



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

**DİSİPLİNLERARASI KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI**

**KRİYOJENİK SICAKLIK ETKİSİNDEKİ KENDİLİĞİNDEN
YERLEŞEN BETONLARDA KIRILMA MEKANİĞİ
PERFORMANSININ BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

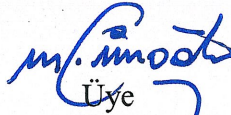
Ümit YURT

EKİM 2015

DÜZCE

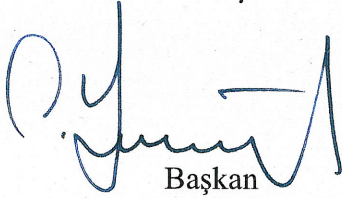
KABUL VE ONAY BELGESİ

Ümit YURT tarafından hazırlanan Kriyojenik Sıcaklık Etkisindeki Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Kırılma Mekanığı Performansının Belirlenmesi isimli lisansüstü tez çalışması, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12.10.2015 tarih ve 2015/878 sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.




Üye
(Tez Danışmanı)

Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
Düzce Üniversitesi



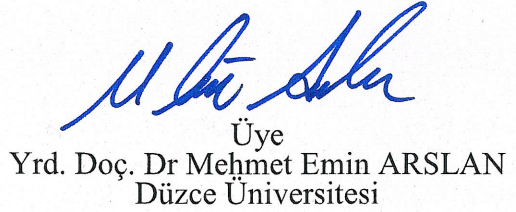
Başkan
Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU
Gazi Üniversitesi



Üye
Prof. Dr. Serkan SUBAŞI
Düzce Üniversitesi



Üye
Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ
Sakarya Üniversitesi



Üye
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin ARSLAN
Düzce Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Ekim 2015

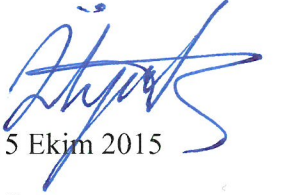
ONAY

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Ümit YURT 'un Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda Doktora derecesini almasını onamıştır.

Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.



15 Ekim 2015

Ümit YURT

*Başımın Tacı Anneme ve Babama
Sevgili Eşime ve Biricik Kızıma İthaf Olunur.*

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim ve bu tezin hazırlanması süresince bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yol gösteren, çalışmalarına destek olan çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na, en içten dileklerle teşekkür ederim.

Değerli tavsiyeleri ve görüşlerinden yararlandığım kıymetli hocalarım Prof. Dr. Serkan SUBAŞI, Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU, Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ, Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin ARSLAN ve Düzce Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri ve çalışanlarına, Sakarya Üniversitesinin laboratuvar imkânlarını kullanmamıza olanak sağlayan Doç. Dr. Metin İPEK'e

Bu çalışma boyunca yardımları ve destekleri ile her zaman yanımda olan sevgili eşim Kübra YURT'a ve aileme,

Destek ve yardımları esirgemeyen arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Ali Etem GÜREL, Enver KÜÇÜKKÜLAHLI, Recep GÜLER, Yrd. Doç. Dr. Yunus BİÇEN, Murat TABANOĞLU, Halil YILMAZ ve Ömer GENÇ'e, sıvı azot temininde tankerini bir ay boyunca çalışmamız için tasarrufumuza sunan ve teknik destek sağlayan OKNAL firması genel müdürü Abdullah GÜNGÖR ve ekibine, sıvı azot ile ilgili teknik destek sağlayan Mehmet Zahid KARAKAN'a, laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan yüksek lisans öğrencisi Mehmetcan YÜKSEK, teknisyen Bayram PEKTAŞ ve 2014 girişli DMYO İnşaat teknolojisi öğrencilerine,

Bu tez çalışmasına maddi destek veren (Proje No: BAP-2015.07.05.293) Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğüne,

Doktora çalışmam boyunca TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Bursu ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

15 Ekim 2015

Ümit YURT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ÖZET	1
ABSTRACT	2
EXTENDED ABSTRACT	3
1. GİRİŞ.....	6
1.1. KRİYOJENİK SIVILARIN DEPOLANMASI VE KULLANIM ALANLARI.....	7
1.2. KRİYOJENİK SIVILARIN BETON VE ÇELİK ÜZERİNE ETKİSİ	13
1.3. ÇALIŞMANIN AMACI	16
1.4. ÇALIŞMANIN KAPSAMI	16
1.5. KIRILMA MEKANİĞİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ.....	16
1.6. BETONDA KIRILMA MEKANİĞİ.....	23
1.7. BETONUN DOĞRUSAL OLMAYAN KIRILMA MEKANİĞİ	25
1.7.1. Fiktif Çatlak Yaklaşımı	28
1.7.2. İki Parametrelili Kırılma Modeli (İPKM)	29
1.7.2.1. Pik Yük Metodu.....	30
1.8. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON (KYB)	32
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	34
2.1. MATERYAL.....	34
2.1.1. Çimento	34
2.1.2. Yüksek Fırın Cürufu.....	35

2.1.3. Hiperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı.....	35
2.1.4. Agrega	36
2.1.5. Çentikli Kiriş Kalıpları.....	37
2.1.6. Kriyojenik Sıvı.....	38
2.2. YÖNTEM	38
2.2.1. KYB Karışımının Hazırlanması	38
2.2.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton Karışım Oranları.....	40
2.2.3. Numunelerin Kriyojenik Sıcaklığa Maruz Bırakılması	40
2.2.4. Dinamik Elastisite Modülü	42
2.2.5. Ultrases Geçiş Hızı Ölçümleri	43
2.2.6. Beton Basınç Dayanımı.....	43
2.2.7. Eğilme Dayanımı	44
2.2.8. Kırılma Performansının Belirlenmesi	45
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	50
3.1. TAZE BETON ÖZELLİKLERİ.....	50
3.2. SERTLEŞMİŞ BETON ÖZELLİKLERİ.....	51
3.2.1. Dinamik Elastisite Modülü.....	51
3.2.2. Ultrases Geçiş Hızı	52
3.2.3. Basınç Dayanımı.....	53
3.2.4. Eğilme Dayanımı	54
3.3. KIRILMA ENERJİLERİ.....	55
3.4. KIRILMA PARAMETRELERİ	62
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
5. KAYNAKLAR.....	72
6. EKLER.....	75
6.1. EK-1 KÜÇÜK BOY KİRİŞLER.....	75
6.2. EK-2 BÜYÜK BOY KİRİŞLER	80
6.3. EK-3 KIRILMA PARAMETRELERİ.....	85
6.4. EK-4 GÖRÜNTÜLER.....	88
7. ÖZGEÇMİŞ.....	94

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Tek muhafazalı kriyojenik tank.....	10
Şekil 1.2. Çift Muhafazalı kriyojenik tank.....	11
Şekil 1.3. Tam Muhafazalı kriyojenik tank.....	11
Şekil 1.4. Kriyojenik tank yalıtım detayı.....	12
Şekil 1.5. Kriyojenik beton tank detayı.....	13
Şekil 1.6. Atomlar arası denge konumu ve etkileşimler.....	17
Şekil 1.7. Atomik gerilme deformasyon eğrisi.....	18
Şekil 1.8. Kırılma mekaniği ve klasik yaklaşımın karşılaştırılması.....	19
Şekil 1.9. Eliptik bir çatlğa sahip düzlem gerilme hali.....	20
Şekil 1.10. Çatlak ucunda herhangi bir noktadaki gerilme.....	22
Şekil 1.11. Gevrek ve sünek kırılma.....	23
Şekil 1.12 Gerilme-şekil değiştirme lişkileri.....	24
Şekil 1.13. Agregaya, çimento pastası ve beton için tipik gerilme-gerinim eğrileri.....	25
Şekil 1.14. Betonda gerilme düzeyi ve mikroçatlak oluşumu ilişkisi.....	26
Şekil 1.15. Betonun kırılma işlem bölgesinde meydana gelen çatlak mekanizmalar..	27
Şekil 1.16. İki parametrelili kırılma modelinin şematik gösterimi.....	29
Şekil 2.1. Kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi.....	36
Şekil 2.2. Kırılma testi için üretilen kalıplarının döküm öncesi görünümü.....	37
Şekil 2.3. Gevşek birim ağırlık ve boşluk oranları.....	39
Şekil 2.4. Beton kirişlerin kriyojenik işlem için yerleşim düzeni.....	41
Şekil 2.5. Kriyojenik işlem sonrası numunelerin görünümü.....	41
Şekil 2.6. Kriyojenik işlem sonrası büyük boy çentikli kirişler.....	42
Şekil 2.7. Boyuna rezonans frekansı ölçümü.....	42
Şekil 2.8. Ultrases geçiş hızı ölçümü.....	43
Şekil 2.9. Eğilme dayanımı test düzeneği.....	44
Şekil 2.10. Kırılma deneyleri için üretilen test kirişleri.....	46
Şekil 2.11. Pik yük metodu uygulama esasları.....	47
Şekil 2.12. Kiriş numunelerine ait yükleme hızları.....	48
Şekil 2.13. Kırılma mekaniği test düzeneği.....	49
Şekil 3.1. Slump deneyi.....	51

Şekil 3.2.	Dinamik elastisite modülü değerleri.....	52
Şekil 3.3.	Ultrases geçiş hızı değerleri.....	53
Şekil 3.4.	Basınç dayanımı değerleri.....	53
Şekil 3.5.	Eğilme dayanımı değerleri.....	54
Şekil 3.6.	Hv-400-10 mm çentikli kırımların Yük-CMOD grafiği.....	55
Şekil 3.7.	Su-400-10 mm çentikli kırımların Yük-CMOD grafiği.....	56
Şekil 3.8.	Hv-400-10 mm ve Su-400-10 mm çentikli kırımların tükettiği enerjiler...	56
Şekil 3.9.	Hv-400-20 mm çentikli kırımların Yük-CMOD grafiği.....	57
Şekil 3.10.	Su-400-20 mm çentikli kırımların Yük-CMOD grafiği.....	58
Şekil 3.11.	Hv-400-20 mm ve Su-400-20 mm çentikli kırımların tükettiği enerjiler	58
Şekil 3.12.	Hv-400-30 mm çentikli kırımların Yük-CMOD grafiği.....	59
Şekil 3.13.	Su-400-30 mm çentikli kırımların Yük-CMOD grafiği.....	60
Şekil 3.14.	Hv-400-30 mm ve Su-400-30 mm çentikli kırımların tükettiği enerjiler	60
Şekil 3.15.	Kırılma yüzey enerjileri.....	62
Şekil 3.16.	Hv-400 serisi için K_{ic}^s -CTOD _c ve s- K_{ic}^s değişimi.....	63
Şekil 3.17.	Su-400 serisi için K_{ic}^s -CTOD _c ve s- K_{ic}^s değişimi.....	63
Şekil 3.18.	1Kr-Hv-400 serisi için K_{ic}^s -CTOD _c ve s- K_{ic}^s değişimi.....	64
Şekil 3.19.	1Kr-Su-400 serisi için K_{ic}^s -CTOD _c ve s- K_{ic}^s değişimi.....	64
Şekil 3.20.	5Kr-Hv-400 serisi için K_{ic}^s -CTOD _c ve s- K_{ic}^s değişimi.....	65
Şekil 3.21.	5Kr-Su-400 serisi için K_{ic}^s -CTOD _c ve s- K_{ic}^s değişimi.....	65
Şekil 3.22.	CTOD _c değerleri ve çevrimler.....	67
Şekil 3.23.	Gevreklik değerlerinin çevrimsel değişimi.....	67
Şekil 3.24.	K_{ic}^s değerlerinin çevrimlerle ilişkisi.....	68

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa No
Çizelge 1.1. Doğalgaz ticareti yapan ülkeler.....	8
Çizelge 1.2. Anlaşmalar kapsamında Türkiye'nin doğalgaz ithalatı yaptığı ülkeler.....	9
Çizelge 1.3. Kriyojenik sıvılara ait teknik özellikler.....	10
Çizelge 1.4. Mod I ve Mod II yükleme durumları için çatlak ucunda oluşan gerilme alanları.....	21
Çizelge 2.1. CEM I 42,5 R tipi çimento ve YFC'nin teknik özellikleri.....	34
Çizelge 2.2. Hiperakışkanlaştırıcı katkıya ait teknik özellikler.....	35
Çizelge 2.3. Karışımda kullanılan agregaya ait fiziksel ve mekanik özellikler.....	36
Çizelge 2.4. Sıvı azota ait teknik bilgiler.....	38
Çizelge 2.5. KYB karışım miktarları (1 m ³).....	40
Çizelge 2.6. Kırılma test kırımlarına ait bilgiler.....	45
Çizelge 3.1. Taze beton deney sonuçları.....	50
Çizelge 3.2. Kırılma yüzey enerjileri.....	61
Çizelge 3.3. Kırılma mekaniği test kırımlarına ait test sonuçları.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Eliptik boşluğun kısa boyutu
a_0	Başlangıç çatlak boyu
a_c	Kritik çatlak boyu
a_e	Efektif çatlak uzunluğu
b	Eliptik boşluğun uzun boyutu
CMOD	Çatlak ağzı açılımı deplasmanı
CTOD	Çatlak ucu açılım deplasmanı
CTOD _c	Kritik çatlak ucu açılım deplasmanı
d_{max}	Maksimum agrega çapı
E	Elastisite modülü
G_c	Çatlak yayılma hızı
G_F	Kırılma enerjisi
K_I	Gerilme şiddet çarpanı
K_{Ic}^s	Kritik gerilme şiddet çarpanı
ACI	Amerika Beton Standartları Enstitüsü
EFNARC	Avrupa Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Uzmanları Federasyonu
EPKM	Elasto-Plastik Kırılma Mekanikliği
LEKM	Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği

ÖZET

KRİYOJENİK SICAKLIK ETKİSİNDEKİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA KIRILMA MEKANİĞİ PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Ümit YURT

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri

Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Ekim 2015, 94 sayfa

Günümüzün en temel ısınma araçlarından biri olan ve diğer ülkelerden ithal ettiğimiz doğalgazın temininde tek bir ülkeye bağımlı olmamak son derece önemlidir. Bu nedenle doğalgazın yüksek hacimlerde depolanması büyük önem arz etmektedir. Doğalgazın depolanması için sıvılaştırılması gerekmekte olup sıvılaşma esnasında doğalgazın hacmi yaklaşık 600 kat küçülmekte ve sıvı haldeki doğalgazın sıcaklığı -162°C olmaktadır. Bu düşük sıcaklıklar kriyojenik sıcaklık olarak adlandırılmaktadır. Beton muhafaza tanklarının doldurma ve boşaltma anındaki termal etkilere ve beklenmedik sızıntı durumlarına karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Bu çalışmada, doğalgazın depolandığı beton muhafazalı tankların herhangi bir sızıntı, termal şok vb. durumlarda kriyojenik sıvı ile betonun teması sonucunda ortaya çıkabilecek etkiler ve beton davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda beton muhafazalı kriyojenik depolama tankları için kullanımı önerilebilecek yüksek dayanıklı kendiliğinden yerleşen beton tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kriyojenik etkiyi temsil etmek amacıyla sıvı nitrojen kullanılarak bir ve beş çevrim donma çözülme etkisi sonucunda dayanım özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Ayrıca beton içerisindeki nem durumunun etkisini araştırmak üzere numuneler suda ve havada olmak üzere iki farklı kür işlemine tabi tutulmuştur. Enerji yapılarının stratejik önem derecesinin yüksek olması nedeniyle, tasarımları yapılan bu betonların, dayanım parametreleri geleneksel dayanım ölçütlerinin yanı sıra iki parametrelilik kırılma mekaniği test yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Kırılma mekaniği parametrelerinin belirlenmesi amacıyla üç farklı boyutta, her farklı boyut için üç farklı çentik uzunluğuna sahip kirişler üretilmiştir. Üretilen kirişler üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler geleneksel tasarım metotları ve kırılma mekaniği parametreleri ile ilişkilendirilerek sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuç olarak, hava kürü numunelerinin su kürü numunelerine göre kriyojenik çevrime daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Bir çevrim kriyojenik işlem ardından K_{IC} ve $CTOD_c$ değerleri artış göstermiştir. Beş çevrim sonucunda ise, bir çevrime kıyasla K_{IC} ve $CTOD_c$ değerlerinde düşüş görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Doğalgaz, Kendiliğinden Yerleşen Beton, Kırılma Mekaniği, Kriyojenik Sıcaklık

ABSTRACT

FRACTURE MECHANICS PERFORMANCE OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE EXPOSED TO CRYOGENIC TEMPERATURES

Ümit YURT

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Materials
Technologies

Doctoral Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU

October 2015, 94 pages

It is important not to be dependent on a single country in the procurement of natural gas that is one of the basic heating sources of today and that we import from other countries. Thus, the storage of natural gas at high volumes is very important. It is required to liquefy the natural gas in order to store it, and the volume of natural gas decreases by about 600 times during liquefaction, and the temperature of natural gas in liquid phase becomes -162°C . These low temperatures are being called cryogenic temperature. The concrete storage tanks are required to be resistant against thermal effects and unexpected leakages during filling and discharge. In this study, the effects possible to arise and the behavior of concrete as the result of contact of cryogenic liquid and concrete in cases of any leakage, thermal shock etc relevant to the concrete encased tanks –where the natural gas is being stored- was examined. Within this scope, high durable self-consolidating concrete design –whose usage may be suggested for concrete encased cryogenic storage tanks- was realized. In the study, the change in the strength properties as the result of one and five cycles freezing and thawing effect was examined by using liquid nitrogen in order to represent cryogenic effect. Moreover, in order to search the effect of humidity within concrete, the samples were subjected to two different curing operations as being in water and in air. Due to high strategic importance of energy structures, the strength parameters of designed concretes were determined by two parameter fracture mechanics test method as well as traditional strength criteria. In order to determine the parameters of fracture mechanics, beams of three different sizes having three different notch lengths for each size were produced. Mechanical tests were performed on the produced beams. The results were obtained by associating the obtained data with the traditional design methods and parameters of fracture mechanics. Consequently, it was determined that samples of air curing were more resistant to cryogenic cycle than the samples of water curing. Following one cycle of cryogenic operation, the K_{IC} and $CTOD_c$ values had showed an increase. And as the result of five cycles, a decrease was observed in the K_{IC} and $CTOD_c$ values compared to one cycle.

Key Words: Cryogenic Temperature, Fracture Mechanics, Natural Gas, Self-Consolidating Concrete

EXTENDED ABSTRACT

FRACTURE MECHANICS PERFORMANCE OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE EXPOSED TO CRYOGENIC TEMPERATURES

Ümit YURT

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Materials
Doctoral Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU

October 2015, 94 pages

1. INTRODUCTION

In parallel to continuous development of technology, the demand for energy resources is increasing each passing day. Obtaining, storing and transporting natural gas –which one of the most significant energy resources- is being encountered as the most significant requirement. Natural gas, which is a hydrocarbon based fuel from among the fossil fuels group, is a colorless, odorless and nonhazardous gas lighter than air. It contains ethane, propane, butane, carbon dioxide, oxygen, nitrogen and 90% methane gases in its composition. The non-toxic natural gas is being used in many industries with the purpose of heating or energy production due to its nature friendly and clean fuel properties. Any flaw that be encountered in the usage of natural gas is causing victimization and significant economic losses etc. both in domestic uses and in industry as raw material and energy source. Especially the countries, making export of natural gas in seasons when the use of natural gas intensifies, are not conforming to mutual agreements from time to time due to strategic and technical reasons, and they are hindering the flow of natural gas. Thus, the storage of natural gas in large tanks and bringing it to use when required is becoming crucial. The storage tanks are generally being produced as double-walled metallic tanks or double-walled concrete tanks. Despite the building of metallic tanks is more practical, concrete walled tanks are more secure in respect of safety. Especially at locations close to centers of population and airports, the preference of concrete walled tanks is being suggested. When the studies performed until today are examined, the behavior of traditional concretes under cryogenic temperatures generally implies increase in mechanical properties by the decrease of temperature. But there are not sufficient studies explaining especially the

determination of the fracture mechanics performance of concrete under cryogenic conditions and this mechanism. In this study, the fracture mechanics performance of self-consolidating concrete under low temperatures was determined by using two parameter fracture mechanics test method and traditional design criteria on the self-consolidating concrete.

2. MATERIAL AND METHODS

For the preparation of the mixtures of self-consolidating concrete (SCC) -which is produced for experimental study- blast furnace slag (BFS), CEM I 42,5 R type Portland cement, aggregate, water and hyper plasticizer were used. The maximum diameter of aggregate and sizes of beams to be produced were determined considering the two parameter fracture model and size effect method. The metal mold and notch apparatus used in the study were designed in three different sizes and as to include 3 different notches for each size. The lengths of the notches were designed as to be 10%, 20% and 30% of the height of the beam. The samples taken from the molds had gained resistance under water and air curing during 90 days. Compressive strength, flexural strength, dynamic modulus of elasticity, ultrasonic pulse velocity and unit weight tests were performed on the samples in the 90 days curing period. In order to determine the performance of fracture mechanics, as the result of three point bending test on the casted notched beam samples, fracture energies were calculated by using the area remaining under the curve of load-crack mouth opening displacement, and K_{IC} and $CTOD_c$ values were calculated by using the two parameter peak load method. By using the obtained data, the relation of fracture mechanics design parameters with the strength parameters under the cryogenic cycling and different curing environments were examined.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

As the result of the experimental study performed, the following results were obtained. Dynamic modulus of elasticity of air cured had gained 3% increase after one cycle cryogenic operation. And after five cycles, the dynamic modulus of elasticity values had decreased by 0.56% compared to reference sample. In the water cured 16% decrease had realized regarding dynamic modulus of elasticity after one cycle. After five cycles, the dynamic modulus of elasticity values had decreased by 0.58% compared to reference sample. For the samples subjected to air curing, the change in the ultrasound pulse velocity had showed a decrease of 0.52% and an increase of 1.03% as the result of

one and five cycles respectively compared to the reference sample. Samples subjected to water curing, the pulse velocity had showed a decrease of 8.7% and a decrease of 17.39% as the result of one and five cycles respectively. Flexural strength values had showed an increase of 1.25% and 3.97% as the result of one and five cycles respectively in the samples subjected to air curing compared to the reference criterion. In the samples subjected to water curing, the bending strength had showed an increase of 10.49% as the result of one cycle, and an increase of 8.57% as the result of five cycles. The compressive strength of samples subjected to air curing had increased by 6.29% as the result of one cycle, and had decreased by 5.44% as the result of five cycles compared to reference value. Fracture surface energies had increased in parallel to the number of cycles in samples which had gained resistance under water and air curing. K_{CTOD_c} and K_{ic}^s values determined by using peak-load method based on the two-parameter fracture model had also showed an increase in general as the result of one cycle cryogenic operation. And while the values of samples subjected to air curing had decreased after five cycles cryogenic operation compared to reference values, it had showed an increase in the samples subjected to water curing.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

By this study, a SCC mixture which may be suggested for the production of cryogenic concrete tank -required for secure storage of cryogenic liquids- was obtained. It had been concluded that the ground granulated blast furnace slag -being used in the obtained mixture- may be used in the production of concrete remaining under the effect of low temperatures. As the result of the contact of cryogenic liquid and concrete, the resistance of tested concretes had generally increased. It had been concluded that the contact of samples -which are subjected to different curing conditions- with the cryogenic liquid and the moisture content within the internal structure of the materials have effect on the durability of concrete. While the resistance of concretes remaining under the effect of cryogenic liquid is increasing, the resistance of samples remaining under the effect of cryogenic liquid for five cycles is lower compared to ones remaining under the same effect for one cycle.

1. GİRİŞ

Sanayinin gelişimi, artan nüfus ve büyüyen ekonomiye paralel olarak, dünya genelinde enerjiye olan talep artmıştır. En temel enerji kaynaklarından birisi olan fosil yakıtlar çevreye zarar vermesine karşın alternatif kaynakların mevcut talebi karşılayamaması nedeniyle hala vazgeçilmez enerji kaynaklarıdır. Bu enerji grubunda yer alan ve çevre dostu olarak bilinen doğalgaz, mesken, işyeri, sanayi, elektrik üretimi vb. birçok alanda kullanılmakta olup özellikle konut yaşamının önemli bir ihtiyacıdır. Bu temiz ve çevre dostu enerji kaynağına erişimde güçlük yaşayan ülkeler, ihtiyaçlarını rezervleri bulunan ülkelere ithalat yaparak karşılamaktadır. Türkiye gerek jeopolitik konumu gerekse coğrafi konumu nedeniyle bu enerji kaynakları bakımından zengin ülkelere yakın bir konuma sahiptir. Fakat zaman zaman ülkeler arası anlaşmazlıklar nedeniyle doğalgaz iletimi kesintiye uğramaktadır. Hatta bu durum ülkeler arasında yaşanan krizler neticesinde ekonomik tehdit olarak da kullanılmaktadır. 2015 yılının sonunda yaşanan Türkiye-Rusya gerginliğinde bu durum karşımıza çıkmıştır. Bu gibi durumlarda, ülke içi talebin karşılanması sebebiyle doğalgazın sıvılaştırılarak depolanması son derece önemlidir. Sıvılaştırma işlemi sayesinde daha fazla miktarda doğalgaz depolamak mümkün olabilmektedir. Sıvılaştırma işlemi düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Düşük sıcaklıklardaki sıvılar ($153,15^{\circ}\text{C}$ 'ın altındaki) kriyojen sıvılar olarak ifade edilmektedir. Depolama işleminde kriyojenik sıcaklıklardaki sıvılar, sıcaklık değişimi ile birlikte yükleme boşaltma durumlarında gaz fazına geçerek basınç artışına, termal şoklara, dinamik yük etkilerine sebep olmaktadır. Bu yüzden depolama işleminin yapılacağı tankın rijit, stabil ve oluşabilecek termal şoklara dayanıklı olması son derece önemlidir. Bu ihtiyacı karşılayacak en iyi malzeme olarak karşımıza beton çıkmaktadır. Kriyojenik sıvıların büyük miktarlarda depolanması, güvenle saklanması, ihtiyaç halinde güvenli bir şekilde talebin karşılanmasında beton muhafazalı tanklar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür tank uygulamalarında kullanılacak olan betonun mekanik performansının yüksek olması, kalıba boşluksuz yerleşmesi ve kriyojenik sıcaklıklara dayanıklı olması gerekmektedir. Tüm bu özellikler bizi Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) kullanımına sevk etmektedir. Literatür incelendiğinde kriyojenik sıcaklıklardaki gele neksel beton davranışı ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Fakat bu

çalışmalar daha çok kriyojenik işlem ardından gerçekleşen deneyler olup, donma çözülme etkisi incelenmemiştir. Ayrıca kendiliğinden yerleşen beton teknolojisi yeni bir teknoloji olduğundan bu konu ile ilgili yeterli çalışmaya rastlanmamıştır. Ülkeler için stratejik öneme sahip yapılar içerisinde enerji üreten ve depolayan terminaller olası risk durumunda işlevini yerine getirebilmesi gerekmektedir. Önem derecesi yüksek bu yapılar için sadece geleneksel tasarım metotlarının kullanılması yeterli öngörüü sağlamayabilir. Beton gibi heterojen bir malzemenin yük altında nasıl davranacağını bilmesi oldukça zordur. Tasarım yapılırken malzeme özelliklerini belirleyen daha fazla veri kullanılması, tasarımın daha doğru bir şekilde gerçekleşmesini sağlayacaktır. Son yıllarda beton bünyesinde bulunan çatlakların da tasarıma dahil edilebildiği kırılma mekaniği metotları, malzeme özelliklerini birden çok parametre ile modellemesi nedeniyle araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir.

1.1. KRİYOJENİK SIVILARIN DEPOLANMASI VE KULLANIM ALANLARI

Teknolojinin sürekli gelişmesine paralel olarak, enerji kaynaklarına olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Bu enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri olan doğalgazın elde edilmesi, depolanması, taşınması önemli bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Fosil yakıtlar grubundan hidrokarbon esaslı bir yakıt olan doğalgaz renksiz, kokusuz, havadan hafif ve zehirsiz bir gazdır. Bileşiminde % 90'nı metan olmak üzere, etan, propan, bütan, karbondioksit, oksijen ve azot gazları bulunmaktadır. Zehirleyici olmayan doğalgaz, çevre dostu ve temiz yakıt özelliği sayesinde birçok sektörde ısınma veya enerji üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Ülkemiz tükettiği enerjinin % 23'ünü doğalgazdan karşılamakla birlikte bu ihtiyacın yalnızca % 7'sini kendisi üretmektedir. Doğalgaz ithalatının % 80'nini boru hatları ile sağlayan ülkemiz, bu ithalatın % 65'ini Rusya Federasyonu'ndan, % 35'ini ise İran'dan karşılamaktadır [1-4]. Japonya, Güney Kore, Fransa ve Türkiye gibi birçok ülke doğalgaz ihtiyacını terminaller (depolama) kurarak muhafaza etmektedir. Çizelge 1.1'de Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2014 yılındaki verilerine göre doğalgaz üreten ülkeler sıralaması görülmektedir. Türkiye Cezayir'den 4 milyar Nm³/yıl ve Nijerya'dan 1,2 milyar Nm³/yıl olmak üzere toplam 5,2 milyar Nm³/yıl doğalgaza eşdeğer (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (Liquifield Natural Gas)) LNG ithalatını doğalgaz terminallerinde depolamaktadır. 1994 yılında işletmeye alınan Tekirdağ'ın Marmara Ereğlisi'nde bulunan BOTAS LNG Alım Terminali (6 milyar Nm³/yıl), 2006 yılında yaklaşık 4,4 milyar Nm³ doğalgazı tüketim hattına

göndermiştir. Ülkemizde ikinci LNG alım terminali ise 2001 yılında kurulan ve hizmete giren 10 milyar Nm³/yıl kapasiteye sahip İzmir Aliğa LNG Terminali'dir [5].

Çizelge 1.1. Doğalgaz ticareti yapan ülkeler [4].

Ülkeler	Üretim Miktarı (10 ⁹ m ³)	Üretim Miktarı (%)	Doğalgaz İhracatı Yapan Ülkeler	İhracat Miktarı (10 ⁹ m ³)	Doğalgaz İthalatı Yapan Ülkeler	İthalat Miktarı (10 ⁹ m ³)
ABD	689	19,8	Rusya	203	Japonya	123
Rusya	671	19,3	Katar	121	Almanya	76
Katar	161	4,6	Norveç	103	İtalya	62
İran	159	4,6	Kanada	54	Kore	53
Kanada	155	4,5	Cezayir	45	Çin	49
Çin	115	3,3	Türkmenistan	45	Türkiye	45
Norveç	109	3,1	Hollanda	40	Fransa	43
Hollanda	86	2,5	Endonezya	35	İngiltere	39
S. Arabistan	84	2,4	Avustralya	26	ABD	37
Cezayir	80	2,3	Nijerya	22	İspanya	30
Diğer	1170	33,6	Diğer	156	Diğer	279
Toplam	3479	100	Toplam	850	Toplam	836
Nm ³ : Normal m ³ , Sıcaklık 15 °C, Basınç 1,01325 bar						

Doğalgaz temininde yaşanacak bir aksaklık, hem ısınma amaçlı evsel kullanımlarda hem de hammadde ve enerji kaynağı olarak sanayide mağduriyetlere, büyük ekonomik zararlara sebep olacaktır. Özellikle doğalgaz kullanımının yoğunlaştığı mevsimlerde doğalgaz ihracatı yapan ülkeler politik, stratejik ve teknik nedenlerden dolayı karşılıklı ticari anlaşmalara zaman zaman uymamakta ve doğalgaz akışının aksamasına neden olmaktadır. Bu nedenle doğalgazın büyük tanklarda depolanması ve gerektiğinde kullanıma sunulması önem kazanmaktadır.

Doğalgazın üretilmesinden kullanılmasına kadar olan aşamalar; üretilmesi, soğutularak sıvılaştırılması, taşınmadan önce geçici depolanması, pazar alanlarına yakın limanlara transferi, dağıtmadan önce geçici depolanması şeklinde sıralanabilir. Doğalgaz, atmosfer basıncında soğutulduğunda yoğunlaşarak sıvı faza geçmekte ve sıvı doğalgaz LNG olarak adlandırılmaktadır. LNG'nin depolanma işlemi bu sıvı fazda gerçekleştirilmektedir. LNG, yaklaşık -162 °C'de (-260°F) sıvılaşmakta ve hacmi yaklaşık 600 kat kadar azalmaktadır. Bu hacimsel değişim doğalgazın taşınması ve depolanması açısından avantaj sağlamaktadır [6, 7].

Doğalgaz üretimi kısıtlı olan ülkemiz, ihtiyaç duyduğu doğalgazı Çizelge 1.2’de belirtilen anlaşmalar çerçevesinde temin etmektedir. Doğalgaza olan bağımlılığı en aza indirmek ancak depolama alanlarının kapasitelerinin ve doğalgaz alımı yapılan ülkelerin çeşitliliğini arttırmakla mümkün olabilmektedir.

Çizelge 1.2. Anlaşmalar kapsamında Türkiye’nin doğalgaz ithalatı yaptığı ülkeler [1-3].

Ülkeler	Miktar (10 ⁹ m ³ /yıl)	İmzalama Tarihi	Süre	Durumu
Cezayir	4,4	14 Nisan 1988	20	Devrede
Nijerya	1,2	9 Kasım 1995	22	Devrede
İran	10	8 Ağustos 1996	25	Devrede
Rusya Fed. (Karedeniz)	16	15 Aralık 1997	25	Devrede
Rusya Fed. (Batı)	4	18 Şubat 1998	23	Devrede
Türkmenistan	16	21 Mayıs 1999	30	Devrede
Azerbaycan (Faz I)	6,6	12 Mart 2001	15	Devrede
Azerbaycan (Faz II)	6	25 Ekim 2011	15	2017/2018

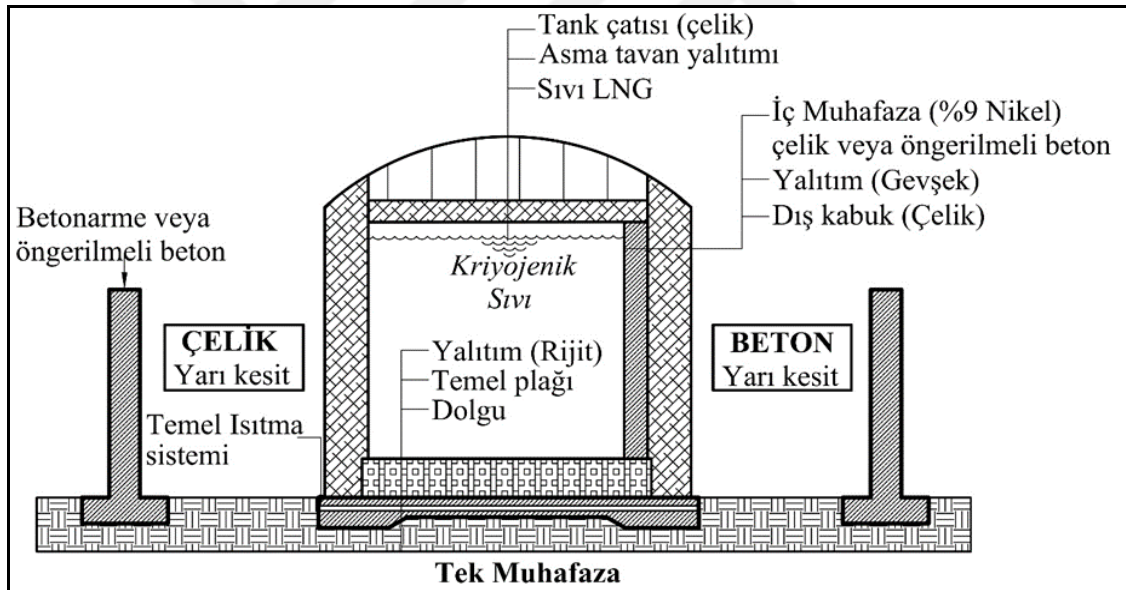
Doğalgazın depolanması için yapılacak olan soğutma işlemi kriyojenik mühendisliğinin önemli konularından biridir. Fiziğin bir dalı olan kriyojeni, düşük sıcaklıkların elde edilmesi olarak tanımlamakla birlikte, literatürde farklı sıcaklık değerleri belirtilmesine karşın genellikle -153,15°C’ın altındaki sıcaklıkları ifade etmektedir.

Havada yaklaşık %78 civarında gaz halinde bulunan azot, -196°C’de kaynama noktasına sahip en çok kullanılan kriyojen maddelerden biridir. Kriyojen sıvılar (Nitrojen olarak da bilinen sıvı azot, oksijen, helyum, argon vs.) tıbbi ve sınıai uygulamalarda çeşitli amaçlarla kullanılan malzemelerdendir. Bu kriyojenik sıvıların uygun şartlarda muhafazası gerekmektedir. Genel uygulama, bu sıvıların nikel alaşımli iç yüzeye sahip metal tanklarla depolanmasıdır. Uzun dönemde daha ekonomik ve daha emniyetli bir muhafaza yöntemi olan kriyojenik beton tankların kullanımına ise daha az rastlanmaktadır. Bunun başlıca nedenlerinden biri kriyojenik sıcaklıklarda beton davranışının yeteri kadar bilinmemesidir. Çizelge 1.3.’de yaygın kullanılan kriyojenik gazlara ait teknik bilgiler özetlenmektedir [8-10]. 1970’li yıllara kadar karada ve denizde kurulan kriyojenik sıvı muhafaza tankları genel olarak çift duvarlı çelik tanklar olarak imal edilmekteydi.

Çizelge 1.3. Kriyojenik sıvılara ait teknik özellikler [11].

Gaz	Formül	Molar Kütle gr / mol	Kaynama Sıcaklığı ° C	Hacim, Nm ³ , 1 bar, 15° C	kg	Hacim, litre 1 atm.
Argon	Ar	40	-183	1	1,669	1,197
Azot	N ₂	28	-196		1,170	1,446
Helyum	He	4	-269		0,167	1,336
Hidrojen	H ₂	2	-253		0,084	1,188
Karbon monoksit	CO	28	-191,6		1,170	1,484
Oksijen	O ₂	32	-183		1,337	1,172

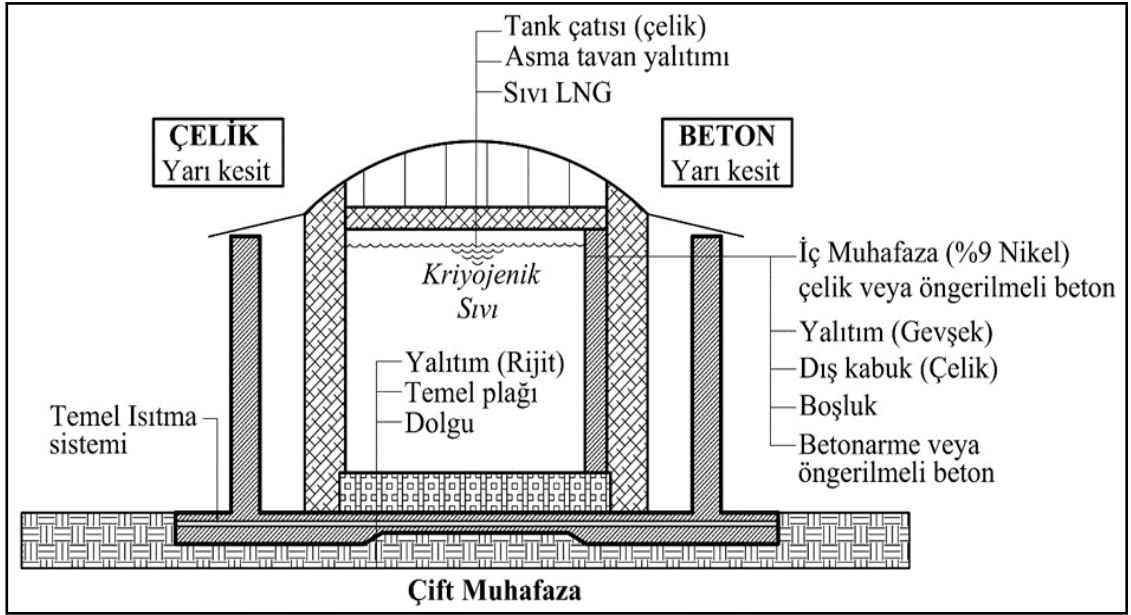
Bu çift taraflı çelik tanklar, iç yüzeyde kriyojenik sıvıya dayanıklı bir alaşım ve dış yüzeyde normal çelikten oluşan bir yapıda üretilmekteydi. 70'li yılların başından itibaren ise, özellikle güvenlik seviyesini daha da artırmak amacıyla çift cidarlı tankların dış yüzeylerinde öngerilmeli beton kullanımı yaygınlaşmıştır [6].



Şekil 1.1. Tek muhafazalı kriyojenik tank [12, 13].

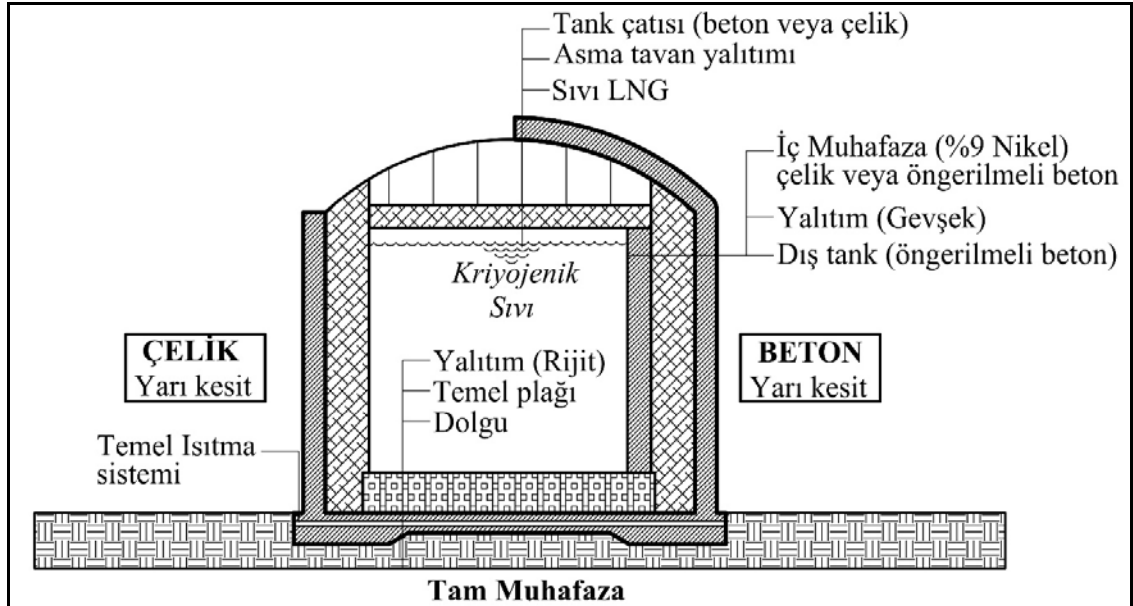
Şekil 1.1 ile Şekil 1.3 arasında kriyojenik muhafaza tanklarına ait teknik çizimler bulunmaktadır. Kriyojenik tanklar metal ve beton yarı kesit olarak verilmiştir. Tek muhafazalı tankların (Şekil 1.1) gövdesi tek muhafazadan oluşmaktadır. Oluşabilecek sızıntılara karşı tank çevresi betonarme veya öngerilmeli beton duvar ile güvenlik altına alınarak korunmaktadır.

Çift muhafazalı tanklarda ise aynı temel sistemi içerisinde ikincil bir muhafaza Şekil 1.2’de görülmektedir. Birincil muhafaza ile ikincil muhafaza arasında boşluk bulunmaktadır.



Şekil 1.2. Çift muhafazalı kriyojenik tank [12, 13].

Tam muhafazalı tank kesitinde ise (Şekil 1.3) iki muhafaza arasında boşluk olmadan oluşturulmuş bir tasarım söz konusudur.

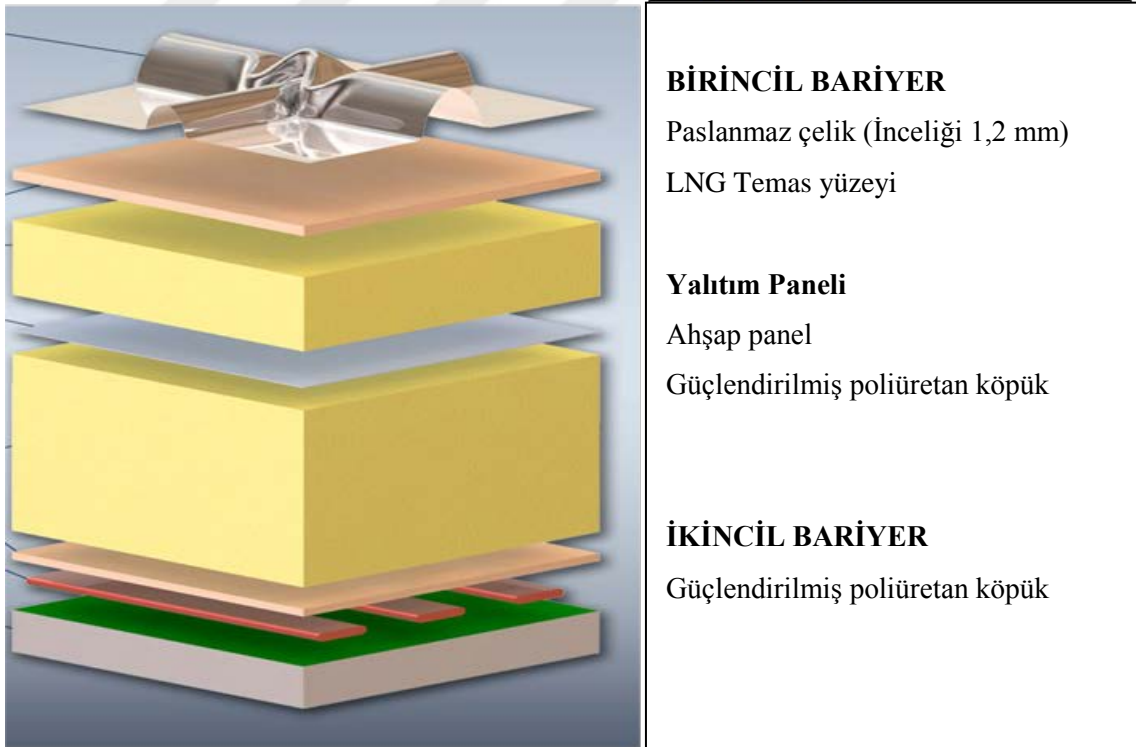


Şekil 1.3. Tam muhafazalı kriyojenik tank [12, 13].

Günümüzde depolama tankları genel olarak, çift duvarlı metalik tanklar veya çift duvarlı beton tanklar olarak üretilmektedir.

Metalik tankların yapımı daha pratik olmasına rağmen beton duvarlı tanklar emniyet açısından daha güvenlidir. Özellikle yerleşim merkezleri ve havaalanları yakınlarında beton duvarlı tankların tercih edilmesi güvenlik açısından önerilmektedir [14].

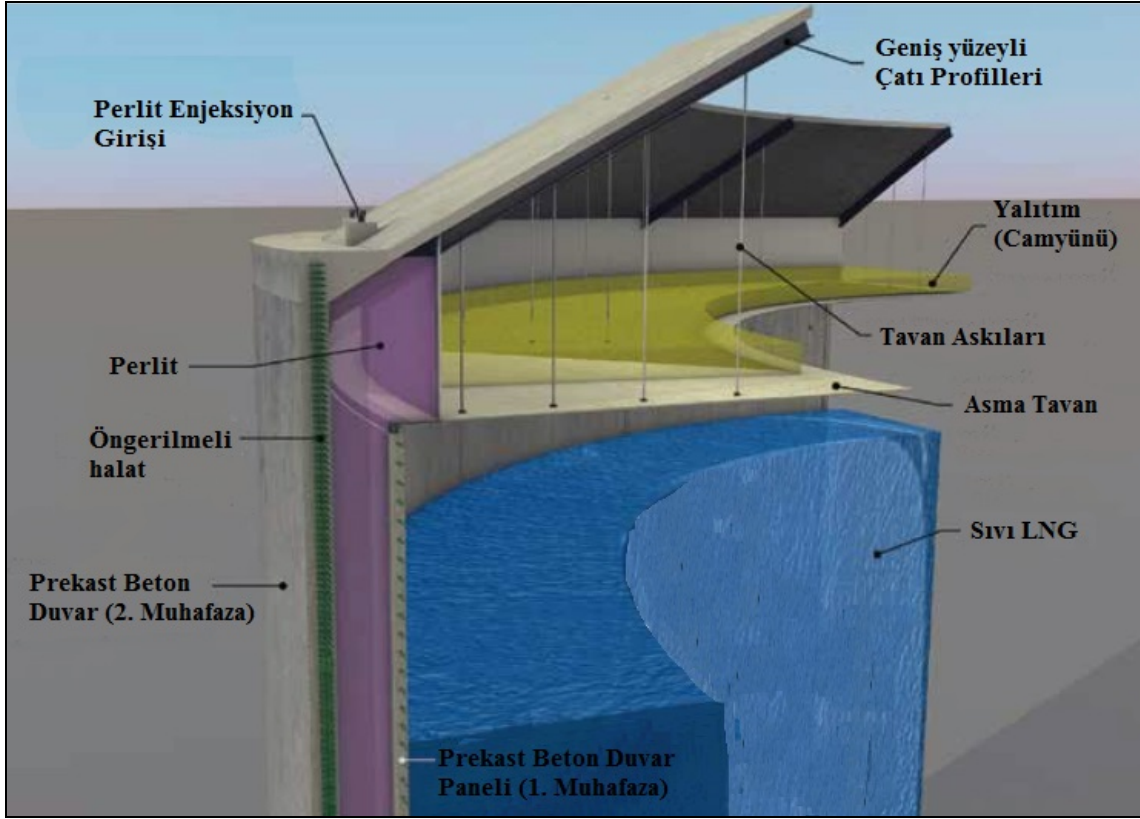
Kriyojenik beton tanklar, özellikle tankların boşaltma ve doldurma esnasında donma-çözülme döngüsüne maruz kalmaktadır. İç yüzeyi alaşımli metal ile kaplı olan betonarme depolama tanklarında beton ile sıvı temas halinde değildir. Bu tanklarda beton iç yüzeyinde koruyucu iç katman mevcuttur. Kriyojen sıvılar bu metallerle temas halindedirler. Ancak içteki metal tankta ortaya çıkacak herhangi bir kusurdan kaynaklanan hasarlar koruduğu beton yüzeye zarar verebilmektedir. Bu durumda beton ile kriyojen sıvı temas edebilir. Ayrıca beton ile sıvının doğrudan temas ettiği tanklar da mevcuttur. Oluşabilecek böyle durumlarda, beton tankın kriyojen sıvıyı boşaltma anına kadar güvenle muhafaza etmesi gerekmektedir. Betonarme tankların çelik tanklara göre, kriyojenik sıcaklıklara, termal şoklara, yangın etkisine, burulma ve yorulmalara karşı yüksek dirençli olması gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca betonarme tankların bir diğer avantajı yer üstünde ya da yer altında uygulamaya müsait olmasıdır [15-19].



Şekil 1.4. Kriyojenik tank yalıtım detayı [20].

Tipik bir LNG beton tank yalıtım detayı Şekil 1.4'de görülmektedir. Tam muhafazalı tanklar, genellikle betondan imal edilmiş bir dış tank ve en az %9 nikel alaşımli çelik

bir iç tanktan meydana gelmektedir. Tam muhafazalı tankların temelinde, duvarlarında ve çatısında beton kullanılmaktadır. Tipik tank boyutları 80–90 m çap ve yaklaşık 50 m yükseklikten oluşmaktadır [19, 21]. Şekil 1.5’de beton taşıyıcı sisteme sahip çift muhafazalı beton tank detayı görülmektedir.



Şekil 1.5. Kriyojenik beton tank detayı [12].

Bu tankın içerisinde sıvılaştırılmış doğalgaz bulunmaktadır. Düşük sıcaklığa sahip sıvının sıcaklığının korunabilmesi amacıyla birincil ve ikincil beton muhafaza arası perlit ile yalıtılmıştır.

1.2. KRİYOJENİK SIVILARIN BETON VE ÇELİK ÜZERİNE ETKİSİ

Betonun temel özelliklerinden biri olan durabilite, dayanım kadar önemli olmasına rağmen tasarımda ne yazık ki göz ardı edilmektedir. Dayanıklılık, servis ömrü ve dolayısıyla ekonomi açısından oldukça önemlidir [22]. Kriyojenik sıvı tanklarındaki beklenmedik bir sızıntı vb. kontrol edilemeyen durumlarda ya da bu tanklardaki eksilen sıvının doldurulması sırasında ani sıcaklık değişimleri meydana gelebilmektedir. Bu nedenle kriyojenik koşullara maruz kalacak betonların durabilite özellikleri hakkındaki

bilgiler, başarılı bir beton tasarımı ve uygulaması için oldukça önemlidir [15]. Düşük sıcaklıklarda betonarme donatısının yaklaşık %4 ile %40 arasında akma ve kopma dayanımında artış olurken sünekliklerinde ise azalma meydana gelir [23].

Betonun nem oranına bağlı olarak düşük sıcaklıklarda dayanımında artış gözlenmektedir. Bunun nedeni düşük sıcaklıklarda beton içerisinde bulunan nem, çimento pastasında mevcut olan gözenekler içerisinde yük taşıyan buz kristallerine dönüşmesiyle açıklanmaktadır [24]. Lee ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarında +20 ile -70 °C aralığındaki farklı sıcaklıklarda betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve donatı aderanslarını belirlemiştir. Sonuç olarak sıcaklıktaki düşüşe bağlı olarak tüm dayanımlarda bir artış olduğu vurgulanmıştır. Basınç dayanımındaki artışın yarmada çekme, elastisite modülü ve donatı aderansı değerlerindeki artışa göre daha fazla olduğu bildirilmiştir [25].

Literatürde, kriyojenik sıcaklıklarda geleneksel (vibrasyon gerektiren) betonlar üzerinde yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Berner ve Gerwick (1985) taşıyıcı hafif betonların, kriyojenik sıcaklıklarda statik ve tekrarlı yükler altındaki özelliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak yüksek dayanımlı hafif betonların mükemmel kriyojenik özellik sergilediği ve sıvılaştırılmış gaz tanklarında ikincil bir bariyer olarak kullanılabileceğini bildirmişlerdir [23].

Vandewalle (1989) test sıcaklığı (20, -40, -80, -120 ve -180 °C) ve kür koşullarının beton davranışına etkisini araştırmak üzere bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sıcaklıktaki düşüşe bağlı olarak donatı aderansında bir artış gözlemlendiği bildirilmiştir [26]. Pusch ve Rostasy (1987) çok düşük sıcaklık çevriminin taşıyıcı hafif betonların dayanım, deformasyon ve termal davranışlarına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 45 MPa dayanıma sahip taşıyıcı hafif betonlar kullanılmıştır. Sonuç olarak taşıyıcı hafif betonların mekanik özelliklerinin çimento pastası ile boşluklu agreganın nem oranına bağlı olduğunu bildirmişlerdir [27].

Elices ve arkadaşları (1989) -170 °C ve oda sıcaklığındaki beton numunelerinin kırılma performanslarını araştırmışlardır. Sıcaklığın azalmasıyla gerilme yoğunluk faktörü değerinde bir azalma olduğu bildirilmiştir [28]. Hanaor (1982) betonun kriyojenik koşullar altındaki mekanik özellikleri dışında farklı bir çalışma yaparak, su yerine sıvı nitrojen kullanımının betonun geçirimsizliğine etkisini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar,

kriyojenik sıcaklıklarda betonun geçirgenliğini düzenleyen mekanizmaların normal sıcaklıklarda geçerli olanlardan önemli ölçüde farklılık göstermediği yönündedir. Çalışmada, özellikle agrega ve çimento pastası ara yüzey etkileşiminin önemli bir rol oynadığı kaydedilmiştir [29].

Günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, geleneksel betonların kriyojenik sıcaklıklar altındaki davranışı genel olarak sıcaklığın azalmasıyla mekanik özelliklerdeki artış ile ifade edilmektedir. Ancak özellikle kriyojenik koşullarda betonun kırılma mekaniği performansının belirlenmesi ve bu mekanizmayı açıklayan yeterli çalışma mevcut değildir. Ayrıca görülmektedir ki, yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde beton numuneler kriyojenik sıcaklıklarda direkt bekletmek suretiyle deneyler gerçekleştirilmiştir. Ancak kriyojenik sıcaklıklarda donma-çözülme etkisi çok nadir incelenmiştir. Buna ek olarak, geleneksel betona oranla farklı bileşim özelliklerine sahip olan kendiliğinden yerleşen betonların kriyojenik sıcaklıklarda davranışı hakkında genel bir fikir oluşturacak düzeyde literatür bilgisine rastlanmamıştır. Talbot (2009) yapmış olduğu çalışmada, sahada ve laboratuvar ortamında duvar elemanı olarak kullanılmak üzere iki farklı kendiliğinden yerleşen beton karışımı üzerinde deneylerini gerçekleştirmiştir. Talbot (2009) yaptığı çalışmanın kendiliğinden yerleşen betonların çok düşük sıcaklıklardaki özelliklerinin incelemesi dışında bir diğer özgün yanı, numunelerin bir saat sıvı nitrojen içerisinde dondurulup kırk sekiz saat suda çözülerek bir çevrim donma-çözülme etkisine maruz bırakılmasıdır. Bu çalışmada toz malzeme olarak yalnızca uçucu kül kullanılmış olup, kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında toz malzeme olarak yaygın kullanılan malzemeler olan, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı vb. malzemelerin etkisi incelenmemiştir [30].

Metaller üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, kriyojenik işlem olarak tanımlanan uygulama, malzemelerin düşük sıcaklıklara maruz bırakılma sürecini tanımlamaktadır. Bu işlem, metal malzemelerin çalışma ömrünü artırmak amacıyla gerçekleştirilen (-196 °C) soğutma işlemidir. Kriyojenik işlem son zamanlarda yoğun bir şekilde kullanılmakta olup metallerin özelliklerini iyileştirmek için tamamlayıcı bir süreçtir. Yapılan çalışmalarda metal malzeme içerisinde geleneksel ısıl işleminden sonra kalan ve malzeme ömrünü olumsuz etkileyen oluşumların azaldığı bildirilmiştir. Genellikle mekanik özelliklerini artırmak için kriyojenik işlem kullanılmaktadır. Sıvı azot kullanılarak gerçekleştirilen bu işlem ile metal malzemelerde tokluk, aşınma direnci vb. değerlerinde artış, sürtünme değerlerinde düşüş gerçekleşmektedir. Ayrıca kriyojenik

işlemin ardından imalat sektöründe kullanılan malzemelerin çatlama problemine karşı daha dayanıklı hale geldiği bildirilmiştir [31-33].

1.3. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmada doğalgaz terminallerinde ve kriyojenik sıcaklıklara maruz kalabilecek betonarme yapılarda kullanılabilecek yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilmiş yüksek durabiliteye sahip KYB karışımı elde edilmiştir. Kriyojenik donma çözülme etkisine maruz kalan beton muhafazalı depolama tanklarında geleneksel tasarım kıstaslarının yanı sıra kırılma mekaniği performansı belirlenmiştir. Çalışmada betonun dış ortamda karşılaşılabileceği kriyojenik sıcaklık koşulları laboratuvar ortamında araştırılarak, geleneksel betonlara nazaran daha çok tercih edilmeye başlayan kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının düşük sıcaklık koşullardaki davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.4. ÇALIŞMANIN KAPSAMI

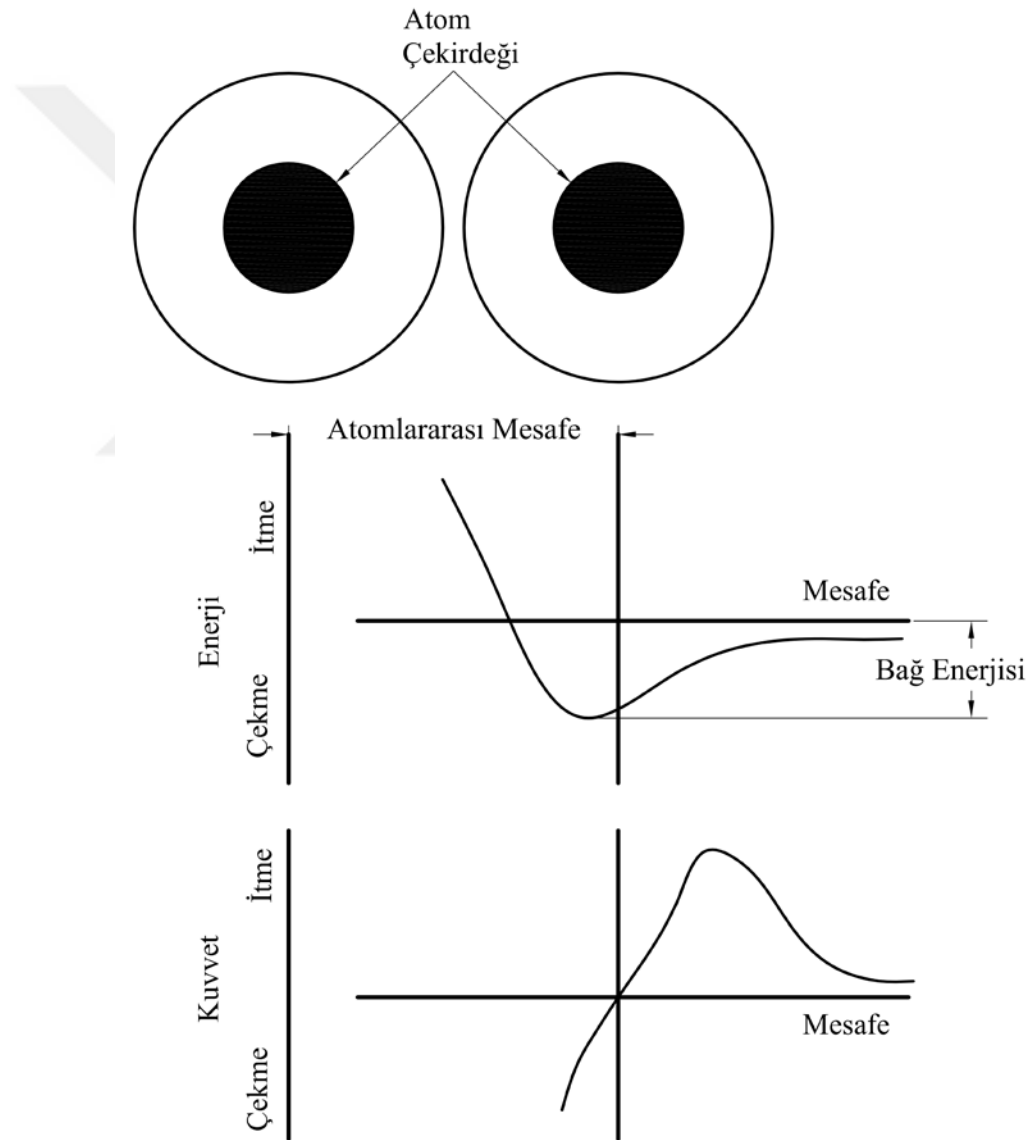
Gerçekleştirilen bu çalışmada, üretilen kendiliğinden yerleşen beton karışımları sıvı nitrojen içerisinde 1 ve 5 çevrim donma-çözülmeye maruz bırakılmıştır. Literatürdeki çalışmaların ortak kanaatlerinden biri olan, beton neminin kriyojenik sıcaklıklardaki betonun performansını etkileyen önemli parametrelerden biri olması nedeniyle, suda kür ve havada kür olmak üzere iki farklı kür yönteminin etkisi de bu çalışma kapsamında araştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada, kriyojenik sıcaklık etkisindeki betonun kırılma mekaniği performansı belirlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, beton dayanımı, dinamik elastisite modülü, ultrases geçiş hızı gibi özelliklerin kendiliğinden yerleşen beton numunelerinin kriyojenik donma-çözülme etkisi altındaki değişimi ve kırılma mekaniği performansı belirlenmiştir.

1.5. KIRILMA MEKANIĞİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Hemen hemen tüm mühendislik malzemeleri mikroskobik boyutlarda olsalar bile çatlak içerirler. Servis koşullarında bu çatlaklar ilerleyerek birbirleri ile kesişirler ve gözle görünür bir hal alırlar. Bu şartlar altında elemanın yapısal bütünlüğü için, çatlağın ne zaman oluştuğunun, ne zaman ve nasıl büyüyeceğinin, bu çatlağın ilerleyip

ilerlemeyeceğinin ve elemanın bu şartlar altında hasar oluşumunun bilinmesi gerekmektedir. İşte tüm bu soruları cevaplamaya yardımcı olan bilim dalı kırılma mekaniğidir [34].

Katı cisimlerin dayanımı, atomları arasındaki bağların dayanımları ile ilgilidir. Atomların bağ kuvvetleri arasındaki uzaklığa bağlı olarak iki türdür. Ancak bu davranış klasik kuvvet kanunlarından farklı olarak moleküller arası bağ kuvvetinin en yüksek değerine eşittir. Dış etkiler bu değeri aşınca, kohezyon yenilmekte ve cisim parçalara ayrılmaktadır [35].

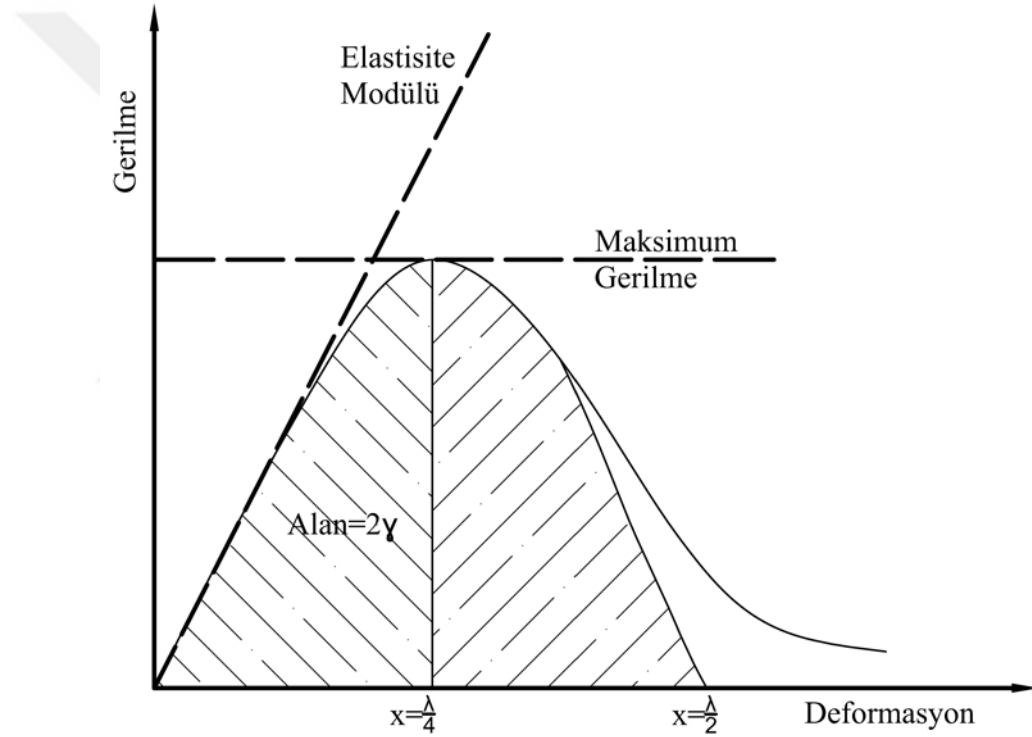


Şekil 1.6. Atomlar arası denge konumu ve etkileşimler

İdeal kusursuz bir kristalin bağ mukavemeti, teorik olarak onun kırılma mukavemetine eşittir. Şekil 1.6'da görüldüğü üzere iki atom arasında denge konumundaki mesafe,

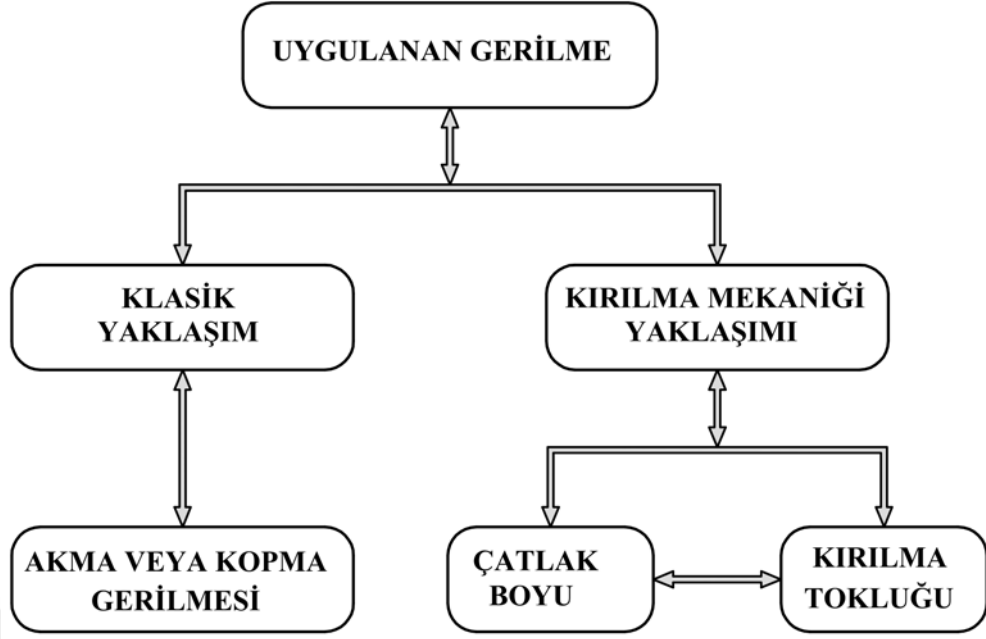
atomlar arasındaki itme ve çekme kuvvetlerinin dengede olduğu durumda sağlanır. Bir kristal malzemede çekme gerilmesi altında bütün bağlar aynı miktarda gerilirler. Gerilme değeri, bir bağ üzerindeki kuvvetin, gerilme yönüne dik birim alandaki bağ sayısı ile çarpımı şeklinde ifade edilebilir [36].

Uygulamada kuvvet yaklaşımından daha çok gerilme yaklaşımı tercih edilmektedir. Malzemenin kohezif mukavemetinin tayini için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda kohezif mukavemet ile deplasman arasında bir sinüs bağıntısının olduğu varsayılmıştır. Şekil 1.7'de gösterilen eğrinin altında kalan alan kırılma sonucu meydana gelen iki yeni yüzeye ait enerji miktarlarının toplamına eşittir [35].



Şekil 1.7. Atomik gerilme deformasyon eğrisi

Klasik yapısal tasarım ile kırılma mekaniği yaklaşımının karşılaştırması Şekil 1.8'de görülmektedir. Klasik mukavemet yaklaşımında, yükleme sonucu parçada ortaya çıkan maksimum gerilme malzemenin akma veya kopma gerilmesine göre kıyaslanmaktadır. Bu yaklaşım tek eksenli gerilmeler için doğru sonuçlar vermekle birlikte iki ya da üç eksenli gerilmeler için geçerli olmamaktadır. Ancak tasarımda gerilmelerle birlikte göz önüne alınması gereken başka faktörlerde bulunmaktadır. Örneğin parça içerisinde çatlaklar söz konusu olabilir, malzeme kusurlu olabilir, ortam zararlı olabilir, parçanın kullanım ömrü çok uzun ve tekrarlı olabilir.



Şekil 1.8. Kırılma mekaniği ve klasik yaklaşımın karşılaştırılması [34, 37].

Tüm bu etkileri de yalnızca bir tek emniyet gerilmesi katsayısı kullanarak ele almak mümkün olmamaktadır. İşte kırılma mekaniği yaklaşımında yükleme sonucu elemanda oluşan gerilmeyle birlikte parça içerisinde bulunan çatlaklar veya süreksizlikler de göz önüne alınarak hesaplanan büyüklük, malzemenin akma mukavemeti yerine kırılma tokluğu ile kıyaslanır. Böylece kırılma mekaniğinde iki parametre yerine üç parametrelilik bir yaklaşım sergilenir [34].

Malzemelerin kırılması ile alakalı olarak matematiksel bir yaklaşım ilk olarak 1913’de Inglis tarafından gerçekleştirilmiştir. Inglis, Şekil 1.9’da görüldüğü üzere çekme gerilmesine maruz eliptik deliğe sahip bir düzlemde maksimum gerilmenin yarıçap eğriliğinin ($\rho = b^2 / a$) minimum olduğu tepe noktasında gerçekleştiğini bildirmiştir [38]. Maksimum gerilme;

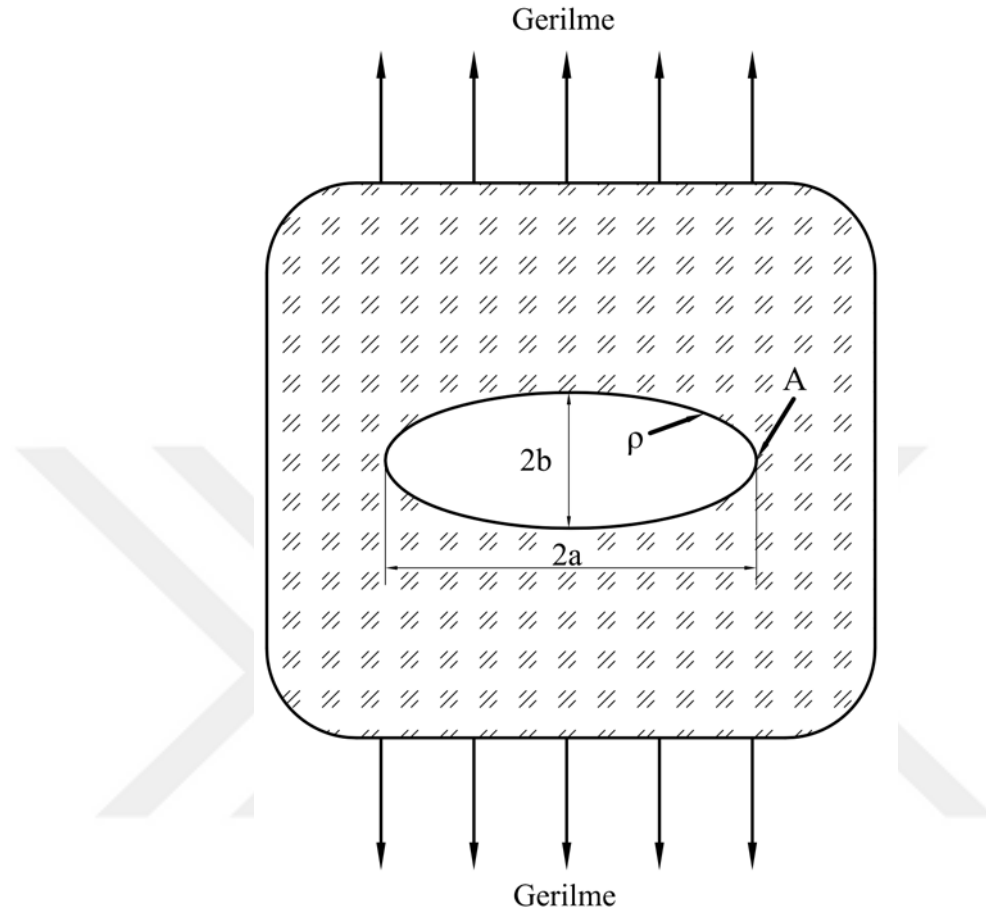
$$(\sigma_y)_{max} = \sigma (1 + 2a/b) \quad (1.1)$$

b’nin sıfıra yaklaştığı limit durumunda;

$$(\sigma_y)_{max} = 2\sigma \left(\frac{a}{\rho}\right)^{0,5} \quad (1.2)$$

Böylece gerçek bir çatlak durumunda ($b=0$) çatlak ucundaki gerilmeler sonsuz büyüklüğe ulaşmaktadır. Bu sonucun deneysel sonuçlar ile uyumsuzluğu 1920’de

Griffith tarafından merkezinde çatlak bulunan cam levhalar üzerinde enerji korunumu yaklaşımıyla yeniden gözden geçirilmiştir [38].



Şekil 1.9. Eliptik bir çatlığa sahip düzlem gerilme hali

Griffith, sistemin toplam enerjisindeki bir azalma ile önceden var olan bir çatlakın ilerlemeye başlayacağını öne sürmüştü ve bu durumu formül ile ifade etmiştir. Griffith'in kırılma modeli basit bir enerji dengesi ile açıklanmaktadır. Gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik gerilme enerjisinde bir azalma olur. İşte bu enerji yeni çatlak yüzeylerinin oluşumu için gerekli enerjidir. Bu teori gevrek katılarda teorik mukavemetin tahminine yaradığı gibi kırılma mukavemeti ile çatlak boyutu arasındaki ilişkiyi de vermektedir [36].

Özellikle Griffith'in gevrek kırılma üzerine yapmış olduğu öncü çalışmanın ardından araştırmacılar yıllar boyunca çatlak ilerlemesinin ardındaki mekanizmayı öğrenmek için çalıştılar. Araştırmaların çoğunda başlangıçta dökme demir ve cam gibi gevrek malzemeler üzerine odaklanmıştır. Sünek malzemelerin kırılması üzerindeki ilgi 1960'lı yıllarda geliştirilen plastik çatlak ucu modeli ardından başlamıştır [39].

Zener ve Holomon 1944'de, Griffith yaklaşımını metalik malzemelerin gevrek kırılmasına uyarlamışlardır. Hemen ardından, 1956'da Irwin, Griffith'in teorisinden yararlanarak Çatlak Yayılma Hızı (G) ve Gerilme Yoğunluk Faktörü (K) yaklaşımını geliştirmiştir [37].

Griffith kırılma için enerji kriterini öneren ilk isim olmasına rağmen, Irwin enerji yaklaşımının günümüzdeki karşılığının ilk sorumlularındandır. İlk olarak Irwin tarafından kavramlaştırılan çatlak ilerleme enerjisi bir başka deyişle çatlak yayılma hızı (G), lineer elastik bir malzeme için çatlak alanındaki potansiyel enerjinin değişimi olarak tarif edilmektedir. Kırılma anında çatlak yayılma hızı ($G=G_c$) olur ki bu da kırılma tokluğunun bir ölçütüdür [37].

G ve K'nın eşdeğerliği, Lineer Elastik Kırılma Mekanizmasının (LEKM) gelişmesine temel olmuştur. Çünkü bir çatlak ucunun etrafındaki ve yakınındaki gerilme dağılımı durumu her zaman (tüm malzemeler için) aynıdır [36]. Çekme gerilmesine maruz 2a çatlak boyuna sahip sonsuz bir plaka için çatlak yayılma hızı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [37].

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (1.3)$$

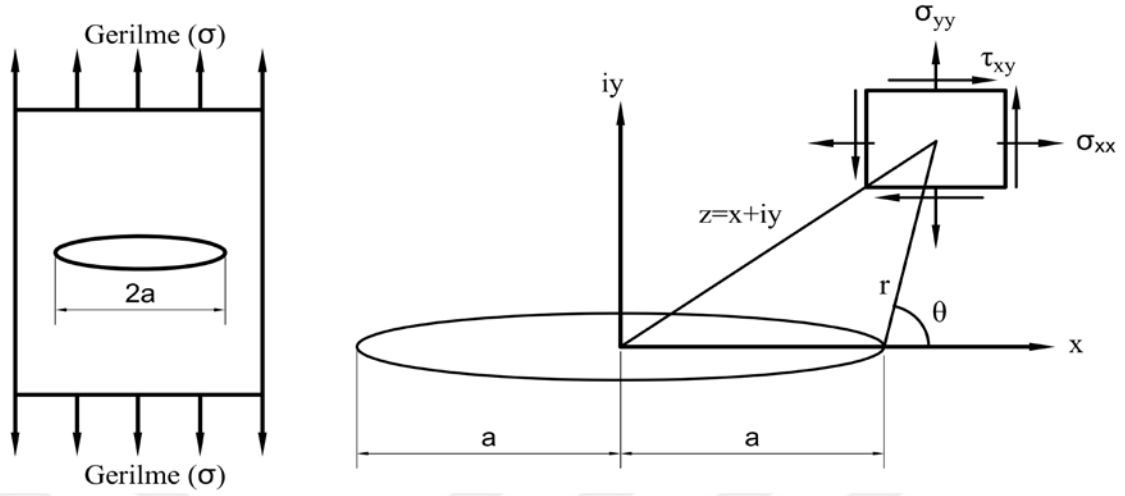
Burada, E, elastisite modülü, σ , uygulanan gerilme, a, çatlak uzunluğunun yarısını ifade etmektedir. Tam kırılma anında $G=G_c$ olur ve denklem aşağıdaki şeklini alır [37].

$$G_c = \frac{\pi \sigma_f^2 a_c}{E} \quad (1.4)$$

Griffith teorisi, enerji yaklaşımını dikkate alıyordu ve bu yaklaşım bazı sınırlamaları birlikte getiriyordu. Bunlar, malzemelerin lineer elastik olduğu varsayımına dayalı olması, malzeme içerisinde bir şekilde çatlağın ilerlemesini durduracak bir mekanizmanın olmadığı ve teorinin yalnızca çatlağın yayılması için gerekli gerilme miktarını vermesidir.

Westergaard (1939) ve Irwin (1955), analitik yolla malzeme içerisinde çatlak ucu etrafındaki gerilmeleri, gerilme yoğunluk faktörü (K) adı verilen bir parametreye bağlı olarak açıkladılar. K her bir yükleme modu için K_I , K_{II} ve K_{III} şeklinde ifade edilmektedir [35]. K, çatlak ucu elastik bölgesinin büyüklüğünü tanımlar. Ayrıca çatlak

ucu gerilme alanının elastik olması şartıyla, malzemelerde çatlak ilerleyişi ile kırılma davranışları arasındaki ilişkiyi belirler [36].



Şekil 1.10. Çatlak ucunda herhangi bir noktadaki gerilme

Sonsuz keskinlikte ($\rho=0$) bir çatlakın ucunda oluşan elastik gerilme alanı Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Burada meydana gelen gerilmeler Çizelge 1.4'de verilmektedir. K ise aşağıda verilen bağıntı ile ifade edilmektedir [34, 37].

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.5)$$

Kırılma mekaniğinin temellerinin Griffith'in beton gibi gevrek olan cam malzemeler üzerinde 1920 yılında yapmış olduğu çalışmalarda atılmasına rağmen, kırılma mekaniği daha çok metalik malzemeler üzerinde uygulanmıştır [40].

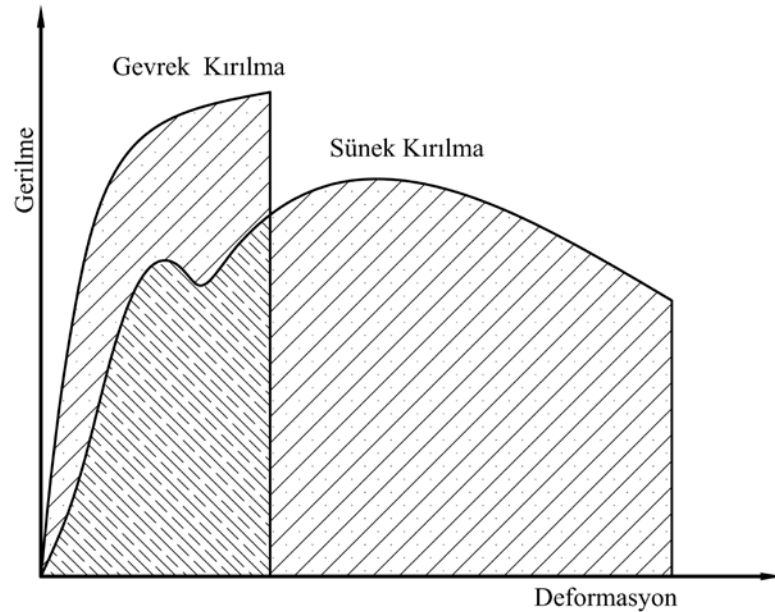
Çizelge 1.4. Mod I ve Mod II durumları için çatlak ucunda oluşan gerilme alanları

	Mod I	Mod II
σ_{xx}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$	$-\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$
σ_{yy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$
τ_{xy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$
σ_{zz}	0 (Düzlem Gerilme) $\nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (Düzlem Uzama)	0 (Düzlem Gerilme) $\nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (Düzlem Uzama)
τ_{xy}	0	0
τ_{yz}	0	0

Kaplan 1961 yılında LEKM prensiplerini betona uyarlamak için çeşitli çalışmalar yapmış ve LEKM varsayımlarının çekme etkisi altındaki betonun kırılma davranışını analiz etmede yetersiz olduğunu vurgulamıştır [41]. Betonun kırılma mekanizmasının bu kadar gecikmiş olmasının başlıca sebepleri, betonun karmaşık içyapısı, kırılma mekanizması ve heterojen yapısı ile ilgilidir. [42]. Yapılan bu çalışma sonrası kırılma mekaniği prensiplerinin betona uyarlanması ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmış sonuç olarak, beton gibi heterojen bir malzemeyi tek bir değişken ile ifade etmenin mümkün olmadığı bu nedenle betonun kırılma mekaniğinin doğrusal olmayan metotlarla incelenmesi gerektiği konusunda birleşmişlerdir [42].

1.6. BETONDA KIRILMA MEKANİĞİ

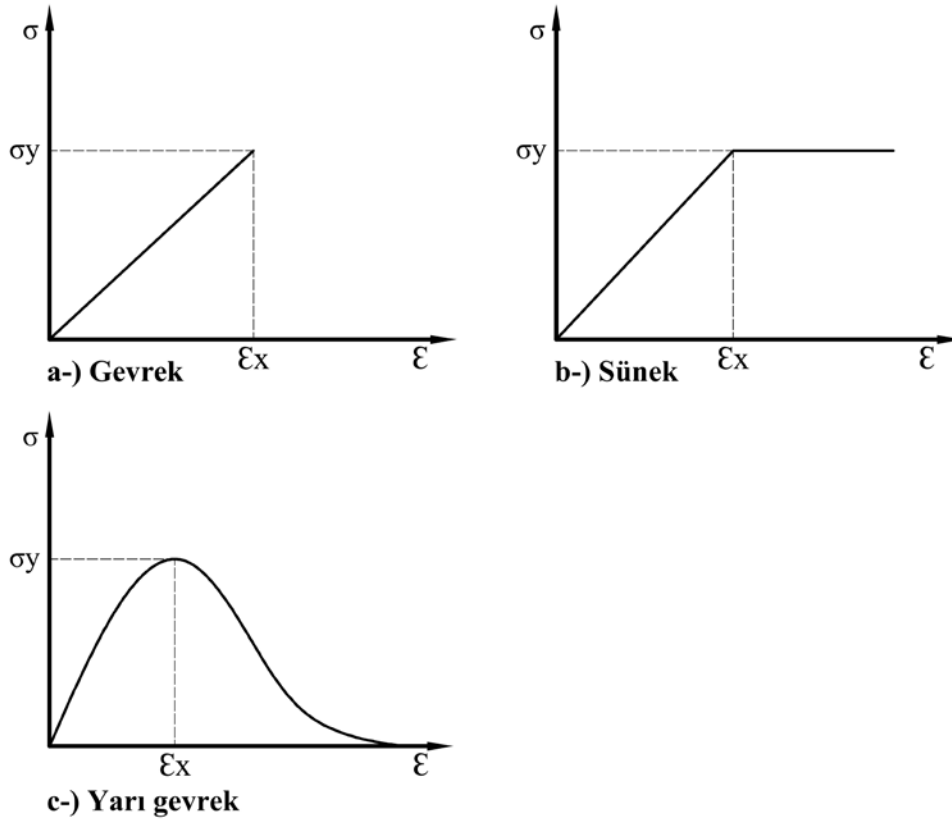
Kırılma (fracture) terimi sık sık hasar (failure) terimi ile eş anlamlı olarak kullanılmaktadır. Ancak bu iki terim aynı işlemi tarif etmemektedir. Hasar, bir elemanın etkisiz hale gelmesi anlamındadır ve kırılma gerçekleşmeden oluşabilir. Örneğin, aşırı deformasyon ya da korozyon nedeniyle yük taşıma alanının azalması sebebiyle hasar oluşabilir. Kırılma ise, bir elemanın statik ya da yavaşça değişen bir yük etkisi altında iki ya da daha fazla parçaya ayrılmasıdır [43].



Şekil 1.11. Gevrek ve sünek kırılma [43].

Şekil 1.11’de gevrek ve sünek malzemelere ait gerilme deformasyon eğrileri görülmektedir. Genel olarak kırılma, gevrek (brittle) ve sünek (ductile) olmak üzere iki

şekilde tanımlanır. Metaller için kırılma mekaniği test yöntemlerinin temelleri oldukça iyi kurulmuştur. Ancak, plastik, seramik ve kompozitlerin kırılma mekaniği temelleri nispeten yenidir ve çözüme kavuşmamış birçok husus bulunmaktadır [37, 44]. Literatürde malzemelerin gerilme-deformasyon eğrileri göz önünde bulundurularak birçok mühendislik materyali gevrek ve sünek dışında bir üçüncü kategori olan yarı gevrek (quasi-brittle) malzeme olarak sınıflandırılmaktadır. Çok fazlı kompozit bir malzeme olan beton, genellikle gevrek (brittle) olarak tanımlanmasına rağmen gerçekte ileri seramiklerin çoğundan daha dayanıklı olan yarı-gevrek bir malzeme olarak nitelendirilmektedir [44-46]. Yarı-gevrek malzemelere en iyi örnekler, beton, buz, kaya ve bazı seramikler olarak sıralanabilir [44]. Şekil 1.12’de gevrek, yarı-gevrek ve sünek malzemenin tipik gerilme deformasyon eğrileri görülmektedir.



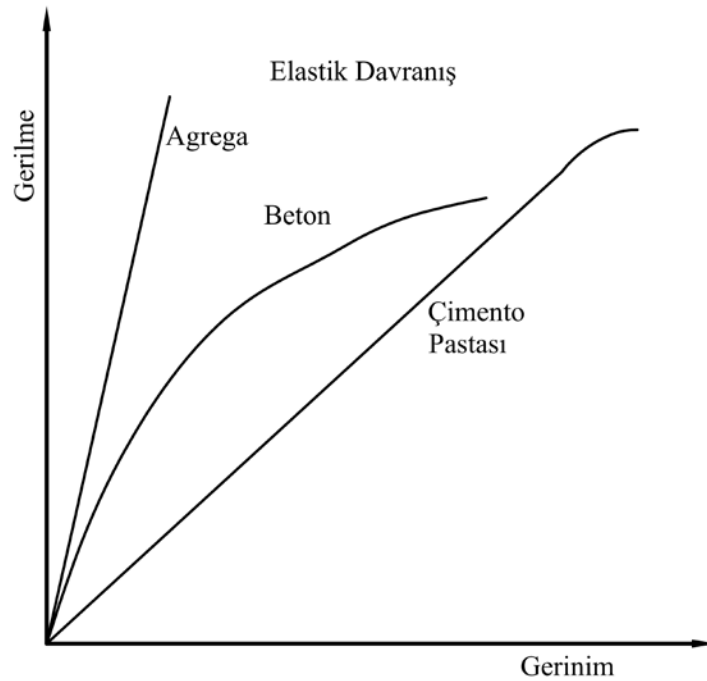
Şekil 1.12. Gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

Gevrek bir malzeme kırıldığında gerilme aniden sıfıra kadar düşer, sünek malzemeler akma yaptıkları zaman gerilme bir müddet sabit kalır, yarı-gevrek malzemelerde ise pik yükün ardından gerilme değerinde dereceli olarak bir azalma meydana gelmektedir [46]. Gevrek malzemelerde gözlenen düşük gerilmelerin nedenini açıklamak üzere camlar üzerinde çalışan Griffith, bu malzemelerde bulunan küçük çatlakların malzemenin

dayanımında etkili olduğunu ileri sürmüştür. Çatlağın etkisi çatlak ucu bölgelerinde gerilme yoğunlaşmaları ile ortaya çıkmakta ve malzeme üzerindeki gerilme $E/10$ değerinden çok daha düşük iken kırılmaya neden olan çatlak ucundaki $E/10$ değerindeki gerilmedir [43].

1.7. BETONUN DOĞRUSAL OLMAYAN KIRILMA MEKANİĞİ

Eğer kırılma işlemi çatlak ucundaki tek bir noktada meydana geliyorsa tüm gövde elastiktir ve lineer elastisite kullanılabilir. Ancak, kırılma işlemi sonsuz bir çizgi üzerinde ya da sonsuz bir bölgede meydana geliyorsa gövde lineer olmayan (nonlineer) anlamda davranır. Kırılma işlem bölgesi çok geniş olan ve tek bir nokta olarak düşünülmeyecek birçok gevrek malzeme bulunmaktadır [44, 47]. Betonun içyapısının farklı düzeylerde heterojen olduğu ve herhangi bir yük uygulamasından önce bile bünyesinde bazı mikroçatlaklar ve gözenekler bulunduğu bilinmektedir. Dolayısıyla betonda belirli bir gerilme durumu altında kırılma, bu mikroçatlaklardan en kritik olanlarının, en kritik gerilme yığılma noktalarını seçerek, tek başına veya diğer çatlaklarla birleşerek dengesiz yayılması sonucu olacaktır [44].

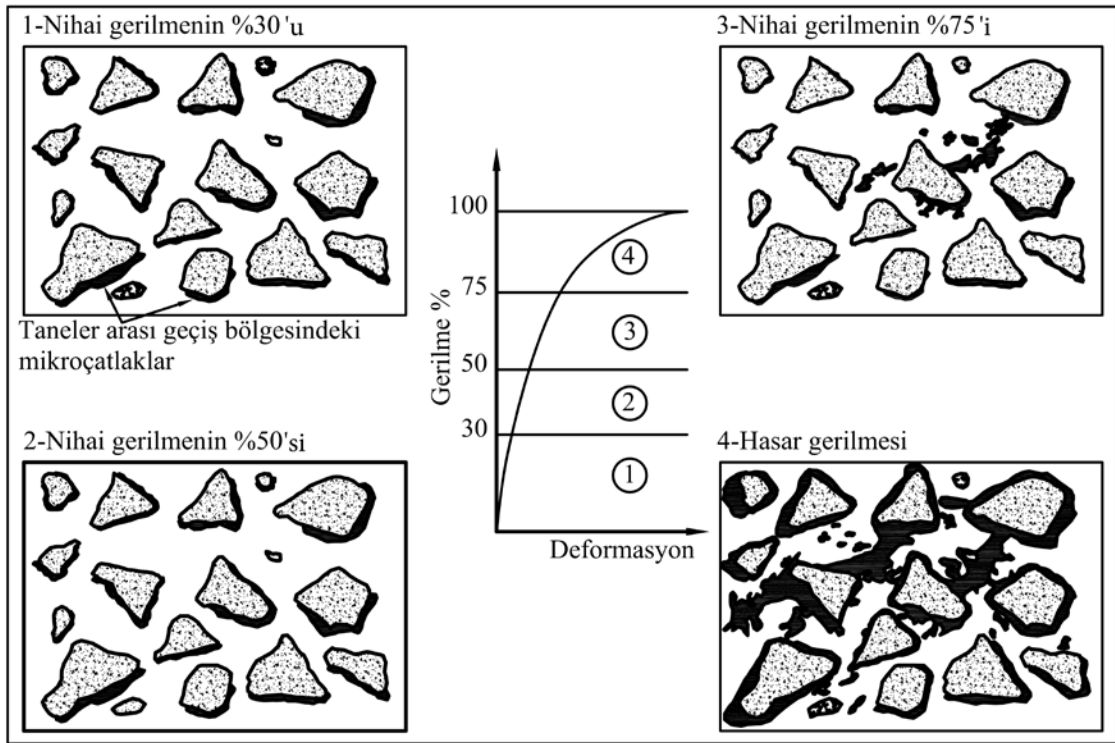


Şekil 1.13. Agregat, çimento pastası ve beton için tipik gerilme-gerinim eğrileri [48].

Bu sırada diğer çatlaklar oluşmaya ve yayılmaya devam edecektir. Beton bileşenleri içerisinde en elastik malzeme agregadır. Çimento hamuru da oldukça elastik ve

doğrusal bir gerilme-birim deformasyon bağıntısı göstermekte, ancak bağıntı harçta biraz daha fazla doğrusallıktan sapmaktadır [42]. Betonun lineer olmayan davranışına rağmen, gerilmelerin neden olduğu deformasyonların belirlenebilmesi için elastisite modülünün tahmin edilmesi zorunludur. Agrega, çimento ve beton için tek eksenli basınç gerilmesi altında tipik gerilme-birim deformasyon eğrileri Şekil 1.13’de verilmiştir [48].

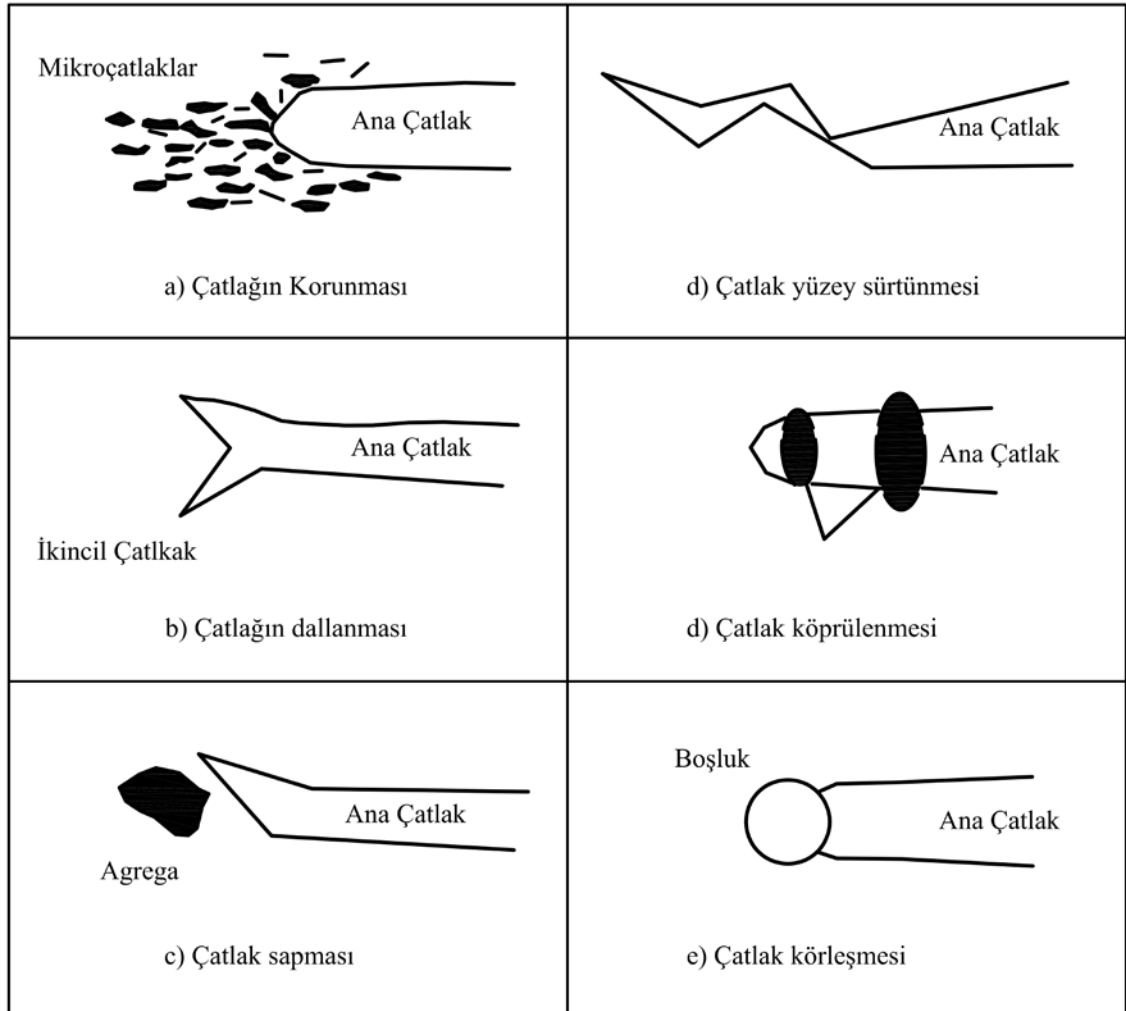
Karmaşık kompozit malzemelerin özelliklerinin kendi bileşenlerinin özelliklerinin toplamı olması gerekirken, çimento pastası ve agreganın lineer elastik bir özellik göstermesine karşın beton lineer olmayan bir davranış sergilemektedir [48]. Betonun gerilme birim deformasyon eğrisi incelendiğinde, betonun gerilme seviyesi ile mikroçatlak oluşumu arasındaki ilişki dört farklı aşamada incelenebilmektedir.



Şekil 1.14. Betonda gerilme düzeyi ve mikroçatlak oluşumu ilişkisi [48].

Birinci aşamada, Şekil 1.14’de nihai gerilmenin %30’u aşılmaya başladığında taneler arası geçiş bölgesindeki mikroçatlakların boyunda, genişliğinde ve sayısında bir artış gözlemlenir. Böylece birim deformasyonun gerilmeye oranında artış gözlenir ve eğrinin lineerliğinden sapmalar başlar. Bununla birlikte nihai gerilmenin %50’sine kadar taneler arası geçiş bölgesindeki mikroçatlakların kararlı durumda oldukları görülmektedir.

İkinci aşamada matris çatlaması ihmal edilebilir. Üçüncü aşamada, nihai gerilmenin %50'si ile %60'ı arasında matris içerisinde çatlaklar oluşmaya başlar. Gerilme oranı %75 ulaşıncaya sadece tanelerarası geçiş bölgesindeki mikroçatlaklar kararsız olmaya başlamaz aynı zamanda matris içerisindeki çatlakların ilerlemesi çoğalır böylece gerilme-deformasyon eğrisi yatay pozisyonunu alır. Dördüncü aşamada, nihai gerilmenin %75'ini aşınca gerilmenin artmasıyla yüksek deformasyonlar gözlenir ve çatlaklar taneler arası geçiş bölgesi ile matris içerisinde hızlıca yayılır [48]. Betonun bu karmaşık içyapısı, kırılma mekanizması ve heterojenliği nedeniyle betonda kırılmanın, kırılma mekaniği prensipleri ile incelenmesi 1961 yılına kadar gecikmiştir [42]. LEKM çatlak ucundaki gerilmelerin sonsuza ulaştığı gerçeğine dayalıdır.



Şekil 1.15. Betonun kırılma işlem bölgesinde meydana gelen çatlak mekanizmaları [46].

Beton heterojen ve birden çok fazdan meydana gelen bir malzeme olduğundan, çatlak ucundaki elastik olmayan bölge kırılma işlem bölgesi (fracture process zone) olarak

adlandırılır ve karmaşık mekanizmalar tarafından kontrol edilir. Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla betonun çatlak ucunda yapılan araştırmalarda betonun çatlak yüzeyinin kıvrımlı ve eğri olduğunu ayrıca betondaki çatlak işlem bölgesinin oldukça karmaşık olduğu bildirilmiştir. Betondaki çatlak işlem bölgesinin karmaşık olmasının birçok sebebi olduğu bilinmektedir. Bunlardan bazıları Şekil 1.15’de gösterilmiştir. Yükleme anında çatlak ucunda bazı mikroçatlak kusurları oluşur. Bu kusurlar, su ile dolu gözeneklerden, beton dökümü esnasında meydana gelen hava boşluklarından ve kür işlemi esnasında oluşan büzülme çatlaklarından kaynaklanmaktadır [46].

Beton, ilerleyen çatlak önünde oluşan kırılma-gelişme bölgesinin varlığı nedeniyle çekme gerilmeleri altında yumuşama davranışı gösterir ve bu nedenle yarı-gevrek bir malzeme olarak kabul edilir. Çatlak ucunda gerilmenin teorik olarak sonsuza gittiğini varsayan LEKM beton gibi yarı gevrek malzemelere doğrudan uygulanamaz. Bundan dolayı, lineer olmayan kırılma mekaniği modelleri geliştirilmiştir [49]. Yarı gevrek malzemelerin kırılma mekaniği modelleri Fiktif Çatlak Modeli ve Eşdeğer-Elastik Çatlak Yaklaşımı (Efektif-Elastik Çatlak Modeli) olarak sınıflandırılabilir [46].

1.7.1. Fiktif Çatlak Yaklaşımı

Fiktif çatlak yaklaşımı, yeni yüzeylerin oluşmasına neden olan enerjinin bu yüzeyleri ayırmak için gerekli enerjiden küçük olduğunu varsayar ve enerji oranı terimi (G_{Ic}) bu modelde yok sayılır [46]. Mod I durumuna uyan çentikli numuneler üzerindeki gerilmeleri ve bu gerilmeler altında çatlak ucundaki gerinim değerlerinin kullanıldığı modelde çatlağın ucundaki kırılma bölgesi araştırılmaktadır. Hillerborg 1978 yılında problemin nümerik çözümü (SEM = Sonlu Elemanlar Metodu) için bir hayali çatlağın varlığını ve bu çatlağın gerilmeleri, hayali çatlak genişliğine bağlı olarak aktardığını kabul etmiştir. Kuvvetler aktarılırken hayali çatlağın uzunluğu ve genişliği artacaktır. Genişlik limit değerine ulaştığında gerilmeler hayali çatlağın ucunda sıfıra inecek ve hayali çatlak gerçek bir çatlağa dönüşecektir [35]. Bu modelde çekme gerilmesi ile çatak açılması eğrisinin altında kalan alan kırılma tokluğu (G_F) olarak gösterilir ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir [46, 49].

$$G_F = \int_0^{w_c} \sigma(w)dw \quad (1.6)$$

Burada w_c , yumuşama gerilmesi sıfır olduğu zaman elde edilen kritik çatlak açılması deplasmanıdır. Malzemenin kırılma tokluğu G_F , birim çatlak alanında sönmülenen enerji olarak gösterilir ve malzemenin bir kırılma parametresidir. Fiktif çatlak modelinde, yumuşama gerilmesi ile çatlak açılması $\sigma(w)$ eğrisi, geometri ve boyuttan bağımsız bir malzeme özelliği olarak kabul edilir [46, 49].

1.7.2. İki Parametrelili Kırılma Modeli (İPKM)

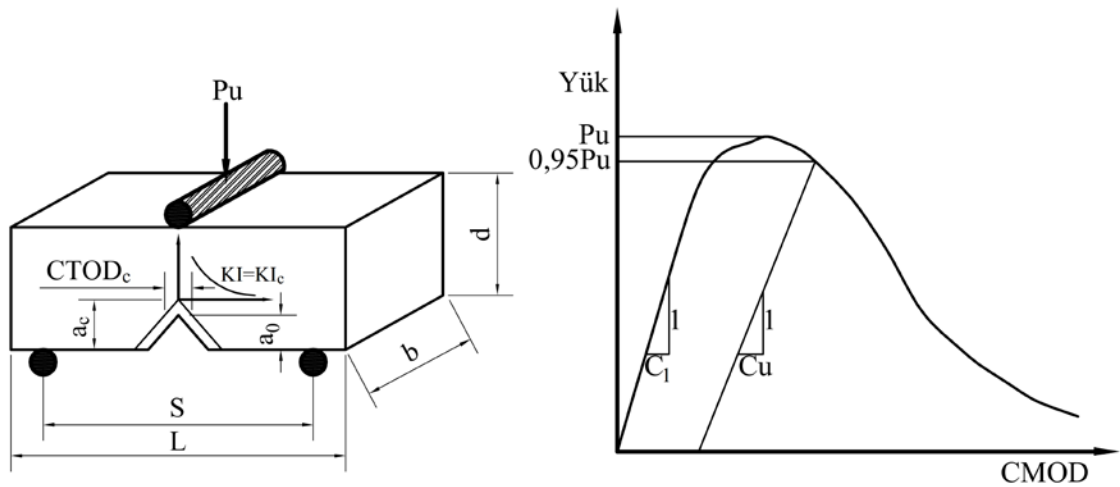
Jenq ve Shah tarafından geliştirilen betonun iki parametrelili kırılma modelinde, çentik uzunluğu a_0 olan gerçek bir yapının pik yük öncesi lineer olmayan davranışı çatlağın efektif uzunluğu a_e ($a_e > a_0$) olan eşdeğer elastik bir yapı vasıtası ile kurulur [42, 44]. İki bağımsız malzeme parametresi olan kritik gerilme yoğunluk faktörü K_{Ic}^s ve kritik çatlak ucu açılma yer değiştirmesi $CTOD_c$ etkili çatlağın kritik durumu için tanımlanır.

Bu kritik durum genellikle maksimum yükte ve aynı zamanda etkili çatlak uzunluğuna (a_c) erişildiğinde söz konusu olmaktadır. Bu kritik durumda;

$$K_I = K_{Ic}^s \text{ ve } CTOD = CTOD_c \quad (1.7)$$

olmaktadır.

İPKM'nin şematik gösterimi Şekil 1.16'da verilmektedir [42, 44]. Burada L , kirişin uzunluğu S , numunenin yükleme mesafesi b , genişlik ve d , yükseklik a_0 , ilk çatlak boyu olarak ifade edilmektedir.



Şekil 1.16. İki parametrelili kırılma modelinin şematik gösterimi [42].

İki parametrelili modelde çözüme iki yoldan ulaşılmaktadır. Bunlar komplians metodu ve pik yük metodudur [42, 44]. Bu çalışmada pik yük metodu kullanıldığı için burada pik yük metodu anlatılmıştır.

1.7.2.1. Pik Yük Metodu

Bu yaklaşımda, komplians metoduna nazaran daha az kapasiteli deney ekipmanına ihtiyaç duyulmasına rağmen, “ya aynı boyutta farklı çentik boyuna ya da farklı boyutta aynı relatif çentik boyuna sahip” en az iki numunenin pik yük değerinin belirlenmesi esastır. Bu metot, hem üç noktalı eğilmeye maruz kirişlere, hem silindir numunelere hem de eksantrik basınç numunelerine uygulanabilmektedir [44].

Yerinde dayanım belirlemede karot alımı sayesinde silindir basınç numuneleri almak mümkün iken, bir yapıdan kırış örnekleri alıp incelemek teknik bakımdan imkânsızdır. Bu nedenle yerinde betonun kırılma davranışını incelemek için farklı geometrideki modeller geliştirmek gerekmektedir. Laboratuvar deneylerinde, kırılma mekaniği testlerinde en çok üç noktalı eğilmeye maruz kırış numuneler kullanılmaktadır. Pik yük metodu bu anlamda, hem kırış hem de yarmada çekme numunelerinin kullanılması için uygun bir metot olarak karşımıza çıkmaktadır [42].

Metot iki farklı numune üzerinden alınan K_{lc}^s ve $CTOD_c$ gibi kırılma parametrelerini aşağıdaki eşitliklerle çözümlenmeye çalışır.

$$K_I^1(\sigma_{Nc}^1, a_c^1) = K_{lc}^s \quad (1.8)$$

$$CTOD^1(\sigma_{Nc}^1, a_c) = CTOD_c \quad (1.9)$$

$$K_I^2(\sigma_{Nc}^2, a_c^2) = K_{lc}^s \quad (1.10)$$

$$CTOD^2(\sigma_{Nc}^2, a_c^2) = CTOD_c \quad (1.11)$$

Burada 1 ve 2 olarak kullanılan üst simgeler iki farklı numuneyi temsil etmektedir. K_{lc}^s ve $CTOD_c$ birer malzeme özelliğidir ve verilen malzeme için aynı olmalıdırlar, bu katsayılar geometriden ve numune boyutlarından bağımsızdır. σ_N gerilmeleri alınan yük değerine göre hesaplanabildiğinden, eşitlikteki ifadelerden bilinmeyen olarak yalnızca a_c^1, a_c^2, K_{lc}^s ve $CTOD_c$ kalmaktadır. Bu da önerilen bu modelin teorik temelini

oluşturur ve bu dört nonlinear denklem takımının çözümü ile K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ elde edilmiş olur [44, 50].

En az iki farklı geometrinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Ya aynı boyuta, farklı çentik uzunluklarına sahip iki numune ya da farklı boyuta aynı çentik uzunluğuna sahip numuneler kullanılmalıdır. Denklemlerden elde edilen K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ değerleri modelin boyut ve geometrisine göre birer ayırt edici malzeme parametresidir.

Gerilme şiddet çarpanı,

$$K_I = \sigma_N \sqrt{\pi a} F(\alpha, \beta) \quad (1.12)$$

σ_N , nominal dayanım(α, β)fonksiyon sabitleri olarak ifade edilebilir. Üç noktalı eğilmeye maruz kiriş numuneler gerekli fonksiyon $F(\alpha)$ olarak ifade edilirse

$$F(a) = \frac{1.99 - a(1-a)(2.15 - 3.93a + 2.7a^2)}{\sqrt{\pi} (1+2a)(1-a)^{3/2}} \quad S = 4d \quad (1.13)$$

$$V(\alpha) = 0.76 - 2.28a + 3.87\alpha^2 - 2.04\alpha^3 + \frac{0.66}{(1-\alpha)^2} \quad S = 4d \quad (1.14)$$

Kiriş numuneler için kritik gerilme yoğunluk faktörü, Denklem 1.15 ile ifade edilir.

$$K_{Ic}^s = \sigma_N \sqrt{\pi a} F(\alpha) \quad (1.15)$$

Nominal dayanım ise P_u , kırılma yükü s , mesnet aralığı b , numune kalınlığı d , numune karakteristik boyutu (yüksekliği) olmak üzere, denklem 1.16 ile hesaplanır.

$$\sigma_N = \frac{3P_u S}{2bd^2}, (S=4d \text{ için}) \quad \sigma_N = \frac{6P}{bd} \quad (1.16)$$

Kritik çatlak ucu açılım deplasman değeri de denklem 1.17 bağıntılarıyla hesaplanmıştır.

$$CTOD_c = \frac{6Pu S a_c}{Ebd^2} V(\alpha) \left\{ \left(1 - \frac{y}{a} \right)^2 + \left(1,081 - 1,149 \frac{a}{d} \right) \right\} \left[\frac{y}{a} - \left(\frac{y}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.17)$$

1.8. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON (KYB)

Dünya genelinde hızla değişen şartlar ile birlikte ihtiyaç duyulan yapıların inşasında beton yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. En önemli yapı malzemeleri arasında yer alan beton yapı endüstrisi için büyük bir öneme sahiptir. İlk kullanıldığı günden bu güne, teknolojinin ve bilimin katkısı ile birlikte farklı bir boyut kazanmış, zaman içerisinde fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirilmiştir.

Geleneksel betonun üretilmesinden taşınmasına, kalıba yerleştirilmesine, istenilen kalıbın şeklini almasına, yüksek kompositeyi sağlamak için zaman ve iş gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda betondan beklenen dayanım ve dayanıklılık özelliklerini taşıması gerekmektedir. Bu ve bunun gibi ihtiyaç duyulan özelliklerde geleneksel beton üretimi nitelikli iş gücü ile sağlanmaya çalışılmaktadır.

Üretilen betonun kalıba yerleştirilmesi aşamasında nitelikli iş gücünü bulmak her zaman mümkün olmamakta, aynı zamanda dar ve derin kesitlerde yerleştirme işlemi istenilen ölçüde gerçekleştirilememektedir. Yaşanılan sorunlar nedeniyle Japonya'da 1980'li yıllarda Hajima Okamura tarafından ileri sürülen betonun kendi ağırlığı ile kalıba yerleşmesi düşüncesi günümüzde yaygın olarak kullanılan kendiliğinden yerleşen beton teriminin temelini atmıştır.

İlerleyen yıllarda öne sürülen kendiliğinden yerleşen beton düşüncesi hayata geçirilerek 1988 yılında ilk prototip üretilmiştir. Bu gelişme ile birlikte kendiliğinden yerleşen beton üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Fakat kendiliğinden yerleşen beton tasarımı, geleneksel beton tasarımının aksine kimyasal katkılarla birlikte toz malzeme olarak nitelendirilen puzolanların kullanılmasını beraberinde getirmektedir. Bu malzemelerin uygun oranlarda karıştırılarak elde edilen ürünün denetimi, kontrolü vb. için geleneksel betondan farklı deney yöntemleri geliştirilmiştir.

Genel olarak bir betonun kendiliğinden yerleşen beton olarak adlandırılması için taşınması gereken özellikler: doldurma kabiliyeti, geçme kabiliyeti, ayrışmaya karşı direnç olarak sıralanabilir.

Kendiliğinden yerleşen beton, yüksek akışkan özelliğe sahip, dayanım ve dayanıklılık açısından üstün performanslı, sık donatılı alanlara segregasyona uğramadan ve vibrasyona ihtiyaç duymadan yerleşebilen bir beton türüdür [51, 52].

Düşük su/çimento oranına sahip ve geleneksel betonlara kıyasla farklı özellikler sergileyen kendiliğinden yerleşen betonların üretiminde “Toz Tipi”, “Viskozite Tipi” ve “Birleşik Tip” olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmaktadır [53]. Taze haldeyken hedeflenen akışkanlık özelliğini gösterebilmesi için karışım içerisinde yüksek oranda toz malzeme kullanmak gerektiğinden ilk uygulamalarında yüksek çimento içeriğinden dolayı büzülme ve yüksek hidrasyon gibi olumsuz durumlar gözlemlenmiştir [54].

Büzülme, yüksek hidrasyon, maliyet gibi olumsuzluklar ve harç reolojisinin geliştirilmesi açısından günümüzde kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında toz malzeme olarak adlandırılan, uçucu kül, ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü, metakaolin ve taş tozu gibi filler malzemeler (<125 mm) kullanılmaktadır [51]. Uygun su/toz oranı ve beton karışımına katılan hava sürükleyici, süper akışkanlaştırıcı, viskozite düzenleyici gibi mineral veya kimyasal katkıların kullanımı ile istenilen özellikte yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen beton tasarımları gerçekleştirilmektedir [51, 55].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal kısmında çalışmanın kapsamı neticesinde çimento, agrega, YFC, hiperakışkanlaştırıcı, su ve kullanılan diğer malzemeler ile çalışmayı gerçekleştirmek için kullanılan test cihazları ve ekipmanlar hakkında bilgi verilmektedir. Yöntem kısmında ise malzeme deneyleri ve özelliklerini belirlemek için kullanılan yöntemler, bu malzemeler ile üretilen beton karışım oranları, yapılan deneyler ve kriyojenik kür işleminin gerçekleştirme aşamaları anlatılmıştır.

2.1. MATERYAL

Deneysel çalışma için üretilmiş olan KYB karışımlarının hazırlanması için, Yüksek Fırın Cürufu (YFC), CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu, agrega, su ve hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Maksimum agrega çapı ve üretilecek kiriş boyutları iki parametrelili kırılma modeli ile boyut etkisi yöntemi dikkate alınarak belirlenmiştir [56]. Çalışmada kullanılan metal kalıp ve çentik aparatları üç farklı boyutta ve her boyut için 3 farklı çentik içerecek şekilde tasarlanmıştır. Oluşturulan çentiklerin boyları kiriş yüksekliğinin %10, %20 ve %30'u olacak şekilde tasarlanmıştır.

2.1.1. Çimento

Çalışmada kullanılan çimento CEM I 42,5 R tipi çimentodur ve Oyak Bolu Çimento Fabrikası A.Ş'den temin edilmiştir. CEM I 42,5 R tipi çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. CEM I 42,5 R tipi çimento ve YFC'nin teknik özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (%)	YFC	CEM I 42,5 R	Çimentonun Fiziksel özellikleri	
SiO ₂	40,52	18,95	Priz başlangıcı (sa/dk)	02:19
Fe ₂ O ₃	1,10	4,07	Priz sonu (sa/dk)	03:53
TiO ₂	0,98	–	Hacim sabitliği (mm Toplam)	1,31
Al ₂ O ₃	14,59	5,32	Özgül ağırlık	3,16
CaO	34,18	64,72	Özgül yüzey (cm ² /g)	4208

Çizelge 2.1. (Devam) CEM I 42,5 R tipi çimento ve YFC'nin teknik özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (%)	YFC	CEM I 42,5 R	Çimentonun Fiziksel özellikleri	
MgO	7,29	1,35	Elek üstü (45 µ) %	3,64
Na ₂ O	0,58	0,16	Basınç dayanımı (MPa)	
K ₂ O	1,1	0,51	2. Gün	31,10
SO ₃	0,16	2,7	7. Gün	39,61
Toplam Alkali	-	0,61	28.Gün	55,22
Kızdırma Kaybı	-	4,21	Eğilme Dayanımı (MPa)	
Çözünmeyen kalıntı (%)	-	0,69		
SCaO (%)	-	1,41	28. Gün	8,44

2.1.2. Yüksek Fırın Cürufu

Gerçekleştirilen çalışma için kullanılan YFC, Oyak Bolu Çimento Ereğli Öğütme ve Paketleme Tesislerinden temin edilmiş olup fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

2.1.3. Hiperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

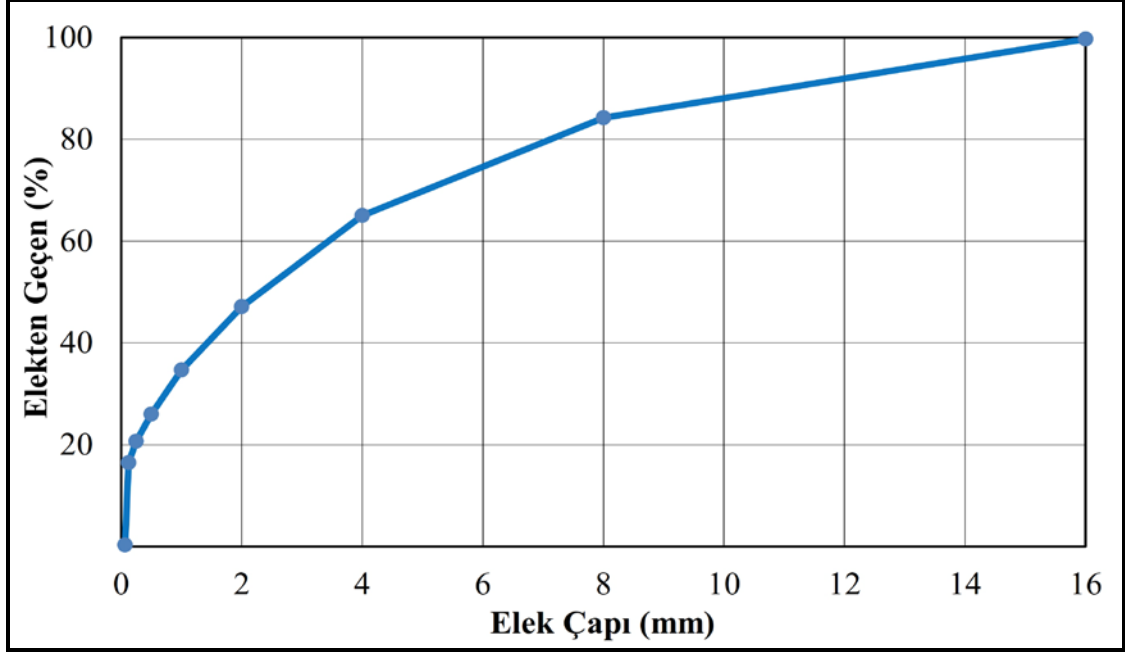
Çalışmada kullanılan "Sika Viscocrete Hi-Tech 79" yüksek oranda su azaltıcı, hiper akışkanlaştırıcı beton katkısı, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'den temin edilmiş olup firmanın açıklamış olduğu ürün bilgisi Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Hiperakışkanlaştırıcı katkıya ait teknik özellikler

Teknik Özellikler	Test Metodu	Sonuçlar	Sika Standart		EN 934-1'in Standart Değerleri
Homojenlik	Görsel	Homojen	Homojen		Homojen. Ayırışma, beyan edilen sınırı aşmamalıdır.
Renk	Görsel	Kahverengi	Kahverengi		Üniform ve üreticinin verdiği tarife uygun
Efektif Bileşen	EN 480-6	-	-		Referans IR ile kıyaslandığında değişiklik göstermemelidir.
Yoğunluk 20°C, g/cm ³	ISO 758	1,0671	1,04	1,08	d>1,10: d±0,03, d<1,10 : d±0,02
Katı Madde Yüzdesi, %	EN 480-8	20,06	14,00	23,00	T>%20: 0,95T<X<1,05T T<%20: 0,90T<X<1,10T
pH, (%10'luk Çözelti)	ISO 4316	4,72	3,00	7,00	Üreticinin beyan ettiği değer ±1 veya beyan ettiği aralık içinde
Suda Çözünebilir Klor Yüzdesi, %	EN 480-10	0,0547	Max. 0,10		Maksimum % 0,10 veya beyan ettiği değer altında
Alkali Yüzdesi, % (Na ₂ O'e ekivalendir.)	EN 480-12	0,86	Max. 3,00		Üreticinin beyan ettiği en yüksek değer altında
Korozyon Davranışı	EN 480-14	Korozyona etkisi yoktur	Korozyona etkisi yoktur		Korozyona etkisi yoktur

2.1.4. Agrega

Çalışmada en büyük dane çapı 16 mm olan, Düzce yöresinden temin edilen Koç Beton A.Ş. firmasının üretmiş olduğu kireçtaşı kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi

Kullanılan agregaya ait fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.3'de agrega granülometrisi ise Şekil 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Karışımda kullanılan agregaya ait fiziksel ve mekanik özellikler

Özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları (TS EN 1097-6)			
Numune	Görünür Tane Yoğunluk (mg/m ³)	Doygun Tane Yoğunluk (mg/m ³)	Su Emme (%)
İnce	2,728	2,658	1,56
İri	2,725	2,711	0,31
Gevşek ve sıkışık yığın yoğunluğu deney sonuçları (TS EN 1097-3)			
Numune	Gevşek Yığın Yoğunluğu (kg/m ³)	Sıkışık Yığın Yoğunluğu (kg/m ³)	
İnce	1782	1948	
İri	1418	1605	
Agrega aşınma ve ezilme dayanımı deney sonuçları (TS EN 1097-2, TS EN 13055-1)			
Numune	Aşınma Dayanımı (%)	Agrega ezilme dayanımı (%)	
İri	25,53	28,16	
Agrega ince madde miktarı (TS EN 933-9)			
Numune	iri agrega (%)	ince agrega (%)	
	0,596	0,574	

TS EN 933-9 standardına uygun olarak yapılan metilen mavisi deneyi ardından ince agreganın metilen mavisi değeri 1 olarak hesaplanmıştır. İki farklı boyuttaki agrega için ayrı ayrı ince madde miktarı deneyi yapılmış olup ince ve iri agrega için ince madde miktarı Çizelge 2.3’de verilmiştir.

2.1.5. Çentikli Kiriş Kalıpları

Çalışmada kullanılan metal kalıp ve çentik aparatları üç farklı boyda ve her boy için 3 farklı çentik içerecek şekilde tasarlanmıştır. Oluşturulan çentiklerin boyları kiriş yüksekliğinin %10, %20 ve %30’u olacak şekilde tasarlanmıştır. Çentik boyu için a_0/D oranı farklı boyuttaki tüm kirişler için aynı tutulmuştur. Numune ebatları 960x200x50, 480x100x50, 240x50x50 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 2.2’de belirtilen ölçülerde üretilen kırılma mekaniği test kirişleri için metal kalıplar görülmektedir. Her bir kalıbın üzerinde a_0/D oranına bağlı kalarak üretilmiş olan çentik aparatları kalıpların orta kenar kısmında görülmektedir. Çentik oluşturacak metal parçanın kalınlığı 3 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.2. Kırılma testi için üretilen kalıpların döküm öncesi görünümü

2.1.6. Kriyojenik Sıvı

Çalışmada hedeflenen düşük sıcaklıkların laboratuvar ortamında sağlanabilmesi için sıvı azot kullanılmıştır. Sıvı azot nükleer santrallerde, kimya, boya, gıda, sanayi, tıp, hayvancılık, yangınların söndürülmesinde, tıpta organların dondurulması vb. alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çizelge 2.4' de teknik özellikleri verilen azot bu çalışmada sıvı fazda kullanılmıştır.

Çizelge 2.4. Sıvı azota ait teknik bilgiler

Azotun Teknik Özellikleri	
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	Zehirsizdir. Havadan hafiftir

2.2. YÖNTEM

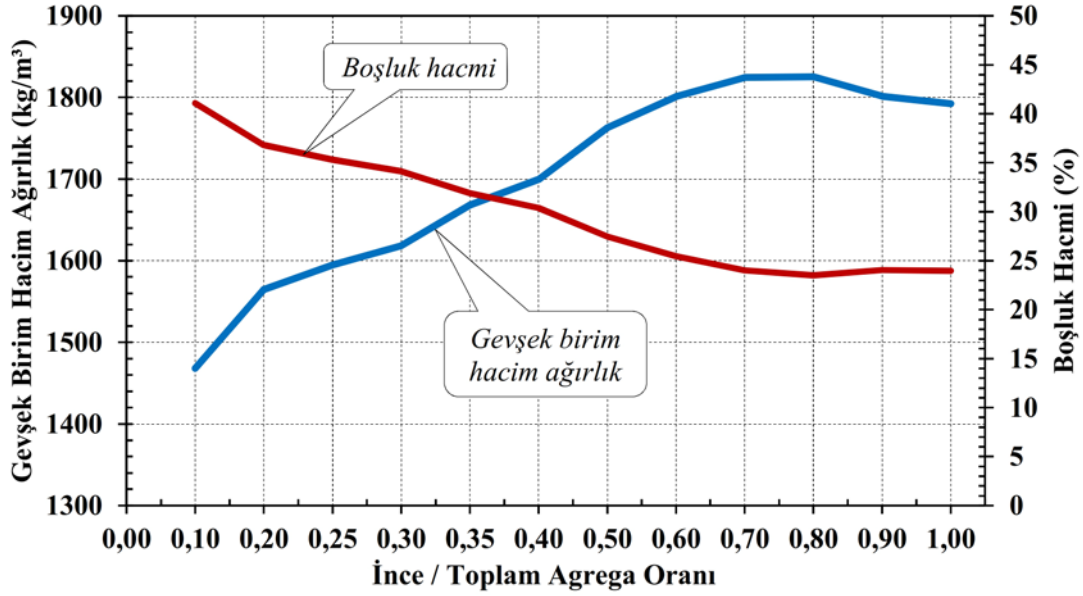
Çalışmanın bu bölümünde, KYB karışım oranları, numune hazırlama, kür işlemi, kriyojenik çevrimin uygulanması, taze ve sertleşmiş beton deneyleri ile kırılma testleri ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

2.2.1. KYB Karışımının Hazırlanması

Karışım için en önemli hususlardan biri olan en yüksek doluluğu sağlamak amacıyla kullanılan ince ve iri agregaların oranları belirlenmiştir. İnce ve iri agreganın gevşek birim hacim ağırlıkları ve boşluk hacimleri hesaplanmıştır. Maksimum doluluğu veren oran tespit edilmiştir [57]. Şekil 2.3'de KYB karışımında kullanılacak olan ince agreganın toplam karışımdaki dağılımının, boşluk oranına etkisi verilmiştir.

$$\gamma_b = \frac{\text{Agrega ağırlığı}}{\text{Deney kabı hacmi}} \quad (2.1)$$

KYB karışımı için ideal agrega birleşiminin belirlenmesi amacıyla en az boşluk en yüksek doluluğu verecek oran tespit edilmiştir. Bu amaçla ağırlıkça ince agrega/toplam agrega oranı %0 ile %100 arasında değişen oranlarda olacak şekilde her bir karışım için gevşek birim ağırlık (γ_g) ve boşluk hacmi (e) değerleri sırasıyla Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 yardımıyla belirlenmiştir[49].



Şekil 2.3. Gevşek birim ağırlık ve boşluk oranları

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

Burada; e, agrega karışımındaki boşluk hacmi yüzdesini, γ_g , 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 2.3'de grafik olarak verilmektedir. Elde edilen gevşek birim hacim ağırlık değerlerinin analizi yapılarak karışımında esas alınacak olan ince ve iri agrega oranı sırasıyla %65 ince ve %35 iri agrega olarak belirlenmiştir.

Karışım miktarları belirlenen malzemeler 300 litre kapasiteli mikser kullanılarak KYB üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasıyla agrega, çimento ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun miksera yerleştirilmesi ardından bir dakika süreyle karıştırılması ile başlamaktadır. Karıştırma işlemi devam ederken su miktarının %75'i ilave edilerek 1 dakika daha karıştırmaya devam edilmiştir. Geriye kalan su hiperakışkanlaştırıcı ile

birlikte karıştırılarak, karışıma eklenmiştir. Topaklaşma bitinceye ve segregasyona sebebiyet vermeyinceye kadar (3,5-4 dakika) karıştırıcı çalıştırılmaya devam edilmiş ve taze beton özelliklerinin belirlenmesine geçilmiştir. Karışımların işlenebilirlik, geçme kabiliyeti ve akışkanlık parametrelerini belirlemek üzere, Slump Yayılma, V-hunisi, L-kutusu, J-ringi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca taze beton birim ağırlık deneyi yapılmıştır. Sertleşmiş beton deneylerinden, basınç dayanımı, dinamik elastsite modülü, ultrases geçiş hızı, ve kırılma parametreleri her bir seri için ayrı ayrı araştırılmıştır. Tüm tahribatlı deneyler 90 günlük kür süreleri ardından ve kriyojenik işlem sonrası gerçekleştirilmiştir.

2.2.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton Karışım Oranları

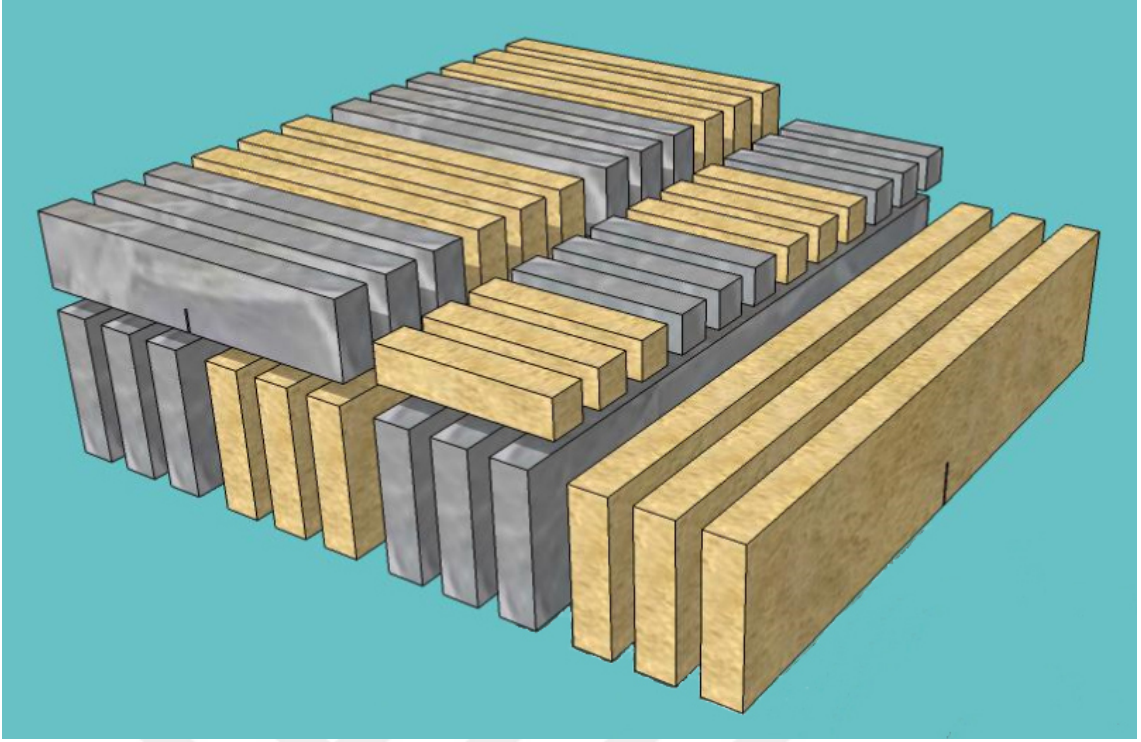
Üretilen kendiliğinden yerleşen beton karışımları EFNARC'de [51] belirtilmiş olan ve duvar elemanlarında kullanılması önerilen SF2 (660–750 mm hedef slump yayılma çapı) akışkanlık sınıfı hedef alınarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan karışım oranları Çizelge 2.5'de verilmiştir. Verilen bu oranlara göre hazırlanan taze beton numuneleri üzerinde EFNARC 2005'e uygun olarak, kendiliğinden yerleşen beton deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.5. KYB karışım miktarları (1 m³)

Çimento (kg)	YFC (kg)	Toplam Filler (kg)	Toplam Su (kg)	Katkı Maddesi (kg)	İnce Agregat (kg)	İri Agregat (kg)
375	175	550	193	7,98	1077	580

2.2.3. Numunelerin Kriyojenik Sıcaklığa Maruz Bırakılması

Kendiliğinden yerleşen betonların kriyojenik şartlardaki performansları donma-çözülme etkisi göz önüne alınarak belirlenmiştir. Donma-çözülme işlemi bir saat -196 °C'de donma ve 24 saat +20 °C oda sıcaklığında çözülme olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üç farklı etki oluşturacak şekilde çevrim uygulanmıştır. Bunlar çevrim olmadan, bir çevrim ve beş çevrim şeklinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin basınç dayanımı, elastsite modülü, eğilme dayanımı, dinamik elastsite modülü, kırılma mekaniği parametreleri ve ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim tespit edilmiştir. Kırılma mekaniği performansının belirlenmesi için üretilen kirişler Şekil 2.4'de görülen şekliyle kriyojenik kür tankına yerleştirilmiştir.



Şekil 2.4. Beton kirişlerin kriyojenik işlem için yerleşim düzeni

Şekil 2.5’de kriyojenik tank içerisine numunelerin yerleştirilmesi ardından kriyojenik sıvıya maruz bırakılan numunelerin çözülmesi görülmektedir. Bu aşama her bir kriyojenik işlemde tekrarlanmıştır.



Şekil 2.5. Kriyojenik işlem sonrası numunelerin görünümü

Bekleme süresinin tamamlanmasının ardından numuneler Şekil 2.5’de görülen tank içerisinden oda sıcaklığında çözülmesi amacıyla laboratuvar ortamına çıkarılmıştır. Şekil 2.6’da laboratuvar ortamına çıkarılan 960x200x50 mm boyutlu çentikli kirişler görülmektedir.

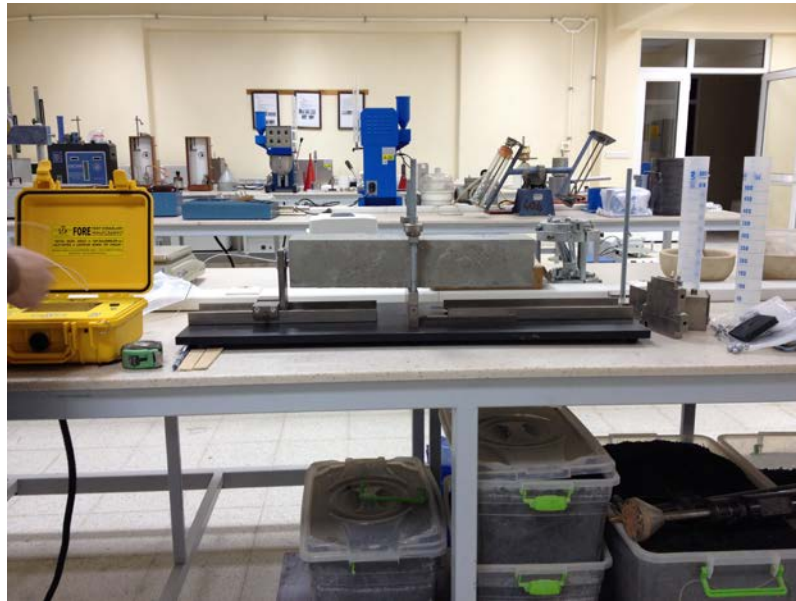


Şekil 2.6. Kriyojenik işlem sonrası büyük boy çentikli kirişler

Şekil 2.6 da görülen kirişler oda sıcaklığında 24 saat çözülmeye bırakılmış olarak görülmektedir. Tüm bu işlemler Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Beton Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

2.2.4. Dinamik Elastisite Modülü

Çalışmada dinamik elastisite modülü değerleri, rezonans frekansı deneyi (ASTM 215) sonucunda hesaplanmıştır. Rezonans frekansı deneyi 100x100x500 mm boyutunda kiriş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu numuneler 90 gün su ve hava küründe dayanım kazandıktan sonra, her çevrim ardından rezonans frekansı ölçümlerine tabii tutulmuştur.



Şekil 2.7. Boyuna rezonans frekansı ölçümü

Her bir çevrim ardından ölçülen değerler Denklem 2.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada E, dinamik elastite modülü, L, numune uzunluğu, ρ , malzeme yoğunluğu, N, boyuna rezonans frekansı olarak verilmiştir.

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

2.2.5. Ultrases Geçiş Hızı Ölçümleri

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde 90 gün su ve hava küründe dayanım kazandıktan sonra, her bir çevrim ardından ultrases hızı ölçümleri gerçekleştirilmiş ve Denklem 2.4

$$V = \frac{S}{t} \left(\frac{km}{sn} \right) \quad (2.4)$$

yardımlarıyla ultrases geçiş hızı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.8. Ultrases geçiş hızı ölçümü

2.2.6. Beton Basınç Dayanımı

Hava ve su küründe 90 gün boyunca dayanım kazanan 15 cm kenar uzunluğuna sahip küp numuneler üzerinde 0, 1 ve 5 çevrim kriyojenik işlemin ardından basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde 300 ton kapasiteli tek eksenli hidrolik pres

kullanılmıştır. Hidrolik test cihazı, beton numunesinin taşıyabileceği en fazla kuvvete ulaştığı anda yüklemeye otomatik olarak son vermiştir.

Maksimum kırılma yük değerlerine göre küp numunelerin basınç dayanımları,

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

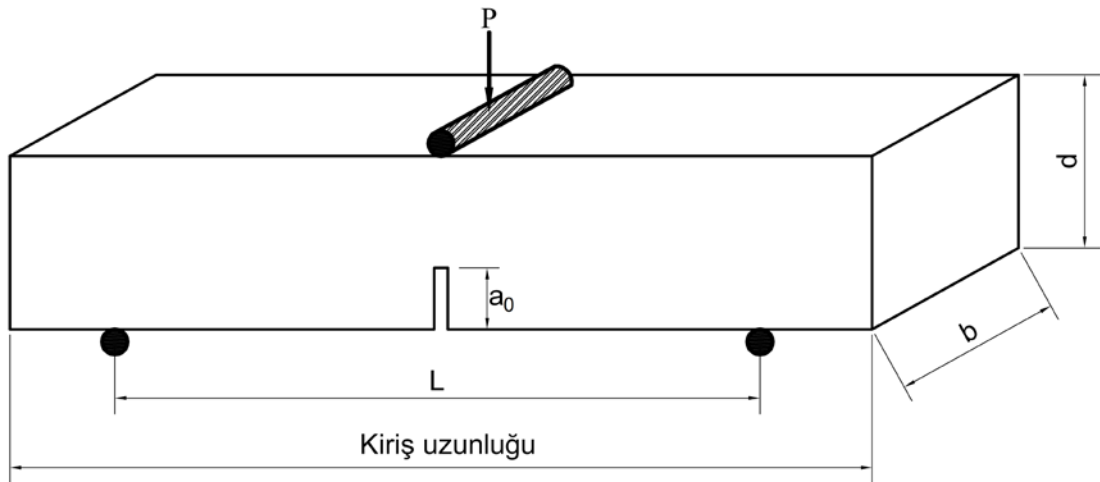
Denklem 2.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

2.2.7. Eğilme Dayanımı

Üretilen kırılma mekaniği test kirişleri üzerinde Şekil 2.9'da görülen üç noktalı eğilme deneyi sonucunda elde edilen pik yük değerleri kullanılarak Denklem 2.6 yardımıyla eğilme dayanımı değerleri hesaplanmıştır.

$$\sigma_f = \frac{3 P L}{2 b (d - a_0)^2} (MPa) \quad (2.6)$$

Burada σ_f , eğilme dayanımı P, maksimum kırılma yükü, L, yükleme yapılan kirişin etkili boyu b, kiriş genişliği d, kiriş yüksekliği, a_0 , çentik boyu olarak verilmiştir.

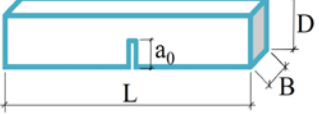




Şekil 2.9. Eğilme dayanımı test düzeneği

2.2.8. Kırılma Performansının Belirlenmesi

Kriyojenik çevrim işleminin tamamlanmasını takiben kırılma mekaniği performansını belirlemek amacıyla kırılma mekaniği test kırımları üzerinde mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler Çizelge 2.6'da verilen farklı boyutta üretilmiş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme testi ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılmış olan kırılma mekaniği test kırımlarının boyutları, çentik ölçüleri, a_0 / D oranları, kür koşulları, kriyojenik çevrimler ve deneysel çalışma için gerekli olan miktarları Çizelge 2.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 2.6. Kırılma mekaniği test kırımlarına ait bilgiler

Kür Koşulları & Çevrimler						Kiriş & Çentik Boyutları				
Su Kürü			Hava Kürü			Çentik Ölçüleri (a_0)			Çentik Boyutu	LxDxB
Çevrim Sayısı			Çevrim Sayısı			$a_0: 5 \text{ mm}$	$a_0: 10 \text{ mm}$	$a_0: 15 \text{ mm}$		
0	1 Kr	5 Kr	0	1 Kr	5 Kr				a_0/D	240x50x50
3	3	3	3	3	3					
3	3	3	3	3	3					
3	3	3	3	3	3					
27			27			$a_0: 10 \text{ mm}$	$a_0: 20 \text{ mm}$	$a_0: 30 \text{ mm}$	Çentik Uzunluğu	
3	3	3	3	3	3				0,1	480x100x50
3	3	3	3	3	3				0,2	
3	3	3	3	3	3				0,3	
27			27			$a_0: 20 \text{ mm}$	$a_0: 40 \text{ mm}$	$a_0: 60 \text{ mm}$	Çentik Uzunluğu	
3	3	3	3	3	3				0,1	960x200x50
3	3	3	3	3	3				0,2	
3	3	3	3	3	3				0,3	
27			27						Tüm kırımlar için çentik genişliği 3 mm	
Toplam 162 adet kırılma mekaniği test kırımları üretilmiştir.										

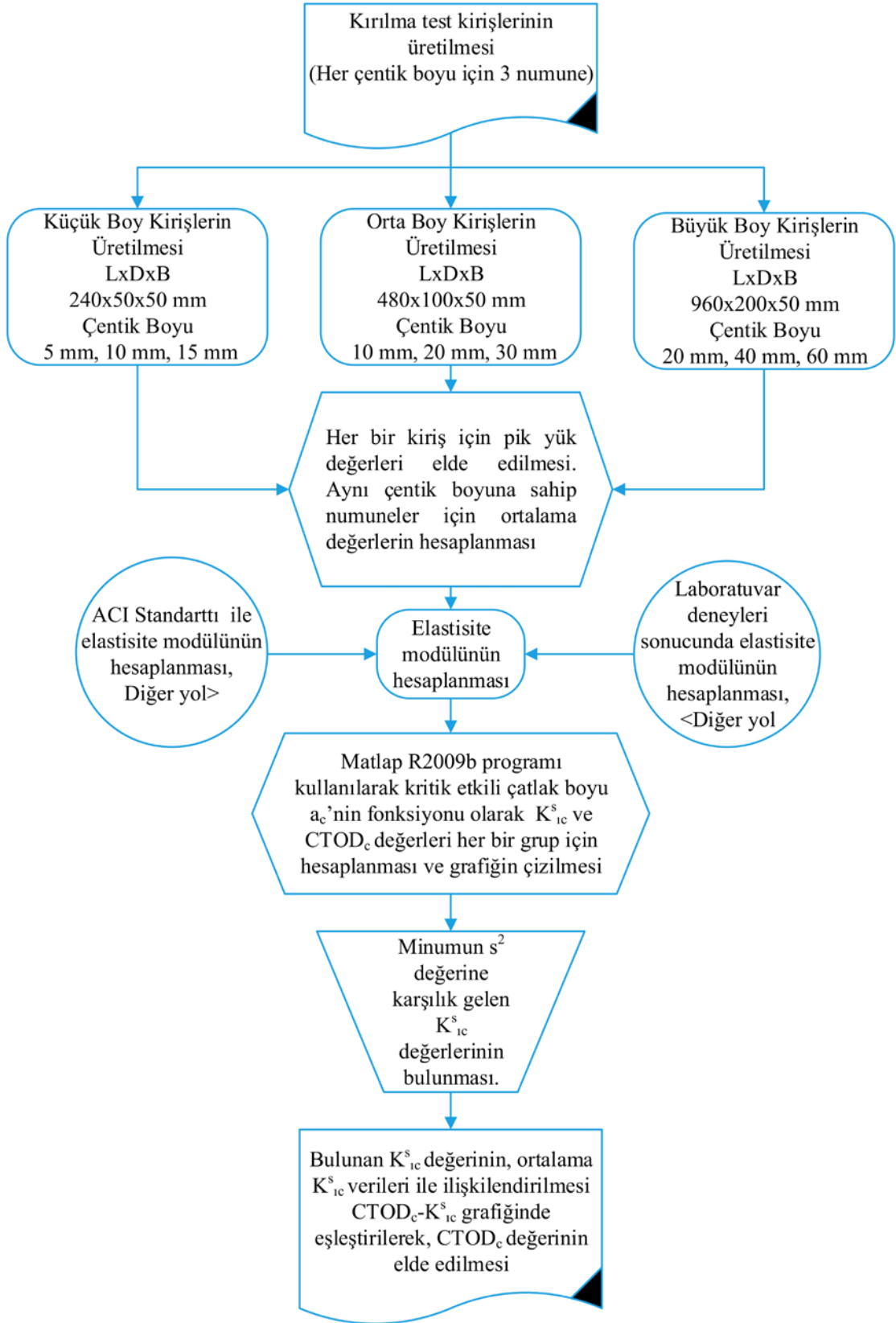
Çizelge 2.6 incelendiğinde temel kür koşullarının hava ve su kürü olduğu, Kriyojenik çevrim ise her iki kür koşulu için, üç farklı etki oluşturacak şekilde tasarlandığı görülmektedir.

Kırılma mekaniği performansının belirlenmesi amacıyla üretilmiş olan test kirişleri Şekil 2.10'da görülmektedir. Bu kirişler, 960x200x50 mm, 480x100x50 mm ve 240x50x50 mm ebatlarında, her kiriş boyutu için üç farklı çentik uzunluğu olacak şekilde üretilmiştir. Üretilen kirişler iki noktalı eğilme testine tabi tutulurken mesnetler arası etkili mesafe büyük boy numune için 800 mm, Orta boy numune için 400 mm ve Küçük boy numune için 200 mm olarak uygulanmıştır. Hesaplamalarda mesnetler arası etkili mesafe göz önünde bulundurularak kırılma parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 2.10. Kırılma deneyleri için üretilen test kirişleri

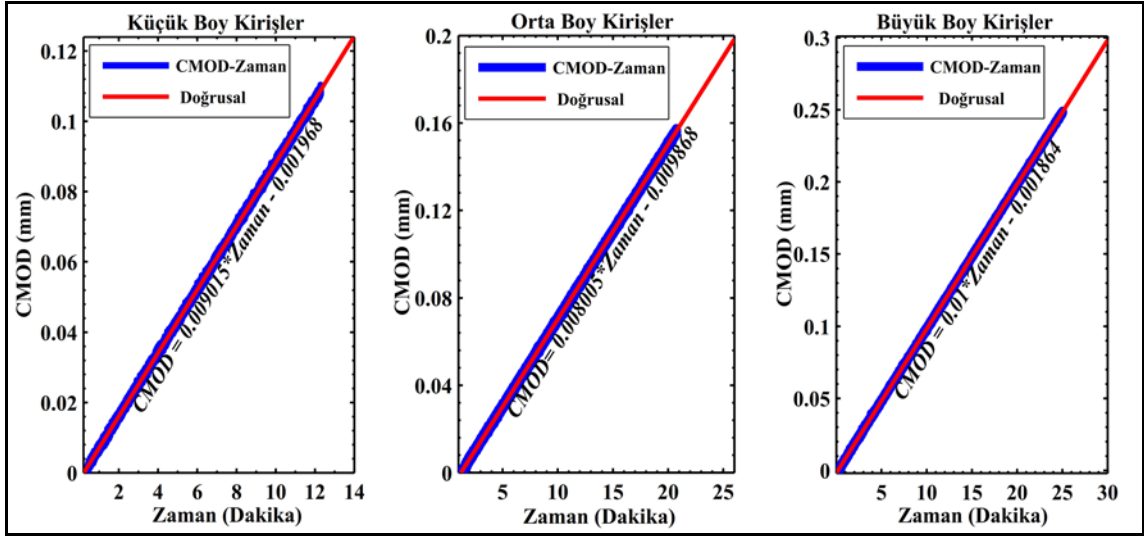
Pik yük metodunun uygulama aşamaları Şekil 2.11'de görülmektedir. Burada kırılma mekaniği test kirişlerinin üretilmesinden pik yük metodunun uygulanarak kırılma parametrelerinin elde edilmesine yönelik adımlar aşamalı olarak görülmektedir.



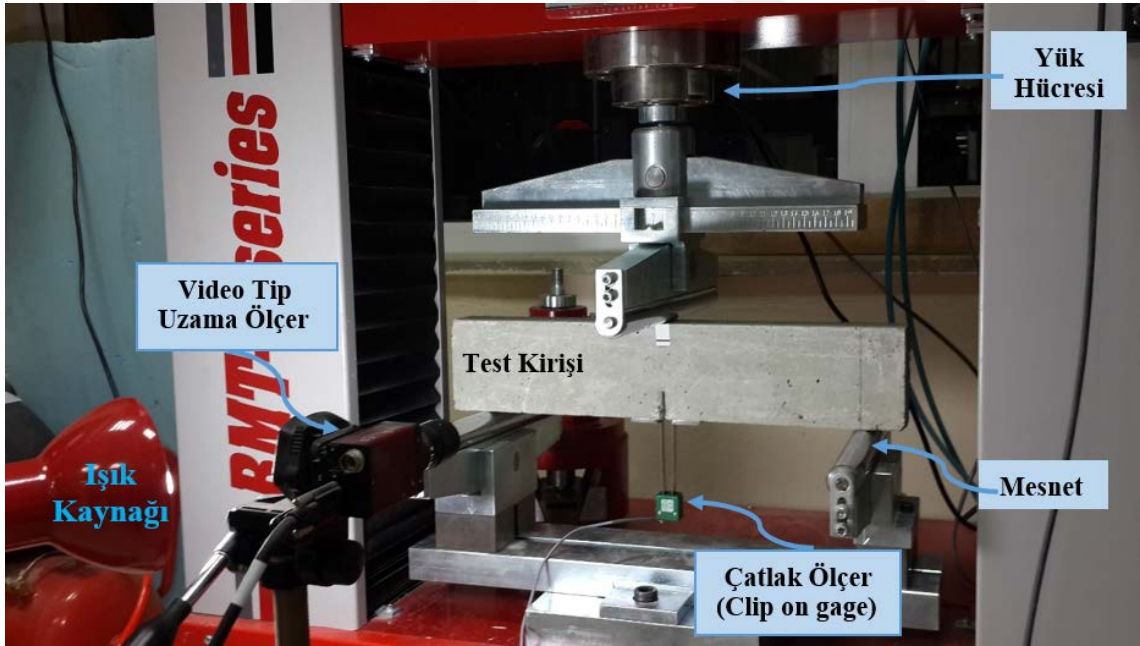
Şekil 2.11. Pik yük metodu uygulama esasları

Pik yük metodunun uygulanabilmesi için numunelerin pik yük değerine beş dakikaya yakın sürede ulaşması gerekmektedir. Bu amaçla her farklı kiriş boyu için Şekil 2.12’de

görüldüğü üzere farklı yükleme hızları kullanılmıştır. Yükleme hızları 0,005 mm/dk. ile 0.015 mm/dk. aralığında olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Kırılma testleri 10 ton kapasiteli, 0.01kN/s ile 15 kN/s aralığında yükleme yapabilen, servo kontrollü elektromekanik üniversal test özelliklerine sahip cihaz ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.12. Kiriş numunelerine ait yükleme hızları



Şekil 2.13. Kırılma mekaniği test düzeneği

Şekil 2.13’de pik yük metodunun uygulanmasına yönelik test düzeneği görülmektedir. Yükleme hızı çatlak açılımına bağlı olarak şekil 2.12’de görülen zaman-cmod bağıntısı ile yükleme yapılmıştır. Bu sayede çatlak ilerleyişi kontrol altına alınarak maksimum yüke beş dakikada ulaşılması koşulu sağlanacak şekilde Çatlak Ağzı Açılım

Deformasyon (CMOD) kontrollü yükleme yapılmıştır. Yük-CMOD eğrisi altında kalan alanlar hesaplanırken pik yükün %85 azalması ile deney durdurulmuş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Eğri altında kalan alanlar kırılma yüzey alanına bölünerek kırılma enerjisi elde edilmiştir. Hesaplamalar Denklem 2.7 kullanılarak yapılmıştır.

$$(G_F) = \frac{W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0}{A_{lig}} (N / mm) \quad (2.7)$$

Bu ifadede,

W_0 , Yük – CMOD eğrisi altında kalan alan, m , kirişin mesnetler arasında kalan kısmının ağırlığı, g , yerçekimi ivmesi, δ_0 , maksimum çatlak açılımı ve A_{lig} , ise çentik açıldıktan sonraki etkin alan ($A_{lig} = (D - a_0) \cdot b$)'dir.

K_{IC}^S ve CTODc parametrelerine ek olarak, bir malzeme parametresi olan elastisite modülü (E) ile birlikte kullanıldığı ve gevreklik indeksi olarak adlandırılan (Q) Denklem 2.8'de verilen eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$Q = \left[\frac{E \cdot CTOD_c}{K_{IC}^S} \right]^2 \quad (2.8)$$

Q gevreklik indisi ile ilgili bir parametre olup pik yük metodu için kullanılmıştır. Aynı boyuttaki farklı çentik içeren numunelerde üç numune deneye tabi tutularak bir değer elde edilmiştir. Elde edilen değerler Çizelge 3.3'de verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler birbiri ile ilişkilendirilerek düzenlenmiştir. Taze ve sertleşmiş betona ait değerler, yüke bağlı olarak çatlak açılımı, kırılma enerjileri çatlak açılımı ilişkisi, iki parametrelili kırılma modeli için gerekli olan kritik değerler (K_{Ic}^s - $CTOD_c$) ve grafikleri elde edilmiştir. Bu bölümde oluşturulmuş olan grafiklerin tamamı verilmemiştir. Çalışmayı özetleyecek olan grafikler verilerek diğerleri ekler bölümünde verilmiştir.

3.1. TAZE BETON ÖZELLİKLERİ

Çalışmada YFC kullanılarak hazırlanan kendiliğinden yerleşen beton numunelere ait akışkanlık değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Taze beton deney sonuçları

L-KUTUSU		U- KUTUSU		J RİNGİ		
T ₂₀ (s)	6,20	h ₁	160	Dış _{ort}	125 mm	h _{ort} (mm)
T ₄₀ (s)	13,01	h ₂	165	İç _{ort}	120 mm	5 mm
H ₁ (mm)	80	(h ₂ -h ₁) mm	5	T ₅₀₀ (s)		6
H ₂ (mm)	67	Elek Segregasyon (%)	10,27	Yayılma Çap (d ₁ d ₂)/2		755 mm
H ₂ /H ₁	0,84	Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)	2372,2	Orta Nokta Çökme		115mm
SLUMP YAYILMA		D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D (mm)		T ₅₀₀ (s)
		740	735	737,5		4,10

Üretilen KYB karışımının Çizelge 3.1’de verilen yayılma çapı değeri incelendiğinde 740 mm yayılma çapına sahip olduğu görülmektedir. Kriyojenik beton tankların duvarlarında kullanılması düşünülen bu karışımın uygunluğu için gerekli olan değer, EFNARC standardına göre SF2 slump yayılma sınıfında olması önerilmektedir. Slump yayılma çapı değeri göz önüne alındığında SF2 (660-750 mm) slump yayılma sınıfının sağlandığı görülmektedir. T₅₀₀ değerleri incelendiğinde 500 mm akma çapına 4.10 s sürede ulaşıldığı görülmektedir. EFNARC sınıflandırılmasına göre üretilen KYB'nin viskozite sınıfı VS2/ VF2 (T₅₀₀>2 s) olarak tespit edilmiştir. Viskozite sınıflandırması

açısından da üretilen KYB'nin duvar elemanlarında kullanılabilir bir beton türü olduğu görülmektedir. L-kutusu deney sonucu değerlendirildiğinde H_2/H_1 oranının 0,84 ile KYB üretimi için uygun olduğu ve elek segragasyon değeri açısından (%10,27) SR2 segragasyon sınıfında (<%15) olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.1. Slump deneyi

Şekil 3.1'de doğalgaz beton depolama tanklarında kullanılması önerilebilecek, YFC içeren bir KYB karışımı için gerçekleştirilen slump yayılma deneyi görülmektedir.

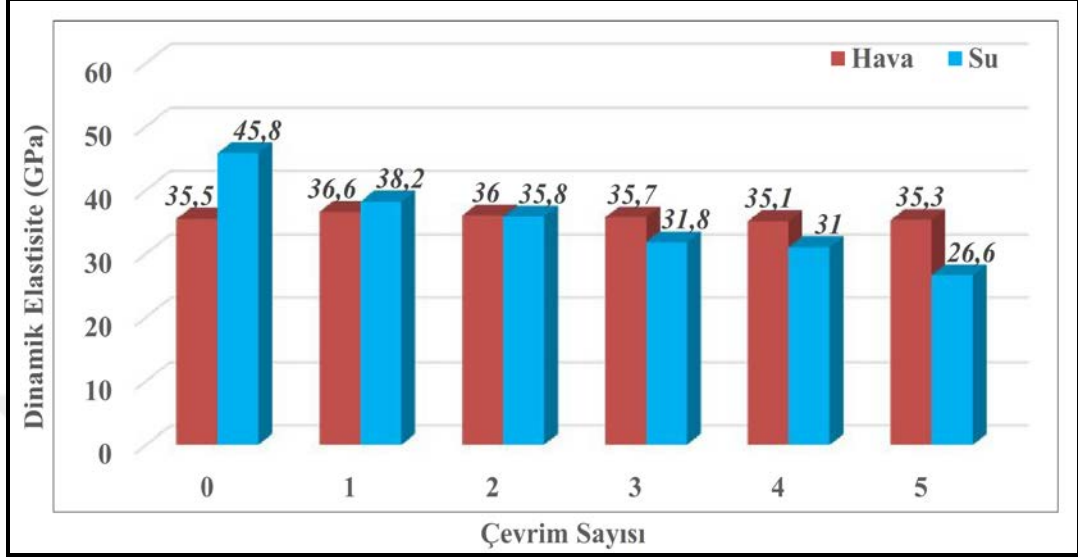
3.2. SERTLEŞMİŞ BETON ÖZELLİKLERİ

3.2.1. Dinamik Elastisite Modülü

Her çevrimin ardından (100x100x500 mm) prizma kirişler üzerinde yapılan boyuna rezonans frekansı ölçümleri sonucunda elde edilen değerler kullanılarak hesaplanan dinamik elastisite modülü değerleri Şekil 3.2'de sütun grafik olarak verilmiştir.

Elde edilen değerler incelendiğinde çevrim sayısına bağlı olarak dinamik elastisite modülündeki değişim görülmektedir. Hava küründe dayanım kazanmış numunelerin dinamik elastisite modülü değerlerindeki değişim 35,50 ile 36,60 GPa arasında değerler almıştır. Su küründe dayanım kazanmış numunelerde ise dinamik elastisite modülü 26,60 ile 45,80 GPa arasında değerler almıştır. Hava küründe dayanım kazanmış numunelerin dinamik elastisite modülü değerleri genel olarak değişim göstermemiş olup, bir çevrim kriyojenik işlemin ardından % 3 artış göstermiş beş çevrim sonucunda ise, referans numuneye göre % 0,56 oranında azalmıştır. Su küründe dayanım kazanmış numunelerde ise referans numuneye göre bir çevrimin ardından %16 düşüş gerçekleşmiştir. Beş çevrimin sonunda ise su kürü numunelerinin dinamik elastisite

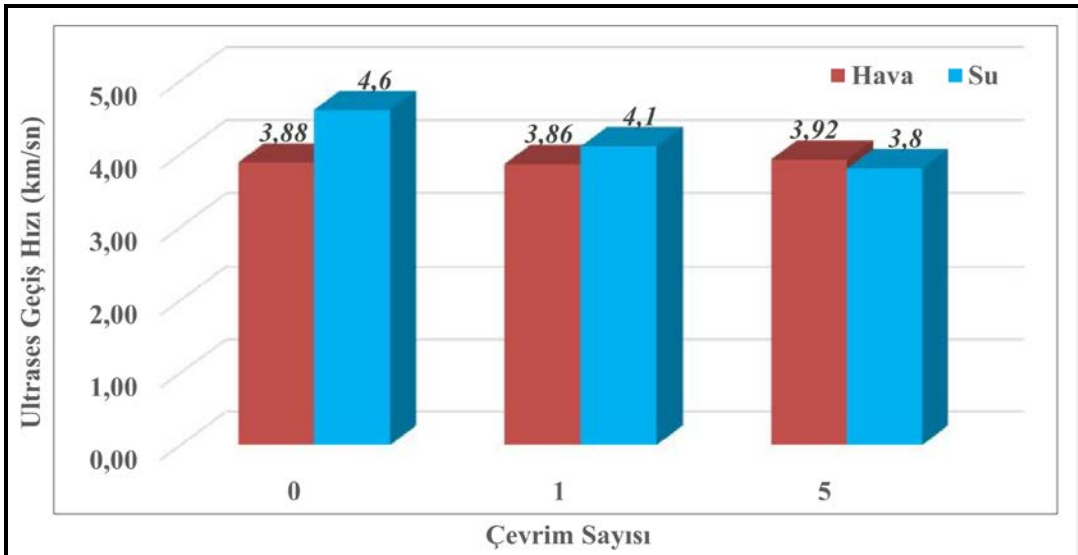
modülü değerleri referans numuneye göre % 58 oranında azalmıştır. Dinamik elastisite modülündeki değişimler incelendiğinde, betonun nem içeriğinin önemli rol oynadığı düşünülmektedir.



Şekil 3.2. Dinamik elastisite modülü değerleri

3.2.2. Ultrases Geçiş Hızı

Ultrases geçiş hızı ölçülen numunelerin değerleri kullanılarak hazırlanmış olan sütun grafik Şekil 3.3’de verilmiştir.



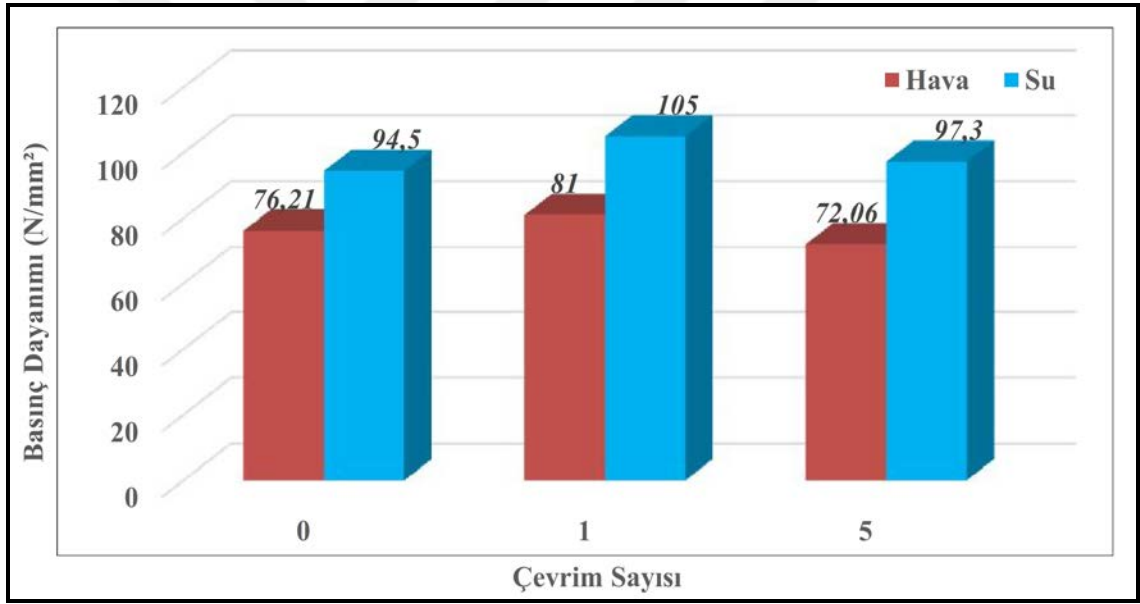
Şekil 3.3. Ultrases geçiş hızı değerleri

Şekil 3.3’de ultrases geçiş hızı değerleri incelendiğinde hava kürü numunelerinin değerleri 3,88 ile 3,92 km/s aralığında değişirken, su küründe dayanım kazanmış

numunelerinin değerleri 4,60 ile 3,80 km/s aralığında değişmektedir. Ultrases geçiş hızındaki değişim hava kürü numuneleri için, sırasıyla referans numuneye kıyasla, bir ve beş çevrim sonucunda % 0,52 oranında düşüş ve % 1.03 oranında artış göstermiştir. Su küründe ise sırasıyla % 8,7 ve % 17,39 oranında düşüş gözlenmiştir.

3.2.3. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı testi sonucunda elde edilen değerler kullanılarak hazırlanmış olan sütun grafik Şekil 3.4’de verilmiştir. Hava küründe dayanım kazanmış numunelerin bir çevrim sonucunda basınç dayanımı değeri % 6,29 oranında artarken, beş çevrimin sonucunda referans değere göre basınç dayanımı değeri % 5,44 oranında azalmıştır. Su küründe dayanım kazanmış numunelerde ise basınç dayanımı değeri bir çevrim sonucunda % 10,11, beş çevrimde ise referans değere göre % 2,96 artış gerçekleşmiştir.



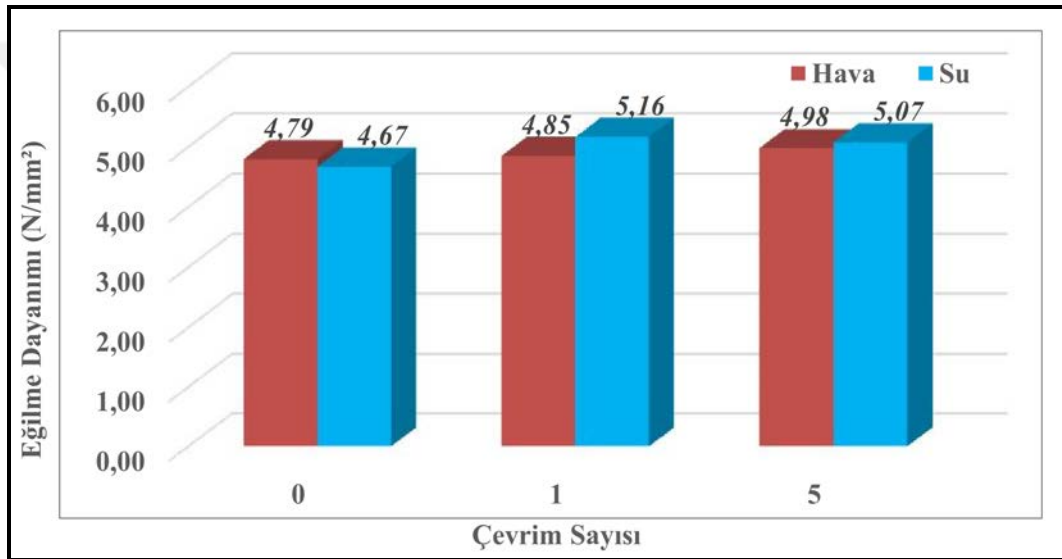
Şekil 3.4. Basınç dayanımı değerleri

Xie ve arkadaşları (2014) donatılı betonlar üzerinde yaptıkları çalışmada sıcaklığın azalmasıyla dayanımın arttığını bildirmişlerdir. Numuneleri dayanım testinden hemen önce düşük sıcaklıklara maruz bırakarak teste tabi tutmuşlardır [58]. Talbot (2009) toz malzeme olarak uçucu kül içeren KYB üzerine gerçekleştirdiği çalışmada numuneleri bir saat sıvı azota maruz bıraktıktan sonra kırk sekiz saat çözülmesini beklemişlerdir. Daha sonra basınç testine tabi tutmuş ve basınç dayanımı değerlerinde artış olduğunu bildirmiştir [30]. Tek çevrim olarak gerçekleştirilen bu çalışmanın sonuçları ile Şekil 3.4’de görüldüğü üzere tek çevrim sonuçları uyum sağlamaktadır.

3.2.4. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanım değerleri kullanılarak çizilen grafik Şekil 3.5’de görülmektedir. Grafik incelendiğinde kriyojenik işlem görmeyen hava küründe dayanım kazanmış numunelerin ortalama eğilme dayanımı değerlerinin su kürüne kıyasla daha yüksek değer aldığı gözlemlenmiştir.

Hava ve su kürü uygulanan farklı çevrimlerdeki kriyojenik işlem sonucunda Şekil 3.5’de görüldüğü üzere su küründe dayanım kazanmış numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin kriyojenik çevrimler sonucunda hava kürüne nazaran daha yüksek değerler aldığı görülmüştür.



Şekil 3.5. Eğilme dayanımı değerleri

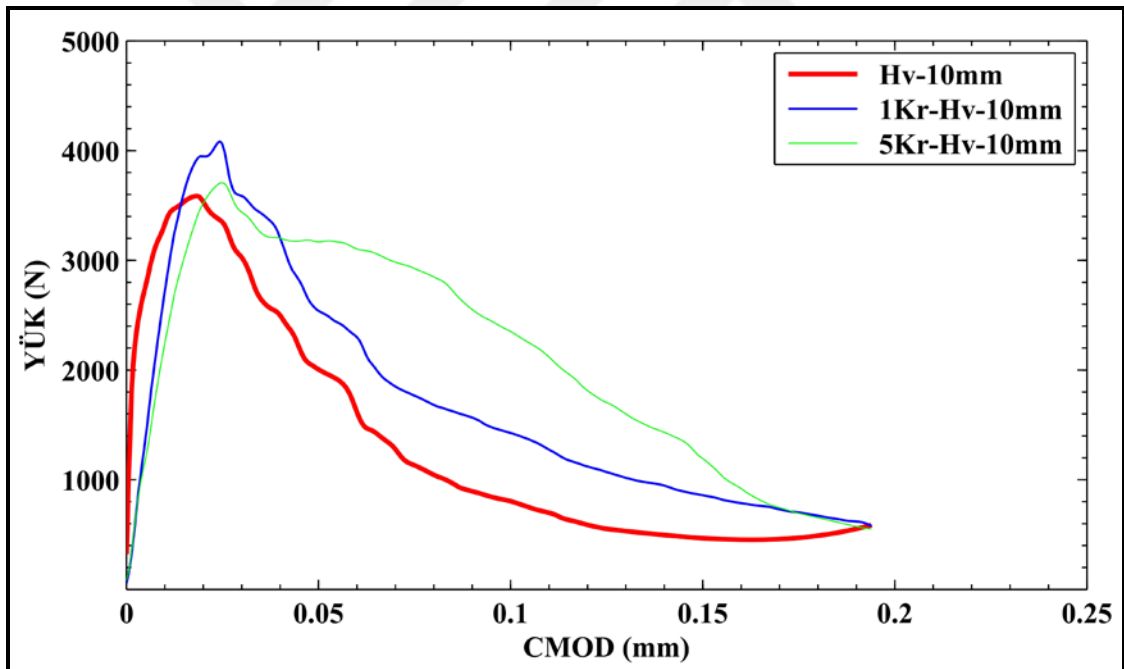
Referans numuneye göre, hava kürü numunelerinde bir ve beş çevrim sonunda sırasıyla %1,25 ve %3,97 artış olmuştur. Su küründe ise, bir çevrim sonunda %10,49 değerini takiben, beş çevrimde %8,57 artış gerçekleşmiştir. Elices ve arkadaşları (1987) yaptıkları çalışmalarında 90 günlük geleneksel beton numunelerini kriyojenik sıcaklık altında (-170°C) eğilme dayanımı testine tabi tutmuşlardır. Suyu doymuş kırıntı numuneler üzerinde gerçekleştirdikleri test sonucunda, eğilme dayanımı deney sonuçlarının referans numuneye oranla artış gösterdiği hatta bazı numunelerde %100’ün üzerinde dayanım artışı gözlemlendiği bildirilmiştir. Bu durum yazarlar tarafından numune bünyesinde bulunan suyun buz kristallerine dönüşerek dayanıma katkı sağlamış olduğu olarak yorumlanmışlardır [28]. Bu tez çalışmasında sıvı nitrojen kullanılarak donma çözülme uygulanmış KYB numunelerinin eğilme dayanımında da artışlar meydana

gelmiş ancak belirtilen çalışmadaki dayanım artışları gözlenmemiştir. Bunun temel nedeni yapılan donma-çözülme işlemi olduğu düşünülmektedir.

Kriyojenik işlem esnasında oluşan buz kristalleri bir gün laboratuvar koşulunda bekletilerek çözülmüş ve buzun dayanıma olan katkısı gözlenmemiştir. Krstulovic (2007) hafif ve normal betonlar üzerine yaptığı çalışmada sıcaklığın azalmasına bağlı olarak dayanım değerlerinde yaklaşık %10 artış olduğunu bildirmiştir. Ayrıca suya doygun numuneler kriyojenik çevrim işlemine maruz bırakılacak olursa dayanımın düşeceğini bildirmiştir [59].

3.3. KIRILMA ENERJİLERİ

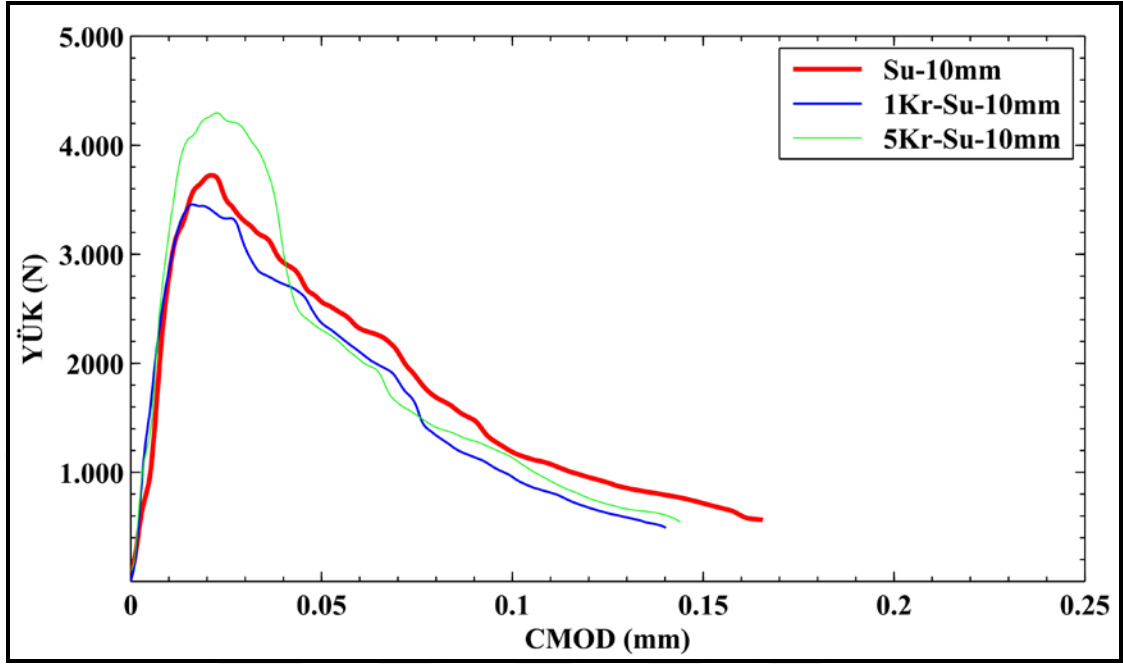
Şekil 3.6'da hava küründe dayanım kazanmış ve sonrasında kriyojenik sıvı etkisine bırakılmış 10 mm çentiğe sahip kirişlere ait Yük-CMOD grafiği görülmektedir.



Şekil 3.6. Hv-400-10 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği

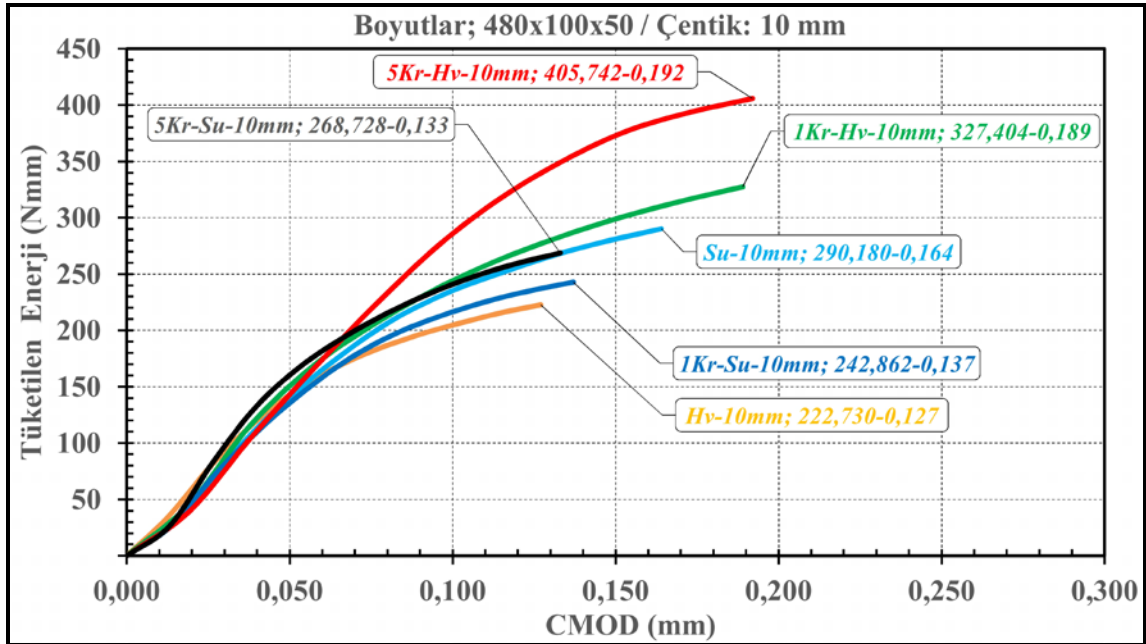
Kriyojenik işlemler sonucunda kirişlerin maksimum yük değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlem görmemiş Hv-10 mm kodlu kiriş referans alınarak bir ve beş çevrim kirişlerin maksimum yük değerleri sırasıyla % 9,60 ve % 8,84 oranında artış göstermiştir. Şekil 3.7'de su küründe dayanım kazanmış ve sonrasında kriyojenik sıvı etkisine bırakılmış 10 mm çentiğe sahip kirişlere ait Yük-CMOD grafiği

görülmektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek yük değerine beş çevrim işlem gören kiriş ulaşırken, en düşük değere bir çevrim kriyojenik işlem gören kiriş ulaşmıştır.



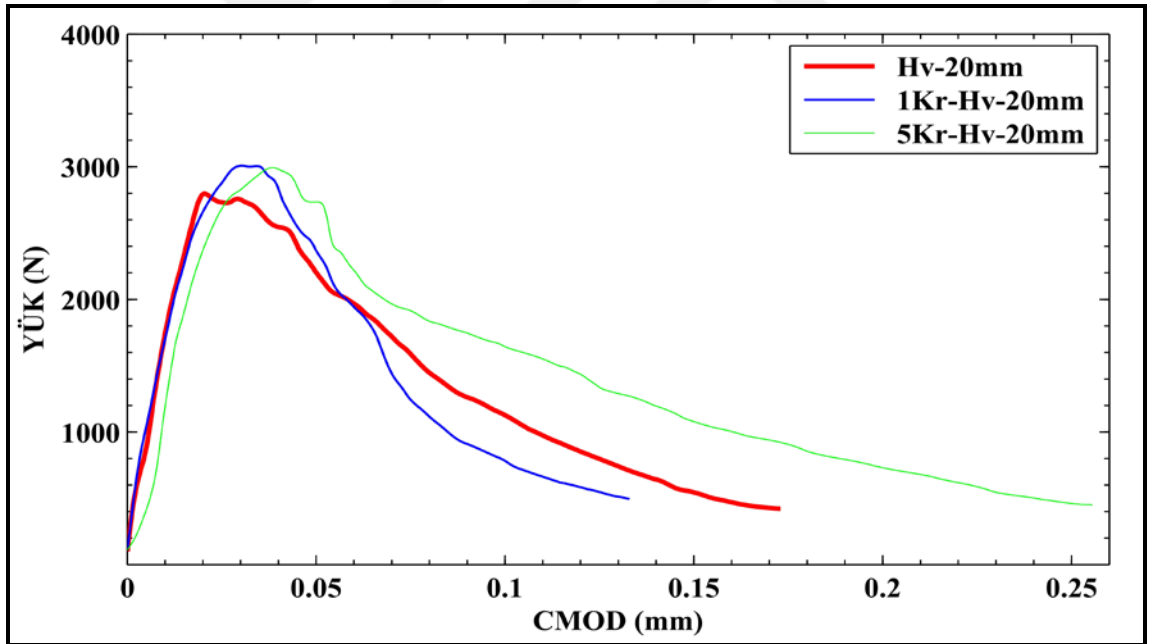
Şekil 3.7. Su-400-10 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği

Bir çevrim kriyojenik sıvı etkisinde kalan numune referans numuneye kıyasla %9,66 oranında artış göstermiştir. Beş çevrim kriyojenik sıvı etkisinde bırakılan numune ise referans değere göre %13,22 oranında artış göstermiştir.



Şekil 3.8. Hv-400-10 mm ve Su-400-10 mm çentikli kirişlerin tükettiği enerjiler

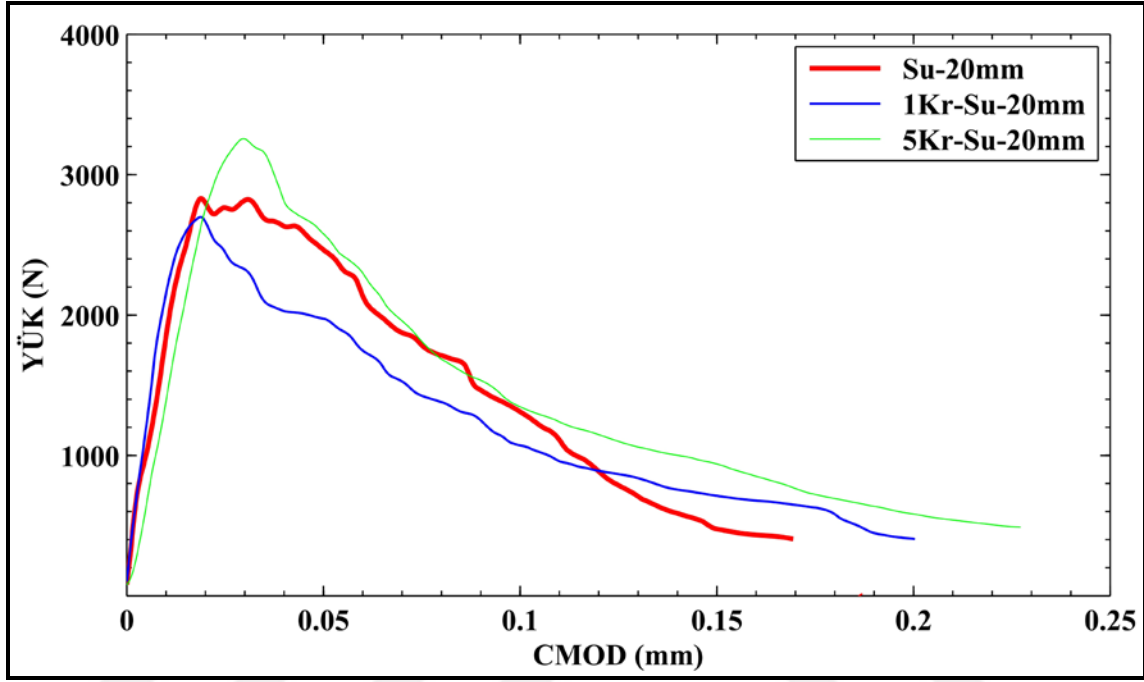
Şekil 3.8.'de tüketilen enerjiler hesaplanırken Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de görülen Yük-CMOD grafiğinin altında kalan alanlar kullanılmıştır. Şekil 3.8 incelendiğinde en yüksek kırılma enerjisine sahip numunenin 5Kr-Hv-10 mm kodlu beş çevrim kriyojenik sıvı etkisinde kalmış numune olduğu görülmüştür. Hv-10 mm kodlu numunenin ise en düşük değeri aldığı görülmektedir. Hv-10 mm kodlu numuneye göre, 1Kr-Su, 5Kr-Su, Su-10, 1Kr-Hv, 5Kr-Hv numuneleri sırasıyla %9,04 %20,64 %30,28 % 47,00 %82,67 oranında daha yüksek değer almıştır. Burada orta boy test kirişleri tartışılmıştır. Büyük ve küçük boy test kirişleri ise ekler bölümünde verilmiştir. Bir ve beş çevrim kriyojenik işlem öncesi su kürü numunesinin hava kürü numunesine oranla %30 daha fazla enerji tükettiği gözlenmiştir. Su kürü numunelerinin enerji tüketme değerlerinde bir çevrim kriyojenik işlem ardından %23,24 düşüş olurken, hava kürü numunelerinin enerji tüketme değerlerinde bir çevrim kriyojenik işlem sonucunda % 47 artış görülmüştür. Genel olarak kriyojenik işlem sonucunda hava kürü numunelerinin tükettiği enerji miktarlarında artış gözlenmiştir.



Şekil 3.9. Hv-400-20 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği

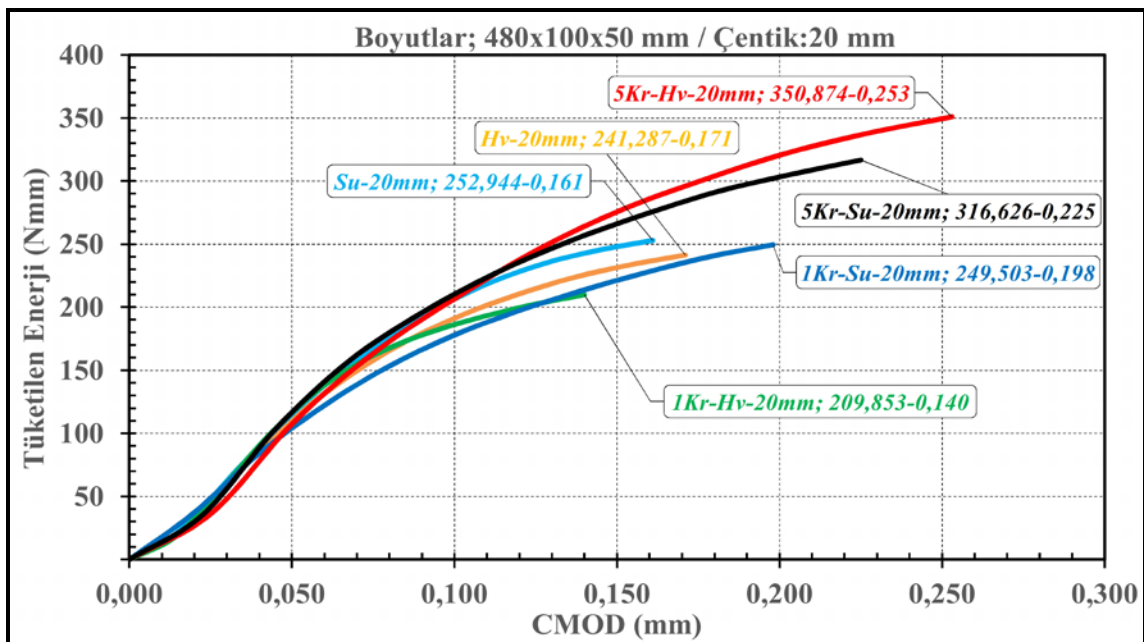
Şekil 3.9'da 20 mm çentiğe sahip hava kürü uygulanmış kirişlerin Yük-CMOD grafikleri görülmektedir. En yüksek yük değerine 1Kr-Hv-20 mm kodlu numune ulaşırken en düşük yük değerini Hv-20 mm kodlu numune almıştır. Kriyojenik işlemler sonucunda kirişlerin maksimum yüklerinde artış gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlem görmemiş Hv-20 mm kodlu kiriş referans alınarak bir ve beş çevrim kirişlerin

maksimum yük değeri sırasıyla % 5,46 ve % 4,38 oranında artış göstermiştir. Şekil 3.10'da su küründe dayanım kazanmış 20 mm çentikli kirişlere ait Yük-CMOD grafikleri görülmektedir. En yüksek yük değerine beş çevrim kriyojenik işlem görmüş numune ulaşmıştır. En düşük yük değeri bir çevrim kriyojenik sıvı etkisinde kalan numune almıştır.



Şekil 3.10. Su-400-20 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği

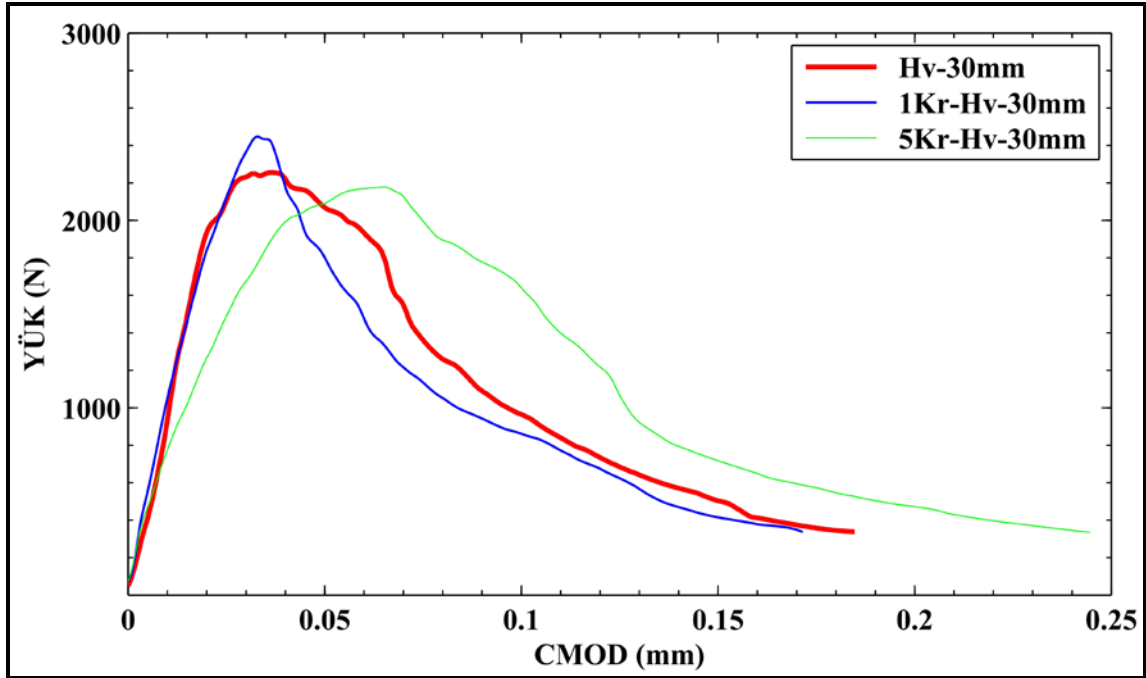
Şekil 3.10'da Su-20 mm kodlu kiriş referans alınarak bir ve beş çevrim kirişlerin maksimum yük değeri sırasıyla % 6,96 azalış ve % 31,09 oranında artış göstermiştir.



Şekil 3.11. Hv-400-20 mm ve Su-400-20 mm çentikli kirişlerin tükettiği enerjiler

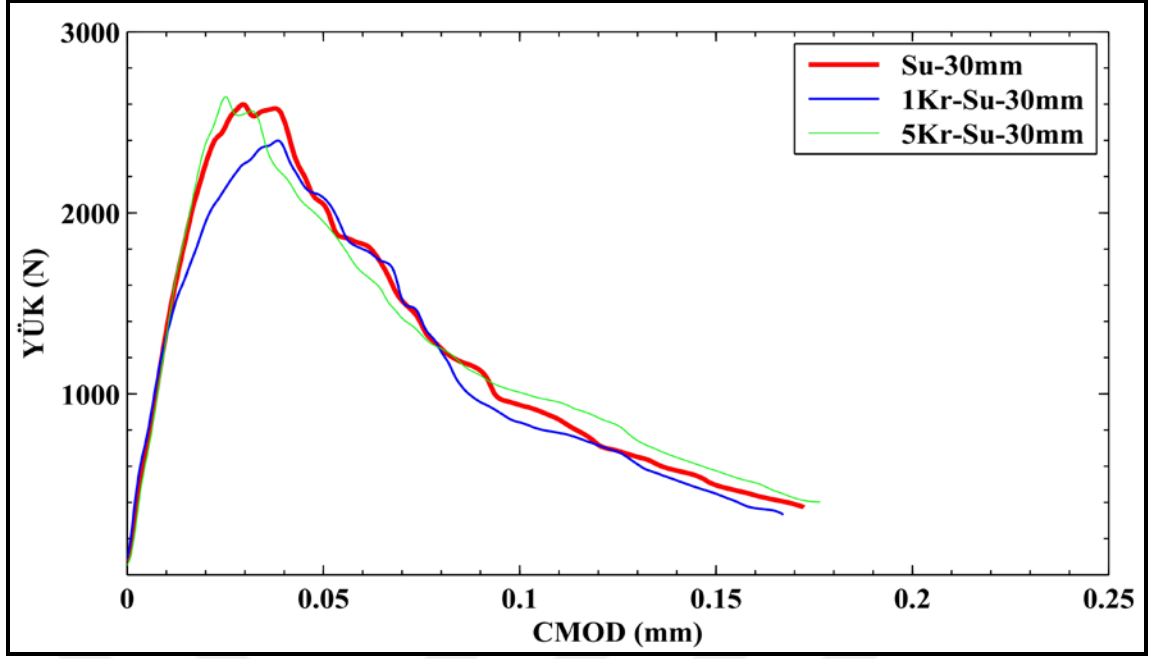
Şekil 3.11’de görülen grafik incelendiğinde bir ve beş çevrim kriyojenik işlem öncesi su kürü numunesinin hava kürü numunesine oranla %4,83 daha fazla enerji tükettiği, bir çevrim kriyojenik işlem sonrası su ve hava kürü numuneleri karşılaştırıldığından 1Kr-Hv-20 mm kodlu numuneye göre 1Kr-Su-20 mm kodlu numune %19 daha yüksek değer almıştır. Beş çevrim sonucunda ise su ve hava küründe dayanım kazanmış numuneler kıyaslandığında 5Kr-Su-20 mm kodlu numuneye göre 5Kr-Hv-20 mm kodlu numune %10,82 daha yüksek enerji tükettiği gözlenmiştir.

Şekil 3.12’de en yüksek tepe yük değerine 1Kr-Hv-30 mm kodlu numune ulaşırken, en düşük yük değerini 5Kr-Hv-30 mm kodlu kiriş numunesi almıştır.



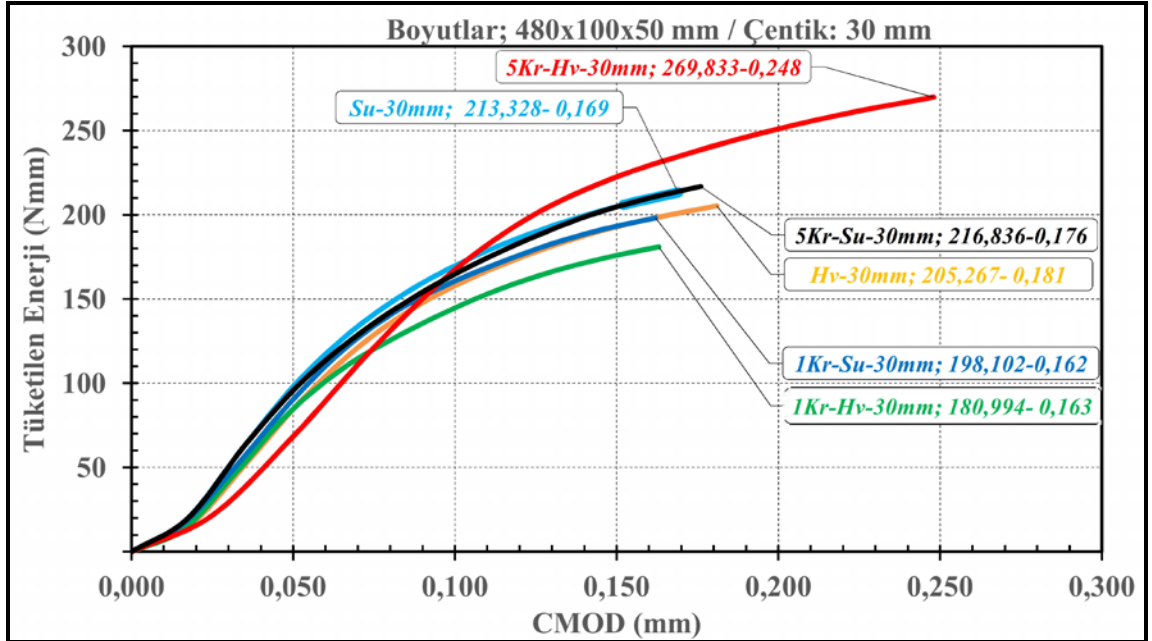
Şekil 3.12. Hv-400-30 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği

Şekil 3.12’de Hv-30 mm kodlu numune referans alınarak grafik incelendiğinde, bir ve beş çevrim kriyojenik işlem sonrasında sırasıyla, % 4,86 artış ve % 8.29 düşüş gerçekleşmiştir. Şekil 3.13’de 30 mm çentikli su kürü numuneleri görülmektedir. Maksimum yük değerleri birbirine yakın olmakla birlikte en yüksek yük değerini 5Kr-Su-30 mm kodlu numune ulaşmıştır. En düşük değer ise 1Kr-Su 30 mm kodlu numunede görülmüştür. Kriyojenik işlem uygulanmadığı su kürü numuneleri referans alındığında, bir çevrim sonucunda numunelerin pik yük değerinde %5,84 düşüş gerçekleşirken beş çevrim sonucunda % 1,94 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 3.13. Su-400-30 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği

Şekil 3.14'de, su ve hava küründe dayanım kazanmış 30 mm çentikli kirişlere ait tüketilen enerji değerleri verilmiştir. Bu değerlere göre tüketilen enerji miktarı en yüksek değere 5Kr-Hv-30 mm numunesi ulaşırken en düşük değere 1Kr-Hv-30 mm kodlu numune ulaşmıştır.



Şekil 3.14. Hv-400-30 mm ve Su-400-30 mm çentikli kirişlerin tükettiği enerjiler

Şekil 3.14'de tüketilen enerjiler incelendiğinde bir ve beş çevrim kriyojenik işlem öncesi su kürü numunesinin hava kürü numunesine oranla %4 daha fazla enerji tükettiği

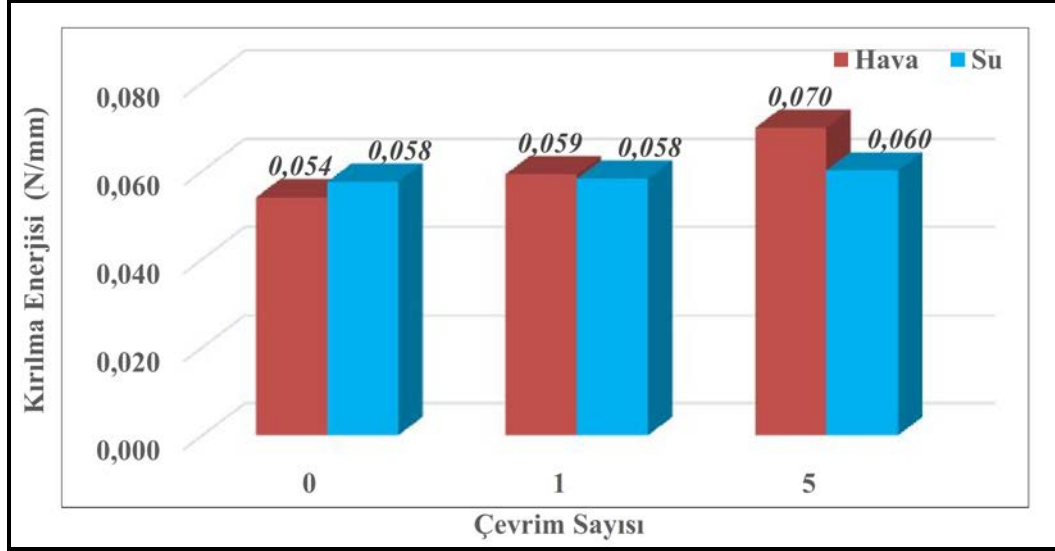
gözlenmiştir. Bir çevrim kriyojenik işlem sonrası su ve hava kürü numuneleri karşılaştırıldığından hava kürü numunesine göre su kürü numunesi %9,45 daha yüksek değer almıştır. Beş çevrim sonucunda ise su ve hava küründe dayanım kazanmış numuneler kıyaslandığında su kürü numunesine göre hava kürü numunesi %24,44 daha yüksek enerji tükettiği gözlenmiştir.

Yük-CMOD eğrisi altında kalan alanların kırılma yüzey alanına bölünmesiyle elde edilen numunelerin kırılma yüzey enerjileri Çizelge 3.2’de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kırılma yüzey enerjileri

Küçük Boy Kirişler 200x50x50 mm		Orta Boy Kirişler 400x100x50 mm		Büyük Boy Kirişler 800x200x50 mm	
SERİLER	G _F N/mm	SERİLER	G _F N/mm	SERİLER	G _F N/mm
Hv-5	0,063	Hv-10	0,049	Hv-20	0,044
1Kr-Hv-5	0,048	1Kr-Hv-10	0,073	1Kr-Hv-20	0,060
5Kr-Hv-5	0,054	5Kr-Hv-10	0,090	5Kr-Hv-20	0,071
Su-5	0,048	Su-10	0,064	Su-20	0,075
1Kr-Su-5	0,059	1Kr-Su-10	0,054	1Kr-Su-20	0,043
5Kr-Su-5	0,064	5Kr-Su-10	0,060	5Kr-Su-20	0,055
Hv-10	0,058	Hv-20	0,060	Hv-40	0,050
1Kr-Hv-10	0,066	1Kr-Hv-20	0,052	1Kr-Hv-40	0,059
5Kr-Hv-10	0,057	5Kr-Hv-20	0,088	5Kr-Hv-40	0,062
Su-10	0,060	Su-20	0,063	Su-40	0,063
1Kr-Su-10	0,075	1Kr-Su-20	0,062	1Kr-Su-40	0,065
5Kr-Su-10	0,055	5Kr-Su-20	0,079	5Kr-Su-40	0,054
Hv-15	0,049	Hv-30	0,059	Hv-60	0,054
1Kr-Hv-15	0,063	1Kr-Hv-30	0,052	1Kr-Hv-60	0,060
5Kr-Hv-15	0,061	5Kr-Hv-30	0,077	5Kr-Hv-60	0,068
Su-15	0,046	1Kr-Su-30	0,061	Su-60	0,038
1Kr-Su-15	0,069	1Kr-Su-30	0,057	1Kr-Su-60	0,040
5Kr-Su-15	0,064	5Kr-Su-30	0,062	5Kr-Su-60	0,048

Çizelge 3.2’de elde edilen değerler incelendiğinde kırılma yüzey enerjileri 0,038 ile 0,090 arasında değişmektedir. En düşük değer 0,038 N/mm ile Su-60 kodlu kiriş numunesi iken en yüksek değer 0,090 N/mm ile 5Kr-Hv-10 kodlu numunede görülmüştür.



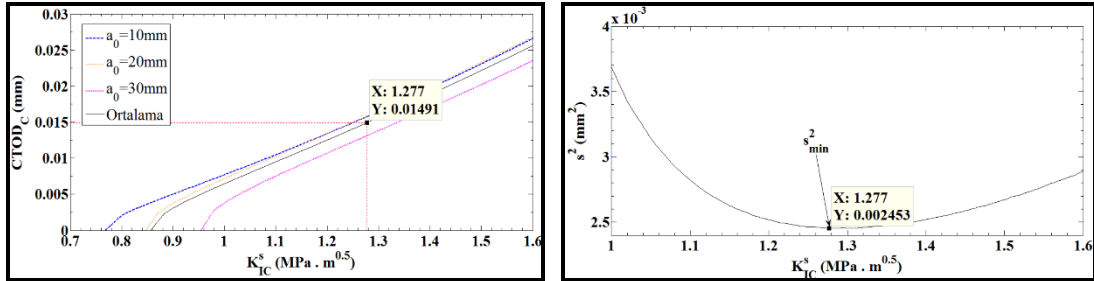
Şekil 3.15. Kırılma yüzey enerjileri

Çizelge 3.2’de verilen değerler kür ve çevrim koşulları dikkate alınarak ortalama kırılma enerjisi değerleri hesaplanarak Şekil 3.15’de çevrim sayısına göre kırılma yüzey enerjisi değerleri sütun grafik olarak ifade edilmiştir. Kırılma yüzey enerji değerleri kriyojenik çevrim uygulanmayan referans numunelere göre referans ölçüte göre, hava küründe dayanım kazanmış numunelerde bir ve beş çevrim sonucunda sırasıyla %9,26 ve %29,63 artış olmuştur. Su küründe ise, bir çevrim sonucunda kırılma yüzey enerji değeri sabit kalırken, beş çevrim sonucunda referans değere göre %3,45 artış gerçekleşmiştir. Hava küründe dayanım kazanmış numunelerin kırılma yüzey enerjileri çevrim sayısının artışına paralel olarak artış göstermiştir. Elices ve arkadaşları (1987) yapmış oldukları çalışmada sıcaklığın azalması ile birlikte kırılma enerji değerlerinde artış olduğunu bildirmişlerdir.

3.4. KIRILMA PARAMETRELERİ

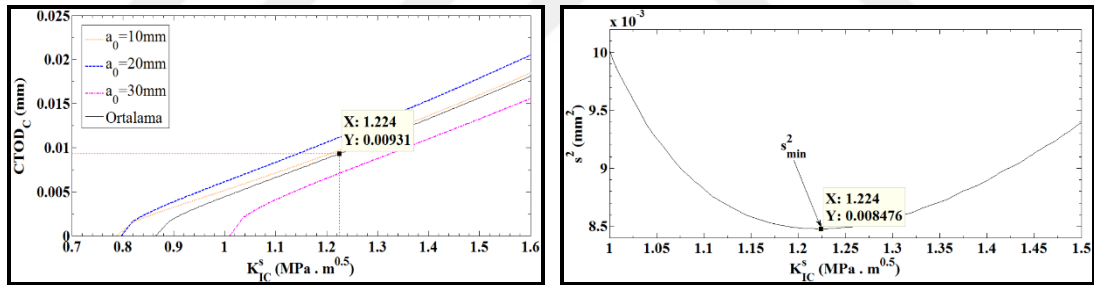
Aynı boy ve aynı koşullarda teste tabi tutulan farklı çentik içeren kirişlerin ortalama pik yük değerleri, başlangıç çentik boyları ve elastisite modülleri kullanılarak $CTOD_c$ ve K_{ic}^s hesaplanmıştır. Hv-400-10, 20, 30 mm çentik ölçülerine sahip kirişler için K_{ic}^s ile $CTOD_c$ arasındaki değişim Şekil 3.16’da görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere Hv-400 serisi için K_{ic}^s ve $CTOD_c$ değerleri sırasıyla 1,277 ve 0,01491 olarak belirlenmiştir.

Hv-400 serisine ait K_{Ic}^s değerini elde etmek amacıyla hesaplanan standart sapma (s) değerinin K_{Ic}^s ile arasındaki değişim Şekilde 3.16’da minimum standart sapma (s_{min}) değeri olan 0,002453 değerine karşılık gelen 1,277 değeri K_{Ic}^s olarak tayin edilmiştir.



Şekil 3.16. Hv-400 serisi için K_{Ic}^s -CTOD_c ve s- K_{Ic}^s değişimi

Su-400 serisine ait K_{Ic}^s ile CTOD_c arasındaki değişim Şekil 3.17’de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere Su-400 serisi için K_{Ic}^s ve CTOD_c değerleri sırasıyla 1,224 ve 0,00931 olarak tayin edilmiştir.

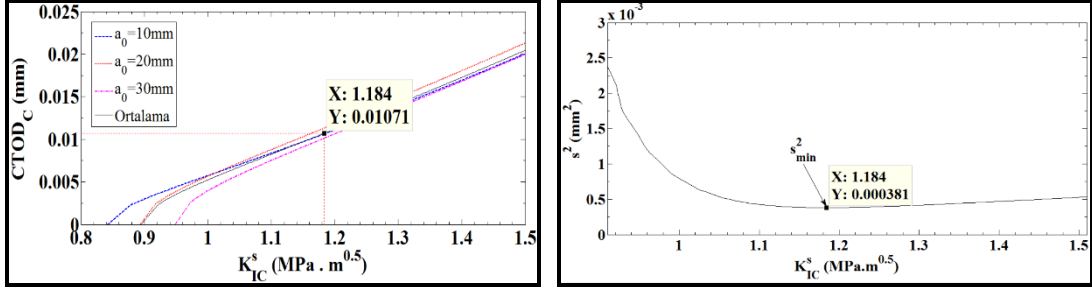


Şekil 3.17. Su-400 serisi için K_{Ic}^s -CTOD_c ve s- K_{Ic}^s değişimi

K_{Ic}^s değerini elde etmek amacıyla hesaplanan standart sapma (s) değerinin K_{Ic}^s ile arasındaki değişim Şekil 3.17’de en küçük standart sapma (s_{min}) değeri olan 0,008476 değerine karşılık gelen 1,224 değeri K_{Ic}^s olarak tayin edilmiştir.

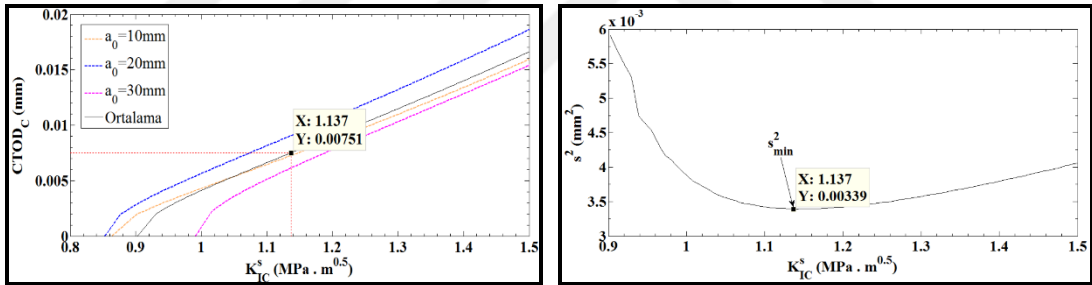
1Kr-Hv-400 serisine ait K_{Ic}^s ile CTOD_c arasındaki değişim Şekil 3.18’de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 1Kr-Hv-400 serisi için K_{Ic}^s ve CTOD_c değerleri sırasıyla 1,184 ve 0,01071 mm olarak belirlenmiştir.

K_{Ic}^s değerini elde etmek amacıyla hesaplanan standart sapma (s) değerinin K_{Ic}^s ile arasındaki değişim Şekil 3.18’de en küçük standart sapma (s_{min}) değeri olan 0,000381 değerine karşılık gelen 1,184 değeri K_{Ic}^s olarak tayin edilmiştir.



Şekil 3.18. 1Kr-Hv-400 serisi için K_{Ic}^s -CTOD_c ve s- K_{Ic}^s değişimi

1Kr-Su-400 serisine ait K_{Ic}^s ile CTOD_c arasındaki değişim Şekil 3.19’de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 1Kr-Su-400 serisi için K_{Ic}^s ve CTOD_c değerleri sırasıyla 1,137 ve 0,00751 olarak belirlenmiştir.

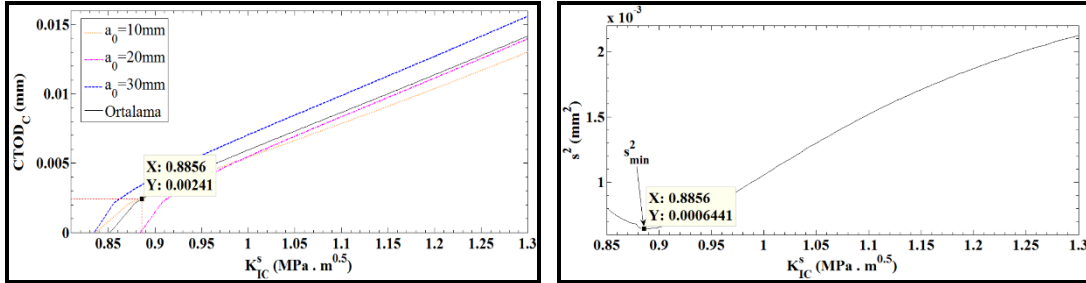


Şekil 3.19. 1Kr-Su-400 serisi için K_{Ic}^s -CTOD_c ve s- K_{Ic}^s değişimi

K_{Ic}^s Değerini elde etmek amacıyla hesaplanan standart sapma (s) değerinin K_{Ic}^s ile arasındaki değişim Şekil 3.18’de en küçük standart sapma (s_{min}) değeri olan 0,00339 değerine karşılık gelen 1,137 değeri K_{Ic}^s olarak tayin edilmiştir.

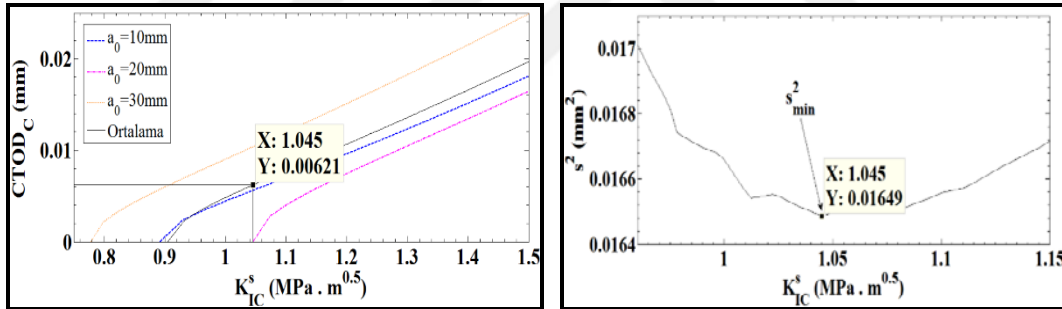
Şekil 3.20’de görülen grafikte 5Kr-Hv-400 serisi için K_{Ic}^s ve CTOD_c değerleri sırasıyla 0,8856 ve 0,00241 olarak belirlenmiştir.

K_{Ic}^s değerini elde etmek amacıyla hesaplanan standart sapma (s) değerinin K_{Ic}^s ile arasındaki değişim Şekilde 3.20’de minimum standart sapma (s_{min}) değeri olan 0,0006441 değerine karşılık gelen 0,8856 değeri K_{Ic}^s olarak tayin edilmiştir.



Şekil 3.20. 5Kr-Hv-400 serisi için K_{Ic}^s -CTOD_c ve s- K_{Ic}^s değişimi

5Kr-Su-400 serisine ait K_{Ic}^s ile CTOD_c arasındaki değişim Şekil 3.21’de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 5Kr-Su-400 serisi için K_{Ic}^s ve CTOD_c değerleri sırasıyla 1,045 ve 0,00621 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.21. 5Kr-Su-400 serisi için K_{Ic}^s -CTOD_c ve s- K_{Ic}^s değişimi

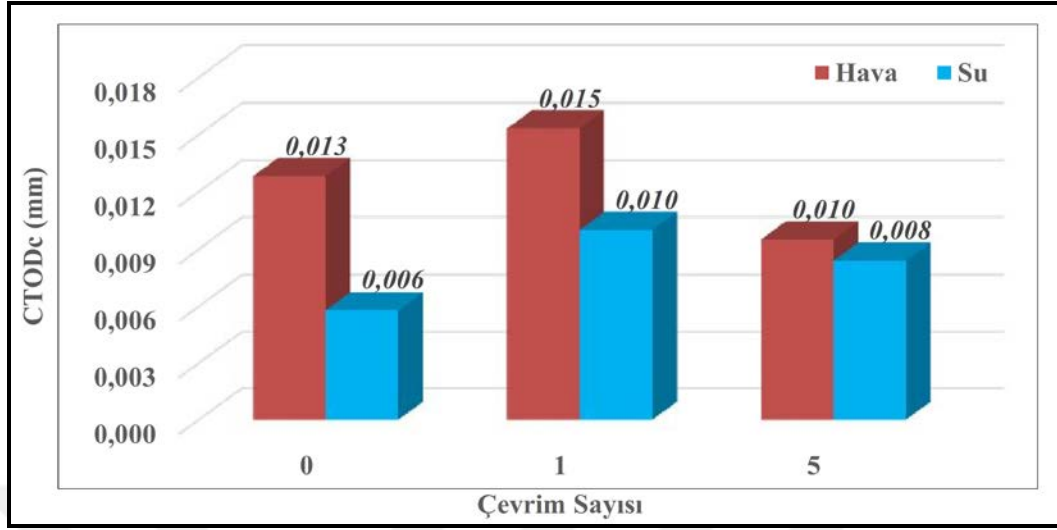
K_{Ic}^s değerini elde etmek amacıyla hesaplanan standart sapma (s) değerinin K_{Ic}^s ile arasındaki değişim Şekil 3.21’de en küçük standart sapma (s_{min}) değeri olan 0,01649 değerine karşılık gelen 1,045 değeri K_{Ic}^s olarak tayin edilmiştir.

Çizelge 3.3’de her bir çentik boyu için üretilen numunelere ait değerlerin ortalamaları alınarak pik yük değeri olarak kabul edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler kullanılarak, CTOD_c, K_{Ic}^s ve Q değerleri hesaplanmış ve tablo halinde Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kırılma mekaniği test kirişlerine ait test sonuçları

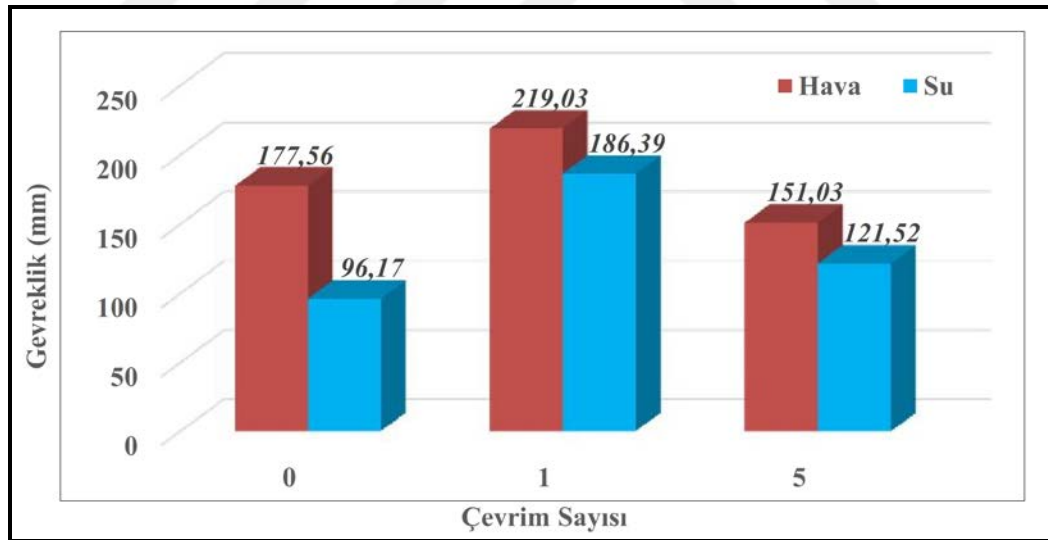
Seriler	P _u (N)	CTOD _c (mm)	K _{IC} ^s (MPa √m)	Q (mm)
Hv-200-5mm	2351,75	0,0031	0,8080	19,33
Hv-200-10 mm	1948,46			
Hv-200-15 mm	981,52			
Su-200-5mm	2276,24	0,0020	0,7795	17,12
Su-200-10mm	1854,26			
Su-200-15mm	1175,83			
1Kr-Hv-200-5mm	1971,63	0,0059	0,8752	62,66
1Kr-Hv-200-10mm	1725,51			
1Kr-Hv-200-15mm	1124,01			
1Kr-Su-200-5mm	2253,92	0,0108	1,3102	137,84
1Kr-Su-200-10mm	1904,62			
1Kr-Su-200-15mm	1460,14			
5Kr-Hv-200-5mm	2386,85	0,0051	0,9650	45,16
5Kr-Hv-200-10mm	1809,59			
5Kr-Hv-200-15mm	1477,49			
5Kr-Su-200-5mm	2556,16	0,0042	0,9528	27,85
5Kr-Su-200-10mm	2052,93			
5Kr-Su-200-15mm	1478,58			
Hv-400-10mm	3585,95	0,0149	1,2771	179,01
Hv-400-20mm	2850,13			
Hv-400-30mm	2364,43			
Su-400-10mm	3674,57	0,0093	1,2245	148,90
Su-400-20mm	2682,56			
Su-400-30mm	2574,76			
1Kr-Hv-400-10mm	3930,48	0,0107	1,1835	112,10
1Kr-Hv-400-20mm	3005,86			
1Kr-Hv-400-30mm	2479,53			
1Kr-Su-400-10mm	4029,42	0,0075	1,1370	88,35
1Kr-Su-400-20mm	2869,14			
1Kr-Su-400-30mm	2421,68			
5Kr-Hv-400-10mm	3903,09	0,0024	0,8856	11,93
5Kr-Hv-400-20mm	2975,08			
5Kr-Hv-400-30mm	2168,96			
5Kr-Su-400-10mm	4160,43	0,0062	1,0455	50,33
5Kr-Su-400-20mm	3516,53			
5Kr-Su-400-30mm	2624,15			
Hv-800-20mm	5309,09	0,0205	1,2855	334,34
Hv-800-40mm	4586,44			
Hv-800-60mm	3187,49			
Su-800-20mm	4750,21	0,0061	0,8860	122,48
Su-800-40mm	3443,18			
Su-800-60mm	2933,76			
1Kr-Hv-800-20mm	5722,57	0,0294	1,5674	482,34
1Kr-Hv-800-40mm	4876,58			
1Kr-Hv-800-60mm	3558,95			
1Kr-Su-800-20mm	3829,36	0,0117	0,9132	332,97
1Kr-Su-800-40mm	2975,55			
1Kr-Su-800-60mm	2458,61			
5Kr-Hv-800-20mm	4949,07	0,0210	1,3398	396,01
5Kr-Hv-800-40mm	4557,73			
5Kr-Hv-800-60mm	3337,51			
5Kr-Su-800-20mm	4513,33	0,0148	1,0453	286,39
5Kr-Su-800-40mm	3266,72			
5Kr-Su-800-60mm	3185,10			

Çizelge 3.3’de elde edilen veriler kullanılarak her bir çevrim için CTOD_c değerlerinin ortalaması alınmış ve sonuçlar Şekil 3.22’de sütun grafik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.22. CTOD_c değerleri ve çevrimler

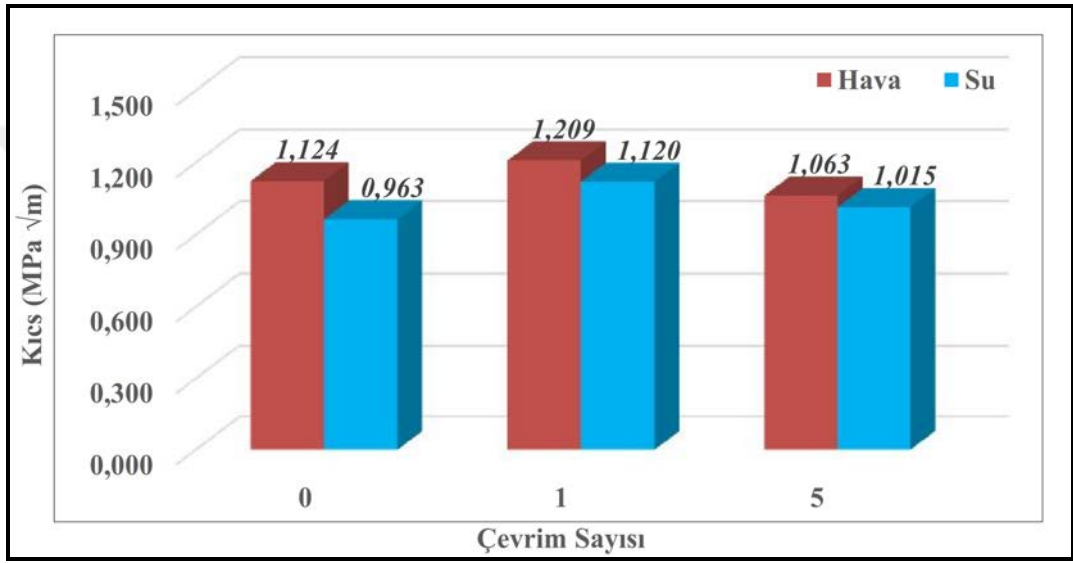
Şekil 3.22’de farklı çevrimlerin ortalama CTOD_c değerlerinin hava ve su kütüründe göstermiş olduğu değişim görülmektedir.



Şekil 3.23. Gevreklik değerlerinin çevrimsel değişimi

Elde edilen veriler ışığında hava kütürüne maruz kalan numunelerin CTOD_c değerleri referans değere göre bir çevrim sonucunda %15,38 oranında, su kütüründe dayanım kazanmış numunelerde ise %66,67 oranında artış gerçekleşmiştir. Beş çevrim sonucunda su kütüründe dayanım kazanmış numunelerde referans değere göre %33,33 artış gerçekleşirken, hava kütüründe dayanım kazanmış numunelerde referans değere göre %23,08 oranında düşüş gerçekleşmiştir.

Şekil 3.23'deki grafik incelendiğinde hava küründe dayanım kazanan numunelerin gevreklik değerleri bir çevrim kriyojenik işlem sonucunda, referans numuneye göre %23,36 oranında artış göstermiştir. Beş çevrim kriyojenik işleme maruz kalan numunelerde ise gevreklik indeksi değerlerinde referans numuneye göre %14,96 oranında düşüş gerçekleşmiştir. Su küründe dayanım kazanan numunelerde bir çevrim kriyojenik işlem sonucunda %93,81 oranında artış gerçekleşirken beş çevrim sonucunda referans değere göre %65,20 oranında artış gerçekleşmiştir. Şekil 3.24'de kritik gerilme yoğunluk faktörünün çevrimsel değişim ile ilişkisi incelenmiştir.



Şekil 3.24. K_{Ic}^s değerlerinin çevrimlerle ilişkisi

Şekil 3.24 incelendiğinde K_{Ic}^s değerlerinin bir çevrim kriyojenik işlem sonucunda, hava ve su küründe dayanım kazanan numunelerde artış gösterdiği görülmektedir. Beş çevrim kriyojenik işlemi takiben bir çevrime göre düşüş görülmüştür. Su küründe dayanım kazanan numunelerin bir çevrim kriyojenik işlem sonucunda referans değere göre K_{Ic}^s değerleri %16,30 artmış beş çevrim sonucunda ise referans değere göre %5,40 oranında artmıştır. Hava küründe dayanım kazanan numunelerde ise referans değere göre sırasıyla bir ve beş çevrim sonucunda, %7,56 oranında artmış ve %5,54 oranında azalmıştır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması sonucunda, düşük sıcaklıklardaki doğalgazın ya da farklı kriyojenik sıvıların depolanması için kullanımı önerilebilecek yüksek performanslı bir beton karışımı tasarlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda çıkarılabilecek bazı sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Kriyojenik beton tank tasarımının önemli bir bölümünü oluşturan, doğalgaz tanklarının betonarme elamanlarında kullanılabilecek, kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı bir beton karışımı elde edilmiş olup, KYB tasarımında değerlendirme ölçütü olarak kabul gören standartlarda taze beton özelliklerine ulaşılmıştır.

Kriyojenik sıcaklık koşulları altında nem içeriğinin önemli bir değişken olduğu, kriyojenik sıcaklık etkisi altında kalan nem içeriği yüksek betonların donma çözülme etkisi ile birlikte dinamik elastisite değerlerinin çevrim sayısının artışı ile birlikte azaldığı görülmüştür. Ayrıca ultrases geçiş hızı değerlerinin çevrim sayısının artışına paralel olarak azaldığı sonucuna varılmıştır.

Genel olarak basınç dayanımı değerlerinin nem içeriği yüksek betonlarda (Su küründe dayanım kazanmış) bir çevrim kriyojenik işlem sonucunda arttığı, beş çevrim sonucunda ise azaldığı, nem içeriği düşük betonlarda ise (hava küründe dayanım kazanmış) basınç dayanımı değerlerinin kriyojenik sıvı etkisi ile çok az değişiklik gösterdiği görülmüştür.

Eğilme dayanımı değerlerinin nem içeriği yüksek betonlarda bir çevrim sonucunda arttığı, beş çevrim sonucunda ise azaldığı, nem içeriği düşük betonlarda ise eğilme dayanımı değerlerinin kriyojenik sıvı etkisine bağlı olarak, çevrim sayısının artışı ile birlikte arttığı sonucuna varılmıştır.

Genel olarak kriyojenik sıvı etkisi altında kalan betonlarda bir ve beş çevrim sonucunda maksimum yük değerlerinde artış olmuştur. Farklı kür koşullarında bekletilen numunelerin kriyojenik sıvı ile teması neticesinde genel olarak bir çevrime maruz kalan numunelerin dayanımlarının arttığı, fakat bir çevrime göre, beş çevrime maruz kalan numunelerin dayanımlarının daha düşük değerler aldığı gözlemlenmiştir.

Kriyojenik sıvı etkisinde kalmayan numunelerle, bir ve beş çevrim kriyojenik sıvı etkisinde kalan numuneler karşılaştırıldığında kriyojenik sıvı ile temas eden numunelerin dayanımlarında genel olarak artış gözlemlenmiştir.

Nem içeriği düşük betonların tükettiği enerji miktarları çevrim sayısının artışına paralel olarak artış göstermiş olup, nem içeri yüksek betonların enerji tüketme değerleri bir ve beş çevrim sonucunda birbirine yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir.

Tüketilen enerjiler incelendiğinde maksimum yük değerleri ve tüketilen enerji miktarları arasında doğrusal bir ilişkiye rastlanmamıştır.

Kırılma enerjisi değerleri, su küründe dayanım kazanan, bir ve beş çevrim kriyojenik sıvı etkisinde kalan betonlarda kayda değer bir değişim görülmemiş olup, hava küründe dayanım kazanan numunelerde çevrim sayısının artışına paralel olarak betonların tükettiği enerji miktarları artmıştır.

Kriyojenik sıvı ile betonun teması neticesinde $CTOD_c$, K_{ic}^s , Q , σ , parametrelerinde kriyojenik çevrimin sayısı ile ilişkili olarak genel olarak artış gözlemlenmiştir. Kırılma parametreleri incelendiğinde, kriyojenik sıvıya maruz kalmış kendiliğinden yerleşen betonlarda pik yük metodunun uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Deney sonuçlarına göre, kriyojenik sıvıya maruz kalan kirişlerin gevreklikleri artmıştır. Bu çalışmada elde edilen Q (gevreklik indeksi) değerleri 11,93 mm ile 482,34 mm arasında değişiklik göstermiştir.

Kriyojenik sıcaklık etkisindeki beton yapılarda, KYB kullanılması ve karışımların YFC içermesi sonucunda mekanik özelliklerinde olumlu sonuçlar ortaya çıkacaktır.

Kriyojenik sıvı ile betonun teması ile ilgili olarak beton içerisindeki ısı değişiminin izlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Betonun dayanım kazanma süreci boyunca kriyojenik sıvı ile temasının dayanım üzerine etkisinin beton yaşı ile değişimi incelenebilir.

Lif içeren betonların kriyojenik işlem sonrasındaki mekanik davranışları araştırılabilir.

Kriyojenik sıvı ile betonun teması sonucunda, çevrimsel etkilerin beton bileşimini oluşturan mikro yapı üzerindeki etkisi araştırılabilir.

Farklı imento türleri ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonların kriyojenik sıcaklıklardaki davranışı araştırılabilir.

KYB tasarımında kullanılan toz malzemelerin kriyojenik sıcaklık koşullarındaki davranışı incelenebilir.



5. KAYNAKLAR

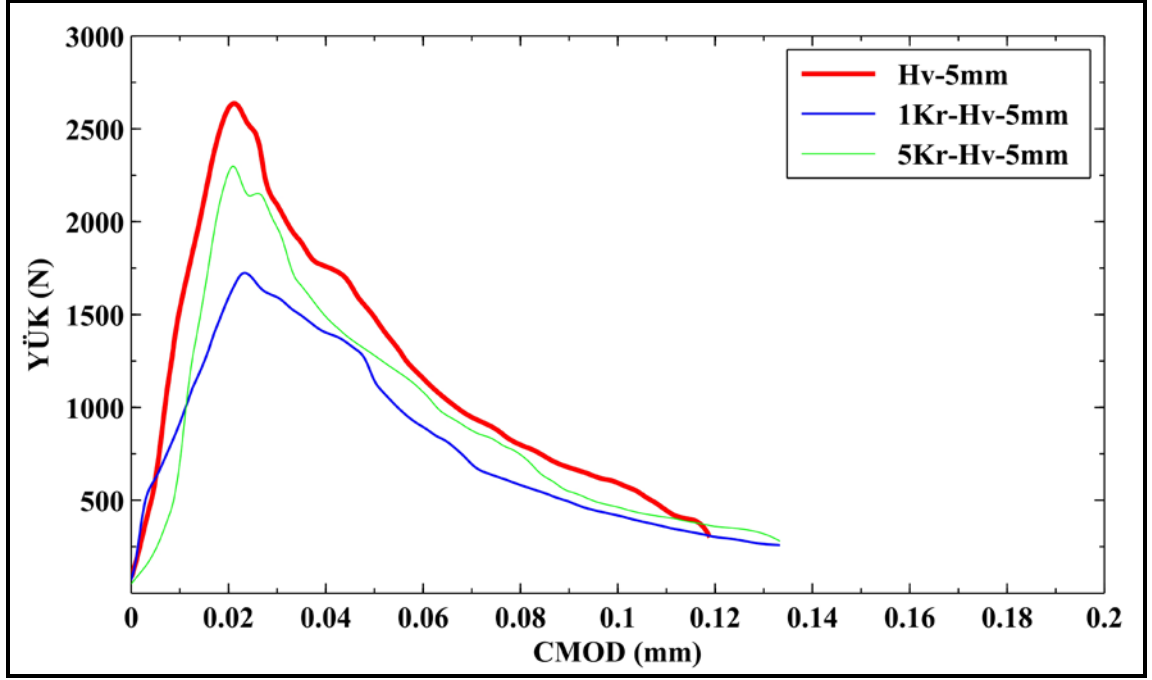
- [1] Anonim, <http://www.botas.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 5 Haziran **2014**).
- [2] Anonim, Doğal gaz piyasası 2014 yılı sektör raporu, EPDK, Ankara, (**2015**).
- [3] Anonim, Doğal gaz piyasası sektör raporu, EPDK, Ankara, (**2013**).
- [4] Anonim, Key world energy statistic, IEA, Paris, (**2014**).
- [5] Demirpolat S.O., Sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) kriyojenik enerjisini kullanarak güç üretiminin araştırılması: örnek çalışma Marmara Ereğlisi LNG alım terminali, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, (**2007**).
- [6] Berner D.E., *Behavior of prestressed concrete subjected to low temperatures and cyclic loading*. University of California, Berkeley, (**1984**) 222-222.
- [7] Anonim, <http://www.lngcng.org.tr/SSGDG%20.pdf> (Erişim Tarihi: 18 Haziran **2014**).
- [8] Anonim, http://www.hopkinsmedicine.org/hse/indiv_sections/hse046.pdf(Erişim Tarihi: 18 Haziran **2014**).
- [9] Lebrun P., *An introduction to cryogenics* (No. CERN-AT-2007-001), (**2007**).
- [10] Ventura G., Risegari L. *The art of cryogenics: low-temperature experimental technique*, Elsevier, (**2010**).
- [11] Anonim, <http://www.habas.com.tr/kuruluslar.aspx?kr=1&sayfa=57> (Erişim Tarihi: 5 Haziran **2014**).
- [12] Hjortset K., Wernli M., LaNier M.W., Hoyle K.A., Oliver, W.H., Development of large-scale precast, prestressed concrete liquefied natural gas storage tanks, *PCI Journal*, 58 (4) (**2013**) 40-54.
- [13] BS EN 1473, Installation and equipment for liquefied natural gas-Design of onshore installations, *STANDARD B*, (**2007**).
- [14] Avcı A., Can M., Kılıç M., Doğal gaz sıvılaştırma yöntemleri, sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) nakli ve depolanması üzerine bir inceleme, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (3) (**1995**) 137-144.
- [15] Dahmani L., Khenane A., Kaci S., Behavior of the reinforced concrete at cryogenic temperatures. *Cryogenics*, 47 (9) (**2007**) 517-525.
- [16] Dahmani L., Mehaddene R., Thermomechanical response of LNG concrete tank to cryogenic temperatures. *Defect and Diffusion Forum*, 312 (**2011**) 1021-1026.
- [17] Flynn T., *Cryogenic Engineering, Second Edition, Revised and Expanded*, Taylor & Francis, (**2004**).
- [18] Aneziris, O.N., Papazoglou, I. A., Konstantinidou, M., Nivolianitou, Z., Integrated risk assessment for LNG terminals, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 28 (**2014**) 23-35.
- [19] Roetzer J., Baumann T., *Outer concrete containments of LNG-tanks- Design against thermal shock*, in *Tailor Made Concrete Structures*, CRC Press. (**2008**) 185-186.
- [20] Anonim, <http://www.abam.com/blog/2013/12/innovation-in-using-precast-prestressed-concrete-for-liquefied-natural-gas-storage> (Erişim Tarihi: 11 Ağustos **2015**).
- [21] Kurle, Y.M., Wang S., Xu Q., Simulation study on boil-off gas minimization and recovery strategies at LNG exporting terminals. *Applied Energy*, 156 (**2015**) 628-641.
- [22] Anonim, www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/10995.pdf (Erişim Tarihi: 15 Temmuz **2015**)
- [23] Berner D.E., Gerwick Jr B.C., Static and cyclic behavior of structural lightweight concrete at cryogenic temperatures, *Ocean Space Utilization'85*, Springer, (**1985**) 439-445.
- [24] Law B., LNG storage tanks: concrete in an ultra-cold environment, *Concrete Construction*, 28 (6) (**1983**) 465-466.

- [25] Lee G.C., Shih T.S., Chang K.C., Mechanical properties of concrete at low temperature, *Journal of Cold Regions Engineering*, 2 (1) (1988) 13-24.
- [26] Vandewalle L., Bond between a reinforcement bar and concrete at normal and cryogenic temperatures, *Journal of Materials Science Letters*, 8 (2) (1989) 147-149.
- [27] Rostásy F.S., Pusch U., Strength and deformation of lightweight concrete of variable moisture content at very low temperatures, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 9 (1) (1987) 3-17.
- [28] Elices M., Planas J., Maturana P., Fracture of concrete at cryogenic temperatures. *Fracture of Concrete and Rock*, Springer, (1989) 106-116.
- [29] Hanaor A., Testing of concrete specimens for permeability at cryogenic temperatures, *Magazine of Concrete Research*, 34 (120) (1982) 155-162.
- [30] Talbot C., Behavior of Self-Consolidating Concrete at Cryogenic Temperatures, *Concrete plant international 1* (2009) 66-68.
- [31] Kara, F., AISI 52100 Çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması, *Doktora Tezi*, Karabük Üniversitesi, Karabük, (2014).
- [32] Bryson, W.E., *Heat Treatment*, Hanser (2015).
- [33] Arslan, Y., Din 1.2080 Soğuk İş Takim Çeliği Zımbalarda Derin Kriyojenik İşlem ve Temperlemenin Alın Aşınmasına Etkisi, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 3 (1) (2014) 45-55.
- [34] Yayla P., *Kırılma Mekaniği*, Çağlayan Kitapevi, (2007).
- [35] İnce R., Çimento bazlı malzemelerin kırılmasında boyut tesirinin (non-linear kırılma mekaniği) yapay sinir ağları ile incelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, (1994).
- [36] Uğuz A., *Kırılma Mekaniğine Giriş*, Uludağ Üniversitesi Basımevi, (1996).
- [37] Anderson T.L., *Fracture Mechanics: Fundamentals and applications*, Second Edition, Taylor & Francis, (1995).
- [38] Owen D.R.J., Fawkes A.J., *Engineering fracture mechanics: numerical methods and applications*, Pineridge Press, (1983).
- [39] Van Mier J.G., *Fracture process of concrete, assessment of material parameters for fracture models.*, CRC Press, (1997).
- [40] Saouma V. E., Fracture Mechanics, *Lecture Notes*, Boulder, (2000).
- [41] Hariri K., Fracture Mechanics Behaviour of Concrete at Early Age, *Department of civil & mining engineering division of structural engineering*, Report No: 2001:36-2 (2001).
- [42] Alyamaç K.E., Kendiliğinden yerleşen betonun lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleriyle incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, (2008).
- [43] Domone P., Illston J., *Construction materials: their nature and behaviour*, CRC Press, (2010).
- [44] Keleştemur M.H., Yıldız S., Emiroğlu M., Lastik agregali kendiliğinden yerleşen betonlarda kırılma parametrelerinin belirlenmesi, *10. Uluslararası Kırılma Konferansı*, Elazığ (2014) 96-107.
- [45] Landis E.N., Nagy E.N., Three-dimensional work of fracture for mortar in compression, *Engineering Fracture Mechanics*, 65 (2) (2000) 223-234.
- [46] Shah S.P., Swartz S.E., Ouyang C., *Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*, John Wiley & Sons, (1995).
- [47] Bažant Z.P., Cedolin L., *Stability of structures: elastic, inelastic, fracture and damage theories*, World Scientific, (2010).
- [48] Mehta P.K., Monteiro P.J., *Concrete microstructure, properties, and materials*, McGraw Hill, (2006).
- [49] Yardımcı M.Y., Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, (2007).

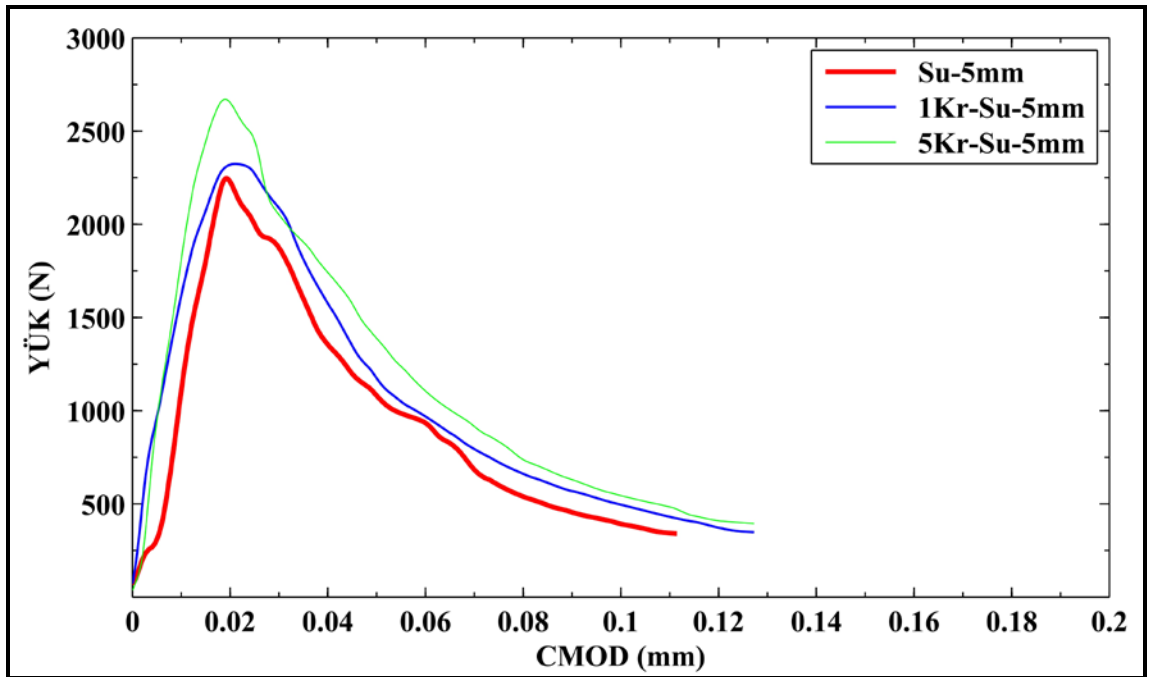
- [50] Tang T., Ouyang C., Shah S.P., Simple method for determining material fracture parameters from peak load., *ACI Materials Journal*, 93 (2) (1996) 147-157.
- [51] *The european guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use*, The european federation of specialist construction chemicals and concrete systems, (2005).
- [52] Özkul M.H., Beton teknolojisinde bir devrim: Kendiliğinden yerleşen-sıkışan beton, *THBB Hazır Beton Dergisi*, 52 (2002) 64-71.
- [53] Safiuddin M., Development of self-consolidating high performance concrete incorporating rice husk ash, *Ph.D. Thesis*. Waterloo Üniversitesi, Waterloo-Canada, (2008).
- [54] Kumar P., Self-compacting concrete: methods of testing and design, *Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division*, 86 (2006) 145-150.
- [55] Domone P.L., A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites*, 29 (1) (2007) 1-12.
- [56] Shah S., Carpinteri A., *Fracture Mechanics Test Methods For Concrete*, Taylor & Francis, (1991).
- [57] Emiroğlu M., Lastik agregalı kendiliğinden yerleşen betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, (2012).
- [58] Jian, X., Xiaomei L., Honghai W., Experimental study on the axial-compression performance of concrete at cryogenic temperatures. *Construction and Building Materials*, 72 (2014) 380-388.
- [59] Krstulovic-Opara, N., Liquefied Natural Gas Storage: Material Behavior of Concrete at Cryogenic Temperatures, *Materials Journal*, 104 (3) (2007) 297-306.

6. EKLER

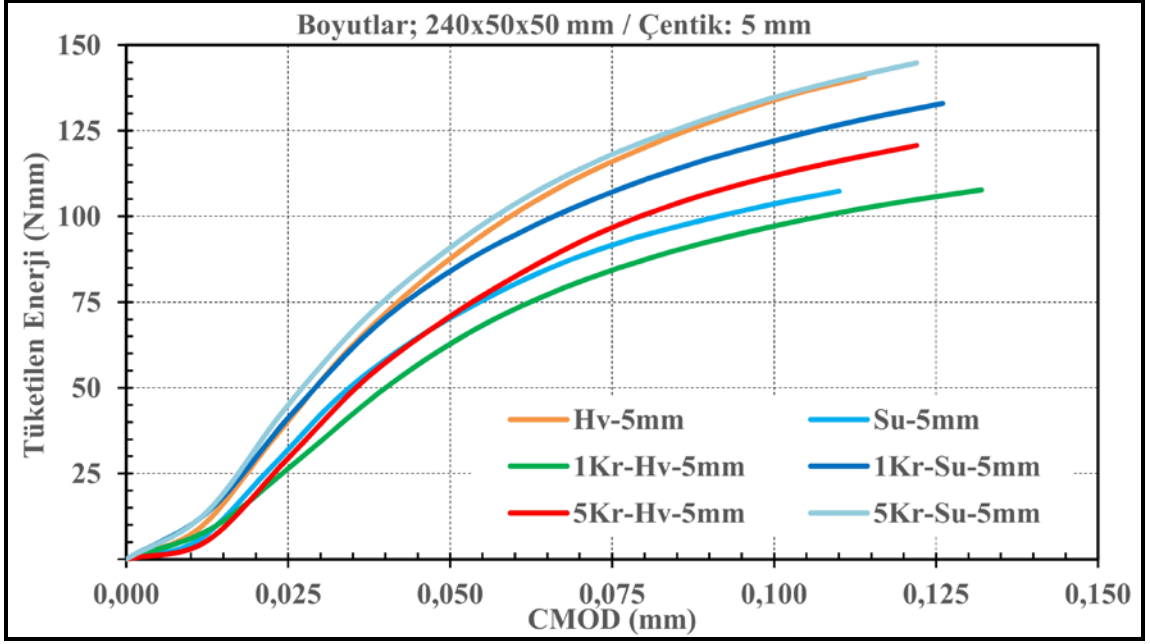
6.1. EK-1 KÜÇÜK BOY KİRİŞLER



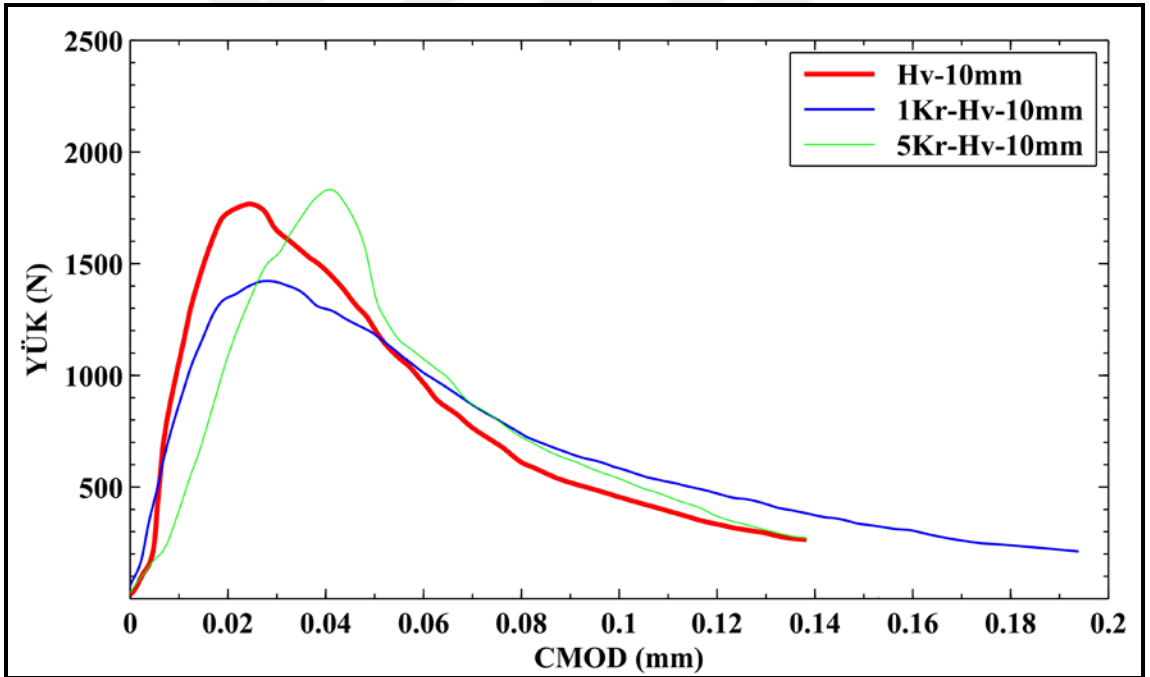
Hv-200-5 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği



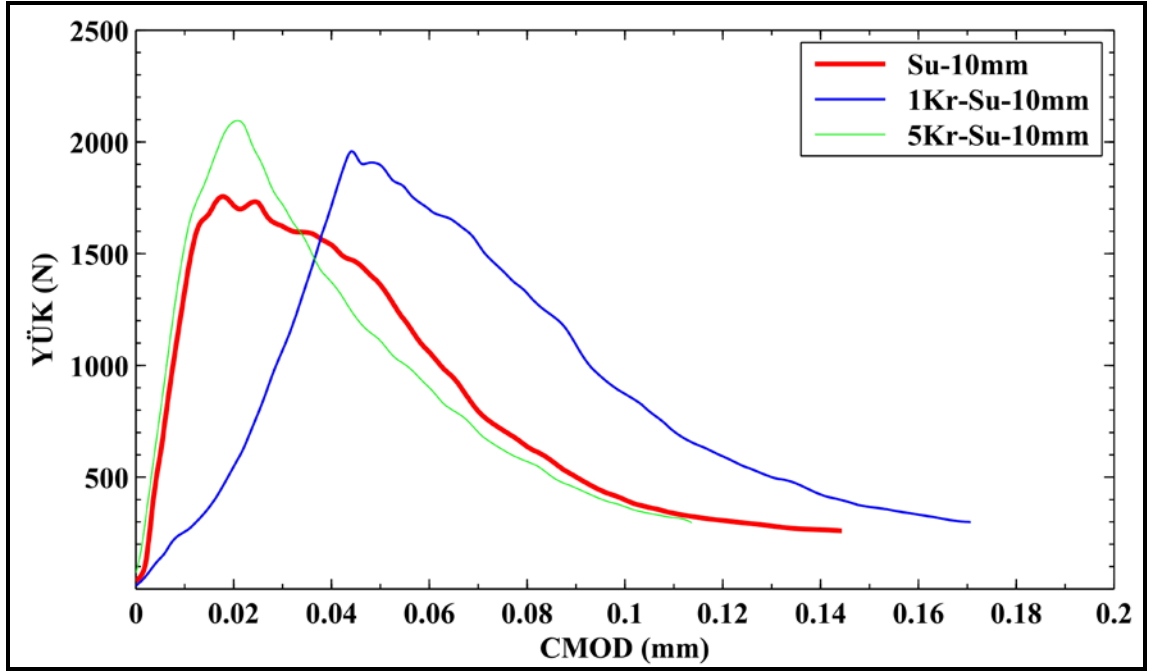
Su-200-5 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği



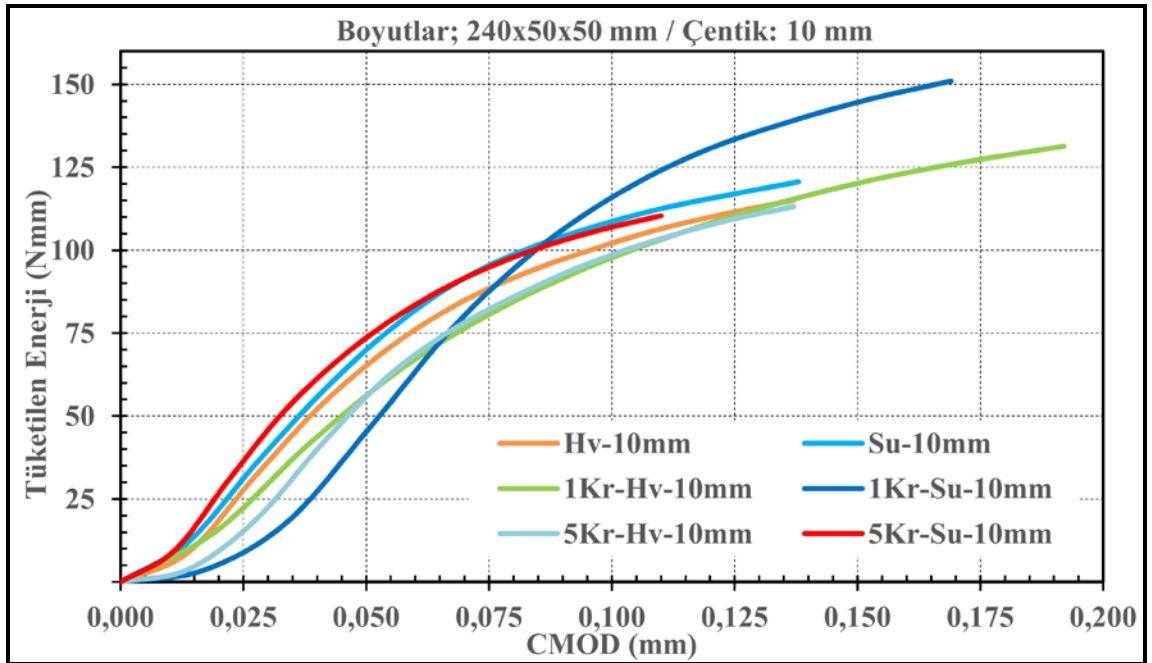
Hv-200-5 mm ve Su-200-5 mm çentikli kirişlerin tükettiği enerjiler



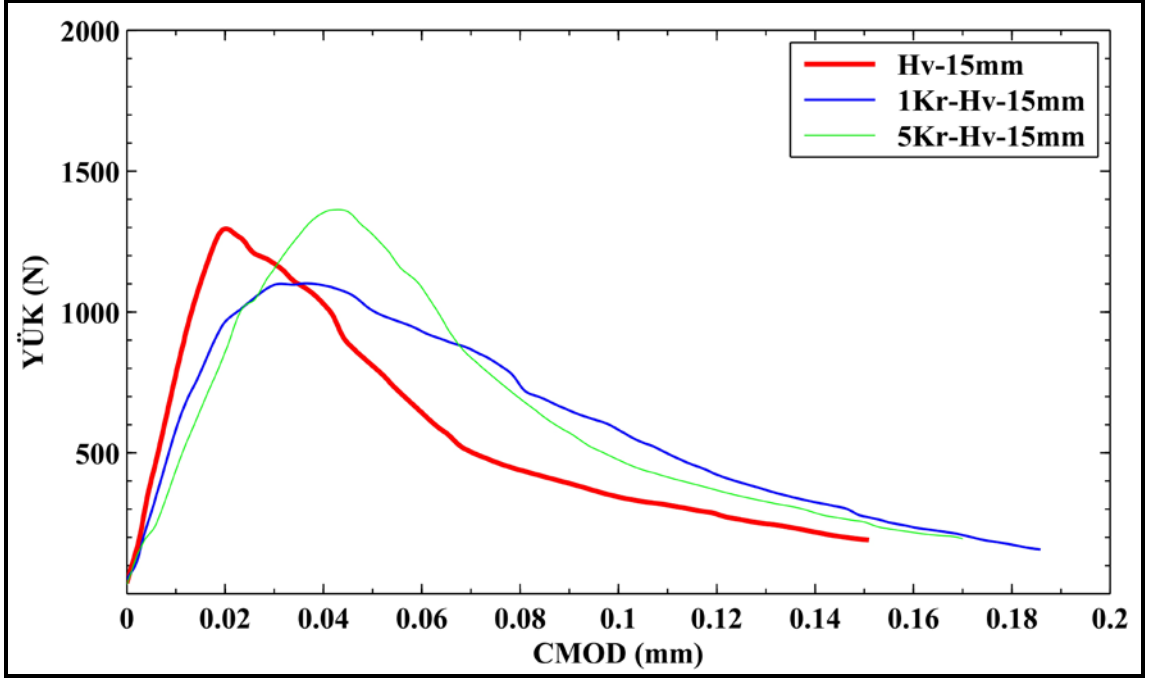
Hv-200-10 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği



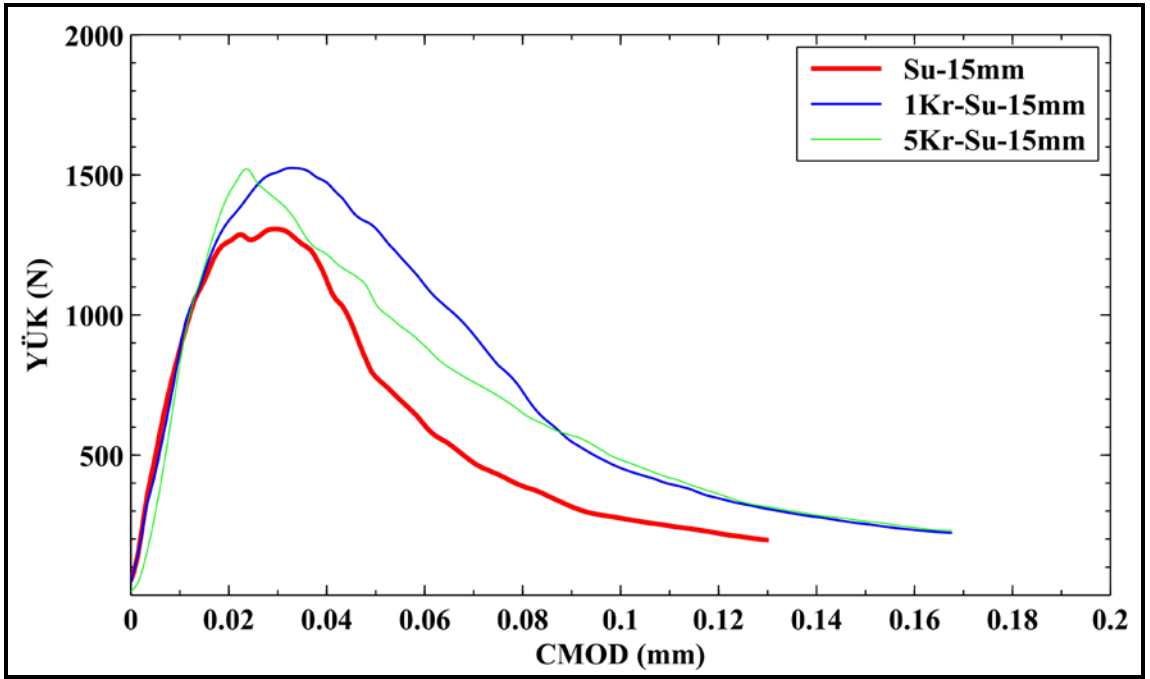
Su-200-10 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği



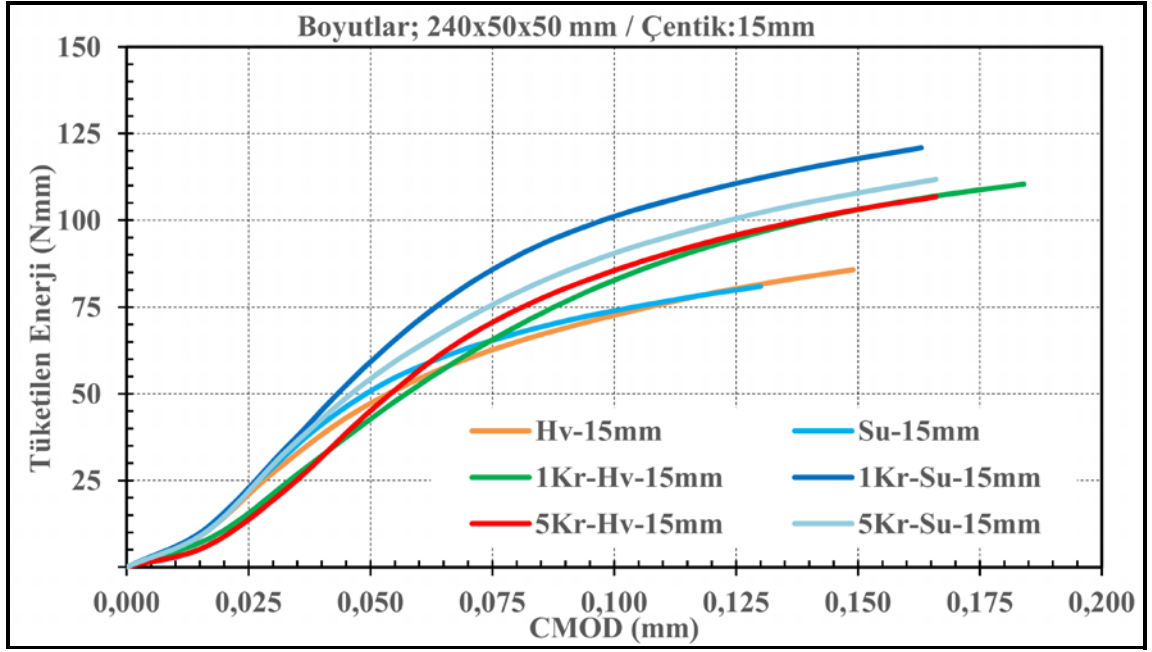
Hv-200-10 mm ve Su-200-10 mm çentikli kirişlerin tükettiği enerjiler



Hv-200-15 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği

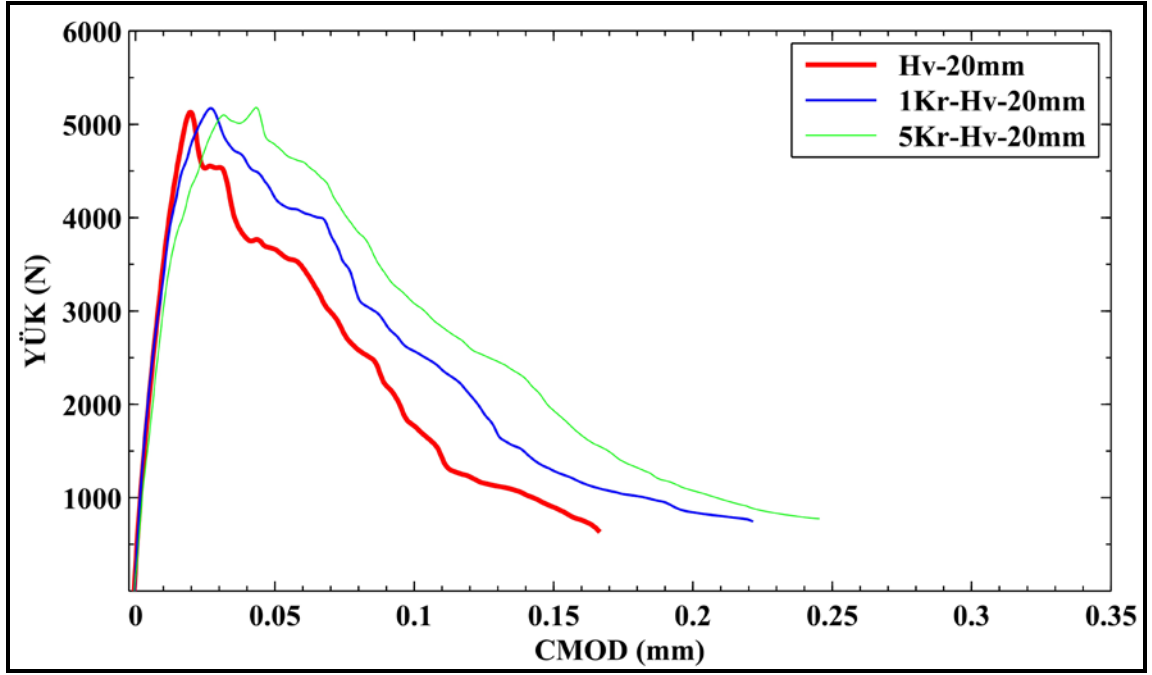


Su-200-15 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği

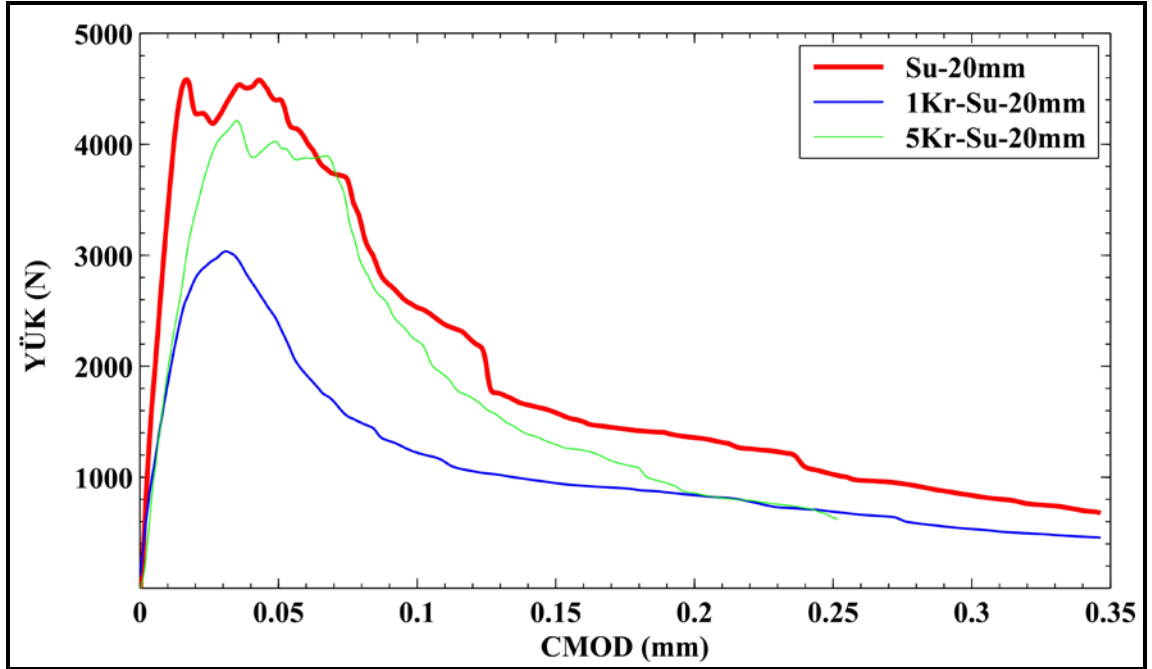


Hv-200-15 mm ve Su-200-15 mm çentikli kirişlerin tükettiği enerjiler

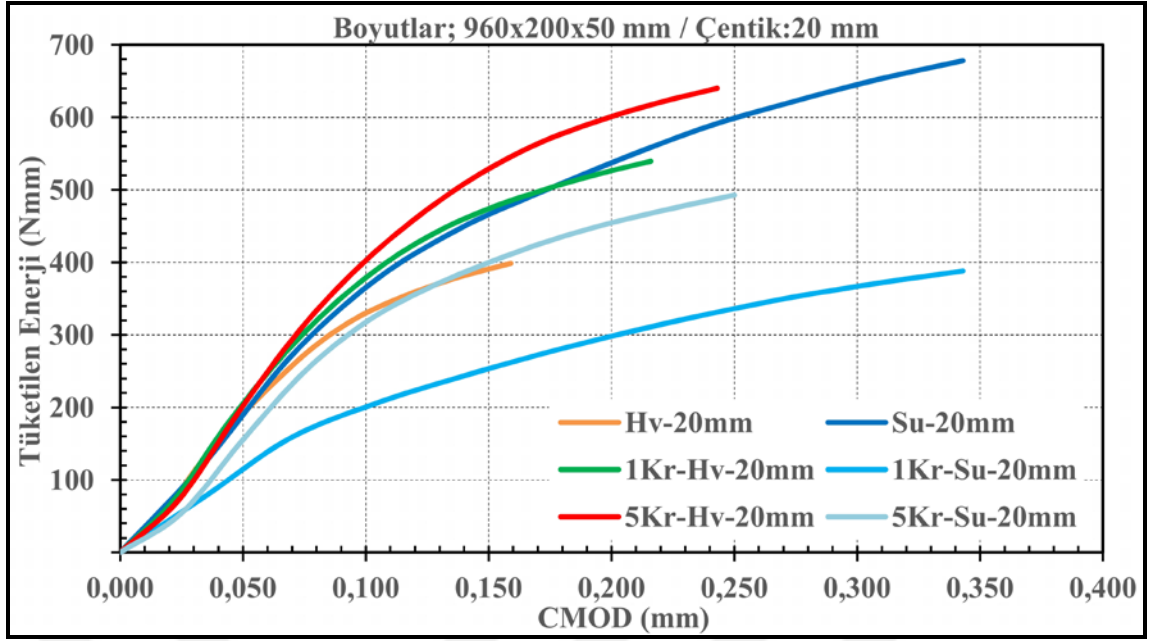
6.2. EK-2 BÜYÜK BOY KIRIŞLER



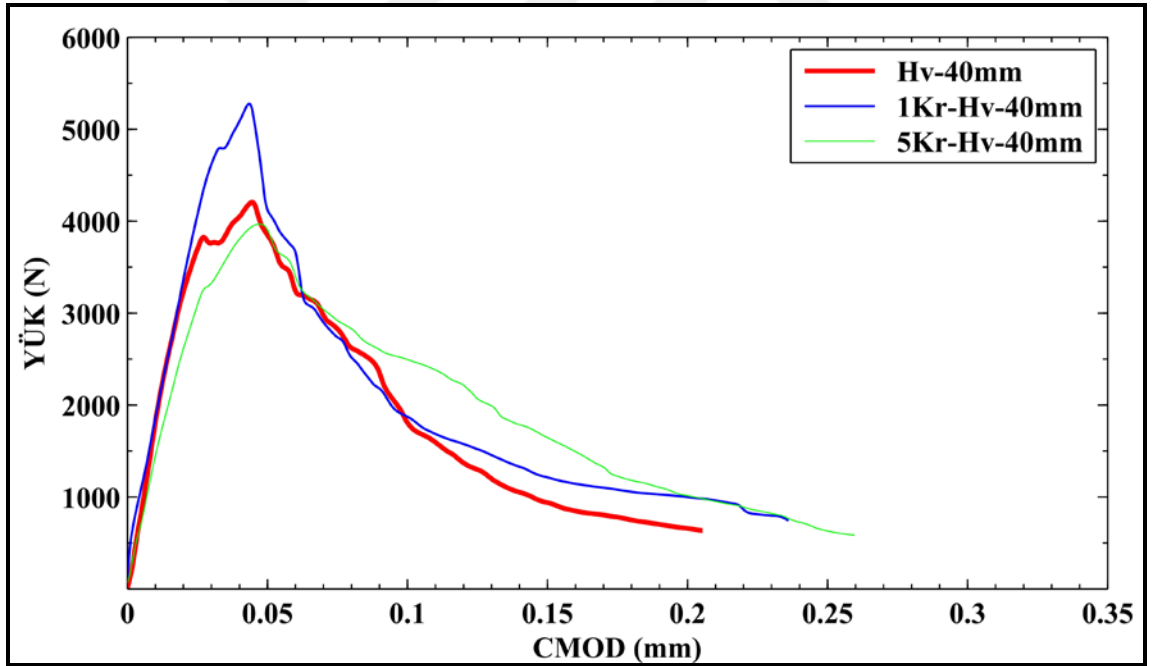
Hv-800-20 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği



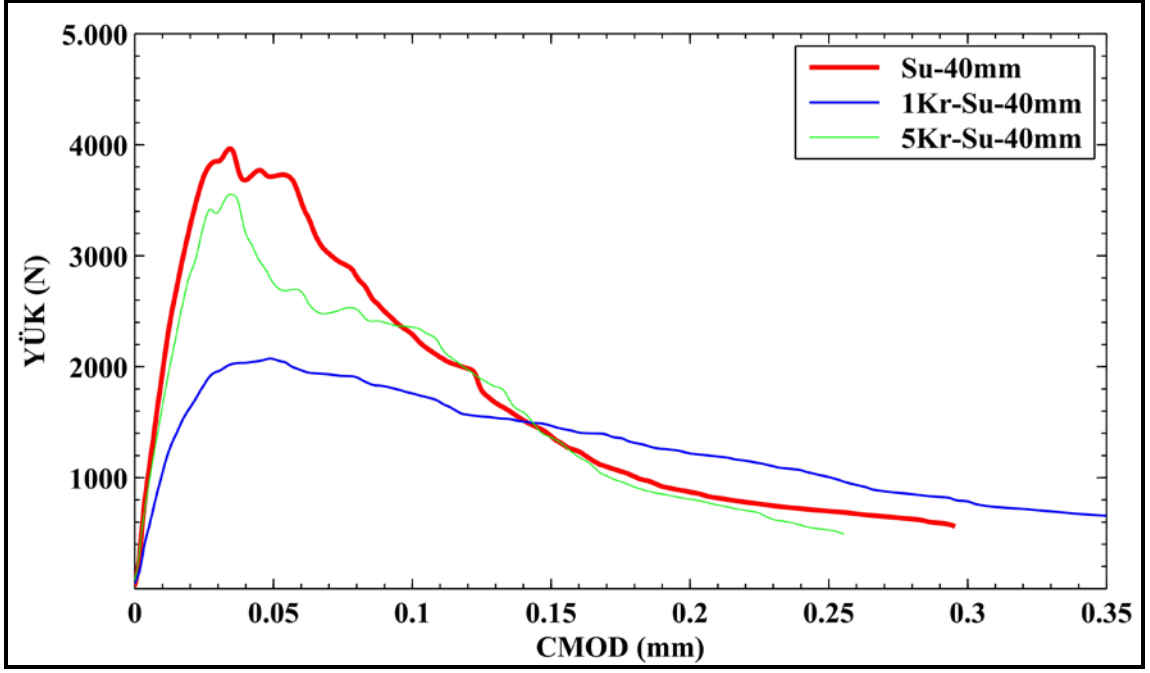
Su-800-20 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği



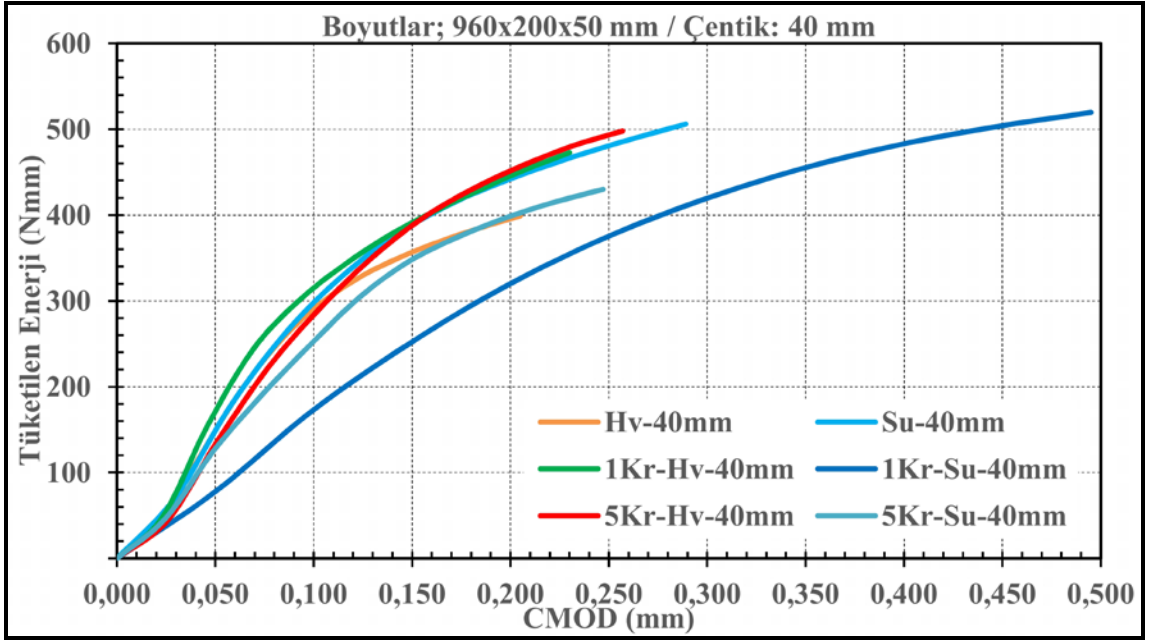
Hv-800-20 mm ve Su-800-20 mm çentikli kirişlerin tükettiği enerjiler



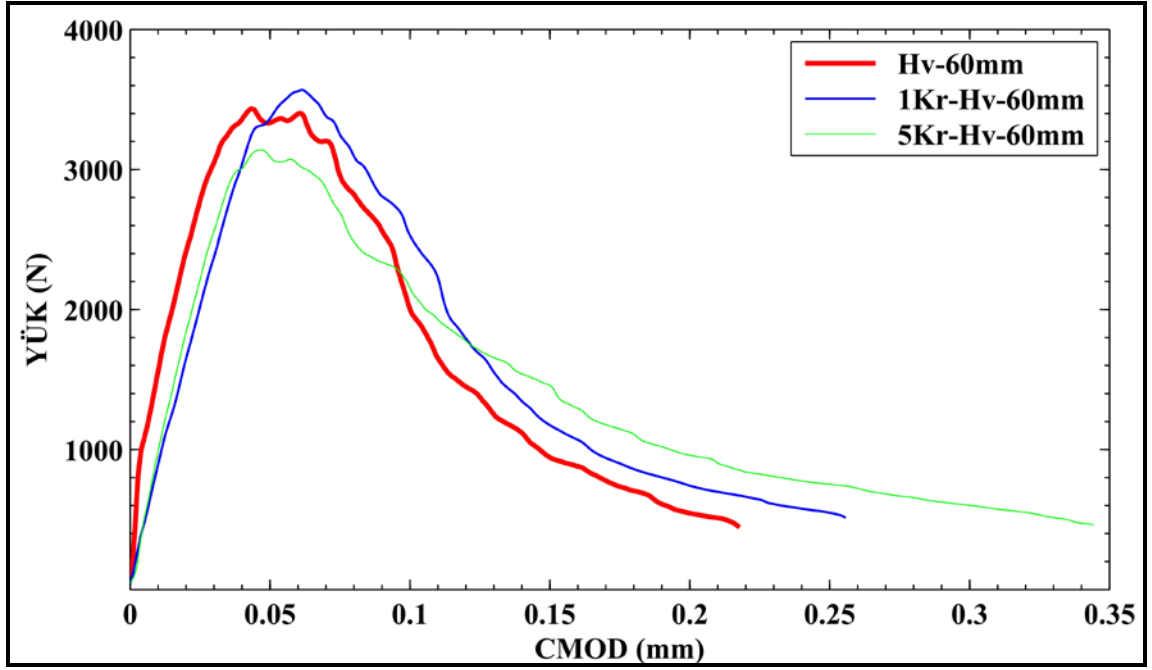
Hv-800-40 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği



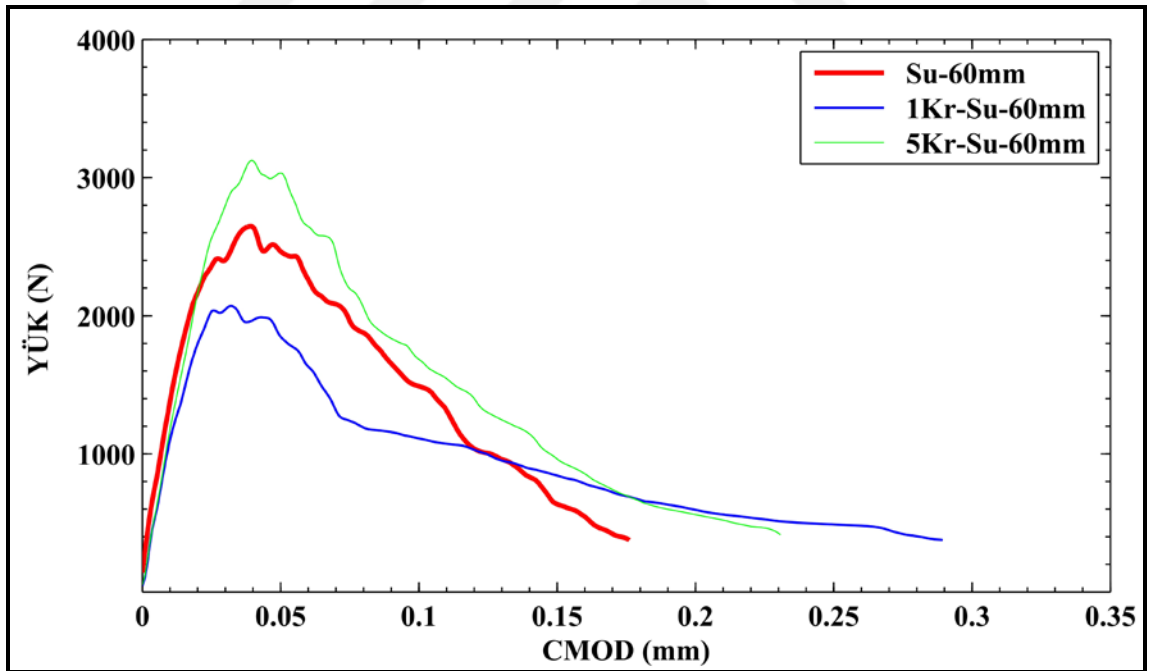
Su-800-40 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği



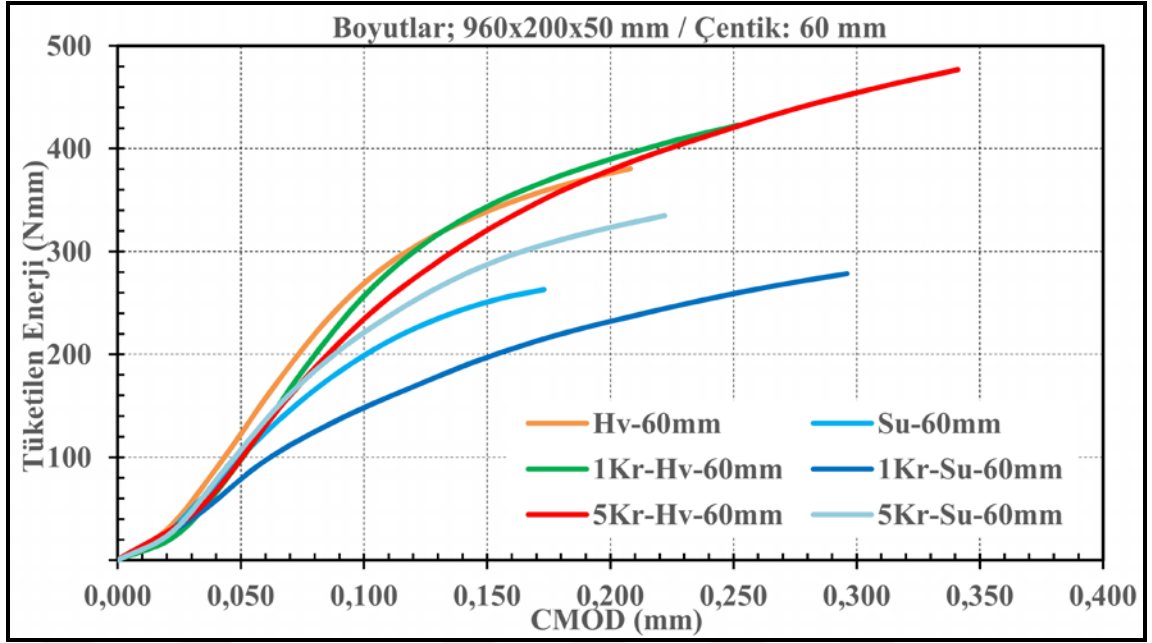
Hv-800-40 mm ve Su-800-40 mm çentikli kirişlerin tükettiği enerjiler



Hv-800-60 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği

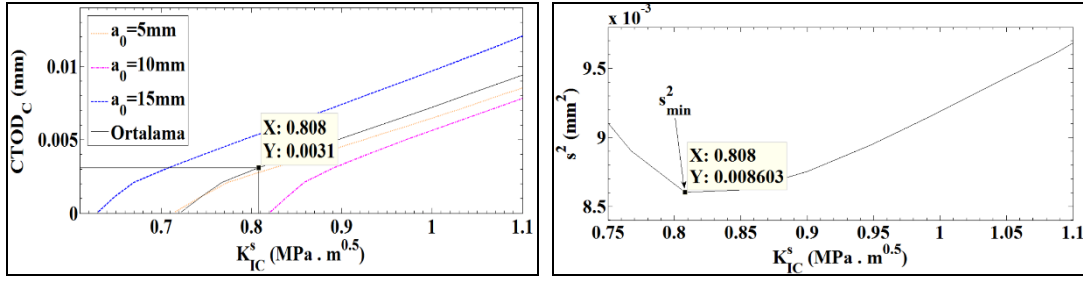


Su-800-60 mm çentikli kirişlerin Yük-CMOD grafiği

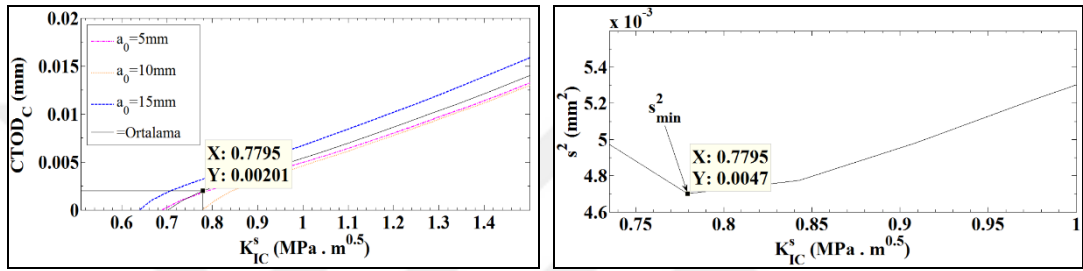


Hv-800-60 mm ve Su-800-60 mm çentikli kirişlerin tükettiği enerjiler

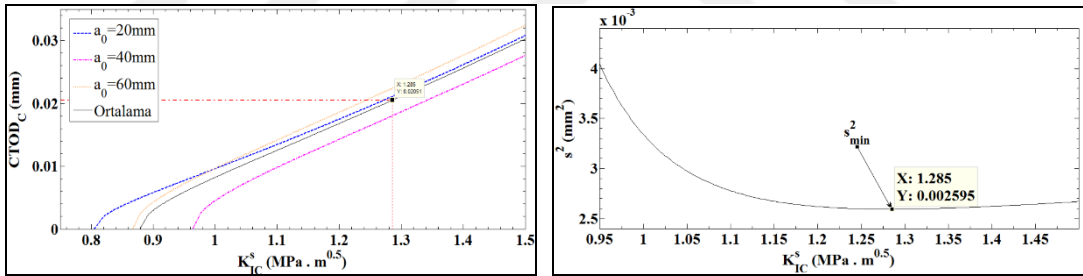
6.3. EK-3 KIRILMA PARAMETRELERİ



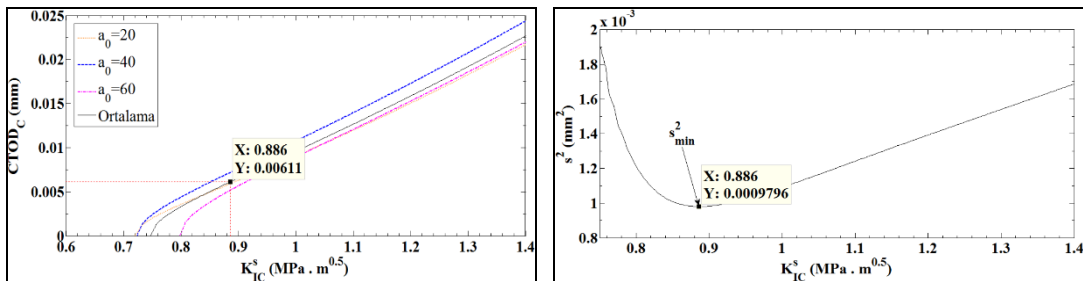
Hv-200 serisi için K_{IC}^s -CTOD_c ve s - K_{IC}^s değişimi



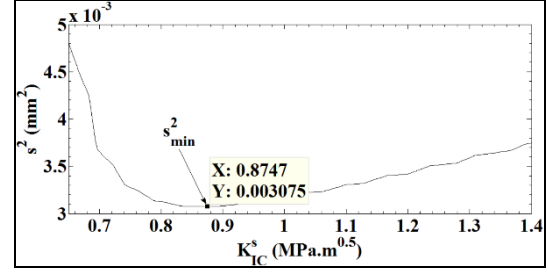
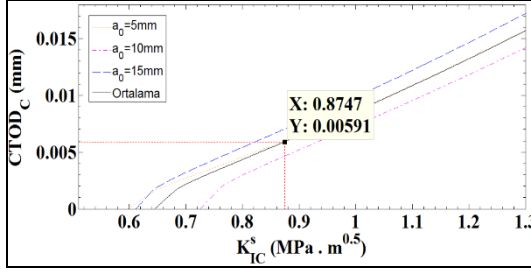
Su-200 serisi için K_{IC}^s -CTOD_c ve s - K_{IC}^s değişimi



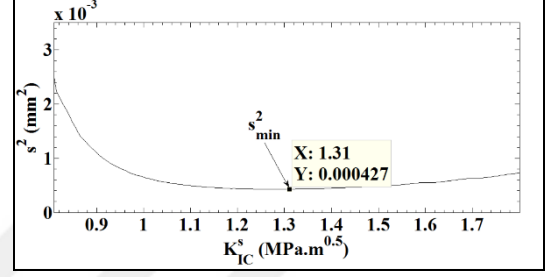
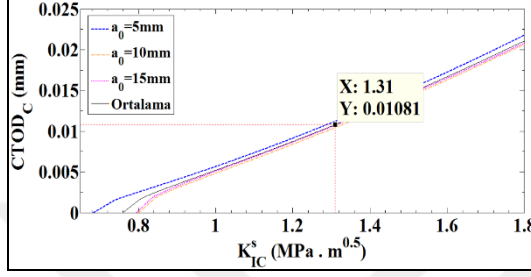
Hv-800 serisi için K_{IC}^s -CTOD_c ve s - K_{IC}^s değişimi



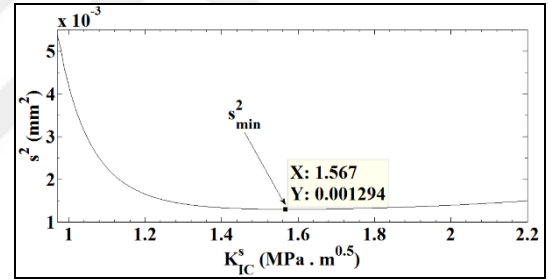
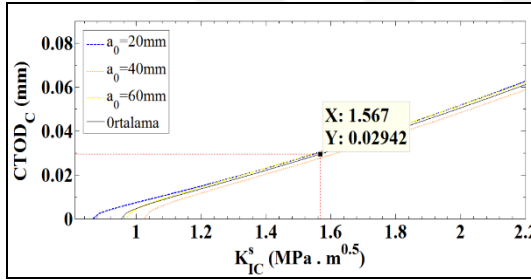
Su-800 serisi için K_{IC}^s -CTOD_c ve s - K_{IC}^s değişimi



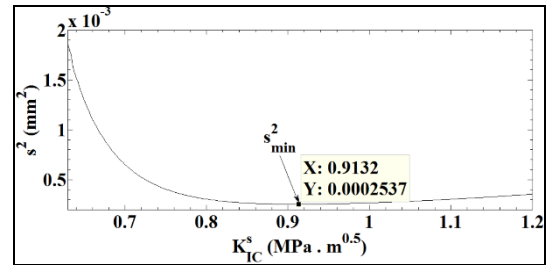
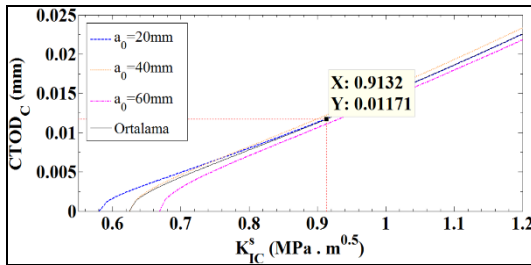
1Kr-Hv-200 serisi için K_{IC}^s -CTOD_c ve s - K_{IC}^s değişimi



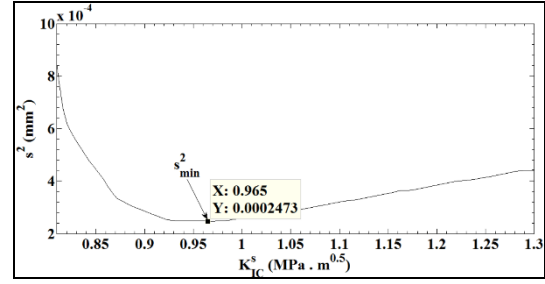
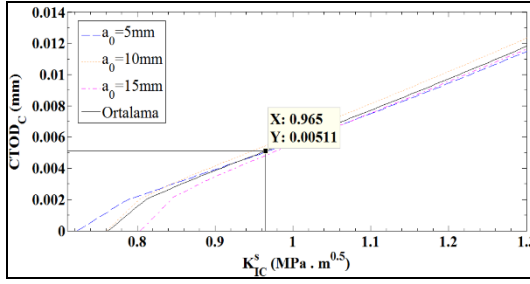
1Kr-Su-200 serisi için K_{IC}^s -CTOD_c ve s - K_{IC}^s değişimi



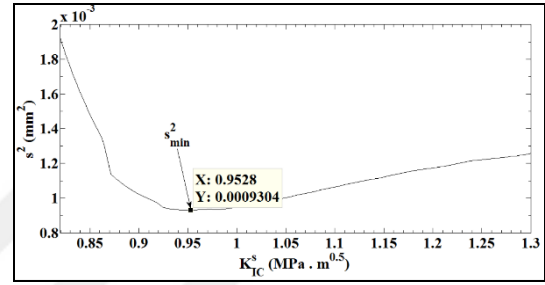
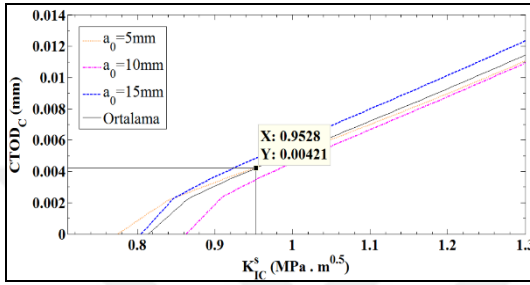
1Kr-Hv-800 serisi için K_{IC}^s -CTOD_c ve s - K_{IC}^s değişimi



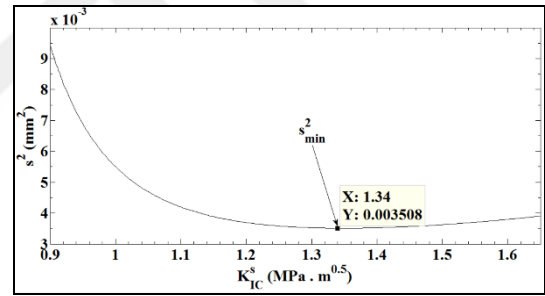
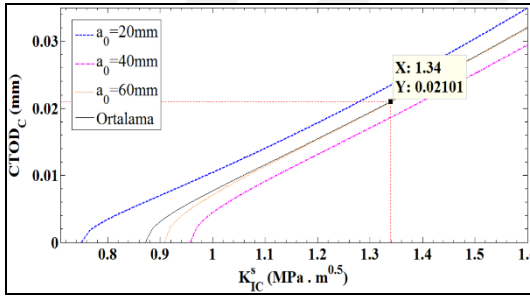
1Kr-Su-800 serisi için K_{IC}^s -CTOD_c ve s - K_{IC}^s değişimi



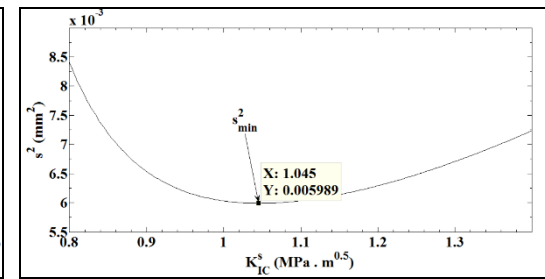
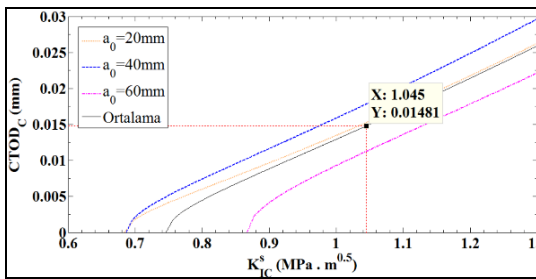
5Kr-Hv-200 serisi için K_{1c}^s -CTOD_c ve s - K_{1c}^s değişimi



5Kr-Su-200 serisi için K_{1c}^s -CTOD_c ve s - K_{1c}^s değişimi



5Kr-Hv-800 serisi için K_{1c}^s -CTOD_c ve s - K_{1c}^s değişimi



5Kr-Su-800 serisi için K_{1c}^s -CTOD_c ve s - K_{1c}^s değişimi

6.4. EK-4 GÖRÜNTÜLER











7. ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı Adı : YURT, Ümit
Uyruğu : T.C.
Telefon : 0380-524-00-99
e-mail : umityurt@duzce.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet: Yılı
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü	2007-2010
Lisans	Anadolu Üniversitesi / Kamu Yönetimi	2003-2008
Lisans	Gazi Üniversitesi / Yapı Öğretmenliği	2001-2005

İş Deneyimi

Yılı	Yeri	Görevi
2010-Devam Ediyor	Düzce Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2006-2010	EN-SU Mühendislik Müş. Ltd. Şti:	Proje Sorumlusu
2005-2006	Baran Mimarlık	Teknik Ressam

Projelerde Yaptığı Görevler

- 1 Gazi Üniversitesi Kampüs Bilgi Sisteminin Oluşturulması, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, 26.10.2008-10.03.2010 (ULUSAL)
- 2 Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu Ve Silis Dumanı İçeren Kriyojenik Sıcaklıklara Maruz Kalmış Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Ve Durabilite Performanslarının Araştırılması, TÜBİTAK PROJESİ, Bursiyer, 15.01.2013-15.11.2015 (ULUSAL)
- 3 Kriyojenik Sıcaklık Etkisindeki Kendiliğinden Yerleşen Betonların Kırılma Mekanik Performansının Belirlenmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, 15.10.2014 (Devam Ediyor) (ULUSAL)

Yayınlar

- 1 Yurt Ü., Tabanoğlu M., Genç Ö., Coğrafi Bilgi sistemleri İle Gayrimenkul Değer Tespiti: Düzce Örneği, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi UMAS 2015
- 2 Çelebi D., Yurt Ü., Yılmaz H., Atabey İ., (2012). Hidroelektrik Santrallerine Yönelik Üç Boyutlu Sayısal Haritaların Üretilmesi. IV. Uzaktan Algılama Ve Coğrafi Bilgi Sistemler Sempozyumu
- 3 Yurt Ü., Tabanoğlu M., Yılmaz H., Atabey İ., (2012). Coğrafi Bilgi Sistemlerine Veri Girişi için Pratik Bir Yaklaşım. IV. Uzaktan Algılama Ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu
- 4 Çelebi D., Yurt Ü., Yılmaz H., Atabey İ., (2012). Hidroelektrik Santrallerin Üç Boyutlu Modellenmesi. IV. Uzaktan Algılama Ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu
- 5 Atabey İ., Yurt Ü., Yılmaz H., (2012). Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü Öğrencilerinin Mevcut Durumu Ve Geleceğe Bakışı. UMÇÖS,