ardından numuneler donatı kırılması sonucu hasara uğramışlardır (Şekil 3.21).

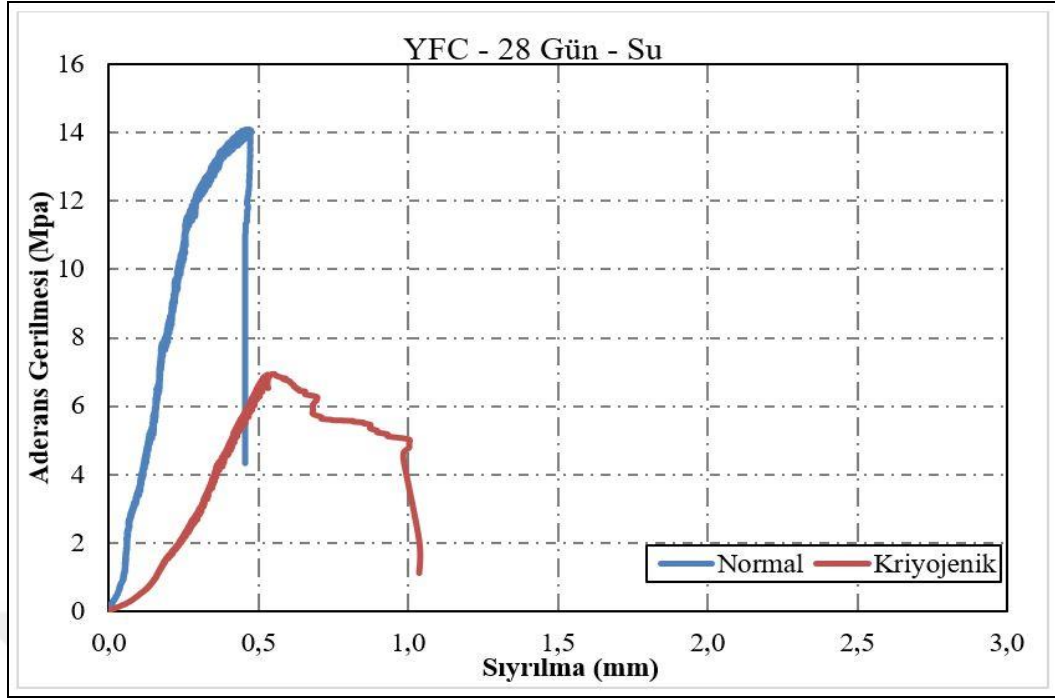


Şekil 3.20. 90 günlük Normal-YFC numunelerine ait aderans-sıyırılma ilişkisi.



Şekil 3.21. 90 günlük Normal-YFC numunelerine ait deney sonrası fotoğraflar.

Kriyojenik işlemin etkisini değerlendirmek amacıyla numunelerin normal ve kriyojenik işlem ardından gerilme-sıyırılma diyagramları çizilmiştir. Şekil 3.22’de 28 gün su kürü uygulaması ardından elde edilen aderans gerilmesi ile sıyırılma arasındaki ilişki verilmektedir.



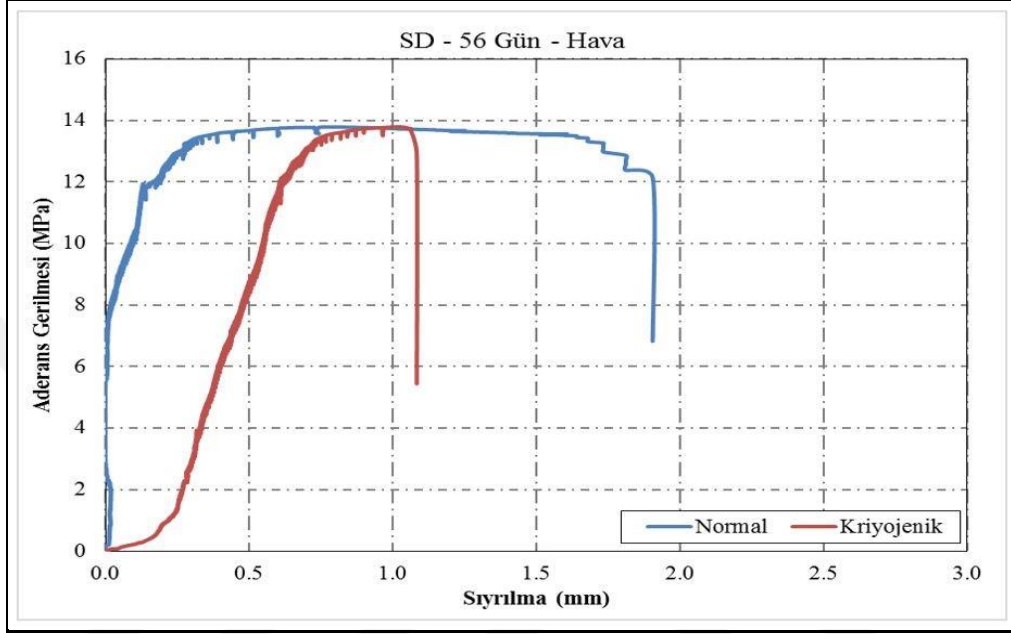
Şekil 3.22. 28 günlük YFC su kürü numunelerine ait aderans gerilmesi-sıyırılma diyagramı.

Şekil 3.22 incelendiğinde kriyojenik işlem ardından 28 günlük su kürü numunelerinin aderans gerilmesi değerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem ardından numunenin hem gerilme değerinde azalma hem de maksimum sıyırılma değerinde artış gözlenmiştir. Kriyojenik işlem öncesi donatı kopması şeklinde meydana gelen hasar biçimi kriyojenik işlem ardından 1 mm'yi aşan sıyırılma sonucunda betonun yarılmaması şeklinde meydana gelmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. 28 günlük su kürü Kriyojenik-YFC numunesinin aderans deneyi sonrası görünüşü.

56 günlük SD hava kürü numunelerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma diyagramını temsil eden Şekil 3.24 incelendiğinde 56 gün hava kürü uygulanmış numunelerin kriyojenik işlem ardından başlangıçta daha fazla sıyrılma değerlerine sahip olduğu ve deney öncesi donatı kopması şeklinde meydana gelen hasar biçiminin kriyojenik işlemin ardından betonun ikiye ayrılarak kırılması şeklinde meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 3.25).

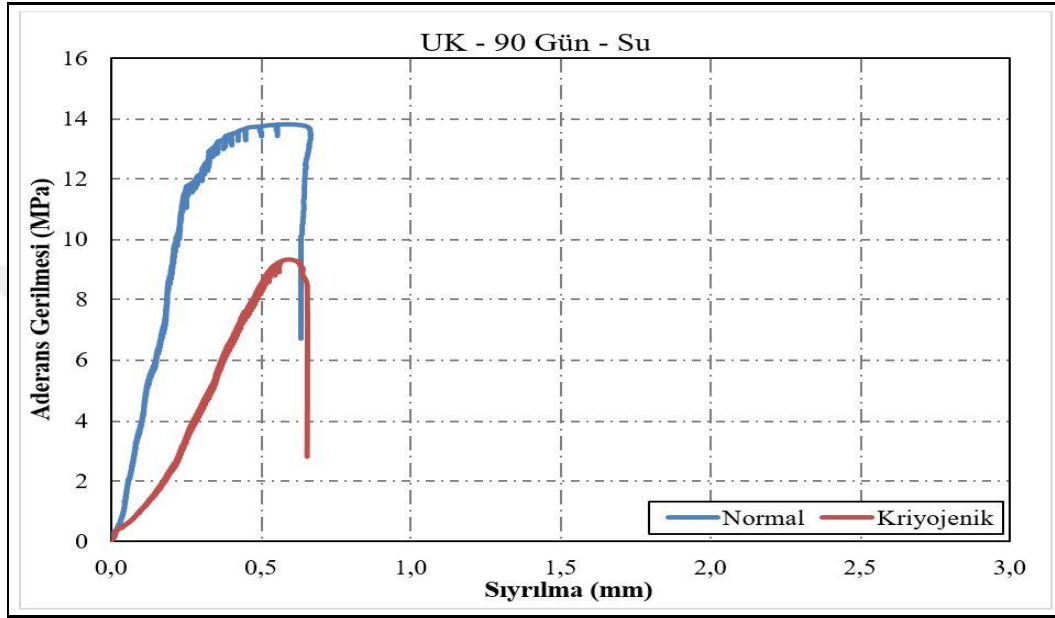


Şekil 3.24. 56 günlük SD hava kürü numunelerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma diyagramı.



Şekil 3.25. 56 günlük SD hava kürü numunesinin kriyojenik işlem öncesi ve sonrası hasar durumu.

Şekil 3.26'da 90 günlük UK su kürü numunelerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma diyagramı görülmektedir. Şekil 3.26 incelendiğinde, kriyojenik işlem öncesinde donatı akma sınırından daha yüksek bir değerde aderans gerilmesine ulaşmasına rağmen 90 günlük su kürü uygulanmış numunelerin kriyojenik işlem ardından aderans dayanımı azalmış beton yüzeyinde makro çatlak oluşumu gözlenmiş ve donatının sıyrılması şeklinde deney sonlanmıştır (Şekil 3.27).



Şekil 3.26. 90 günlük UK su kürü numunelerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma diyagramı.



Şekil 3.27. 90 günlük UK su kürü numunesinin kriyojenik işlem öncesi ve sonrasında hasar durumu

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneyssel çalışma sonucunda elde edilen bulgulardan faydalanarak aşağıdaki sonuçlara varılabilir;

- Toplam bağlayıcı miktarına oranla %30-35 aralığında UK ve YFC kullanımı ile SF2 sınıfında KYB elde edilebildiği,
- UK ve YFC ile üretilmiş beton ile aynı akışkanlık sınıfında KYB elde edebilmek için toplam bağlayıcı miktarına oranla yaklaşık %10 SD kullanımının yeterli olduğu,
- SD kullanımı ile karışımın su ihtiyacının arttığı ve YFC ile UK kullanımında gerekli olan 0,35'lik su/toplam bağlayıcı oranının 0,39'a yükseldiği,
- Karışımlarda SD kullanımı ile YFC ve UK karışımlarında kullanılan %1,45 oranındaki akışkanlaştırıcı/toplam bağlayıcı oranının %1,75'e yükseldiği,
- Bu çalışmada kullanılan agrega için maksimum birim ağırlık ve minimum boşluk oranını veren karışımın %35 iri ve %65 ince agregadan oluşması gerektiği,
- 300 çevrim donma çözülme etkisi altında yüksek durabiliteye sahip KYB' lerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde göze çarpan bir değişimin olmadığı,
- Ultrases geçiş hızı değerleri göz önüne alındığında, 28 gün su kürü uygulanmış UK ve YFC numunelerinin 5 çevrim kriyojenik işlem ardından ultrases geçiş hızı değerlerinin sırasıyla %26,59 ve %56,99 oranında azaldığı,
- Dinamik elastisite modülü değerleri ile ultrases geçiş hızı değerlerinin birbiri ile uyumlu olduğu,
- Su kürü uygulanan KYB' lerin dinamik elastisite modülü değerlerinin 28, 56 ve 90. günlerde hava ve örtü kürü numunelerine oranla daha fazla azalma gösterdiği,
- 28 günlük su kürü uygulanmış UK numunelerinin yüzeylerinde 5 çevrim kriyojenik işlem ardından makro çatlakların gözlemlendiği,
- Tüm kür günleri ve tüm kür metotları göz önüne alındığında 5 çevrim kriyojenik donma çözülme etkisi ardından numunelerin basınç dayanımlarının azalma gösterdiği,

- Su kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen azalmanın hava ve örtü kürüne oranla daha fazla olduğu,
- Yarmada çekme dayanımı değerlerinin basınç dayanımında olduğu gibi kriyojenik işlem ardından azalma gösterdiği,
- Su, örtü ve hava kürü uygulanmış numunelerde yarmada çekme dayanımlarında meydana gelen en fazla azalmaların sırasıyla YFC, SD ve UK numunelerinden elde edildiği,
- 5 çevrim ardından 28 günlük su kürü uygulanmış YFC ve UK numunelerinin ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değerleri ile eğilme dayanımı değerlerinin uyum içerisinde olduğu,
- Kriyojenik işlem öncesi ve sonrası kullanılan donatı çubuklarının gerilme birim uzama davranışlarında değişimin gözlenmediği,
- Aderans gerilmesi deneyi sonucunda genel olarak kriyojenik işlem uygulanmamış numunelerin deney sonrasında donatı kırılması şeklinde hasara uğrarken kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin ya donatı sıyrılması ya da betonun iki veya üç parçaya ayrılması şeklinde hasara uğradığı,
- Kriyojenik işleme tabi tutulmuş 28 günlük su kürü uygulanan YFC ve UK numuneleri ile 90 günlük su kürü uygulanmış UK numunesi dışındaki numunelerin kullanılan donatının akma sınırından daha yüksek bir gerilme değerinde aderans hasarına uğradığı,
- Hava kürü uygulanmış numunelerinin tüm kür günlerinde örtü ve su kürü uygulanan numunelerden daha fazla sıyrılma değerlerine sahip olduğu,

Genel olarak tüm deney sonuçları göz önüne alındığında SD ve YFC kullanılan numunelerin kriyojenik ortamlara maruz kalabilecek betonarme yapılarda rahatlıkla kullanılabileceği görülmektedir.

Öneriler;

Genel olarak KYB'lerin kriyojenik sıcaklıklara maruz kalacak olan betonarme yapılarda yaşanması olası durabilite sorunlarını en aza indirse de, bu çalışmadan elde edilen veriler ışığında özellikle YFC katkılı KYB kullanımının tercih edilmesi önerilmektedir.

Kriyojenik sıcaklığa maruz yapı çeliklerinin gerilme-birim şekil değiştirme

davranışlarında gözle görünür bir değişim olmamıştır, ancak kriyojenik sıcaklıklara maruz kalmış betonarme yapılarda donatı-beton aderansının olumsuz etkileneceği çalışma sonucunda belirlenmiştir. Bu nedenle, kriyojenik koşullara maruz betonarme yapılarda beton muhafaza tankları vb. kenetlenme boyu, donatı çapı gibi aderansı etkileyecek parametrelerin daha dikkatli seçilmesi önerilmektedir.

Beton muhafaza tankları gibi çok düşük sıcaklıklara maruz yapılarda kriyojenik sıcaklıklara tekrarlı bir biçimde maruz kalmaması için önlem alınması önerilmektedir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, beton-donatı arasındaki aderansın kriyojenik sıcaklıklarda incelenmesi durumunda, donatı aderansı için literatürde önerilen farklı deneyler kullanılarak karşılaştırma yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] G. R. Sensale, I. R. Viacava and A. Aguado, “Simple and rational methodology for the formulation of self-compacting concrete mixes,” *Journal of Material Civil Engineering*, c. 28, ss. 1-36, 2016.
- [2] G. Samson, A. Phelipot-Mardelé and C. Lanos, “A review of thermomechanical properties of lightweight concrete,” *Magazine of Concrete Research*, c. 69, ss. 201–216, 2016.
- [3] T. Z. H. Ting, M. E. Rahman and M. Z. Y. Ting, “Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete,” *Construction and Building Materials*, c. 201, ss. 763-777, 2019.
- [4] S. Senaratne, D. Gerace, O. Mirza, V.W. Tam and W.-H. Kang, “The costs and benefits of combining recycled aggregate with steel fibres as a sustainable, structural material,” *Journal of Cleaner Production*, c. 112, ss. 2318–2327, 2016.
- [5] M. Hunger, A. G. Entrop, I. Mandilaras, H. J. H. Brouwers, and M. Founti, “The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials,” *Cement and Concrete Composites*, c. 31, ss. 731-743, 2009.
- [6] M. Liu, “Incorporating ground glass in self-compacting concrete,” *Construction and Building Materials*, c. 25, ss. 919-925, 2011.
- [7] M.H. Beygi, M. T. Kazemi, I. M. Nikbin, and J. V. Amiri, “The effect of water to cement ratio on fracture parameters and brittleness of self-compacting concrete,” *Materials & Design*, c. 50, ss. 267-276, 2013.
- [8] P. Dinakar, M. K. Reddy, and M. Sharma, “Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash,” *Materials & Design*, c. 46, ss. 609-616, 2013.
- [9] H. E. Çolakoğlu, “U şekilli betonarme perdelerin farklı yatay yük etkileri altında doğrusal olmayan davranışı,” *Teknik Dergi*, c. 30, ss. 8887-8912, 2019.
- [10] A. Bingöl ve G. Ü. L. Rüstem, “Donatı-beton aderansı, yüksek sıcaklıkların beton dayanımına ve aderansa etkileri konusunda bir derleme,” *Tübvav Bilim Dergisi*, c. 2, ss. 211-230, 2009.
- [11] S. K. Handoo, S. Agarwal, and S. K. Agarwal, “Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures,” *Cement and Concrete Research*, c. 32, ss. 1009-118, 2002.

- [12] T. Yıldırım, K. T. Felekoğlu, E. Gödek, M. Keskinates, B. Felekoğlu, ve O. Önal, "Investigation of multiple cracking behavior of cement-based fiber composites by digital image correlation method," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 34, ss. 479-493, 2019.
- [13] T. Kaya, C. Karakurt ve M. Dumangöz, "Mineral katkılı kendiliğinden yerleşen betonların porozite ve basınç dayanımlarına yüksek sıcaklığın etkisi," *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 1, ss. 39-44, 2014.
- [14] S. Kim, M. J. Kim, J. J. Kim, B. Chun and D. Y. Yoo, "Improvement of safety and durability of lng storage tank using ultra-high-performance concrete," *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, c. 19, ss. 275-287, 2019.
- [15] Z. Wu, Y. Zhang, J. Zheng, and Y. Ding, "An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete," *Construction and Building Materials*, c. 23, ss. 2087-2092, 2009.
- [16] R. B. Kogbara, S. R. Iyengar, E. A. Masad, S. Rahman, Z. C. Grasley, and D. G. Zollinger, "Pore structure and thermal conductivity of cryogenic concrete," *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, c. 8, ss. 10-15, 2019.
- [17] D. E. Berner and B. C. Gerwick, "Static and cyclic behavior of structural lightweight concrete at cryogenic temperatures," *Ocean Space Utilization*, ss. 439-445, 1985.
- [18] G. C. Lee, T. S. Shih, and K.C. Chang, "Mechanical properties of concrete at low temperature," *Journal of Cold Regions Engineering*, c. 2, ss.13-24, 1988.
- [19] B. Law, "LNG storage tanks: concrete in an ultra-cold environment," *Concrete Construction*, c. 28, ss. 465-466, 1983.
- [20] M. H. Özkul, "Beton teknolojisinde bir devrim: Kendiliğinden yerleşen-sıkışan beton," *THBB Hazır Beton Dergisi*, c. 52, ss. 64-71, 2002.
- [21] M. Safiuddin, "Development of self-consolidating high performance concrete incorporating rice husk ash," Ph.D. Thesis, Waterloo University, Waterloo, Canada, 2008.
- [22] P. Kumar, "Self-compacting concrete: methods of testing and design," *Journal of the Institution of Engineers India Civil Engineering Division*, c. 86, ss. 145-150, 2006.
- [23] P. L. Domone, "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete," *Cement and Concrete Composites*, c. 29, ss.1-12, 2007.
- [24] L. Vandewalle, "Bond between a reinforcement bar and concrete at normal and cryogenic temperatures," *Journal of Materials Science Letters*, c. 8, ss.147-149, 1989.

- [25] F. S. Rostásy, and U. Pusch, “Strength and deformation of lightweight concrete of variable moisture content at very low temperatures,” *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, c. 9, ss. 3-17, 1987.
- [26] M. Elices, J. Planas, and P. Maturana “Fracture of concrete at cryogenic temperatures,” *Fracture of Concrete and Rock*, ss.106-116, 1989.
- [27] A. Hanaor, “Testing of concrete specimens for permeability at cryogenic temperatures,” *Magazine of Concrete Research*, c. 34, ss.155-162, 1982..
- [28] C. Talbot, “Behavior of self-consolidating concrete at cryogenic temperatures,” *Concrete Plant International*, c. 1, ss. 66-68, 2009.
- [29] Ü. Yurt, “Kriyojenik sıcaklık etkisindeki kendiliğinden yerleşen betonlarda kırılma mekanizması performansının belirlenmesi,” Doktora tezi, Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2015.
- [30] R. B. Kogbara, S. R. Iyengar, E. A. Masad, S. Rahman, Z. C. Grasley, and D. G. Zollinger, “A review of concrete properties at cryogenic temperatures: Towards direct LNG containment,” *Construction and Building Materials*, c. 47, ss. 760-770, 2013.
- [31] R. B. Kogbara, S. R. Iyengar, Z. C. Grasley, S. Rahman, E. A. Masad, and D. G. Zollinger, “Relating damage evolution of concrete cooled to cryogenic temperatures to permeability,” *Cryogenics*, c. 64, ss. 21-28, 2014.
- [32] N. K. Opara, “Liquefied natural gas storage: Material behavior of concrete at cryogenic temperatures,” *Aci Materials Journal*, c. 104, ss. 297-306, 2007.
- [33] M. Sahmaran, A. Yurtseven, and I. O. Yaman, “Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete,” *Building and Environment*, c. 40, ss. 1672–1677, 2005.
- [34] A. Beycioğlu, “Kendiliğinden yerleşen betonlarda beton ile donatı aderansı ilişkisinin araştırılması”, Doktora tezi, Yapı Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2013.
- [35] M. Velay-Lizancos, I. Martinez-Lage, and P. Vazquez-Burgo, “The effect of recycled aggregates on the accuracy of the maturity method on vibrated and self-compacting concretes,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, c. 19, ss. 311-321, 2019.
- [36] M. Tuyan, A. M. Aghabaglou, and K. Ramyar, “Freeze–thaw resistance, mechanical properties of self-consolidating concrete incorporating recycled concrete aggregate,” *Materials & Design*, c. 53, ss. 983-991, 2014.
- [37] K.E. Alyamac, E. Ghafari, and R. Ince, “Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method,” *Journal of Cleaner Production*, c. 144, ss. 192–202, 2017.

- [38] P. R. Silva, and J. De-Brito, "Fresh-state properties of self-compacting mortar and concrete with combined use of limestone filler and fly ash," *Materials Research*, c. 18, ss. 1097-1108, 2015.
- [39] T. Z. H. Ting, M. E. Rahman, H. H. Lau, and M. Z. Y. Ting, "Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, c. 201, ss. 763–777, 2019.
- [40] C. L. Hwang, and M. F. Hung, "Durability design and performance of self consolidating lightweight concrete," *Construction and Building Materials*, c. 19, ss. 619– 626, 2005.
- [41] J. A. Bogas, A. Gomes, and M. F. C. Pereira, "Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate," *Construction and Building Materials*, c. 35, ss. 1013–1022, 2012.
- [42] S. Nunes, A. M. Matos, T. Duarte, H. Figueiras, and J. Sousa- Coutinho, "Mixture design of self-compacting glass mortar," *Cement and Concrete Composites*, c. 43, ss. 1–11, 2013.
- [43] Z. J. Grdic, G. A. Toplicic-Curcic, I. M. Despotovic, and N. S. Ristic, "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, c. 24, ss. 1129-1133, 2010.
- [44] J. Cai, H. Jiang, Y. Zhu, and D. Wang, "Mechanical properties of fiber reinforced self-compacting concrete," *Optoelectronics and Advanced Materials*, c. 7, ss. 1013-1016, 2010.
- [45] T. Miyata, H. Yamada, H. Katsuchi, and M. Kitagawa, "Full-scale measurement of Akashi–Kaikyo Bridge during typhoon," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, c. 90, ss. 1517-1527, 2002.
- [46] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, Z. Algin, and H. Yazıcı, "Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, c. 64, ss. 172-183, 2014.
- [47] A.H. Bakhtiarian, M. Shokri and M.R. Sabour, "Application of self-compacting concrete", *Worldwide Experiences 5. SASTech*, Mashhad, Iran, 2011, 1-8.
- [48] J. L. Silfwerbrand, "Bonded concrete overlays for repairing concrete structures," *Failure, Distress and Repair of Concrete Structures*, ss. 208-243, 2009.
- [49] M.I. Kaffetzakis, and C.G. Papanicolaou, "Mix Proportioning method for lightweight aggregate SCC (LWASCC) based on the optimum packing point concept," *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*, ss. 131-151, 2012.
- [50] V. Corinaldesi, and G. Moriconi, "Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions," *Cement and Concrete Composites*, c. 33, ss. 596-601, 2011.

- [51] N. I. Fattuhi, "Curing compounds for fresh or hardened concrete," *Building Environment*, c. 21, ss. 119-125, 1986.
- [52] B. Lothenbach, F. Winnefeld, C. Alder, E. Wieland, P. Lunk, "Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes," *Cement and Concrete Research*, c. 37, ss. 483-491, 2007.
- [53] Y. Cao ve R. J. Detwiler, "Backscattered electron imaging of cement pastes cured at elevated temperatures," *Cement and Concrete Research*, c. 25, ss. 627-638, 1995.
- [54] A. Morch, J. Loken, T. Farstad, K. Reknes, "Production of steel fibre reinforced sprayed concrete and the influence of setting accelerator dosage on durability," *Production Methods and Workability of Concrete*, ss. 109-114, 1996.
- [55] H. Mazeheripour, S. Ghanbarpour, S. H. Mirmoradi, and I. Hosseinpour, "The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, c. 25, ss. 351-358, 2011.
- [56] S.O. Demirpolat, "Sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) kriyojenik enerjisini kullanarak güç üretiminin araştırılması: örnek çalışma Marmara Ereğlisi LNG alım terminali," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2007.
- [57] D. E. Berner, "Behavior of prestressed concrete subjected to low temperatures and cyclic loading," *5.th Behavior of CFRP*, England, 1984.
- [58] G. Ventura, L. Risegari, "The art of cryogenics: Low-temperature experimental technique," 1 st ed., New Jersey, USA: Elsevier, 2010, ss. 75-123.
- [59] A. Avcı, M. Can, M. Kılıç, "Doğal gaz sıvılaştırma yöntemleri, sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) nakli ve depolanması üzerine bir inceleme," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 1, ss. 137-144, 1995.
- [60] T. Flynn, "Cryogenic Engineering," Second Edition, Revised and Expanded, Taylor & Francis, 2004, ss. 25-36.
- [61] L. Dahmani, R. Mehaddene, "Thermomechanical response of LNG concrete tank to cryogenic temperatures," *Defect and Diffusion Forum*, c. 312, ss. 1021-1026, 2011.
- [62] K. Hjortset, M. Wernli, M.W. LaNier, K.A. Hoyle, W.H. Oliver, "Development of large-scale precast, prestressed concrete liquefied natural gas storage tanks," *Precast/Prestressed Concrete Institute Journal*, c. 58, ss. 40-54, 2013.
- [63] D. F. Liu, X. L. Yang, L.F. Hou, T.X. Cui, Y.T. Hu, Y.H. Wei, "Research and application of ultralow temperature 9Ni steel for LNG storage tank," *Journal of Iron and Steel Research*, c. 21, ss. 1-5, 2009.

- [64] *Installation and equipment for liquefied natural gas-design of onshore installations*, STANDARD, B, BS EN, 1473, 2007.
- [65] *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*. Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN 933-1, 2012.
- [66] P. Richard, M. Cheyrezy, “Composition of reactive powder concretes,” *Cement and Concrete Research*, c. 25, ss. 1501-1511, 1995.
- [67] *Tests for mechanical and physical properties of aggregates- Part 3: Determination of loose bulk density and voids*, Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN 1097-3, 1999.
- [68] *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 10: Assessment of fines - Grading of filler aggregates (air jet sieving)*, Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN 933-10, 1995.
- [69] *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation*, Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN 1097-2, 2015.
- [70] Y. Engin. (2014, 16 Aralık). *Yüksek Fırın Cürufu (Özet)*. [Online]. Erişim: <http://www.betonvecimento.com/surdurulebilirlik/yukse-firin-curufu-ozet>.
- [71] A. Keçeci. (2019, 26 Haziran). *Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Silis Dumanı Kullanımının, Beton Basınç Dayanımına ve Aderansa Etkileri*. [Online]. Erişim: <https://insapedia.com/silis-dumani-ve-betonda-kullanimi>
- [72] Y. Engin. (2015, 19 Şubat). *Betonda Uçucu Kül Kullanımı: Madalyonun Diğer Yüzü*. [Online]. Erişim: <http://www.betonvecimento.com/beton-2/betonda-ucucu-kul-kullanimi>
- [73] E. Arıoğlu, A.O. Yılmaz, N. Arıoğlu, “*Beton Agregaları Çözümlü Problemler-Bilgi Föyleri*”, İstanbul, Türkiye: Evrim Yayınevi, 2006 ss. 287.
- [74] M.Y. Yardımcı, “Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı,” Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2007.
- [75] L. Dahmani, A. Khenane, S. Kaci, “Behavior of the reinforced concrete at cryogenic temperatures,” *Cryogenics*, c. 47, ss. 517-525, 2007.
- [76] D.E. Berner, B.C. Gerwick, “Static and cyclic behavior of structural lightweight concrete at cryogenic temperatures,” *Ocean Space Utilization '85*, c.15, ss. 439-445, 1985.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Soyadı, adı : YÜKSEK, Mehmetcan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 25.11.1991 / Ankara
Telefon : 0544 403 80 10
E-posta : mehmetcanyuksek@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Düzce Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2013-devam
Lisans	Düzce Üniversitesi / Yapı Öğretmenliği	2009-2013
	Bayburt Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2015-2016
Lise	İncirli Anadolu Meslek Lisesi	2004-2009

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2016-2016	TB-BAŞAR Yapı Sistemleri	Tasarım Mühendisi
2018-.....	PROBE Mühendislik	Tasarım Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce (YDS: 32.5)

YAYINLAR

U. Yurt, M. Emiroglu, B. Comak and M. Yuksek, "Kriyojenik sıcaklık koşullarının kendiliğinden yerleşen betonların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi," *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, c. 3, ss. 248-257, 2016.