

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ VE ESKİ NESİL BETONDAN ÜRETİLMİŞ  
KOMPOZİT KİRİŞLERİN DARBE KUVVETİ ETKİSİ  
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Medine AYDIN**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : YAPI**  
**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi ELİF AĞCAKOCA**

**Ocak 2020**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ VE ESKİ NESİL BETONDAN ÜRETİLMİŞ  
KOMPOZİT KİRİŞLERİN DARBE KUVVETİ ETKİSİ  
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Medine AYDIN**

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 28.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi  
Elif AĞCAKOCA  
Jüri Başkanı



Dr. Öğr. Üyesi  
Elif BORU  
Üye



Dr. Öğr. Üyesi  
Muhammet Zeki ÖZYURT  
Üye



## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Medine AYDIN

27.12.2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmamın gerçekleştirilmesinde, eğitimim boyunca benden değerli bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, bana her konuda yol gösteren, yüksek lisans tezimin planlanmasından yazılmasına kadar her aşamada yanımda bulunan; eğitimci kişiliği, çalışkanlığı ve azmiyle bana örnek olan saygıdeğer danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Elif AĞCAKOCA ‘ya ayrıca fikir ve tecrübeleriyle tez çalışmalarına yön veren çok değerli hocalarım Yrd. Doç. Zeynep YAMAN’a ve Mohammad Manzoor NASERY’e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Öncelikle yüksek lisans tezimi, bugünleri görmesini çok istediğim anneme armağan ediyorum. Hayatımın her safhasında olduğu gibi yüksek lisans eğitimim boyunca da yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli aileme minnettarlığımı ifade ederim. Ayrıca beni her konuda destekleyen, moral ve motivasyonumu yükselten, verdiğim her karara güvenen ve yanımda olan çok değerli eşim Hüseyin TURAN’A sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Hayatımın her anında yanımda oldukları gibi yüksek lisans eğitimimde de yardımlarını esirgemeyen, umudumu tazeleyen ve benimle birlikte bu süreci yaşayan arkadaşlarım Ceren DİZDAR SEVİNÇ’e, Eylem AYYILDIZ’a ve Yaprak ULUÇAY’a en içten dileklerle sevgimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmam Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projelerini Destekleme Komisyonu (Proje No: 2019-7-24-44) tarafından desteklenmiş olup Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projelerini Destekleme Komisyonu Kurucu ve Komisyon üyelerine, Sakarya Üniversitesi ve Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Akademisyenleri ve idari personeline teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY .....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	3
1.2. Darbe Yüğü ile İlgili Literatür .....	4
1.3. Yeni Nesil Beton (Geopolimer) .....	13
BÖLÜM 2.	
KOMPOZİT YAPILAR, GEOPOLİMER BETON VE DARBE ETKİSİ .....	22
2.1. Kompozit Döşemeler.....	23
2.2. Kompozit Kirişler.....	26
2.3. Kompozit Kolonlar.....	28
2.4. Geopolimer Beton .....	29
2.4.1. Geopolimer beton kullanmanın avantajları .....	31
2.5. Darbe Etkisi.....	32
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMA .....	37
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	39
3.1.1. Yapısal çelik profil ve malzeme özellikleri.....	39

3.1.2. Beton malzeme özellikleri.....	42
3.1.3. Donatı malzeme özellikleri .....	44
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	46
3.3. Darbe Deney Düzenine Hazırlanması .....	52
3.4. Deney Mesnetlerinin Hazırlanması .....	53
3.5. Deneyde Kullanılan Veri Alma Aletleri ve Ekipmanlar .....	55
3.5.1. İvmeölçerler .....	55
3.5.2. Gerinim pulları (Strain-Gauge) .....	56
3.5.3. Yük hücresi .....	58
3.5.4. Ölçüm ve kontrol sistemi .....	59
3.5.4.1. CompactDAQ kasa .....	59
3.5.4.2. Veri alma ve sayısallaştırma modülleri .....	59
3.5.4.3. Datalogger.....	60
3.5.4.4. Veri alma ve verilerin işlenmesi.....	60
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>DARBE DENEYİ .....</b>	<b>65</b>
4.1. OPC-S-1000 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi .....	65
4.2. OPC-C-1000 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi .....	68
4.3. OPC-S-1300 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi .....	71
4.4. OPC-C-1300 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi .....	74
4.5. GPC-S-1300 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi .....	77
4.6. GPC-C-1300 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi .....	80
<b>BÖLÜM 5.</b>	
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>84</b>
5.1. Sonuçlar.....	84
5.2. Öneriler.....	87
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>88</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>94</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Tipik kompozit elemanlar [34] .....	23
Şekil 2.2. Kompozit döşeme sistemi [35] .....	24
Şekil 2.3. Çelik sac için esaslar [34] .....	25
Şekil 2.4. Eurocode4'te bulunan tipik kompozit kirişler [36].....	27
Şekil 2.5. Eurocode4 kompozit kolon türleri [36] .....	28
Şekil 2.6. Küresel Değişim Enstitüsü(GCI) binası .....	31
Şekil 2.7. Brisbane West Wellcamp Havaalanı (BWWA).....	31
Şekil 2.8. Charpy ve İzod deney metodları [65] .....	34
Şekil 2.9. Charpy deney metodu [16] .....	35
Şekil 2.10. Ağırlık düşürme deney düzeneği [66] .....	36
Şekil 3.1. Eksenel çekme deney cihazı .....	40
Şekil 3.2. Kupon numunesi boyutları-deney öncesi ve deney sonrası numune görüntüleri .....	41
Şekil 3.3. Eksenel çekme deney görüntüleri ve gerilme-birim şekil değiştirme grafığı .....	42
Şekil 3.4. Geopolimer (GPC) yapısında bulunan malzemeler .....	43
Şekil 3.5. Karışımı tamamlanmış geopolimer beton.....	44
Şekil 3.6. Kiriş donatıları .....	45
Şekil 3.7. Donatı çekme deneylerine ait görüntüler .....	45
Şekil 3.8. Strain gauge yapıştırılan çelik profiller.....	46
Şekil 3.9. Betona dökümüne hazır hale getirilen kalıplar .....	47
Şekil 3.10. OPC beton Slump Deneyi.....	48
Şekil 3.11. GPC ve OPC taze betonlardan alınan numuneler .....	49
Şekil 3.12. OPC numunelerin basınç deneylerine ait bazı görüntüler .....	49
Şekil 3.13. GPC numunelerin eğilme deneylerine ait bazı görüntüler.....	50
Şekil 3.14. GPC numunelerin basınç deneylerine ait bazı görüntüler .....	50

Şekil 3.15. OPC beton döküm öncesi ve sonrası .....	51
Şekil 3.16. Darbe deney düzeneği.....	53
Şekil 3.17. Basit kiriş mesnet modelleri.....	54
Şekil 3.18. İvmeölçer delikleri .....	56
Şekil 3.19. Deneysel çalışmada kullanılan Strain Gauge.....	57
Şekil 3.20. Strain-gauge yapıştırılan numuneler .....	58
Şekil 3.21. Datalogger.....	60
Şekil 3.22. LabVIEW veri alma algoritması .....	61
Şekil 3.23. LabVIEW veri alma algoritmasına ait ara yüz .....	62
Şekil 3.24. LabVIEW yazılımı veri işleme algoritması .....	62
Şekil 3.25. Potansiyometre.....	63
Şekil 3.26. Lazermetre .....	64
Şekil 4.1. OPC-S-1000 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüler .....	66
Şekil 4.2. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1000 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği.....	67
Şekil 4.3. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1000 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği.....	67
Şekil 4.4. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1000 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği.....	68
Şekil 4.5. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin mesnetlerde oluşturduğu toplam mesnet kuvvet-zaman grafiği .....	68
Şekil 4.6. OPC-C-1000 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüler .....	69
Şekil 4.7. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-C-1000 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği.....	70
Şekil 4.8. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-C-1000 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği.....	70
Şekil 4.9. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-C-1000 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği.....	71
Şekil 4.10. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin mesnetlerde oluşturduğu toplam mesnet kuvvet-zaman grafiği .....	71



Şekil 4.11. OPC-S-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüler .....	72
Şekil 4.12. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği.....	73
Şekil 4.13. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği.....	73
Şekil 4.14. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği.....	74
Şekil 4.15. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin mesnetlerde oluşturduğu kuvvet-zaman grafiği.....	74
Şekil 4.16. OPC-C-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüler .....	75
Şekil 4.17. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği.....	76
Şekil 4.18. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği.....	76
Şekil 4.19. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği.....	77
Şekil 4.20. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin mesnetlerde oluşturduğu toplam mesnet kuvvet-zaman grafiği .....	77
Şekil 4.21. GPC-S-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüler .....	78
Şekil 4.22. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin GPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği.....	79
Şekil 4.23. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin GPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği.....	79
Şekil 4.24. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin GPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği.....	80
Şekil 4.25. 1500 mm yüksekliğinden çekicinin sabit mesnette oluşturduğu kuvvet-zaman grafiği .....	80
Şekil 4.26. GPC-C-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüler .....	81

Şekil 4.27. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin GPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği.....	82
Şekil 4.28. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin GPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği.....	82
Şekil 4.29. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin GPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği.....	83
Şekil 4.30. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin toplam mesnet kuvvet-zaman grafiği.....	83



## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Deney numunelerinin isimlendirilmesi ve kısaltmaları .....	38
Tablo 3.2. Yapısal profillerin özellikleri.....	39
Tablo 3.3. Çelik çekme deney sonuçları .....	41
Tablo 3.4. GPC ve OPC betonlara ait eğilme ve basınç dayanımları .....	52
Tablo 3.5. GPC ve OPC betonlarına ait elastisite modülleri .....	52
Tablo 3.6. PCB tipi ivmeölçere ait teknik özellikler.....	56
Tablo 3.7. Yük hücreğine ait teknik bilgiler.....	59

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Kompozit kiriş, darbe yükü, geopolimer beton

Günümüzde yapılar, kullanım ömürleri boyunca statik yükler ve dinamik yüklerin etkisi altında kalmaktadır. Yapının kendi ağırlığı, yapıdaki sabit ve hareketli yükler statik yükler olarak tanımlanabilir. Dinamik yükler ise zamanla değişim gösteren yada aniden ortaya çıkan ve yapı üzerinde kalıcı hasarlara sebebiyet veren yükler olarak tanımlanabilir. Statik yükler altındaki yapılara, patlamadan yada çarpmadan dolayı bir darbe etkisi meydana gelebilmektedir. Ani patlamaların oluşturduğu şoklar, depremler, doğalgaz sistemlerinde meydana gelen patlamalar, kaya çarpması, roket çarpması gibi bir ivmeye sahip olan bu etkiler taşıyıcı sistem üzerinde gerilme değişimleri oluşturmaktadır. Dinamik yüklerden biri olan çarpma etkisi özellikleri ve etkisi en az bilinen yüklemelerden biridir. Özellikle son yıllarda yapıların darbe yüküne karşı göstermiş olduğu dayanım ve davranışın belirlenmesi amacıyla deneysel, numerik ve teorik olarak incelemeler yapılmaktadır.

Yapıyı oluşturan taşıyıcı elemanlarının en önemli özelliği sünekliği yani şekil değiştirmeye olan yatkınlığıdır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alan elemanın enerji sönümlenme kapasitesini başka bir deyişle tokluğunu ifade etmektedir. Yapı elemanlarına etkiyen statik ve dinamik yükler birbirinden farklı karakterlere sahip olduklarından dolayı elemanda oluşturacakları şekil değiştirmeleri yani enerji sönümlenme kapasiteleri birbirinden farklı olacaktır.

Yapılan bu çalışmada, kullanım alanı her geçen gün artan geopolimer beton ve geleneksel olarak kullanılan portland çimentolu beton ile oluşturulmuş kompozit kiriş elemanların çarpma dayanımına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ağırlık düşürme yöntemi kullanılarak uygulanan darbe deneyinde aynı çekiç ağırlığı ve düşü yüksekliği kullanılarak kompozit kirişlere darbe yükü uygulanmıştır. Deneyler sonucunda kompozit kiriş numunelerin davranışları, dayanımları, hasar durumları, çatlak şekilleri, rijitlikleri, enerji yutma kapasiteleri detaylı olarak incelenmiştir.

# **INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF COMPOSITE BEAMS MADE FROM NEW AND OLD GENERATION CONCRETE UNDER IMPACT FORCE**

## **SUMMARY**

Keywords: Composite beam, impact load, geopolymer concrete

Today, structures are subject to static and dynamic loads throughout their lifecycle. The weight of the structure itself, static and moving loads in the structure can be defined as static loads. Dynamic loads can be defined as loads that change over time or occur suddenly and cause permanent damage to the structure. An impact can occur on structures under static loads due to explosion or impact. These effects, which have an acceleration such as shocks caused by sudden explosions, earthquakes, explosions in natural gas systems, rock impacts and rockets, create stress changes on the carrier system. The impact effect is one of the least known loads whose properties and impact are from dynamic loads. Especially in the recent years, experimental, numerical and theoretical investigations are carried out to determine the resistance and behavior of structures against impact load.

The most important characteristic of the carrier elements constituting the structure is its ductility, ie its tendency to deform. The area under the stress-strain curve indicates the energy-damping capacity of the element, in other words its toughness. Since the static and dynamic loads acting on the structural elements have different characteristics, the deformation capacities that they will form in the element will be different from each other.

In this study, the effect of composite beam elements formed with geopolymer concrete and traditionally used Portland cement concrete which has increasing usage area on impact strength has been investigated experimentally. In the impact test using the weight reduction method, impact load was applied to the composite beams using the same hammer weight and drop height. As a result of the experiments, the behavior, strength, damage conditions, crack shapes, stiffness, energy absorption capacity of composite beam samples were examined in detail.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ülkemizde nüfusun hızla artmasıyla birlikte, yerleşim alanlarına olan ihtiyaç hızla artmaktadır. Kullanım alanı açısından sınırlı olan ve daralan bu yerleşim yerlerinin en uygun şekilde kullanılması yapı inşaatı sektörünü farklı arayışlara ve çözümlere yöneltmektedir. Sınırlı alanlarda daha yüksek yapılar inşa edilmesi fikri bu sorunlara çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek yapıların inşa edilmesi yapı kullanım alanlarının artmasını sağlamakta ama yapının ağırlığının artmasından dolayıyla düşey yükleri de artırmaktadır. Bununla birlikte yapının maruz kalacağı deprem yükü artmaktadır.

Yapılarda, ana taşıyıcı sistem olan çerçeve sistem, yatay ve düşey yüklerin büyük bir kısmını taşımaktadır. Ana taşıyıcı sistem betonarme, çelik ya da kompozit olarak belirlenip, üzerine gelen yükleri karşılayacak şekilde dizayn edilmesi gerekmektedir. Taşıyıcı sistemi oluşturan malzeme belirlenirken, malzemelerin avantaj ve dezavantajlarının değerlendirilip yapının maruz kalacağı yükleri dikkate alarak, uygun olan malzemenin kullanılması gerekmektedir. Yapının taşıyıcı sisteminin seçiminde zemin durumu, yapı kat adedi, yapının kullanım amacı önemli olmaktadır. Bu yüzden taşıyıcı sistem seçiminde bazı durumlarda betonarme yapı avantajlı olurken bazı durumlarda da çelik yapı daha avantajlı olmaktadır. Çelik yada betonarmenin avantaj ve dezavantajlar değerlendirildiğinde, iki durumda da meydana gelen olumsuz durumların ortadan kaldırılması için çelik ve betonarmenin birarada kullanıldığı kompozit yapı sistemleri yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit elemanlar kullanılarak oluşturulmuş yapıların ağırlıklarının betonarme yapıların ağırlıklarına göre %40-%50 daha az olmaktadır. Sadece çelik elemanlardan oluşan yapılarla kıyaslandığında ise %20 daha az çelik kullanılmaktadır. Sadece betonarme ya da sadece çelikten oluşan yapılara göre kompozit yapı sistemlerinin kullanılmasıyla daha fazla rijitlik, dayanım, dayanıklılık ve süneklik elde edilmektedir [1].

Günümüzde inşa edilen sanayi yapıları, yüksek katlı yapılar, köprüler, endüstri yapıları ve deniz yapıları gibi birçok alanda kompozit yapılar kullanılmaktadır [2]. Yapılar kullanım ömürleri boyunca hem statik hem de dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması gereken bu yükler kullanılarak modelleme yapılması can ve mal güvenliğinin sağlanmasında etkili olmaktadır. Statik yükler; yapının kendi ağırlığı ve üzerindeki depolama alanlarından oluşan ağırlıklardan dolayı meydana gelen yükler olarak ifade edilmektedir. Dinamik yükler; deprem yükü, kaya düşmesi, gemilerin liman yapılarına çarpması, makine titreşimleri, araç çarpması gibi birçok şekilde yapıya etki etmektedir. Yapılara etkiyen dinamik yükler meydana gelme şekillerine göre farklı karakterlerde oluşabilmektedir. Darbe etkisi; yaşanan kazalar, doğal afetler gibi nedenlerden dolayı olduğu gibi küresel tehditlerin ve terörist eylemlerin çarpıcı bir şekilde artmasından dolayı da oluşmaktadır. Yapılan bu çalışmanın konusu olan çarpma etkisi iki farklı nesnenin çarpışması sırasında meydana gelen dinamik etkilerin çarpışan nesnelere üzerinde oluşturduğu değişimin incelenmesini amaçlamıştır. Bu yüzden gerçekleşme periyodu uzun olan, can ve mal güvenliği açısından hayati bir öneme sahip olan darbe etkisinin göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Statik ve dinamik yükler altında bulunan yapı elemanlarının daha iyi anlaşılabilmesi için deneysel, numerik ve sayısal çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Günümüzde birçok avantajı olan kompozit elemanlara olan ilginin artmasına benzer bir örnek de yeni nesil geopolimer betonların kullanılmasıdır. Geopolimer temel olarak amorf kil ve buna benzer malzemelerin polimerize silikat yada alüminosilikatlardan oluşan bileşiklerin alkali ortamlarda sentezlenmesi yöntemine dayanmaktadır. Geopolimerazasyon olayı; yüksek fırın cürufu, kaolin, silis dumanı, volkanik tüf, uygun şekilde ufalanmış doğal başkalaşım kayalar, endüstriyel atıklar, kaolin gibi dehidratasyona uğramış malzemelerle alkali silikat ve alkali tuzların uygun ölçülerde tepkimeye girmesi ile başlamaktadır. Böylelikle elde edilen geopolimer beton 6-8 gün gibi kısa bir sürede mukavemet kazanarak taşıyıcılık özelliği kazanmaktadır. Geopolimer betonların (GPC) üretiminin hızlı olması, yüksek mukavemetlere kısa sürede ulaşması, bileşimindeki malzemelerin atık maddelerden oluşması gibi özelliklerinden dolayı yıllardır kullanılan portland çimentolu betona (OPC) alternatif

olarak gösterilmektedir. Yeni nesil beton olan GPC betonlar çevre dostu, kolay ve daha az maliyetle üretilmesi sebebiyle inşaat sektöründe hızla kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde birçok kullanım alanı bulunan geopolimer betonlar yol kaplamalarında, iklim şartları ağır olan ve yüksek dayanıklılık gerektiren duvar kaplamalarında, zehirli atıkların depolanması ve yangına karşı yüksek dayanım gerektiren durumlarda, taşıyıcılık özelliği gösteren veya göstermeyen yapı elemanlarında sıkça tercih edilmektedir.

### **1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Yapılan bu çalışmanın amacı, kompozit olarak üretilen kirişlere dinamik bir yük olan darbe etkisi uygulanarak kompozit kirişlerin davranışının deneysel olarak incelenmesi olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamına farklı parametreler kullanılmıştır. Kompozit kiriş numunelerinde kullanılan yapısal çeliğin enkesiti, kiriş numunelerinin boyu, yeni nesil olan GPC ve geleneksel beton olan OPC beton kullanılarak üretilen numunelerin darbe etkisine karşı tepkisi incelenmiştir.

Çalışma boyunca izlenen yol, farklı parametrelerle oluşturulmuş kiriş numunelerine darbe yükü uygulanarak yardımcı elemanlar aracılığıyla ivme-zaman, hız-zaman, yerdeğiştirme-zaman, hareketli ve sabit mesnet tepkilerinin değerlerinin elde edilmiştir. Bilgisayar ortamındaki bu değerler yardımıyla grafikler elde edilmiştir ve böylelikle tokluk, ivme değerleri, eğilme rijitliği, deformasyon miktarı gibi değerler karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışma 5 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın genel amacı, kapsamı ve yapılan bu çalışmanın konusuyla ilgili daha önceden yapılmış literatür çalışmaları incelenmiştir. İkinci bölümde kompozit yapılar, darbe etkisi ve yeni nesil beton olan geopolimer betonlarla ilgili bilgiler aktarılmıştır. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan kompozit kirişlerin genel özellikleri deneyde izlenen yol, deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ve ekipmanlarla ilgili bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde ise darbe deneyi ve deney sonrası elde edilen grafiklere yer verilmiştir. Beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar açıklanarak yorumlanmıştır ve bazı önerilere yer verilmiştir.



## 1.2. Darbe Yüğü ile İlgili Literatür

Lin-Hai Han ve arkadaşları çalışmalarında (2014), enine darbe yüküne maruz kalan yüksek mukavemetli betonla doldurulmuş çelik boru elemanların (CFST) davranışı deneysel olarak incelenmiştir. ABAQUS programı ile elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları yardımı ile doğrulanmıştır. Yapılan bu çalışmadaki deneysel değişkenler; sınır koşulları, darbe yüksekliği, numunenin boyu ve darbe yükünün ağırlığı olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında hazırlanan 12 adet numunesinin; 9 tanesi içi beton dolgulu, 3 tanesi de içi boş referans numunesi olarak üretilmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda, deney numunesinin mesnet bölgesinin üst kısmında bulunan betonda çekme çatlakları oluşurken alt kısımlarında ise ezilme meydana gelmiştir. Ayrıca yüksek mukavemete sahip betonla doldurulmuş (CFST) numuneler esnek bir şekilde deforme olmakta ve uygulanan darbe yükü altında iyi bir dayanım sergilemektedir. Çalışmanın sonunda deneysel çalışmalar ile sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar benzerlik göstermiştir [3].

Gonzalo ve arkadaşları (2017) yaptıkları bu çalışmada dikdörtgen geometriye sahip betonarme kirişlere çelik lif eklenerek darbe etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Deneyde 125x250x1600 mm ebatlarında numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan deney numunelerinde, darbe yüksekliği 1750 mm ve darbe yükü ağırlığı 200 kg olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında hazırlanan 7 adet deney numunesinde çelik lif tipi; düz, kanca ve prizmatik ve lif oranları ise liffsiz numune, %0.5 lifli numune ve %1 lifli numune olarak üretilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda, çelik lif ile deney numunelerinde belirli lif oranına kadar darbe dayanımında artış olurken, belirli lif oranından sonra darbe dayanımında azalma olduğu görülmüştür [4].

Mohammad Yousuf ve arkadaşları (2013) içi boş ve betonla doldurulmuş paslanmaz çelik boruların statik ve darbe yükünün bileşik etkisi altında bulunan eleman davranışını deneysel ve numerik olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmanın amacı içi boş ve betonla doldurulmuş (CFST) kolonların bileşik (darbe+statik) yük etkisindeki lokal burkulmalarının, enerji yutma kapasitesilerinin ve burkulma modlarının deneysel

ve numerik olarak karşılaştırmaktır. Çalışma doğrultusunda 100x100x2500 mm ebatlarında, D/t oranı 20 mm olan 4 adet kare çelik numune üretilmiştir. Çalışmada kullanılan deney numuneleri için darbe yüksekliği 650 mm ve darbe yükü ağırlığı 592 kg, mesnet koşulları sabit ve hareketli olacak şekilde darbe düzeneği hazırlanmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda; içi boş numunelerde lokal burkulma gerçekleştiği fakat içi beton dolu numunelerde lokal burkulmanın büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlardan hareketle beton dolgulu elemanların içi boş elemanlara kıyasla daha yüksek enerji yutma kapasitesi, daha yüksek mukavemet ve süneklik özelliklerine sahip olduğu sonuçlarına varılmıştır. Darbe yükü kapasitesi kıyaslandığında CFST numunelerin içi boş çelik numunelerden %45 daha yüksek olduğu görülmüştür. Paslanmaz çelikten üretilen içi boş ve CFST elemanların statik dayanımının yumuşak çelikten üretilen numunelerden %12 daha yüksek olduğu görülmüştür. Paslanmaz çelikten üretilen içi boş elemanların darbe dayanımı yumuşak çelikten üretilen numuneden %17, CFST elemanların darbe dayanımının ise yumuşak çelikten %14 daha yüksek olduğu görülmüştür. Paslanmaz çelik numunelerin sünekliği yumuşak çelikten %73 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Ayrıca sonlu eleman çalışmasından elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmış, yük sapma eğrilerinin ve deforme olma şekillerinin benzer olduğu görülmüştür [5].

Wang ve arkadaşları (2015) yaptıkları bu çalışmada, ultra hafif ağırlıklı çimento (ULCC) kullanılarak elde edilmiş beton dolgulu, dairesel geometriye sahip, kompozit çelik elemanların darbe yükü etkisi altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Deney düzeneğinde bulunan darbe yükünün ağırlığı 1350 kg, darbe yüksekliği 3400 mm olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında hazırlanan 6 adet deney numunesinde çapı 219 mm, boru uzunluğu 1800 mm ve et kalınlıkları 10 mm, 6,3 mm ve 5 mm olacak şekilde numune üretilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda, ultra hafif ağırlıklı çimento dolgulu kompozit numunelerin daha güçlü darbe dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca çelik numunelerin beton dolgulu olması ve et kalınlığının artmasıyla birlikte darbe kuvvetine karşı dayanım artmakta, lokal deformasyon azalmakta ve numunenin darbeye maruz kaldığı bölgenin düşey yerdeğiştirmesi azalmaktadır [6].

Yazıcı ve arkadaşları (2017) çalışmalarında, kompozit ve dikdörtgen geometriye sahip çelik kirişlerin darbe yükü altındaki davranışı incelenmiştir. Çalışmada ABAQUS programı ile elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar yardımı ile doğrulanmıştır. Yapılan bu çalışmada kullanılan beton sınıfı, numune ebatları, darbe yüksekliği ve çekiç ağırlığı bütün deneyler için sabit tutulmuştur. Deney düzeneğinde bulunan darbe yükünün ağırlığı 220 kg, darbe yüksekliği 2000 mm olarak belirlenmiştir ve darbe yükü deney numunelerinin tam orta kısmına gelecek şekilde serbest düşmeye bırakılmıştır. Deney kapsamında hazırlanan 2 adet numune, 120x80x3 mm ebatlarında ve uzunluğu 1500 mm uzunluğunda olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan bu kiriş numunelerinden bir tanesi C30 beton sınıfı ile doldurulmuş ve diğer kiriş numunesinin içi boş bırakılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda ivme-zaman, hız-zaman ve konum-zaman grafikleri elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde içi beton ile doldurulmuş kiriş numunesinin 9,65 mm deplasman yaptığı, içi boş kutu kiriş numunesinin 330,12 mm deplasman yaptığı görülmüştür [7].

Kantar ve arkadaşları (2011) çalışmalarında, beton basınç dayanımındaki değişimin, darbe etkisi altındaki davranışa olan etkisini incelemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmayla, deney numunelerini göçmeye götüren düşme sayısı, ivme-zaman, hız-zaman, konum-zaman grafikleri, enerji kapasiteleri, çatlak şekli ve gelişimini incelemeyi amaçlamışlardır. Deney elemanlarına 5,25 kg ağırlığındaki sabit ağırlık; 300, 350, 400, 450 ve 500 mm olmak üzere beş farklı yükseklikten serbest düşmeye bırakılmıştır. Çalışma kapsamında 150x150x710 mm boyutlarına sahip, 5 adet normal dayanımlı (25 MPa) 5 adet yüksek dayanımlı (45 MPa) beton kullanılarak toplamda 10 adet donatısız beton kiriş üretilmiştir. Kiriş numunelerine ivme ölçerler yerleştirilerek numunelerde meydana gelen içsel etkiler belirlenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda; yüksek dayanımlı kiriş numunesinin göçmesi için gereken düşme sayısının normal dayanımlı kiriş numunesinden daha fazla olduğu görülürken, normal dayanımlı beton dayanımına sahip kiriş numunesinin daha sünek davranış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca daha önceki çalışmalarda bahsedilmeyen, düşürülen ağırlığın numune üzerindeki sıçrayıp tekrar çarpma sayısı incelenmiş sonuçta normal dayanımlı betona sahip kiriş numunesinde çekicinin daha az

zıplama yaptığı görülmüştür. Normal dayanımlı kiriş numunelerinde kırılma agrega yüzeylerinin matrizen ayrılmasıyla gerçekleşirken, yüksek dayanımlı numunelerde ise kiriş eksenine dik ve çarpma yüklemesinin uygulandığı kısımda kırılma gerçekleşmiştir. Elde edilen ivme-zaman grafikleri incelendiğinde düşme sayısının artmasına bağlı olarak deney elemanları elastik durumdan plastik duruma geçmiş ve göçme meydana gelmiştir. Deplasman değerleri kıyaslandığında normal dayanımlı numunelerin ortalama %19 daha fazla deplasman yaptığı görülmüştür. Ayrıca, maksimum ivme değerinin ölçüldüğü düşme yüksekliği için hesap edilen enerji, normal dayanımlı numunelerin yüksek dayanımlı numunelerden ortalama %17 daha büyük olduğu sonucuna ulaşılmıştır [8].

Mashal ve arkadaşları (2019) çalışmalarında, darbe yükü etkisi altında bulunan kiriş elemanlarının davranışını deneysel ve nümerik olarak belirlenip elde edilen sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Deney elemanına 75 kg ağırlığındaki sabit ağırlık 900 mm yükseklikten serbest düşmeye bırakılmıştır. Yapılan deneysel çalışma kapsamında S235 çelik sınıfından imal edilmiş, 120x80x3 mm ebatlarında 2000 mm uzunluğunda dikdörtgen geometriye sahip kiriş numunesi kullanılmıştır. Çelik kiriş numunesi, basit mesnet sınır koşullarına sahip olan darbe deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deneylerin sonucundan hem çekiç yükünden hem de deney numunesinden ivme değerlerinin alınabilmesi için iki adet genel amaçlı ivmeölçer kullanılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda ivme-zaman, hız-zaman ve konum-zaman grafikleri elde edilmiştir. Darbe esnasından çelik profilin basınç bölgesinde plastik şekil değiştirme meydana gelirken, çekme bölgesinde akma meydana geldiği görülmüştür. Darbe yükünün etki ettiği noktada daha fazla gerilme meydana gelirken mesnet bölgelerinde bu gerilmenin azaldığı görülmüştür. Elde edilen bu deneysel sonuçlar sonlu elemanlar modeliyle de doğrulanmıştır [9].

Saini ve arkadaşları (2019) yapılan çalışmada, CFRP ile güçlendirilmiş betonla doldurulmuş çelik boru kirişlerinin darbe yüküne karşı davranışı incelenmiştir. Çalışmada malzeme özellikleri, kesit özellikleri, darbe yükü ağırlığı ve darbe hızları farklı olan 42 adet numune hazırlanmıştır. Basit mesnet koşullarına sahip, silindirik geometrili çekiç başlığının numunenin orta açıklığına etki ettiği bir deney düzeneği

hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 3150 mm, 1800 mm ve 1300 mm açıklıklarına sahip A, B ve C serilerinden oluşmuştur. Boru çapları ve et kalınlıkları sırasıyla 219 mm ve 3,7 mm iken C serisindeki numuneler için 114,3 mm ve 4,5 mm olarak seçilmiştir. Borulara sarılan CFRP'nin kalınlığı 0,52 mm olarak belirlenmiştir. Çeşitli darbe enerjisi elde edebilmek için farklı darbe yükseklikleri ve farklı darbe yükü ağırlıkları seçilmiştir. Darbe yükünün çapı ve ağırlığı sırasıyla A ve B serileri için 150 mm ve 625 kg olarak seçilirken, C serisi için 100 mm ve 592 kg olarak seçilmiştir. Yapılan testlerin sonucunda CFRP ile sarılan kirişlerin yerdeğiştirmelerinin %20 azaldığı ve absorbe edilen enerjinin %10 azaldığı görülmüştür. Darbe etkisi altındaki numunelerde, yüksek dayanımlı kirişlerden ve CFRP ile sarılan kiriş numunelerinden maksimum verim sağlanırken, beton kalitesinin değişmesi önemli bir fark meydana getirmemiştir. Beton çekirdek çeliğin deformasyonunu sınırlandırmıştır. Numunelerde üç kat CFRP yerine tek kat CFRP kullanılması halinde absorbe edilen enerji miktarının 0,85-0,79 arasında azaldığı görülmüştür [10].

Bambach (2011) çalışmasında, farklı mesnet koşullarına sahip içi boş ve betonla doldurulmuş paslanmaz çelik boru kolonların enine darbe yükü altındaki davranışı incelenmiştir. Çelik borularının kompozit olarak çalışması için, çelik profilin orta bölgesine basınç dayanımı 91,3 MPa olan beton kullanılmıştır. Darbe deney düzeneğinde 600 kg ağırlığındaki darbe yükü 1975 mm yüksekliğe çıkarılmıştır. Darbe yükü numunelerin orta kısmına denk gelecek şekilde serbest düşmeye bırakılmıştır. Deneylerde kullanılan normal çeliğin bxdxt değerleri 20x20x1,6 mm; 35x35x1,6 mm; 50x50x1,6 mm iken paslanmaz çeliğin bxdxt değerleri 19x19x1,46 mm; 38x38x1,58 mm; 50x50x1,52 mm olarak belirlenmiştir. Deney numuneleri her iki ucundan 150 mm kaynaklandıktan sonra 700 mm'lik serbest açıklık elde edilmiştir. Ayrıca her numunenin orta açıklığına ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda paslanmaz çelik boruların normal çelik borularla kıyaslandığında ortalama 1,8 kat daha fazla enerji emme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür [11].

Gücüyen ve arkadaşları (2018) çalışmalarında, darbe kuvveti etkisi altındaki kompozit boru elemanların davranışının deneysel ve nümerik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmalarında ivme, deplasman, çarpma kuvvet değerleri ve hasar gelişimi

incelenmiştir. Deneylerde kullanılan darbe yükü ağırlığı 12 kg ve darbenin uygulanacağı yükseklik 1000 mm olarak belirlenmiştir. Darbe kuvveti uygulandığı zaman deney numunesinin uçlarında oluşacak yanal dönme ve ötelenme hareketlerini önlemek için 50x50x500 mm ebatlarında bağlantı aparatları kullanılmıştır. Kompozit boru elemanlar 4 mm kalınlığındaki galvanizli boru ile PVC boru arasına beton dökülerek 2",3" ve 4" olarak sınıflandırılan üç farklı çapta deney numunesi oluşturulmuştur. Çekicinin etki edeceği bölgenin sağına ve soluna 25 cm'lik mesafeye ivme ölçerler yerleştirilmiş ve LVDT'ler deney numunesinin orta kısmına monte edilmiştir. Darbe etkisi sonucunda oluşacak çarpma kuvvetinin değerini elde edebilmek için çekicinin uç kısmına kuvvet algılayıcı monte edilmiştir. Yapılan bütün hazırlıklardan sonra deneylere başlanmıştır ve numuneler göçme anına ulaşınca kadar devam edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile ABAQUS programından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kompozit boruların göçmesi için düşme sayısı 2",3" ve 4" çaplı kompozit borular için sırasıyla 14, 25 ve 37 olarak tespit edilmiştir. Kesit çapı arttıkça deney elemanının göçmesi için gereken düşme sayısının arttığı sonucuna varılmıştır. 2",3" ve 4" çaplı kompozit borularda göçme anında ulaşılan maksimum deplasman değerleri sırasıyla 2,61 mm, 2,17 mm ve 1,34 mm olarak tespit edilmiştir [12].

Kobya'nın çalışmasında (2016), farklı lif oranlarına sahip kendiliğinden yerleşen betonda (KYB) meydana gelen darbe etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney kapsamında 3400 g ağırlığındaki darbe yükü 350 mm, 500 mm ve 650 mm olmak üzere üç farklı yükseklikten düşürülerek darbe testi uygulanmıştır. Yapılan çalışmada lifsiz referans numunesi ve  $2 \text{ kg/m}^3$  (%0,57),  $2,5 \text{ kg/m}^3$  (%0,71),  $3 \text{ kg/m}^3$  Strux 90/40 sentetik lif ilave edilen 4 seri ve her bir seride 3'er adet 400x400x40 mm ebatlarında döşemeler imal edilmiştir. Lif kullanılan numunelerde viskoziteyi artırabilmek için süper akışkanlatırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Sertleşmiş beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları KYB1, KYB2, KYB3 ve KYB4 için sırasıyla 47,1 MPa, 51,5 MPa, 45,6 MPa ve 46,5 MPa olarak test edilmiştir. Darbe deney düzeneğine yerleştirilen numunelere ivmeölçerler monte edilmiştir ve deney numuneler göçene kadar darbe testlerine devam edilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda beton basınç dayanımı KYB4 serisinin KYB1'e, KYB3 serisinin KYB2'ye göre sırasıyla %1,27 ve

%5,63 oranında az olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak artan lif oranlarının betonun homojen yapısını etkilemiş olması olarak değerlendirilmiştir. Tüm serilerde çekiç yüksekliğinin artmasıyla birlikte numuneleri göçmeye götüren darbe sayısının azaldığı görülmüştür [13].

Selvi çalışmasında (2008), beton dayanımındaki değişimin darbe davranışına etkisini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında 5,25 kg ağırlığındaki sabit ağırlıklı darbe farklı yüksekliklere çıkarılarak deney elemanlarına göçme anına kadar darbe kuvveti uygulanmıştır. Böylece dayanımdaki değişimin darbe yükü düşme sayısı, numunelerin deplasmanları, ivme değerleri ve göçme mekanizması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan deney kapsamında 150x150x710 mm ebatlarında 5 tanesi normal dayanımlı (S1, S2, S3, S4, S5) diğer 5 tanesi ise yüksek dayanımlı (S6, S7, S8, S9, S10) olmak üzere toplam 10 adet deney numunesi oluşturulmuştur. Deney numunelerine ivmeölçerler yerleştirilmiştir ve darbe esnasında ivmeölçerlerin hareketinin önlenmesi için çelik dübellerle numuneye sabitlenmiştir. Düşü yükseklikleri 300 mm, 350 mm, 400 mm, 450 mm ve 550 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda darbe yükü düşme yüksekliğinin artmasıyla birlikte numuneyi göçme anına getiren düşme sayısının azaldığı görülmüştür. Darbenin uygulanacağı yükseklik arttıkça darbe kuvveti daha çok artacağından numunede oluşturacağı etki daha çok artmıştır ve numunelerin enerji yutma kapasiteleri azalmıştır. Yüksek ve normal dayanımlı betonda çekicinin ilk düşmesinin ardından yapmış olduğu zıplama (re-bound), sayıları arasında çok farklılık meydana gelmemiştir. Çatlak şekline ve ilerleyişine bakıldığında ise yüksek dayanımlı betonda dik veya dike yakın çatlaklar oluşurken, normal dayanımlı betonda dik açıdan uzak bir şekilde meydana gelmiştir. Düşme yükseklikleri arttıkça numunelerde meydana gelen ivme değerleri buna bağlı olarak da hız ve deplasman değerlerinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca normal ve yüksek dayanımlı betonlar kıyaslandığında (S1/S6, S2/S7, S3/S8, S4/S9, S5/S10) minimum ivme oranı %16 iken, maksimum ivme oranı %68 ve ortalama ivme oranı %31 olarak hesaplanmıştır. Hızlardaki oranların ise minimum %0,6, maksimum %21 ve ortalama %1 olduğu görülmüştür [14].

Zineddin ve arkadaşları (2007) yapılan çalışmada, betonarme döşemelerin darbe yükü etkisi altındaki dinamik davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Deney kapsamında farklı darbe yükseklikleri kullanılarak maksimum darbe yükü, maksimum deplasman, maksimum gerilme, ivme ve çatlakların yayılması gibi çeşitli parametreler incelenmiştir. Ağırlığı 2608 kg olan darbe yükü, numunelerin merkezine denk gelecek şekilde 305 mm, 152 mm ve 610 mm yüksekliklerinden serbest düşmeye bırakılmıştır. Deney kapsamında 90x1524x3353 mm ebatlarında, paspayları ve donatılandırılma şekli farklı olan farklı olan 3 seri döşeme numunesi üretilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda, betonarme döşeme numunelerinde kullanılan çelik donatı oranının ve düşme yüksekliğinin eleman davranışına olan etkisi incelenmiştir. Yapılan incelemelerin sonucunda, donatıların deformasyona uğradığı ve donatı yerleşiminin numunelerin göçme şeklini etkilediği görülmüştür. Düşme yüksekliğinin artmasıyla göçmeye uğrayan alanların daha çok küçüldüğü görülmüştür. Ayrıca düşme yüksekliğinin artmasıyla, zımbalama ve direkt kesme riski de artmaktadır [15].

Arıcı yapılan bu çalışmayla (2010), Charpy metoduyla betonun basınç dayanımının çarpma mukavemetine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında maksimum agrega çapı 8 mm olan, iki farklı başlangıç çatlağı (0,2-0,3) bulunan ve beton basınç dayanımları 38 MPa, 28 MPa, 13 MPa olan SeriI, SeriII ve SeriIII numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin boyutları 100x100x500 mm ebatlarında üretilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda beton basınç dayanımının artmasıyla çarpma mukavemetinin, eğilmede çekme ve yarma dayanımlarının arttığı görülmüştür. Başlangıç çatlak boyunun artmasıyla faydalı enkesit alanının azaldığı ve buna bağlı olarak kırılma için gerekli olan enerjinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada, betonun çarpma dayanımı ( $C$ ) ve basınç dayanımı ( $\sigma$ ) arasındaki  $q$  oranının 0,77-0,82 arasında değiştiği görülmüştür [16].

Wu ve arkadaşları (2019) yapılan bu çalışmayla, ultra yüksek performanslı çimento ile üretilmiş betonla doldurulmuş kompozit çelik tüplerin (UHPCC-FST) enine darbe yükü altındaki davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Deney doğrultusunda 5 adet UHPCC-FST üretilmiştir ve bunlardan 2 tanesi aksenal yüke maruz bırakılırken, 3 tanesi ise darbe yüküne maruz bırakılmıştır. UHPCC'lerden 100x100x100 mm ve



100x100x300 mm ebatlarında numuneler alınarak mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ortalama yarı statik basınç dayanımı 141,5 MPa, basınç dayanımı 119,2 MPa, elastisite modülü 43,8 MPa ve poisson oranı 0,23 olarak bulunmuştur. Çelik tüplerin uzunluğu 2000 mm, kesit çapı 203 mm ve et kalınlığı 6 mm olacak şekilde seçilmiştir. Deney numunesinin içerisine UHPCC doldurulan 2 adet kompozit numune 1000 tonluk aksenal basınç kapasitesine sahip deney düzeneğinde test edilmiştir. Deplasmanların hesaplanabilmesi için toplam 7 adet LVDT deney düzeneğine ve numuneye monte edilmiştir. Darbe deneyinde ise 530 kg ağırlığındaki darbe yükü 5 m (C-5), 8 m (C-8) ve 11 m (C-11) yüksekliklerinden serbest düşmeye bırakılmıştır. Ayrıca, kiriş numunelerine darbe esnasında oluşabilecek deplasman değerinin hesaplanabilmesi için 4 adet LVDT monte edilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda darbe kuvveti uygulanan C-5, C-8 ve C-11 kirişlerinde darbe alanında az miktarda eğilme deformasyonun olduğu ve diğer kısımların neredeyse düz kaldığı görülmüştür. Ayrıca çalışmada kullanılan UHPCC-FST'lerin sünek bir şekilde deforme oldukları ve ciddi burkulmaların meydana gelmediği gözlemlenmiştir [17].

Saatçi ve arkadaşları (2012), düşük hızlı darbe yükü altında betonarme döşemelerin (RC) davranışı incelenmiştir. Üretilen numunelerin merkezine, 137 kg ağırlığındaki darbe yükü 2500 mm yükseklikten serbest düşmeye bırakılmıştır. Yapılan çalışmada 6 adet 2015x2015x150 mm ebatlarında 25 mm paspayına ve farklı donatı oranlarına sahip BB100a (%0,4), BB150a (%0,3) ve BB200a (%0,2) numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu numunelerin 3 tanesi darbe yükü altında test edilirken özdeş olarak üretilen diğer üç numune iste statik yükler altında test edilmiştir. RC levhaların deney esnasındaki hareketinin sınırlandırılması için kenar kısımlarından 20 noktadan deney düzeneğine sabitlenmiştir. Ayrıca 16 adet LVDT ve donatılara yapıştırılmış 12 adet gerinim ölçer kullanılmıştır. Deney numunelerinde kullanılan betonun basınç dayanımı ( $f_c$ ) 29,5 MPa olarak bulunmuştur. Kullanılan donatının akma dayanımı ( $f_y$ ) 420MPa ve kopma dayanımı ( $f_u$ ) 490MPa olarak test edilmiştir. Darbe hızı 7 m/sn olarak ölçülmüştür. Statik testlerin gerçekleştirilmesi için el ile çalıştırılan hidrolik bir kriko numunelerin orta kısmına yerleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, deney numunelerinin yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda donatı aralığı az olan betonarme döşemelerinin daha az yük taşıdığı ama daha sünek

bir davranış sergilediği görülmüştür. Donatı aralığı fazla olan numunelerde daha az çatlak olduğu fakat bu çatlakların daha derin olduğu sonucuna varılmıştır [18].

### 1.3. Yeni Nesil Beton (Geopolimer)

Binici ve arkadaşları (2012) çalışmalarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı ve pomzanın NaOH ile aktivasyonu ile elde edilen geopolimer beton üretilmesi ve bunların fiziksel, mekanik ve radyasyon geçirgenlik özelliklerinin kıyaslanması amaçlanmıştır. Geopolimer beton numuneleri; su emme, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, ultrasonik ses geçirgenlik hızı ve radyasyon tutuculuk özelliklerinin belirlenmesi için bazı testlere tabi tutulmuştur. Deneysel kapsamda 100°C ve 150°C'de 40x40x160 mm ve 100x100x100 mm boyutlarında toplam 24 adet geopolimer beton numune üretilmiştir. Aktivatör olarak %98 saflıkta puzolan cüruf ağırlığının %4±7'si kadar NaOH kullanılmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silika kumu ve pomzanın birim hacim ağırlıkları sırasıyla 2,36 gr/cm<sup>3</sup>, 2,45 gr/cm<sup>3</sup>, 2,89 gr/cm<sup>3</sup>, 2,05 gr/cm<sup>3</sup> şeklindedir. Yapılan çalışmaların sonucunda en iyi su emme oranına sahip numunelerin yüksek fırın cürufu ile oluşturulan geopolimer beton olduğu görülmüştür. Ultrasonik ses geçiş hızları düşük olan numunelerin su emme oranının fazla, dayanımının ise düşük olduğu belirlenmiştir. En yüksek eğilme (7,32 MPa) ve basınç (42,81 MPa) dayanımına sahip numune 150°C aktivasyon ısı ile üretilmiş yüksek fırın cürufu geopolimer beton olduğu görülmüştür. Lineer soğurma katsayısı en yüksek yani radyoaktif geçirgenliği en fazla olan numunenin yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimer beton olduğu belirlenmiştir [19].

Tuyan ve arkadaşları (2017) uçucu kül esaslı geopolimer betonların mekanik özelliklerini ve yüksek sıcaklık dirençlerini araştırılmıştır. Çalışma kapsamında F (FUK) ve C (CUK) tipi uçucu kül katkılı 4 adet geopolimer beton üretilmiş ve benzer dayanıma sahip çimento esaslı (CEMI 42,5R) 2 adet farklı dayanımda geleneksel beton üretilmiştir. Üretilen bu numunelerin basınç dayanımı, elastisite modülü, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımları kıyaslanmıştır. Beton üretiminde ince agrega olarak 0-3 mm dane boyutunda kırma taş kum, 5-15mm

boyutunda iri agrega ve 15-25 mm boyutunda kalker esaslı kırma taş kullanılmıştır. Agregalar 40 dm<sup>3</sup> kapasiteli mikserde karıştırıldıktan sonra su emme oranı kadar su ilave edilip doygun kuru yüzey elde edildikten sonra bağlayıcı malzemeler de eklenip karıştırılmaya devam edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda yüksek sıcaklık direnci ve mekanik özellikleri kıyaslandığında F tipi geopolimer betonun benzer dayanımlı çimento esaslı betonunkinden daha yüksek olduğu görülürken C tipi geopolimer betonun çimento esaslı betonunkinden daha düşük olduğu görülmüştür. Ortam sıcaklığında kürlenmiş C tipi geopolimer betonun mekanik özellikleri ile benzer dayanıma sahip çimento esaslı betonun mekanik özellikleri birbirine yakın performanslar göstermiştir. %50'si F tipi %50'si C tipi uçucu kül olan geopolimer betonlar ile benzer dayanımlı çimento esaslı betonların normal sıcaklıkta kürlenmiş numuneleri karşılaştırıldığında mekanik özelliklerinin ve yüksek sıcaklık dayanımlarının daha düşük olduğu belirlenmiştir [20].

Kaya ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (2018), uçucu külün sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ve sodyum hidroksit (NaOH) ile aktivasyonu sonucu elde edilen geopolimer harçların dayanım, kür sıcaklıkları ve boşluk oranı ilişkilerini varyans analizi ile incelenmiştir. Yapılan araştırmada elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sosyal bilimler istatistik programı (SPSS) kullanılmıştır. Harçların üretilmesi için F tipi uçucu kül, içme suyu ve maksimum dane boyutu 2mm olan agregalar kullanılmıştır. Üretilen harç numuneleri 50°C-60°C-70°C-80°C-90°C ve 100°C'de 48 saat süreyle sıcaklık kürü uygulanmıştır. Sıcaklık kür etkisinden çıkarılan harç numuneleri 3-7-14-28-90-180 günü tamamlayacak şekilde ±22°C'de havada kürendikten sonra eğilme ve basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Yapılan testlerin sonucunda dayanım, kür sıcaklığı ve boşluk oranlarıyla ilgili hipotezler ortaya atılmış ve bu hipotezlerin doğruluğu SPSS programı yardımıyla varyans analizi yapılarak kontrol edilmiştir. Sonuç olarak düşük sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelere göre ilerleyen yaşlarda daha fazla dayanım kazandığı görülürken dayanım artışının geleneksel betonla kıyaslandığında daha fazla artış göstermediği görülmüştür. Boşluk oranları incelendiğinde ise farklı sıcaklıklarda kürlenmiş numuneler arasında yaşa göre anlamlı değişim göstermediği sonucuna varılmıştır. Bunun sebebi olarak geopolimer oluşumu sonucunda ortaya çıkan N-A-S-H jellerinde

suyun bulunmaması olarak açıklanmıştır. Varyans analizi geopolimer harcın yapısında bulunan su, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün basınç dayanımına 0,495 oranında etki ettiği görülmüştür [21].

Vijai ve arkadaşları (2010) çalışmalarında, uçucu kül katkılı geopolimer betonun kürlenme tiplerinin değiştirilmesinin dayanıma etkisi araştırılmıştır. Geopolimer betonda kullanılan kaba ve ince agregalar kütleli olarak %77 olarak belirlenmiştir. Uçucu kül ile oluşturulan geopolimer yoğunluğu geleneksel betona benzer olup 2400 kg/cm<sup>3</sup> civarında olduğu belirtilmiştir. Geopolimer betonda aktivatör olarak NaOH, su ve sodyum silikat kullanılmıştır. Yapılan karışımlardan sonra 12 adet 150x150 mm küp numuneler üretilmiştir. 6 adet numune oda sıcaklığında kür edilirken 6 adet numune ise 60°C'de kür edilmiştir. 7 ve 28 günlük kür işlemi uygulanmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda Yapılan çalışmada sonucunda 7 ve 28 gün boyunca numunelerin yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin basınç dayanımlarının 7 gün için 7 kat 28 gün için ise 2 kat fazla olduğu görülmüştür. Oda sıcaklığında kürlenme işleminde 28 günlük basınç dayanımının 7 günlük basınç dayanımının 4,5 katı iken, yüksek sıcaklıkta kürlenme işleminde 1,2 katı olarak hesaplanmıştır. Yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelerin 30 MPa'lık bir dayanıma ulaştığı tespit edilmiştir [22].

Güzelküçük ve arkadaşları (2019), perlit esaslı geopolimer kompozitlere kür süresi ve sıcaklığın etkileri araştırılmıştır. Perlit içeren geopolimer kullanılarak, çimento üretiminden kaynaklanan enerji tüketimi, CO<sub>2</sub> emisyonunu ve buna bağlı olarak çevreye verilen olumsuz etkiler en aza indirilmeye çalışılmıştır. Geopolimer betonun su/bağlayıcı oranı 0,45 olan 50x50x50 mm boyutlarında toplam 12 adet çimentosuz perlit esaslı küp numuneler üretilmiştir. Çözeltilerde NaOH molariteleri 7,7-11,6 ve 15,5 olarak belirlenmiştir. Üretilen numunelere 24 ve 48 saatlik kür süreleri boyunca 90°C ve 110°C sıcaklık uygulanmıştır. Etüv kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda en iyi dayanım 15,5 NaOH molaritesine sahip 110°C'de ve 24 saat boyunca kür edilen numunelerden elde edilmiş olup bu değer 46,76 MPa olarak bulunmuştur [23].

Turner ve arkadaşları (2013) geopolimer ve sıradan portland çimento (OPC) bağlayıcılı geleneksel betonun üretimi sırasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> gazının miktarı karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın yapılabilmesi için 1 m<sup>3</sup> beton üretilmiş ve beton dayanımları 40 MPa olarak belirlenmiştir. Açığa çıkan CO<sub>2</sub> miktarı (1.1) denklemi kullanılarak belirlenmiştir:

$$CO_2 - e = Q \times EC \times GWP \quad (1.1)$$

(1.1) denklemindeki Q kg cinsinden yanan yakıt miktarı, EC aktivitenin gerçekleşmesi için kullanılan yakıt tiplerinin J/kg cinsinden enerji içeriği ve GWP ise küresel ısınma potansiyeli olarak değerlendirilmiştir. Geopolimer betonun üretimi için aktivatör olarak Sodyumhidroksit ve Sodyumsilikat kullanılmıştır. Geopolimer betonda SiO<sub>2</sub>/NaOH oranı 2,4'tür. Üretilen numuneler 24°C-60°C'de kür edilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda geopolimer betonun üretimi için açığa çıkan CO<sub>2</sub> miktarı OPC üretimi için açığa çıkan CO<sub>2</sub> miktarından %9 daha az olduğu görülmüştür [24].

Sarker (2011), uçucu kül katkılı geopolimer betona gömülü donatıların yapışma gücü (aderans) ile ilgili çalışma yapılmıştır. Çalışma doğrultusunda beton basınç dayanımı, donatı çapı, paspayı gibi farklı parametreler kullanılmıştır. Çalışmada 24 adet geopolimer beton (GPC) ve 24 adet normal portlan çimentosuyla üretilmiş beton (OPC) kiriş numuneleri üretilmiştir. GPC basınç dayanımı 25-39 MPa arasında değişmektedir. Beton numuneler 250x250x600 mm ebatlarında üretilmiştir. Donatı çapları 12 mm, 16 mm, 20 mm ve 24 mm olarak seçilmiştir. Geopolimer beton F tipi uçucu kül kullanılarak üretilmiştir ve 60°C'de 24 saat boyunca kürlenmiştir. Hazırlanan numuneler beton içerisinde bulunan çekme çubuklarıyla çekilerek deneyler tamamlanmıştır. Yapılan çekme deneylerinin sonucunda GPC ve OPC betonlarda benzer çatlaklar görülmüş ve çekme çubuğunun olduğu kısımlarda kırılmalar meydana gelmiştir. Her iki beton türünde de beton basınç dayanımı ve paspayındaki artış ile birlikte bağlanma kuvveti artmıştır. Genel olarak aynı parametrelere sahip GPC betonlarının OPC betonlarından daha fazla bağlanma kuvveti göstermiş olup, aynı basınç dayanımlı OPC betonundan daha yüksek çekme ve ayrılma dayanımına sahip olduğu görülmüştür [25].

Nath ve arkadaşları (2017), ortam sıcaklığında kürlenmiş düşük kalsiyumlu uçucu kül katkılı geopolimer betonuneğilme davranışı ve elastisite modülü belirlenmiştir. Deneysel çalışmada 11 adet geopolimer beton (GPC) ve 2 adet portland çimentolu beton (OPC) hazırlanmıştır. GPC’de değişken parametre olarak alkali sıvı miktarı seçilmiştir. Hazırlanan numuneler 18°C-23°C arasında değişen sıcaklıkta ve bağıl nemin %70±10 olduğu ortamda krlenmesi sağlanmıştır. Bütün numuneler için 28. ve 90. Günlerde basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülünün belirlenmesi için testlere tabi tutulmuştur. Yapılan deneylerin sonucunda GPC betonların OPC betonlardan daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu grlmştir. 28 gün uygulanan krn ardından GPC’nin elastisite modülün aynı dayanımlı OPC betonundan %25-30 daha az olduğu sonucuna varılmıştır [26].

zcan ve arkadaşları (2019) alışmalarında, yüksek fırın cürufu (BFS) ve Ferrokrom (EFS) katkılı geopolimer betonlar üretilmiştir. Üretilen 5 grup numune %5 fosforik asit (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), hidroklorik asit (HCl), hidroflorik asit (HF) ve sülfirik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) zeltilerine batırılarak 12 hafta boyunca bekletilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda basınç dayanımları, ultrasonik atım hızları (UPV), numunelerin ağırlık ve uzunluklarındaki değişimin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda EFS ile üretilen numunelerin BFS ile üretilen numunelerden daha yüksek dayanıma (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>HF>HCl>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) sahip olduğu grlmştir [27].

Doğan ve arkadaşları (2018) pomza üretimi sırasında açığa çıkan elek altı ince malzeme ve kr yakılması sonucu oluşan depolanamaz kazan altı külü alkali aktivatör olan sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive ederek geopolimer yapı malzemesi üretilmiştir. Deneysel alışma kapsamında %50 atık kazan (AKAK) ve %50 pomza elek altı atığı (PEAA) karıştırılmıştır. Bu kuru karışıma ağırlıkça %10, %15, %20 ve %25 oranlarında NaOH ilave edilerek 40x40x160 mm ebatlarındaki kaıplara dklerel toplam 12 adet numune üretilmiştir. Üretilen bu numuneler 70°C, 80°C ve 150°C’de ayarlanan etüvde 24 saat boyunca kürlenmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda basınç dayanım değerleri karışlaştırıldığında optimum sonuç 100°C’de krlen %20 oranında NaOH aktivatörü içeren numunede 16,5 MPa olarak elde

edilmiştir. 28 günlük basınç değerleri 7 günlük basınç değerlerinden %6-9 daha fazla olduğu görülmüştür [28].

Sumajouw ve arkadaşları (2007), geopolimer betondan üretilmiş betonarme kolonların aksenal yük etkisi altındaki davranışı hakkında deneysel olarak çalışılmıştır. Değişken parametreler olarak beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı ve yük eksantirikliği olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında F tipi uçucu kül kullanılmıştır ve agregalarla bağlanması için aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi kullanılmıştır. Deneysel çalışmada 175×175×1500 mm ebatlarında 12 adet geopolimer kolon üretilmiştir. Seri1'deki 6 adet numunede beton basınç dayanımı 40 MPa, 4Ø12 boyuna donatı, Ø6 etriye kullanılırken; Seri2'deki 6 adet numunede ise beton basınç dayanımı 60 MPa, 8Ø12 boyuna donatı, Ø6 etriye kullanılmıştır. Deney esnasında numunelerin düzlem dışı hareketinin ölçülebilmesi için LVDT'ler yerleştirilmiştir. Geopolimer numuneler 20 kN'luk ön yüklemeyle yüklendikten sonra 0,3 mm/sn'lik yükleme hızıyla yüklenmeye devam edilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda, eksantirikliğin azalması, donatı oranının ve beton basınç dayanımının artmasıyla geopolimer numunelerin taşıdığı yük kapasitesinin arttığı görülmüştür [29].

Tran ve arkadaşları (2019) çalışmalarında çelik liflerle güçlendirilmiş ortam sıcaklığında kürlenmiş geopolimer (GPC) kirişleri deneysel ve teorik olarak incelenmektedir. GPC kiriş numunelerin üretilmesi için düşük kalsiyumlu uçucu kül (FA), öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBFS), 7 mm ebatlarında agrega, 10 mm çapında enine-boyuna donatı ve alkali aktivatör olarak ise 12 molar sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) kullanılmıştır. Çalışmanın değişken parametreleri ise kirişlerdeki çelik lif oranı ve uzunluğu olarak seçilmiştir. 150x200x1700 mm ebatlarında 5 adet GPC ve 1 adet portland çimentosuyla üretilmiş beton (OPC) referans kiriş numunesi üretilmiştir. Kirişlerdeki çelik lif uzunlukları 35 mm-60 mm olarak değişirken lif oranları ise %0, %0,375, %0,75, %1,5 (GPC, GPC-0,375-35, GPC-0,75-35, GPC-1,5-35, GPC-0,375-60) olarak değişmektedir. Üretilen kiriş numuneleri kalıplardan çıkartılmıştır ve iki ay boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Hazırlanan kiriş numunelerine 5 adet LVDT monte edilmiştir. Basit mesnet koşullarına sahip deney düzeneğine yerleştirilen kirişlere 4 noktalı eğilme

deneyi yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda düşük elatisite modülüne sahip olması sebebiyle çelik lif kullanılmadan üretilen GPC kirişlerin en düşük çatlama dayanıklılığına sahip olduğu görülürken OPC kirişine göre %40 daha fazla olduğu görülmüştür. Kancalı fiberlerin eklenmesiyle, eğilme kapasitesinin %40, sünekliğin ise %49 arttığı belirlenmiştir. Fiber oranı %1,5 olan GPC kirişlerin %0,75 oranına sahip numunelerden %18 daha az yük taşıdığı görülmüştür. Kanca boyunun artmasıyla kiriş içerisindeki homojenliğin ve buna bağlı olarak kapasitenin azaldığı sonucuna varılmıştır. Analitik tahminler ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür [30].

Mathew ve arkadaşları yapılan bu çalışmayla (2018), yüksek sıcaklıklara (200°C, 400°C, 600°C, 800°C) maruz bırakılmış geopolimer beton kirişlerin eğilme davranışı incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada geopolimer beton kirişlerin deformasyon özellikleri, moment-eğrilik ilişkisi ve çatlak davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Kiriş numuneleri 150×200×1100 mm boyutlarında ve donatı oranı %0,52 olacak şekilde üretilmiştir. Kirişlerin paspayları 20 mm, 30 mm ve 40 mm olarak değişmektedir. Geopolimer beton üretiminde F tipi uçucu kül, alkali çözelti olarak sodyum hidroksit-sodyum silikat (NaOH-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), 20 mm boyutunda agrega ve nehir kumu kullanılarak üretilmiştir. Kullanılan geopolimer betonun basınç dayanımı 57 MPa olarak test edilmiştir. Kirişlerde 2 adet Ø8'lik basınç donatısı, 2 adet Ø12'lik çekme donatısı ve Ø6/80'lik etriye kullanılmıştır. Basit mesnet özelliklerine sahip deney düzeneğine yerleştirilen geopolimer kiriş numunelere 3 kN yük artırımı uygulanarak 4 noktalı eğilme testleri uygulanmıştır. Yapılan testlerin sonucunda numunelerin yük taşıma kapasitelerinin 600°C'nin üzerine çıkıldıkça azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak da başlangıçta reaksiyona girmemiş malzemelerin polimerizasyonu ve donatılardaki dayanımın azalması olarak düşünülmüştür. 800°C'de 20 mm paspayına sahip numunedeki çatlamlar uygulanan yükün %65'ine karşılık gelirken 40mm'lik paspayına sahip numunelerde %75'ine karşılık geldiği görülmüştür. Sıcaklığın artmasıyla birlikte sünekliğin azaldığı ve bu azalmanın miktarı 800°C'deki kiriş numuneleri için %64 olarak hesaplanmıştır [31].



Nguyen ve arkadaşları (2016), düşük kalsiyumlu F tipi uçucu kül katkılı geopolimer betonun mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi ve eğilme etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Mekanik özellikler olarak elastisite modülü, poisson oranı, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi araştırılmıştır. Geopolimer betonun üretiminde kullanılan F tipi uçucu külün özgül ağırlığı  $2500 \text{ kg/m}^3$ , alkali aktivatör olarak  $\text{NaOH-Na}_2\text{SiO}_3$  (kütlece %36-38), 10 mm-20 mm boyutlarında agregalar (%30-%40) ve kum (%30) kullanılmıştır. Agregalar, uçucu kül ve kum kuru olarak karıştırılmıştır. Su ve alkali aktivatörün karıştırılmasıyla elde edilen alkali sıvı kuru karışımın üzerine eklenerek taze beton oluşumu tamamlanmıştır.  $100 \times 200 \times 2000$  mm ebatlarında, beton basınç dayanımları 30 MPa (GPC1), 25 MPa (GPC2) ve 20 MPa (GPC3) olan 3 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Kirişlerin 4 noktalı eğilme testi sırasında deplasmanlarının ölçülebilmesi için 3 adet LVDT kullanılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiğinin geleneksel betonla aynı olduğu görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda kürlenmiş geopolimer betonun elastisite modülünün normal betondan düşük olduğu hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar ABAQUS programında analiz edilen kirişlerin sonuçlarıyla kıyaslandığında daha dayanımlı olduğu sonucuna varılmıştır [32].

Maranan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (2019), cam elyaf takviyeli donatı (GFRP) çubukları ve çelik çubukları kullanılarak farklı yerleşim konfigürasyonlarıyla oluşturulan geopolimer beton kirişlerin eğilme davranışları incelenmiştir.  $200 \times 300 \times 3100$  mm ebatlarında sadece GFRP donatılarla (2 adet), üstte GFRP altta çelik donatılarla (3 adet), üstte çelik altta GFRP donatılarla (1 adet) ve sadece çelik donatılarla (1 adet) oluşturulmuş toplam 7 adet kiriş numunesi oluşturulmuştur. GFRP donatılan beton ile aderansın artırılması için vinil ester reçinesine batırılarak silika kumlarla pürüzlü bir yüzey oluşturulmuştur. GFRP'den üretilmiş etriyelerin çapları 9,5mm, GFRP çubukların çapları 9,5 mm, 12,7 mm ve 15,9 mm olarak değişirken çelik donatıların çapı 16mm olarak seçilmiştir. Geopolimer betonun dayanımı ortalama 31 MPa olarak hesaplanmıştır. 4 noktalı eğilme deney düzeneğine yerleştirilen geopolimer kiriş numunelerinin merkezine denk gelecek şekilde lazer yerdeğiştirme sensörü yerleştirilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda hibrit GFRP-çelik donatılarla oluşturulmuş numunelerde sadece GFRP kullanılarak oluşturulmuş

numunelere göre daha fazla eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Kirişlerde donatı oranı %66'ya yükseltince orta açıklıkta sapma ve yerdeğiştirme oranı sırasıyla %21 ve %31 oranında artış gösterdiği görülmüştür. Basınç donatısı olarak çelik, çekme donatısı olarak GFRP kullanılmasıyla daha sünek kirişlerin elde edilmiştir. Geopolimer hibrit kirişlerin normal betonlu hibrit kirişlerden daha yüksek eğilme mukavemeti ve elastisite modülüne sahip olduğu görülmüştür [33].

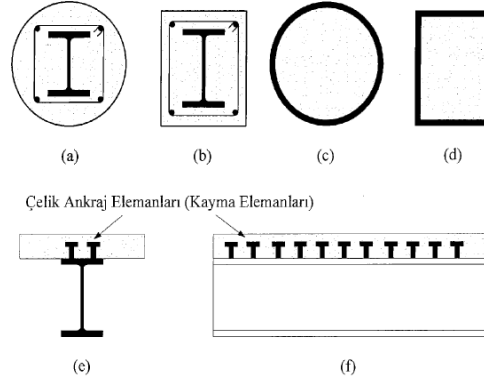


## **BÖLÜM 2. KOMPOZİT YAPILAR, GEOPOLİMER BETON VE DARBE ETKİSİ**

Kompozit yapılar, dünyada yapı uygulamalarının vazgeçilmez taşıyıcı sistemleri haline gelmiştir. Kompozit yapı sistemleri, betonarme binalarla kıyaslandığında yapının zati ağırlığını etkili bir şekilde azalttığı ve sismik yüklere karşı istenilen dayanımlara ulaşmaya olanak sağlamaktadır. Kompozit kesit, yapısal çelik ve betonun birarada çalıştığı üniteyi ifade etmektedir. Oluşturulan bu kompozit kesitlerin asıl amacı bir bütünlük sağlanarak çelik ve betonun birlikte çalışmasını sağlamak ve daha büyük taşıma kapasiteleri elde etmektir. Ayrıca çelik ve beton malzemelerinin zayıf yönleri de oluşturulan kompozit yapıyla birlikte bertaraf edilmektedir. Çelik malzemesinin korozyon ve düşük yangın dayanımı gibi zayıf yönleri beton malzemesiyle, beton malzemesinin ise düşük çekme mukavemeti gibi zayıf yönü çelik malzemesi ile giderilerek yüksek performanslı elemanlar ortaya çıkmaktadır. Kompozit elemanların bu performans artışı; rijitlik, süneklik, yapı kullanım ömrünün artması, dayanım ve dayanıklılık artışı olarak sıralanabilir. Kompozit yapıların avantajları:

- Kompozit yapılar, betonarme yapılara göre %40 daha hafif olabilmekte ve bu özelliğinden dolayı meydana gelebilecek depremlerde daha az deprem yükünün oluşmasını sağlamaktadır.
- Ana taşıyıcı sistem elemanları atölye ortamında hazırlandığından yüksek derecede kalite kontrol imkanı sağlamaktadır.
- Yüksek duktilite özelliğine sahip olan kompozit yapılar, deprem esnasında daha sünek davranış göstermektedir.
- Kompozit elemanlar yalın halde kullanılacak çelik elemanlardan %25 oranında daha az çelik kullanılmasını sağlamaktadır.

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar yönetmeliğinde Bölüm 12’de tipik kompozit elemanlar ile ilgili kesitlere yer verilmiştir (Şekil 2.1.).

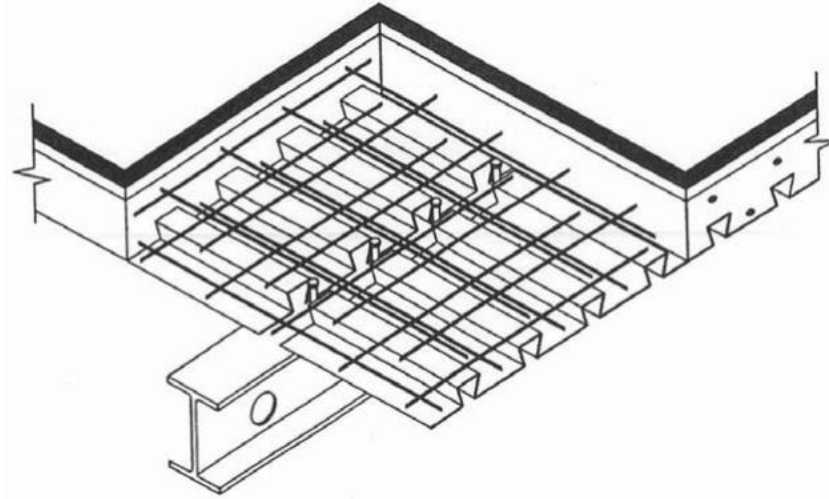


Şekil 2.1. Tipik kompozit elemanlar [34]

Kompozit taşıyıcı yapı elemanları kompozit döşeme, kompozit kiriş ve kompozit kolon olmak üzere üç temel başlıktan oluşmaktadır.

## 2.1. Kompozit Döşemeler

Kompozit döşemeler, çelik kirişler üzerine döşenmiş çelik sacların beton ile birlikte çalıştırılmasıyla ortaya çıkan kompozit taşıyıcı elemanlardır (Şekil 2.2.). Kompozit döşemelerin kullanılmasıyla yapı ağırlığında  $1 \text{ kN/m}^2$ 'ye kadar azalma sağlanabilmektedir. Bu durum da betonarme döşeme kullanılan yapılara göre %30 civarında daha hafif döşemeler elde edilmesini sağlamaktadır. Günümüzde kompozit döşemeler yaygın olarak okul, hastahane, yüksek yapılar, köprü döşemeleri, otoparklar gibi büyük açıklıkların olduğu ve yüksek dayanım kapasitesinin gerektiği alanlarda kullanılmaktadır. Kompozit döşemelerin kullanılmasıyla tesisat için ekstra alanlar oluşmakta, işçilik azalmakta, yangın dayanımı büyük oranlarda artmakta ve ısı izolasyonu sağlanmaktadır.



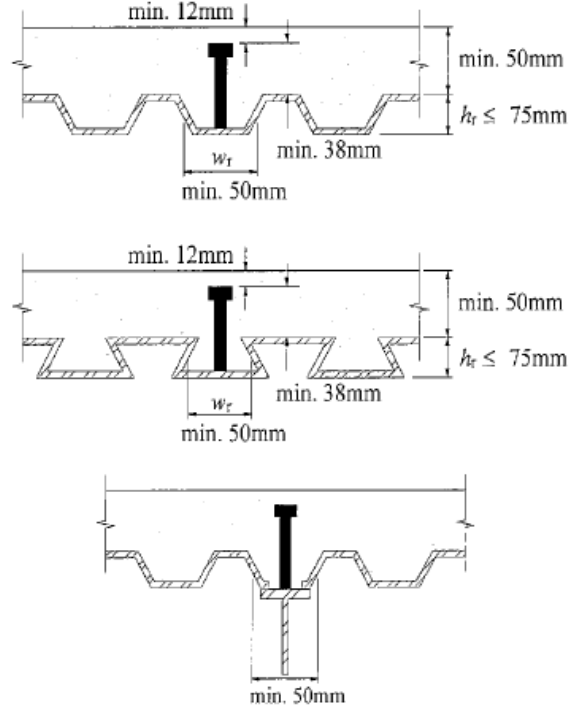
Şekil 2.2. Kompozit döşeme sistemi [35]

Kompozit döşeme sistemleri esas olarak 4 bileşenden meydana gelmektedir:

- Yapısal çelik kiriş
- Başlıklı kayma elemanları
- Profillenmiş çelik sac
- Donatılı beton

Kompozit döşemelerde, beton dökümünde kalıp görevi gören çelik sacların beton ile birlikte çalışmasını sağlanması ve iki malzeme arasındaki kaymanın engellenmesi gerekmektedir. Profilli çelik sac ile beton arasındaki doğal kenetlenme trapez çelik sacın 10 mm-15 mm yüksekliğe sahip çıkıntılar yardımıyla oluşmaktadır. Çelik sac yeni dökülen betonun ağırlığını, betonarme döşemedeki donatının ağırlığını, kendi ağırlığını ve inşaat yapım süresi boyunca meydana gelebilecek hareketli yükleri taşıyabilmektedir. Bu yüzden trapez kesitli sacların kullanılması daha ekonomiktir ve bu kullanım çok fazla yaygınlaşmıştır. Çelik profil kiriş ile trapez sac ve betondan oluşan kompozit döşemenin birlikte çalışması için kayma elemanları kullanılmaktadır. Ayrıca çelik sac ile betonun birlikte çalışmasını sağlamak ve böylelikle döşeme plağının pozitif moment bölgelerinde çelik sacın donatı görevi yapabilmesi için de kayma elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Kayma elemanlarının kullanılmasıyla birlikte çelik sac ile beton arasında oluşan boyuna kaymaları engellemektedir.

Kompozit döşemelerin kullanılmasıyla daha ekonomik, daha hafif ve daha güvenli yapıların elde edilmesine olanak sağlamaktadır [35].



Şekil 2.3. Çelik sac için esaslar [34]

Çelik yapıların tasarım, hesap ve dayanımına dair esaslar yönetmeliğinde bulunan ve Şekil 2.3.'te gösterilen çelik sac için esaslar aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

- $h_r$  olarak ifade edilen çelik sacın hadve yüksekliği en fazla 75 mm ve  $w_r$  olarak ifade edilen ortalama hadve genişliği ise en az 50 mm olacaktır.
- Betonarme döşeme, çelik sac üzerinde ve üzerinde bulunduğu çelik kiriş başlığına doğrudan başlıklı çelik ankrajlarla kaynaklanarak bağlanacaktır. Başlıklı çelik ankrajın kaynaklanan kısmından sonra çelik sacın hadve üst kotuna kadar olan mesafe en az 38 mm olacaktır ve beton döşemenin üst kotundan en az 12 mm aşağıda olacaktır.
- Hadve üst kotu ile beton döşemenin üst kotu arasındaki mesafe minimum 50 mm olacaktır.
- Kiriş başlığına mesnetlenen bağlantı aralığı maksimum 450 mm olacaktır.

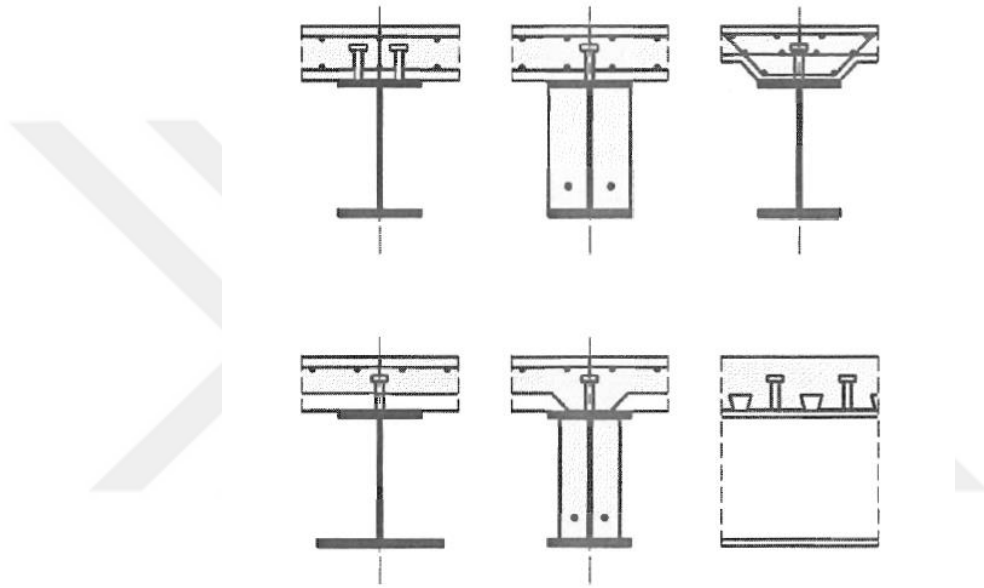
- Çelik kirişin boyuna eksenine dik olarak yerleştirilen çelik sac hadvelerinde, çelik sacın üst kotundan itibaren hadve içerisinde kalan beton tasarımda ihmal edilecektir.
- Çelik kirişin boyuna eksenine paralel olarak yerleştirilen çelik sac hadvelerinde ise hadve içerisinde kalan beton kompozit enkesit tasarımında ihmal edilmeyebilir.
- Çelik kirişin boyuna eksenine paralel olarak yerleştirilen çelik sac hadvelerinde her bir hadvede bir tane başlıklı çelik ankraj kullanıldığı durumlarda hadve genişliği  $w_r$  minimum 50 mm olacaktır. Her hadvenin içerisinde birden fazla başlıklı çelik ankraj kullanılması durumunda ise hadve genişliği  $w_r$ , ilave edilen her bir başlıklı çelik ankrajın gövde çapının 4 katı olacak şekilde artırılmalıdır.

## 2.2. Kompozit Kirişler

Kompozit kirişler, normal yapısal çelik kirişlerle kıyaslandığında daha fazla moment taşıma kapasitesine ve yüksek rijitliğe sahip olduğu görülmektedir. Kompozit kirişlerin kullanılmasının amacı, betonun basınç mukavemeti ve yapısal çeliğin çekme mukavemeti birarada kullanılarak daha küçük kesitler elde etmektir. Böylelikle elde edilen daha küçük kesitlerle taşınması gereken moment kapasitesine erişmeye imkan tanımaktadır. Bununla birlikte kullanılacak malzeme miktarı ve yüksek yapılarda döşeme kalınlığı azaltılarak daha ekonomik yapılar elde edilebilmektedir. Kompozit kirişler bina türü yapılarda ve köprü kirişleri olarak sıkça kullanılmaktadır.

Kompozit kirişlerin olumlu yönlerinin yanı sıra olumsuz tarafları da bulunmaktadır. En önemli dezavantajı betonarme döşeme ile çeliğin birlikte çalışması ve kenetlenmesinin sağlanması için elemanlara gereksinim duyulmasıdır. Bu elemanlar kesme bağlantı elemanları (shear stud) olarak bilinmektedir. Bütün tasarımlarda olduğu gibi kompozit kiriş tasarımında hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Yapılacak bu hesaplamalarda ve tasarımlarda kompozit kirişlerin yeterli kesme kuvveti ve moment taşıma kapasitelerine sahip oldukları irdelenmelidir. Kompozit kirişlerin yanı sıra kullanılacak kesme elemanlarının da yeterli dayanımda olması

gerekmektedir. Kullanılacak kesme elemanlarının kopmaması ve bu elemanların çevresindeki betonda hasarların meydana gelmemesi için gerekli ve yeterli önlemler alınmalıdır. Kesme elemanlarının kullanılmayan elemanlarda, çeşitli yüklemeler altındaki kompozit kirişleri meydana getiren her bir bileşeni ayrı ayrı çalışmaktadır. Kesme elemanlarının özelliklerine bağlı olarak, kompozit kirişlerin rijitliklerinde ve mukavemetinde yüksek derecede artış meydana gelmektedir. Eurocode4'te bulunan bazı tipik kompozit kirişler Şekil 2.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Eurocode4'te bulunan tipik kompozit kirişler [36]

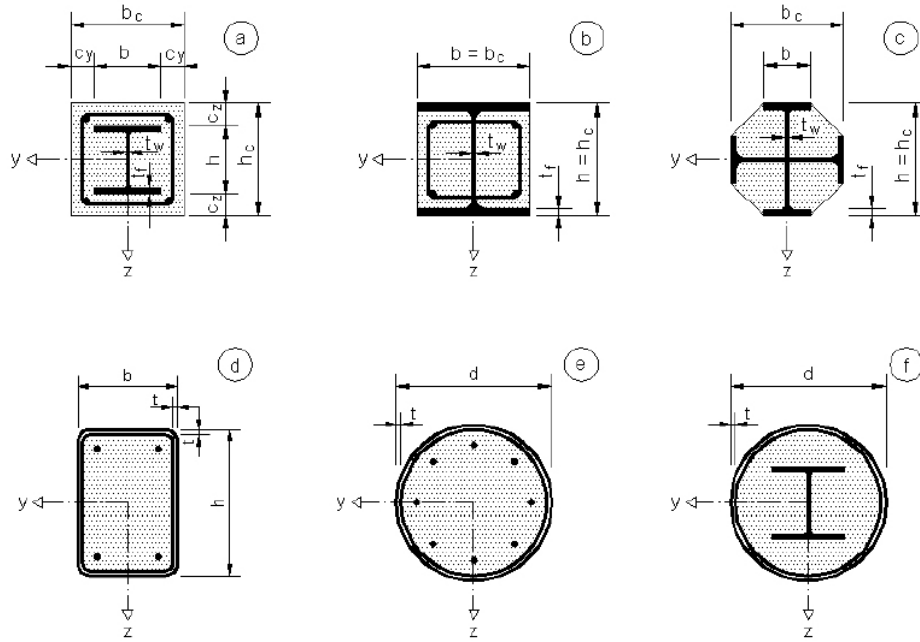
Kompozit kirişler betonarme hesaplara benzer olarak geniş başlıklı (tablalı) yani T-Kirişleri olarak ifade edilen şekilde modellenenmektedir. Bu şekildeki bir tasarımda döşeme boyunca eğilme gerilmeleri meydana gelmekte ve eğilme momenti dağılımının hesaplanması ve kontrollerinin yapılması gerekmektedir. Tablalı kompozit kirişlerde efektif genişlik yani 'beff' değeri, kompozit kirişin açıklığına, mesnetlenme şekline ve ardarda oluşturulan kirişlerin arasındaki mesafeye bağlı olarak değişmektedir. Bu yüzden tabla genişliğinin basit kirişlerdeki hesaplamaları ile sürekli veya konsol kompozit kiriş olarak tasarlanacak kirişlerdeki hesaplamalar farklı şekillerde değerlendirilmelidir.



### 2.3. Kompozit Kolonlar

Beton, donatı ve yapısal çelik elemanlarının bir araya gelmesiyle kompozit kolonlar oluşmaktadır. Kompozit kolon taşıyıcı elemanları, özellikle çok katlı yapılarda betonarme veya çelikten oluşturulmuş kolonlarla kıyaslandığında birçok avantajının olduğu görülmektedir. Kompozit kolonların yüksek yapısal performans sergilemesi sebebiyle birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan kompozit kolonların kullanılmasıyla kesit boyutu azalmakta, yapının sabit ağırlığı azalmakta ve çelik kolonlarda en sık karşılaşılan problemlerden biri olan yangın dayanımını artırmaktadır. Eurocode4'te, kompozit kolonların enkesit şekillerinin genel olarak kullanım şekilleri gösterilmiştir (Şekil 2.5.). Kompozit kolonlar genel olarak 4 farklı şekilde oluşturulmaktadır:

- Beton içerisine tamamen gömülmüş çelik profilli kompozit kolonlar
- Yarı (kısmi) gömme kompozit kolonlar
- Çelik profilin içi tamamen betonla doldurulan kompozit kolonlar
- Beton içerisine gömülmüş tüp çelik betonarme kompozit kolonlar



Şekil 2.5. Eurocode4 kompozit kolon türleri [36]

## 2.4. Geopolimer Beton

Beton, diğer tüm inşaat malzemelerinden daha çok kullanılmaktadır ve dünyanın devam eden gelişim ihtiyacını karşılayabilmek için beton ürünlere olan talep artmaktadır. Betonun üretilmesi için esas olarak çimento, agrega-kum ve suyun belirli oranlarda bir araya gelmesi gerekmektedir. Çimento, betonun oluşabilmesi için kaba ve ince agregalar arasında bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. 1 tonluk çimento üretiminde çevreye salınan CO<sub>2</sub> miktarının yaklaşık olarak 1 ton olduğu bilinmektedir ve çevreye ciddi anlamda zararlar vermektedir. Çevreye salınan CO<sub>2</sub> gazının azaltılması için çimentoya alternatif olarak düşük emisyonlu bağlayıcı malzeme arayışı içerisine girilmiştir. Beton üretimi için çimento kullanımı yerine geopolimer bağlayıcılar kullanılarak daha az CO<sub>2</sub> emisyonu meydana gelerek çevreye verilen zararlı etkiler azaltılmış olacaktır. Geopolimer beton üretebilmek için geopolimer bağlayıcılar agregalarla birlikte kullanılmaktadır. Uçucu kül bazlı geopolimer beton portland çimentosu kullanılmadan üretilen bir betondur. Uçucu kül kullanılarak elde edilen geopolimer betonun temel bileşenleri uçucu kül, kaba agrega, ince agrega, sodyum hidroksit ve sodyum silikattır. Kullanılan bu malzemelerin yanında geopolimer betonun işlenebilirliğini artırabilmek için su ve bazı akışkanlaştırıcı katkı maddeleri de kullanılabilir. Geopolimer betonun işlenebilirliğini artırabilmek için su ve bazı akışkanlaştırıcı katkı maddeleri de kullanılabilir.

Geopolimer ismi 1978 yılında Fransız malzeme bilimcisi olan Joseph Davidovits tarafından inorganik moleküllerin oluşturduğu yapılara verilmiştir. Geopolimerizasyon ekzotermik bir olaydır; oligomerlerle üç boyutlu makromoleküler yapıların oluşumunu sağladığı varsayılmaktadır [37]. Geopolimer yapı malzemeleri yüksek erken dayanım, düşük geçirimsizlik, yüksek kimyasal ve yangın dayanımı gibi üstün özelliklere sahip olduğundan dolayı kullanılmaktadır [38]. Geopolimer betonlar yeni nesil çevre dostu betonlardır. Geopolimerler genel olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerden oluşmaktadır. Uçucu küller termik santrallerden elde edilirken yüksek fırın cürufu ise demir-çelik tesislerinden elde edilmektedir ve bu sayede atık maddeler bu şekilde değerlendirilmektedir. Elde edilen bu uçucu küller ve yüksek fırın cürufuları uygun teknolojilerle bir araya getirilerek beton için uygun hale getirilmektedir. Geopolimerlerin içerisinde genellikle ısı yardımıyla oluşturulmuş

doğal malzemelerden olan alüminyum ve silikon malzemeleri bulunmaktadır. Alüminyum ve silikon malzemeleri kullanılan alkaliyle birlikte aktifleşerek moleküller arasındaki bağı güçlendirip polimerleşmektedir. Geopolimerler prosesi bir eritme ya da füzyon sinterleme işlemi ile değil belirli polimerleşme süreci geçirerek oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı yakıt tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonu açısından geleneksel beton üretimine kıyasla daha avantajlıdır. Geopolimer betonun birçok kullanım alanı vardır. Taşıyıcı olan ve olmayan yapı malzemeleri, rijit yol kaplamaları, zemin iyileştirme, betonarme su tankları [34], tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu, istinat duvarları [39], ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Son yıllarda geopolimer betonların erken basınç dayanımı, düşük geçirgenlik, yüksek kimyasal direnç, yangına karşı iyi dayanımı davranışlarından dolayı tercih sebebi olmaktadır [37, 40, 41, 42, 43]. Bu avantajlı özelliklerinden dolayı yangına dayanıklı kaplamalar, elyaf takviyeli kompozitler, kimyasal ve nükleer endüstrilerin imalatında portland çimentosuna alternatif olarak kullanılabilir.

Geopolimerler yeni nesil bir malzeme olduğundan dolayı karmaşık yapısının ve uygulanabilirliğinin anlaşılabilmesi için literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Donma-çözünme [44, 45], CO<sub>2</sub> emisyonu [46, 47], kür koşullarının geopolimer betonun dayanımına etkisi [48, 49, 50], aktivatör etkisi [51, 52, 53], büzülme-sünme durumları [54, 55], karışım oranları, yangın dayanımı [47, 56], asidik ortamların geopolimer betonun dayanımına etkisi [57, 58, 59, 60] gibi birçok alanda çalışmalar yapılmıştır.

Günümüzde geopolimer beton kullanılarak inşa edilen çok az yapı bulunmaktadır. Geopolimer beton kullanılarak inşa edilen ilk bina 2013 yılında Avustralya'da bulunan Queensland Üniversitesi'ndeki Küresel Değişim Enstitüsü (GCI) binasıdır (Şekil 2.6.). Binanın inşasında uçucu kül bazlı geopolimer beton kullanılmıştır. GCI binası 3 asma kat olarak tasarlanmış ve yapımında 10,8 m uzunluğunda 2,4 m genişliğinde ve 9,6 metre uzunluğunda 2,4 m genişliğinde iki tip prefabrik kiriş üretilmiş olup toplam 33 adet kiriş kullanılmıştır [61].



Şekil 2.6. Küresel Değişim Enstitüsü(GCI) binası

Dünyadaki en büyük geopolimer projesi ise yine Avustralya’da bulunan Brisbane West Wellcamp Havaalanı (BWWA) pistidir (Şekil 2.7.). Çevre dostu olarak bilinen geopolimer betonun yüksek eğilme mukavemeti, düşük büzülme ve işlenebilirlik özelliklerinden dolayı pist inşaatı için uygun olduğu görülmüştür. 40000 m<sup>3</sup> (100000 ton) geopolimer beton kullanılarak yapılan uygulama 435 mm kalınlığındadır. Büyük ölçekli geopolimer betonun yüzeyindeki büzülmenin önlenmesi için alkali buharlaşma önleyici spreyle kullanılmıştır. Avustralya’daki bu havaalanının inşası 48 yılda tamamlanmış ve Kasım 2014’te kullanıma açılmıştır [62].



Şekil 2.7. Brisbane West Wellcamp Havaalanı (BWWA)

#### 2.4.1. Geopolimer beton kullanmanın avantajları

Yapılan çalışmalar ve araştırmalar sonucunda aşağıda sıralanan avantajlardan söz edilebilir.

- Çevre kirliliğinin az olması, yüksek dayanıklılık gerektiren çevresel koşullara karşı yüksek performansı
- GPC üretimi için gerekli bileşenlerin endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesiyle oluşturulduğu için düşük maliyetlerin harcanması
- Geopolimer beton endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesiyle oluşturulan çevre dostu bir ürün olması
- Portland çimentosunun (OPC) üretimi yapılırken çevreye salınan CO<sub>2</sub> gazının GPC beton için üretilen bileşenlerin üretiminde açığa çıkmaması
- Zararlı sera gazı emisyonlarının oluşmaması
- GPC ve OPC'lerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında GPC'lerin aşırı yüksek sıcaklıklara maruz kalması halinde bile önemli bir dayanım kaybının yaşanmaması
- GPC'ler OPC betonlarla kıyaslandığında daha az kürlenme sürelerine ihtiyaç duymaktadırlar. GPC'lerin içeriğindeki alkali aktivatörlerin erken reaksiyonu sonucu 3-8 saat arasında kürlenme süresiyle mükemmel dayanım özelliklerine sahip sertleşmiş beton elde edilmesi
- GPC'lerin eğilme ve basınç dayanımlarının OPC betonuyla benzerlik göstermesi
- GPC'lerin ısı işleme karşı yüksek dayanıklılık göstermesi,
- Asit sülfat saldırısına karşı dayanıklı olması
- GPC'lerin yapı elemanı olarak OPC betonu ile üretilen yapı elemanlarından beklenen mekanik özelliklere sahip olması
- Radyoaktif ışınlarının geçirgenliğinin az olması

gibi geniş kullanım alanları ve özelliklerinden dolayı kullanılmaktadır.

## 2.5. Darbe Etkisi

Geçmişte ve günümüzde betonun birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Hemen her alanda kullanılan beton malzemesi hem statik hem dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Statik yükler yapının kendi ağırlığı, üzerinde bulunan sabit ve hareketli yüklerden dolayı oluşan yükler olarak tanımlanabilir. Dinamik yükler ise çığ, heyelan,

kaya düşmesi, deprem gibi doğal afetlerden dolayı meydana gelebileceği gibi araba çarpması yada gemilerin limanlara çarpması gibi kazalardan dolayı da meydana gelebilmektedir. Dinamik bir yük olan darbe; iki cismin çarpışması, bir nesnenin başka bir nesnenin üzerine düşmesi ya da anlık olarak bir kuvvetin etkimesi olarak tanımlanabilir. Darbe olayı kısa bir süre içerisinde gerçekleşip gerilme etkisi de bu kısa süre içerisinde artarak büyük hasarlara sebep olmaktadır. Darbe etkisine maruz kalan malzemeler yeterli dayanıma ve dayanıklılığa sahip değilse eğer deformasyona uğrar, kırılmalar meydana gelir, malzeme göçer ve işlevselliğini yitirir. Darbe etkisi yapılarda bu derece önemli olmasına rağmen çarpma etkisiyle ilgili herhangi bir yönetmelik yada standart bulunmamaktadır. Literatürde yapılan geniş çaplı araştırmalar sonucunda, ilk teorik çalışmanın 1800'lü yıllarda demir üzerine yapıldığı [63] ve yine 1800'lü yıllarda Rodman [64] tarafından silah üretiminde kullanılan çeliklerin özelliklerinin belirlenmesinde ağırlık düşürücü düzenek kullanılarak çalışmalar yapıldığı görülmüştür.

Çarpma olayının deneysel olarak incelenmesi için, malzemenin cinsine ve şekline bağlı olan bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar;

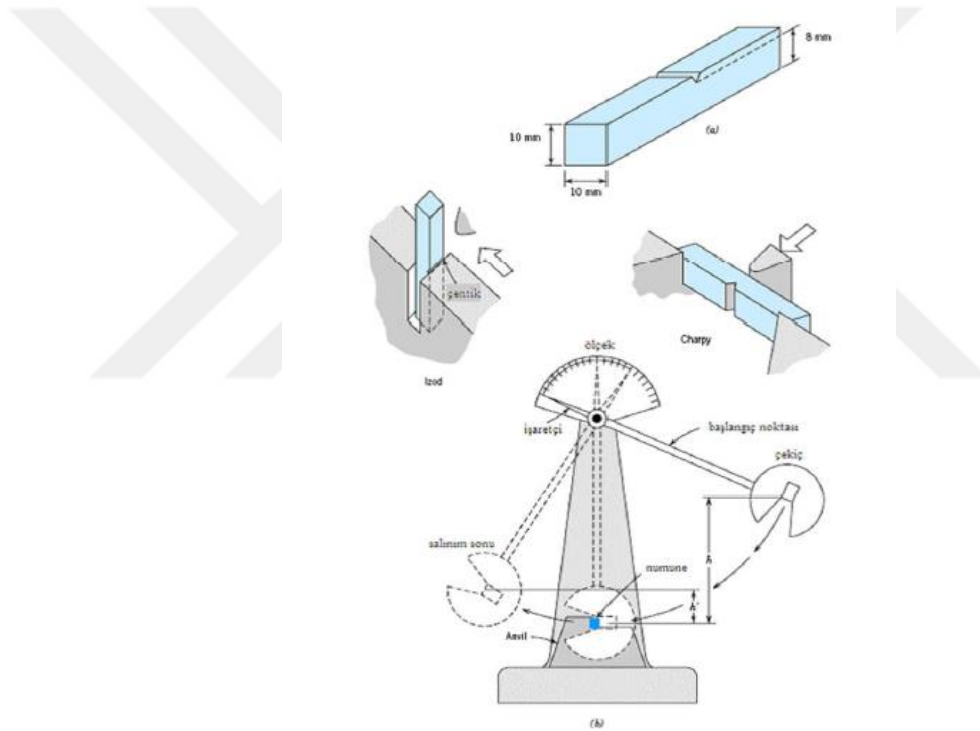
- Ağırlık düşürme metodu
- Charppy ve İzod deney metodu
- Yapısal elemanların belirli bir yükseklikten düşürülmesi

olarak sıralanabilir.

Darbe deneyleri temel olarak deney numunelerine yüksek hızlarla uygulanan kuvvetin etkilerinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Deneylerde numunelerin dinamik zorlama etkisi altında kırılması için gerekli olan enerji belirlenir ve bulunan bu enerji değeri malzemenin darbe direnci yani darbe mukavemeti olarak ifade edilir. Malzemenin kırılması ya da göçmesi için soğrulan enerjinin, malzemenin mukavemetinin, tokluğunun, gevrekliğinin ve birçok özelliğinin tayin edilmesi için gerçekleştirilmektedir. Malzemelerin çarpma dayanımlarının belirlenebilmesi için bazı deneysel metodlar geliştirilmiştir. Charpy deney metodu genellikle malzemelerde

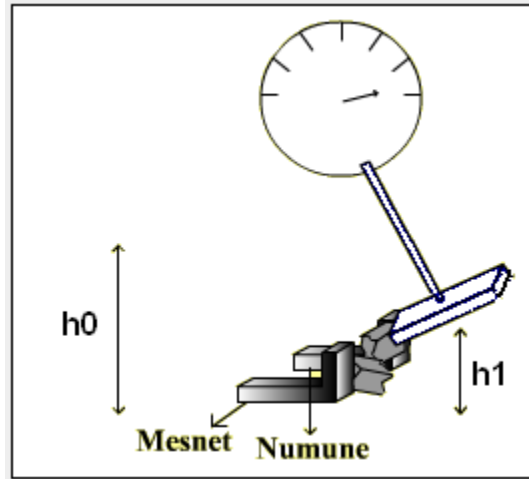
çentik darbe deneyi olarak kullanılırken, yapısal elemanlara ağırlık düşürme metodu yani belirli bir ağırlığın herhangi bir yükseklikten serbest düşmeye bırakılması yöntemi uygulanmaktadır.

Charpy ve izod deney metodlarının temel deney prensipleri aynıdır ancak aralarında bazı küçük farklar bulunmaktadır. Bu farklar; deney numunesinin boyutu, mesnetlenme ve yüklenme şekli olarak sıralanabilir. Charpy deney metodunda, deney numunesi yatık olarak deney cihazına yerleştirilirken, İzod deney metodunda ise deney numunesi dik olarak deney cihazına yerleştirilir (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Charpy ve İzod deney metodları [65]

Charpy deneyinde belirli bir  $G$  ağırlığındaki sarkaç Şekil 2.9.'da görüldüğü gibi  $h_0$  yüksekliğine çıkarılır ve bu konumdayken sarkaç,  $G \times h_0$  potansiyel enerjisi sahip olur. Çıkarılan bu  $h_0$  yüksekliğinden serbest bırakılan sarkaç, deney numunesine çarpar ve  $h_1$  yüksekliğine çıkar. Bu konumdaki potansiyel enerjisi  $G \times h_1$  değerine düşer. Bu iki potansiyel enerji arasındaki fark numunenin kırılması için gereken enerji miktarına eşit olmaktadır.



Şekil 2.9. Charpy deney metodu [16]

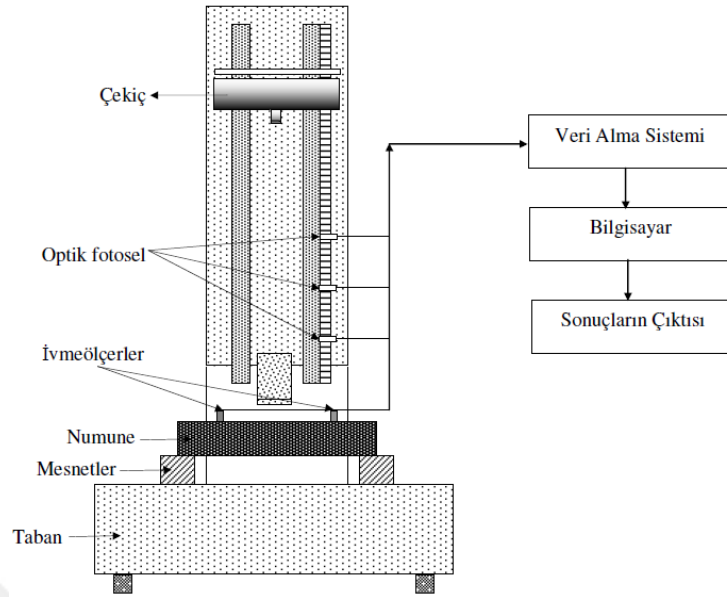
Darbe mukavemeti olarak bilinen bu enerji farklı aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$\zeta = U/A = (G(h_0 - h_1))/A \quad (2.1)$$

Denklemde G sarkacın ağırlığını,  $h_0$  sarkacın ağırlık merkezinin m cinsinden ilk düşme yüksekliği,  $h_1$  sarkacın merkezinin numuneye çarptıktan sonraki çıkış yüksekliği (m), A ifadesi ise numunenin kesit alanıdır. Darbe mukavemeti genel olarak  $\text{kg.m/cm}^2$  veya  $\text{N.mm/mm}^2$  cinsinden ifade edilir.

Ağırlık düşürme deney metodu, dikey doğrultudaki bir ağırlığın borularla, raylarla yada zincirlerle yönlendirilerek istenilen yüksekliği çıkarıldıktan sonra serbest düşürmeye bırakılması ile gerçekleşmektedir (Şekil 2.10.)





Şekil 2.10. Ağrlık düşürme deney düzeneği [66]

Belirlenen düşme yüksekliği ve ağrlık ile darbe enerjisi hesaplanabilmektedir. Belirli bir yüksekliğe çıkartılan ağrlıkta meydana gelen potansiyel enerji ( $m \times g \times h$ ) çarpma esnasında kinetik enerjiye dönüşmektedir. Enerji korunumu yasasına göre düşme esnasında kaybedilen enerji malzemenin soğurduğu enerji miktarına eşittir. Numunelerde meydana gelen bu kinetik enerji, numune üzerinde bir gerilme dağılımına sebep olmaktadır.

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda yapılan bu araştırmada ağrlık düşürme deney metodu kullanılmasına karar verilmiştir.

### **BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA**

Bu bölümde, kompozit deney numunesinin malzeme özellikleri, darbe deney düzeneği, deney esnasında kullanılan cihazlar ve ekipmanlardan detaylı olarak bahsedilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmada, geleneksel portland çimentosuyla üretilmiş (OPC) beton ile yeni nesil geopolimer beton (GPC) kullanılarak üretilen kompozit kiriş numunelerinin darbe yükü etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Deneylerde darbe yüksekliği 1500 mm darbe yükü ise 220 kg olarak belirlenmiştir ve yapılan bütün deneylerde bu değerler sabit parametre olarak belirlenmiştir.

Çalışma doğrultusunda 2 adet 150×150×1000 mm ebatlarında ve 4 adet 150×150×1300 mm ebatlarında toplam 6 adet kompozit kiriş numunesi oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan kompozit numunelerin enkesit ve boykesit detayları autocad programında çizilmiştir. Kompozit kiriş numuneleri OPC-S-1000, OPC-C-1000, GPC-S-1300, OPC-S-1300, GPC-C-1300 ve GPC-S-1300 olarak isimlendirilmiştir. İsimlendirilmeler Tablo 3.1.'de de ifade edildiği gibi ilk terim kullanılan betonu, ikinci terim beton içerisine gömülen yapısal çelik profilin enkesit şeklini, üçüncü terim ise kompozit kiriş numunesinin mm cinsinden uzunluğunu ifade etmektedir. Gömme kompozit kirişler, beton içerisine merkezleri çakışacak şekilde yapısal çelik profillerin yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada paspayı, kompozit numune enkesiti, basınç donatısı alanı, çekme donatısı alanı, etriye aralığı, darbe yüksekliği ve darbe yükü sabit parametreler olarak belirlenmiştir. Değişken parametreler ise yapısal çelik profilin kesiti, kompozit numunenin boyu, GPC ve OPC beton olarak belirlenmiştir. Deneysel testler, serbest ağırlık düşürme deney düzeneği kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 3.1. Deneysel numunelerinin isimlendirilmesi ve kısaltmaları

KISALTIMA	AÇIKLAMA	DENEY ELEMANI
OPC-C-1000	Geleneksel beton kullanılarak içerisine dairesel kesitli yapısal çelik profil gömülmüş 1000 mm uzunluğundaki kompozit kiriş numunesi	
OPC-S-1000	Geleneksel beton kullanılarak içerisine kare kesitli yapısal çelik profil gömülmüş 1000 mm uzunluğundaki kompozit kiriş numunesi	
OPC-C-1300	Geleneksel beton kullanılarak içerisine dairesel kesitli yapısal çelik profil gömülmüş 1300 mm uzunluğundaki kompozit kiriş numunesi	
OPC-S-1300	Geleneksel beton kullanılarak içerisine kare kesitli yapısal çelik profil gömülmüş 1300 mm uzunluğundaki kompozit kiriş numunesi	
GPC-C-1300	Geopolimer beton kullanılarak içerisine dairesel kesitli yapısal çelik profil gömülmüş 1300 mm uzunluğundaki kompozit kiriş numunesi	
GPC-S-1300	Geopolimer beton kullanılarak içerisine kare kesitli yapısal çelik profil gömülmüş 1300 mm uzunluğundaki kompozit kiriş numunesi	

### 3.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışma kapsamında 150x150 mm enkesite sahip kiriş numunelerinin içerisine, S235 çelik sınıfına sahip yapısal çelik profillerin betona gömülmesiyle kompozit kiriş numuneleri üretilmiştir.

#### 3.1.1. Yapısal çelik profil ve malzeme özellikleri

Deneylerde S235 çelik sınıfından imal edilen yapısal kutu ve dairesel kesitli çelik profiller kullanılmıştır. Deneysel kompozit kirişlerin enkesit alanları 225 cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Çelik profiller 48,3 mm çapında, 2,5 mm et kalınlığında dairesel kesitli profil ve 40×40 ebatlarında, 2,5 mm et kalınlığına sahip kare kutu profil kullanılmıştır. Birim ağırlıkları aynı olan profillerin kesit özellikleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Yapısal profillerin özellikleri

Yapısal Çelik Profiller	Birim Ağırlık (kg/m)	Kesit Alanı (cm <sup>2</sup> )	Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /m)	Atalet Momenti (cm <sup>4</sup> )
40×40/2,5	2,82	3,59	0,151	8,22
R48,3/2,5	2,82	3,60	0,152	9,46

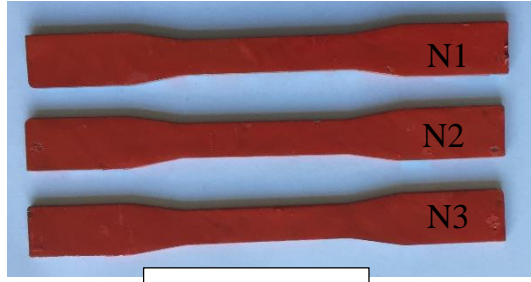
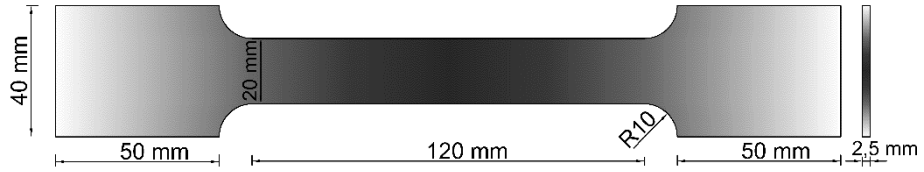
Toplam kompozit numunenin enkesit alanının %1'i 2,25 cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Yapısal çelik profillerin enkesit alanları ise 3,59 cm<sup>2</sup>'dir. Yapılan bu hesaplamaların sonucunda "Çelik Yapıların Kompozit Tasarım, Hesap ve Dayanımına Dair Esaslar" yönetmeliğinin Bölüm 12 kısmında bulunan yapısal çelik profilin enkesit alanının, toplam kompozit alanının %1'inden az olamaz şartı da sağlanmış olmaktadır [34]. Deney numunesini oluşturmak için kullanılan çelik profil malzemelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çelik profillerden TS EN 6892 Standartına göre üç adet kupon numunesi alınmıştır. Kupon numuneleri eksenel çekme dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Hazırlanan kupon numuneleri UTEST firmasına ait UTM-4000 Hidrolik Üniversal eksenel çekme deney cihazı kullanılarak test edilmiştir (Şekil 3.1.). 600 kN çekme kapasitesine sahip, 0-40 mm düz ve 8-32 mm çapları arasındaki yuvarlak numunelerin deney kullanımına uygundur. Cihaz, test sırasında ölçülen gerilme ve

uzama değerlerine dayanarak kontrol parametrelerinin geręek zamanlı olarak otomatik ayarlanmasına olanak vermektedir.



Şekil 3.1. Eksenel çekme deney cihazı

Çelik kupon numunelerin deney öncesi ve sonrası fotoğrafları Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Deney öncesi



Deney sonrası

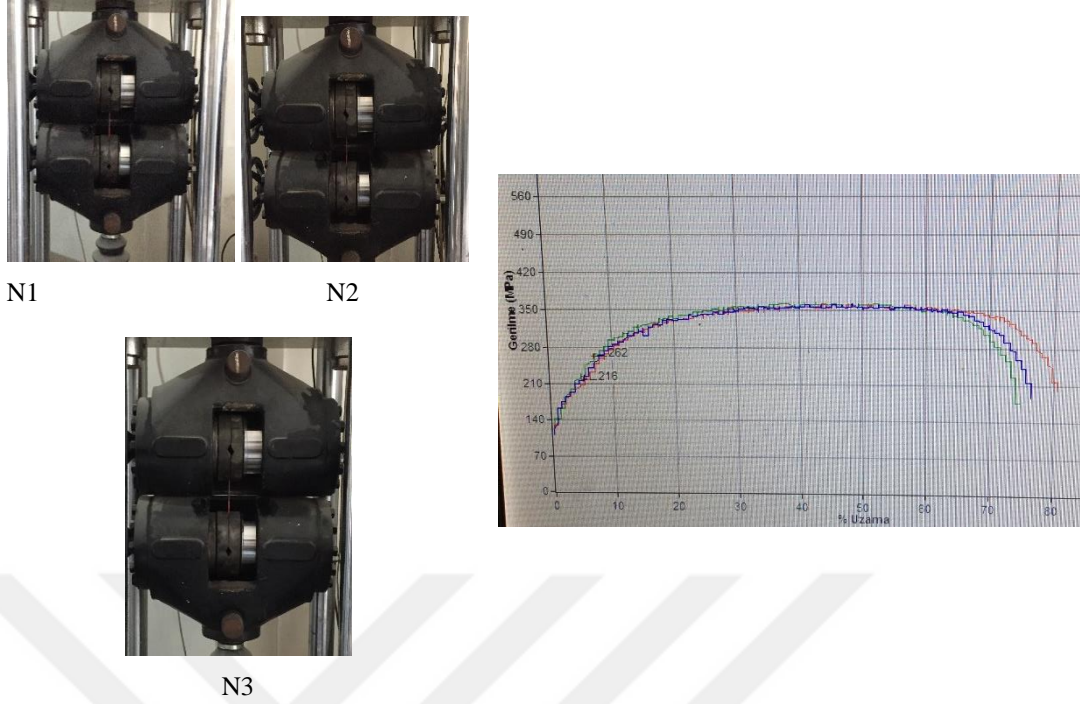
Şekil 3.2. Kupon numunesi boyutları-deney öncesi ve deney sonrası numune görüntüleri

Çelik kupon numunelerin aksenal çekme deney sonuçlarına göre mekanik özellikleri Tablo 3.3.'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Çelik çekme deney sonuçları

Numune Adı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması %	Çekme/Akma
N1	223,75	365,70	74,84	1,63
N2	215,60	360,25	80,54	1,67
N3	215,60	362,95	76,44	1,68

Yapısal çelik profillerden alınan kupon numunelerine uygulanan aksenal çekme deney görüntüleri ve deney sonucunda ulaşılan veriler sayesinde her kupon numunesine ait gerilme-şekil değiştirme diyagramları Şekil 3.3.'te belirtilmiştir.



Şekil 3.3. Eksenel çekme deney görüntüleri ve gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

### 3.1.2. Beton malzeme özellikleri

Yapılan deneysel çalışma kapsamında hem geleneksel portland çimentosuyla üretilmiş beton (OPC) hem de yeni nesil beton olarak bilinen geopolimer beton (GPC) kullanılmıştır. Kompozit numunelerdeki paspayları 15 mm olacak şekilde bütün numunelerde sabit tutulmuştur. Beton içerisindeki agrega seçiminde, TS500'de 3.1.2'deki ilgili madde göz önünde bulundurulmuştur [67]. İnci Beton hazır beton firmasından brüt beton temin edilmiştir. 1 m<sup>3</sup> brüt beton üretimi için; 320 kg çimento, 100 kg kül, 177 kg su, 800 kg 1 numaralı mıcır, 902 kg kırma kum, katkı maddesi olarak ise 2,94 kg normal akışkanlaştırıcı (%0,7) ve 2,94 kg süper akışkanlaştırıcı (%0,7) kullanılmıştır. Kiriş numunelerinin üretiminde TS 11222'ye uygun hazır beton kullanılmıştır. Kullanılan betonda maksimum dane boyutu 12 mm olarak belirlenmiştir. Böylelikle TS500'deki maksimum dane boyutu beton örtüsünden büyük olamaz şartı sağlanmıştır.

Geopolimer beton (GPC) ile OPC arasındaki en önemli fark GPC betonların çimentosuz olarak üretilmesidir. Bu kısımda çimentosuz beton olarak üretilen

geopolimer betonun hazırlanması açıklanacaktır. Deney kapsamında kullanılan geopolimer betonun içeriğinde Şekil 3.4.'te belirtilen standart rilem kumu, metakaolin, cüruf, Sodyum Hidroksit (NaOH), Sodyum Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve saf su bulunmaktadır.



Şekil 3.4. Geopolimer (GPC) yapısında bulunan malzemeler

Metakaolin, kaolin malzemesinin yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmasıyla elde edilmektedir. Alüminyum oksit, silisyum dioksit ve sudan meydana oluşan kaolin malzemesine ısı uygulanmasıyla yani kalsinasyonun başlamasıyla öncelikle  $200^{\circ}\text{C}$ 'de yapısındaki yüzeysel higroskopik suyu atmaktadır. Kaolin malzemesi, ısı işleme maruz kalmaya devam ettikçe  $500^{\circ}\text{C}$ - $800^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıklarda kimyasal formülde bulunan bağıl suyunu bırakarak minerojik yapısında değişim meydana gelmektedir. Böylelikle ısı işlemlere tabi olan kaolin esnek plastik özelliğini kaybederek puzolanik hale gelmektedir. Puzolanik hale gelen kaolin bu haliyle çok iyi bir bağlayıcılık özelliği kazanmış olmaktadır. Nemli ortamda bulunan rilem kumunun içeriğindeki nemin tamamen yok edilmesi için  $100^{\circ}\text{C}$ 'deki etüvde 24 saat boyunca bekletilmiştir. Etüvden alınan kum oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Bu arada alkali çözelti hazırlanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Saf su içerisinde sodyum hidroksitin karıştırılarak çözülmesi ve bu alkali karışımın 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Bunun sebebi ise saf suyun içerisine atılan sodyum hidroksitin kimyasal ekzotermik reaksiyon gerçekleştirmesi ve bu esnada meydana yüksek ısı çıkması olarak açıklanabilir. Yapılan bazı hesaplamalar sonucu 11,624 kg saf su ve 5,580 kg sodyum hidroksit kullanılmıştır. Bekletilen alkali sıvı karışımının içerisine karışımın iki katı kadar yani 17,204 kg sodyum silikat sıvısı eklenmiştir ve böylelikle karışımda bağlayıcı görevi görececek alkali aktivatör sıvısı hazırlanmıştır. Laboratuvar



ortamında hazırlanacak karışımda karıştırıcıya ilk olarak 23,243 kg metakaolin ve daha sonra da hazırlanan alkali aktivatörler eklenerek karışım homojen bir hal alıncaya kadar karıştırılmıştır. Homojen karışıma 23,243 kg cüruf eklenerek tekrar karıştırılmıştır. Oluşan homojen karışıma son olarak da 92,289 kg rilem kumu eklenmiştir ve iyice karıştırılmıştır.



Şekil 3.5. Karışımı tamamlanmış geopolimer beton

Yapılan işlemlerin ardından geopolimer beton üretimi tamamlanmış ve aderansın iyice sağlanması için tokmaklanarak ve şişlenerek kalıplara yerleştirilmiştir.

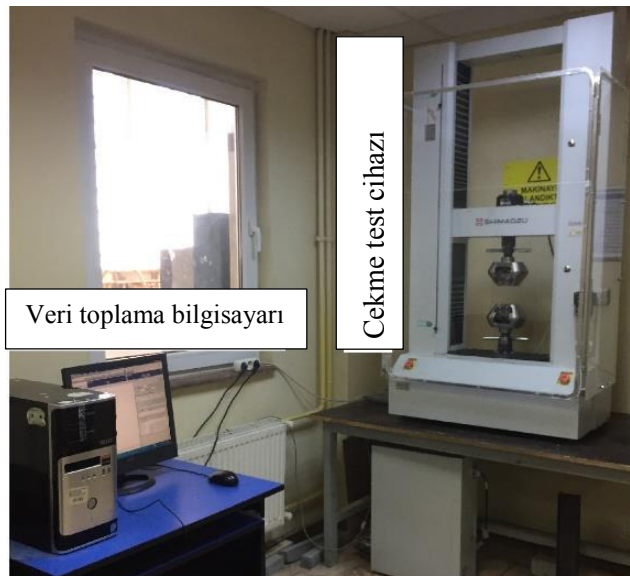
### 3.1.3. Donatı malzeme özellikleri

Kompozit kiriş numunlerinin oluşturulurken S420 nervürlü donatılar kullanılmıştır. Etriyelerin çapları 8 mm (Ø8) seçilmiş ve 100 mm arayla yerleştirilmiştir. Etriyelerin kanca boyları ve kanca açıları TBDY-2018'deki kurallar dikkate alınarak hazırlanmıştır [68]. Kompozit kiriş numunelerin çekme ve basınç donatıları ise 2'şer adet 12 mm (Ø12) olacak şekilde seçilmiştir. Kompozit kirişlerde bulunan donatı düzenleri Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Kiriş donatıları

Kompozit deney numunelerinin üretilmesi için kullanılan farklı çaplardaki donatılara uygun aksenal çekme testi uygulanmıştır (Şekil 3.7.).



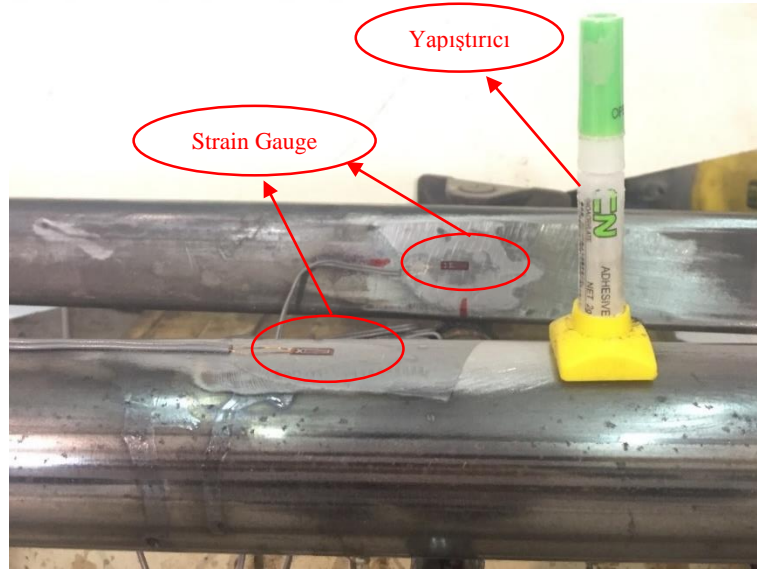
Şekil 3.7. Donatı çekme deneylerine ait görüntüler

### 3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışma kapsamında geopolimer ve geleneksel betonla üretilmiş numuneler hazırlanmıştır. Deneysel kiriş numunelerinin hazırlanması için aşağıdaki sıralama takip edilmiştir.

- Kalıpların hazırlanması
- Donatıların oluşturulması
- Yapısal çelik profillerin uygun uzunlukta kesilmesi
- Hazırlanan donatıların ve çelik profilin kalıplara yerleştirilmesi
- Beton dökümü

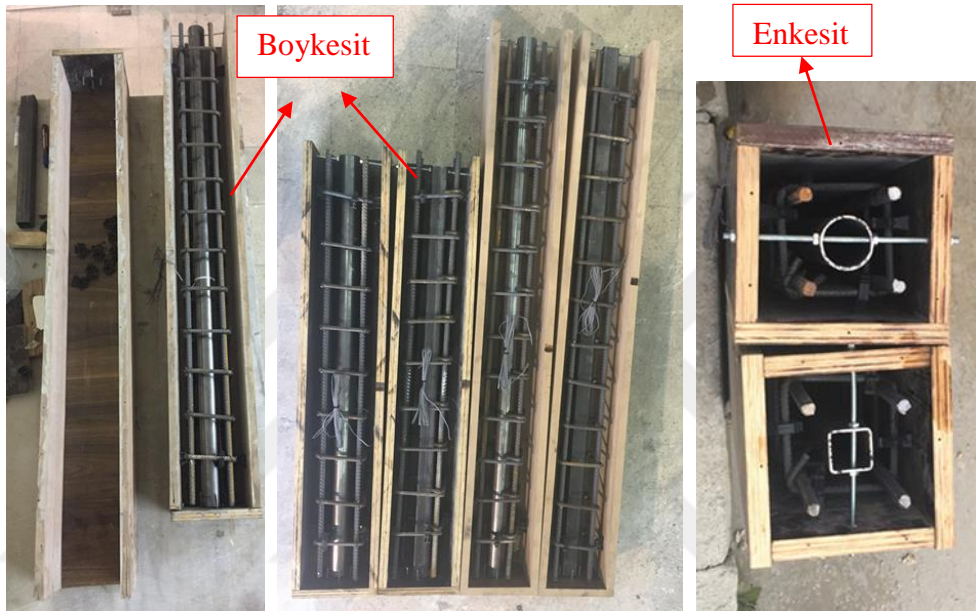
Darbe deneyi esnasında yapısal çelik profile strain gaugeler yerleştirilmiştir. Strain gaugeler çelik profile yapıştırılmadan önce zımparalanmış ve pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Temizlenen yüzey strain gauge yapıştırılmadan önce asetonla iyice silinmiştir ve olası toz parçacıklarından temizlenmiştir (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Strain gauge yapıştırılan çelik profiller

Kalıpların hazırlanması plywood kalıp malzemesi kullanılmıştır. Plywood malzemesi, ağaç tabakalarının lifleri birbirine dik gelecek şekilde yüksek basınç altında preslenmesiyle elde edilmektedir. Plywoodlar hafif, yüksek dayanıklılığa sahip, nemli

ortamlara ve suya duyarlılığı yüksek olan çevre dostu bir malzemelerdir. Betonun kalıplara yapışmasını önlemek için yağlanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalıpların içerisine etriyeler, çekme ve basınç donatılarını dıştan saracak şekilde bağlanması suretiyle hazırlanan donatılar yerleştirilmiştir. Spiral yardımıyla 1000 mm ve 1300 mm uzunluğunda kesilen yapısal çelik profiller de yerleştirilerek beton dökümüne hazır hale getirilmiştir. Kalıplar Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Betona dökümüne hazır hale getirilen kalıplar

Ayrıca betonların basınç dayanımlarının belirlenmesi için taze betonlardan numuneler alınmıştır. OPC taze betona yerinde kıvam testi yani slump deneyi yapılmıştır. Yapılan slump deneyi sonucunda betonun yaklaşık olarak 17 cm çökme gerçekleştiği ve S4 kıvam sınıfında olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. OPC beton Slump Deneyi

OPC betondan 100×200 mm ebatlarında 6 adet silindir numune alınırken, GPC betondan 4×4×16 mm ebatlarında 6 adet prizma numune alınmıştır. Numunelerin alınacağı kalıplara betonun yapışmasını önlemek için silindir numunler normal yağ ile yağlama yapılırken prizma numuneler ise gres yağı ile yağlanmıştır (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. GPC ve OPC taze betonlardan alınan numuneler

Silindir numuneler oda sıcaklığında bulunan su içerisinde kürlenirken, prizma numuneler oda sıcaklığında kürlenmiştir. OPC beton numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları tespit edilmiştir (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. OPC numunelerin basınç deneylerine ait bazı görüntüler

GPC prizma numunelerinin ise 7 ve 28 günlükte hem eğilme (Şekil 3.13.) hem de basınç dayanımları tespit edilmiştir (Şekil 3.14.).

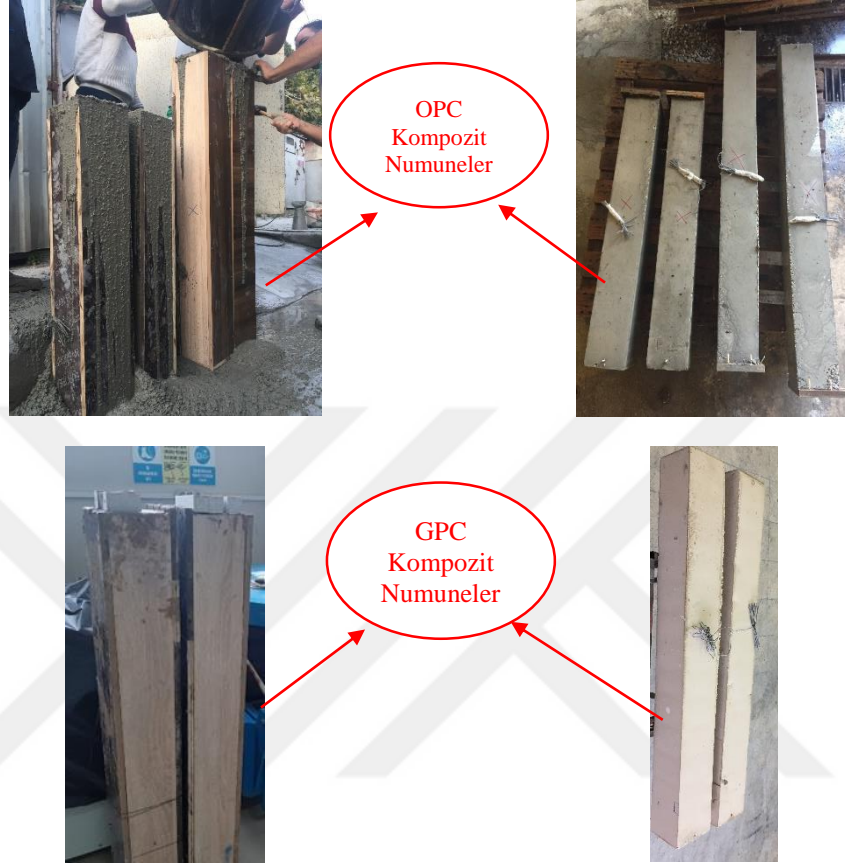


Şekil 3.13. GPC numunelerin eğilme deneylerine ait bazı görüntüler



Şekil 3.14. GPC numunelerin basınç deneylerine ait bazı görüntüler

Hazırlanan numunelere geopolimer ve geleneksel beton döküldükten sonra darbe deneyine hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.15.).



Şekil 3.15. OPC beton döküm öncesi ve sonrası

GPC ve OPC betonlardan alınan taze betonların 7 ve 28 gün sonunda yapılan deney sonuçları Tablo 3.4.'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde GPC betonun 7 günlük basınç ve eğilme dayanımlarının 28 günlük dayanım sonuçlarından yüksek olduğu görülmüştür. Böyle bir durumun ortaya çıkmasının sebebi olarak sıcaklık etkisi gösterilebilir. Geopolimer betonların aktivasyon sürecinin hızlandırılması için belirli sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır. Sıcaklık arttıkça aktivasyon hızı artar buna bağlı olarak da geopolimerazsyon olayı da hızlanır ve taneler birbirini daha iyi tutar böylece dayanım da artar. Yapılan bu çalışmada geopolimer numuneler oda sıcaklığında kürlenmiştir. Laboratuvar ortam sıcaklığı 15°C-16°C civarında olduğundan dolayı GPC betonların dayanım değerlerinde azalmaya sebep olan nedenin bu olduğu tahmin edilmektedir.



Tablo 3.4. GPC ve OPC betonlara ait eğilme ve basınç dayanımları

Numune adı	Basınç dayanımları (MPa)		Eğilme dayanımları (MPa)	
	7 günlük	28 günlük	7 günlük	28 günlük
GPC1	47,65	-	9,96	-
GPC2	46,26	-	8,67	-
GPC3	47,70	-	8,58	-
GPC4	-	40,53	-	9,40
GPC5	-	44,26	-	7,76
GPC6	-	39,03	-	7,31
OPC1	22,34	-	-	-
OPC2	28,58	-	-	-
OPC3	25,17	-	-	-
OPC4	-	32,3	-	-
OPC5	-	29,7	-	-
OPC6	-	30,4	-	-
GPC <sub>ort</sub>	47,20	41,26	9,07	8,15
OPC <sub>ort</sub>	25,35	30,16	-	-

Betonların elastisite modülü, ‘Çelik Yapıların Hesap, Tasarım ve Yapımına Dair Esaslar’ yönetmeliğindeki (3.1) formülü dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$E_c = 0.043w_c^{1.5}\sqrt{f_{ck}} \quad (3.1)$$

Burada;  $E_c$  betonun elastisite modülünü (MPa),  $f_{ck}$  betonun MPa cinsinden karakteristik dayanımını,  $w_c$  betonun  $kg/m^3$  cinsinden birim hacim ağırlığını ifade etmektedir. Tablo 3.5.’te GPC ve OPC betonlarına ait birim hacim ağırlığı ve elastisite modülleri hesaplanmıştır.

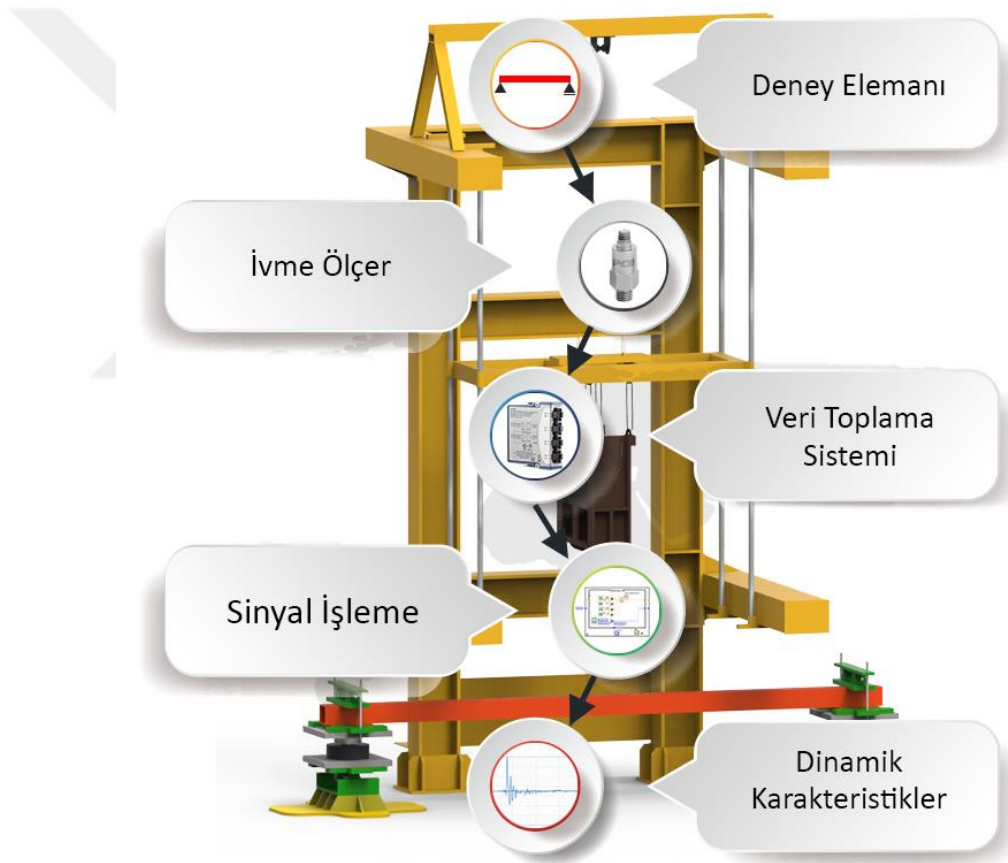
Tablo 3.5. GPC ve OPC betonlarına ait elastisite modülleri

Numune adı	Birim hacim ağırlığı ( $kg/m^3$ )	Elastisite modülleri (MPa)
GPC <sub>ort</sub>	203,125	799,61
OPC <sub>ort</sub>	2263	25354,55

### 3.3. Darbe Deney Düzenekinin Hazırlanması

Darbe deney düzenekği, Sakarya Üniversitesi Yapı-Mekanik Laboratuvarı’nda hazırlanmıştır. Darbe deney düzenekğinin, statik ve dinamik analizleri bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Deney öncesinde ve sonrasında düzenekte oluşabilecek tüm olası tepkime yükleri dikkate alınarak deney düzenekğinin imalatı

gerçekleştirilmiştir. Ağırlık düşürme metodu kullanılarak darbe yükünün ilk hızlı serbest düşme hareketi oluşturacak şekilde darbe deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneğinin asıl taşıyıcı sistemi IPE300 kolonunun yere M36 bulonlarıyla ankastre olarak bağlanması ile oluşturulmuştur. Deney taşıyıcı sistemi, sistemin kendi ağırlığını, çekiç yükünü ve darbe sırasında oluşacak dinamik yüklemelerin etkilerini taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Üzerinde çalışılacak deney elemanı boyutlarına göre deney düzeneğinde açıklığı ayarlanabilir bir sistem oluşturulmuştur. Zemine dökülmüş betonda belirli mesafelerle açılmış bulon delikleri sayesinde istenilen açıklığın elde edilebilmesi sağlanmaktadır. Darbe deney düzeneği Şekil 3.16.'da verilmiştir.

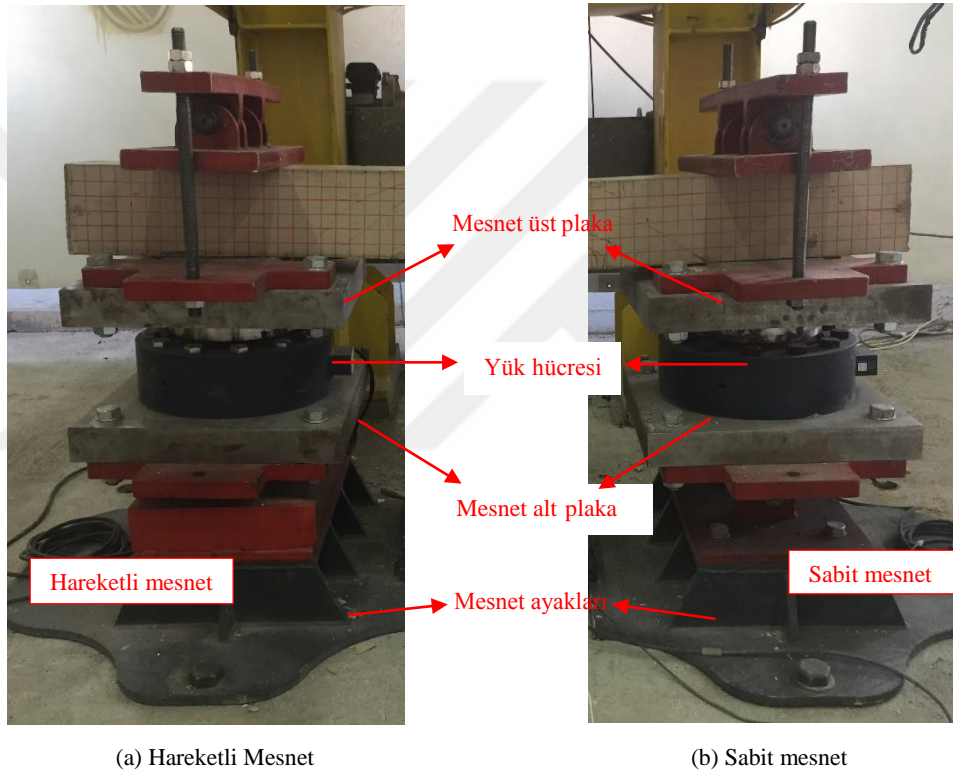


Şekil 3.16. Darbe deney düzeneği

### 3.4. Deney Mesnetlerinin Hazırlanması

Modellenen kiriş elemanlarda yaygın olarak basit kirişler kullanılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmada da kompozit kiriş numuneleri, basit kiriş olarak tasarlanmıştır.

Basit kiriş, mesnetlere oturan her iki uca da dönmesi engellenmiş yani moment aktarmayacak şekilde tasarlanan kirişler olarak ifade edilebilir. Fakat moment aktarımı engellenen mesnetlerde eğilme düzlemindeki bu hareket farklı tanımlanmaktadır. Mesnetlerde meydana gelen bu hareket farklılığından dolayı kirişin bir ucu dönmesi ve ötelenmesi engellenmiş sabit mesnet diğer ucu ise sadece dönmesi engellenmiş kayıcı mesnet olarak tanımlanmaktadır. Deney düzeneğinde daha önceden hazırlanmış ve uygun mesnet koşullarını sağlayacak yük hücreleri (loadcell) kullanılmıştır (Şekil 3.17.).



Şekil 3.17. Basit kiriş mesnet modelleri

Deney düzeneğinde sabit ve kayıcı mesnet koşulları sağlandıktan sonra kompozit kiriş numuneleri deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Kompozit kiriş numunelerinin ön yüzünün tam orta noktasına denk gelecek şekilde ivme ölçerler monte edilmiştir. Darbe esnasında ivme ölçerlerden elde edilen verilerle ivme-zaman, hız-zaman ve konum-zaman grafikleri elde edilecektir.

### 3.5. Deneyde Kullanılan Veri Alma Aletleri ve Ekipmanlar

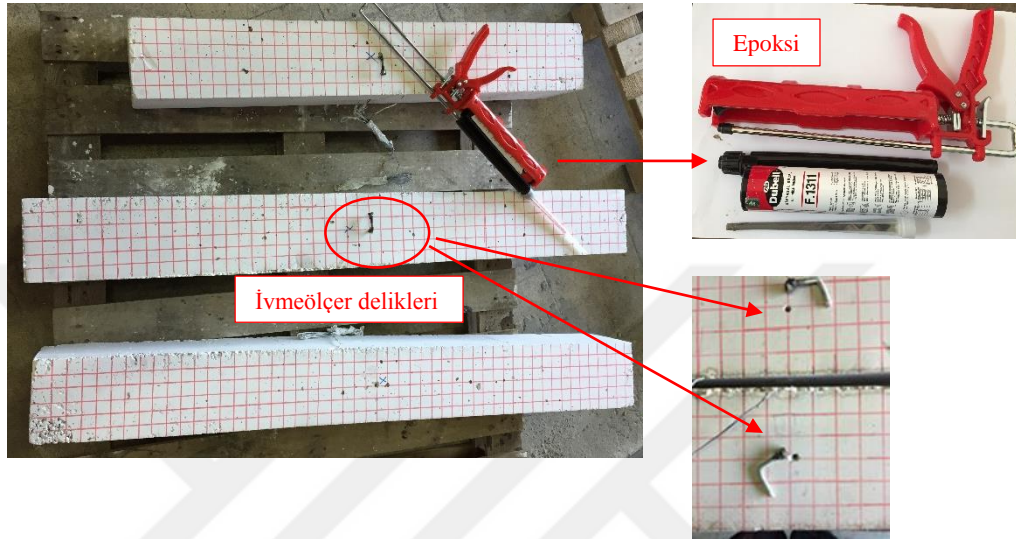
Çalışmalarda, deneysel numunelerin maruz kalacağı yükler karşısında gösterdiği performansın ölçülebilmesi için bazı cihazlar bulunmaktadır. Yapılan darbe deneyi çalışmasını gerçekleştirebilmek için bazı ekipmanlara, elde edilen verilerin işlenebilmesi için bilgisayar ortamındaki yazılım ve programlara ihtiyaç duyulmuştur.

#### 3.5.1. İvmeölçerler

İvmeölçerler (akselometre), ivme kuvvetlerinin ölçülmesini sağlayan elektromanyetik cihazlar olarak bilinmektedir. Statik kuvvetleri veya dinamik hareketleri algılamaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan ivmeölçerler, çekicinin serbest düşmeye bırakıldığı anda kompozit kiriş numune ve çekiç üzerinde meydana gelen anlık ivme değerlerini ölçmeye yaramaktadır. İvmeölçer değerlerinin bilgisayar ortamına aktarıldığı ara sistemlere bağlanmıştır. Kompozit kiriş numunesinin darbeye temas ettiği orta kısmına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler, civata dişine sahip olan başlıkları numune ve çekiç üzerine sabitlenmiş halde bulunan somunlar yardımıyla monte edilmiştir.

Dinamik hareketteki darbe yükünün zamana ve konuma bağlı olarak değişkenlik gösteren bir durum olmasından dolayı literatürden hareketle, hem çekiç yükünden hem de kompozit kiriş numunelerinden ivme kaydının alınmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda, deney numunelerinin darbe testlerine verdiği tepkinin analiz edilmesi için 2 adet genel amaçlı tek eksenli PCB-PIEZOTRONICS marka ivmeölçer kullanılmıştır. Kullanılan bu ivmeölçerler ortalama olarak 10 mV/g hassasiyetli,  $\pm\%$  5 hata payı ile 0,5-10000 Hz frekans ölçümü yapabilen ve ucunda seramikten yapılmış algılama aparatı bulunan elemanlardır. Ayrıca çekiçten ve kiriş numunelerinden elde edilen değerlerin veri toplama ünitesine bağlanması için aynı firmadan temin edilen bir ucunda BNC diğer ucunda 10-32 koaksiyonel fiş bulunan ve düşük gürültü kapasiteli 15 m uzunluğa sahip iki tane kablo kullanılmıştır.

İvmeölçerlerin montajının yapılması için matkap kullanılarak kompozit kiriş numunelerinin ön tarafına paspayını geçmeyecek derinlikte delikler açılmıştır. Açılan deliklerin içerisinde toz kalmaması için süpürgeyle temizlenmiştir. Darbe esnasında ivmeölçerin hareket etmemesi için somunlar deliklere yerleştirilirken epoksi ile monte edilmiştir (Şekil 3.18.).



Şekil 3.18. İvmeölçer delikleri

Deneyleerde kullanılan PCB tipi ivmeölçerle ilgili teknik bilgiler Tablo 3.5.'te verilmiştir.

Tablo 3.6. PCB tipi ivmeölçere ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Model	ICP
Ağırlık	5 gr
Hassasiyet( $\pm$ %30)	1 mV/g
Ölçüm Aralığı	5000g pk
Frekans aralığı	0,5-10 kHz
Rezonans frekansı	100 kHz
Çalışma sıcaklığı	-18°C/+66°C
Elektrik bağlantısı	10-32 koaksiyal jak

### 3.5.2. Gerinim pulları (Strain-Gauge)

Günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle deneyleerde daha hassas ölçümlerin yapılması olanağı da artmaktadır. İlerleyen teknolojiyle basit yapıda olmasına rağmen çok hassas

ölçümler yapan sensörler oldukça önem kazanmıştır. Araştırmalarda kullanılan bu sensörlerin pek çok kullanım alanı bulunmaktadır. Strain Gauge'ler (gerinim ölçer, gerinim pulu) en hassas basınç ölçümü yapan basınç sensörü olarak bilinmektedir.

Strain Gauge'ler istenilen metal yüzeyin uzama miktarını ölçmek için kullanılır. Yapısal olarak, bakır ve nikel karışımından oluşan metalik tellerin üzerine yalıtkan maddelerle kapatılması işlemiyle oluşturulmaktadır. Yapıştırıldıkları yüzeylerin direnç değişimini hesaplayarak malzemenin uzama katsayısını ortaya çıkartmaktadır. Oluşan gerilmeye bağlı olarak strain gauge'ler üzerinde birkaç mili voltluk değişim gözlenebilmektedir. Sağlıklı bir ölçümün elde edilebilmesi için strain gaugeler malzemeye çok iyi bir şekilde yapıştırılmalıdır. Bu sebepten dolayı 1/1000 inc (25,4 mikron) inceliğinde imal edilmektedir. Gerinim pulları, üzerine yapıştırıldığı metalin uygulanan kuvvet etkisi altında genleşmesi sonucu meydana gelen uzamanın miktarını ölçmek için kullanılmaktadır. Başka bir ifadeyle strain-gague malzemesindeki direnç değişimi hesaplanarak metal malzemenin uzama katsayısı elde edilmektedir. Darbe etkisi altındaki kompozit kiriş numunelerindeki yapısal çeliklerde meydana gelen birim şekil değiştirme değerlerinin elde edilmesi için strain-gague kullanılmıştır. Çalışma doğrultusunda Şekil 3.19.'da görüldüğü gibi TML marka genel amaçlı metaller için uygun olan FLAB-5-11-3LJC-F tipi gerinim pulu kullanılmıştır. Gerinim pulu; 5 mm kalınlığında, 120  $\Omega$  dirençli ve 5 metre kablolu olarak tedarik edilmiştir.



Şekil 3.19. Deneysel çalışmada kullanılan Strain Gauge

Gerinim pulunun yapıştırılması için yine aynı firmadan tedarik edilen CN model yapıştırıcı malzemesi kullanılmıştır. Gerinim pulları yapıştırılmadan önce dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. Bunlardan biri gerinim pulunun konumunun belirlenmesi ikincisi ise yapışmanın tam anlamıyla gerçekleşmesidir. Kompozit kirişin

üst kısmı statik yükler ve darbe etkisi altında basınca çalışırken alt kısmı çekmeye çalışacaktır. Gerinim pulları kompozit kiriş numunelerinin ön yüzünün tam ortasına denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Yapışmanın tam olarak gerçekleşebilmesi için ise yapıştırılacak yüzeyin pürüzsüz ve temiz olması gerekmektedir. Bu yüzden gerinim pulları yapıştırılmadan önce metal yüzey zımparalanmış, asetonla iyice temizlenmiş böylelikle temiz ve pürüzsüz bir yüzey oluşturulmuştur. Hazırlanan bölgeye daha sonra CN model yapıştırıcı sürülerek üzerine gerinim pulları yerleştirilmiştir. Gerinim pullarının, beton dökümü sırasında zarar görmemesi ve betonun nemli ortamından etkilenmemesi için üzeri silikon ile kaplanmıştır (Şekil 3.20.).



Şekil 3.20. Strain-gauge yapıştırılan numuneler

### 3.5.3. Yük hücresi

Çalışmada basit kiriş olarak üretilen kompozit kiriş numuneleri deney düzeneğinde hazırlanan mesnet platformu üzerine yerleştirilmiştir. Darbe deneyi esnasında mesnetlerde meydana gelen tepkilerin ölçülebilmesi için yük hücreleri kullanılmıştır. Çalışmalarda; CAS marka, LS 200 tipi yük hücreleri tercih edilmiştir. Deney düzeneğinde 200 ton kapasiteli basınç ve çekme özelliklerine sahip iki adet kullanılmıştır. Kullanılan yük hücrelerine ait teknik bilgiler Tablo 3.6.'da verilmiştir.

Tablo 3.7. Yük hücrelerine ait teknik bilgiler

Özellik	Değer
Model	LS
Malzeme	Boyalı çelik
Yüksüz çıkış voltajı	0±0.02 mV/V
Tam yükleme çıkış voltajı	2.0±0.005 mV/V
Giriş direnci	350±3.5 Ω
Çıkış direnci	350±3.5 Ω

### 3.5.4. Ölçüm ve kontrol sistemi

Deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm ve kontrol sistemleri; deney verilerinin ölçülmesi, toplanması ve analiz edilmesini sağlayan sistemlerdir. Yapılan bu çalışmada, NATIONAL INSTRUMENTS firmasına ait CompactDAQ ölçüm ve kontrol sistemleri kullanılmıştır. CompactDAQ ölçüm sistemleri, çalışmanın içeriğine uygun olması, ortam ve çevre koşullarına cevap verebilecek çözümler sunması sebebiyle tercih edilmiştir.

#### 3.5.4.1. CompactDAQ kasa

CompactDAQ Kasa, birçok farklı deneyde kullanılan, USB bağlantı özelliğine sahip ve doğru sayıda Giriş(G)/Çıkış(Ç) sağlamak amacıyla birden çok slot girişine sahip kasalardır. Yapılacak deneylerde C serisi G/Ç modüllerinin bir kombinasyonu olan; analog G/Ç, dijital G/Ç ve sayaç/zamanlayıcı ölçümlerinin bir arada yapılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Birbirinden bağımsız oranlarda eş zamanlı birden fazla modülün zaman bağılı olarak işlem kaydının yürütülebilmesi için, bütün modüller kasanın arka panelinde bulunan donanım saatleri tarafından otomatik olarak algılanan ve senkronize edilen sistemlerden oluşmaktadır.

#### 3.5.4.2. Veri alma ve sayısallaştırma modülleri

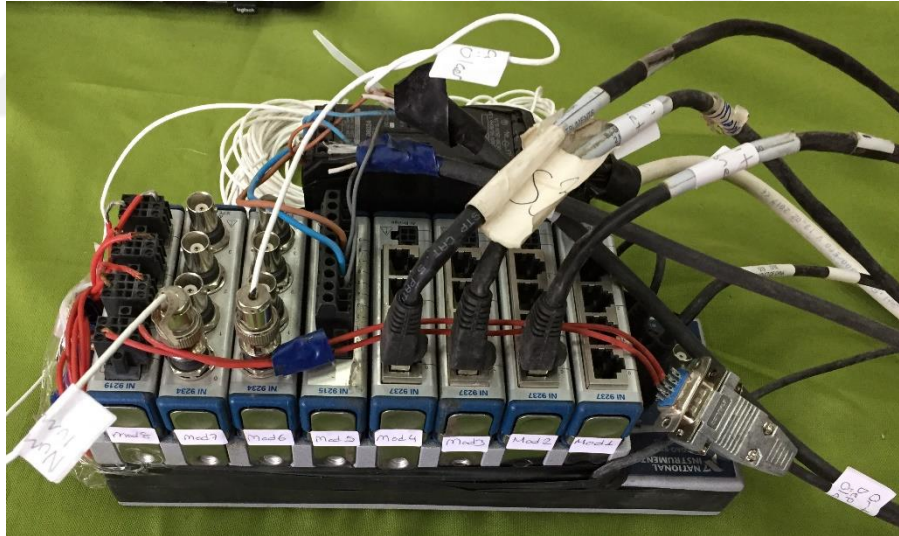
Üretici firma tarafından Veri Alma Giriş-Çıkış Modülleri, her tür voltaj ölçümü yapabilmesi için yeterli çözünürlük, kanal sayısı ve sinyal akımı alma hızına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Giriş Modülleri; güvenlik, gürültü ayrıştırma ve yüksek voltaj aralığı için kasanın ve birbirinden ayrı olarak izole edilip tasarlanırken Çıkış



Modüllerini ise; aşırı voltaj-kısa devre koruması, yüksek bağıl hassasiyeti, hızlı veri kaydı dönüş hızı ve kendi parçalarını kalibre edecek şekilde tasarlanmıştır.

### 3.5.4.3. Datalogger

Data Logger, üzerinde bazı kanallar bulunan, verilerin toplanması ve depolamasını sağlayan elektronik kayıt cihazları olarak tanımlanabilir. Üretici firma tarafından kalibrasyonu yapılan bu cihazlar, farklı parametrelere sahip verilerin elde edilebilmesi için, temas veya temassız ölçüm metodları kullanılabilir. Ayrıca bu cihazların içinde, birçok kullanıma uygun veri kaydedici, veri örnekleyici, veya veri toplayıcı olarak isimlendirilen veri dizisi bulunmaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan Data Loggerin üzerinde çeşitli kanallar bulunmaktadır ve bu kanallar sayesinde ivme kayıtları, strain gauge kayıtları, potansiyometre, lazermetre ve yük hücrelerinden değerler alınmıştır (Şekil 3.21.).



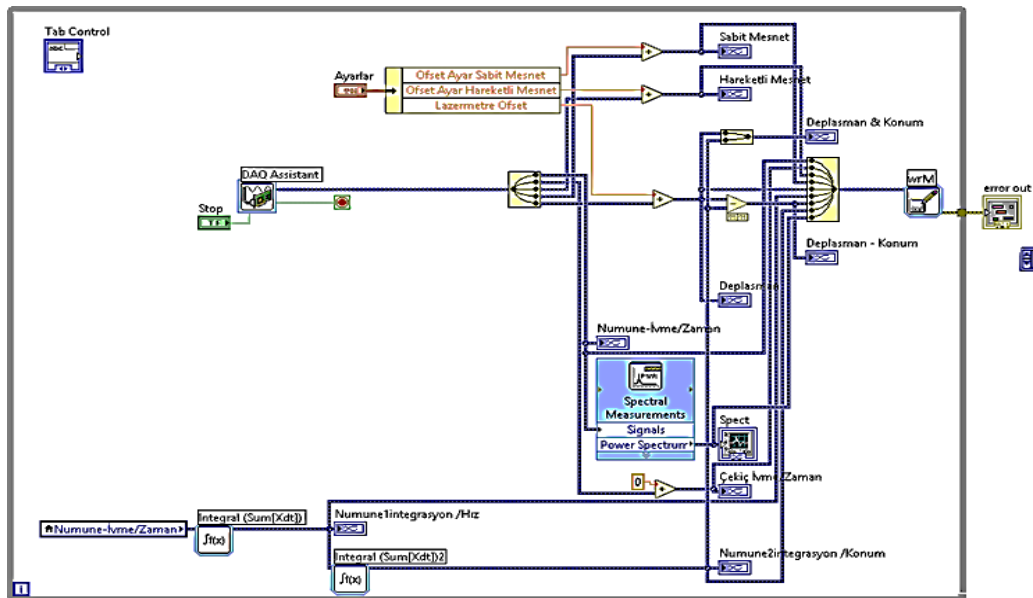
Şekil 3.21. Datalogger

### 3.5.4.4. Veri alma ve verilerin işlenmesi

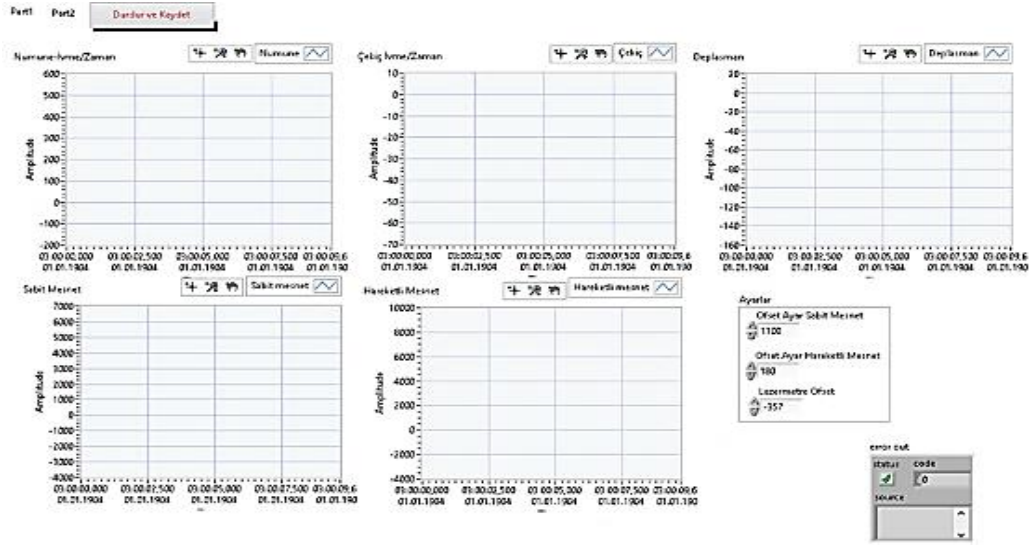
NI Labview Signal Express, datalogger ile birlikte gelen ve datalogger sayesinde verilerin toplanıp bilgisayar ortamında görüntülenmesini sağlayan ve analizinin yapılmasına yardımcı olan programlardır. Labview programı sinyal işlemede yaygın

olarak kullanılmakta ve birçok farklı grafiksel ve sayısal analiz arayüzüne sahip bir programlama sistemi bulunmaktadır (Şekil 3.22.). Bununla birlikte darbe deneyi sırasında Labview programında veri alma ünitesine gelen sinyallerin sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlayan algoritmalar bulunmaktadır (Şekil 3.23.). Ayrıca LabVIEW yazılımında,  $6,05 \times 10^{-4}$  sn aralıklarla 1 sn'de 25000 veri alacak şekilde veri işleme algoritmasına da sahiptir (Şekil 3.24.). Datalogger üzerindeki kanallar üzerinde bulunan kanallara bağlanan mekanizmaları yönetebilme imkanı bulunmaktadır. Labview programı sayesinde alt ve üst sınır değerleri saniyelik okunabilmekte ve istenilen ölçütlerde kayıt yapılabilmektedir. Bu sayede çekice ve deney numunesine yerleştirilen ivmeölçerlerden anlık olarak alınan değerlerdeki değişimler görülebilmektedir.

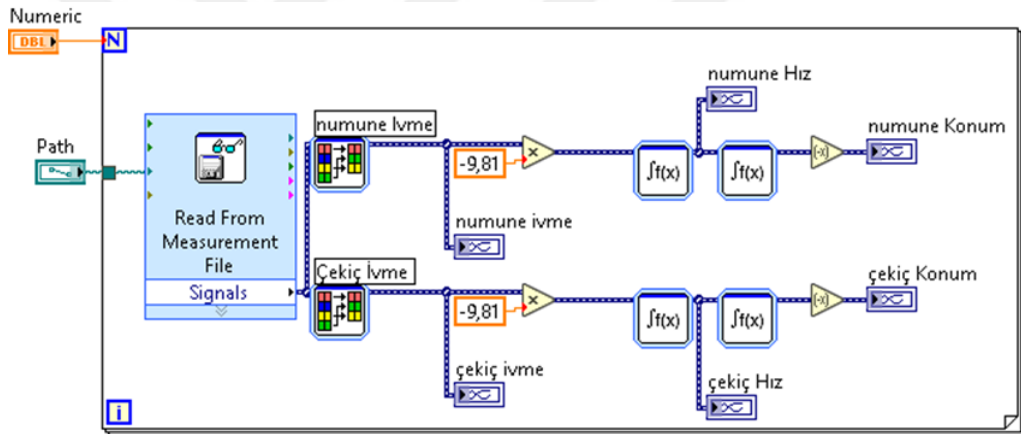
Çekice ve deney numunesine bağlanan ivmeölçerlerin kontrolleri yapılmıştır ve daha sonra Labview programı sayesinde son kontroller yapılmıştır. Serbest düşmeye bırakılan çekicin deney numunesiyle temasından kısa bir süre sonra kayıt işlemi tamamlanmıştır. Bilgisayar ortamına aktarılan veriler daha sonra üzerinde çalışılabilmesi için farklı bir dosyada kayıt edilmiş ve darbe esnasında meydana değişimler excel dosyasında ivme-zaman değerleri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.22. LabVIEW veri alma algoritması



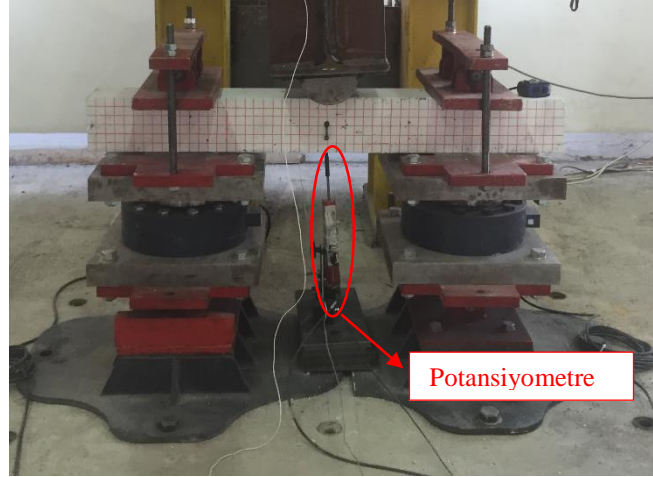
Şekil 3.23. LabVIEW veri alma algoritmasına ait ara yüz



Şekil 3.24. LabVIEW yazılımı veri işleme algoritması

### 3.5.4.5. Potansiyometre

Deneylerde Şekil 3.25.'te görüldüğü gibi 1 adet mafsalsız potansiyometre kullanılmıştır. Opkon marka LPS model potansiyometre, 30-150 mm ölçüm aralığına sahip, 5 kOhm ve 10 kOhm dirençli, yay baskılı lineer potansiyometre kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kompozit kiriş numunelerin tam orta noktasına yerleştirilen bir adet potansiyometre kullanılmıştır.



Şekil 3.25. Potansiyometre

#### 3.5.4.6. Lazermetre

Yapılan deneysel çalışmalarda, kompozit kiriş numunelerde meydana gelen deplasmanın ölçülmesi için her numunede bir adet optik lazermetre kullanılmıştır. Lazermetre numunelerin deplasmanın ölçülmesi için numunelerin en alt ve orta kısmına yerleştirilmiştir. Deneylede Leuze marka, ODSL 9V6-450-S12 model numaralı ve 40-450 mm ölçüm aralığına sahip lazermetre tercih edilmiştir (Şekil 3.26.).



Şekil 3.26. Lazermetre

## **BÖLÜM 4. DARBE DENEYİ**

Çalışmanın konusu olan darbe deneyi, Sakarya Üniversitesi Mustafa Kazak Laboratuvarında yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmanın bu bölümünde, deneylere ait görüntülere ve deney sonucunda elde edilen grafiklere yer verilmiştir. Deneysel çalışmalarda, hazırlanan her bir numuneye ayrı ayrı darbe yükü uygulanmış farklı deformasyon değerleri ve farklı deformasyon şekilleri elde edilmiştir. Her bir numuneye uygulanan darbe deneyinden sonra darbe deney sistemi tekrar kontrol edilmiştir. Darbe yükünün serbest bırakılmasının ardından çarpma esnasında büyük etkiler meydana geldiği için cıvatalarda boşalma ya da darbe yükünü taşıyan zincirlerde deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Mesnetlerde, bulonlarda ya da zincirlerde meydana gelebilecek hasarlar çekicin düşeydeki doğrultusunun değişmesine sebep olabilmekte ve darbe yükünün kiriş numunesinde belirlenen noktadan sapmasına sebep olabilmektedir. Ayrıca çekice ve deney numunesine yerleştirilen ivmeölçerlerin çalışıp çalışmadığının kontrolleri tamamlandıktan sonra deneylere başlanmıştır. Kiriş numunelerinde meydana gelecek çatlakların daha doğru yorumlanabilmesi için ön yüzeyi kalemle 2,5×2,5 cm karelere bölünmüştür.

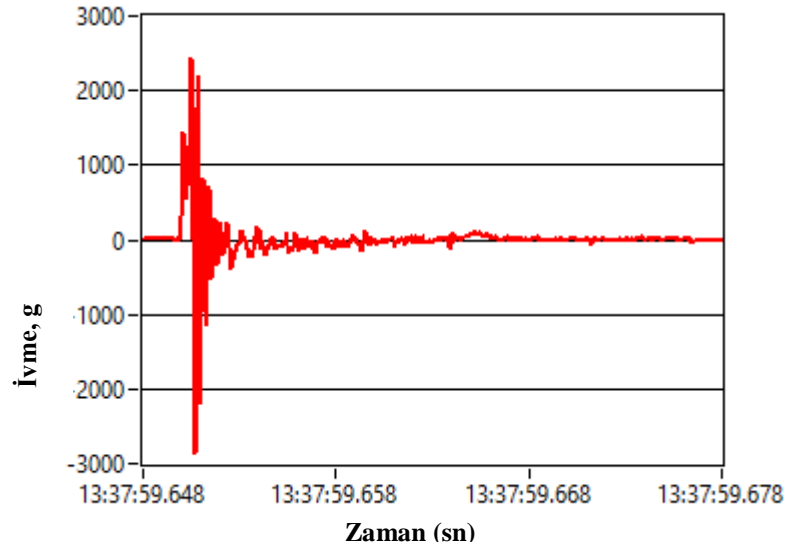
### **4.1. OPC-S-1000 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi**

OPC-S-1000 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve deney sonrası görüntüler Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

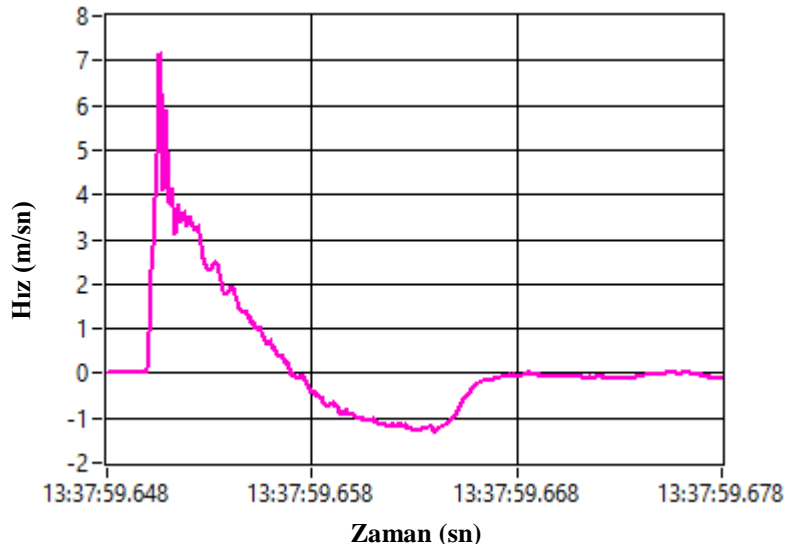


Şekil 4.1. OPC-S-1000 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüleri

Deneilerde OPC-S-1000 numunesi üzerine serbest bırakılan çekiç başlığının çarpma etkisinden dolayı numunede oluşturduğu ivme-zaman (Şekil 4.2.), hız-zaman (Şekil 4.3.) ve deplasman-zaman (Şekil 4.4.) grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca sabit ve hareketli mesnetlerde darbe etkisinden dolayı oluşan toplam mesnet tepkilerinin grafiği Şekil 4.5.'te gösterilmiştir.

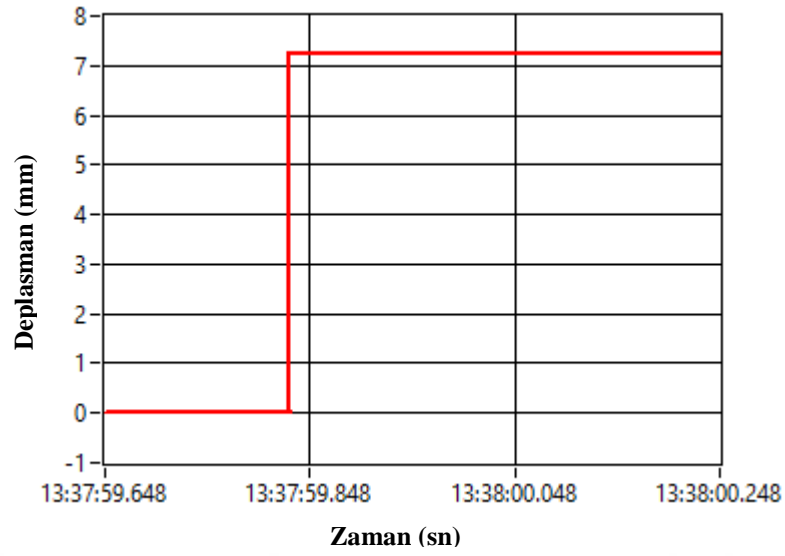


Şekil 4.2. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1000 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği

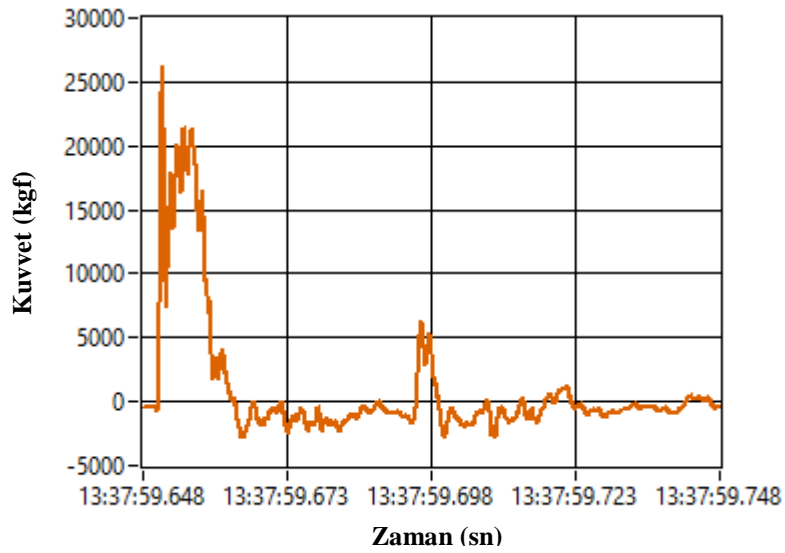


Şekil 4.3. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1000 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği





Şekil 4.4. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1000 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği



Şekil 4.5. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin mesnetlerde oluşturduğu toplam mesnet kuvvet-zaman grafiği

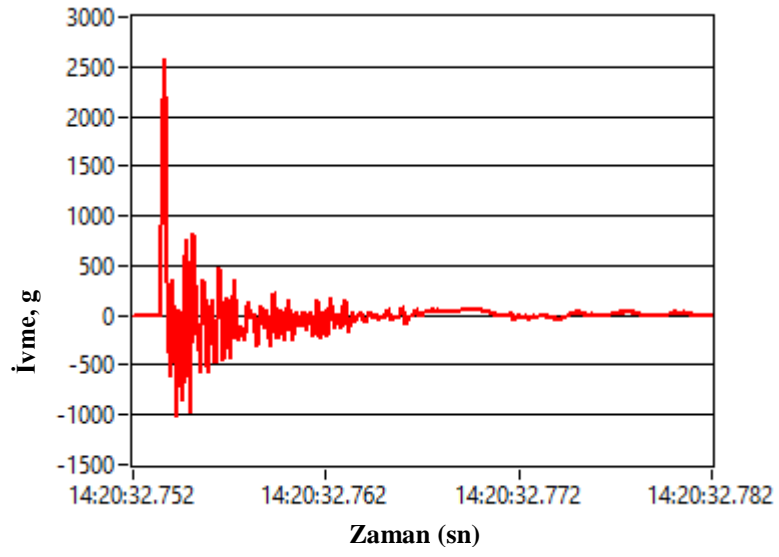
#### 4.2. OPC-C-1000 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi

OPC-C-1000 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.

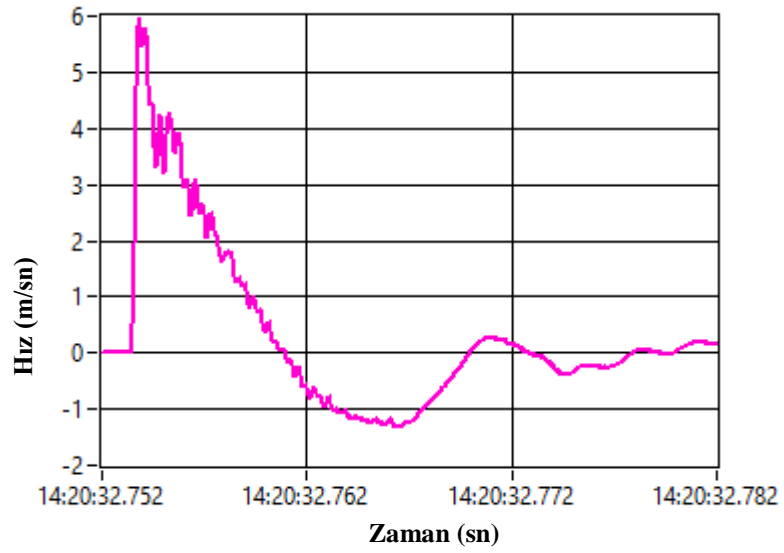


Şekil 4.6. OPC-C-1000 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüleri

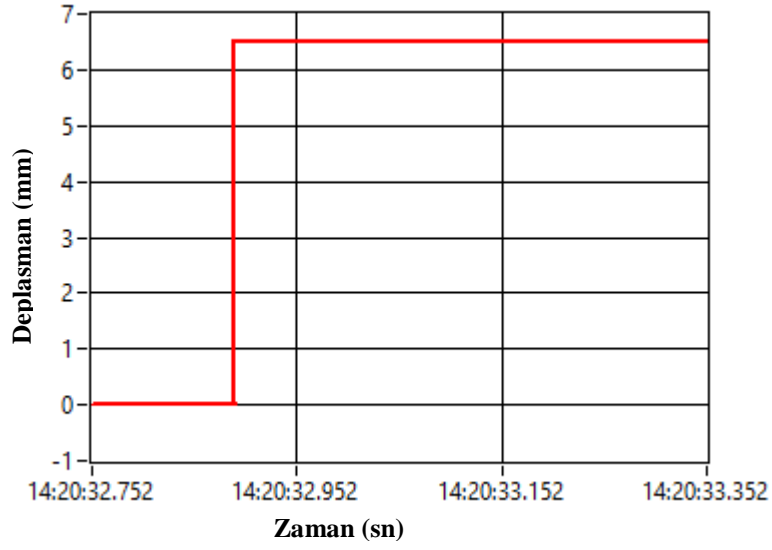
Deneilerde OPC-C-1000 numunesi üzerine serbest bırakılan çekiç başlığın çarpma etkisinden dolayı numunede oluşturduğu ivme-zaman (Şekil 4.7.), hız-zaman (Şekil 4.8.) ve deplasman-zaman (Şekil 4.9.) grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca sabit ve hareketli mesnetlerde darbe etkisinden dolayı oluşan toplam mesnet tepkilerinin grafikleri Şekil 4.10.'da gösterilmiştir.



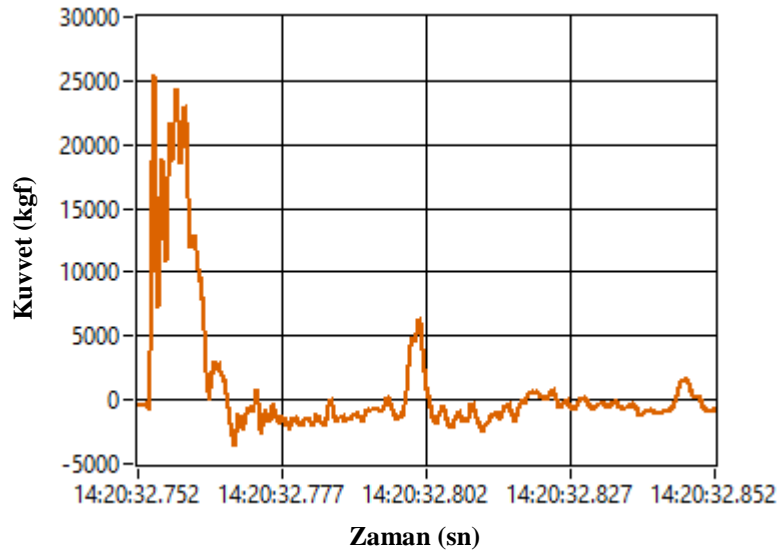
Şekil 4.7. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin OPC-C-1000 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği



Şekil 4.8. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin OPC-C-1000 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği



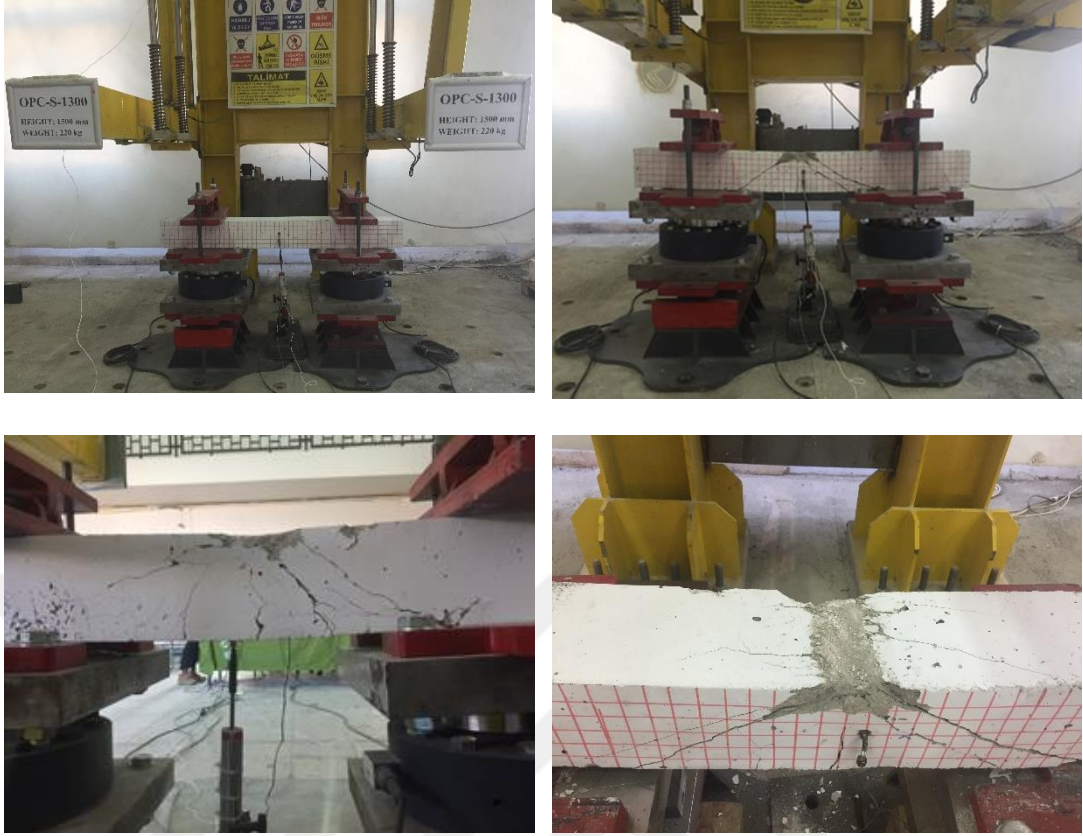
Şekil 4.9. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-C-1000 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği



Şekil 4.10. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin mesnetlerde oluşturduğu toplam mesnet kuvvet-zaman grafiği

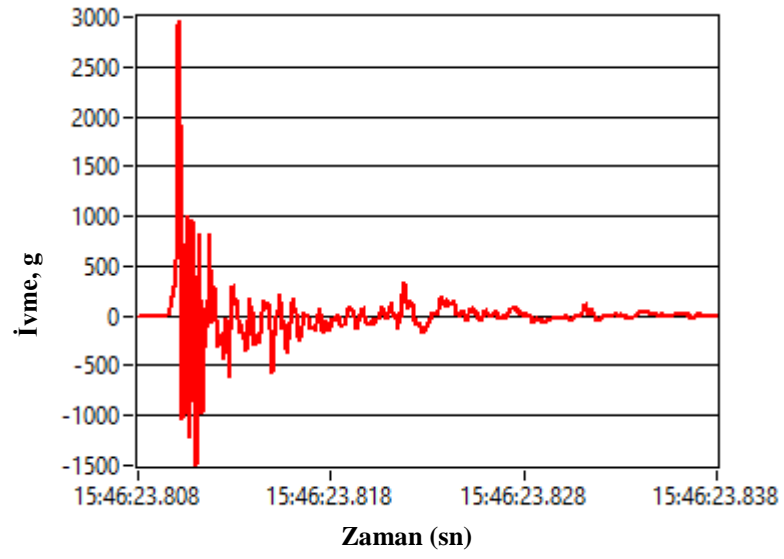
### 4.3. OPC-S-1300 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi

OPC-S-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri Şekil 4.11.'de gösterilmiştir.

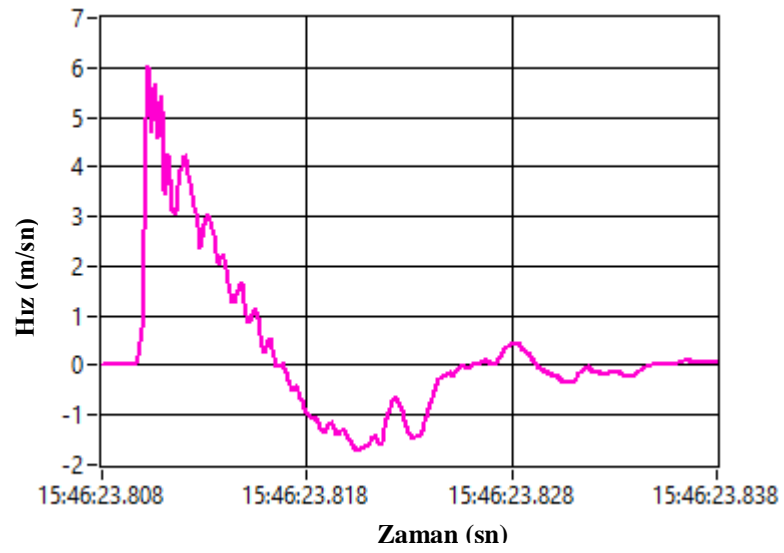


Şekil 4.11. OPC-S-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüleri

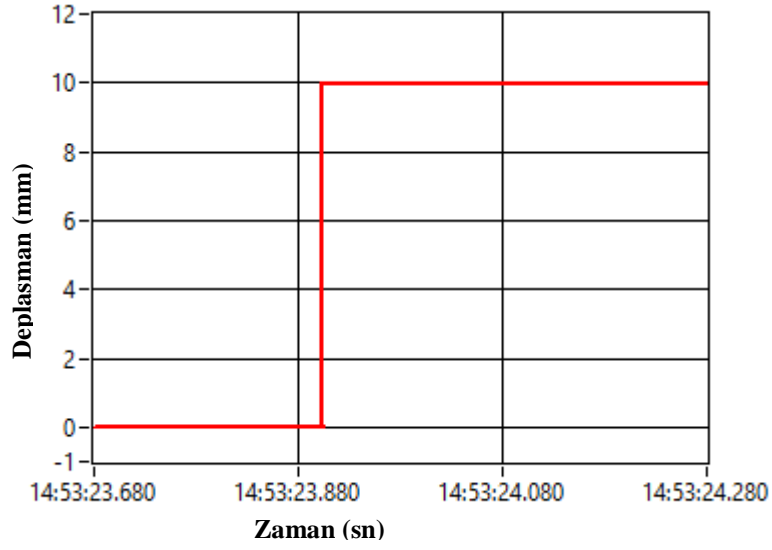
Deneylerde OPC-S-1300 numunesi üzerine serbest bırakılan çekiç başlığının çarpma etkisinden dolayı numunede oluşturduğu ivme-zaman (Şekil 4.12.), hız-zaman (Şekil 4.13.) ve deplasman-zaman (Şekil 4.14.) grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca sabit ve hareketli mesnetlerde darbe etkisinden dolayı oluşan toplam mesnet tepkilerinin grafiği Şekil 4.15.'te gösterilmiştir.



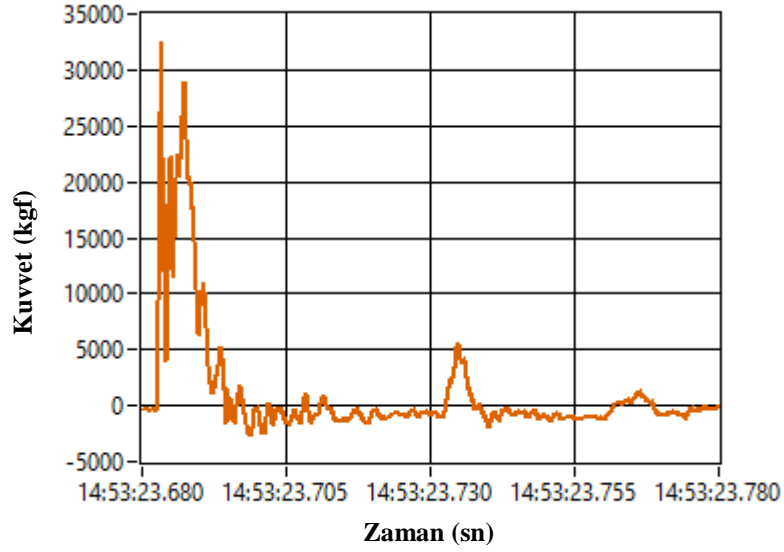
Şekil 4.12. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği



Şekil 4.13. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği



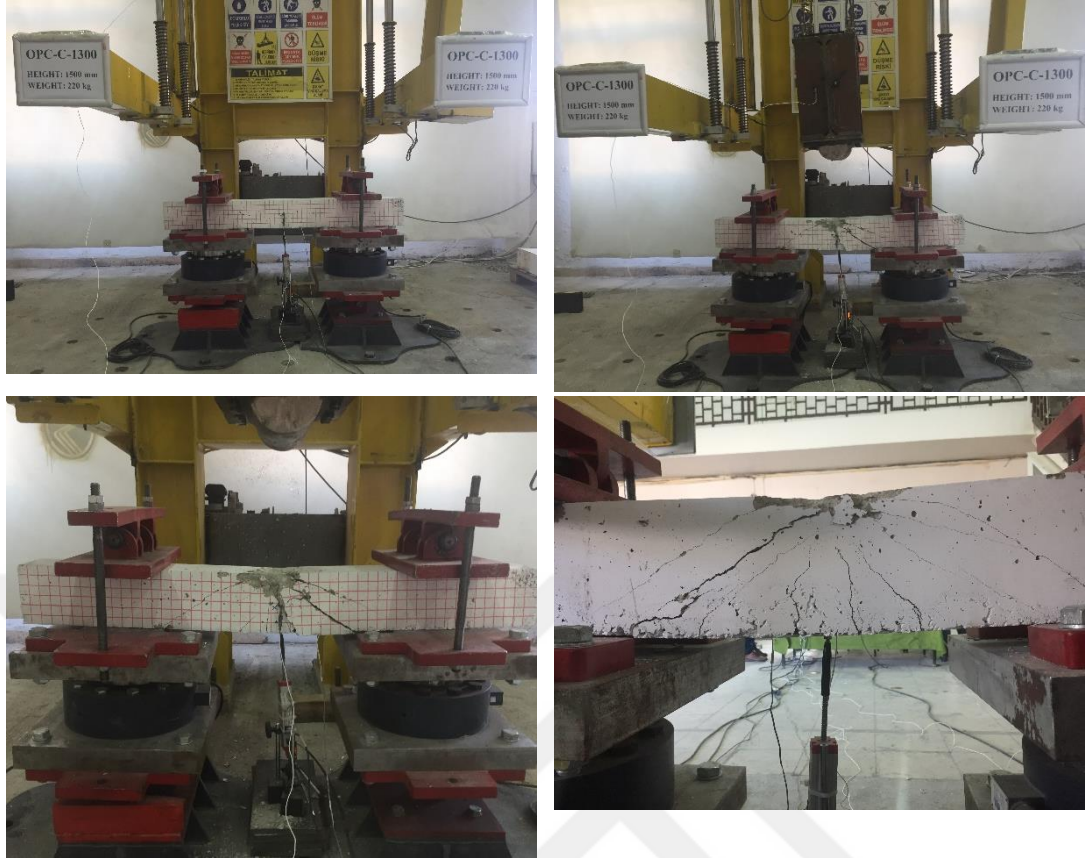
Şekil 4.14. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği



Şekil 4.15. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin mesnetlerde oluşturduğu kuvvet-zaman grafiği

#### 4.4. OPC-C-1300 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi

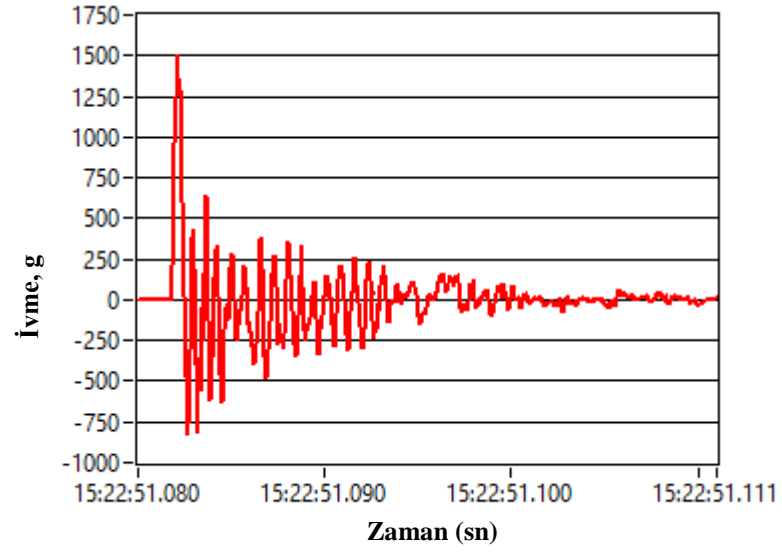
OPC-C-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri Şekil 4.16.'da gösterilmiştir.



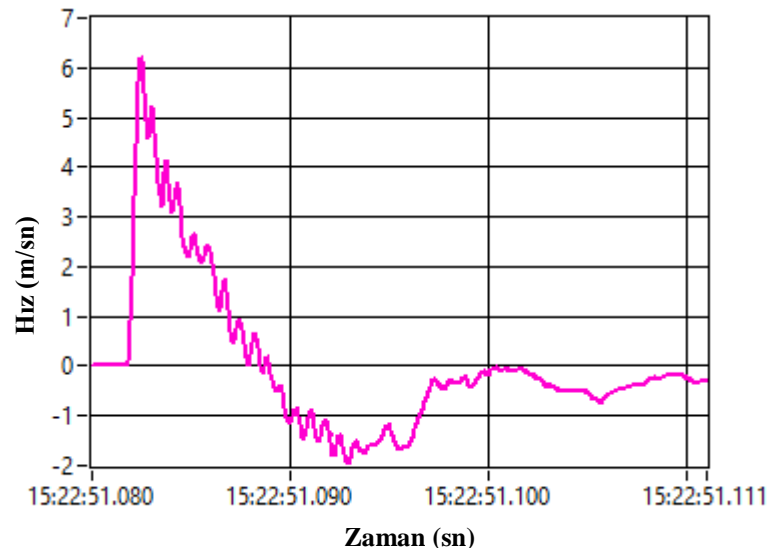
Şekil 4.16. OPC-C-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüleri

Deneyleerde OPC-C-1300 numunesi üzerine serbest bırakılan çekiç başlığının çarpma etkisinden dolayı numunede oluşturduğu ivme-zaman (Şekil 4.17.), hız-zaman (Şekil 4.18.) ve deplasman-zaman (Şekil 4.19.) grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca sabit ve hareketli mesnetlerde darbe etkisinden dolayı oluşan toplam mesnet tepkilerinin grafiği Şekil 4.20.'de gösterilmiştir.

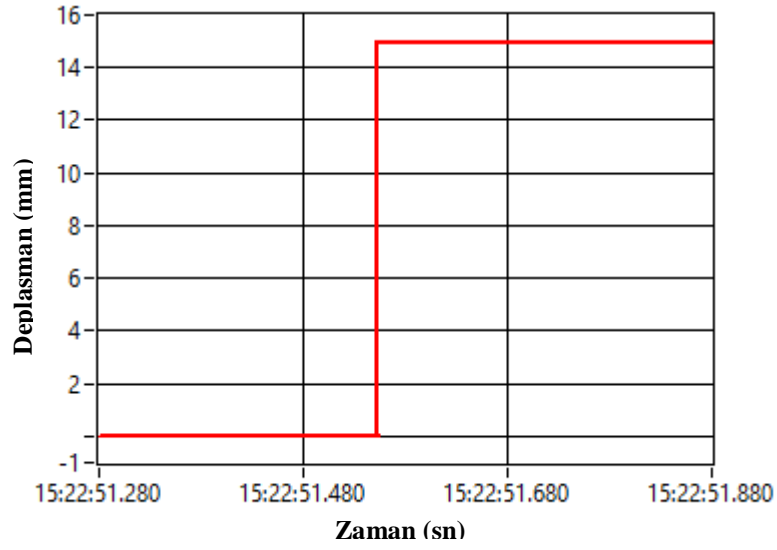




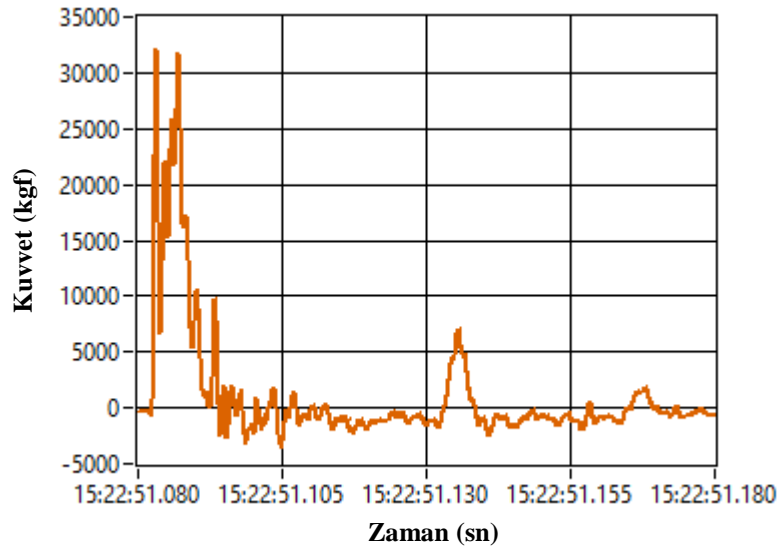
Şekil 4.17. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği



Şekil 4.18. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin OPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği



Şekil 4.19. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin OPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği



Şekil 4.20. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin mesnetlerde oluşturduğu toplam mesnet kuvvet-zaman grafiği

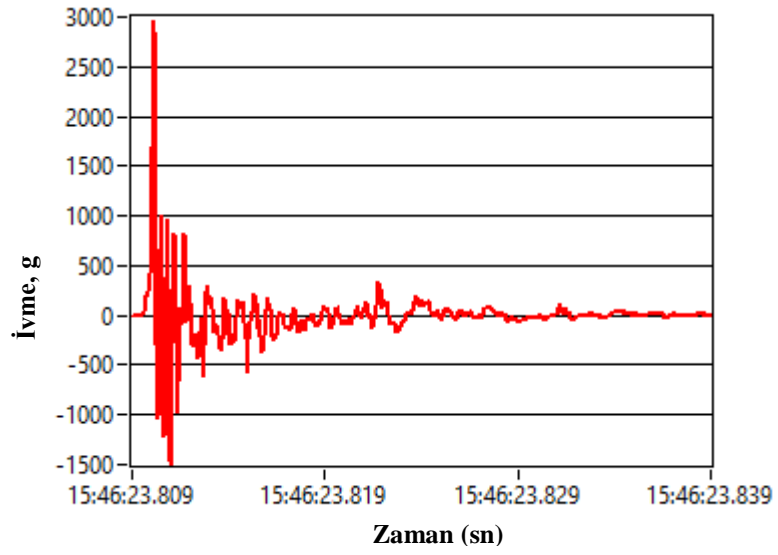
#### 4.5. GPC-S-1300 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi

GPC-S-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve deney sonrası görüntüler Şekil 4.21.'de gösterilmiştir.

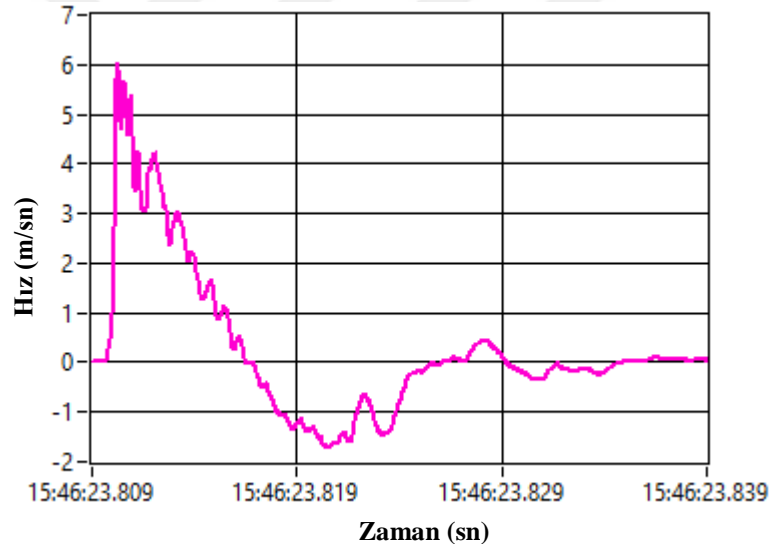


Şekil 4.21. GPC-S-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüler

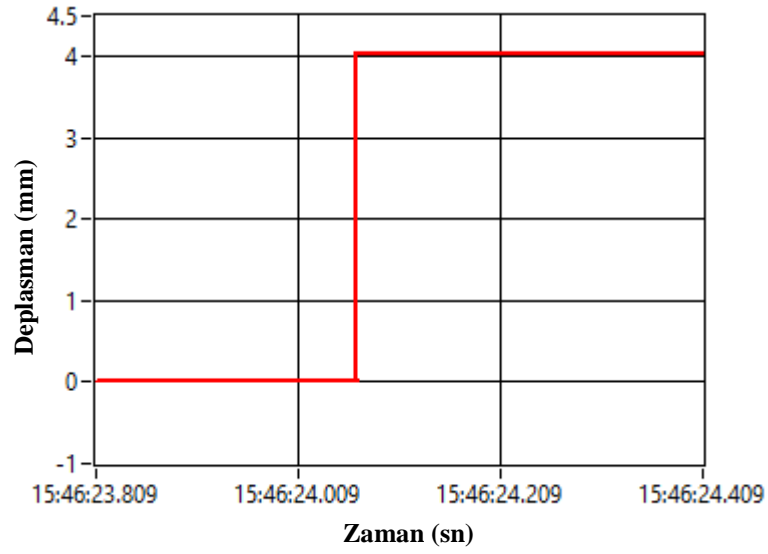
Deneyleerde GPC-S-1300 numunesi üzerine serbest bırakılan çekiç başlığın çarpma etkisinden dolayı numunede oluşturduğu ivme-zaman (Şekil 4.22.), hız-zaman (Şekil 4.23.) ve deplasman-zaman (Şekil 4.24.) grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca sabit ve hareketli mesnetlerde darbe etkisinden dolayı oluşan toplam mesnet tepkilerinin grafiği Şekil 4.25.'te gösterilmiştir.



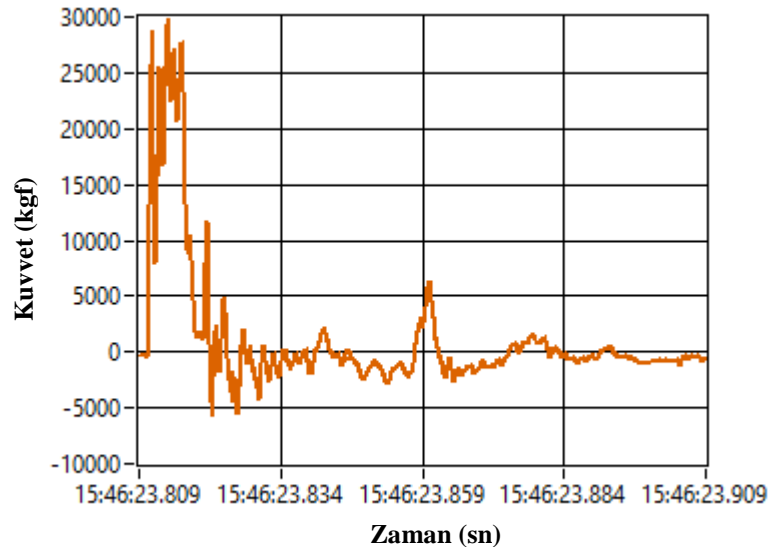
Şekil 4.22. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin GPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği



Şekil 4.23. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin GPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği



Şekil 4.24. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicinin GPC-S-1300 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği



Şekil 4.25. 1500 mm yüksekliğinden çekicinin sabit mesnetinde oluşturduğu kuvvet-zaman grafiği

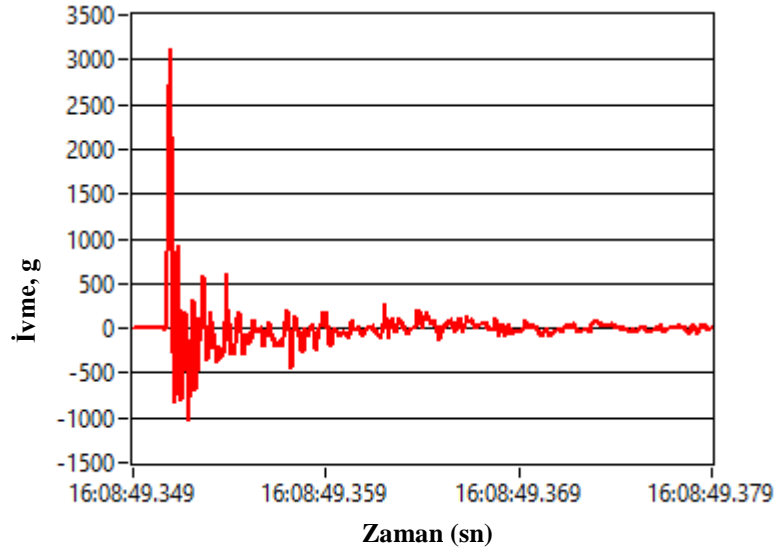
#### 4.6. GPC-C-1300 Kompozit Kirişine Uygulanan Darbe Deneyi

GPC-C-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri Şekil 4.26.'da gösterilmiştir.

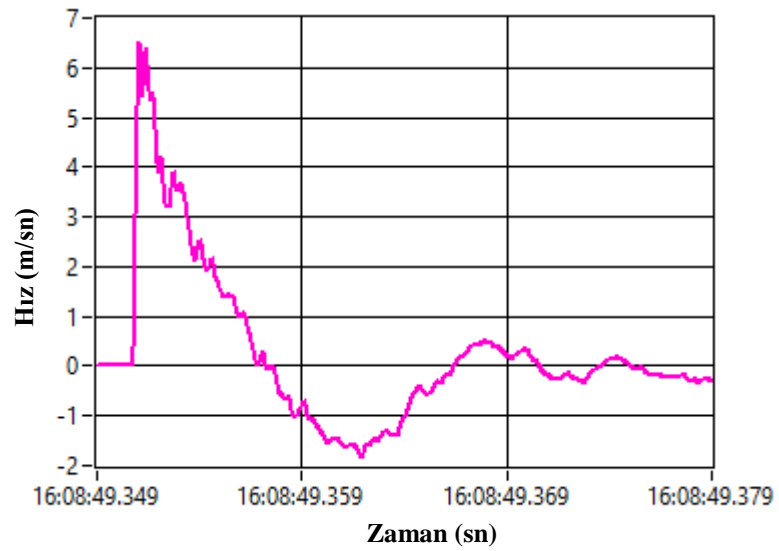


Şekil 4.26. GPC-C-1300 kompozit kiriş numunesine ait deney öncesi ve sonrası görüntüleri

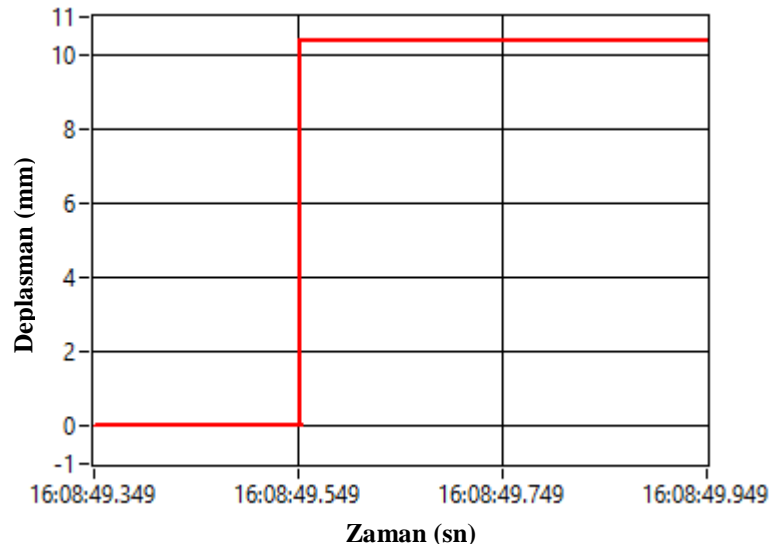
Deneylerde GPC-C-1300 numunesi üzerine serbest bırakılan çekiç başlığının çarpma etkisinden dolayı numunede oluşturduğu ivme-zaman (Şekil 4.27.), hız-zaman (Şekil 4.28.) ve deplasman-zaman (Şekil 4.29.) grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca sabit ve hareketli mesnetlerde darbe etkisinden dolayı oluşan toplam mesnet tepkilerinin grafiği Şekil 4.30.'da gösterilmiştir.



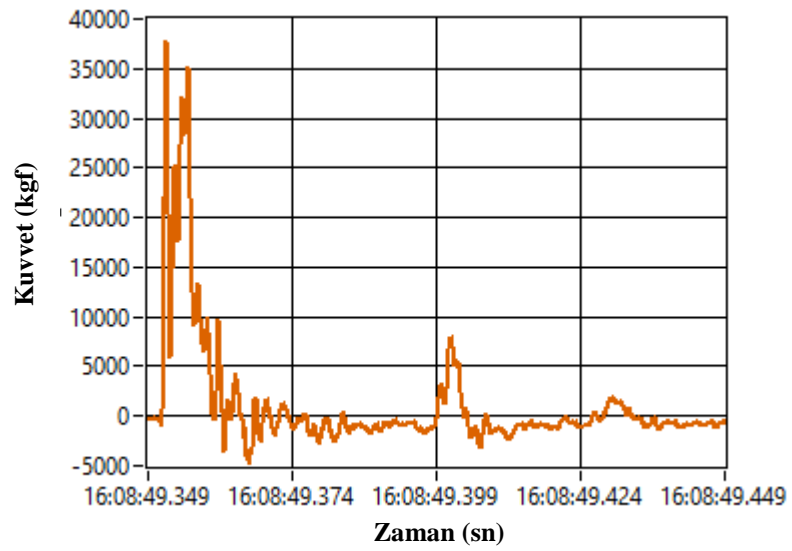
Şekil 4.27. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin GPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu ivme-zaman grafiği



Şekil 4.28. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin GPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu hız-zaman grafiği



Şekil 4.29. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin GPC-C-1300 numunesinde oluşturduğu deplasman-zaman grafiği



Şekil 4.30. 1500 mm yüksekliğinden atılan çekicin toplam mesnet kuvvet-zaman grafiği



## **BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER**

Bu bölümde, sonuçlar kısmında, darbe deneyi sonucunda, çekiç ve numunelerdeki ivmeölçerlerden alınan kayıtlar kullanılarak araştırma yapılmıştır. Numunelerden alınan ivme kaydının sayısal analizi ile hız-zaman ve konum zaman eğrileri elde edilmiştir. Grafikler değerlendirilerek aşağıdaki sonuçlara varılmıştır. Günümüzde yapılara etkiyebilecek olan çarpma etkisi ile ilgili herhangi bir yönetmelik veya standart bulunmamaktadır. Yapılan bu çalışmanın gelecekte yapılacak standartlara bir ışık tutacağı düşünülmektedir.

### **5.1. Sonuçlar**

Geleneksel beton kullanılarak oluşturulan OPC-S-1000 kare geometri ve OPC-C-1000 daire geometriye sahip kompozit deney numunelerinin sonuçları incelendiğinde; OPS-S-1000 kompozit numunenin ivme değeri 2400g, OPC-C-1000 kompozit numunenin ivme değeri 2600g olduğu görülmüştür. OPC-S-1000 ile OPC-C-1000 deney numunelerden deplasman ölçer kullanılarak ölçülen, deplasman değerleri sırası ile 7,2 mm ve 6,5 mm'dir. Farklı geometri ile oluşturulmuş OPC-S-1000 ile OPS-C-1000 kompozit numunelerin deplasman değeri karşılaştırıldığında kare kesitli kompozit numunenin, daire geometri ile oluşturulmuş kompozit numuneden %10 daha fazla deplasman yaptığı görülmüştür. Yapılan iki deney sonucu incelendiğinde OPC-C-1000 kompozit numuneye yerleştirilen ivme ölçerden elde edilen ivme değerinin daha büyük değer olmasına rağmen, deplasman ölçer kullanılarak ölçülen deplasman değerinin, daha küçük olduğu görülmektedir. Matematiksel kabuller dikkate alınarak yapılan değerlendirmeye göre, deney numunesinden elde edilen ivme değeri ile deplasman ölçerden elde edilen deplasman değerinin birbirine paralel olması gerekmektedir. Ayrıca OPC-S-1000 kompozit numunenin hız değeri 7,2 m/sn, OPC-C-1000 kompozit numunenin hız değeri 6 m/sn olduğu görülmüştür. İvme ölçerden

elde edilen hız değerleri, deplasman ölçerden elde edilen deplasman değerleri ile karşılaştırıldığında birbirine paralellik göstermektedir. Sonuç olarak, deneysel olarak elde edilen ivme değer farkı, ivme ölçerin hassasiyetinden ve deney sırasında ortamda bulunan gürültüden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca ivme değerleri arasındaki beklenmedik farkın literatürde birçok çalışmada bulunduğu görülmektedir.

OPC-S-1300 ile OPC-C-1300 karşılaştırıldığında OPC-S-1300 kompozit numunenin ivme değeri 2900g, OPC-C-1300 kompozit numunenin ivme değeri 1500g'dir. OPC-S-1300 ile OPC-C-1300 deney numunelerden deplasman ölçer kullanılarak ölçülen, deplasman değerleri sırası ile 10 mm ve 15 mm'dir. Farklı geometri ile oluşturulmuş kompozit numunelerin OPC-S-1300 ile OPS-C-1300 deplasman değeri karşılaştırıldığında daire kesitli kompozit numunenin kare geometri ile oluşturulmuş kompozit numuneden %50 daha fazla deplasman yaptığı görülmüştür. Yapılan iki deney sonucu incelendiğinde OPC-S-1300 kompozit numuneye yerleştirilen ivme ölçerden elde edilen ivme değeri daha büyük değer olmasına rağmen, deplasman ölçer kullanılarak ölçülen deplasman değerinin, daha küçük olduğu görülmektedir. Matematiksel kabuller dikkate alınarak yapılan değerlendirmeye göre, deney numunesinden elde edilen ivme değeri ile deplasman ölçerden elde edilen deplasman değerinin birbirine paralel olması gerekmektedir. Ayrıca OPC-S-1300 kompozit numunenin hız değeri 6 m/sn, OPC-C-1000 kompozit numunenin hız değeri 6,2 m/sn'dir. İvme ölçerden elde edilen hız değerleri, deplasman ölçerden elde edilen deplasman değerleri ile karşılaştırıldığında birbirine paralellik göstermektedir. Sonuç olarak, deneysel olarak elde edilen ivme değer farkı, ivme ölçerin hassasiyetinden ve deney sırasında ortamda bulunan gürültüden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca ivme değerleri arasındaki beklenmedik farkın literatürde birçok çalışmada bulunduğu görülmektedir.

OPC-S-1000 ile OPC-S-1300 kompozit numuneler karşılaştırıldığında; deney numunesinin her iki mesnet noktasından sonraki 15 mm uzun olması, deplasman değerinde %38 oranında artma meydana getirmiştir. OPC-C-1000 ile OPC-C-1300 kompozit numuneler karşılaştırıldığında; deney numunesinin her iki mesnet noktasından sonraki 15 mm uzun olması, deplasman değerinde %130 oranında artma

meydana getirmiştir. Sonuç olarak; deney numunesinin uzunluğunun artması mesnet noktalarını dönmeye karşı sınırlamış, bu durum deplasman değerlerinde artış sağlamıştır. Farklı geometri ile oluşturulmuş kompozit numunelerin her ikisinde de aynı durum meydana gelmiştir. Dolayısıyla; farklı geometriler kullanılarak oluşturulan kompozit numunelerin, mesnet noktasının sınırlandırılması deplasman değerini artmaktadır. Bu durum deneyde oluşturulan sınır şartlarının, deneyde elde edilen verileri %38-130 oranında etkilediğini göstermiştir.

GPC-S-1300 ile GPC-C-1300 karşılaştırıldığında GPC-S-1300 kompozit numunenin ivme değeri 2900g, GPC-C-1300 kompozit numunenin ivme değeri 3100g'dir. GPC-S-1300 ile GPC-C-1300 deney numunelerden deplasman ölçer kullanılarak ölçülen, deplasman değerleri sırası ile 4 mm ve 10,4 mm'dir. Farklı geometri ile oluşturulmuş kompozit numunelerin GPC-S-1300 ile GPC-C-1300 deplasman değeri karşılaştırıldığında daire kesitli kompozit numunenin kare geometri ile oluşturulmuş kompozit numuneden %160 daha fazla deplasman yaptığı görülmüştür. Ayrıca GPC-S-1300 kompozit numunenin hız değeri 6 m/sn, GPC-C-1000 kompozit numunenin hız değeri 6,5 m/sn'dir. İvme ölçerden elde edilen hız değerleri, deplasman ölçerden elde edilen deplasman değerleri ile karşılaştırıldığında birbirine paralellik göstermektedir.

Eski ve yeni nesil betondan elde edilen numuneler incelendiğinde OPC-S-1300 ile GPC-S-1300 kompozit numuneler karşılaştırıldığında; deplasman değerinde %150 oranında azalma meydana getirmiştir. OPC-C-1300 ile GPC-C-1300 kompozit numuneler karşılaştırıldığında; deplasman değerinde %44 oranında azalma meydana getirmiştir. Sonuç olarak; farklı tip beton kullanılarak elde edilen deney numuneleri darbe etkisi altında farklı deplasman değeri elde edilmiştir. Yeni nesil beton olarak isimlendirilen Geopolimer beton ile üretilmiş kompozit deney numunelerinin darbe etkisine daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Ancak Geopolimer beton ile üretilmiş kompozit numunenin dayanımının 40 MPa civarında olduğu, eski nesil betondan üretilmiş kompozit deney numunesinden alınan karot numunelerinin basınç değeri 30 MPa civarında olduğu unutulmamalıdır

## 5.2. Öneriler

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, deney sırasında deney numunelerinin birçok farklı noktasından daha fazla veri alınarak hata payı azaltılabilir. Daha doğru ve sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için oluşturulacak geopolimer betonun basınç dayanımı ile karşılaştırma yapılacak geleneksel betonun basınç dayanımının benzer olmasına dikkat edilmelidir. Ayrıca yapısal çelik profil kullanılmadan birer referans numune hazırlanarak da deneysel çalışmalar yapılması önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Musthafa, L., Rani, S., & KK, S. (2016). Study of Material Property of Concrete Filled Steel Tubular Columns.
- [2] Kamil, G. M., Liang, Q. Q., & Hadi, M. N. (2019). Fiber element simulation of interaction behavior of local and global buckling in axially loaded rectangular concrete-filled steel tubular slender columns under fire exposure. *Thin-Walled Structures*, 145, 106403.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Ağcakoca, E., Yaman, Z., & Yazıcı, Y. E. Behavior Of Composite And Box Profile Under Impact Force.
- [8] Kantar, E., Arslan, A., & Özgür, A. N. I. L. (2011). Beton Dayanımındaki Değişimin Çarpma Davranışına Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(1).
- [9] Mashal, M. J., Darbe yükü etkisi altında çelik kiriş elemanların deneysel ve sonlu eleman metodu ile incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi*, 2019.
- [10] Saini, D., & Shafei, B. (2019). Investigation of concrete-filled steel tube beams strengthened with CFRP against impact loads. *Composite Structures*, 208, 744-757.

- [11] 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.
- [12] Gücüyen, E., Erdem, R. T., & Kantar, E. Kompozit Boru Kesitlerinin Çarpma Etkisi Altında Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 139-149.
- [13] Kantar, E., Yuen, T. Y., Kobya, V., & Kuang, J. S. (2017). Impact dynamics and energy dissipation capacity of fibre-reinforced self-compacting concrete plates. *Construction and Building Materials*, 138, 383-397.
- [14] Selvi. M., Beton dayanımındaki değişimin çarpma davranışına olan etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi*, 2008.
- [15] 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.
- [16] Arıcı, E. (2010). Betonunun Çarpma Mukavemeti Üzerine Basınç Dayanımının Etkisi. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 9(1), 1-9.
- [17] Wu, H., Ren, G. M., Fang, Q., & Liu, J. Z. (2019). Response of ultra-high performance cementitious composites filled steel tube (UHPCC-FST) subjected to low-velocity impact. *Thin-Walled Structures*, 144, 106341.
- [18] Saatçı, S., & Vecchio, F. J. (2009). Nonlinear finite element modeling of reinforced concrete structures under impact loads. *American Concrete Institute*.
- [19] Binici, H., Mustafa, E. K. E. N., & AKSOĞAN, O. (2012). Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik Ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(2), 12-25.
- [20] Tuyan, M., Boyacı, O. C., Çakır, Ö. A., & Ramyar, K. Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonların Mekanik Özellik Ve Yüksek Sıcaklık Dirençlerinin Araştırılması.
- [21] Kaya, M., Uysal, M., & Yılmaz, K. (2018). Jeopolimer harçlarda dayanım, kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisinin varyans analizi ile incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 248-256.
- [22] Vijai, K., Kumutha, R., & Vishnuram, B. G. (2010). Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete. *International journal of physical sciences*, 5(9), 1419-1423.

- [23] Güzelküçük, S., & Demir, İ. Perlit Esaslı Geopolimer Kompozitlere Kür Süresi Ve Sıcaklığın Etkisi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 11(2), 730-737.
- [24] Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolimer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125-130.
- [25] Sarker, P. K. (2011). Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolimer concrete. *Materials and structures*, 44(5), 1021-1030.
- [26] Nath, P., & Sarker, P. K. (2017). Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolimer concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 22-31.
- [27] Özcan, A., & Karakoç, M. B. (2019). The Resistance of Blast Furnace Slag- and Ferrochrome Slag-Based Geopolimer Concrete Against Acid Attack. *International Journal of Civil Engineering*, 1-13.
- [28] Doğan-Sağlamtimur, N., & Bilgil, A. (2018). ATIK KAZAN ALTI KÜLÜ VE POMZA ELEK ALTI ATIĞINDAN GEOPOLİMER YAPI MALZEMESİ ÜRETİMİ. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 590-599.
- [29] Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2007). Fly ash-based geopolimer concrete: study of slender reinforced columns. *Journal of materials science*, 42(9), 3124-3130.
- [30] Tran, T. T., Pham, T. M., & Hao, H. (2019). Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of ambient cured geopolimer concrete beams reinforced with steel fibers. *Engineering Structures*, 200, 109707.
- [31] Mathew, G., & Joseph, B. (2018). Flexural behaviour of geopolimer concrete beams exposed to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 15, 311-317.
- [32] Nguyen, KT, Ahn, N., Le, TA, ve Lee, K. (2016). Uçucu kül-jeopolimer betonun mekanik özellikleri ve eğilme dayanımı üzerine teorik ve deneysel çalışma. *İnşaat ve Yapı Malzemeleri*, 106, 65-77.
- [33] Maranan, G. B., Manalo, A. C., Benmokrane, B., Karunasena, W., Mendis, P., & Nguyen, T. Q. (2019). Flexural behavior of geopolimer-concrete beams longitudinally reinforced with GFRP and steel hybrid reinforcements. *Engineering Structures*, 182, 141-152.
- [34] Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar.

- [35] Yorgun, C. (2005). Çelik Sac-Beton Kompozit Döşeme Sistemlerinin Uygulamalarına Yönelik Değerlendirmeler. Türkiye Mühendislik Haberleri, 435, 60-64.
- [36] Eurocode4.
- [37] Davidovit J (1991) Jeopolimerler: inorganik polimerik yeni malzemeler. J Therm Anal 37: 1633–1656.
- [38] Aleem, M. A., & Arumairaj, P. D. (2012). Geopolymer concrete—a review. International journal of engineering sciences & emerging technologies, 1(2), 118-22.
- [39] Aldred, J., & Day, J. (2012, August). Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete. In 37th Conference on our world in concrete & structures, Singapore (pp. 29-31).
- [40] Mehta A, Siddique R (2017) Uçucu kül bazlı jeopolimer betonun sülfürik asit direnci. Constr Yapı Mater 146: 136–143.
- [41] P. Duxon , A. Fernandez-Jiminez , JL Provis , GC Luckey , A. Palomo , JSJ Van Deventer Geopolymer teknolojisi: son teknoloji ürünü J Mater Sci , 42 ( 2007 ) , sayfa 2917 – 2933.
- [42] JL Provis , JSJ VanDeventer (Eds.) , Jeopolimerler, yapı, işleme, özellikler ve uygulama , Woodhead Publishing Limited , İngiltere ( 2009 ) .
- [43] C. Li , H. Sun , L. Li Bir inceleme: Alkali ile aktive olan cüruf (Si + Ca) ve metakaolin (Si + Al) simanları arasındaki karşılaştırma Cem Concr Res , 40 ( 2010 ) , s. 1341 – 1349.
- [44] Pilehvar, S., Szczotok, AM, Rodríguez, JF, Valentini, L., Lanzón, M., Pamies, R., & Kjønksen, AL (2019). Donma - çözünme çevrimlerinin jeopolimer betonun ve mikro kapsüllenmiş faz değişim malzemelerini içeren Portland çimento betonunun mekanik davranışlarına etkisi. İnşaat ve Yapı Malzemeleri , 200 , 94-103.
- [45] Slavik, R., Bednarik, V., Vondruska, M., & Nemeč, A. (2008). Preparation of geopolymer from fluidized bed combustion bottom ash. Journal of Materials Processing Technology, 200(1-3), 265-270.
- [46] Li, C., Gong, XZ, Cui, SP, Wang, ZH, Zheng, Y. ve Chi, BC (2011). Çimento üretiminden kaynaklanan CO2 emisyonları. Gelen Materials Science Forum (Cilt. 685, s. 181-187). Trans Tech Yayınları.
- [47] Peng, J. X., Huang, L., Zhao, Y. B., Chen, P., & Zeng, L. (2013). Modeling of carbon dioxide measurement on cement plants. In Advanced materials research (Vol. 610, pp. 2120-2128). Trans Tech Publications.



- [48] Hayder, A. L. I., & TAYŞI, N. Investigation of Alkaline Activator ratio on Geopolymer Concrete under Ambient Curing Regime. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(2), 89-100.
- [49] Jia, Z., Yang, Y., Yang, L., Zhang, Y., & Sun, Z. (2018). Hydration products, internal relative humidity and drying shrinkage of alkali activated slag mortar with expansion agents. *Construction and Building Materials*, 158, 198-207.
- [50] Kürklü, G. (2016). Oda Sıcaklığında Kür Edilen Granüle Yüksek FırınCürüflüGeopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 356-367.
- [51] Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z., & Ou, Z. (2017). Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. *Construction and Building Materials*, 152, 598-613.
- [52] Khale, Divya, Chaudhary, Rubina, “Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review”, *J Mater Sci* 42, pp.729-746, 2007.
- [53] Hayder, A. L. I., & TAYŞI, N. Investigation of Alkaline Activator ratio on Geopolymer Concrete under Ambient Curing Regime. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(2), 89-100.
- [54] Castel, A., Foster, S. J., Ng, T., Sanjayan, J. G., & Gilbert, R. I. (2016). Creep and drying shrinkage of a blended slag and low calcium fly ash geopolymer Concrete. *Materials and Structures*, 49(5), 1619-1628.
- [55] Mermerdaş, K., & Ekmen, Ş. Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 93-101.
- [56] Zhang, H. Y., Kodur, V., Qi, S. L., Cao, L., & Wu, B. (2014). Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications. *Construction and Building Materials*, 55, 38-45.
- [57] Bakharev T (2005) Jeopolimer malzemelerin asit saldırısına karşı direnci. *Cem Concr Res* 35: 658–670.
- [58] Ariffin MAM, Bhutta MAR, Hussin MW, Tahir MM, Aziah N (2013) Karışımli kül jeopolimer betonunun sülfürik asit direnci. *Constr Oluştur Mater* 43: 80–86.
- [59] Deb PS, Sarker PK, Barbhuiya S (2016) Nano-silika içeren ortamla muamele edilmiş jeopolimer harçların emicilik ve asit direnci. *Cement Concr Compos* 72: 235–245.

- [60] Mehta A, Siddique R (2017) Uçucu kül bazlı jeopolimer betonun sülfürik asit direnci. Constr Yapı Mater 146: 136–143.
- [61] Aldred, J., & Day, J. (2012, August). Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete. In 37th Conference on our world in concrete & structures, Singapore (pp. 29-31).
- [62] Glasby, T., Day, J., Genrich, R., & Aldred, J. (2015). EFC geopolymer concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport. Concrete, 2015, 1-9.
- [63] Tredgold, T., “Strength of cast iron”,: 245-268(1824).
- [64] White, A.E. and Clark, C.L., “Bibliography of impact testing”, Department of Engineering Research, University of Michigan, 4-14 (1925).
- [65] Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Düşen Ağırlık Darbe Testi Deney Föyü, 2010.
- [66] Kantar, E., CFRP ile güçlendirilmiş beton kirişlerin çarpma davranışının deneysel olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2009.
- [67] TS500.
- [68] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018.

## ÖZGEÇMİŞ

Medine AYDIN. 12.04.1993 tarihinde Mardin’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Şenyurt İlköğretim Okulunda tamamladı. Lise öğrenimini 2011 yılında Şenyurt Lisesinden mezun olarak tamamladı. 2012 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2016 yılında mezun oldu. 2017 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı.