T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GEOPOLİMER VE GELENEKSEL BETONDAN ÜRETİLEN GÖVDE BOŞLUKLU KİRİŞLERİN STATİK VE ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Salih ASLAN

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Salih ASLAN tarafından hazırlanan "Geopolimer ve Geleneksel Betondan Üretilen Gövde Boşluklu Kirişlerin Statik ve Çarpma Yükleri Altında Davranışının Deneysel Olarak Araştırılması" adlı tez çalışması 25/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Özgür ANIL (Gazi Üniversitesi)	……..
Danışman Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN (Konya Teknik Üniversitesi)	……..
Üye Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN (Konya Teknik Üniversitesi)	……..
Üye Prof. Dr. Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ (Konya Teknik Üniversitesi)	……..
Üye Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ (Necmettin Erbakan Üniversitesi)	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması KTÜN Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından 221104056 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Salih ASLAN

Tarih: 11.07.2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

GEOPOLİMER VE GELENEKSEL BETONDAN ÜRETİLEN GÖVDE BOŞLUKLU KİRİŞLERİN STATİK VE ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Salih ASLAN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışmanın: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN

2024, 291 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN
Prof. Dr. Özgür ANIL
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Prof. Dr. Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ

Geopolimer betonların, düşük karbon emisyonu nedeniyle inşaat sektörünün temel yapı taşı olan çimentolu betonun yerini alıp alamayacağı konusu günümüzde yoğun olarak araştırılan konuların başında gelmektedir. Henüz çok yeni bir malzeme olan geopolimer betonların üretim esasları henüz tam olarak belirlenebilmiş değildir. Ayrıca geopolimer betonların donatılı bir yapı elemanında göstereceği yapısal davranışları ortaya koyan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Statik yükler altındaki yapılara, patlama veya çarpmadan dolayı bir dinamik darbe yükü etki edebilmektedir. Ani patlamaların oluşturduğu şoklar, depremler, doğalgaz sistemlerinde meydana gelen patlamalar, kaya çarpması, roket çarpması gibi bir ivmeye sahip olan bu etkiler taşıyıcı sistem üzerinde hasarlara neden olmaktadır. Dinamik yüklerden biri olan çarpma yükü özellikleri ve etkisi en az bilinen ve çalışılan yüklemelerden birisi olup özellikle son yıllarda yapıların darbe yüküne karşı göstermiş olduğu dayanım ve davranışın belirlenmesi amacıyla deneysel, numerik ve teorik olarak incelemeler yapılmaktadır. Yapıyı oluşturan taşıyıcı elemanların en önemli özelliği sünekliği yani şekil değiştirmeye olan yatkınlığıdır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alan, elemanın enerji sönümleme kapasitesini başka bir deyişle sünekliğini ifade etmektedir. Yapı elemanlarına etkiyen statik ve dinamik yükler birbirinden farklı karakterlere sahip olduklarından dolayı elemanda oluşturacakları şekil değiştirmeler yani enerji sönümleme kapasiteleri birbirinden farklı olacaktır.

Bu tez çalışması kapsamında, kullanım alanı her geçen gün artan geopolimer beton ve geleneksel olarak kullanılan Portland çimentolu beton ile oluşturulmuş kiriş elemanları çarpma(darbe) ve eğilme dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Özellikle betonarme kirişlerde, sıhhi tesisat, kalorifer boruları ve havalandırma kanalları gibi tesisatın tavandan geçirilişi sırasında kiriş gövdelerinde kontrolsüz boşluklar oluşturulmaktadır. Açılan boşlukların kiriş davranışına etkileri önemlidir. Bu amaçla çalışma kapsamında öncelik olarak geopolimer beton tasarımı için Mixture Design yöntemi kullanılarak uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve pişirilmiş taş tozu (PTT) atıkları ile 10 farklı karışım oluşturularak geopolimer harçların

mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Oluşturulan karışımlar üzerine basınç mukavemeti, eğilme dayanımı, çarpma dayanımı, birim hacim ağırlığı, su emme, priz süreleri tayini ve yayılma deneyleri yapılmıştır. Daha sonra istenilen özelliklere sahip bir geopolimer beton üretebilmek için silis dumanı, metakaolin vb farklı atık malzemeler eklenip ilave karışımlar hazırlanarak geopolimer betonun optimum karışım oranları belirlenmiştir. Daha sonra mekanik, fiziksel ve işlenebilirlik bakımından ideal karışım oranı kullanılarak geopolimer beton üretilmiştir. Benzer mekanik özelliklere sahip geopolimer ve geleneksel beton kullanılarak boşluksuz ve kiriş mesnet bölgelerinde açılmış farklı boşluk çapı/kiriş yüksekliği oranına sahip (D/H= %25.0, %41.5 ve %55.0) boşluklu dikdörtgen kesitli toplam 32 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Üretilen kirişlerin statik ve dinamik yüklemeler altında davranışları, dayanımları, hasar durumları, çatlak şekilleri, rijitlikleri, enerji yutma kapasiteleri detaylı olarak incelenmiştir.

Çalışmanın sonucunda ön karışım deneylerinde kullanılan C sınıfı uçucu kül miktarının artması, su emme değerini artırmış, basınç eğilme çarpma mukavemetleri, birim hacim ağırlığı ve yayılma değerlerini düşürmüş, priz başlangıç ve bitiş sürelerini oldukça kısaltarak harcın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemiştir.

Yine ön karışım deneylerinde YFC oranının artmasıyla basınç, eğilme, çarpma mukavemetleri ile birim hacim ağırlık değerleri artmıştır aynı zamanda YFC miktarının artmasıyla priz başlangıç ve bitiş süreleri ile yayılma değerlerinin olumsuz etkilendiği görülmüştür. Ancak karışımlara pişirilmiş taş tozunun ilavesi ile işlenebilirliğin yani priz başlangıç ve bitiş süreleri ile yayılma değerlerinin uygulama bakımından ideal koşullara geldiği görülmüştür. Bununla beraber PTT oranının artmasıyla harçların mekanik özelliklerinde (basınç, eğilme ve çarpma mukavemetleri) bir düşüş görülmüştür. Karışımlarda silis dumanının kullanılması basınç mukavemetine ve priz başlangıç süresine olumlu katkı sağlamıştır. Geopolimer ve geleneksel betonarme kesme ve eğilme kirişlerinde boşluk açıldığında 50mm çapın (D/H=%25.0) üstünde açılan boşluklarda yük taşıma kapasiteleri önemli miktarda azalır aynı zamanda süneklik oranı artmıştır. Bu düşüş ve artma oranları boşluk çaplarına uyumludur. Geopolimer ve geleneksel betonarme kesme kirişlerindeki açılan boşluklar sebebiyle meydana gelen yük kapasitesindeki azalmalar, eğilme kirişlerine kıyasla çok daha fazla meydana gelmiştir. Bu yüzden betonarme boşluklu kirişlerde etriye aralığı çok önemli bir faktördür. Daha düşük basınç dayanımı. Geopolimer beton, genellikle Portland çimentolu betona kıyasla daha düşük basınç dayanımına sahiptir. Bu, geopolimer betonun belirli bir yük altında daha kolay çatlayabileceği veya deformasyona uğrayabileceği anlamına gelebilir. Geleneksel betonarme kirişlerin uygulanan sabit enerjili çarpma yüklemesinden Geopolimer kirişlere göre daha fazla etkilendiğini, daha fazla deplasman yaptığını, daha fazla kalıcı plastik deformasyon oluşarak geleneksel betonarme kirişlerin daha fazla enerji yuttuğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar Geopolimer kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki performansının geleneksel betonarme kirişlerden daha yüksek maksimum ivme değerleri göstermiş aynı zamanda daha iyi olduğunu gösteren önemli bir bulgudur.

Anahtar Kelimeler: Boşluklu kiriş, Çarpma dayanımı, Eğilme dayanımı, Geopolimer beton, Pişirilmiş taş tozu ve Silis dumanı.

ABSTRACT

PhD THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BEAMS BEHAVIOR MADE BY CONVENTIONAL CONCRETE AND GEOPOLYMER CONCRETE BEAMS HAVING OPENINGS UNDER STATIC AND IMPACT LOADING

Salih ASLAN

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. İbrahim Hakkı ERKAN

2024, 291 Pages

Jury
Asst. Prof. Dr. İbrahim Hakkı ERKAN
Prof. Dr. Özgür ANIL
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Prof. Dr. Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ
Asst. Prof. Dr. Ali Serdar ECEMİŞ

The issue of whether geopolymer concretes can replace cement concrete, which is the basic building block of the construction sector, due to its low carbon emission is one of the most intensively researched issues today. The production principles of geopolymer concrete, which is still a very new material, have not yet been fully determined. In addition, studies revealing the structural behaviour of geopolymer concretes in a reinforced structural element are quite limited. Structures under static loads may be subjected to a dynamic impact load due to explosion or impact. These effects such as shocks caused by explosions, earthquakes, explosions in natural gas systems, rock impacts, and rocket impacts, which have an acceleration, cause damage to the carrier system. Impact load, which is one of the dynamic loads, is one of the least known and studied loads, and especially in recent years, experimental, numerical, and theoretical investigations have been carried out to determine the strength and behaviour of structures against impact load. The most important feature of the structural elements that make up the structure is its ductility, that is, its susceptibility to deformation. The area under the stress-strain curve expresses the energy absorption capacity of the element, in other words, its ductility. Since the static and dynamic loads acting on the structural elements have different characteristics, the deformations that they will create in the element, that is, their energy absorption capacities will be different from each other.

Within the scope of this thesis, the impact and flexural strengths of beam elements formed with geopolymer concrete, whose usage area is increasing day by day, and conventionally used Portland cement concrete was experimentally investigated. Especially in reinforced concrete beams, uncontrolled gaps are formed in the beam bodies during the installation of plumbing, heating pipes and ventilation ducts through the ceiling. The effects of these holes on beam behaviour are important. For this purpose, the mechanical and physical properties of geopolymer mortars were determined by creating 10 different mixtures with Fly Ash (UK), Blast Furnace Slag (YFC), and Waste Stone Powder (PTT) wastes using the Mixture Design method for geopolymer concrete design. Compressive strength, flexural strength, impact strength, unit volume weight, water absorption, setting times and flow table were performed on the mixtures. Then, in order to produce a

geopolymer concrete with the desired properties, different waste materials such as silica fume, metakaolin, etc. were added and additional mixtures were prepared and the optimum mixing ratios of geopolymer concrete were determined. Then, geopolymer concrete was produced by using the ideal mixture ratio in terms of mechanical, physical and workability. Using geopolymer and conventional concrete with similar mechanical properties, a total of 32 beam specimens with rectangular cross-sections without holes and with different hole diameter/beam height ratios (D/H= 25%, 41.5% and 55%) opened in the beam bearing areas were produced. The behaviour of the beams under static and dynamic loading, their strength, damage conditions, crack patterns, stiffness and energy absorption capacities were investigated in detail.

As a result of the study, the increase in the amount of Class C fly ash used in the pre-mix tests increased the water absorption value, decreased the compressive flexural impact strengths, unit volume weight and flow table test values, shortened the setting start and end times considerably and negatively affected the workability of the mortar.

Again, in the pre-mix tests, it was observed that the compressive, flexural and impact strengths and unit volume weight values increased with the increase in the YFC ratio, and at the same time, the setting start and end times and flow table values were adversely affected by the increase in the amount of YFC. However, with the addition of PTT to the mixtures, it was observed that the workability, i.e. setting start and end times and flow table test values reached ideal conditions in terms of application. However, a decrease was observed in the mechanical properties (compressive, flexural and impact strengths) of the mortars with increasing PTT ratio. The use of silica fume in the mixtures contributed positively to the compressive strength and setting start time. When holes are opened in geopolymer and conventional reinforced concrete shear and flexural beams, the load carrying capacities of the holes opened above 50 mm diameter (D/H=25%) decreased significantly and at the same time the ductility rate increased. These decrease and increase rates are compatible with the hole diameters. The load carrying capacity reductions due to holes in geopolymer and conventional reinforced concrete shear beams were much higher than in flexural beams. Therefore, the stirrup spacing is a very important factor in reinforced concrete hollow beams—lower compressive strength. Geopolymer concrete generally has a lower compressive strength than Portland cement concrete. This may mean geopolymer concrete may crack or deform more easily under a given load. The study demonstrates that traditional reinforced concrete beams are more affected by applied fixed-energy impact loading than geopolymer beams, experiencing greater displacement and more permanent plastic deformation, thereby absorbing more energy. These results indicate that the performance of geopolymer beams under impact loading is superior, as evidenced by higher maximum acceleration values compared to traditional reinforced concrete beams. This finding highlights the improved performance of geopolymer beams under impact loading conditions.

Keywords: Beams with web openings, flexural strength, Geopolymer concrete, Impact resistance, Silica füme and Waste stone powder.

ÖNSÖZ

Yüksek lisanstan itibaren ve bu doktora tez çalışmam boyunca bana her konuda yardımcı olan, beni yönlendiren ve bana değerli zamanını asla esirgemeyen değerli ve sevgili danışma hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam sırasında tecrübeleri ve bilgileriyle yol gösteren, kıymetli fikirlerini ve katkılarını esirgemeyen sayın Prof. Dr. M. Hakan ARSLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez İzleme Komitesinde bana her türlü yönlendirmede bulunan sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ 'e şükranlarımı sunarım.

Doktora öğretimim boyunca maddi destek sağlayan Türkiye Bursları (YTB) Başkanlığı'na ve Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine teşekkür ederim.

Değerli fikirleri ve katkılarını esirgemeyen geopolimer ve geleneksel betonarme boşluklu ve boşluksuz kirişlerin çarpma testi verilerinin analizini yapılışında katkı sağlayan sayın Prof. Dr. Özgür ANIL'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Geopolimer ve geleneksel betonarme boşluklu ve boşluksuz kirişlerin Eğilme ve çarpma testlerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU, Dr. Öğr. Üyesi Hasan Selim ŞENGEL ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan EROL'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez çalışması sırasında yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Alican ŞENKAYA ve Arş. Gör. Ekrem Burak TOKA'ya, laboratuvarda deneylerim esnasında sevincimi, umudumu, endişelerimi ve heyecanımı en yakından gören ve yardımlarını hiç esirgemeyen kardeşim Laith ALSHELASH ve arkadaşlarım Kader YILMAZ, Amer MEŞAL, Gays ALASI, Yusuf TUNÇ ve Hümeyra Ayşe ZÜMRÜT'e teşekkür ediyorum.

Başta abim Haitham ALSHELASH, kardeşim Laith ALSHELASH, Annem ve tüm Ailem'e, hayatım boyunca çalışmalarıma devem edebilmem için her türlü fedakârlığı yapan, motive eden, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve bu aşamaya ulaşmamda yardımcı olan herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Salih ASLAN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **vii**

ABSTRACT ..... **ix**

ÖNSÖZ ..... **xi**

İÇİNDEKİLER ..... **xii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **xvii**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **9**

2.1. Geopolimerler 9

2.1.1. Geopolimerin tanımı ve çevresel etkileri 9

2.1.2. Geopolimerlerin kimyası 13

2.1.3. Geopolimerlerin mekanik özellikleri 14

2.1.4. Geopolimer türleri 15

2.1.5. Geopolimerin kullanım alanları 15

2.1.6. Geopolimerlerin uygulama alanları 16

2.1.7. Geopolimerin avantaj ve dezavantajları 17

2.2. Uçucu Kül (UK) 19

2.3. Yüksek Fırın Curüfü (YFC) 22

2.4. Pişirilmiş Taş Tozu (PTT) 23

2.5. Silis Dumanı (SD) 25

2.6. Alkali Aktivetör 27

2.6.1. Sodyum hidroksit (SH) 27

2.6.2. Sodyum silikat (SS) 30

2.7. Çarpma Yükü ile İlgili Literatür 32

2.8. Boşluklu Kiriş 38

3. MATERYAL VE YÖNTEM 44

3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler 44

3.1.1. Uçucu kül 44

3.1.1.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması 45

3.1.2. Yüksek fırın cürufu 48

3.1.3. Pişirilmiş taş tozu 50

3.1.4. Alkali aktivatörler 51

3.1.4.1. Sodyum hidroksit (NaOH) 52

3.1.4.2. Sodyum silikat (Na_2SiO_3) 53

3.1.5. Agrega 54

3.2. Geopolimer Harç Üretimi 54

3.2.1. Numune hazırlama ve kuru işlemleri 55

3.2.2. Deney tasarım yöntemi 56

3.3. Geopolimer Harç Numuneler Üzerine Yapılan Deneyler 57

3.3.1. Priz alma süresinin tayini deneyi (vicat aleti) 57

3.3.2. Yayılma tablası 58

3.3.3. Basınç dayanımı 59

3.3.4. Eğilme dayanımı 61

3.3.5. Birim hacim ağırlığı 63

3.3.6. Su emme deneyi 64

3.3.7. Çarpma deneyi 66

3.4. İlave Denenmiş Karışımlar 67

3.4.1. Silis dumanı 68

3.4.2. Metakaolin 70

3.4.1. F Sınıfı uçucu kül 72
3.4.2. Seydişehir Eti Alüminyum tesislerden elde edilen uçucu kül 73
3.5. GB ve GPC kirişlerin Üretimi 74
3.5.1. Deney numunelerinin tasarımı 74
3.5.2. Kirişlerinin üretimi 75
3.5.2.1. Donatıların hazırlanması 75
3.5.2.2. GPC dökümü 77
3.5.2.3. GB dökümü 78
3.5.3. Kirişlere boşlukların açılması 79
3.6. Ana Deneylerde Kullanılan GPC ve GB Basınç Deneyleri 82
3.7. Kiriş Numunelerine (Boşluklu-Boşluksuz) Statik Deneylerin Yapılması 84
3.8. Kiriş Numunelerine (Boşluklu-Boşluksuz) Dinamik (Çarpma) Deneylerin Yapılması 85
3.8.1. Mesnet düzeneği 88
3.8.2. Ölçüm aygıtları 89
3.8.3. Kuvvet algılayıcısı 89
3.8.4. İvme ölçerler 91
3.8.5. GPC ve GB kirişlerin çarpma testinde kullanılan yöntem 94
3.9. Boşluklu Kirişlerde Kırılma Mekanizması 98
3.10. Değerlendirilen Parametreler 99
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 101
4.1. Geopolimer Harç Üretimi Ön Tasarım Deney Sonuçları 101
4.1.1. Birim hacim ağırlık deneyi 102
4.1.2. Yayılma deneyi 104
4.1.3. Basınç deneyi 106

.4.1.4 Eğilme deneyi 110
4.1.5. Çarpma dayanımı 112
4.1.6. Su Emme deneyi 115
4.1.7. Priz alma süresinin tayini deneyi 116
4.2. İlave Karışımların Deney Sonuçları 121
4.2.1. İlave karışımların priz başlangıç sürelerinin sonuçları 121
4.2.1.1. Mixture design programında (ön tasarım) kullanılan malzemelerin karışım oranlarının değiştirilerek priz başlangıç sürelerinin tayini 121
4.2.1.2. Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. uçucu külü (UKS) kullanılarak elde edilen karışımların priz başlangıç süreleri 122
4.2.1.3. F sınıfı uçucu kül kullanılan karışımların priz başlangıç süreleri 123
4.2.1.4. Metakaolin içeren karışımların priz başlangıç süreleri 124
4.2.1.5. Silis dumanı içeren karışımların priz başlangıç süreleri 125
4.2.2. İlave karışımların 7 günlük basınç dayanımı sonuçları 126
4.2.2.1. Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. uçucu külü (UKS) kullanılarak elde edilen karışımların 7 günlük basınç dayanımı sonuçları 126
4.2.2.2. F sınıfı uçucu kül kullanılan karışımların 7 günlük basınç mukavemetleri 126
4.2.2.3. Metakaolin kullanılan karışımların 7 günlük basınç mukavemetleri 128
4.2.2.4. Silis dumanı kullanılan karışımların 7 günlük basınç mukavemetleri .. 129
4.3. GPC ve GB Boşluklu-Boşluksuz Kirişlerin Statik Yükleme Sonuçları 131
4.3.1. GB kesme ve eğilme kiriş numuneleri 131
4.3.1.1. GB kesme kiriş numuneleri 133
4.3.1.2. GB eğilme kiriş numuneleri 141
4.3.2. GPC kesme ve eğilme kiriş numuneleri 151
4.3.2.1. GPC kesme kiriş numuneleri 153

4.3.2.2. GPC eğilme kiriş numuneleri 162
4.3.3. GPC ve GB numune kirişlerinin statik yükleme altında deneysel sonuçlarının karşılaştırması 172
4.4. GPC ve GB Boşluklu-Boşluksuz Kirişlerin Dinamik Yükleme Sonuçları 180
4.4.1. GB kesme ve eğilme kiriş numuneleri 181
4.4.1.1. GB kesme kiriş numuneleri 183
4.4.1.2. GB eğilme kiriş numuneleri 194
4.4.2. GPC kesme ve eğilme kiriş numuneleri 205
4.4.2.1. GPC kesme kiriş numuneleri 207
4.4.2.2. GPC Eğilme kiriş numuneleri 218
4.4.3. GPC ve GB numune kirişlerin dinamik yükleme altında deneysel sonuçları karşılaştırması 229
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 242
5.1. Sonuçlar 242
5.2. Öneriler 246
KAYNAKLAR 248

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Ac	: Numune yüzeyinin en kesit alanı, mm^2.
Al	: Alüminyum
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
b	: Numunenin genişliği (mm)
Ca	: Kalsiyum
$CaCO_3$	: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyum oksit
Co	: Karbonmonoksit
CO_2	: Karbondioksit
Cr	: Krom
Ç	: Çarpma dayanımı
d	: Numunenin kalınlığı (mm)
D	: Numunenin Kuru halde ağırlığı (gr)
d_1 ve d_2	: Numunenin enkesit boyutları, (mm)
E_{ab}	: Numuneler tarafından emilen enerji miktarı
$E_{çarpma}$	: Çarpma enerjisi
Ek	: Kinetik enerji
Fc	: Basınç dayanımı, MPa.
Fe	: Demir
Fe_2O_3	: Demir oksit
g	: Yerçekimi
h	: Çekicin yüksekliği
I_P	:İmpuls
Hg	: Cıva
K	: Potasyum
K_2SiO_3	: Potasyum silikat
KOH	: Potasyum hidroksit
L_1	: Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm.
L_2	: Numunenin boyu (mm)
ΔM	: Momentumdaki değişime

M	: Molarite
M_1	: Kütle
Mn	: Manganez
MnO	: Manganez oksit
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
Na	: Sodyum
Na_2SiO_3	: Sodyum silikat
Na_2SO_4	: Sodyum Sülfat
NaOH	: Sodyum hidroksit
P	: Kırılma yükü (N)
P_b	: Kurşun
P_{max}	: Maksimum Yük (kN)
Pu	: 0.85 P_{max} (kN)
q	: Basınç çarpma dayanımların arasındaki oranı
R	: Yükleme hızı, N/s,
s	: Gerilme artış hızı, MPa/s (N/mm^2 /s),
Sa	: Su emme oranı (%).
Si	: Silisyum
SiO_2	: Silisyum oksit
Si– O–Al–O–	: Poly (sialate)
Si–O–Al– O–Si–O–Si–O–	: Poly (sialate-disiloxo)
Si–O–Al–O–Si–O–	: Poly (sialate-siloxo)
Si–O–Si–O–	: Poly (siloxo)
Sr	: Stronsiyum
Ti	: Titanyum
v	: Çekicin çarpma anındaki hızı
V	: Numunenin hacmi (cm^3)
$V_{çarpma}$	: Çekicin çarpma anındaki hızı
V_r	: Geri tepme hızı
W/mK	: Metre başına watt kelvin
Wk	: Numunenin Kuru Ağırlığı.
Ws	: Numunenin Doymuş Ağırlığı.

δu ve δy	: Pu noktasında gelen deplasman değeri (mm)
μm	: Milimikron
σ	: Basınç dayanımı
σ_e	: Eğilme dayanımı, MPa

Kısaltmalar

ACI	: Amerikan beton enstitüsü yapısal beton işleri yapım şartnamesi
ASTM	: Amerikan deney standartları
B	: Bağlayıcı
CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer
CFST	: Betonla doldurulmuş çelik boru elemanlarının
CL	: Plastisiteli kil
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
CT	: Atık cam tozu
D	: Delik çapı
DZ	: Doğal zeolit
ESOGÜ	: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
FE	: Sonlu eleman yöntemi
FRP	: Fiber takviyeli polimer
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
G	: Yer çekimi (mm/s^2)
GB	: Geleneksel Beton
GPC	: Geopolimer betonu
H	: Kiriş yüksekliği
H_1	: Tokmağın yüksekliği (mm)
HPC	: Yüksek performanslı beton
KT	: Kireç taşı tozu
KTÜN	: Konya Teknik Üniversitesi
L	: Likit
LVDT	: Doğrusal değişken diferansiyel transformatörler
LWC	: Hafif boşluklu kirişler

m	: Çekicin ağırlığı (kg)
M_1	: Kütle (kg)
MK	: Metakaolin
n	: Vuruş sayısı
N-A-S-H	: Sodyum alüminyum silikat hidrat
NWC	: Derin boşluklu kirişler
NWC	: Orta boşluklu kirişler
ÖYFC	: Öğütülmüş yüksek fırın cürufu
PTT	: Pişirilmiş taş tozu
RC	: Betonarme
SD	: Silis dumanı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SH	: Sodyum hidroksit
SS	: Sodyum silikat
T	: Düşürme zamanı
U	: Çarpma enerjisi
UK	: Uçucu kül
UKF	: F Sınıfı uçucu kül
UKS	: Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.'den temin edilen uçucu kül
ULCC	: Ultra hafif çimento
V	: Vuruş hızı (mm/s)
W	: Ağırlık (N)
XRD	: X-Işını difraktometresi
YFC	: Yüksek fırın cürufu
YSA	: Yapay sinir ağı yöntemi

1. GİRİŞ

Günümüzde, binaların yapımında en çok kullanılan yapı malzemesi, betonarme yapıların taşıyıcı sistemi ile birlikte birçok harçlı imalatlarda kullanılan ve geleneksel yöntemlerle imal edilen Portland Çimentosudur. Portland Çimentosu'nun üretimi aşamasında çevreye büyük miktar CO_2 salınımından dolayı çimento kullanımı çevreye olumsuz etkilemektedir.

Yüksek basınç dayanımlı, fiziksel ve kimyasal tesirlere karşı dayanıklı beton üretimi ve kullanımı, günümüzde yaygınlaşmaktadır. Ayrıca Geleneksel Beton (GB) malzemesine alternatif olarak diğer bir yapı malzemesi olan yapısal çeliğin fiyatının hem ekonomik hem de politik koşullara son derece duyarlı olmasından dolayı ülkemizde çok fazla tercih edilmemektedir.

GB imalatında genellikle çimento, su ve agrega bulunmaktadır. Taşıyıcı sistemi betonarme olan yapıların yapısal ve yapısal olmayan elemanlarında yoğun kullanım oranına sahip Portland Çimentosunu üretmek için gereken yüksek enerji miktarı ve çevreye salınan karbondioksit nedeniyle, ülkemizde ve dünya çapında yeni nesil sürdürülebilir yapı malzemelerinin arayışı son yıllarda artmaktadır.

Bağlayıcı malzeme olarak çimento içermeyen beton olarak da bilinen Geopolimer Beton (GPC) veya alkali aktif beton, son zamanlarda birçok araştırmacı tarafından araştırma konusu olmuştur. Çimento içermeyen bu betonlarda farklı birçok bağlayıcılar kullanılabilir. Uçucu Kül (UK), Silis Dumanı (SD), Yüksek Fırın Cürufu (YFC) ve Pişirilmiş Taş Tozu (PTT) bunlara örnek olarak verilebilir. Bu bağlayıcıların sertleşip zamanla mukavemet kazanabilmesi için su yerine çeşitli alkali aktivatörler kullanılır. Bu aktivatörlerden en yaygın olanı ve diğer kimyasallara göre daha ekonomik olmasından dolayı, sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımları kullanılmaktadır.

Literatatürde geopolimer beton ile ilgili yapılan ilk çalışma Davidovits (2015) tarafından yapılmıştır. Davidovits (2015) alüminosilikat içeren atık malzemeler kullanarak ve alkali aktivatörler ile GPC üretmiştir.

UK, YFC ve PTT gibi endüstriyel atıkların geri dönüşümünün önemi son yıllarda artmaktadır. Bu atıkları çeşitli alkalilerle aktive ederek bağlayıcı malzeme üretilebilir. Farklı araştırmacılar da bu bağlayıcıları kullanılarak üretilen betonlara geopolimer beton

demişlerdir (Qaidi ve diğ., 2022; Amran ve diğ., 2021; Abdulrahman ve diğ., 2022; Chokkalingam ve diğ., 2022; Amin ve diğ., 2022; Mustakim ve diğ., 2021; ve Zuaiter ve diğ., 2022).

Amerikan deney standartları (ASTM C618-19)'a göre uçucu küller C ve F sınıfı olmak üzere 2 sınıfa ayrılır. ASTM C618–19 standardı, Silisyum Oksit (SiO_2) + Alüminyum Oksit (Al_2O_3) + Demir Oksit (Fe_2O_3) içeriği %50'den fazla olan bitümlü kömürlerden elde edilen uçucu külleri C sınıfı olarak tanımlamaktadır. Ayrıca, kalsiyum oksit (CaO) oranın UK'da C sınıfı sınıflandırmasında %10'dan fazla olduğu belirtilmektedir (ASTM C618, 1998).

Geopolimer malzemeler hem düşük karbondioksit salınımı hem de yüksek mekanik ve fiziksel özellikleri ile birlikte yüksek durabilite özellikleri nedeniyle, son zamanlarda ilgi odağı olmuştur. Son yıllarda, çimento üretimi sırasında enerji tüketimi ve CO_2 gazı salınımı nedeniyle çimentoya alternatif bağlayıcı yapı malzemeleri geliştirme çabaları önem kazanmıştır. Yapılan araştırmalar, çimento üretiminde enerji maliyetinin %20 ila %40 arasında olduğunu göstermiştir (Singh ve diğ., 2019; Wang ve diğ., 2009; Zhang ve diğ., 2019). 1 ton çimento üretiminde yaklaşık 1 ton CO_2 eşdeğeri emisyon salındığı da bilinmektedir. Bununla birlikte çimento üretim tesisleri yıllık CO_2 salınımının yaklaşık %5 ila %8'ini oluşturmaktadır (Demir, 2022). Bu açıdan özellikle karbon ayak izi düşünüldüğü zaman beton üretiminde kullanılan çimentonun azalmasıyla ekolojiye verilen zararın azalacağı bilinmektedir.

Geopolimerizasyon, heterojen bir kimyasal reaksiyon olarak bilinir. Boyacı'ya (2019) göre, silikat hidratları ısıya maruz kaldığında, OH- iyonları suya ayrışır ve böylece Si-O-Al bağları oluşur. Bu reaksiyon, hem yüksek alkali ortamlarda hemde orta ısılarda Si-O-Al ve Si-O-Si bağlarını içeren amorf yarı-kristal polimerik yapıları oluşturur. Bu bağlar, katı alüminosilikat oksitler ve alkali metal silikat çözeltileri arasında gerçekleşir (Bingöl, 2018).

Si/Al oranına bakıldığında, literatürde tanımlanmış çeşitli geopolimerler görülmektedir. Geopolimerler örneklerinden bazıları şunlardır: Camsuyu esaslı geopolimer, poly (siloxo) Si–O–Si–O– (Si: Al=1:0), kaolin hidrosodalit esaslı geopolimer, poly (sialate) –Si– O–Al–O– (Si: Al=1:1), metakaolinit esaslı geopolimer, poly (sialate-siloxo) –Si–O–Al–O–Si–O– (Si: Al=2:1), kalsiyum esaslı geopolimer, (Ca, K, Na)-sialate, (Si: Al=1, 2, 3),

kayaç esaslı geopolimer, poly(sialate-multisiloxo) (1<Si: Al<5) silika esaslı geopolimer, sialate ve siloxo bağlı poly(siloxonate) (Si: Al>5) ve uçucu kül esaslı geopolimerlerdir (Zeybek, 2009).

Potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum silikat (K_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) gibi alkali aktivatörler, aktivasyon işlemlerinde kullanılır (Atis ve diğ., 2015; Okoye, 2015; Yu ve diğ., 2017; ve Chi ve diğ., 2019). Geleneksel portland çimentosunda bulunan C-S-H jeli, alkali aktivasyon yoluyla oluşturulan geopolimerlerde N-A-S-H veya C-A-S-H jelidir (Davidovits, 1994; ve Luhar ve diğ., 2021). Bu jelin geopolimerin dayanım mekanizmasında oynadığı rol çok önemlidir. Bununla birlikte, karışımda kullanılan bağlayıcıların yapısındaki Si/Al oranları, bağ yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Komljenovic ve diğ., 2010; ve Greiser ve diğ., 2018). Geopolimerin dayanım kazanması genellikle sıcaklık kürüne bağlıdır (Tayeh ve diğ., 2022; Amin ve diğ., 2021; ve Ghafoor ve diğ., 2021). YFC ve Metakaolin (MK) içeren geopolimerler kür süresince 60-80 °C'ye ihtiyaç duyarken, uçucu kül esaslı geopolimerler 80-110°C'ye ihtiyaç duymaktadır (Tippayasam ve diğ., 2016; ve Ankur, 2021). Kür süresi ve sıcaklığı, kömürün yanma koşullarına bağlı olan bağlayıcı kalitesi, bağlayıcı içeriği, su miktarı, agrega tipi, aktivatör oranı ve cinsi ve kür koşulları, geopolimer betonun dayanım mekanizmasında önemli bileşenlerdir (Aslan ve Erkan, 2024; Atis ve diğ., 2015; Kaya ve diğ., 2020; İlkentapar ve diğ., 2017 ve Ozodabas ve diğ., 2013). GB‘dan farklı olarak, geopolimer betonlar donma-çözülme, yüksek sıcaklık, ıslanma-kuruma, aşınma ve erken kuruma büzülmesine karşı daha dirençlidir. Ayrıca daha düşük kuruma büzülmesine sahiptir (Atabey, 2017; ve Balcikanli, 2017). Bununla birlikte, geleneksel betonların asit ve sülfatlara karşı dirençleri daha düşüktür (Kaya, 2016). Bazı çalışmalar, geoplolimer betonun ağır metaller ve asitlere karşı dirençli olduğunu göstermiştir (Zhang ve diğ., 2016; ve Jindal, 2019). Literatürde geopolimer betonun kürleme işlemlerini oda şartlarında gerçekleştirmek için bağlayıcılardaki CaO içeriğinin yüksek tutulması gerektiğini belirtmişlerdir. Bunun için çalışmada UK, YFC ve PTT kullanılmıştır. Bununla birlikte, PTT, geopolimerin düşük işlenebilirliği ve erken prizini geliştirmek için kullanılmıştır (Aktürk, 2021).

Geopolimer betonların üretilmesi ile kiriş ve kolonlar üzerine farklı deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde genellikle dikdörtgen kesitli kirişler kullanılmıştır. Fakat kirişlerin mesnet bölgelerinde bırakılacak çeşitli gövde boşluklarını içeren kiriş deneyleri yapılmamıştır. Özellikle betonarme binaların bodrum kat kirişlerinde çeşitli nedenlerle boşlukların oluşturulması gerekebilir. Bu boşlukların çoğu dairesel kesitli olmaktadır (El Ame ve diğ., 2020). Özellikle elektrik veya tesisat boruları için, ya da bazen de bina sahibinin isteğine göre açılan bu boşluklar kirişin kesit alanını azaltır (Al-Shaarbaf ve Abdulridha, 2017). Bu boşluklar inşaat öncesinde planlanmışsa, gerekli önlemlerin alınması için boşluğun etrafına ek takviyeler eklenebilir. Bununla birlikte, bu boşlukların beklenmedik bir şekilde açılması durumunda, kirişlerin sağlamlığı ve rijitliği kontrol edilmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır. Özellikle bu boşluklar kirişlerin kesme kuvveti açısından en kritik yeri olan mesnet bölgelerinde açılırsa kirişin kesme kapasitesinde önemli miktarda düşüş görülebilir. Şekil 1.1’ de, kirişlere sonradan açılan boşluklar görülmektedir. Bu örneklerden de görüldüğü gibi boşlukları kimi zaman kontrollü bir şekilde dairesel açılabildiği gibi kimi zamanda kontrolsüz şekillerde olabilmektedir. Keza boşluklar kiriş mesnetlerine yakın olabildiği gibi açıklık bölgelerinde de teşkil edilebilmektedir.



Şekil 1.1. Yapılardaki açılan dileğin örneği (Özkılıç ve diğ., 2022)

Birçok araştırmacı, inşaat öncesinde veya sonrasında delinen kirişlerin kesme ve eğilme davranışlarını incelemiştir (Mansur ve diğ., 1991; Mansur ve diğ., 2006; Mansur ve diğ., 1998; Mansur ve tan, 1999; Tan ve Mansur, 1996; Mansur ve diğ., 1985; Yang ve diğ., 2006; Aykac ve diğ., 2013; Aykac ve diğ., 2014; Aykaç ve Yılmaz, 2011).

Bu çalışmalarda genellikle statik yada dinamik yüklemeler altında davranışlar incelenmiştir. Bu testlerin haricinde son yıllarda çarpma testleri de oldukça popüler hale gelmiştir. Bilindiği gibi yapısal elemanların çarpma dayanımı, basınç ve eğilme dayanımı kadar önemlidir. Karmaşık yükleme yöntemlerinin kısa süreli etkileri vardır. Günümüzde kullanılan diğer ana inşaat malzemeleri arasında beton, yüksek hızlı şekil değiştirme veya çarpma yükü nedeniyle karmaşık şekilde davranan yapı malzemelerinin başında

gelmektedir. Yapısal elemanlar cisimlerin çarpışması, patlamalar ve balistik mermilerden kaynaklanan çarpma yüklerinden etkilenebilir. Bu tür olaylar, yapıya dinamik yük olarak çok fazla enerji iletmektedir. Yapılar, uygulanan çarpma yüklerine dayanacak şekilde tasarlanmamışsa bu yükler etkisi altında önemli hasarlara maruz kalabilir. Bunun bir sonucu olarak istenmeyen can kayıpları ve maddi kayıplar yaşanabilir. Şekil 1.2'de çarpma etkisinden kaynaklanan yapı hasarının bir kısmı görülmektedir. Dolayısıyla bu tür yükleme sistemlerinin incelemesi günümüzde kritik öneme sahiptir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 1.2. (a) ve (b) ulaşım yapılarına araç çarpması (Sharma ve diğ.,2012), c) Bina içi gaz patlaması, Moskova, Rusya, (2021) (Kyivpost, 2021), d) Kaya düşmesi, Samsun, Türkiye, 2022 (Anadolu Ajansı., 2022)

Yukarıda sunulan geniş perspektifte tez çalışması dört ana başlığa ayrılmıştır;

a) Çalışmanın birinci aşaması bağlayıcı olarak çimento içermeyen geopolimer harcın ana bileşenlerini araştırmak olmuştur. Bunun için geopolimer malzemenin üretilmesinde gerekli olan bağlayıcı malzemelerin optimum karışım oranlarını belirlemek

gerekir. Geopolimer harç için gerekli olan atık malzemeler ülkemizde bulunan farklı işletmelerden temin edilmiştir. Uçucu kül, Manisa-Soma'da bulunan termik santralden, pişirilmiş taş tozu Konya-Meram Belediyesi asfalt şantiyesinden, silis dumanı Antalya Eti Elektrometalürji fabrikasından, yüksek fırın cürufu ise Adana Çimento'dan temin edilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında dört farklı atık malzeme ile birlikte alkali aktivatörler kullanılarak üretilecek geopolimer kiriş numunelerinin karışım oranları Mixture Design metodu kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Mixture Design metodunda ilk olarak UK, YFC ve PTT atıkları kullanılarak 10 farklı karışım denenerek oluşturulan harçların mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Oluşturulan karışımlar üzerine basınç mukavemeti, eğilme dayanımı, çarpma dayanımı, birim hacim ağırlığı, su emme, priz süreleri tayini ve yayılma deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın devamında Mixture Design metodunda kullanılan üç farklı atık malzemeye ilave olarak silis dumanı da eklenerek geopolimer harcın hem mekanik hem de işlenebilirlik açısından optimum bağlayıcı oranı belirlenmiştir.

b) Çalışmanın ikinci aşamasında, ilk aşamada belirlenen ve hem mekanik hem de işlenebilirlik bakımından ideal karışım oranları kullanılarak GPC üretimine geçilmiştir. Bu aşamada bağlayıcıların ideal karışım oranıyla birlikte agrega da kullanılarak üretilen numunelerin istenilen basınç dayanımına ulaşıp ulaşmadığı teyit edilmiştir. Geopolimer betonun hedeflenen basınç mukavemetine ulaşılmasının ardından kirişlerin üretimi yapılmıştır. Bu bölümde ayrıyeten çalışmanın ana konusunda belirtilen ve geopolimer kirişlerle statik ve dinamik açıdan davranışları karşılaştırılacak olan GB'dan imal edilmiş betonarme kirişler de üretilmiştir.

c) Çalışmanın üçüncü aşamasında imal edilen geopolimer boşluklu-boşluksuz kirişler ve geleneksel boşluklu-boşluksuz betonarme kirişler üzerine basit eğilme deneyleri yapılarak kirişlerin hem eğilme hemde kesme davranışları karşılaştırılmıştır.

d) Çalışmanın son aşamasında ise üretilen geopolimer ve geleneksel boşluklu-boşluksuz betonarme kirişler üzerine çarpma deneyleri yapılarak elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Özet olarak tez çalışmasının amaçları aşağıda sıralanmıştır.

- Mekanik ve fiziksel olarak GB'a eşdeğer veya daha yüksek özelliklere sahip GPC üretmek.

- Yüksek kür sıcaklıklarına ihtiyaç duymadan normal hava şartlarında kür edebilen GPC üretmek.
- Geopolimer harç üretim aşamalarından elde edilen ideal bağlayıcı oranları kullanarak büyük ölçekli geopolimer beton numuneleri üretmek.
- Benzer mekanik özelliklere sahip GPC ve GB'u kullanarak boşluklu-boşluksuz kiriş numunelerini üretmek.
- Farklı boşluk oranlarına sahip GPC ve GB kirişleri üzerinde basit eğilme deneyleri yaparak sonuçları karşılaştırmak.
- Farklı boşluk oranlarına sahip GPC ve GB kirişleri üzerinde çarpma deneyleri yaparak sonuçları karşılaştırmak.

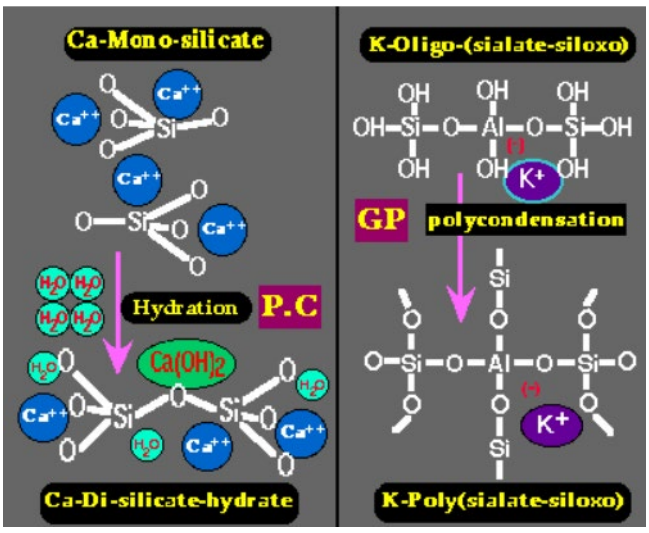
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Geopolimerler

2.1.1. Geopolimerin tanımı ve çevresel etkileri

Geopolimer terimi, Fransız malzeme bilimcisi Davidovits tarafından ilk defa 1978'de kullanılmıştır. Bu terim, genellikle uçucu kül, cüruf, metakaolin, silis dumanı, perlit, volkanik kökenli kül, pirinç kabuğu külü gibi alimünosilikatça zengin hammaddelerin, uygun kür koşulları altında güçlü alkali çözeltiler (genellikle NaOH veya KOH) ve çözünür silikatlar (genellikle Na_2SiO_3) ile reaksiyona girerek oluşan SiO_4 ve AlO_4 bileşiklerinden meydana gelen "poli-sialat" (Si-O-Al-O) adı verilen üç boyutlu polimerik zincir yapısına sahip sürdürülebilir bir malzeme olarak tanımlanmıştır. (Davidovits, 1991).

Davidovits (1994) Portland çimentosunu alkali ile aktifleştirilmiş kalsiyum silikatlar olarak tanımladı. Ca içeriği yüksek olan alkali aktifleştirilmiş alüminosilikat malzemeler jeli (C-A-S-H), çimento hidratasyon ürünü tobermorit C-S-H jeline benzer. Hidratasyon ürünü, Portland çimentosundan daha düşük bir CaO/SiO_2 oranına sahiptir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Portland çimentosunun hidratasyon ve geopolimerlerin polikondansasyon aşamaları (Geopolymer Institute, 2012)

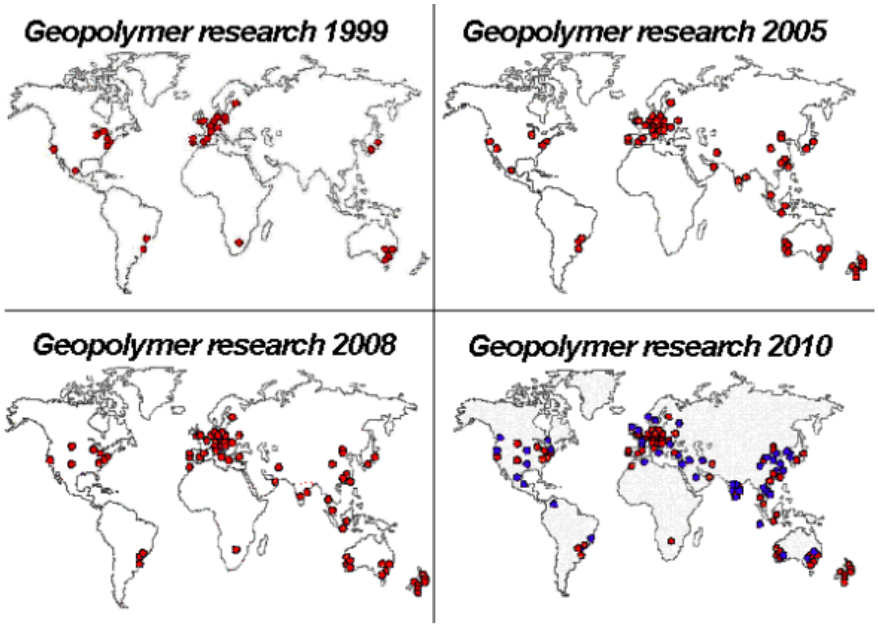
Davidovits'a göre geopolimer üç boyutlu alümina-silikat temelli bir bağlayıcıdır. Katı alümina silikat ile yüksek konsantrasyondaki sıvı alkali hidroksit veya silikat çözeltisinin bir reaksiyonunda oluşan geopolimerler oluşturulmuştur. Bu tür geopolimerler için, aynı türden malzemelere çeşitli isimler kullanılmıştır (Xu ve Deventer, 2000).

Çok eski bir prensibe dayanan geopolimerizasyon, birbirleri ile bağlantılı SiO_4 ve AlO_4 tetrahedronları ile karmaşık kimyasal işlemler yoluyla amorf, polimerik bir yapı oluşturur. Alkali (Na^+ veya K^+) silikat (SiO_{3-2}) veya hidroksit (OH^-) karışımı, en yaygın olarak kullanılan alkali aktivatördür. Alüminosilikat içeren kaynak malzemeleri, çözeltiler kullanılarak aktive edildiğinde meydana gelen reaksiyonlar, kristalli zeolitlere benzer ancak çoğunlukla amorf bağlayıcı malzeme oluşumuna neden olur (Davidovits, 1991; Duxson ve diğ., 2007; Monteiro ve diğ., 2010).

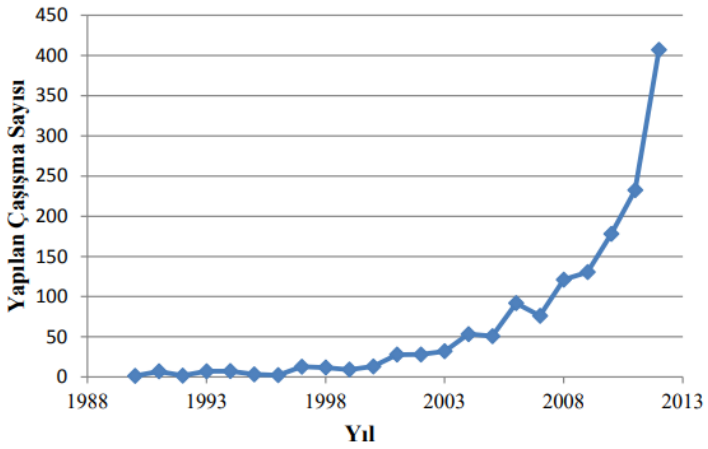
1978 yılında Davidovits, geopolimeri ilk olarak tanımlamış ve sınıflandırmıştır. 1978 yılından sonra çok sayıda araştırma yapılmıştır. Davidovits, geopolimer oluşumunda oluşan reaksiyonun termoset polimerlerin kondanzasyonu, yani polikondenzasyon reaksiyonuna çok benzer olması nedeniyle geopolimer ismini uygun görmüştür (Torgal ve diğ., 2008).

Geopolimerik katkı maddeleri Portland çimentosu içermediğinden, doğal puzolan veya yapay puzolan gibi sentetik alümino-silikat polimerler, geopolimerlerin doğal kaynakları olabilir. Ayrıca, doğal puzolanlar ve polimerik silikon-oksijen-alüminyum bileşimine sahip mineral bağlayıcılar, volkanik patlamaların bir sonucudur. Örneğin, süngertaşı, perlit, kaolinit, killer ve diğerleri insan yapımı puzolanlar veya yapay puzolanlar olarak bilinir. Öte yandan, YFC, UK ve SD gibi endüstriyel yan ürünler de vardır (Güneyisi ve diğ., 2004). Ayrıca, günümüzde giderek daha ilgi çekici ve yaygın hale gelen modern kaya olan pomza da küresel tedarik zincirinde bulunmaktadır (Yıldız ve diğ., 2009).

Geopolimerin bulunmasından sonraki ilk 20 yıl içinde, bu malzeme alanında belirgin ilerlemeler kaydedilmemiş olsa da özellikle son 20 yılda geleneksel betona üstün özellikleriyle dikkat çekmesi ve çevresel avantajlarıyla öne çıkması, bilim dünyasında son yıllarda büyük ilgi uyandırmıştır. Şekil 2.2, geopolimer malzemelerle ilgili çalışmaların coğrafi dağılımını yıllara göre göstermektedir. Aynı şekilde, Şekil 2.3, "geopolimer" anahtar kelimesiyle yapılan çalışmaların sayısının zaman içinde nasıl arttığını göstermektedir (Geopolymer Institute, 2014).



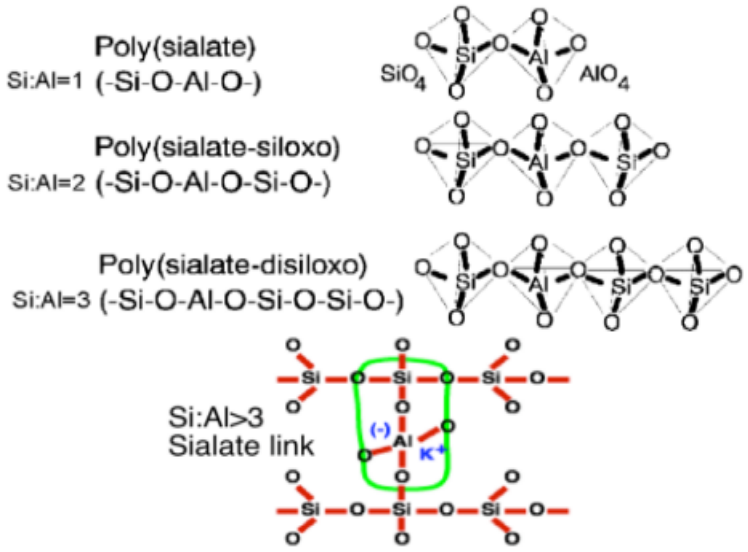
Şekil 2.2. Yıllara göre dünyada geopolimer çalışmasının coğrafi dağılımı (Geopolymer Institute, 2014)



Şekil 2.3. Geopolimer anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı (Geopolymer Institute, 2014)

Genellikle sodyum veya potasyum kullanılarak hazırlanan alkali bir ortamda, silisyum ve alüminyum minerallerinin veya alüminosilikat oksitlerinin polimerik Si–O–Si ve Si–O–Al ağları oluşturmak için alkali çözelti ile reaksiyona girmesi, geopolimerizasyon işlemini gerçekleştirir. Bu kimyasallar; poly (siloxo) Si–O–Si–O, poly (sialate) –Si– O–Al–O–, poly (sialate-siloxo) –Si–O–Al–O–Si–O– ve poly (sialate-disiloxo) –Si–O–Al– O–Si–

O–Si–O–gibi tekrarlayan birimlerden oluşur. Silisyum-oksijen-alüminat kısaltması "sialate"dir (Ng ve diğ., 2018; Demir, 2019). Sıcaklık, derişim, pH ve çözünür Si/Al oranı, alüminosilikatların çözünme ve çökelme hızlarını etkiler. Geopolimerizasyon, jelin Si/Al oranını değiştirerek silikat ve alüminat bileşiklerini oluşturur (Arıöz, 2018). Farklı Si/Al orana sahip moleküler ağ yapısı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Farklı Si/Al mol zincir yapısı (Davidovits, 2008)

Katalizör veya ısı uygulaması polimerizasyon işlemini başlatabilir (Castillo ve diğ., 2021). Alümino silikatlar, doğal olarak veya ısıl işlem nedeniyle amorf bir yapıya sahip maddelerdir (Gök, 2020). Hem doğal hem de yan ürün olan alümina (Al_2O_3) ve silika (SiO_2), geopolimer öncü malzemelerinin önemli bileşenleri olmalıdır. Bu bileşenler, N-A-S-H jelini oluşturarak geopolimerlerin sertleşmesinde önemli bir rol oynar ve diğer bileşenlerle birlikte malzemenin karakteristik mukavemetini sağlar (Castillo ve diğ., 2021).

Geopolimerlerin yapısı, doğal kayaçların yapısına benzer. İçerik olarak Al_2O_3 ve SiO2 bileşiklerini içeren doğal mineraller kullanılır. Bu, alkali bir ortam oluşturmak için kullanılır. Bu nedenle, kayaç gibi yapısal malzemeler oluşturulur. GPC üretimi, amorf kil ve diğer malzemelerin yüksek alkali ortamlarda alüminosilikat içeren bileşiklerin sentezlenmesine dayalı bir sistem kullanır (Bakırdöven, 2021).

2.1.2. Geopolimerlerin kimyası

Geopolimerleşme, füzyon sinterleme veya eritme gibi bir polimerleşme sürecidir. Spesifik olarak, N a- Si - Fosfor (P) - Al - Ca - Magnezyum (Mg)- Potasyum (K) gibi mineral moleküllerini içeren monomerlerin birbirleri arasında polikondensasyonu nedeniyle kovalent kompleks zincir bağlı polimerler oluşturur. Kalsine olmuş metakaolinit kilini 750 ºC'de alkali tuz ve alkali silikatlar ile aktifleştirmek ve çözeltiyi düşük ısıda (40-100 ºC) fırınlamak, geopolimer malzemelerin en iyi özelliklerini gösteren koşulları sağlar (Gümüş, 2016; Davidovits, 2008).

Zeolit kayaçlarına benzer tanecik yapılarına sahip olan geopolimerler, zeolit kristallerinden farklı olarak amorf üç boyutlu hekzagonal moleküler bağ yapısına sahiptir. Geopolimeri, zeolitlerden ayıran 80 ºC'de sentezlenebilmesidir. Bu nedenle, geopolimer yapısında su moleküllerini de içerir. Zeolit, 150-250 ºC'de kristalleşerek boşluklar bırakabilir. Geopolimerizasıyon devam ederken ortamın pH değeri düşük olmasına bağlı basınç dayanımın kazandığına çok önemlidir. Geopolimer hamurunun pH düzeyi ortalama on ila on iki arasında değişmektedir. Isıl işlem sıcaklığı arttıkça, geopolimer hamurunun pH düzeyi düşer. 700 °C'de ısıl işlem gördüğünde, 85 °C'de pH 10,5 olan geopolimer hamurun pH'ı 7,5'e düşer. K_2O/SiO_2 molar oranı, ısıl kür sıcaklığının yüksek olduğu işlemlerde pH seviyesini düzeltmek için artmaktadır. Geopolimer hamurunun toplam pH düzeyi on ila on iki arasındadır. Bugünkü bilimsel araştırmalar ve standartlar, kullanıcıya zarar vermeyen karışımlar elde etmeyi gerektirmektedir. pH düzeyi düşük geopolimer formülleri geliştirmek, hem doğa hem de insan sağlığı açısından geopolimer kullanımının yaygınlaşmasına yol açacaktır (Gümüş, 2016; Zeybek, 2009).

Geopolimerizasyon, heterojen bir kimyasal reaksiyon olarak bilinir. Boyacı'ya (2018) göre, silikat hidratları ısıya maruz kaldığında, OH- iyonları suya ayrışır ve bu da Si-O-Al bağlarının oluşumunu sağlar. Bu reaksiyon, yüksek alkali ortamlarda ve normal ısılarda Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarını içeren amorf yarı-kristal polimerik yapıları oluşturur. Bu bağlar, alkali metal silikat çözeltileri ve katı alüminosilikat oksitler arasında gerçekleşir (Bingöl, 2018).

Si katyonu, C'dan daha az iyonizasyon enerjisine sahiptir ve dört elektron ve bir metaloid verir. Si'nin Oksijen (O) ve diğer elementlerle kuracağı bağlar bu nedenle daha

sağlamdır. Bu kararlı hal, geopolimerlerin kimyasını oluşturur. Geopolimer kimyasının temelindeki bu özellikler, SiO_4 ile AlO_4 molekülleri O_2 atomlarının e-1 atomlarını paylaşmasıyla elde edilen polisilikatlar ve silikat moleküllerinin zincir bağlarından oluşan siloksonların keşfini sağlamıştır. Bu bulgular, geopolimer kimya araştırmalarının temelini oluşturmuştur (Boyacı, 2018).

YFC, UK ve SD gibi atık malzemelerin, doğal başkalaşım kayaçları, kaolinit kili ve volkanik tüf gibi alkali silikat ve tuzların düşük ısıda tepkime yaparak geopolimerizasyon sürecini başlatır. Oluşacak ürünün fiziksel özellikleri; ısıl kür, katı malzemenin yapısı veya kalsinasyon ısısı ve süresine bağlı olarak değişir (Bingöl, 2018).

2.1.3. Geopolimerlerin mekanik özellikleri

Geopolimerlerin kullanılmasının bir avantajı, onları oluşturan nihai bağlayıcı malzemenin dış etkilere karşı yüksek performansıdır. Özellikle düşük C-S-H içeren geopolimerlerin boyut stabilitesine bağlıdır. Kalsiyum içeriğinin düşük olması nedeniyle, alkali agrega reaksiyonu geopolimerlerde çok etkili değildir. Yine aynı sebepten dolayı, deniz suyuna ve sülfat atağına karşı geleneksel bağlayıcılara göre geopolimerler daha dayanıklıdır. Si/Al oranı bire yakın olan matrislerde ayrışma, zor atmosferik koşullar ve dış etkenler nedeniyle meydana gelir (Luga, 2015).

Aktivatör konsantrasyonu, geopolimerlerin basınç dayanımını önemli ölçüde etkiler. Geopolimerin dayanımı, ideal aktivatör konsantrasyonu ile artacaktır. Bu ideal konsantrasyondan daha yüksek konsantrasyonlarda malzemenin geopolimer yapısını değiştirebilecek alkali aktifleştirilmiş bir matriste bulunan serbest OH iyonları da malzemenin mekanik özelliklerini azaltabilir. Örneğin basınç dayanımı, kür sıcaklığı ve geopolimerlerin yaşı tarafından da etkilenir. Bununla birlikte, bu değişkenlerin geopolimerizasyon sürecinde etkili olabilmesi için ortamda yeterli aktivatör konsantrasyonu olmalıdır (Girgin, 2016).

Prizin ilk dört saatinde geopolimerler, basınç dayanımından yaklaşık %70'ini kazanabilirler. Dış etkilere ve çevre koşullarına karşı uzun süre dayanıklılık kazanabilirler. Yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi ve düşük ısıl iletkenlik göstermesi, geopolimer malzemelerin bir başka avantajıdır. 1200 °C'ye kadar güçlü bir şekilde dayanabilirler. Diğer

yapı malzemelerine göre ısı iletkenlikleri düşüktür ve 0.24 W/mK ile 0.3 W/mK arasında değişmektedir (Gümüş, 2016).

Si:Al oranı, geopolimerlerin elastik modülünü ve dayanımını etkiler. Örneğin, 100 MPa'ya kadar dayanan örnekler veya oda sıcaklığında dört saatte 20 MPa'ya kadar dayanan örnekler mevcuttur. Ek olarak, bazı geopolimerik ürünler normal hava sıcaklığında priz alıp dayanabilir. Bununla birlikte, geopolimerli karışımların GB sistemlerle karşılaştırılabilir dayanımlara ulaşabilmesi için 40 ila 80 °C'de altı saat veya daha fazla kür gerektiren çalışmalar, literatürde daha kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Gümüş, 2016).

2.1.4. Geopolimer türleri

UK içerisinde bulunan bileşenlerin daha düzenli bir şekilde çözünebilmesi için camsuyuna Na_2SiO_3 veya Na_2O-Al_2O_3 eklenebilir. Bu, geopolimer malzeme özelliklerini geliştirir. Kimyasalların çözünmesi için kullanılan fazla su, ürünün basınç dayanımını düşürür. Bu tür karışımlarda daha fazla çökelti halindeki sodyum iyonu bulunur. Bunun nedeni, sodyumlardan ayrılan alüminatların ve silikatların bir araya gelmesiyle ilgilidir. Uçucu kül gibi içeriğinde yoğun olarak Al-Si içeren kimyasallar, sodyum alüminat tetrahedral alüminyum bağ yapılarının oluşumunu kolaylaştırır. Ayrıca, cam suyu çapraz bağlı silikat moleküllerinin oluşumunu teşvik eder. Bu, nükleer manyetik rezonans aracılığıyla gözlemlenebilmektedir (Gümüş, 2016).

2.1.5. Geopolimerin kullanım alanları

Alkali aktivasyonla üretilen bağlayıcılar, daha az enerji harcaması, daha düşük kirletici gaz emisyonları (CO_2, NO_x, SO_2) gibi ve çevrenin daha az tahribi (doğal kaynaklar yerine atıklar kullanılarak). Atık malzemelerin kullanılması ayrıca çevreye verdiği zarar aynı zamanda depolama sorunlarını azaltmaktadır. Bu bağlayıcılar, normal Portland çimentoları ve betonlarına kıyasla daha düşük hidratasyon ısısı, daha erkan yüksek dayanım, kimyasallara ve donma-çözülme etkilerine karşı daha iyi dayanıklılık ve agrega-

matris aderansı gibi birçok önemli teknik avantaja sahiptir. Bu bağlayıcıların kullanımının önünde en büyük engel kuruma büzülmesidir (Luga, 2015).

Genelde, geopolimerler bol miktarda ham madde kaynağı, düşük karbondioksit emisyonu, az enerji tüketimi, düşük üretim maliyetleri, yüksek erken dayanım ve hızlı dayanım özelliklerine sahiptir. Geopolimerin performansı nedeniyle prefabrik yapı endüstrisi, zemin iyileştirme, heykelcilik ve süsleme sanatları, zehirli ve nükleer atıkların depolanması, beton yol kaplamaları, refrakter seramik malzemelerin üretimi, ağır iklim koşullarına dayanıklı duvar kaplamaları, güçlendirme, tarihsel binaların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu ve uçak ve yarış arabaları endüstrisi. Kullanılan teknolojinin düzeyine, seçilen kimyasal oranlara ve toprak esaslı hammaddede yapılan fiziksel iyileştirmelere bağlı olarak geopolimere istenilen fiziksel özellikler kazandırılabilir. Bu özellikler, birçok seramik malzemede olduğu gibi geopolimere kazandırılabilir (Gümüş, 2016; Davidovits, 2008; Zeybek, 2009).

2.1.6. Geopolimerlerin uygulama alanları

Fransa'daki Geopolimer Enstitüsü tarafından belirlenen olası uygulama alanları aşağıdaki gibidir:

- Taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan prefabrik eleman olarak
- Kimyasal ve tehlikeli madde etkilerine maruz kalan elemanlar
- Yüksek sıcaklığa maruz kalan elemanları yalıtmak için termal malzeme olarak
- Refrakter malzeme olarak kullanılması mümkündür

Çizelge 2.1'de gösterildiği gibi, geopolimerin Si/Al oranlarına göre kullanılabilecek alanlarını.

Çizelge 2.1. Geopolimer bağlayıcıların kullanım alanları (Davidovits, 1999)

Si/Al Oranı	Kullanım Alanları
1	Seramik ve tuğla, yangından korunma
2	Çevreye duyarlı çimento, beton, radyoaktif veya toksik atıkların muhafaza edilmesi
3	Isıya dayanıklı kompozitler, dökümhane ekipmanları, cam elyaf kompozitler
> 3	Endüstri için dolgu malzemesi
20-35	Yangına ve ısıya dayanıklı lifli kompozitler

2.1.7. Geopolimerin avantaj ve dezavantajları

Geopolimer bağlayıcı sistemler çevreye dost olarak geleneksel betona göre üretim aşamasında çevreye daha az zarar vermektedir. Alternatif bağlayıcı sistemlerde UK ve YFC gibi malzemeler yaygın olarak kullanılabilir. Gartner'a (2004) göre, bu malzemelerin endüstri yan ürünleri olduğundan, geopolimer bağlayıcı sistemler çevresel açıdan değerlendirilebilmektedir. Endüstri yan ürünleri dışında, metakaolin ve kalsine edilmiş kil gibi geopolimer bağlayıcılar için kullanılan toz malzemeler, doğada bulunan alüminosilikatların kalsine edilmesi yoluyla elde edilir. Bu toz maddelerin elde edilmesi sırasında, kalsinasyon süreci karbondioksit salımının meydana gelmesine neden olur. Bununla birlikte, çimentonun üretimi için gerekli olan sıcaklığın (≈1450°C) çok altındaki sıcaklıklarda yakma işlemi gerçekleştirilebilir. Örneğin, metakaolin, kaolin kilinin (550 ve 850)°C arasında kalsine edilmesi yoluyla elde edilir (Snellings ve diğ., 2012). Farklı oranlar ile metakaolin esaslı geopolimer bağlayıcı üretilir ve üstün performanslı bir yapı malzemesi oluşturur (Khale ve Chaudhary, 2007).

Bir diğer avantaj, geopolimer bağlayıcı sistemlerde alkali-silis reaksiyonunun oluşmamasıdır. Portland çimentoları kullanılan sistemlerde reaktif silis içeren agrega kullanıldığında alkali-silis reaksiyonu oluşur. Reaktif silis içeren agregaların kullanımı, geopolimer bağlayıcı sistemlerde kullanılan toz malzemelerin yapısı nedeniyle bu reaksiyona neden olmadığı için zararlı değildir (García-Lodeiro ve diğ., 2007).

Geopolimer bağlayıcı sistemler hem ekonomik hem çevresel hem de teknik açıdan çok avantajlıdır. Geopolimer bağlayıcı sistemleri, çimentolu sistemlere göre daha

ekonomiktir çünkü bu tür bağlayıcıların üretiminde endüstri yan ürünü olarak ortaya çıkan atık tozlar kullanılabilir. Bununla birlikte, çimentonun üretimi sırasında sıcaklığın yaklaşık 1450 °C'ye yükselmesi nedeniyle çok fazla enerji kullanılır ve bu da çok pahalıdır. Geopolimer bağlayıcıların çimentolu bağlayıcılara göre en büyük avantajlarından biri, bağlayıcı malzeme üretimi için gerekli toz malzemesinin daha ucuza elde edilmesidir (Juenger ve diğ., 2011).

Geopolimer bağlayıcı sistemlerde hem endüstri yan ürün atığı hem de kalsine edilmiş ürünlerin kullanılması, çimentolu sistemlere göre çevre dostu bir yapı malzemesi üretme yeteneğine sahiptir. Teknik açıdan geopolimer bağlayıcı sistemlerin çok sayıda avantajı vardır. Kimyasal reaksiyonlara karşı dayanıklılığı bu avantajlardan biridir. Çimento esaslı bağlayıcı sistemler, sülfat etkisine karşı daha iyi performans göstermektedir. GPC üretmek için kullanılan bağlayıcı olarak atık malzemelerin kimyasal özeliklerinden kaynaklanan sülfat direnci yüksek olan bağlayıcı üründe alçı ve etrenjit bulunmamaktadır (Chindaprasirt ve diğ., 2014).

Yüksek sıcaklıklarda kararlı bir yapıya sahip olmaları da geopolimer bağlayıcıların bir başka avantajıdır. Özellikle, düşük CaO içeren alüminosilikat malzemeler, alkalilerle aktivasyonu nedeniyle oluşan bağlayıcıların sağlam yapısından dolayı yüksek sıcaklıklara oldukça dirençlidir. Geopolimer bağlayıcı sistemlerin dezavantajlarından bahsedecek olursak, kullanılan toz alüminosilikat malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin her zaman sabit olmaması, kalite kontrolünde önemli sorunlara neden olur. Endüstri yan ürünü olarak elde edilen atık toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, ana ürünün üretim sürecinde yapılan küçük değişiklikler nedeniyle zamanla değişebilir. Bağlayıcı sistemin özelikleri, toz malzemenin özeliklerinde meydana gelen değişikliklerden önemli ölçüde etkilenir (Pacheco-Torgal ve diğ., 2015). Bu açıdan, örneğin, geopolimer bağlayıcı üretimi yapılacak bir tesiste, farklı yerlerden ve farklı zamanlarda toplanan her atık toz malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekecektir. Bu da kalite kontrol ve AR-GE masraflarını artıracaktır.

Taze halde karışımların çimentolu sistemlere göre daha kötü işlenebilir olması, geopolimer bağlayıcı sistemlerin bir başka dezavantajıdır. Alkali aktivasyon için kullanılan çözeltilerin yüksek viskozitesi, oldukça yapışkan karışımlara neden olur. Bu, karışımın

işlenebilirliğini azaltır. Karışımın işlenebilirliğini artırmak için su ilave katmak, sertleşmiş haldeki gepolimerin mekanik özeliklerini azaltır.

Geopolimer bağlayıcılarda çiçeklenme sorunu da vardır. Alkaliler veya çözünmüş silikatlar karışımın bünyesinde geopolimerizasyon sırasında tamamen tükenemediği için çiçeklenme gerçekleşir. Yüksek geçirgenliğe ve su emmeye sahip geopolimer karışımlarda alkalilerin beton yüzeyine su ile birlikte hareket etmesi söz konusudur. Bu durumu kontrol altına almak için alkali aktivatörün kimyasal formülünün değiştirilmesi, karışımların reaksiyon derecesini artırmak için farklı kür koşullarına tabi tutulması ve daha yoğun bir içyapı elde etmek için farklı katkı maddelerinin değerlendirilmesi gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır (Pacheco-Torgal ve diğ, 2015).

2.2. Uçucu Kül (UK)

Fernandez ve diğ. (2007) çalışmasında, alkali aktivatörlerle aktive edilen ve UK bağlayıcı olarak kullanarak üretilen geopolimer harç numunelerinin sülfat direncini test etmişlerdir. Hem %4,4 Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) çözeltisine batırılmış numuneler hem de havada kür edilen kontrol numuneleri, incelemede dayanımlarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. UK bağlayıcılı numuneler, alkali aktivatörlerle aktive edildikten sonra, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri kullanılarak hazırlanmıştır. Bu numunelerin sülfat direnci önemli ölçüde değişmemiştir. Alkali aktivatör kullanılarak aktive edilen bağlayıcının elektron mikroskobu, 365 gün boyunca Na_2SO_4 çözeltisinde kaldıktan sonra malzemenin gözeneklerinde Na_2SO_4 tuzlarının kristallerini göstermiştir.

Arıöz ve diğ. (2008) çalışmasında, yüksek miktar kalsiyum içeren UK bağlayıcı olarak kullanarak geopolimerik tuğlaları ısıl işleme tabi tutarak fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bağlayıcı malzeme C sınıfı uçucu kül, alkali aktivatör olarak sodyum silikat, sodyum hidroksit ve çözelti olarak potasyum hidroksit kullanarak basınç yoluyla numuneler hazırlanmıştır. Üretilen tuğlaların şekillendirme işlemine tabi tutulmasından bir gün sonra numuneler etüvde 60°C sıcaklıkta ve buhar odasında ayrı ayrı ısıl işleme tabi tutulmuştur. Bu işlemler 2, 24 ve 72 saat sürmüştür. Üretimden yedi gün sonra, ısıl işlemin süresinin ve tipinin geopolimer tuğlaların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için tuğla numunelerinin basınç dayanımı, yoğunluğu ve su

emme miktarı ölçülmüştür. Çalışmanın sonuçlarına göre, C sınıfı uçucu kül numunelerinin basınç dayanımı 9-12 MPa, yoğunluğu 1,23–1,32 g/cm3 ve su emme değerleri %26–36 idi. Çalışma, C sınıfı UK kullanılarak üretilen tuğlaların basınç dayanımları üzerinde bir etkisi olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, numunelere uygulanan ısıl işlem tipinin ve süresi geopolimer tuğlaların yoğunluklarına önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Etüvde ısıl işlem gören tuğla numuneler için ısıl işlem süresi arttıkça su emme değerleri de artmıştır.

Jumrat ve diğ. (2011) çalışmasında, UK kullanılarak üretilen geopolimer harçların sıcaklık profillerini ve dielektrik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, bağlayıcı olarak UK kullanılarak taze geopolimer harçların karışım özelliklerine, karışım yüzdelerine ve dielektrik özelliklerine ve sıcaklık profiline etkilerini incelemiştir. Araştırmacılar alkali aktivatör olarak Na_2SiO_3 ve sodyum hidroksit kullanmıştır. Çalışmada, geopolimerin işlenebilmesi için ilave su eklenmiştir. Üretilen tüm geopolimer harçların priz başlangıç ve bitiş süreleri, kıyaslama için üretilen çimento esaslı harçlardan daha kısa çıkmıştır. 24 saatlik bir süre boyunca, üretilen geopolimer harçların dielektrik özelliklerini ve yüzey sıcaklığını belirlemek için harçlar oda sıcaklığında sürekli olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümler, geopolimer harçların dielektrik özelliklerinin ve yüzey sıcaklığının harcın karıştırılmasıyla birlikte zamanla arttığını göstermektedir. Ayrıca, taze geopolimer harçların en yüksek dielektrik özelliğe ve yüzey sıcaklığına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, daha sıvı bileşenlere sahip olan ve likit oranı yüksek olan geopolimer numunelerin dielektrik özelliklerinin (εr' ve εr") daha yüksek olduğu bulunmuştur. Çalışma, mikrodalga enerjisinin uçucu kül esaslı geopolimer harçların özelliklerini iyileştirebileceğini göstermiştir. Bu, özellikle karışımın oranına ve karıştırıldıktan sonraki zamana bağlı olarak gerçekleştirilebilir.

Görhan ve Kürklü (2014) yaptıkları çalışmada, Kütahya Seyitömer termik santralinden temin edilen F sınıfı UK kullanılarak geopolimer harcı üretmiştir. Üretilen numunelerin özelliklerine kür süresinin, kür sıcaklığının ve çeşitli NaOH konsantrasyonlarının etkisini incelemişlerdir. Molaritesi 3, 6 ve 9 M ve Na_2SiO_3 ile birlikte kullanılan NaOH ile oluşturulan geopolimer harç örnekleri 65 ve 85°C sıcaklıkta kür edilmiştir. Sonuçlar, seçilen kür süresinin ve sıcaklığı geopolimer harçların fiziksel özellikler'e çok önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Elde edilen mukavemet değerleri için, ideal konsantrasyon 6 M ve ideal kür sıcaklığı 85°C 'dir.

Chindaprasirt ve Chalee (2014) yaptıkları çalışmada, basınç dayanımı ve çelik korozyonu gibi özelliklerine NaOH molaritesinin etkisini araştırmak için bağlayıcı olarak C sınıfı UK kullanılarak geopolimer betonlar üretilmiştir. C sınıfı UK, Na2SiO3 ve NaOH alkali sıvılarının karıştırılmasıyla homojen bir karışım oluşturulmuştur. NaOH farklı molaritesi (8, 10, 12, 14, 16 ve 18) M hazırlanmıştır. Üretilen geopolimer numuneler 28 gün boyunca laboratuvar koşullarında kür edilmiştir. Daha sonra istenilen deneyleri araştırabilmek amacıyla Tayland Körfezi deniz çevresinin deniz suyun etkisine maruz bırakılmıştır. Deney numuneleri 3 yıl deniz kenerine bekletmiştir, numunelerin basınç dayanımını, klorür penetrasyonunu ve gömülü donatı korozyonunu ölçmek için test edildi. Elde edilen sonuçlara göre, NaOH konsantrasyonu arttıkça klorür penetrasyonu ve donatının korozyonu azalır. Ayrıca, numunelerin donatı korozyonu ile basınç dayanımı arasında bir ilişki olduğu bulundu. Yüksek basınç değeri olan numunelerin, korozyon miktarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Posi ve diğ. 2015 yıllında yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş ambalaj köpüğü ile C sınıfı UK hafif geopolimer betonların fiziksel ve kimyasal özelliklerini araştırmışlardır. 0.33 ile 3 değişen Na_2SiO_3/NaOH oranının, (5 ile 15) M arasında değişen NaOH konsantrasyonunun olduğu ve (25 ve 60) °C kür sıcaklığının olduğu çalışmada, Na_2SiO_3/NaOH değerinin 0,33'ten 1'e kadar yükselmesinin geopolimer betonların yoğunluklarında bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, Na_2SiO_3'un NaOH'dan daha yüksek yoğunluğa sahip olmasıdır. Sonuçlar, NaOH konsantrasyonunun üretilen numunelerin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. 10 M NaOH ile aktive edilen geopolimer betonların, 5 M NaOH ile aktive edilen betonlardan biraz daha yüksek basınç dayanımı gösterdiğini ortaya koymuştur. NaOH konsantrasyonunun artması, ham maddedeki alümin ve silisin çözünmesine yardımcı olduğu için geopolimerizasyon sürecini hızlandırmıştır. NaOH molaritesinin 10–15 M'ye yükselmesi basınç dayanımını artırmamıştır. Kür sıcaklığının geopolimer betonların basınç dayanımlarına etkisini araştırmak için numuneler (25, 40 ve 60)°C'de kür edilmiştir. Geopolimerizasyon reaksiyonu gerçekleşmesi için ideal sıcaklık 40 °C'dir.

Noushini ve Castel (2016) yıllında yaptıkları çalışmada, F sınıfı UK kullanılarak geopolimer beton üretmiştir. Üretilen geopolimer betonların farklı kür sıcaklık (60, 75 ve 90)°C ve farklı kür sürelerinde (8, 12, 18 ve 24) saat kür edilmiştir, üretilen numunelerin

su emmesi, basınç dayanımı, geçirimli boşlukların hacmi, elastisite modülü, , özdirenç ve gözeneklerin boyut dağılımı gibi mekanik ve fiziksel özelliklerine laboratuvar koşullarında kür edilmesinin etkisini araştırmışlardır. 28 günlük basınç dayanımı, kür işlemlerine bağlı olarak 27,4 MPa ile 62,3 MPa arasında değişiklik göstermiştir. Elastisite modülleri de (13.5- 25.9) GPa arasında değişiklik göstermiştir. Kür sıcaklığının 75°C'ye ve kür süresinin 24 saate kadar artmasıyla birlikte, basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri önemli ölçüde artmıştır. Bununla birlikte, laboratuvar koşullarında kür edilen numunelerin basınç dayanımında küçük bir miktar artış göstermiştir. Bu nedenle, F sınıfı UK kullanılarak üretilen geopolimerler için bu kür tekniği uygun bir yöntem değildir.

2.3. Yüksek Fırın Curüfü (YFC)

Allahverdi ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufu ile %5, %15 ve %25 pomza ikamesinin priz süresi ve basınç dayanımı üzerindeki etkisi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-Işını difraktometresi (XRD) testleri kullanılarak incelenmiştir. Karışımlar priz sürelerini uzatırken, cüruf kullanımı priz sürelerini önemli ölçüde etkilememiştir. Sonuçlar, pomza-cüruf karışımlarına kıyasla sadece pomzanın yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, kuru bağlayıcının SiO_2/Al_2O_3 oranındaki artışın, yüksek fırın cürufu kullanımı ile ilgili literatürün bu bulgulardan farklı olduğunu belirtmişlerdir.

Yüksek fırın cürufu, demir ve metali ergiterek oluşturulan bir maddedir. Genel olarak silika ve metal oksitlerden oluşur. Yüksek fırın cürufu, sıvı metali en aza indirmek ve eritme sırasında sıcaklığı kontrol etmek gibi birçok amaca hizmet edebilir (Provis ve diğ., 2009). Beton ve çimento üretiminde de kullanılır.

Zhang ve diğ. (2012) yılında yaptığı çalışmada, deniz kemerinde kalan beton yapıların hizmet ömrünü uzatmak için metakaolin ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer beton kaplamalarının etkisini araştırmışlardır. Değerlendirmeler, geopolimer betonun düşük geçirgenliğe ve üstün korozyon önleyici özelliklere sahip olduğunu göstermiştir.

Kaya, 2016 yılında yaptığı çalışmada, uçucu küllerin, metakaolinin ve kaolinitik küllerin, yüksek fırın cürufu gerektiren geopolimerik malzemelerde yüksek dayanımlara ulaşmak için sıklıkla kullanıldığını belirtmişlerdir. Aslında, yüksek dayanıma ulaşmada

alüminosilikat malzemenin iç yapısı en önemli rol oynar. Doğal malzemelerden yapılan geopolimerik malzemelerin yüksek dayanımları mümkün değildir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi malzemelerde silika ve alümina yüksek olduğundan, alkali aktivasyon sürecinde daha yüksek dayanımlar elde edilebilir.

Yalghuz ve Işıkdağ (2020) yılında yaptığı çalışmada, potasyum oksit (K_2O) değerinin, geopolimerik malzemelerin üretim sürecinde özelliklerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmışlardır. Potasyum oksit (K_2O) değeri yüksek olduğunda, geopolimerik malzemenin priz süresi, basınç dayanımı ve yangın direnci gibi özelliklerinde iyileşme görülür. Sonuç olarak, granüle edilmiş yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerik malzemelerin mühendislik uygulamaları için çok sayıda potansiyeli olduğu söylenebilir. Kalsiyum içeriği yüksek fırın cüruflu geopolimerlerde değişir. Yüksek fırın cürufu kullanılarak geopolimerlerin priz süresi hızlanmıştır. Fırın cürufu içeriği arttıkça priz süresi de düşer.

Dave ve diğ. (2020) yaptığı çalışmada, 8 M NaOH alkali aktivatör ile yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonun yol onarım işlerinde yerinde performansını araştırdılar. Uçucu kül ve silika dumanı kullanıldı. Geopolimerler, mükemmel basınç dayanımı ve sülfat saldırısına karşı olağanüstü direnci nedeniyle yol onarım uygulamalarında kullanılabilir ve aynı zamanda çevresel ve ekonomik faydalar sağlayabilir.

2.4. Pişirilmiş Taş Tozu (PTT)

Alnuaimi (2019) yaptığı çalışmasında derin karıştırma ve jet grout yöntemlerinde kullanılmak üzere kireç taşı tozu ve taban külü kullanılmıştır. Na_2SiO_3 ve NaOH ise alkalin aktivatör olarak kullanılmıştır. $NaOH/Na_2SiO_3$ oranı 2,5 ve kuru ağırlıkça alkali aktivatör/ham madde oranı 0.35'tir. Killi zeminlerde derin karıştırma yöntemi kullanılmıştır. 0.75-1.50 s/b oranları ve %0-100 ağırlıkça çimento-katkı oranları kullanılmıştır. Tüm s/b oranlarında, geliştirilen harçlar dilatant özellik göstermiştir. Sonuçlar, kireç taşı tozunun akışkanlığı azalttığını, ince taneli malzemenin akmasını engellediğini ve plastik viskoziteyi artırdığını göstermiştir. Ayrıca, s/b oranının artmasının reolojik özellikleri olumsuz etkilediğini göstermiştir. Geopolimerleştirilmiş taban külü, tüm harçlar arasında en yüksek basınç dayanımını gösterirken, kireç taşı tozuna göre daha

düşüktür. Bunun nedeni, geopolimerize edilmiş taban külünün yapısındaki düşük gözeneklilik ve çimento ile yüksek reaksiyon olmasıdır. Saf çimento harcından önemsiz derecede düşük basınç dayanımına neden olan normal taban külü katkısı %40'a kadardır. Bununla birlikte, saf çimento harcına göre daha düşük basınç dayanımı, kireç taşı tozu katkısı nedeniyle meydana gelmiştir. Bu, sertleşmiş çimento ile daha yavaş dayanıma girmesi ve seyreltme etkisinin bir sonucudur. Bununla birlikte, derin karıştırma için tüm katkılı harçların basınç dayanımı yeterli olmalıdır.

Tok, 2021, bu çalışmada, dere kumu ve kireç taşı tozu ile cüruf ve bentonit kullanarak geopolimer oluşturdu ve ısıl kür kullandı. Numunenin yüksek sıcaklıklara dayanımı, agrega tipine bağlıdır. Kireç taşının mukavemet özellikleri %50 oranında arttı. 600°C'den sonra, geopolimer matrisin serbest su buharlaşması ve dehidrasyonu nedeniyle mukavemet özelliklerinde önemli ölçüde azalma meydana geldi. Gözenekli yapıların büyümesi ve çatlakların yayılması nedeniyle eğilme dayanımı basınç dayanımına göre önemli ölçüde azalmıştır. Çok küçük geopolimerik matrisleri nedeniyle, numuneler donma-çözülme etkilerine karşı güçlü bir direnç göstermiştir. Donma-çözülme testi, mikro çatlakların yönü basınç yüküne paralel iken eğilme mukavemetinin yüküne dik olduğu için eğilme mukavemetinin üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir.

Waheed ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, pişmemiş UK katkılı tuğlaların dayanıklılığını ve mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Çalışma iki aşamada tamamlanmıştır. Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi, 2022, 5(2):171-176 174'de ilk aşamada, küçük ölçekli silindirik UK'un su emmesi ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Agreganın tipi (ince kum, kaba kum, taş tozu ve taş agregası) ve şekillendirme yöntemi (vibro sıkıştırma ve presle şekillendirme) ilk aşamada buldukları agrega türü ve şekillendirme yöntemini (presle şekillendirme ve kaba kum) kullanarak, ikinci aşamada tam boyutlu yanmamış uçucu kül tuğlaları hazırlandı. Bunların, mekanik performanslarını (basınç modülü ve basınç dayanımı) ve dayanıklılıklarını (su emme, çiçeklenme, sülfat direnci ve ilk su emme oranı) değerlendirdiler. Elde edilen sonuçlara göre, geleneksel yanmış kil tuğlalarına alternatif olarak yanmamış uçucu kül tuğlaları kullanılabilir.

2.5. Silis Dumanı (SD)

Silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımları üretmek için elektrik ark fırınlarında odun parçacıkları ve yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ile indirgenmesi, SD olarak bilinen çok ince taneli bir baca tozudur. SiO gazı, üretim sürecinde hava ile etkileşime girerek SiO_2'ye dönüşür. Hızlı soğuma ve yoğunlaşma nedeniyle, içerisinde %85-98 arasında amorf silis içeren ince taneli bir malzeme olan SD oluşur. Silis dumanı yüksek oranda ve yüksek incelikte bulunur ve yüksek puzolanik bir malzeme özelliği gösterir (Yeginobalı, 2007).

Yazıcı, (2008) yaptığı çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonların çözülme dayanıklılığı, mekanik özelliklerine, donma, klor geçirimliliği ve SD ve UK ilavesinin etkilerini incelemiştir. Betona ilave edilen uçucu kül oranı %30'dan %60'a kadar değiştirilmiştir. Bu karışımlara yüzde on silis dumanı ilave edilmiştir. Test bulguları, yüksek özelliklere sahib bir kendiliğinden yerleşen betonun, %10 SD ile birlikte UK içermesi gerektiğini göstermiştir. Bu şekilde üretilen kendiliğinden yerleşen betonlar, yüksek donma çözülme, düşük klor geçirgenliği ve iyi mekanik özelliklere sahiptir. Çimento hamurunun yoğunlaşması, daha iri çimento parçacıkları arasındaki küçük boşlukları dolduran silis dumanından kaynaklanmaktadır (Caldarone, 2008).

Geopolimer üretiminde silis dumanı etkisini bulmak için üretilen numunelerin (7. 28. ve 90.) günlük basınç dayanımı ölçülmüştür, silis dumanı içermeyen kontrol numunelerine göre önemli ölçüde artmıştır. Bu, numunelerin ortam sıcaklığındaki performansını değerlendirmek için yapılan bir çalışmada elde edilmiştir. Silis dumanı içeriğinin çimento ağırlığının %5'inden %10'a çıkarılmasıyla basınç dayanımı da artmıştır (Ibrahim ve diğerleri, 2011). Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkisi, çimentonun nem içeriğine, geçirgenliğine, hidrasyon derecesine ve yüksek sıcaklığa maruz kalma süresine bağlıdır. Silis dumanının sistemleri birleştirirken yüksek sıcaklıklara nasıl tepki verdiği konusunda farklı görüşler vardır (Jahren, 1989). Yapılan bir çalışmada, 300 °C'ye maruz kaldıktan sonra neredeyse tüm numunelerin basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Silis dumanı içeren numuneler bu artıştan daha fazla etkilenmiştir (Ibrahim ve diğ., 2011).

SD, beton mikroyapısını iyileştiriyor. SD, betonun basınç dayanımını artıran, geçiş bölgesini güçlendiren ve hidratasyon oranını artıran yapay bir puzolandır. Bu, betonun ömrünün erken dönemlerinde gerçekleşir (Wang ve diğ., 2012).

Rostami ve Behfarnia, (2017) yılında yaptıkları çalışmada, geopolimer beton üretmek için bağlayıcı olarak silis dumanı kullanmışlardır. Çalışmada, geopolimer betonda cürufun silis dumanı yerine kullanılmasının basınç dayanımını ve geçirgenliği üzerindeki etkilerini incelediler. Çalışmanın bulguları, alkalilerle aktive edilmiş cüruf betonunda silis dumanı bulunmasının hem basınç dayanımını artırdığını hem de permeabilitesini azalttığını göstermektedir. Bununla birlikte, suyla yapılan kürün en iyi yöntemi olduğunu keşfetmişlerdir.

Silika dumanı, betonun dayanımını artıran daha fazla C-S-H jeli üretmek için portlandit ile reaksiyona girer. Bu kimyasal değişiklik, betonun dayanımını artıran temel bileşendir. Alkali ile aktifleştirilen cüruf betona %15 kadar silis dumanı eklenmesi, betonun mekanik mukavemetinin artmasına, geçirgenliğinin azalmasına ve klorür iyonu penetrasyonuna karşı direncine katkıda bulunmasına neden olur (Rostami ve Behfarnia, 2017).

Aygörmez. (2018), metakaolin, Kolemanit ve silis dumanı malzemelerinden yapılan geopolimerlerin mekanik, dayanıklılık ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. İkame edilen malzemelerin yararlı olduğu ve dayanımları önemli ölçüde artırdığı kanıtlanmıştır. 28 gün boyunca, %100 metakaolin esaslı geopolimer numuneler ile %20 silis dumanı ve %10 kolemanit katkılı numuneler karşılaştırıldığında, basınç dayanımında %2, eğilme dayanımında %14,7 ve %29 artış kaydedilmiştir. Polipropilen lif takviyeli numuneler hem eğilme hem de basınç dayanımını artırmamıştır. Numunelerin aşınma direnci ve eğilme dayanımı, polipropilen liflerle artırılmıştır. Mikroyapısal analizler, SEM ve XRD incelemeleri, güçlü bir geopolimerizasyon bağı oluşturduğunu göstermiştir.

Zannerni ve diğ. (2020) yıllında yaptıkları çalışmada, YFC ve UK'una silis dumanı ikame etmek yoluyla geopolimer ürettiler. 10 M NaOH ile çeşitli bağlayıcı kombinasyonlarını aktive ederek oda sıcaklığında 7 ve 28 gün bekletmişlerdir. 2 küp geopolimer numunesi, 7 gün oda sıcaklığında bekledikten sonra 75 °C'de 24 saat kür edilmiştir. Ardından tekrar oda sıcaklığına bırakılarak 28 gün oda sıcaklığında kür işlemini tamamladı. Hem oda kür koşullarında hem de 75 °C ısıl kür koşullarında uçucu kül esaslı geopolimere %15 oranında ikame edilen silis dumanı 28 gün sonra basınç ve çekme dayanımını artırmıştır.

2.6. Alkali Aktivetör

Rangan (2014), alkali sıvıların çoğunlukla sodyum ve potasyum içeren çözünür alkali metallerden oluştuğunu keşfetmiştir. NaOH, KOH, Na_2SiO_3, K_2SiO_3 veya bu alkalilerin hepsinin geopolimerizasyon işleminde kullanıldığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, kullanılacak olan alkali aktivatörlerin en az 24 saat önce hazırlanması önerilir, böylece çeşitli kombinasyonlarda kullanılabilirler.

2.6.1. Sodyum hidroksit (SH)

Aktivetör olarak sodyum hidroksit ile sodyum silikatlar kullanıldığında, geopolimer betonun mekanik özelliklerini geliştirme potansiyeline sahiptir. Alkali malzemelerin oranı, geopolimer betonun basınç dayanımını ve kimyasal etkilere karşı direncini olduğunu bilinmektedir. Çalışmaların tarafından, geopolimer betonun mekanik özellikleri ve erken gelişim özellikleri, sodyum silikata sodyum hidroksit oranı büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Geopolimer betonun basınç dayanımı, sodyum silikat-sodyum hidroksit sıvısının kütle oranına bağlıdır (Hardjito ve diğ., 2004).

Albitar ve diğ., 2017 yılında yaptıkları çalışmada, Portland çimentosu yerine YFC ile aktivasyon sağlayan yeni bağlayıcı maddeleri araştırdılar. Bu çalışmada alkali aktifleştirici olarak sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum silikat kullanılmıştır. Test sürecinde 7, 28 ve 90 gün boyunca eğilmede çekme dayanımları, basınç dayanımları ve kuruma rötreleri ölçülmüştür. Bununla birlikte, mevcut örneklerin hidratasyonu nasıl gerçekleştiği de ayrıntılı olarak incelenmiştir. Prizin başlangıç ve sona erme süreleri olarak belirlenen süreler vardır. Sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat aktifleştiricileri kullanılarak üretilen malzemeler, sodyum karbonat aktifleştiricileri kullanılarak üretilen malzemelere göre daha iyi performans göstermiştir. Sıvı durumda sodyum silikatın silis modülünün artması, özellikle eğilmede çekme dayanımları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. NaOH ve Na_2SiO_3 aktifleştiricileri kullanılarak üretilen malzemeler, sodyum

karbonat aktifleştiricileri kullanılarak üretilen malzemelere göre daha gevrek bir yapıya sahiptir.

Walkey ve diğ., 2019 yılında yaptıkları çalışmada, silika (SiO_2)/sodyum oksit (Na_2O) molaritesi oranı birkaç çalışmada 0,93 ile 3,32 arasında değişti. Na_2SiO_3 (susuz sodyum meta silikat, modülü 0.93) ve Na_2SiO_3-NH_2O (spesifik olmayan sulu sodyum silikat, modülü 2.06), işlenebilirlik açısından daha iyidir ve bu da basınç dayanımı değerlerini artırır.

Xiao ve diğ. (2020) Atık cam şişelerin öğütülmesi (d50 = 15,4 μm) yoluyla elde edilen cam tozunun geopolimer üretiminde kaynak malzeme olarak kullanılabileceğini araştırmışlardır. Bu durumda, atık cam tozu (CT) ve C sınıfı uçucu kül (UK) farklı sodyum hidroksit konsantrasyonlarında hazırlanan çözeltiler ile karıştırıldı. Bu oranlar 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 ve 0:100 idi. Bu bulgular, aktifleştirilmiş geopolimer pasta sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kireç taşı tozu (KT) ve UK ile farklı oranlarda (100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100) ve farklı sodyum hidroksit konsantrasyonları ile karşılaştırılmıştır. Taze geopolimer numuneler, 2,5 x 5 cm boyutlarında plastik kalıplara yerleştirildi ve 24 saat sonra kalıptan çıkarıldı. Test gününe kadar, numuneler aynı ortamda kürlenmiştir. Sonuçlar, CT'nin ilk günlerde düşük reaksiyon hızından dolayı inert bir dolgu malzemesi gibi davrandığını gösterdi, ancak 14 günlük kürleme sonrası mukavemete etkisinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Basınç dayanım bulguları, tüm geopolimer numunelerin yaşla birlikte daha dayanıklı olduğunu göstermiştir ve alkali çözelti mol oranı ve karışım oranı ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermiştir. 60. günde, %100FC içeriğindeki 100:0 NaOH oranının 2,5 M'den 10 M'e yükselmesiyle basınç dayanımı 5 MPa'dan 33,5 MPa'ya yükseldi. Bununla birlikte, cam tozu içeren geopolimer karışımlar, daha düşük mol oranları ile en yüksek dayanımları göstermiştir. 5 M NaOH ile aktive edilmiş CT:UK (75:25) geopolimer numunelerde 60. günde 34,6 MPa ve 29,4 MPa bulunmuştur. Basınç dayanımı sonuçları, bilgisayarlı tomografinin CT yaşlandıkça geopolimerizasyona dahil olduğunu ve geopolimerlerin üretiminde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Ek olarak, basınç dayanımından ödün vermeden CT kullanımı sodyum hidroksit kullanımını azaltabilir. 5 mol NaOH alkali çözelti ile aktifleştirilen KT:UK karışımı ise Kalsiyum karbonat ($CaCO_3$)'ün düşük çözünürlüklü yapısı nedeniyle karışıma KT ilavesinin tüm yaşlarda dayanımı azalttığı görülmüştür. Bu, $CaCO_3$'ün geopolimer jel yapısını seyrelttiği anlamına

gelir. SEM görüntü analizi, karışımdaki UK yüzdesi arttıkça geopolimer mikro yapısının daha yoğun hale geldiğini göstermiştir. En küçük yapılı numune 25KT:75UK idi. Alüminosilikat jellerin oluşumunda, cam tozu ile uygun miktarda uçucu kül birlikte karıştırıldığında sonuçlarda olumlu etki göstermiştir. Atık cam tozu ve uçucu kül üzerinde yapılan röntgen difraktogramlarına göre, bilgisayarlı tomografinin (CT) XRD paterni 18° ila 38° (2θ) arasında net bir tümsek göstermiştir. Bu, CT'nin yüksek amorf faz içeriğiyle geopolimer oluşturmak için güvenilir bir temel malzeme olduğunu göstermiştir. Bu arada, UK, beklendiği gibi, mullit, kireç ve kuvars gibi kristal içeriklerle ilgili olarak bir dizi gelişme göstermiştir. Aktivasyon sonrası geopolimerlerin XRD paterninde 27–29° (2θ) yüksek tepeler bulundu. Sonuçlar, diğer çalışmalardaki geopolimer XRD özelliklerine benzerdir. 60 günlük numuneler üzerinde yapılan sızıntı testlerine göre, karışımda UK oranı arttıkça sızıntı miktarı azaldı, ancak CT ve sodyum hidroksit oranları arttıkça sızıntı miktarı arttı. Bu nedenle, İnşaat endüstrisindeki uygulamalar, yüksek konsantrasyonda sodyum hidroksit ile aktive edilen CT bazlı geopolimerlerin yüzey kaplaması gerektirebilir. Sürdürülebilirlik açısından, 25KT:75UK karışımı 5 mol NaOH ile aktifleştirilmiştir. Çalışmada, normal portland çimentosuna kıyasla geopolimerlerin üretim enerjisi ve karbon emisyonları daha düşük olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın tüm sonuçları, geopolimer üretmek için atık cam tozu kullanmanın hem ekonomik hem de sürdürülebilir olduğunu göstermiştir.

Shahmansouri ve diğ. (2021) sodyum silikat ile sodyum hidroksit aktivetör olarak ve farklı molaritelerde (4M, 6M ve 8M) öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) bazlı geopolimer betonlarda (GPC) silis dumanı (SD) ve doğal zeolit (DZ) ikamesinin etkisini incelemiştir. Kullanılan malzemelerin oranında %0–30 artışla sonuçlar %5 bir artış göstermiştir. Çalışmada ayrıca öğütülmüş yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer betonun basınç dayanımını hesaplamak için yapay sinir ağı (YSA) yöntemi kullanılmıştır. GPC karışımların su/katı oranı 0,48'dir (NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltilerini hazırlamak için kullanılan su/ÖYFC, SD, DZ ve NaOH ve Na2SiO3 katı kısımları), alkali çözeltinin kaynak malzemeye oranı 0,45'tir ve agrega miktarı %77'dir. Karışımı bitirdikten sonra GPC betonun işlenebilirliğini ölçmek için slump testi uygulanmıştır. Basınç dayanımını test etmek için 100 x 100 x 100 mm boyutlarında kübik kalıplar kullanılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler bir gün 23 °C (±2 °C) derecede bekletildikten sonra su havuzunda test

gününe kadar (7, 28 ve 90 gün) bekletilmiştir. Slump testi sonuçlarına göre, tüm karışımlarda SD ve DZ ilavesi ile çökme miktarı azaldı. 4 M NaOH ile aktive edilen GPB'ler, 6 M ve 8 M GPC'lerden daha iyi işlenebilir ve priz süreleri daha uzundur. GPC aktivasyonunda sodyum hidroksit konsantrasyonunun artması, slumpta önemli ölçüde azalmaya yol açmıştır. Basınç dayanımı araştırmasının bulgularına göre, çoğu karışımda sodyum hidroksit molaritesi 4 M'den 8 M'e yükseldiğinde dayanım düşer. Karışımlara SD ikame etmek, DZ ikame etmek yerine daha iyi sonuçlar vermiştir. Basınç dayanımı değerlerine göre, 7. günde 6M NaOH %30 SD ikamesi ve 4M NaOH %10 DZ ikamesi; 28. günde 4M NaOH %30 SD ikamesi ve 4M NaOH %10 DZ ikamesi ve 90. günde 4M NaOH %30 SD ikamesi ve 6M NaOH %15 DZ ikamesi karışım tasarımlarında en iyi sonuçlar elde edilmiştir. GPC basınç dayanımlarını tahmin etmek için YSA modeli, numune yaşı, sodyum hidroksit konsantrasyonu, ÖYFC, SD ve DZ içeriği kullanılarak tasarlanmıştır. Basınç dayanım sonuçları, numunelerin basınç dayanımlarını hesaplamak için kullanılmıştır. Modelin doğruluğunu test etmek için ortalama hata karesi ve kolerasyon katsayısı hesaplanmıştır. YSA'nın tahmin edilen basınç dayanım sonuçları ve basınç deneyi sonuçları çok benzer özellikler göstermektedir. Böylece, tasarlanan YSA modelin yüksek doğruluğu ve tahmin kabiliyeti gösterilmiştir.

2.6.2. Sodyum silikat (SS)

Cioffi ve diğ. (2003) yılında yaptığı çalışmada, basınç dayanımının, sodyum silikatın sodyum hidroksite oranına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Basınç dayanımı, alkali (Na ve K metalik iyonları) konsantrasyonunun artması veya silikat SiO_2 miktarının azalmasıyla artacaktır. Bunun nedeni, fazla sodyum silikatın suyun buharlaşmasını ve yapı oluşumunu durdurmasıdır. Potasyum silikat veya sodyum hidroksit ile aktive edilmiş matrisler, sodyum hidroksit ya da sodyum silikat ile aktive edilmiş matrislerden daha güçlü ve daha iyi basınç dayanımı göstermiştir. (K^+ bazik olduğu için, daha yüksek çözünmüş polimerik iyonlaşma ve çözünme, yoğun çoklu yoğuşma reaksiyonuna neden olur. Bu, daha fazla genel ağ oluşumuna ve matrisin sıkıştırma mukavemetinin artmasına neden olur. Büyük boyutlu K, polikonsevanzasyon derecesini artırabilir (Cioffi ve diğ., 2003).

Palomo ve diğ. (2008) yılında yaptıkları çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer üretiminde uçucu külün aktivleştirmek için kullanılan alkali aktivatörün reaksiyonu büyük ölçüde etkilediğini gösteren bir faktör olduğunu bilinmektedir. Alkali aktivatör çözeltisinin sodyum silikat, potasyum veya silikat içerdiği durumlarda tepkimelerin zamanla arttığını tespit edilmiştir. Bu reaksiyon gelişimini çok önemli olduğunu söylemişlerdir. Aynı zamanda alkali aktivatör tek kullanımına kıyasla sodyum silikat, potasyum veya silikat içerdiğinde, tepkimelerin zaman ile arttığını bulmuşlardır.

Kalinkin ve diğ. (2012) yaptığı çalışmada, testler incelendiğinde, alüminyum ilavesinin kararlılığı artırdığı görülmektedir. Yüksek kararlılık, özellikle düşük bir silisyum-alüminyum oranı olduğunu gösterir. Jellerin basınç dayanımını belirlemek için vickers sertliği ölçülebilir. Sodyum silikat jellerinde SiO_2/Na_2O oranı daha yüksek olduğunda, vickers sertliği ve basınç dayanımı daha yüksek olur.

Memon ve diğ. (2013) uçucu kül esaslı kendiliğinden yerleşen geopolimer harçların taze mekanik özellikleri üzerindeki alkali hidroksit molaritelerinin etkilerini, sodyum silikat ile NaOH (8, 10, 12 ve 14 M) konsantrasyonlarından oluşan bir aktivatör çözeltisi kullanarak incelemiştir. Kullanılan numunelerin alkali/bağlayıcı oranı 0,5'dir. Tüm karışımlar 400 kg/m3 uçucu kül içeriğine sahiptir ve 48 saat boyunca 70°C'de kürlenmiştir. Sonuçlar, sodyum hidroksitin pH'ının yükseltilmesiyle kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliğinin biraz azaldığını, basınç mukavemetinin arttığını göstermiştir. 12 M NaOH çözeltisiyle aktive edilen numunenin 28 gün sonra kırılması, maksimum basınç dayanımını sağladı. 12 M üzeri çözeltilerin, geopolimerizasyon üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğu ve bu koşullarda kesikli bir basınç dayanımına neden olduğu görülmüştür.

Singhi ve diğ. (2016) UK'da, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) ve kaynak malzeme olarak harmanlanan zemin-geopolimer üzerinde deneysel bir çalışma yürüttüler. Çalışmada düşük plastisiteli kil (CL), UK (C tipi) ve ÖGYFC kullanıldı. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali aktivatör olarak kullanıldı. Zemin numuneleri için katkı malzemelerinin (uçucu kül, cüruf veya her ikisinin bir kombinasyonu) ağırlıkça %4, 8, 12, 16 ve %20 oranları kullanılmıştır. 12M ve 14.5M kullanılmıştır. Zemin-geopolimer sistemlerinin, katkı malzeme içeriği arttıkça, serbest basınç dayanımı artmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek fırın cüruf içeriği, serbest basınç dayanımını istikrarlı bir şekilde artırmıştır. Geopolimer stabilizasyonu için katkı olarak uçucu kül kullanılırken,

cüruf bazlı geopolimer stabilize zemin ile karşılaştırıldığında, serbest basınç dayanımı çok daha düşüktür.

Abdila ve diğ. (2021) yapmış olduğu çalışmada, zemin granüllü yüksek fırın cüruf ve uçucu kül (C sınıf) bazlı geopolimer yöntemlerini kullanarak killi zemin stabilizasyonunu incelemişlerdir. Sodyum silikatın ve sodyum hidroksitin molaritesi 10 M'de sabitlenmiş ve sodyum silikatın/sodyum hidroksite oranı 2'dir. Fırın cürufunun etkilerini ve 1 ve 7 gün boyunca kürlenen uçucu kül/alkali aktivatör oranlarını (1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 ve 3:1) inceleyen bir araştırmadır. Serbest basınç deneyinde, zemin stabilizasyonuna dayanan geopolimer sürecinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Zemin stabilizasyonu, plastik sınır, likit sınır testleri, SEM, XRD ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizleri kullanılarak gösterilmiştir. Sonuçlar, 1.5 bağlayıcı/alkali aktivatör oranı ve 2.0 Na_2SiO_3/NaOH oranı ile 7 günlük kür süresinde elde edilen en yüksek mukavemetin 3.15 MPa olduğunu göstermiştir.

2.7.Çarpma Yükü ile İlgili Literatür

Zineddin ve diğ. (2007) tarafından yürütülen araştırmanın amacı, betonarme döşemelerin çarpma yüküne bağlı olarak nasıl değiştiğini belirlemektir. Deney, maksimum çarpma yükünü, deplasmanı, gerilmesini, ivmesini ve çatlak yayılmasını farklı çarpma yükseklikleri kullanılarak incelemiştir. Çarpma yükü, numunelerin ortasına gelen yük ise 2608 kg ağırlığındayken 152, 305 ve 610 mm yükseklikten zati ağırlığının etkisi altında düşürülmüştür. Test için üç farklı döşeme numunesi üretilmiştir. Her birinin boyutu 90 x 1524 x 3353 mm ve paspayıları ve süslemeleri farklı. Çalışma, betonarme döşeme örneklerinde çelik donatı oranının ve düşme yüksekliğinin numunelerin davranışını nasıl etkilediğini incelemiştir. Yapılan araştırmalara göre, numunelerin göçme şeklini donatı yerleşimi ile etkilendiğini ve donatı deformasyonu uğradığını görülmüştür. Göç alanı azaldığını. Zımbalama ve direkt kesme riski yükseldiğini, düşme yüksekliği arttığında bulunmuştur.

Selvi, (2008) deneysel ve sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak betonun dayanımındaki değişikliklerin çarpma davranışına etkisini araştırmıştır. Çalışma boyunca deney elemanlarına 5,25 kilogram ağırlığında sabit ağırlıklı bir çarpma uygulanmıştır.

Böylece dayanımdaki değişimin göçme mekanizması, ivme değerleri, düşme sayısı ve çarpma yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deney için 10 adet 150 x 150 x 710 mm boyutlarında numune üretilmiştir. Bunlardan beş tanesi normal dayanımlı (S1, S2, S3, S4 ve S5) iken, diğer beş tanesi (S6, S7, S8, S9 ve S10) yüksek dayanımlıdır. İvmeölçerlerin çarpma sırasında hareket etmesini önlemek için deney numuneleri çelik dübellerle sabitlenmiştir. 300, 350, 400, 450 ve 550 mm'lik yüksekliğindedir. Çalışmalar, çarpma yükünün düşme yüksekliğinin, numuneyi göçme anına getiren düşme sayısı arasında bir korelasyon olduğunu göstermiştir. çarpmanın uygulanacağı yükseklik, numune üzerinde daha fazla etki yaratarak enerji yutma kapasitesini azaltır. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda, çekicin ilk düşmesinin ardından yaptığı zıplama sayıları önemli ölçüde farklıdır. Normal dayanımlı betonda dik açıdan uzak çatlaklar meydana gelir, ancak yüksek dayanımlı betonda dik veya dike yakın çatlaklar meydana gelir. İvme ve deplasman değerleri, numunelerin düşme yüksekliğine bağlı olarak artmıştır. Ek olarak, S1/S6, S2/S7, S3/S8, S4/S9 ve S5/S10 gibi normal ve yüksek dayanımlı betonlar için minimum ivme oranı %16, maksimum ivme oranı %68 ve ortalama ivme oranı %31'dir. Hızlarda ise maksimum %21, minimum %0.6 ve ortalama %1 olduğunu bulunmuştur.

Charpy tekniği kullanılarak çarpma mukavemeti ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi bulmak, Arıcı'nın (2010)'daki çalışmasının amacıydı. Çalışmada üç farklı beton 13, 28 ve 38 MPa basınç dayanımı üretmiş. Modellerin ölçüleri 100 x 100 x 500 mm'dir. Çalışmalar, betonun basınç dayanımını artırarak çarpma, çekme ve yarma dayanımlarını artırabileceğini göstermiştir. Başlangıç çatlak boyunun büyümesi, kırılma için gerekli enerjinin ve faydalı enkesit alanının azaldığını göstermektedir. Çalışma ayrıca betonun basınç dayanımı (σ) ve çarpma dayanımı (Ç) arasındaki q oranının 0,77-0,82 olduğunu bulmuştur.

Bambach'ın (2011) çalışmasında, içi boş ve betonla dolu paslanmaz çelik boru kolonlarının enine çarpma yükü üzerindeki etkisini incelemiştir. Basınç dayanımı 91,3 MPa olan beton, çelik boru kompozitinin orta bölgesini oluşturmuştur. 600 kg ağırlığındaki çarpma yükünün yüksekliği 1975 mm'dir. Numunelerin orta kısmına denk gelen bir çarpma yükü atılmıştır. Deneylerde, Paslanmaz çeliğin üç farklı ebadı b x d x t değerleri ise (19x 19 x 1, 38 x 38 x 1.58 ve 50 x 50 x 1.52)'mm iken normal çeliğin ebadı (20 x 20 x 1.6, 35 x 35 x 1.6 ve 50 x 50 x 1.6)'mm dir. Her iki taraftan 150 mm kaynaklandıktan sonra 700 mm'lik

bir boşluk elde edilmiştir. Her örnekte ivmeölçerler de yer almıştır. Yapılan deneylerde, paslanmaz çelik boruların ortalama 1,8 kat daha fazla enerji emebileceği tespit edilmiştir.

Kantar ve diğ. (2011) betonun çarpma etkisi altındaki davranışını etkileyen beton basınç dayanımındaki değişikliği incelemişlerdir. Bu çalışmanın amacı, deney numunelerinin ivme-zaman, hız-zaman, konum-zaman grafiklerini, enerji kapasitelerini, çatlak şeklini ve gelişimini incelemektir. Numunenin ağırlığı 5,25 kg'dır sabit bir ağırlık, beş farklı yükseklikten (300, 350, 400, 450 ve 500) mm'lik serbest düşürme deneyi uygulanmıştır. Çalışmada on adet donatısız 150 x 150 x 710 mm boyutlarında beş normal (25 MPa) ve beş yüksek (45 MPa) dayanımlı beton kiriş kullanılmıştır. Numunelerin içsel etkisini ölçmek için ivme ölçerler kullanılmıştır. Yapılan deneylerde, yüksek dayanımlı kirişlerin normal dayanımlı kirişlerinkinden daha fazla düşürmeye dayanabileceğini gösterilmiştir. Ek olarak, normal dayanımlı betondan yapılmış bir kiriş numunesinde, düşürülen ağırlığın numune üzerindeki düşürme ve tekrar çarpmasına ilişkin sayısı incelenmiştir. Normal dayanımlı betondan üretilen kiriş numunesinde çekicin daha az zıplama yaptı. Yüksek dayanımlı kirişler, agrega yüzeylerinin matristen ayrılmasıyla kırılmıştır. Bununla birlikte, normal dayanımlı kirişler, kiriş eksenine dik ve çarpma yüklemesinin uygulandığı kısımda kırılmışlardır. Deney elemanları elastik durumdan plastik duruma geçtiği ve ivme-zaman grafikleri incelendiğinde göçme meydana geldiği tespit edilmiştir. Normal dayanımlı numunelerin deplasman değerlerinden ortalama %19 daha fazla hareket ettikleri görülmüştür. Ek olarak, yüksek dayanımlı numuneler, tipik dayanımlı numunelerden yaklaşık %17 daha fazla enerji kullanarak maksimum ivme değerini elde ettiği tespit edilmiştir.

Yousuf ve diğ. (2013) boş ve betonla doldurulan çelik borularda hem statik hem de çarpma yükünün kombine etkisinin eleman davranışını incelemek için deneysel ve matematiksel yöntemler kullanmışlardır. Çalışmanın amacı, içi boş ve betonla doldurulmuş (CFST) kolonların bileşik (statik ve dinamik) yük etkisi altında enerji tüketim kapasitesi, burkulma ve burkulmaların modlarının hem sayısal hem de deneysel olarak karşılaştırılmasıdır. Çalışma için, d/t oranı 20 mm olan 100 x 100 x 2500 mm ölçülerinde dört kare çelik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneleri için bir çarpma düzeneği geliştirilmiştir. Çarpmanın yüksekliği 650 mm ve çarpma yükü 592 kilogramdır. Çarpma düzeneği hem sabit hem de hareketli mesnet koşulları için geliştirilmiştir. İçi beton dolu

numunelerde lokal burkulma çok fazla olduğu, ancak içi boş numunelerde çok az olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, içi boş parçalardan daha fazla süneklik, mukavemet ve enerji yutma kapasitesi özelliklerine sahip olan beton dolgulu parçaların olduğunu göstermektedir. İçi boş çelik numunelerden %45 daha yüksek bir çarpma yükü kapasitesine sahip CFST numuneleri bulundu. İçi boş ve CFST malzemelerinden yapılan paslanmaz çeliğin statik dayanımı yumuşak çeliğinkinden %12 daha iyiydi. Çelikten yapılan içi boş parçaların ve CFST malzemelerin çarpma dayanımı yumuşak çelikten yapılan numunelerden %17 daha yüksektir. Yumuşak çelik örnekleri paslanmaz çelikten %73 daha sünektir. Ek olarak, sonlu eleman çalışmasının sonuçları, deneysel çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırıldığında yük sapma eğrilerinin ve deforme olma biçimlerinin benzer olduğu bulunmuştur.

Lin-Hai Han ve diğ. (2014), çarpma testi yoluyla yüksek mukavemetli Betonla Doldurulmuş Çelik Boru Elemanlarının (CFST) performansını incelemişlerdir. Deneysel çalışmaların bulguları, ABAQUS programı kullanılarak elde edilen bulguları doğruladı. Araştırmanın değişkenleri sınır koşulları, yükün ağırlığıdır, numunenin boyu ve çarpma yüksekliği. Deneysel çalışmanın 12 numunesinin 9'u beton içeriyordu ve 3'ü içi boş referans numunesi olarak kullanıldı. Test numunesinin üst kısmındaki betonda çekme çatlakları ve alt kısmındaki betonda ezilme bulundu. Ek olarak, yüksek mukavemete sahip betonla doldurulmuş (CFST) numuneler, uygulanan çarpma yükü altında esnek bir şekilde deforme olur ve iyi bir çarpma dayanımı gösterir. Sonlu elemanlar yöntemi ile deneysel çalışmalar arasındaki sonuçlar çalışmanın sonunda benzer bir sonuç göstermiştir.

Wang ve diğ. (2015) yılında yaptıkları çalışmada, Ultra Hafif Çimento (ULCC) kullanılarak yapılan beton dolgulu kompozit çelik parçalarının çarpma yüküne nasıl tepki verdiğini araştırdılar. Çarpmanın ağırlığı 1350 kg ve yüksekliği 3400 mm'dir. Deney numunelerinin 1800 mm uzunluğunda, çapı 219 mm ve 10 mm et kalınlıkları, 6,3 mm ve 5 mm'dir. Deney sonucuna göre et kalınlığının artması ve çelik numunelerin beton dolgulu olmasıyla birlikte çarpma kuvvetine karşı dayanım artmış, lokal deformasyon ve düşey yerdeğiştirmesi azaltmıştır.

Ağcakoca ve diğ. (2017) kompozit dikdörtgen kesitli çelik kirişlerin çarpma yüküne nasıl tepki verdiğini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ABAQUS programı kullanılarak elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmaların sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Her deneyde aynı

beton sınıfı, numune ebatları, çarpma yüksekliği ve çekiç ağırlığı kullanıldı. 220 kilogram ağırlığında bir çarpma yükü deney numunelerinin tam ortasında serbest bırakıldı. Çarpmanın ağırlığı 220 kg ve yüksekliği 2000 mm'dir. Deney için iki numune tasarlanmıştır. Her biri 120 x 80 x 3 mm ölçülerinde ve 1500 mm uzunluğundadır. Bir kiriş numunesinin içi boşken, diğerinin içi C30 beton sınıfı ile doldurulmuştur. Yapılan deneylerin ardından konum-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri tasarlanmıştır. Grafiği incelerken, içi betonla dolu bir kirişin 9,65 mm deplasman yaptığı ve içi boş bir kutu kirişin 330,12 mm deplasman yaptığı bulunmuştur.

Gonzalo ve diğ. (2017) yılında yaptıkları bir çalışmada, çarpmanın dikdörtgen kesitli çelik lifli betonarme kirişler üzerindeki etkisini incelediler. Deney için 125x250x1600 mm ölçülerinde numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada çarpmanın yüksekliği 1750 mm ve çarpma yükü 200 kilogramdır. Üç farklı çelik lif tipi (düz, kanca ve prizmatik) kullanılarak yapılan deneyde yedi numune kullanılmıştır. Numuneler %0.5 lifli, %1 lifli ve lifsizdir. Çelik lif içeren deney numunelerinin çarpma dayanımı, belirli bir lif oranına ulaştıklarında artmış, fakat belirleyen orandan fazla kullanıldığında çarpma dayanımı azalmıştır.

Gücüyen ve diğ. (2018) tarafından deneysel bir inceleme yapılmıştır. Deneysel çalışma, çarpma deney altında kompozit boru davranışlarını incelenmiştir. ivme, çarpma kuvveti ve deplasman gelişimini ölçmüştür. Çarpma tokmanı 1000 mm yükseklikte ve 12 kg çarpma yükü ağırlığındaydı. Test numunesinin uçlarında meydana gelebilecek yanal dönme ve ötelenme hareketlerini gözlemlemek için 50 x 50 x 500 mm ebatlarında bağlantı aparatları kullanılmıştır. Kompozit boru elemanlarından oluşan deney numuneleri, 4 mm kalınlığında galvanizli bir boru ile PVC boru arasına beton döküldükten sonra üç farklı çapta oluşturulmuştur: 2 inç, 3 inç ve 4 inç. Deney numunesinin orta kısmına Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörler (LVDT)'ler yerleştirilmiş ve ivme ölçerler çekicin etki edeceği alana 25 cm uzağa konulmuştur. Kuvvet algılayıcısı çekicin uç kısmındadır. Bu, çarpmanın etkisiyle meydana gelen çarpma kuvvetinin miktarını bulmak için kullanılır. Hazırlıklar tamamlandıktan sonra deneyler başlanmış olup göçmesi ulaşıncaya kadar deneyi devam etmiş. Deney sonuçları ve ABAQUS programı sonuçları karşılaştırılmıştır. 2 inç, 3 inç ve 4 inç çaplı kompozit boruların göçme düşme sayısı 14, 25 ve 37 olarak

sıralanabilir. Kesit çapı arttıkça düşme sayısı artmıştır. Kompozit boruların 1,34 mm, 2,17 mm ve 2,61 mm göçme anında en yüksek deplasman değerleri bulunmuştur.

Mashal ve diğ. (2019) yıllında yaptığı çalışma, deneysel ve nümerik olarak çarpma yükü altındaki kirişlerin davranışlarını araştırmaktadır. 75 kilogramlık bir sabit ağırlık 900 mm yükseklikten serbest bırakılmıştır. Bu deneysel çalışmada S235 çelik sınıfından yapılmış, dikdörtgen kesitli 120x80x3 mm ebatlarında ve 2000 mm uzunluğunda bir kiriş numunesi kullanılmıştır. Çalışma, basit mesnet sınır koşullarına sahip bir çarpma deney düzeneğine çelik kiriş numunesini yerleştirerek yürütülmüştür. Deney numunesini ve çekiç yükünü ölçmek için iki genel amaçlı ivmeölçer kullanılmıştır. Yapılan deneylerden sonra konum-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Deney esnasından kiriş numunenin basınç bölgesinde plastik şekil değiştirme ve çekme bölgesinde akma meydana gelmiştir. Mesnet bölgelerinde daha az gerilme meydana gelirken çarpma yükünün etki ettiği noktada daha fazla gerilme meydana gelmiştir. Sonlu elemanlar modeli deney sonuçlarını doğrulamıştır.

Saini ve diğ. (2019) tarafından yürütülen bir çalışmada, betonla doldurulmuş çelik boru kirişleri CFRP ile güçlendirilmiştir. Ardından, çarpma yüküne karşı tepkileri incelenmiştir. Çalışmada 42 numune, çeşitli malzeme özellikleri, kesit özellikleri, çarpma yükü ağırlığı ve çarpma hızları ile hazırlanmıştır. Deney düzeneği, basit mesnet koşullarını kullanır ve silindirik geometrili bir çekiç başlığının numunenin orta açıklığını etkiler. A, B ve C serilerinde bulunan numunelerin açıklıkları sırasıyla 3150 mm, 1800 mm ve 1300 mm'dir. C serisindeki numunelerin et kalınlığı 3,7 mm ve boru çapı 219 mm iken, numunelerin 114,3 mm ve 4,5 mm'dir. Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP) borulara sarılırken 0,52 mm kalınlığa sahiptir. Çarpma enerjisi, farklı çarpma yükseklikleri ve çarpma yükü ağırlıkları kullanılarak oluşturulmuştur. A ve B serileri için çarpma yükünün çapı 150 mm ve ağırlığı 625 kg'dır. C serisi 100 mm ve 592 kg ağırlığındadır. Yapılan araştırmalar, CFRP ile sarılan kirişlerin yer değiştirmelerinin ve absorbe edilen enerjinin %20 azaldığını göstermiştir. Çarpma etkisi altında test edilen örnekler, CFRP ile sarılan kirişler ve yüksek dayanımlı kirişlerin en iyi performansını gösterirken, beton kalitesi önemli ölçüde değişmemiştir. Beton çekirdek çeliğin deformasyonunu önlemiştir. Tek kat CFRP yerine üç kat CFRP kullanıldığında, numuneler 0,85-0,79 enerji absorbe etmiştir.

2.8. Boşluklu Kiriş

Ashour ve diğ. (2000) gövdede iki boşluk olan 16 betonarme kirişi incelediler. Kiriş numunelerinin her biri aynı basınç ve çekme donatısına sahiptir. Boşluk boyutu, konumu ve donatı düzeni deney değişkenleridir. Deney sonuçlarına göre, sadece boşluğun konumuna bağlı olarak iki farklı göçme tipi ortaya çıkmıştır. Bu tür göçmeler, boşluk bölgesindeki donatı miktarı ve düzeni dikkate alınmadığında ortaya çıkmıştır. oluşturulan boşluğu etrafına mevcut boyuna donatılar, enine donatılara oranla kirişin kesme kapasitesini iyileşmede daha etkili olduğunu, mesnet reaksiyonlarının boşluğun boyutuna ve konumuna bağlı olarak değiştiğini, mesnede yakın bölgelerinde oluşturulan küçük gövde boşluklu sürekli derin kirişlerin davranışı, referans kirişlerin davranışına daha yakın ve sürekli derin kirişler için önceden belirtilen denklemler ile uyumlu sonuçlar gösterdiğini göz önüne alındığında, sürekli derin kirişler için önceden belirtilen denklemler ile uyumlu ’dur.

Osman ve diğ. (2017), güçlendirilmiş boşluklu betonarme kirişlerin yüzeylerinde polimerler kullanarak beton yapıların ağır yükleri taşıyabilecek şekilde tasarlanması için faydalı bir çözüm önermiştir. Güçlendirilmemiş iki kontrol kirişi, ön çatlama olmadan güçlendirilmiş bir kiriş ve güçlendirilmemiş dört kiriş test edilmiştir. Sonuçlar, hem önceden var olan hasar seviyesinin hem de Fiber Takviyeli Polimer (FRP) oryantasyonunun etkinliği ve hasarı güçlendirmeyi önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Sonuçlar, FRP levhalarla güçlendirilmiş boşlukları olan önceden çatlamış RC derin kirişlerin rijitlik ve süneklilik açısından daha iyi olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni, FRP güçlendirme şeridinin uygulanmasından önce epoksi reçinesi kullanılarak kesme çatlaklarının gelişimlerinin sınırlandırılması olarak değerlendirmişlerdir. Güçlendirilmiş örneklerin tümü, güçlendirilmemiş kontrol kirişlerinden daha fazla kapasite göstermiştir.

Abdul-Razzaq ve diğ. (2017) boşlukları olan betonarme (RC) derin kirişlerin çelik levhalarla güçlendirilmesinin potansiyel olarak kullanılması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Oluşturulan kare, yatay, dikey ve dairesel dikdörtgen boşluklarla dört noktalı yükleme altında on üç derin kirişi test ettiler. Kare, yatay ve dikey dikdörtgen boşlukların oluşturulması, referans kiriş ile karşılaştırıldığında nihai kapasitesinin azalmasına neden olur. Bu boşlukların çelik plakalarla güçlendirilmesinin, RC derin kirişlerin kesme mukavemetinin önemli ölçüde artmasına yardımcı olduğunu göstermiştir.

Güçlendirilmiş kirişler, güçlendirilmemiş kirişlere göre %10 daha iyi performans göstermiştir. Güçlendirilmemiş kare boşlukların boyutunun %25-50 azaltılması sonucunda nihai yük kapasitesi %11-17 artmıştır. Buna ek olarak, güçlendirme plakası kalınlığı arttıkça, nihai yük kapasitesinin arttığını göstermişlerdir.

Saleh ve diğ. (2017) güçlendirilmiş olarak oluşturulan boşluk ve konumuna bağlı olarak bir betonarme kiriş-kolon birleşimi üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. İncelenmiş parametrelerden bazıları, çatlama şekli, kırılma yükü, rijitlik azalması, çelik takviyeli gerilme, enerji dağılımı, yük-deplasman zarfı, mukavemet ve sünekliliktir. Üç büyük ölçekli kiriş-kolon birleşimini çevrimsel yükleme altında test etmişler. Sonuç olarak, güçlendirilmiş bir boşluklu kirişin enerji yutma kapasitesini, kolon birleşiminin nihai yükünü, yer değiştirmesini ve rijitliğini azalttığını keşfettiler.

Salama ve diğ. (2018) burulma etkisi altında dikdörtgen boşlukların T şeklinde betonarme kirişlerin davranışını inceleyen deneysel bir çalışma yürüttüler. Boşluğun hasar modları, çatlaktaki dönme açısı, nihai dönme açısı, çatlama momenti ve nihai momenti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Test sonuçlarını analiz ederek ve bu kirişler için çeşitli öneriler sunarak birkaç temel hususu vurguladılar. Geometrik parametrelerin kiriş üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gösteren deneysel sonuçlar sağladılar. T-şekilli betonarme kirişlerinde burulma etkisi altında büyük bir boşluk olan yumuşatılmış kafes modeli kullanılmıştır. Analitik moment rotasyon eğrileri deneysel eğrilerle karşılaştırılmıştır.

Demiral ve diğ. (2018), yaptıkları çalışmada mesnede yakın bölgelere kiriş yüksekliğinin %20, %40 ve %60 oranlarında boşluklu betonarme kirişler üretmiş ve statik yükleme altındaki davranışlarını araştırmıştır. Deneysel çalışmada (%20, %40 ve %60) boşluklu oranı ile boşluklu olan iki referans kiriş ile karşılaştırılmıştır. Üç farklı "Boşluk oranı" deney ana değişkeni olarak belirlenmiştir. Deney boyunca, kolon- kiriş birleşim bölgelerinin ankastre mesnet gibi davranmasına dikkat edilmiştir. Referans kirişler ile birlikte %20 boşluk oranına sahip kirişler, deneysel çalışmanın sonunda yeterli dayanım ve süneklilik gösterebilmiştir. Deneyler sonucunda, diğer boşluk oranlarına sahip kirişlerin dayanımı ve sünekliliği açısından istenilen seviyede olmadığına karar verilmiştir.

Marzewski (2018) güçlendirilmiş boşluklu Yüksek Performanslı Beton (HPC) kirişlerin performansını artırmak için güçlendirici bir çözüm olarak hibrid çelik-polipropilen kombinasyonunu incelemiştir. Toplamda dört noktalı eğilme altında altı adet

basit mesnetli kirişi test etmiştir. Orta noktaya simetrik olarak yerleştirilmiş üç kirişte, kesme bölgesinde iki kare boşluk oluşturmuştur. Mevcut çalışmanın bulguları şu şekildedir: Hibrit lif içeriği %1'in üzerinde olan boşluksuz kirişler ve %1.6'nın üzerinde lif ilavesi olan boşluklu kirişler, en yüksek verimi göstermiştir. Hibrit lif içeriği arttıkça kirişin ilk çatlama yükünü, nihai yük kapasitesini, tokluğunu ve sünekliliğini artırabilmiştir. Ortalama çatlaklar arası mesafe, çatlak genişliği ve yükte azalma olduğunu keşfettiler. Elyaflar kullanılarak yapılan kirişler, en büyük etkiyi göstermiştir. Sırasıyla en az %1 ve %1,6 oranlarında gözlemlemiştir. Düşük lif oranına sahip kirişler, nihai yükte bir azalma ve ani bir kesme kırılması moduna geçiş göstermiştir. Hibrit elyaflı kirişler için maksimum ve ortalama çatlak aralığı oranları benzerdir. Boşluklar, süneklilik faktörünü ve tokluk aralığını önemli ölçüde etkiler.

Senthil ve diğ. (2018) sonlu elemana dayalı sayısal modellerin doğruluğunu göstermek için statik monotonik yüklemeye maruz bırakılan derin kirişler üzerinde sayısal araştırma yürütmüşlerdir. ABAQUS/CAE sonlu eleman programı ile modellemeleri ve simülasyonları analiz ederek elde ettikleri sonuçları literatürde mevcut deneylerle doğrulamışlardır. Basit mesnetli olarak altı kirişte iki dikdörtgen boşluk oluşturarak modellemişlerdir. Bu boşluklar, kirişin merkezinde, üstünde ve altında 200 ve 250 mm uzunluklarındadır. ABAQUS programında ayrıca on yedi kirişin konumunu, boyutu, şeklini ve yüksekliğini ve kesme açıklığının derinlik oranına etkisini incelemek için statik yükleme altında simüle edilmiştir. Genel olarak, sayısal sonuçları, deformasyon ve yer değiştirme modülünü doğru bir şekilde tahmin etmişler ve deneylerle iyi bir şekilde uyumlu olduğunu görmüşlerdir. Boşluk boyutunda 200 ila 250 mm'lik bir artışın, ortalama kayma mukavemetini % 35 azalttığını tespit etmişlerdir. Dairesel boşluklara sahip derin kirişlerin daha az sapma gösterdikleri için kare boşluklara göre daha çok tercih edildiğini belirtmişlerdir. Bu gözlemlerinden hareketle, dairesel boşlukların derin kirişler üzerinde kare boşluklardan daha faydalı olduğu düşünülmektedir.

Shader ve diğ. (2018) çelik levhalarla güçlendirilmiş boşlukları olan Betonarme (RC) derin kirişlerin kullanımını incelemişlerdir. On üç kare boşluklu derin kirişleri iki noktalı yükleme altında test etmişlerdir. Denedikleri her kiriş 1000 mm uzunluğa ve 100 mm x 400 mm kesit alanına sahiptir. Her kesme bölgesinde bir tane olmak üzere iki boşluğu simetrik olarak kirişin etrafında konumlandırmışlardır. Boşluklu derin kirişte ilk

diagonal çatlaklar %28 ve ilk çatlama gerilmesi sonlu eleman yazılımında [ABAQUS] %30 seviyelerinde bulunmuştur. Güçlendirilmemiş boşlukların yakınlığının, ABAQUS sonucuna kıyasla numunenin orta boşluk sapmasını %8 azalttığı tespit edilmiştir.

Marzewski P. (2018), hibrit çelik-polipropilen lif takviyeli yüksek performanslı betondan yapılan boşluklu ve boşluksuz derin kirişlerin yük taşıma kapasitesini ve davranışını incelemiştir. Kirişler üç nokta yükleme testine tabi tutulmuştur. Tüm numunelerin test edilmesi için aynı basit mesnetli koşullar kullanılmıştır. Araştırma, donatı türü ve miktarına odaklanmıştır. Çalışmasında, hibrit liflerin boşluklu derin kirişlerin yük taşıma kapasitesini artırdığını ve derin kiriş çatlak genişliklerini artırdığını göstermiştir. Aşağıdaki sonuçlar, deneysel araştırmalar ve teorik analizler sonucunda ortaya çıkmıştır. Çelik lif içeriği %1 ila %1.5 arasında ve polipropilen lif ile güçlendirilmiş boşluklu beton derin kiriş numuneleri %28 daha iyi performans göstermiştir. Boşlukların etrafında bulunan hibrit liflerin, derin kirişlerin mukavemetinin önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Jasim ve diğ. (2019) deneysel ve nümerik bir çalışma ile boşlukların boyutu ve konumu yük taşıma kapasitesi ve betonarme derin kirişlerin performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kırılma yükünü ölçmek için, kesme bölgelerinde oluşan iki büyük boşluğa sahip beş tam ölçekli, basit mesnetli olarak desteklenen betonarme derin kirişleri test ettiler. Kesme açıklığının toplam derinliğe oranı 1,1'dir. Kesme açıklığının orta noktasında veya iç kısımlarında orta açıklık kısmına göre kare boşlukları simetrik olarak yerleştirmişlerdir. Bu deneyde, ilk diyagonal çatlak yükünün (% 8-9) değiştiği, ilk eğilme çatlak yükünün (% 17-23) arttığı ve kırılma yükünün (% 3-11) değiştiği bulunmuştur.

Sayed (2019) betonarme bir kirişin kesme bölgesindeki boşluk ve dairesel boşlukların kesme performansını nasıl etkilediğini incelemiştir. Ansys'inin sonlu elemanlar programı 41 kiriş analiz etti. Kirişin yük kapasitesini ve kırılma modlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için yeni geliştirilen Sonlu Eleman Yöntemi (FE) modeli kullanılabilir. Dikey boşluk çapının kiriş bölümünün genişliği üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, boşluk çapının etkisinin boşluk sayısının etkisinden daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Parametrik araştırmalar, kirişteki boşluk konumunun, yükün, boşluk sayılarının ve boyutlarının etkilerini incelemiştir. Boşluk sayısının etkisinden daha büyük olan boşluk çapının etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Quaderi (2020) betonarme bir kiriş gövdesinde açılan boşluk sayısı ve yatay doğrultudaki konum değişikliğinin kiriş davranışını nasıl etkilediğini araştırmıştır. Bu amaçla on üç betonarme kiriş numunesi tasarlanmıştır. Bu üretilen kirişlerden bir adet referans olarak bir boşluksuz kiriş numune üretilmiştir. Diğer geri kalan numuneler boşluk bırakarak yapılmıştır. Boşluk yeri ve sayısı değiştirildikten sonra, numune kiriş davranışlarını üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçları yorumlandığında, boşluk adedi artması ve boşluğun konumu mesnete doğru yaklaştıkça numunenin yük taşıma ve deplasman kapasitesi önemli ölçüde azalmaktadır.

Aksoylu ve diğ. (2020) kirişlerin güçlendirilmesi için iki farklı CFRP uygulaması yöntemini incelemiştir. Dairesel boşluklar ve on bir ölçekli numuneler dahil olmak üzere geniş bir deney programı geliştirilmiştir. Delik çapı (D) ve Kiriş Yüksekliği (H) oranı (D/H) olan kirişlerde belirli oranlarda simetrik boşluklar oluşturulmuş ve düşey yükleme altında test edilmiştir. 0.30 D/H oranında sadece yük taşıma kapasitesi azalırken kirişin sünekliliği artmıştır. Boşluk çapları arttıkça yük taşıma kapasitelerinin azaldığı görülmüştür. Farklı CFRP konfigürasyonları, yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini önemli ölçüde artırmıştır. Boşluk çapının ve CFRP güçlendirme yönteminin, güçlendirme için çok önemli olduğu sonucuna varmışlardır. CFRP güçlendirme seçeneği olmayan D/H oranı 0.64 olan kirişler de iyi performans göstermişlerdir. Makro ve mikro hasar analizlerini sunmuşlardır.

Shaaban ve diğ. (2020) 13 numuneyi Hafif Boşluklu (LWC), Orta Boşluklu (NWC) ve Derin Boşluklu (NWC) kirişler olarak sınıflandırarak kesme davranışını incelemek amacıyla. monotonik yükü altında test etmiştir. Bu araştırmada LWC terimi, hafif agrega içeren betonu değil, agreganın polistiren köpük topları ile değiştirilmesiyle elde edilen betonu ifade eder. Boşlukların boyutları ve yerleri, enine donatı oranı ve kesme açıklığı/derinlik oranı deney açısından önemli değişkenlerdir. Boşluk derinliğinin, kiriş derinliğinin % 20'sinden % 40'ına çıkarıldığı durumda, nihai yükün % 46.4'e düştüğünü tespit etmişlerdir. Numune kirişlerine karşı sayısal sonuçları doğrulamak için sonlu eleman modeli kullandılar ve her ikisi içinde uyum sağladılar.

Quaderi (2020) betonarme kiriş numunelerine açılan boşluk sayısının ve yatay doğrultudaki konum değişiminin kiriş davranışlarına etkisini incelemiştir. Elde edilen

sonuçlara göre, boşluk adedi artması ile ve boşluğun konumu mesnete doğru yaklaştıkça numunenin yük taşıma kapasitesi ve deplasman kapasitesi önemli derecelerde azalmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması 4 ana başlık altında yürütülmüştür. Birinci bölümde geopolimer beton üretmek için gerekli optimum karışım oranları belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, elde edilen optimum karışım oranları kullanılarak geopolimer betonarme kirişler ve GB kirişlerin üretimi yapılmıştır. Üçüncü bölümde ise üretilen GPC ve GB kirişlere statik yükleme deneyleri uygulanmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise üretilen kiriş numunelerine dinamik (çarpma) yükleme deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Çimentosuz beton (GPC) üretebilmek için bağlayıcı olarak çimento yerine SiO_2 ve Al_2O_3 gibi içerikleri zengin malzemeleri kullanmak gerekmektedir. GPC üretiminde bu minerallere sahip atık malzemelerin kullanması hem enerji maliyetlerini düşürmek hem de çevreye verilen zarar açısından önem arz ettiği görülmektedir. Literatürde GPC üretiminde çeşitli atık malzemeler kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, pişirilmiş taş tozu, metakaolin, silis dumanı vs. verilebilir. Tez çalışması kapsamında GPC üretimi için kullanılan atık malzemeler; uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin, pişirilmiş taş tozu olarak belirlenmiştir. Bu malzemelerden metakaolin ön tasarım deneylerinde kullanılmış olup, tedarik maliyeti fazla olduğu için çalışmanın ana deneylerinde kullanılmamıştır.

3.1.1. Uçucu kül

Termik santrallerde yakılan kömürden farklı türde kül elde edilebilir bunlardan birisi taban küldür: Kullanıldığı alanda nispeten iri taneli olması sebebiyle hava sirkülasyonu ile taşınamayan ve tabana düşen küldür. Bir diğeri ham küldür: Ocaklarda yakılan kömürün belirli işlemlerle soğutulmasından meydana gelen küldür. Bir diğeri ise kül ise uçucu küldür. hava sirkülasyonu sebebiyle taşınan ve çok ince tanelere sahip küldür.

Hava sirkülasyonu sebebiyle taşınan ve çok ince tanelere sahip küldür. (0.5-150 mikron) İçeriside kalsiyum oksit (CaO), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe2O3),silisyum oksit (SiO2), manganez oksit (MnO) gibi olup, bileşenleri barındırır. Ayrıca MgO, SO_3, alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Genel olarak uçucu küldeki temel oksitlerden Al_2O_3 %10-30, SiO_2 %25-60, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO, %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu değer aralığındaki farklı oranlar uçucu külün karakterini sunmaktadır.

Uçucu küller ile bilinmesi gereken diğer bir konu ise doğaya ve insana verebileceği zarardır. Kontrol altında mekanik ve elektrostatik yöntemle toplanarak depolanır. Bu durum zamanla toplanan küllerin kapladığı geniş alan sebebiyle santral idaresi için çözülmesi gereken bir sorun olmaya başlayabilir.

3.1.1.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması

ASTM C618-12a (2012),'ye göre uçucu küller, kalsiyum oksit içeriklerine göre C ve F olarak sınıflandırılabilir. C sınıfı uçucu kül, yüksek kalsiyum oksit içeriğine sahiptir ve esas olarak linyit kömürü kaynaklarının yakılmasından üretilir. C sınıfı uçucu külde ağırlıkça SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 toplamı %50 den fazla olmalıdır. CaO içeriği ise %10'den fazla olmalıdır. F Sınıfı uçucu kül ise, düşük kalsiyum oksit (ağırlıkça <%10) içeriğine sahiptir. F sınıfı uçucu küller antrasit veya bitümlü kömür kaynaklarının yakılmasından üretilir. F sınıfı uçucu külün içerisinde ağırlıkça SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 toplamı %70'in üzerinde ve CaO içeriği ise %10'un altındadır (Bankowski ve diğ., 2004; Antiohos ve Tsimas, 2007). Uçucu küllerin, en önemli sınıflandırma sistemi ASTM C618 ve TS EN 197-1'ye göre sınıfları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Uçucu küller Silisyum (Si), alüminyum (Al), demir (Fe) ve kalsiyum (Ca)'ya ek olarak, Cıva (Hg), Krom (Cr), Manganez (Mn), Karbonmonoksit (Co), Stronsiyum (Sr), Titanyum (Ti), Molibden (Mo) ve kurşun (Pb) gibi metal elementleri de içerir. Uçucu küldeki toksik eser elementlerin konsantrasyonları, kömürdekinden 4-10 kat daha yüksek olabilir (Neupane ve Donahoe, 2013; Nyale ve diğ., 2014; Yao ve diğ., 2015). Ayrıca küçük konsantrasyonlarda dioksinler ve polisiklik aromatik hidrokarbon bileşikleri içerebilir (Shibayama ve diğ., 2005; Nomura ve diğ., 2010). Bu nedenle uçucu kül tehlikeli

bir madde olarak kabul edilmekte ve uçucu külün uygun olmayan şekilde bertaraf edilmesi sadece arazi işgalini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda çevre ve ekolojiyi de bozacaktır. Son birkaç on yılda, özellikle verimli ve yeşil bir şekilde uçucu külün kullanımına yönelik çalışmalar artmaktadır.

Çizelge 3.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması

Standart	Tip	Tanımı
ASTM C 618	**F**	Bitümlü kömürden üretilen ve toplam Al_2O_3+Fe_2O_3+SiO_2 yüzdesi ağırlıkça %70'den fazla olan uçucu küllerdir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'dan azdır, puzolanik özelliğe sahiptirler.
	C	Linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarı ağırlıkça %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, CaO yüzdesi > %10 olmalıdır, puzolanik özelliğin yanısıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.
TS EN 197-1	**V**	Çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden oluşan ince bir tozdur. Alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum dioksit (SiO_2) başlıca bileşenleri olup, kalan kısmı demir oksit ve diğer bileşenlerden oluşur. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az ve reaktif silis oranı %25'den fazla olması gerekir.
	W	Hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir tozdur. Genel olarak CaO, SiO_2ve Al_2O_3'ten oluşur ve kalan kısmı kül ve diğer bileşenlerden oluşur. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranı %10 ve reaktif silis oranı %25'den fazla olmalıdır.

Çalışmada kullanılan uçucu kül Manisa-Soma Termik Santralinden elde edilmiştir. Temin edilen uçucu kül ASTM C 618'e göre incelendiğinde C sınıfı uçucu kül olarak kabul edilmektedir (Şekil 3.1). Manisa-Soma Termik Santrali uçucu külünün üretim aşamaları Şekil 3.2'de olup kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Tez çalışmasında kullanılan uçucu kül

Çizelge 3.2. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri

Oksit	**SiO_2**	**AI_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**SiO_2/Al_2O_3**	**K_2O**	**SO_3**	**TiO_2**
(%)	30.05	13.93	6.55	43.09	2.01	2.12	3.45	0.78



a) UK Çıkartması b) UK Toplaması

c) UK Soğutma işlemleri d) UK Taşıması

Şekil 3.2. Uçucu kül üretim aşamaları

3.1.2. Yüksek fırın cürufu

Çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen çeşitli atık maddeler arasında cüruflar bulunmaktadır. Bu cürufların kimyasal özellikleri ve bileşimleri, üretildikleri sanayi kuruluşlarının ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterir. Örneğin, bakır ve nikel cürufları genellikle puzolanik özelliklere sahiptir, ancak

YFC (yüksek fırın cürufu) bağlayıcı özellikler gösterir ve çimento ve beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Geleneksel çelik üretim yöntemleriyle elde edilen cüruflar genellikle kristal yapıdadır ve genellikle atık olarak bertaraf edilir veya yol malzemesi ve beton agregası olarak kullanılır. Modern çelik üretim tesislerinde ise camsı yapıya ve hidrolik özelliklere sahip cüruflar üretilir ve bu tür cüruflar çimentolu sistemlerde kullanılabilmektedir. YFC, üretilen tüm cüruflar arasında genellikle tercih edilen bir üründür.

Yüksek fırın cürufunun özellikleri belirlenirken malzemenin kimyasal yapısı büyük önem taşır. Cüruflar genellikle SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, CaO ve MnO gibi bileşikler içerir. Malzemenin yapısındaki kalsiyum oksit (CaO), bazı bağlayıcı özellikler kazanmasına yardımcı olur. Yüksek fırın cürufunda bulunan CaO/SiO_2 oranının belirli bir sınır değere kadar artması, malzemenin hidrolik özelliklerini artırabilir. Ancak bu sınır değeri aşıldığında hidrolik özelliklerde azalma görülebilir, çünkü yüksek CaO miktarı granülasyonu zorlaştırabilir. Kimyasal kompozisyon içinde CaO/SiO_2 oranı sabitken, Al_2O_3 miktarının artması genellikle cürufların aktivitesini artırır. Magnezyum oksit (MgO) içeriğinin ise %10'a kadar dayanıma etkisi bulunmamaktadır (Şahan, 2006).

Tez çalışmasında kullanılan YFC, Türkiye, Adana Çimento A.Ş. İskenderun tesisinden temin edilmiş olup (Şekil 3.3), YFC'un kimyasal özellikleri Çizelge 3,3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriği

Oksit	**SiO_2**	**AI_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**SiO_2/Al_2O_3**	**MgO**	**MnO**
(%)	35.00	16.00	1.40	37.50	2.18	5.25	1.75



Şekil 3.3. Tez çalışmasında kullanılan yüksek fırın cürufu

3.1.3. Pişirilmiş taş tozu

PTT Asfalt fabrikalarından üretilen 150°C sıcaklığında fırınlara belirli gradasyonlardaki agregaları ekleyip belirli sürede ısıtılan ve sonra kullanılan agregaların yüzeylerinde bulunan pişmiş tozların temizlenerek atık malzeme niteliği kazanıp depolanması sonucu oluşan bir yan malzemedir. Yalnızca ısıya tabi tutularak ve fazladan enerjiye ihtiyaç duyulmadan yüksek puzolanik aktivite (%75) kazanmaları, PTT için büyük önem arz eder. Bu çalışmada kullanılan Pişirilmiş taş tozu atığı Meram Belediyesi Asfalt Fabrikasından temin edilmiş olup, özgül ağırlığı 2,70 g/cm^3'tür, pişirilmiş taş tozu atığının kimyasal birleşimi ve ilgili resmi Çizelge 3.4 ve Şekil 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Pişirilmiş taş tozu atığı kimyasal özellikleri

Oksit	**SiO_2**	**AI_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**SiO_2/Al_2O_3**	**MgO**	**K_2O**	**TiO_2**
(%)	4.08	1.62	0.58	43.00	2.51	9.34	0.19	0.11



Şekil 3.4. Tez çalışmasında kullanılan pişirilmiş taş tozu atığı

3.1.4. Alkali aktivatörler

GPC üretiminde kullanılan alkali ise, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikatın (Na_2SiO_3) birleşimidir. Deneyler için alkali sıvı olarak bir alkali silikat çözeltisi ve alkali hidroksit çözeltisi kombinasyonu seçilmiştir.

Geopolimerizasyon reaksiyonunu başlatmak için kimyasal bir aktivatör gereklidir. Genel olarak, yüksek pH koşulları altında alkali hidroksitler veya silikatlar tarafından aktive edilen alüminosilikat bağlayıcı malzemeler geopolimerler olarak sınıflandırılır (Shi ve diğ., 2006).

Geopolimer sentezinde aktivatörler olarak en yaygın olarak kullanılan alkali hidroksitler sodyum ve / veya potasyumdur.

Tez çalışma kapsamında Geopolimerizasyon işlemi için alkali çözelti; NaOH çözeltisi ile Na_2SiO_3 çözeltisinin kullanılmıştır, NaOH ve Na_2SiO_3 kimyasalları yerel tedarikçilerden temin edilmiştir.

3.1.4.1. Sodyum hidroksit (NaOH)

NaOH çözeltisi hazırlanırken; çoğu durumda ısının bir kısmı kaybolacak ve bir kısmı da çözeltinin bir kısmının buharlaşması esnasında harcanacaktır. Sodyum hidroksit geopolimer sentezinde en yaygın olarak kullanılan hidroksit aktivatörüdür ve alkali hidroksitlerin hem en ucuz hem de en yaygın olarak bulunanıdır. NaOH'ın hem uçucu kül hem de metakaolin ile birlikte geopolimer sentezinde bir aktivatör olarak kullanılabilir. Düşük viskozitesi önemli bir avantajıdır. Bununla birlikte, konsantre NaOH veya diğer herhangi bir alkali hidroksitin oldukça aşındırıcı doğası, büyük miktarlarda hidroksitle aktive edilen geopolimerlerin üretilmesi için çok özel bir üretim ekipmanının olmasını gerektirmektedir. Çalışmada kullanılan Sodyum hidroksitin kimyasal birleşimi ve ilgili resmi Çizelge 3.5 ve Şekil Şekil 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri

Kimyasal Adı	**Sodyum Hidroksit**
Formülü	NaOH
Ağırlığı	39.9971 g/mol
Renk / Form	Beyaz, Sıvı
Yoğunluk	2.1 g/cm³
Erime derecesi	318 ° C
Kaynama derecesi	1.390 °C
NaOH(%)	%98



Şekil 3.5. Tez çalışmasında kullanılan Sodyum Hidroksit.

3.1.4.2. Sodyum silikat (Na_2SiO_3)

Geopolimerlerin oluşturulmasında kullanılan alkalilerden Na_2SiO_3'ın yoğunluğu 1410-1435 g/cm^3 'tür. Tez çalışmasında kullanılan alkali aktivatörlerden olan Na_2SiO_3 çözeltisi; Na_2O ve SiO_2 içeren, katı içeriği %40 olan bir alkalidir. Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltilerinin karıştırılmasıyla oluşan alkali solüsyonlar kullanılmadan önce birkaç saat bekletilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan Na_2SiO_3 alkalisinin görseli Şekil 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.6. Tez çalışmasında kullanılan sodyum silikat

3.1.5. Agrega

Bu çalışmada kullanılan agregalar (TS 706 EN 12620, 2009) standardına uygundur. İnce agrega yıkanmış kum ve iri agrega kırmataş olarak temin edilmiştir. Agreganın en büyük tane büyüklüğü 15 mm olarak seçilmiştir. Agregaların boyutları ise ince agrega 0 ile 5 mm, iri agrega ise 7 ile 15 mm arasındadır. Çalışmada kullanılan ince ve iri agregaların görünümü Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



a. İnce agrega b. İri agrega c. Kullanılan agrega

Şekil 3.7. Tez çalışmada kullanılan ince ve iri agregaların görünümü.

3.2. Geopolimer Harç Üretimi

Hazırlanan tüm karışımlar için üretim parametreleri literatüre uygun olarak ana faktörler sabit tutularak üretilmiştir. Bu sabit parametreler; kum/bağlayıcı oranı 2.5, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1.5, Molarite 10 M, Likit/Bağlayıcı (L/B) oranı 0.5, toplam bağlayıcının ağırlıkça %2'si süper akışkanlaştırıcı ve ilave su miktarı ise toplam bağlayıcının %14.5'i olarak belirlenmiştir. Geopolimer harç numunelerinin karışım oranları ise, Çizelge 3.6'da verilmiştir. Çalışmadan elde edilen geopolimer harç numunelerinin kür süresi boyunca normal hava şartları yani oda sıcaklığında ($23^0C \pm 2^0C$) bekletilmiştir.

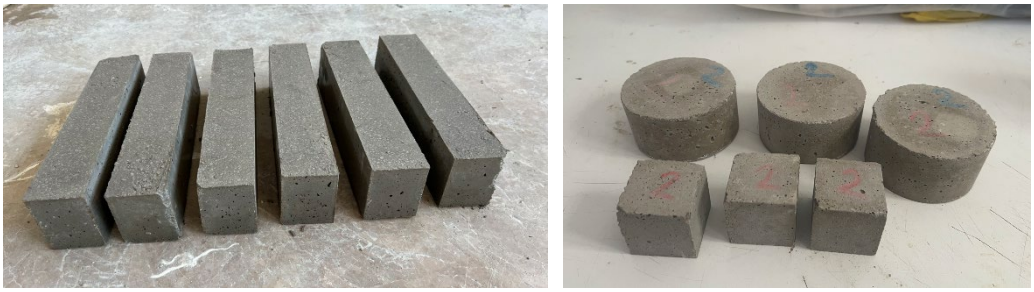
Çizelge 3.6. Geopolimer harç numunelerinin bileşen miktarları (1 dm^3 için)

Karışım Kodu	Kum (gr)	Bağlayıcı (gr)	UK (gr)	YFC (gr)	PTT (gr)	SH (gr)	SS (gr)	İlave Su (gr)	Süperakışkanlaştırıcı (gr)
L1	1350	540	297	135	108	108	162	100	10.8
L2	1350	540	243	189	108	108	162	100	10.8
L3	1350	540	243	135	162	108	162	100	10.8
L4	1350	540	270	162	108	108	162	100	10.8
L5	1350	540	270	135	135	108	162	100	10.8
L6	1350	540	243	162	135	108	162	100	10.8
L7	1350	540	261	153	126	108	162	100	10.8
L8	1350	540	279	144	117	108	162	100	10.8
L9	1350	540	252	171	117	108	162	100	10.8
L10	1350	540	252	144	144	108	162	100	10.8

3.2.1. Numune hazırlama ve kuru işlemleri

Hazırlanan her bir geopolimer karışımından 3 adet 50x50x50 mm boyutlarında küp, 6 adet 80x100x400 mm boyutlarında kiriş, 3 adet Ø100/50 mm boyutlarında silindir numune hazırlanmıştır (Şekil 3.8).

Hazırlanan karışımlar önceden yağlanmış olan kalıplara yerleştirilmiş, sıkıştırma işlemi iyi yapılmıştır. 24 saat sonra numuneler kalıplarından çıkartılarak, açık havada koyulmuştur. 28. gün sonunda numuneler üzerlerinde mekanik, dayanıklılık ve geçirimlilik deneyleri yapılmıştır (Alshlash, 2019).



a) Geopolimer kiriş numuneleri b). Geopolimer küp ve silindir numuneleri

Şekil 3.8. Geopolimer harcından üretilen numuneler

3.2.2. Deney tasarım yöntemi

Çalışma kapsamında (C sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve pişirilmiş taş tozu) atık malzeme olarak ve kimyasal aktivatör (sodyum silikat ve sodyum hidroksit) kullanarak GPC üretilmiştir. Ön deney yapılmak üzere ve ideal karışım oranı elde etmek için Mixture Design (Rosales-Herrera and Prozzi., 2008) yöntemi kullanarak bağlayıcı oranları tespit edilmiştir (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7. Mixture design yönteminden bağlayıcı oranları

Karışım No	Bağlayıcı (%)		
	UK	YFC	PTT
L1	55.00	25.00	20.00
L2	45.00	35.00	20.00
L3	45.00	25.00	30.00
L4	50.00	30.00	20.00
L5	50.00	25.00	25.00
L6	45.00	30.00	25.00
L7	48.33	28.33	23.33
L8	51.66	26.66	21.66
L9	46.66	31.66	21.66
L10	46.66	26.66	26.66

3.3. Geopolimer Harç Numuneler Üzerine Yapılan Deneyler

3.3.1. Priz alma süresinin tayini deneyi (vicat aleti)

Harçların önemli parametrelerden biri ise priz başlama ve bitiş süresidir. Bu çalışmada TS EN 196-3 (2017) Standard'a göre geopolimer harcın priz başlangıç ve bitiş süresinin tayini deneyi yapılmıştır. Şekil 3.9'da gösteren vikat aleti kullanılarak üretilen geopolimer harcın priz süreleri tayin edilmiştir. %50 ile %60 arasında nisbi nem ve 23 ± 2°C sıcaklıkta laboratuvar ortamda priz süreleri tayini deneyi yapılmıştır. Vikat aletine iğneyi taktıktan sonra, iğne cam levha ile temas ettiği anda sıfır olduğu ayarlanmıştır. Vikat halaka ve cam levhası yağ ile yağlanmıştır. Üretilen geopolimer harçları vikat halkasın içine doldurulmuş ve yüzünde fazlalığı kaldırılmıştır. Daha sonra iğnenin belirli süre aralıklarla (örneğin iki dakika) harcın içine girilmesi için yan videyi açılır ve iğnenin harcın içine batması tamamlandıktan sonra okuma alınmıştır. Bu değer, sıfır anından itibaren geçen süre ile birlikte kaydedilmiştir ve iğnenin ucu ile taban plakası arasındaki mesafeyi gösterir. İğne her batırıldıktan sonra bir bez veya süzgeç kâğıdı ile temizlenmeli. İğnenin harca ve alt levhaya en fazla 3 ile 5 mm yükseklik batırıldığında deney sonlandırılmış olup geopolimer harç priz başlangıç süresini kaydedilmiştir. Alt levhanın üzerinde bulunan kullanılmış harçla dolu kalıp, priz bitiş süresi tayini için ters çevrilmiştir. Priz başlangıç süresi tayininde kullanılan iğneyi değiştirip, priz bitiş süresi tayini için kullanılan iğneyi takılmıştır ve deneye başlamıştır.

Priz başlangıç süresinin tayini deneyindeki gibi okumalar alınmış ve iğne en fazla 1 mm girinceye kadar devam edilmiş ve en çok 1 mm girince priz bitiş süresi olarak tespit edilip kaydedilmiştir (TS EN 196–3., 2017). Deneyin yapılışı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Priz başlangıç ve bitiş sürelerinin tayini, Kullanılan vikat aleti

3.3.2. Yayılma tablası

Tez çalışmasında üretilen geopolimer harçlara ASTM C230 (2014) standardına göre yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Hazırlanan geopolimer harçların kıvamları hakkında bilgi vermesi açısından bu deneyi uygulanmıştır. Hazırlanan karışımlardan yayılma tablasının kalıba harç 2 tabaka şeklinde ve her tabakaya tokmak ile 25 kez vurularak doldurulmuş ve yüzeyini düzeltmiştir. Yayılma aletin kalıbı çıkartılmış ve aletin kolu 15 sn'de 5 kez çevrilmiştir. Yayılan harcın 2 farklı eksende çapı ölçülmüş ve ortalama değeri yayılma değeri olarak kaydedilmiştir. Şekil 3.10'da yayılma deneyinin uygulanışı gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Yayılma tablası

3.3.3. Basınç dayanımı

Çalışmada hazırlanan karışımlar 50x50x50 mm boyutlarında küp kalıplara yerleştirildikten 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak deney gününe kadar oda sıcaklıkta açık havada kür edilmiştir. 28. günlerde kürden çıkarılan küp numuneler basınç deneyine tabi tutularak dayanımları belirlenmiştir. Basınç dayanımı deneyi ASTM C39-05 (2005) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11 basınç deneyinde kullanılan pres aleti. Şekil 3.12,a ve 3. 12.b' de basınç dayanımı ölçmek için üretilen küp numuneleri örneği gösterilmiştir).



Şekil 3.11. basınç deneyinde kullanılan pres aleti.



a) Kalıp'a yerleşen geopolimer b) kalıptan çıkartılan küp nümüneler

Şekil 3.12. geopolimer harcından üretilen küp nümüne örneği

Basınç dayanım değeri Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanır. Her harç karışımda 3 adet 50 x 50 x 50 mm'lik boyutlarında küp numune test edilip ortalama değeri basınç dayanımını olarak belirlenmiştir.

$$f_c = P/A_c \quad (3.1)$$

f_c: Basınç dayanımı (MPa)

P: numunenin dayanabildiği en büyük yük (N)

A_c: Küp numunenin, yüzeyinin en kesit alanı (mm^2)

3.3.4. Eğilme dayanımı

Eğilme deneyi mukavemetini ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini belirlemek etmek için yapılan bir deneydir. Eksene dik doğrultuda gelen yükün taşımasına kiriş gibi elemanlar eğilmeye maruz kalmaktadır. Bu deneyin temel prensibi, beton üretimindeki kullanılan malzemeyi basit kiriş modeli olarak kabul etmeye dayanmaktadır. Kiriş numuneleri 28. günlük kür süreleri sonrasında sudan çıkarılmış, yüzeyi temiz bir bez yardımıyla kurulanmış ve daha sonra kiriş kırma deney aletine yerleştirilerek 4 noktalı eğilme yüklemesine maruz bırakılmıştır. Eğilme deneyi aleti Şekil 3.13'te gösterildiği gibi 80x100x400 mm boyutundaki kiriş numunelerde ASTM C293 (1979)'a uygun olarak yapılmış ve eğilmede çekme dayanımı (σ_e) denklem 3.2 ile hesaplanmıştır. Şekil 3.13.a'da laboratuvarda kiriş numunelere uygulanan eğilme deneyi, Şekil 3.13.b'de ise eğilme deneyi sonrası kırılmış kiriş numuneleri gösterilmiştir.

Betonun eğilme dayanımı ile ilgili Türk ve ASTM standartları şunlardır; TS EN 12390-3 (2019), TS EN 12390-5 (2002), ASTM C 293 (1979) ve ASTM C 78 (1994). Bu standartlara göre numuneler hazırlanmakta ve Şekil 3.13'deki düzenleme ile numuneler eğilme yükü altında kırılmaya tabi tutulmaktadır.

4 noktadan yükleme için;

$$\sigma_e = PL / bd^2 \qquad (3.2)$$

σ_e: Eğilme dayanımı (MPa)

P: Kırılma yükü (N)

b: Numunenin genişliği (mm)

d: Numunenin kalınlığı (mm)

L: Numunenin boyu (mm)

Eğilme deneyinde seçilen yükleme hızı ise, 0,04 MPa/s sabit gerilme artış hızı ayarlanmalıdır. Yük, çarpma etkisi oluşturulmadan, seçilen hız ± %1 sapma sınırları içerisinde sağlanarak, numune göçene kadar, sabit hızda arttırılarak uygulanmalıdır.

Deney makinası tarafından uygulanması gerekli yükleme hızı, aşağıda verilen eşitlikle bulunur:

$R = s.\ d_1\ d_2^2 / L_1$ (3.3)

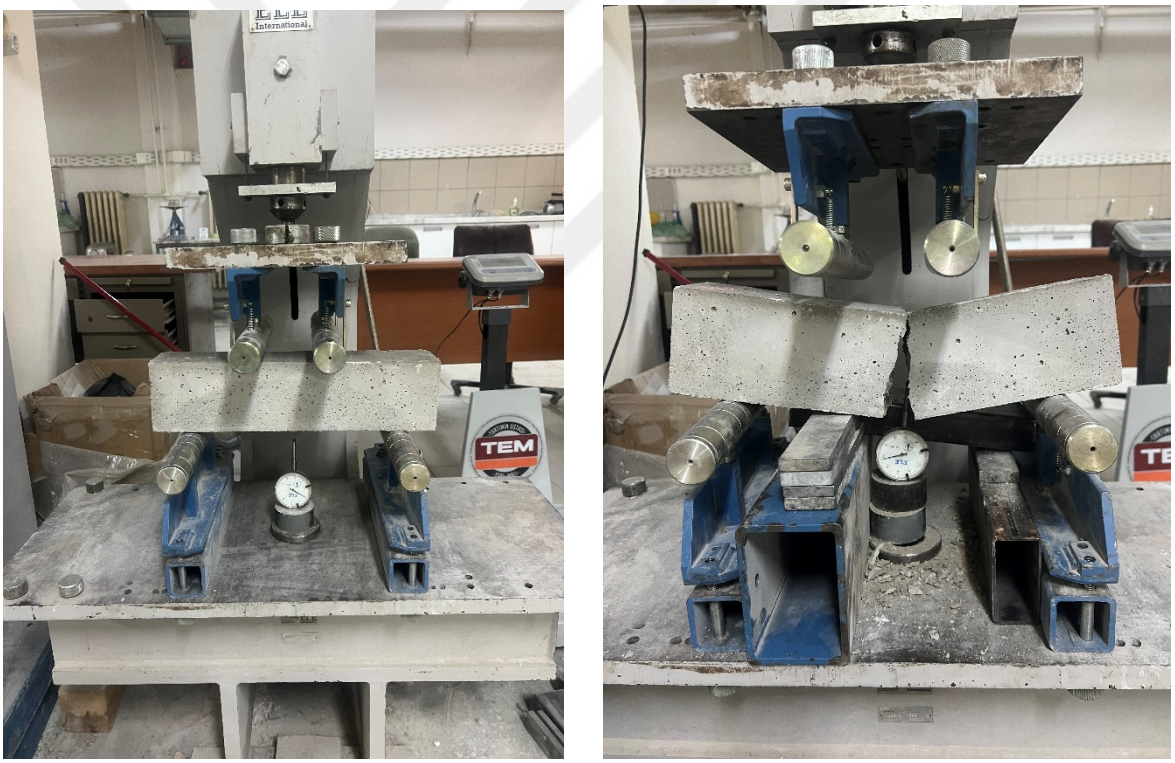
R: Yükleme hızı (N/s,

s: Gerilme artış hızı (MPa/s) (N/mm^2 /s)

d_1 ve d_2: Numunenin enkesit boyutları (mm)

L_1: Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm)

Bu çalışmada yükleme hızı R= 0.04 x 80 x 100^2 / 300 = 106 N/s = 0.1 kN/s olarak bütün deneyler için sabit tutulmuştur.



(a) (b)

Şekil 3.13. a) Eğilme deney düzeneği, b) Eğilme deneyi sonrasında kırılmış kirişler

3.3.5. Birim hacim ağırlığı

Çalışma kapsamında üretilen 50x50x50 mm boyutlarındaki geopolimer harç küpleri 28.günde her karışım için üçer küpün kuru halde (hava kurusu) (D) uygun terazide tartmış ağırlığı kaydedilmiştir. Birim hacim ağırlık sonuçları aşağıda verilen denklem ile hesaplanmıştır. İlgili bağıntılar Denklem 3.4'te verilmiştir. Deneyler için kullanılan terazi Şekil 3.14'te verilmiştir.

Birim Hacim Ağırlık (g/cm^3) = W_k / V (3.4)

W_k; numunenin Kuru halde ağırlığı (gr)

V; numunenin hacmi (cm^3)



Şekil 3.14. Deneylerdeki kullanılan terazi

3.3.6. Su emme deneyi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen su emme deneyleri ASTM C642-13 (2013) standardına uygun şekilde yapılmıştır. Su emme deneyinde Ø100×50 mm boyutlarındaki silindir numuneler kullanılmıştır. Numuneler deney gününe kadar oda sıcaklığında açık havada küre bırakılmıştır. Deney günü silindir numunelerin kuru hale gelmesi için 50 ^{0}C'de etüvde 3 gün süre boyunca bekletilmiştir (Şekil 3.16.a). Bu süreden sonra etüvden çıkarılıp terazide tartılarak kuru ağırlıkları (W_k) Şekil 3.15, daha sonra doygun halde ağırlığı belirmek için numuneler su içerisine koyulmuş (Şekil 3.16.b) ve burada su içine 3 gün bırakılmıştır. Sonra numuneler sudan çıkarılmış ve yüzeylerindeki kaba su alındıktan sonra hassas terazide tartılmıştır (W_s). Kuru ağırlık ile doymuş ağırlık arasındaki fark, doyma noktasındaki emilen su olarak tanımlanmaktadır. Su emme oranı (S_a) denklem 3.5'ten hesaplanmıştır.

$$S_a = \frac{Ws - Wk}{Wk} x\ 100 \qquad (3.5)$$

S_a; Su emme oranı (%)

W_s; Numunenin doymuş ağırlığı (gr)

W_k; Numunenin kuru ağırlığı (gr)



Şekil 3.15. su emme deneyinde numune tartılması



(a) (b)

Şekil 3.16. Su Emme Deneyi a) Etüv içerisinde kurutulan numuneler b) suyu içindeki bırakılan numuneler

3.3.7. Çarpma deneyi

Çarpma deneyi yapmak için her bir karışımdan 80x100x400 mm'lik 3 adet kiriş numune hazırlanmıştır (Şekil 3.17). Bu deneyde kullanılan çarpma cihazı ise Şekil 3.18' de görüldüğü gibi numune kiriş iki taraftan iki mesnete yaslanmış, daha önce ayarlanmış bir yükseklikten ve sadece zati ağırlığın etkisiyle düşürülen 5.68 kg'lık bir ağırlık vasıtasıyla uygulanmaktadır. Deney aletinin yanında bulunan sensör ise zamanı kaydederek çarpma anındaki enerjiyi ölçmektedir.

Amerikan Beton Enstitüsü Yapısal Beton İşleri Yapım Şartnamesi ACI 544 (2009) standardında, ağırlık düşürme deneyi yönteminin temellerini açıklamaktadır.



Şekil 3.17. Çarpma deneyleri için hazırlanan numuneler



Şekil 3.18. Çarpma deneyindeki kullanılan cihazı

3.4. İlave Denenmiş Karışımlar

Çalışmanın birinci bölümünde yapılan ön tasarım (Mixture Design) deney sonuçları incelendiğinde gerek dayanım gerek de işlenebilirlik bakımından yapısal elemanlarda kullanılabilecek yeterli bir geopolimer betonun tam anlamıyla üretilemediği görülmüştür. Dolayısıyla Mixture Design yönteminde sabit alınan bazı parametreler (molarite, likit/bağlayıcı oranı) ve karışım oranları değiştirilerek ilave atık malzemeler de kullanılarak yeniden tasarımlar yapılmıştır. Bu ilave karışımların amacı yeterli dayanım ve işlenebilirliğe sahip ve yapısal elemanlarda da kullanılabilecek bir geopolimer harç üretmektir. Yapılan ekstra karışımların ilk önce uygulama açısından büyük öneme sahip olan priz başlangıç sürelerine bakılmıştır. Daha sonra uygun priz başlangıç süresine sahip

karışımların basınç dayanımlarına bakılmıştır. Değişkenleri en aza indirmek ve karışımların sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için tüm numuneler aynı üretim ve karışım yöntemi ile hazırlanmış ve daha sonra ilk karışımlardaki kürleme ve test koşulları aynen uygulanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde ilave kullanılan atık malzemeler, SD, Metakaolin (MK), F Sınıfı Uçucu Kül (UKF) ve Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.'den temin edilen Uçucu Kül (UKS) olarak belirlenmiştir.

3.4.1. Silis dumanı

Silis dumanı, Silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde kullanılan elektrik ark ocaklarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucunda elde edilen çok ince taneli bir baca tozudur. Üretim sırasında çok miktarda SiO gazı açığa çıkmakta ve hava ile etkileşime girerek SiO_2 ye dönüşmektedir. Bu arada hızlı soğuma ve yoğunlaşmadan dolayı içerisinde %85-98 arasında amorf yapıda silis içeren, ince taneli malzeme silis dumanı oluşmaktadır. Yüksek oranda ve yüksek incelikte bulunan silis dumanı çok iyi puzolanik bir malzeme özelliği göstermektedir (Yeginobalı, 2007).

Son yıllarda, 60 MPa'dan 170 MPa'a kadar çıkan basınç dayanımına sahip yüksek mukavemetli betonların kullanımı yaygınlaşmıştır. Yüksek bina imalatlarında ve nükleer reaktör kabukları gibi beton yapılarında yüksek mukavemetli betonlar kullanılmaktadır ki bu tür betonları üretmek için kullanılan temel malzemelerden biri de silis dumanıdır.

SD'nin betonun mikroyapısı üzerinde olumlu etkileri vardır. SD, beton ömrünün erken dönemlerinde geçiş bölgesini güçlendirerek ve hidratasyon oranını artırarak betonun basınç dayanımını artıran yapay bir puzolandır (Wang ve diğ., 2012). Silis dumanı, mikro dolgu görevi görerek ve daha iri çimento parçacıkları arasındaki küçük boşlukları doldurarak çimento hamurunun yoğunlaşmasına yol açmaktadır (Caldarone, 2008). Silika (Silis) dumanı, betondaki dayanım için ana sorumlu ürün olan daha fazla miktarda C-S-H jeli üretmek için portlandit ile reaksiyona girerek betonda kimyasal bir etkiye sahip olmaktadır (Khayat ve Aitcin, 1992). Alkali ile aktifleştirilen cüruf betona %15'e kadar silis dumanı katılması ile betonun mekanik mukavemeti iyileşmekte, geçirgenliği azalmakta ve klorür iyonu penetrasyonuna karşı direnç artmaktadır (Rostami ve Behfarnia, 2017).

Numunelerin ortam sıcaklığındaki performansını incelemek için yapılan bir çalışmada; silis dumanı içeren 7, 28 ve 90 günlük nemli kürlenmiş harç numunelerinin basınç dayanımı, silis dumanı içermeyen kontrol numunelerinin mukavemetine göre önemli oranda artmıştır. Ayrıca, silis dumanı içeriğinin çimento ağırlığının %5'inden %10'una çıkarılmasıyla basınç dayanımı artmaktadır (Ibrahim ve diğ., 2011).

Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkisi çimentonun hidrasyon derecesine, nem içeriğine, geçirgenliğine ve ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kalma hızına ve süresine bağlıdır. Sistemleri birleştiren silis dumanının yüksek sıcaklık etkisi altında nasıl davrandığı konusunda farklı görüşler vardır (Jahren, 1989). Yapılan bir çalışmada; 300 ° C'ye maruz kaldıktan sonra neredeyse tüm numunelerin basınç dayanımı artarken, bu artış silis dumanı içeren numuneler için daha fazla olmuştur (Ibrahim ve diğ. 2011).

Geopolimer harç karışımlarına ana bileşen olarak kullanılan silis dumanı Antalya Eti Elektrometalurji firmasından temin edilmiştir. Silis dumanının kimyasal özellikleri Çizelge 3.8'de verilmiştir (Şekil 3.19).

Çizelge 3.8. Silis dumanının kimyasal içeriği (Ergeshov, 2021)

Oksit	**(%)**
SiO_2	87.02
Al_2O_3	0.53
Fe_2O_3	0.74
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 >= 70%	88.29
Na_2O	1.01
CaO	0.64
MgO	3.38
Kızdırma kaybı	0.1



Şekil 3.19. Tez çalışmasında kullanılan silis dumanı

3.4.2. Metakaolin

Metakaolin, bir kil türü olan kaolinin yüksek sıcaklıklarda (600-800°C) arasında kalsine edilmesi sonucu elde edilen bir yan üründür. Bu işlem sırasında kaolinin yapısındaki organik maddeler ve kristal suyu dışarı çıkar. Bunun sonucu olarak da kaolin minerali amorf bir yapıya dönüşür.

Yüksek sıcaklık, mukavemet ve reaktiviteye sahip metakaolin aynı zamanda düşük poroziteye sahiptir. Bu özelliğinden dolayı da başta inşaat sektörü olmak üzere endüstride yoğun olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber metakaolin çevre dostu bir malzeme olarak literatürde geçmektedir.

Bu tez çalışmasında kullanılan metakaolin (Şekil 3.20)., Kaolin Endüstriyel Mineraller San. ve Tic. A. Ş. (İstanbul, Türkiye) şirketinde temin edilmiştir. Kullanılan metakaolinin özgül ağırlığı 2.52 g/cm^3. metakaolin kimyasal özellikleri Çizelge 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.20. Tez çalışmasında kullanılan metakaolin

Çizelge 3.9. Metakaolinin kimyasal içeriği

Oksit	**(%)**
SiO_2	55 ± 2.00
Al_2O_3	40 ± 2.00
Fe_2O_3	0.8 ± 0.10
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3	95.8 ± 4.10
Na_2O	0.20 ±0.05
CaO	0.30 ± 0.10
MgO	0.30 ± 0.10
TiO_2	0.60 ± 0.10
K_2O	0.60 ± 0.20
Kızdırma kaybı	0.70 ± 0.30

3.4.1. F Sınıfı uçucu kül

F sınıfı uçucu küller, elektrik üreten termik santrallerden, termal enerji üretimi sürecinde bitümlü kömür yakılması sonucunda üretilen atık bir malzemedir. Kömürün yanması sırasında ortaya çıkan gazlar, bir yakma fırını içinde yakılır ve bu süreçte uçucu kül olarak adlandırılan ince partiküller ortaya çıkar. Daha sonra, bu partiküller filtreler veya elektrostatik önleyiciler gibi sistemler aracılığıyla havadan ayrıştırılır ve toplanır.

F sınıfı uçucu küllerin toplam SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küllerdir. Düşük miktar CaO (yüzdesi %10'un altında) olduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak da adlandırılmaktadır. F sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılık özellikleri yoktur, puzolanik özelliğe sahiptirler. F sınıfı uçucu kül, geopolimerlerin üretiminde bir reaktif bileşen olarak kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan F sınıfı uçucu kül (Şekil 3.21), Kaolin Endüstriyel Mineraller San. ve Tic. A. Ş. (İstanbul, Türkiye) şirketinde temin edilmiştir. Kullanılan F sınıfı uçucu külün özgül ağırlığı 2.52 g/cm^3. F sınıfı uçucu kül kimyasal özellikleri Çizelge 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.21. Tez çalışmasında kullanılan F sınıfı uçucu kül

Çizelge 3.10. F sınıfı uçucu külün kimyasal içeriği

Oksit	(%)
SiO_2	48.30
Al_2O_3	16.44
Fe_2O_3	13.14
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3	77.84
Na_2O	0.90
CaO	5.58
MgO	6.72
K_2O	0.90
Diğer	≈ 6.20
Kızdırma kaybı	1.30

3.4.2. Seydişehir Eti Alüminyum tesislerden elde edilen uçucu kül

Çalışmada kullanılan bir diğer uçucu kül ise Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.den temin edilmiştir (Şekil 3.22). Bu külün tane çapı dağılımına bakıldığında %14 kum %86 silt boyutunda olduğu görülmüştür. Bu uçucu külün sınıfı tam olarak belirlenememiştir. Uçucu külün kimyasal içeriği tam olarak ne C sınıfına ne de F sınıfına girmemektedir. Bununla beraber içeriğindeki CaO miktarı ile SO_3 miktarı oldukça fazladır. Bu uçucu küle ait kimyasal içerik analizi Çizelge 3.11 de verilmiştir.



Şekil 3.22. Tez çalışmasında kullanılan Seydişehir uçucu külü

Çizelge 3.11. Seydişehir uçucu külünün kimyasal içeriği

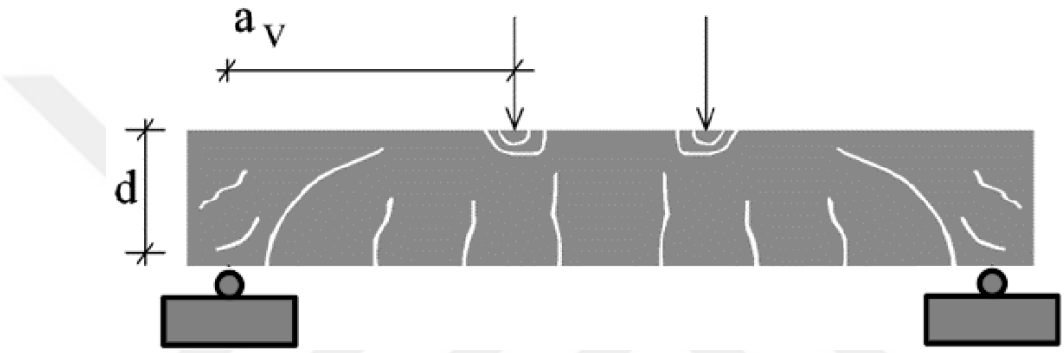
Oksit	(%)
SiO_2	19.80
Al_2O_3	8.10
Fe_2O_3	6.00
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3	33.90
Na_2O	0.40
CaO	28.30
MgO	1.00
K_2O	0.10
SO_3	18.20
Serbest CaO	16.30
Kızdırma kaybı	1.80

3.5. GB ve GPC kirişlerin Üretimi

3.5.1. Deney numunelerinin tasarımı

Kiriş numunelerinin geometrik boyutları ve özellikleri, deneysel çalışmada laboratuvar cihazlarının kapasitesi göz önüne alınarak ve literatüre uygun şekilde üretilmiştir. Deney numunesi olarak, ahşap kalıplar kullanılarak 32 adet dikdörtgen kesitli (150 x 200 x 1250mm) betonarme kirişler yapılmıştır. Konya Teknik Üniversitesi (KTÜN) Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarında statik yükleme deneyleri, etkisi Eskişehir Osmangazi Üniversitesi (ESOGÜ) Yapı Laboratuvarında ise ağırlık düşürme (çarpma, dinamik-impact) deneyleri yürütülmüştür. Şekil 3.23'te deney numunelerinin boyutları gösterilmektedir. Üretilen tüm kirişlerin boyutları sabit olarak seçilmiştir. Üretilen tüm kirişlerin kesme açıklığı (a_v) 500 mm, eğilme ve kesme hasarları elde etmek için faydalı yüksekliği (d) 175 mm (paspayı 25 mm) ve (a_v/d) oranı 2.85'olarak seçilmiştir (Aslan ve diğ., 2024). 1250 mm uzunluğunda, 200 mm yüksekliğinde ve 150 mm genişliğindeki deney elemanları statik ve dinamik deneylere tabi tutulmuştur.

Çalışmada kiriş numuneleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) (2018) ve Türk Standardı (TS 500) (2000)'e uygun olarak denge altı kirişler olarak tasarlanmıştır. Toplamda 32 adet GPC ve GB kiriş, farklı enine ve boyuna donatı oranları sahip olmak üzere 16 adedi eğilme davranışı, 16 adedi ise kesme davranışı gösterecek şekilde üretilmiştir. Bu 32 adet kiriş numunesinin 16 adedi GPC‘dan, 16 adedi ise GB‘dan üretilmiştir.

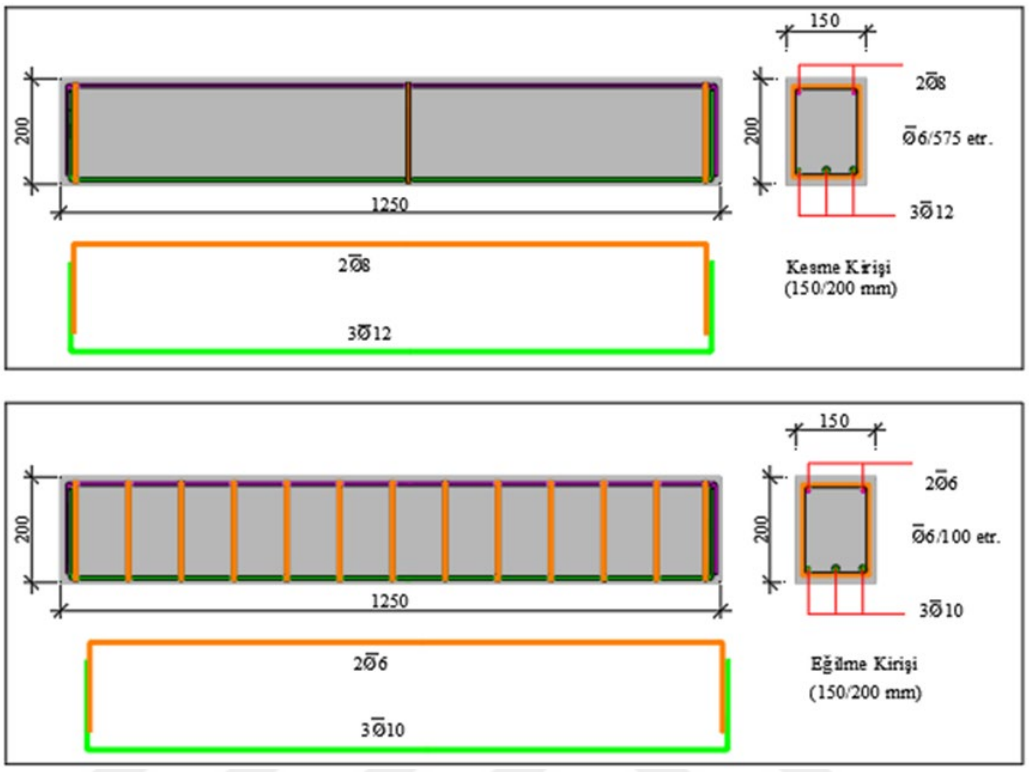


Şekil 3. 23. Üretilen GPC ve GB kiriş deney elemanlarının boyutları

3.5.2. Kirişlerinin üretimi

3.5.2.1.Donatıların hazırlanması

Deney elemanları TBDY 2018 ve TS 500'e göre denge altı kirişler olarak tasarlanmıştır. Numunelerde B420c tipi donatılar kullanılmıştır. Kesme kirişlerin çekme donatısı 3 Φ 12 nervürlü ve basınç donatısı 2 Φ 8'dir. Ancak, kirişlerin kesme davranışı gösterebilmesi için etriyesi B420c tipi 6 Φ /575 mm olarak yerleştirilmiştir. Eğilme kirişlerin çekme donatısı 3 Φ 10 nervürlü ve basınç donatısı 2 Φ 6'dır. Eğilme kirişlerinin kesme kırılmasına uğramaması için seçilen enine donatı B420c tipi ve 6 Φ /100 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Tipik kesme ve eğilme kiriş donatı detayları

Tasarıma uygun ölçülerde kesilen boyuna ve enine donatılar daha sonra hazırlanan kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.25).



a) Donatı bükülmesi



b) Boyuna donatı



c) Etriye



d) Donatı bağlama

Şekil 3.25. Donatıların kesilmesi, bükülmesi, hazırlanması ve kalıplara yerleştirilmesi

3.5.2.2. GPC dökümü

Ön tasarım ve ilave tasarım deneylerinden sonra karar kılınan geopolimer karışımının % 40 UK + %40 PTT + %20 SD olduğu daha önce belirlemiş idi. Bu bölümde belirlenen karışım miktarlarıyla hazır beton santrallerinden GPC elde edilemediği için laboratuvarda üretilmek durumunda kalınmıştır. Geopolimer betonların üretimi ve dökümü laboratuvardaki betonyer kapasitesi dikkate alınarak dört seri olarak yapılmıştır. Hazırlanan her seriden 4 adet 1250 x 200 x 150 mm GPC kirişi dökülmüş ilave olarak da 3 adet 300 x 150 mm silindir numunesi alınmıştır (Şekil 3.26).

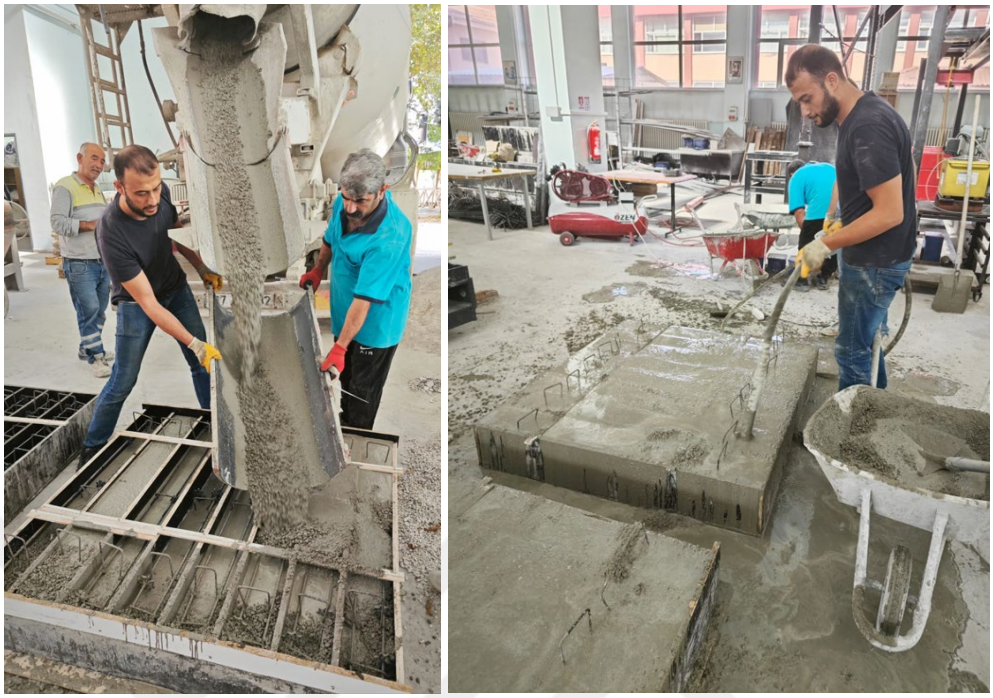


a) Mikser **b) Silindir kalıp** **c) Kiriş kalıp**

Şekil 3.26. Geopolimer beton dökümü ve kalıplara yerleştirilmesi

3.5.2.3.GB dökümü

Çalışmada GPC ile benzer mukavemet özelliklerine sahip C25 sınıfında geleneksel hazır beton kullanılmıştır. Hazır olarak laboratuvara gelen beton daha önceden hazırlanan kalıplara vibrasyon eşliğinde yerleştirilmiştir. Daha sonra tesviyeleri yapılan kiriş numuneleri priz almaya bırakıldı. GB 16 adet 1250 x 200 x 150 mm boyutlarında kesme ve eğilme kirişleri ile 3 adet 300 x 150 mm silindir numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 3.27).



a) Beton dökümü b) Vibretör kullanımı



c)Silindir numuneleri d) kiriş numuneleri

Şekil 3.27. GB döküm işlemi

3.5.3. Kirişlere boşlukların açılması

Dört noktalı yüklemede tüm kiriş numuneleri aynı kesme açıklığı (500 mm), faydalı yükseklik 175 mm ve a_v/d oranı 2.85 olacak şekilde ayarlanmıştır. Kirişlerde açılması planlanan boşlukların çapları ülkemizde mekanik tesisatçılarının maalesef özellikle bodrum katlarda kirişlere açtığı kontrolsüz boşlukların çapları dikkate alınarak belirlenmiştir (Şekil

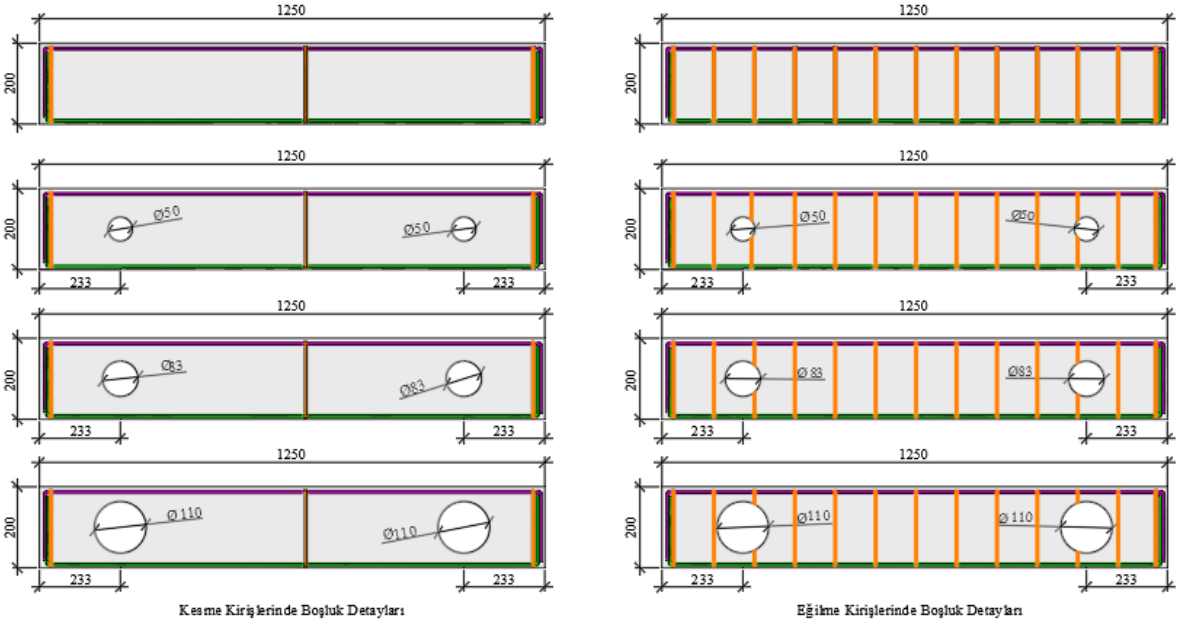
3.28-3.29). Bu duruma paralel ve literatüre göre de çalışmada 50 mm, 83 mm ve 110 mm çaplarında boşlukların açılması planlanmıştır. Boşluk çaplarının kiriş yüksekliğine oranı da sırasıyla %25.0, %41.5 ve %55.0 olarak hesap edilmiştir. Açılan boşluklar gerçek betonarme binalarda mekanik tesisatçıların genelde kolon kiriş birleşim bölgesinde açmış oldukları kontrolsüz boşlukları simüle edebilmesi amacıyla kiriş numunelerinin mesnet kısmına yakın bölgeye (kiriş kenarından 233mm) tüm kirişlerde aynı olmak kaydıyla oluşturulmuştur (Çizelge 3.12).

Çizelge 3.12. Kiriş numunelerin boşluk detayları

Beton Tipi	Kiriş Davranış Tipi	Yükleme Şekli	Boşluk Çapı (mm)	Boşluk çapı/Kiriş yüksekliği (D/H), %
GPC	Kesme	Statik	Boşluksuz	-
			50	25.0
			83	41.5
			110	55.0
	Eğilme	Statik	Boşluksuz	-
			50	25.0
			83	41.5
			110	55.0
	Kesme	Çarpma	Boşluksuz	-
			50	25.0
			83	41.5
			110	55.0
	Eğilme	Çarpma	Boşluksuz	-
			50	25.0
			83	41.5
			110	55.0
GB	Kesme	Statik	Boşluksuz	-
			50	25.0
			83	41.5
			110	55.0
	Eğilme	Statik	Boşluksuz	-
			50	25.0
			83	41.5
			110	55.0
	Kesme	Çarpma	Boşluksuz	-
			50	25.0
			83	41.5
			110	55.0
	Eğilme	Çarpma	Boşluksuz	-
			50	25.0
			83	41.5
			110	55.0



Şekil 3.28. Kiriş numunelerine karot makinası ile boşluk açılması



Şekil 3.29. Kiriş numuneleri üzerindeki boşluk çap ve yerleri

3.6.Ana Deneylerde Kullanılan GPC ve GB Basınç Deneyleri

Deneysel çalışmada GPC ve GB'un basınç dayanımını belirlemek amacıyla 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindeki silindir beton numuneleri hazırlanmıştır. 28 gün sonra hazırlanan silindir numunelere eksenel basınç testi yapılmıştır. Malzeme deneyleri için

standart silindir numunelerin basınç dayanımları, beton pres yardımı ile TS EN 12390-3 (2019)'e uygun olarak yapılmıştır. Bu, betonun gerilme şekil değiştirme davranışını belirlemek için kullanılmıştır. Basınç deneyinde 0.3 MPa/s yükleme hızı ASTM C39 (2012)'ye uygun olarak seçilmiştir. KTÜN 'nin Geoteknik laboratuvarında kullanılan cihazlar ve ekipmanlar yardımı ile testi yapılmıştır (Şekil 3.30).



Şekil 3.30. Beton basınç deneyi düzeneği

GPC sınıfı olarak TBDY 2018 ‘de betonarme yapılar için minimum basınç dayanımı olan C25 hedeflenmiştir. Buna göre geopolimer harçlar üzerine yapılan detaylı araştırma ve deneyler sonucundan elde edilen karışım sonuçlarına göre seçilen parametreler dikkate alınarak ve kırmataş agrega kullanılan GPC numunelerinin sonuçları çizelge 3.13’te verilmiştir. Buna göre kiriş numunelerinde kullanılan ortalama GPC basınç dayanımı 25.37 MPa olarak belirlenmiştir.

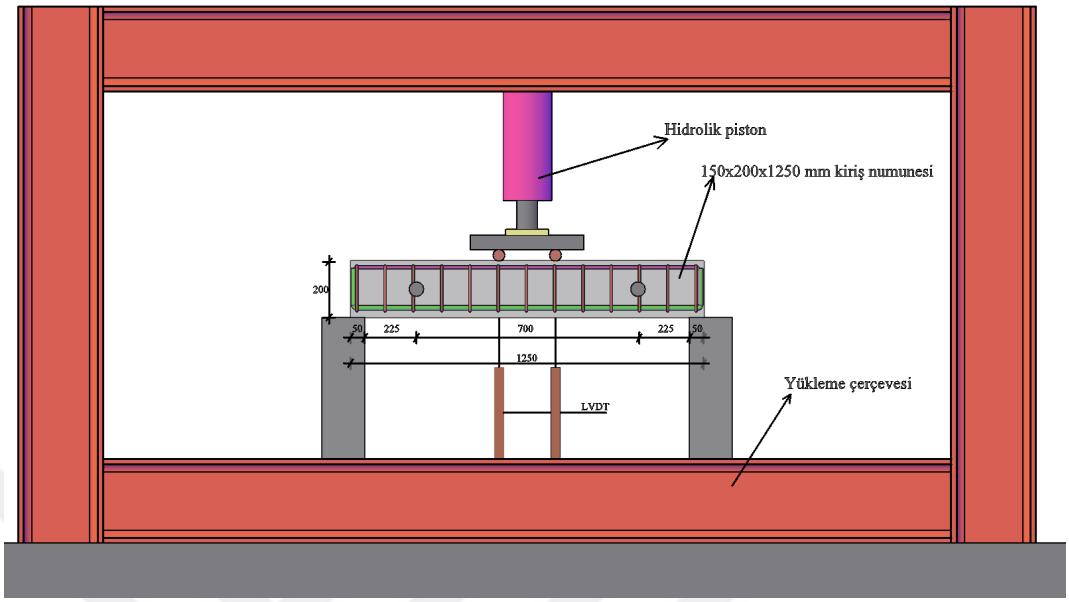
Çizelge 3.13. GPC basınç dayanımları

Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)
Seri 1	24.29
Seri 2	23.70
Seri 3	22.13
Seri 4	31.37
Ortalama	25.37

Kiriş numunelerinde kullanılan GB‘un ortalama silindir basınç dayanımı ise 28.09 MPa olarak belirlenmiştir.

3.7.Kiriş Numunelerine (Boşluklu-Boşluksuz) Statik Deneylerin Yapılması

Geopolimer kirişlerin (boşluklu ve boşluksuz) statik yükleme deneyleri, dört noktalı eğilme testi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 2 kN/s olarak tek yönlü artan yük etkisinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Kirişlerde meydana gelen düşey yer değiştirmeler, kiriş merkezinin 100 mm sağ ve sol tarafına takılan iki adet LVDT tarafından kaydedilmiştir. Kirişler donatı düzenine göre (kesme ve eğilme) göçmeye ulaşana kadar sabit hızda yüklenmeye devam edilmiştir. Test mekanizmasında mesnet koşulları bir taraf sabit diğer taraf kayıcı mesnet olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.31. Statik yükleme deney düzeneği

Deneylerde yük ve yer değiştirmelerin ölçülmesi ve kaydedilmesi için bilgisayar destekli 8 kanallı veri toplama sistemi kullanılmıştır. Dört noktalı eğilme testini tamamlamak için 300 kN kapasiteli bir yük hücresi kullanılmıştır. Tüm deneylerde kirişlerin çatlak oluşumunun izlenmesi için 10 kN yüklerde deneye ara verilerek çatlaklar belirlenmiştir. Kirişlerin statik yükleme deneylerinde deney koşulları tüm numuneler için sabit seçilmiştir. Statik yükleme düzeneği Şekil 3.31'de verilmiştir.

3.8. Kiriş Numunelerine (Boşluklu-Boşluksuz) Dinamik (Çarpma) Deneylerin Yapılması

Ağırlık düşürme testi olarak geçen çarpma deneyi, GPC ve GB kirişlerin çarpma davranışını incelemek için kullanılmıştır. Ağırlığı belli bir çekiç, ağırlık düşürme deneyinde belirli bir yükseklikten serbestçe düşürülür. Çekicin potansiyel enerjisi numuneye çok kısa bir sürede kinetik enerji olarak aktarılır. Bu nedenle, numune boyunca ani gerilme dalgaları oluşur. Numunelerin çarpma tepkileri, uygun ölçüm araçları kullanılarak ölçülür ve değerlendirilir.

ESOGÜ yapı laboratuvarında ağırlık düşürme deneyi yapılmıştır. Şekil 3.32'de ağırlık düşürme test cihazının detayları ve genel test düzeneği görülmektedir. Bu cihaz,

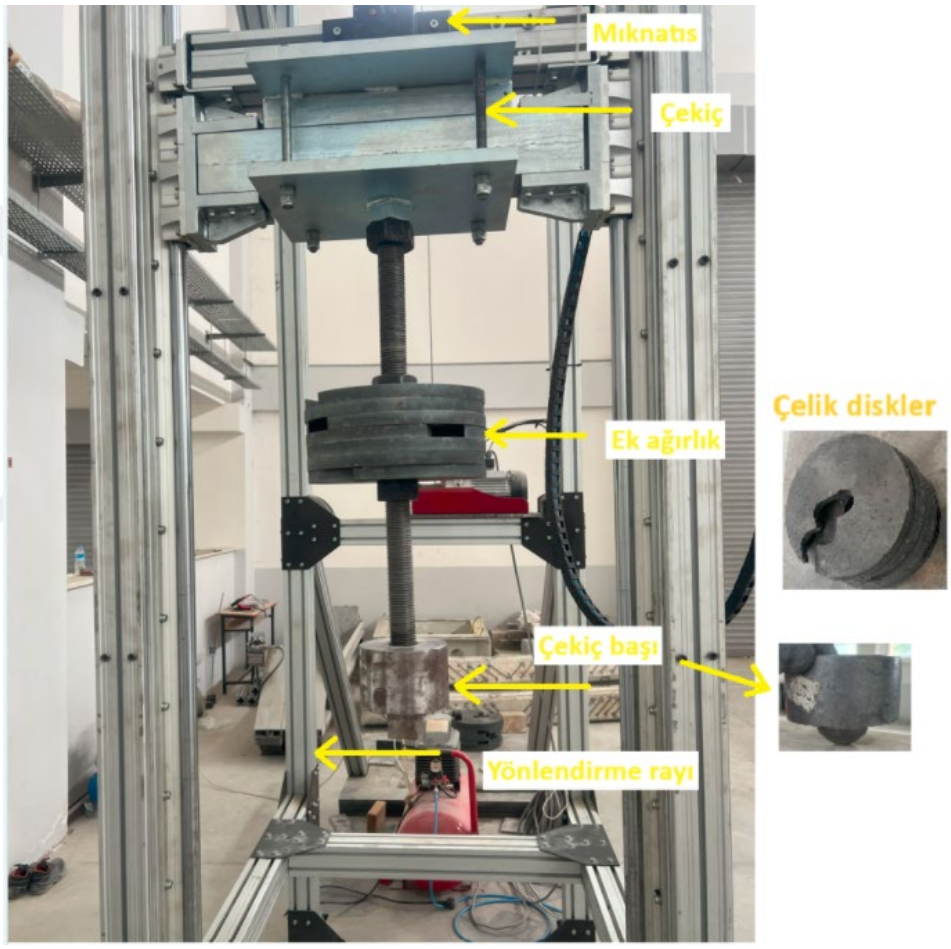
döşeme, kolon ve kiriş gibi çeşitli betonarme yapı elemanlarının çarpma dayanımlarını test etmek için kullanılmaktadır. Alüminyum gövdeli ağırlık düşürme test cihazı, farklı çarpma enerjilerine göre ayarlanabilmektedir. Çarpma yüksekliği ve çarpma ağırlığı, istenilen çarpma enerjisinin ayarlanmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.32. Çarpma deney düzeneği

Çarpma testinde kullanılan çekiç 87 kg ağırlığındadır. Bununla birlikte, 75 cm uzunluğunda ve 4.8 cm çapında bir profil ile çekicin çarpma anında hareketi engellenmiştir. Çarpma enerjisini artırmak için düzeneğe ilave ağırlıklar çelik diskler yardımıyla

eklenebilmektedir. Çarpma deneyinde kullanılan ek çelik disklerin adedinin ağırlığı 9.3 kg dır. Çelik disklerin çekice rijit bir şekilde bağlanmasını sağlamak için uygun bir kilitleme sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.33). Çarpma deney düzeneğinde sisteme en fazla on altı adet çelik disk ilave olarak takılabilmektedir. Çalışmada düşen ağırlık olarak çekiç ağırlığına ek 12 adet ilave çelik disk ile beraber toplam 198.6 kg'lık bir ağırlık uygulanmıştır.



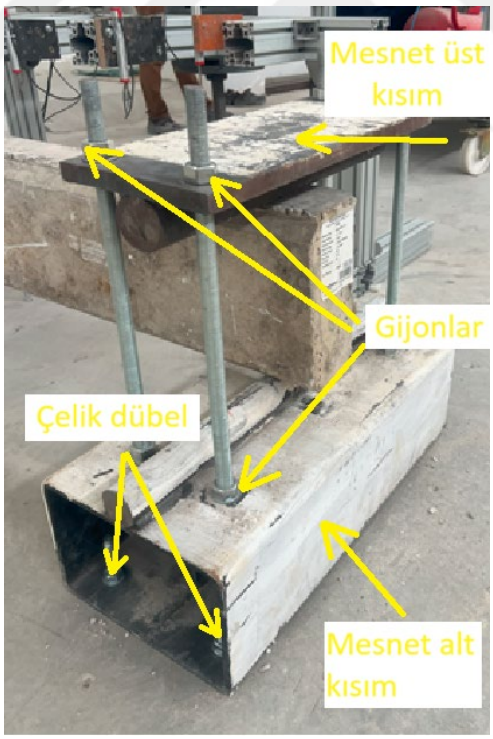
Şekil 3.33. Çarpma deney düzeneğinde kullanılan ek ağrılıklar ve kilit sistemi

Çarpma deney düzeneğinde ağırlık en fazla 2.5 m'ye kadar istenilen yüksekliklerden serbestçe düşürülebilmektedir. Motorlu kaldıraç sistemi, çekici istenilen yüksekliğe kaldırmaktadır. Kaldıraç sistemindeki statik mıknatıs, çekici kaldıraç sistemine bağlamakta kullanılmaktadır. Pnömotik valf ve kompresör tarafından sağlanan hava basıncıyla mıknatısın düşmesi ve kilitlenmesi durumları kontrol edilmektedir. Yönlendirme rayı, çekicin hareket yönünü kontrol etmektedir. Test düzeneğindeki sürtünmeyi en aza

indirmek için yönlendirme rayı pürüzsüz olarak tasarlanmıştır. Ayrıca her deney öncesi yönlendirme rayı yağlanmıştır.

3.8.1. Mesnet düzeneği

Bu çalışmada kullanılan mesnet sistemi, numuneyi pozisyonunda tutmak ve istenmeyen harekeleri önlemek için tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan mesnet düzeneği Şekil 3.34'te verilmiştir. Şekil 3.23'te görüldüğü gibi, mesnet ile deney numuneleri alt ve üst taraftan sabitlenmiştir. Mesnedin iki ana parçası vardır. Birinci parçanın dört tarafı çelik plakla desteklenmiştir. Numuneyi yukarıdan tutan dikey hareketini engelleyen çelik profil ikinci parçadır. Numune mesnete sıkıca bağlanması için dört adet gijon kullanılmıştır. Daha sonra çelik dübeller yardımıyla mesnedin zemine rijit bir şekilde bağlanması sağlanmıştır.



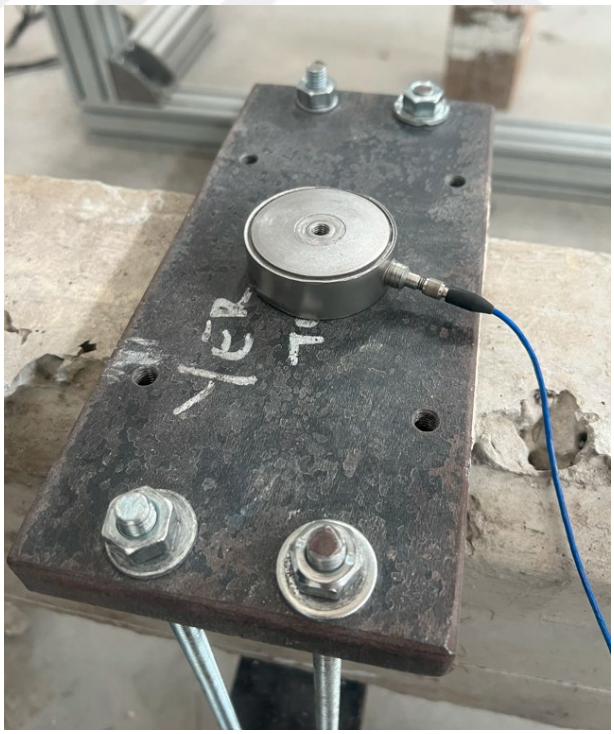
Şekil 3.34. Mesnet düzeneği

3.8.2. Ölçüm aygıtları

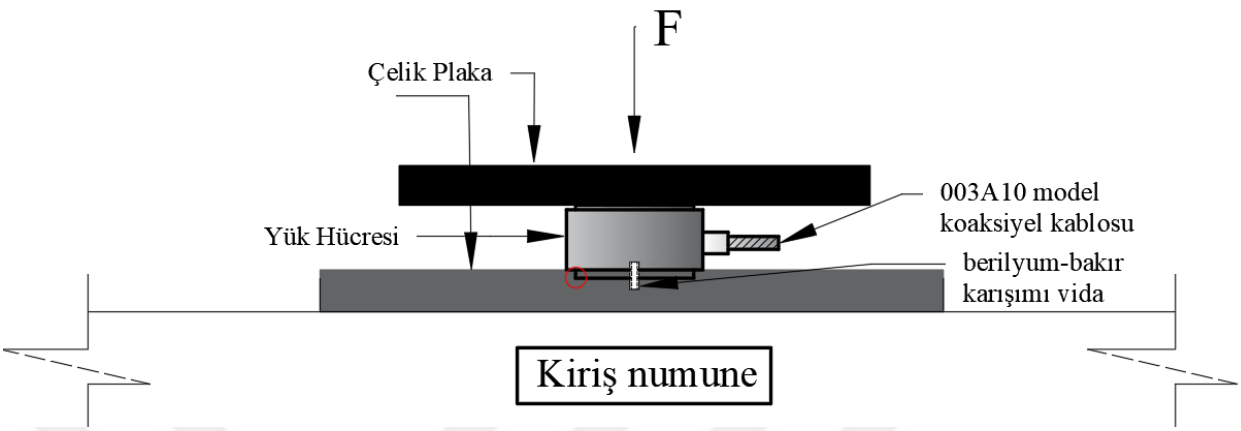
GPC ve GB kirişlerin çarpma davranışını incelemek için bir takım ölçüm araçlarının kullanılması gerekmektedir. Zamana bağlı çarpma yükünü belirlemek için kuvvet algılayıcısı (load cell), üç adet LVDT ve farklı yerlerde üç adet ivme ölçer kullanılmıştır.

3.8.3. Kuvvet algılayıcısı

Çalışmada kiriş numunelerine etki eden çarpma yükünü ölçmek için bir yük hücresi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yük hücresi, PCB Group tarafından üretilen 200C50 model bir ICP kuvars çarpma kuvveti algılayıcısıdır. 200C50 model kuvvet algılayıcısı, 222.4 kN (basınç kuvveti) maksimum ölçüm aralığı, 333.6 kN (statik basınç kuvveti), hassasiyeti (± %15) 22.48 mV/kN ve frekans aralığı 0,0003-30000 Hz'dir (PCB Piezotronics, 2022a; Yılmaz, 2018). Şekil 3.35 ve 3.36, kullanılan yük hücresidir.



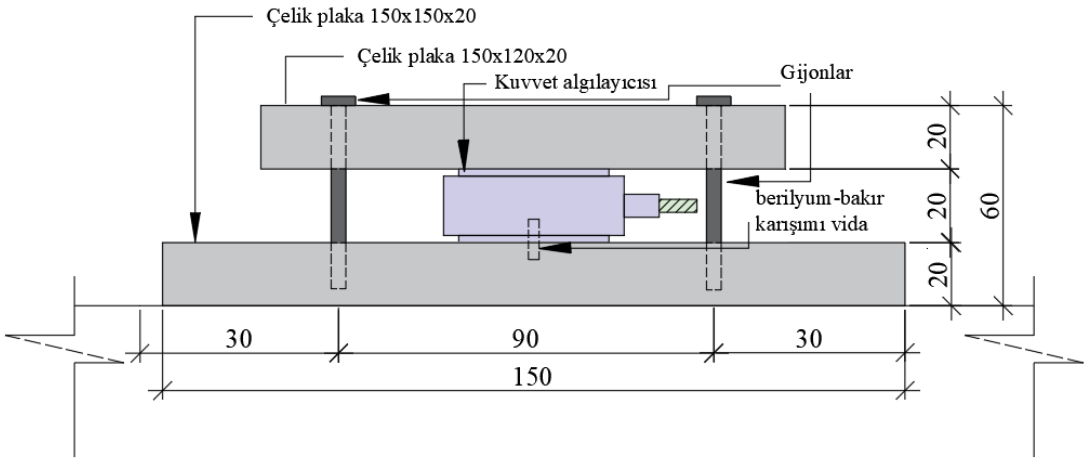
Şekil 3.35. Kuvvet algılayıcısı



Şekil 3.36. Kuvvet algıcısının serbest duruş montaj şekli

Bu çalışmada, 20 mm kalınlığındaki iki adet çelik plaka arasına kuvvet algılayıcısı yerleştirilmiştir. Çarpma durumunda, üst çelik plaka yükü kuvvet algılayıcısına aktarır. Uygulanan çarpma yükünü ölçen kuvvet algılayıcısı, yükü test numunesine bağlanan alt çelik plakaya aktarır. Kuvvet algılayıcısının altındaki 150 x 150 x 20 mm'lik çelik plaka çarpma yükününün numuneye yayılmasını sağlar. Bu plaka aynı zamanda numunede muhtemel zımbalama gibi yerel hasarı da önlemektedir.

Şekil 3.37'de kuvvet algılayıcısı montajının ayrıntıları görülmektedir. Kuvvet algılayıcısının yerleştirilmesi sırasında numunenin orta kısmı temizlenmiş ve düzeltilmiştir. Kuvvet algılayıcısı alt çelik plakaya çarpma esnasında deplase olmayacak şekilde bağlanmıştır. Kuvvet algılayıcısının alt ve üst çelik plakaları dört adet Ø10 mm vida ile birbirine bağlanmıştır. Bu nedenle kuvvet algılayıcısı iki çelik plaka arasında sabitlenmiştir. Kuvvet algılayıcısının ön yüklemesini önlemek ve üst çelik plakanın dikey hareketini sağlamak için vidalar biraz gevşek bağlanmıştır.



Şekil 3.37. Kuvvet algılayıcısının montaj şekli (Ölçüler mm)

Kuvvet algılayıcısı tarafından ölçülen verileri veri toplama aygıtına aktarmak için özel bir kablo kullanılmıştır. Çalışmada PCB Group tarafından üretilen 003A10 model veri aktarma kablosu kullanılmıştır.

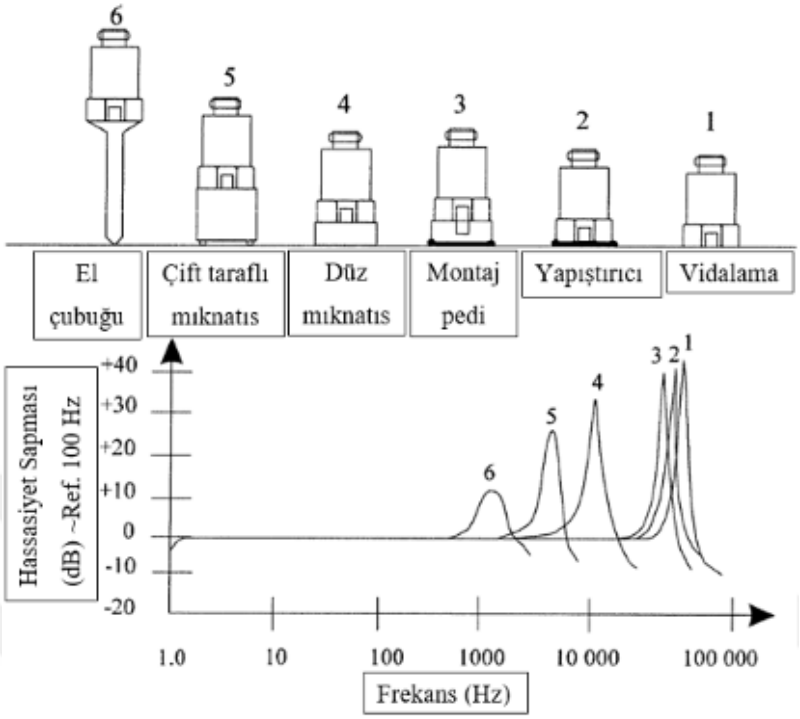
3.8.4. İvme ölçerler

Bu çalışmada, çarpma deneylerinde sıklıkla kullanılan piezoelektrik ivmeölçer, GPC ve GB kirişlerin ivme-zaman ölçümlerini elde etmek için kullanılmıştır. Çalışma da her deney elemanında üç ivmeölçer kullanılmıştır. Şekilde 3.38'de gösterilen ivme ölçerler ICP tipi 352B70 model piezoelektrik PCB Group tarafından üretilmiştir. İvme ölçerin hassasiyeti (± %25) 1 mV/g, frekans aralığı (± %5) 0,7-9000 Hz ve rezonans frekansı en az 55 kHz'dir. Şekil 3.27 de çalışmada kullanılan ivme ölçerler görülmektedir. İvme ölçerlerden gelen verileri veri toplama cihazına aktarım sırasında veri kaybını önlemek için yine 003A10 tipi koaksiyel kablolar kullanılmıştır.



Şekil 3.38. Çalışmada kullanılan ivme ölçerler

Çarpma deneylerinde ivme ölçerlerin kurulumu çok önemli bir adımdır. İvme ölçerlerin montaj şekli sonuçların hassasiyetini önemli ölçüde etkilemektedir. İvme ölçerler numuneye farklı şekilde montajlanabilir. Şekil 3.39'da montaj şekillerinin ölçüm hassasiyetine etkileri görülmektedir. Çalışmada çarpma etkisi esnasında ivme ölçerlerden hassas bir şekilde veri alabilmek için vidalama şeklinde montajın (çarpma esnasında yüksek frekanslar elde edilebilir) en iyi montaj yöntemi olacağı belirlenmiştir.



Şekil 3.39. İvmeölçerlerin montaj türleri ve yüksek frekansa etkileri (Yılmaz, 2018)

İvme ölçerin numunelere montajı Şekil 3.40'ta görülmektedir. İvmeölçerin monte edileceği yüzey, daha hassas bir ölçüm için temizlenerek rijit bir şekilde montaj tamamlanmıştır.



Şekil 3.40. İvme ölçerlerin kiriş numunelerine montajı

3.8.5. GPC ve GB kirişlerin çarpma testinde kullanılan yöntem

Çalışmanın bu aşamasında, GPC ve GB kirişlerin düşük hızlı çarpma yüküne maruz kaldıklarında nasıl davrandıkları incelenmiştir. Çalışmadaki değişkenler kirişlerin imalat malzemesi, donatı düzeni ve geometrisidir (boşluklu-boşluksuz). Deney esnasında numuneler aynı çarpma ve ölçüm düzeneğinde test edilmiştir (Şekil 3.41). Deneylerde çekicin sabit ağırlığına ilave olarak on iki çelik disk eklenerek toplamda 198.6 kg bir çarpma ağırlığı kullanılmıştır. Bu ağırlık numunelerin ortasına 1.5 m'lik bir çarpma yüksekliğinden serbestçe düşürülmüştür. Denklem (3.6)'ya göre her bir numuneye aktarılan kinetik enerji E_k = 2.922 kj ve çekicin çarpma hızı da denklem (3.7)'ye göre v = 5.4 m/s olarak hesaplanmıştır.

$$E_k = m \times g \times h \tag{3.6}$$

$$v = \sqrt{2g\ x\ h} \tag{3.7}$$

E_k; Kinetik enerji

m; Kütle

g; Yerçekimi

h; Çekicin yüksekliği

v; Çekicin çarpma anındaki hızı

Ek olarak, impuls-momentum teoremi kullanılarak kiriş numune tarafından emilen enerji miktarı hesaplanmıştır. Impuls-momentum teoremine göre impuls, momentumdaki değişime eşittir (ΔM) (Othman, 2016; Othman ve Marzouk, 2016b; Yuan ve ark., 2022). Denklem (3.8) kullanılarak çarpma anındaki momentum değişimi hesaplanmıştır, m, çekiç ağırlığı (198.6 kg). Impuls (I_p), çarpma yükü-zaman grafiğinin altındaki alan olarak hesaplanmaktadır. Denklem (3.9)'deki impuls değeri kullanılarak ta geri tepme hızı (V_r) hesaplanmıştır. Kiriş numunelerin emidiği enerji (E_{ab}), $V_{çarpma}$ çekişme hızı (5.4 m/s), denklem (3.10) kullanılarak çarpma enerjisinin ($E_{çarpma}$), $E_{çarpma}$, uygulanan çekişteki

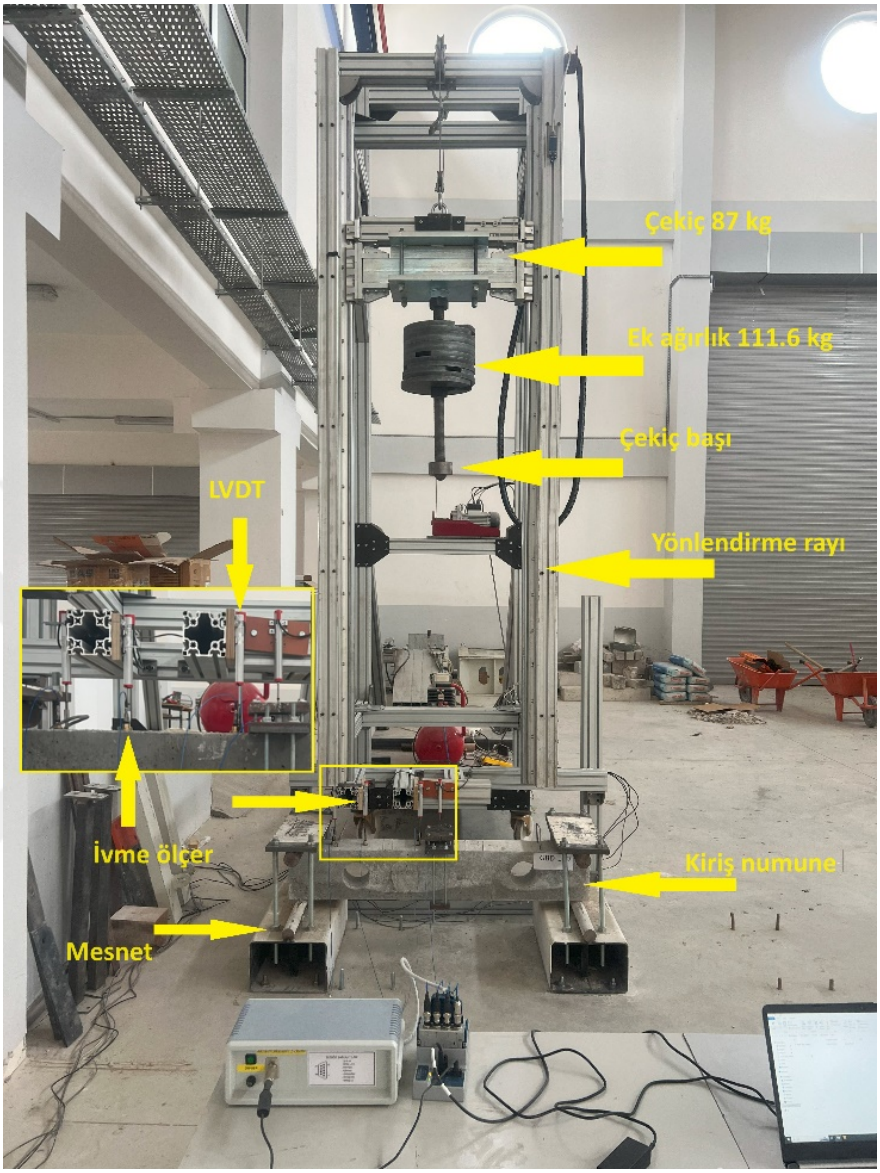
enerjidir (2922.4 J), geri tepme enerjisinden çıkarılmasıyla hesaplanabilir (Yuan ve diğ., 2022).

$$\Delta M = m \times (V_{çarpma} - V_r) = I_P \quad (3.8)$$

$$V_r = V_{çarpma} - \frac{I_P}{m} \quad (3.9)$$

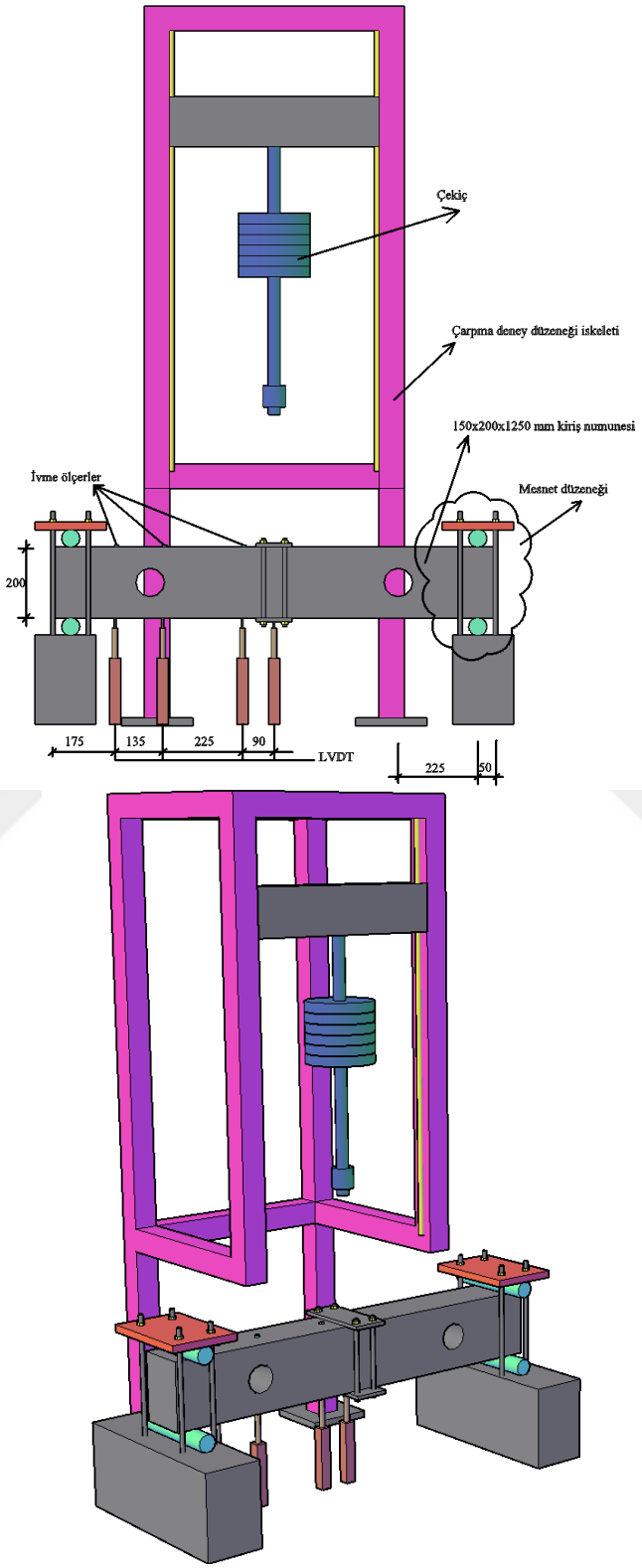
$$E_{ab} = E_{çarpma} - 0.5 \times m \times V_r^2 \quad (3.10)$$

Çarpışma enerjisini hesaplarken, test cihazındaki hava direnci ve sürtünme nedeniyle meydana gelen enerji kaybı göz ardı edildi. Ek olarak, örnekler tarafından emilen enerjiyi hesaplarken, destekle emilen enerji ve gürültü ve ısıdan kaynaklanan enerji kaybı göz ardı edildi. (Yuan ve diğ., 2022).



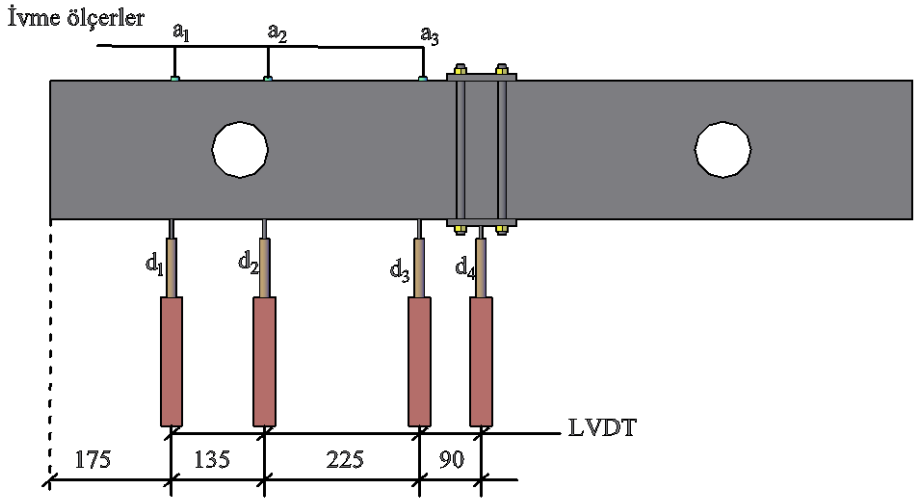
Şekil 3.41 Çarpma deneyi test düzeneğinin detaylarını

Çalışmada her çarpma testinde öncelikli olarak numunenin mesnet üzerine yerleştirilmesi ve sabitlenmesi gerekmektedir. Daha sonra gerekli ölçüm sensörlerinin tasarıma göre planlanan noktalara yerleştirilmesi gerekmektedir. Deney sırasında LabVIEW Signal Express programı (Thiagarajan ve diğ., 2009) kullanılarak zamana bağlı çarpma yükü, ivme ve deplasman verileri kaydedilmiştir. Bundan sonra manyetik kilit açıldı ve vurucu ağırlık serbestçe düşmeye başlamış. Şekil 3. 42'de, çarpma sırasında test numunesinin davranışı görülmektedir. Çarpma işlemi tamamlandıktan sonra numune çıkarılarak çarpma sonrası hasar durumları incelenmiştir.



Şekil 3.42. Çarpma test düzeneği şematik görünümü

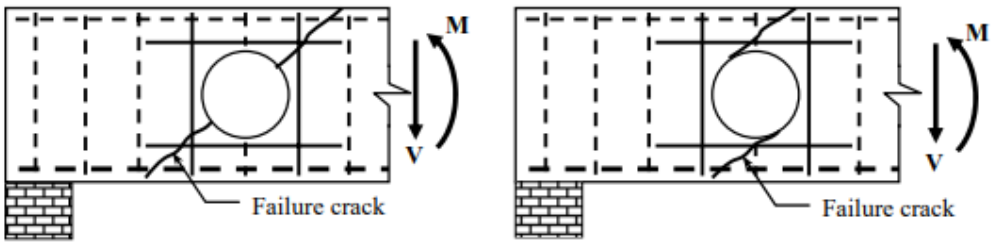
Numunelerin çarpma davranışını değerlendirebilmek için, sensörlerin konumları iyi seçilmelidir. Şekil 3.43‘te ölçüm aygıtlarının (ivme ölçer ve LVDT) numuneye yerleşimleri görülmektedir. Şekil 3.43’ten görüldüğü gibi, LVDT ve ivme ölçerlerin anlaşılmasını kolaylaştırmak için çeşitli kodlar kullanılmıştır. Kodlamada, ivme ölçerler "a" ve LVDT’ler ise "d" harfi ile gösterilmiştir.



Şekil 3. 43. İvme ölçer ve LVDT’lerin deney elemanına yerleşim şekli

3.9. Boşluklu Kirişlerde Kırılma Mekanizması

Mansur (2006) çalışmasında betonarme kirişlerde kesme kuvvetine maruz kalan bölgelerde bir boşluk açılması durumunda Şekil 3.34’te görüldüğü gibi iki farklı modda göçme olabileceğini belirtilmiştir.



a. Beam type b. Frame type

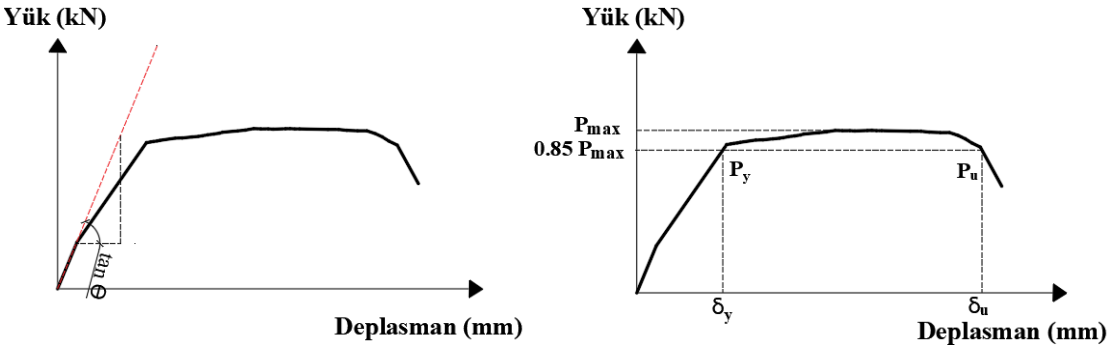
Şekil 3. 44. Küçük boşluklu betonarme kirişin kırılma tipleri (Mansur, 2006)

Birinci tip kırılma (Beam Type), yaygın görülen tiptir, kesit boşluksuz gibi çalışarak ana çatlak boşluğun merkezinden geçer ve boşluğun iki tarafında da 45^0'lik tıpkı kesme çatlağı gibi devam eder (Şekil 3.44-a).

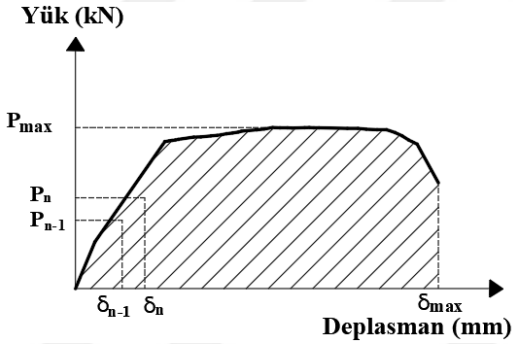
İkinci tipi kırılma da ise (Frame Type), boşluğun altında ve üstünde her birinde bir tane olmak üzere iki bağımsız diyagonal çatlak görülür. Bu tip kırılmada oluşan çatlakların birbirinden bağımsız olarak davrandığı görülmektedir (Şekil 3.44-b).

3.10. Değerlendirilen Parametreler

Rijitlik: Bir yapı elemanın yükleme altında hareket etmeye karşı koyma gücü rijitlik olarak bilinir. Enerji tüketim kapasitesi: yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanması yoluyla bulunabilir. Süneklik: bir yapı elemanın yük taşıma kapasitesi değeri sabitken deplasman miktarını artırmasıdır. Bu nedenle, Şekil 3.45'de gösterildiği gibi, elemanların süneklik oranları, maksimum yükün %85'ine karşılık gelen deplasman değerlerinin akma anındaki deplasmana bölünmesiyle elde edilmiştir.



a.Rijitlik b. Süneklik



c. Enerji tüketim kapasitesi

Şekil 3.45. Kirişlerin değerlendirilmesinde dikkate alınan parametreler

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1.Geopolimer Harç Üretimi Ön Tasarım Deney Sonuçları

Tez çalışmasının 5 ana başlık altında yürütüldüğü daha önce belirtilmişti. Bu bölümde GPC üretmek için gerekli optimum karışım oranını belirlemek amacıyla yapılan tasarımlar ve sonuçları verilmiştir. Ön tasarım aşamasında geopolimer harç üretiminde kullanılan UK, YFC ve PTT malzemelerinin oranları değiştirildiğinde geopolimer harcın mekanik ve fiziksel özelliklerindeki değişimi detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Çalışmada, UK, YFC ve PTT kullanılarak Mixture Design yöntemi ile 10 farklı karışım oranı belirlenerek geopolimer harçların mekanik özellikleri ve işlenebilirliği üzerine bir takım deneysel araştırma sunulmaktadır. Çalışmada, UK, YFC ve PTT ile üretilen geopolimer harçların genel performanslarını araştırmak amacıyla oluşturulan geopolimer harçlar üzerine basınç deneyi, eğilme deneyi, çarpma deneyi, priz tayini süresi, yayılma tablası deneyi, birim hacim ağırlık deneyi ve su emme deneyleri yürütülmüştür. Yapılan deneysel çalışmada geopolimer harcın oluşturulmasında kullanılan malzemelerin değişimlerinin geopolimer harcın mekanik ve fiziksel özelliklerini ne ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Bu amaçla geopolimer harcı oluşturmak için bazı parametreler (molarite, agrega/bağlayıcı, akışkanlaştırıcı oranı, aktivatör oranları, ilave su miktarı, likit/bağlayıcı) literatüre uygun şekilde sabit seçilmiştir. Bu oranlar ise Çizelge 4.1. de belirlenmiştir;

Çizelge 4.1. Karışımlarda sabit tutulmuş oranları

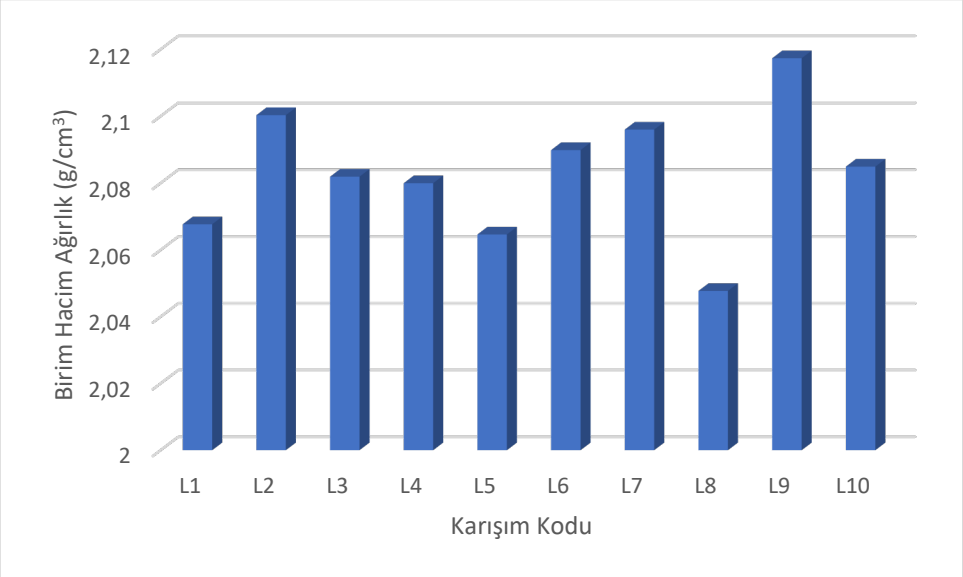
Sabit oranı	Değeri
Molarite (M)	10
Agrega/Bağlayıcı	2.5
Akışkanlaştırıcı (%)	2
Sodyum Silikat/Sodyum Hidroksit	1.5
İlave su miktarı (%)	14.5
Likit/bağlayıcı	0.5

Daha sonra Mixture Design yöntemine göre belirlenen 10 farklı karışım oranına göre harçlar üretilerek deneyler tamamlanmıştır. Hazırlanan 10 farklı karışımın numuneleri

kalıplardan çıkarıldıktan sonra oda sıcaklığında 28 gün boyunca hava kürüne (23^0C $\pm 2^0$C) tabi tutulmuşlardır. Hava kürünü takiben gerçekleştirilen deneylerin sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.1.1. Birim hacim ağırlık deneyi

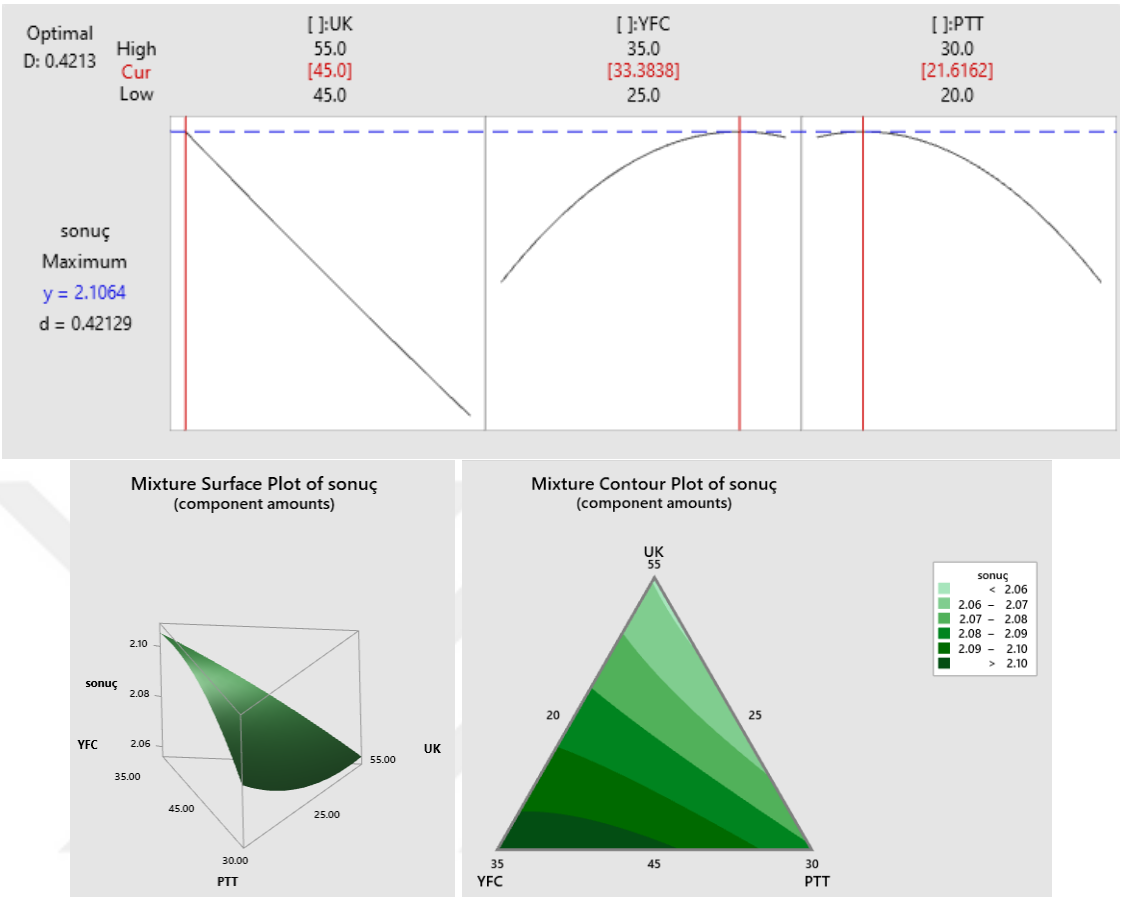
Birim hacim ağırlık deneyinde, geopolimer harçtan hazırlanan karışım, 50x50x50 mm 'lik küp kalıplara yerleştirilmiş ve ağırlıkları tartılmıştır. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ortalama birim hacim ağırlık değerleri ise Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Üretilen geopolimer harçların 28 günlük birim hacim ağırlık değerleri

Birim hacim ağırlığının en düşük olduğu geopolimer harç karışımı L8 nolu tasarım olup (%51.66 UK + %26.66 YFC + %21.66 PTT) değeri 2.04 g/cm^3 tür, en yüksek birim hacim ağırlığa sahip tasarım ise L9 olup (% 46.66 UK + % 31.66 YFC + % 21.66 PTT) değeri 2.11 g/cm^3 olarak belirlenmiştir.

Mixture Design yöntemi ile bağlayıcı malzemelerin geopolimer harcın birim hacim ağırlığına etkilerini gösteren grafikler Şekil 4.2 'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Kullanılan bağlayıcı malzemelerin karışım oranı ile geopolimer harcın birim hacim ağırlığı arasındaki ilişki

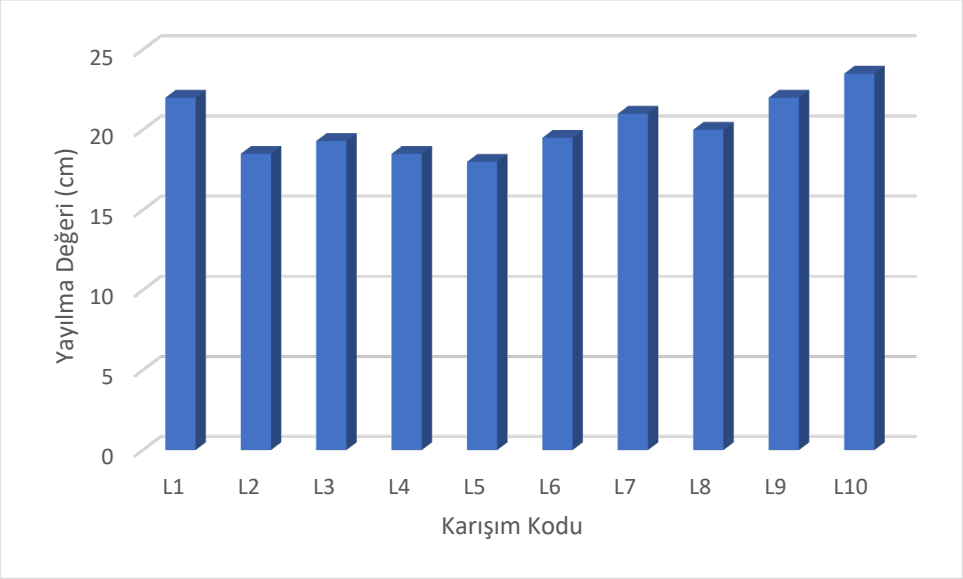
Mixture Design yöntemine göre tasarlanmış deney sonuçları incelendiğinde numunelerdeki C sınıfı uçucu kül veya pişirilmiş taş tozu oranı arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı görülmüştür aynı zamanda yüksek fırın cürufunun oranı arttıkça birim hacim ağırlık değerleri arttırıldığı görülmüştür. Bunun nedeni C tipi uçucu külün veya pişirilmiş taş tozu özgül ağırlığının yüksek fırın cürufuna göre düşük olmasıdır. Kullanılan pişirilmiş taş tozunun (PTT) özgül ağırlığı 2,70 g/cm^3, UK'un özgül ağırlığı 2.06 g/cm^3 ve YFC ise özgül ağırlığı 2,80 g/cm^3'tür. Bu artış ve azalmalar kullanılan malzemenin incelik, tane büyüklüğü, tane şekli gibi bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerine de bağlı olabilmektedir.

Aynı zamanda UK tanelerinin diğer karışım malzemelerine oranla tane çapının daha büyük olmasından dolayı numunelerin boşluk oranını arttırdığı görülmüştür. Bu yüzden uçucu kül miktarı arttıkça birim hacim ağırlık değerinin azaldığı görülmüştür. YFC

tanelerinin çapı ise uçucu küle göre daha küçük olmasından dolayı geopolimer harç numuneleri daha az boşluklu oluşmuştur. Bundan dolayı da birim hacim değeri YFC miktarının artmasıyla arttığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar Kaya ve arkadaşları (2020) elde ettiği sonuca uyumludur.

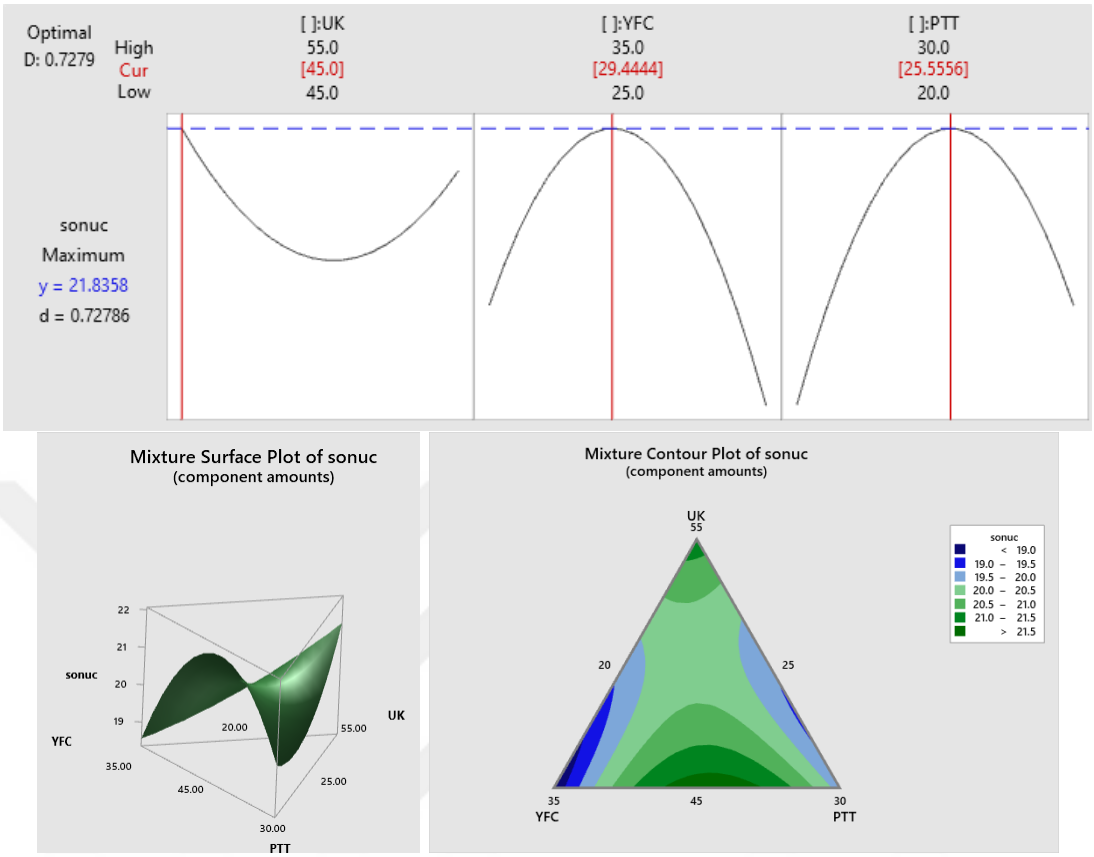
4.1.2. Yayılma deneyi

Hazırlanan 10 farklı karışım için yayılma değerleri belirlenmiş ve yayılma deneyinin sonuçları Çizelge 4.2'de gösterilmektedir. Tasarımların ortalama yayılma değerleri ise Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Üretilen geopolimer harçların 28. Günlük yayılma değerleri

Mixture Design yöntemi ile bağlayıcı malzemelerin geopolimer harcın yayılma değerlerine (işlenebilirlik) etkilerini gösteren grafikler Şekil 4.4 'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin karışım oranı ile geopolimer harcın yayılma değerleri arasındaki ilişki

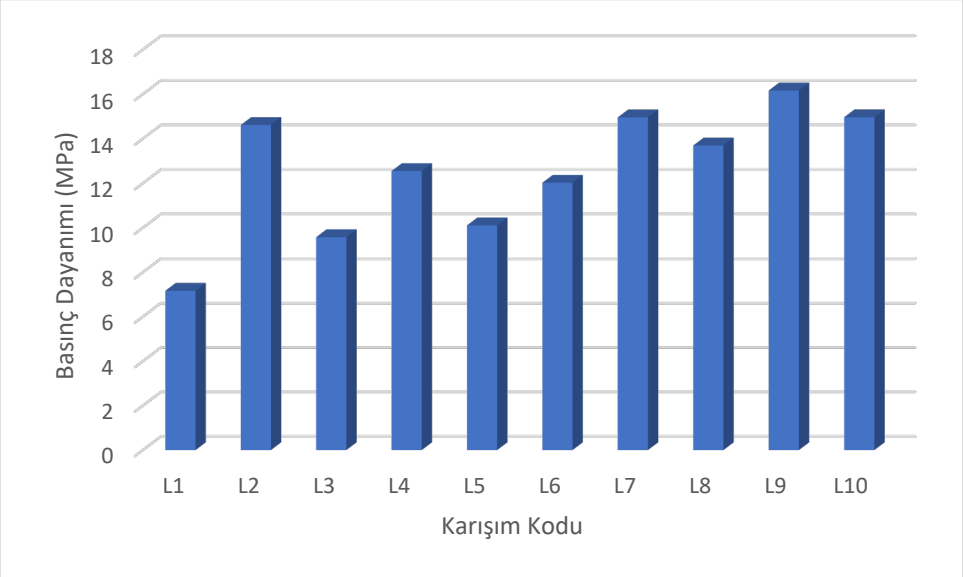
Yukarıdaki sonuçlardan, karışımların yayılma değerleri 18 - 23.5 cm arasında değişmektedir. Geopolimer harcın işlenebilirliği açısından en iyi sonucu veren karışım L10 tasarımı ve değeri ise 23.5 cm yayılma olduğunu söylenebilir. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin fiziksel özellikleri, inceliği, kimyasal ve mineralojik bileşimi bu noktada önemli bir rol oynamıştır.

Geopolimirezasyon oluşumunda Si-O-Al ve Si-O-Si bağları oluştuğu bilinmektedir. Bağlayıcı içerisindeki UK ve YFC miktarı arttığında SiO_2, AL_2O_3 ve CaO miktarının da artmasına bağlı olarak Ca–Al–Si jelleri oluşmaktadır. Dolayısıyla geopolimirezasyon işlemini oluşturmak için daha fazla aktivatör çözeltiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun sonucu olarak da yayılma değerlerinde azalma görülmektedir. Literatürde UK ve YFC oranları arttıkça işlenebilirlik azaldığını elde edilen bazı çalışmalar bulunmaktadır (Kotwal ve diğ., 2015; Nath ve diğ., 2014; Nath ve diğ., 2015; Li ve diğ., 2018; Nuaklong ve diğ.,

2016; Malkawi ve diğ., 2016). PTT oranı artmasıyla yayılma yani işlenebilirlik değeri artmaktadır (Kubátová ve diğ., 2021; Yuan ve diğ., 2017).

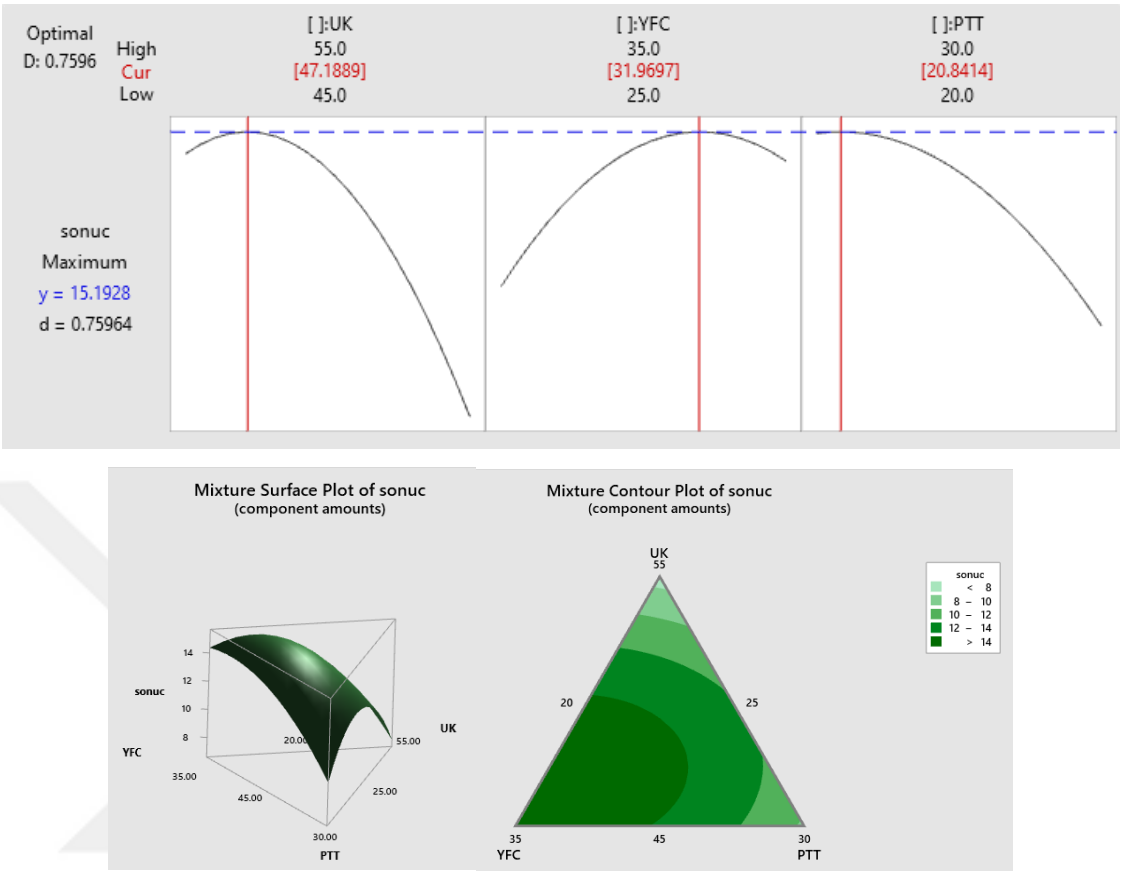
4.1.3. Basınç deneyi

Geopolimer harcın basınç dayanımını belirlemek için 50x50x50 mm boyutlarında küp numuneleri üretilmiş olup 28. gün sonunda basınç testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir. Tasarımların ortalama basınç dayanım değerleri ise Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Üretilen geopolimer harçların 28 Günlük Basınç dayanım değerleri

Mixture Design yöntemi ile bağlayıcı malzemelerin geopolimer harcın basınç dayanımına etkilerini gösteren grafikler Şekil 4.6 'da verilmiştir.



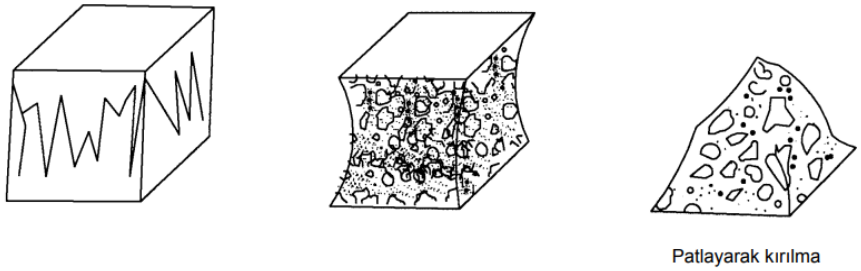
Şekil 4.6. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin karışım oranı ile geopolimer harcın basınç mukavemeti arasındaki ilişki

Çizelge 4.2 incelendiğinde basınç dayanım değerleri 7.17-16.16 MPa arasında olduğu görülmüştür. Tasarımlardan elde edilen en yüksek basınç mukavemeti değeri veren L9 tasarımı olup değeri 16.16 MPa'dır. En düşük basınç mukavemetini veren tasarım ise L1 tasarımı olup değeri 7.17 MPa'dır. Uçucu kül ve pişirilmiş taş tozu oranlarının artışına bağlı olarak basınç dayanımının azaldığı görülmüş olup aynı zamanda yüksek fırın cüruf oranı arttığında ise basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Şekil 4.5'te tasarımların basınç dayanımlarının karşılaştırılmasına ait grafik verilmiştir.

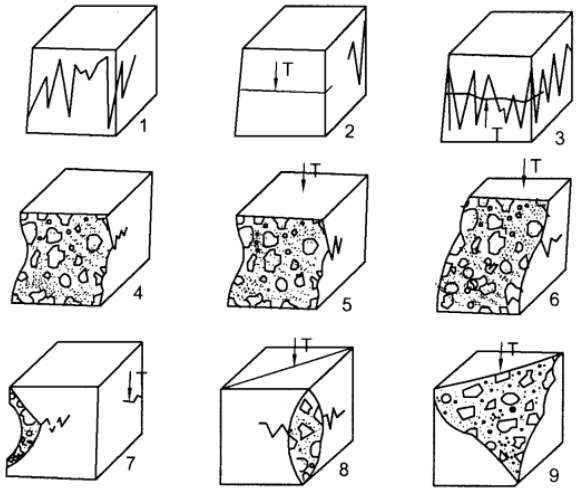
Numunelerin kırılma mekanizmaları incelendiğinde numunelerin açıktaki dört yüzü de yaklaşık olarak eşit şekilde çatlamış, yükleme başlıklarına temas eden yüzeylere doğru, çok küçük hasar oluşmuştur, yani ideal kırılma mekanizmasının oluştuğu söylenebilir (Şekil 4.7). TS EN 12390-3'e göre uygun ve uygun olmayan kırılma şekilleri (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Örnek küp numunelerinin kırılma mekanizmaları



Şekil 4.8. Küp numunelerin tatmin edici kırılma şekilleri (TS EN 12390-3., 2019)

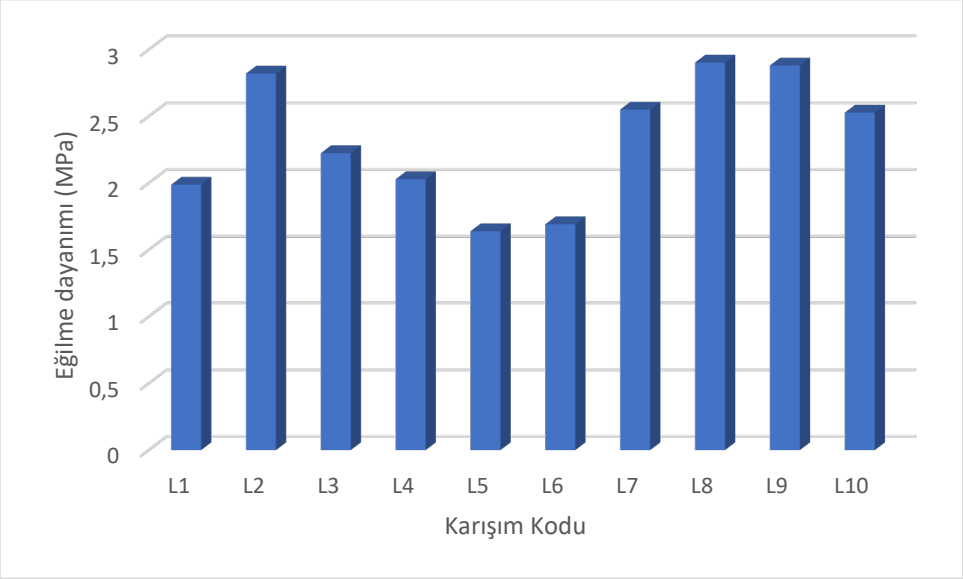


Şekil 4.9. Küp numunelerin tatmin edici olmayan bazı kırılma şekiller (TS EN 12390-3., 2019)

Basınç mukavemeti deneylerinde UK ve PTT oranlarının artışına bağlı olarak basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak temin edilen uçucu külün içerisinde bulunan istenmeyen atık malzemeler olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla UK ile aktivatör çözeltinin tam reaksiyona giremediği gözlenmiştir. PTT'daki SiO_2 ve Al_2O_3 miktarı az olduğu için geopolimeri oluşturan bağlar (Si-O-Al ve Si-O-Si) az miktarda oluşmuştur. Bu durum da basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. Taher (2021) çalışmasında benzer sonuçları görmüştür. Aynı zamanda düşük mukavemet elde edilen tasarımlarda sebebi olarak reaksiyon ve jel yapısının oluşumu için daha uzun süreye ihtiyaç duyan PTT'daki kil ve feldispat minerallerinin daha düşük reaktivitesine bağlanabilir (Xu ve van, 2000; Komnitsas ve diğ., 2007; Liew ve diğ., 2016). PTT'nin içeriğinde bulunan kaolinitin yüzeyde neredeyse sıfır yükteki katmanlı yapısından dolayı alkalilerin yapıya nüfuzu çok yavaş olmakla beraber bu da çoğu kil bazlı geopolimerde zayıf bir yapının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu da kaolinitin geopolimer yapısına tam olarak katılamadığını göstermektedir. (Xu ve van, 2000; Heah ve diğ., 2012; Liew ve diğ., 2016). YFC oranı arttığında ise basınç dayanımının da arttığı görülmüştür. Bunun nedeni ise YFC içeriğindeki yüksek miktarda bulunan SiO_2 ve Al_2O_3 mineralleridir. Basınç mukavemeti deneylerinden elde edilen sonuçlar literatür ile de uyumluluk göstermektedir (Kumar ve diğ., 2010; Ravikumar, 2012; Fernández ve diğ., 2003; Wang ve diğ., 2015; Puertas ve diğ., 2000; Buchwald ve diğ., 2007; Buchwald ve diğ., 2009; Yao ve diğ., 2009; Mozgawa ve Deja, 2009).

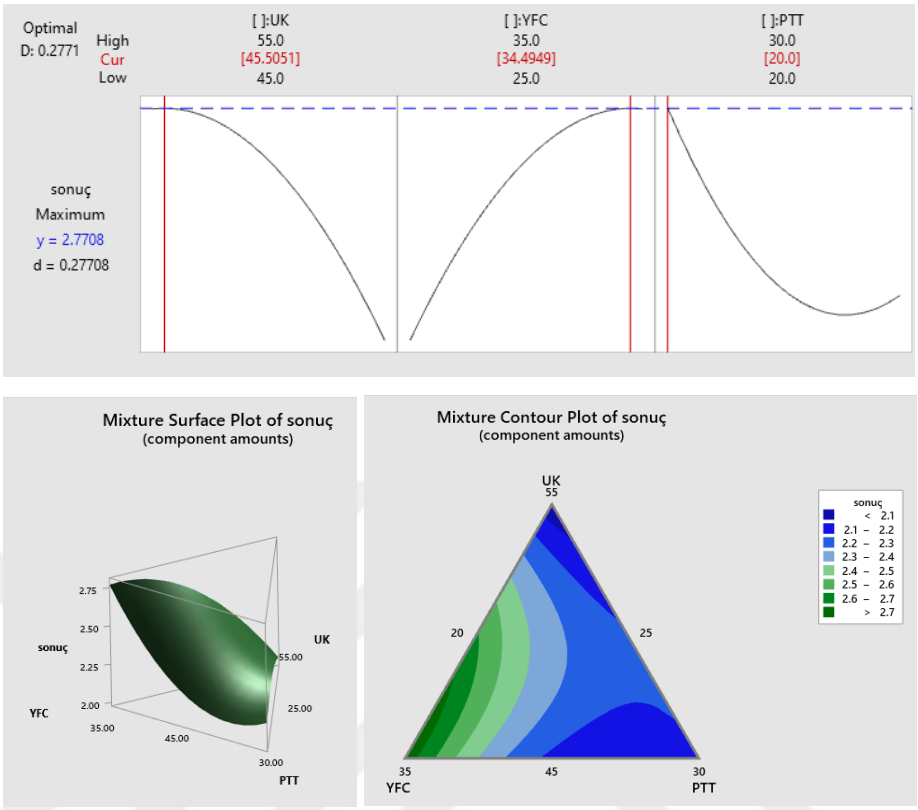
4.1.4. Eğilme deneyi

Geopolimer harcın eğilme dayanımını belirlemek için 80x100x400 mm boyutlarında kiriş numuneleri hazırlanmış ve 28. günde eğilme deneyi yapılarak sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir. Tasarımların ortalama eğilme dayanım değerleri ise Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Üretilen geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanım değerleri

Mixture Design yöntemi ile bağlayıcı malzemelerin geopolimer harcın eğilme dayanımına etkilerini gösteren grafikler ise Şekil 4.11 'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin karışım oranı ile geopolimer harcın eğilme mukavemeti arasındaki ilişki

Çizelge 4.2 incelendiğinde eğilme dayanım değerlerinin 1.69-2.9 MPa arasında olduğu görülmüştür. Basınç mukavemeti sonuçlarına duruma benzer şekilde UK ve PTT oranlarının artışına bağlı olarak eğilme dayanımının azaldığı görülmüştür. Bu sonuç Taher ve diğ. (2021) elde ettiği sonuçlar ile tutarlıdır. Aynı zamanda YFC oranı arttığında ise eğilme dayanımının da arttığı görülmüştür. Elde edilen maksimum eğilme dayanımı ise 2.9 MPa ile L8 tasarımı, en düşük eğilme dayanımı değeri veren tasarım ise 1.63 MPa ile L5 tasarımı olduğu görülmüştür.

4.1.5. Çarpma dayanımı

Geopolimer harcın çarpma dayanımını basit ve en çok tercih edilen yöntem olan ağırlık düşürme yönteminde 5.68 kg ağırlığındaki yükün 180 mm yükseklikten 80x100x400 mm boyutlarındaki kiriş numunenin üzerine düşürülerek belirlenmiştir. Numunelere uygulanan çarpma enerjisi aşağıda verilen formüllere (4.1- 4.2 - 4.3 – 4.4 - 4.5) göre hesaplanmıştır (Murali ve diğ., 2014; Oltulu ve diğ., 2018).

Çarpma deneyinde kullanılan ağırlık 28 gün kür süresi sonunda boyutları 80x100x400 mm olan kiriş elemanları üzerlerine 180 mm yükseklikten düşürülerek yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

$$Çarpma\ Dayanımı = n\ x\ U \tag{4.1}$$

$$H_1 = ½\ g\ t^2 \tag{4.2}$$

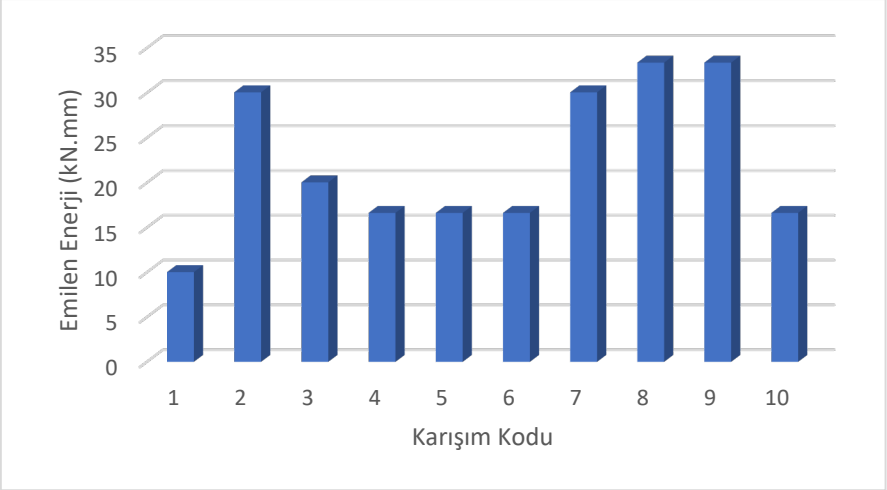
$$U = ½\ m\ V^2 \quad , m\ g\ H_1 \tag{4.3}$$

$$V = g\ t \tag{4.4}$$

$$M_1 = W/g \tag{4.5}$$

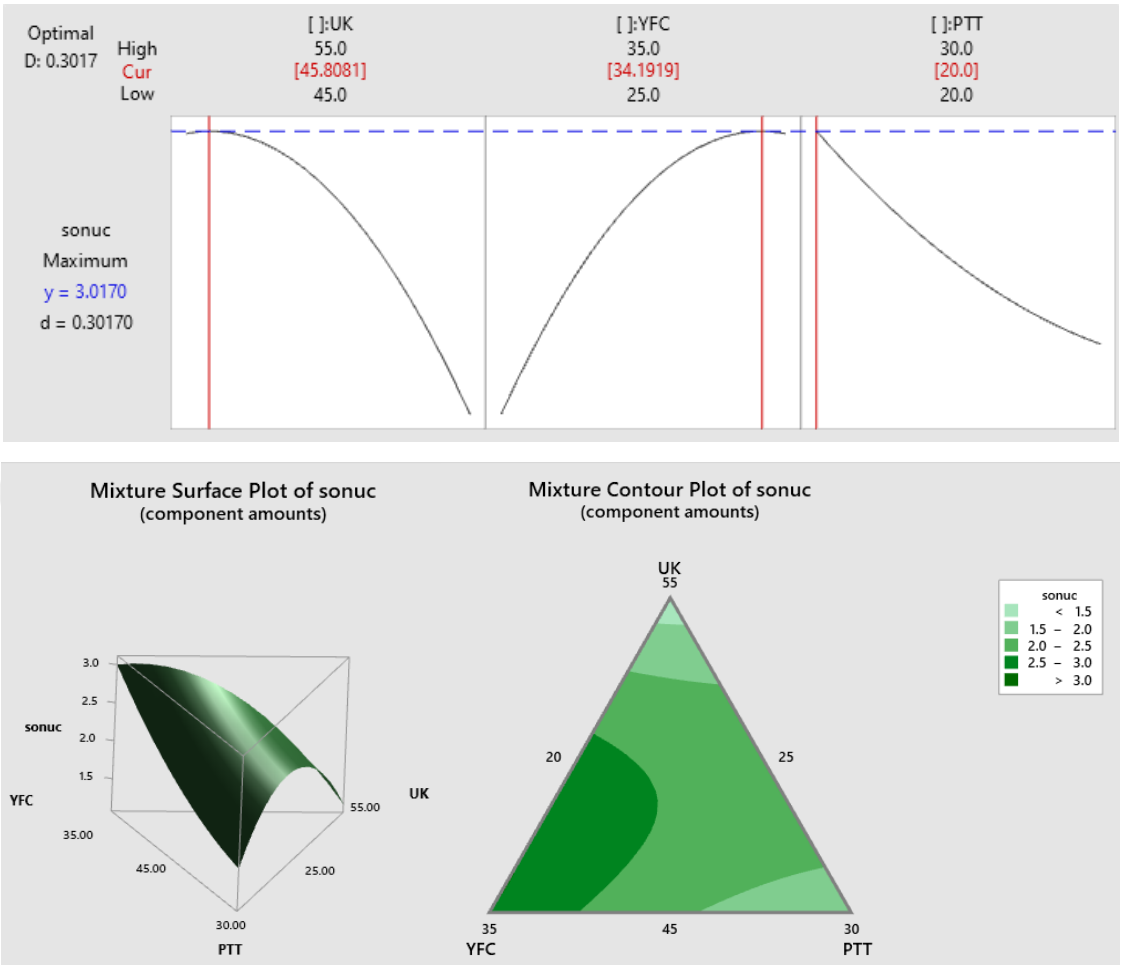
Burada H_1; Tokmağın yüksekliği (mm), n; Vuruş sayısı, U; Çarpma enerjisi, V; Vuruş Hızı (mm/s), m; Çekicin ağırlığı (kg), W; Ağırlık (N), M_1; Kütle (kg), g; Yer çekimi (mm/s^2) ve t; Düşürme zamanı.

Hazırlanan karışımlardan elde edilen numunelere aynı şartlarda (düşürme kütlesi, ağırlık ve yükseklik) çarpma deneyleri yapılmış ve numunelere yukarıdaki formüllere göre hesaplanan 10.02 kN.mm'lik bir çarpma enerjisi uygulanmıştır.



Şekil 4.12. Üretilen geopolimer harçların 28 günlük emilen enerji değerleri

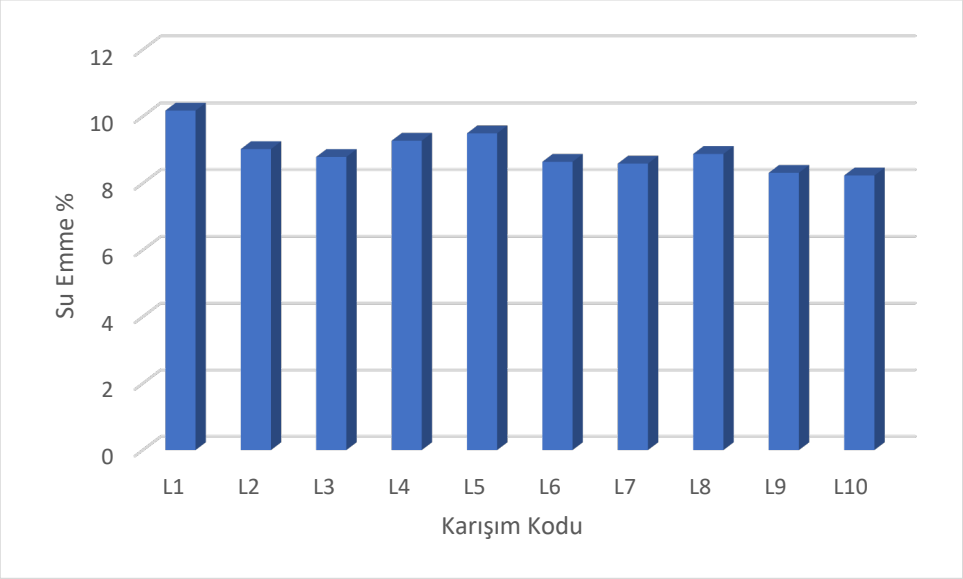
Şekil 4.12 incelendiğinde karışımların çarpma enerjisi değerlerinin 10.02 – 33.3 kN.mm arasında olduğunu görülmüştür. Basınç ve eğilme dayanımdakine benzer şekilde UK ve PTT oranlarının artışına bağlı olarak çarpma dayanımının azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda YFC oranı arttığında ise çarpma dayanımı arttığını görülmüştür. Elde edilen maksimum çarpma enerjisi ise 33.3 kN.mm ile L8 ve L9 tasarımlarında görülmüştür. En düşük çarpma enerjisi veren karışım ise 10.02 kN.mm değeri ile L1 tasarımıdır. Şekil 4.13'te gösteren grafik ise Mixture design yöntemi ile bağlayıcı malzemelerin geopolimer harcın çarpma dayanımına etkilerini göstermiştir.



Şekil 4.13. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin karışım oranı ile geopolimer harcın çarpma dayanımı arasındaki ilişki

4.1.6. Su Emme deneyi

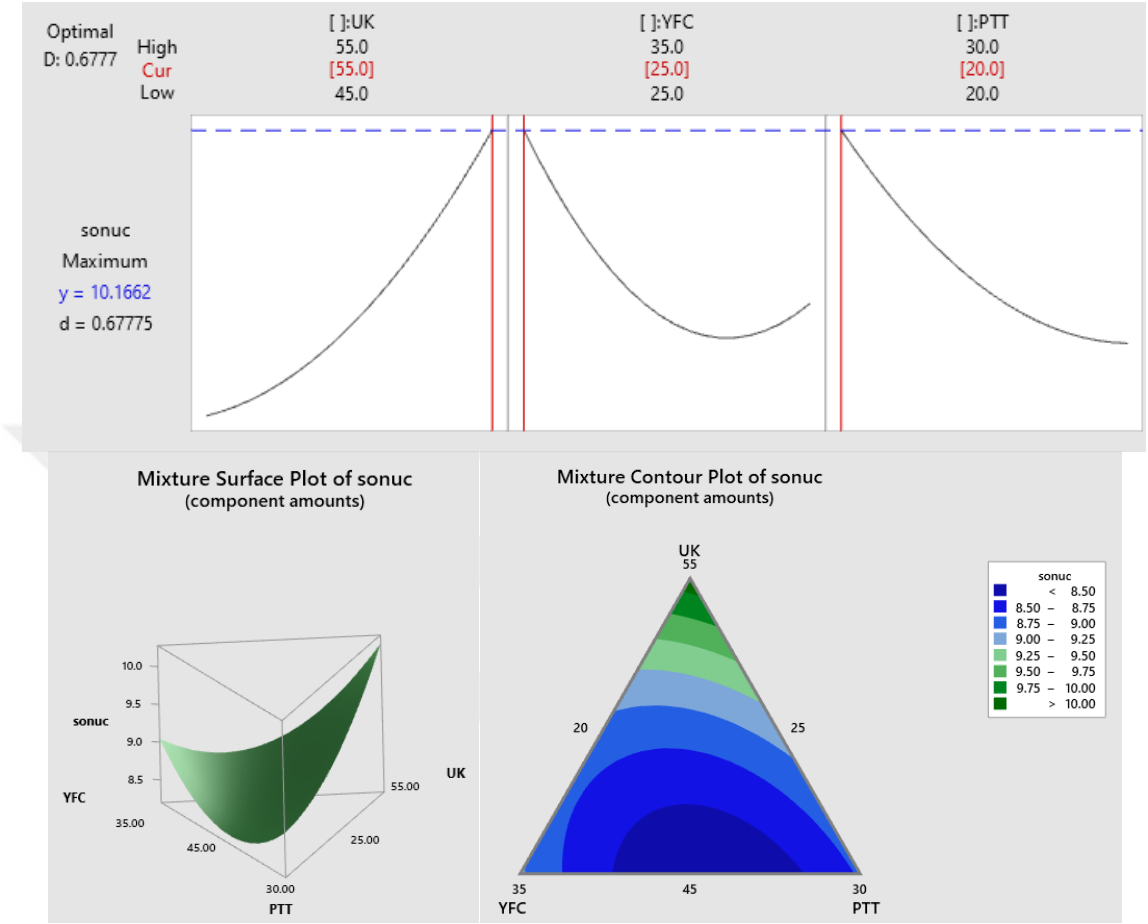
Geopolimer harcın su emme değerini belirlemek için Ø100×50 mm boyutlu silindir numunelerde 28. gün sonunda deneyler yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir. Tasarımların su emme değerleri ise Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Üretilen geopolimer harçların 28 günlük su emme değerleri

Çizelge 4.2 incelendiğinde su emme değerleri %8.23-10.17 arasında değiştiği görülmüştür. UK oranın artışına bağlı olarak su emme değerinin arttığı görülmüştür. Bu durum uçucu külün tane yüzey alanının YFC ve PTT'ye göre daha fazla olması ile puzolanik özellik göstermesi için daha fazla aktivatör çözeltiye ihtiyaç duyması olarak değerlendirilmiştir.

Bununla beraber YFC ve PTT taneleri uçucu küle göre daha küçük olduğu için geopolimer harcın boşluklarını azalttığı görülmüş olup bu yüzden de oranlarının artmasıyla su emme değerinin azaldığı görülmüştür. Su emme değerlerinin Bayiha ve diğ., (2019) yaptıkları çalışma ile uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 4.14'te gösterildiği gibi maksimum su emme oranı %10.17 ile L1 karışımı çıkmıştır. Şekil 4.15 ise karışımı oluşturan malzemelerin su emme miktarlarına olan etkileri görülmektedir.

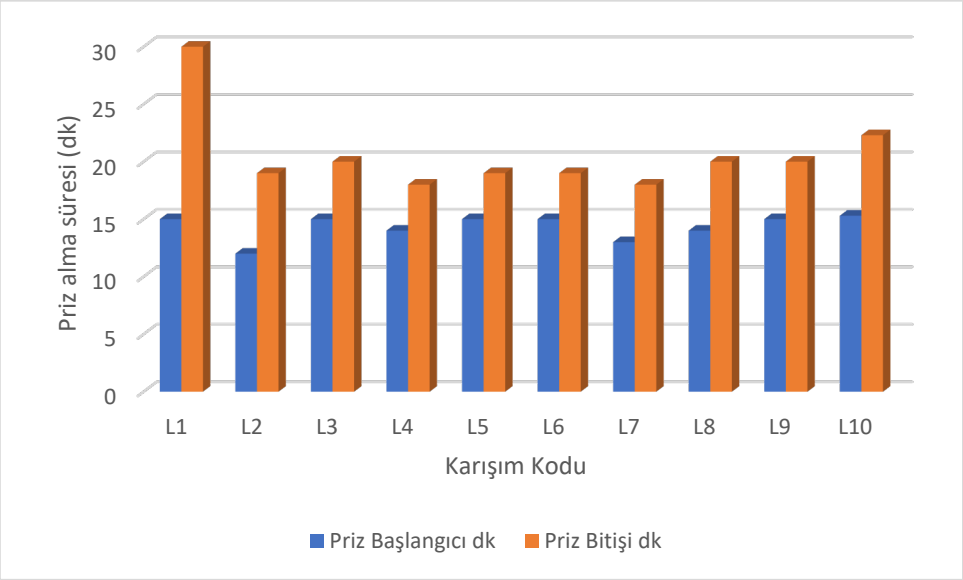


Şekil 4.15. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin karışım oranı ile geopolimer harcın su emme değerleri arasındaki ilişki

4.1.7. Priz alma süresinin tayini deneyi

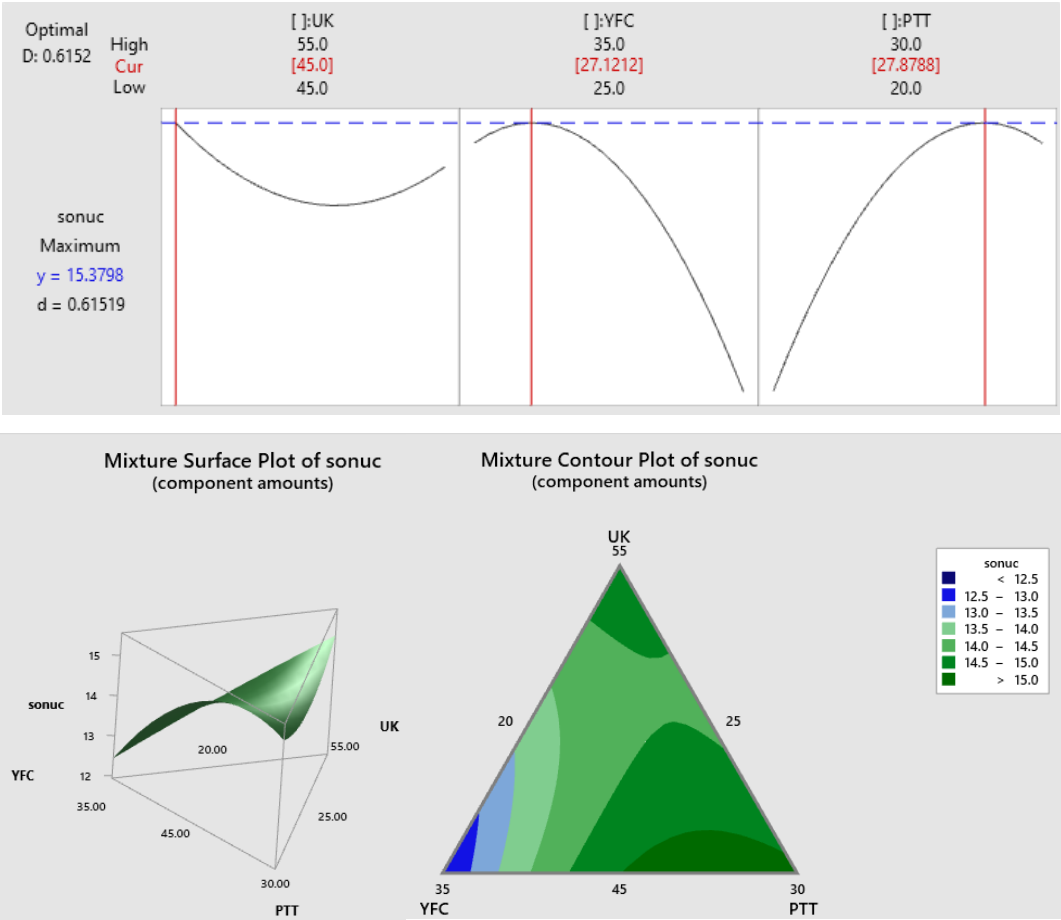
Çalışmada üretilen geopolimer harç numunelerinin priz başlangıç ve bitiş süreleri Çizelge 4.2. ve Şekil 4.16'da verilmektedir. Priz başlangıç ve priz sonu sürelerinin tayini için yapılan deneyde priz başlangıç sürelerinin 12 dk ile 15.3 dk arasında, priz sonu sürelerinin ise 18 dk ile 30 dk arasında olduğu görülmektedir. Priz başlangıç süresinin en erken olduğu karışım L2 geopolimer harç karışımı olup, en geç priz başlangıcının bağlayıcı olarak L1 olduğu görülmektedir. Sonuçta priz başlangıç ve bitiş süresi olarak C sınıfı uçucu kül esaslı geopolimerin çok hızlı bir şekilde prize başlaması ve sonlanması neticesinde çalışmanın diğer bölümlerinde üretilecek olan kiriş numunelerinin üretilmesinde istenilen

işlenebilirliği göstermeyeceği görülmüştür. İşlenebilme ve priz süresinde pişirilmiş taş tozu atığının oranı arttıkça uygulama açısından daha olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 4.16. Üretilen geopolimer harçların priz başlangıç ve bitiş süreleri

Mixture Design yöntemi ile bağlayıcı malzemelerin geopolimer harcın priz sürelerine etkilerini gösteren grafikler Şekil 4.17 ‘de verilmiştir.



Şekil 4.17. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin karışım oranı ile geopolimer harcın priz süresi tayini arasındaki ilişki

Hazırlanan geopolimer harçlar üzerinde yapılan deneylerin toplu sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4. 2. Deneysel sonuçları

Numune kodu	Priz başlangıç süresi (dk)	Priz bitiş süresi (dk)	Yayılma değeri (mm)	Basınç dayanımı (MPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Çarpma enerjisi (kN.mm)	Su emme (%)	Birim hacim ağırlığı (g/cm^3)
L1	15	30.0	220	7.17	1.98	10.02	10.17	2.06
L2	12	19.0	185	14.61	2.82	30.06	9.02	2.10
L3	15	20.0	193	9.57	2.22	20.04	8.78	2.08
L4	14	18.0	185	12.54	2.02	16.63	9.27	2.07
L5	15	19.0	180	10.10	1.63	16.63	9.49	2.06
L6	15	19.0	195	12.02	1.69	16.63	8.64	2.08
L7	13	18.0	210	14.95	2.55	30.06	8.58	2.09
L8	14	20.0	200	13.69	2.90	33.36	8.87	2.04
L9	15	20.0	220	16.16	2.88	33.36	8.31	2.11
L10	15.3	22.3	235	14.96	2.52	16.63	8.23	2.08

Çalışmanın ileri bölümlerinde geopolimer kiriş üretebilmek öncelik olarak GB‘un basınç, eğilme ve işlenebilirlik bakımından eşdeğer ve ideal bir GPC karışımının elde edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle Mixture Design yöntemi kullanılarak 10 adet farklı karışım oranı ile geopolimer harçlar elde edilmiş ve bu harç karışımları üzerine yukarıda bahsedilen mekanik ve fiziksel özellik deneyleri yapılmıştır. Bu ön deney sonuçlarına göre karışımdaki C sınıfı uçucu kül miktarının artması, su emme değerini artırmış, basınç eğilme çarpma mukavemetleri, birim hacim ağırlığı ve yayılma değerlerini düşürmüş, priz başlangıç ve bitiş sürelerini oldukça kısaltarak harcın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemiştir.

Karışımlardaki yüksek fırın cürufu oranının artmasıyla basınç, eğilme, çarpma mukavemetleri ile birim hacim ağırlık değerleri artmıştır. Bu sonuç çalışmanın ileri aşamaları için olumlu gibi görünse de YFC miktarının artmasıyla priz başlangıç ve bitiş süreleri ile yayılma değerlerinin olumsuz etkilendiği görülmüştür. Bu da aynı uçucu külde olduğu gibi işlenebilirliği olumsuz bir şekilde etkilemiştir. Ancak karışımlara pişirilmiş taş tozunun ilavesi ile işlenebilirliğin yani priz başlangıç ve bitiş süreleri ile yayılma değerlerinin uygulama bakımından ideal koşullara geldiği görülmüştür. Bununla beraber PTT oranının artmasıyla harçların mekanik özelliklerinde (basınç, eğilme ve çarpma

mukavemetleri) bir düşüş görülmüştür. Dolayısıyla çalışmanın ileri bölümlerinde üretilecek olan GPC kiriş numuneleri için daha farklı atık malzemelerin ve farklı karışım oralarının kullanılması durumu gerekmektedir. Ancak çalışmanın bu bölümünde elde edilen sonuçlara göre yüksek dayanım gerektirmeyen harçlı imalatlarda, zemin iyileştirmelerinde Mixture Design yöntemine göre elde edilen karışım oranları kullanılarak bu atık malzemelerin değerlendirilmesi uygun olacaktır. Bu çalışma sonrasında kazanılan deneyimlere göre, GPC üretiminde yüksek fırın cürufu, pişirilmiş taş tozu veya uçucu külün kullanılması konusunda yapılabilecek bundan sonraki araştırmalar için aşağıda sunulan önerilerin katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

- Yukarıda belirtildiği gibi, uçucu küller ASTM standartlarına göre F ve C sınıfı olarak ayrılmaktadır. Bu çalışmada sadece C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Farklı olarak her iki sınıfın farklı karıştırma yöntemleri kullanılarak geopolimerin çeşitli özelliklerine etkileri araştırılabilir.
- Çalışmada kullanılan uçucu kül Soma Termik Santralinden elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında yürütülen çalışmaların farklı termik santral külleri için de yürütülmesi önerilmektedir. Bilindiği üzere, termik santrallerin yakma potansiyelleri farklı olabilmekte ve bu farklılık sonuçları etkilemektedir.
- Tezde yapılan deneysel çalışmalar dışında, hava içeriği, priz süresi tayini, sülfat etkisi, rötre tayini, ultrases geçiş hızı, elastisite modülü ve aşınma tayini gibi diğer deneylerde uygulanarak daha kapsamlı bir çalışma yapılabilir.
- Geopolimer harçların mekanik özellikleri için daha uzun kür süreleri denenebilir.
- Bu çalışma kapsamında mekanik dayanım değerleri esas alınarak Mixture design optimizasyon yöntemi kullanılmış ve optimum değerler elde edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda maliyet parametreleri göz önüne alınarak maliyetin optimizasyonu için Taguchi optimizasyon yöntemi gibi farklı optimizasyon teknikleri kullanılabilir.
- PTT dışındaki diğer toz malzemelerle GPC üretiminde yaşanan en büyük problem işlenebilirliklerinin çok düşük olmasıdır. Bu betonların işlenebilirliklerinin arttırılması için farklı kimyasal katkılar kullanılabilir ve geliştirilebilir.

Çalışmanın bu bölümünde elde edilen deneysel sonuçlar literatür de benzer malzemelerle yapılan çalışmalar ile de (Kaya ve diğ., 2020; Shi ve diğ., 2003; Yıldız, 2023;

Kumar ve diğ., 2010; Qiu ve diğ., 2019; Bernal ve diğ., 2016; Sasui ve diğ., 2019; Kotwal ve diğ., 2015, Nath ve diğ., 2014; Nath ve diğ., 2015; Li ve diğ., 2018; Nuaklong ve diğ., 2016; Malkawi ve diğ., 2016; Ravikumar, 2012; Fernández ve diğ., 2003; Wang ve diğ., 2015; Puertas ve diğ., 2000; Buchwald ve diğ., 2007; Buchwald ve diğ., 2009; Yao ve diğ., 2009; Mozgawa ve Deja, 2009; Shi ve diğ., 2003; Yıldız, 2023; Kumar ve diğ., 2010; Qiu ve diğ., 2019; Bernal ve diğ., 2016; Sasui ve diğ., 2019; Bayiha ve diğ., 2019; Ravikumar, 2012; Fernández ve diğ., 2003; Wang ve diğ., 2015; Puertas ve diğ., 2000; Buchwald ve diğ., 2007; Buchwald ve diğ., 2009; Yao ve diğ., 2009; Mozgawa ve Deja, 2009; Aktürk, 2021; Kubátová ve diğ., 2021; Bayiha ve diğ., 2019; Yuan ve diğ., 2017) oldukça tutarlı çıkması gelecek çalışmalar için de umut vermektedir.

4.2. İlave Karışımların Deney Sonuçları

Çalışmanın materyal ve metot kısmında gerekçesi belirtilen ilave karışımlar üzerine önce priz başlangıç süresinin tayini deneyi yapılmıştır. Bu aşamadan sonra işlenebilirlik bakımından uygun olan karışımların basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Uygulamada geopolimer harç ve betonların üretiminde karşılaşılan en önemli problem işlenebilirlik yani hazırlanan karışımın uygun zamanda kalıplara yerleştirilmesidir.

4.2.1. İlave karışımların priz başlangıç sürelerinin sonuçları

4.2.1.1. Mixture design programında (ön tasarım) kullanılan malzemelerin karışım oranlarının değiştirilerek priz başlangıç sürelerinin tayini

Bu deney serisinde ön tasarımda kullanılan karışım malzemelerin oranları, molaritesi ve likit/bağlayıcı oranları değiştirilerek priz başlangıç süreleri tayin edilmiştir. Karışımlara ilave olarak priz geciktirici katkı malzemesi (Retarton 300) de kullanılmıştır. Hazırlanan karışım oranları, üretim parametreleri ve priz başlangıç değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Malzeme oranları ve üretim parametreleri değiştirilmiş deney setinin priz başlangıç süreleri

Karışım No	Bağlayıcı Malzeme (%)	Priz Başlangıcı (Dk)	Molarite (M)	L/B Oranı	Priz Geciktirici (%)
1	UK15+YFC35 +PTT50	15.00	10	0.5	-
2	UK35+YFC15 +PTT50	21.00	10	0.5	-
3	UK55+YFC25 +PTT20	17.00	6	0.5	-
4	UK25+YFC25 +PTT50	27.00	10	0.5	-
5	UK55+YFC25 +PTT20	9.00	14	0.5	-
6	UK55+YFC25 +PTT20	17.00	10	0.5	2
7	UK55+YFC25 +PTT20	17.30	10	0.5	4
8	UK55+YFC25 +PTT20	17.30	10	0.5	6
9	UK55+YFC25 +PTT20	17.30	10	0.5	8

4.2.1.2. Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. uçucu külü (UKS) kullanılarak elde edilen karışımların priz başlangıç süreleri

Bu deney serisinde uçucu külün cinsi değiştirilmiş ve C sınıfı uçucu kül yerine Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.'den temin edilen uçucu kül kullanılmıştır. Malzemelerin karışım oranları, üretim parametreleri ve priz başlangıç süreleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Seydişehir uçucu külü (UKS) kullanılan deney setinin priz başlangıç süreleri

Karışım No	Bağlayıcı Malzeme (%)	Priz Başlangıcı (Dk)	Molarite (M)	L/B Oranı
1	UKS40+YFC25 +PTT35	48	10	0.5
2	UKS55+YFC25 +PTT20	33	10	0.5
3	UKS50+ PTT50	54	10	0.5
4	UKS60+ PTT40	46	10	0.5
5	UKS70+ PTT30	36	10	0.5

4.2.1.3. F sınıfı uçucu kül kullanılan karışımların priz başlangıç süreleri

Bu deney serisinde ön tasarımda kullanılan C sınıfı uçucu kül ile beraber F sınıfı uçucu kül ve silis dumanı (SD) ilave edilerek elde edilen karışımların farklı üretim parametreleri ve priz geciktirici katkı içeren harçların priz başlangıç süreleri verilmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. F sınıfı ve C sınıfı uçucu kül kullanılan karışımların priz başlangıç süreleri

Karışım No	Bağlayıcı Malzeme %	Priz Başlangıcı (dk)	Molarite (M)	L/B Oranı	Priz Geciktirici (%)
1	UKF55+ YFC25 +PTT20	50	10	0.5	-
2	UKF50+ PTT50	52	10	0.5	-
3	UKF60+ PTT40	58	10	0.5	-
4	UKF70+ PTT30	88	10	0.5	-
5	UKF50+UK50	44	10	0.5	2
6	UKF60+ UK40	80	10	0.5	2
7	UKF70+ UK30	123	10	0.5	2
8	UKF40+PTT40+SD20	8	10	0.5	-
9	UKF40+PTT40+SD20	13	10	0.7	-
10	UKF50+PTT30+SD20	7	10	0.8	-
11	UKF20+ MK40+PTT40	35	10	0.5	-
12	UKF20 + MK50+PTT30	13	10	0.8	-
13	UKF30+ MK40+PTT30	95	10	0.5	-
14	UKF30+ MK40+PTT30	36	10	0.7	-
15	UKF40+ MK20+PTT40	95	10	0.5	-
16	UKF40+ MK20+PTT40	14	10	0.7	-
17	UKF50+ UK30 +SD20	13	10	0.7	-
18	UKF55+ UK30 +SD15	10	10	0.7	-
19	UKF60+ UK30 +SD10	17	10	1.0	-
20	UKF40+ UK25+PTT20 +SD15	17	10	0.8	-

4.2.1.4. Metakaolin içeren karışımların priz başlangıç süreleri

Bu deney serisinde C sınıfı uçucu kül ile beraber metakaolin kullanılan karışımların farklı üretim parametreleri ile elde edilen priz başlangıç sürelerinin tayini verilmektedir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. Metakaolin ve C sınıfı uçucu kül kullanılan karışımların priz başlangıç süreleri

Karışım No	Bağlayıcı Malzeme (%)	Priz Başlangıcı (dk)	Molarite (M)	L/B Oranı
1	MK20+ UK30+PTT50	8	10	0.5
2	MK30+ UK40+PTT30	15	10	0.5
3	MK30+ UK20+PTT50	35	10	0.5
4	MK35+ UK15+PTT50	15	10	0.5
5	MK40+ UK30+PTT30	40	10	0.5
6	MK50+ UK20+PTT30	8	10	0.5
7	MK50+ UK20+PTT30	125	10	0.6
8	MK50+ UK20+PTT30	4	10	1.0
9	MK40+ UKF20+PTT40	35	10	0.5
10	MK40+ UKF30+PTT30	95	10	0.5
11	MK40+ UKF30+PTT30	36	10	0.7
12	MK50+ UKF20 +PTT30	13	10	0.8
13	MK60+PTT40	120	10	0.7
14	MK60+PTT40	28	10	0.5
15	MK70+PTT30	10	10	0.8
16	MK70+PTT30	125	10	0.6

4.2.1.5. Silis dumanı içeren karışımların priz başlangıç süreleri

Bu deney setinde silis dumanı (SD), uçucu kül (C ve F sınıfı) ve pişirilmiş taş tozu kullanılan karışımların priz başlangıç süreleri verilmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Silis dumanı ve uçucu kül (C ve F sınıfı) kullanılan karışımların priz başlangıç süreleri

Karışım No	Bağlayıcı Malzeme (%)	Priz Başlangıcı (dk)	Molarite (M)	(L/B) Oranı
1	SD20+ UK40+PTT40	15	10	0.5
2	SD20+ UK40+PTT40	28	10	0.5
3	SD20+ UK40+PTT40	16	10	0.3
4	SD20+ UK40+PTT40	24	10	0.6
5	SD20+ UK40+PTT40	37	10	0.7
6	SD20+ UK40+PTT40	25	10	1.0
7	SD20+ UK50+PTT30	13	10	0.8
8	SD20+ UKF40+PTT40	8	10	0.5
9	SD20+ UKF40+PTT40	13	10	0.7
10	SD20+ UKF50+PTT30	7	10	0.8
11	SD15+ UKF55+ UK 30	10	10	0.7
12	SD20+ UKF50+ UK 30	13	10	0.7
13	SD10+ UKF60+ UK 30	17	10	1.0
14	SD15+ UKF40+ UK25+PTT20	17	10	0.8

4.2.2. İlave karışımların 7 günlük basınç dayanımı sonuçları

4.2.2.1. Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş. uçucu külü (UKS) kullanılarak elde edilen karışımların 7 günlük basınç dayanımı sonuçları

İlave karışımlardan priz başlangıç süreleri uygulama bakımından uygun görülen karışımların 7 günlük basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Bu bölümde Seydişehir uçucu külü içeren karışımların 7 günlük basınç dayanımı değerleri verilmiştir (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8. Seydişehir uçucu külü (UKS) kullanılan deney setinin 7 günlük basınç dayanımları

Karışım No	Bağlayıcı Malzeme (%)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Molarite (M)	(L/B) Oranı
1	UKS50+ PTT50	3.30	10	0.5
2	UKS60+ PTT40	3.00	10	0.5
3	UKS70+ PTT30	3.00	10	0.5

4.2.2.2. F sınıfı uçucu kül kullanılan karışımların 7 günlük basınç mukavemetleri

Bu deney setinde F sınıfı uçucu kül içerip de uygun priz başlangıç süresine sahip karışımların 7 günlük basınç mukavemeti sonuçları verilmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. F sınıfı uçucu külü (UKF) kullanılan deney setinin 7 günlük basınç dayanımları

Karışım No	Bağlayıcı Malzeme (%)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Molarite (M)	(L/B) Oranı	Priz Geciktirici (%)
1	UKF50 + PTT50	1.05	10	0.5	-
2	UKF60 + PTT40	1.10	10	0.5	-
3	UKF70 + PTT30	1.25	10	0.5	-
4	UKF60+PTT40	4.18	12	0.9	-
5	UKF70+ PTT30	2.84	12	0.9	-
6	UKF50+C50	1.52	10	0.5	2
7	UKF60+C40	1.50	10	0.5	2
8	UKF70+C30	1.10	10	0.5	2
9	UKF40+ UK 60	3.30	12	0.9	-
10	UKF60+ UK 40	4.28	12	0.9	-
11	UKF55+ UK 30 +SD15	13.65	12	0.9	-
12	UKF20+MK40+ PTT40	4.80	10	0.5	-
13	UKF30+MK40+ PTT30	4.00	10	0.5	-
14	UKF40+MK20+ PTT40	2.80	10	0.5	-
15	UKF30+MK40+ PTT30	3.20	10	0.7	-
16	UKF40+MK20+ PTT40	7.20	10	0.7	-

4.2.2.3. Metakaolin kullanılan karışımların 7 günlük basınç mukavemetleri

Bu deney setinde Metakaolin içerip de uygun priz başlangıç süresine sahip karışımların 7 günlük basınç mukavemeti sonuçları verilmiştir (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10. Metakaolin (M) kullanılan deney setinin 7 günlük basınç dayanımları

Karışım No	Bağlayıcı Malzeme (%)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Molarite (M)	(L/B) Oranı
1	MK20+UK30+PTT50	3.20	10	0.5
2	MK30+UK20+PTT50	10.00	10	0.5
3	MK35+UK15+PTT50	3.20	10	0.5
4	MK40+UK30+PTT30	10.00	10	0.5
5	MK40+ UK30+ PTT30	17.39	12	0.9
6	MK35+UK50+SD15	25.50	12	0.9
7	MK50+UK20+PTT30	8.80	10	0.6
8	MK20+UKF40+PTT40	2.80	10	0.5
9	MK20+UKF40+PTT40	7.20	10	0.7
10	MK40+UKF20+PTT40	4.80	10	0.5
11	MK40+UKF30+PTT30	4.00	10	0.5
12	MK40+UKF30+PTT30	3.20	10	0.7
13	MK60+PTT40	2.40	10	0.7
14	MK60+PTT40	35.35	12	0.9
15	MK70+PTT30	5.20	10	0.6
16	MK70+PTT30	21.50	10	0.8

4.2.2.4. Silis dumanı kullanılan karışımların 7 günlük basınç mukavemetleri

Bu deney setinde Silis dumanı (SD) içerip de uygun priz başlangıç süresine sahip karışımların 7 günlük basınç mukavemeti sonuçları verilmiştir (Çizelge .11).

Çizelge 4.11. Silis Dumanı (SD) kullanılan deney setinin 7 günlük basınç dayanımları

Karışım No	Bağlayıcı Malzeme (%)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Molarite (M)	(L/B) Oranı
1	SD15+UKF55+ UK30	13.65	12	0.9
2	SD15+MK35+UK50	25.50	12	0.9
3	SD20+UK40+PTT40	30.00	12	0.5
4	SD20+UK40+PTT40	25.00	10	0.7

Ön deneylerde kullanılan ve farklı oranlarda atık malzeme (UK, YFC ve PTT) kullanılarak elde edilen karışımların sonuçlarında yukarıda bahsedildiği gibi istenilen mekanik ve fiziksel özellikler elde edilemediği için ilave karışımlara ihtiyaç duyulmuştur. İlave karışımlarda daha önceden kullanılan malzemelerin oranları, molariteleri, L/B oranları değiştirilerek ve aynı zamanda yeni atık malzemeler (metakaolin, silis dumanı, F sınıfı uçucu kül ve Seydişehir uçucu külü) kullanarak priz başlangıç süresi tayini ve basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Geopolimer harç üzerine yapılan işlenebilirlik ve mukavemet deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Geopolimer harcı üretiminde UK, YFC ve PTT bağlayıcı madde olarak farklı oranlarda birlikte kullanılmasının harcın priz başlangıç süresinde istenilen işlenebilirliği vermediği görülmüştür.
- Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.'den elde edilen uçucu külün kullanması priz süresi bakımından olumlu sonuçlar vermiş (priz başlangıç süreleri> 33 dakika) vermiş fakat basınç mukavemeti bakımından oldukça düşük değerler elde edilmiştir (yaklaşık 3 MPa). Basınç mukavemetinin düşük çıkmasının sebebi olarak ise uçucu külün içeriğinde yüksek oranda Fe_2O_3 bulunması olduğu düşünülmektedir.
- Geopolimer harç üretiminde F sınıfı uçucu külün kullanması priz başlangıç süresine katkısı büyük oranda olumlu olmuştur. Ancak UKS'de olduğu gibi yapısal elemanlarda kullanılabilecek kadar yüksek basınç mukavemeti elde edilememiştir

(<25 MPa). F sınıfı uçucu külün içeriğindeki CaO miktarının düşük olması bu durumu açıklamaktadır.

- Geopolimer harç üretiminde silis dumanının kullanması priz başlangıç süresine olumlu katkı sağlamıştır. Ayrıca silis dumanının içeriğindeki SiO_2 miktarının fazla olması sebebiyle geopolimerizasyon işlemi sırasında oluşan Si-O-Si bağlarının kuvvetli olması neticesinde istenilen basınç mukavemetleri de sağlanmıştır (>25 MPa).
- GPC üretiminde genel olarak kullanılan aktivatör molaritesinin artması priz başlangıç süresine olumsuz, basınç mukavemetine ise olumlu katkı sunmuştur.
- Karışımlarda kullanılan metakaolin ve pişirilmiş taş tozunun oranlarının artmasıyla işlenebilirliğin arttığı görülmüştür.
- Kullanılan aktivatör /bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte basınç mukavemetinin de arttığı görülmüştür.
- Karışımlarda priz geciktirici olarak kullanılan kimyasal katkının (Retarton 300) priz süresine olumlu bir katkısı görülmemiştir. Bunun sebebi olarak da kullanılan kimyasal aktivatör ile katkının reaksiyona girip etkisinin sönümlendiği olarak değerlendirilmiştir.
- Elde edilen sonuçlara göre hem işlenebilirlik hem de basınç mukavemeti bakımından ideal olan karışıma ait oranlar ve üretim parametreleri Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. İdeal karışım oranı ve üretim parametreleri

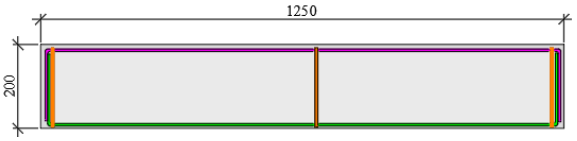
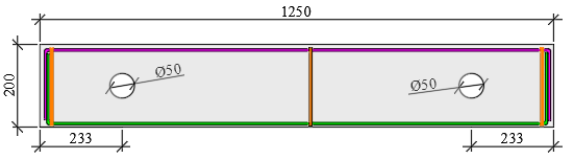
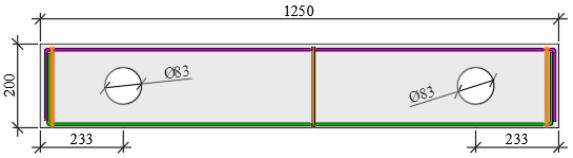
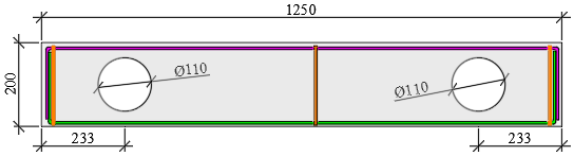
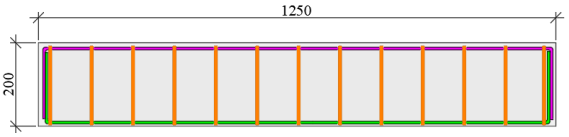
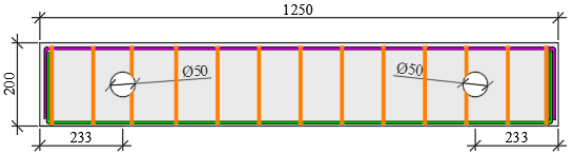
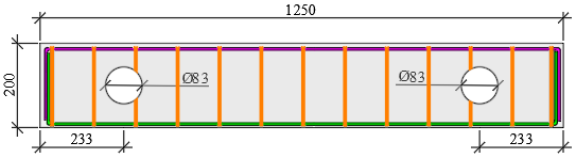
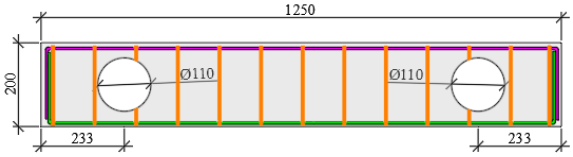
Atık Malzeme 1	Atık Malzeme 2	Atık Malzeme 3	Molarite	L/B	Priz Başlangıç Süresi (dk)	Basınç Mukavemeti (MPa)
%40 C sınıfı UK	%40 PTT	%20 SD	10	0.7	37	25

4.3. GPC ve GB Boşluklu-Boşluksuz Kirişlerin Statik Yükleme Sonuçları

4.3.1. GB kesme ve eğilme kiriş numuneleri

Statik yükleme altındaki GB boşluklu ve boşluksuz kesme ve eğilme kirişlerin davranışlarını incelemek için iki adet boşluksuz betonarme referans eğilme ve kesme kiriş, 6 adet farklı boşluk oranına sahip toplam 8 adet dikdörtgen kesitli 150 x 200 x 1250 mm boyutlarında betonarme kirişler üretilmiştir. Numune kirişlerin kodlamasında geleneksel betonarme sembolü N, geopolimer beton sembolü G, kesme davranışı gösteren kirişlerin sembolü S, eğilme davranışı gösteren kirişlerin sembolü B, statik yükleme (basit eğilme) testinin sembolü S, dinamik yükleme (çarpma) testinin sembolü D, boşluksuz (referans) kirişlerin sembolü R ve boşluk çapı (50, 83 ve 110 mm'lik) numara olarak verilmiştir. Çizelge 4.13'te gösterildiği gibi boşluklu kiriş numunelerin D/H oranı sırasıyla %25.0, %41.5 ve %55.0 olarak literatüre uygun olarak seçilmiştir (Mansur ve diğ., 2006; Aykac ve diğ., 2013 ve Özkılıç ve diğ., 2022). Üretilen numuneler yük taşıma kapasitesine kadar yüklenerek göçme modu, maksimum yük taşıma kapasitesi, deplasman, süneklik, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasiteleri incelenmiştir.

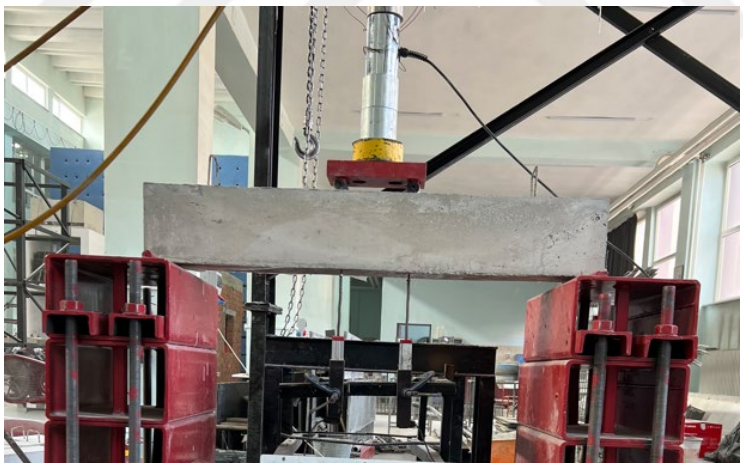
Çizelge 4.13. GB kirişleri

Numara	Kiriş Tipi	Numune kodu	Boşluk Çapı/ Kiriş Yüksekliği (D/H)	Kiriş gösterişi
1	Kesme	NSS-R	-	
2	Kesme	NSS-50	0.250	
3	Kesme	NSS-83	0.415	
4	Kesme	NSS-110	0.550	
5	Eğilme	NBS-R	-	
6	Eğilme	NBS-50	0.250	
7	Eğilme	NBS-83	0.415	
8	Eğilme	NBS-110	0.550	

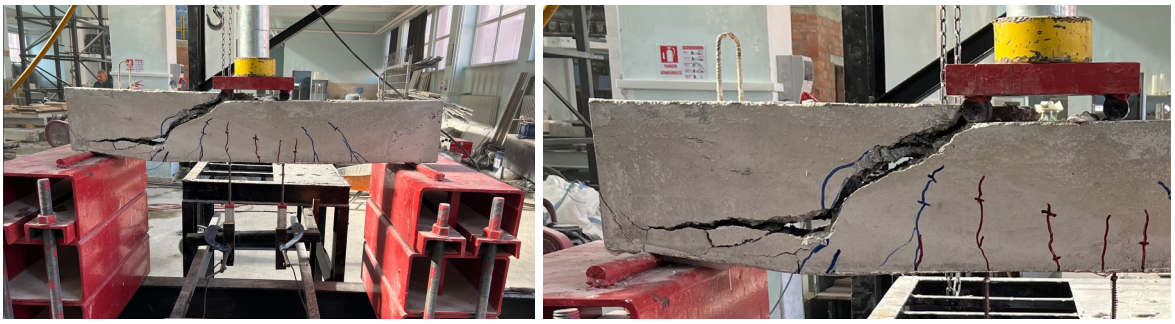
4.3.1.1. GB kesme kiriş numuneleri

1) NSS-R Kesme referans kiriş

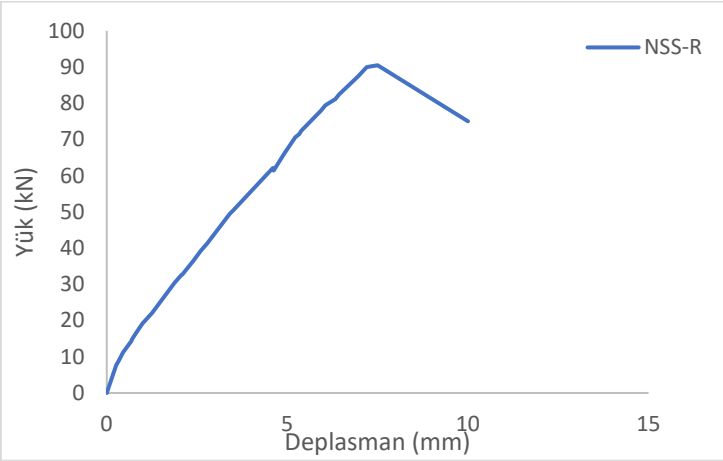
Bu deney numunesi kesme davranışı göstermesi beklenen boşluksuz referans kiriş olarak tasarlanmış ve test edilmiştir. Yüklemeler, yük ve deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme esnasında ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlağı olarak 41 kN yükte oluşmuştur. 50 kN yükte kesme bölgesinde ilk çatlak oluşmuş ve eğilme bölgesindeki çatlaklar oluşmaya ve ilerlemeye devam etmişlerdir. Kiriş numunesi planladığı gibi 90.50 kN yüküne ulaştığında kirişin sol mesnet kısmında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Referans kesme kirişi olarak elde edilen bütün sonuçlar (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.14'te verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.18- 4.19)'de gösterilmiştir. NSS-R numune kirişin deney esnasında kayıt edilen yük-deplasman grafiği Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. (NSS-R) Nolu kiriş numunesi



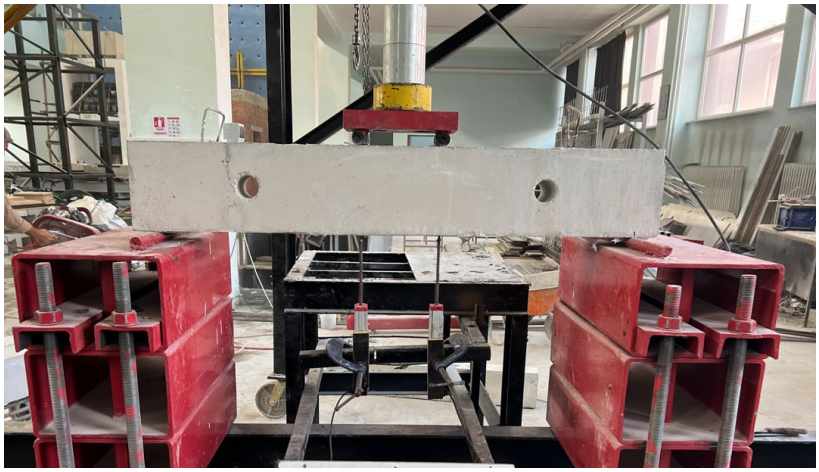
Şekil 4.19. (NSS-R) Nolu kiriş numunenin göçme modu



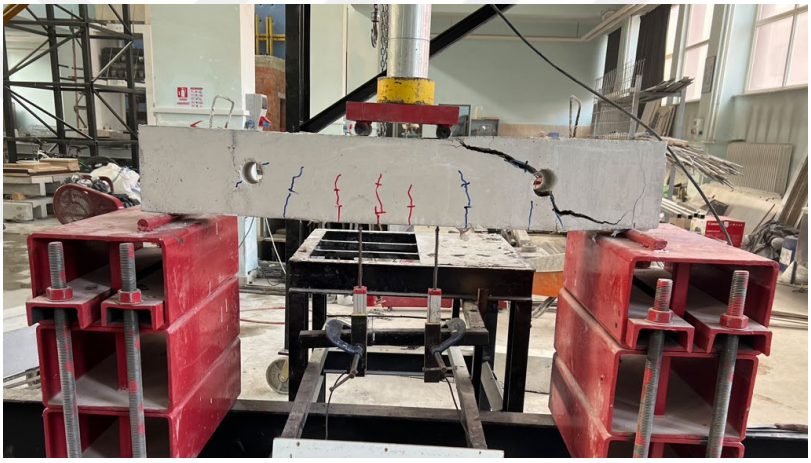
Şekil 4.20. (NSS-R) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

2) NSS-50 Numune kirişi

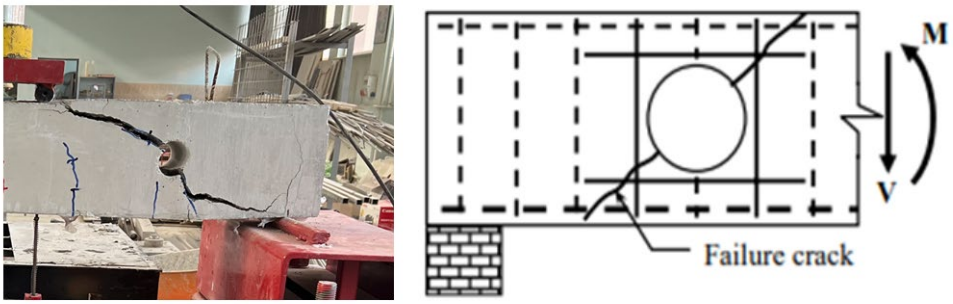
Bu kesme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı %25.0 olacak şekilde 50 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. Kiriş numunesi yüklenirken 31 kN yüke ulaştığında kirişin açıklığında (eğilme bölgesinde) ilk çatlak oluşmuştur. Yük 43 kN'a ulaştığında ise kirişin mesnet bölgesinde ilk kesme çatlağı oluşmuş ve boşluğun çevresinde de çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Bu kirişin maksimum yük taşıma kapasitesi 61.07 kN olarak ölçülmüştür. Bu değer kesme referans kirişinin maksimum yük kapasitesinin %67'si olarak belirlenmiştir. 50 mm boşluk çapına ve %25.0 D/H oranına sahip kirişin başlangıç rijitliği 15.65 kN/mm olarak belirlenmiştir. Bu değer referans kesme kirişi başlangıç rijitliğinin %86'ine karşılık gelmektedir. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.23 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Beam tipi göçme modunu göstermiştir. NSS-50 kirişinin yüklenmesi sonucu elde edilen sonuçlar (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.14 ve 4.15'te verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve deneyden sonraki durumu Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de gösterilmiştir. NSS-50 numune kirişinin deney esnasında kayıt edilen yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.21. (NSS-50) Nolu kiriş numunesi

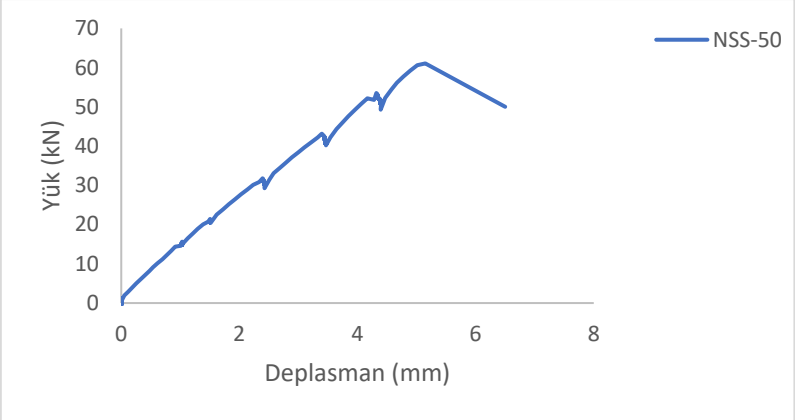


Şekil 4.22. (NSS-50) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.23. NSS-50 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



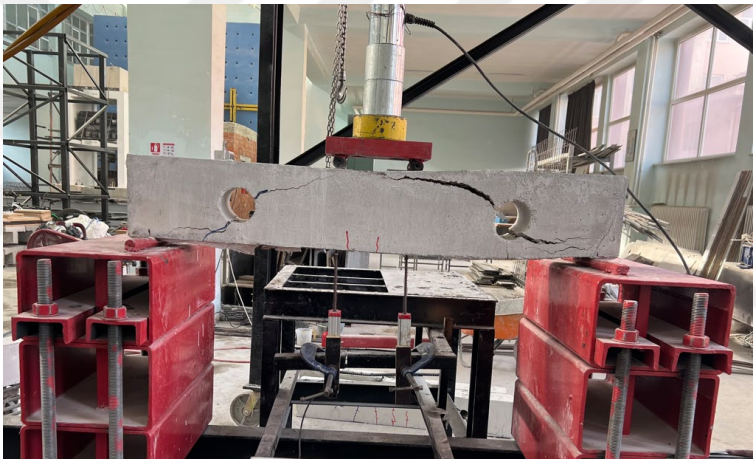
Şekil 4.24. (NSS-50) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

3) NSS-83 Numune kirişi

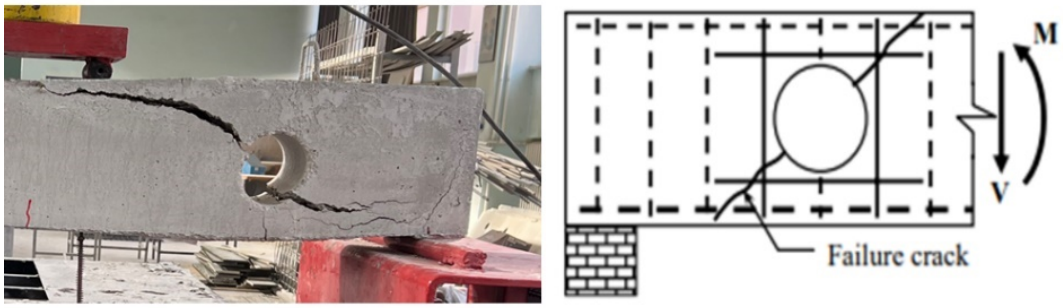
NSS-83 kodlu kesme kirişi numunesine D/H oranı % 41.5 olacak şekilde 83 mm'lik bir boşluk açılmış ve teste tabi tutulmuştur. Kiriş numunesi 32 kN'luk yüke ulaştığında hem eğilme bölgesinde hem de boşluğun çevresinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Kiriş numunesi yüklenmeye devam edilmiş ve yük 41.46 kN'ye ulaşınca kiriş maksimum kapasitesine ulaşarak göçme gözlenmiştir. NSS-83 kodlu kirişin yük taşıma kapasitesi referans kirişin yük taşıma kapasitesinin %45'ine ulaşmıştır. Deney elemanının başlangıç rijitliği değeri ise 16.21 kN/mm olarak hesaplanmış bu değer de referans numune başlangıç rijitlik değerinin %88'ine karşılık gelmektedir. Değerlerdeki anlamlı düşüşün boşluk çapının artmasına bağlanmıştır. Deney elemanının davranış kesme kirişi davranışı göstermiştir. NSS-83 kodlu kirişin elde edilen deney sonuçları (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.14 ve 4.15'te verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve deneyden sonraki durumu Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da gösterilmiştir. NSS-83 numune kirişin deney esnasında kayıt edilen yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Aynı şekilde Şekil 4.27' de görülen göçme mekanizması incelendiğinde bu kirişinde Beam tipi bir kırılma davranışı sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 4.25. (NSS-83) Nolu kiriş numunesi

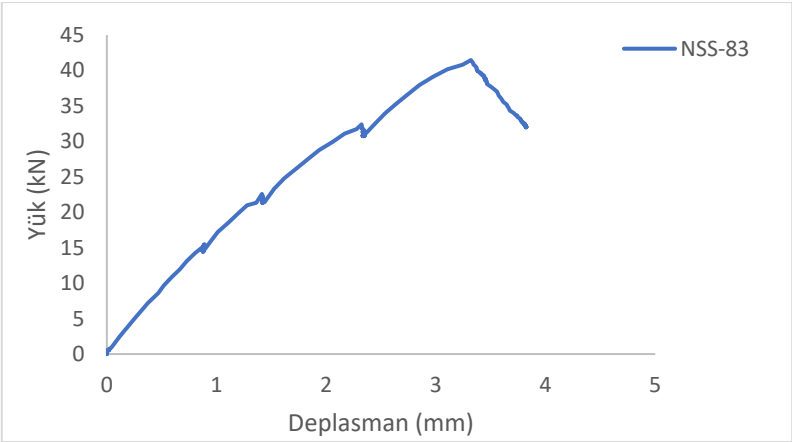


Şekil 4.26. (NSS-83) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

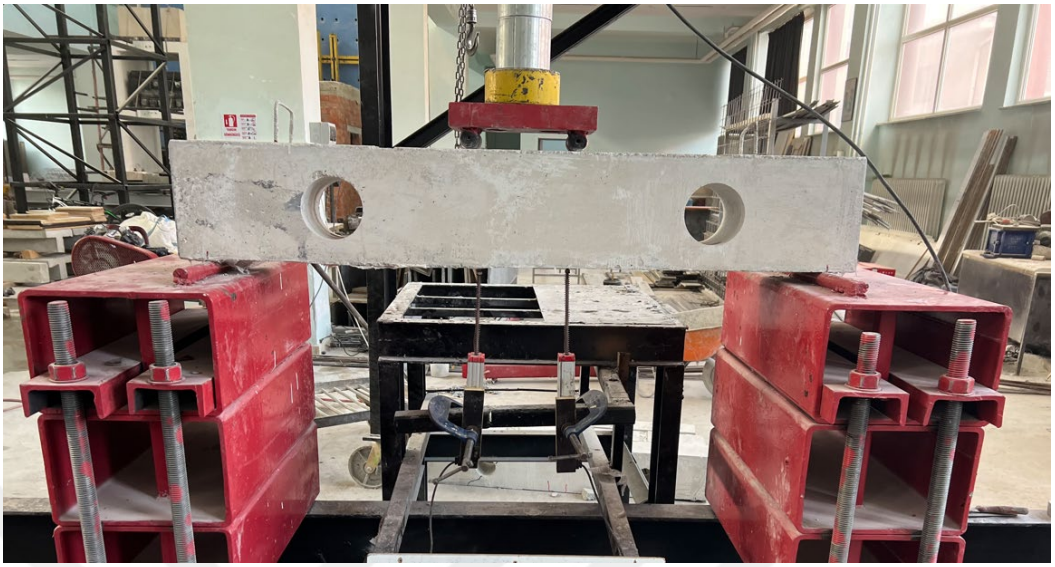
Şekil 4.27. NSS-83 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



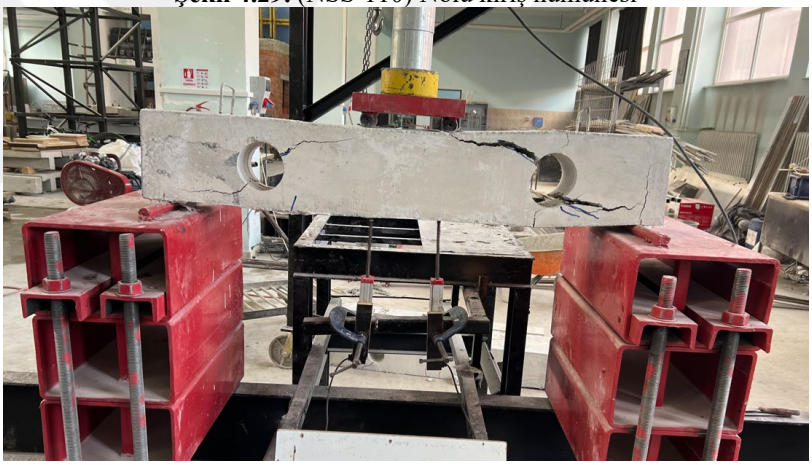
Şekil 4.28. (NSS-83) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

4) NSS-110 Numune kirişi

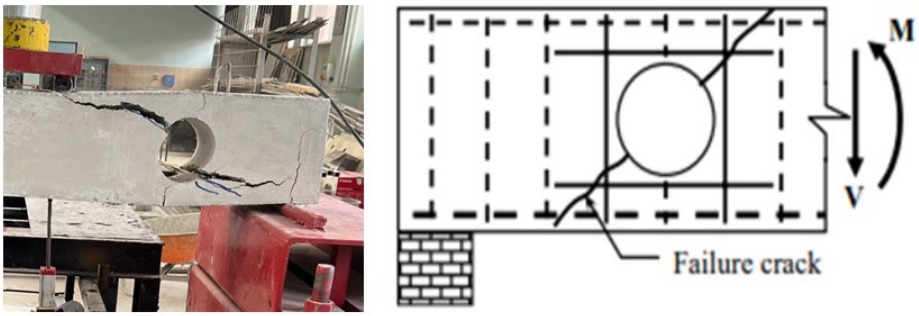
NSS-110 kodlu deney numunesine D/H oranı %55.0 olacak şekilde 110 mm'lik boşluklar her iki mesnet bölgesine açılarak numune teste tabi tutulmuştur. Deney esnasında kiriş üzerindeki yük 31 kN'a ulaştığında boşluğun çevresinde ilk çatlaklar oluşmuştur. Numune yüklenmeye devam etmiş ve numunenin maksimum yük kapasitesi olan 32.76 kN yüke ulaştığında göçme meydana gelmiştir. Deney numunesinin göçme yükü referans kirişin göçme yükünün %36'i olarak belirlenmiştir. Numunede deney esnasında başlangıç rijitliği 16.21 kN/mm olarak ölçülmüş olup bu değer referans kirişin başlangıç rijitliğinin %84'üne karşılık gelmektedir. NSS-83 numunesine benzer olarak bu kirişin de davranışı kesme davranışı olarak gözlemlenmiştir. Kirişin deneyden önce ve deneyden sonraki durumu Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Göçme mekanizması olarak yine aynı şekilde Beam tipi bir kırılma görülmüştür (Şekil 4.31). NSS-110 kirişin deney esnasında kayıt edilen sonuçları (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.14 ve 4.15'te verilmiştir. NSS-110 numune kirişin kayıt edilen yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.32'de verilmiştir.



Şekil 4.29. (NSS-110) Nolu kiriş numunesi

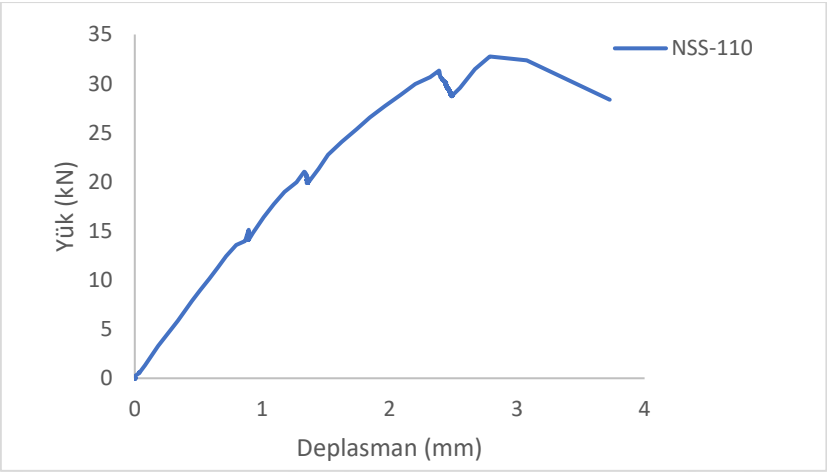


Şekil 4.30. (NSS-110) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.31. NSS-110 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



Şekil 4.32. (NSS-110) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği.

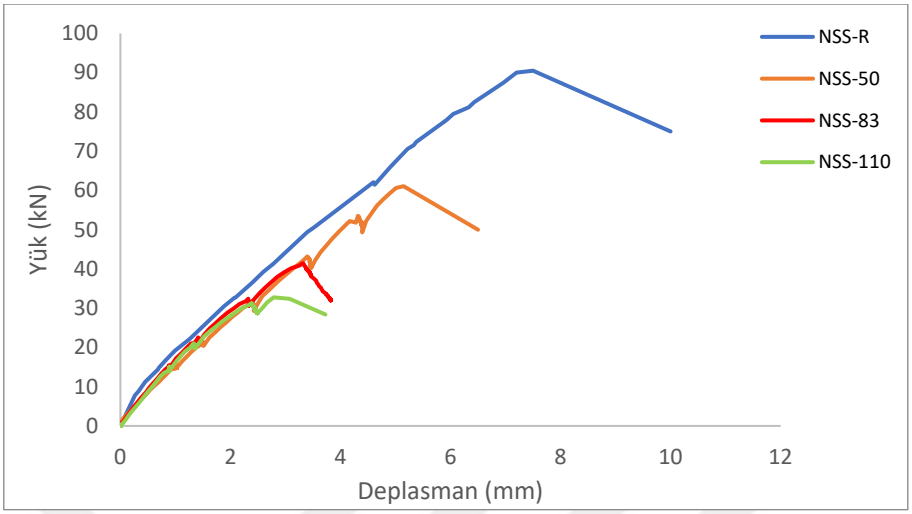
Çizelge 4.14 ve 4.15'te GB'dan üretilen kesme kirişlerinin sonuçları ve Şekil 4.33'te yük-deplasman grafikleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Geleneksel betondan üretilen kesme kirişlerinin sonuçları

Numune	Numune kodu	Maksimum Yük (P_{max}) (kN)	0.85 P_{max} (P_u) (kN)	P_u noktasında gelen deplasman değeri (mm)	
				δ_y	δ_u
1	NSS-R	90.50	76.92	-	-
2	NSS-50	61.07	51.90	-	-
3	NSS-83	41.46	35.24	-	-
4	NSS-110	32.76	27.84	-	-

Çizelge 4.15. Geleneksel betondan üretilen kesme kirişlerinin süneklik, rijitlik ve enerji tüketim değerleri

Numune	Numune kodu	Süneklik oranı (δ_u/δ_y)	Başlangıç rijitlik değeri (kN/mm)	Tüketilen enerji değeri (kj)	Göçme Mekanizması
1	NSS-R	1.00	18.16	-	Kesme
2	NSS-50	1.00	15.65	-	Kesme
3	NSS-83	1.00	16.21	-	Kesme
4	NSS-110	1.00	15.31	-	Kesme



Şekil 4.33. Geleneksel betondan üretilen kesme kiriş numune sonuçlarının karşılaştırılması

4.3.1.2. GB eğilme kiriş numuneleri

1) NBS-R Eğilme referans kirişi

Bu deney numunesi eğilme davranışı göstermesi beklenen ve buna uygun olarak tasarlanan boşluksuz bir kiriş olarak tasarlanmış ve test edilmiştir. Deney esnasında numunedeki ilk çatlak kirişin açıklığında orta bölgede eğilme çatlağı olarak 35 kN yükte oluşmuştur. 45 kN yükte ise kirişin kesme bölgesinde ilk çatlak oluşmuş ve eğilme bölgesindeki çatlaklar oluşmaya ve ilerlemeye devam etmiştir. Numune üzerindeki yük 94.0 kN'a ulaştığında kiriş yük taşıma kapasitesine ulaşmış olup kirişin çekme donatıları akmaya başlamıştır. Bu andaki düşey deplasman 8.2 mm olarak ölçülmüştür. Numunenin süneklik oranı ise 11.11 olarak belirlenmiş ve göçme mekanizması eğilme davranışı olarak görülmüştür. NBS-R referans kirişinin deney esnasında ulaştığı maksimum deplasman 79 mm, başlangıç rijitliği 17.11 kN/mm ve tüketilen enerji kapasitesi ise 4.0317 kj olarak ölçülmüştür. Kirişin deneyden önce ve deneyden sonraki durumu Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te gösterilmiştir. NBS-R kirişin deney esnasında elde edilen sonuçları (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.16 ve 4.17'de verilmiş olup yük-deplasman grafiği Şekil 4.36'da gösterilmiştir.

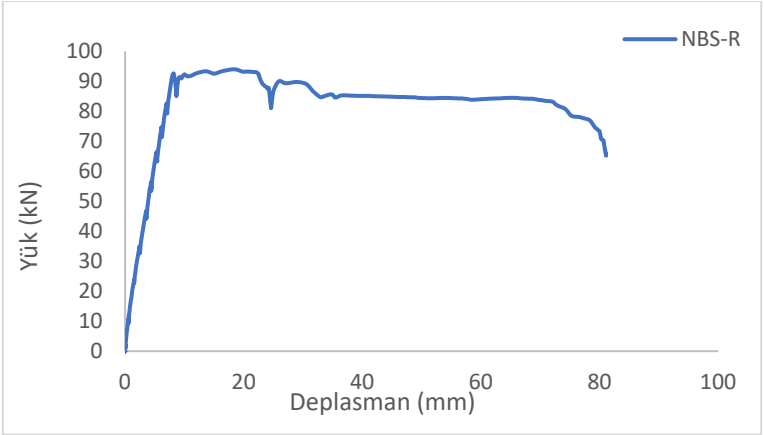


Şekil 4.34. (NBS-R) Nolu kiriş numunesi



(a) (b)

Şekil 4.35. (NBS-R) Nolu kiriş numunenin göçme mekanizması



Şekil 4.36. (NBS-R) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

2) NBS-50 Numune kirişi

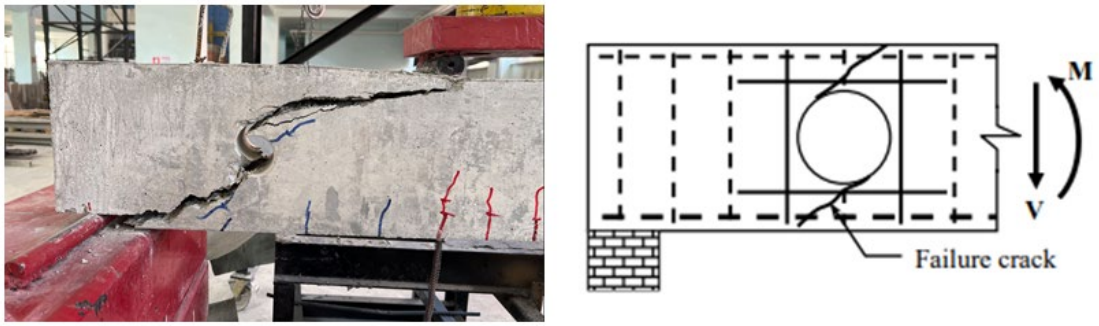
NBS-50 kiriş numunesine D/H oranı %25.0 olacak şekilde 50 mm'lik boşluk her iki mesnet bölgesine açılmış ve numune teste tabi tutulmuştur. Deney esnasında kiriş üzerindeki düşey yük 31 kN'a ulaştığında kiriş açıklığında ilk çatlak oluşmuştur. Düşey yük 50 kN'a ulaştığında numunenin mesnet bölgelerinde ilk kesme çatlağı oluşmuştur. Bu esnada mesnet bölgesindeki boşluğun çevresinde de çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Kiriş üzerindeki düşey yük 72.93 kN'a ulaştığında numunede göçme meydana gelmiş olup bu değer referans kirişin maksimum yük taşıma kapasitesinin %78'ine karşılık gelmektedir. Deney elemanının başlangıç rijitliği 15.63 kN/mm olarak ölçülmüş olup bu değer referans kirişteki başlangıç rijitliğinin %91.3'üne karşılık gelmektedir. Deney elemanı göçme mekanizması kesme kirişi davranışı şeklinde gerçekleşmiştir. Kirişin deneyden önce ve deneyden sonraki durumu Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de gösterilmiştir. Şekil 4.39 incelendiğinde boşluklu kiriş numunesi Frame tipi kırılmaya uğramış olduğu görülmektedir. NBS-50 kodlu deney numunesinden elde edilen sonuçlar (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.16 ve 4.17'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.40'ta verilmiştir.



Şekil 4.37. (NBS-50) Nolu kiriş numunesi

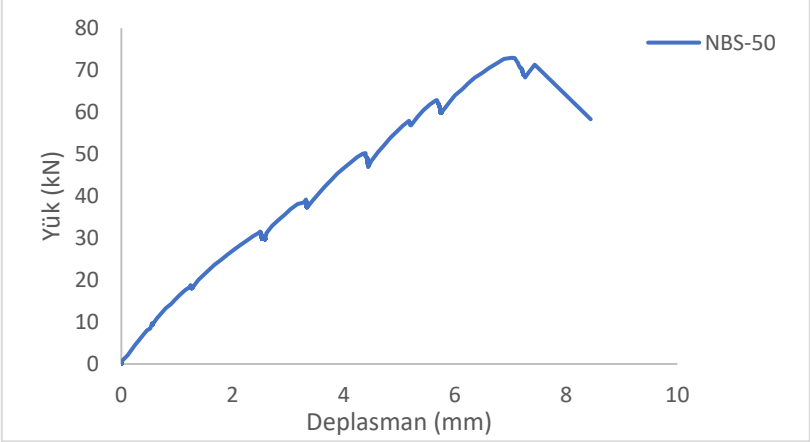


Şekil 4.38. (NBS-50) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

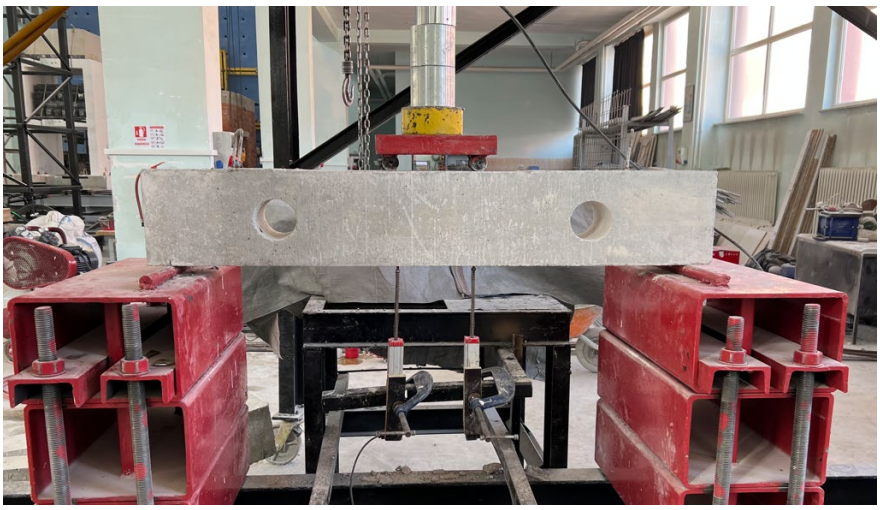
Şekil 4.39. NBS-50 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



Şekil 4.40. (NBS-50) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

3) NBS-83 Numune kirişi

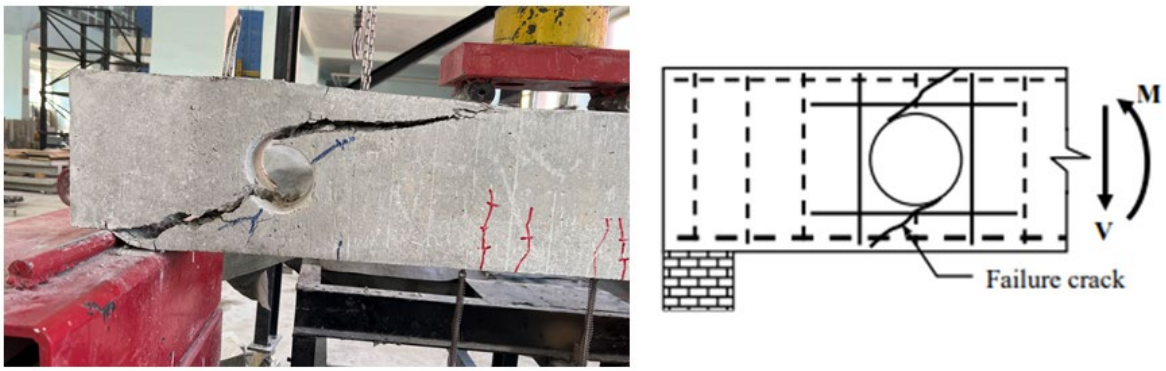
NBS-83 kodlu numuneye D/H oranı % 41.5 olacak şekilde mesnedin her iki tarafına 83 mm çapında boşluklar açılarak teste tabi tutulmuştur. Deney esnasında numune üzerindeki düşey yük 34 kN'a ulaştığında kirişin hem eğilme bölgesinde hem de kesme bölgesinde ve boşluğun çevresinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Numune yüklenmeye devam edilerek kirişin maksimum taşıma kapasitesi olan 75.19 kN'luk yüke ulaşılmıştır. Bu değer referans kirişin yük taşıma kapasitesinin %80'nine karşılık gelmektedir. Deney numunesinin başlangıç rijitliği değeri ise 16.77 kN/mm ile referans kirişin başlangıç rijitlik değerinin % 98.01'ine karşılık gelmektedir. Deney esnasında numune her ne kadar eğilme davranışı gösterecek donatı detaylarına sahip olsa da, mesnet bölgesindeki boşluklardan ötürü kesme kirişi davranışı göstererek sünek olmayan bir davranış göstermiştir. Kirişin deneyden önce ve deneyden sonraki durumu Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de gösterilmiştir. Numunenin göçme mekanizması ise Frame tipi bir davranış göstermiştir (Şekil 4.43). NBS-83 kirişinin deney esnasında elde edilen sonuçları (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.16 ve 4.17'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.44'te verilmiştir.



Şekil 4.41. (NBS-83) Nolu kiriş numunesi

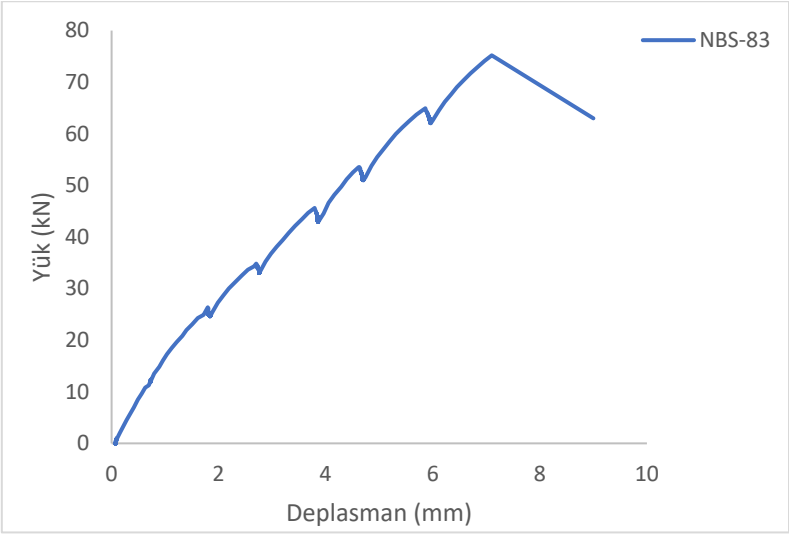


Şekil 4.42. (NBS-83) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

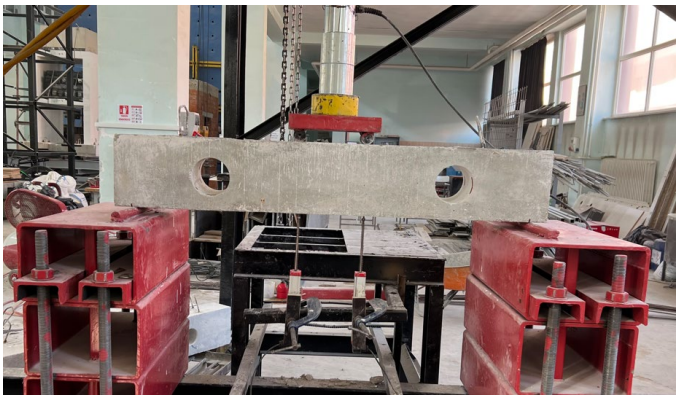
Şekil 4.43. NBS-83 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



Şekil 4.44. (NBS-83) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

4) NBS-110 Numune kirişi

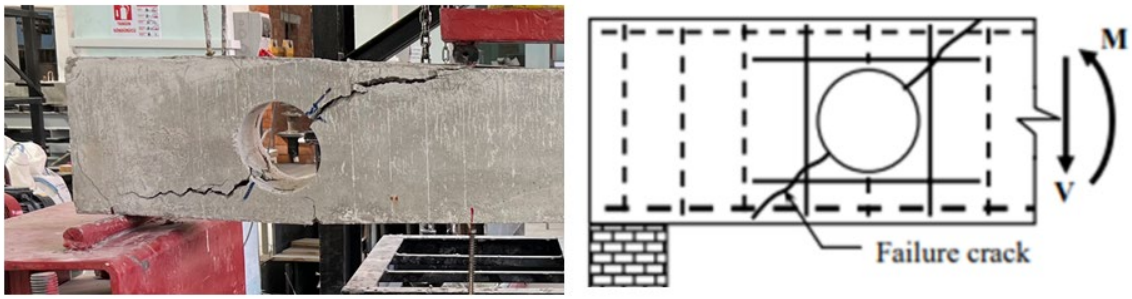
NBS-110 kodlu deney numunesine D/H oranı %55.0 olacak 110 mm'lik boşluklar mesnet bölgelerine açılarak teste tabi tutulmuştur. Numunedeki düşey yük 22 kN'a ulaştığında boşluğun çevresinde ilk çatlak oluşmuştur. Yükleme devam ederken düşey yük numunenin maksimum yük kapasitesi olan 40.25 kN'a ulaştığı anda göçme meydana gelmiştir. Bu değer yaklaşık olarak referans kirişin yük taşıma kapasitesinin %43'üne karşılık gelmektedir. Aynı şekilde numunenin başlangıç rijitlik değeri ise 15.21 kN/mm olarak hesaplanmış ve bu değer de referans numunenin %88.89'una karşılık gelmektedir. Deney numunesi kesme davranışı göstermiş olup NBS-83 ve NBS-50 numunelerine göre bir miktar daha fazla sünek davranmıştır. Kirişin deneyden önce ve deneyden sonraki durumu Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da gösterilmiştir. Göçme mekanizması olarak da ve Beam tipi bir kırılma göstermiştir (Şekil 4.47). NBS-83 kirişin deneyde elde edilen sonuçları (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.16 ve 4.17'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.48'de verilmiştir.



Şekil 4.45. (NBS-110) Nolu kiriş numunesi

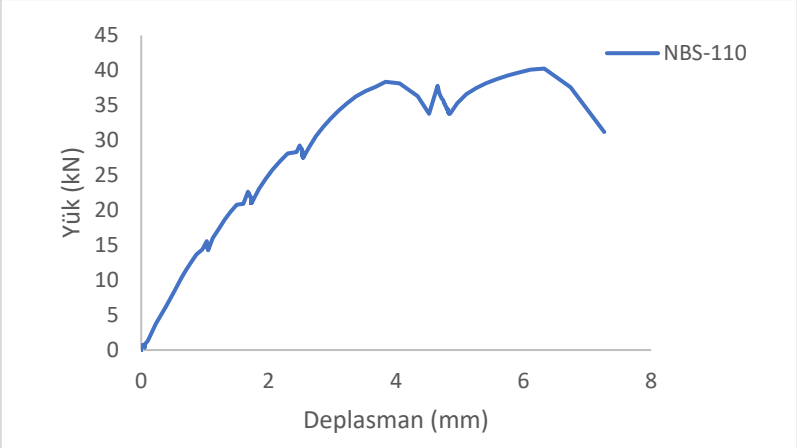


Şekil 4.46. (NBS-110) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.47. NBS-110 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



Şekil 4.48. (NBS-110) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

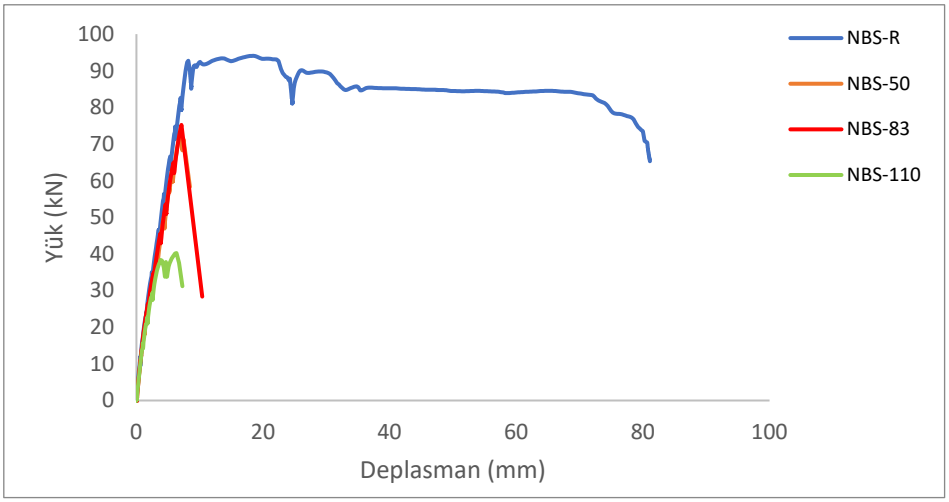
Çizelge 4.16 ve 4.17'de GB'dan üretilen eğilme kirişlerinin sonuçları ve Şekil 4.49'da yük-deplasman grafikleri gösterilmiştir.

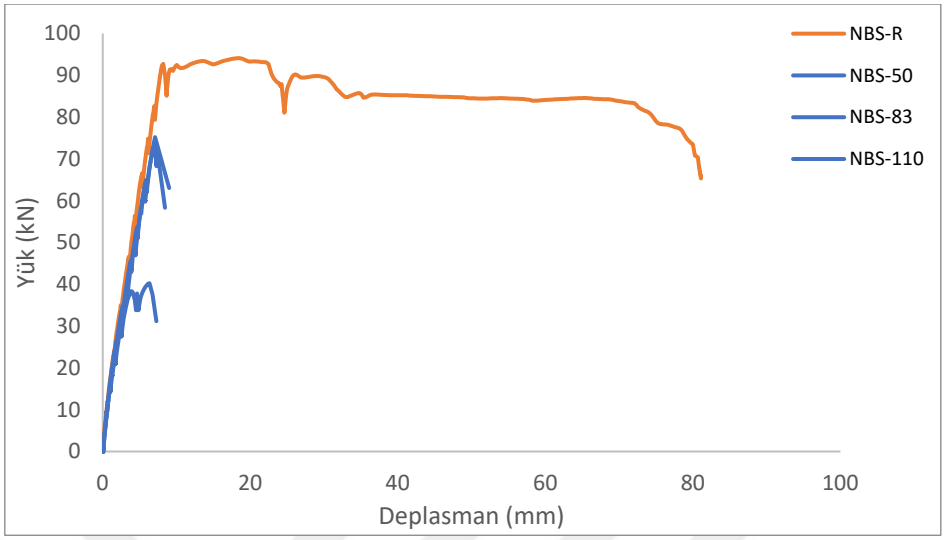
Çizelge 4.16. Geleneksel betondan üretilen eğilme kirişlerinin sonuçları

Numune	Numune kodu	Maksimum Yük (P_{max}) (kN)	0.85 P_{max} (P_u) (kN)	P_u noktasında gelen deplasman değeri (mm)	
				δ_y	δ_u
5	NBS-R	94.00	79.90	6.70	74.50
6	NBS-50	72.93	61.99	-	-
7	NBS-83	75.19	63.91	-	-
8	NBS-110	40.25	34.21	-	-

Çizelge 4.17. Geleneksel betondan üretilen eğilme kirişlerinin süneklik, rijitlik ve enerji tüketim değerleri

Numune	Numune kodu	Süneklik oranı (δ_u/δ_y)	Başlangıç rijitlik değeri (kN/mm)	Tüketilen enerji değeri (kj)	Göçme Mekanizması
5	NBS-R	11.11	17.11	4.03	Eğilme
6	NBS-50	1.00	15.63	-	Kesme
7	NBS-83	1.00	16.77	-	Kesme
8	NBS-110	1.00	15.21	-	Kesme





Şekil 4.49. Geleneksel betondan üretilen eğilme kiriş numune sonuçlarının karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde GB'dan üretilen kesme ve eğilme davranışı gösteren betonarme kirişlere farklı D/H oranları ile mesnet bölgelerine açılan boşluklar açılarak statik yükleme altında bu kirişlerin davranışları araştırılmıştır. Dolayısıyla numunelerde donatı detaylandırması (kesme ve eğilme) ile boşluk çapları haricinde diğer parametreler (beton sınıfı, donatı sınıfı, kiriş boyutları) sabit tutulmuştur. Bu kapsamda küçük, orta ve büyük çaplı (50, 83 ve 110 mm) boşluklar kirişlerin kesme bölgesinde mesnete yakın bölgede açılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Mevcut betonarme kesme kirişlerinden D/H oranı %25.0, %41.5 ve %55.0 olan boşluklu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri referans kesme kirişine göre sırasıyla %32, %54 ve %64 azalma gözlenmiştir (Şekil 4.33).
- Aynı şekilde D/H oranı %25.0, %41.5 ve %55.0 olan boşluklu kesme kirişlerinin başlangıç rijitlik değerleri de referans kiriş başlangıç rijitliğine göre sırasıyla %13.8, % 10 ve %15.6 oranında azalmıştır. Yük taşıma kapasitesine göre başlangıç rijitliklerindeki bu düşüş daha az dikkat çekmektedir.
- Geleneksel betondan üretilen kesme kirişlerinin göçme davranışları incelendiğinde numunelerin tümü gevrek kırılma mekanizması göstermiş olup, kirişlere açılan boşluklar numunelere ilave bir süneklik yada enerji tüketim kapasitesi katkısı göstermemiştir.

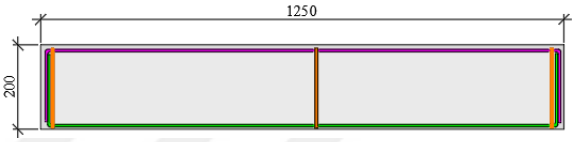
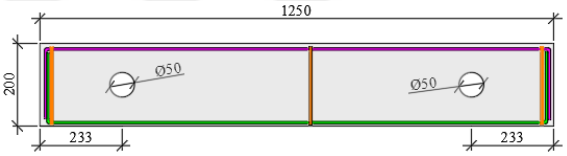
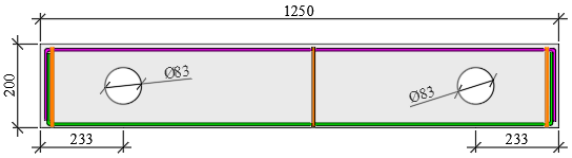
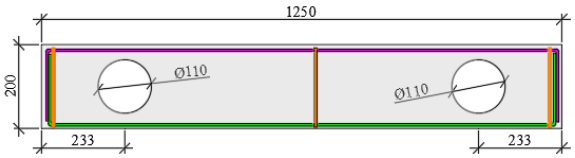
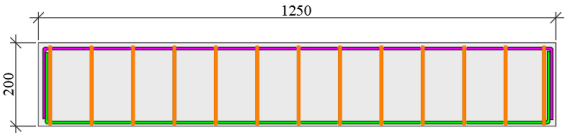
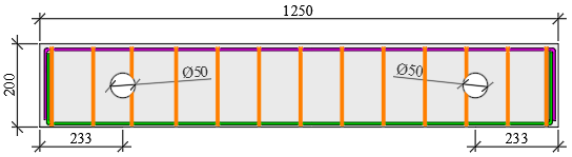
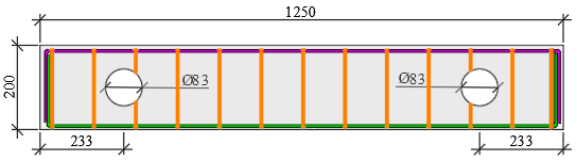
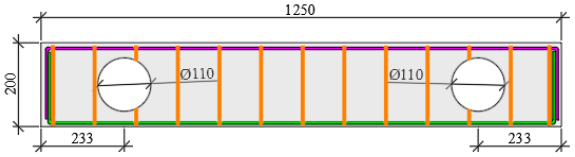
- Mevcut betonarme eğilme kirişlerinden D/H oranı %25.0, %41.5 ve %55.0 olan boşluklu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri referans eğilme kirişine göre sırasıyla %22, %20 ve %57 azalma gözlenmiştir (Şekil 4.49).
- Eğilme davranışı gösterecek şekilde tasarlanan numunelere mesnet bölgesine açılan farklı D/H oranlarına sahip boşlukların bulunması, kirişlerin eğilme davranışından çıkıp kesme davranışına geçmesine ve gevrek bir şekilde sünek olmayan göçme mekanizması göstermelerine sebep olmaktadır.
- Benzer şekilde D/H oranı %25.0, %41.5 ve %55.0 olan boşluklu eğilme kirişlerinin başlangıç rijitlik değerleri de referans kiriş eğilme başlangıç rijitliğine göre sırasıyla %9, % 2 ve %11 oranında azalmıştır. Yük taşıma kapasitesine göre başlangıç rijitliklerindeki bu düşüş daha az dikkat çekmektedir.
- Boşluklu eğilme kirişlerinin enerji tüketme kapasitelerinde ise oldukça fazla bir düşüş gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise kirişlere açılan boşluklar sebebiyle eğilme davranışı gösteren kirişin, kesme davranışına geçmesi olarak açıklanabilir.
- Betonarme kesme kirişlerindeki açılan boşluklar sebebiyle meydana gelen yük kapasitesindeki azalmalar ortalama %51, betonarme eğilme kirişlerindeki ise kapasite azalımı %33 mertebesinde elde edilmiştir. Bu yüzden betonarme boşluklu kirişlerde sıklaştırma bölgesindeki etriye aralığı kirişin davranışında önemli bir faktördür.

4.3.2. GPC kesme ve eğilme kiriş numuneleri

Statik yükleme altındaki GPC boşluklu ve boşluksuz kesme ve eğilme kirişlerin davranışlarını incelemek için iki adet boşluksuz GPC referans eğilme ve kesme kirişi ile 6 adet farklı boşluk oranına sahip toplam 8 adet dikdörtgen kesitli 150 x 200 x 1250 mm boyutlarında GPC kirişler üretilmiştir. Çizelge 4.18'de gösterildiği gibi boşluklu kiriş numunelerin D/H oranı sırasıyla %25.0, %41.5 ve %55.0 olarak literatüre uygun olarak seçilmiştir (Mansur ve diğ., 2006; Aykac ve diğ., 2014; ve Özkılıç ve diğ., 2022). Üretilen

numuneler yük taşıma kapasitesine kadar yüklenerek göçme modu, maksimum yük taşıma kapasitesi, deplasman, süneklik, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasiteleri incelenmiştir.

Çizelge 4.18. GPC kiriş numunelerin detayları

Numara	Kiriş Tipi	Numune kodu	Boşluk Çapı/ Kiriş Yüksekliği (D/H)	Kiriş Gösterişi
1	Kesme	GSS-R	-	
2	Kesme	GSS-50	0.250	
3	Kesme	GSS-83	0.415	
4	Kesme	GSS-110	0.550	
5	Eğilme	GBS-R	-	
6	Eğilme	GBS-50	0.250	
7	Eğilme	GBS-83	0.415	
8	Eğilme	GBS-110	0.550	

4.3.2.1. GPC kesme kiriş numuneleri

1) GSS-R Kesme referans kiriş

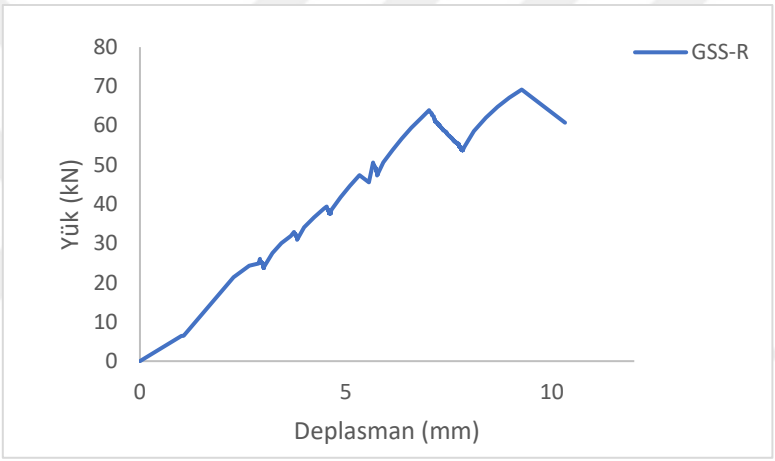
Bu deney numunesi kesme davranışı göstermesi beklenen boşluksuz geopolimer referans kiriş olarak tasarlanmış ve test edilmiştir. Yüklemeler, yük ve deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme esnasında ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlağı olarak 26 kN yükte oluşmuştur. Yükleme devam ederken eğilme bölgesindeki çatlaklar oluşmaya ve ilerlemeye devam etmişlerdir. Kiriş numunesi 69.18 kN yüküne ulaştığında kirişin sağ mesnet kısmında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Geopolimer referans kesme kirişi olarak elde edilen bütün sonuçlar (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.19 ve 4.20'de verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.50- 4.51)'de gösterilmiştir. GSS-R numune kirişin deney esnasında kayıt edilen yük-deplasman grafiği Şekil 4.52'de gösterilmiştir.



Şekil 4.50. (GSS-R) Nolu kiriş numunesi



Şekil 4.51. (GSS-R) Nolu kiriş numunenin göçme modu



Şekil 4.52. (GSS-R) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

2) GSS-50 Numune kirişi

Bu geopolimer kesme kirişi numunesinin mesnet bölgesinde D/H = %25.0 olarak 50 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. Kiriş numunesi yüklenirken 32 kN yüke ulaştığında kirişin açıklığında (eğilme bölgesinde) ilk çatlak oluşmuştur. Bu kirişin maksimum yük taşıma kapasitesi 39.75 kN olarak ölçülmüştür. Bu değer kesme referans kirişinin maksimum yük kapasitesinin %57'si olarak belirlenmiştir. 50 mm boşluk çapına ve %25.0 D/H oranına sahip kirişin başlangıç rijitliği 14.20 kN/mm olarak belirlenmiştir. Bu değer referans kesmen kirişi başlangıç rijitliğinin %220'sine karşılık gelmektedir. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.55 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre

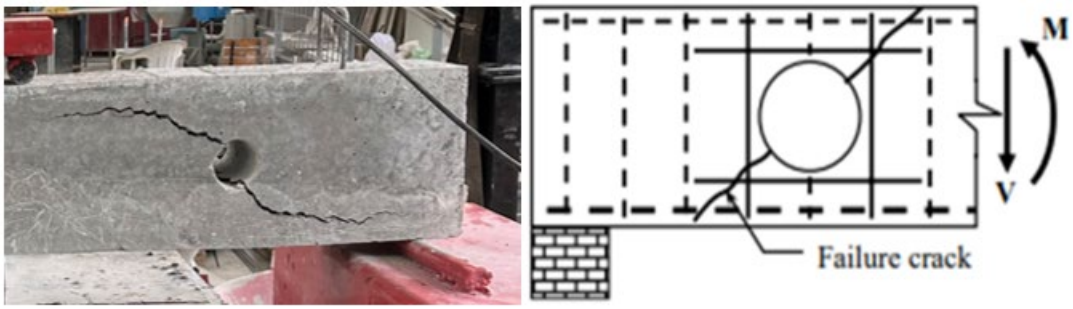
Beam tipi göçme modunu göstermiştir. GSS-50 kirişinin yüklenmesi sonucu elde edilen sonuçlar (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.19 ve 4.20'de verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve deneyden sonraki durumu Şekil 4.53 ve 4.54'te gösterilmiştir. GSS-50 numune kirişinin deney esnasında kayıt edilen yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.56'da verilmiştir.



Şekil 4.53. (GSS-50) Nolu kiriş numunesi

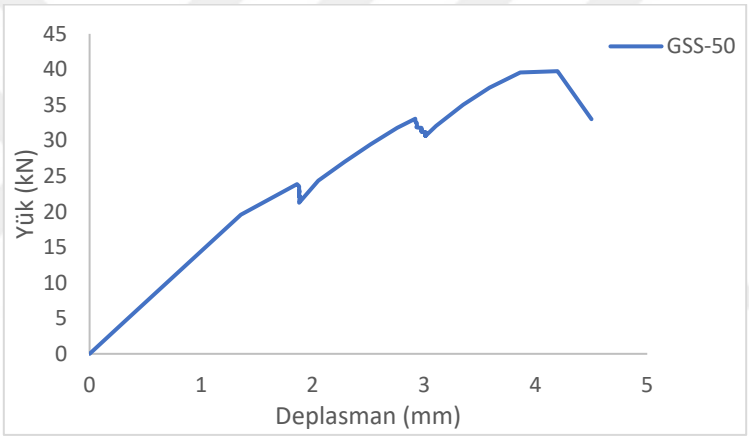


Şekil 4.54. (GSS-50) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.55. GSS-50 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



Şekil 4.56. (GSS-50) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

3) GSS-83 Numune kirişi

GSS-83 kodlu geopolimer kesme kirişi numunesine D/H oranı % 41.5 olacak şekilde 83 mm'lik bir boşluk açılmış ve teste tabi tutulmuştur. Kiriş numunesi yük 23.70 kN'ye ulaşınca kiriş maksimum kapasitesine ulaşarak göçme gözlenmiştir. GSS-83 kodlu kirişin yük taşıma kapasitesi referans kirişin yük taşıma kapasitesinin %34'üne ulaşmıştır. Deney elemanının başlangıç rijitliği değeri ise 10.32 kN/mm olarak hesaplanmış bu değer de referans numune başlangıç rijitlik değerinin %160'ına karşılık gelmektedir. Deney elemanının yük taşıma kapasitesindeki anlamlı düşüşün boşluk çapının artmasına bağlanmıştır. Deney esnasında davranış kesme kirişi davranışı göstermiştir. Kirişin deneyden önce ve deneyden sonraki durumu Şekil 4.57 ve 4.58'de gösterilmiştir. GSS-83

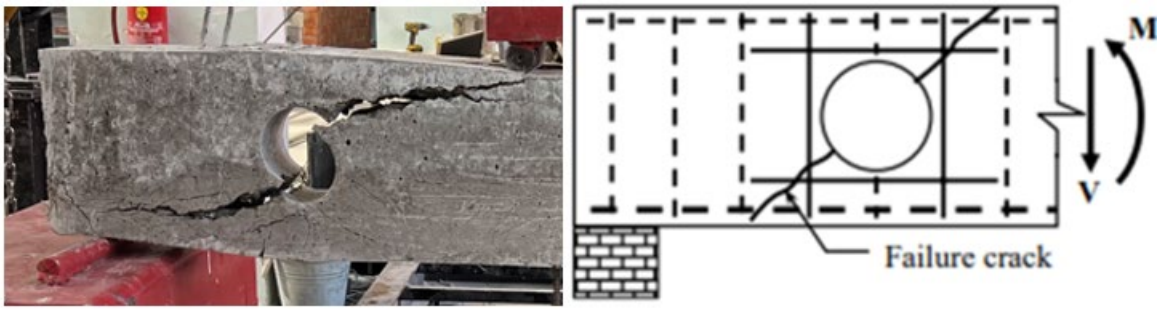
kodlu kirişin elde edilen deney sonuçları (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.19 ve 4.20'de verilmiştir. GSS-83 numune kirişin deney esnasında kayıt edilen yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.60'da gösterilmiştir. Aynı şekilde Şekil 4.59'da görülen göçme mekanizması incelendiğinde bu kirişinde Beam tipi bir kırılma davranışı sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 4.57. (GSS-83) Nolu kiriş numunesi

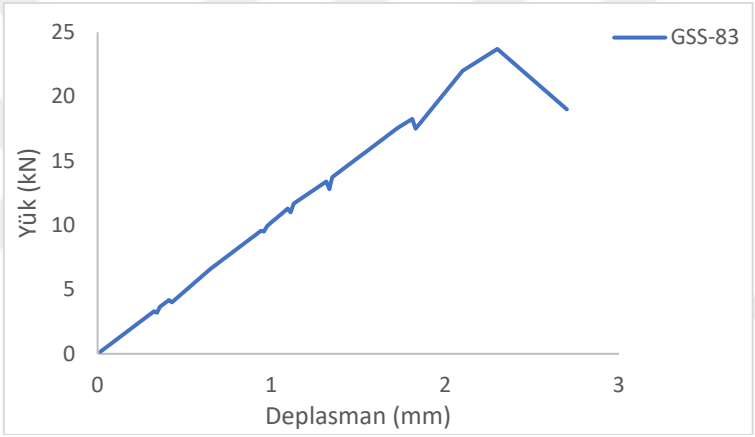


Şekil 4.58. (GSS-83) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.59. GSS-83 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması

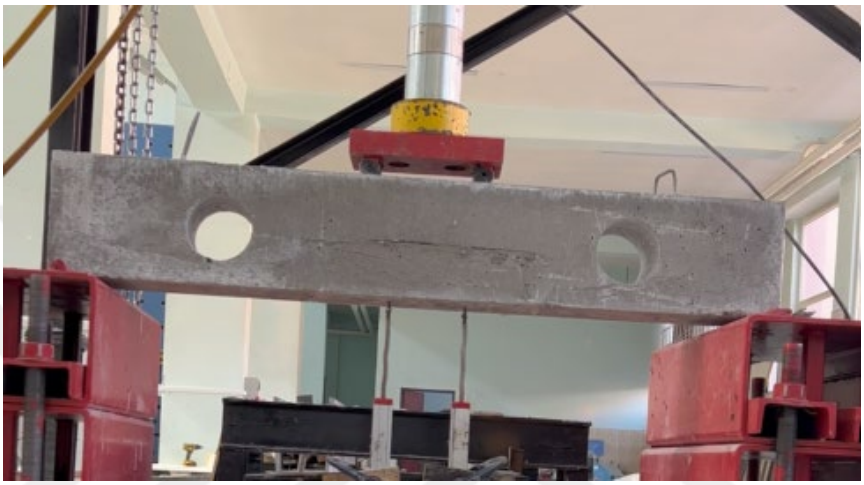


Şekil 4.60. (GSS-83) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

4) GSS-110 Numune kirişi

GSS-110 kodlu deney numunesine D/H oranı %55.0 olacak şekilde 110 mm'lik boşluklar her iki mesnet bölgesine açılarak numune teste tabi tutulmuştur. GSS-110 kiriş numunenin maksimum yük kapasitesi olan 22 kN yüke ulaştığında göçme meydana gelmiştir. Deney numunesinin göçme yükü referans kirişin göçme yükünün %31'i olarak belirlenmiştir. Numunede deney esnasında başlangıç rijitliği 12.2 kN/mm olarak ölçülmüş olup bu değer referans kirişin başlangıç rijitliğinin %189'una karşılık gelmektedir. GSS-83 numunesine benzer olarak bu kirişin de davranışı kesme davranışı olarak gözlemlenmiştir. Kirişin deneyden önce ve deneyden sonraki durumu Şekil 4.61 ve 4.62'de gösterilmiştir.

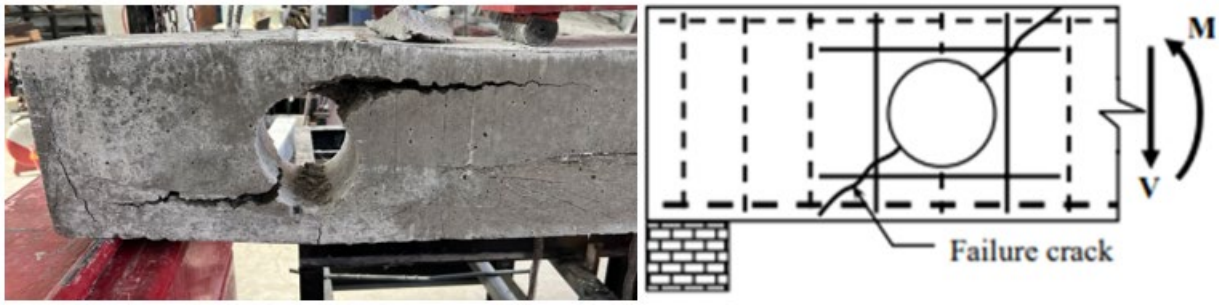
Göçme mekanizması olarak yine aynı şekilde Beam tipi bir kırılma görülmüştür (Şekil 4.63). GSS-110 kirişin deney esnasında kayıt edilen sonuçları (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.19 ve 4.20'de verilmiştir. GSS-110 numune kirişin kayıt edilen yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.64'te verilmiştir.



Şekil 4.61. (GSS-110) Nolu kiriş numunesi

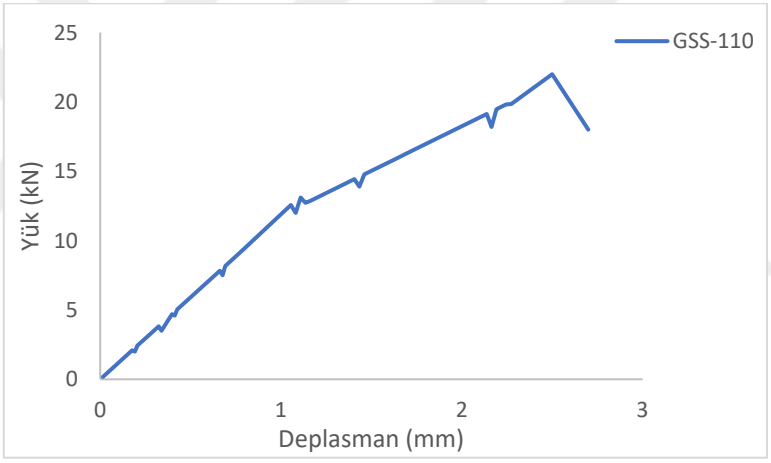


Şekil 4.62. (GSS-110) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.63. GSS-50 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



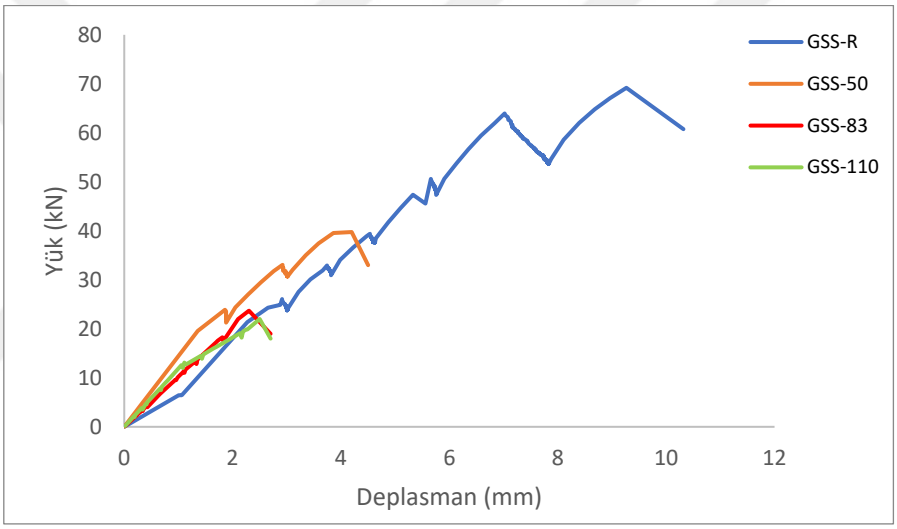
Şekil 4.64. (GSS-110) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

Çizelge 4.19. Geopolimer betondan üretilen kesme kirişlerinin sonuçları

Numune	Numune kodu	Maksimum Yük (P_{max}) (kN)	0.85 P_{max} (P_u) (kN)	P_u noktasında gelen deplasman değeri (mm)	
				δ_y	δ_u
1	GSS-R	69.18	58.80	-	-
2	GSS-50	39.75	33.78	-	-
3	GSS-83	23.7	20.14	-	-
4	GSS-110	22	18.70	-	-

Çizelge 4.20. Geopolimer betondan üretilen kesme kirişlerinin süneklik, rijitlik ve enerji tüketim değerleri

Numune	Numune kodu	Süneklik oranı (δ_u/δ_y)	Başlangıç rijitlik değeri (kN/mm)	Tüketilen enerji değeri (kj)	Göçme Mekanizması
1	GSS-R	1.00	6.43	-	Kesme
2	GSS-50	1.00	14.20	-	Kesme
3	GSS-83	1.00	10.32	-	Kesme
4	GSS-110	1.00	12.20	-	Kesme



Şekil 4.65. Geopolimer betondan üretilen kesme kiriş numune sonuçlarının karşılaştırılması

4.3.2.2. GPC eğilme kiriş numuneleri

1) GBS-R Numune kirişi

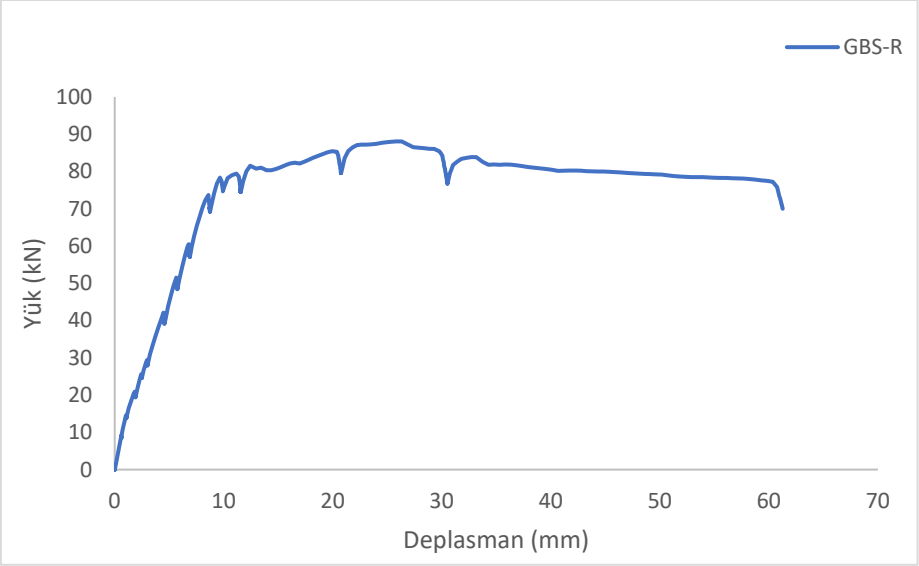
Bu deney numunesi eğilme davranışı göstermesi beklenen ve buna uygun olarak tasarlanan boşluksuz bir geopolimer kiriş olarak tasarlanmış ve test edilmiştir. Deney esnasında numunedeki ilk çatlak kirişin açıklığında orta bölgede eğilme çatlağı olarak 29 kN yükte oluşmuştur. 51 kN yükte ise kirişin kesme bölgesinde ilk çatlak oluşmuş ve eğilme bölgesindeki çatlaklar oluşmaya ve ilerlemeye devam etmiştir. Numune üzerindeki yük 88.07 kN'a ulaştığında kiriş yük taşıma kapasitesine ulaşmış olup kirişin çekme donatıları akmaya başlamıştır. Numunenin süneklik oranı ise 6.62 olarak belirlenmiş ve göçme mekanizması eğilme davranışı olarak görülmüştür. GBS-R referans kirişinin başlangıç rijitliği 14.51 kN/mm ve tüketilen enerji kapasitesi ise 2.4737 kj olarak ölçülmüştür. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki halini Şekil 4.66 ve Şekil 4.67'de gösterilmiştir. GBS-R kirişin deney esnasında elde edilen sonuçları (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.21 ve 4.22'de verilmiş olup yük-deplasman grafiği Şekil 5.68'de gösterilmiştir.



Şekil 4.66. (GBS-R) Nolu kiriş numunesi



Şekil 4.67. (GBS-R) Nolu kiriş numunenin göçme modu



Şekil 4.68. (GBS-R) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

2) GBS-50 Numune kirişi

GBS-50 kiriş numunesine D/H oranı %25.0 olacak şekilde 50 mm'lik boşluk her iki mesnet bölgesine açılmış ve numune teste tabi tutulmuştur. Deney esnasında kiriş üzerindeki düşey yük 23 kN'a ulaştığında kiriş açıklığında ilk çatlak oluşmuştur. Düşey yük 32 kN'a ulaştığında numunenin mesnet bölgelerinde ilk kesme çatlağı oluşmuştur. Bu esnada mesnet bölgesindeki boşluğun çevresinde de çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Kiriş üzerindeki düşey yük 86.59 kN'a ulaştığında numunede göçme meydana gelmiş olup bu

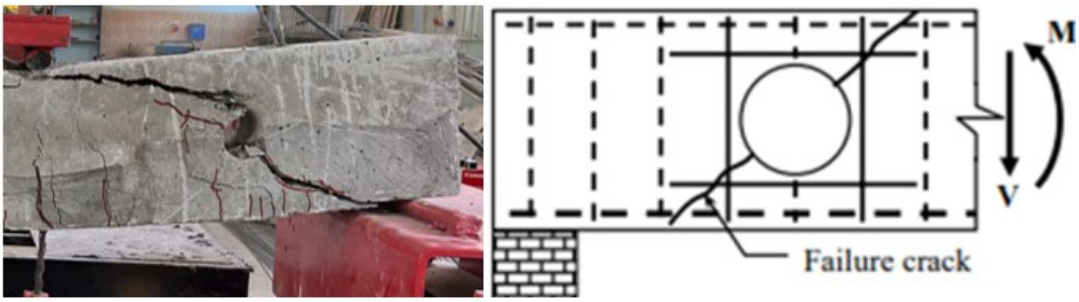
değer referans kirişin maksimum yük taşıma kapasitesinin %98'ine karşılık gelmektedir. Deney elemanının süneklik oranı 6.46, enerji kapasite değeri 3.5651 kj ve başlangıç rijitliği 11.51 kN/mm olarak ölçülmüş olup bu değer referans kirişteki başlangıç rijitliğinin %79.32'sine karşılık gelmektedir. Deney numunesi eğilme davranışı gösterip donatı akması ve basınç bölgesinde beton ezildiği için eğilme davranışı gösterdiği kabul edilmiştir. Şekil 4.71 incelendiğinde boşluklu kiriş numunesinin Beam tipi kırılmaya uğramış olduğu görülmektedir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki halini Şekil 4.69 ve Şekil 4.70'te gösterilmiştir. GBS-50 kodlu deney numunesinden elde edilen sonuçlar (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.21 ve 4.22'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 5.72'de verilmiştir.



Şekil 4.69. (GBS-50) Nolu kiriş numunesi

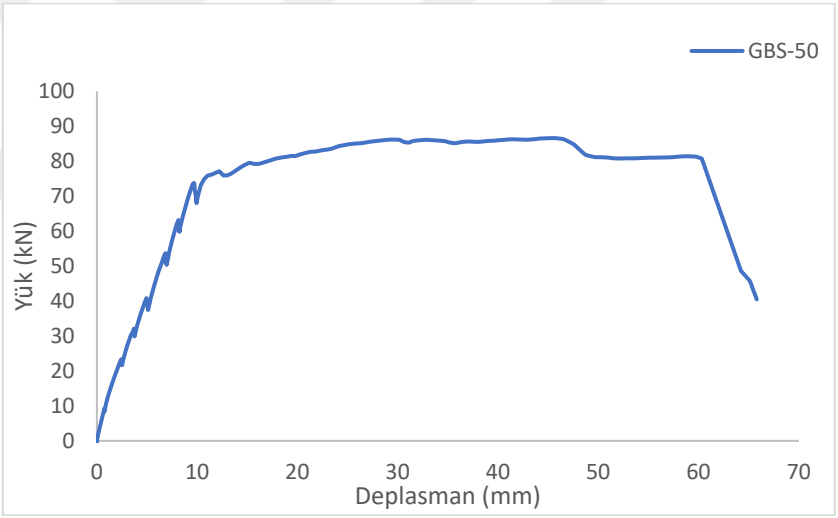


Şekil 4.70. (GBS-50) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.71. GBS-50 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



Şekil 4.72. (GBS-50) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

3) GBS-83 Numune kirişi

GBS-83 kodlu numuneye D/H oranı % 41.5 olacak şekilde mesnedin her iki tarafına 83 mm çapında boşluklar açılarak teste tabi tutulmuştur. Deney esnasında numune üzerindeki düşey yük 24 kN'a ulaştığında kirişin kesme bölgesinde ve boşluğun çevresinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Numune yüklenmeye devam edilerek kirişin maksimum taşıma kapasitesi olan 35.62 kN'luk yüke ulaşılmıştır. Bu değer referans kirişin yük taşıma kapasitesinin % 40'una karşılık gelmektedir. Deney numunesinin başlangıç rijitliği değeri ise 11.72 kN/mm ile referans kirişin başlangıç rijitlik değerinin % 80.77'sine karşılık

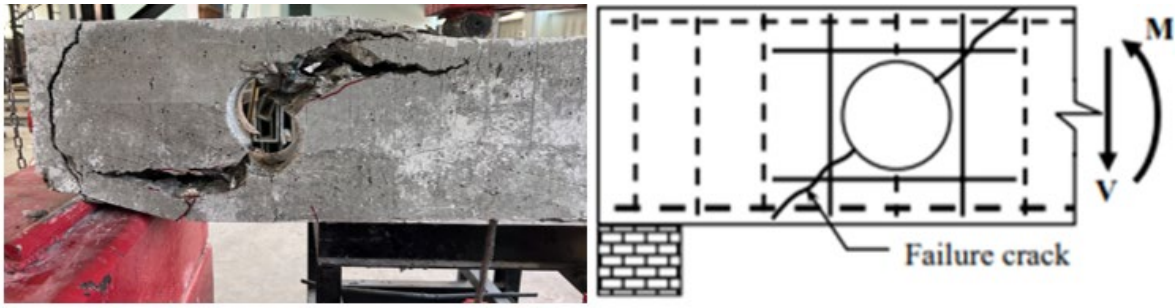
gelmektedir. Deney esnasında numune her ne kadar eğilme davranışı gösterecek donatı detaylarına sahip olsa da, mesnet bölgesindeki boşluklardan ötürü kesme davranışı göstermiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki halini Şekil 4.73 ve Şekil 4.74'de gösterilmiştir. Numunenin göçme mekanizması ise Beam tipi bir davranış göstermiştir (Şekil 4.75). GBS-83 kirişinin deney esnasında elde edilen sonuçları (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.21 ve 4.22'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.76'da verilmiştir.



Şekil 4.73. (GBS-83) Nolu kiriş numunesi

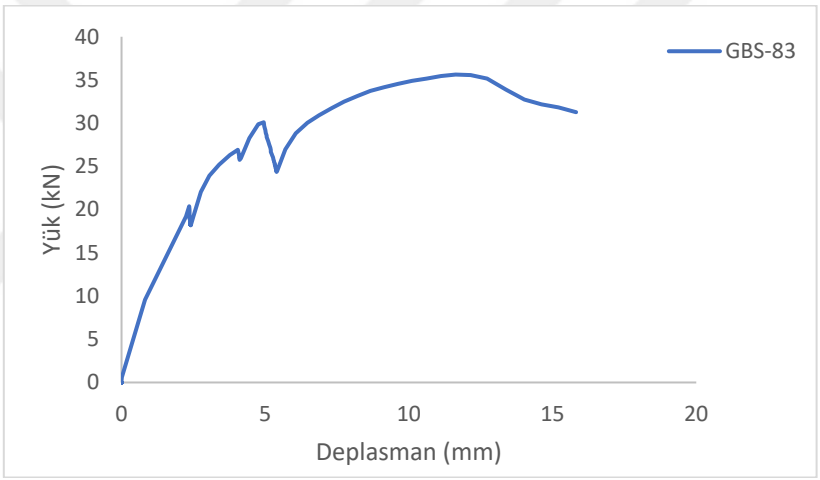


Şekil 4.74. (GBS-83) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.75. GBS-83 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



Şekil 4.76. (GBS-83) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

4) GBS-110 Numune kirişi

GBS-110 kodlu deney numunesine D/H oranı %55.0 olacak 110 mm'lik boşluklar mesnet bölgelerine açılarak teste tabi tutulmuştur. Numunedeki düşey yük numunenin maksimum yük kapasitesi olan 30.67 kN'a ulaştığı anda göçme meydana gelmiştir. Bu değer yaklaşık olarak referans kirişin yük taşıma kapasitesinin %34'üne karşılık gelmektedir. Aynı şekilde numunenin başlangıç rijitlik değeri ise 10.52 kN/mm olarak hesaplanmış ve bu değer de referans numunenin % 72.25'ine karşılık gelmektedir. Deney numunesi kesme davranışı göstermiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki halini

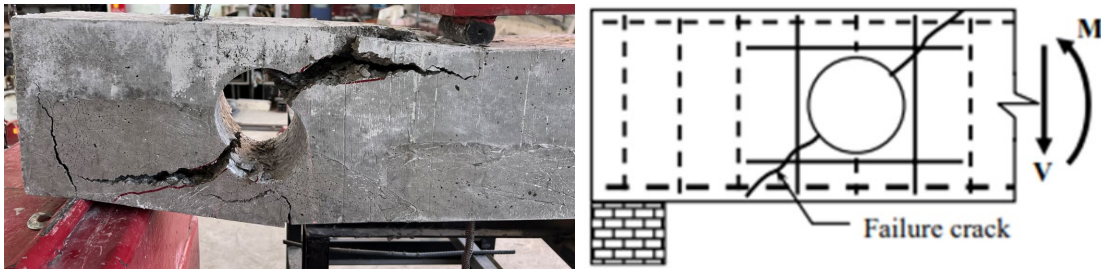
Şekil 4.77 ve Şekil 4.78'de gösterilmiştir. Göçme mekanizması olarak da ve Beam tipi bir kırılma göstermiştir (Şekil 4.79). GBS-83 kirişin deneyde elde edilen sonuçları (rijitlik, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi) Çizelge 4.21 ve 4.22'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 4.80'de verilmiştir.



Şekil 4.77. (GBS-110) Nolu kiriş numunesi

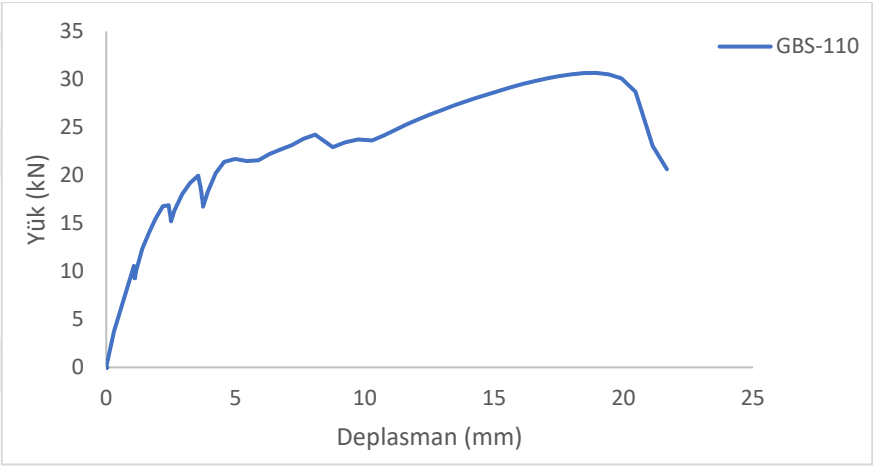


Şekil 4.78. (GBS-110) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.79. GBS-110 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



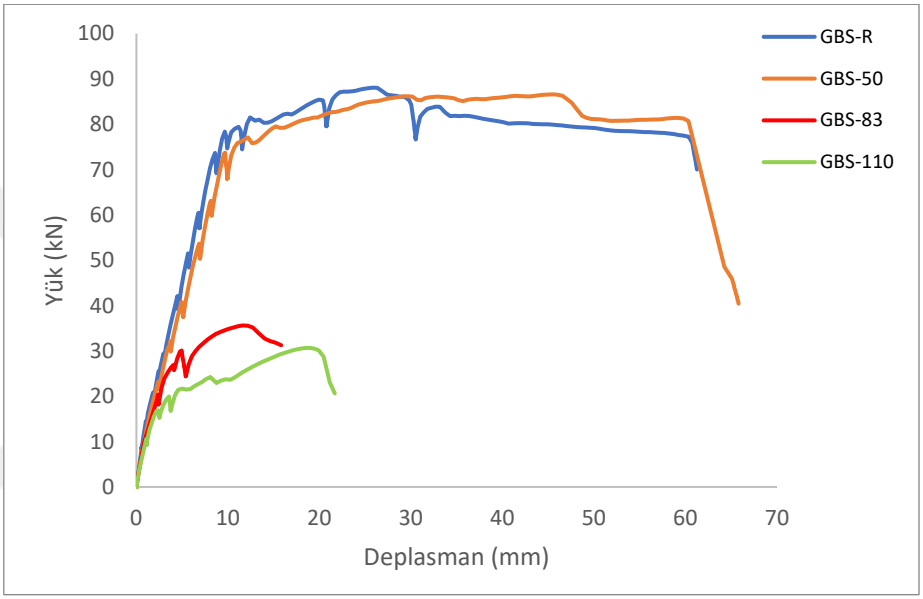
Şekil 4.80. (GBS-110) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafiği

Çizelge 4.21. Geopolimer betondan üretilen eğilme kirişlerinin sonuçları

Numune	Numune kodu	Maksimum Yük (P_{max}) (kN)	0.85 P_{max} (P_u) (kN)	P_u noktasında gelen deplasman değeri (mm)	
				δ_y	δ_u
1	GBS-R	88.07	74.85	9.18	60.82
2	GBS-50	86.59	73.60	9.63	62.21
3	GBS-83	35.62	30.27	-	-
4	GBS-110	30.67	26.06	-	-

Çizelge 4.22. Geopolimer betondan üretilen eğilme kirişlerinin süneklik, rijitlik ve enerji tüketim değerleri

Numune	Numune kodu	Süneklik oranı (δ_u/δ_y)	Başlangıç rijitlik değeri (kN/mm)	Tüketilen enerji değeri (kj)	Göçme Mekanizması
1	GBS-R	6.62	14.51	2.47	Eğilme
2	GBS-50	6.46	11.51	3.56	Eğilme
3	GBS-83	1.00	11.72	-	Kesme
4	GBS-110	1.00	10.52	-	Kesme



Şekil 4.81. Geopolimer betondan üretilen eğilme kiriş numune sonuçlarının karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde GPC'dan üretilen kesme ve eğilme davranışı gösteren betonarme kirişlere farklı D/H oranları ile mesnet bölgelerine açılan boşluklar açılarak statik yükleme altında bu kirişlerin davranışları araştırılmıştır. Dolayısıyla numunelerde donatı detaylandırması (kesme ve eğilme) ile boşluk çapları haricinde diğer parametreler (GPC sınıfı, donatı sınıfı, kiriş boyutları) sabit tutulmuştur. Bu kapsamda küçük, orta ve büyük çaplı (50, 83 ve 110 mm) boşluklar kirişlerin kesme bölgesinde mesnete yakın bölgede açılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

• Mevcut geopolimer kesme kirişlerinden D/H oranı %25.0, %41.5 ve %55.0 olan geopolimer boşluklu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri referans kesme kirişine göre sırasıyla %43, %66 ve %69 azalma gözlenmiştir (Şekil 4.65).

• Aynı şekilde D/H oranı %25.0, %41.5 ve %55.0 olan geopolimer boşluklu kesme kirişlerinin başlangıç rijitlik değerleri de referans kiriş başlangıç rijitliğine göre sırasıyla %120, % 60 ve %89 oranında yükseltmiştir.

• Geopolimer eğilme kirişlerinden D/H oranı %25.0, %41.5 ve %55.0 olan boşluklu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri geopolimer referans eğilme kirişine göre sırasıyla %2, %60 ve %66 azalma gözlenmiştir (Şekil 4.81).

• Eğilme davranışı gösterecek şekilde tasarlanan Geopolimer numunelere mesnet bölgesine açılan farklı D/H oranlarına sahip boşlukların bulunması, kirişlerin eğilme davranışından çıkıp kesme davranışına geçmesine ve gevrek bir şekilde sünek olmayan göçme mekanizması göstermelerine sebep olmaktadır.

• Güncel deprem yönetmeliğine göre tasarlanan (kesme ve eğilme donatıları uygun) kirişlerde mesnet bölgelerine açılan küçük çaplı boşlukların geopolimer kirişlerin yük taşıma kapasitesi, süneklik, davranış ve tüketilen enerji değerlerinde anlamlı düşüşler görülmemektedir (GBS-R ve GBS-50 numuneleri).

• Benzer şekilde D/H oranı %25.0, %41.5 ve %55.0 olan boşluklu eğilme geopolimer kirişlerinin başlangıç rijitlik değerleri de referans kiriş eğilme başlangıç rijitliğine göre sırasıyla %21, % 20 ve %28 oranında azalmıştır.

• Geopolimer boşluklu eğilme kirişlerinin enerji tüketme kapasitelerinde ise küçük boşluk çapına sahip (50 mm) boşluklu GBS-50 numunesi boşluksuz eğilme kirişi gibi davranarak yüksek enerji tüketim ve yüksek süneklik değeri göstermiştir. GBS-83 ve GBS-110 numunelerinde ise enerji tüketme kapasitelerinde ve süneklik değerlerinde oldukça fazla bir düşüş gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise kirişlere açılan boşluklar sebebiyle eğilme davranışı gösteren kirişin, kesme davranışına geçmesi olarak açıklanabilir.

• Geopolimer kesme kirişlerindeki açılan boşluklar sebebiyle meydana gelen yük kapasitesindeki azalmalar ortalama %60 civarında, geopolimer eğilme kirişlerinde azalmaların ortalaması ise %43 mertebesinde elde edilmiştir.

4.3.3. GPC ve GB numune kirişlerinin statik yükleme altında deneysel sonuçlarının karşılaştırması

Çalışmanın bu bölümünde toplam 16 adet dikdörtgen kesitli 150 x 200 x 1250 mm boyutlarında, 8 adedi geopolimer betondan 8 adedi ise GB kesme ve eğilme davranışı gösteren kirişlere farklı D/H oranları (0.250, 0.415 ve 0.550) içeren boşluklu ve boşluksuz kirişlerin statik yükleme altındaki davranışlarının sonuçları incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ve karşılaştırmaları Çizelge 4.23' te verilmiştir.

Çizelge 4.23. GPC ve GB numune kirişlerinin statik yükleme altında deneysel sonuçları

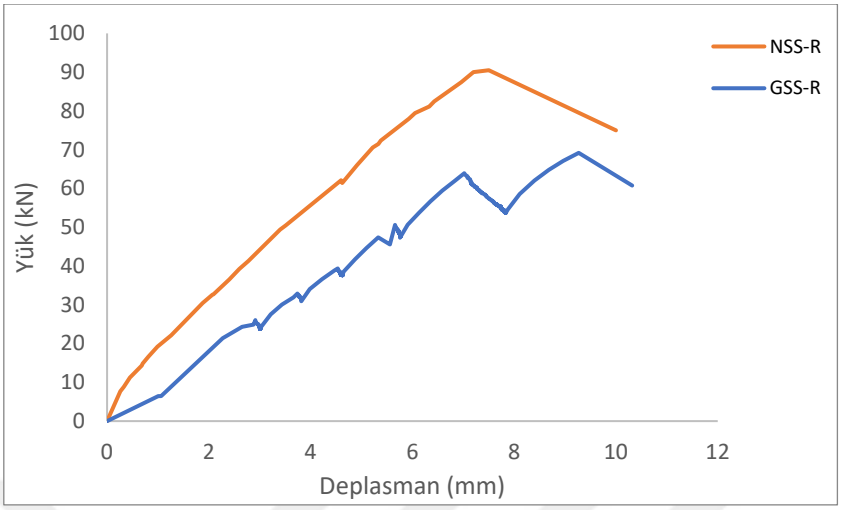
Numune	Numune kodu	Maksimum Yük (P_{max}) (kN)	Süneklik oranı (δ_u/δ_y)	Başlangıç rijitlik değeri (kN/mm)	Tüketilen enerji değeri (kj)	Göçme Mekanizması
1	NSS-R	90.50	1.00	18.16	-	Kesme
	GSS-R	69.18	1.00	6.43	-	Kesme
2	NSS-50	61.07	1.00	15.65	-	Kesme
	GSS-50	39.75	1.00	14.20	-	Kesme
3	NSS-83	41.46	1.00	16.21	-	Kesme
	GSS-83	23.70	1.00	10.32	-	Kesme
4	NSS-110	32.76	1.00	15.31	-	Kesme
	GSS-110	22.00	1.00	12.20	-	Kesme
5	NBS-R	94.00	11.11	17.11	4.03	Eğilme
	GBS-R	88.07	6.62	14.51	2.47	Eğilme
6	NBS-50	72.93	1.00	15.63	-	Kesme
	GBS-50	86.59	6.46	11.51	3.56	Eğilme
7	NBS-83	75.19	1.00	16.77	-	Kesme
	GBS-83	35.62	1.00	11.72	-	Kesme
8	NBS-110	40.25	1.00	15.21	-	Kesme
	GBS-110	30.67	1.00	10.52	-	Kesme

- GPC ve GB boşluksuz kesme referans kiriş numunelerindeki maksimum yük taşıma kapasitelerine bakıldığında geopolimer betondan üretilen kiriş numunesi GSS-R geleneksel betondan üretilen NSS-R kiriş numunesine göre daha düşük taşıma kapasitesi vermiştir. GB kiriş numunesi yaklaşık 90 kN taşıma kapasitesine ulaşırken, geopolimer betondan üretilen kirişte ise taşıma kapasitesi yaklaşık 70 kN civarında görülmektedir. Her iki numunenin göçme mekanizması birbirine benzer çıkmıştır. Taşıma kapasitelerindeki bu farklılığın sebebi kirişlerin beton basınç dayanımındaki farktır (GB basınç dayanımı 28 MPa, GPC basınç dayanımı 25 MPa). Aynı zamanda GPC üretiminde kullanılan alkali aktivatörler ve alüminosilikat gibi kimyasal bağlayıcılar geleneksel Portland çimentosu gibi hidratasyon reaksiyonlarına girmezler. Dolayısıyla, geopolimer betonun iç yapısındaki mineral oluşumu ve kristalleşme süreci farklıdır. Bu reaksiyon mekanizması, GB'un tipik olarak daha yüksek eğilme dayanımına sahip olmasına ve geopolimer betonun daha düşük eğilme dayanımına sahip olmasına yol açabilmektedir (Şekil 4.83). Şekil 4.82'de her iki numunenin göçme anındaki durumları verilmiştir.



a. NSS-R b. GSS-R

Şekil 4.82. GPC ve GB referans kesme kirişlerinin göçme modları



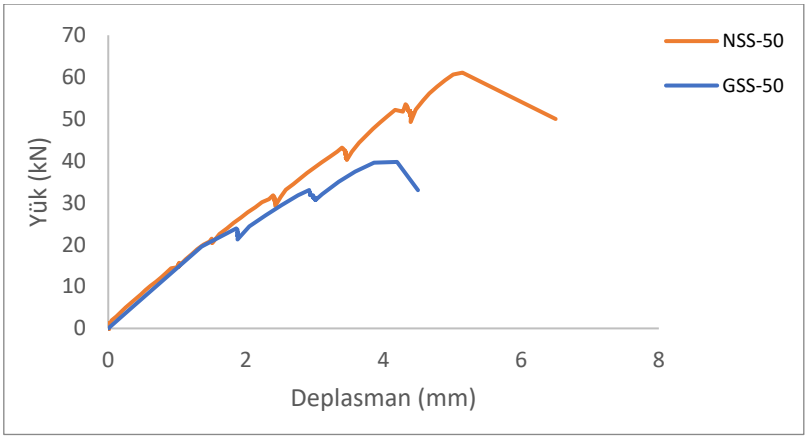
Şekil 4.83. GPC ve GB referans kesme kirişlerinin karşılaştırması

- NSS-50 ve GSS-50 kirişlerinin yani 50 mm çapında boşluğa sahip numunelerin statik yükleme sonuçları incelendiğinde, referans kirişlere oranla 50 mm'lik çaplı boşluklu kirişlerin taşıma kapasitelerinde GB numunede %33, GPC numunede ise bu düşüş %43 mertebesinde görülmüştür. Bu durumun sebebi de yine basınç dayanımları arasındaki farktan kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4.85). Şekil 4.84'te her iki numunenin göçme anındaki durumları verilmiştir.



a. NSS-50 b. GSS-50

Şekil 4.84. GSS-50 ve NSS-50 kirişlerinin göçme modları

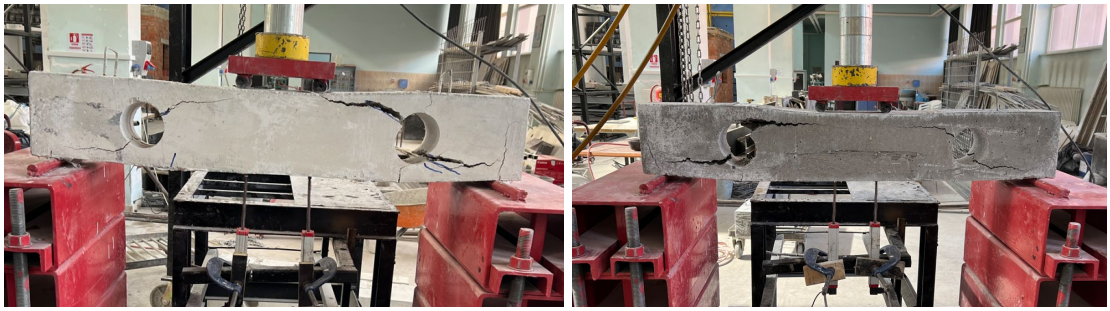


Şekil 4.85. GSS-50 ve NSS-50 kirişlerinin statik yükleme karşılaştırması

- Orta ve büyük ölçekli 83 ve 110 mm'lik boşluklu kirişlerde ise GB kullanılarak üretilen kirişlerdeki (NSS-83 ve NSS-110) yük taşıma kapasitesindeki düşüş sırasıyla %55 ve %64, GPC kullanılan kirişlerdeki (GSS-83 ve GSS-110) düşüş ise sırasıyla %66 ve %69 ile karşılaştırıldığında taşıma kapasitelerindeki azalma oranı benzer tespit edilmiştir. Fakat statik yükleme altındaki bu kirişlerin davranış bakımından önemli farklılıkları görülmektedir. Geopolimer kirişlerdeki rijitlik azalması GB kirişlere göre daha hızlı görülmüştür. Boşluklu geopolimer kirişlerde, kimyasal bağlayıcılar arasındaki bağlar zayıfladığında veya boşluklar oluşturulduğunda, kirişin rijitliği bu durumdan GB göre daha fazla etkilenebilir. Yani boşluklar, kirişin eğilme dayanımını azaltabilir (Şekil 4.87-a-b). Şekil 4.86'da kiriş numunelerinin göçme anındaki durumları verilmiştir.

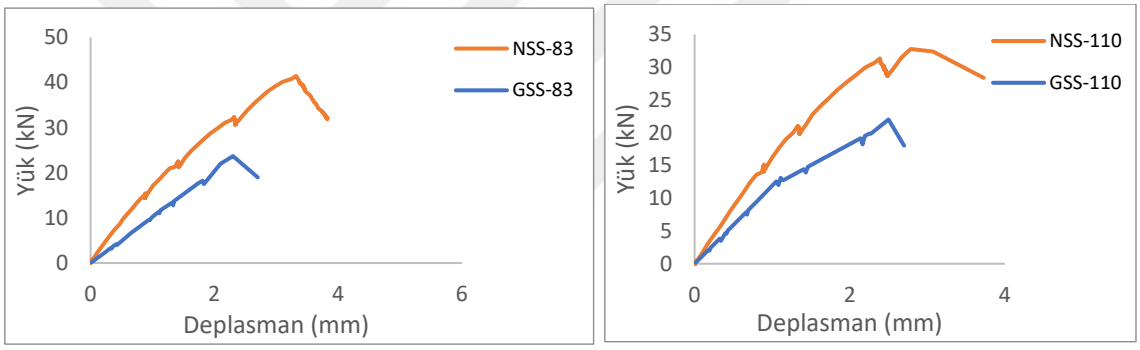


a. NSS-83 b. GSS-83



c.NSS-110 d. GSS-110

Şekil 4.86. NSS-85, GSS-85, NSS-110 ve GSS-110 kirişlerinin göçme modları



a) b)

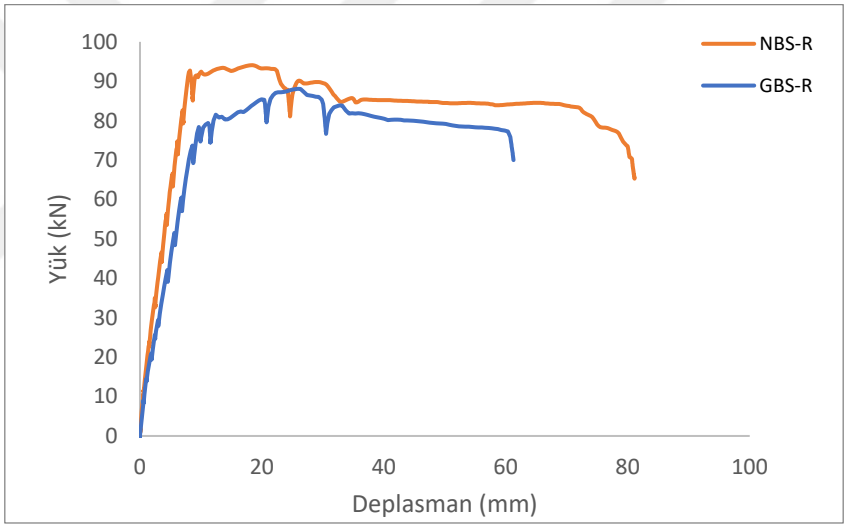
Şekil 4.87. a. GSS-83 ve NSS-83 b. GSS-110 ve NSS-110 kirişlerinin statik yükleme sonuçlarının karşılaştırması

- GPC ve GB boşluksuz eğilme referans kiriş numunelerindeki maksimum yük taşıma kapasitesi, tüketilen enerji değeri ve süneklik oranları birbirine benzer olmakla beraber geopolimer betondan üretilen referans kirişin bu değerleri GB numuneye kıyasla çok da anlamlı olmayacak derecede düşük çıkmıştır. Bunun sebebi geopolimer betonun daha düşük bir basınç dayanıma sahip olması söylenebilir (Şekil 4.89). Şekil 4.88'de her iki numunenin göçme anındaki durumları verilmiştir.



a. NBS-R b. GBS-R

Şekil 4.88. GPC ve GB referans eğilme kirişlerinin göçme modları



Şekil 4.89. GBS-R ve NBS-R kirişlerinin statik yükleme altında deney sonuçlarının karşılaştırılması

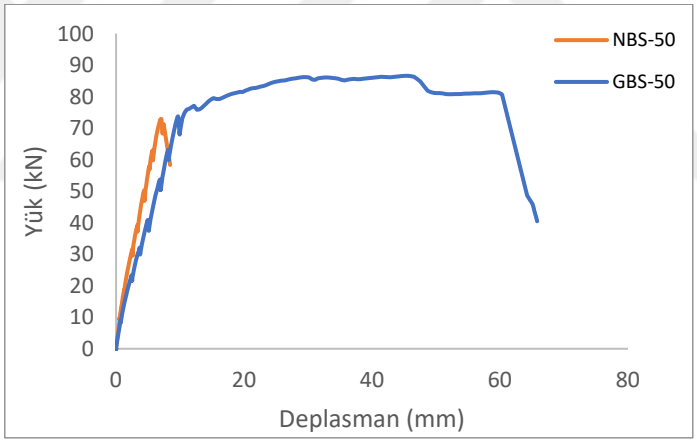
- NBS-50 ve GBS-50 eğilme kirişlerin sonuçları incelendiğinde, GPC eğilme kirişlerinde mesnet bölgesinde 50 mm çaplı bir boşluğun bulunması (GBS-50) süneklik, rijitlik ve taşıma gücü bakımından referans kirişe göre anlamlı bir değişikliğin olmadığını göstermektedir. Bu kirişte taşıma gücündeki azalma %2 mertebesinde kalmaktadır. GB eğilme kirişinde ise bu durum aynı değildir. Bu kirişte kirişin yük taşıma kapasitesindeki azalma %23'lere kadar çıkmaktadır. Ayrıca bu kirişin deney esnasındaki davranışı sünek bir davranıştan çıkıp gevrek bir

davranışa dönüşmüştür (Şekil 4.91). Şekil 4.90'da her iki numunenin göçme anındaki durumları verilmiştir.



a. NBS-50 b. GBS-50

Şekil 4.90. GBS-50 ve NBS-50 kirişlerinin göçme modları



Şekil 4.91. GBS-50 ve NBS-50 kirişlerin karşılaştırma sonuçları

- Mesnet bölgelerinde orta ve büyük ölçekli (83 ve 110 'mm) boşluklara sahip GB kirişlerdeki (NBS-83 ve NBS-110) yük taşıma kapasitesindeki düşüş referans kirişe göre sırasıyla %21 ve %58, GPC kirişlerdeki (GBS-83 ve GBS-110) ise referans kirişe göre sırasıyla %60 ve %66 çıkmıştır. Bu kirişlerin davranış bakımından da GPC kirişlerin rijitliği kesme kirişlerinde olduğu gibi GB'dan daha hızlı azalmaya uğrayarak GB'a göre daha sünek bir davranış sergilemişlerdir (Şekil 4.93 a-b). Şekil 4.92'de kiriş numunelerinin göçme anındaki durumları verilmiştir.

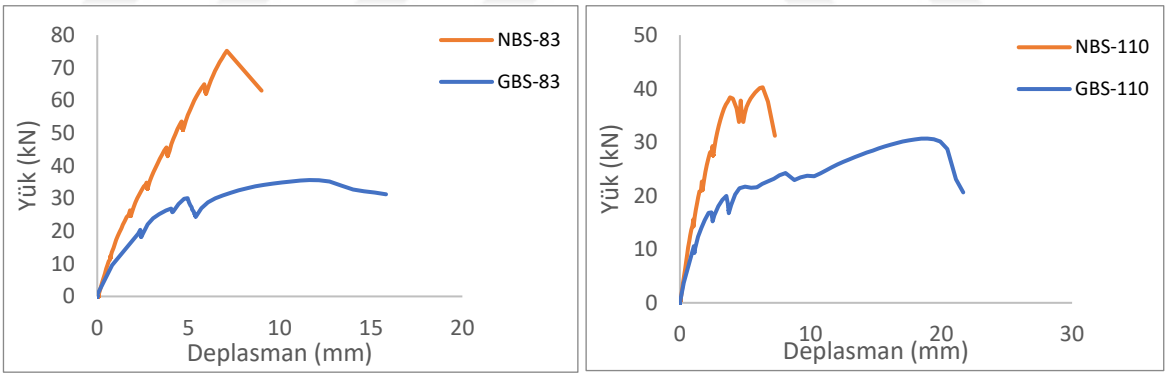


a. NBS-85 b. GBS-85



c.NBS-110 d. GBS-110

Şekil 4.92. NSS-83, GSS-83, NSS-110 ve GSS-110 kirişlerinin göçme modları



a) **b)**

Şekil 4.93. a. GBS-83 ve NBS-83 **b.** GBS-110 ve NBS-110 kirişlerinin statik yükleme sonuçlarının karşılaştırılması

- GB'dan üretilen boşluklu kesme kirişlerin boşluksuz kesme kirişlerine göre ortalama %51 daha düşük yük kapasitesi gösterirken GPC kesme kirişlerdeki düşüşü %60 olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda GB boşluklu eğilme kirişlerin boşluksuz eğilme kirişlerine göre ortalama %33 daha düşük yük kapasitesi gösterirken GPC kesme kirişlerdeki düşüşü %43 olarak tespit edilmiştir.

- Toplu olarak GB eğilme ve kesme boşluklu kirişlerindeki yük taşıma kapasitesi boşluksuz kirişlere göre %42 azalırken, GPC eğilme ve kesme kirişlerindeki yük taşıma kapasite düşüşü %52 olarak bulunmuştur. Buna göre GB kirişler GPC kirişlerden daha iyi davrandığını söylenebilir.
- GB ve GPC'den üretilen boşluklu kesme kirişlerindeki yük taşıma kapasitesi boşluksuz kirişlere göre %56'lık bir düşüş gösterirken eğilme kirişlerindeki düşüş %38 seviyesinde kalmaktadır. Bu da geleneksel betondan üretilen geopolimer kirişlere göre daha iyi davrandığını göstermektedir.

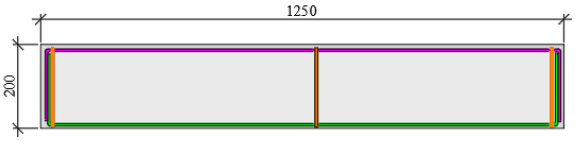
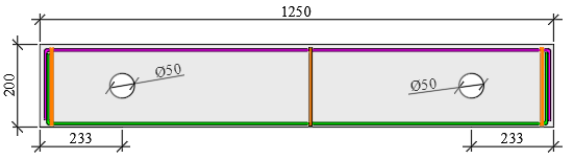
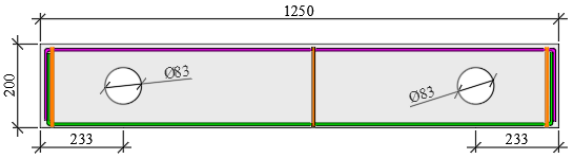
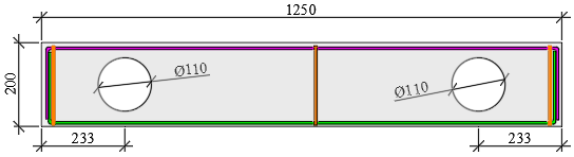
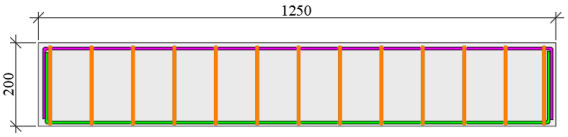
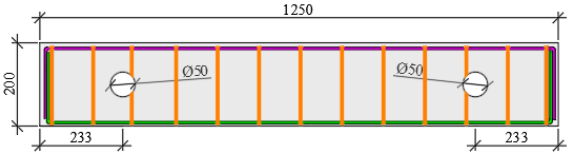
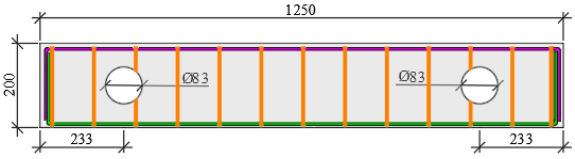
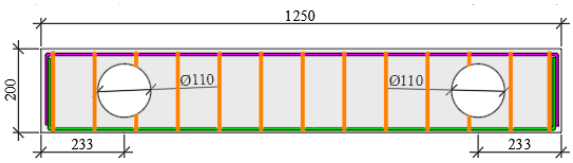
4.4. GPC ve GB Boşluklu-Boşluksuz Kirişlerin Dinamik Yükleme Sonuçları

Betonarme kiriş deney elemanlarının çarpma yüklemesi etkisi altındaki genel davranışları ve performansları hakkında yorum yapılabilmesi için her kiriş üzerinden 3 noktadan ivme-zaman, 4 noktadan deplasman-zaman ve kirişlere uygulanan çarpma yüklemesi-zaman ölçümleri alınmıştır. Kirişlere tam orta noktasından uygulanan çarpma yüklemesine en yakın konumda yer alan a_1 ivme sensörü ve d_1 deplasman sensöründen ölçülen maksimum ivme-zaman grafikleri, maksimum deplasman-zaman grafikleri, çarpma yüklemesi-deplasman ve çarpma yüklemesi-zaman aşağıda verilmiştir. Verilen maksimum deplasman değerleri çarpma yüklemesi etkisiyle betonarme kirişlerde meydana gelen aşağı yönlü negatif ve yukarı yönlü pozitif deplasman değerlerinin mutlak değerce toplanması ile hesaplanmış, kirişte meydana gelen toplam deplasman değeridir. Ayrıca maksimum deplasman grafiklerinden çarpma yüklemesi uygulanıp sönümlendikten sonra betonarme kirişlerde meydana gelen kalıcı plastik deplasman değerleri de kayıt edilmiştir. Deney elemanlarına uygulanan çarpma yüklemesi sonrasında hasar dağılımları ve göçme mekanizmalarını gösteren testler sonunda sunulmuştur.

4.4.1. GB kesme ve eğilme kiriş numuneleri

Dinamik yükleme altındaki GB boşluklu ve boşluksuz kesme ve eğilme kirişlerin davranışlarını incelemek için iki adet boşluksuz betonarme referans eğilme ve kesme kiriş, 6 adet farklı boşluk oranına sahip toplam 8 adet dikdörtgen kesitli 150 x 200 x 1250 mm boyutlarında betonarme kirişler üretilmiştir. Numune kirişlerin kodlamasında geleneksel betonarme sembolü N, geopolimer beton sembolü G, kesme davranışı gösteren kirişlerin sembolü S, eğilme davranışı gösteren kirişlerin sembolü B, statik yükleme (basit eğilme) testinin sembolü S, dinamik yükleme (çarpma) testinin sembolü D, boşluksuz (referans) kirişlerin sembolü R ve boşluk çapı (50, 83 ve 110 mm'lik) numara olarak verilmiştir. Çizelge 4.24'te gösterildiği gibi boşluklu kiriş numunelerin D/H oranı sırasıyla %25.00, %41.50 ve %55.00 olarak literatüre uygun olarak seçilmiştir (Mansur ve diğ., 2006; Aykac ve diğ., 2014 ve Özkılıç ve diğ., 2022). Üretilen numuneler maksimum ivme-zaman, maksimum deplasman-zaman, çarpma yüklemesi-deplasman ve çarpma yüklemesi-zaman ilişkileri incelenmiştir.

Çizelge 4.24. GB kirişleri

Numara	Kiriş Tipi	Numune kodu	Boşluk Çapı/ Kiriş Yüksekliği (D/H)	Kiriş gösterişi
1	Kesme	NSD-R	-	
2	Kesme	NSD-50	0.250	
3	Kesme	NSD-83	0.415	
4	Kesme	NSD-110	0.550	
5	Eğilme	NBD-R	-	
6	Eğilme	NBD-50	0.250	
7	Eğilme	NBD-83	0.415	
8	Eğilme	NBD-110	0.550	

4.4.1.1. GB kesme kiriş numuneleri

1) NSD-R Referans Numune Kiriş

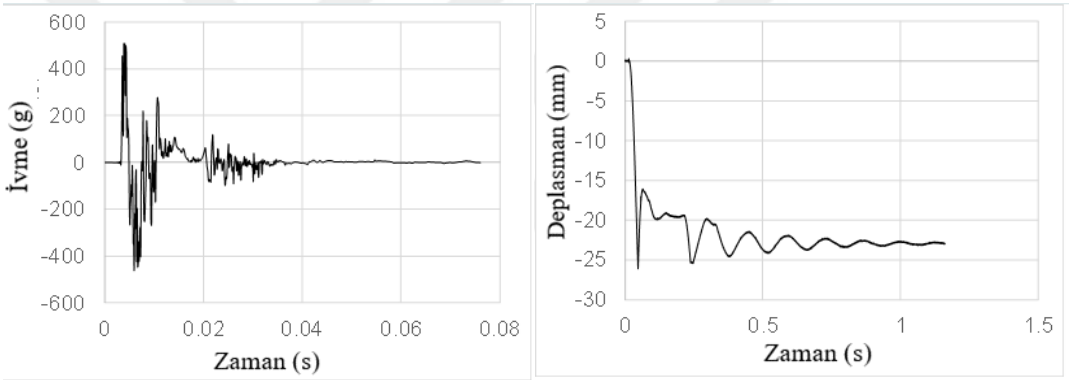
Bu deney numunesinde kesme davranışı göstermesi beklenen boşluksuz referans kiriş olarak tasarlanmış ve test edilmiştir. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle GB referans kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu referans numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.03 kN, maksimum ivme 508.82 g, minimum ivme -459.70 g, maksimum deplasman 26.46 mm ve kalıcı deplasman 22.96 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1674.45 kN-s, V_r 3.03 m/s, E_{ab} 2009.97 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 69 Kiriş numunesinin sağ mesnet kısmında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Referans kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.96'da, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.94- 4.95)'te gösterilmiştir.



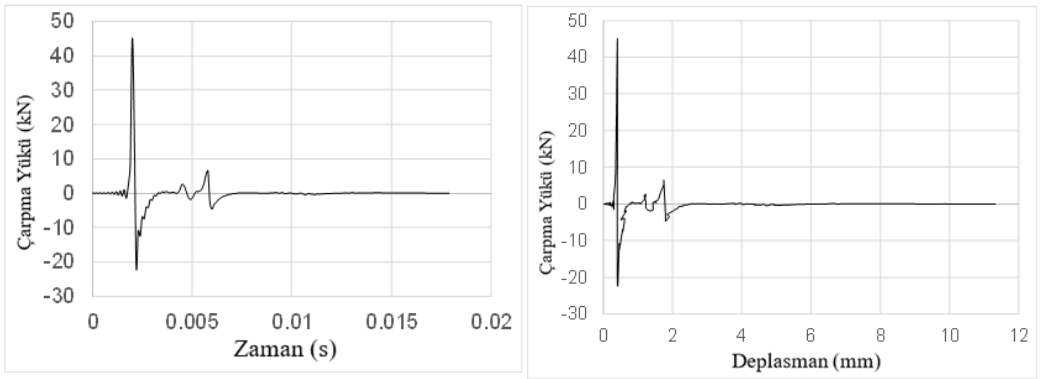
Şekil 4.94. (NSD-R) Nolu kiriş numunesi



Şekil 4.95. (NSD-R) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

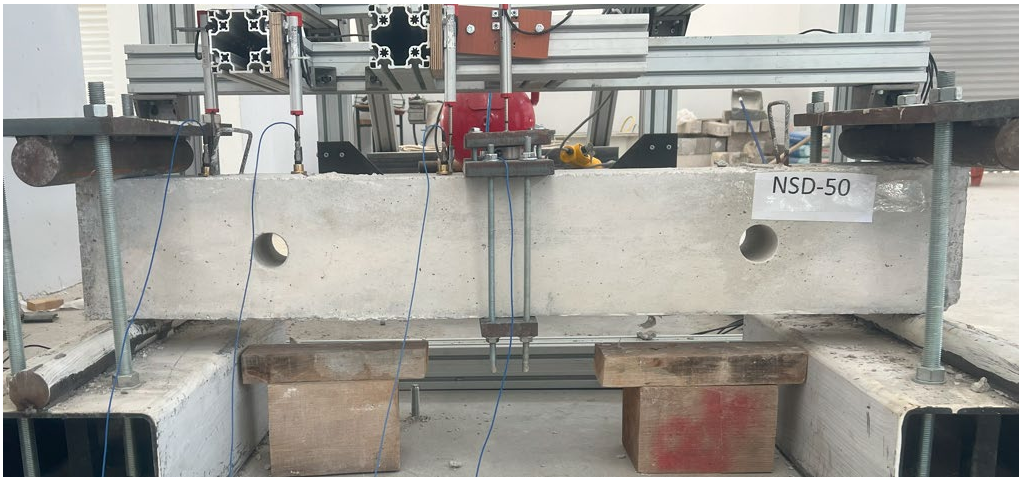


(c) (d)

Şekil 4.96. (NSD-50) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

2) NSD-50 Numune Kiriş

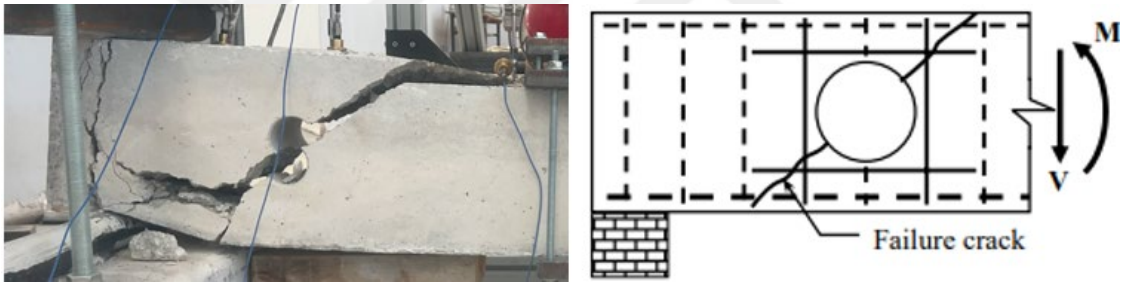
Bu kesme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı %25.00 olacak şekilde 50 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle bu kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.00 kN, maksimum ivme 345.36 g, minimum ivme -210.14 g, maksimum deplasman 38.68 mm ve kalıcı deplasman 38.45 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1545.56 kN-s, V_r 2.38 m/s, E_{ab} 2358.85 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 81. Bu kiriş numunesinin referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %67, maksimum deplasmanı ise %168 ve E_{ab} ise %117 değerlerindedir. Kiriş numunesinin sağ mesnet kısmında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.99 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Beam tipi göçme modunu göstermiştir. NSD-50 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.100'da, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.97- 4.98)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.97. (NSD-50) Nolu kiriş numunesi

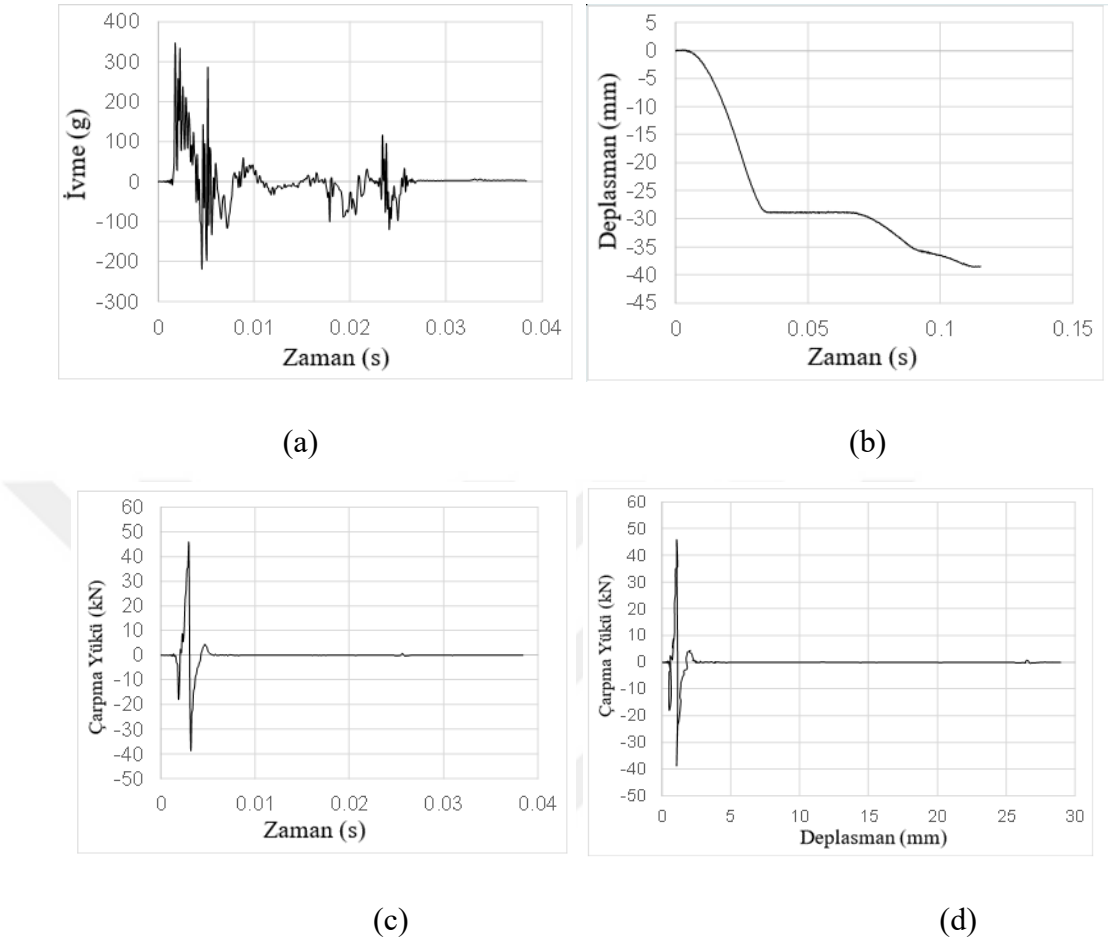


Şekil 4.98. (NSD-50) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.99. NSD-50 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması

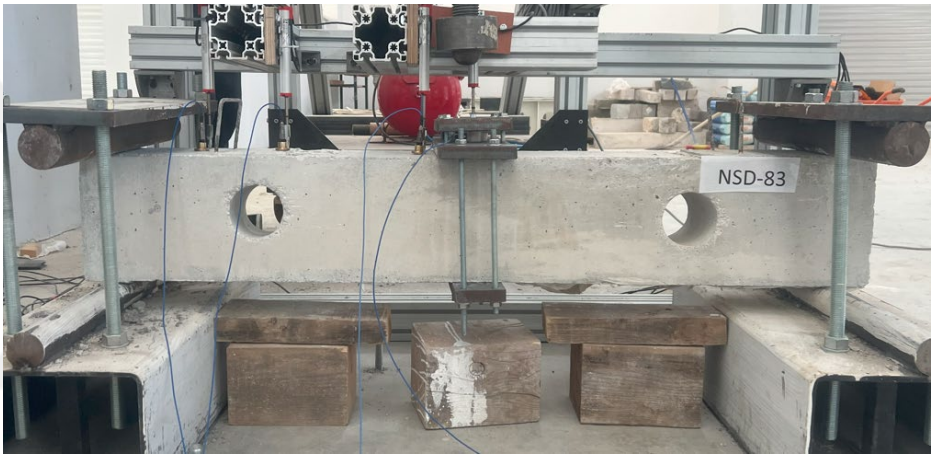


Şekil 4.100. (NSD-50) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

3) NSD-83 Numune Kiriş

Bu kesme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı % 41.50 olacak şekilde 83 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle bu kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.00 kN, maksimum ivme 262.20 g, minimum ivme -233.23 g, maksimum deplasman 53.94 mm ve kalıcı deplasman 53.84 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1498.00 kN-s, V_r 2.14 m/s, E_{ab} 2466.45 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 84. Bu kiriş numunesinin referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %51, maksimum deplasmanı ise %203 ve E_{ab} ise %122

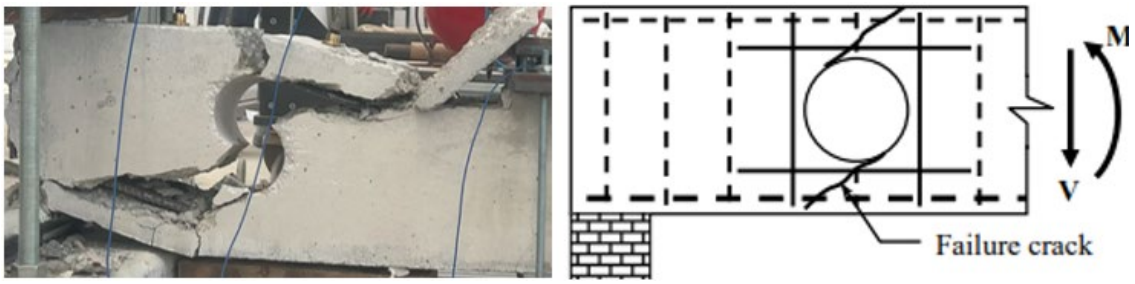
değerlerindedir. Kiriş numunesinin sağ mesnet kısmında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.103 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Frame tipi göçme modunu göstermiştir. NSD-83 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.104'te, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.101- 4.102)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.101. (NSD-83) Nolu kiriş numunesi

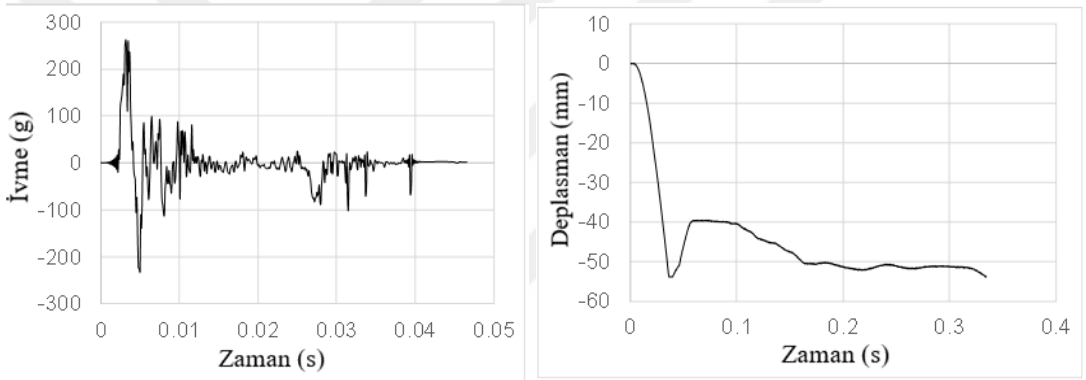


Şekil 4.102. (NSD-83) Nolu kiriş numunenin göçme modu

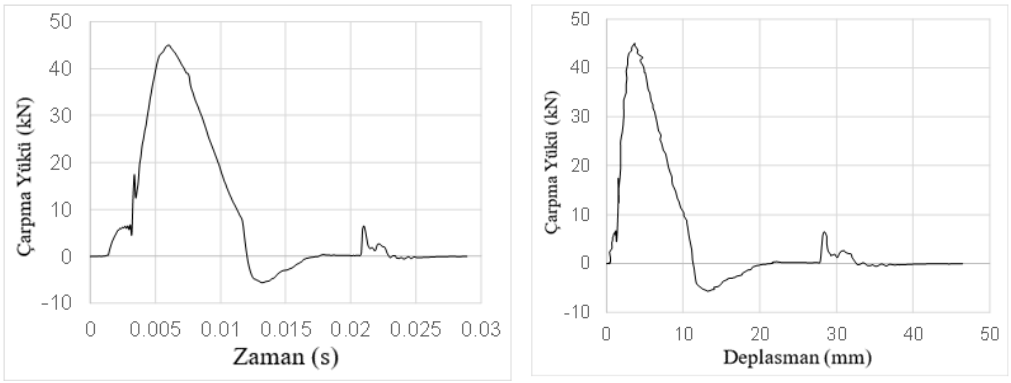


(a) (b)

Şekil 4.103. NSD-83 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



(a) (b)

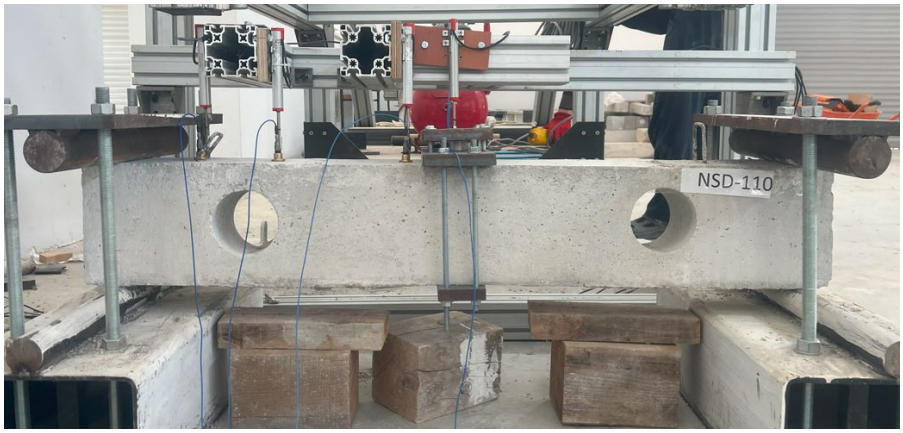


(c) (d)

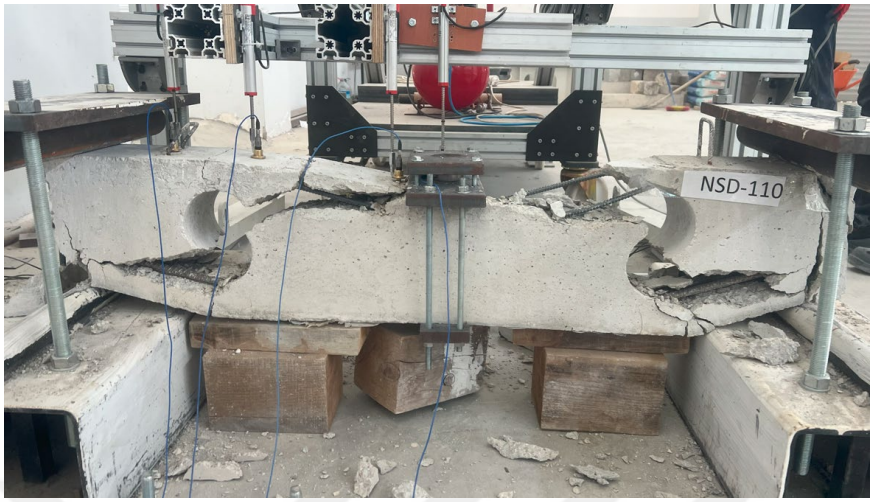
Şekil 4.104. (NSD-83) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

4) NSD-110 Numune Kiriş

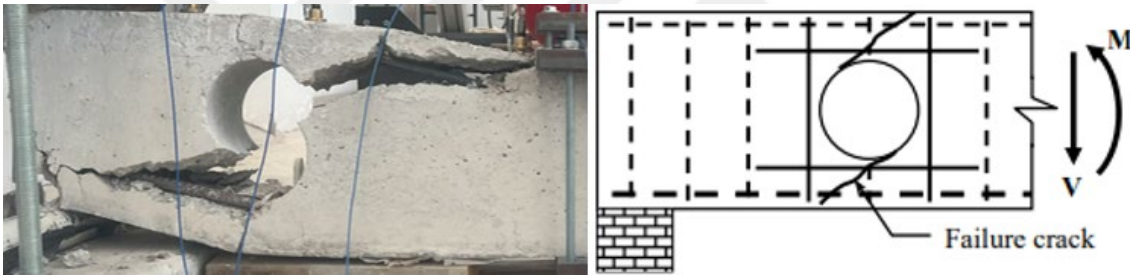
Bu kesme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı % 55.00 olacak şekilde 110 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle bu GB kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.08 kN, maksimum ivme 206.59 g, minimum ivme -180.51 g, maksimum deplasman 66.91 mm ve kalıcı deplasman 66.65 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1367.56 kN-s, V_r 1.49 m/s, E_{ab} 2703.12 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 92. Bu kiriş numunesinin referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %40, maksimum deplasmanı ise %252 ve E_{ab} ise %134 değerlerindedir. Kiriş numunesinin sağ mesnet kısmında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.107 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Frame tipi göçme modunu göstermiştir. NSD-110 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.108'de, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.105- 4.106)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.105. (NSD-110) Nolu kiriş numunesi

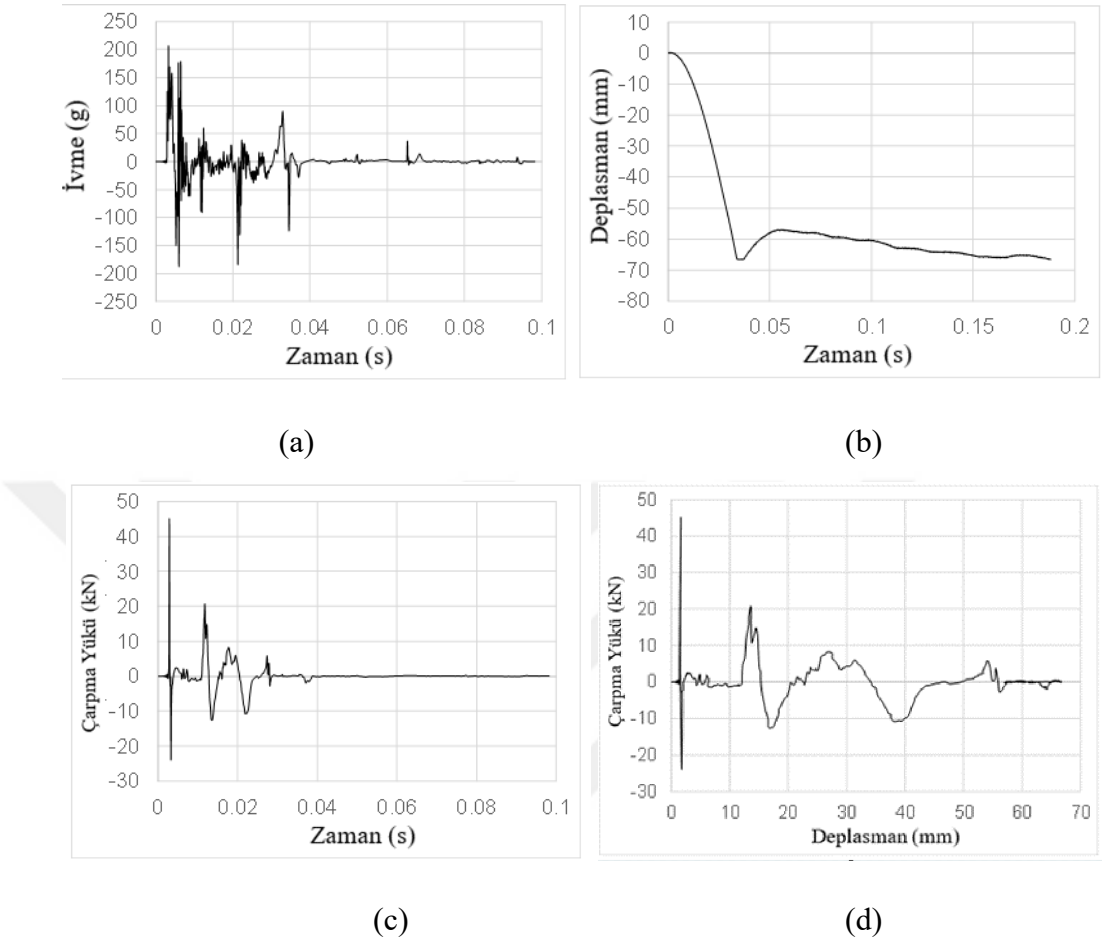


Şekil 4.106. (NSD-110) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.107. NSD-110 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



Şekil 4.108. (NSD-110) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

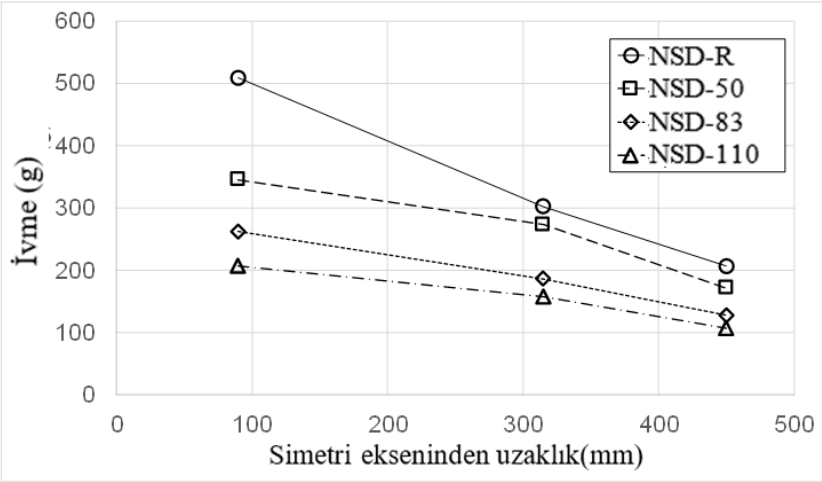
Çizelge 4.25 ve 4.26'da GB kesme kirişlerinin çarpma sonuçları ve Şekil 4.109'da Kiriş orta noktasından mesnete doğru ivme değerlerinin değişim grafiği ve Şekil 4.110'da Kiriş orta noktasından mesnete doğru deplasman değerlerinin değişim grafiği gösterilmiştir.

Çizelge 4.25. Geleneksel betondan üretilen kesme kirişlerinin çarpma test sonuçları

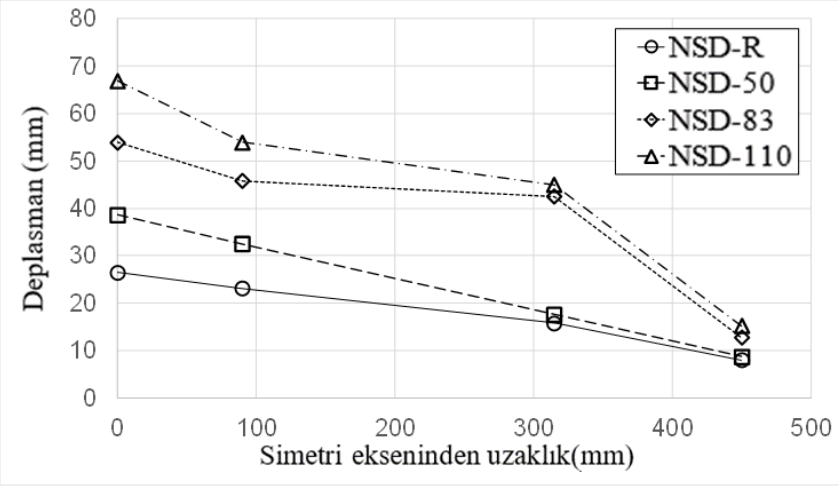
Numune	Numune kodu	Maksimum İvme (g)		Maksimum Deplasman (mm)		Maksimum Çarpma Yükü (kN)
		Maksimum	Minimum	Maksimum	Kalıcı	
1	NSD-R	508.82	-459.70	26.46	22.96	45.03
2	NSD-50	345.36	-210.14	38.68	38.45	45.00
3	NSD-83	262.20	-233.23	53.94	53.84	45.00
4	NSD-110	206.59	-180.51	66.91	66.65	45.08

Çizelge 4.26. Geleneksel betondan üretilen kesme kirişlerinin emilen enerji değerleri

Numune	Numune kodu	$E_{çarpma}$ (Joule)	$V_{çarpma}$ (m/s)	I_p (kN-s)	V_r (m/s)	E_{ab} (Joule)	E_{ab} / $E_{çarpma}$
1	NSD-R	2922.40	5.40	1674.45	3.03	2009.97	0.69
2	NSD-50	2922.40	5.40	1545.56	2.38	2358.85	0.81
3	NSD-83	2922.40	5.40	1498.00	2.14	2466.45	0.84
4	NSD-110	2922.40	5.40	1367.56	1.49	2703.12	0.92



Şekil 4.109. Kiriş orta noktasından mesnete doğru ivme değerlerinin değişimi



Şekil 4.110. Kiriş orta noktasından mesnete doğru deplasman değerlerinin değişimi

4.4.1.2. GB eğilme kiriş numuneleri

1) NBD-R Referans Numune Kiriş

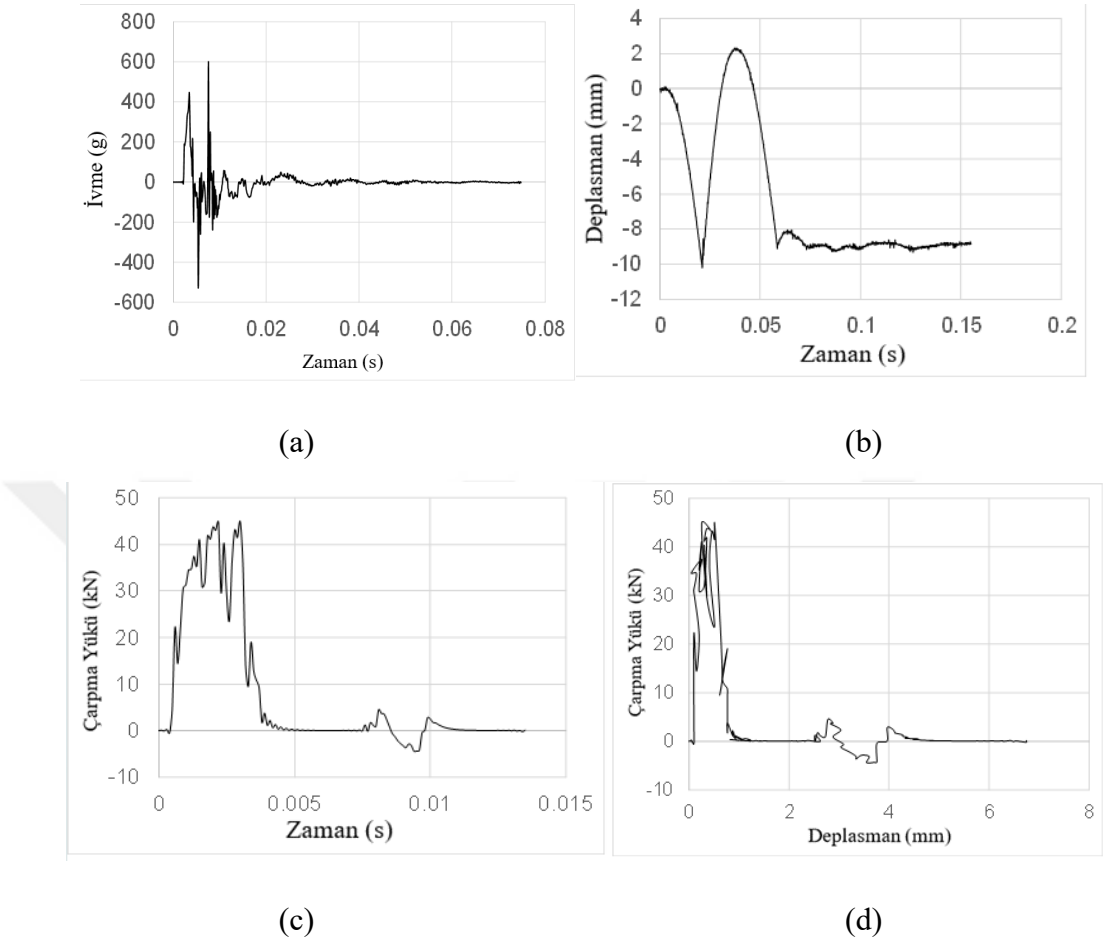
Bu deney numunesinde eğilme davranışı göstermesi beklenen boşluksuz referans kiriş olarak tasarlanmış ve test edilmiştir. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle GB referans kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu referans numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 44.96 kN, maksimum ivme 600.97 g, minimum ivme -518.68 g, maksimum deplasman 12.51mm ve kalıcı deplasman 8.85 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1728.93 kN-s, V_r 3.31 m/s, E_{ab} 1837.34 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 63 Kiriş numunesinin eğilme çatlağı oluşarak eğilme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Referans eğilme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.113'te, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.111- 4.112)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.111. (NBD-R) Nolu kiriş numunesi



Şekil 4.112. (NBD-R) Nolu kiriş numunenin göçme modu

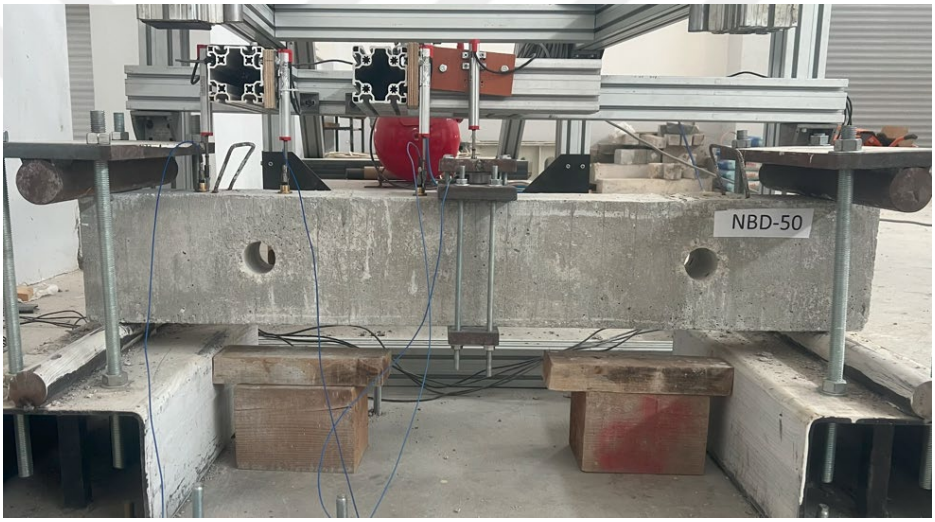


Şekil 4.113. (NBD-R) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

2) NBD-50 Numune Kiriş

Bu kesme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı %25.00 olacak şekilde 50 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle NBD-50 kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.11 kN, maksimum ivme 419.60 g, minimum ivme -153.83 g, maksimum deplasman 19.97 mm ve kalıcı deplasman 16.78 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1608.90 kN-s, V_r 2.70 m/s, E_{ab} 2197.84 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 75. Bu kiriş numunesinin

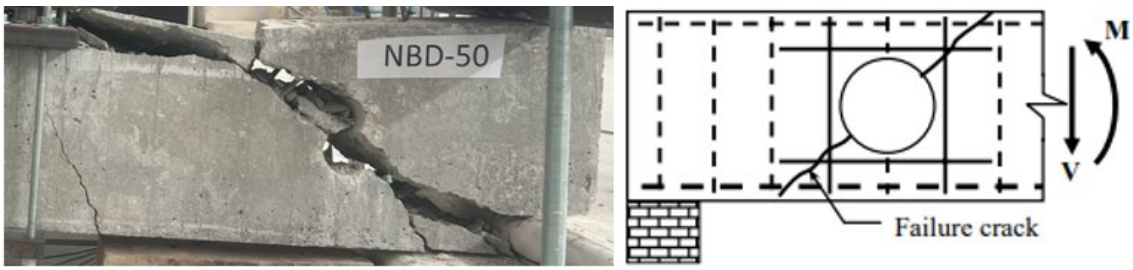
referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %69, maksimum deplasmanı ise %159 ve E_{ab} ise %119 değerlerindedir. Kiriş numunesinin sol mesnet kısmında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.116 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Beam tipi göçme modunu göstermiştir. NBD-50 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.117'de, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.114-4.115)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.114. (NBD-50) Nolu kiriş numunesi

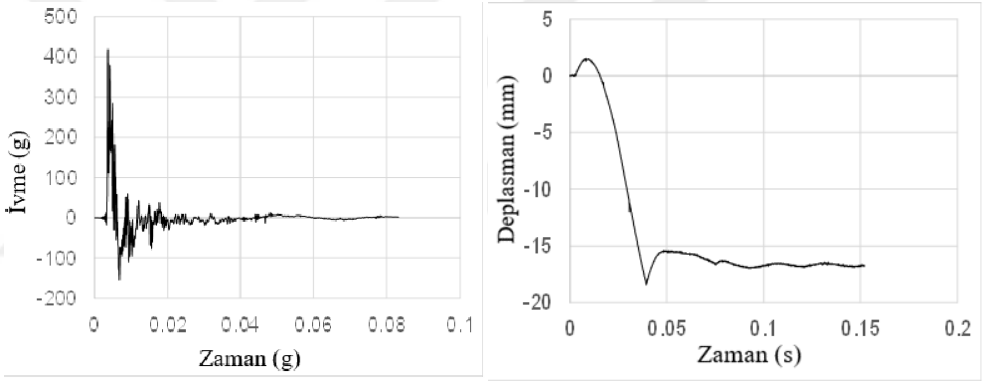


Şekil 4.115. (NBD-50) Nolu kiriş numunenin göçme modu

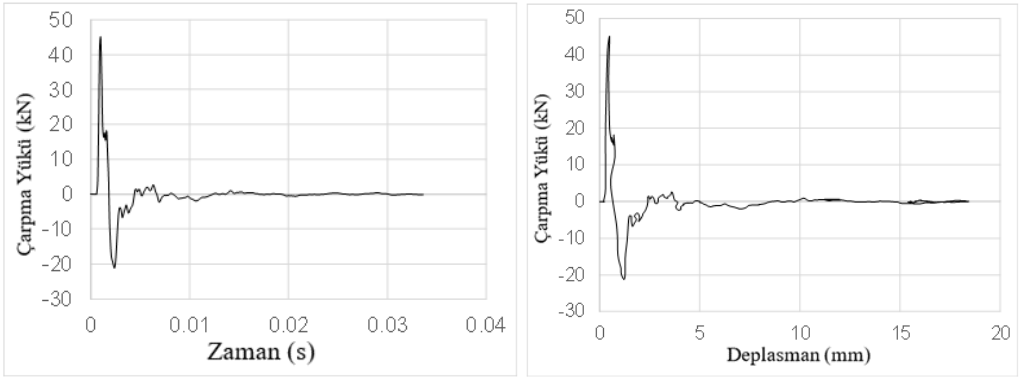


(a) (b)

Şekil 4.116. NBD-50 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



(a) (b)



(c) (d)

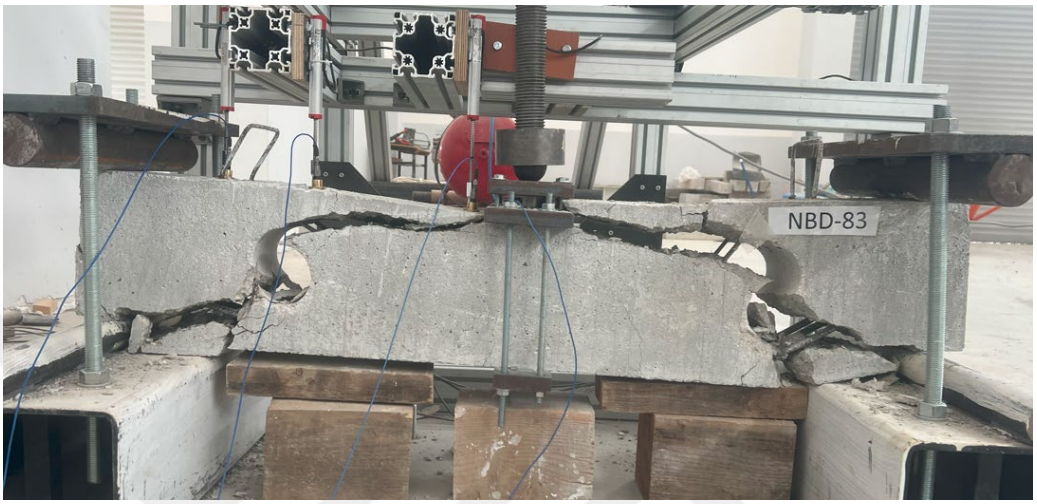
Şekil 4.117. (NBD-50) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

3) NBD-83 Numune Kiriş

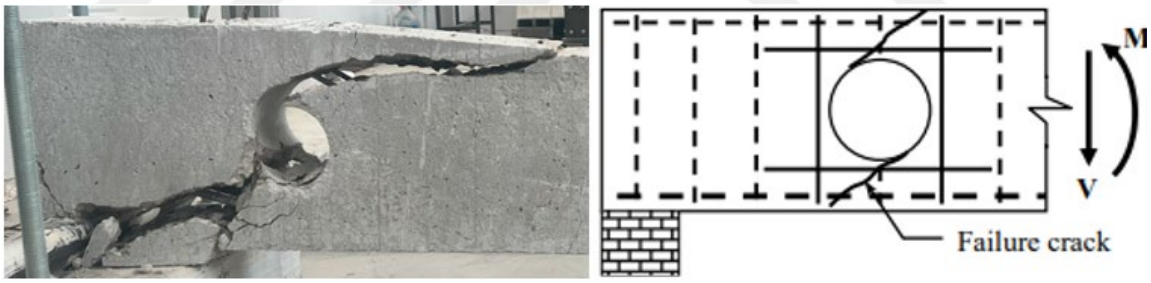
Bu kesme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı %41.50 olacak şekilde 83 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle NBD-83 kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 44.91 kN, maksimum ivme 329.99 g, minimum ivme -328.09 g, maksimum deplasman 27.33mm ve kalıcı deplasman 25.69 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1580.16 kN-s, V_r 2.56 m/s, E_{ab} 2273.42 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 78. Bu kiriş numunesinin referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %54, maksimum deplasmanı ise %218 ve E_{ab} ise %123 değerlerindedir. Kiriş numunesinin sağ mesnet kısmında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.120 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Frame tipi göçme modunu göstermiştir. NBD-83 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.121'de, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.118-4.119)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.118. (NBD-83) Nolu kiriş numunesi

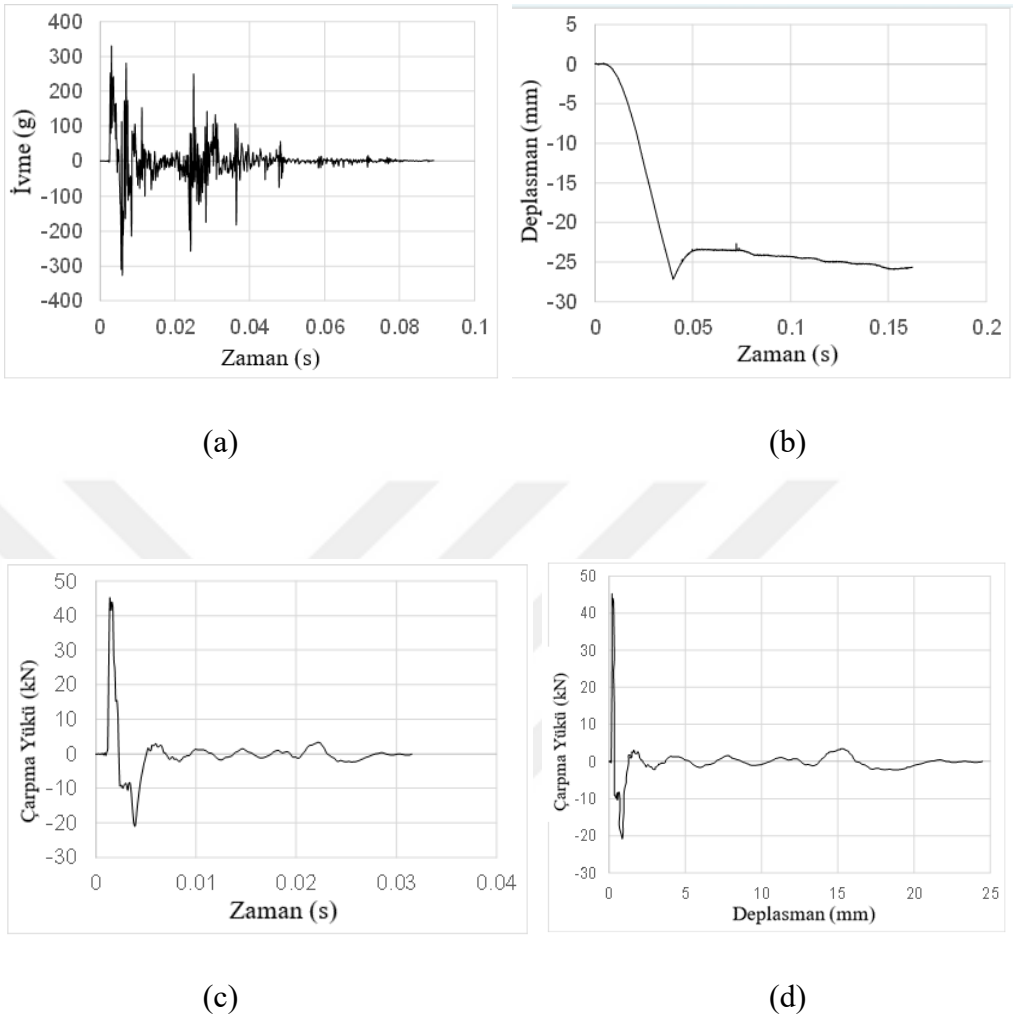


Şekil 4.119. (NBD-83) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.120. NBD-83 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması

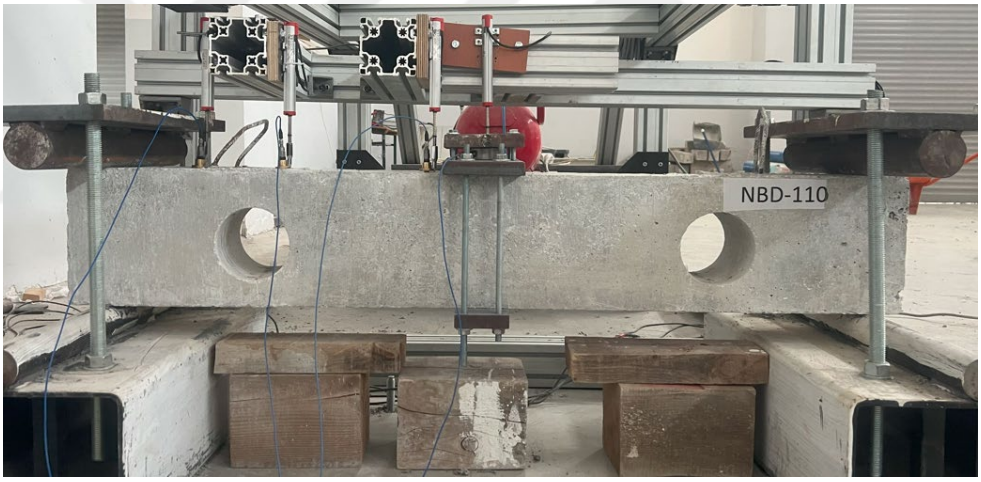


Şekil 4.121. (NBD-83) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

4) NBD-110 Numune Kiriş

Bu kesme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı %55.0 olacak şekilde 110 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle NBD-110 kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.01 kN, maksimum ivme 258.03 g, minimum ivme -222.17 g, maksimum deplasman 44.27 mm ve kalıcı deplasman 43.03 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p

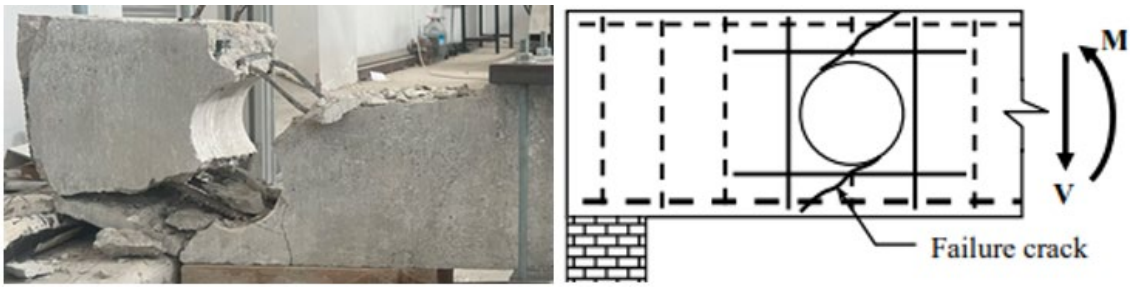
1485.67 kN-s, V_r 2.08 m/s, E_{ab} 2492.49 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 85. Bu kiriş numunesinin referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %42, maksimum deplasmanı ise %354 ve E_{ab} ise %135 değerlerindedir. Kiriş numunesinin sağ mesnet kısmında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.124 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Frame tipi göçme modunu göstermiştir. NSD-110 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.125'te, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.122-4.123)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.122. (NBD-110) Nolu kiriş numunesi

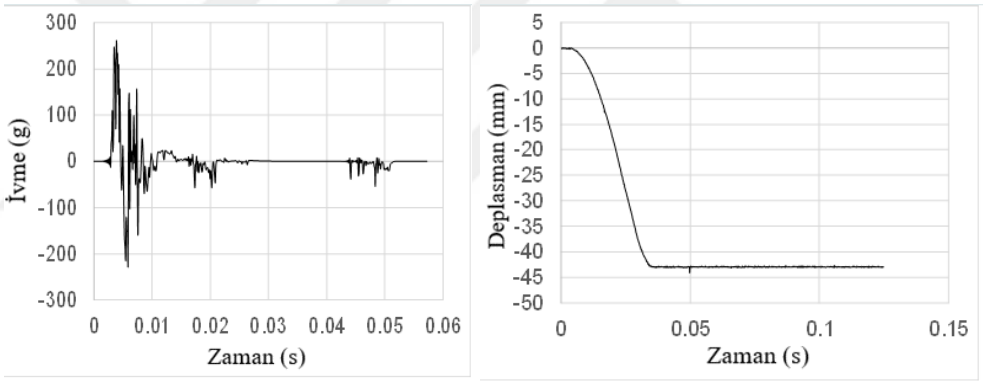


Şekil 4.123. (NBD-110) Nolu kiriş numunenin göçme modu

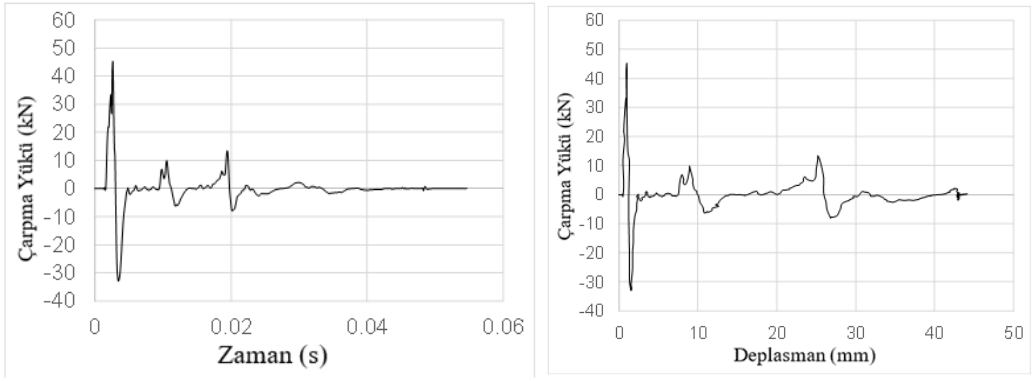


(a) (b)

Şekil 4.124. NBD-110 Kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



(a) (b)



(c) (d)

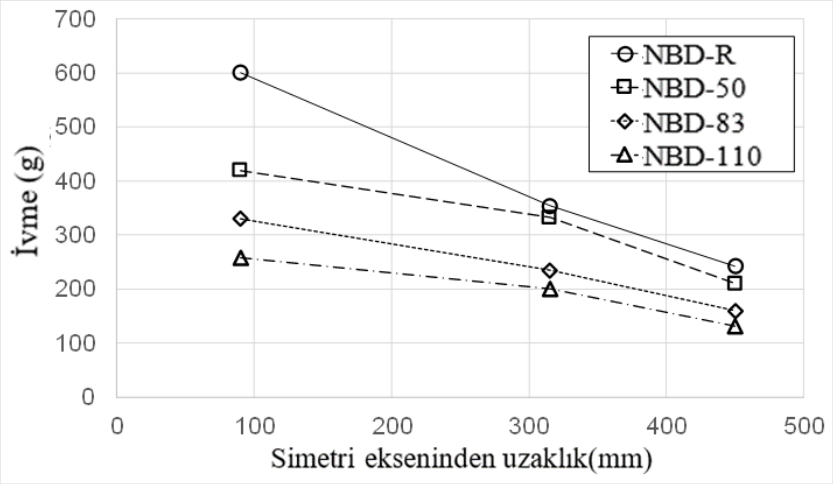
Şekil 4.125. (NBD-110) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

Çizelge 4.25. Geleneksel betondan üretilen eğilme kirişlerinin çarpma test sonuçları

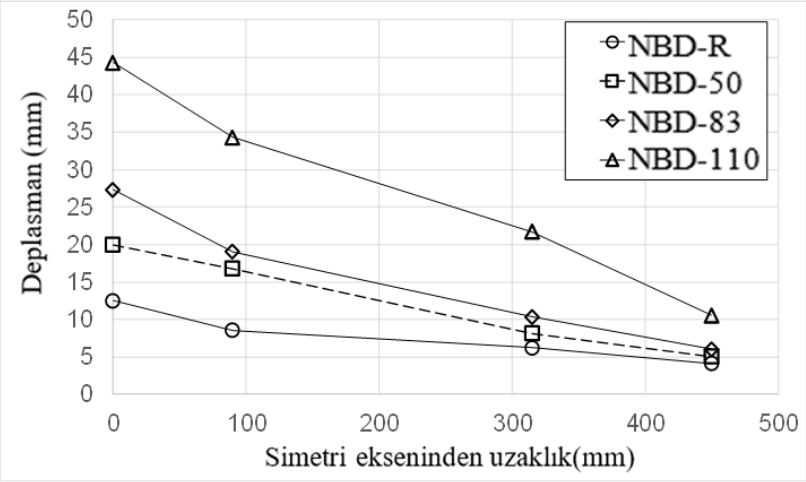
Numune	Numune kodu	Maksimum İvme (g)		Maksimum Deplasman (mm)		Maksimum Çarpma Yükü (kN)
		Maksimum	Minimum	Maksimum	Kalıcı	
1	NBD-R	600.97	-518.68	12.51	8.85	44.96
2	NBD-50	419.60	-153.83	19.97	16.78	45.11
3	NBD-83	329.99	-328.09	27.33	25.69	44.91
4	NBD-110	258.03	-222.17	44.27	43.03	45.01

Çizelge 4.26. Geleneksel betondan üretilen eğilme kirişlerinin emilen enerji değerleri

Numune	Numune kodu	$E_{çarpma}$ (Joule)	$V_{çarpma}$ (m/s)	I_p (kN-s)	V_r (m/s)	E_{ab} (Joule)	E_{ab} / $E_{çarpma}$
1	NBD-R	2922.40	5.40	1728.93	3.31	1837.34	0.63
2	NBD-50	2922.40	5.40	1608.90	2.70	2197.84	0.75
3	NBD-83	2922.40	5.40	1580.16	2.56	2273.42	0.78
4	NBD-110	2922.40	5.40	1485.67	2.08	2492.49	0.85



Şekil 4.125. Kiriş orta noktasından mesnete doğru ivme değerlerinin değişimi

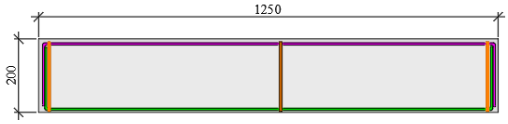
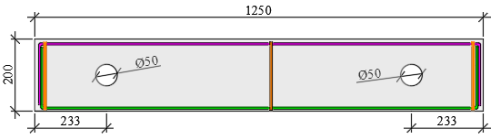
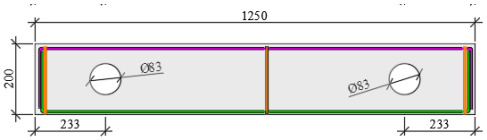
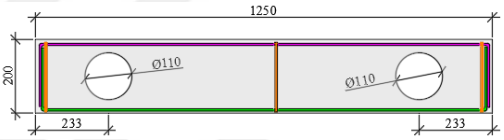
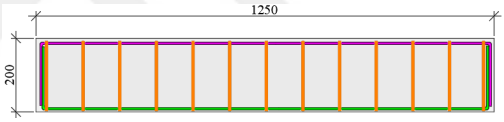
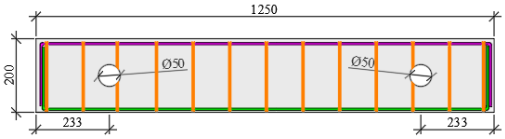
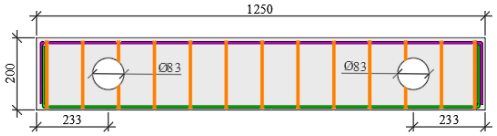
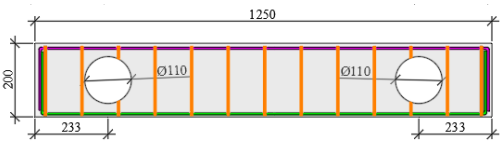


Şekil 4.126. Kiriş orta noktasından mesnete doğru deplasman değerlerinin değişimi

4.4.2. GPC kesme ve eğilme kiriş numuneleri

Aşağıda gösterildiği gibi, geopolimer kesme ve eğilme kirişleri çarpma deneyi dinamik yükleme altında test edildi. Dikdörtgen kesitli 150 x 200 x 1250 mm boyutlarında iki adet boşluksuz geopolimer kesme ve eğilme referans kirişleri, 6 adet iki grup kesme ve eğilme D/H oranı sırasıyla %25.00, %41.50 ve %55.00 boşluklu geopolimer kiriş. Üretilen numuneler maksimum ivme-zaman, maksimum deplasman-zaman, çarpma yüklemesi-deplasman ve çarpma yüklemesi-zaman ilişkileri incelenmiştir.

Çizelge 4.27. GPC kiriş numunelerin detayları

Numara	Kiriş Tipi	Numune kodu	Boşluk Çapı/Kiriş Yüksekliği (D/H)	
1	Kesme	GSD-R	-	
2	Kesme	GSD-50	0.250	
3	Kesme	GSD-83	0.415	
4	Kesme	GSD-110	0.550	
5	Eğilme	GBD-R	-	
6	Eğilme	GBD-50	0.250	
7	Eğilme	GBD-83	0.415	
8	Eğilme	GBD-110	0.550	

4.4.2.1. GPC kesme kiriş numuneleri

1) GSD-R Referans kiriş

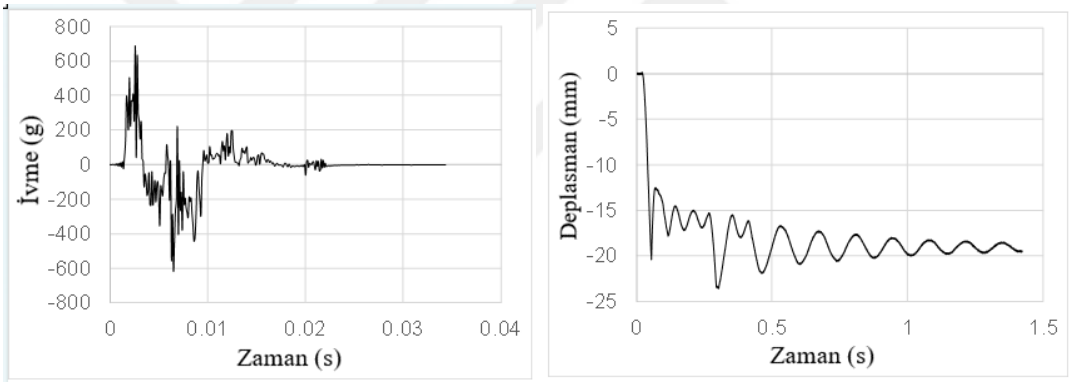
Bu deney numunesinde kesme davranışı göstermesi beklenen boşluksuz referans kiriş olarak tasarlanmış ve test edilmiştir. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle GPC kesme referans kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu referans numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.00 kN, maksimum ivme 686.08 g, minimum ivme -616.72 g, maksimum deplasman 23.78 mm ve kalıcı deplasman 19.46 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1720.12 kN-s, V_r 3.26 m/s, E_{ab} 1866.28 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 64 Kiriş numunesinin sağ mesnet kısmında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Referans kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.129'da, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.127-4.128)'de gösterilmiştir.



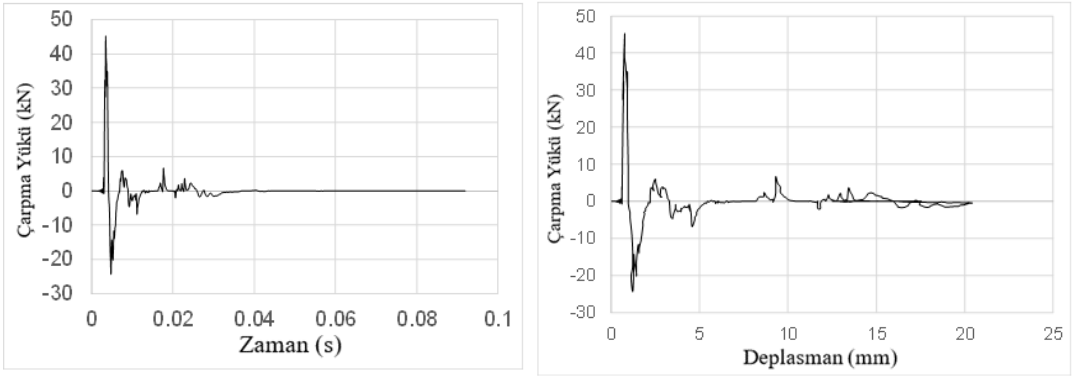
Şekil 4.127. (GSD-R) Nolu kiriş numunesi



Şekil 4.128. (GSD-R) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)



(c) (d)

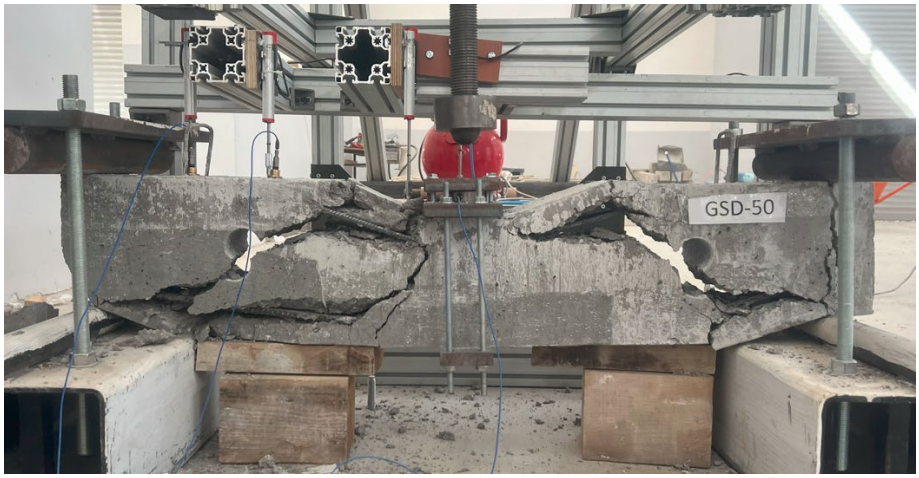
Şekil 4.129. (GSD-R) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

2) GSD-50 Numune kirişi

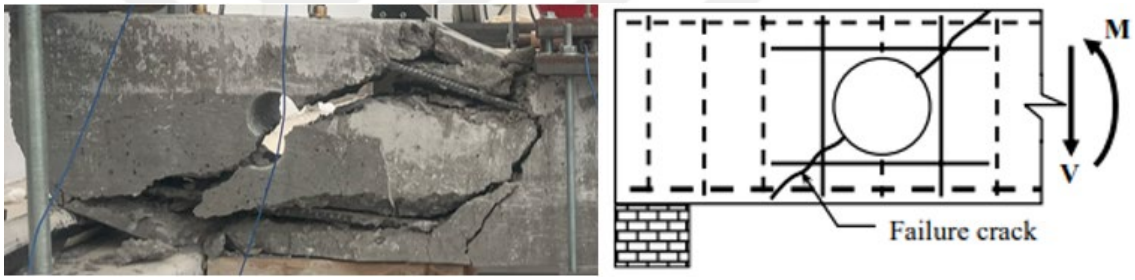
Bu kesme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı %25.00 olacak şekilde 50 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle GSD-50 kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.04 kN, maksimum ivme 477.86 g, minimum ivme -330.84 g, maksimum deplasman 34.93 mm ve kalıcı deplasman 34.81 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1595.67 kN-s, V_r 2.63 m/s, E_{ab} 2233.15 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 76. Bu kiriş numunesinin referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %69, maksimum deplasmanı ise %146 ve E_{ab} ise %119 değerlerindedir. Kiriş numunesi kesme çatlakları oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.132 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Beam tipi göçme modunu göstermiştir. GSD-50 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.133'te, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.130- 4.131)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.130. (GSD-50) Nolu kiriş numunesi

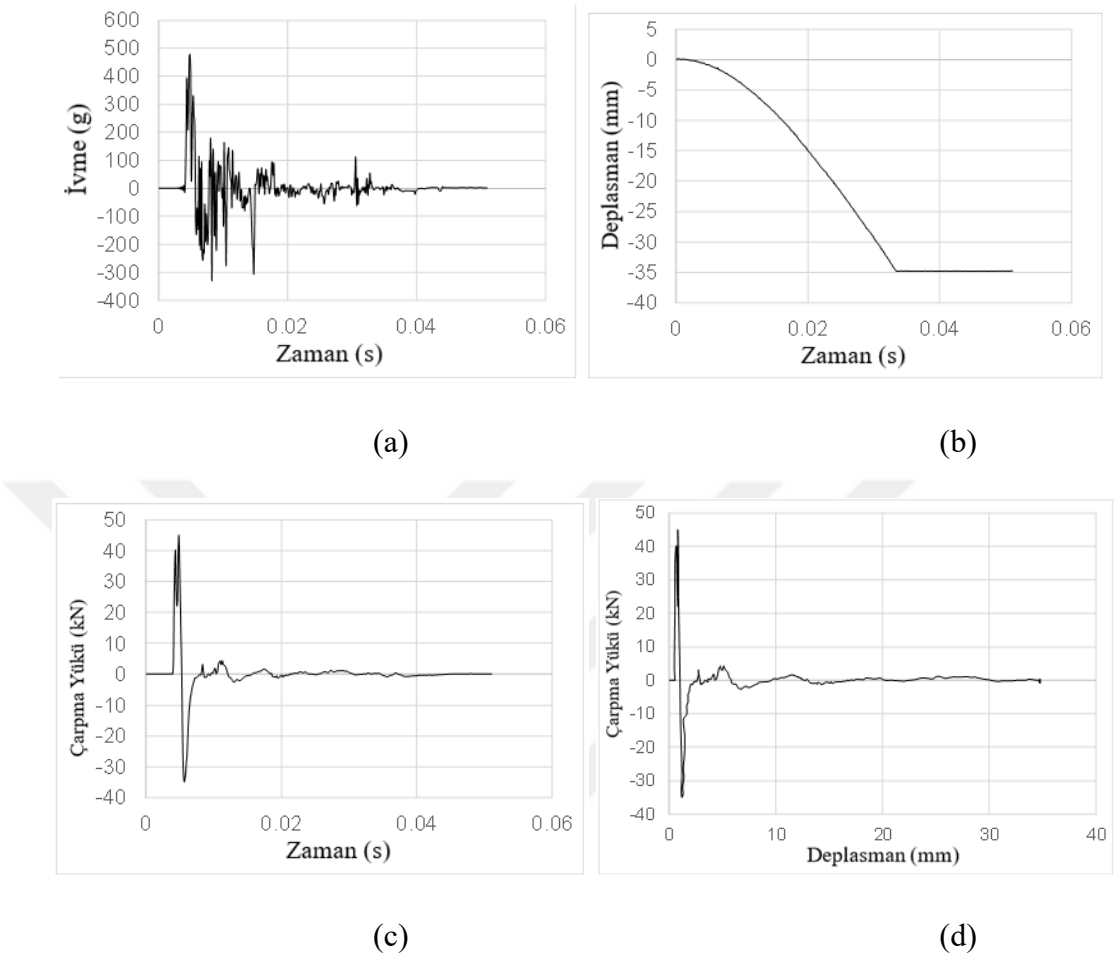


Şekil 4.131. (GSD-50) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.132. GSD-50 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması

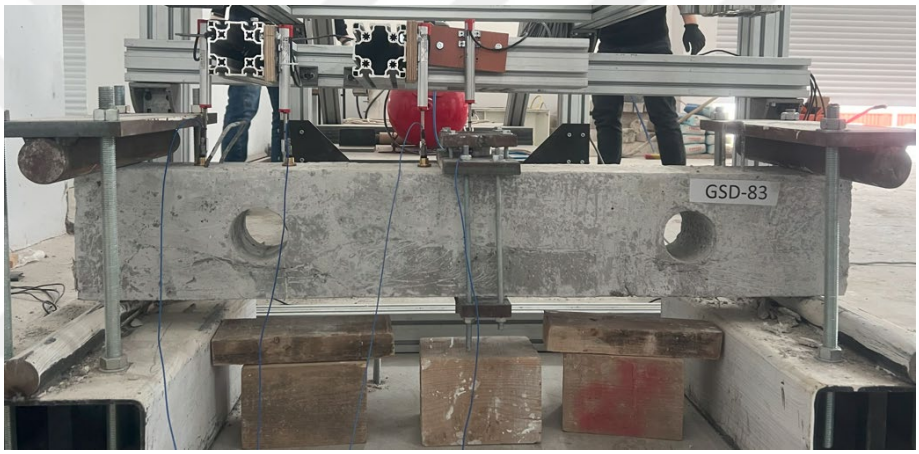


Şekil 4.133. (GSD-50) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

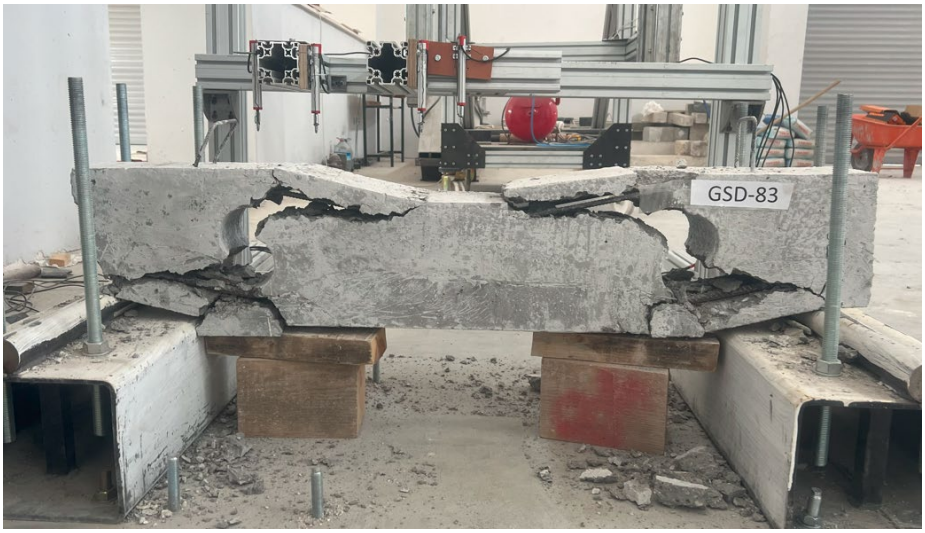
3) GSD-83 Numune kirişi

Bu kesme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı %41.50 olacak şekilde 83 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle GSD-83 kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.08 kN, maksimum ivme 340.64 g, minimum ivme -231.53 g, maksimum deplasman 49.94 mm ve kalıcı deplasman 37.61 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1563.45 kN-s, V_r 2.47 m/s, E_{ab} 2315.42 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 79. Bu kiriş numunesinin

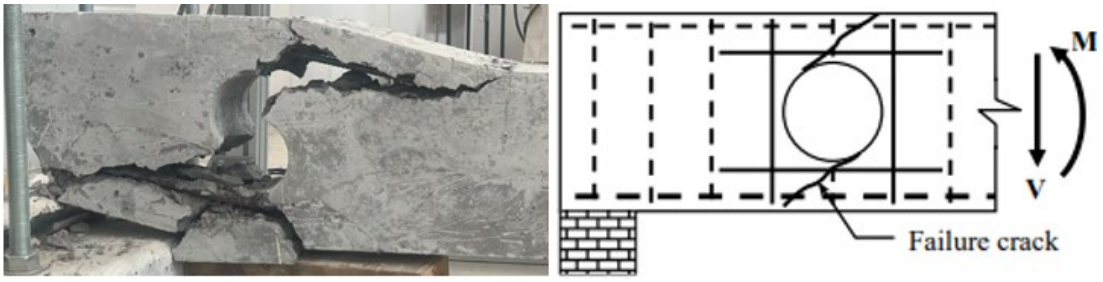
referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %49, maksimum deplasmanı ise %209 ve E_{ab} ise %124 değerlerindedir. Kiriş numunesi kesme çatlakları oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.136 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Frame tipi göçme modunu göstermiştir. GSD-83 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.137'de, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.134- 4.135)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.134. (GSD-83) Nolu kiriş numunesi

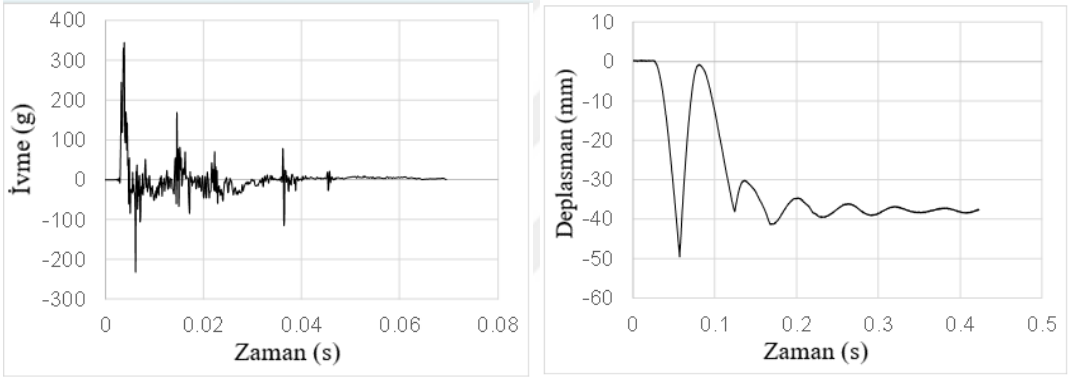


Şekil 4.135. (GSD-83) Nolu kiriş numunenin göçme modu

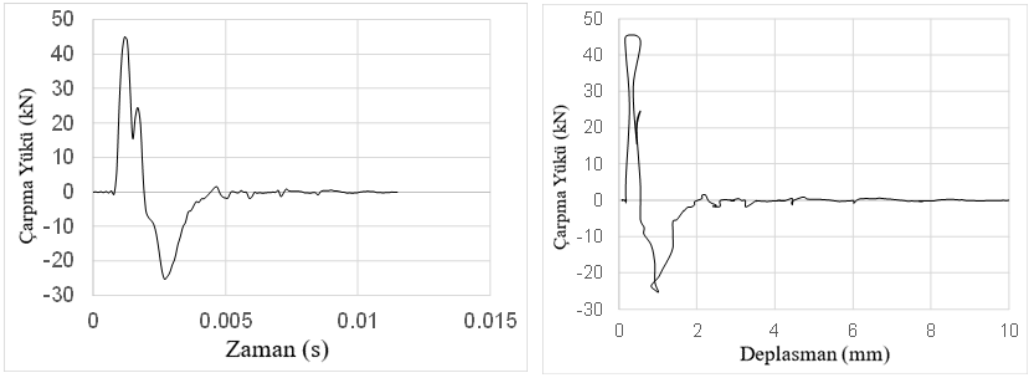


(a) (b)

Şekil 4.136. GSD-83 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



(a) (b)

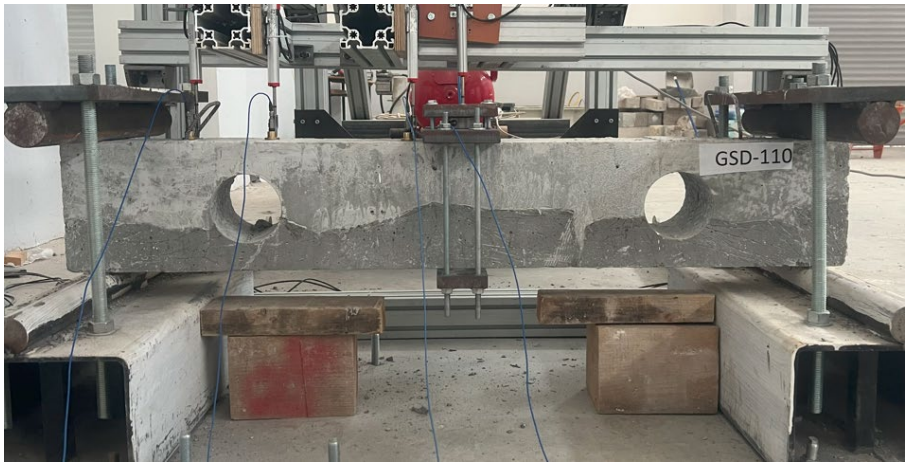


(c) (d)

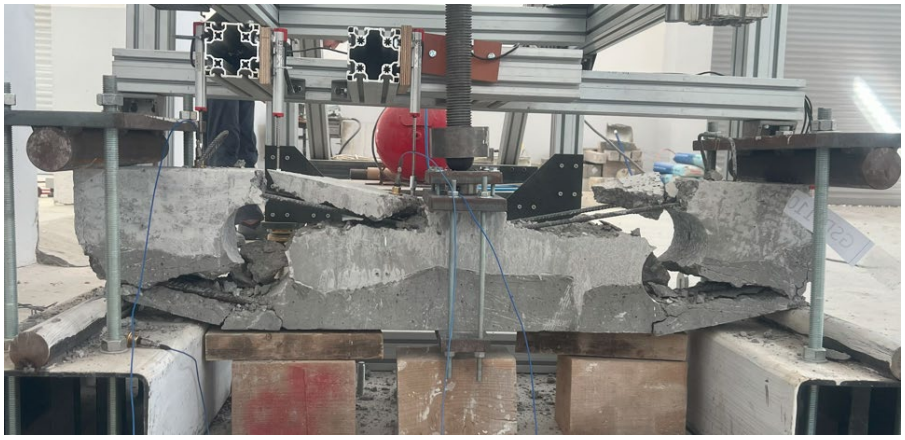
Şekil 4.137. (GSD-83) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

4) GSD-110 Numune kirişi

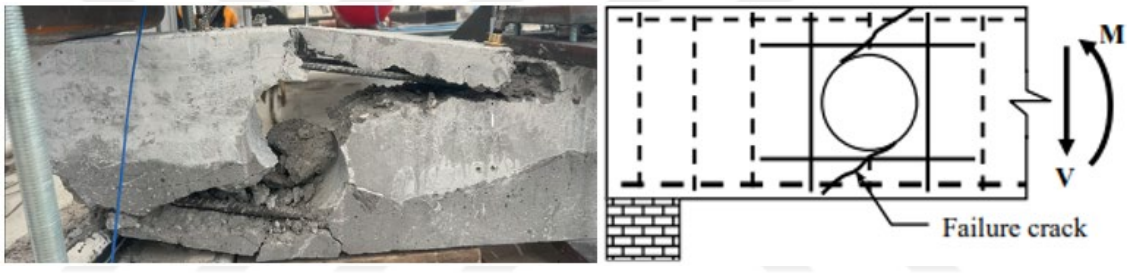
Bu kesme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı %55.00 olacak şekilde 110 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle GSD-110 kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.08 kN, maksimum ivme 273.61 g, minimum ivme -97.63 g, maksimum deplasman 62.63 mm ve kalıcı deplasman 56.61mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1480.12 kN-s, V_r 2.05 m/s, E_{ab} 2503.96 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 86. Bu kiriş numunesinin referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %39, maksimum deplasmanı ise %263 ve E_{ab} ise %134 değerlerindedir. Kiriş numunesi kesme çatlakları oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.140 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Frame tipi göçme modunu göstermiştir. GSD-110 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.141'de, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.138- 4.139)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.138. (GSD-110) Nolu kiriş numunesi

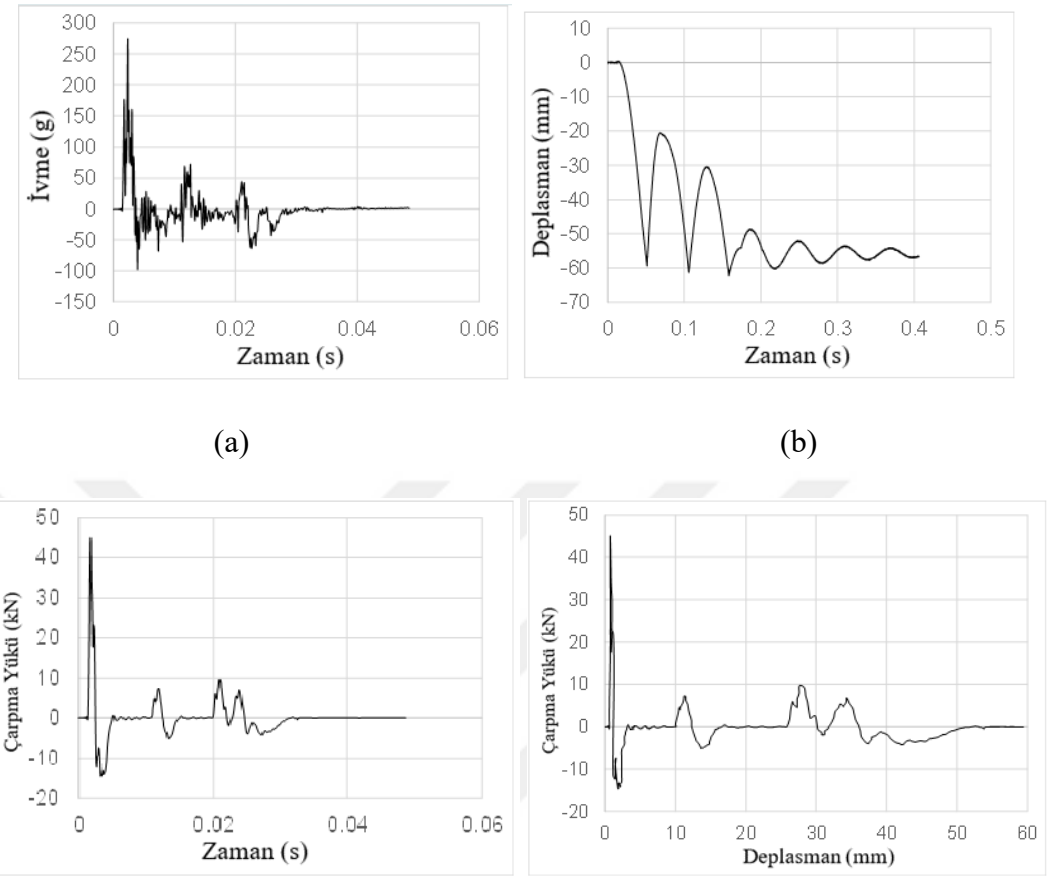


Şekil 4.139. (GSD-110) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.140. GSD-110 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



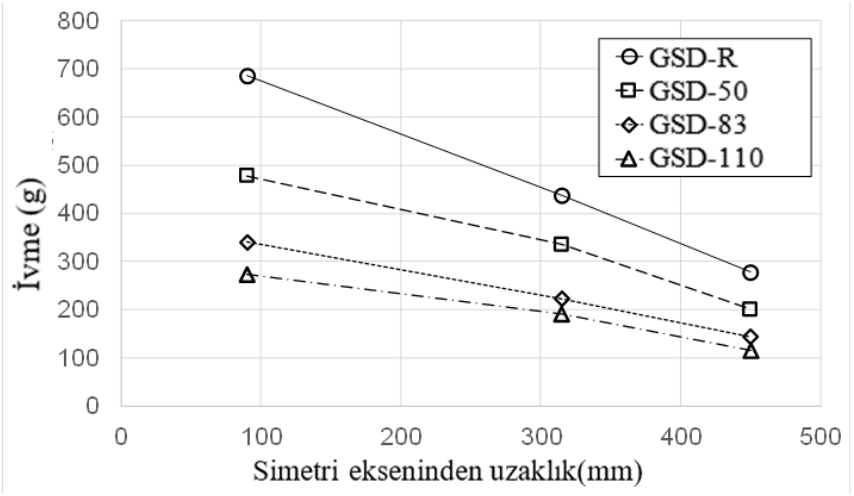
Şekil 4.141. (GSD-110) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

Çizelge 4.27. Geopolimer betondan üretilen kesme kirişlerinin çarpma test sonuçları

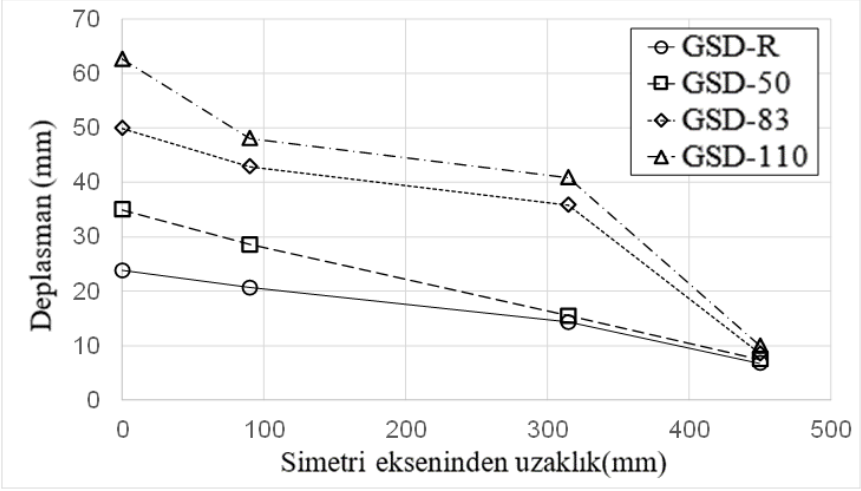
Numune	**Numune kodu**	**Maksimum İvme (g)**		**Maksimum Deplasman (mm)**		**Maksimum Çarpma Yükü (kN)**
		Maksimum	Minimum	Maksimum	Kalıcı	
1	GSD-R	686.08	-616.72	23.78	19.46	45.00
2	GSD-50	477.86	-330.84	34.93	34.81	45.04
3	GSD-83	340.64	-231.53	49.94	37.61	45.08
4	GSD-110	273.61	-97.63	62.63	56.61	45.08

Çizelge 4.28. Geopolimer betondan üretilen kesme kirişlerinin emilen enerji değerleri

Numune	Numune kodu	$E_{çarpma}$ (Joule)	$V_{çarpma}$ (m/s)	I_p (kN-s)	V_r (m/s)	E_{ab} (Joule)	E_{ab} / $E_{çarpma}$
1	GSD-R	2922.40	5.4	1720.12	3.26	1866.28	0.64
2	GSD-50	2922.40	5.4	1595.67	2.63	2233.15	0.76
3	GSD-83	2922.40	5.4	1563.45	2.47	2315.42	0.79
4	GSD-110	2922.40	5.4	1480.12	2.05	2503.96	0.86



Şekil 4.142. Kiriş orta noktasından mesnete doğru ivme değerlerinin değişimi

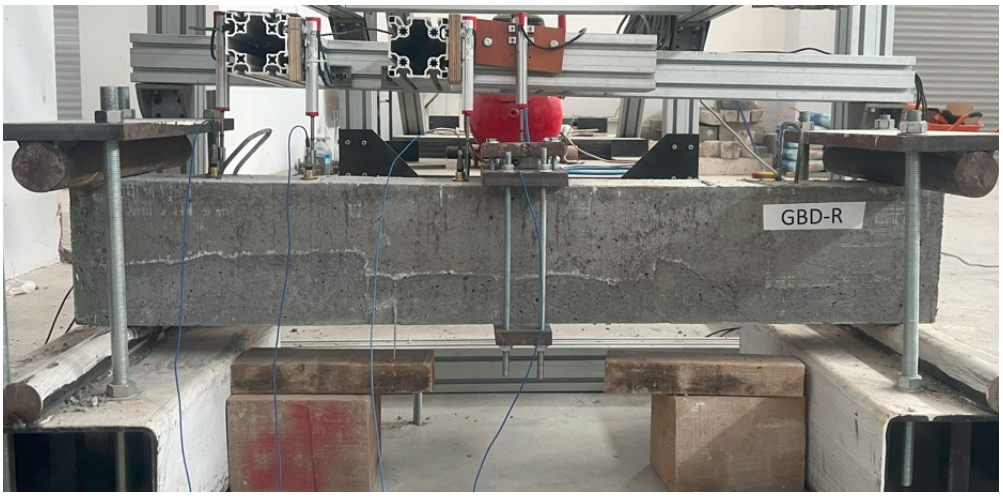


Şekil 4.143. Kiriş orta noktasından mesnete doğru deplasman değerlerinin değişimi

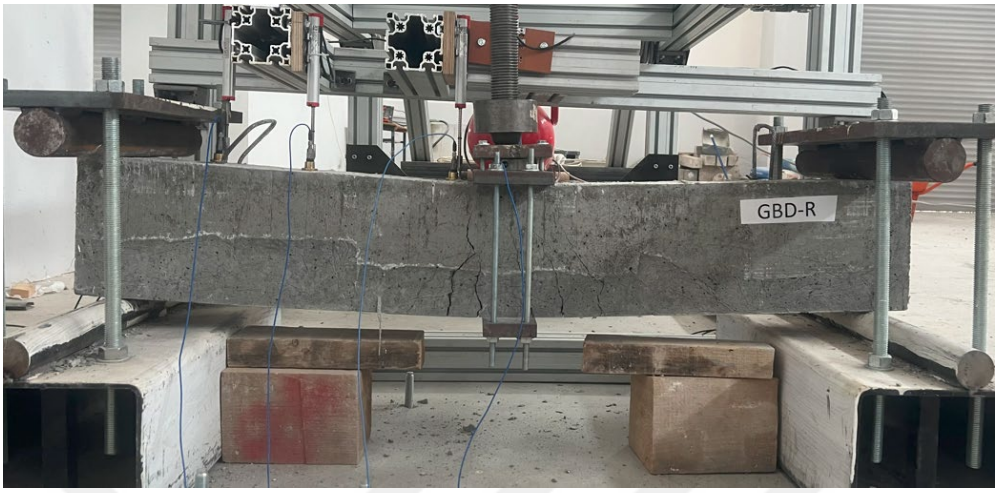
4.4.2.2. GPC Eğilme kiriş numuneleri

1) GBD-R Referans kiriş

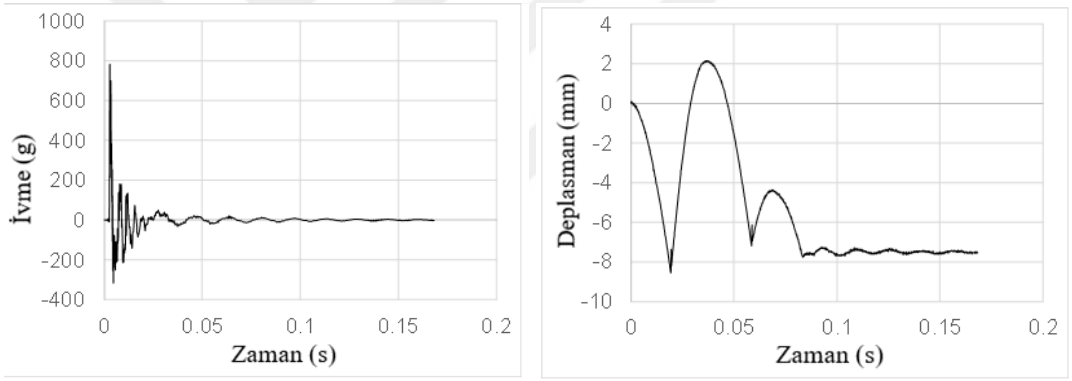
Bu deney numunesinde eğilme davranışı göstermesi beklenen boşluksuz referans kiriş olarak tasarlanmış ve test edilmiştir. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle GPC eğilme referans kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu referans numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.03 kN, maksimum ivme 776.54 g, minimum ivme -317.33 g, maksimum deplasman 10.71 mm ve kalıcı deplasman 7.54 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1770.45 kN-s, V_r 3.51 m/s, E_{ab} 1695.77 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 58 Kiriş numunesinin orta kısmında eğilme çatlağı oluşarak eğilme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Referans eğilme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.146'da, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.144-4.145)'de gösterilmiştir.



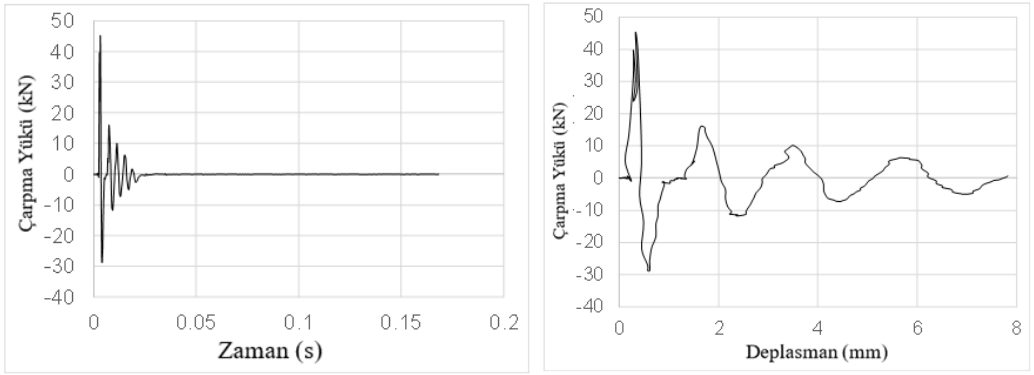
Şekil 4.144. (GBD-R) Nolu kiriş numunesi



Şekil 4.145. (GBD-R) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)



(c) (d)

Şekil 4.146. (GBD-R) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

2) GBD-50 Numune kirişi

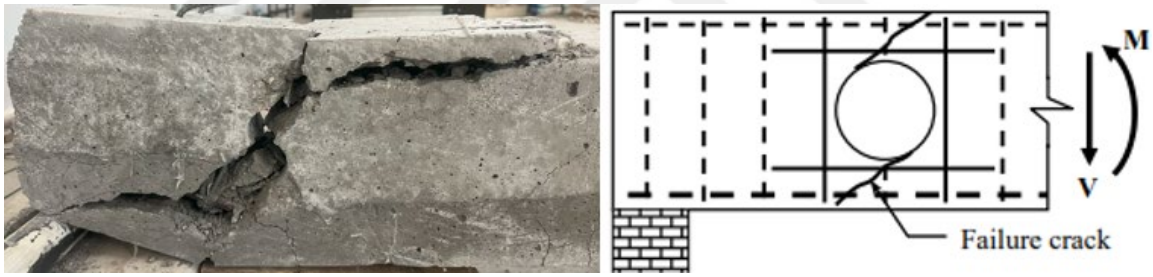
Bu eğilme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı %25.00 olacak şekilde 50 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle GBD-50 kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 44.97 kN, maksimum ivme 579.96 g, minimum ivme -147.04 g, maksimum deplasman 17.09 mm ve kalıcı deplasman 14.37 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1656.23 kN-s, V_r 2.94 m/s, E_{ab} 2064.37 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 71. Bu kiriş numunesinin referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %74, maksimum deplasmanı ise %158 ve E_{ab} ise %121 değerlerindedir. Kiriş numunenin sağ tarafında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.149 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Frame tipi göçme modunu göstermiştir. GBD-50 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.150'de, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.147- 4.148)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.147. (GBD-50) Nolu kiriş numunesi

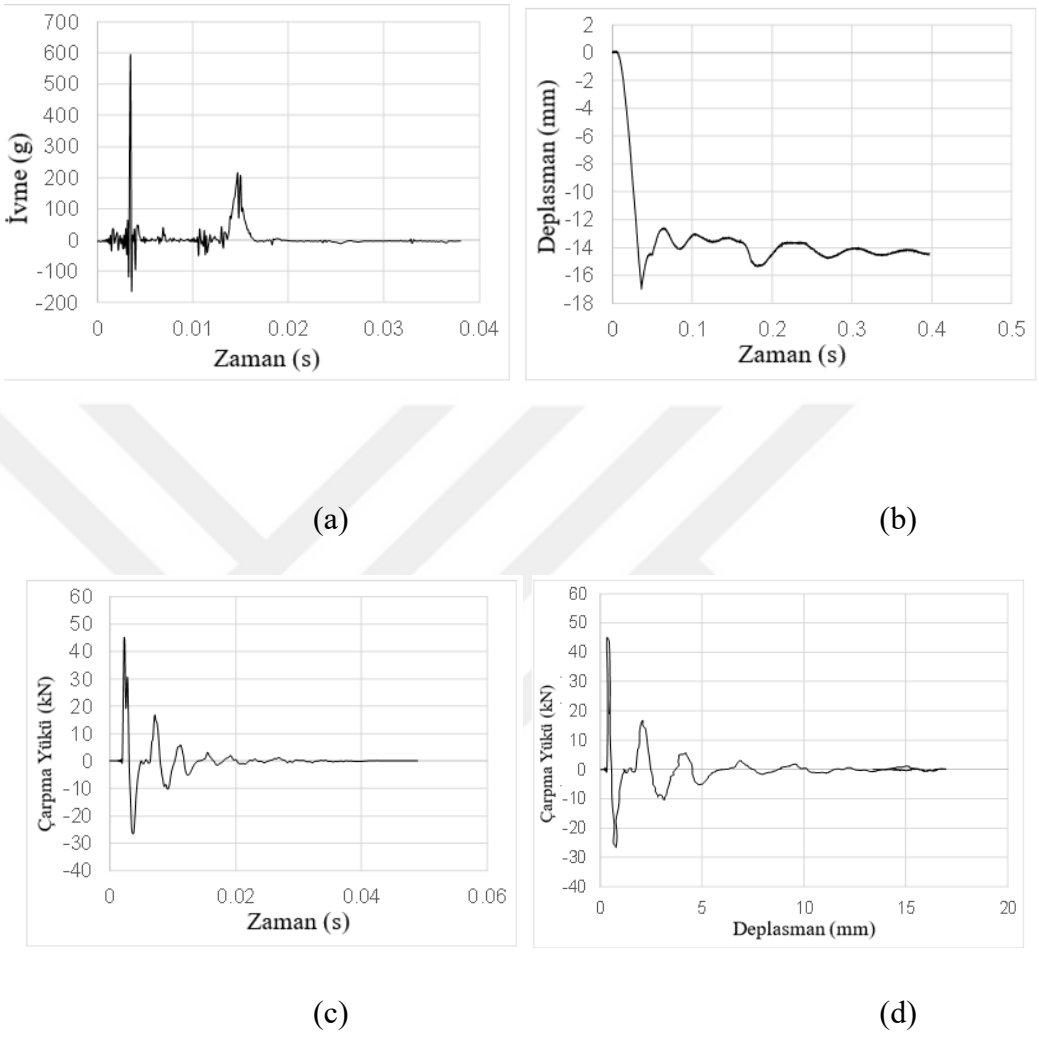


Şekil 4.148. (GBD-50) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.149. GBD-50 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



Şekil 4.150. (GBD-50) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

3) GBD-83 Numune kirişi

Bu eğilme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı %41.50 olacak şekilde 83 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle GBD-83 kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.04 kN, maksimum ivme 469.53 g, minimum ivme -157.63 g, maksimum

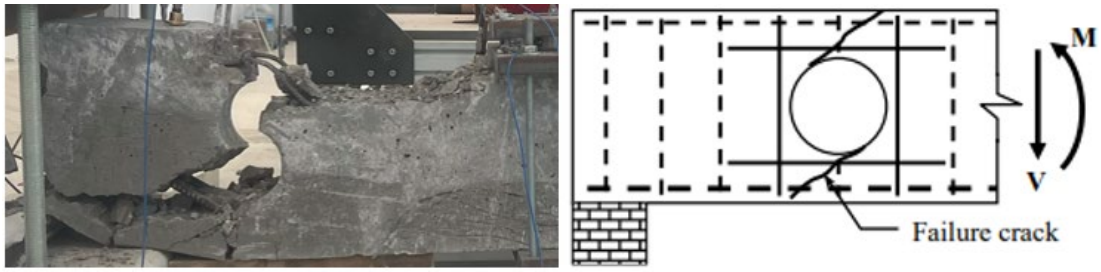
deplasman 25.27 mm ve kalıcı deplasman 25.12 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1632.45 kN-s, V_r 2.82 m/s, E_{ab} 2132.84 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 73. Bu kiriş numunesinin referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %60, maksimum deplasmanı ise %235 ve E_{ab} ise %125 değerlerindedir. Kiriş numunenin sağ tarafında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.153 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Frame tipi göçme modunu göstermiştir. GBD-83 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.154'te, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.151- 4.152)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.151. (GBD-83) Nolu kiriş numunesi

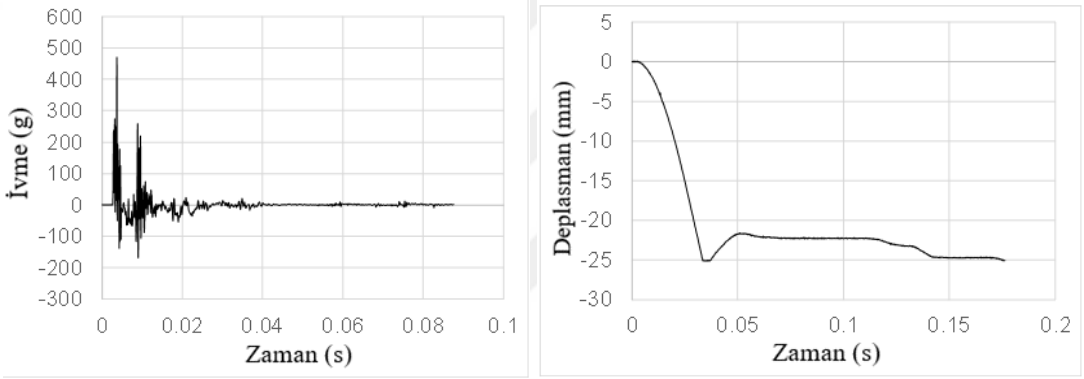


Şekil 4.152. (GBD-83) Nolu kiriş numunenin göçme modu

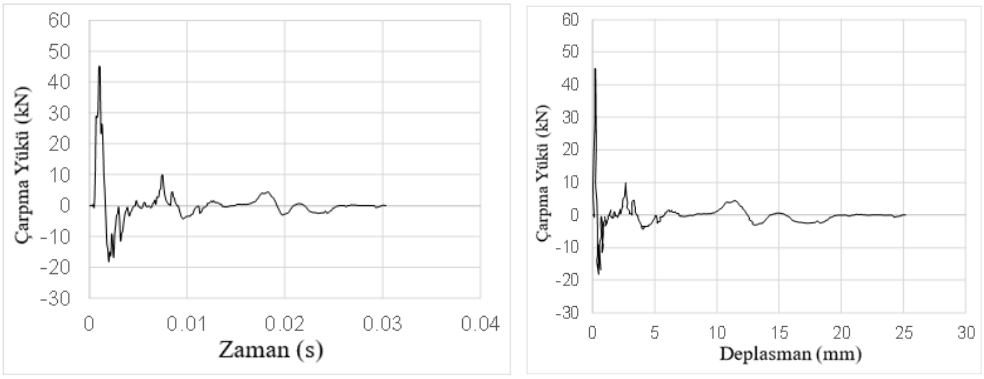


(a) (b)

Şekil 4.153. GBD-83 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



(a) (b)

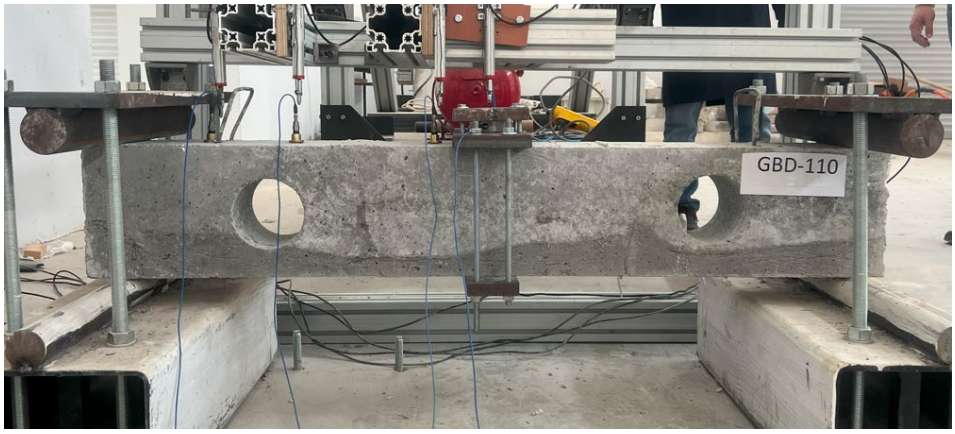


(c) (d)

Şekil 4.154. (GBD-83) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

4) GBD-110 Numune kirişi

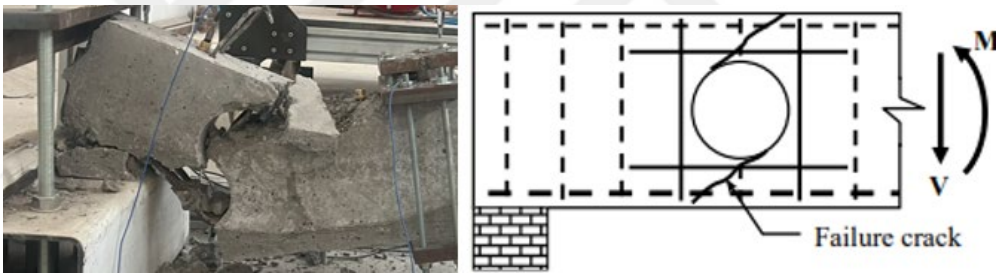
Bu eğilme kiriş numunesinin mesnet bölgesinde D/H oranı % 55.00 olacak şekilde 110 mm'lik bir boşluk açılmış ve test düzeneğine tabi tutulmuştur. 198.6 kg'lık bir çarpma tertibatının 1.5 m yükseklikten düşürülmesiyle GBD-110 kiriş numunesine 2.9224 kJoule sabit enerjili darbe yükü uygulanmıştır. Bu kiriş numunenin ölçülen maksimum çarpma kuvveti ise 45.03 kN, maksimum ivme 374.39 g, minimum ivme -179.39 g, maksimum deplasman 41.77 mm ve kalıcı deplasman 41.61 mm. Bu kiriş numunenin hesaplanan I_p 1567.89 kN-s, V_r 2.49 m/s, E_{ab} 2304.40 j ve E_{ab} / $E_{çarpma}$ % 79. Bu kiriş numunesinin referans kirişinin maksimum ivmesine kıyasla %48, maksimum deplasmanı ise %390 ve E_{ab} ise %135 değerlerindedir. Kiriş numunenin sağ tarafında kesme çatlağı oluşarak kesme kırılmasına uğramış ve deney sonlandırılmıştır. Deney elemanında göçme modu kesme kırılması olarak görülmüştür. Şekil 4.157 incelendiğinde bu boşluklu kiriş numunesinin Mansur (2006) yaptığı çalışmaya göre Frame tipi göçme modunu göstermiştir. GBD-110 kesme kirişi olarak elde edilen sonuçları Şekil 4.158'te, ivme-zaman (a), deplasman-zaman (b), çarpma yükü-zaman (c) ve çarpma yükü-deplasman (d) olarak grafikleri verilmiştir. Kirişin deneyden önce ve göçmeden sonraki hali Şekil (4.155- 4.156)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.155. (GBD-110) Nolu kiriş numunesi

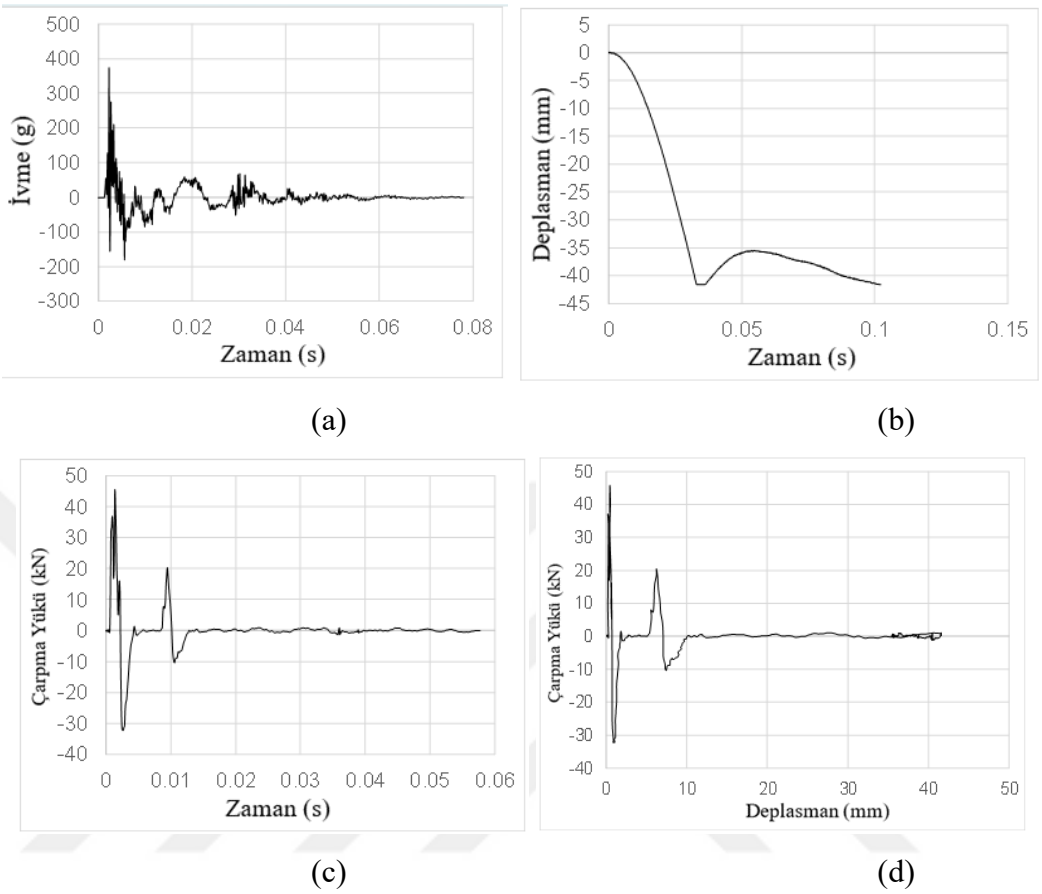


Şekil 4.156. (GBD-110) Nolu kiriş numunenin göçme modu



(a) (b)

Şekil 4.157. GBD-110 kirişinin kırılma mekanizmasının literatür ile karşılaştırılması a- deney sonucu b- literatürdeki kırılma mekanizması



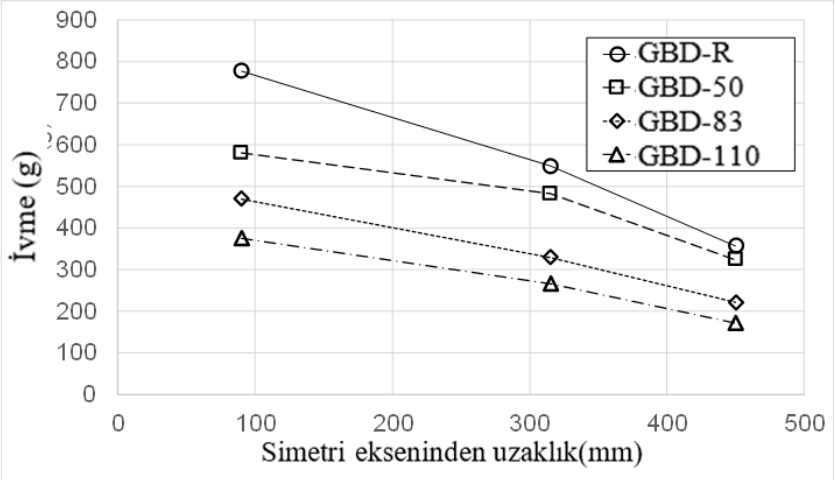
Şekil 4.158. (GBD-110) Nolu kiriş numunenin (a) ivme-zaman, (b) deplasman-zaman, (c) çarpma yükü-zaman ve (d) çarpma yükü-deplasman grafikleri

Çizelge 4.29. Geopolimer betondan üretilen eğilme kirişlerinin çarpma test sonuçları

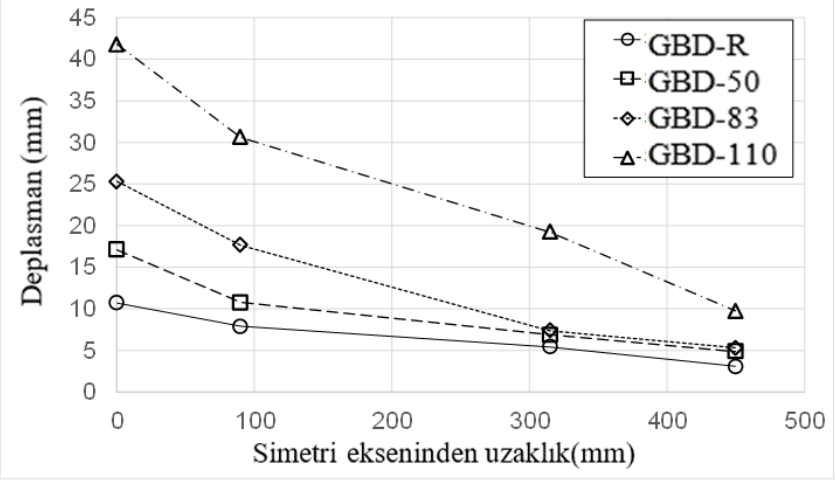
Numune	**Numune kodu**	**Maksimum İvme (g)**		**Maksimum Deplasman (mm)**		**Maksimum Çarpma Yükü (kN)**
		Maksimum	Minimum	Maksimum	Kalıcı	
1	GBD-R	776.54	-317.33	10.71	7.54	45.03
2	GBD-50	579.96	-147.04	17.09	14.37	44.97
3	GBD-83	469.53	-157.63	25.27	25.12	45.04
4	GBD-110	374.39	-179.39	41.77	41.61	45.03

Çizelge 4.30. Geopolimer betondan üretilen eğilme kirişlerinin emilen enerji değerleri

Numune	Numune kodu	$E_{çarpma}$ (Joule)	$V_{çarpma}$ (m/s)	I_p (kN-s)	V_r (m/s)	E_{ab} (Joule)	E_{ab} / $E_{çarpma}$
1	GBD-R	2922.40	5.4	1770.45	3.51	1695.77	0.58
2	GBD-50	2922.40	5.4	1656.23	2.94	2064.37	0.71
3	GBD-83	2922.40	5.4	1632.45	2.82	2132.84	0.73
4	GBD-110	2922.40	5.4	1567.89	2.49	2304.40	0.79



Şekil 4.159. Kiriş orta noktasından mesnete doğru ivme değerlerinin değişimi



Şekil 4.160. Kiriş orta noktasından mesnete doğru deplasman değerlerinin değişimi

4.4.3. GPC ve GB numune kirişlerin dinamik yükleme altında deneysel sonuçları karşılaştırması

Bu çalışma kapsamında GB ve GPC kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi için deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada deneysel değişkenler olarak betonarme kirişlerin eğilme ve kesme olması durumu ile kirişlerin kesme açıklığında bırakılan boşlukların kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki genel davranışları ve performansları üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Literatürde yer alan birçok başka çalışmada kullanılan serbest ağırlık düşürme test düzeneği kullanılarak 16 adet betonarme kiriş sabit enerji düzeyli çarpma yüklemesi etkisinde test edilerek deneysel değişkenlerin davranış üzerindeki etkileri yorumlanmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen tüm sonuçları Çizelge (4.31-4.34)'te sunulmuştur.

Çizelge 4.31. GPC ve GB numune kirişlerinin dinamik yükleme altında ölçülen ivme değerleri

Numune	Numune kodu	İvme (g)					
		a_1		a_2		a_3	
		Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
1	NBD-R	600.97	-518.68	353.63	-212.93	242.57	-203.82
2	NBD-50	419.60	-153.83	332.08	-141.00	209.89	-107.28
3	NBD-83	329.99	-328.09	234.46	-217.58	159.86	-85.43
4	NBD-110	258.03	-222.17	199.63	-177.52	131.07	-72.33
5	NSD-R	508.82	-459.70	302.10	-178.07	206.58	-157.51
6	NSD-50	345.36	-210.14	273.23	-180.52	171.02	-141.35
7	NSD-83	262.20	-233.23	186.25	-178.08	127.68	-121.38
8	NSD-110	206.59	-180.51	157.34	-64.72	106.59	-82.41
9	GBD-R	776.54	-317.33	548.67	-381.19	356.76	-209.17
10	GBD-50	579.96	-147.04	481.54	-348.29	323.29	-157.89
11	GBD-83	469.53	-157.63	329.18	-188.59	220.63	-93.49
12	GBD-110	374.39	-179.39	264.85	-254.04	172.24	-110.73
13	GSD-R	686.08	-616.72	437.30	-263.39	277.94	-247.06
14	GSD-50	477.86	-330.84	335.69	-262.12	201.07	-97.32
15	GSD-83	340.64	-231.53	222.65	-207.49	143.88	-123.29
16	GSD-110	273.61	-97.63	191.23	-124.58	115.86	-104.15

Çizelge 4.32. GPC ve GB numune kirişlerinin dinamik yükleme altında ölçülen deplasman değerleri

Numune	Numune kodu	Deplasman (mm)											
		d_1			d_2			d_3			d_4		
		Max	Min.	Total	Max.	Min.	Total	Max.	Min.	Total	Max.	Min.	Total
1	NBD-R	2.32	-10.19	12.51	0.10	-8.45	8.56	0.21	-6.02	6.23	0.51	-3.60	4.12
2	NBD-50	1.54	-18.43	19.97	0.10	-16.70	16.80	0.10	-8.03	8.13	0.13	-4.95	5.08
3	NBD-83	0.10	-27.23	27.33	0.05	-18.97	19.02	0.08	-10.27	10.35	1.42	-4.63	6.05
4	NBD-110	0.10	-44.16	44.27	0.15	-34.15	34.31	7.10	-14.59	21.70	4.79	-5.79	10.58
5	NSD-R	0.31	-26.15	26.46	13.14	-10.00	23.14	12.25	-3.55	15.80	3.96	-4.01	7.98
6	NSD-50	0.15	-38.52	38.68	0.15	-32.32	32.47	0.10	-17.50	17.60	0.13	-8.62	8.75
7	NSD-83	0.10	-53.84	53.94	0.21	-45.64	45.85	2.08	-40.46	42.55	3.24	-9.50	12.74
8	NSD-110	0.26	-66.65	66.91	0.26	-53.74	53.99	2.14	-42.83	44.97	0.41	-14.82	15.23
9	GBD-R	2.14	-8.57	10.71	0.00	-7.88	7.88	0.05	-5.39	5.44	0.08	-3.01	3.09
10	GBD-50	0.12	-16.97	17.09	0.00	-10.78	10.78	0.02	-6.87	6.89	0.06	-4.82	4.88
11	GBD-83	0.10	-25.17	25.27	0.04	-17.64	17.68	1.15	-6.24	7.39	1.05	-4.24	5.29
12	GBD-110	0.15	-41.61	41.77	0.12	-30.47	30.59	0.15	-19.09	19.25	0.03	-9.70	9.73
13	GSD-R	0.15	-23.63	23.78	13.92	-6.68	20.60	12.77	-1.54	14.31	6.08	-0.65	6.73
14	GSD-50	0.13	-34.81	34.93	0.06	-28.48	28.52	0.66	-14.82	15.48	0.26	-7.21	7.46
15	GSD-83	0.37	-49.57	49.94	0.19	-42.22	42.90	27.18	-8.65	35.83	2.60	-5.92	8.52
16	GSD-110	0.40	-62.23	62.63	0.32	-47.70	48.03	23.55	-17.26	40.82	4.14	-5.86	10.00

Çizelge 4.33. GPC ve GB numune kirişlerinin dinamik yükleme altında (ivme, deplasman ve çarpma yükü) sonuçları

Numune	Numune kodu	İvme (g)		Deplasman (mm)		Maksimum Çarpma Yükü (kN)
		Maksimum	Minimum	Maksimum	Kalıcı	
1	NBD-R	600.97	-518.68	12.51	8.85	44.96
2	NBD-50	419.60	-153.83	19.97	16.78	45.11
3	NBD-83	329.99	-328.09	27.33	25.69	44.91
4	NBD-110	258.03	-222.17	44.27	43.03	45.01
5	NSD-R	508.82	-459.70	26.46	22.96	45.03
6	NSD-50	345.36	-210.14	38.68	38.45	45.00
7	NSD-83	262.20	-233.23	53.94	53.84	45.00
8	NSD-110	206.59	-180.51	66.91	66.65	45.08
9	GBD-R	776.54	-317.33	10.71	7.54	45.03
10	GBD-50	579.96	-147.04	17.09	14.37	44.97
11	GBD-83	469.53	-157.63	25.27	25.12	45.04
12	GBD-110	374.39	-179.39	41.77	41.61	45.03
13	GSD-R	686.08	-616.72	23.78	19.46	45.00
14	GSD-50	477.86	-330.84	34.93	34.81	45.04
15	GSD-83	340.64	-231.53	49.94	37.61	45.08
16	GSD-110	273.61	-97.63	62.63	56.61	45.08

Çizelge 4.34. GPC ve GB numune kirişlerinin emilen enerji sonuçları

Numune	Numune kodu	$E_{çarpma}$ (Joule)	$V_{çarpma}$ (m/s)	I_p (kN-s)	V_r (m/s)	E_{ab} (Joule)	E_{ab} /$E_{çarpma}$
1	NBD-R	2922.40	5.4	1728.93	3.31	1837.34	0.63
2	NBD-50	2922.40	5.4	1608.90	2.70	2197.84	0.75
3	NBD-83	2922.40	5.4	1580.16	2.56	2273.42	0.78
4	NBD-110	2922.40	5.4	1485.67	2.08	2492.49	0.85
5	NSD-R	2922.40	5.4	1674.45	3.03	2009.97	0.69
6	NSD-50	2922.40	5.4	1545.56	2.38	2358.85	0.81
7	NSD-83	2922.40	5.4	1498.00	2.14	2466.45	0.84
8	NSD-110	2922.40	5.4	1367.56	1.49	2703.12	0.92
9	GBD-R	2922.40	5.4	1770.45	3.51	1695.77	0.58
10	GBD-50	2922.40	5.4	1656.23	2.94	2064.37	0.71
11	GBD-83	2922.40	5.4	1632.45	2.82	2132.84	0.73
12	GBD-110	2922.40	5.4	1567.89	2.49	2304.40	0.79
13	GSD-R	2922.40	5.4	1720.12	3.26	1866.28	0.64
14	GSD-50	2922.40	5.4	1595.67	2.63	2233.15	0.76
15	GSD-83	2922.40	5.4	1563.45	2.47	2315.42	0.79
16	GSD-110	2922.40	5.4	1480.12	2.05	2503.96	0.86

Çizelge 4.34. GPC ve GB numune boşluklu kirişlerin referans kirişlere göre sonuçları

Numune	Numune kodu	Maksimum ivme %	Maksimum deplasman %	E_{ab} (Joule)
1	NBD-R	-	-	-
2	NBD-50	69	159	119
3	NBD-83	54	218	123
4	NBD-110	42	354	135
5	NSD-R	-	-	-
6	NSD-50	67	168	117
7	NSD-83	51	203	122
8	NSD-110	40	252	134
9	GBD-R	-	-	-
10	GBD-50	74	158	121
11	GBD-83	60	235	125
12	GBD-110	48	390	135
13	GSD-R	-	-	-
14	GSD-50	69	146	119
15	GSD-83	49	209	124
16	GSD-110	39	263	134

Betonarme kiriş deney elemanlarının orta noktasına uygulanan çarpma yüklemesinin maksimum değerleri incelendiğinde 44.91 kN ile 45.08 kN arasında değişim gösterdiği ve ortalama 45.02 kN değerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Uygulanan çarpma yüklemesi değerlerinin birbirlerine son derece yakın olduğu, standart sapma ve varyasyon değerlerinin sırasıyla 0.0496 kN ve 0.0025 olarak elde edildiği görülmüştür. Maksimum çarpma yüklemesi değerlerinin birbirleri ile uyumlu ve son derece yakın ölçülmesi deneysel çalışmada tüm kiriş deney elemanlarına sabit ağırlıklı çekiç, sabit yükseklikten düşürülerek uygulanan sabit enerji düzeyli çarpma yüklemesi etkisinde özdeş bir çarpma yüklemesi

uygulanabildiğini göstermiştir. Çalışmada kullanılan çarpma yüklemesinin uygulanmasında kullanılan serbest ağırlık düşürme test düzeneği daha önce literatürde yer alan birçok çalışmada da kullanılmış ve özdeş çarpma yüklemesi uygulayabildiği bilinen bir test sistemi olduğu bir kere daha görülmüştür (Yılmaz ve diğ., 2022). Numunelere uygulanan darbe enerjisi seviyesi aynı olduğundan bu beklenen bir durumdur. Bu sonuç, deneylerde kullanılan serbest düşme ağırlık test düzeneğinde sürtünmeden kaynaklanabilecek enerji kaybının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ve cihazın darbe testlerine uygun olduğunu göstermektedir.

Çalışmada incelenen değişkenlerden birisi betonarme kirişlerin üretilmesinde kullanılan beton türüdür. Çalışmada deney elemanları standart çimentolu beton ve çimentosuz GPC kullanılarak iki seri şeklinde üretilmiştir. Genel olarak çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, GPC kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki davranışlarının ve performanslarının GB kirişlerden daha iyi olduğu görülmüştür. GPC kirişlerden ölçülen maksimum ivme değerlerinin GB kullanılan kirişlerde ortalama %35.7 oranında daha büyük değerler sergilediği görülmüştür. GB kiriş deney elemanlarında ölçülen maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri de GPC kullanılan deney elemanlarından sırasıyla ortalama %11 ve %16 oranlarında daha büyüktür. Elde edilen sonuçlar birbirlerine çok yakın basınç dayanımına sahip GPC ve GB türlerinin çarpma yüklemesi altında sergilediği davranış açısından değerlendirildiğinde, GPC'nin daha başarılı olduğunu göstermiştir. GPC kiriş deney elemanları sabit enerji düzeyli çarpma yüklemesi etkisinde GB kirişlere göre daha fazla maksimum ivme değerleri sergilerken, çok daha küçük maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerlerine sahiptir. GPC kirişlerin daha fazla ivme değerleri sergilemesi daha rijit bir davranış gösterdiklerini, sertliklerinin GB kirişlere göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca GPC kirişlerin daha küçük deplasman değerleri sergilemesi GB kirişlerde göre daha az hasar aldıklarını ve uygulanan çarpma yüklemesi etkisiyle daha az deformasyona uğrayarak kalıcı kapasiteleri ve performanslarının daha yüksek olduğunu göstermiştir.

GPC eğilme kirişlerden ölçülen maksimum ivme değerleri GB kirişlerden ortalama 39% yüksek hesaplanmış, kesme dayanımı yetersiz kirişlerde ise bu fark 34% olarak elde

edilmiştir. Maksimum deplasman değerlerinde kesme ve eğilme GB ve GPC kirişler arasındaki farklar birbirlerine yakın değerler sergilemiştir. Ancak kalıcı deplasmanlar açısından değerlendirildiğinde kesme dayanımı yetersizliği çarpma yüklemesi etkisi altında beton türleri arasındaki farkı olumsuz etkilemiştir. Eğilme GB kirişlerin kalıcı deplasman değerleri eğilme GPC kirişlerden ortalama %10 büyük değerlere sahipken, kesme dayanımı yetersiz olması durumunda bu farklılık %22 değerine çıkmıştır. Beton tipinin normalden geopolimer betona dönüştürülmesi, numunelerin deformasyon yapma yeteneğini ve dolayısıyla enerji emme kapasitelerini artırmıştır. Beton tipinin normalden geopolimer betona değiştirilmesi, betonun boşluk oranını azaltmış ve sertliğini artırmıştır. Katı ortamda çarpma sonucu oluşan (tokluğun yüksek olduğu) dalgalar çok daha hızlı hareket ederek ivmeölçere daha az kayıpla ulaştığı ve bu nedenlerden dolayı GPC tipindeki numunelerden daha yüksek ivme, hız ve daha düşük yer değiştirme değerlerinin ölçüldüğü düşünülmektedir.

Çalışmada incelenen değişkenlerden birisi betonarme kirişlerin kesme donatısının yeterliliği veya yetersizliğidir. Betonarme kirişler olması gerektiği gibi kesme donatısı yerleştirilerek eğilme davranışı sergileyecek şekilde ve hiç kesme donatı yerleştirilmeden iki farklı şekilde tasarlanmıştır. Kesme dayanımı yetersiz kirişler uygulanan çarpma yüklemesi etkisinde eğilme kirişi olarak tasarlanan betonarme kirişlere göre çok daha başarısız bir davranış sergilemiş, maksimum ivme değerleri azalmış, maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri ise önemli oranlarda artmıştır. GB ve GPC eğilme kirişlerden ölçülen maksimum ivme değerleri kesme kirişlerden ortalama %23 daha büyük hesaplanmıştır. GB kesme dayanımı yetersiz deney elemanlarının maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri ise eğilme kirişlerden sırasıyla ortalama %88 ve %113 oranlarında çok daha büyük değerler sergilemiştir. GPC kirişlerde de kesme dayanımı yetersizliği çarpma yüklemesi etkisi altındaki davranışı olumsuz etkilemiş ve performansı azaltmıştır. GPC eğilme kirişlerin maksimum ivme değerleri kesme dayanımı yetersiz deney elemanlarından ortalama %27 daha büyük hesaplanmıştır. Kesme kirişlerinin kalıcı deplasman değerleri üzerindeki olumsuz etkisi GPC kirişlerde GB deney elemanlarına göre biraz daha az ve kalıcı deplasmanlardaki artış oranın ise daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. GPC kesme kiriş deney elemanlarının maksimum deplasman ve kalıcı

deplasman değerleri eğilme kirişlerden sırasıyla ortalama %93 ve %97 oranlarında daha büyük elde edilmiştir. Bu sonuçlar, kirişlerde kesme donatı oranının azalmasının performansı olumsuz etkileyerek maksimum ivme değerlerinin azalmasına, kirişlerde yer değiştirme ve çatlak genişliği değerlerinin artmasına neden olduğunu göstermiştir. Kesme donatı aralığının artması, oluşan kesme çatlaklarının sayısının ve genişliğinin artmasına neden olmuştur (Şekil 4.18). Aynı darbe enerjisine sahip darbe yükleri altında, betonarme kirişin kırılma modunda kayma kırılmasının baskın hale gelmesi, numunelerin daha fazla hasar görmesine neden olmuştur. Kesme hasarlarının artması ve numunelere aktarılan enerjinin artması, betonarme kiriş numunelerinden ölçülen ivmeyi azaltmış ve yer değiştirme değerlerini artırmıştır. Kesme donatısı oranının betonarme kiriş numunelerinin darbe davranışı üzerindeki bu etkileri, literatürdeki deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilen sonuçlarla oldukça uyumludur (Anıl ve diğ., 2018a; Anıl ve diğ., 2018b; Demartino ve diğ., 2017; Yılmaz ve diğerleri, 2019; Kantar ve Anıl, 2012)

Çalışmada incelenen son değişken GB kirişlerde bırakılan dairesel boşluk büyüklüğüdür. Deneysel çalışmada boşluksuz, 50, 83 ve 110 mm çapında olmak üzere 4 farklı boşluk alternatifinde deney elemanları üretilmiştir. Betonarme kirişlerde simetrik olarak her iki kesme açıklığında bırakılan dairesel boşluklar hem GB hem de GPC kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki davranışlarını olumsuz etkilemiş, maksimum ivme değerlerinin azalmasına, maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerlerinin ise artmasına neden olmuştur. GB eğilme kirişlerinde boşluklu deney elemanlarının maksimum ivme değeri, boşluksuz deney elemanından ortalama %55 oranındadır. Boşluklu deney elemanlarının maksimum deplasman değerleri ve kalıcı deplasman değerleri ise boşluksuz deney elemanından sırasıyla ortalama %243 ve %322 oranlarındadır. GB kesme kirişlerinde boşluklu deney elemanlarının maksimum ivme değeri, boşluksuz deney elemanından ortalama %53 oranındadır. Boşluklu deney elemanlarının maksimum deplasman değerleri ve kalıcı deplasman değerleri ise boşluksuz deney elemanından sırasıyla ortalama %200 ve %230 oranlarındadır. GPC eğilme kirişlerde boşluklu deney elemanlarının maksimum ivme değeri, boşluksuz deney elemanından ortalama 61% oranında bulunmuştur. Boşluklu deney elemanlarının maksimum deplasman değerleri ve kalıcı deplasman değerleri ise boşluksuz deney elemanından sırasıyla ortalama %261 ve

%358 oranlarındadır. GPC kesme kirişlerde boşluklu deney elemanlarının maksimum ivme değeri, boşluksuz deney elemanından ortalama %53 oranında hesaplanmıştır. Boşluklu deney elemanlarının maksimum deplasman değerleri ve kalıcı deplasman değerleri ise boşluksuz deney elemanından sırasıyla ortalama %206 ve %221 oranlarında daha büyük hesaplanmıştır.

Beton türü ve boşluk büyüklüğü birlikte değerlendirildiğinde GB boşluksuz kirişlerin maksimum ivme değerleri boşluklu deney elemanlarından ortalama %91 daha büyük elde edilmiş, GPC kullanılan kirişlerde ise boşluksuz kirişlerin maksimum ivme değerleri boşluklu deney elemanlarından ortalama 84% daha büyük değerlere sahiptir. GB boşluklu kirişlerin maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri boşluksuz deney elemanlarından sırasıyla ortalama %122 ve %176 daha büyük elde edilmiş, GPC kirişlerde ise boşluklu kirişlerin maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri boşluksuz deney elemanlarından sırasıyla ortalama %134 ve %190 daha büyük hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuç GPC kullanılan kirişlerin boşluklardan daha olumsuz etkilendiğini, boşluk büyüklüğü arttıkça maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerlerinin daha fazla artış gösterdiğini göstermiştir. Boşluk büyüklüğü arttıkça GB ve GPC kirişlerde çarpma yüklemesi etkisi altındaki davranış daha fazla olumsuz etkilenmiş, maksimum ivme değerlerindeki azalım oranı ile maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerlerindeki artış oranlarının hepsi birden önemli oranlarda artmıştır. Boşluksuz kirişlerin maksimum ivme değerleri 50 mm boşluklu betonarme kirişlerin maksimum ivme değerlerinden ortalama 42% oranında baha büyük hesaplanmıştır. 50 mm boşluklu betonarme kirişlerin maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri ise boşluksuz kirişlerden sırasıyla ortalama %53 ve %82 oranlarında daha büyüktür. Boşluksuz kirişlerin maksimum ivme değerleri 83 mm boşluklu betonarme kirişlerin maksimum ivme değerlerinden ortalama %86 oranında baha büyük hesaplanmıştır. 83 mm boşluklu betonarme kirişlerin maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri ise boşluksuz kirişlerden sırasıyla ortalama %117 ve %163 oranlarında daha büyüktür. Boşluksuz kirişlerin maksimum ivme değerleri 110 mm boşluklu betonarme kirişlerin maksimum ivme değerlerinden ortalama %134 oranında baha büyük hesaplanmıştır. 110 mm boşluklu betonarme kirişlerin maksimum deplasman

ve kalıcı deplasman değerleri ise boşluksuz kirişlerden sırasıyla ortalama %215 ve %305 oranlarında daha büyüktür.

Kiriş numunelerin absorbe edebildiği enerji değerleri incelendiğinde sabit enerji düzeyinde uygulanan çarpma yüklemesi etkisinde GB kirişlerin GPC kirişlerden ortalama %7 daha fazla enerji absorbe ettiği hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuç GB kirişlerin uygulanan sabit enerjili çarpma yüklemesinden GPC kirişlere göre daha fazla etkilendiğini, daha fazla deplasman yaptığını, daha fazla kalıcı plastik deformasyon oluşarak GB kirişlerin daha fazla enerjiyi emdiğini göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar GPC kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki performansının GB kirişlerden daha yüksek maksimum ivme değerleri göstermiş aynı zamanda daha iyi olduğunu gösteren önemli bir bulgudur.

- Çimentosuz geopolimer beton kullanılarak üretilen betonarme kirişlerin ani dinamik çarpma yüklemesi etkisi altındaki genel davranışlarının ve performans düzeylerinin benzer basınç dayanımına sahip, çimento kullanılan standart beton ile üretilen kirişlerin üzerine çıktığı ve daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. GPC kirişlerden ölçülen maksimum ivme değerleri GB kirişlerden daha yüksek elde edilmiştir. GB kirişlerden ölçülen maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri ise GPC kirişlerden daha büyük değerler sergilemiştir.
- Kesme donatısı yetersizliği GB ve GPC -her iki türdeki- kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki performanslarını olumsuz etkilemiş ve önemli oranlarda azaltmıştır. Kesme kirişlerin maksimum ivme değerleri önemli oranda azalmış, maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri ise önemli oranlarda artmıştır.
- Betonarme kirişlerde bırakılan boşluklar ve boşlukların büyüklüklerinin artması hem GB hem de GPC kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki performanslarını olumsuz etkilemiş ve azalmasına neden olmuştur. Boşlukların olması ve boşluk büyüklüğünün artması her iki beton türünden de üretilen kirişlerin maksimum ivme değerlerinin azalmasına, maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerlerinin ise önemli oranlarda artmasına neden olmuştur.

- Betonarme kirişlere uygulanan sabit enerji düzeyli çarpma yüklemesi etkisiyle GB deney elemanlarının GPC kirişlerden daha fazla enerji absorbe ederek, daha fazla deplasman yaptığı, daha fazla kalıcı deplasmanlar meydana geldiği, hasar miktarlarının daha fazla olduğu görülmüştür. GPC kirişler aynı düzeydeki çarpma yüklemesinden daha az enerji absorbe ederek, daha az deplasman yaparak ve daha az hasar alarak, daha fazla kalıcı dayanım ile çıkmayı başarmıştır.

GPC statik yüklemelerde geleneksel Portland çimentolu betona kıyasla daha düşük yük taşıma kapasitesine sahip olması birkaç nedenle ilişkilendirilebilir.

- Daha düşük basınç dayanımı: GPC, genellikle Portland çimentolu betona kıyasla daha düşük basınç dayanımına sahiptir. Bu, geopolimer betonun belirli bir yük altında daha kolay çatlayabileceği veya deformasyona uğrayabileceği anlamına gelebilir.
- Geopolimer betonun üretimi geleneksel yöntemlerle yapıldığı için kullanıcı hatalarından dolayı homojenlik ve bileşenlerin uniform dağılımı vs. gibi durumların GB‘a göre daha zor sağlanabilir. Bu durum, GPC‘un daha düzensiz veya daha zayıf bölgelere sahip olmasına ve dolayısıyla yük taşıma kapasitesinde azalmalara neden olabilir.
- Geopolimer betonun üretim süreci ve bileşenlerinin dengelenmesi, GB’a kıyasla daha karmaşık olabilir. Bu da üretimdeki herhangi bir hata veya dengesizlik durumunda yük taşıma kapasitesinde düşüşe neden olabilir.
- GPC, GB’a kıyasla daha yeni bir teknolojidir ve henüz tam olarak geliştirilmiş ve optimize edilmiş değildir. GPC‘un üretim süreçleri ve bileşenlerinin optimize edilmesi konusunda araştırmalar henüz başlangıç aşamasındadır. Bu nedenle, bazı durumlarda GB’un daha iyi performans göstermesi mümkündür. GB ile ilgili çalışmalar bir kaç yüz yıldır devam etmektedir.
- GPC, genellikle Portland çimentosu yerine alkali aktivatörler ve alüminosilikat malzemeler gibi kimyasal bağlayıcılar kullanılarak üretilir. Bu kimyasal bileşenlerin

bir araya gelmesiyle, geopolimer betonun daha homojen, daha dayanıklı ve daha esnek bir yapıya sahip olması sağlanabilir.

- GPC, Portland çimentolu betona kıyasla agregalarla (çakıl, kum vb.) daha iyi bir şekilde bağlanabilir. Bu, yapı elemanlarının daha homojen bir yapıya sahip olmasını ve çatlak oluşumunu önlemeye yardımcı olabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1.Sonuçlar

Çalışmanın birinci aşaması bağlayıcı olarak çimento içermeyen geopolimer harcın ana bileşenlerini araştırılmıştır. Bunun için geopolimer malzemenin üretilmesinde üç farklı atık malzeme (UK, YFC ve PTT) kullanılmıştır. Çalışmanın bu aşamasında üç farklı atık malzeme ile birlikte alkali aktivatörler kullanılarak üretilecek geopolimer kiriş numunelerinin karışım oranları Mixture Design metodu kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Mixture Design metodunda ilk olarak UK, YFC ve PTT atıkları kullanılarak 10 farklı karışım denenerek oluşturulan harçların mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Çalışmanın devamında Mixture Design metodunda kullanılan üç farklı atık malzemeye ilave olarak silis dumanı da eklenerek geopolimer harcın hem mekanik hem de işlenebilirlik açısından optimum bağlayıcı oranı belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, ilk aşamada belirlenen ideal karışım oranıyla birlikte agrega da kullanılarak üretilen numunelerin istenilen basınç dayanımına ulaşıp ulaşmadığı teyit edilmiştir. Geopolimer betonun hedeflenen basınç mukavemetine ulaşılmasının ardından kirişlerin üretimi yapılmıştır. Bu bölümde ayrıyeten çalışmanın ana konusunda belirtilen ve geopolimer kirişlerle statik ve dinamik açıdan davranışları karşılaştırılacak olan GB‘dan imal edilmiş betonarme kirişler de üretilmiştir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında imal edilen geopolimer boşluklu-boşluksuz kirişler ve geleneksel boşluklu-boşluksuz betonarme kirişler üzerine basit eğilme deneyleri yapılarak kirişlerin hem eğilme hemde kesme davranışları karşılaştırılmıştır.

Son aşama kapsamında GB ve GPC kirişlerin statik ve dinamik yüklemeleri etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi için deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada deneysel değişkenler olarak betonarme kirişlerin eğilme ve kesme olması durumu ile kirişlerin kesme açıklığında bırakılan boşlukların kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki genel davranışları ve performansları üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Literatürde yer alan birçok başka çalışmada kullanılan statik ve dinamik (serbest ağırlık

düşürme) testlerin düzenekleri kullanılarak toplam 32 adet 150 x 200 x 1250 mm lik boyutunda dikdörtgen kesitli betonarme kiriş test edilerek deneysel değişkenlerin davranış üzerindeki etkileri yorumlanmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen tüm sonuçları aşağıda sunulmuştur.

1) Geopolimer harç üretimi ile ilgili sonuçlar

Karışımlardaki yüksek fırın cürufu oranının artmasıyla basınç, eğilme, çarpma mukavemetleri ile birim hacim ağırlık değerleri artmıştır. YFC miktarının artmasıyla priz başlangıç ve bitiş süreleri ile yayılma değerlerinin olumsuz etkilendiği görülmüştür. Bu da aynı uçucu külde olduğu gibi işlenebilirliği olumsuz bir şekilde etkilemiştir. Ancak karışımlara pişirilmiş taş tozunun ilavesi ile işlenebilirliğin yani priz başlangıç ve bitiş süreleri ile yayılma değerlerinin uygulama bakımından ideal koşullara geldiği görülmüştür. Bununla beraber PTT oranının artmasıyla harçların mekanik özelliklerinde (basınç, eğilme ve çarpma mukavemetleri) bir düşüş görülmüştür. Dolayısıyla çalışmanın ileri bölümlerinde üretilecek olan GPC kiriş numuneleri için daha farklı atık malzemelerin ve farklı karışım oralarının kullanılması durumu gerekmektedir. Ancak çalışmanın bu bölümünde elde edilen sonuçlara göre yüksek dayanım gerektirmeyen harçlı imalatlarda, zemin iyileştirmelerinde Mixture Design yöntemine göre elde edilen karışım oranları kullanılarak bu atık malzemelerin değerlendirilmesi uygun olacaktır.

2) İlave karışımları ile ilgili sonuçlar

Geopolimer harcı üretiminde UK, YFC ve PTT bağlayıcı madde olarak farklı oranlarda birlikte kullanılmasının harcın priz başlangıç süresinde istenilen işlenebilirliği vermediği görülmüştür. Seydişehir Eti Alüminyum A.Ş.'den elde edilen uçucu külün kullanması priz süresi bakımından olumlu sonuçlar vermiş (priz başlangıç süreleri> 33 dakika) vermiş fakat basınç mukavemeti bakımından oldukça düşük değerler elde edilmiştir (yaklaşık 3 MPa). Basınç mukavemetinin düşük çıkmasının sebebi olarak ise uçucu külün

içeriğinde yüksek oranda Fe_2O_3 bulunması olduğu düşünülmektedir. Geopolimer harç üretiminde F sınıfı uçucu külün kullanması priz başlangıç süresine katkısı büyük oranda olumlu olmuştur. Ancak UKS'de olduğu gibi yapısal elemanlarda kullanılabilecek kadar yüksek basınç mukavemeti elde edilememiştir (25 MPa). GPC üretiminde genel olarak kullanılan aktivatör molaritesinin artması priz başlangıç süresine olumsuz, basınç mukavemetine ise olumlu katkı sunmuştur. Karışımlarda kullanılan metakaolin ve pişirilmiş taş tozunun oranlarının artmasıyla işlenebilirliğin arttığı görülmüştür. Kullanılan aktivatör /bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte basınç mukavemetinin de arttığı görülmüştür. Karışımlarda priz geciktirici olarak kullanılan kimyasal katkının (Retarton 300) priz süresine olumlu bir katkısı görülmemiştir. Bunun sebebi olarak da kullanılan kimyasal aktivatör ile katkının reaksiyona girip etkisinin sönümlendiği olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hem işlenebilirlik hem de basınç mukavemeti bakımından ideal olan karışımın oranları ise (%40 UK, %40 PTT ve %20 SD) molarite 10 M, L/B oranı 0.7 olarak belirlenmiş olup elde edilen sonuçları ise başlangıç priz süresi 37 dk ve basınç dayanımı 25 Mpa'dır.

3) Statik yükleme ile ilgili sonuçlar

GB'dan üretilen boşluklu kesme kirişlerin boşluksuz kesme kirişlerine göre ortalama %51 daha düşük yük kapasitesi gösterirken GPC kesme kirişlerdeki düşüşü %60 olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda GB boşluklu eğilme kirişlerin boşluksuz eğilme kirişlerine göre ortalama %33 daha düşük yük kapasitesi gösterirken GPC kesme kirişlerdeki düşüşü %43 olarak tespit edilmiştir. Toplu olarak GB eğilme ve kesme boşluklu kirişlerindeki yük taşıma kapasitesi boşluksuz kirişlere göre %42 azalırken, GPC eğilme ve kesme kirişlerindeki yük taşıma kapasite düşüşü %52 olarak bulunmuştur. Buna göre GB kirişler GPC kirişlerden daha iyi davrandığını söylenebilir. GB ve GPC'den üretilen boşluklu kesme kirişlerindeki yük taşıma kapasitesi boşluksuz kirişlere göre %56'lık bir düşüş gösterirken eğilme kirişlerindeki düşüş %38 seviyesinde kalmaktadır. Bu da geleneksel betondan üretilen geopolimer kirişlere göre daha iyi davrandığını göstermektedir.

4) Dinamik yükleme ile ilgili sonuçlar

GPC kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki davranışlarının ve performanslarının GB kirişlerden daha iyi olduğu görülmüştür. GPC kirişlerden ölçülen maksimum ivme değerlerinin GB kullanılan kirişlerde ortalama %35.7 oranında daha büyük değerler sergilediği görülmüştür. GB kiriş deney elemanlarında ölçülen maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri de GPC kullanılan deney elemanlarından sırasıyla ortalama %11 ve %16 oranlarında daha büyüktür. GPC eğilme kirişlerden ölçülen maksimum ivme değerleri GB kirişlerden ortalama 39% yüksek hesaplanmış, kesme dayanımı yetersiz kirişlerde ise bu fark 34% olarak elde edilmiştir. Eğilme GB kirişlerin kalıcı deplasman değerleri eğilme GPC kirişlerden ortalama %10 büyük değerlere sahipken, kesme dayanımı yetersiz olması durumunda bu farklılık %22 değerine çıkmıştır. Beton tipinin normalden geopolimer betona dönüştürülmesi, numunelerin ölçülen ivme değerleri azalmış, maksimum ve kalıcı deplasman değerleri artmış aynı zamanda deformasyon yapma yeteneğini ve dolayısıyla enerji emme kapasitelerini artırmıştır. Bu sonuçlarına göre GPC'inin daha başarılı olduğunu göstermiştir. Kesme dayanımı yetersiz kirişler uygulanan çarpma yüklemesi etkisinde eğilme kirişi olarak tasarlanan betonarme kirişlere göre çok daha başarısız bir davranış sergilemiş, maksimum ivme değerleri azalmış, maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerleri ise önemli oranlarda artmıştır. Betonarme kirişlerde simetrik olarak her iki kesme açıklığında bırakılan dairesel boşluklar hem GB hem de GPC kirişlerin çarpma yüklemesi etkisi altındaki davranışlarını olumsuz etkilemiş, maksimum ivme değerlerinin azalmasına, maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerlerinin ise artmasına neden olmuştur.

5.2. Öneriler

- Yukarıda belirtildiği gibi, uçucu küller ASTM standartlarına göre F ve C sınıfı olarak ayrılmaktadır. Bu çalışmada sadece C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Farklı olarak her iki sınıfın farklı karıştırma yöntemleri kullanılarak geopolimerin çeşitli özelliklerine etkileri araştırılabilir.
- Çalışmada kullanılan uçucu kül Soma Termik Santralinden elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında yürütülen çalışmaların farklı termik santral külleri için de yürütülmesi önerilmektedir. Bilindiği üzere, termik santrallerin yakma potansiyelleri farklı olabilmekte ve bu farklılık sonuçları etkilemektedir.
- Tezde yapılan deneysel çalışmalar dışında, hava içeriği, priz süresi tayini, sülfat etkisi, rötre tayini, ultrases geçiş hızı, elastisite modülü ve aşınma tayini gibi diğer deneylerde uygulanarak daha kapsamlı bir çalışma yapılabilir.
- Geopolimer harçların mekanik özellikleri için daha uzun kür süreleri denenebilir.
- Bu çalışma kapsamında mekanik dayanım değerleri esas alınarak Mixture design optimizasyon yöntemi kullanılmış ve optimum değerler elde edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda maliyet parametreleri göz önüne alınarak maliyetin optimizasyonu için Taguchi optimizasyon yöntemi gibi farklı optimizasyon teknikleri kullanılabilir.
- PTT dışındaki diğer toz malzemelerle GPC üretiminde yaşanan en büyük problem işlenebilirliklerinin çok düşük olmasıdır. Bu betonların işlenebilirliklerinin arttırılması için farklı kimyasal katkılar kullanılabilir ve geliştirilebilir.
- Geopolimer üretiminde ilave su kullanımı basınç dayanımını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu yüzden işlenebilirliği iyileştirmek için likit oranını artırmak ya da PTT, SD veya Metakaolin gibi atık malzemelerin oranları artırılabilir.
- Statik yükleme testinde kullanılan GPC ve GB kirişlerin boyutları, donatı oranları ve a_v/d oranı değiştirilerek ayrı ayrı etkileri araştırılabilir.
- Dinamik testte kullanılan çelik levhanın boyutlarının, kullanılan saplamanın türlerinin ve sayısının GPC ve GB kirişlerin çarpma dayanımına etkisi araştırılabilir.

- Daha düşük bir ağırlık kullanarak aynı zamanda birden fazla çarpma tekrarı uygulanarak GPC ve GB kirişlerin hasar oluşumu, çatlak ilerlemesi ve hasar mekanizması da araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Abdila, S, R., Abdullah, M., Ahmad. R, Abd Rahim. S, Rychta, M., Wnuk, İ., Nabiałek, M., Muskalski. K., Tahir. M, Syafwandi., Isradi, M. and Gucwa, M., 2021, Evaluation on the mechanical properties of ground granulated blast slag (GGBS) and fly ash stabilized soil via geopolymer process, *Materials*, 2-19.

Abdulrahman, H., Muhamad, R., Visintin, P., & Shukri, A. A., 2022, Mechanical properties and bond stress-slip behaviour of fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 327: 126909.

Abdul-Razzaq, K. S., Ali, H. I., Abdul-Kareem, M. M., 2017, A new strengthening technique for deep beam openings using steel plates. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(24), 15935-15947.

ACI Committee 544. Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96) (Reapproved 2009); *American Concrete Institute*: Farmington Hills, MI, USA, 1996; p. 66.

Ağcakoca, E., Yaman, Z., & Yazıcı, Y. E., Behavior of composite and box profile under ımpact force.

Aksoylu, C., Yazman, ġ., Özkılıç, Y. O., Gemi, L., Arslan, M. H., 2020, Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 249, 112561. 149

Aktürk M., 2021, Metakaolin Tabanlı Pişirilmiş Taş Tozu Atığı İkameli Kolemanit ve Boraks Penta Hidrat Katkılı Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri, *Doktora Tezi*, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya Teknik Üniversitesi, Konya.*

Albitar, M., Mohamed Ali, M. S., Visintin, P., Drechsler, M., 2017, Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 136, 374-385.

Allahverdi, A., Mehrpour, K., Kani, E. N., 2008, Investigating the possibility of utilizing pumice-type natural pozzonal in production of geopolymer cement. *Ceramics Silikaty*, 52(1), 15-16.

Alnuaimi, M. D. A., 2019, Investigation of Using Geopolymer Utilized Limestone Dust and Bottom Ash for Grouting and Deep Mixing. *Master Theses, Civil Engineering Gaziantep University, Gaziantep 69 p.*

Al-Shaarbaf, I. A., Abdulridha, A. J., 2017, Experimental and numerical investigation of high strength reinforced concrete deep beams with web openings under repeated loading, *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 20(2), 311-325.

Alshlash, S., 2019, Betonarme Kirişlerde Onarım Ve Güçlendirme Yöntemlerinin Deneysel Olarak İrdelenmesi Ve Maliyet Analizi, Master's thesis, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye.

Amin, M., Elsakhawy, Y., Abu el-hassan, K., & Abdelsalam, B. A., 2022, Behavior evaluation of sustainable high strength geopolymer concrete based on fly ash, metakaolin, and slag. *Case Studies in Construction Materials*, 16: e00976.

Amin, M., Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., & Agwa, I. S.,2021, Effect of high temperatures on mechanical, radiation attenuation and microstructure properties of heavyweight *geopolymer concrete. Structural Engineering and Mechanics*, 80(2), 181.

Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T., 2021, Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*, 270: 121857.

Anadolu Ajansı, 2022, *Samsun'da heyelan nedeniyle iki katlı bina zarar gördü* [online], https://www.aa.com.tr/tr/gundem/samsunda-heyelan-nedeniyle-iki-katli-bina-zarar-gordu/2574180 [Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2023].

Anıl, Ö., Erdem, R. T., Tokgöz, M.N. (2018a), Investigation of lateral impact behavior of RC columns. *Computers and Concrete*, 22:123–132.

Anıl, Ö., Yılmaz, M. C., Barmaki, W. (2018b), Experimental and numerical study of RC columns under lateral low-velocity impact load. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Structures and Buildings*, 1–19.

Ankur, G., 2021, Investigation of the strength of ground granulated blast furnace slag based geopolymer composite with silica füme, *Materials Today: Proceedings*.44: 23-28.

Antiohos, S. K., & Tsimas, S., 2007, A novel way to upgrade the coarse part of a high calcium fly ash for reuse into cement systems, *Waste management*, 27(5), 675- 683.

Arıcı, E., 201,. Betonunun çarpma mukavemeti üzerine basınç dayanımının etkisi. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 9(1), 1-9.

Arıöz, E., 2018, Geopolimer Elde Edilmesi ve Katyon, Ph ve Isıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi, *Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Eskişehir*, 405963.

Arıöz, Ö., Kılınç, K., Tuncan, M., Tuncan, A., Zeybek, O., Kavas, T., 2008, Isıl işlem tipi ve süresinin yüksek kalsiyum içerikli uçucu kül esaslı geopolimerik tuğlaların fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkisi, *Uluslararası Katılımlı 7. Seramik Kongresi*, TE167, 355-363.

Ashour, A.F., Rishi, G., 2000, Tests of reinforced concrete continuous deep beams with web openings. *Structural Journal*, 97(3), 418-426.

Aslan, S., & Erkan, İ. H, 2024, The effects of fly ash, blast furnace slag, and limestone powder on the physical and mechanical properties of geopolymer mortar. *Applied Sciences*, 14(2), 553.

Aslan, S., Erkan, İ. H., Aksoylu, C., & Arslan, M. H., 2024., An experimental investigation and cost analysis of flexural or shear strengthening pre-damaged RC beams. In *Structures* (Vol. 62, p. 106091). Elsevier.

ASTM C 78., 1994, Standart Test Method for Flexural Strenght of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), Annual Book of ASTM Standards, USA.

ASTM C230, 2014, Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement, Annual Book of ASTM Standard, USA.

ASTM C293., 1979, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (using simple beam with center point loading), Annual Book of ASTM Standard, West Conshohocken, USA.

ASTM C39., 2012, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, USA.

ASTM C39–05., 2005, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual book of ASTM Standards: West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C618., 1998, Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, No.4, USA.

ASTM C642–13., 2013, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concretes. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

Atabey, İ. İ., 2017, F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği, Kayseri*.

Atis, C. D., 2015, Gorur E. B, Karahan O, Bilim C, Ilkentapar S, LUGA E. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Constr. Build. Mater*.96: 673-678.

Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M.M., 2020, Assessment of geopolymer composites durability at one year age. *Journal of Building Engineering*, 32, 101453

Aykac, B., Aykac, S., Kalkan, I., Dundar, B., Can H., 2014, Flexural behavior and strength of reinforced concrete beams with multiple transverse openings. *ACI Struct J*,111:267–78.

Aykac, B., Kalkan, I., Aykac, S., Egriboz, Y. E., 2013, Flexural behavior of RC beams with regular square or circular web openings. *Eng Struct,* 56:2165–74.

Aykaç, S., and Yılmaz, M., 2011, Behaviour and strength of RC beams with regular triangular or circular web openings. *J Faculty Eng Archit Gazi Univ*, 26:711–8.

Bakırdöven, A., 2021, Endüstriyel Atıkların Geopolimerler Eldesinde Kullanılabilirliği Ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi, İnönü üniversitesi fen bilimleri enstitüsü*, *Malatya*, 154.

Balcikanli, M., Turker, H. T., Ozbay, E., Karahan, O., and Atiş, C. D., 2017, Identifying the bond and abrasion behavior of alkali activated concretes by central composite design method. *Construction and Building Materials*, 132: 196-209.

Bambach, M. R., 2011, Design of hollow and concrete filled steel and stainless steel tubular columns for transverse impact loads. *Thin-walled structures*, 49(10), 1251-1260.

Bankowski, P., Zou, L. and Hodges, R., 2004, Reduction of metal leaching in brown coal fly ash using geopolymers. *Journal of hazardous materials*, 114(1-3), 59-67.

Bayiha, B. N., Billong, N., Yamb, E., Kaze, R. C., & Nzengwa, R., 2019, Effect of limestone dosages on some properties of geopolymer from thermally activated halloysite. *Construction and Building Materials*, 217, 28-35.

Bernal, S. A., San Nicolas, R., Van Deventer, J. S., and Provis, J. L., 2016, Alkali-activated slag cements produced with a blended sodium carbonate/sodium silicate activator. *Adv. Cem. Res*.28, 262–273.

Bingöl, Ş., 2018, Alkali İle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.*

Boyacı, Ö., 2018, Farklı Kaolenlerin Metakaolen ve Spinel Yapılarda Geopolimer Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.*

Buchwald, A., Hilbig, H., & Kaps, C., 2007, Alkali-activated metakaolin-slag blends-performance and structure in dependence of their composition. *Journal of materials science,* 42, 3024-3032.

Buchwald, A., Tatarin, R., & Stephan, D., 2009, Reaction progress of alkaline-activated metakaolin-ground granulated blast furnace slag blends. *Journal of materials science*, 44, 5609-5617.

Caldarone, M. A., 2008, High-Strength Concrete: A Practical Guide, *Taylor and Francis Group*, London.

Castillo, H., Collado, H., Droguett, T., Vesely, M., Garrido, P. and Sergio, P., 2022, *State of the art of geopolymers: A review: e-Polymers*, 22, 108-124.

Chindaprasirt, P., Chalee, W., 2014, Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Construction and Building Materials*, 63, 303-310.

Chokkalingam, P., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & El-Mir, A., 2022, Development and characterization of ceramic waste powder-slag blended geopolymer concrete designed using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 349: 128744.

Cioffi, L., Maffucci, L. and Santoro B., 2003, Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue, *Resources, Conservation and Recycling,* 40 (1), 27-38.

Dave, N., Sahu, V., Misra, A. K., 2020, Development of geopolymer cement concrete for highway infrastructure applications. *J. Eng. Design Technol*, 18, 1321-1333.

Davidovits, J., 2008, Geopolymer Chemistry and Applications. *Saint Quantin*, s.n.

Davidovits, J., 1994, High-Alkali cements for 21st century concretes. *ACI J* 144, 383–398. 5.

Davidovits, J., 1991, Geopolymers Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633-1656.

Davidovits, J., 1999, Chemistry of geopolymeric systems, terminology, *Géopolymère'99 International Conference*, Saint-Quentin, France, 9-22pp.

Davidovits, J., 2008, Geopolymers – chemistry and application, San Quintin, *Institute geopolymer*, 1-22.

Davidovits, J., 2012, Portland Cement Chemistry vs. Geopolymer Chemistry, *San Quintin, Institute geopolymer*, 1-22.

Davidovits, J., 2014, World-wide increase in geopolymer research, *San Quintin, Institute geopolymer,* 1-22.

Davidovits, J., 2015, False values on CO_2 emission for geopolymer cement/concrete published in scientific papers, *Technical paper*, *Geopolymer Institute Library*, 24: 1-9.

Davidovits, J., 2008, Geopolymer Chemistry and Applications, *3rd edition, St. Quinten, Institut Geopolymere*, (2008).

Demartino, C., Wu, J. G., Xiao, Y., 2017, Response of shear-deficient reinforced circular RC columns under lateral impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 109:196–213.

Demir, F., 2019, Endüstriyel Atıklardan Elde Edilen Geopolimerlerin Sulardan Ağır Metal Gideriminde Adsorban Olarak Değerlendirilmesi, *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Universitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,* 605812.

Demir, İ., 2022, F Sınıfı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikamesinin çimento harç özelliklerine etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14.2: 531-543.

Demiral, T., 2018, Betonarme Kiriş Boşluklarının Davranışa Etkisinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri*, 127.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., Deventer, J. S., 2007, Geopolymer technology: the current state of the art, *Journal of materials science*, 42(3), 2917-2933.

El Ame, F., Mwero, J., Kabubo, C., 2020, Openings effect on the performance of reinforced concrete beams loaded in bending and shear. *Eng Technol Appl Sci Res*, 10:5352–60.

Fernandez-Jimenez, A., García-Lodeiro, I., ve Palomo, A., 2007, Durability of alkali activated fly ash cementitious materials, *J. Mater. Sci*., 42(9): 3055–3065.

Fernández-Jiménez, A., Puertas, F., Sobrados, I., Sanz, J., 2003, Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: Influence of the type of alkaline activator. *J. Am. Ceram. Soc*, 86, 1389–1394.

Zannerni, G. M., Fattah, K. P., & Al-Tamimi, A. K., 2020, Ambient-cured geopolymer concrete with single alkali activator. *Sustainable materials and technologies*, 23, e00131.

García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., 2007, Alkali– aggregate reaction in activated fly ash systems, *Cement and Concrete Research*, 37(2):175-183pp.

Gartner, E., 2004, Industrially interesting approaches to “low-CO2” cements, *Cement and Concrete Research*, 34(9):1489-1498pp.

Ghafoor, M. T., Khan, Q. S., Qazi, A. U., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. S., 2021, Influence of alkaline activators on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 273, 121752.

Girgin, S., 2016, Naoh ile Aktifleştirilmiş Metakaolin Katkılı Geopolimer Malzeme Özelliklerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon*.

Gök, S., 2020, Alkali ile Aktive Edilmiş Harç ve Atık Çelik Tel Donatılı Betonların (Sıfcon) Fiziksel, Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması, *Doktora tezi, İstanbul teknik üniversitesi, fen bilimleri enstitüsü, İstanbul*

Görhan, G., Kürklü, G., 2014, The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, *Composites: Part B*. 58, 371-377.

Greiser, S., Gluth, G. J., Sturm, P., & Jäger, C., 2018, 29 Si {27 Al}, 27 Al {29 Si} and 27 Al {1 H} double-resonance NMR spectroscopy study of cementitious sodium aluminosilicate gels (geopolymers) and gel–zeolite composites. *RSC advances*, 8(70), 40164-40171.

Gücüyen, E., Erdem, R. T., & Kantar, E., 2018, Kompozit boru kesitlerinin çarpma etkisi altında deneysel ve nümerik olarak incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 139-149.

Gümüş, A., 2016, Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon*.

Chi, H. L., Louda, P., Bakalova, T., & Kovačič, V., 2019, Preparation and mechanical properties of potassium metakaolin based geopolymer paste. *In Advanced Engineering* Forum (Vol. 31, pp. 38-45).

Han, L. H., Hou, C. C., Zhao, X. L., & Rasmussen, K. J., 2014, Behaviour of high-strength concrete filled steel tubes under transverse impact loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 92, 25-39.

Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J. & Rangan, B. V., 2004, on the development of fly ash-based geopolymer concrete, *ACI Materials Journal*, 101,6.

Heah C. Y., Kamarudin H., Mustafa Al Bakri A. M., Bnhussain M., Khairul Nizar I., Ruzaidi C. M. and Liew Y. M., 2012, Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers, *Construction and Building Materials*, 35 pp 912–922.

Ibrahim, R. K., Ramyar, K., Hamid, R., & Raihan Tah, M., 2011, The effect of high temperature on mortars containing silica fume, *Journal of Applied Sciences*, 11(14), 2666-2669.

İlkentapar, S., Atiş, C. D., Karahan, O., Görür Avşaroğlu E. B., 2017, Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic ofalkali activated class F fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, vol. 151: 363-369.

Jahren, P. A., 1989, Fire resistance of high strength/dense concrete, with particular reference to the use of condensed silica fume: A review. International conference, *High-Strength Concrete*, 114: PP. 1013-1050.

Jasim, W. A., Allawi, A. A., Oukaili, N. K. 2019, Effect of size and location of square web openings on the entire behavior of reinforced concrete deep beams. *Civil Engineering Journal*, 5(1), 209-226.

Jindal, B. B., 2019, Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures, A review, *Construction and Building Materials*. 227; 116644.

Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., Ideker, J., 2011, Advances in alternative cementitious binders, *Cement and Concrete Research*, 41(12):1232-1243pp.

Jumrat, S., Chatveera, B., Rattanadecho, P., 2011, Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar, *International Communications in Heat and Mass Transfer,* 38,244-248.

Kalinkin, A. M., Kumar, S., Gurevich, B. I., Alex, T. C., Kalinkina, E. V., Tyukavkina, V. V., Kalinnikov, V. T., Kumar, R., 2012, Geopolymerization behavior of Cu–Ni slag mechanically activated in air and in CO_2 atmosphere. *International Journal of Mineral Processing*, 112- 113, 101-106.

Kantar, E., Anıl, Ö., 2012, Low velocity ımpact behavior of concrete beam strengthened with CFRP strip, *Steel and Composite Structures*, 12(3): 207-230.

Kantar, E., Arslan, A., & Anıl, Ö., 2011, Beton dayanımındaki değişimin çarpma davranışına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(1).

Kaya, M., Uysal, M., Yılmaz, K., Atiş, C. D., 2018, Behaviour of geopolymer mortars after exposure to elevated temperatures. *Materials Science (Medžiagotyra*). 24: 428-436.

Kaya, M., Uysal, M., Yılmaz, K., Karahan, O., Atiş, C. D., 2020, Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars, *Gradevinar*. 72 (4): 297- 309.

Kaya, M., 2016, Farklı Tür Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya*, 207 s., Türkiye.

Khale, D., Chaudhary, R., 2007, Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review, *Journal of Materials Science*, 42:729-746pp.

Khayat, K. H., & Aitcin, P. C., 1992, Sılıca fume ın concrete - an overvıew. fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete. *Fourth International Conference American Concrete Institute* (ACI), 2(SP-132).

Komljenovic, M., Bascarivic, Z., Bradic, V., 2010, Mechanical and microstructural properties of alkaliactivated fly ash geopolymers. *J. Hazard. Mater*, 2010; 181: 35-42.

Komnitsas K., Zaharaki D., and Perdikatsis V., 2007, Geopolymerisation of low calcium ferronickel slags, *Journal of Materials Science*, 42 pp 3073–3082.

Kotwal, A. R., Kim, Y. J., Hu, J., & Sriraman, V., 2015, Characterization and early age physical properties of ambient cured geopolymer mortar based on class C fly ash. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(1), 35-43.

Kubátová, D., Khongová, I., Kotlanova, M. K., Zezulova, A., & Bohac, M., 2021, The use of limestone sludge for the geopolymer preparation. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1205, No. 1, p. 012002. IOP Publishing.

Kumar, S., Kumar, R., & Mehrotra, S. P., 2010, Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. *Journal Of Materials Science*, 45, 607-615.

Kyivpost., 2021, Two People Killed After Gas Blast Hits Apartment Building İn Russia [online], https://archive.kyivpost.com/eastern-europe/reuters-two-people-killed-after-gas-blast-hits-apartment-building-in-russia.html [Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2023]

Li, Z., & Li, S., 2018, Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 668-680.

Liew Y. M., Heah C. Y., Mohd Mustafa A. B., and Kamarudin H., 2016, Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review, *Progress in Materials Science*, 83 pp 595–629.

Luga, E., 2015, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Jeopolimer Harçların Özellikleri, *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri*.

Luhar, S., Nicolaides, D., Luhar, I., 2021, Fire resistance behaviour of geopolymer concrete: An overview. *Buildings*, 11, 82.

Malkawi, A. B., Nuruddin, M. F., Fauzi, A., Almattarneh, H., & Mohammed, B. S., 2016, Effects of alkaline solution on properties of the HCFA geopolymer mortars. *Procedia Engineering*, 148, 710-717.

Mansur, M., Lee, Y., Tan, K., Lee, S., 1991, Tests on RC continuous beams with openings. *J Struct Eng*, 117:1593–606.

Mansur, M., Tan, K. H., Weng, W., 2006, Analysis of concrete beams with circular web openings using strut-and-tie models. *Malaysian J Civil Eng,* 18.

Mansur, M., Tan, K. H., 1999, Concrete beams with openings: analysis and design. *CRC Press*.

Mansur, M., 1992, Deflections of reinforced concrete beams with web openings. *ACI Struct J*, Citeseer.

Mansur, M., 1998, Effect of openings on the behaviour and strength of R/C beams in shear. *Cem Concr Compos*, 20:477–86.

Mansur, M. A., Tan, K., Lee, S., 1985, Design method for reinforced concrete beams with large openings. *J Proc,* 517–24.

Mansur, M. A., 2006, Design of reinforced concrete beams with web openings. In: *Proceedings of the 6th Asia-Pacific structural engineering and construction conference (ASPEC 2006*). Malaysia: Kuala Lumpur, p. 5-6.

Mashal, M. J., 2019, Darbe Yükü Etkisi Altında Çelik Kiriş Elemanların Deneysel ve Sonlu Eleman Metodu ile İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü*, Sakarya.

Memon, F. A., Nuruddin, M. F., Khan, S., Shafiq, N. A. S. I. R., Ayub, T., 2013, Effect of sodium hydroxide concentration on fresh properties and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete. *J. Eng. Sci*. Technol, 8(1), 44-56.

Mozgawa, W., & Deja, J., 2009, Spectroscopic studies of alkaline activated slag geopolymers. *Journal of Molecular Structure*, 924, 434-441.

Murali, G., Santhi, A. S., & Ganesh, G. M., 2014, Effect of crimped and hooked end steel fibres on the impact resistance of concrete. *Journal of Applied Science and Engineering,* 17(3), 259-266.

Mustakim, S. M., Das, S. K., Mishra, J., Aftab, A., Alomayri, T. S., Assaedi, H. S., & Kaze, C. R., 2021, Improvement in fresh, mechanical and microstructural properties of fly ash-blast furnace slag based geopolymer concrete by addition of nano and micro silica. *Silicon*, 13: 2415-2428.

Nath, P., & Sarker, P. K., 2014, Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163-171.

Nath, P., & Sarker, P. K., 2015, Use of OPC to ımprove setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Cement and Concrete Composites*, 55, 205-214.

Neupane, G., and Donahoe, R. J., 2013, Leachability of elements in alkaline and acidic coal fly ash samples during batch and column leaching tests. *Fuel*, 104, 758-770.

Ng, C., Alengaram, U. J., Wong, L. S., Mo, K. H., Jumaat, M. Z., & Ramesh, S., 2018, A Review on Microstructural Study and Compressive Strength of Geopolymer Mortar, Paste and Concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 550-576.

Nomura, Y., Fujiwara, K., Terada, A., Nakai, S. and Hosomi, M., 2010, Prevention of lead leaching from fly ashes by mechanochemical treatment. *Waste management*, 30(7), 1290-1295.

Noushini, A., Castel, A., 2016, The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 112, 464-477.

Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P., 2016, Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.

Nyale, S. M., Eze, C. P., Akinyeye, R. O., Gitari, W. M., Akinyemi, S. A., Fatoba, O. O., and Petrik, L. F., 2014, The leaching behaviour and geochemical fractionation of trace elements in hydraulically disposed weathered coal fly ash. *Journal of environmental science and health*, Part A, 49(2), 233-242.

Oh, J. E., Monteiro, P. J., Jun, S. S., Choi, S., Clark, S. M., 2010, The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 189-196.

Okoye, F. N, Durgaprasad, J., Singh N. B., 2015, Fly ash/Kaolin based geopolymer green concretes and their mechanical properties. *Data in Brief*, 5:739-744.

Oltulu, M., & Gökhan Altun, M., 2018, Betonun darbe dayanımının tespitinde ağırlık düşürme deney yöntemi ve yapılan çalışmalar. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 155-163.

Osman, B. H., Wu, E., Ji, B., Abdulhameed, S. S., 2017, Repair of pre-cracked reinforced concrete (RC) Beams with openings strengthened using FRP sheets under sustained load. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1), 171-183. 148.

Othman, H., and Marzouk, H., 2016, Impact response of ultra-high-performance reinforced concrete plates, *ACI Structural Journal*, 113 (6), 1325–1334.

Othman, H., 2016, Performance Of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete Plates Under İmpact Loads, *PhD Thesis, Ryerson University, Toronto, Ontario*, Canada.

Ozodabas, A., Yilmaz, K., 2013, Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slag mortars with very finely ground pumice. *Constructıon And Building Materials*, Vol. 48 pp.26.

Özkılıç, Y. O., Aksoylu, C., Gemi, L., & Arslan, M. H., 2022, Behavior of CFRP-strengthened RC beams with circular web openings in shear zones: *Numerical study. In Structures,* Vol. 41, pp. 1369-1389. .

Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P., & Rattanasak, U., 2014, Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fume alkali-activated composite. *Advanced Powder Technology*, 25(3), 1087-1093.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. & Jalali, S., 2008 Alkali-Activated binders: a review: part 1. historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Construction and Building Materials*, 22.

Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindaprasirt P., 2015, Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes, *Woodhead Publishing, Cambridge*, UK, 852p.

PCB Piezotronics, 2022a, Model 200C50 ICP® force sensor installation and operating manual [online], https://www.pcb.com/products?m=200C50 [Ziyaret Tarihi: 03 Nisan 2024].

PCB Piezotronics, 2022b, Test & measurement sensors and instrumentation [online], http://www.pcb.com/Resources/ProductLiterature/PCBTestMeasurementSensorsInstrumentationCatalog [Ziyaret Tarihi: 03 Nisan 2024].

Posi, P., Ridtirud, C., Ekvong, C., Chammanee, D., Janthowong, K., Chindaprasirt, P., 2015, Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. *Construction and Building Materials*. 94, 408-413.

Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J., 2009, Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. *Elsevier*.

Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S., Vazquez, T., 2000, Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products. Cem. *Concr. Res*, 30, 1625–1632.

Qaidi, S. M., Atrushi, D. S., Mohammed, A. S., Ahmed, H. U., Faraj, R. H., Emad, W., Tayeh, B. H., & Najm, H. M., 2022, Ultra-high-performance geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 346: 128495.

Qiu, J., Zhao, Y., Xing, J., and Sun, X., 2019, Fly ash/blast furnace slag-based geopolymer as a potential binder for mine backfilling: Effect of binder type and activator concentration. *Adv. Mater. Sci. Eng*, 1–12.

Quaderi A., 2020, Eğilme Etkisindeki Büyük Dairesel Boşluklu Kirişlerin Davranışının Deneysel İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, *Süleyman Demirel Üniversitesi,* Isparta, 65

Rahier, H., Simons, W. and Biesemans, M., 1997, Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses: Part III Influence of the composition of the silicate solution on production, structure and properties, *Journal of Materials Science*, 32, 2237-2247.

Rangan, B.V., 2014, Geopolymer concrete for environmental protection. *The Indian Concrete Journal*. 88 (4), 41-59.

Ravikumar, D., Neithalath, N., 2012, Effects of activator characteristics on the reaction product formation in slag binders activated using alkali silicate powder and NaOH. *Constr Build Mater*, 34, 809–818.n

Rosales-Herrera, V. I., & Prozzi, J. A., 2008, Mixture design manual and performance-based specifications for cold patching mixtures (No. Report No. 0-4872-P2). Salem: Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.

Rostami, M., ve Behfarnia, K., 2017, The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete, *Constr. Build. Mater*., 134: 262–268.

Rostami, M., Behfarnia, K., 2017 The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete, *Construct. Build. Mater*. 134, 262–268.

Saini, D., & Shafei, B., 2019 Investigation of concrete-filled steel tube beams strengthened with CFRP against impact loads. *Composite Structures*, 208, 744-757.

Salama, A. E., Kassem, M. E., Mahmoud, A. A., 2018, Torsional behavior of T-shaped reinforced concrete beams with large web openings. *Journal of Building Engineering*, 18, 84-94.

Saleh, A., Hamad, M., Elzeny, S., Elwan, S. K., Deifalla, A., 2017, The behavior of rc beam-column joint with beam reinforced web opening under cyclic loading, *Research Significance and Previous Work Test Set-up*. 39:191-200.

Sasui, S., Kim, G., Nam, J., Koyama, T., & Chansomsak, S., 2019, Strength and microstructure of class-C fly ash and GGBS blend geopolymer activated in NaOH & NaOH+ Na_2SiO_3. *Materials*, 13(1), 59.

Sayed, A. M., 2019, Numerical study using FE simulation on rectangular RC beams with vertical circular web openings in the shear zones. *Engineering Structures*, 198, 109471.

Selvi. M., 2008, Beton dayanımındaki değişimin çarpma davranışına olan etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Senthil, K., Gupta, A., Singh, S. P., 2018, Computation of stress-deformation of deep beam with openings using finite element method. *Advances in concrete construction*, 6(3), 245-257.

Shaaban, I. G., Zaher, A. H., Said, M., Montaser, W., Ramadan, M., Abd Elhameed, G. N., 2020, Effect of partial replacement of coarse aggregate by polystyrene balls on the shear behaviour of deep beams with web openings. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00328.

Shahmansouri, A. A., Yazdani, M., Ghanbari, S., Bengar, H. A., Jafari, A., & Ghatte, H. F., 2021, Artificial neural network model to predict the compressive strength of eco-friendly geopolymer concrete incorporating silica fume and natural zeolite. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123697.

Sharma, H., Hurlebaus, S., & Gardoni, P., 2012 Performance-based response evaluation of reinforced concrete columns subject to vehicle impact. *International Journal of Impact Engineering*, 43, 52-62.

Shather, L. M., Hussein, S. N., Hasan, L. F., 2018, Theoretical evaluation of RC deep beam with web opening by using nonlinear finite element software [ABAQUS]. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 9(5):413-421.

Shi, C., Roy, D., & Krivenko, P., 2003, Alkali-activated cements and concretes. *CRC press*.

Shibayama, A., Kim, Y., Harjanto, S., Sugai, Y., Okada, K., and Fujita, T., 2005, Remediation of contaminated soil by fly ash containing dioxins from incineration by using flotation. *Materials transactions*, 46(5), 990-995.

Singh, G. B., and Subramaniam, K. V., 2019, Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. *Journal of Cleaner Production*, *239*, 118024.

Singhi, B., Laskar, A. I., and Ahmed, M. A., 2016, Investigation on soil–geopolymer with slag, fly ash and their blending. *Arabian Journal for science and engineering*, 41, 393-400.

Smarzewski, P., 2018, Hybrid fibres as shear reinforcement in high-performance concrete beams with and without openings. *Applied Sciences*, 8(11), 2070- 2084.

Smarzewski, P., 2019, Analysis of failure mechanics in hybrid fibre-reinforced high-performance concrete deep beams with and without openings. *Materials*, 12(1), 101.

Snellings, R., Mertens, G., Elsen, J., 2012, Supplementary cementitious materials, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 74(1):211-278pp

Subaşı, S., İşbilir, B., & Ercan, İ., 2011, Uçucu Kül ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi. *Politeknik Dergisi*, 14, 141-148.

Şahan, A., 2006, Düşük Dozajlı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliği, *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Taher, S. M., Saadullah, S. T., Haido, J. H., & Tayeh, B. A., 2021, Behavior of geopolymer concrete deep beams containing waste aggregate of glass and limestone as a partial replacement of natural sand. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00744.

Tan, K. H., Mansur, M. A., 1996, Design procedure for reinforced concrete beams with large web openings. *Struct J*, 93:404–11.

Tayeh, B. A., Hakamy, A., Amin, M., Zeyad, A. M., & Agwa, I. S., 2022, Effect of air agent on mechanical properties and microstructure of lightweight geopolymer concrete under high temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00951.

Thiagarajan, J. J., Tsakalis, K., Spanias, A., & Thornburg, H., 2009, On the use of LabVIEW in signals and systems. In 2009 Annual Conference & Exposition (pp. 14-932).

Tippayasam, C., Balyore, P., Thavorniti, P., Kamseu, E., Leonelli, C., Chindaprasirt, P., & Chaysuwan, D., 2016, Potassium alkali concentration and heat treatment affected metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 104, 293-297.

Tok L.V., 2021, Yüksek Fırın Cürufu ve Bentonit Tabanlı Geopolimer Harçların Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul 59 s.

Torgal, P.F., Gomes, C.J., Jalali, S., 2008, Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *J. Constr. Build. Mater*, 22, 1305-1314.

TS EN 12390-3., 2019, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*, Türkiye.

TS EN 12390-5,, 2002, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*, Türkiye.

TS EN 196–3., 2017, Çimento Deney Metotları – Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*, Türkiye.

TS EN 197-1., 2002, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*, Türkiye.

Türk Standardı-TS500., 2000, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., ve Yeğinobalı, A., 2009, Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, *TÇMB*, Ankara.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, TBDY., 2018, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

Ulzurrun, G. S., & Zanuy, C., 2017, Enhancement of impact performance of reinforced concrete beams without stirrups by adding steel fibers. *Construction and Building Materials*, 145, 166-182.

Waheed, A., Azam, R., Riaz, M. R., Zawam, M., 2022, Mechanical and durability properties of fy ash cement sand composite bricks: an alternative to conventional burnt clay bricks, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7-24.

Walkey, B., Ke, X., Hussein, O. H., Bernal, S. A., Provis, J., 2020, Incorporation of strontium and calcium in geopolymer gels. *Journal of Hazardous Materials*, 382, 121015.

Wang, J., Dai, Y., & Gao, L., 2009, Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry. *Applied Energy*, 86.6: 941-948.

Wang, W. C., Wang, H. Y., Lo, M. H., 2015, The fresh and engineering properties of alkali activated slag as a function of fly ash replacement and alkali concentration. *Constr. Build Mater*, 84, 224–229.

Wang, X. Y., Park, K. B. and Lee, H. S., 2012, Modeling of chloride diffusion in a hydrating concrete incorporating silica fume, *Comput. Concr*, 10(5).

Wang, Y., Qian, X., Liew, J. R., & Zhang, M. H., 2015, Impact of cement composite filled steel tubes: an experimental, numerical and theoretical treatise. *Thin-walled structures*, 87, 76-88.

Xiao, R., Ma, Y., Jiang, X., Zhang, M., Zhang, Y., Wang, Y., Huang, B., & He, Q., 2020, Strength, microstructure, efflorescence behavior and environmental ımpacts of waste glass geopolymers cured at ambient temperature. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119610.

Xu, H. and Deventer, V., 2000, The geopolymerization of Alamino-Silicate minerals, *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266.

Yalghuz, M. R., Işıkdağ, B., 2020, Farklı Tip Malzemeler Kullanılarak Geopolimer Harç Üretimi ve Dayanıklılığın İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir Teknik Üniversitesi*, Eskişehir, Türkiye.

Yang, K. H., Eun, H. C., Chung, H. S., 2006, The influence of web openings on the structural behavior of reinforced high-strength concrete deep beams. *Eng Struct*, 28:1825–34.

Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y., 2009, Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493(1-2), 49-54.

Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S. and Xi, Y. Q., 2015, A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-science reviews*, 141, 105-121

Yazıcı, H., 2008, The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 22, 456-462.

Yeginobalı A., 2007, Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara.

Yıldız S., 2023, Endüstriyel Yan Ürünlerle Üretilmiş Geopolimer Betonların Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, *Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi*. Turkey.

Yılmaz, T., Anıl, Ö., and Erdem, T. R., 2022, Experimental and numerical investigation of impact behavior of RC slab with different opening size and layout, *Structures*, 35, 818–832.

Yılmaz, T., 2018, Betonarme Kolonların Çarpma Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*, Eskişehir. Turkey.

Yılmaz, T., Kiraç, N., Anıl, Ö., 2019, Experimental investigation of axial loaded reinforced concrete square column subjected to lateral low-velocity impact loading. *Structural Concrete*, 20: 1358–1378.

Yousuf, M., Uy, B., Tao, Z., Remennikov, A., & Liew, J. R., 2013, Transverse impact resistance of hollow and concrete filled stainless steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 82, 177-189.

Yu, X., Jiang, L., Xu, J., & Zu, Y., 2017, Effect of Na_2SiO_3 content on passivation and corrosion behaviour of steel in a simulated pore solution of Na_2SiO_3-activated slag. *Construction and Building Materials*, 146, 156-164.

Yuan, B., Yu, Q. L., and Brouwers, H. J. H., 2017, Assessing the chemical involvement of limestone powder in sodium carbonate activated slag, *Materials and Structures*, 50 136.

Yuan, J., Wu, J., Su, T. and Lin, D., 2022, Dynamic Response of Reinforced Recycled Aggregate Concrete Pavement under Impact Loading, *Applied Sciences* (Switzerland), 12 (17).

Zeybek, O., 2009, Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, Türkiye.

Zhang, M., Zhao, M., Zhang, G., Mann, D., Lumsden, K., & Tao, M., 2016, Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water. *Construction and Building Materials*, 124: 373-382.

Zhang, W., Maleki, A., Khajeh, M. G., Zhang, Y., Mortazavi, S. M., & Vasel-Be-Hagh, A., 2019, A novel framework for integrated energy optimization of a cement plant: An industrial case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35: 245-256.

Zhang, Z., Yao, X., Wang, H., 2012. Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete III. Field experiment. *Appl. Clay Sci*., 67–68, 57-60.

Zineddin, M., & Krauthammer, T., 2007, Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 34(9), 1517-1534.

Zuaiter, M., El-Hassan, H., El-Maaddawy, T., & El-Ariss, B., 2022, Properties of slag-fly ash blended geopolymer concrete reinforced with hybrid glass fibers. *Buildings*, 12.8: 1114.