

T.C.
ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARBON LİF TAKVİYELİ BETONUN DARBE YÜKLERİ
ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET CİHAN KORKMAZ

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR.ÜYESİ İSMAİL ÜNSAL**

ADİYAMAN, 2025

ÖZET

KARBON LİF TAKVİYELİ BETONUN DARBE YÜKLERİ ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Mehmet Cihan KORKMAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Adıyaman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temmuz/2025, Sayfa:43

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail ÜNSAL

Bu çalışmada karbon lif katkılı betonun darbe yükleri etkisinde dayanım ve enerji sönümleme özellikleri incelenmiştir. Dinamik deneylere hazırlık yapılırken ACI.544.2R kılavuzundaki numune hazırlama ve darbe test düzenekleri dikkate alınarak 152 mm çapında disk numuneler üretilmiştir. Numunelerin aletli ağırlık düşürme deney düzeneği altında düşük hızlı çarpma yükleri altındaki davranışları irdelenmiştir. Ayrıca liflerin numunelerin karakteristik özellikleri üzerindeki etkilerini gözlemek için hazırlanan küp numuneler üzerinde yarı statik basınç ve yarma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karbon lif olarak 3 mm ve 12 mm olmak üzere iki farklı uzunlukta lifler kullanılmıştır. Beton hacmine bağlı olarak 5 kg/m³, 10 kg/m³ ve 15 kg/m³ olarak üç farklı lif oranı kullanılmıştır. Çalışmada basınç ve yarmada çekme dayanımı için en iyi değerleri veren gruplar 3 mm liflerin 5 kg/m³ oranında ve 12 mm liflerin 10 kg/m³ oranında kullanıldığı gruplar olmuştur. Kontrol numunelerine kıyasla dayanım artışı yaklaşık olarak sırasıyla %23 ve %28 olarak gerçekleşmiştir. 3 mm liflerin 10 kg/m³ oranında kullanıldığı grupta lifli betonlar bu dayanımlarını korurken diğer tüm numunelerde düşüşler gözlenmiştir. Darbe etkisinde ise 3 mm liflerin 15 kg/m³ oranında kullanıldığı numuneler en iyi performansı sergilemiş olup bu oran çalışma genelinde optimum oran olarak belirlenmiştir. Statik durumda en iyi performans gösteren her iki grubun darbe yükleri etkisinde alabildikleri maksimum kuvvet miktarı kontrol numunelerinden yaklaşık %7 oranında daha düşük olsa da enerji tüketimleri kontrol betonlarına kıyasla yaklaşık %35 oranında artmıştır. Karbon lif katkısı ile betonların hasar miktarının da sınırlı düzeyde kaldığı gözlenmiştir. Genel olarak hem statik hem de dinamik etkiler açısından 3 mm lifler 12 mm liflere kıyasla daha iyi sonuç vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbon lifli beton; Basınç dayanımı; Dinamik darbe davranışı; Aletli ağırlık düşürme deneyi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF CARBON FIBER REINFORCED CONCRETE UNDER IMPACT LOADS

Mehmet Cihan KORKMAZ

Department of Civil Engineering

Adiyaman University, Graduate Education Institute, July/2025 Page:43

Supervisor: Assist. Prof. Dr. İsmail ÜNSAL

In this study, the strength and energy absorption properties of carbon fiber-reinforced concrete under impact loads were investigated. In preparation for the dynamic tests, 152 mm diameter disc specimens were produced using the sample preparation and impact test setups in the ACI.544.2R guideline. The specimens were then subjected to low-velocity impact loads under an instrumented drop-weight test setup. Quasi-static compression and splitting tests were also conducted on the prepared cube specimens to observe the effects of the fibers on the characteristics of the concrete. Carbon fibers of two different lengths, 3 mm and 12 mm, were used. Three different fiber ratios were used, depending on the concrete volume: 5 kg/m³, 10 kg/m³, and 15 kg/m³. The groups with the best compressive and splitting strength values in the study were those using 3 mm fibers at 5 kg/m³ and 12 mm fibers at 10 kg/m³. Compared to the control samples, the strength increases were approximately 23% and 28%, respectively. In the group where 3 mm fibers were used at a rate of 10 kg/m³, the fiber reinforced concretes maintained their strength, while decreases were observed in all other samples comparing the control group. The most prominent group in terms of impact performance differed from those in the static tests; samples using 3 mm fibers at a rate of 15 kg/m³ exhibited the best performance, and this rate was determined to be the optimum rate for the study. Although the maximum force that both groups, which performed best in the static condition, could receive maximum impact force 7% lower than the control samples, they increased their energy consumption by approximately 35% compared to the control concretes. It was observed that the amount of damage in the concrete remained limited due to the carbon fiber addition. In general, 3 mm fibers performed better than 12 mm fibers in terms of both static and dynamic effects.

Key Word: Carbon fiber reinforced concrete; Compressive strength; Dynamic impact behavior; Instrumented drop-weight test

TEŞEKKÜR / ÖNSÖZ

Öncelikle tezimi bitirmem ve pes etmemem için beni destekleyen, yönlendiren, bilgisi ve öngöröleri ile çalışmama katkıda bulunan hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi İsmail ÜNSAL'a ve Prof. Dr. Mehmet Fatih ŞAHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Beni yetiştirip bu noktaya getiren, benim için her türlü fedakârlığı yapan, emeklerini esirgemeyen ve haklarını asla ödeyemeyeceğim Canım Annem ve Babam Rabia ve Kamber KORKMAZ'a ne kadar teşekkür etsem azdır.

Bu yolda beni motive etmek için elinden geleni yapan ve yanımda olan sevgili eşim Gülseren KORKMAZ'a, onunla geçireceğim zamandan feragat eden güzel kızım Bilge Yaren'e sonsuz teşekkürler.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Adıyaman Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Mehmet Cihan KORKMAZ

İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR / ÖNSÖZ.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	4
3.YAPI TEKNOLOJİSİNDE KULLANILAN LİFLER	7
4.DİNAMİK TEST CİHAZLARI	9
5.MATERYAL VE METOD	12
5.1.Karışım Bilgileri.....	12
5.2.Karbon Lif Bilgileri	14
5.3.Beton	15
5.4.Numune Boyutları.....	16
5.5.Test Düzenekleri	17
6.BULGULAR ve TARTIŞMA	19
6.1.İlk Aşamada Üretilen Kontrol ve Hibrit Numunelere Ait 7 Günlük Statik Deney Sonuçları.....	19
6.2.İlk Aşamada Üretilen Kontrol ve Hibrit Numunelere Ait 7 Günlük Ağırlık Düşürme Test Sonuçları.....	21
6.3.İkinci Aşamada Üretilen Kontrol ve Lif Katkılı Numunelere Ait 28 Günlük Statik Deney Sonuçları	27
6.4.İkinci Aşamada Üretilen Kontrol ve Lif Katkılı Numunelere Ait 28 Günlük Ağırlık Düşürme Test Sonuçları.....	29
7.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKÇA.....	41

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 5.1. Darbe deneyleri için disk şeklindeki kontrol ve hibrit numune bilgileri.....	12
Tablo 5.2. Basınç ve yarma deneyleri için küp şeklindeki kontrol ve hibrit numune bilgileri	13
Tablo 5.3. Darbe deneyleri için disk şeklindeki kontrol ve lif katkılı numune bilgileri.....	13
Tablo 5.4. Basınç ve yarma deneyleri için küp şeklindeki kontrol ve lif katkılı numune bilgileri	14
Tablo 5.5. Karbon liflerin mekanik özellikleri	15
Tablo 6.1. İlk aşamada üretilen kontrol ve hibrit numunelere ait 7 günlük basınç dayanımı sonuçları	20
Tablo 6.2. İlk aşamada üretilen kontrol ve hibrit numunelere ait 7 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları.....	20
Tablo 6.3. İlk aşamada üretilen kontrol ve hibrit numunelere ait 7 günlük ağırlık düşürme test sonuçları	26
Tablo 6.4. İkinci aşamada üretilen kontrol ve lif katkılı numunelere ait 28 günlük basınç dayanımı sonuçları.....	28
Tablo 6.5. İkinci aşamada üretilen kontrol ve lif katkılı numunelere ait 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları	29
Tablo 6.6. 28 günlük ağırlık düşürme test sonuçları.....	36

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Karbon, Aramid, Bazalt ve Cam liflerin gerilme – şekil değiştirme ilişkileri	2
Şekil 3.1. Başlıca lif türleri.....	7
Şekil 4.1. Bölünmüş Hopkinson Basınç Çubuğu Test Düzeneği	9
Şekil 4.2. CEAST marka Charpy, ve İzod test cihazı	10
Şekil 4.3. Tekrarlı ağırlık düşürme test sistemi.....	10
Şekil 4.4. Aletli ağırlık düşürme test sistemi	11
Şekil 5.1. Karbon elyaf: a) 3 mm lif b) 12 mm lif.....	14
Şekil 5.2 Beton karışımında kullanılan çimento	15
Şekil 5.3 Çalışmada kullanılan agregalar a) İri agreg a) Orta agreg a) İnce agreg.....	16
Şekil 5.4 Küp numunelerde yarmada çekme dayanımı testi	17
Şekil 5.5 Aletli ağırlık düşürme cihazı a) deney düzeneği b) vurucu uç ve numune.....	18
Şekil 5.6 ELE marka beton basınç deney düzeneği	18
Şekil 6.1. İlk aşamada üretilen kontrol ve hibrit numunelere ait 7 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımı sonuçları	19
Şekil 6.2. Basınç deneylerinden sonra küp numuneler	21
Şekil 6.3. Yarma deneylerinden sonra küp numuneler	21
Şekil 6.4. Kontrol numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri.....	22
Şekil 6.5. H70/30 hibrit numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri.....	22
Şekil 6.6. H30/70 hibrit numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri.....	23
Şekil 6.7. H50/50 hibrit numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri.....	23
Şekil 6.8. Kontrol ve hibrit numunelerin karşılaştırıldığı ortalama kuvvet – deplasman ve enerji – deplasman grafikleri	24
Şekil 6.9. Kontrol ve hibrit numunelerin karşılaştırıldığı maksimum kuvvet değerleri.....	25
Şekil 6.10. Kontrol ve hibrit numunelerin karşılaştırıldığı pik enerji değerleri	25
Şekil 6.11. Kontrol ve hibrit numunelerinin 50 joule darbe etkisinde kırılma modları	26
Şekil 6.12. İkinci aşamada üretilen kontrol ve lif katkılı numunelere ait 28 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımı sonuçları.....	27
Şekil 6.13. Kontrol numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri.....	30
Şekil 6.14. 3_5 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri	30
Şekil 6.15. 3_10 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri	31
Şekil 6.16. 3_15 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri	31

Şekil 6.17. 12_5 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri	32
Şekil 6.18. 12_10 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri	32
Şekil 6.19. 12_15 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri	33
Şekil 6.20. Kontrol ve lif katkılı numunelerin karşılaştırıldığı ortalama kuvvet – deplasman grafikleri	33
Şekil 6.21. Kontrol ve lif katkılı numunelerin karşılaştırıldığı ortalama enerji – deplasman grafikleri	34
Şekil 6.22. Kontrol ve lif katkılı numunelerin karşılaştırıldığı ortalama maksimum kuvvet grafikleri	34
Şekil 6.23. Kontrol ve lif katkılı numunelerin karşılaştırıldığı ortalama pik enerji grafikleri	35
Şekil 6.24. Kontrol ve lif katkılı numunelerin 200 joule darbe etkisinde kırılma modları .	37
Şekil 6.25. Darbe testlerinden sonra numuneler	38

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ACI : American Concrete Institute

YÖK : Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı

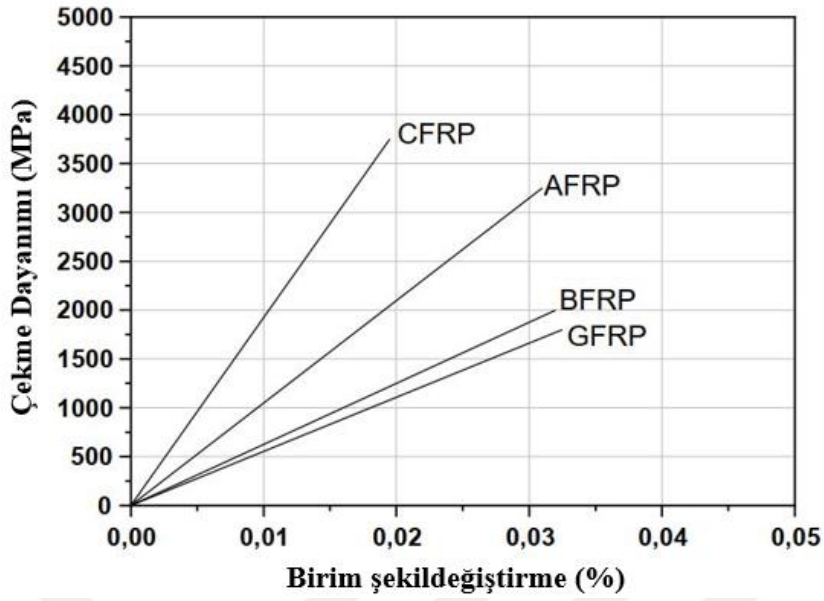


1. GİRİŞ

Bilindiği gibi beton gevrek bir malzeme olup [1] bu davranışı, basınç dayanımına kıyasla çok düşük olan çekme dayanımı ve ani kırılma eğilimiyle ilişkilendirilmektedir. Çoğu durumda betonun çekme dayanımı ihmal edilmektedir. Fakat günümüzde öyle mühendislik problemleri vardır ki betonun çekme dayanımının iyileştirilmesi ve çatlak gelişiminin kontrol altına alınması bir ihtiyaç haline gelmiştir. Nükleer santraller veya askeri yapılar gibi çok özel alanların yanı sıra artık günlük hayata da dokunan birçok konuda beton içerisine lif takviyesi pratik bir çözüm halini almıştır. Örnek olarak endüstriyel tesislerde sıklıkla titreşimlere maruz kalmakta olan zemin betonlarının bu tür dinamik yüklemeler altında çatlak gelişimi fiber lif takviyeleri ile kontrol altında tutulabilmektedir. Deprem yükleri etkisindeki betonarme elemanların tasarımı veya güçlendirilmesi amaçlı sismik performans iyileştirilmesinde polivinil alkol (PVA) liflerin etkili olduğu literatürde gösterilmiştir [2]. Benzer şekilde yüksek hızlı trenler gibi ulaşım sistemlerinin maruz kaldığı yoğun dinamik etkiler altında, agresif kimyasal koşullarda, termal şoklar etkisinde ve geleneksel donatıların yetersiz kalabileceğinin düşünüldüğü benzer durumlarda betonun bütünlüğünü korumak amacıyla lif takviyesi iyi bir çözüm olabilmektedir. Bu gibi problemlerin çözümü için yakın gelecekte betonarme elemanlarda lif takviyesinin ilgili konulardaki tasarım standartlarına girmesi ve hatta bazı durumlarda zorunluluk belirtilmesi şaşırtıcı olmayacaktır.

Lif takviyeli beton üretimi için çeşitli malzemelerden yapılmış lifler geliştirilmiştir. Paslanmaz veya karbon çelik lifler, polipropilen lifler (PP), cam lifler (GFRC), polivinil alkol lifler (PVA), karbon lifler, çeşitli narinlik oranlarında, dayanımda ve elastisite modülü değerlerinde üretilebilmektedir. Mikro çatlak oluşumunun veya rötre çatlaklarının azaltılması ve çatlak kontrolü, kırılma tokluğunun iyileştirilmesi, gevrek davranışın azaltılması, düşük hızlı darbe (çarpma) ya da yüksek hızlı darbe (patlama vb.) dayanımının iyileştirilmesi, sismik ya da diğer dinamik yükler altında enerji sönmlemenin artırılması, donma-çözülme direncinin artırılması, aşınma direncinin iyileştirilmesi, betonun çeşitli durumlarda bütünlüğünün korunması gibi çok farklı amaçlara göre uygun lif kullanımları söz konusudur.

Yapıldığı malzemeye bağlı olarak liflerin avantaj ve dezavantajları söz konusudur. Örneğin Şekil 1.1'de görüldüğü gibi karbon liflerin çekme dayanımları ve elastisite modülleri diğer lif türlerine kıyasla oldukça yüksektir.



Şekil 1.1 Karbon, Aramid, Bazalt ve Cam liflerin gerilme – şekil değiştirme ilişkileri [3, 4]

Karbon liflerin diğer avantajları aşınma dayanımının yüksek olması [5], UV ışınlarına karşı dirençli olmaları, elastisite modülünün öz ağırlığa oranının çok yüksek olması, sünme dayanımının yüksek olması, kimyasal ve çevresel etkilere karşı dirençlerinin yüksek olması gibi özellikleridir. Bu avantajları nedeniyle karbon lifler sismik güçlendirme uygulamalarında, korozyonun söz konusu olduğu köprüler ve diğer tarihi yapılarda, modern köprülerde, yüksek hızlı tren yollarında, havaalanı pistlerinde ve daha özel birçok alanda tercih edilmektedirler [6]. Dezavantajları için yüksek maliyetli olması, yangın duyarlılığı ve geri dönüşüm zorluğu gibi etmenler sayılabilir.

Lif takviyeli beton konusu günümüzde oldukça popüler bir konu olup her yıl global ölçekte spesifik olarak lif takviyeli betonlar üzerine birçok sempozyum ve kongreler düzenlenmektedir. Konu, modern ve sürdürülebilir verimli beton teknolojilerini geliştirmek amacıyla araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Yeni malzeme konseptleri, yapısal uygulamalar, karakterizasyon teknikleri, ilgili standartların güncellenmesi gibi başlıklar konu ile ilgili araştırmaların odağı haline gelmiştir [7].

Bu tez çalışmasında çeşitli oranlardaki karbon lif takviyesinin hem statik yükler altında hem de düşük hızlı darbe yükleri altında betonun mekanik davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Basınç ve çekme dayanımlarını belirlemeye yönelik olarak 100 mm ebatlarındaki küp numunelerin yanı sıra, dinamik deneyler için ACI 544.2R-89’da [8] önerildiği gibi 63.5 mm kalınlığında ve 152 mm çapında disk numuneler üretilmiştir. Düşük hızlı darbe yükleri altındaki davranışı irdelemek üzere çalışmada aletli

ağırlık düşürme deney düzeneği kullanılmıştır. Çalışmada 3 mm ve 12 mm uzunluk olmak üzere iki farklı narinliğe sahip karbon lifler kullanılmıştır. Beton hacmine bağlı olarak her iki lif türü için ayrı ayrı olmak üzere 5 kg/m^3 , 10 kg/m^3 , ve 15 kg/m^3 oranlarında karbon lifler kullanılarak altı adet karışım elde edilmiştir. Bunların yanısıra her iki lif türünü içeren üç adet hibrit karışım ile birlikte kontrol numuneleri de üretilmiştir. Düşük hızlı darbe testlerinin sonucunda alınan veriler ile zaman tanım alanında yük, deplasman ve enerji eğrileri elde edilerek karbon lif katkısının betonun dinamik tepkileri üzerindeki etkileri yorumlanmıştır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Lif takviyeli betonların çeşitli yüklemeler altındaki davranışı, durabilitesi, mekanik özellikleri gibi konular son yıllarda araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Lif olarak çoğunlukla bazalt, aramid, cam ve karbon esaslı malzemeler kullanılmaktadır.

Aduwenye ve ark. [9] çimento esaslı kompozitlerde fiber takviyesi olarak karbon fiberin kullanıldığı çalışmaları derlemişlerdir. Karbon lif takviyeli betonlar (CFRC) için tespit edilen gelişmiş mekanik özellikler, liflerin çatlakları kapatma ve arayüz geçiş bölgesini (ITZ) güçlendirme kabiliyetine atfedilmiştir. Çalışmada karbon lifli betonların donma-çözülme, asidik ortamlar ve yüksek sıcaklıklar gibi çeşitli çevresel şartlarda iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Basınç dayanımı üzerindeki etkisi konusunda ise araştırmacılar arasında kesin bir sonuca varılamamış olduğu belirtilmiştir.

Dündar ve ark. [5] bazalt ve karbon lif üzerine yaptıkları çalışmada hacimce %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarını esas alarak lif takviyeli beton karışımlar hazırlamışlardır. 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları için bazalt liflerin 0 ile 1.5 oranlar arasında etkili olduğunu, bunun üzerindeki oranlarda ise etkisiz kaldığını, karbon lifte ise aksine, sadece %2 oran için dayanımda artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Basınç dayanımında bazalt lifler daha etkili olurken eğilme dayanımında ise etkinin lif oranına bağlı olduğu görülmüştür. Lif kullanımı ile aşınma dayanımının da arttığı bildirilmiştir.

Akın ve ark. [10] Farklı uzunluktaki doğal liflerin prizmatik beton numunelerinin performansı üzerindeki etkilerini incelemek üzere ince kıyım, 0.75, 1.5, 3, ve 6 cm uzunluklarda mısır yaprağı lifleri kullanmışlardır. Lif boyutunun artması ile Eğilme ve Basınç dayanımlarının önce iyileştiğini, belirli değerlerden sonra ise zayıfladığını gözlemlemişlerdir. En iyi sonuçlar en kısa lif uzunluğu için elde edilirken en zayıf sonuçlar 6 cm lif uzunluğunda gözlenmiştir.

Alkayış ve Başıyigit [11] deneysel çalışmaları derleyerek betonun darbe davranışı için lif türü, lif şekli, ilave oranı, narinlik oranı gibi parametrelerin etkisini araştırmışlardır. Çelik liflerde lif miktarının kontrollü olarak artırmanın betonun darbe direncini ve diğer mekanik özelliklerini iyileştirebildiğini, çelik lifler için en uygun şeklin spiral ve kanca olduğunu, lif uzunluğunun darbe dayanımını iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Demirel ve Gönen farklı lif boyutunun kapilariteye etkisini inceledikleri bir çalışmada [12] karbon lif boyunun artmasının betonun basınç dayanımını düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Safiuddin ve ark. [13] karbon lifli kendiliğinden yerleşen betonların temel mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını incelemişlerdir. Karbon liflerin yüksek narinlik nedeniyle basınca karşı geometrik olarak dayanıklı olmadığı bildirilmiştir. Betonun hacimce %0 ile %1 arasındaki oranlarında kullanılan karbon lifler basınç dayanımını önemli oranda düşürürken köprüleme etkisiyle yarmada çekme dayanımını artırmıştır. Farklı su/çimento oranına sahip karışımlarda karbon lifli betonlar normal betona kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı sergilemiştir. Çalışmada optimum lif oranı %0.25 olarak elde edilmiştir. Bu oranda lifler daha iyi dağılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile, daha yüksek lif oranına sahip karışımlarda lif topaklanmasının olduğu bildirilmiştir.

Şahan ve Ünsal [14] çalışmalarında prizmatik beton (kiriş) numunelerinde çelik lif oranının eğilmede darbe davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Beton hacminin %0,25'i (19,5 kg/m³), %0,50'si (39 kg/m³) ve %0,75'i (58,5 kg/m³) oranları ile hazırladıkları çelik lif katkılı beton karışımları ile 100x100x500 mm boyutlarında kirişler üretmişlerdir. Aletli bir ağırlık düşürme test sistemi kullanarak gerçekleştirdikleri düşük hızlı darbe testlerinde, çelik lif takviyeli betonların kontrol betonlarına kıyasla ani kırılmaya karşı daha dirençli olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, çelik lif miktarı arttıkça dinamik yük altında çatlak genişliklerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Diğer bir çalışmada [15] küp ve prizmatik beton numunelerin darbe yükleri altındaki performansının polipropilen elyaf takviyesi ile iyileştirilebildiğini göstermişlerdir.

Karbon lifli betonun 200 °C ile 800 °C sıcaklıklar ve darbe yüklemesi gibi birleşik koşullar altındaki arasındaki statik ve dinamik performansını incelemek üzere yapılan bir çalışmada [16], karbon fiberlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisinin sınırlı olmasına karşın, yüksek sıcaklıklar ve dinamik yükleme altında numune hasarını önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Çalışma karbon lif takviyeli betonun (CFRC), patlama ve darbe yüküne maruz kalan yapılarda gevrek kırılma riskini azaltarak ani çökmeyi etkili bir şekilde önleyebildiği, kırılma öncesinde oldukça iyi enerji emme ve deformasyon kapasitesi olduğunu belirtmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, yüksek sıcaklık ve basıncın birleşik etkileri altında uygun beton karışım tasarımlarının geliştirilmesi için teorik destek ve teknik rehberlik sunmuştur.

Literatürde karbon lif takviyeli betonlar ile ilgili çok çeşitli çalışmalar varken, düşük hızlı darbe yüklemeleri etkisindeki davranışını irdeleyen araştırmalar kısıtlı miktarda kalmaktadır. Bu çalışmada, karbon lif ilaveli betonun statik yükler ve düşük hızlı darbe

yüklemeleri etkisindeki davranışı incelenirken lif narinliğinin performansa etkisi de araştırılmıştır.



3. YAPI TEKNOLOJİSİNDE KULLANILAN LİFLER

Karbon, cam ve bazalt lifler inorganik lifler olarak sınıflandırılmaktadır. Akrilik, naylon, polipropilen, polivinilalkol ve polyester lifler ise polimer lifler olarak adlandırılmaktadır [17]. Metalik lifler olarak en çok çelik lifler kullanılmaktadır. Bunlardan başka keten, pamuk, kenaf, jüt ve asbest lifler de doğal lifler olarak kullanılabilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Başlıca lif türleri [17, 18]

Elastisite modülünün yoğunluğuna oranı oldukça yüksek olan karbon lifler üstün termal stabilite, alkali direnci ve yorulma direnci ile öne çıkmaktadır. İlk önceleri sadece aydınlatma, filtrasyon ve izolasyon uygulamalarında kullanılmak üzere üretimine başlanan karbon fiberin ticari olarak tarihçesi yaklaşık yetmiş yıl öncesine dayanmaktadır [19]. İnsan saçına göre çok daha ince (5-7 mikron) olan karbon fiberler grafit ve elmas gibi karbon atomlarından oluşmaktadır. Üretim aşamasında poliakrilonitril elyaflar belirli sıcaklığa kadar ısıtılarak oksidasyon işlemine, daha sonra çok yüksek sıcaklıklarda

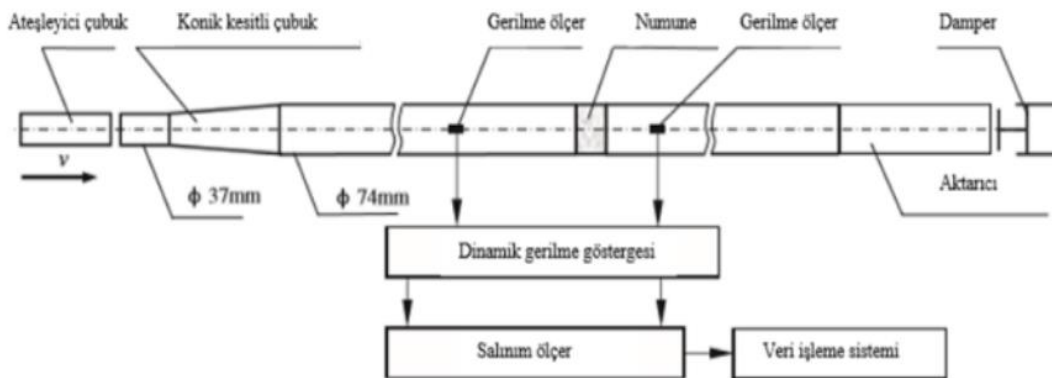
gerçekleşen karbonizasyon işlemine tabi tutulur [19]. Zift ve PAN (poliakrilonitril) olmak üzere betonda kullanılabilen iki tür karbon lif mevcuttur [20]. PAN esaslı karbon liflerin elastisite modülü ve çekme dayanımı çok yüksek olup inşaat mühendisliği alanında kullanımı sınırlıdır. Zift bazlı karbon lifler diğerine nazaran daha düşük elastisite modülüne sahip olup inşaat mühendisliği alanında daha yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. Ayrıca bu tür lifler kimyasal kararlılıkla birlikte, yüksek ısı ve aşınma direncine de sahiptir.



4. DİNAMİK TEST CİHAZLARI

Çarpma mekaniğinin uygulama alanı çok geniş olup esasen mühendislik mekaniğinin en zor konularından biri olduğu söylenebilir. Cern'deki çarpıştırıcıdan meteor hareketlerine, uzay araçlarından trafik kazalarına, tektonik plakaların çarpışarak ürettiği depremlerden tsunami tehdidine, balistik olaylardan cisim serbest düşmelerine kadar çok çeşitli mühendislik ve tasarım problemleri çarpışma mekaniği ile ilgili analizler gerektirebilmektedir [22]. İnşaat mühendisliği alanında ise daha spesifik olarak onlarca problem malzemenin veya yapısal elemanın darbe performansı için dinamik analizler gerektirebilir. Yüksek hızlı trenlerin raylarının altında çok tekrarlı darbe veya titreşime maruz kalan yapısal elemanlar, yüzlerce ton ağırlığa sahip uçakların iniş sırasında ilk temas anındaki darbelere maruz kalan havaalanı platformları, limana yanaşma sırasında deniz araçlarının ilk temas anında uyguladıkları çarpma yüklerine maruz kalan kıyı yapıları, endüstriyel binalarda ağır cisimlerin düşmesine maruz kalabilen zemin betonları, konut veya iş merkezi binalarının otopark olarak kullanılan bodrum katlarında araç çarpmalarına maruz kalan düşey taşıyıcı elemanlar, zemine çakılan kazık elemanlar, terör saldırısına maruz kalan yapılar gibi ve daha bir çok durumda malzemenin veya elemanın darbe yüklemeleri altındaki performansı hayati olabilmektedir [23].

Öte yandan bu senaryolarda olduğu gibi mühendislik problemlerinin çok çeşitli ve farklı nitelikte olması çok farklı dinamik test yöntemlerinin ve cihazlarının geliştirilmesini gerektirmiştir. Bölünmüş Hopkinson Basınç Çubuğu test yöntemi ve sistemi (Şekil 4.1) çok yüksek hızlarda dinamik deneyler gerçekleştirmek için geliştirilmiştir [24, 25]. Patlayıcı şokları veya balistik etkileri simüle etmek için uygun olsa da bu tarz çalışmalar için projektıl darbe testi veya balistik çarpma test metotları uygulanmaktadır.



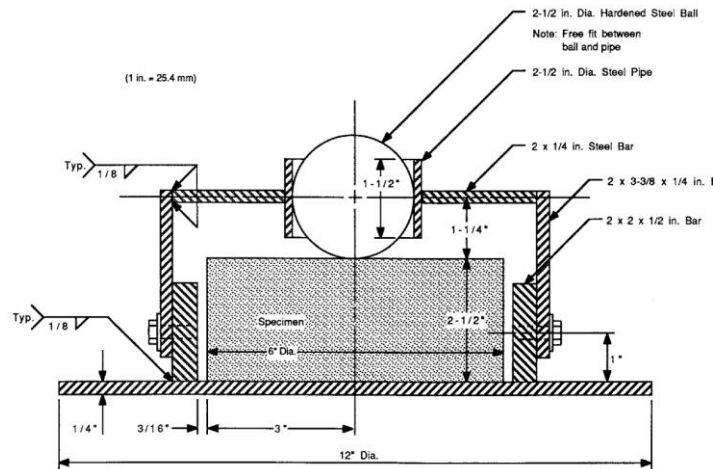
Şekil 4.1. Bölünmüş Hopkinson Basınç Çubuğu Test Düzenegi [24, 25]

Mühendislik malzemelerinin geliştirilmesi söz konusu olduğunda düşük hızlı darbe testleri önemli bir aşamayı teşkil etmektedir. Düşük hızlı darbe testleri için aletli ve aletsiz test düzenekleri geliştirilmiştir. Aletsiz test düzenekleri ile yapılan deneylerde alınan veriler çok kısıtlı miktardadır. Charpy ve İzod testleri (Şekil. 4.2) bu tür test sistemlerinden olup sarkaç tipli testlerdir [26]. Charpy test düzeneği modifiye edilerek çeşitli yazılım ve donanım ilavesiyle aletli test sistemine geçilebilmektedir.



Şekil 4.2. CEAST marka Charpy, ve İzod test cihazı [26]

Tekrarlı ağırlık düşürme testi de aletsiz bir test yöntemi olup bu metotla sadece ilk çatlama anındaki ve tamamen kırılma anındaki toplam darbe enerjisi miktarı hesaplanmaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Tekrarlı ağırlık düşürme test sistemi

Bu tez çalışmasında faydalanılmış olan aletli ağırlık düşürme test sistemi (Şekil 4.4) ise birkaç milisaniye süren tek bir çarpma olayına ait kuvvet - zaman grafiğini hesaplayarak buradan deplasman - zaman ve enerji - zaman eğrilerini verebilmektedir. Numune ile temas eden vurucu uç noktasal, çizgisel veya istenilen çapta yarı silindirik geometrilerde olabilmektedir. Ağırlık düşürme yüksekliğinin ayarlanabilir olması yükleme hızının da ayarlanmasına olanak verir. Benzer şekilde düşürülecek ağırlık miktarı da ayarlanabilmektedir. Bu şekilde ağırlık ve yükseklik kombinasyonları ile istenilen darbe enerji düzeyi elde edilebilir.



Şekil 4.4. Aletli ağırlık düşürme test sistemi [27]

5. MATERYAL VE METOD

Çalışmanın bu bölümü, lif takviyeli numuneler için karışım bilgileri, çalışmada kullanılan karbon liflerin özellikleri, beton karışım oranları, numune geometrileri ve test düzenekleri hakkında bilgileri içermektedir.

5.1. Karışım Bilgileri

Çalışmada Portland çimentolu normal betona ilave edilmek üzere 3 mm ve 12 mm uzunluğa sahip iki farklı narinlikte karbon lifler kullanılmıştır. Deneysel çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada narinlik oranlarının davranışa etkisini inceleyerek elde edilecek sonuçlara göre tez çalışmasına yön vermek amacıyla her iki lif tipinin kullanıldığı hibrit numuneler üretilmiş, 7 gün suda bekletildikten sonra statik ve dinamik deneylere geçilmiştir. Bu aşamada, hacimce 5 kg/m³ lif içeriği ile her iki tipteki lifler çeşitli oranlarda birlikte kullanılarak narinlik bakımından hibrit lif takviyeli karışımlar elde edilmiştir. H70/30 isimli hibrit numunelere 3 mm ve 12 mm'lik liflerden sırasıyla toplam lif miktarının %70'i ve %30'u ilave edilmiştir. H30/70 için ise benzer şekilde lifler sırasıyla %30 ve %70 oranlarında ilave edilmiştir. Her iki tipteki lifler %50 oranında karışıma ilave edilerek H50/50 isimli hibrit numuneler elde edilmiştir. Çizelge 5.1'de darbe deneyleri için üretilen disk şeklindeki numunelere ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 5.1. Darbe deneyleri için disk şeklindeki kontrol ve hibrit numune bilgileri

Grup İsmi	Lif Tipi	Lif Oranı	Lif Miktarı	Adet
Kontrol	-	-	-	6
H70/30	3 mm	5 kg/ m ³	4.0 gram	3
	12 mm		1.7 gram	
H30/70	3 mm	5 kg/ m ³	1.7 gram	3
	12 mm		4.0 gram	
H50/50	3 mm	5 kg/ m ³	2.85 gram	3
	12 mm		2.85 gram	

Çizelge 5.2'de ise statik basınç ve yarma deneyleri için üretilen küp şeklindeki numunelere ait bilgiler verilmektedir. Uygun darbe enerjisini deneme yanılma yolu ile bulmak üzere kontrol numunelerinden fazla miktarda üretilmiştir.

Tablo 5.2. Basınç ve yarma deneyleri için küp şeklindeki kontrol ve hibrit numune bilgileri

Grup İsmi	Lif Tipi	Lif Oranı	Lif Miktarı	Adet
Kontrol	-	-	-	6
H70/30	3 mm 12 mm	5 kg/ m ³	3.5 gram 1.5 gram	6
H30/70	3 mm 12 mm	5 kg/ m ³	1.5 gram 3.5 gram	6
H50/50	3 mm 12 mm	5 kg/ m ³	2. 5 gram 2. 5 gram	6

Beton karışımları için TS 802 [28], lif katkısı için TS 10514 [29] standartları dikkate alınmıştır. Basınç deneyleri TS EN 12390-1 ve TS EN 12390-3'e [30, 31] uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada ilk aşamadaki hibrit örneklerin aksine 3 mm ve 12 mm lif tipleri için ayrı ayrı olmak üzere 5 kg/m³, 10 kg/m³ ve 15 kg/m³ lif dozajlarını içeren karışımlar elde edilmiştir. Darbe deneyleri için disk numune isimleri ve içerdikleri lif tipi ile özellikleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Darbe deneyleri için disk şeklindeki kontrol ve lif katkılı numune bilgileri

Grup İsmi	Lif Tipi	Lif Oranı	Lif Miktarı	Adet
Kontrol	-	-	-	6
3_5	3 mm	5 kg/ m ³	5.7 gram	3
3_10	3 mm	10 kg/ m ³	11.4 gram	3
3_15	3 mm	15 kg/ m ³	17.1 gram	3
12_5	12 mm	5 kg/ m ³	5.7 gram	3
12_10	12 mm	10 kg/ m ³	11.4 gram	3
12_15	12 mm	15 kg/ m ³	17.1 gram	3

Çizelge 5.4'te ise basınç ve yarma deneyleri için küp şeklindeki kontrol ve lif katkılı numune bilgileri verilmiştir. Uygun darbe enerjisini deneme yanılma yolu ile bulmak üzere kontrol numunelerinden fazla miktarda üretilmiştir.

Tablo 5.4. Basınç ve yarma deneyleri için küp şeklindeki kontrol ve lif katkılı numune bilgileri

Grup İsmi	Lif Tipi	Lif Oranı	Lif Miktarı	Adet
Kontrol	-	-	-	6
3_5	3 mm	5 kg/ m ³	5 gram	6
3_10	3 mm	10 kg/ m ³	10 gram	6
3_15	3 mm	15 kg/ m ³	15 gram	6
12_5	12 mm	5 kg/ m ³	5 gram	6
12_10	12 mm	10 kg/ m ³	10 gram	6
12_15	12 mm	15 kg/ m ³	15 gram	6

5.2. Karbon Lif Bilgileri

Çalışmada kullanılan karbon lifler (Şekil 5.1), DostKimya End. Ham. Ltd. Şti.'den [32] temin edilmiş olup teknik özellikleri Çizelge 5.5'te verilmiştir.



a)



b)

Şekil 5.1. Karbon elyaf: a) 3 mm lif b) 12 mm lif [32]

Tablo 5.5. Karbon liflerin mekanik özellikleri

Çekme Dayanımı	3800 MPa
Elastisite Modülü	228 GPa
Elektrik İletkenliği	0,00155 ohm-cm
Özgül Ağırlık	1,81 gr/cc
Elyaf Çapı	7,2 mikron
Karbon Yüzdesi	%95
Elyaf Uzunluğu	3 mm – 12 mm

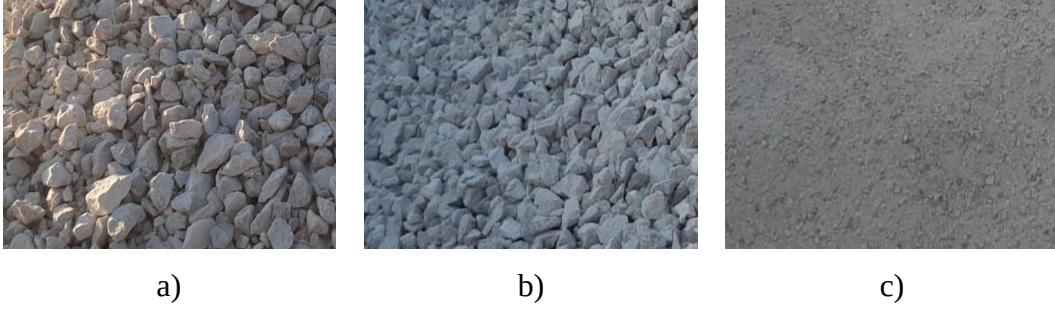
5.3. Beton

Çalışmada, Oyak Çimento firmasından tedarik edilen Starcem EN 197-1: 2011 CEM IV/ B 32,5 N çimentosu kullanılmıştır (Şekil 5.2). Tedarikçi tarafından, çimento bileşeninde %45-64 oranlarında klinker, %36-55 oranlarında puzolan ve priz düzenleyici olarak da kalsiyum sülfat bulunduğu belirtilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı 32.5 MPa olarak belirtilmiş olup düşük karbon salınımı ve yüksek işlenebilirliğe sahiptir. Çimentonun özgül ağırlığı 2.85 g/cm^3 olarak belirtilmiştir.



Şekil 5.2 Beton karışımında kullanılan çimento

Bunun yanı sıra deneysel çalışmada karışım suyu için Adıyaman ili merkezindeki şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan iri ve orta agregaların özgül ağırlıkları 2650 kg/m^3 olup, Adıyaman ili Kömür Belediyesi'ne bağlı Tercih Mermer Taş Ocağı'ndan alınmıştır. Maksimum dane çapı 22 mm'dir (Şekil 5.3). İnce agreganın özgül ağırlığı 2700 kg/m^3 'tür.



Şekil 5.3 Çalışmada kullanılan agregalar a) İri agrega b) Orta agrega c) İnce agrega

Yapılan deneyde beton karışımı içinde yer alan agreganın %65'i iri ve orta kırmataş, % 35'i ince kumdur.

Sahada sıva karıştırıcısı matkap ucuyla karıştırılarak hazırlanan taze beton kalıplara konulduktan sonra vibratör ve tokmak yardımıyla sıkıştırılması sağlanmıştır. Betonun muhtevası Çizelge 5.6'da verilmiştir. Su/Çimento oranı 0.48 olarak belirlenmiştir. Beton karışımları için TS 802 [28], lif katkısı için TS 10514 [29] standartları dikkate alınmıştır.

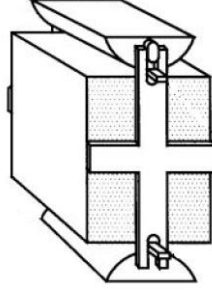
Tablo 5.6. Beton bileşenlerinin miktarları

Malzeme	Miktar (kg)
Çimento	12,5
Su	6
İnce Agrega (kum)	16,5
Orta Agrega	15,5
İri Agrega	14,5

5.4. Numune Boyutları

Amerikan Beton Enstitüsünün hazırlamış olduğu ACI_544_R_89 [8] isimli kılavuz lif katkılı betonların çeşitli özelliklerini belirlemek için geliştirilmiştir. Bu kılavuzda lif katkılı betonların darbe dayanımlarını belirlemek üzere 152 mm çapında ve 63.5 mm kalınlığında disk şeklindeki numunelerin hazırlanması önerilmektedir. Tez çalışmasında da bu öneriye uyularak darbe testleri için bu ölçülerde numuneler üretilmiştir. Statik basınç ve yarma deneyleri için ise 100 mm ebatlarında küpler üretilmiştir. 100 mm ebatlarındaki (s) küplerde yarma yükünden (P) yola çıkarak yarmada çekme dayanımları (σ) denklem (5.1)'deki gibi hesaplanmıştır (Şekil 5.4).

$$\sigma = 0.642 * P / s^2 \quad (5.1)$$



Şekil 5.4 Küp numunelerde yarmada çekme dayanımı testi

5.5. Test Düzenekleri

ACI 544.2R-89 lif katkılı betonların darbe davranışını incelemek üzere farklı deney düzenekleri önermiş olup bunlar tekrarlı ağırlık düşürme ve aletli ağırlık düşürme test düzenekleridir. Dördüncü bölümde belirtildiği gibi tekrarlı ağırlık düşürme testinde elde edilecek veri miktarı oldukça sınırlıdır. Bu tez çalışmasında düşük hızlı darbe yükleri altındaki davranışı irdelemek üzere Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarlarında bulunan Instron marka Ceast 9350 model aletli ağırlık düşürme deney düzeneği kullanılmıştır (Şekil 5.5). İlk aşamadaki darbe deneyleri için 16.235 kg ağırlık 31.4 mm yükseklikten düşürülerek numunelere 50 joule seviyesinde darbe enerjisi uygulanmıştır. İkinci aşama deneylerde ise 26.235 kg ağırlık 777 mm yükseklikten düşürülerek numunelere 200 joule seviyesinde bir darbe enerjisi uygulanmıştır.



a)



b)

Şekil 5.5 Aletli ağırlık düşürme cihazı a) deney düzeneği b) vurucu uç ve numune

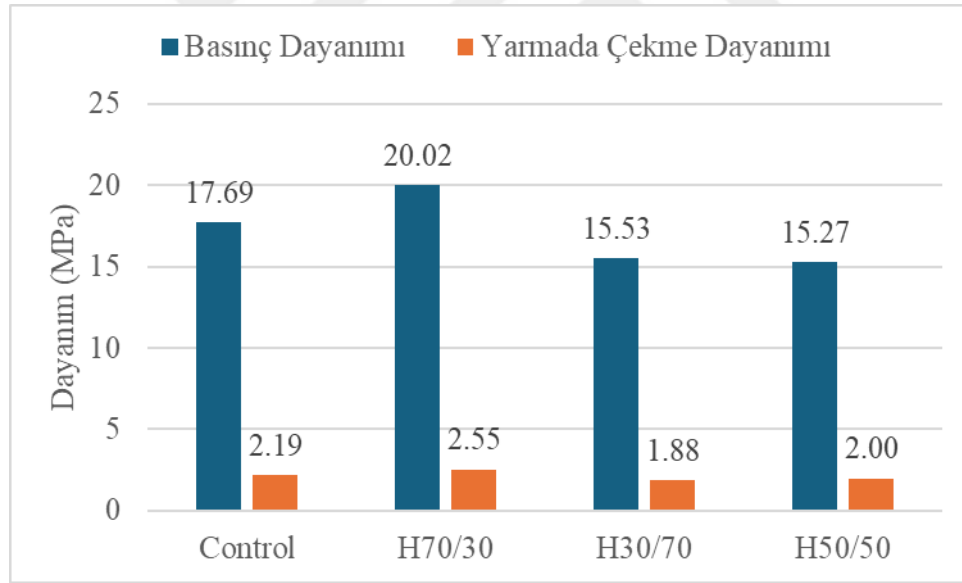
Statik basınç ve yarma deneyleri için ise yine yapı laboratuvarında bulunan ELE marka test cihazları kullanılmıştır (Şekil 5.6). Yükleme hızı basınç deneylerinde 4.5 kN/s olarak, yarma deneylerinde ise 0.5 kN/s olarak uygulanmıştır. Basınç ve yarmada çekme dayanımı deneyleri sırasıyla TS EN 12390-3 [31] ve TS EN 12390-6 [33] standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

6. BULGULAR ve TARTIŞMA

İlk aşamada üretilen kontrol ve hibrit numuneler 7 gün suda bekletildikten sonra yarı-statik basınç ve yarma deneyleri ile dinamik ağırlık düşürme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada üretilen numuneler ise 28 gün suda bekletildikten sonra deneylere geçilmiştir.

6.1. İlk Aşamada Üretilen Kontrol ve Hibrit Numunelere Ait 7 Günlük Statik Deney Sonuçları

Şekil 6.1’de 7 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımı sonuçları görselleştirilmiştir. H70/30 hibrit karışımının basınç ve yarmada çekme dayanımlarında kontrol karışımına nazaran sırasıyla %13.2 ve %16.4 oranında artış gözlenmiştir. Diğer hibrit karışımlarda basınç ve yarmada çekme dayanımları kontrol karışımlarına nazaran sırasıyla yaklaşık olarak %13 ve %11 oranlarında düşmüştür.



Şekil 6.1. İlk aşamada üretilen kontrol ve hibrit numunelere ait 7 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımı sonuçları

Şekil 6.1’de görselleştirilen 7 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımı değerleri sırasıyla Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.1. İlk aşamada üretilen kontrol ve hibrit numunelere ait 7 günlük basınç dayanımı sonuçları

Numune İsmi	Lif Miktarı kg/m^3	Yük (kN)	Dayanım (MPa)	Ortalama
Kontrol	-	157.4	15.74	17.69
		173.0	17.30	
		200.3	20.03	
H70/30	5 kg/m^3	216.5	21.65	20.02
		180.2	18.02	
		203.8	20.38	
H30/70	5 kg/m^3	150.0	15.0	15.53
		145.5	14.55	
		170.3	17.03	
H50/50	5 kg/m^3	161.3	16.13	15.27
		149.5	14.95	
		147.2	14.72	

Tablo 6.2. İlk aşamada üretilen kontrol ve hibrit numunelere ait 7 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları

Numune İsmi	Lif Miktarı kg/m^3	Yük (kN)	Dayanım (MPa)	Ortalama
Kontrol	-	35.2	2.26	2.19
		33.8	2.17	
		33.5	2.15	
H70/30	5 kg/m^3	40.5	2.60	2.55
		37.6	2.41	
		41.2	2.65	
H30/70	5 kg/m^3	28.6	1.84	1.88
		28.8	1.85	
		30.6	1.96	
H50/50	5 kg/m^3	28.9	1.86	2.00
		31.1	2.00	
		33.4	2.14	

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te sırasıyla basınç ve yarma deneylerinden sonra numunelerin toplu haldeki görselleri verilmiştir.



Şekil 6.2. Basınç deneylerinden sonra küp numuneler

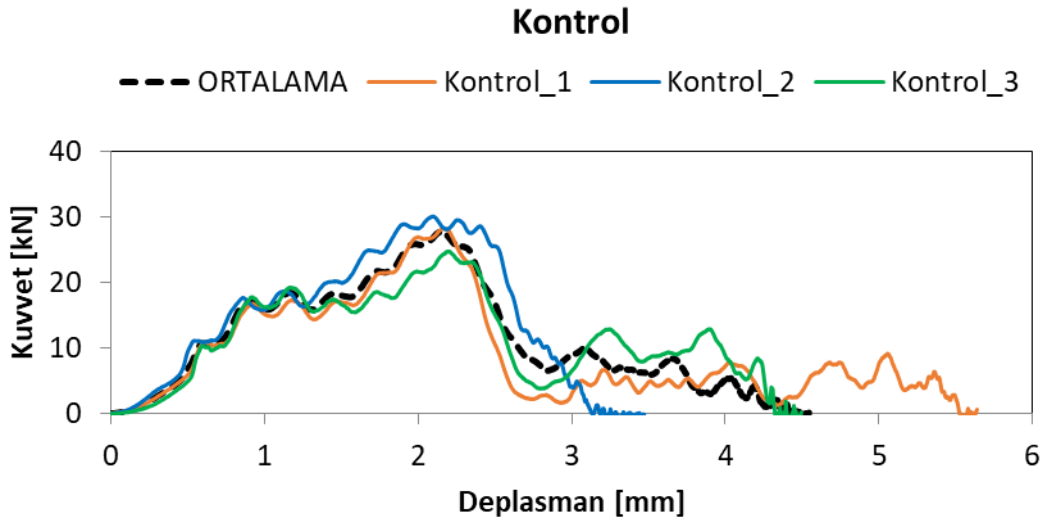


Şekil 6.3. Yarma deneylerinden sonra küp numuneler

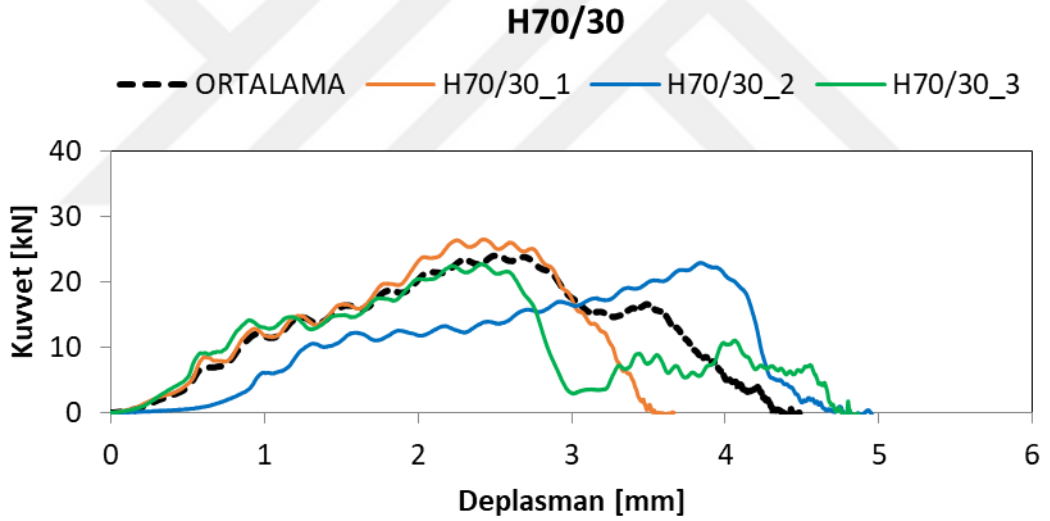
6.2. İlk Aşamada Üretilen Kontrol ve Hibrit Numunelere Ait 7 Günlük Ağırlık

Düşürme Test Sonuçları

İlk aşamada üretilen kontrol ve hibrit numuneler için aletli ağırlık düşürme test düzeneğinden elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri Şekil 6.4 – Şekil 6.7 arasında verilmiştir. Şekil 6.4'te üç adet kontrol numunesinin oldukça benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu üç eğrinin ortalaması alınmış ve grafik üzerinde kesikli siyah çizgi ile gösterilmiştir.

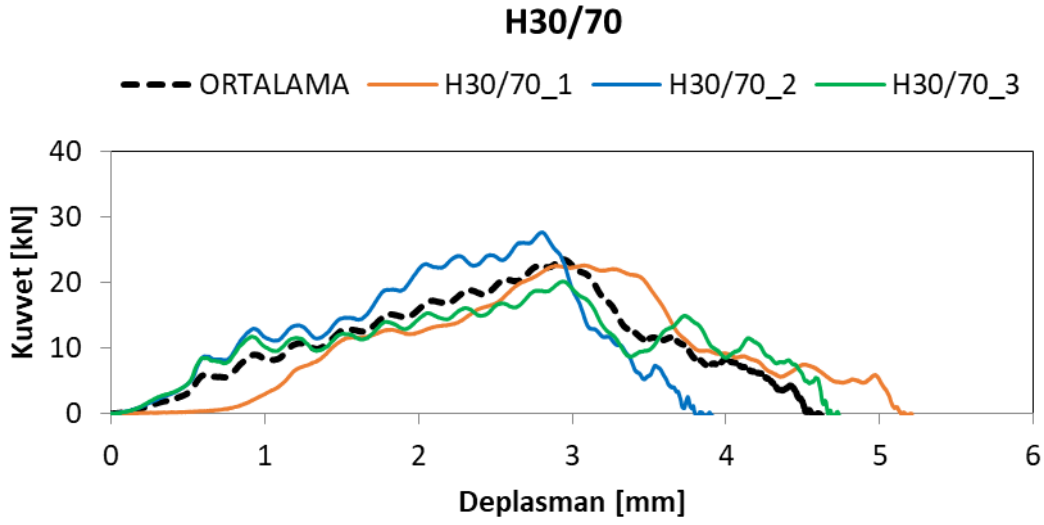


Şekil 6.4. Kontrol numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri



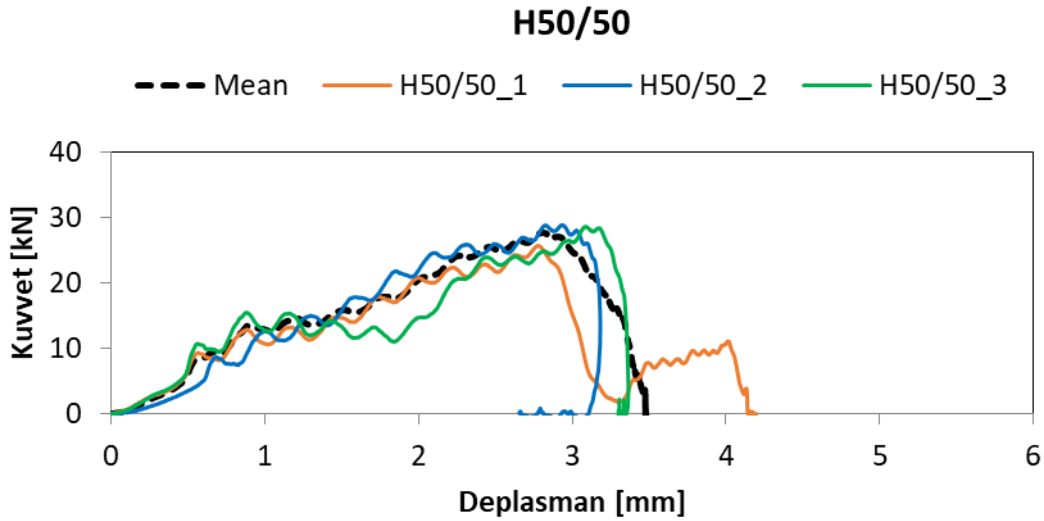
Şekil 6.5. H70/30 hibrit numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri

Şekil 6.5'te üç adet H70/30 numunesi için benzer eğriler elde edilmiştir. Bu üç eğrinin ortalaması alınarak grafik üzerinde kesikli siyah çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 6.6. H30/70 hibrit numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri

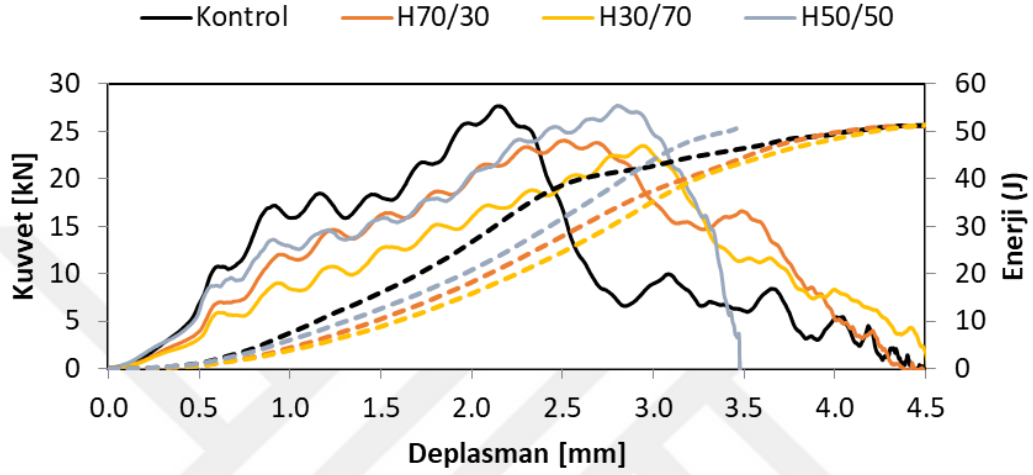
Şekil 6.6’da üç adet H30/70 numunesi için elde edilen eğrilerin benzer olduğu görülmektedir. Bu üç eğrinin ortalaması alınarak grafik üzerinde kesikli siyah çizgi ile gösterilmiştir. Benzer durum Şekil 6.7 için de geçerlidir.



Şekil 6.7. H50/50 hibrit numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri

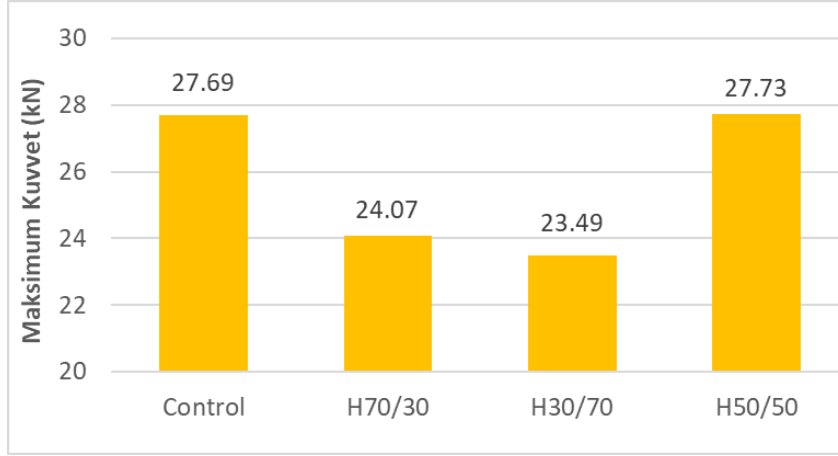
Her gruba ait ortalama kuvvet – deplasman ve enerji – deplasman eğrileri Şekil 6.8’da karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere kontrol numunelerinden lif ilaveli hibrit karışımlı H70/30 ve H30/70 numunelerine geçişte maksimum kuvvet sırasıyla %13.1

ve %15.2 oranlarında azalmıştır. H50/50 karışımında ise maksimum kuvvetin korunduğu görülmektedir. H70/30, H30/70, ve H50/50 hibrit numunelerinde pik enerji değerleri kontrol numunelerine göre sırasıyla %14.2, %10.5, ve %38.6 oranında artmıştır. Bu değerler lif katkısı ile betonun darbe yükleri altında davranışındaki iyileşmeyi göstermektedir.

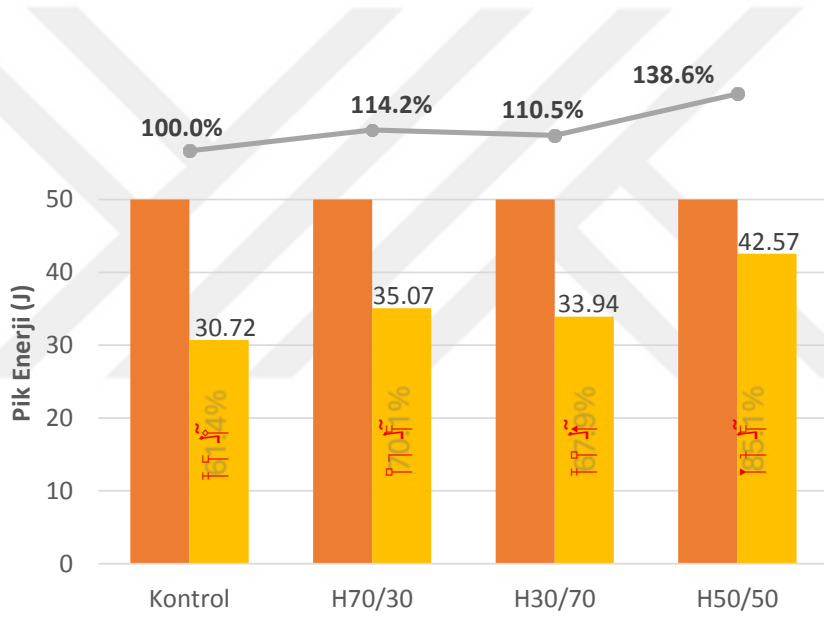


Şekil 6.8. Kontrol ve hibrit numunelerin karşılaştırıldığı ortalama kuvvet – deplasman ve enerji – deplasman grafikleri

Bu değerleri görsel olarak karşılaştırılmak amacıyla Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 hazırlanmıştır. Şekil 6.10’de H70/30, H30/70 ve H50/50 hibrit lif takviyeli karışımların enerji sönümlerlerinin kontrol numunelerine nazaran sırasıyla %14.2, %10.5, ve %38.6 oranında iyileştiği gözlenmiş olup H50/50 numunelerinin enerji sönümleme kapasitesindeki artış dikkat çekicidir [34]. Bu durum hibrit lif katkılı tasarımlarda lif karışım oranlarının önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.9. Kontrol ve hibrit numunelerin karşılaştırıldığı maksimum kuvvet değerleri



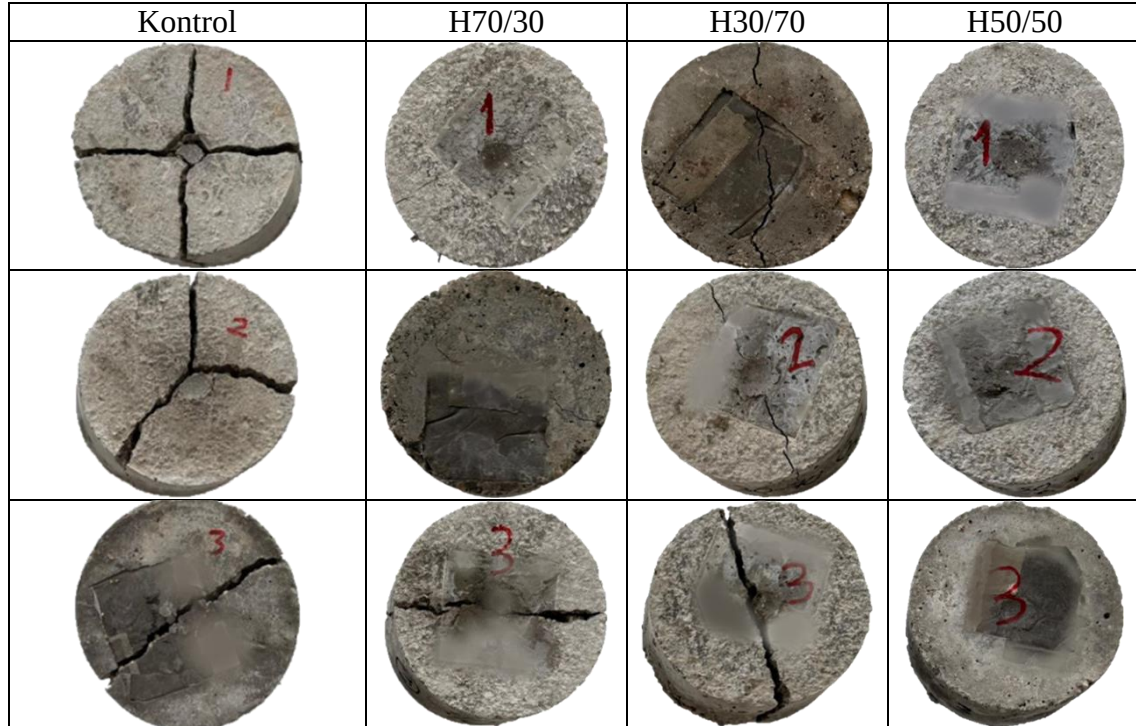
Şekil 6.10. Kontrol ve hibrit numunelerin karşılaştırıldığı pik enerji değerleri

Şekil 6.8-6.10 grafiklerine ait sayısal değerler Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3. İlk aşamada üretilen kontrol ve hibrit numunelere ait 7 günlük ağırlık düşürme test sonuçları

Numune İsmi	Lif Miktarı kg/m ³	Maksimum Kuvvet (N)	Ortalama (kN)	Pik Enerji (joule)	Ortalama (joule)
Kontrol	-	28217.25	27.69	30.32	30.72
		30093.79		32.80	
		24763.49		29.04	
H70/30	5 kg/m ³	26524.91	24.07	32.45	35.07
		22932.99		42.03	
		22760.30		30.74	
H30/70	5 kg/m ³	22633.67	23.49	29.36	33.94
		27676.16		39.87	
		20169.98		32.59	
H50/50	5 kg/m ³	25719.03	27.73	38.34	42.57
		28850.44		44.86	
		28620.19		44.50	

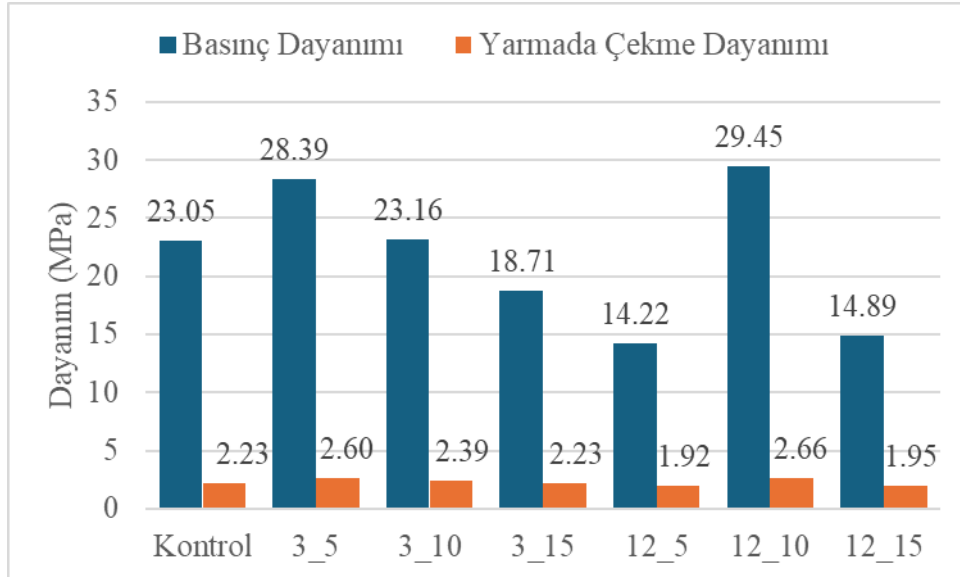
Şekil 6.11’de ise numunelerin darbe enerjisi altındaki kırılma modları görülmektedir. 50 joule darbe enerjisi etkisinde kontrol numuneleri iki, üç veya dört parçaya ayrılırken, lif katkısı ile H70/30 ve H30/70 numunelerinde hasar miktarı azalmış, birer numune haricinde numuneler bütünlüğünü koruyabilmiştir. H50/50 örneğinde ise hasarın oldukça azaldığı görülmektedir. Bu grupta tüm numuneler bütünlüğünü koruyabilmiştir.



Şekil 6.11. Kontrol ve hibrit numunelerinin 50 joule darbe etkisinde kırılma modları

6.3. İkinci Aşamada Üretilen Kontrol ve Lif Katkılı Numunelere Ait 28 Günlük Statik Deney Sonuçları

Şekil 6.12’de 28 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımı değerleri verilmiştir. 3 mm karbon liflerin 5 kg/m³ takviyesi ile basınç dayanımı kontrol numunelerine nazaran %23.1 oranında artmıştır. 10 kg/m³ lif miktarında basınç dayanımı kontrollere kıyasla korunmuş olsa da 15 kg/m³ lif miktarı %18.9’luk bir düşüşe neden olmuştur. 12 mm karbon lifler için en iyi sonuç 10 kg/m³’lük karışımlarda elde edilmiş olup basınç dayanımında %27.7’lik bir artış sağlanmıştır. 5 kg/m³ ve 15 kg/m³’lük lif miktarları ise basınç dayanımını sırasıyla %38.3 ve %35.4 oranlarında düşürmüştür. Literatürde karbon lif boyundaki artışın beton basınç dayanımını düşürdüğü belirtilmiştir [12]. 12_10 numunesi hariç diğer 12 mm’lik karışımlarda buna benzer bir sonuç görülmektedir. Karbon yerine doğal lif kullanılan başka bir çalışmada ise [10] lif miktarının artışıyla beton basınç dayanımının düştüğü belirtilmiştir. Grafikte 3 mm’lik karışımlarda buna benzer etki görülmektedir. Bununla birlikte karbon lif kullanımının beton basınç dayanımı üzerindeki etkisinin sınırlı miktarda olduğunu [16], karbon liflerin belirli oranlarda kullanılması halinde ise beton basınç dayanımını artırabildiğini belirten başka çalışmalar da mevcuttur [5, 13].



Şekil 6.12. İkinci aşamada üretilen kontrol ve lif katkılı numunelere ait 28 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımı sonuçları

Yarmada çekme dayanımları için de benzer ilişkiler söz konusudur. 3 mm karbon liflerin 5 kg/m³ takviyesi ile çekme dayanımı kontrol numunelerine nazaran %16.3 oranında artmıştır. 10 kg/m³ lif miktarında bu artış %7.5 oranında gerçekleşmiştir. 15 kg/m³ lif miktarında ise çekme dayanımı için kontrol numuneleri ile oldukça yakın değerler elde edilmiştir. 12 mm karbon lifler için en iyi sonuç 10 kg/m³'lük karışımlarda elde edilmiş olup çekme dayanımında %19.1'lik bir artış sağlanmıştır. 5 kg/m³ ve 15 kg/m³'lük lif miktarları ise çekme dayanımını sırasıyla %13.8 ve %12.4 oranlarında düşürmüştür. Basınç ve çekme dayanımları için en belirgin iyileşmelerin 3 mm lifler için 5 kg/m³, 12 mm lifler için ise 10 kg/m³ lif miktarında olduğu gözlenmektedir. 28 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımı sonuçlarını yansıtan Şekil 6.12'ye ait sayısal değerler sırasıyla Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Tablo 6.4. İkinci aşamada üretilen kontrol ve lif katkılı numunelere ait 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

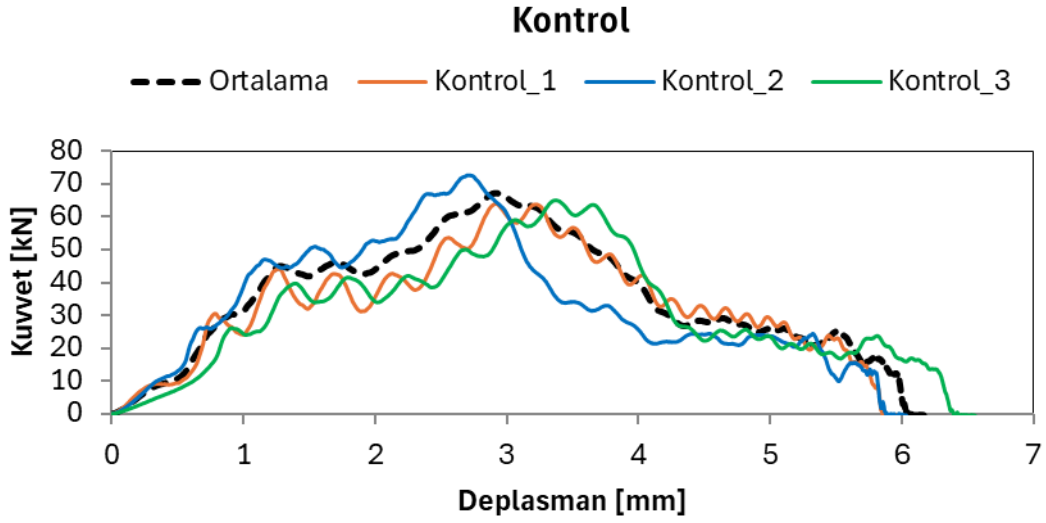
Numune İsmi	Lif Miktarı kg/m ³	Yük (kN)	Dayanım (MPa)	Ortalama
Kontrol	-	247.3	24.73	23.05
		212.1	21.21	
		232.2	23.22	
3_5	5 kg/m ³	297.9	29.79	28.39
		270.1	27.01	
		283.6	28.36	
3_10	10 kg/m ³	246.5	24.65	23,16
		221.8	22.18	
		226.4	22.64	
3_15	15 kg/m ³	197.2	19.72	18,71
		194.2	19.42	
		169.8	16.98	
12_5	5 kg/m ³	139.1	13.91	14,22
		143.5	14.35	
		144.0	14.40	
12_10	10 kg/m ³	283.6	28.36	29,45
		296.1	29.61	
		303.7	30.37	
12_15	15 kg/m ³	145.0	14.50	14,89
		148.8	14.88	
		153.0	115.30	

Tablo 6.5. İkinci aşamada üretilen kontrol ve lif katkılı numunelere ait 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları

Numune İsmi	Lif Miktarı kg/m ³	Yük (kN)	Dayanım (MPa)	Ortalama
Kontrol	-	34.3	2.20	2.23
		30.3	1.95	
		39.5	2.54	
3_5	5 kg/m ³	38.2	2.45	2.60
		39.6	2.54	
		43.5	2.79	
3_10	10 kg/m ³	38.3	2.46	2.39
		35.5	2.28	
		38.1	2.45	
3_15	15 kg/m ³	32.5	2.09	2.23
		34.9	2.24	
		36.7	2.36	
12_5	5 kg/m ³	28.2	1.81	1.92
		29.4	1.89	
		32.3	2.07	
12_10	10 kg/m ³	42.8	2.75	2.66
		39.6	2.54	
		41.7	2.68	
12_15	15 kg/m ³	30.5	1.96	1.95
		28.9	1.86	
		31.7	2.04	

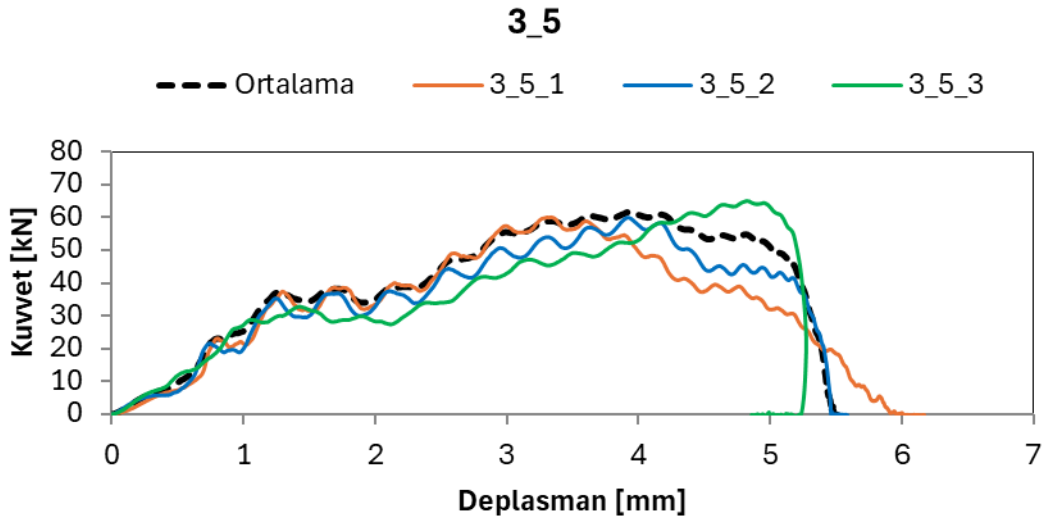
6.4. İkinci Aşamada Üretilen Kontrol ve Lif Katkılı Numunelere Ait 28 Günlük Ağırlık Düşürme Test Sonuçları

İkinci aşamada üretilen kontrol ve hibrit numuneler için aletli ağırlık düşürme test düzeneğinden elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri Şekil 6.13 – Şekil 6.19 arasında verilmiştir. Şekil 6.13'te üç adet kontrol numunesinin oldukça benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu üç eğrinin ortalaması alınmış ve grafik üzerinde kesikli siyah çizgi ile gösterilmiştir.



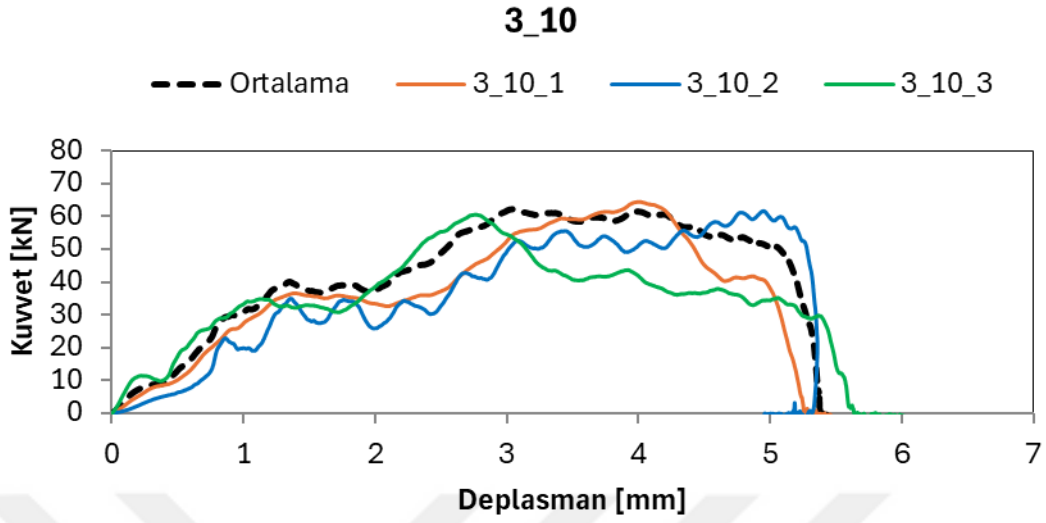
Şekil 6.13. Kontrol numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri

Şekil 6.14'te 3 mm karbon liflerin 5 kg/m^3 oranında kullanıldığı üç adet 3_5 numunesi için benzer eğriler elde edildiği görülmektedir. Bu üç eğrinin ortalaması alınarak grafik üzerinde kesikli siyah çizgi ile gösterilmiştir.



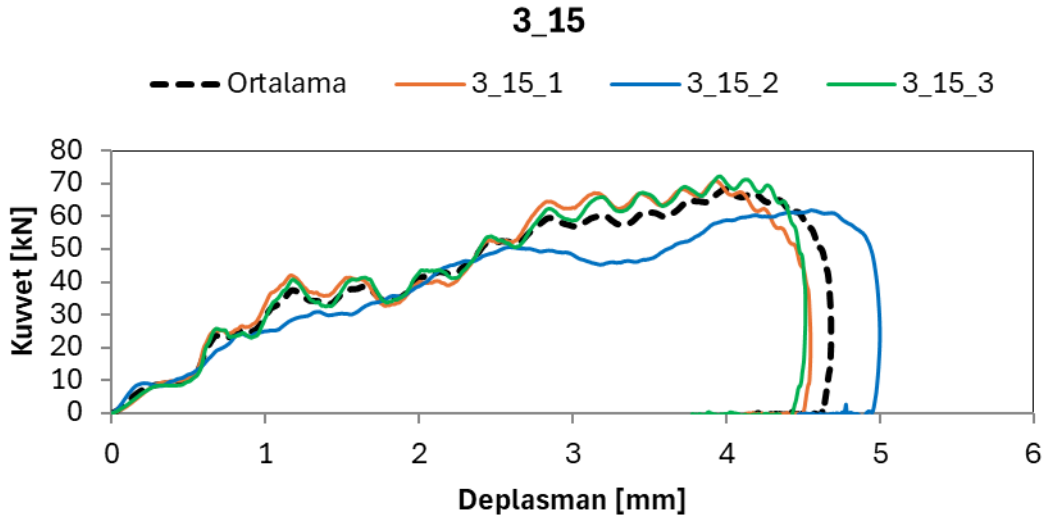
Şekil 6.14. 3_5 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri

Şekil 6.15'te üç adet 3_10 numunesi için elde edilen eğrilerin benzer olduğu görülmektedir. Bu üç eğrinin ortalaması alınarak grafik üzerinde kesikli siyah çizgi ile gösterilmiştir.



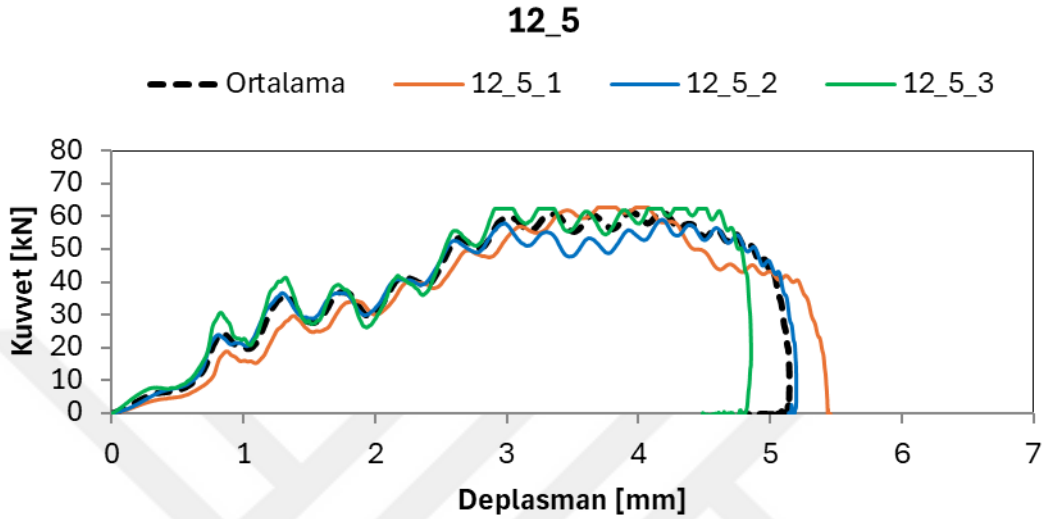
Şekil 6.15. 3_10 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri

Şekil 6.16’da 3 mm liflerin 15 kg/m^3 oranında kullanıldığı üç adet 3_15 numunesi için elde edilen eğrilerin benzer olduğu görülmektedir. Bu üç eğrinin ortalaması grafik üzerinde kesikli siyah çizgi ile gösterilmiştir.



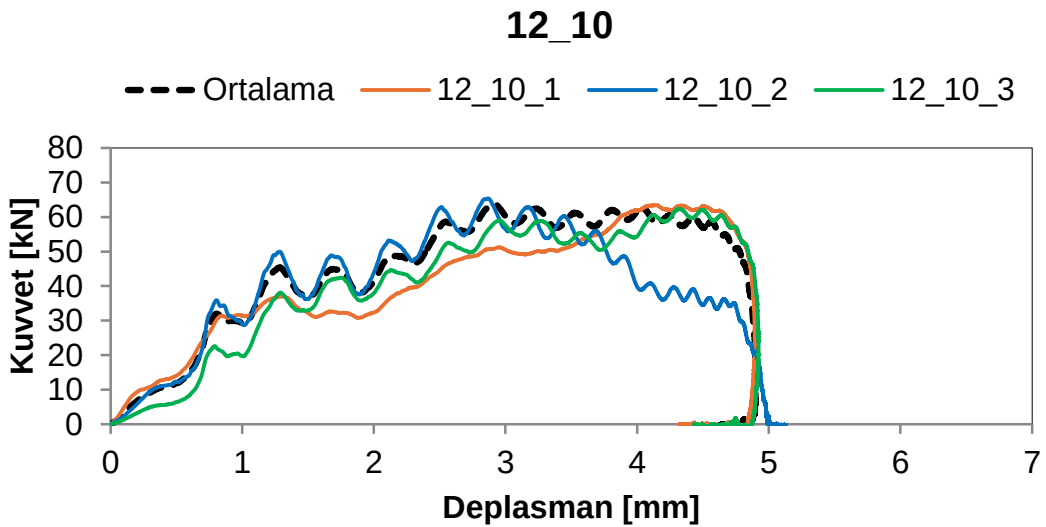
Şekil 6.16. 3_15 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri

Şekil 6.17’de 12 mm liflerin 5 kg/m³ oranında kullanıldığı üç adet 12_5 numunesi için elde edilen eğrilerin benzer olduğu görülmektedir. Bu üç eğrinin ortalaması grafik üzerinde kesikli siyah çizgi ile gösterilmiştir.



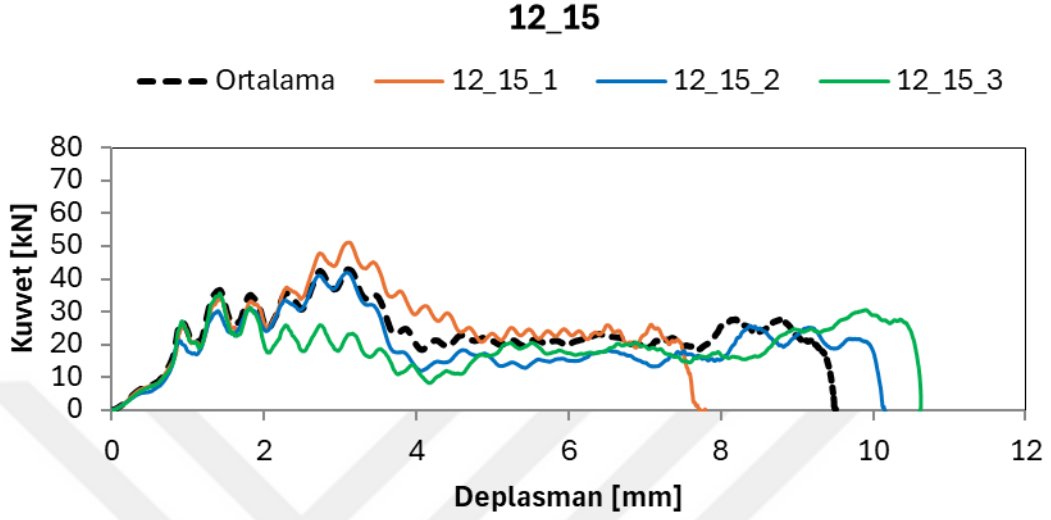
Şekil 6.17. 12_5 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri

Şekil 6.18’de 12 mm liflerin 10 kg/m³ oranında kullanıldığı üç adet 12_10 numunesi için elde edilen eğrilerin benzer olduğu görülmektedir. Bu üç eğrinin ortalaması grafik üzerinde kesikli siyah çizgi ile gösterilmiştir.



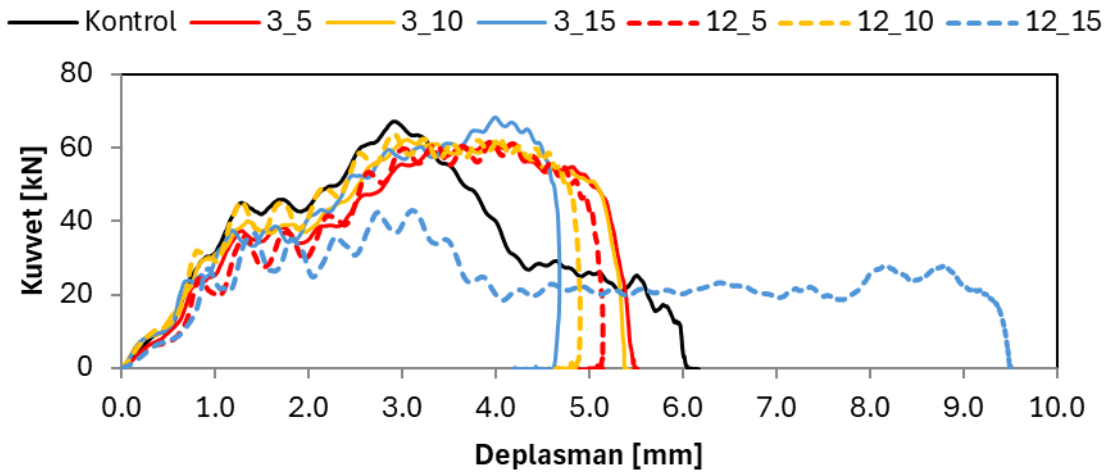
Şekil 6.18. 12_10 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri

Şekil 6.19’da 12 mm liflerin 15 kg/m³ oranında kullanıldığı üç adet 12_15 numunesi için elde edilen eğrilerin benzer olduğu görülmektedir. Bu üç eğrinin ortalaması grafik üzerinde kesikli siyah çizgi ile gösterilmiştir.



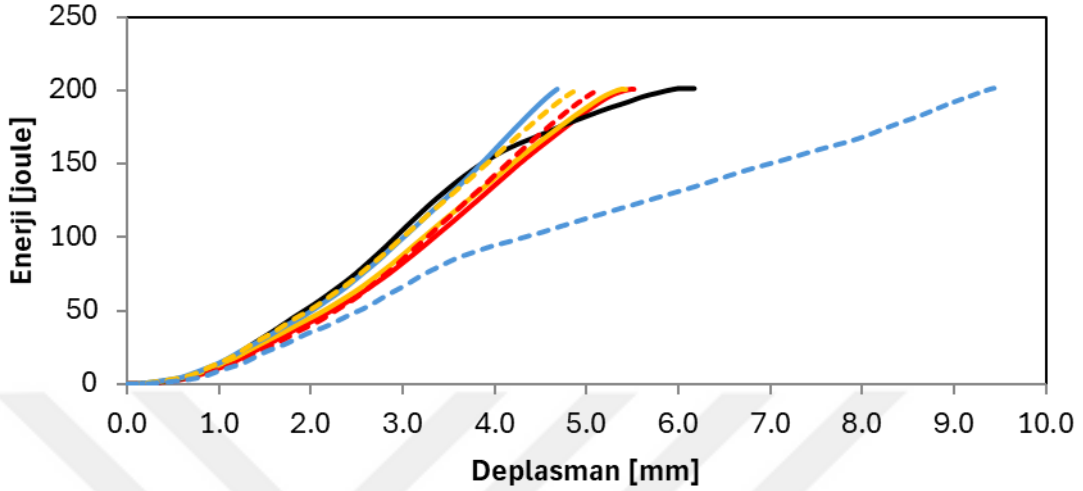
Şekil 6.19. 12_15 numuneleri için elde edilen kuvvet – deplasman grafikleri

Şekil 6.13 – Şekil 6.19’te elde edilen her gruba ait ortalama kuvvet – deplasman eğrileri Şekil 6.20’de karşılaştırılmıştır. Şekil 6.20’de görüldüğü üzere kontrol numunelerinden lif katkılı numunelere geçişte maksimum kuvvet genel olarak azalmış olup sadece 3_15 karışımında maksimum kuvvet korunmuş hatta %1.7 oranında iyileşme görülmüştür.



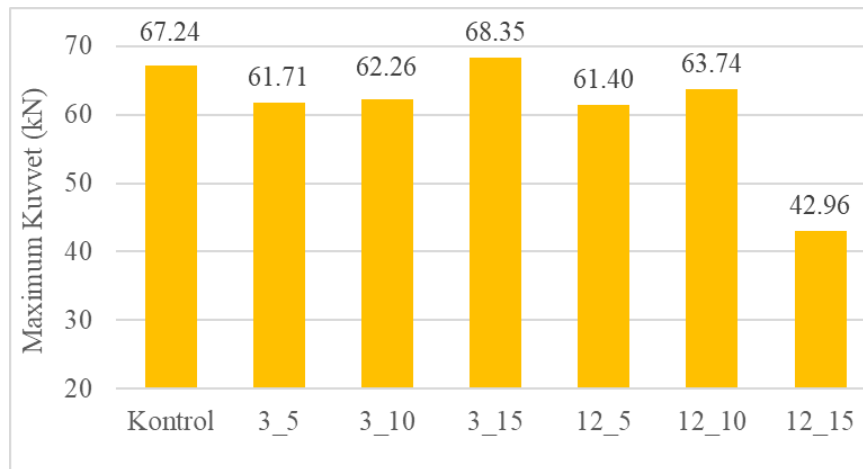
Şekil 6.20. Kontrol ve lif katkılı numunelerin karşılaştırıldığı ortalama kuvvet – deplasman grafikleri

Şekil 6.13 – Şekil 6.19’te elde edilen her gruba ait ortalama enerji – deplasman eğrileri Şekil 6.21’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.21. Kontrol ve lif katkılı numunelerin karşılaştırıldığı ortalama enerji – deplasman grafikleri

Maksimum kuvvet ve pik enerji değerlerini görselleştirmek amacıyla Şekil 6.22 ve Şekil 6.23 hazırlanmıştır. Statik dayanımlarda öne çıkan 12_10 karışımı ise 12 mm lif grubunda en iyi performansı göstermiş olsa da darbe yükü altında maksimum kuvvet kontrol karışımlarına göre %5.2 oranında düşmüştür. Benzer şekilde statik dayanımlarda optimum karışım olarak öne çıkan 3_5 karışımında maksimum kuvvet %8.2 oranında azalmıştır.



Şekil 6.22. Kontrol ve lif katkılı numunelerin karşılaştırıldığı ortalama maksimum kuvvet grafikleri

12_15 hariç tüm lif takviyeli karışımlarda enerji artışı görülmektedir. En yüksek artış %62.1 ile 3_15 numunelerinde görülmüştür. Genel olarak 3 mm lif kullanılan karışımların 12 mm lifli betonlara göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. 12_15 karışımlarının enerji sönümlemesi kontrol karışımlarının %55'ine düşmüştür.



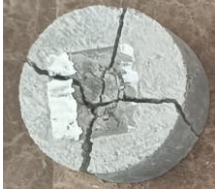
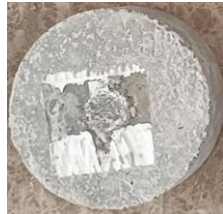
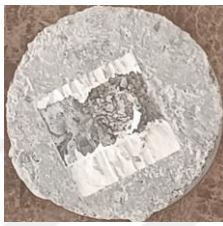
Şekil 6.23. Kontrol ve lif katkılı numunelerin karşılaştırıldığı ortalama pik enerji grafikleri

Şekil 6.13-6.23'teki maksimum kuvvet ve enerji grafiklerine ait sayısal değerler Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.6. 28 günlük ağırlık düşürme test sonuçları

Numune İsmi	Lif Miktarı kg/m ³	Maksimum Kuvvet (N)	Ortalama (kN)	Pik Enerji (joule)	Ortalama (joule)
Kontrol	-	63,963.71	67,237.1	93.57	103.87
		72,713.24		107.18	
		65,034.37		110.83	
3_5	5 kg/m³	60095.49	61714.9	106.95	137.98
		59980.36		132.06	
		65068.91		174.94	
3_10	10 kg/m³	64493.28	62263.7	145.94	138.23
		61707.24		178.86	
		60590.53		89.89	
3_15	15 kg/m³	70781.23	68353.8	164.80	168.32
		61937.49		175.68	
		72252.74		164.50	
12_5	5 kg/m³	62743.38	61396.4	124.83	137.43
		59093.89		150.03	
		62351.95		137.43	
12_10	10 kg/m³	63491.69	63741.1	155.82	142.72
		65391.26		105.36	
		62340.43		166.96	
12_15	15 kg/m³	51184.78	42961.0	80.90	57.17
		42009.28		70.49	
		35688.89		20.12	

Şekil 6.24'te numunelerin darbe enerjisi altındaki kırılma modları görülmektedir. 200 joule darbe enerjisi etkisinde kontrol numuneleri üç veya dört parçaya ayrılırken, lif katkısı ile numuneler genel olarak bütünlüğünü koruyabilmiştir. En az hasar 3_15, 12_5 ve 12_10 gruplarında görülmüştür.

Kontrol			
3_5			
3_10			
3_15			
12_5			
12_10			
12_15			

Şekil 6.24. Kontrol ve lif katkılı numunelerin 200 joule darbe etkisinde kırılma modları

Şekil 6.25'te ise Şekil 6.24'te teker teker verilen numunelerin darbe enerjisi altındaki kırılma modları bir arada gösterilmiştir.



Şekil 6.25. Darbe testlerinden sonra numuneler



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada karbon lif ilaveli betonun darbe yükleri altındaki davranışını irdelemek üzere statik ve dinamik deneyler yapılmıştır. Disk numuneler üzerinde aletli ağırlık düşürme deney düzeneği kullanılarak zaman tanım kuvvet-deplasman ve enerji-deplasman grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca küp numuneler üzerinde beton basınç ve yarma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki karbon lifler 5 kg/m³, 10 kg/m³, ve 15 kg/m³ dozlarında uygulanarak lif katkılı beton karışımları elde edilmiş ve 28 günlük kürleme sonrasında deneylere geçilmiştir. Ayrıca 5 kg/m³ doz için hem 3 mm hem de 12 mm lifler birlikte kullanılarak hibrit karışımlar hazırlanmış ve 7 günlük kür sonunda statik ve dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

7 günlük basınç ve yarma deneyi sonuçlarında artış ve azalış trendleri benzerdir. En yüksek basınç ve yarmada çekme dayanımları H70/30 numunelerinde gözlenmiştir. Diğer hibrit numunelerde bu dayanımlar kontrol betonlardakilerin altına gerilemiştir.

50 joule darbe enerjili dinamik yük etkisinde en yüksek maksimum kuvvet ve enerji sönümlenme H50/50 numunelerinde elde edilmiştir. Bu numuneler aynı zamanda en az hasar alan numuneler olmuşlardır. Kısaca en iyi darbe performansını 7 günlük numuneler içerisinde H50/50 grubu sergilemiştir. Bu durum hibrit lif katkılı tasarımlarda lif karışım oranlarının önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

28 günlük numunelerde ise 3_5 ve 12_10 karışımlarında lifler basınç ve yarmada çekme dayanımlarını önemli oranda iyileştirirken 12_5 ve 12_15 karışımlarında bu dayanımlar önemli oranda düşmüştür. 3_10 karışımında dayanımlar korunurken 3_15'te düşüş sınırlı miktardadır.

Dinamik yük altında ise gerek maksimum kuvvet gerekse enerji tüketimi bakımından en iyi performansı 3_15 grubu sergilemiştir. Diğer tüm gruplarda maksimum kuvvet az da olsa düşmüş, 12_15 grubunda bu düşüşün önemli düzeyde olduğu görülmüştür. Lifler, 12_15 haricindeki tüm gruplarda kontrol betonlarına göre enerji sönümlenme düzeyini iyileştirmişlerdir.

En güçlü performans 3_15, ve en zayıf performans 12_15 gruplarında gözlenirken kontrol betonlarına kıyasla enerji tüketimi sırasıyla %162.1 ve %55.0 olarak gerçekleşmiştir. Diğer gruplar oldukça yakın enerji değerleri vermiş olup kontrol grubuna oranla yaklaşık %32-37 düzeyinde iyileşmeler görülmüştür. Bu davranışlar dinamik deneyler sonrasındaki hasar durumlarına da yansımış olup en hasarlı gruplar kontrol ve

12_15 grupları olurken en az hasarlı grup 3_15 olmuştur. Kontrol numuneleri hem 7 günlük hem de 28 günlük testlerde bütünlüğünü koruyamayarak iki, üç veya dört parçaya ayrılmışlardır. Diğer gruplarda da lif kullanımı ile hasarlar önemli oranda azalmış ve numuneler bütünlüğünü koruyabilmiştir.

Numunelerde maksimum yük, enerji tüketimi ve hasar durumları birlikte değerlendirildiğinde betonda karbon lif kullanımının darbe performansını arttırdığı görülmüştür. Fakat bu artış tüm lif tipleri ve oranları için geçerli değildir. Bu çalışma kapsamında darbe performansı açısından 3 mm'lik kısa liflerin 12 mm'lik uzun liflere kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği ve optimum lif oranının 3 mm lifler için 15 kg/m^3 olduğu gözlenmiştir. Dinamik performans açısından ikinci sırayı 12 mm liflerin 10 kg/m^3 miktarında kullanıldığı 12_10 karışımının aldığını vurgulamak gerekmektedir. Statik basınç ve yarmada çekme dayanımı açısından bu karışım kısa lifli karışımlara kıyasla az da olsa daha iyi sonuç vermiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Ersoy, U., Özcebe, G., & Canbay, E. (2019). Betonarme: Davranış ve hesap ilkeleri (9. baskı). Evrim Yayıncılık.
- [2] Li, Y., Zhang, Q., Wu, S., Feng, J., & Cai, J. (2025). Experimental seismic study of precast beam-column connection with polyvinyl alcohol (PVA) fibers. *Structures*, 71, 107974. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107974>
- [3] Guiassi, B., & Dalfré, G. M. (2023). Flexural behavior of carbon/glass and basalt textile reinforced concrete (TRC) I-beams. In *Proceedings of the 11th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2023)* (July 23–26). Rio de Janeiro, Brazil.
- [4] Fédération Internationale du Béton (fib). (2019). Bulletin 90: Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Lausanne, Switzerland.
- [5] Dündar, B., Çınar, E., & Peşin, S. (2020). Bazalt ve karbon lif takviyeli betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(4), 1039–1048. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.700956>
- [6] Kopf, F., Rehman, N. U., & Marx, S. (2023). Reuse of recycled carbon fibers for reinforcements. In *Proceedings of the 11th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2023)* (July 23–26). Rio de Janeiro, Brazil.
- [7] Mechtcherine, V., Signorini, C., & Junger, D. (Chairs). (2024, September 15–18). XI International Symposium on Fiber Reinforced Concrete (BEFIB 2024) [Conference symposium]. Dresden, Germany: RILEM-FIB.
- [8] American Concrete Institute. (1989). ACI 544.2R-89: Measurement of properties of fiber reinforced concrete. ACI Committee 544.
- [9] Aduwenye, P., Chong, B. W., Gujar, P., & Shi, X. (2024). Mechanical properties and durability of carbon fiber reinforced cementitious composites: A review. *Construction and Building Materials*, 452, 138822. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138822>
- [10] Akın, S., Kaplan, A. N., & Özel, C. (2022). Farklı uzunluktaki doğal liflerin beton performansı üzerine etkileri. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 80–84.
- [11] Alkayış, M. H., & Başıyigit, C. (2021). Lif katkısının beton darbe dayanımına etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 455–462. <https://doi.org/10.31590/ejosat.897865>
- [12] Demirel, B., & Gönen, T. (2007). Karbon fiber takviyeli betonda farklı fiber boyunun kapilariteye etkisi. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 12–15.
- [13] Safiuddin, M., Yakhlaif, M., & Soudki, K. A. (2018). Key mechanical properties and microstructure of carbon fibre reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 164, 477–488. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.172>

- [14] Şahan, M. F., & Ünsal, İ. (2021). Farklı lif oranına sahip çelik lif takviyeli beton kirişlerde çarpma etkisi. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 5(2), 212–217. <https://doi.org/10.46460/ijiea.986369>
- [15] Şahan, M. F., Öncel, F. A., & Ünsal, İ. (2021). Effect of fiber ratio on the impact behavior of polypropylene fiber reinforced samples. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 4(4), 239–248. <https://doi.org/10.31462/jseam.2021.04239248>
- [16] Wang, Z., Li, L., Wu, J., Du, X., Wang, H., & Du, G. (2025). Experimental investigation of static and dynamic compressive behavior of carbon fiber reinforced concrete at elevated temperatures. *Engineering Fracture Mechanics*, 324, 111275. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111275>
- [17] Aydın, Ş. (2024). Bazalt lifi ve karbon lifi ilaveli yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçların bazı mekanik ve durabilite özellikleri [Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. Trabzon.
- [18] Amran, M., Fediuk, R., Abdelgader, H. S., Murali, G., Ozbakkaloglu, T., Lee, Y. H., & Lee, Y. Y. (2022). Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 45, 103638. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103638>
- [19] Öğdü, M. K. (2018). Farklı uzunluklarda karbon fiber takviyeli gazbetonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin deneysel olarak araştırılması [Yüksek lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi]. Kırıkkale, Türkiye.
- [20] Öncel, F. A. (2021). Çelik ve polipropilen lif ilavesinin betonun davranışına etkisi: Statik ve dinamik değerlendirme [Yüksek lisans tezi, Adıyaman Üniversitesi]. Adıyaman, Türkiye.
- [21] Asaad, G. Y. (2015). An experimental study on the workability of carbon fiber reinforced self-compacting concrete [Yüksek lisans tezi, University of Gaziantep, School of Natural and Applied Sciences]. Gaziantep, Türkiye.
- [22] Rao, C. L., Narayanamurthy, V., & Simha, K. R. Y. (2016). *Applied impact mechanics*. Wiley.
- [23] Seydmoradi, A., Tavana, M. H., & Habibi, M. R. (2024). Investigation on the response of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete slab under sequential impact loading. *Engineering Failure Analysis*, 161, 108221. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108221>
- [24] Alkayış, M. H., & Başyigit, C. (2021). Lif katkısının beton darbe dayanımına etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 455–462. <https://doi.org/10.31590/ejosat.897865> (Not: Bu kaynak [11] ile aynı, yinelenmiştir.)
- [25] Xiao, J., Li, L., Shen, L., & Poon, C. S. (2015). Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading. *Cement and Concrete Research*, 71, 46–55.
- [26] C., A., & M., B. (2007). *Impact testing handbook*.

- [27] Şahan, M. F., & Ünsal, İ. (2023). An experimental analysis for impact behavior of Portland cement concrete substituted with reclaimed asphalt pavement aggregate. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(4), 2113–2130. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01052-7>
- [28] Türk Standartları Enstitüsü. (2016). TS 802: Beton karışım tasarımı hesap esasları. Ankara, Türkiye.
- [29] Türk Standartları Enstitüsü. (2015). TS 10514: Lif takviyeli betonun karışım oranları ve imalatı için kurallar. Ankara, Türkiye.
- [30] Türk Standartları Enstitüsü. (2014). TS EN 12390-1: Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri. Ankara, Türkiye.
- [31] Türk Standartları Enstitüsü. (2019). TS EN 12390-3: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Ankara, Türkiye.
- [32] DostKimya End. Ham. Ltd. Şti. (t.y.). Kırpılmış karbon elyaf. İstanbul, Türkiye.
- [33] Türk Standartları Enstitüsü. (2014). TS EN 12390-6: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Ankara, Türkiye.
- [34] Ünsal, İ., & Korkmaz, M. C. (2025, Temmuz 19–20). Atlas 15. Uluslararası İleri Bilimsel Çalışmalar ve Disiplinlerarası Araştırmalar Kongresi. Ankara, Türkiye.