



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KATKI MALZEMELERİ, ÇELİK LİF VE
ÇELİK LEVHA İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ İKİ
DOĞRULTULU BETONARME
DÖŞEMELERİN DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA
YÜKLEMESİ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Mohammed Gamal Omar AL-HAGRI

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mohammed Gamal Omar AL-HAGRI tarafından hazırlanan “Katkı Malzemeleri, Çelik Lif ve Çelik Levha İle Güçlendirilmiş İki Doğrultulu Betonarme Döşemelerin Düşük Hızlı Çarpma Yükleme Etkisindeki Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 26/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Özgür ANIL

.....

Danışman

Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

.....

Üye

Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK

.....

Üye

Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Tolga YILMAZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması KTÜN Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından 201104025 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Mohammed Gamal Omar AL-HAGRI

Tarih: 31/01/2023

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KATKI MALZEMELERİ, ÇELİK LİF VE ÇELİK LEVHA İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ İKİ DOĞRULTULU BETONARME DÖŞEMELERİN DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLEMESİ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mohammed Gamal Omar AL-HAGRI

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

2023, 304 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

Prof. Dr. Özgür ANIL

Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK

Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL

Dr. Öğr. Üyesi Tolga YILMAZ

Bu çalışmanın amacı, farklı katkı maddeleri kullanılarak betonarme elemanların çarpma performansının artırılmasıdır. Bu amaçla, farklı katkı maddelerinin betonun statik ve çarpma özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen katkı maddeleri, nano katkı maddeleri (nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃), lifler (çelik lif, PET lif, polipropilen lif) ve atık lastik kauçuklardır (ince ve iri atık lastik kauçuk). Katkı maddeleri ayrı ayrı ve farklı bileşimler şeklinde kullanılmıştır. Toplam 39 adet beton üretilmiş ve test edilmiştir. Katkı maddelerinin betonun birim ağırlığı, statik özellikleri (basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu özellikleri), mikroyapısal özellikleri ve çarpma performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Betonlar ayrıca maliyet ve arzu edilirlilik fonksiyonu analizleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, nano katkı maddeleri grubu, lifler grubu ve atık lastik kauçuklar grubunda en yüksek performansa sahip betonların sırasıyla %0.5 nano-Fe₂O₃ içeren beton, %1 çelik lif içeren beton ve %10 ince lastik kauçuk içeren beton olduğunu göstermiştir. Bu üç katkı maddesinin farklı kombinasyonlarının betonun performansı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. İncelenen tüm betonlar arasında, %1 çelik lif içeren betonun en yüksek genel performansa sahip olduğu görülmüştür. Bu beton, referans betonla birlikte farklı tipte betonarme plaklar üretmek için kullanılmıştır. Bunlar, referans betondan üretilen, çelik lif içeren betondan üretilen, fonksiyonel derecelendirilmiş betondan üretilen ve çelik levhalı betonarme plaklardır. Toplam 9 adet betonarme plak hazırlanmış ve ağırlık düşürme deneyi kullanılarak test edilmiştir. Testte, her numuneye ait çarpma yükünün, ivmenin ve deplasmanın zaman tanım alanında değişimleri ve çatlak dağılımı incelenmiştir. Betonarme plakların maliyet analizi de yapılmıştır. Sonuçlar, çelik lifle birlikte çelik levhanın, özellikle arka yüzeyde, kullanımının betonarme plağın çarpma performansında dikkate değer bir artış sağladığını göstermiştir. En yüksek çarpma performansı, ön yüzeyinde ve arka yüzeyinde birer adet çelik levha içeren betonarme plakta bulunmuştur. Betonarme plakların sonlu eleman modelleri de Abaqus yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sonuçta nümerik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılıp yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Abaqus, Ağırlık düşürme testi, Atık lastik kauçuklar, Betonarme plak, Betonun özellikleri, Lifler, Nano katkı maddeleri

ABSTRACT

PhD THESIS

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF TWO-WAY REINFORCED CONCRETE SLABS STRENGTHENED WITH ADDITIVE MATERIALS, STEEL FIBER AND STEEL PLATE UNDER LOW-VELOCITY IMPACT LOADING

Mohammed Gamal Omar AL-HAGRI

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

2023, 304 Pages

Jury

Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

Prof. Dr. Özgür ANIL

Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK

Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL

Dr. Öğr. Üyesi Tolga YILMAZ

The aim of this study is to improve the impact performance of reinforced concrete elements using different additive materials. For this purpose, the effect of different additive materials on the static and impact properties of concrete was experimentally investigated. The studied additive materials are nano additive materials (nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃), fibers (steel fiber, PET fiber, polypropylene fiber) and waste tire rubbers (fine and coarse tire rubbers). Additive materials were used separately and in different combinations. A total of 39 concretes were produced and tested. The effect of additive materials on the unit weight, static properties (compressive strength, split tensile strength, flexural strength and flexural toughness properties), microstructural properties and impact performance of concrete was researched. The concretes were also evaluated using cost and desirability function analyses. The results showed that the concretes with highest performance in nano additive materials group, fibers group and waste tire rubbers group are concrete containing 0.5% nano-Fe₂O₃, concrete containing 1% steel fiber and concrete containing 10% fine tire rubber, respectively. The effect of different combinations of these three additive materials on the performance of concrete was also investigated. Among all the studied concretes, concrete containing %1 steel fiber was observed to have the highest overall performance. This concrete, along with the reference concrete, was used to produce RC plates of different types. These are RC plates manufactured from reference concrete, steel fiber reinforced concrete and functionally graded concrete, and RC plates containing steel plates. A total of 9 RC plates were prepared and tested using drop weight test. In the test, the impact load-time, acceleration-time and displacement-time histories and crack pattern of each specimen were investigated. Cost analysis of the RC plates was also conducted. The results showed that use of steel plates, especially at the back surface, along with steel fibers led to a remarkable increase in the impact performance of RC plates. The highest impact performance was found in RC plate containing one steel plate at the front surface and one at the back surface. Finite element models of the RC plates were also generated using Abaqus software. Finally, numerical results were compared with the experimental ones and evaluated.

Keywords: Abaqus, Concrete properties, Drop weight test, Fibers, Nano additive materials, RC plate, Waste tire rubbers

ÖNSÖZ

Tez çalışması boyunca bana her türlü desteği veren, beni yönlendiren ve değerli katkılarını asla esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez İzleme Komitesinde bilgileri ve tecrübeleriyle yol gösteren, kıymetli görüşlerini ve katkılarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mehmet KAMANLI ve Sayın Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora öğretimimi yapmam için bana maddi destek sağlayan Türkiye Bursları (YTB) Başkanlığı'na ve tez çalışmasının yürütülmesinde 201104025 no'lu projeye maddi imkân sağlayan Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine teşekkür ederim.

Beton kiriş numunelerin çarpma testi gerçekleştirilmesi için laboratuvarlarında bulunan ağırlık düşürme testi cihazını kullanmamıza izin verdiklerinden dolayı Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na ve Mekanik Anabilim Dalı Başkanlığı'na da teşekkür ederim.

Değerli bilimsel görüşlerini ve katkılarını esirgemeyen ve betonarme plakların çarpma testi verilerinin analizini gerçekleştirmemizde katkı sağlayan Sayın Prof. Dr. Özgür ANIL hocama teşekkürlerimi borç bilirim.

Betonarme plakların çarpma testi yapılabilmesi için laboratuvarlarında bulunan çarpma testi cihazını kullanmamıza izin verdiklerinden dolayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na, betonarme plakların çarpma testlerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan Selim ŞENGEL ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan EROL hocalarıma, sonlu eleman analizi konusunda katkılarını ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tolga YILMAZ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca sürekli desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL ve Arş. Gör. Abdulhamit NAKİPOĞLU hocalarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında imkanlarımı kullandığım Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü yapı-deprem, malzeme ve geoteknik laboratuvarları sorumlularına ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Hayatım boyunca çalışmalarına devam edebilmem için her türlü fedakârlığı yapan, bu aşamaya ulaşmama vesile olan, maddi ve manevi sonsuz desteklerini esirgemeyen başta babama, anneme, eşime, oğluma ve tüm aileme içten teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca verdiği sonsuz destek, ilgi, fedakârlık ve motivasyon sayesinde bugünlere gelmemi sağlayan babama özel olarak en içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Mohammed Gamal Omar AL-HAGRI
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Nano Katkı Maddeleri	4
1.2. Lifler	6
1.3. Atık Lastik Kauçuklar.....	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	11
2.1. Katkı Maddelerinin Çimento Esaslı Malzemelerin Özellikleri Üzerindeki Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar	11
2.1.1. Nano-SiO ₂	11
2.1.2. Nano-Al ₂ O ₃	19
2.1.3. Nano-Fe ₂ O ₃	22
2.1.4. İnce ve iri atık lastik kauçuk	24
2.1.5. Çelik lifler	31
2.1.6. Polipropilen lifler	38
2.1.7. PET lifler.....	40
2.2. Betonarme Plakların Çarpma Davranışı	43
2.3. Literatür Araştırmasından Elde Edilen Sonuçlar	49
2.4. Bilimsel Çalışmanın Özgünlüğü	50
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	52
3.1. Malzemeler	54
3.1.1. Çimento.....	54
3.1.2. Agregalar	55
3.1.3. Süper akışkanlaştırıcı	58
3.1.4. Atık lastik kauçuk	59
3.1.5. Lifler	62
3.1.6. Nano katkı maddeleri.....	66
3.2. Farklı Katkı Maddeleri İçeren Betonların Hazırlanması ve Test Edilmesi	67
3.2.1. Referans beton karışım tasarımı	67
3.2.2. Beton tipleri ve karışım hesapları	68
3.2.3. Karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları	72
3.2.4. Test ve analiz yöntemleri	73
3.3. Betonarme Plakların Hazırlanması ve Test Edilmesi	87
3.3.1. Betonarme plakların detayları.....	87
3.3.2. Betonarme plakların üretimi	92

3.3.3. Ağırlık düşürme test düzeneği	93
3.3.4. Mesnet düzeneği	96
3.3.5. Ölçüm aygıtları	97
3.3.6. Veri toplama aygıtları	103
3.3.7. Betonarme plakların çarpma testinde kullanılan yöntem	105
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	111
4.1. Farklı Katkı Maddeleri İçeren Betonun Özellikleri	111
4.1.1. Birim ağırlık.....	111
4.1.2. Basınç dayanımı.....	115
4.1.3. Yarmada çekme dayanımı	120
4.1.4. Eğilme dayanımı	125
4.1.5. Tokluk özellikleri.....	128
4.1.6. Çarpma test sonuçları.....	143
4.1.7. Karışım gruplarının test sonuçlarının karşılaştırılması ve en uygun karışımın seçilmesi.....	156
4.1.8. SEM analizi.....	163
4.1.9. Karışım grupları arasındaki etkiler	175
4.1.10. Genel olarak en uygun karışımın seçilmesi	183
4.1.11. Maliyet analizi	185
4.1.12. Arzu edirlilik fonksiyonu.....	188
4.2. Betonarme Plakların Çarpma Testi Sonuçları	193
4.2.1. Betonarme plakların test bulguları.....	193
4.2.2. Betonarme plakların test sonuçlarının tartışılması.....	230
4.2.3. Betonarme plakların maliyet analizi	239
5. NÜMERİK ÇALIŞMA.....	242
5.1. Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması	242
5.2. Malzeme Özellikleri	246
5.2.1. Beton özellikleri.....	246
5.2.2. Çelik donatı özellikleri.....	252
5.2.3. Diğer malzemelerin özellikleri	253
5.2.4. Gerinim hızı etkisi	254
5.3. Nümerik Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması	256
5.3.1. SN1 betonarme plağı	256
5.3.2. SN2 betonarme plağı	258
5.3.3. SH1 betonarme plağı	260
5.3.4. SH2 betonarme plağı	261
5.3.5. SH3 betonarme plağı	263
5.3.6. SH4 betonarme plağı	265
5.3.7. SS1 betonarme plağı	266
5.3.8. SS2 betonarme plağı	268
5.3.9. SS3 betonarme plağı	270
5.4. Nümerik Sonuçların Değerlendirilmesi	271
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	276
6.1. Sonuçlar	276

6.1.1. Farklı katkı maddelerinin betonun özellikleri üzerindeki etkisine ait sonuçlar	276
6.1.2. Betonarme plakların çarpma testine ait sonuçlar	281
6.2. Öneriler	283
KAYNAKLAR	285



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Enkesit alanı (m ²)
b	: Genişlik (m)
c	: Kalınlık (m)
d_e	: Eşdeğer çap (m)
E	: Çarpma enerjisi (J)
h	: Yükseklik (m)
L	: Uzunluk (m)
M	: Kütle (kg)
ρ_a	: Görünen özgül ağırlık
ρ_{rd}	: Kuru özgül ağırlık
ρ_{ssd}	: Doygun yüzey kuru özgül ağırlık
λ	: Narinlik oranı
V	: Hacim (m ³)
V_1	: İlk okunan hacim (m ³)
V_2	: Son okunan hacim (m ³)
m	: Çekicinin ağırlığı (kg)
v	: Çarpma hızı (m/s)
W	: Ağırlık (kg)
W_p	: Piknometre ağırlığı (gr)
W_{p+s}	: Piknometre + numune ağırlığı (gr)
W_{p+w}	: Piknometre + su ağırlığı (gr)
M_1	: Numunenin ağırlığı (gr)
M_2	: Piknometre + etil alkol + numune ağırlığı (gr)
M_3	: Etil alkol ile doldurulmuş piknometrenin ağırlığı (gr)
G_e	: Etil alkolün özgül ağırlığı
W_1	: Ölçü kabı boş ağırlığı (gr)
W_2	: Kap + numune ağırlığı (gr)
f_{ct}	: Yarmada çekme dayanımı (MPa)
P	: Maksimum yük (kN)
d	: Çap (m)
f_{cf}	: Eğilme dayanımı (MPa)
W	: Toplam emilen enerji miktarı (N.m)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
δ_m	: Numunenin kırılma anında ölçülen nihai deplasman (m)
P_F	: Çentiksiz kırılgan kırılma anında ölçülen yük (N)
G_F	: Kırılma enerjisi (J)
δ	: Deplasman (m)
δ_0	: İlk çatlak deplasmanı (m)
T	: Tokluk (J)
I_5, I_{10} ve I_{20}	: Tokluk indeksleri
$R_{5,10}$ ve $R_{10,20}$: Artık mukavemet faktörleri
N_1	: İlk çatlak kadar vuruş sayısı
N_2	: Kırılmaya kadar vuruş sayısı
d_i	: i yanıtına ait arzu edilirlilik fonksiyonu
Y_i	: i yanıtının değeri

$\min f_i$: i yanıtının minimum değeri
$\max f_i$: i yanıtının maksimum değeri
t_i	: Yanıtın ağırlık faktörü
D	: Kompozit arzu edirlilik (amaç fonksiyonu)
n	: Yanıtların sayısı
ΔM	: Momentumdaki değişime (N.s)
$V_{\text{Çarpma}}$: Çekicinin çarpma anındaki hızı (m/s)
V_r	: Geri tepme hızı (m/s)
I_p	: İmpuls (N.s)
E_{ab}	: Numune tarafından emilen enerji (J)
$E_{\text{Çarpma}}$: Uygulanan çarpma enerjisi (J)
$V_{\text{Çarpma}}$: Çekicinin çarpma anındaki hızı (m/s)
E_k	: Kinetik enerji (J)
σ_{c0}	: Basınçta ilk akma gerilmesi (MPa)
σ_{cu}	: Maksimum basınç gerilmesi (MPa)
σ_c	: Basınç gerilmesi (MPa)
$\tilde{\epsilon}_c^{ln}$: Elastik olmayan birim şekil değiştirme
σ_t	: Çekme gerilmesi (MPa)
σ_{t0}	: Çekmede ilk akma gerilmesi (MPa)
$\tilde{\epsilon}_t^{ck}$: Çatlama birim şekil değiştirmesi
ϵ_c	: Toplam basınç şekil değiştirmesi
ϵ_t	: Toplam çekme şekil değiştirmesi
E_0	: Başlangıç elastisite modülü (MPa)
d_c	: Basınç hasar parametresi
d_t	: Çekme hasar parametresi
$\tilde{\epsilon}_c^{pl}$: Basınçta eşdeğer plastik birim şekil değiştirme
$\tilde{\epsilon}_t^{pl}$: Çekmede eşdeğer plastik birim şekil değiştirme
σ_c'	: Basınç dayanımı (MPa)
σ_t'	: Çekme dayanımı (MPa)
ψ	: Dilatasyon açısı ($^\circ$)
e	: Eksantrisite parametresi
$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$: İki eksenli başlangıç basınç akma gerilmesinin tek eksenli başlangıç basınç gerilmesine oranı
K_c	: Meridyenler arası uzaklık oranı
μ	: Viskozite parametresi
w	: Çatlak deplasmanı (mm)
σ_g	: Geçer çekme gerilmesi (MPa)
ϵ_g	: Gerçek birim şekil değiştirme
σ_{kopma}	: Deneysel kopma gerilmesi (MPa)
σ	: Deneysel çekme gerilmesi (MPa)
ϵ	: Deneysel birim şekil değiştirme (MPa)
ϵ_g^{pl}	: Plastik gerçek birim şekil değiştirme
E_s	: Çelik donatının elastisite modülü (MPa)
$\dot{\epsilon}_d$: Gerinim hızı (s^{-1})
σ_{cd}'	: Dinamik basınç dayanımı (MPa)
σ_{td}	: Dinamik çekme dayanımı (MPa)
f_y	: Akma dayanımı (MPa)

Kısaltmalar

CH	: Kalsiyum hidroksit
CDP	: Beton hasar plastisite
ÇDSAY	: Çatlak sonrası çarpma sayısındaki artış yüzdesi
C-F-H	: Kalsiyum ferrik hidrat
CR	: İri atık lastik kauçuk
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
DÇ-B-DC	: Düz çelik plaka-beton-düz çelik plaka
DÇ-B-OÇ	: Düz çelik plaka-beton-oluklu çelik plaka
DIF	: Dinamik artış faktörü
FR	: İnce atık lastik kauçuk
GDAB	: Geri dönüşümlü agregalı beton
GFRP	: Cam fiber takviyeli polimer
HAB	: Hafif agregalı beton
ITZ	: Ara yüzey geçiş bölgesi
KDV	: Katma Değer Vergisi
KİALB	: Katmanlı iki aşamalı lifli beton
KYB	: Kendiliğinden yerleşen beton
KYH	: Kendiliğinden yerleşen harç
LW	: Doygun kireç suyunda kürlenmiş
MSTF	: Pirinç kaplı mikro çelik
NA	: Nano alümina veya nano- Al_2O_3
NC	: Nano- $CaCO_3$
NF	: Nano demir veya nano- Fe_2O_3
NS	: Nano silika veya nano- SiO_2
NSA	: Nano- SiO_2 + nano- Al_2O_3 kombinasyonu
NT	: Nano- TiO_2
ÖYA	: Özgül yüzey alanı
PET	: Polietilen tereftalat
PETF	: Polietilen tereftalat lif
PF	: Polivinil alkol lif
PP	: Polipropilen
PPF	: Polipropilen lif
PVA	: Polivinil alkol
RHA	: Pirinç kabuğu külü
SA	: Süper akışkanlaştırıcı
SE	: Sonlu eleman
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
STF	: Çelik lif
MSTF	: Mikro çelik lif
TDG	: Teknik Destek Grubu
TKİALB	: Tek katmanlı iki aşamalı lifli beton
TL	: Türk lirası
UYDKYB	: Ultra yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen beton
UYPB	: Ultra yüksek performanslı beton
UYPLDB	: Ultra yüksek performanslı lif donatılı beton
W	: Suda kürlenmiş
YPLDB	: Yüksek performanslı lif donatılı beton

1. GİRİŞ

Kullanım ömrü boyunca, bir yapı çeşitli çevresel ve yükleme koşullarına maruz kalabilir. Son yıllarda, basınç dayanımının önemi kadar, yapıların çarpma dayanımı da büyük önem kazanmıştır. Çarpma, kısa bir süreliğine etki eden, karmaşık bir yükleme sistemidir. Yapısal malzemeler düşünüldüğünde, betonun yüksek hızlı şekil değiştirme (çarpma yükü) etkisi altındaki davranışı, günümüzde kullanılan diğer ana inşaat malzemelerine göre en karmaşık olanıdır. Cisimlerin çarpışmasından, patlamalardan ve balistik mermilerden kaynaklanan çarpma yükleri yapıların tasarımında endişe verici olabilir. Bu tür olaylar sırasında, yapıya dinamik yük şeklinde büyük miktarda enerji iletilir. Eğer bir yapı uygulanan çarpma yüklerine dayanacak şekilde tasarlanmamışsa, büyük hasarlar oluşabilir. Bunun sonucunda yaşamsal ve ekonomik kayıplar olabilir. Çarpma etkisinden dolayı yapılarda meydana gelen hasarların bazıları Şekil 1.1.'de verilmiştir. Bu nedenle, bu tür yükleme sistemlerinin incelemesi çok önemlidir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 1.1. a) Birinci kata araç çarpması, Kaliforniya, ABD, 2018 (BBC, 2018), b) Betonarme köprü ayaklarına taşıt çarpması, Teksas, ABD, 2003 (T. Yılmaz, 2018), c) Bina içi gaz patlaması, Moskova, Rusya, 2021 (Kyivpost, 2021), d) Kaya düşmesi, Samsun, Türkiye, 2022 (Anadolu Ajansı, 2022)

Gelişmekte olan ülkemizde artan tüketim ihtiyaçlarını karşılamak ve yaşam kalitesini artırmak için nükleer santraller, askeri yapılar, köprüler, demiryolları, havaalanı pistleri ve tüneller gibi birçok stratejik yapı inşa edilmektedir. Bu tür yapılar dünya çapında gelişmiş ülkelerin sembolü haline gelmiştir. Ancak, bu tür yapılar depremler, patlamalar, araba veya uçak çarpmaları ve son yıllarda terörist saldırılar gibi ekstrem yüklere maruz kalabilmektedir. Bu nedenle, bu tür yapıların çarpma dayanımı, bütün güvenlik problemlerini önleyecek kadar yüksek olmalıdır. Bu tür yapıların ve içinde bulunan insanların, değerli eşyaların güvenliğini sağlamak için yapıların çarpma etkisi altındaki tepkisi kesin olarak bilinmelidir (Abbas ve ark., 2004; Oltulu ve Altun, 2018).

Savunma sanayinde, yapılar için çarpma etkisi en ekstrem yüklemeye durumudur. Son yıllarda, tüm dünyada askeri ve terörist faaliyetlerden kaynaklanan patlamaya bağlı çok sayıda kayıp meydana gelmiş ve bu durum sivil binaların ve diğer yapıların bu tür olaylara karşı savunmasız olduğunu ortaya koymuştur. Bir şehir merkezinde veya bir yapının içinde meydana gelen patlamalar çokça can ve mal kaybına sebep olmaktadır. Patlamalar önemli miktarda yapısal hasara ve daha da kötüsü yapının çökmesi gibi sonuçlara yol açabilmektedir. Bu durum düşünüldüğünde, beton elemanların çarpma dayanımının artırılarak mevcut ve gelecekteki yapıların hasar görülebilirliğinin azaltılması gerekmektedir (Arora ve ark., 2011; Morales-Alonso ve ark., 2011).

Özellikle terör saldırısı riski taşıyan kritik devlet binaları, askeri binalar ve diğer stratejik yapılarda kullanılacak yapı malzemelerinin, çarpma yüküne karşı direncinin artırılmasına ihtiyaç vardır. Bu gibi kritik yapıları ciddi çarpma yüklerine karşı korumak için yapılarda en çok kullanılan malzeme olan betonun çarpma yükü altındaki tepkisi ve hasar modlarını anlamak çok önemlidir (Yusof ve ark., 2010; Zhao ve Guo, 2018). Bu çalışmada, savunma sanayinde kullanılan betonun çarpma dayanımının artırılması planlanmaktadır.

Beton, iyi basınç dayanımı, dayanıklılığı ve çevresel uyumluluğu nedeniyle en çok kullanılan yapı malzemesidir (Döndüren ve Al-Hagri, 2022; Jalal ve Jalal, 2020; Kazmi ve ark., 2021). Ancak yine beton, düşük çekme dayanımı, düşük enerji yutma kapasitesi ve düşük çarpma mukavemeti gibi birçok zayıf yönü de olan yarı gevrek bir malzemedir (Anıl ve ark., 2016; Bhuvaneshwari ve ark., 2011; Döndüren ve Al-Hagri, 2022). Son zamanlarda betonun statik ve dinamik yükler altında performansını artırmak için birçok katkı malzemesi kullanılmaktadır. Bu katkı maddelerinden bazıları nano katkı maddeleri, lifler ve atık lastik kauçuklardır. Araştırmacıların ilgisini çeken bu katkı maddeleri inşaat sektöründe gelecek vaat etmektedir. Bu katkı maddeleri betonun statik

ve dinamik performansını iyileştirmeyi mümkün kılmıştır (Al-Tayeb, Abu Bakar, Akil, ve ark., 2013; Dey ve ark., 2014; Faghieh ve Ayoub, 2019; T. D. Hrynyk ve Vecchio, 2014; H. Zhang ve ark., 2019).

Farklı katkı maddeleri kullanarak değişik yapı elemanlarının çarpma dayanımını arttırmak için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Ancak, yapılan araştırmalar henüz yeterli düzeyde değildir. Yeni katkı maddelerinin bileşimlerini kullanarak yapısal elemanların çarpma yükü etkisi altındaki tepkisini artırmak için çok fazla olasılık vardır.

Uygulanan herhangi bir çarpma yüküne dayanabilecek malzemelerin geliştirilmesi, can kaybını önlemek ve büyük ekonomik kayıpları azaltmak için çok önemlidir. Bu, insanların konforunu ve güvende oldukları hissini arttıracaktır. Ayrıca askeri yapıların ve sığınakların inşasında yeni bir ufuk açacaktır. Ek olarak, malzemelerin temel özelliklerini iyileştirebilecek katkı maddelerinin kullanılması hem çarpma dayanımı yüksek hem de daha küçük kalınlığa sahip elemanların geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Ayrıca, atık lastik kauçuk ve PET lifler gibi atık malzemelerin kullanılması, ekonomik bir çözüm olmasının yanı sıra çevre üzerindeki olumsuz etkileri de azaltacaktır. Enerji yutma kapasitesinden dolayı çarpma etkisine karşı dayanıklı olan elemanlar deprem ve rüzgâr gibi diğer büyük dinamik yükleme durumlarında da kullanılabilir.

Bu çalışmanın amacı da nano katkı maddeleri, lifler ve atık lastik kauçuk gibi çeşitli katkı maddelerinin beton elemanların çarpma tepkisi üzerindeki etkisini araştırmaktır. Tez çalışmasında, herhangi bir güvenlik problemi olmadan çarpma yüküne dayanabilecek güçlü betonarme plaklar üretmek için yeni yollar bulunmaya çalışılmıştır. Bu çalışma, nano katkı maddelerinin, çimento esaslı malzemelerin dinamik yükleme ve çarpma yüklemesi altındaki davranışlarına etkisi gibi yeterince araştırılmamış bazı konular hakkındaki bilgi birikimini arttıracaktır. Beton elemanların ve genel olarak yapıların çeşitli çarpma yüklerine tepkisini iyileştirme potansiyeline sahip yeni katkı maddeleri bileşimlerinin geliştirilmesi planlanmıştır. Betonarme elemanların çarpma tepkisi hakkındaki literatürde eksik olan bilgi birikimini arttıracak ve çarpmaya dayanıklı yapı tasarımı için yeni seçenekler geliştirecektir.

Çalışmada, nano katkı maddeleri (nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃), lifler (çelik lif, PET lif, polipropilen lif) ve atık lastik kauçuk (ince ve iri atık lastik kauçuk) içeren betonların statik ve dinamik özellikleri incelenmiştir. Üretilen betonlar, içinde kullanılan katkı maddelerinin türüne göre üç gruba ayrılmıştır. Bunlar, nano katkı maddeleri grubu, lifler grubu ve atık lastik kauçuklar grubudur. Nano katkı maddeleri,

ağırlıkça %0.5 ve %1'lik oranlarda çimentonun yerine kullanılmıştır. Çelik lifler ve PET lifler karışıma hacimce %1 ve %2 oranlarında eklenmişken, polipropilen lifler %0.25 ve %0.5 oranlarında eklenmiştir. İnce ve iri lastik kauçuklar, sırasıyla ince ve iri agregaların hacimce %10 ve %20'sinin yerine kullanılmıştır. Bu kullanım oranları literatürde bulunan araştırmaların tavsiyesi üzerine seçilmiştir (Al-Hagri ve Döndüren, 2022; Al-Tayeb, Abu Bakar, Akil, ve ark., 2013; Alavi Nia ve ark., 2012; Givi ve ark., 2010; Gravina ve Xie, 2022; Mohseni ve ark., 2015, 2016; Nili ve Afroughsabet, 2010a, 2010b; Oltulu ve Şahin, 2013; Pereira de Oliveira ve Castro-Gomes, 2011; Shaikh, 2020; Wu, Shi, He, ve ark., 2016; Wu, Shi, Khayat, ve ark., 2016; Yazdi ve ark., 2011; Ying ve ark., 2017).

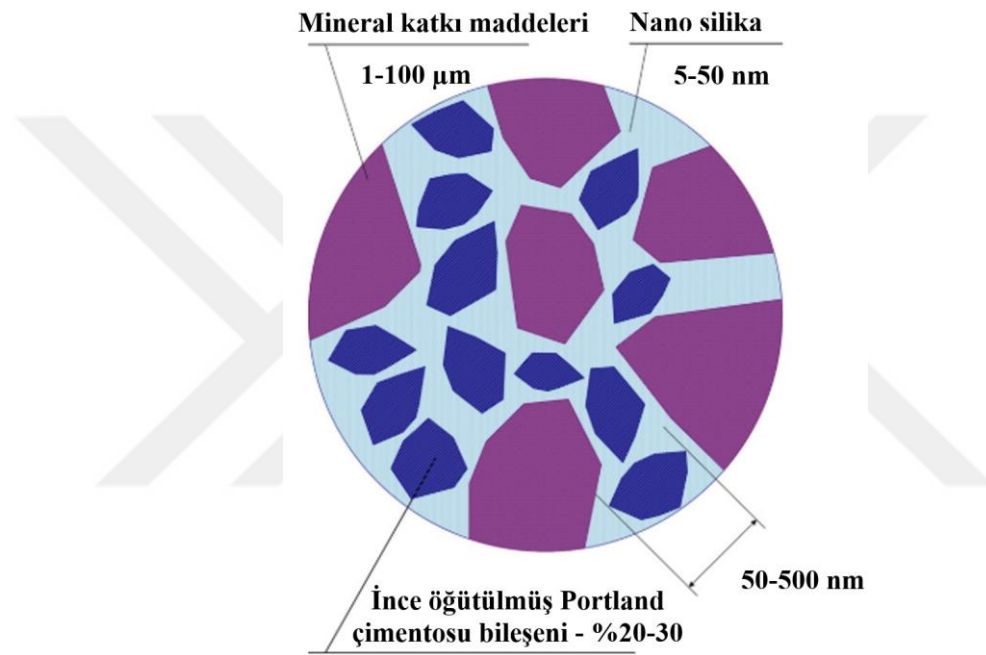
İncelenen katkı maddeleri ayrı ayrı ve farklı bileşimlerde kullanılmıştır. Üretilen betonların birim ağırlığı, mekanik özellikleri (basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluğu) ve çarpma dayanımı incelenmiştir. Bu aşamadaki çarpma testleri 80×100×400 mm ebatlarında kirişler kullanılarak ağırlık düşürme deneyi ile gerçekleştirilmiştir. Testte ilk çatlağa ve tam hasara kadar vuruş sayısı hesaplanarak elastik ve toplam emilen çarpma enerjisi hesaplanmıştır. Ayrıca, farklı katkı maddelerinin betonun mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Ek olarak, üretilen farklı betonlar için maliyet analizi ve arzu edilirlilik fonksiyonu analizi yapılmıştır.

Karışım gruplarının her birisinde, en iyi sonucu veren karışımlar dikkate alınarak yeni katkı maddelerinin bileşimlerini içeren betonlar da hazırlanmış ve test edilmiştir. Toplam 39 farklı karışım üretilmiş ve test edilmiştir. Çarpma dayanımı açısından en iyi performans gösteren beton farklı tipte (referans betondan üretilen, en iyi performans gösteren betondan üretilen, fonksiyonel derecelendirilmiş ve çelik levhalı) betonarme plakları üretmek için kullanılmıştır. Üretilen 1000×1000×120 mm ebatlarındaki betonarme plakların ağırlık düşürme deneyi ile çarpma özellikleri incelenmiştir. Ek olarak, farklı betonarme plakların ekonomik verimliliği tartışılmıştır. Ayrıca, betonarme plakların davranışı sonlu eleman programı Abaqus kullanılarak simüle edilmiştir.

1.1. Nano Katkı Maddeleri

Son zamanlarda, nano katkı maddelerinin betonda kullanımı, yeni potansiyelleri sayesinde umut verici bir araştırma alanı olarak birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir (Arif ve ark., 2020; Behfarnia ve Salemi, 2013; Jayapalan ve ark., 2013). Nano malzemeler, genellikle 1 ila 100 nm boyutunda olan, en azından bir doğrultuda nano ölçeğe sahip malzemeler olarak tanımlanabilir (Al-Bayati ve Al-Zubaidi, 2018; Amin ve

Abu el-Hassan, 2015; Kawashima ve ark., 2013). Malzemelerin partikül boyutlarının nano ölçeğe düşürülmesi, çimento hidratasyonu sırasında puzolanik reaktiviteyi ve kalsiyum-silikat-hidratın (C-S-H) miktarını arttırmaktadır. Ayrıca, nano katkı maddeleri, beton bileşenleri arasındaki boşlukları doldurmaktadır. Dolayısıyla daha yoğun ve kompakt bir mikroyapı elde edilebilmektedir. Böylece, nano katkı maddeleri betonun özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilmektedir (Behfarnia ve Salemi, 2013; Juenger ve Siddique, 2015; Noorvand ve ark., 2013; Sobolev ve ark., 2016). Nano malzemelerin gözenekleri doldurma etkisi Şekil 1.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Nano katkı maddelerinin gözenekleri doldurma etkisi (Sobolev ve ark., 2016)

Nano katkı maddelerinin çimento esaslı malzemelerin performansı üzerindeki etkisi, türleri, partikül boyutları, kullanım oranları ve numunelerin yaşı gibi birçok faktöre bağlıdır (Al-Hagri ve Döndüren, 2022; Arif ve ark., 2020; Reches, 2018; P. Zhang ve ark., 2018). Literatürde bulunan çalışmalar, nano katkı maddelerinin betonda kullanımının, geleneksel betona kıyasla önemli ölçüde daha iyi mekanik, fiziksel ve mikroyapısal özelliklere sahip betonların üretimini sağladığını göstermiştir (Amin ve Abu el-Hassan, 2015; Ardalan ve ark., 2017; Arif ve ark., 2020; Barbhuiya ve Qureshi, 2015; Biricik ve Sarier, 2014; Hou, Kawashima, Wang, ve ark., 2013). Ayrıca, nano malzemelerin çimentolu malzemelerde kullanılması, inşaat projelerinin sürdürülebilirliğini artıracak (Bi ve ark., 2012; J. Lee ve ark., 2010; Oke ve ark., 2018; Zhu ve ark., 2004) ve ömür boyu onarım ve bakım maliyetlerini azaltacaktır (Al-Hagri ve

Döndüren, 2022; Safiuddin ve ark., 2014; Teizer ve ark., 2011; Zheng ve ark., 2010). İlaveten, çimentonun nano katkı maddeleriyle kısmen değiştirilmesi, küresel antropojenik CO₂ emisyonlarının %5-8'inden sorumlu olan çimento üretiminin çevresel olumsuz etkisinin azaltılmasına yardımcı olacaktır (Döndüren ve Al-Hagri, 2022; Kewalramani ve Syed, 2018; Lazaro ve ark., 2016).

Çeşitli çimento esaslı malzemelerde kullanılan birçok nano katkı maddesi türü vardır. Çimento esaslı kompozitlerde en yaygın olarak kullanılan nano malzeme türlerinin bazıları nano-SiO₂, nano-TiO₂, nano-Fe₂O₃, nano-Al₂O₃, nano-CaCO₃ ve nano-killerdir (Ardalan ve ark., 2017; Reches, 2018; R. Zhang ve ark., 2015). Bununla birlikte, nano katkı maddelerinin çimento esaslı malzemelerin farklı özellikleri üzerindeki etkisi hakkında hala bilgi eksikliği bulunmaktadır. Ayrıca, bazı durumlarda literatürde bulunan farklı yayınlarda çelişkili sonuçlar rapor edilmiştir. Bu çalışmada, nano-SiO₂ (NS), nano-Fe₂O₃ (NF) ve nano-Al₂O₃'ün (NA) betonun statik özellikleri ve çarpma performansı üzerindeki etkisi üzerinde durulacaktır. Önceki çalışmalar, NS, NA ve NF az miktarlarda bile kullanımının, betonun mekanik özelliklerini (basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı vb.), mikroyapısal özelliklerini ve çarpma performansını iyileştirmede büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir (Aly ve ark., 2012; Arif ve ark., 2020; Demirhan ve ark., 2019; Döndüren ve Al-Hagri, 2022; Joshaghani ve ark., 2020; Oltulu ve Şahin, 2011; P. Zhang ve ark., 2021).

1.2. Lifler

Lifler, çimento esaslı malzemelerin performanslarını artırmak için en yaygın olarak kullanılan katkı maddelerinden biridir (Tang ve ark., 2022). Betonda kullanılan birçok lif türü vardır. Bunların bazıları çelik, polimerik (polietilen, polipropilen, naylon, polivinil alkol vb.), organik, bazalt, cam ve karbon liflerdir. Liflerin en yaygın olarak kullanılan bazılarının görüntüleri Şekil 1.3.'te gösterilmektedir. Bu çalışmada, üç tip lifin betonun özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bunlar, çelik lif (STF), polipropilen lif (PPF) ve polietilen tereftalat liftir (PETF). STF ve PPF, yüksek performanslarından dolayı en yaygın kullanılan lif türleridir (Alavi Nia ve ark., 2012; Nili ve Afroughsabet, 2010b). Şekilden de anlaşılacağı gibi çelik lifler farklı tiplerde kullanılmaktadır. Örneğin, iki ucu kıvrılmış (kanca uçlu) çelik lif, kıvrılmış çelik lif, çentikli çelik lif ve düz çelik liftir. Bu çalışmada kanca uçlu çelik lif kullanılmıştır.



Şekil 1.3. En yaygın olarak kullanılan liflerin bazı örnekleri (Öksüzer, 2021)

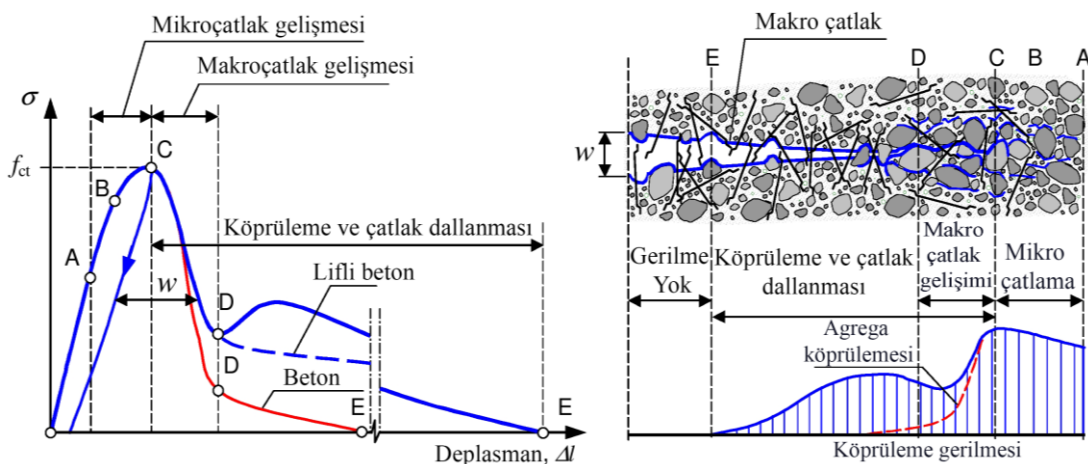
Plastik atıklar her gün çok büyük miktarda biriktiğinden çevreyi tehlikeye atan en büyük sorunlardan biridir (Khalid Ali ve ark., 2022). Bui ve ark., (2018)'ye göre, yıllık küresel plastik tüketimi 1950'de 1.5 milyon tondan 2015'te 322 milyon tona yükselmiştir. Atık plastikler çoğunlukla atık depolama sahalarında toplanmaktadır (Al-Hadithi ve ark., 2019). Atık plastikler biyolojik olarak çözünmeyen malzemelerdir. Plastiğin doğada çözünmesi yüzyıllarca sürmektedir (Khalid Ali ve ark., 2022; Shaikh, 2020). Dünyada en yaygın plastik bileşik PET'tir (Bui ve ark., 2018). PET, maden suyu şişeleri, meşrubat şişeleri, gıda ambalajları gibi bir çok üründe kullanılmaktadır (Al-Hadithi ve ark., 2019; Nikbin ve ark., 2022). Yıllık küresel PET şişe tüketiminin 2007 yılında 250,000 milyon adet olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, bunun büyüme oranı %15 olarak tahmin edilmiştir (Al-Hadithi ve ark., 2019).

PET lifler, genellikle atık PET şişenin kesilmesiyle oluşturulan plastik liflerdir. PET liflerin betonda kullanılması, atık plastiklerin olumsuz çevresel etkilerini azaltmak için çözümlerden birini temsil etmektedir. Ayrıca, betonun bazı istenen özelliklerini iyileştirmeye yardımcı olabilmektedir. PET liflerin üretimi, PET şişelerin uygun liflere manuel veya mekanik olarak kesilmesiyle düşük maliyetli ve düşük enerji tüketen yöntemlerle yapılabilmektedir. Sonuç olarak, iyi korozyon direncine ve genel performansa sahip ucuz lifler üretilmektedir (Khalid Ali ve ark., 2022).

Liflerin betonun özellikleri üzerindeki etkisi, tipi, çekme mukavemeti, narinlik oranı gibi faktörlere bağlıdır. Betona STF, PPF ve PETF'nin eklenmesinin, betonun genel

performansını iyileştirebildiği rapor edilmiştir. Bu lifler, betonun mekanik özelliklerini (özellikle eğilme dayanımını ve enerji yutma kapasitesini), çarpma dayanımını, dayanıklılığını, yorulma direncini, donma ve çözülme direncini, büzülme direncini, sünme direncini, sürdürülebilirliğini ve kullanım ömrünü önemli ölçüde iyileştirebilmektedir (Kavya Sameera ve Keshav, 2022; Khan ve ark., 2022; Ozturk ve Ozyurt, 2022; Pelisser ve ark., 2012; Tang ve ark., 2022; Y. Wang ve ark., 2022; Yoo ve ark., 2015). Bu, liflerin çatlak oluşumunu ve yayılmasını etkili bir şekilde engellemesine, çatlama direncini arttırmasına ve çatlak köprülleme etkisine bağlanabilir. (Alavi Nia ve ark., 2012; Y. Wang ve ark., 2022).

Liflerin çatlak köprülme etkisinin şematik gösterimi Şekil 1.4.'te sunulmaktadır. Bu etkinin daha net bir şekilde anlaşılması için lif donatılı betonun tek eksenli çekme etkisi altında gerilme-deplasman ilişkisi şekilde de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi liflerin önemli miktardaki etkisi ilk çatlak oluşumundan sonra başlamaktadır. Lifler, çatlak yönünde gerilmeleri çimento hamuruna aktaran köprüler oluşturur. Dolayısıyla, betonun gevrekliği kayda değer miktarda azalır. Şekil 1.4.'ten de görüldüğü gibi, lifsiz betonda, pik yükten sonra gerilme-deplasman grafiğinde keskin bir düşüş gözlenmektedir. Liflerin kullanılmasında, çatlakların köprülenmesinden dolayı gerilme aşamalı ve yumuşak olarak azalır. Böylece, betonun sünekliliği ve enerji yutma kapasitesi önemli ölçüde artar. Sonuç olarak, lifler betonun pik sonrası statik ve çarpma performansını önemli miktarda arttırır (Khan ve ark., 2022; Öz, 2014; Yoo ve ark., 2015). Şekilden de görüldüğü gibi, agregaların çatlak köprülleme etkisi de bulunmaktadır. Ancak bu etki liflerin etkisinden çok daha kısıtlıdır.



Şekil 1.4. Betonun tek eksenli çekme yükü altındaki davranışı üzerinde liflerin etkisinin şematik gösterimi (Öz, 2014)

Öte yandan, yaygın olarak kullanılan liflerin çoğu bazı dezavantajlara sahiptir (Tang ve ark., 2022). Aynı anda birden fazla lif tipinin kullanımı (hibrit kullanımı) ile bu dezavantajlar giderilebilir. Bu çalışmada, STF, PPF ve PETF'nin tek ve hibrit kullanımı deneysel olarak araştırılmıştır.

1.3. Atık Lastik Kauçuklar

Atık lastik kauçuklar, uygun olmayan şekilde doğaya atıldığında büyük çevre, sağlık ve ekonomik sorunlara yol açabilen kullanım ömrünü tamamlamış malzemelerdir. Bunun nedeni, biyolojik olarak çözünmeyen özellikleri, içeriğindeki toksik bileşenleri ve çok fazla miktarda doğaya atılmasıdır. Ayrıca, suyu uzun süre tutabilmeleri nedeniyle hava, su ve toprak kirliliğini arttırmaları. Bazı haşereler ve sivrisineklerin yayılması için uygun ortam oluştururlar (Gravina ve Xie, 2022; R. Kumar ve Dev, 2022; H. Wang ve ark., 2022; Werdine ve ark., 2021; Zafar ve ark., 2022; R. Zhang ve ark., 2022). Dünya genelinde her yıl yaklaşık 1.5 milyar lastiğin üretildiği ve yaklaşık 1 milyar lastiğin atık malzeme haline geldiği tahmin edilmektedir (Jalal ve Jalal, 2020; Kazmi ve ark., 2021; H. Wang ve ark., 2022). Bunların %50'sinden azı geri dönüştürülmekte ve geri kalanı atık depolama sahalarına atılmaktadır (Gravina ve Xie, 2022; H. Wang ve ark., 2022). Yıllık atık lastik miktarının 2030 yılı sonunda 5 milyar lastiğe ulaşması beklenmektedir (Thomas ve Chandra Gupta, 2016; Zafar ve ark., 2022). Bu atık lastik kauçuklar betonda uygun bir şekilde kullanılırsa çevre dostu betonların üretiminin yanı sıra betonun bazı zayıf yönlerine de iyi bir çözüm olabilmektedir. Betonda kullanılabilecek ince ve iri atık lastik kauçuğun hazırlanma süreci Şekil 1.5.'te gösterilmiştir.

Atık lastik kauçukların betonda uygun bir şekilde kullanılmasının betonun çarpma dayanımı, sünekliği, enerji emme kapasitesi, sönüm oranı, yorulma direnci, donma direnci, sülfat atağı direnci, klorür penetrasyon direnci ve aşınma direnci gibi özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür (Ali Emadi ve Modarres, 2021; C. Chen ve ark., 2021; L.-Y. Feng ve ark., 2021; Habib ve ark., 2020; Jalal ve Jalal, 2020; R. Kumar ve Dev, 2022; H. Wang ve ark., 2022). Ayrıca, atık lastik kauçuk normal betona göre daha düşük ağırlığa sahip bir betonun üretilmesini sağlayabilmektedir. Bu da inşaat sektöründe faydalıdır. Ayrıca, doğal agregaların atık lastik kauçuklarla kısmen değiştirilmesi, doğal kaynakların korunmasına yardımcı olacaktır (Gupta ve ark., 2015; Medine ve ark., 2020; Werdine ve ark., 2021).



Şekil 1.5. Betonda kullanılacak atık lastik kauçuğun hazırlanma süreci (Mhaya ve ark., 2021)

Atık lastik kauçuklu beton, düşük dayanımlı bir betondur. Ancak betonun performansı üzerindeki avantaj ve dezavantajları göz önüne alındığında ticari olarak büyük ölçekte üretilebilir ve yüksek dayanım gerektirmeyen yerlerde kullanılabilir. Bu olası uygulamalardan bazıları çarpma bariyerleri, spor alanı kaldırımları, oyun alanı zeminleri ve makine temelleridir (Atahan ve Yücel, 2012; Gravina ve Xie, 2022; Gupta ve ark., 2015). Ancak, betonda yüksek miktarda atık lastik kauçuk kullanımı (hacimce %25'ten fazla) araştırmacılar tarafından önerilmemektedir. Bunun nedeni üretilen betonun dayanımının çok düşük olmasıdır. Bununla beraber diğer bir sebep de, atık lastik kauçuğun bir inşaat malzemesi olarak kullanılabilmesi için hazırlanma sürecinde zararlı çevresel etkilere neden olan yüksek enerji tüketimidir (Gravina ve Xie, 2022). Bu çalışmada, iki tür atık lastik kauçuk kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla ince ve iri agregaları kısmen değiştirmek için kullanılabilen ince ve iri atık lastik kauçuklardır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatür taramasında, farklı katkı maddelerinin çimento esaslı malzemelerin statik özellikleri ve çarpma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırılan katkı maddeleri nano-SiO₂ (NS), nano-Al₂O₃ (NA), nano-Fe₂O₃ (NF), ince atık lastik kauçuk (FR), iri atık lastik kauçuk (CR), çelik lif (STF), polipropilen lif (PPF) ve PET liftir (PETF). Ayrıca çarpma yüklerine maruz kalan betonarme plakların davranışı da irdelenmiştir. Bu kaynak araştırmasında, mevcut çalışmanın konusuyla ilgili literatürde bulunan en önemli araştırmaların bazıları özetlenmiştir. Buna göre, daha önce yeterince araştırılmamış bazı konular hakkındaki bilgi birikimini artırmaya çalışan bu çalışmanın önemi de vurgulanmıştır.

2.1. Katkı Maddelerinin Çimento Esaslı Malzemelerin Özellikleri Üzerindeki Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Farklı katkı maddelerinin çimento esaslı malzemelerin özellikleri üzerindeki etkisi birçok araştırmada incelenmiştir. Bu literatür araştırmasında, nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, çelik lif, PET lif, polipropilen lif, ince atık lastik kauçuk ve iri atık lastik kauçuğun betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, tokluk özellikleri, mikroyapısal özellikleri ve çarpma davranışı üzerindeki etkisine odaklanılmıştır.

Kaynak araştırması, katkı maddelerine göre farklı bölümlere ayrılmıştır. Bazı araştırmalarda birden fazla katkı maddesi incelenmiştir. Bu durumda, araştırmalar, önceki bölümde özetlenip sonraki bölümlerde tekrar edilmemiştir.

2.1.1. Nano-SiO₂

NS'nin çimento esaslı malzemelerin statik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için Al-Hagri ve Döndüren (2022) tarafından kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. NS'nin çimento esaslı malzemelerde kullanımının maliyet etkinliği de tartışılmıştır. Yazarlar, çimento esaslı malzemelerin genel performanslarını iyileştirmek için NS'nin optimum kullanım oranını bulmaya çalışmışlardır. NS'nin, çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını, eğilme dayanımını, dayanıklılığını ve mikroyapısal özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceği

sonucuna varılmıştır. NS'nin çimento esaslı malzemelerde optimum kullanım oranının bağlayıcının ağırlığına göre %1 - %4 olduğu sonucuna varılmıştır. NS'nin çimento esaslı malzemelerin performansı üzerindeki etkisinin optimum oranına kadar orantılı olarak arttığı bulunmuştur. Optimum oranından sonra bu etkinin orantılı olarak azaldığı görülmüştür. NS'nin yapıların ilk maliyetini önemli ölçüde artırmamasına rağmen, bakım ve onarım maliyetlerini düşürmeye ve yapıların kullanım ömrünü uzatmaya yardımcı olarak ekonomik faydalar sağlayabileceği rapor edilmiştir. Sonuç olarak, NS'nin ticari kullanımını değerlendirmek için bir yaşam döngüsü maliyet analizinin yapılması önerilmiştir.

Hao ve ark. (2022), nano silika ve nano alüminanın kullanımının doymuş betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. NS ve NA çimentonun ağırlıkça %3 ve %6'sı yerine kullanılmıştır. Beton, 12 gün boyunca pH'ı 8 olan bir sodyum hidroksit çözeltisi içinde doyurulmuştur. Sonuçlar, NS ve NA'nın basınç dayanımını arttırdığını ve çatlak boyutlarını azalttığını göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, optimum kullanım oranı %3 olduğunu da göstermiştir. Sonuçlardan NA'nın, NS'den daha iyi bir etki gösterdiği de görülmüştür.

Demirhan ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, nano-SiO₂ ve nano-Al₂O₃ iki lif bileşimini (polivinil alkol lif (PF) ile kanca uçlu çelik lif (STF) ve pirinç kaplı mikro çelik lif (MSTF) ile kanca uçlu çelik lif) içeren betonarme kiriş elemanlarının mekanik özelliklerini ve çarpma davranışlarını incelemişlerdir. Kiriş numuneleri üzerinde ağırlık düşürme şeklinde çarpma testi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, basınç dayanımı açısından önemli bir fark bulunmamasına rağmen, genel olarak, betonun mekanik özelliklerinin iyileşmesi açısından, nano-Al₂O₃, nano-SiO₂'den daha iyi bir etki yarattığı görülmüştür. Test edilen tüm numunelerin basınç dayanımı 73-74 MPa olarak bulunmuştur. Nano katkı maddelerinin çarpma testi altında incelenen numunelerin deplasmanını azalttığı ve ivmesini de arttırdığı bulunmuştur. Bu da nano katkı maddelerinin genel çarpma davranışını iyileştirdiğini göstermektedir. NA'nın betonun çarpma performansını NS'dan daha fazla arttırdığı da gözlenmiştir. Bunun nedeni, NA'nın mekanik özellikler (özellikle eğilme özellikleri) üzerindeki etkisinin NS'ye göre daha iyi olmasına bağlanmıştır. Öte yandan, STF ile MSTF içeren numuneler daha fazla eğilme mukavemetine sahipken, STF ile PF içeren numunelerin daha fazla eğilme yer değiştirmesi kapasitesi sergilediği görülmüştür. Liflerin çarpma performansını iyileştirdiği de gözlenmiştir. Genel olarak, STF ile MSTF'in kullanımının STF ile PF'den daha iyi bir çarpma performansı gösterdiği bulunmuştur.

Wu ve ark. (2018) çalışmalarında, NS'nin, lifsiz ve %2 çelik lif içeren ultra yüksek performanslı betonun (UYPB) statik ve dinamik mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dinamik testler ağırlık düşürme deneyi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, ağırlıkça %1 NS'nin, lifsiz betonun basınç dayanımını, statik eğilme dayanımını, çarpma eğilme dayanımını, toplam statik enerjisini ve toplam çarpma enerjisini sırasıyla %10, %13.3, %15.4, %22.2 ve %11.5 oranlarında arttırdığını göstermiştir. Bu artış oranları, %2 çelik lifin kullanımıyla daha da fazla artmıştır. Çelik lifin betonun sünekliğini de önemli bir ölçüde arttırdığı da gözlenmiştir. Mikroyapı analizinden, NS'nin mikroyapının yoğunluğunu arttırdığı görülmüştür. Bu da daha iyi bir lif-beton matrisi bağının oluşmasını sağlamıştır.

J. V. Silva ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, NS, NA ve STF'nin kullanımının, farklı çimento dozlarıyla yapılan betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, NS ve NA'nın betonun basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Öte yandan, %0.5 çelik liflerin betonun basınç dayanımını yaklaşık %7 oranında arttırdığı bulunmuştur. Sonuçlar ayrıca, NS'nin, düşük çimento dozları ile üretilen betonarme kirişlerin kesme ve eğilme mukavemeti üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ancak, NA'nın olumlu bir etki yarattığı bulunmuştur. %2 NA'nın kesme mukavemetini ve eğilme momenti kapasitesini sırasıyla %3 ve %4.5 oranlarında arttırdığı bulunmuştur. Daha yüksek çimento dozlarıyla üretilen kirişlerde ise, NS ve NA kesme mukavemetinde sırasıyla %9 veya %7'lik bir artış yaratmıştır. Ancak, eğilme momenti kapasitesi üzerinde neredeyse hiçbir etkisi olmamıştır. Öte yandan, çelik liflerin betonarme kirişlerin kesme mukavemetini, eğilme momenti kapasitesini ve sünekliğini önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Çelik liflerin etkisi nano katkı maddelerinin etkisinden çok daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ancak, nano partiküller ve çelik lifler arasındaki etkileşimin betonarme kirişlerin mukavemeti üzerinde olumsuz bir etki gösterdiği gözlenmiştir.

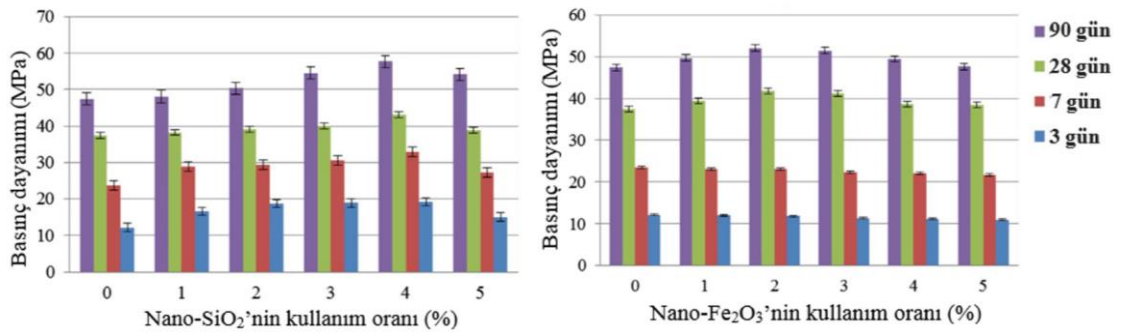
Su ve ark. (2016) tarafında gerçekleştirilen çalışmada, NS ve NA, mikro çelik lif içeren ultra yüksek performanslı betonun (UYPB) statik özellikleri ve dinamik tepkisi incelenmiştir. Dinamik davranışlar Hopkinson yarma basınç çubuğu kullanılarak incelenmiştir. NS ve NA ağırlıkça %3 oranında kullanılmıştır. Nano katkı maddelerinin basınç dayanımını ve yarmada çekme dayanımını arttırdığı bildirilmiştir. NS, NA'dan biraz daha iyi bir basınç dayanımı sağlamışken yarmada çekme dayanımı durumunda ise NA daha iyi bir performans göstermiştir. Öte yandan, nano katkı maddelerinin betonun dinamik dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Geleneksel

normal mukavemetli beton ile karşılaştırıldığında, nano katkı maddeleri ve çelik lif içeren UYPB'nin daha az yüklemeye hızına karşı hassas olduğu da rapor edilmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi, NS ve NA içeren numunelerin oldukça az gözenekli ve kompakt mikroyapılara sahip olduğunu göstermiştir. Bu da ultra küçük nano partiküllerin boşluk doldurma etkisine bağlanmıştır. Ayrıca, dayanımı azaltıcı büyük kristaller şeklinde Ca(OH)_2 'nin gözlenmediği bildirilmiştir. Bu, nano partiküllerin Ca(OH)_2 ile puzolanik reaksiyonlarından kaynaklandığı belirtilmiştir.

W. Li ve ark. (2016) çalışmalarında, NS'nin geri dönüşümlü agregalı betonun (GDAB) statik ve dinamik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Dinamik testler Hopkinson yarma basınç çubuğu kullanılarak yapılmıştır. NS çimentonun yerine ağırlıkça %1 ve %2 olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, NS içeren GDAB'lerin kontrol GDAB'ye kıyasla hem statik hem de dinamik basınç dayanımının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Statik basınç dayanımı açısından NS'nin optimum kullanım oranının %2 olduğu bulunmuştur. %2 NS'nin betonun basınç dayanımını %21.6 oranında arttırdığı görülmüştür. Öte yandan, %1 NS içeren betonun, %2 NS içeren betondan daha yüksek bir dinamik basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. %1 NS içeren betonun dinamik basınç dayanımı referans betona göre %10.3 daha yüksek olduğu bulunmuştur. NS kullanıldığında betonun hasar şeklinde hiçbir fark gözlenmemiştir. Bunun, uygulanan çarpma yükünün yüksek hızlı olduğuna bağlı olduğu düşünülmüştür.

Bolhassani ve Samani (2015) tarafından yapılan çalışmada, nano silikanın türünün, dozajının ve ortalama partikül boyutunun harcın basınç dayanımına ve mikroyapısına etkisi araştırılmıştır. Basınç dayanımının, NS'nin şekinden (toz veya kolloidal) etkilenmediğini bulmuşlardır. Fakat özgül yüzey alanında (ÖYA) değişimden etkilendiğini bulmuşlardır. ÖYA, partikül boyutu ve kullanım oranı için sırasıyla 80-380 m^2/g , 7-25 nm ve %0.5, %1.5, %3 ve %5 değerleri araştırılmıştır. Çalışmada en iyi sonuçlar NS'nin özgül yüzey alanı 90 m^2/g ve içeriği %3 olduğunda gözlenmiştir. Bu durumda, 28 günlük basınç dayanımındaki artışın %13.1 olduğu bulunmuştur. Mikroyapı analizi, NS içeren numunelerin yoğun bir mikroyapıya sahip olduğunu göstermiştir. NS, karışımdaki kalsiyum hidroksitin (CH veya Ca(OH)_2) miktarını ve ara yüzey geçiş bölgesindeki (ITZ) portlandit miktarını azaltmıştır. Bu da, NS partiküllerinin yüksek puzolanik reaktivitesine bağlanmıştır. Bununla birlikte, NS'nin içeriğini ve ÖYA'sını arttırdığından zayıf bölgeler oluşmaya başlamıştır. Bu da, NS'nin partiküllerinin zayıf dağılımına bağlanmıştır.

Madandoust ve ark. (2015), NS ve NF'nin ayrı ayrı kullanımının uçucu kül içeren harcın özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. NS ve NF, çimentonun yerine ağırlıkça %5'e kadar kullanılmıştır. Sonuçlar, NS ve NF'nin harcın basınç dayanımını, dayanıklılığını ve mikroyapısal özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Nano silika ve nano demirin harcın farklı yaşlarda basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 2.1.'de gösterilmektedir. NS ve NF'nin optimum içeriği sırasıyla %4 ve %2 olarak bulunmuştur. %4 NS ve %2 NF'nin kullanımı, 28 günlük basınç dayanımını 37.4 MPa'dan sırasıyla 43.03 MPa ve 41.76 MPa'ya yükseltmiştir. SEM analizinde, nano partiküller kullanıldığında daha yoğun ve daha küçük gözeneklere sahip mikroyapılar izlenmiştir.



Şekil 2.1. NS ve NF'nin harcın basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Madandoust ve ark., 2015)

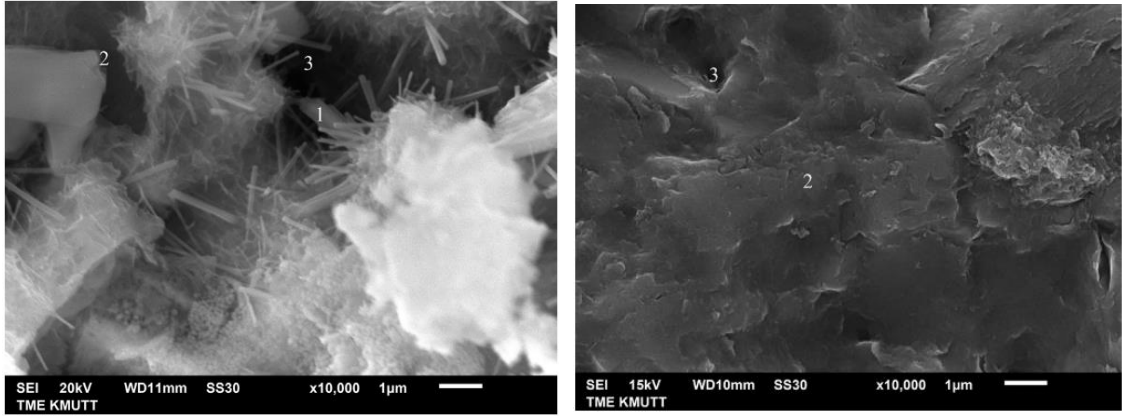
Benzer bir çalışmada, Mohseni ve ark. (2015) NS ve NA'nın ayrı ayrı ve bileşimler şeklinde kullanılmalarının uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen harcın (KYH) özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. NS ve NA çimentonun yerine ağırlıkça %1, %3 ve %5 olarak kullanılmıştır. NS ve NA'nın ayrı ayrı ve kombinasyonlar (NSA) halinde kullanılmalarının basınç dayanımını arttırdığı bulunmuştur. Basınç dayanımı açısından, NA, NS ve NSA'nın optimum içeriği sırasıyla %1, %3 ve %1 olduğu tespit edilmiştir. Araştırılan tüm kullanım oranlarında, NA'nın basınç dayanımı üzerindeki etkisinin, NS ve NSA'dan daha yüksek olduğu görülmüştür.

Biricik ve Sarier (2014) gerçekleştirdikleri çalışmada, partikülleri iyi bir şekilde dağılmış NS'nin, harcın mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın sonuçları, NS'nin farklı yaşlarda test edilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarını arttırdığını göstermiştir. Ağırlıkça %5 ve %10 NS, 7 günlük basınç dayanımında sırasıyla %10 ve %35'lik bir artış ve 28 günlük basınç dayanımında sırasıyla %31 ve %83'lük bir artış sağlamıştır. Ayrıca, %5 ve %10 NS'nin

kullanımıyla 7 günlük eğilme dayanımında sırasıyla %5 ve %15'lik bir artış gözlenmiştir. 28 günlük eğilme dayanımında ise sırasıyla %19 ve %32'lik bir artış bulunmuştur. SEM analizi, kontrol harcın mikroyapısında bulunan C-S-H ve CH tanelerinin heterojen bir dağılım gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Mikroyapıda bazı mikro çatlaklar görülebildiği bildirilmiştir. %10 NS'nin kullanılması çok yoğun bir mikroyapı oluşmasını sağlamıştır. NS içeren numunelerdeki CH kristallerinin miktarının, NS içermeyen numunelere göre daha az olduğu bulunmuştur. Ayrıca, büyük CH kristalleri gözlenmemiştir.

Ghafari ve ark. (2014) çalışmalarında, nano silikanın, çimento ağırlığının %27'si silis dumanı ile değiştirilmiş olan betonun performansına etkisini araştırmışlardır. Nano-SiO₂'nin kullanılmasının betonun erken yaştaki basınç dayanımını önemli ölçüde arttırdığını göstermişlerdir. NS'nin optimum kullanım oranının %3 olduğu bulunmuştur. Bu oranda NS'nin kullanılmasıyla 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımında sırasıyla yaklaşık %24, %7.5 ve %6.5'lik bir artış gözlenmiştir. SEM analizi, NS'nin betonun gözenekliliğini önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Bu da daha kompakt ve yoğun bir mikroyapı yaratmıştır. NS'nin portlanditin miktarını etkili bir şekilde azalttığı ve agregaya ile harcın arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinde daha yoğun bir mikroyapı sağladığı gözlenmiştir. NS kullanıldığında, harç ve agregalar arasında mükemmel bir bağ olduğu gözlenmiştir.

Haruehansapong ve ark. (2014) çalışmaları kapsamında, NS'nin farklı tane büyüklüğünün harcın basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Test sonuçları, NS'nin çimento harcının basınç dayanımını önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, NS'nin tane boyutunun harcın basınç dayanımını doğrudan etkilediği bulunmuştur. 40 nm tane boyutu olan NS içeren harçlar, 12 nm ve 20 nm tane boyutu olan NS içeren harçlara göre daha yüksek bir basınç dayanımı göstermiştir. SEM analizi, silika nano partiküllerinin çimento hamurunun gözeneklerini doldurduğunu ve daha homojen, yoğun ve kompakt bir mikroyapı oluşturduğunu göstermiştir. Normal ve NS içeren betonun SEM görüntüleri Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 2.2. SEM analizi görüntüleri, a) Referans numune, b) %9 oranında, 40nm tane boyutuna sahip NS içeren numune, 1 = Ca(OH)₂ kristali, 2 = C-S-H, 3 = gözenek (Haruehansapong ve ark. 2014)

Beigi ve ark. (2013) çalışmalarında, NS, STF ve PPF'nin kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. NS çimentonun yerine ağırlıkça %0, %2, %4, %6 oranlarında kullanılmıştır. STF ve PPF ise sırasıyla hacimce %0.2, %0.3 ve %0.5 ve %0.1, %0.15 ve %0.2 oranında betona eklenmiştir. Sonuçlar, NS'nin KYB'nin mekanik özelliklerini arttırdığını göstermiştir. En iyi sonuçların, basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %18, %35 ve %39 arttıran %4 NS'den elde edildiği belirtilmiştir. Sonuçlar ayrıca, çelik liflerin betonun mekanik özelliklerini arttırdığını göstermiştir. %0.5 çelik lifin eklenmesi, basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını, eğilme dayanımını ve tokluğu sırasıyla %6.85, %45, %37.2 ve %2519.24 arttırdığı gözlenmiştir. Öte yandan, polipropilen liflerin içeriği arttıkça basınç dayanımının hafifçe azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, PP lif KYB'nin diğer mekanik özelliklerini arttırmıştır. Çelik liflerin PP liflerden daha iyi performans gösterdiği gözlenmiştir. Çelik ve PP liflere ek olarak NS'nin kullanılmasının, NS içermeyen lif donatılı KYB'ye kıyasla betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. Mikroyapısal analiz, NS'nin yüksek puzolanik aktivitesi ile çimento karışımındaki CH'yi önemli ölçüde azalttığını göstermiştir.

Oltulu ve Şahin (2013) çalışmalarında, bazı nano katkı maddelerinin (NS, NA ve NF) tekil, ikili ve üçlü kombinasyonlarının uçucu kül içeren çimento harçlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. NS, NA ve NF ağırlıkça %0.5, %1.25 ve %2.5 oranlarında kullanılmıştır. Genel olarak, nano katkı maddelerinin optimum kullanım oranının %1.25'in olduğu bulunmuştur. Ancak, NA ve NF'nin tek olarak eklenmesinin 28 günlük basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı

bulunmuştur. Nano katkı maddelerinin ikili ve üçlü kombinasyonlarında kullanılmasının 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisinin ayrı ayrı kullanılmalarından daha iyi olduğu bulunmuştur. Çalışmada en iyi sonuçlar, %1.25 oranında NS+NA+NF içeren harçlardan elde edilmiştir. Bu harcın basınç dayanımı referans harca göre %31.5 daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Benzer bir çalışmada, Oltulu ve Şahin (2011), NS, NA ve NF'nin silis dumanı içeren çimento harçlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Nano katkı maddeleri ağırlıkça %0.5, %1.25 ve %2.5 oranlarında ayrı ayrı ve farklı kombinasyonlarda kullanılmıştır. Sonuçlar, nano katkı maddelerinin ayrı ayrı ve kombinasyonlarda kullanılmasının basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. NA'nın basınç dayanımı üzerindeki etkisinin, NS ve NF'nden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Genel olarak, düşük nano katkı maddelerinin içeriğinin (%0.5 ve %1.25) yüksek içeriğe göre daha iyi bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, ikili ve üçlü kombinasyonlarda kullanılan nano malzeme tozları arasındaki etkileşimin harçların mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu tespit edilmiştir.

M. Zhang ve Li (2011) yaptıkları çalışmada, nano katkı maddeleri ve polipropilen lif içeren betonun mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar, az içerikte (ağırlıkça %1) NS'nin kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini arttırdığını göstermiştir. %1 NS'nin, betonun basınç dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %12.31 ve %4.21 oranlarında arttırdığı bulunmuştur. Daha yüksek NS kullanımı, betonun mekanik özellikleri üzerinde normal betona göre daha fazla bir etki göstermemiştir. Sonuçlar ayrıca, PP liflerin betonun mekanik özelliklerini, özellikle eğilme dayanımını, önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. PP lif içeriği arttıkça bu etkinin arttığı bulunmuştur. Sonuçlar, NS'nin gözenekliliği, zararlı gözenek miktarını ve gözenek çapını azalttığını da göstermiştir. Bu etkinin, NS'nin içeriği arttıkça arttığı bulunmuştur. Öte yandan, PP liflerin içeriği arttıkça gözenekliliğin, zararlı gözenek miktarının ve gözenek çapının arttığı görülmüştür.

Givi ve ark. (2010) çalışmalarında, iki farklı tane boyutlu (15 nm ve 80 nm) nano-SiO₂'nin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. NS ağırlıkça %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında kullanılmıştır. Sonuçlar, nano silikanın betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. 15 nm boyutlu NS'nin, 80 nm boyutlu NS'den daha iyi bir etki gösterdiği bulunmuştur. Sonuçlar ayrıca, 15 nm boyutlu ve 80 nm boyutlu NS'nin optimum kullanım oranının sırasıyla %1 ve %1.5 olduğunu göstermiştir. 15 nm boyutlu %1 NS, 28 günlük basınç dayanımını, yarmada

çekme dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %18.5, %83.3 ve %31.8 artırmışken, 80 nm boyutlu %1.5 NS dayanımları sırasıyla %12, %72.2 ve %22.7 oranlarında arttırmıştır.

He ve Shi (2008) gerçekleştirdiği çalışmada, %1 nano-SiO₂, %1 nano-Fe₂O₃ ve %1 nano-Al₂O₃'ün çimento harcının mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, nano partiküllerin harcın mikroyapısını önemli bir şekilde iyileştirdiğini göstermiştir. Mikroyapısal analiz, nano malzemelerin kullanılmasının daha yoğun bir mikroyapı yarattığını ortaya koymuştur. Nano partiküller içeren harçlarda C-S-H miktarı yükselmiştir. Ayrıca, CH kristalleri ve iğne şeklinde bulunan etrenjit kristalleri çok azalmıştır.

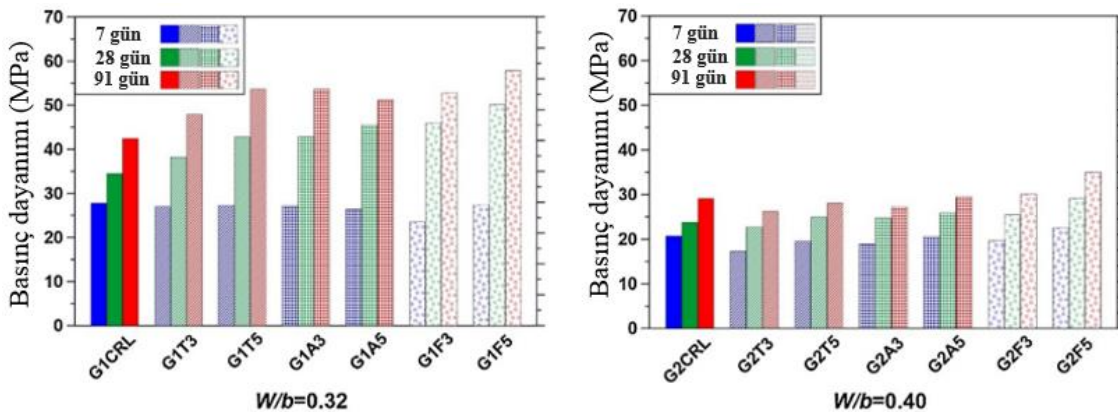
H. Li ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada, nano-SiO₂ ve nano-Fe₂O₃ içeren çimento harcının mekanik ve mikroyapısal özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, NS'nin ve NF'nin, çimento harçlarının 7. ve 28. günlerde ölçülen basınç ve eğilme dayanımlarını iyileştirdiğini göstermiştir. Basınç dayanımı açısından optimum kullanım oranı olan %10 NS, basınç dayanımını kontrol numuneye göre %26 oranında yükseltmiştir. %3 ve %5 NS, sırasıyla %13.8 ve %17'lik bir artış sağlamıştır. Ayrıca, NS'nin %5'e kadar kullanılmasının harcın 28 günlük eğilme dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. %3 NS ve %5 NS, harcın eğilme dayanımını sırasıyla 17.8% ve %27 oralarında arttırmıştır. Sonuçlar ayrıca, %1 nano-Fe₂O₃'ün kullanılmasının 28 günlük basınç dayanımını önemli ölçüde arttırdığını (referans numuneye göre %26 daha yüksek) göstermiştir. Eğilme dayanımı durumunda %2 NF'nin, %1 NF'den daha iyi sonuçlara (sırasıyla %23 ve %17.8 bir artış) sahip olduğu bulunmuştur. SEM analizi, NS ve NF içeren harçların normal harçtan daha iyi ve yoğunlaştırılmış bir mikroyapıya sahip olduğunu göstermiştir. NS ve NF'nin, gözenekleri doldurduğu ve hidratlar arasındaki Ca(OH)₂ kristallerini azalttığı bulunmuştur.

2.1.2. Nano-Al₂O₃

Ankamma ve Srujan Kumar (2022) tarafından yapılan çalışmada, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ nano partiküllerinin kullanımının betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. NA ve NF ağırlıkça %3.25'e kadar çimentonun yerine tekil ve hibrit şekillerde kullanılmıştır. Test sonuçları, optimum kullanım oranı ağırlıkça %2.25 olan nano partiküllerin betonun basınç dayanımını, eğilme dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve mikroyapısal özelliklerini önemli ölçüde artırabildiğini göstermiştir.

NA'nın ve NF'nin etkilerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, NA'nın ve NF'nin hibrit kullanımındaki dayanım artışının, sadece NA'nın veya NF'nin kullanımındakiyle nispeten eşit olduğu bulunmuştur. %1.13 NA + %1.13 NF bir bileşim şeklinde kullanıldığında, 28 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı sırasıyla yaklaşık %14, %16 ve %11 oranında artmıştır. SEM analizi, NA'nın ve NF'nin, nano partiküllerinin yüksek reaktivitesinden dolayı CH kristallerini azalttığını göstermiştir. Sonuç olarak, hidrasyon hızlandırılmış, betonun mikroyapısı daha yoğun olmuş ve genel olarak dayanım artmıştır.

Joshaghani ve ark. (2020) çalışmalarında, farklı nanopartiküllerin kendiliğinden yerleşen betonun farklı yaşlardaki performansı üzerindeki etkileri üzerine deneysel bir inceleme yapmışlardır. Çalışmada, ortalama tane büyüklükleri 15 nm, 14 nm ve 18 nm olan sırasıyla nano- Al_2O_3 , nano- Fe_2O_3 ve nano- TiO_2 (NT) kullanılmıştır. Nano malzemeler ağırlıkça %3 ve %5 oranlarında kullanılmıştır. Sonuçlar, nano katkı maddelerinin betonun basınç dayanımını ve dayanıklılığını artırdığını göstermiştir. Nano- Fe_2O_3 'ün nano- Al_2O_3 'e kıyasla mukavemetin artırılmasında daha üstün bir etki gösterdiği bulunmuştur. Bu bulgular, mikroyapıda kalsiyum ferrik hidrat (C-F-H) jeli oluşumuna bağlanmıştır. Ayrıca nano partiküller, çimento partikülleri için çekirdeklenme bölgeleri sağlayarak hidrasyon hızını arttırmaktadır. Bu, mikroyapının daha yoğun ve homojen olmasını ve gözenek boyutlarının küçültülmesini sağlamaktadır. Çalışmada elde edilen basınç dayanımının test sonuçları Şekil 2.3.'te gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, nano malzemelerin betonun özellikleri üzerindeki etkisinin su/bağlayıcı oranından etkilendiği izlenmiştir. Su/bağlayıcı oranı azalınca nano katkı maddelerinin etkisinin yükseldiği görülmüştür.



Şekil 2.3. Joshaghani ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları, W/b = su/bağlayıcı, G1CRL = referans beton, G1T3 = %3 NT içeren beton, G1A3 = %3 NA içeren beton, G1F3 = %3 NF içeren beton

Mohseni ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, NA ve PP liflerinin kullanılmasının pirinç kabuğu külü (RHA) içeren çimento harçlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı, dayanıklılığı ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada NA ve PPF'nin incelenen kullanım oranları sırasıyla ağırlıkça %1, %2, ve %3 ve hacimce %0.3'tür. Sonuçlarda, nano- Al_2O_3 'ün, RHA'nın kullanılmasından oluşan dayanım kaybını telafi edebildiği görülmüştür. NA'nın en etkili kullanım oranı %3 olarak bulunmuştur. Ayrıca, %0.3 PP lifin ilave edilmesinin, harçların basınç dayanımını az bir miktarda arttırdığı bulunmuştur. Öte yandan, PPF'nin eğilme mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı açısından en iyi sonuçlar %3 NA ve %0.3 PPF'nin aynı zamanda kullanılmasında ve RHA'nın az olduğunda (ağırlıkça %10) bulunmuştur. Bu durumda, normal harca göre basınç dayanımında ve eğilme dayanımında %18.2 ve %34 bir artış izlenmiştir. Mikroyapı analizi, NA ve PP liflerin mikroyapıyı geliştirebildiğini göstermiştir.

Mohseni ve Tsavdaridis (2016) tarafından yapılan çalışmada, ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında NA ve ağırlıkça %25 uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen harçların basınç dayanımı, dayanıklılığı ve mikroyapısal özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar, NA partikülleri içeren karışımların, farklı kürlenme yaşlarında kontrol numuneye kıyasla daha yüksek bir basınç mukavemeti gösterdiğini ortaya koymuştur. NA'nın optimum kullanım oranı %1 olduğu ve bu oranın 28 günlük basınç dayanımını %16 oranında arttırdığı bulunmuştur. SEM analizi, NA içeren harçların yoğun, kompakt ve daha homojen bir mikroyapıya sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte, NA'nın %1 oranından daha fazla eklenmesinin, topaklanma nedeniyle numunelerin gözenek hacminde bir artışa sebep olduğu gözlenmiştir.

Arefi ve ark. (2011) araştırmalarında, %1, %3 ve %5 NA içeren çimento harcının basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarını ve mikroyapısını incelemişlerdir. Sonuçlar, %1 ve %3 NA'nın kullanılmasının harcın mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Ancak, %5 NA'nın normal harca kıyasla mekanik dayanımda ciddi bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. Optimum kullanım oranında (%3) NA'nın kullanılmasının, 7 günlük basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını normal harca göre sırasıyla %63.38, %81.46 ve %70 oranında arttırdığı gözlenmiştir. SEM analizi, NA'nın $Ca(OH)_2$ kristallerinin azalmasını sağladığını, daha yoğun bir mikroyapı oluşturduğunu ve gözenekleri doldurduğunu göstermiştir.

2.1.3. Nano-Fe₂O₃

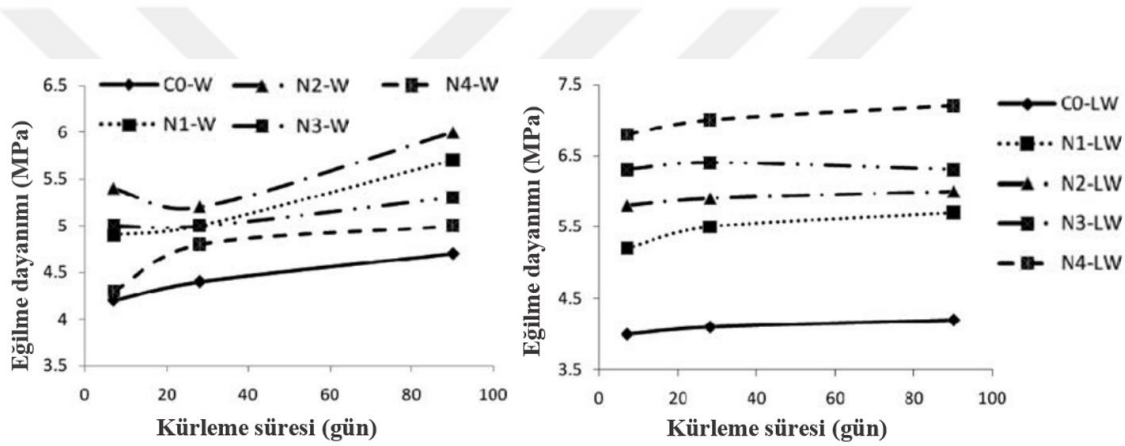
Fe₂O₃ nano partiküllerinin kullanımının 300 °C ve 400 °C sıcaklıklarında çimento hamurunun mekanik performansı üzerindeki etkisi Heikal ve ark. (2021) tarafından incelenmiştir. NF ağırlıkça %1-4 oranlarında kullanılmıştır. Sonuçlar, NF'nin özellikle erken yaşlarda, çimento hamurunun basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Nano-Fe₂O₃ partiküllerinin, çimento hamurunun hidrasyonunu bir günde içerisinde önemli miktarda hızlandırdığı ve puzolanik reaksiyonu arttırdığı bulunmuştur. Sonuç olarak, NF erken dayanımı önemli bir seviyede arttırmıştır. Çalışmada optimum kullanım oranını temsil eden %1 NF, 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımını sırasıyla %98, %86, %53, %35 ve %21'e kadar arttırmıştır. NF'nin ayrıca dayanıklılığı arttırdığı ve çimento hamurunun gözenekliliğini azalttığı bulunmuştur.

Cibilakshmi ve Jegan (2020) tarafından yapılan çalışmada, NF'nin polivinil alkol (PVA) lifler içeren betonun performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. NF'nin kullanımının betonun basınç dayanımını ve çekme dayanımını arttırdığı bulunmuştur. NF'nin optimum kullanım oranının ağırlıkça %2 olduğu sonucuna varılmıştır. NF'nin mikro gözenekleri doldurduğu, mikroyapıyı yoğunlaştırdığı ve betonun hidrasyon sürecini hızlandırdığı bulunmuştur. Öte yandan, NF'nin yüksek kullanım oranı, dayanımda azalmaya neden olmuştur. Bu, NF'nin betondaki fazla silikayı sızdırdığından dolayı oluşmuştur.

Khoshakhlagh ve ark. (2012) çalışmalarında, NF'nin kullanılmasının yüksek performanslı KYB'un mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonuçları, NF'nin ağırlıkça %5'e kadar kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini arttırdığını ortaya koymuştur. Ancak, en iyi sonuçlar %4 NF'den elde edilmiştir. Referans betona kıyasla, %4 NF'nin 28 günlük basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla yaklaşık %72, %94 ve %76 oranlarında arttırdığı bulunmuştur. NF'nin, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşumunu hızlandırmak için bir aktivatör olarak davrandığı görülmüştür. Ayrıca, NF'nin, zararlı gözeneklerin hacmini ve çapını azalttığı izlenmiştir. NF'nin, numunelerin mikroyapısını iyileştirmek için bir nano dolgu maddesi olarak davrandığı da gözlenmiştir. Bu sayede, NF kullanıldığında betonun ara yüzey geçiş bölgesi ve mikroyapısı kayda değer bir şekilde iyileşmiştir.

Nazari ve Riahi (2011) gerçekleştirdikleri çalışmada, suda (W) ve doygun kireç suyunda (LW) kürlenmiş, NF içeren betonun eğilme dayanımını incelemiştir. Sonuçlar, NF'nin betonun eğilme dayanımını önemli ölçüde arttırabildiğini göstermiştir. Çalışmada

elde edilen test sonuçları Şekil 2.4.'te sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi, NF'nin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi betonun kürlendiği ortamdaki çok etkilenmiştir. Doygun kireç suyunda kürlenen betonlarda NF'nin etkisinin, suda kürlenen betonlardan daha fazla olduğu bulunmuştur. Numuneler suda kürlendiğinde, en yüksek performansın %1 NF'den elde edildiği görülmüştür. Bu NF'nin oranı, 28 günlük eğilme mukavemetini yaklaşık %22 oranında arttırmıştır. Bununla birlikte, numuneler doymuş kireç suyunda kürlendiğinde en iyi sonuçlar %2 NF'den elde edilmiştir. Bu da 28 günlük eğilme mukavemetini yaklaşık %70 oranında arttırmıştır. Ayrıca, NF'nin kullanılması sayesinde, C-S-H jelinin miktarının arttığı, çimento hidratasyonunun hızlandığı ve daha büyük gözeneklerin hacminin azaldığı gözlenmiştir. Bu da NF partiküllerinin yüksek reaktivitesine ve dolgu etkisine bağlanmıştır.

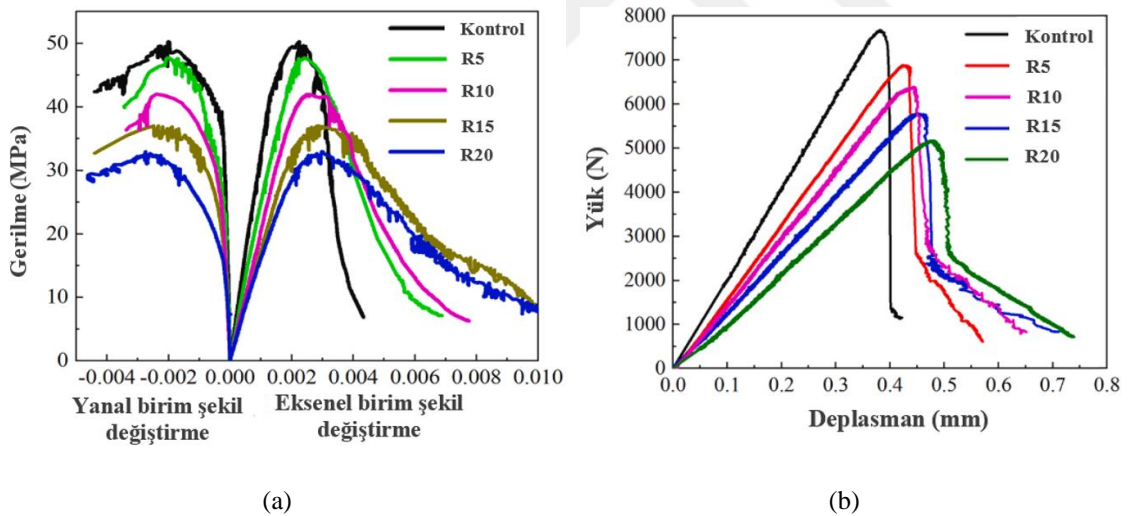


Şekil 2.4. Nazari ve Riahi (2011) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları, N1-W = suda kürlenen %1 NF içeren beton, N1-LW = doymuş kireç suyunda kürlenen %1 NF içeren beton

Yazdi ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada, ağırlıkça %1, %3 ve %5 NF içeren çimento harcının mekanik özelliklerini ve mikroyapısını araştırmışlardır. Sonuçlar, NF'nin mekanik özellikleri önemli ölçüde artırabildiğini göstermiştir. Normal harçlara kıyasla, %1 ve %3 NF'nin basınç dayanımını sırasıyla %56.44 ve %74 ve çekme dayanımını sırasıyla %34.43 ve %49 arttırdığı bulunmuştur. Ancak, %5 NF'nin, basınç ve çekme mukavemetlerini referans numunelere kıyasla önemli ölçüde azalttığı gözlenmiştir. SEM analizi, Fe_2O_3 nano partiküllerinin dolgu maddesi olarak davrandığını, gözenekleri tamamen doldurduğunu, büyük $Ca(OH)_2$ kristallerini azalttığını ve daha kompakt ve yoğun bir mikroyapı sağladığını ortaya koymuştur.

2.1.4. İnce ve iri atık lastik kauçuk

İnce agregaların atık lastik kauçukla kısmen değiştirilmesinin, alkali ile aktifleştirilmiş betonun mekanik özelliklerine etkisi H. Wang ve ark. (2022) tarafından araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, ince agreganın hacimce %20'ye kadar atık lastik kauçukla değiştirilmesinin, betonun basınç dayanımının, yarmada çekme dayanımının ve eğilme dayanımının azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Ancak, atık lastik kauçuğun kullanılmasıyla betonun enerji yutma kapasitesi önemli ölçüde artmıştır. Basınç dayanımı testinden ve eğilme dayanımı testinden elde edilen sonuçlar Şekil 2.5.'te sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere, atık lastik kauçuğun kullanımı maksimum yüke karşılık gelen birim şekil değiştirmeyi ve deplasmanı arttırmıştır. Bundan da anlaşılacağı üzere lastik kauçuk betonun şekil değiştirme kapasitesini yükseltmiştir. Çalışmada, betonun dayanımındaki azalma ve süneklilikteki iyileşme arasında iyi bir denge için lastik kauçukların optimum kullanım oranının hacimce %10-%15 olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.5. H. Wang ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları, a) basınç dayanımı test sonuçları, b) eğilme dayanımı test sonuçları, R5 = %5 atık lastik kauçuk içeren beton

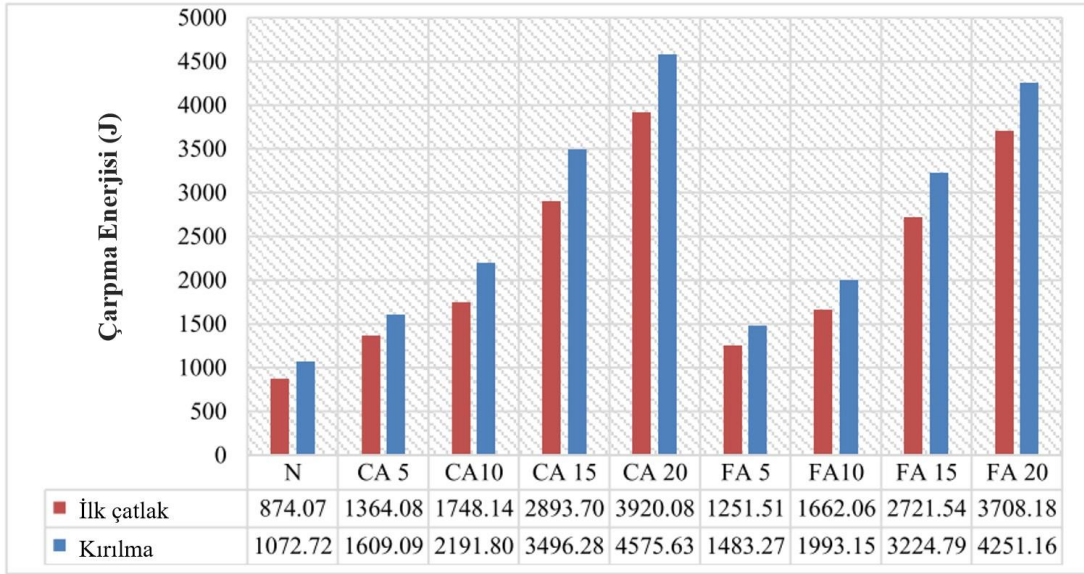
Zafar ve ark. (2022) çalışmalarında, hacimce %0-20 iri agrega, ince agrega ve çimentonun sırasıyla iri lastik kauçuk, ince lastik kauçuk ve toz lastik kauçuk ile değiştirilmesinin betonun özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, lastik kauçukların betonun basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını içeriğiyle orantılı olarak azalttığını göstermiştir.

Atık lastik kauçuğun üç türünün benzer bir performans gösterdiği bulunmuştur. Ancak toz halinde lastik kauçuk, CR ve FR'ye göre biraz daha fazla bir azaltma etkisi göstermiştir.

Chen ve ark. (2021) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, ince agregaların %10-30'u yerine lastik kauçuk içeren betonun basınç ve eğilme davranışı incelenmiştir. Lastik kauçuğun kullanılması nedeniyle betonun basınç dayanımında ve eğilme dayanımında azalma olduğu bildirilmiştir. Azalmanın lastik kauçuk içeriği ile orantılı olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, lastik kauçuğun betonun tokluğunu arttırdığı bulunmuştur.

L.-Y. Feng ve ark. (2021), ince agregaların hacimce %5-20'si yerine FR'nin kullanılmasının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. Sonuçlar, basınç dayanımının ve yarmada çekme dayanımının, FR içeriğiyle orantılı olarak azaldığını ortaya koymuştur. Ancak, suyla, NaOH çözeltisiyle veya NaOH+KH570 ile yıkama işlemi gibi uygun bir kauçuk ön iyileştirme işlemi uygulandığında, basınç dayanımı ve çekme dayanımı, ön işlem görmemiş kauçuklu betondan daha yüksek olmuştur. Elde ettikleri sonuçlar ayrıca, kauçuğun partikül boyutu 1-3 mm'den 3-5 mm'ye yükseldikçe, her iki durumda da basınç dayanımının ve yarmada çekme dayanımının arttığını göstermiştir.

Kadhim ve Al-Mutairee (2020) çalışmalarında, %5-20 FR veya CR'nin kullanılmasıyla betonun mekanik özelliklerinin (basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı) azaldığını bildirmişlerdir. Bu azalma lastik kauçuk içeriğiyle orantılı olduğu bulunmuştur. Öte yandan, FR ve CR'nin betonun çarpma dayanımını kayda değer miktarda arttırdığı görülmüştür. Yapılan ağırlık düşürme deneyi sonuçları Şekil 2.6.'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, çarpma dayanımının atık lastik kauçuğun miktarının artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Ayrıca yapılan tüm testlerde CR'nin FR'den daha iyi bir performans gösterdiği bulunmuştur.



Şekil 2.6. Atık lastik kauçuğun betonun çarpma dayanımı üzerindeki etkisi (Kadhim ve Al-Mutairee, 2020), N = normal beton, CA5 = %5 iri lastik kauçuk içeren beton, FA5 = %5 ince lastik kauçuk içeren beton

W. Feng ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, lastik kauçuklu betonun statik özelliklerini ve dinamik eğilme davranışını incelemiştir. Kauçuk partikülleri, farklı hacim oranlarında (%0-50) ince agregaların yerine kullanılmıştır. Kauçuk partiküllerinin kullanım oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanımlarının azaldığı bulunmuştur. %10 lastik kauçuk, basınç dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %9.8 ve %9.7 oranlarında azaltmışken, %50 lastik kauçuk dayanımları sırasıyla %64.3 ve %37.7 oranlarında azaltmıştır. Ayrıca kauçuğun, betonun statik tokluğunu arttırdığı bildirilmiştir. Deneysel sonuçlar ayrıca, kauçuk içeriği %30'un altında olduğunda kauçuklu betonun yükleme hızına karşı normal betondan daha hassas olduğunu göstermiştir. %30 kauçuklu betonun, en büyük şekil değiştirme kapasitesini gösterdiği ve normal betondan daha düşük bir çatlama hızına sahip olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, lastik kauçuğun, dinamik bir eğilme yükü altında betonun gevrekliğini azaltabildiğini de göstermiştir.

Manoharan ve ark. (2019) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, ince agregaların hacimce %15'ine kadar lastik kauçuk ile değiştirilmesinin, ağırlıkça %8 silis dumani içeren betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Genel olarak, kauçuklu betonun normal betondan daha az bir basınç dayanımına sahip olmasına rağmen, ince agregaların %6'sına kadar atık lastik kauçukla değiştirilmesinin basınç dayanımında artış gösterdiği bulunmuştur. %3 lastik kauçuğun, 28 günlük basınç dayanımını normal betona göre %8 oranında arttırdığı gözlenmiştir. Sonuçlar ayrıca, %9'a kadar lastik kauçuk kullanıldığında yarmada çekme dayanımının arttığını

göstermiştir. Ancak, daha fazla lastik kauçuk kullanıldığında, dayanımda azalma olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, incelenen tüm kullanım yüzdeleri için lastik kauçuğun eğilme mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. En iyi sonuç, eğilme mukavemetini %47 oranında arttıran %9 kullanım yüzdesinden elde edilmiştir.

W. Feng ve ark. (2018) yaptıkları araştırmada, ince agreganın hacimce %50'sine kadarki kısmı ile lastik kauçuğun değiştirilmesinin betonun statik ve dinamik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuçlar, kauçuklu betonun statik basınç dayanımının, elastisite modülünün ve yarmada çekme dayanımının normal betondan daha düşük olduğunu göstermiştir. Statik mukavemet değerlerinin kauçuk oranı arttıkça azaldığı bulunmuştur. Kullanım oranı %40'ın üzerinde olduğunda, basınç dayanımı yarıdan fazla azalmıştır. Ancak, çekme dayanımının yavaşça azaldığı görülmüştür. Sonuçlar ayrıca, atık lastik kauçuğun betonun çarpma dayanımını ve enerji yutma kapasitesini arttırdığını göstermiştir. Çarpma dayanımı ve enerji yutma kapasitesi açısından en iyi sonuçların %30 kullanım oranından elde edildiği bulunmuştur.

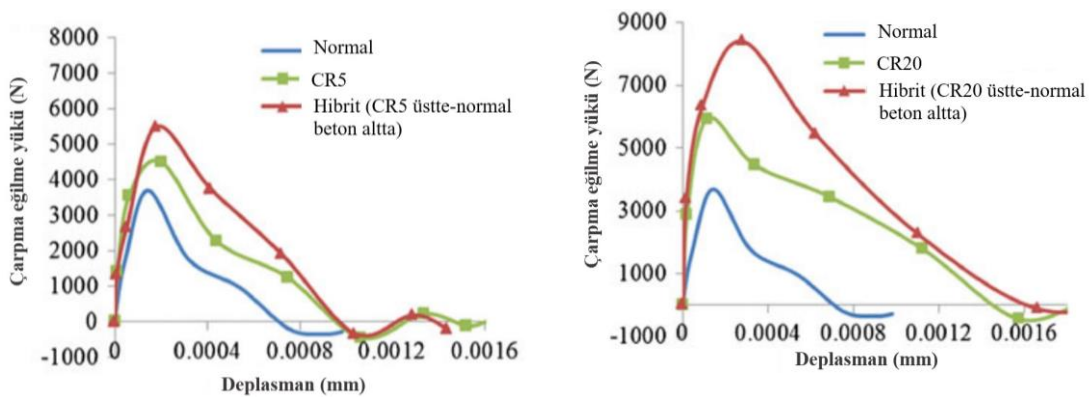
Mendis ve ark. (2017) çalışmalarında, benzer basınç dayanımına sahip kauçuklu betonlardan yapılan betonarme kirişlerin eğilme performanslarını deneysel olarak araştırmışlardır. Atık lastik kauçuk, ince agregaların kısmen değiştirilmesiyle kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, benzer basınç dayanımına sahip kauçuklu betonlardan yapılan betonarme kirişlerin, kauçuk içeriğine ve diğer karışım oranlarına bakılmaksızın benzer nihai eğilme kapasitelerine sahip olduğunu göstermiştir. Kirişler ayrıca, birbirine çok yakın çatlama momentlerine, eğilme davranışına ve maksimum deformasyona sahip olmuştur. Sonuçlar ayrıca, bazı yönetmeliklerin, kauçuklu betonarme kirişlerin nihai eğilme kapasitesini ve çatlama momentini, benzer basınç dayanımına sahip normal bir beton kiriş için önerilen denklemler kullanılarak aynı doğruluk seviyesinde tahmin edebileceğini göstermiştir.

Gupta ve ark. (2015) gerçekleştirdikleri çalışmada, ince agregaların atık kauçuk lifleri ile kısmen değiştirilmesinin betonun basınç dayanımı, çarpma dayanımı ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Lastik kauçuk içeriği arttıkça basınç dayanımının önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur. Sonuçlar ayrıca, lastik kauçuğun betonun çarpma direncini önemli ölçüde arttırdığını ve silis dumanı dahil edildiğinde çarpma dayanımının daha da fazla arttığını göstermiştir. Kauçuk ve silis dumanı içeriği arttıkça bu etkinin arttığı da gözlenmiştir. Kauçuk içeriği arttıkça betonun sünekliğinin arttığı da bulunmuştur. SEM analizi, betonun mukavemetini azaltan mikro

boşlukların bulunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, kauçuk ile çimento harcı arasında zayıf bir bağın bulunduğunu göstermiştir.

Vadivel ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, ince ve iri agregaların hacimce %6 oranında lastik kauçuk ile değiştirilmesinin betonun basınç dayanımı ve çarpma davranışı üzerindeki etkisini ağırlık düşürme testi kullanarak incelemişlerdir. Test sonuçları, kauçuğun genellikle betonun basınç dayanımını azalttığını göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, ince ve iri agregaların sırasıyla %3 FR ve %3 CR ile aynı zamanda değiştirilmesi, kauçukların tek tek kullanılmasına kıyasla çarpma direnci ve enerji yutma kapasitesi üzerinde daha iyi bir etki yarattığını ortaya koymuştur. İki kauçuk türünün birlikte kullanılmasının çarpma direncini %20 oranında arttırdığı gözlenmiştir. %6 FR ve %6 CR'nin ayrı ayrı kullanılması çarpma direncinde azalmaya neden olmuştur.

Al-Tayeb, Abu Bakar, Akil, ve ark. (2013) çalışmalarında, ince agregaların %5-%20 oranlarında atık lastik kauçukla değiştirilmesinin betonun statik ve çarpma performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hazırlanan kiriş numunelerinin çarpma davranışı, ağırlık düşürme deneyi kullanılarak test edilmiştir. Sonlu eleman modelleri LUSAS V14 yazılımı kullanılarak da hazırlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, lastik kauçuk içeriği arttıkça statik basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülünün azaldığını göstermiştir. Kauçuğun içeriği %20 olduğunda basınç dayanımı yaklaşık %20 oranında azalmıştır. Öte yandan, kauçuklu betonun çarpma dayanımının ve enerji yutma kapasitesinin normal betondan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu etkilerin, normal ve kauçuklu betonun avantajlarını birleştiren hibrit (kauçuklu beton üst yarısında ve normal beton alt yarısında olan) kirişte daha da yüksek olduğu gözlenmiştir. İri lastik kauçuğun betonun çarpma eğilme yükü-deplasman grafiği üzerindeki etkisi Şekil 2.7.'de sunulmuştur.



Şekil 2.7. Çarpma eğilme yükü-deplasman grafikleri (Al-Tayeb, Abu Bakar, Akil, ve ark., 2013), CR5 = %5 iri lastik kauçuk içeren beton

Al-Tayeb, Abu Bakar, Ismail, ve ark. (2013), normal beton ve hibrit beton (kauçuklu beton üstte ve normal beton altta) kırıların statik ve dinamik yükler altındaki performansını araştırmışlardır. Kauçuklu beton, ince agregaların hacimce %10 ve %20'si yerine geri dönüştürülmüş ince lastik kauçuk içermektedir. Kırıların dinamik davranışı LUSAS V14 yazılımı kullanılarak sayısal olarak da analiz edilmiştir. %10-%20 oranlarında kauçuğun kullanılmasının betonun basınç dayanımını, çekme dayanımını ve elastisite modülünü, sırasıyla, %22-29, %18-22 ve %16-23 oranlarında azalttığı bulunmuştur. Bununla birlikte sonuçlar, hibrit kırıların eğilme çarpma performansının, kauçuğun kullanım oranındaki artışla arttığını göstermiştir. Ayrıca, kauçuğun eklenmesi normal betonun tokluğunu ve şekil değiştirme kapasitesini geliştirdiği görülmüştür.

Atahan ve Yücel (2012) çalışmalarında, lastik kauçuğun beton güvenlik bariyerlerinin enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İri ve ince agregalar farklı oranlarda (hacimce %20, %40, %60, %80 ve %100) lastik kauçukla değiştirilmiştir. Test sonuçları, lastik kauçuğun içeriği arttıkça betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü azalmışken, enerji yutma kapasitesinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Aynı anda hem ince hem de iri agregaların %100'ü sırasıyla ince ve iri kauçuk ile değiştirildiğinde, basınç dayanımında %94'lük ve elastisite modülünde %96'lık bir azalma görülmüştür. Öte yandan, %100 kauçuk değiştirme oranında, maksimum yükte enerji yutma kapasitesinde %160.8'lik bir artış bulunmuştur. Agregaların %20 - 40'ının lastik kauçukla değiştirilmesinin çarpma etkisini önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca bu kullanım oranlarında, betonun dayanımı azalmasına rağmen hala iyi seviyede olduğu izlenmiştir.

Liu ve ark. (2012), atık lastik kauçuk ve çelik lif içeren betonun çarpma performansı üzerine Hopkinson yarma basınç çubuğu kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Lastik kauçuk içeren betonarme elemanların sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Sonuçlar, lastik kauçuk içeriği %10'un altında olduğunda, kauçuklu betonun enerji yutma kapasitesinin, kauçuk içeriğinin artmasıyla arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, kauçuk içeriği %10'dan daha fazla olduğunda, kauçuklu betonun enerji yutma kapasitesinin azaldığını göstermiştir. Çelik lif içeren kauçuklu betonun şekil değiştirme kapasitesi ve enerji yutma kapasitesinin, lifsiz kauçuklu betona göre daha fazla olduğu bulunmuştur. Öte yandan, çelik lif içeren kauçuklu betonun çekme dayanımı ve eğilme dayanımı artmışken, basınç dayanımının artmadığı izlenmiştir. Yükleme hızını artırarak lifli kauçuklu betonun dinamik basınç dayanımı ve dinamik artış faktörünün lifsiz kauçuklu betona göre önemli ölçüde arttığını görülmüştür.

Pelisser ve ark. (2011) yaptıkları deneysel çalışmada, kumunun %10'u geri dönüştürülmüş lastik kauçukla değiştirilmiş olan betonun özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmalarında, geleneksel kauçuktan yapılmış betonu ve alkalın aktivasyonu ile modifiye edilmiş kauçuklu ve %15 silis dumanı içeren betonu incelemiştir. Sonuçlar, geleneksel geri dönüştürülmüş kauçuğun basınç dayanımını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Referans betona kıyasla, ortalama olarak %67'lik bir azalma izlenmiştir. Ancak, modifiye edilmiş kauçuklu betonun basınç dayanımında %14'ten az bir azalma bulunmuştur. SEM analizi, geleneksel kauçuklu betonda, kauçuk ve çimento hamuru arasındaki ara yüzeyde büyük boşlukların bulunduğunu göstermiştir. Öte yandan, modifiye edilmiş kauçuklu betonda ara yüzey geçiş bölgesinde bulunan gözenekler daha az olmuştur.

Aiello ve Leuzzi (2010) çalışmalarında, iri ve ince agregalarının %75'ine kadar aynı boyutlara sahip olan atık lastik kauçukla değiştirilmiş olan betonun özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, ince agregaların boyutları 10-12.5 mm iken, iri agregaların boyutları 12.5-20 mm'dir. Sonuçlar, lastik kauçuğun basınç dayanımını ve eğilme dayanımını azalttığını göstermiştir. Kauçuğun içeriği arttıkça dayanımdaki azalmanın arttığı bulunmuştur. Ayrıca azalmanın, iri kauçuk için ince kauçuktan daha yüksek olduğu bildirilmiştir. %75 iri kauçuk, basınç dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %61.9 ve %28.2 oranlarında azaltmışken, aynı oranda kullanılan ince kauçuk dayanımları sırasıyla %37.1 ve %7.3 oranlarında azaltmıştır. Öte yandan, beton numunelerin çatlama sonrası davranışının, ince agregaların kauçukla kısmen değiştirilmesinden etkilenmediği gözlenmiştir. Ancak, iri kauçuk içeren betonun çatlama sonrasındaki mukavemetinin, enerji yutma kapasitesinin ve sünekliğinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir.

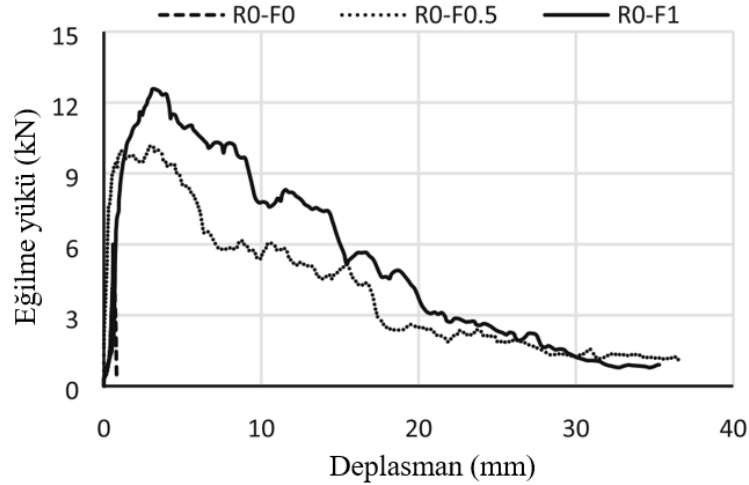
Reda Taha ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada, iri ve ince agregaların %100'üne kadar çıkartılıp bunun yerine lastik kauçuğun kullanılmasının betonun statik ve çarpma özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuçlar, kauçuğun içeriği arttıkça basınç dayanımının önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. İri kauçuğun ince kauçuğa göre daha az bir performans gösterdiği gözlenmiştir. Öte yandan, iri kauçuğun çarpma dayanımı üzerindeki etkisinin ince kauçuktan daha iyi olduğu bulunmuştur. En iyi çarpma sonuçları, çarpma direncini yaklaşık %165 oranında arttıran %50 CR'den elde edilmiştir. %50 FR çarpma dayanımını yaklaşık %35 oranında artırmıştır.

Bignozzi ve Sandrolini (2006) çalışmalarında, FR'nin kendiliğinden yerleşen betonun mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuçlar, kauçuğun içeriği arttıkça basınç dayanımının azaldığını göstermiştir. Ancak,

lastik kauçuğun betonun sünekliğini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. SEM analizinden, yüksek kauçuk içeriği kullanıldığında kauçuğun betonun gözenekliliği üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Lastik kauçuk ile çimento hamuru arasında iyi bir bağ gözlenmiştir.

2.1.5. Çelik lifler

Geri dönüştürülmüş agregalar içeren çelik lif donatılı betonun mekanik ve çarpma özellikleri Omidinasab ve ark. (2022) tarafından araştırılmıştır. Kanca uçlu STF karışıma hacimce %0, %0.5 ve %1 oranlarında ilave edilmiştir. Geri dönüştürülmüş agregalar ise hacimce %0, %25, %50, %75 ve %100 doğal agregalar yerine kullanılmıştır. Sonuçlar, %0.5 STF'nin betonun basınç dayanımını arttırdığını, %1 STF'nin ise basınç dayanımını azalttığını göstermiştir. Öte yandan, STF'nin betonun yarmada çekme dayanımını, eğilme dayanımını ve enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca, bu etkinin çelik lifin miktarı arttıkça arttığı görülmüştür. STF'nin eğilme yükü-deplasman grafiği üzerindeki etkisi Şekil 2.8.'de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen grafikler doğal agregalı betonun grafikleridir. Maliyet analizi ve arzu edilirlilik fonksiyonu analizine göre, statik özellikler, çarpma dayanımı ve maliyet etkinliği açısından en iyi performansın %1 STF içeren doğal agregalı betondan elde edildiği bulunmuştur. Bu betonun kompozit arzu edilirlilik fonksiyonu değeri 0.72 iken, referans betonun kompozit arzu edilirlilik fonksiyonu değeri 0.15 olarak bulunmuştur. SEM analizi, liflerin, beton hamurunda oluşan mikro çatlaklar üzerinde köprüleme etkisini göstermiştir. Ancak, yüksek oranda çelik lif kullanılmasının betonun gözenekliliğini artırabileceği ve basınç dayanımını azaltabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.8. Çelik liflerin eğilme yükü-deplasman grafiği üzerindeki etkisi (Omidinasab ve ark., 2022), R0-F0.5 = %0 geri dönüştürülmüş agrega ve %0.5 çelik lif içeren beton

Abid ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, tekrarlanan ağırlık düşürme etkisine maruz kalan çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonun statik ve çarpma performansı incelenmiştir. Çelik lifler %0, %0.5, %0.75 ve %1 oranlarında kullanılmıştır. Test sonuçları, mikro çelik liflerin kullanılmasıyla basınç dayanımı, eğilme dayanımı, süneklik ve çarpma dayanımının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Kırılma çarpma dayanımındaki artış yüzdesinin çatlama çarpma dayanımına göre çok daha yüksek olduğu bulunmuştur. Genel olarak, %1 STF'nin diğer kullanım yüzdelerinden daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. %1 STF, C30 ve C50 betonunun çatlama çarpma dayanımını sırasıyla %525 ve %1300 oranlarında ve kırılma çarpma dayanımını sırasıyla %855.6 ve %1327.8 oranlarında arttırmıştır.

Banyhussan ve ark. (2019) çalışmalarında, üç tip lifin (polivinil alkol, çelik ve naylon lifler), yüksek performanslı lif donatılı beton (YPLDB) kiriş numunelerinin çarpma direnci üzerindeki etkisini ağırlık düşürme testi kullanarak incelemişlerdir. Ayrıca farklı miktarlarda lif içeren betonun bazı mekanik özellikleri de araştırılmıştır. Test sonuçları, çelik lifin betonun basınç dayanımını arttırabildiğini göstermiştir. Ayrıca, STF'nin betonun eğilme dayanımını, eğilme deplasmanını ve enerji yutma kapasitesini kayda değer miktarda arttırdığı da bulunmuştur. Sonuçlar, liflerin kullanılmasının, YPLDB numunelerin çarpma dayanımını arttırmada önemli ölçüde etkili olduğunu göstermiştir.

Hannawi ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, farklı lif türlerinin eklenmesinin ultra yüksek performanslı lif donatılı betonların (UYPLDB) mikroyapısı ve mekanik davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çelik, mineral ve sentetik lifler, %1'lik bir

hacim oranında UYPLDB'ye ilave edilmiştir. Deneysel sonuçlar, liflerin betonun mekanik özellikleri üzerinde nispeten az bir etkisi olduğunu göstermiştir. Ancak, çelik lifin betonun dayanımını arttırdığı bulunmuştur. %1 çelik lifin, basınç dayanımını ve elastisite modülünü sırasıyla %23 ve %14 oranlarında arttırdığı gözlenmiştir. Öte yandan, liflerin betondaki oluşan çatlamaı açık bir şekilde kısıtladığı gözlenmiştir. Mikroyapı analizi, kompakt bir lif/matris arayüzey bölgesi bulunduğunu göstermiştir. Çelik liflerin kullanılmasının, karışımların gözenekliliği üzerinde önemli bir etkisi olmadığı da bulunmuştur.

Nili ve ark. (2016) yaptıkları araştırmada, çelik lif donatılı betonun yüksek hızlı çarpma yükünün etkisi altındaki davranışını incelemiştir. Ayrıca, betonun yüksek hızlı çarpma yükü altındaki davranışını, serbestçe düşen ağırlık altındaki davranışıyla karşılaştırmışlardır. Yüksek hızlı çarpma testleri yüksek hızda mermi çarpması deneyi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çelik lif hacimce %1 oranında kullanılmıştır. Sonuçlar, çelik lif kullanımının betonun çarpma yüküne karşı dayanıklılığını arttırdığı için çok önemli olduğunu göstermiştir. Ağırlık düşürme deneyinde, çelik liflerin kullanılmasının hasar şeklini radyalden çapraza değiştirdiği görülmüştür. Yüksek hızdaki merminin etkisi altında, lif donatısız numunelerde kayma hasarı görülmüşken, lif donatılı numunelerde merminin büyük bir hasar oluşturmada n numuneye nüfuz ettiği gözlenmiştir.

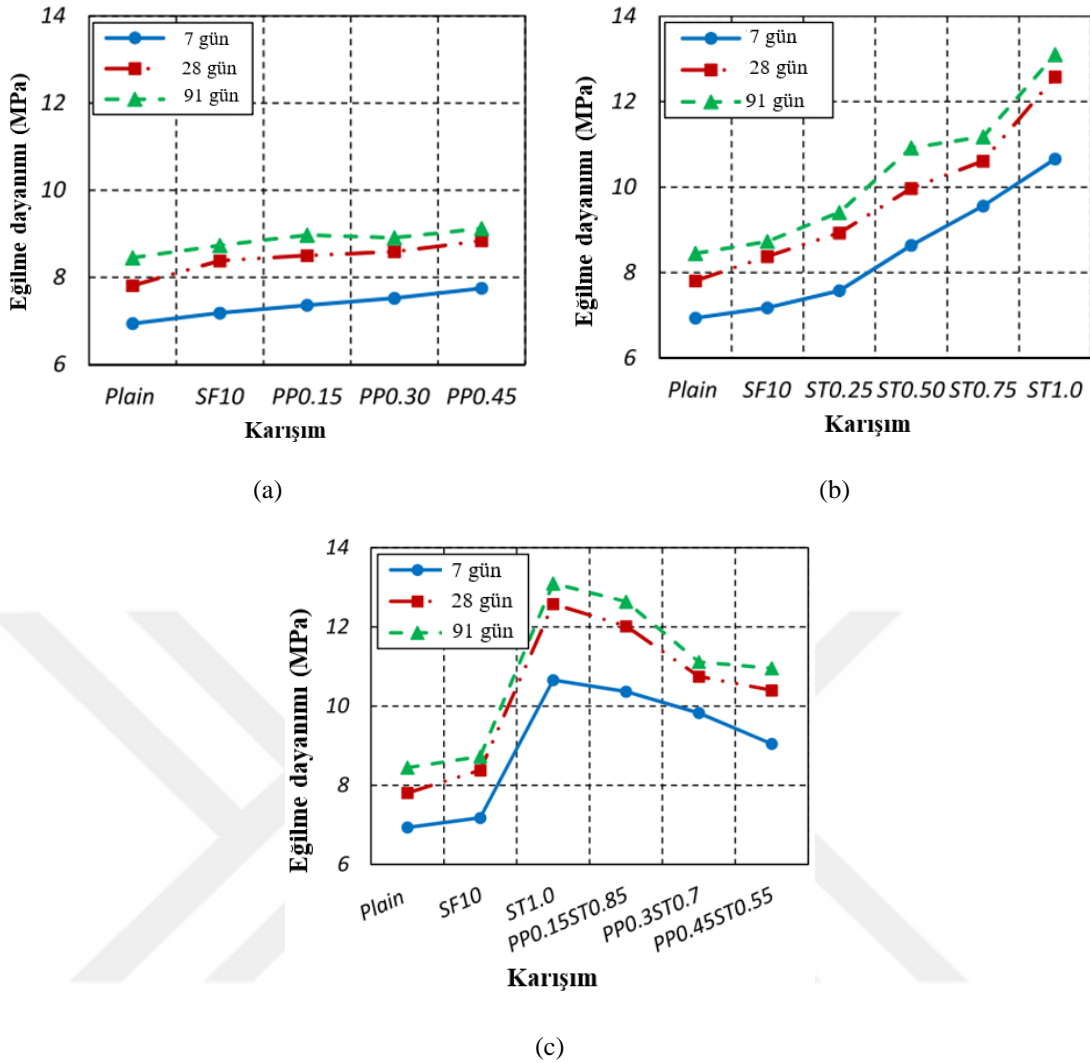
Verma ve ark. (2016), çelik lif içeren ultra yüksek performanslı beton (UYPB) plakların çarpma tepkisini incelemek üzere deneysel ve nümerik bir araştırma yapmışlardır. Çelik lifler %2.5 oranına kadar kullanılmıştır. Sonuçta, maksimum çarpma yükünün, lif içeriğinden daha fazla çarpma enerjisine ve numunenin kalınlığına duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Liflerin UYPB'ye eklenmesinin, sünekliği ve enerji yutma kapasitesini arttırdığı gözlenmiştir. Lifli betonun çatlamaı karşı çok yüksek bir dirence sahip olduğu görülmüştür. Nümerik incelemelerden elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmadan elde edilenlerle uyumlu çıkmıştır.

Wu, Shi, He, ve ark. (2016) çalışmalarında, çelik lifin betona eklenme oranının (hacimce %0, %1, %2 ve %3) ve şeklinin (düz, oluklu ve kanca uçlu) ultra yüksek performanslı betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, lif içeriği arttıkça basınç dayanımının ve eğilme dayanımının arttığını göstermiştir. %3 düz çelik lif kullanımında, 28 günlük basınç dayanımının ve eğilme dayanımının sırasıyla 150 MPa ve 35 MPa'nın üzerine çıktığı belirtilmiştir. Bu da normal betondan sırasıyla %48 ve %84 daha yüksektir. %3 kanca uçlu ve %3 oluklu lif içeren betonların basınç dayanımı, %3 düz lif içeren betona kıyasla sırasıyla %48 ve %59 oranlarında artmıştır.

Eğilme dayanımı açısından da benzer bir davranış gözlenmiştir. Sonuçlar ayrıca, çelik lifler eklenerek süneklığın ve tokluğun önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Bu etkinin, betondaki lif içeriği artıkça arttığı gözlenmiştir. Çelik lif içeriği, UYPB'nin eğilme yüküdeplasman eğrisinde ilk çatlak dayanımı ve ilk çatlak sehmi üzerinde çok az bir etki göstermiştir. Ancak, maksimum yük ve maksimum deplasman üzerinde önemli bir etki göstermiştir.

Yu ve ark. (2016) çalışmalarında, ultra yüksek performanslı lif donatılı betonun çarpma dayanımını araştırmışlardır. Sonuçlar, UYPLDB'nin lifsiz UYPB'den çok daha iyi bir enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Tek boyutlu lif içeren beton ile karşılaştırıldığında, hibrit çelik lif içeren betonun enerji yutma kapasitesinin daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Afrouhsabet ve Ozbakkaloglu (2015) tarafından yapılan çalışmada, çelik ve polipropilen liflerin ayrı ayrı ve bir kombinasyon halinde betona eklenmesinin yüksek dayanımlı betonun (YDB) mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çelik lifler %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranlarında kullanılmışken, PP lifler %0.15, %0.30 ve %0.45 oranlarında kullanılmıştır. Sonuçlar, STF ve PP liflerin kullanılmasının, YPB'nin mekanik özelliklerini (özellikle eğilme dayanımını) yükselttiğini göstermiştir. Bu etki genelde lif içeriği artıkça artmıştır. Bu da liflerin çatlakların uzamasını sınırlama etkisi, çatlakların ucundaki gerilme konsantrasyonunun derecesini azaltma etkisi ve çatlakların büyüme hızını azaltma etkisine bağlanmıştır. Çelik lifin ve PP lifin ayrı ayrı ve hibrit şeklinde kullanılmasının betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 2.9.'da gösterilmiştir. Çalışmada en iyi sonuçlar, basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını referans betona kıyasla sırasıyla %11.1, %38.9 ve % 50.1 oranlarında arttıran %1 çelik liften elde edilmiştir. Çelik liflerin ve PP liflerin bir kombinasyon halinde kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini referans betona göre arttırdığı görülmüştür. Ancak %1 STF ile karşılaştırıldığında, bu özelliklerin azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 2.9. Afroughsabet ve Ozbakkaloglu (2015) tarafından elde edilen sonuçlar, a) PPF etkisi, b) STF'in etkisi, c) hibrit kullanımın etkisi, Plain = referans beton, SF10 = %10 silis dumanı içeren beton, PP0.15 = %0.15 PP lif içeren beton, ST0.25 = %0.25 çelik lif içeren beton

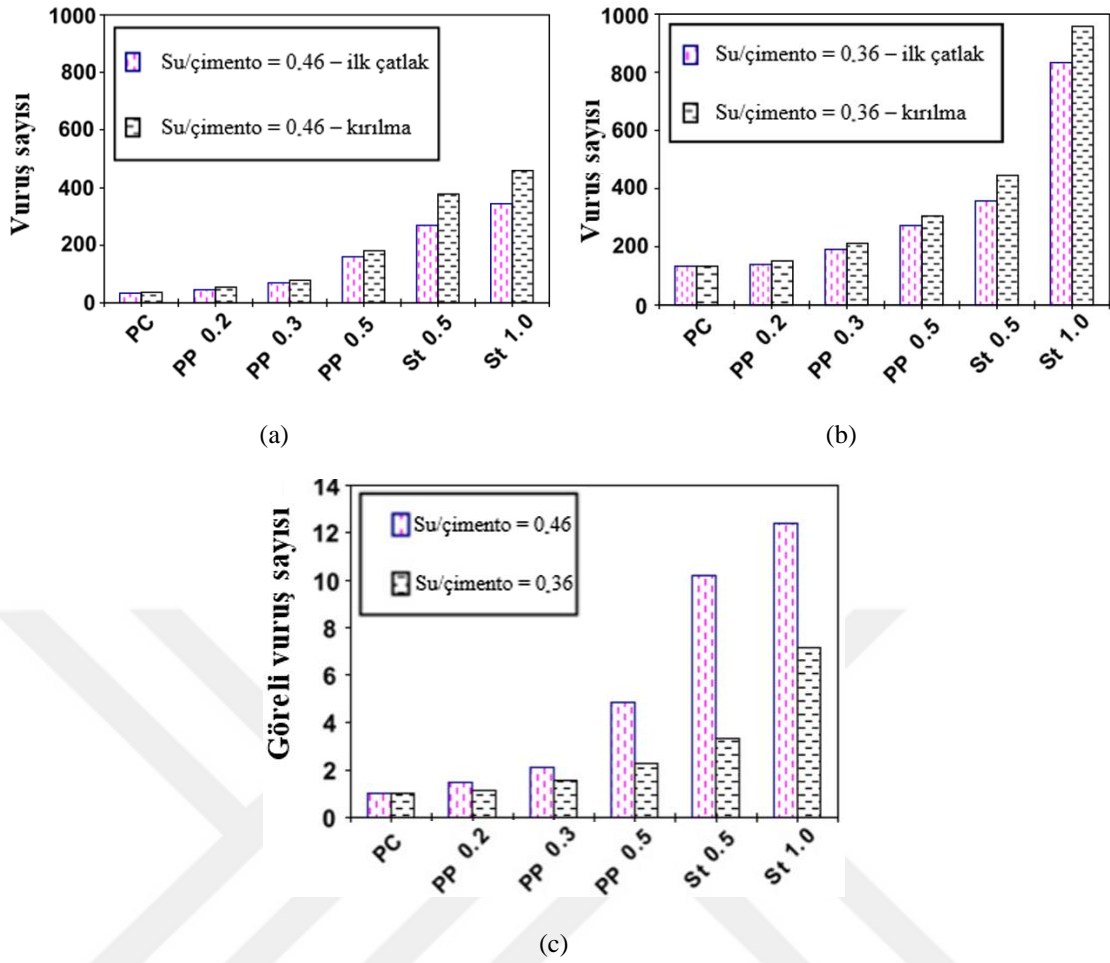
Sovják ve ark. (2015) çalışmalarında, ultra yüksek performanslı betonarme plakların çarpma davranışını tüfek mermileri kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada, çelik lifin optimum kullanım oranı hacimce %2 olarak bulunmuştur. Bu içerikten daha az çelik lif kullanılarak yapılan testlerde, betonarme plakların arka tarafından etrafa çok miktarda beton parçası saçıldığından bu oranın altındaki numunelerin güvenli olmadığı sonucuna varılmıştır. Lif içeriği %2'den %2.5 veya %3'e değiştirildiğinde, tüm hasar parametrelerinde bir gelişme görülmemiştir.

Mácave ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, ultra yüksek performanslı lif donatılı betonarme plakların çarpma performansı yüksek hızda mermi çarpması kullanılarak incelenmiştir. Çelik liflerin kullanılmasının betonarme plakların çarpma yüküne karşı mukavemetini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Çelik lifin optimum içeriğinin

hacimce %2 olduğu bulunmuştur. Ultra yüksek performanslı lif donatılı betonarme plakların, geleneksel lif donatılı betonarme plaklara göre çarpma yüküne karşı çok daha fazla dayanıma sahip olduğu doğrulanmıştır. Ultra yüksek performanslı lif donatılı betonarme plakların krater çapının, lifsiz ultra yüksek performanslı betonarme plaklara göre %42-%50 oranlarında azaldığı bulunmuştur.

Alavi Nia ve ark. (2012), STF ve PPF'nin betonun mekanik ve çarpma özelliklerini nasıl etkilediğine ilişkin deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kanca uçlu çelik lifler hacimce %0.5 ve %1 ve polipropilen lifler hacimce %0.2, %0.3 ve %0.5 oranlarında kullanılmıştır. Sayısal simülasyonlar LS-DYNA yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, liflerin betonun basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını, enerji yutma kapasitesini ve çarpma dayanımını arttırdığını göstermiştir. Liflerin dayanımı artırma etkisinin, normal dayanımlı betonda yüksek dayanımlı betondan daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Liflerin normal ve yüksek dayanımlı betonların çarpma dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 2.10.'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, liflerin kullanım oranının artırılmasının beton numunelerin çarpma dayanımını arttırdığı görülmüştür. Sonuçlar ayrıca, çelik liflerin çarpma direncini arttırmada polipropilen liflere göre daha etkili olduğunu göstermiştir.

Rahmani ve ark. (2012) gerçekleştirdikleri çalışmada, lif donatılı beton silindirlerin ağırlık düşürme testi altındaki davranışını incelemiştir. Üç tip lif dikkate alınmıştır. Bunlar, selüloz lif, polipropilen lif ve kanca uçlu çelik liftir. Selüloz lif ve PPF hacimce %0.15 oranında eklenmişken STF hacimce %0.5 oranında eklenmiştir. Çalışma sonucunda, liflerin betonun çarpma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. Çarpma dayanımı açısından en iyi sonuçlar STF kullanıldığında elde edilmiştir. STF ve PPF ilk çatlak çarpma dayanımını sırasıyla %192.9 ve %33.3 oranlarında arttırmışken kırılma çarpma dayanımını sırasıyla %375 ve %47.9 oranlarında arttırmıştır.



Şekil 2.10. Alavi Nia ve ark. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın çarpma test sonuçları, a) normal betonun çarpma dayanımı, b) yüksek dayanımlı beton çarpma dayanımı, c) görelî vuruş sayısı (kırılmada), PC = normal beton, PP0.2 = %0.2 PP lif içeren beton, St0.5 = %0.5 çelik lif içeren beton

El-Dieb (2009) çalışmasında, çelik lif içeren ultra yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonun (UYDKYB) mekanik özelliklerini, dayanıklılığını ve mikroyapısal özelliklerini deneysel olarak değerlendirmiştir. Test sonuçları, UYDKYB'ye çelik liflerin eklenmesinin mekanik özellikleri, özellikle yarmada çekme dayanımını, arttırdığını göstermiştir. Dayanımdaki artış yüzdesinin lif içeriğiyle orantılı olduğu bulunmuştur. Çelik liflerin %0.52 oranında kullanılmasının 28 günlük basınç dayanımını ve yarmada çekme dayanımını sırasıyla %23 ve %111 oranlarında arttırdığı gözlenmiştir. Betonun sünekliğinin çelik lif kullanımıyla büyük ölçüde iyileştiği ve lif içeriği arttıkça arttığı gözlenmiştir. Mikroyapısal analiz, çimento hamurunun, özellikle agrega parçacıklarının ve çelik liflerin etrafında, çok yoğun bir mikroyapıya sahip olduğuna göstermiştir. Lifler ile çimento hamuru arasında çok güçlü bir bağ da gözlenmiştir.

Uygunoğlu (2008) tarafından yapılan araştırmada, çelik lif donatılı betonun farklı yaşlardaki mikroyapısı ve eğilme dayanımı incelenmiştir. Sonuçlar, betonun eğilme dayanımının betonun yaşıyla ve lifin kullanım oranıyla arttığını göstermiştir. Eğilme dayanımının, liflerin narinlik oranının artırılmasıyla arttığı da bulunmuştur. Mikroyapı analizi, çelik lifin yüzeylerinin yoğun bir çimento hamuruyla kaplandığını ortaya koymuştur. Çimento hamuru ile çelik lifler arasında iyi bir bağ gözlenmiştir.

2.1.6. Polipropilen lifler

PPF'nin betonun mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi Ramana ve Surendranath (2022) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. PPF, hacimce %0.25 – %0.5 oranlarında kullanılmıştır. Test sonuçları, PPF'nin betonun basınç dayanımını, eğilme dayanımını ve dayanıklılığını arttırdığını göstermiştir. PPF'nin optimum kullanım oranı %0.35 olarak bulunmuştur. Bu kullanım yüzdesi, 28 günlük basınç dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %11 ve %23 arttırmıştır. SEM analizi polipropilen liflerin, agrega-çimento hamuru arasındaki ara yüzey geçiş bölgesindeki mikro çatlakların miktarını ve boyutunu azalttığını göstermiştir. Liflerin, CH kristallerini kontrol eden ve mikro boşlukları azaltan bir ağ oluşturduğu izlenmiştir.

Zhang ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, makro sentetik polipropilen lif ve bazalt lifin betonun dinamik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, hibrit lif içeren beton için uygun bir dinamik hasar modeli de önerilmiştir. PPF lif %0.15, %0.25, %0.35 ve %0.5 oranlarında kullanılmış ve bazalt lif %0.05, %0.075 ve %0.1 oranlarında kullanılmıştır. Test sonuçları, PPF ve bazalt lifin betonun çarpma dayanımını ve tokluğunu arttırabildiğini göstermiştir. Ancak, liflerin yüksek oranda kullanılmasında ters sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada en iyi sonuçlar, %0.075 bazalt lif ve %0.35 PPF'nin aynı zamanda kullanılmasında bulunmuştur.

Sohaib ve ark. (2018) çalışmalarında, PPF içeren betonun basınç dayanımını ve yarmada çekme dayanımını incelemiştir. Çalışmada PPF, çimento ağırlığının %0-4.5'i oranlarında karışıma ilave edilmiştir. Az miktarda polipropilen lif eklenmesinin betonun mekanik özelliklerini arttırdığı gözlenmiştir. En iyi sonuçlar ağırlıkça %1.5 PPF'den elde edilmiştir. Bu lif oranı, 28 günlük basınç dayanımını ve yarmada çekme dayanımını sırasıyla %16.5 ve %20.7 oranlarında arttırmıştır. Ancak, PPF içeriği %1.5 oranından daha fazla olduğunda mekanik özelliklerin kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir.

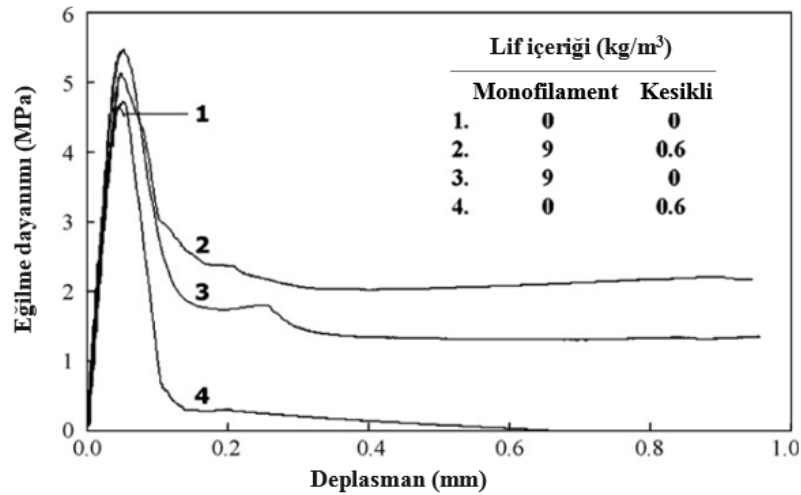
J. J. Li ve ark. (2016) çalışmalarında, yüksek performanslı polipropilen liflerin hafif agregalı betonun (HAB) mekanik özellikleri ve çarpma direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, PP liflerin eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını arttırdığını, basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi bulunmadığını göstermiştir. Ek olarak, PP lif kullanımının eğilme tokluğunu ve çarpma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. Lif içeriği arttıkça çarpma dayanımının arttığı da gözlenmiştir. PP liflerin uygun bir miktarda kullanılmasının, betonun çatlama sonrası çarpma davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. SEM analizi, lifler ve çimento hamuru arasındaki bağın zayıf olduğunu ortaya koymuştur. Bu da lif-çimento hamuru arasındaki geçiş bölgesinde bulunan büyük CH kristalleri ve çatlaklardan kaynaklanmıştır. PP lifin optimum içeriğinin hacimce %0.95 olduğu sonucuna varılmıştır.

H. Zhang ve ark. (2016) gerçekleştirdikleri araştırmada, PP lif donatılı harcın statik ve dinamik performansını araştırmışlardır. Dinamik davranış Hopkinson yarma basınç çubuğu kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, az miktarda (1.2 kg/m^3 altında) PP lif eklenmesinin harcın basınç dayanımını %27.8 oranına kadar arttırabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, PP lif eklenmesi harcın elastisite modülünü hafifçe azaltmıştır. Deneysel sonuçlar ayrıca, PP lif donatılı harcın dinamik performansının yükleme hızından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Harcın çarpma dayanımının yükleme hızının artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Öte yandan, harcın dayanımı arttıkça yükleme hızının etkisinin azaldığı görülmüştür. Polipropilen liflerin çarpma tokluğunu ve sünekliliğini arttırabildiği bulunmuştur. Tokluk açısından optimum lif içeriğinin, 0.4 ve 0.5 su/çimento oranları için 1.2 kg/m^3 , 0.5 su/çimento oranı için ise 0.9 kg/m^3 olduğu sonucuna varılmıştır.

Nili ve Afroughsabet (2010) çalışmalarında, PP liflerin ve silis dumanının betonun çarpma dayanımı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, PP lif kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini ve çarpma dayanımını önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, PP liflerin ve silis dumanının beraber kullanılmasının, betonun basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını, eğilme dayanımını ve özellikle çarpma dayanımını sadece PP lifin kullanılması durumuna göre daha fazla arttırdığı bulunmuştur. Lifli numunelerin çarpma yükü altında sünek davranış gösterdiği bildirilmiştir.

Hsie ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada, iki tür PP lif (kaba monofilament PP lif ve kesikli PP lif) içeren betonun mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, iki tür PP lifin aynı zamanda kullanılmasının betonun basınç dayanımını,

yarmada çekme dayanımını, eğilme dayanımını, bir tür PP lifin kullanılmasına göre daha fazla arttırdığını göstermiştir. Normal betonla karşılaştırıldığında, hibrit lif donatılı betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımının sırasıyla %14.60-17.31, %8.88-13.35 ve %8.99-24.60 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. PP lifin betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 2.11.'de gösterilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, PP lif betonun tokluğunu kayda değer ölçüde arttırmıştır. Bu etki liflerin hibrit şeklinde kullanılmasında daha da net görülmüştür. Lif içeriği arttıkça tokluk endeksinin arttığı gözlenmiştir.



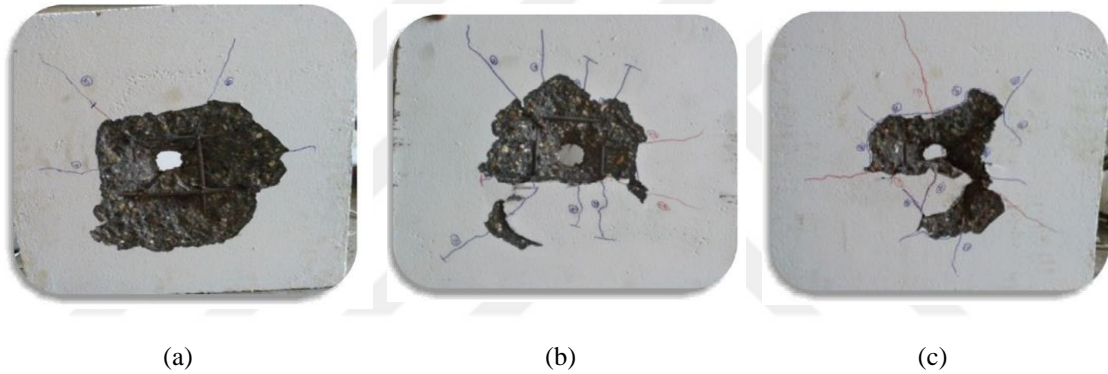
Şekil 2.11. Hsie ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları

2.1.7. PET lifler

PET liflerin, monotonik yüke maruz kalan iki yönlü betonarme plakların davranışına etkisi Rasheed ve ark. (2022) tarafından deneysel olarak değerlendirilmiştir. PET lifler hacimce %0, %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında kullanılmıştır. Tüm karışımlarda ayrıca, silis dumanı çimentonun ağırlıkça %6'sı oranında kullanılmıştır. Test sonuçları, PET liflerin betonun basınç dayanımını lif içeriğiyle orantılı olarak azalttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, PET liflerin betonun 28 günlük yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını azalttığı bulunmuştur. Ancak, PET lif içeriği arttıkça yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımındaki kayıplar yavaşça geri kazanılmaya başlanmıştır. PET liflerin, monotonik yükler altındaki betonarme plakların nihai yük kapasitesini, tokluğunu ve sünekliğini önemli ölçüde arttırdığı da bulunmuştur.

Al-Hadithi ve ark. (2019) çalışmalarında, PET liflerin hacimce %2'ye kadar kullanılmasının mikro silika içeren kendiliğinden yerleşen betonun statik ve çarpma

performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, PET lif eklenmesinin basınç dayanımını, elastisite modülünü ve eğilme dayanımını referans betona kıyasla sırasıyla %12-44, %3-17 ve %9-70 oranlarında arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, PET liflerin ilave edilmesiyle beton plakların çarpma dayanımı ve enerji yutma kapasitesinin önemli ölçüde arttığı bulunmuştur. Çalışmada, PET liflerin optimum kullanım oranı hacimce %1.5 olarak bulunmuştur. PET liflerin betona eklenmesiyle düşük hızda çarpma yükü etkisi altındaki betonarme plakların hasar tipi gevrekten süneğe dönüşmüştür. Davranıştaki bu değişiklik, PET liflerin beton plakların kırık parçaları arasındaki köprüleme etkisi sayesinde meydana gelmiştir. Şekil 2.12. PETF beton plakların hasar şekli üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, uygun miktarda PET lif kullanımıyla hasar miktarı azalabilmektedir.



Şekil 2.12. Hasar şekli (Al-Hadithi ve ark., 2019), a) normal beton, b) %1 PETF içeren beton, c) %1.5 PETF içeren beton

Al-Hadithi ve Hilal (2016) yaptıkları çalışmada, hacimce %0.25-2 oranlarında eklenen PET liflerin, ağırlıkça %25 uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen betonun özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuçlar, PET lif kullanımının, betonun basınç dayanımını ve eğilme dayanımını önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Çalışmada optimum kullanım oranı olan hacimce %1.5 PET lif, 28 günlük basınç dayanımını ve eğilme dayanımını kontrol numuneye göre sırasıyla %43.4 ve %86 oranlarında arttırmıştır.

Bui ve ark. (2018) çalışmalarında, PET liflerin, geri dönüştürülmüş agrega içeren betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemiştir. PET şişeler, 50-60 mm uzunluğunda ve 2-3.5 mm genişliğinde lifler oluşturulacak şekilde elle kesilmiştir. Çalışma bulguları, PET liflerin yüksek alkali direncine sahip olduğunu göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, silis dumanı ve PET lifin bileşiminin, lif ve silis dumanı

içermeyen betona göre basınç dayanımını %3.6-9.0 oranlarında, elastisite modülünü %16.9-21.5 oranlarında, çekme dayanımını %11.8-20.3 oranlarında, kayma mukavemetini %7-15 oranlarında arttırdığını göstermiştir. Ek olarak, PET liflerin betonun tokluğunu, sünekliğini ve çatlama sonrası performansını arttırdığı gözlenmiştir. SEM görüntüleri, PET liflerin çimento hamuruna güçlü bir şekilde bağlanmadığını göstermiştir. Bu da PET liflerin pürüzsüz ve parlak yüzeyine bağlanmıştır.

Marthong ve Marthong (2016) tarafından yapılan çalışmada, PET liflerin betonun özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, %0.5 PET lifin, basınç dayanımında önemli bir azalma olmaksızın, çekme dayanımını, eğilme dayanımını ve enerji yutma kapasitesini sırasıyla %50, %22 ve %205 oranlarında artırdığını göstermiştir. Ayrıca, %1 PET lif, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesi açısından kontrol numuneden daha iyi bir performans göstermişken basınç dayanımını referans numuneye göre yaklaşık %23 oranında azaltmıştır. Ayrıca, liflerin köprüleme etkisi nedeniyle makro çatlakların azaldığı gözlenmiştir. Bu da tokluğun ve sünekliğin artmasını sağlamıştır.

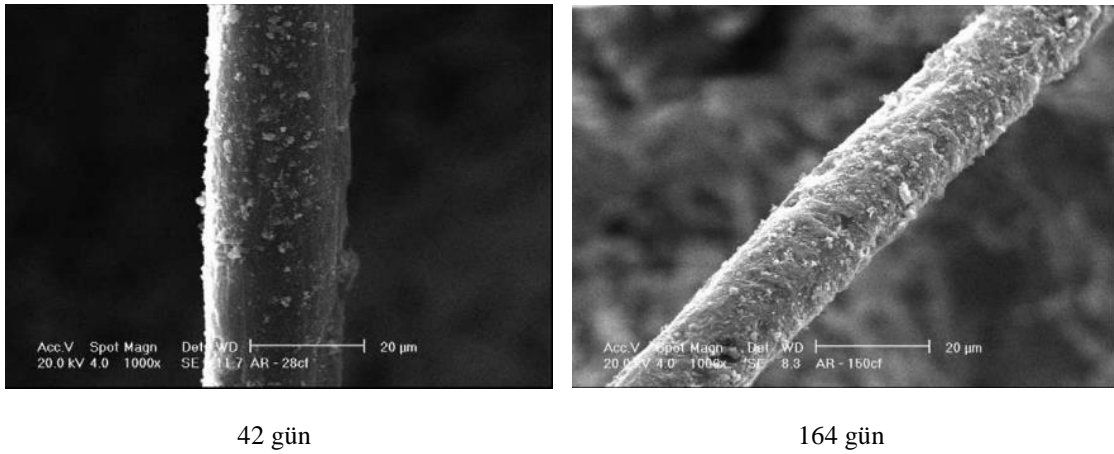
Pelisser ve ark. (2012) çalışmalarında, hacimce %0.05-0.3 PET lif içeren betonun fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini araştırmışlardır. PET lifin, basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Ancak, PET lif içeriği arttıkça 28 günlük eğilme dayanımının arttığı bulunmuştur. %0.3 PET lif, eğilme dayanımını yaklaşık %19 oranında arttırmıştır. Öte yandan, PET liflerin ilk çatlak çarpma dayanımı üzerinde önemli bir etkisi bulunmamıştır. Ancak, PET liflerin, betonun 28 günlük kırılma çarpma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. PET lif içeriği arttıkça bu etkinin arttığı da izlenmiştir. Bununla birlikte, PET liflerin çarpma direnci üzerindeki etkisinin betonun yaşı arttıkça azaldığı gözlenmiştir. %0.3 PET lif, 28 günlük kırılma çarpma dayanımını %123 oranında arttırmışken 150 günlük dayanımını %18 oranında arttırmıştır. 150 günlük ve bir yıllık SEM gözlemleri, alkalin beton ortamında yüksek derecede lif bozulmasının oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, referans numuneye göre, PET lifli betonda daha fazla gözeneklilik gözlenmiştir.

Foti (2011) çalışmasında, PET liflerin betonun sünekliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Test sonuçları, PET liflerin betonun sünekliğini arttırdığını göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, PET liflerin, beton elemanların çatlama sonrası davranışı üzerinde büyük bir etkisi olduğunu göstermiştir. PET liflerin, numunelerin tokluğunu büyük ölçüde arttırdığı da bulunmuştur.

Pereira de Oliveira ve Castro-Gomes (2011) yaptıkları çalışmada, PET liflerin çimento harcının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluğu üzerindeki etkisini

araştırmışlardır. PET liflerin hacimce %0.5 ve %1 oranlarında kullanılması 28 günlük basınç dayanımını azaltmıştır. Ancak, %1.5 PET lif içeren harç, referans harca göre biraz daha iyi bir performans göstermiştir. Öte yandan, PET liflerin eklenmesinin 28 günlük eğilme dayanımını %30 oranına kadar arttırdığı bulunmuştur. PET liflerin harcın enerji yutma kapasitesini ve dayanıklılığını arttırdığı da bildirilmiştir. Bu etkinin, PET lifin kullanım oranındaki artışla arttığı gözlenmiştir.

D. A. Silva ve ark. (2005) çalışmalarında, PET lif içeren çimento harcının mekanik özellikleri, tokluğu ve mikroyapısal özelliklerini incelemiştir. Test edilen PET lifin kullanım yüzdelerinin (hacimce %0.4 ve %0.8), harçların basınç dayanımı ve eğilme dayanımı üzerinde hiçbir etki göstermediği gözlenmiştir. Öte yandan, PET liflerin 28 günlük çekme dayanımını önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. Ancak daha sonraki yaşlarda, normal harçlardan daha az bir çekme dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. PET liflerin, harcın erken yaşlardaki tokluğunu arttırdığı bulunmuştur. Ancak, tokluğun zamanla azaldığı görülmüştür. PET lifli harçların performansındaki yaşla artan azalma, liflerin harcın içindeki alkali hidrolizi ile bozulmasına bağlanmıştır. Bu da SEM analizi ile kanıtlanmıştır. Şekil 2.13.'ten görüldüğü üzere, liflerin yüzeyleri oldukça pürüzlü olmuştur. Bu durum liflerin çimento hamurundan dolayı zarar gördüğünü göstermektedir.



Şekil 2.13. D. A. Silva ve ark. (2005) tarafından yapılan SEM analizinin sonuçları

2.2. Betonarme Plakların Çarpma Davranışı

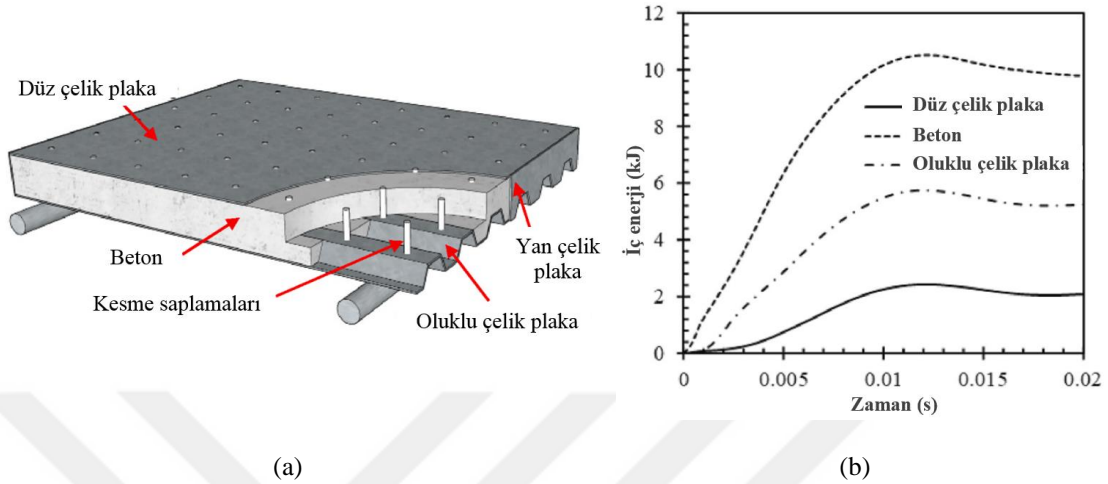
Bu çalışmada, betonarme plağın tipi hariç, plakların çarpma davranışını etkileyebilecek tüm parametreler sabit tutulmuştur. Çalışmada, farklı tiplerde betonarme plakların çarpma davranışı incelenmiştir. Bunlar, referans betondan üretilen betonarme

plak, çelik lif donatılı betondan üretilen betonarme plak, fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plaklar ve üst ve/veya alt yüzeylerinde çelik levha bulunan betonarme plaklardır. Literatürde benzer konuları inceleyen bazı yayınlar örnek olarak aşağıda verilmiştir.

Betonarme plakların, düşük hızlı çarpma yükleri (ağırlık düşürme deneyi) altındaki davranışı birçok araştırmacı tarafından değerlendirilmiştir. Literatürde bulunan yayınlarda, betonarme plakların çarpma davranışını etkileyebilecek farklı parametreler incelenmiştir. Örnek olarak, Şengel ve ark. (2022), düşen ağırlığın geometrisinin betonarme plakların çarpma davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. T. Yılmaz ve ark. (2022) betonarme plaklarda açıklıkların boyut ve düzeninin etkisini araştırmışlardır. Anıl ve ark. (2015) ve T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem ve Hoşkal (2020) mesnet durumlarının etkisini araştırmışlardır. Çelik donatı oranının ve düzeninin etkisi Othman ve Marzouk (2016b) ve T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem ve Kaçaran (2020) tarafından incelenmiştir. Iqbal ve ark. (2019) ve Kumar ve ark. (2017) normal ve öngermeli betonarme plakların çarpma davranışını karşılaştırmışlardır. Xiao ve ark. (2017), çarpma enerjisinin, çarpmada etkilenen alanın çapının ve vurucu ucun şeklinin betonarme plakların hasarı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Betonarme plakların farklı yöntemlerle güçlendirilmesinin etkisi W. Chen ve ark. (2020), Elnagar ve ark. (2019), Selim Şengel ve ark. (2022) ve T. Yılmaz ve ark. (2018) tarafından araştırılmıştır.

Lu ve ark. (2021) çalışmalarında, iki tarafında çelik plakalar bulunan beton plakların çarpma davranışı üzerine deneysel ve nümerik bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada, iki tip numune hazırlanmış ve karşılaştırılmıştır. Bunlar, düz çelik plaka-beton-düz çelik plaka (DÇ-B-DÇ) tipinde sandviç plak ve düz çelik plaka-beton-oluklu çelik plaka (DÇ-B-OÇ) tipinde sandviç plaktır. DÇ-B-OÇ sandviç plağın 3 boyutlu şematik görünümü Şekil 2.14. (a)'da verilmiştir. Beton plakların uzunluğu×genişliği 1100×840 mm, yüklenmiş açıklık uzunluğu 910 mm ve ortalama beton kalınlığı 80 mm'dir. Çelik plakalar 3-5 mm kalınlığa sahiptir. Düşen çekicinin ağırlığı 620 kg ve çarpma hızı 8 m/s'dir. Test edilen plağın sonlu eleman modelleri LS-DYNA programı kullanılarak oluşturulmuştur. Test sonuçları, DÇ-B-OÇ sandviç plakların çarpma yükü altında DÇ-B-DÇ sandviç plaktan daha iyi bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur. DÇ-B-DÇ plağa kıyasla, DÇ-B-OÇ plaklar daha küçük deformasyonlar, daha büyük çarpma yükleri ve daha büyük pik sonrası ortalama yükü göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, çarpma enerjisinin çoğunun beton çekirdek, ardından oluklu çelik plaka ve ardından düz çelik plaka tarafından dağıtıldığını göstermiştir (Şekil 2.14. (b)). Sonlu eleman parametrik

çalışması, kesme saplamalarının aralığının azaltılmasının, betonun basınç dayanımının artırılmasının ve yan taraflarda çelik plakaların kullanılmasının DÇ-B-OÇ plakların çarpma direncini daha da iyileştirdiğini göstermiştir.

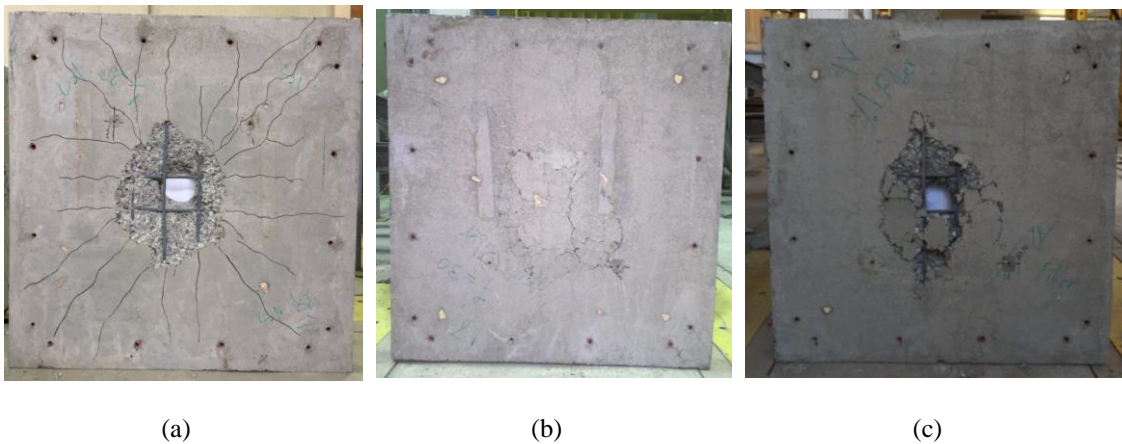


Şekil 2.14. a) DÇ-B-OÇ sandviç plağın 3 boyutlu şematik görünümü, b) DÇ-B-OÇ sandviç plağın iç enerji-zaman grafiği (Lu ve ark., 2021)

Sahraei Moghadam ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş çimento esaslı kompozitten üretilmiş beton plakların eğilme ve çarpma davranışını araştırmışlardır. Beton plaklar, 600×600×75 mm boyutlarında olup üç katmana ayrılmıştır. Katmanlarda farklı beton (lif donatılı beton veya normal beton) kullanılmıştır. Çalışmada, çelik lifler ve naylon lifler olmak üzere iki tip lif ele alınmıştır. Referans beton plak hariç, tüm beton plaklarında liflerin toplam hacim fraksiyonu plağın hacimce %1'i kadardır. Ağırlık düşürme testlerinde çekicinin ağırlığı 5.8 kg ve çarpma yüksekliği 1.5 m'dir. Ağırlık düşürme deneyi numune tam hasar görene kadar tekrarlanmıştır. Sonuçlar, çelik liflerin betonun eğilme ve çarpma dayanımlarını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. %1 çelik lif kullanılması, ilk çatlak ve kırılma çarpma dayanımlarını normal beton plağa göre sırasıyla %3763 ve %8290 oranlarında arttırmıştır. Sonuçlar, liflerin çarpma dayanımı üzerindeki iyileştirme etkisinin, eğilme dayanımı üzerindeki etkisinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, çok katmanlı beton plakların, tek katmanlı beton plaklardan daha iyi bir çarpma direncine sahip olabileceğini ortaya koymuştur. En iyi çarpma performansı, üst katmanında %1.5 STF donatılı beton, orta katmanında normal beton ve alt katmanında %1.5 STF donatılı beton olan hibrit beton plaktan elde edilmiştir. Bu beton plak, %1 STF içeren betondan

üretilem tek katmanlı beton plaktan %19.6 daha yüksek bir kırılma çarpma direnci göstermiştir.

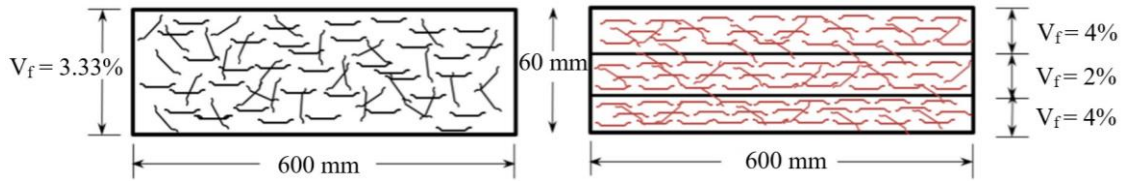
Soltani ve ark. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çelik liflerin betonarme plakların çarpma tepkisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çelik lifler, betonun hacimce %0.5, %0.75 ve %1'i olarak eklenmiştir. Çalışmada ayrıca, cam fiber takviyeli polimer (GFRP) levhalarla harici olarak güçlendirilmiş betonarme plakların dinamik davranışı araştırılmıştır. Çalışmada, çatlak gelişimi, kırılma modları, deplasman-zaman grafikleri, birim şekil değiştirme-zaman grafikleri ve ivme-zaman grafikleri değerlendirilmiştir. Sonlu eleman analizleri, LS-DYNA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, STF'nin betonarme plakların çarpma dayanımını kayda değer derecede artırabildiğini göstermiştir. Normal betonarme plak ile karşılaştırıldığında, STF donatılı betonarme plaklar daha düşük maksimum deplasman, daha yüksek ivme, daha düşük çelik donatı birim şekil değiştirmesi ve daha az hasar göstermiştir. Çelik lifler, çatlak gelişimini, çatlak genişliğini, betonarme plakların alt yüzündeki dökülmelerin kütlelerini ve penetrasyon derinliğini azaltmıştır. Normal ve çelik lifli betonarme plaklarda çarpma etkisi altında oluşan hasarın görüntüleri Şekil 2.15.'te sunulmuştur. Sonuçlar ayrıca, yüksek oranda çelik lifin kullanılmasının betonarme plakların çarpma dayanımı üzerinde olumsuz bir etkisi olabileceğini göstermiştir. Bu da, heterojenlik ve düşük işlenebilirlik problemlerine bağlanmıştır.



Şekil 2.15. Soltani ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada elde edilen hasar şekli, a) normal betonarme plak, b) %0.75 çelik lif içeren betonarme plak, c) %1 çelik lif içeren betonarme plak

Murali ve Ramprasad (2018) çalışmalarında, katmanlı iki aşamalı lifli beton (KİALB) plakların çarpma davranışını tekrarlı ağırlık düşürme deneyi kullanılarak araştırmışlardır. KİALB plak, yeni bir fonksiyonel derecelendirilmiş beton plak türüdür.

KİALB plağın hazırlanması için, öncelikle gerekli miktarda iri agrega ve lifler birlikte karıştırılır ve kalıpta farklı katmanlara yerleştirilir. Daha sonra, boşlukları doldurmak için akıcı bir çimento şerbeti dökülür. Bu çalışmada KİALB plaklar, farklı oranlarda çelik liflerle (üst katmanda %4 - orta katmanda %2 - alt katmanda %4) hazırlanmıştır. KİALB plaklar, normal beton plakla ve %3.3 çelik lif içeren tek katmanlı iki aşamalı lifli beton (TKİALB) plaklarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, eşit miktarda lif içermesine rağmen, KİALB'nin TKİALB'ye göre üstün basınç dayanımı sergilediğini göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, KİALB plakların ve çelik lifli plakların, lifsiz beton plağa kıyasla, daha fazla ilk çatlak ve kırılma çarpma dayanımları, daha yüksek çatlak direnci ve daha fazla süneklik gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu etki (Şekil 2.16.'da gösterildiği gibi) hibrit plaklarda lif dağılımının tek katmanlı lif donatılı plaklardan daha iyi olduğuna bağlanmıştır. Çalışmada en iyi statik ve çarpma performansı, iki çelik lif türünün bileşimini (%50 kıvrımlı çelik lif + %50 kanca uçlu çelik lif) içeren KİALB beton plaktan elde edilmiştir. Bu beton plak, normal beton plaktan %1982.1 ve aynı tip ve miktarda lif içeren TKİALB plaktan %9.8 daha yüksek bir kırılma çarpma dayanımı göstermiştir.



Şekil 2.16. TKİALB ve KİALB plakalarda lif dağılımı, V_f = lif kullanım oranı (Murali ve Ramprasad, 2018)

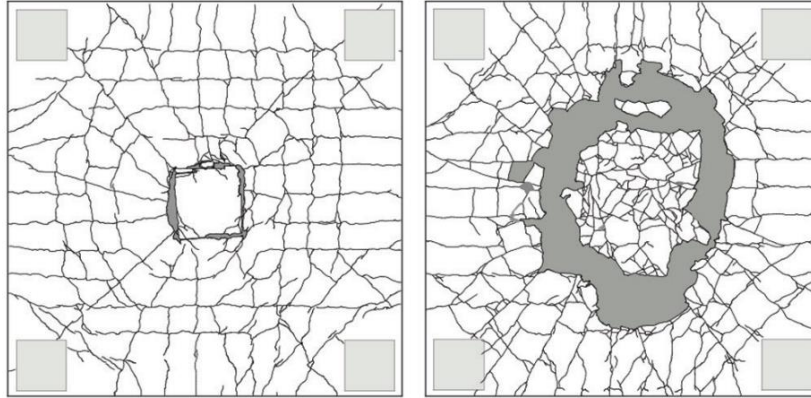
Zhao ve Guo (2018) yaptıkları araştırmada, çelik-beton-çelik plakların çarpma ve çarpma sonrası davranışını araştırmışlardır. Ağırlık düşürme deneyi 233.5 kg'lık bir ağırlık kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testte, farklı çarpma yüksekliği (1.5-7.5 m) kullanılarak farklı çarpma enerjisi uygulanmıştır. Çalışmada, test edilen plaklar 800×1000 mm ebatlarındadır. Ayrıca, seçilen bazı numunelerde, uzun doğrultuda 197 kN'lik bir eksenel basınç yükü uygulanmıştır. Beton çekirdeğin ve çelik plakaların kalınlıkları sırasıyla 75 mm ve 2.9 mm'dir. Çarpmadan sonra, hasarlı beton plaklar ve çarpma yükü altında test edilmemiş beton plaklar eksenel yönde yarı-statik basınç yükleri altında test edilmiştir. Araştırma sonunda, yazarlar rezidüel basınç dayanımını değerlendirmek için bir hesap modeli önermişlerdir. Maksimum çarpma yükü ile çarpma hızı arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Ayrıca, kalıcı deformasyonlar ile plak tarafından emilen enerji arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Sonuçlar, çarpma

yüksekliğinin 4,5m'den fazla arttırıldığında ön yüzeydeki çelik plakanın delindiğini ve hasar şiddetinin arttığını göstermiştir. Öte yandan, eksenel basınç yükü uygulamasının beton plakların çarpma direncini arttırdığı izlenmiştir. Çelik-beton-çelik plakların rezidüel basınç dayanımının, çarpma hasarından önemli ölçüde etkilendiği de görülmüştür.

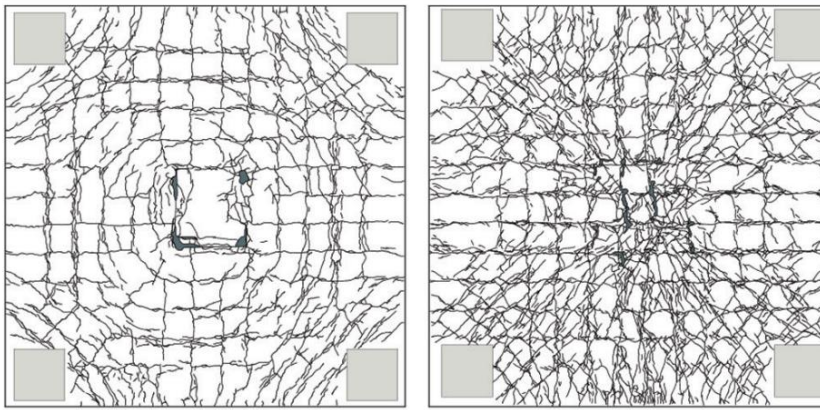
Abdel-Kader ve Fouda (2014) gerçekleştirdikleri araştırmada, çelik donatı oranının, yerinin (önde, ortada veya arkada) ve tipinin (normal donatı veya çelik levha) betonarme plakların mermi etkisi altındaki davranışına etkisini incelemiştir. Çelik levhaların kalınlıkları 1-3 mm arasında değişmektedir. Sonuçlar, normal beton plakta, çarpma hızı ve delinme derinliği arasında lineer bir ilişki bulunduğunu göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, çelik donatının konumunun, ön ve arka yüzeylerde oluşan hasarın alanını etkilediğini ortaya koymuştur. Arkada çelik donatı kullanılmasının betonarme plakların delinme dayanımını arttırdığı izlenmiştir. Arkada donatı kullanıldığında, arka yüzeydeki hasarı sınırladığı, fakat dökülmeyi önleyemediği de bulunmuştur. Öte yandan, arka yüzeyde veya ön ve arka yüzeylerde çelik levhaların kullanılmasının betonarme plakların delinme dayanımını önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Sonuçlar ayrıca, çelik levhaların arka yüzeyde kullanılmasının, ön yüzeye göre daha etkili olduğunu göstermiştir.

Hrynyk ve Vecchio (2014) çalışmalarında, çelik lif donatılı betonarme plakların çarpma yükü altındaki davranışını incelemiştir. Kanca uçlu çelik lifler hacimce %0-1.50 oranlarında kullanılmıştır. Tekrarlı çarpma testlerinde 3.26 m olan aynı çarpma yüksekliği kullanılmıştır. Çekicinin ağırlığı için incelenen çarpma sayısına bağlı olarak 150 kg ile 300 kg arasında bir ağırlık kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, çelik lif donatılı betonarme plaklar, lifsiz betonarme plaklarla karşılaştırıldığında üstün bir çarpma performansı sergilediğini göstermiştir. Çelik liflerin kullanılması, çatlakların aralığını, çatlakların genişliğini ve yerel hasarı (kütle penetrasyonu ve beton dökülmesi gibi) azaltmış ve betonarme plağın rijitliğini ve kapasitesini arttırmıştır. Çelik lifin, çarpma etkisinden dolayı betonarme plaklarda oluşan hasar şekli üzerindeki etkisi Şekil 2.17.'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, lifsiz betonarme plakta 3 vuruştan sonra ciddi bir hasar oluşmuşken %1.5 çelik lif içeren betonarme plağın 10 vuruşa kadar dayanabildiği gözlenmiştir. Çelik lifli betonarme plakların çarpma dayanımı, rijitliği ve şekil değiştirme kapasitesindeki artışın, çelik lifin kullanım oranıyla orantılı olduğu bulunmuştur. Sonuçlar ayrıca, betonarme plakların statik yükler altında eğilme kırılmasına sahip olacak şekilde tasarlanmasına rağmen, çarpma testlerinde zımbalama

kırılmasının ana hasar türü olduğunu göstermiştir. Bu, dinamik yüklemeler sırasında atalet kuvvetlerinin varlığına bağlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2.17. Çarpma testi sonucunda elde edilen hasar şekli, a) lifsiz betonarme plak, vuruş sayısı = 3, b) %1.5 çelik lif donatılı betonarme plak, vuruş sayısı = 10. Solda: ön yüzey; sağda: arka yüzey (T. D. Hrynyk ve Vecchio, 2014)

2.3. Literatür Araştırmasından Elde Edilen Sonuçlar

Yapılan literatür araştırmasından aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Uygun oranda nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ ve nano-Fe₂O₃'ün kullanılması betonun basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını arttırmaktadır. Ayrıca, NS betonun çarpma direncini yükseltmektedir. Nano katkı maddeleri, betonun mikroyapısını önemli ölçüde iyileştirebilmektedir.
- Çelik lif ve PP lif betonun basınç dayanımını arttırırken PET lifin basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkisi bulunmaktadır. Çatlama engelleme ve çatlaklar üzerinde köprüleme etkileri sayesinde lifler betonun yarmada

çekme dayanımını, eğilme dayanımını, enerji yutma kapasitesini ve çarpma direncini önemli ölçüde artırabilmektedir. Bu etki ilk çatlak oluşuktan sonra daha büyük olmaktadır. Çelik lif ile çimento hamuru arasında iyi bir bağ bulunurken PPF ve PETF ile çimento hamuru arasında zayıf bir bağ bulunmaktadır.

- Atık lastik kauçuklar betonun mekanik özelliklerini, özellikle basınç dayanımını, azaltmaktadır. Atık lastik kauçuklar ayrıca betonun mikroyapısındaki gözenekliliğin miktarını arttırmaktadır. Ancak, FR ve CR betonun tokluğunu ve çarpma dayanımını kayda değer ölçüde arttırmaktadır.
- Çelik lif betonarme plakların çarpma dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır. Ayrıca, çelik lif içeren fonksiyonel derecelendirilmiş beton kullanılarak betonarme plakların çarpma dayanımı daha fazla yükseltilebilmektedir.
- Betonarme plalarda çelik levhaların kullanılması çarpma etkisinde oluşan hasar seviyesini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Bu etki, çelik levhanın betonarme plağın arka yüzeyinde kullanılmasında daha net görülmektedir.

2.4. Bilimsel Çalışmanın Özgünlüğü

Literatür araştırmasından, farklı katkı maddeleri içeren betonun statik ve çarpma yükleri altındaki davranışının birçok çalışmada incelendiği görülebilir. Ancak yeterince araştırılmamış bazı konular vardır. Nano katkı maddelerinin betonun çarpma dayanımı üzerindeki etkisi üzerine az araştırma yapılmıştır. Literatür incelendiğinde, nano- Al_2O_3 'ün betonun özellikleri üzerindeki etkisinden daha ziyade çimento harcının özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. NA'nın betonun özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen yayınlar hala sınırlıdır. Ayrıca, NA'nın eğilme dayanımı üzerindeki etkisi çok az çalışılmıştır. Dahası, NA'nın dinamik özellikler ve çarpma dayanımı üzerindeki etkisi hakkında sadece iki adet yayınlanmış makale bulunmaktadır (Demirhan ve ark., 2019; Su ve ark., 2016). Ayrıca, NA içeren betonun düşük hızlı çarpma yükü altındaki davranışı bu çalışmaların sadece bir tanesinde incelenmiştir (Demirhan ve ark., 2019). Ek olarak, nano- Fe_2O_3 'ün beton elemanların çarpma dayanımı üzerindeki etkisi hakkında yayınlanmış hiçbir makale bulunamamıştır. Bu çalışmada, NS, NA ve NF'nin betonun statik ve çarpma yükleri altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir.

STF+PPF, STF+PETF ve PPF+PETF bileşimlerinin betonun özellikleri üzerindeki etkisi daha önce çokça araştırılmıştır. Ancak bu liflerin üçlü kullanımının betonun özellikleri ve özellikle çarpma davranışı üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde araştırılmamıştır. Bu çalışmada, çelik, polipropilen ve PET liflerin tekil, ikili ve üçlü kullanımının betonun statik ve çarpma yükleri altındaki performansına etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Literatür taramasından, FR ve CR'nin betonun özellikleri üzerindeki etkisi üzerine çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, ince ve iri atık lastik kauçuğun tekil ve hibrit kullanımının betonun statik özellikleri ve çarpma performansı üzerindeki etkisinin incelendiği ve karşılaştırıldığı çalışmaların az olduğu görülmektedir. Yayınlanan çalışmaların çoğunda, ince ve iri lastik kauçukların tekil etkisine odaklanılmıştır. Bu çalışmada, FR ve CR'nin tekil ve hibrit kullanımının betonun statik, mikroyapısal ve çarpma özellikleri üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde araştırılmış ve karşılaştırılmıştır.

Bunun dışında betonun çarpma dayanımını arttırabilecek deneysel olarak henüz incelenmemiş birçok katkı maddelerinin bileşimleri vardır. Bu çalışmada, betonun çarpma dayanımını arttırmak amacıyla NS, NA, NF, STF, PPF, PETF, FR ve CR içeren yeni katkı maddelerinin bileşimleri denenmiştir.

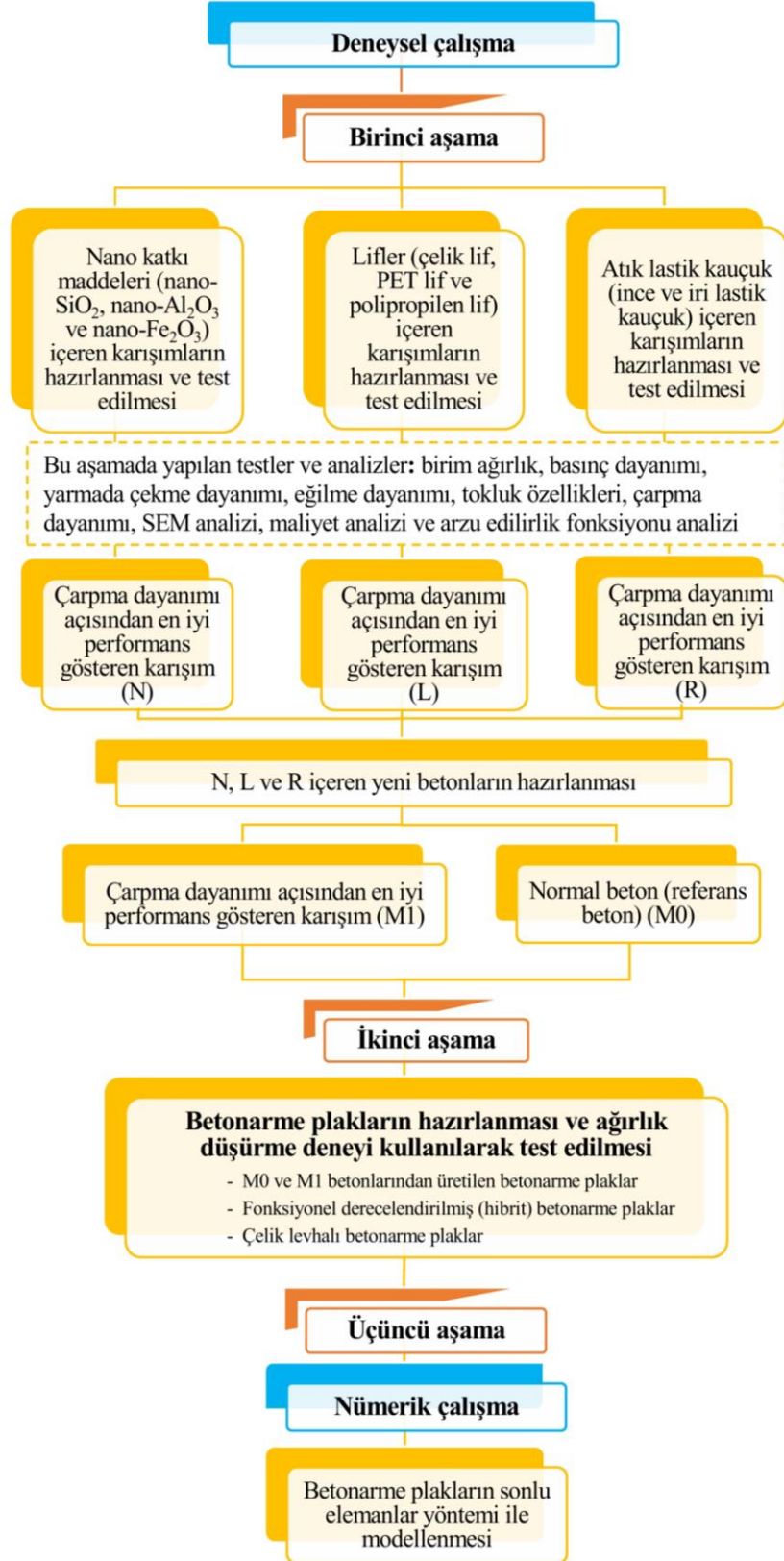
Öte yandan, çelik lif donatılı fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plakların ağırlık düşürme testi altındaki davranışını araştıran yayınlar çok azdır. Ayrıca, çelik lif donatılı betonarme plağın ön ve/veya arka yüzeylerinde çelik levhanın kullanılmasının, plağın ağırlık düşürme testi altındaki tepkisi üzerindeki etkisi sınırlı sayıda makalede tartışılmıştır. Bu çalışmada, bu tip betonarme plakların çarpma tepkisi detaylı olarak incelenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, farklı katkı maddelerinin beton/betonarme elemanların performansı üzerindeki etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Tez kapsamında yapılan deneyler ve analizler Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, bu araştırma üç ana aşamadan oluşmaktadır.

Birinci aşamada, farklı katkı maddelerinin betonun statik özellikleri, mikroyapısal özellikleri ve çarpma performansı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu aşamada, nano katkı maddeleri (nano silika, nano alümina ve nano demir), lifler (çelik lif, PET lif, polipropilen lif) ve atık lastik kauçuklar (ince ve iri lastik kauçuk) içeren betonlar hazırlanmış ve test edilmiştir. Bu aşamada gerçekleştirilen deneysel testler, birim ağırlık testi, basınç dayanımı testi, yarmada çekme dayanımı testi, eğilme dayanımı testi ve çarpma dayanımı testidir. Deneysel testlerin yanı sıra SEM analizi ve maliyet analizi yapılmıştır. Ek olarak, üretilen betonların statik özellikleri, çarpma dayanımı ve maliyeti göz önüne alınarak genel performansını karşılaştırmak amacıyla arzu edilirlilik fonksiyonu analizi yapılmıştır. Üretilen betonlar, içinde kullanılan katkı maddelerinin türüne göre üç gruba ayrılmıştır. Bunlar, nano katkı maddeleri grubu, lifler grubu ve atık lastik kauçuklar grubudur. Nano katkı maddeleri grubunda, NS, NA ve NF çimentonun ağırlıkça %0.5 ve %1'i oranında ayrı ayrı ve farklı kombinasyonlarda kullanılmıştır. Lifler grubunda, çelik lif ve PET lif karışımının hacimce %1 ve %2'si oranında kullanılmıştır. PP lif ise hacimce %0.25 ve %0.5 oranında betona eklenmiştir. Lifler tekil ve hibrit şeklinde kullanılmıştır. Atık lastik kauçuklar grubunda, ince ve iri atık lastik kauçuklar hacimce %10 ve %20'lik oranlarda sırasıyla ince ve iri agregaların yerine kullanılmıştır. Bu grupta da kauçuklar ayrı ayrı ve kombinasyonlar şeklinde kullanılmıştır. Beton gruplarının her birinde, kırılma çarpma dayanımı açısından en yüksek performans gösteren karışım ve içinde kullanılan katkı maddeleri belirlenmiştir. Bu üç katkı maddesi kullanılarak yeni katkı maddelerinin bileşimlerini içeren karışımlar hazırlanmıştır.

İkinci aşamada, birinci aşamada test edilen betonların kırılma çarpma dayanımı açısından en yüksek performans gösteren seçilmiştir. Bu beton, referans betonla birlikte farklı tiplerde betonarme plaklar üretmek için kullanılmıştır. Bunlar, referans betondan üretilen, en iyi performans gösteren betondan üretilen, fonksiyonel derecelendirilmiş betondan üretilen ve çelik levhalı betonarme plaklardır. Betonarme plakların çarpma davranışı ağırlık düşürüme deneyi kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, üretilen betonarme plakların maliyet analizi de yapılmıştır.



Şekil 3.1. Tezin deneysel ve nümerik aşamaları

Üçüncü aşama nümerik aşamadır. Bu aşamada, betonarme plakların ağırlık düşürme deneyi altındaki davranışı sonlu elmanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Analizler Abaqus yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.1. Malzemeler

3.1.1. Çimento

Bu çalışmada, (TS EN 197-1, 2012) standardına uygun olan Konya Çimento San. A.Ş.'nin ürettiği CEM I 42.5 R tipi Portland Çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun özgül ağırlığı Le Chatelier balonu (Şekil 3.2.) kullanılarak tespit edilmiştir. Testte çimentonun özgül ağırlığını bulmak için etil alkol kullanılmıştır. Test sonuçları Çizelge 3.1.'de sunulmuştur. Çimentoya ait diğer fiziksel ve kimyasal özellikler üretici firmadan elde edilmiş ve Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Le Chatelier balonu

Çizelge 3.1. Çimentonun özgül ağırlığı

	Numune 1	Numune 2
Çimento kütlesi (M) (gr)	64	64
İlk okunan hacim (V ₁) (cm ³)	0.9	0.9
Son okunan hacim (V ₂) (cm ³)	21.7	21.5
Çimentonun yoğunluğu (gr/cm ³) = $\frac{M}{V_2 - V_1}$	3.077	3.107
Özgül ağırlık = $\frac{M}{\frac{V_2 - V_1}{1} \left(\frac{gr}{cm^3}\right)}$	3.077	3.107
Ortalama özgül ağırlık		3.09

Çizelge 3.2. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellikler	Elde edilen değerler	(TS EN 197-1, 2012)'de istenen değerler	
		En az	En çok
Kimyasal özellikler			
Kızdırma kaybı (%)	4.02		5
Çözünmeyen kalıntı (%)	0.71		5
Kükürt trioksit (SO ₃) (%)	3.26		4
Klorür (Cl) (%)	0.029		0.1
K ₂ O (%)	0.72		
Na ₂ O (%)	0.26		
Fiziksel özellikler			
2 günlük basınç dayanımı (MPa)	27	20	
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	48.7	42.5	62.5
Priz başlangıcı (dk)	135	60	
Hacim genleşmesi (Le Catelier) (dk)	1		10

3.1.2. Agregalar

Bu çalışmada kullanılan agregalar (TS 706 EN 12620, 2009) standardına uygundur. İnce agrega yıkanmış kum ve iri agrega kırmataş olarak temin edilmiştir. Agreganın en büyük tane büyüklüğü 16 mm olarak seçilmiştir. Tezde kullanılan ince ve iri agregaların görünümü Şekil 3.3.'te gösterilmektedir. Agregaların elek analizi, su emme kapasitesi, özgül ağırlığı, sıkışık birim ağırlığı ve gevşek birim ağırlığı test edilmiştir.



İnce agrega



İri agrega

Şekil 3.3. Kullanılan ince ve iri agregaların görünümü

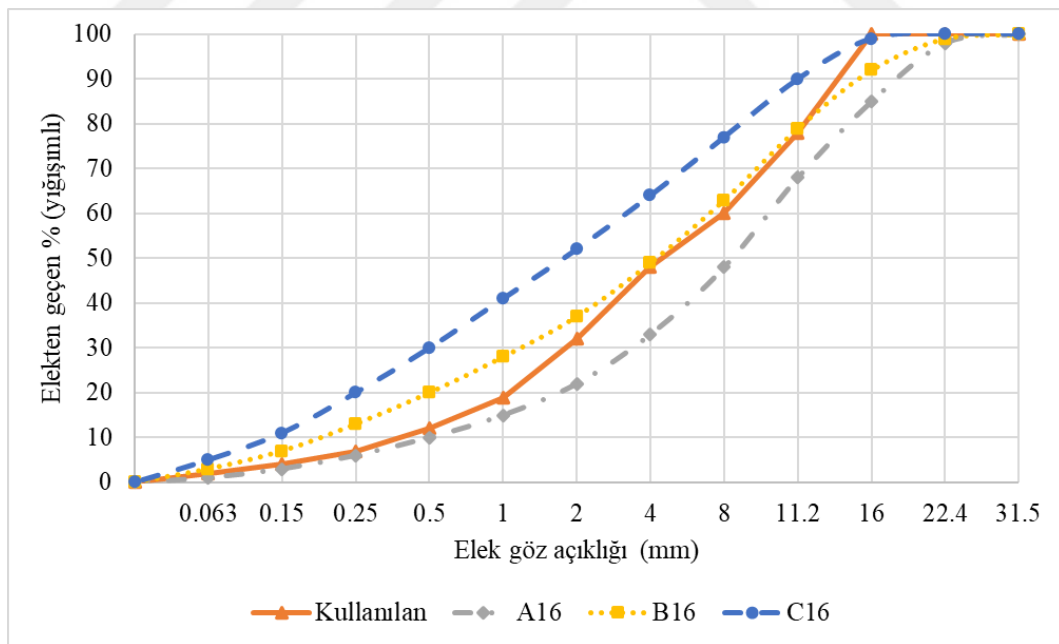
3.1.2.1. Elek analizi

İnce ve iri agregaların elek analizi üçer numune kullanılarak yapılmıştır. İnce ve iri agregaların elek analizi sonuçları Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Bu çalışmada, uygun bir agrega karışımı elde edilmesi için %55 ince ve %45 iri agrega kullanılmıştır. Oluşturulan

agrega karışımının granülometri eğrisi Şekil 3.4.'te gösterilmiştir. Şekilde ayrıca, en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan agrega karışımı için (TS 802, 2016) standardında belirlenen sınırlar verilmiştir.

Çizelge 3.3. İnce ve iri agregaların elek analizinin sonuçları

Elek açıklığı (mm)	İnce agrega		İri agrega			
	Elek üzerinde kalan (%)	Kümülatif kalan (%)	Kümülatif geçen (%)	Elek üzerinde kalan (%)	Kümülatif kalan (%)	Kümülatif geçen (%)
31.5	0	0	100	0	0	100
22.4	0	0	100	0	0	100
16	0	0	100	0	0	100
11.2	0	0	100	49	49	51
8	0	0	100	41	90	10
4	12	12	88	10	100	0
2	30	42	58	0	100	0
1	24	66	34	0	100	0
0.5	12	78	22	0	100	0
0.25	10	88	12	0	100	0
0.15	5	93	7	0	100	0
0.063	4	97	3	0	100	0
Tava	3	100	0	0	100	0
	İncelik modülü	2.86		İncelik modülü	5.9	



Şekil 3.4. Karışımlarda kullanılan agreganın granülometri eğrisi

3.1.2.2. Özgül ağırlık ve su emme kapasitesi

İnce ve iri agregaların özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi (TS EN 1097-6, 2013) standardına göre tayin edilmiştir. Agregaların görünen özgül ağırlığı, kuru özgül ağırlığı, doymuş yüzey kuru özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi üçer numune kullanılarak elde edilmiştir. İnce agreganın deney sonuçları Çizelge 3.4'te verilmiştir. İri agreganın deney sonuçları ise Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4. İnce agreganın özgül ağırlıkları ve su emme kapasitesi

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Numunenin doymuş yüzey kuru durumdaki ağırlığı (M ₁) (gr)	196.55	194.42	196.42	195.8
Piknometre + su + numune ağırlığı (M ₂) (gr)	669.5	670	669.58	669.69
Su ile doldurulmuş piknometrenin ağırlığı (M ₃) (gr)	548.09	549.19	548.45	548.58
Numunenin etüv kuru ağırlığı (M ₄) (gr)	190.58	190.46	191.19	190.74
Görünen özgül ağırlık (ρ_a) = $\frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$	2.76	2.73	2.73	2.74
Kuru özgül ağırlık (ρ_{rd}) = $\frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$	2.54	2.59	2.54	2.56
Doymuş yüzey kuru özgül ağırlık (ρ_{ssd}) = $\frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$	2.62	2.64	2.61	2.62
Su emme kapasitesi (%) = $\frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100$	3.1	2.1	2.7	2.6

Çizelge 3.5. İri agreganın özgül ağırlıkları ve su emme kapasitesi

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Numunenin doymuş yüzey kuru durumdaki ağırlığı (M ₁) (gr)	1990	1988	1988	1988.67
Numunenin etüv kuru ağırlığı (M ₂) (gr)	1985	1982	1982	1983
Doymuş yüzey kuru durumdaki numunenin su içindeki ağırlığı (M ₃) (gr)	1212	1200	1199	1203.67
Görünen özgül ağırlık (ρ_a) = $\frac{M_2}{M_2 - M_3}$	2.57	2.54	2.54	2.55
Kuru özgül ağırlık (ρ_{rd}) = $\frac{M_2}{M_1 - M_3}$	2.55	2.52	2.51	2.53
Doymuş yüzey kuru özgül ağırlık (ρ_{ssd}) = $\frac{M_1}{M_1 - M_3}$	2.56	2.52	2.52	2.53
Su emme kapasitesi (%) = $\frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$	0.3	0.3	0.3	0.3

3.1.2.3. Birim ağırlık

İri ve ince agregaların gevşek ve sıkışık birim ağırlığı üçer numune kullanılarak elde edilmiştir. İnce agrega ve iri agregaya ait test sonuçları sırasıyla Çizelge 3.6.'da ve Çizelge 3.7.'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.6. İnce agregaya ait birim ağırlık deneyi sonuçları

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ölçü kabı hacmi (V) (cm ³)	3375	3375	3375	3375
Ölçü kabı boş ağırlığı (W ₁) (gr)	2266	2266	2266	2266
Sıkışık birim ağırlık				
Kap + numune ağırlığı (W ₂) (gr)	8321.5	8389	8412.5	8374.33
Sıkışık birim ağırlık = $\frac{W_2 - W_1}{V}$ (gr/cm ³)	1.79	1.81	1.82	1.81
Gevşek birim ağırlık				
Kap + numune ağırlığı (W ₂) (gr)	7945	8050	8058.5	8017.83
Gevşek birim ağırlık = $\frac{W_2 - W_1}{V}$ (gr/cm ³)	1.68	1.71	1.72	1.7

Çizelge 3.7. İri agregaya için birim ağırlık deneyi sonuçları

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ölçü kabı hacmi (V) (cm ³)	3375	3375	3375	3375
Ölçü kabı boş ağırlığı (W ₁) (gr)	2267	2267	2267	2267
Sıkışık birim ağırlık				
Kap + numune ağırlığı (W ₂) (gr)	7241	7235	7185	7220.33
Sıkışık birim ağırlık = $\frac{W_2 - W_1}{V}$ (gr/cm ³)	1.47	1.47	1.46	1.47
Gevşek birim ağırlık				
Kap + numune ağırlığı (W ₂) (gr)	6787	6750.5	6740	6759.17
Gevşek birim ağırlık = $\frac{W_2 - W_1}{V}$ (gr/cm ³)	1.34	1.33	1.33	1.33

3.1.3. Süper akışkanlaştırıcı

Çalışmada, Sikament® FFN süper akışkanlaştırıcı (yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi) kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcının (SA) özgül ağırlığının tayin edilmesinde üç numune kullanılmıştır. Özgül ağırlık deneyi sonuçları Çizelge 3.8.'de verilmiştir. Diğer özellikler üretici firma tarafından sağlanmış ve Çizelge 3.9.'da sunulmuştur. Çizelgelerden görüldüğü gibi, testte elde edilen ortalama özgül ağırlık (1.18) üretici firma tarafında verilen değerlerle (1.15-1.19) uyumludur.

Çizelge 3.8. Süper akışkanlaştırıcının özgül ağırlık deneyi sonuçları

	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Piknometre ağırlığı (W _p) (gr)	161	31	49.5
Piknometre + numune ağırlığı (W _{p+s}) (gr)	747.5	154	634.5
Piknometre + su ağırlığı (W _{p+w}) (gr)	660	135.5	547.5
Özgül ağırlık = $\frac{W_{p+s} - W_p}{W_{p+w} - W_p}$	1.175	1.177	1.175
Ortalama özgül ağırlık		1.18	

Çizelge 3.9. Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Ürün adı	Sikament® FFN
Standartlar	TS EN 934-2 Çizelge 3.1 ve 3.2'e özelliklerine uygundur.
Görünüm / Renk	Kahverengi, homojen, sıvı
Kimyasal yapı	Melamin sülfonat polimeri esaslı sıvı
Yoğunluk	1.15 – 1.19 kg/l, 20 °C'de
pH değeri	7-11
Donma noktası	-10 °C
Toplam klorür iyon içeriği	En fazla %0.1, klorür içermez
Alkali miktarı (%Na ₂ O eşdeğeri olarak)	En fazla %7
Dozaj	Bağlayıcı ağırlığının %0.8-%3'ü oranında

3.1.4. Atık lastik kauçuk

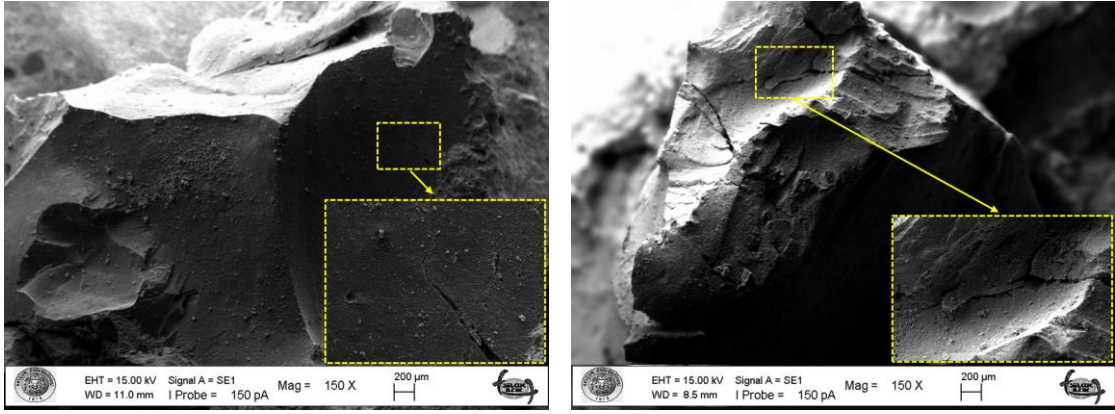
Tez çalışmasında, iki tür atık lastik kauçuk kullanılmıştır. Bunlar, ince ve iri atık lastik kauçuktur. Bu çalışmada kullanılan ince ve iri atık lastik kauçukların görünümü Şekil 3.5.'te gösterilmiştir. İnce lastik ve iri lastik kauçuğun SEM görüntüsü Şekil 3.6.'da sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi, kauçuk partikülleri boşluklar, gözenekler ve çatlaklar içeren pürüzlü bir yüzeye sahiptir. Atık lastik kauçukların elek analizi, özgül ağırlığı, gevşek birim ağırlığı ve sıkışık birim ağırlığı tayin edilmiştir.



İri atık lastik kauçuk

İnce atık lastik kauçuk

Şekil 3.5. Kullanılan iri ve ince atık lastik kauçuk görünümü



(a)

(b)

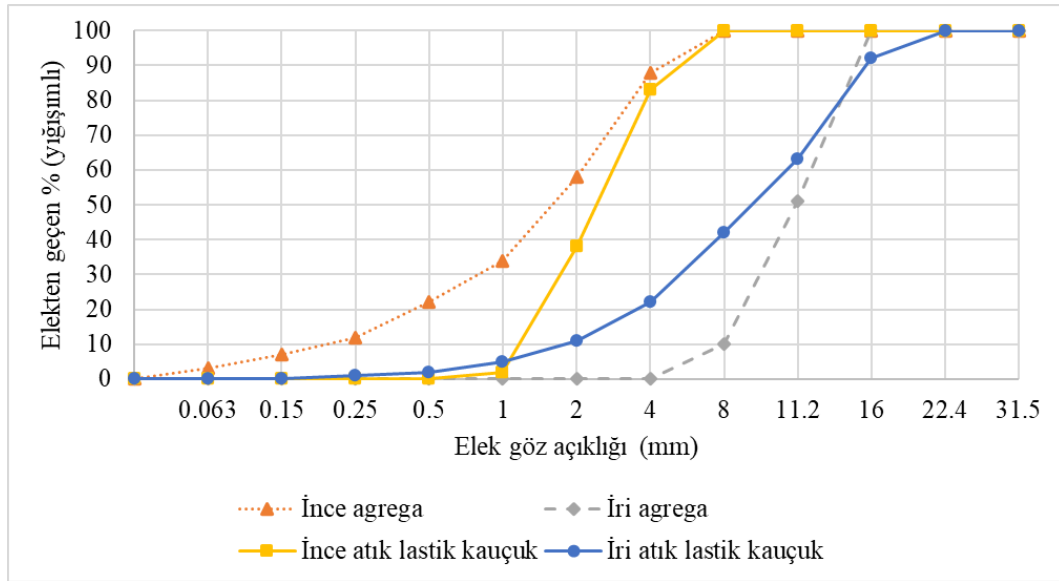
Şekil 3.6. Atık lastik kauçukların SEM görüntüsü, a) ince atık lastik kauçuk, b) iri atık lastik kauçuk

3.1.4.1. Elek Analizi

İnce ve iri atık lastik kauçukların elek analizi üçer numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Atık lastik kauçukların elek analizinin sonuçları Çizelge 3.10.'da sunulmuştur. İnce ve iri atık lastik kauçukların granülometri eğrisi, ince ve iri agregalarınki ile birlikte, Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. İnce ve iri atık lastik kauçukların elek analizinin sonuçları

Elek açıklığı (mm)	İnce atık lastik kauçuk			İri atık lastik kauçuk		
	Elek üzerinde kalan (%)	Kümülatif kalan (%)	Kümülatif geçen (%)	Elek üzerinde kalan (%)	Kümülatif kalan (%)	Kümülatif geçen (%)
31.5	0	0	100	0	0	100
22.4	0	0	100	0	0	100
16	0	0	100	8	8	92
11.2	0	0	100	29	37	63
8	0	0	100	21	58	42
4	17	17	83	20	78	22
2	45	62	38	11	89	11
1	36	98	2	6	95	5
0.5	2	100	0	3	98	2
0.25	0	100	0	1	99	1
0.15	0	100	0	1	100	0
0.063	0	100	0	0	100	0
Tava	0	100	0	0	100	0
	İncelik modülü	3.77		İncelik Modülü	5.25	



Şekil 3.7. Atık lastik kauçukların ve agregaların tane büyüklüğü dağılımı eğrisi

3.1.4.2. Özgül ağırlık

İnce ve iri atık lastik kauçukların özgül ağırlığı etil alkol kullanılarak tayin edilmiştir. Testte kullanılan etil alkolün derecesi hacimce en az %96'dır. Etil alkolün özgül ağırlığı üç numune kullanılarak tespit edilmiş ve 0.81 olarak bulunmuştur. İnce atık lastik kauçuğun deney sonuçları Çizelge 3.11.'de gösterilmiştir. İri atık lastik kauçuğun deney sonuçları ise Çizelge 3.12.'de sunulmuştur.

Çizelge 3.11. İnce atık lastik kauçuğun özgül ağırlıkları

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Numunenin ağırlığı (M_1) (gr)	50	50	50	50
Piknometre + etil alkol + numune ağırlığı (M_2) (gr)	466.91	467.72	262.33	398.99
Etil alkol ile doldurulmuş piknometrenin ağırlığı (M_3) (gr)	452.09	452.79	247.17	384.02
Etil alkolün özgül ağırlığı (G_e)			0.81	
Özgül ağırlık = $\frac{M_1}{M_1 - [M_2 - M_3] * G_e}$	1.32	1.32	1.33	1.32

Çizelge 3.12. İri atık lastik kauçuğun özgül ağırlıkları

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Numunenin ağırlığı (M_1) (gr)	100	100	100	100
Piknometre + etil alkol + numune ağırlığı (M_2) (gr)	580.5	579.61	580.55	580.22
Etil alkol ile doldurulmuş piknometrenin ağırlığı (M_3) (gr)	550.51	549.02	550.5	550.01
Etil alkolün özgül ağırlığı (G_e)			0.81	
Özgül ağırlık = $\frac{M_1}{M_1 - [M_2 - M_3] * G_e}$	1.32	1.33	1.32	1.32

3.1.4.3. Birim ağırlık

Çalışmada kullanılan iri ve ince atık lastik kauçuğun gevşek ve sıkışık birim ağırlığı deneysel olarak tayin edilmiştir. İnce ve iri atık lastik kauçuğun test sonuçları sırasıyla Çizelge 3.13.'te ve Çizelge 3.14.'te sunulmuştur.

Çizelge 3.13. İnce atık lastik kauçuğun birim ağırlık deneyi sonuçları

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ölçü kabı hacmi (V) (cm ³)	3375	3375	3375	3375
Ölçü kabı boş ağırlığı (W ₁) (gr)	2267.5	2267.5	2267.5	2267.5
Sıkışık birim ağırlık				
Kap + numune ağırlığı (W ₂) (gr)	4071	4078	4061.5	4070.17
Sıkışık birim ağırlık = $\frac{W_2 - W_1}{V}$ (gr/cm ³)	0.53	0.54	0.53	0.53
Gevşek birim ağırlık				
Kap + numune ağırlığı (W ₂) (gr)	3862.5	3869.5	3856	3862.67
Gevşek birim ağırlık = $\frac{W_2 - W_1}{V}$ (gr/cm ³)	0.47	0.47	0.47	0.47

Çizelge 3.14. İri atık lastik kauçuğun birim ağırlık deneyi sonuçları

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ölçü kabı hacmi (V) (cm ³)	3375	3375	3375	3375
Ölçü kabı boş ağırlığı (W ₁) (gr)	2267.5	2267.5	2267.5	2267.5
Sıkışık birim ağırlık				
Kap + numune ağırlığı (W ₂) (gr)	4282	4309	4288	4293
Sıkışık birim ağırlık = $\frac{W_2 - W_1}{V}$ (gr/cm ³)	0.6	0.6	0.6	0.6
Gevşek birim ağırlık				
Kap + numune ağırlığı (W ₂) (gr)	4029	3985	3992	4002
Gevşek birim ağırlık = $\frac{W_2 - W_1}{V}$ (gr/cm ³)	0.52	0.51	0.51	0.51

3.1.5. Lifler

Bu çalışmada üç farklı lif tipi kullanılmıştır. Bunlar çelik lif, polipropilen lif ve PET liftir. Çalışmada kullanılan liflerin görünümü Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan liflerin görünümü; solda çelik lif, ortada polipropilen lif, sağda PET lif

3.1.5.1. Çelik lif

Çalışmada kullanılan çelik lifler ATLAS1 firmasından elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan çelik liflerin tipi kanca uçlu çelik liftir (Şekil 3.8.). Çelik liflerin özgül ağırlığı deneysel olarak tespit edilmiştir. Özgül ağırlık deneyi sonuçları Çizelge 3.15.'te gösterilmiştir. Liflerin diğer özellikleri ise üretici firma tarafından elde edilmiş ve Çizelge 3.16.'da sunulmuştur.

Çizelge 3.15. Çelik liflerin özgül ağırlık deneyi sonuçları

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Numunenin ağırlığı (M ₁) (gr)	49.96	49.99	50.05	50
Piknometre + su + numune ağırlığı (M ₂)	338.68	338.69	338.7	338.69
Su ile doldurulmuş piknometrenin ağırlığı (M ₃) (gr)	295.08	295.08	295.02	295.06
Özgül ağırlık = $\frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$	7.86	7.84	7.86	7.85

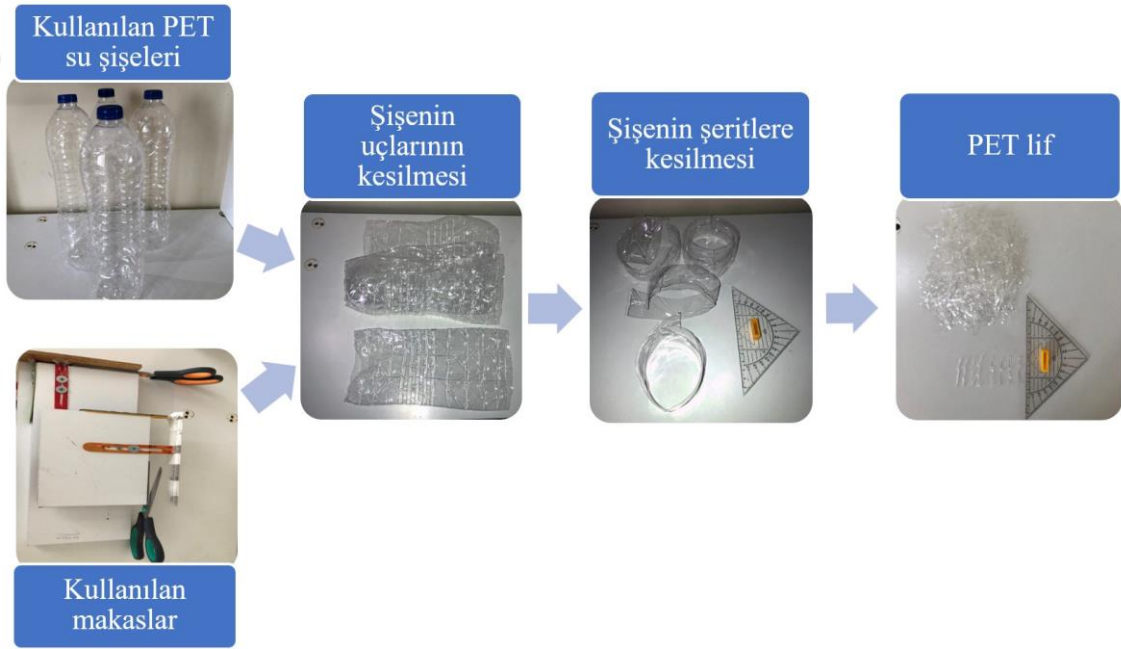
Çizelge 3.16. Çelik lifin teknik özellikleri

Ürün adı	BETONFİBER® HE1050 ÇELİK FİBER	Açı	45°
Standart	ASTM A820/A820M-04 Type 1EN 14889:2 CE	Uzunluk	50 mm
Görünüm	Parlak, çelik tel	Çap	1.00 mm
Tip	Soğuk çekme	Narinlik oranı	50
Kenar	Kıvrımlı	Çekme mukavemeti	1200 MPa

3.1.5.2. PET lif

Çalışmada kullanılan polietilen tereftalat (PET) lifler 1.5 litre kapasiteli su şişeler kesilerek temin edilmiştir. PET lifler, yaklaşık 330 su şişesinin elle kesilmesiyle hazırlanmıştır. Kesilen şişelerden yaklaşık 4.2 kg PET lif elde edilmiştir. PET liflerin aynı

özelliklere sahip olmasını sağlamak için liflerin hazırlanmasında aynı su şişeleri kullanılmıştır. PET liflerin su şişelerinden hazırlanma süreci Şekil 3.9.'da gösterilmiştir. İlk başta, şişenin üst ve alt kısımları çıkarılmıştır. Sonra, şişe 35 mm genişliğinde dairesel şeritlere kesilmiştir. Daha sonra şeritler 3 mm genişliğinde liflere ayrılmıştır. Sonuçta, üretilen lifler 3 mm genişlikte ve 35 mm uzunluktadır. PET liflerin ortalama kalınlığı 10 µm hassasiyetli dijital komparatör saati kullanılarak ölçülmüştür. Kullanılan dijital komparatör saatinin görünümü Şekil 3.10.'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, PET lifin kalınlığı 0.18 mm'dir. PET lifin özgül ağırlığı etil alkol yardımıyla tayin edilmiştir. Özgül ağırlık deney sonuçları Çizelge 3.17.'de sunulmuştur.



Şekil 3.9. PET liflerin hazırlanma süreci



Şekil 3.10. PET lifin ortalama kalınlığı

Çizelge 3.17. PET lifin özgül ağırlığı

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Numunenin ağırlığı (M ₁) (gr)	10.01	10.015	10.014	10.013
Piknometre + etil alkol + numune ağırlığı (M ₂) (gr)	250.75	250.695	250.706	250.717
Etıl alkol ile doldurulmuş piknometrenin ağırlığı (M ₃) (gr)	247.279	247.339	247.318	247.312
Etıl alkolün özgül ağırlığı (G _e)		0.81		
Özgül ağırlık = $\frac{M_1}{M_1 - [M_2 - M_3] \cdot G_e}$	1.39	1.37	1.38	1.38

PET lifin narinlik oranı, lifin eşdeğer çapı yardımıyla denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmaktadır (Pereira de Oliveira ve Castro-Gomes, 2011).

$$\lambda = \frac{l}{d_e} = \frac{l}{2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}}} = \frac{l}{2 \times \sqrt{\frac{b \times c}{\pi}}} \quad (3.1)$$

Burada, l : mm cinsinden lifin uzunluğu, d_e : eşdeğer çapı, A : mm² cinsinden lifin enkesit alanı, b : lifin genişliği, c : lifin kalınlığıdır. PET lifin narinlik oranı 42.2 olarak tespit edilmiştir.

3.1.5.3. Polipropilen lif

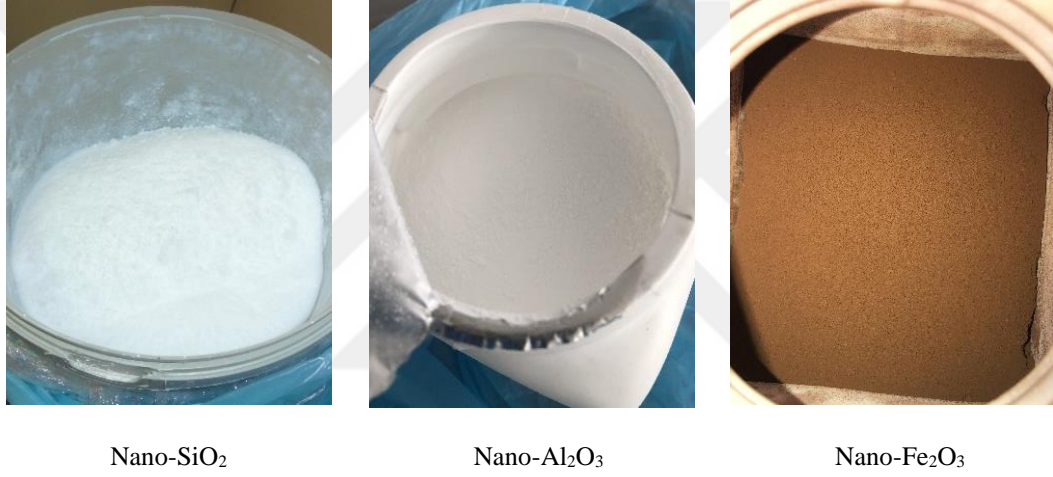
Bu çalışmada kullanılan polipropilen lifler ATLAS1 firmasından temin edilmiştir. Ürüne ait teknik özellikler üretici firma tarafından verilmiş ve Çizelge 3.18.'de sunulmuştur. Çizelgeden de anlaşılacağı gibi, PP lifin özgül ağırlığı 0.91 gr/cm³'tür.

Çizelge 3.18. Polipropilen liflerin teknik özellikleri

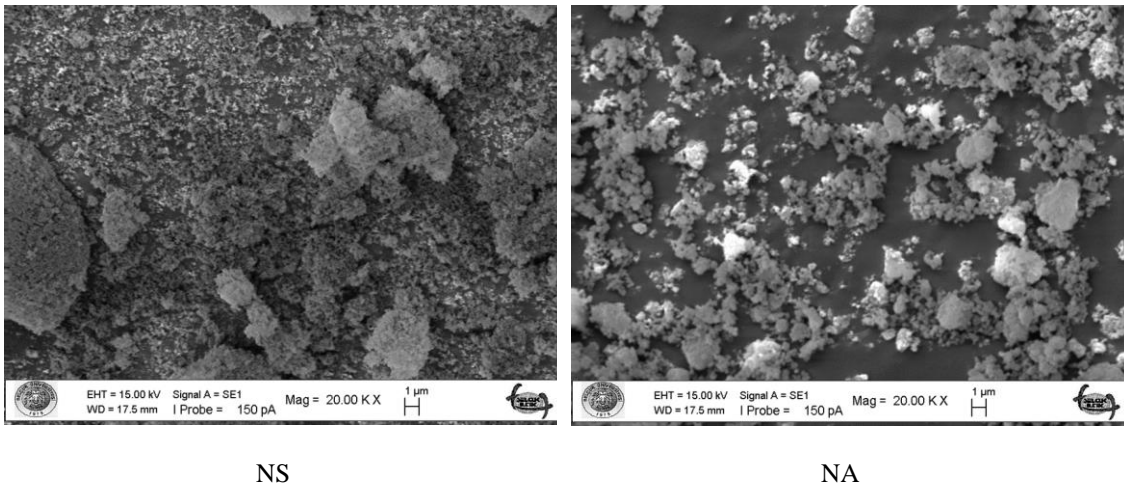
Ürün adı	BETONFİBER® BF19 PP ELYAF	Erime noktası	162 °C
Standart	ASTM CIII6 CE, EN 14889-2 BBA 92/2830	Yanma noktası	593 °C
Görünüm	Doğal beyaz lif	Asit reaksiyonu	Asit etkisine karşı dayanıklı
Tip	Polipropilen	Tuz reaksiyonu	Tuz etkisine karşı dayanıklı
Saflık	%100 saf	Alkali reaksiyonu	Alkali etkisine karşı dayanıklı
Yoğunluk	0.91 gr/cm ³	UV direnci	UV etkisine karşı dayanıklı
Uzunluk	19 mm	Oksidasyon direnci	Yüksek
Kesit ve çap	Dairesel, 18–20 µm	Aşınma dayanımı	Yüksek
Çekme mukavemeti	450-700 MPa	Nem Tutma	0
Elastisite modülü	3000-3500 MPa	Raf ömrü	Kuru ortamda sınırsız

3.1.6. Nano katkı maddeleri

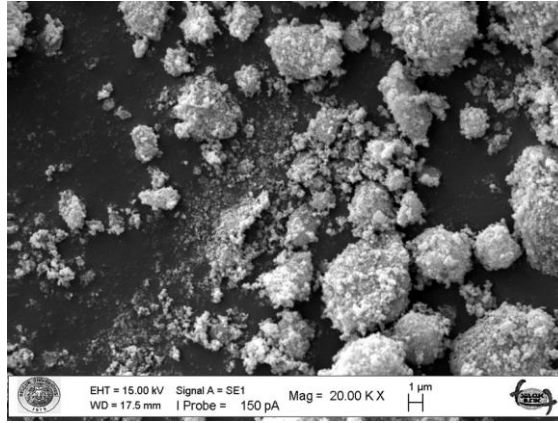
Bu çalışmada üç tip nano katkı maddesi kullanılmıştır. Bunlar gözeneksiz ve amorf S-tipli nano-SiO₂, alfa tipli hidrofilik nano-Al₂O₃ ve gama tipli nano-Fe₂O₃'tür. Kullanılan nano katkı maddeleri Nanografi Nanotechnology firmasından temin edilmiştir. Nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ ve nano-Fe₂O₃'ün görünümü Şekil 3.11.'de ve SEM görüntüsü Şekil 3.12.'de gösterilmiştir. Şekil 3.12.'den de anlaşıldığı üzere, nano partiküller aglomera formlarda bulunmaktadır. Bu durum, nano malzemelerin yüksek özgül yüzey alanına bağlanabilir. Nano katkı maddelerine ait teknik özellikler üretici firma tarafından verilmiş ve Çizelge 3.19.'da sunulmuştur.



Şekil 3.11. Kullanılan nano katkı maddeleri



Şekil 3.12. Nano katkı maddelerinin SEM analizi görüntüsü



NF

Şekil 3.12. (Devam) Nano katkı maddelerinin SEM analizi görüntüsü

Çizelge 3.19. Nano katkı maddelerinin özellikleri

Nano malzeme	Nano-SiO ₂	Nano-Al ₂ O ₃	Nano-Fe ₂ O ₃
Safılık (%)	99.95+	99.5+	99.55
Renk	Beyaz	Beyaz	Kırmızı kahverengi
Morfoloji	Küresel	Neredeyse küresel	Küresel
Ortalama partikül boyutu (nm)	13-22	78	18-38
Özgül yüzey alanı (m ² /g)	165-195	>20	>55
Yoğunluk (g/cm ³)	2.2	3.9	5.24
Element analizi (%)			
Al	0.001	-	0.05
Fe	0.001	-	-
Ca	0.004	<20 ppm	0.003
Mn	-	<5 ppm	0.14
Mg	0.001	-	-
V	-	<5 ppm	-
Cl	-	<280 ppm	-
Na	-	<30 ppm	-
Co	-	<5 ppm	-
Cr	-	-	0.015
SiO ₂	-	-	0.091

3.2. Farklı Katkı Maddeleri İçeren Betonların Hazırlanması ve Test Edilmesi

3.2.1. Referans beton karışım tasarımı

Çalışmada üretilen katkı maddeleri içeren betonlar için referans olarak katkısız normal bir karışım tasarlanmıştır. Referans betonun karışım hesabı (TS 802, 2016) standardına göre yapılmıştır. Referans betonun uygun karışım oranlarının bulunması için deneme beton karışımları üretilmiştir. Deneme beton karışımlarının akışkanlığı ve basınç dayanımı kontrol edilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan bazı katkı maddeleri

betonun akışkanlığını ciddi bir şekilde azaltabildiği için referans betonun çökme değeri yüksek seçilmiştir. Bu amaçla süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcının uygun kullanım oranının belirlenmesi amacıyla deneme beton karışımlarında farklı miktarlar test edilmiştir. Sonuçta, bu çalışmada süper akışkanlaştırıcının optimum kullanım oranının bağlayıcı ağırlığının %0.8'i oranında olduğu bulunmuştur. Bu oran, üretici firma tarafından belirtilen en az kullanım oranıdır (Bkz. Çizelge 3.9.). Bu kullanım oranıyla istenilen çökme değeri ve basınç dayanımı sağlanmıştır. Seçilen referans betonun karışım oranları Çizelge 3.20.'de gösterilmiştir. Referans betonun çökme değeri 138 mm, 7 günlük basınç dayanımı 36.04 MPa ve 28 günlük basınç dayanımı 44.4 MPa'dır.

Çizelge 3.20. Referans betonun karışım oranları

Malzeme	Su/çimento oranı	Çimento	Su	İnce agrega	İri agrega	Süper akışkanlaştırıcı
Malzemenin miktarı (kg/m ³)	0.55	350	189.85	953.86	774.99	2.8

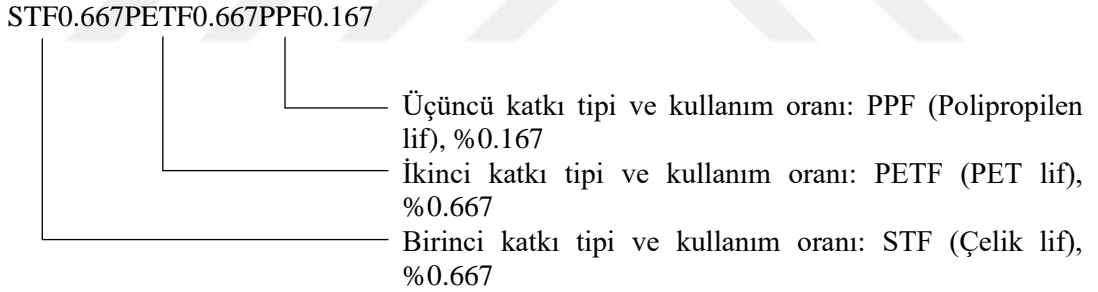
3.2.2. Beton tipleri ve karışım hesapları

Tez kapsamında farklı oranlarda katkı maddeleri içeren betonlar hazırlanmıştır. Toplam 39 karışım hazırlanmış ve test edilmiştir. Üretilen karışımlar üç farklı gruba ayrılmıştır. Nano katkı maddeleri grubu 14 karışımdan, lifler grubu 14 karışımdan ve atık lastik kauçuklar grubu 6 karışımdan oluşmaktadır. Ayrıca, referans olarak 1 adet normal beton (katkısız) karışım hazırlanmıştır. Ek olarak, farklı gruplardan katkı maddelerinin birbirine etkisini değerlendirmek üzere yeni katkı maddelerinin bileşimleri test edilmiştir. Nano katkı maddeleri grubunda, lifler grubunda ve atık lastik kauçuklar grubunda betonun kırılma çarpma dayanımı üzerinde ayrı ayrı en iyi etkiye sahip katkı maddesi (sırasıyla N, F ve R) seçilmiş ve yeni karışımlar üretmek için kullanılmıştır. Sonuçta, 4 yeni karışım hazırlanmıştır. Bunlar N+F, N+R, F+R ve N+F+R içeren karışımlardır.

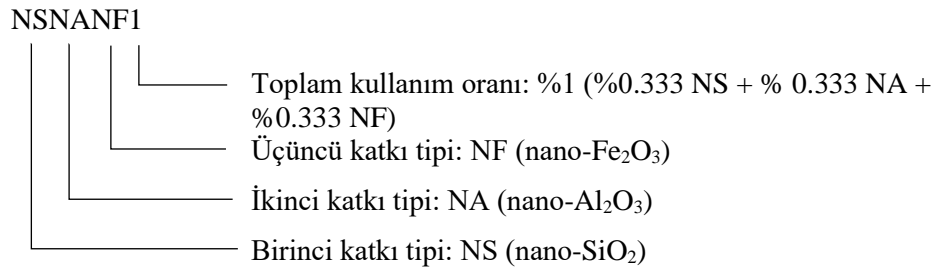
Tüm karışımlarda referans betona benzer karışım oranları kullanılmıştır. Bununla birlikte, çimentonun belli bir kısmı yerine nano katkı maddeleri ve doğal agregaların belli kısım yerine de atık lastik kauçuk kullanılmıştır. Lifler karışımlara ekstra malzeme olarak eklenmiştir. Süper akışkanlaştırıcının betonun mekanik özellikleri üzerinde etkisi bulunmaktadır (Benaicha ve ark., 2019; Jalal ve ark., 2013; Khan ve Ali, 2018). Farklı

beton karışımları arasındaki karşılaştırmada SA'nın etkisinin nötralize edilmesi için tüm beton karışımlarda aynı kullanım oranı (%0.8) uygulanmıştır.

Her karışıma, diğer karışımlardan net bir şekilde ayrılacak şekilde farklı bir kod verilmiştir. Örneğin, M0, %0 katkı maddesi içeren normal betonu ifade etmektedir. Karışım kodlama yöntemi Şekil 3.13.'te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere kullanılan katkı maddeleri ve kullanım oranı karışım kodunda belirlenmiştir. Şekil 3.13. (a)'dan görüldüğü gibi, karışım kodunda her katkı maddesinin sembolünden sonra ona ait kullanım oranı verilmiştir. Ancak, Şekil 3.13. (b)'de de gösterildiği gibi, karışımda kullanılan tüm katkı maddelerinin aynı kullanım oranına sahip olduğunda katkı maddelerinin sembolünden sonra sadece toplam kullanım oranı verilmiştir. Karışımların kodlamasında nano-SiO₂'nin sembolü NS, nano-Al₂O₃'ün sembolü NA, nano-Fe₂O₃'ün sembolü NF, çelik lifin sembolü STF, polipropilen lifin sembolü PPF, PET lifin sembolü PETF, ince atık lastik kauçuğun sembolü FR ve iri atık lastik kauçuğun sembolü CR olarak alınmıştır. Nano katkı maddeleri içeren betonun karışım oranları Çizelge 3.21.'de, lifler içeren betonun karışım oranları Çizelge 3.22.'de ve atık lastik kauçuklar içeren betonun karışım oranları ise Çizelge 3.23.'te sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 3.13. Karışımların örnek kodlaması, a) katkı maddelerinin farklı kullanım oranına sahip olduğunda, b) katkı maddelerinin aynı kullanım oranına sahip olduğunda

Çizelge 3.21. Nano katkı maddeleri içeren betonun karışım oranları

Karışım No.	Karışım kodu	Çimento	Su	İnce agrega	İri agrega	Süper akışkanlaştırıcı (0.8%)	Nano-SiO ₂		Nano-Al ₂ O ₃		Nano-Fe ₂ O ₃	
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³
1	M0	350	189.85	953.86	774.99	2.8						
2	NS0.5	348.25	189.85	953.86	774.99	2.8	0.5	1.75				
3	NS1	346.5	189.85	953.86	774.99	2.8	1	3.5				
4	NA0.5	348.25	189.85	953.86	774.99	2.8			0.5	1.75		
5	NA1	346.5	189.85	953.86	774.99	2.8			1	3.5		
6	NF0.5	348.25	189.85	953.86	774.99	2.8					0.5	1.75
7	NF1	346.5	189.85	953.86	774.99	2.8					1	3.5
8	NSNA0.5	348.25	189.85	953.86	774.99	2.8	0.25	0.875	0.25	0.875		
9	NSNA1	346.5	189.85	953.86	774.99	2.8	0.5	1.75	0.5	1.75		
10	NSNF0.5	348.25	189.85	953.86	774.99	2.8	0.25	0.875			0.25	0.875
11	NSNF1	346.5	189.85	953.86	774.99	2.8	0.5	1.75			0.5	1.75
12	NANF0.5	348.25	189.85	953.86	774.99	2.8			0.25	0.875	0.25	0.875
13	NANF1	346.5	189.85	953.86	774.99	2.8			0.5	1.75	0.5	1.75
14	NSNANF0.5	348.2465	189.85	953.86	774.99	2.8	0.167	0.5845	0.167	0.5845	0.167	0.5845
15	NSNANF1	346.5035	189.85	953.86	774.99	2.8	0.333	1.1655	0.333	1.1655	0.333	1.1655

Çizelge 3.22. Lifler içeren betonun karışım oranları

Karışım No.	Karışım kodu	Çimento	Su	İnce agrega	İri agrega	Süper akışkanlaştırıcı (0.8%)	Çelik lif		PET lif		Polipropilen lif	
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³
16	STF1	350	189.85	953.86	774.99	2.8	1	78.5				
17	STF2	350	189.85	953.86	774.99	2.8	2	157				
18	PETF1	350	189.85	953.86	774.99	2.8			1	13.8		
19	PETF2	350	189.85	953.86	774.99	2.8			2	27.6		
20	PPF0.25	350	189.85	953.86	774.99	2.8					0.25	2.275
21	PPF0.5	350	189.85	953.86	774.99	2.8					0.5	4.55
22	STFPETF1	350	189.85	953.86	774.99	2.8	0.5	39.25	0.5	6.9		
23	STFPETF2	350	189.85	953.86	774.99	2.8	1	78.5	1	13.8		
24	STF0.5PPF0.125	350	189.85	953.86	774.99	2.8	0.5	39.25			0.125	1.1375
25	STF1PPF0.25	350	189.85	953.86	774.99	2.8	1	78.5			0.25	2.275
26	PETF0.5PPF0.125	350	189.85	953.86	774.99	2.8			0.5	6.9	0.125	1.1375
27	PETF1PPF0.25	350	189.85	953.86	774.99	2.8			1	13.8	0.25	2.275
28	STF0.333PETF0.333PPF0.083	350	189.85	953.86	774.99	2.8	0.333	26.1405	0.333	4.5954	0.083	0.7553
29	STF0.667PETF0.667PPF0.167	350	189.85	953.86	774.99	2.8	0.667	52.3595	0.667	9.2046	0.167	1.5197

Çizelge 3.23. Atık lastik kauçuklar içeren betonun karışım oranları

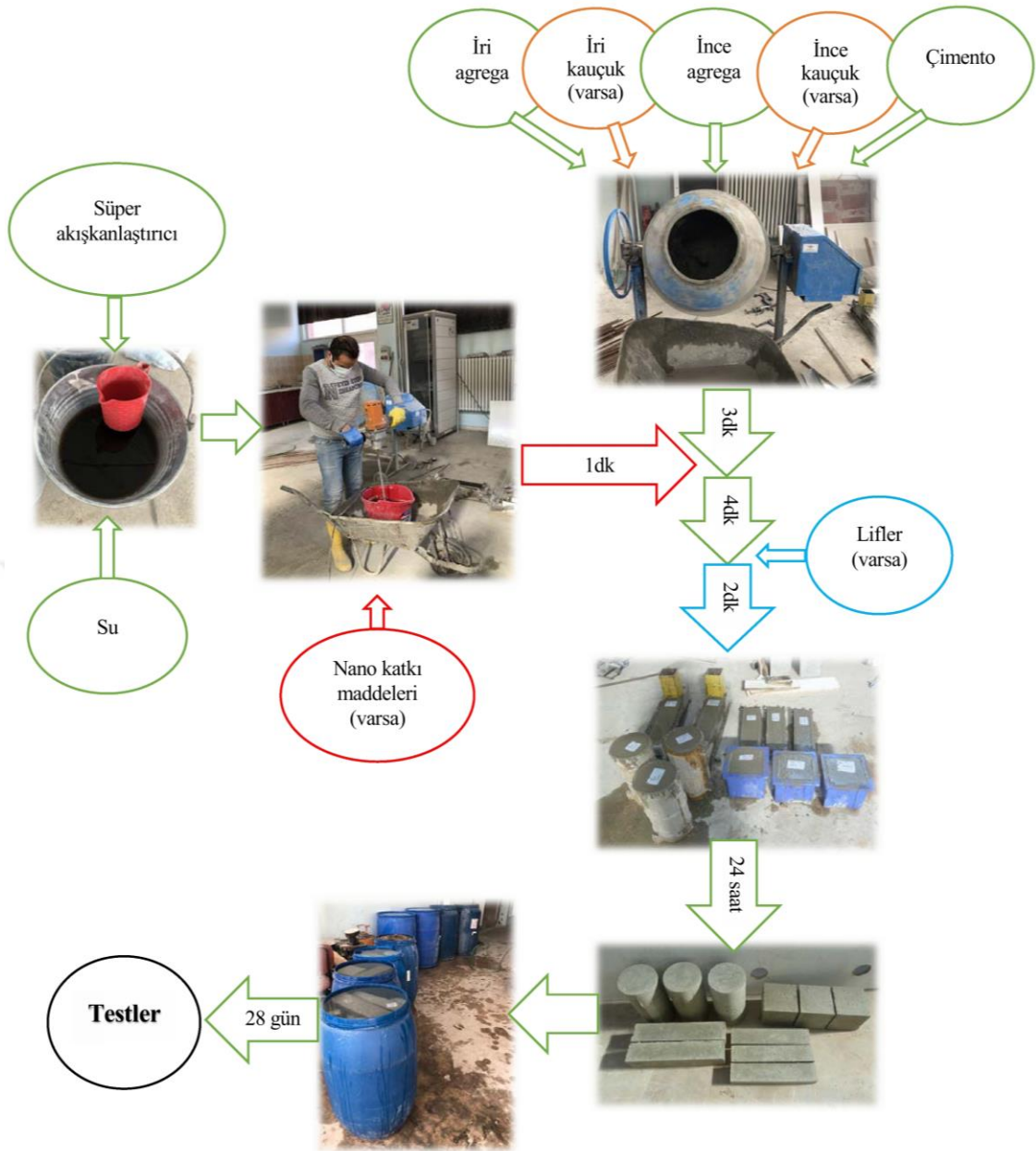
Karışım No.	Karışım kodu	Çimento	Su	İnce agrega	İri agrega	Süper akışkanlaştırıcı (0.8%)	İnce lastik kauçuk		İri lastik kauçuk	
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³
30	FR10	350	189.85	858.474	774.99	2.8	10	48.057		
31	FR20	350	189.85	763.088	774.99	2.8	20	96.114		
32	CR10	350	189.85	953.86	697.491	2.8			10	40.434
33	CR20	350	189.85	953.86	619.992	2.8			20	80.869
34	FRCR10	350	189.85	906.167	736.2405	2.8	5	24.029	5	20.217
35	FRCR20	350	189.85	858.474	697.491	2.8	10	48.057	10	40.434

3.2.3. Karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları

Numunelerin testler için hazırlanma süreci Şekil 3.14.'te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, betonun karıştırma işlemi kullanılan katkı maddelerinin türüne göre değişmektedir. Normal ve lastik kauçuklu betonlarda, ilk önce sırasıyla iri agrega, iri lastik kauçuk (varsa), ince agrega, ince lastik kauçuk (varsa) ve çimento miksere eklenmiş ve 3 dakika kuru halinde karıştırılmıştır. Ondan sonra, daha önce karıştırılmış su ile süper akışkanlaştırıcı miksere eklenmiş ve karıştırma işlemine 4 dakika devam edilmiştir. Nano katkı maddeleri içeren betonların karıştırma işlemi normal betonun karıştırma işlemine benzemektedir. Ancak, nano katkı maddeleri su ve süper akışkanlaştırıcı bileşimine eklenmiş ve yüksek hızlı karıştırıcı mikser yardımıyla 1 dakika karıştırılmıştır. Bu yöntemin nano partiküllerin karışımda daha iyi bir şekilde dağılmasına yardımcı olduğu bildirilmiştir (Behfarnia ve Salemi, 2013). Lifli karışımlarda ise normal betonun karıştırma işleminden sonra lifler miksere elle yavaşça eklenmiş ve karıştırma işlemine 2 dakika daha devam edilmiştir.

Karıştırma işleminden sonra beton daha önceden uygun bir şekilde yağlanmış kalıplara dökülmüştür. Betonun kalıplara dökümü sırasında ilgili standartlarda belirtildiği şekilde tabakalar halinde dökülmüş ve sıkıştırma çubuğu ile yeterince şişlenmiştir. Hazırlanan numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkartılıp test gününe kadar su sıcaklığı 20 ± 2 °C olan kür havuzuna bırakılmıştır. Yapılan testlerin hepsi 28 gün sonra gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında toplam 429 numune üretilmiştir. Her karışım için toplam 11 numune hazırlanmıştır. Bunlar, üç adet $150 \times 150 \times 150$ mm küp, üç adet 150×300 mm silindir, üç adet $50 \times 75 \times 360$ mm kiriş ve iki adet $80 \times 100 \times 400$ mm kiriştir.



Şekil 3.14. Numunelerin hazırlanma süreci

3.2.4. Test ve analiz yöntemleri

Bu çalışmada, üretilen her karışım üzerinde bir takım deneysel test ve analiz gerçekleştirilmiştir. Bunlar, birim ağırlık testi, basınç dayanımı testi, yarmada çekme dayanımı testi, eğilme dayanımı testi, ağırlık düşürme deneyi, SEM analizi, maliyet analizi ve arzu edilirlilik fonksiyonu analizidir. Betonun statik ve dinamik özellikleri 28 gün sonra test edilerek elde edilmiştir.

3.2.4.1. Birim ağırlık

Sertleşmiş betonun birim ağırlığı (TS EN 12390-7, 2019) standardına göre test edilmiştir. Her karışım için üç 150×150×150 mm küp test edilmiş ve ortalama değer hesaplanmıştır. Birim ağırlık deneyinde 0.5 gr hassasiyetinde bir terazi kullanılmıştır (Şekil 3.15.). Birim ağırlık denklem (3.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Birim ağırlık} = \frac{W}{V} * 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.2)$$

Burada, W : gram cinsinden küpün ağırlığı ve V : cm^3 cinsinden küpün hacmidir.



Şekil 3.15. Birim ağırlık deneyi

3.2.4.2. Basınç dayanımı

Basınç dayanımı testi (TS EN 12390-3, 2019) standardına göre yapılmıştır. Basınç dayanımı üçer 150×150×150 mm küp kullanılarak elde edilmiştir. Tüm karışımlar için aynı yükleme hızı (0.9 MPa/s) kullanılmıştır. Bu yükleme hızı ilgili standartta belirtilen yükleme hızına (0.2-1.0 MPa/s) uygundur. Basınç dayanımı test presi Şekil 3.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Basınç dayanımı test presi

3.2.4.3. Yarmada çekme dayanımı

Yarmada çekme dayanımı deneyi (TS EN 12390-6, 2010) standardına göre yapılmıştır. Testte kullanılan cihaz Şekil 3.17.'de gösterilmiştir. Betonun yarmada çekme dayanımı deneyinde çapı 150 mm ve uzunluğu 300 mm olan üç adet silindir kullanılmıştır. (TS EN 12390-6, 2010) standardına göre yarmada çekme dayanımı deneyinde yükleme hızı 0.04-0.06 MPa/s olmalıdır. Bu çalışmada kullanılan yükleme hızı 0.05 MPa/s'dir. Yarmada çekme dayanımı (f_{ct}) denklem (3.3) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi.L.d} \quad (3.3)$$

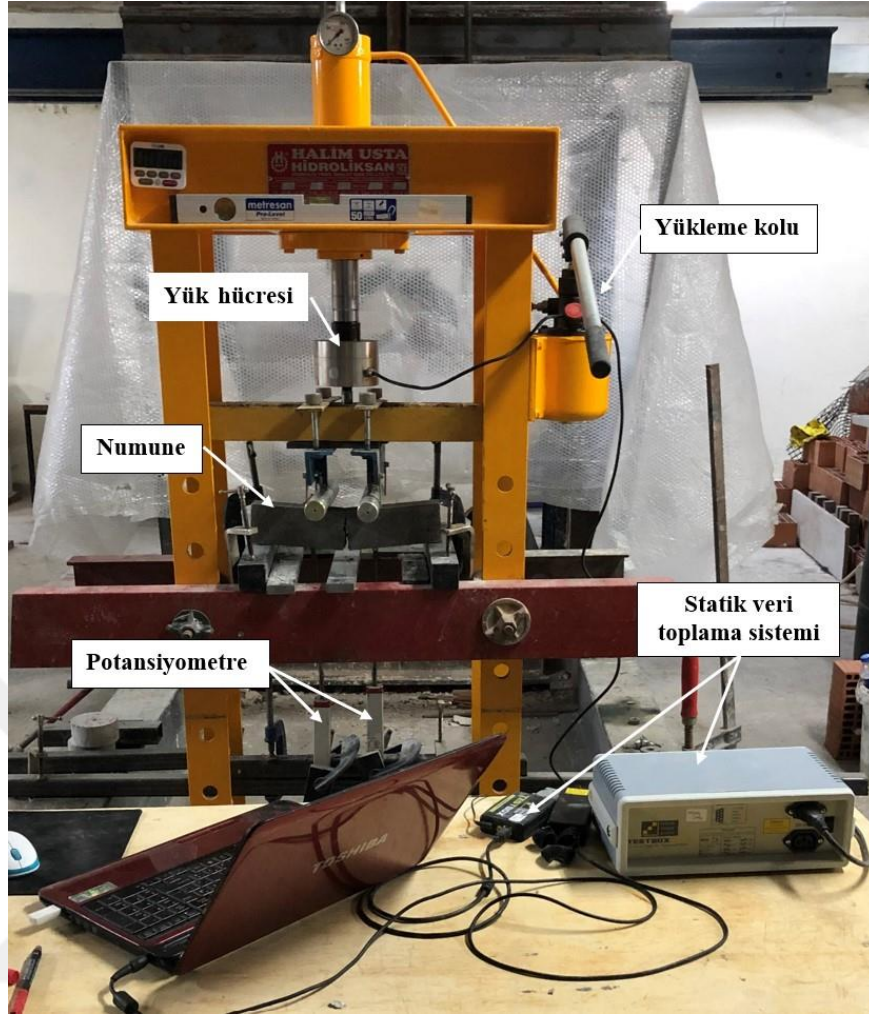
Burada, P : maksimum yük, L : silindirin uzunluğu ve d : silindirin çapıdır.



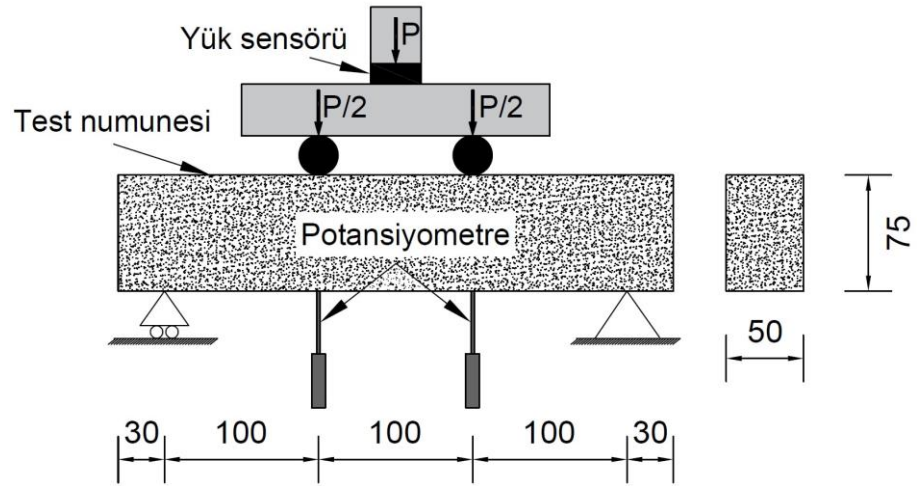
Şekil 3.17. Yarmada çekme dayanımı deneyi

3.2.4.4. Eğilme dayanımı ve tokluk özellikleri

Eğilme testi (TS EN 12390-5, 2019) standardına göre yapılmıştır. Betonun eğilme dayanımının tespit edilmesi için $50 \times 75 \times 360$ mm ebatlarında üçer adet beton kiriş kullanılmıştır. Testte beton kirişlerin yüklenmiş açıklık uzunluğu 300 mm'dir. Eğilme dayanımı deneyinde kullanılan cihaz ve test düzeneği Şekil 3.18.'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, yapılan eğilme testi dört nokta eğilme testidir. Yük, yükleme kolu kullanılarak yağ basıncı aracılığıyla manuel olarak uygulanmıştır. Testte eğilme yükü altındaki yük-deplasman eğrileri elde edilmek üzere gerekli sensörler ve aletler kullanılmıştır. Yük verileri 5 ton kapasiteli yük hücresi yardımıyla elde edilmiştir. Deplasmanlar ise iki adet Opkon firması tarafından üretilen LPT 500 D 10K model lineer potansiyometre kullanılarak ölçülmüş ve ortalama değer hesaplanmıştır. Potansiyometrenin ölçme boyu 50 cm'dir. Şekilden de görüldüğü gibi potansiyometreler yük uygulama noktalarının altına yerleştirilmiştir. Yük ve deplasman verileri TDG (Teknik Destek Grubu) tarafından üretilen TESTBOX1001 model statik veri toplama sistemi aracılığıyla 8 Hz örnekleme hızında toplanmıştır.



(a)



(b)

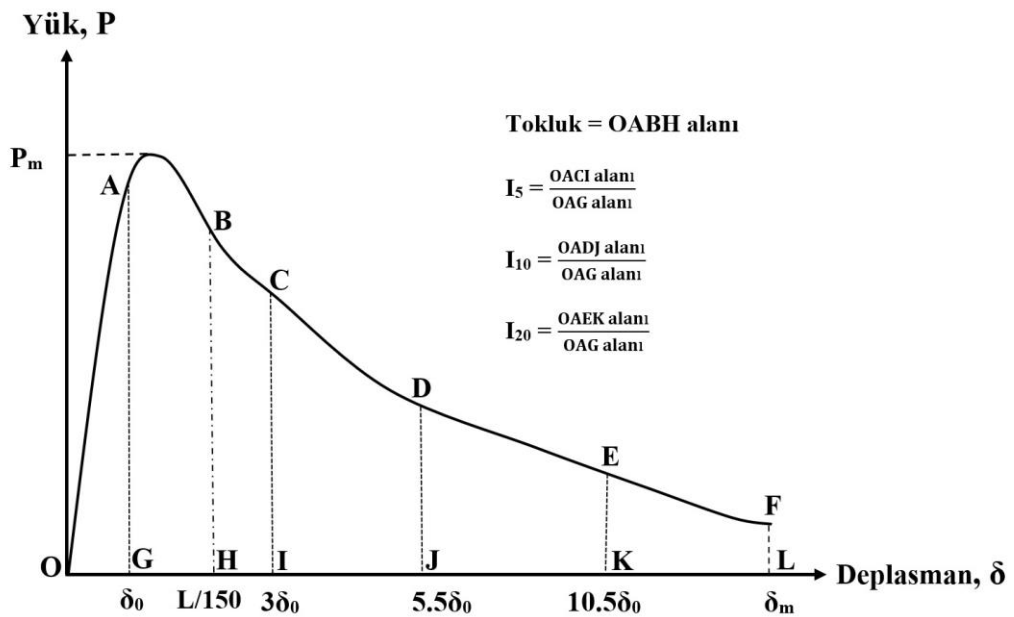
Şekil 3.18. Eğilme dayanımı deneyi, a) test cihazı, b) test düzeneği (boyutlar mm'dir)

Farklı betonların eğilme davranışının karşılaştırılması için bu testte eğilme dayanımının yanı sıra yük-deplasman eğrileri, kırılma enerjisi, eğilme tokluğu ve tokluk indeksleri değerlendirilmiştir. Bu amaç için her karışım için üretilen üç numunenin ortalama yük-deplasman eğrisi elde edilmiştir. Bu eğri yardımıyla kırılma enerjisi, eğilme tokluğu ve tokluk indeksleri hesaplanmıştır. Eğilme dayanımı denklem (3.4) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$f_{cf} = \frac{P_m \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (3.4)$$

Burada, P_m : yük-deplasman eğrisinde maksimum yük, L : kirişin yüklenmiş açıklık uzunluğu, b : kirişin genişliği, h : kirişin yüksekliğidir.

Şekil 3.19.'da bir örnek yük-deplasman eğrisi gösterilmiştir. Şekilde eğilme tokluğu ve tokluk indekslerinin hesap yöntemi de verilmiştir. Tokluk, enerji yutma yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Tokluk, statik, dinamik ve yorulma yüklerine karşı direnç için çok önemli bir parametredir. Tokluk, yük-deplasman eğrisi altında kalan alandan hesaplanmaktadır (Eisa ve ark., 2020; Habib ve ark., 2020; Pereira de Oliveira ve Castro-Gomes, 2011). Bu çalışmada tokluk, (ASTM C1609, 2010) standardına göre hesaplanmıştır. Buna göre tokluk, kirişin yüklenmiş açıklık uzunluğunun 1/150'sine (yani 2 mm) eşit bir sehime kadar yük-deplasman eğrisi altında kalan alan (Şekil 3.19.'da OABH alanı) olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 3.19. Eğilme tokluğu ve tokluk indekslerinin tanımı

Kırılma enerjisi (G_F), beton matrisinin birim alanında oluşacak çatlaklar için gereken enerji olarak tanımlanmaktadır. Kırılma enerjisi, betonun tokluğunu, çatlak direncini ve enerji yutma kapasitesini değerlendirmek için kullanılan temel bir malzeme özelliğidir (Alwesabi ve ark., 2021). Bu çalışmada kırılma enerjisi, (RILEM 50-FMC Draft Recommendation, 1985) standardına göre hesaplanmıştır. Çentiksiz kirişin kırılma enerjisi (3.5) ve (3.6) numaralı denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır (S. F. Lee ve Jacobsen, 2011; Noaman ve ark., 2017).

$$G_F = \frac{W+mg\delta_m}{A} \text{ (N.m/m}^2\text{)} \quad (3.5)$$

$$W = \int_0^{P_F} P_i d\delta \text{ (N.m)} \quad (3.6)$$

Burada W (N.m): yük-deplasman eğrisi altındaki alanın tamamı (Şekil 3.19.'da O AFL alanı) olarak hesaplanan toplam emilen enerji miktarı, m (kg): kirişin mesnetler arasındaki kütle, g : (m/s^2) yerçekimi ivmesi, δ_m (m): numunenin kırılma anında ölçülen nihai deplasmanı, A (m^2): kirişin enkesit alanı, P_F (N): çentiksiz kirişin kırılma anında ölçülen yüküdür. Lif donatılı betonlarda kırılma enerjisinin hesaplanmasında, yük-deplasman eğrisi altında kalan alanı belirli bir deplasmana kadar dikkate alınmaktadır (Güneyisi ve ark., 2015; Köksal ve ark., 2013). Bu çalışmada kırılma enerjisinin hesaplanmasında, yük-deplasman eğrisi 10 mm'ye eşit bir deplasmana kadar göz önüne alınmıştır.

Tokluk indeksleri, belirli deplasmanlarda tokluk değerlerinden hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, tokluk indeksleri (ASTM C1018, 1997) standardına göre hesaplanmıştır. Bu standarda göre, tokluk endeksleri I_5 , I_{10} ve I_{20} , sırasıyla $3\delta_0$, $5.5\delta_0$ ve $10.5\delta_0$ deplasmanlarındaki tokluğun ilk çatlaktaki (δ_0) tokluğa oranı olarak hesaplanmaktadır. İlk çatlak noktası, yük-deplasman eğrisi üzerinde yükün maksimum değere ulaştığı ve eğrinin lineer olmadığı ilk nokta olarak tanımlanabilir (Çivici, 2006; Yavaş ve ark., 2020). I_5 , I_{10} ve I_{20} sırasıyla (3.7), (3.8) ve (3.9) numaralı denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$I_5 = \frac{T_{3\delta_0}}{T_{\delta_0}} = \frac{\text{OACI alanı}}{\text{OAG alanı}} \quad (3.7)$$

$$I_{10} = \frac{T_{5.5\delta_0}}{T_{\delta_0}} = \frac{\text{OADJ alanı}}{\text{OAG alanı}} \quad (3.8)$$

$$I_{20} = \frac{T_{10.5\delta_0}}{T_{\delta_0}} = \frac{\text{OAEK alanı}}{\text{OAG alanı}} \quad (3.9)$$

Burada, T_{δ_0} , $T_{3\delta_0}$, $T_{5.5\delta_0}$ ve $T_{10.5\delta_0}$, sırasıyla δ_0 , $3\delta_0$, $5.5\delta_0$ ve $10.5\delta_0$ deplasmanlarındaki eğilme tokluğunun değerleridir. Tokluk indeksleri malzemenin elasto-plastik davranışını değerlendirmek için kullanılmaktadır. I_5 , I_{10} ve I_{20} değerinin sırasıyla 5, 10 ve 20'ye eşit olması malzemenin ideal bir elasto-plastik davranışa sahip olduğunu göstermektedir. Bu da ilk çatlak oluşumundan sonra malzemenin tam plastik bir davranış gösterdiği anlamına gelmektedir. Öte yandan, tokluk indekslerinin değerinin 1'e yakın olması malzemenin gevrek olduğunu göstermektedir. Bu da ilk çatlak oluşumundan sonra enerji yutma yeteneğinin az ve hasar miktarının büyük olduğunu ifade etmektedir.

Beton kirişin eğilme yükü altındaki davranışını değerlendirmek için artık mukavemet faktörleri de kullanılmaktadır. Artık dayanım faktörleri, ilk çatlak oluşumundan sonraki farklı aşamalarda mukavemet kapasitelerinin, ilk çatlaktaki mukavemete oranını yaklaşık bir şekilde vermektedir. Bu faktörler çatlama sonrasında oluşan hasar derecesini de gösteren indekslerdir. Artık mukavemet faktörleri $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}$, (3.10) ve (3.11) numaralı denklemlerle hesaplanmaktadır. Kalıcı dayanım faktörlerinin 100'e eşit olması, ilk çatlığa kadar tam bir elastik davranış ve ilk çatlak sonrası tam bir plastik davranışın bulunduğunu ifade etmektedir (Pereira de Oliveira ve Castro-Gomes, 2011).

$$R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5) \quad (3.10)$$

$$R_{10,20} = 10(I_{20} - I_{10}) \quad (3.11)$$

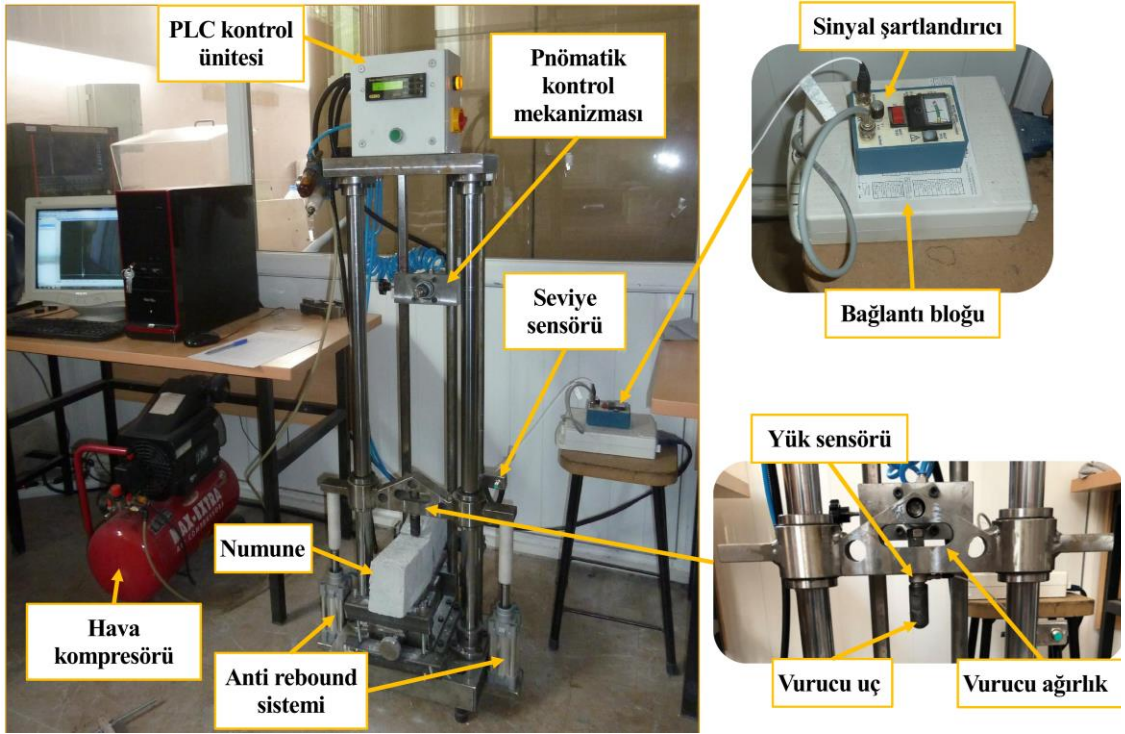
Normalde, tokluk, kırılma enerjisi ve tokluk indeksleri orta noktadaki deplasman kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak çalışmada, bu parametreler, orta noktadaki deplasmandan daha küçük olan yük uygulama noktalarının altındaki deplasmanların ortalaması kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu deplasmanlar, farklı betonların eğilme davranışlarını karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır.

3.2.4.5. Çarpma dayanımı

Farklı katkı maddeleri içeren betonun çarpma davranışını değerlendirmek üzere beton kiriş numunelerinin çarpma yükü altındaki davranışı incelenmiştir. Bu aşamada yapılan çarpma testi Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik laboratuvarında bulunan ağırlık düşürme deneyi

cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çarpma test cihazının detayları Şekil 3.20.'de sunulmuştur.

Düşük hızlı çarpma testi cihazı, 75 cm'ye kadar farklı yüksekliklerden düşürülebilen 5.6 kg'lık bir vurucu ağırlığa sahiptir. Yarım küre şeklinde olan vurucu ucun çapı 24 mm'dir. Çarpma test cihazı, vurucu ağırlığın numuneye birden fazla kez çarpmasını engelleyebilen bir anti rebound sistemine sahiptir. Anti rebound sistemi, vurucu ağırlık seviye sensörünün önünden geçtikten belirli bir süre sonra çalışmaktadır. Çarpma yükü-zaman verileri, PCB Group firmasının 44.48 kN kapasiteli ve 60 kHz üst frekans limitine sahip 202B model yük sensörü ile ölçülmüştür. Yük sensörü, vurucu uç ile vurucu ağırlık arasına yerleştirilmiştir. Ölçüm verileri, PCB Group firması tarafından üretilen 480E09 model ICP® sensör sinyal şartlandırıcı ve National Instruments firmasına ait SCC-68 model bağlantı bloğu kullanılarak toplanmıştır.



Şekil 3.20. Ağırlık düşürme test cihazı

Bu çalışmada, farklı katkı maddelerinin betonun çarpma yükü altındaki davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere üretilen her karışım için 80×100×400 mm boyutlarında iki adet kiriş test edilmiştir. Pnömatik kontrol mekanizmasının yerleştirildiği çubuklar arasındaki mesafe yaklaşık 90 mm'dir. Bu nedenle test kirişlerinin genişliği 80 mm olarak seçilmiştir. Çalışmada, tüm çarpma test parametreleri sabit tutulmuştur.

Vurucu ağırlık sabit olduğundan, numunelere uygulanacak çarpma enerjisinin belirlenmesi için ilk önce uygun bir çarpma yüksekliği belirlenmelidir. Bu amaçla farklı çarpma yüksekliği denenerek ön testler yapılmıştır. Farklı betonların çarpma davranışı arasındaki karşılaştırmanın daha net olabilmesi için, çarpma yüksekliği, referans numunenin sadece bir vuruş altında kırılmayacağı şekilde seçilmiştir. Referans numunenin birden fazla vuruş tarafından uygulanan çarpma enerjisine direnmesi istenmiştir. Sonuçta, çarpma yüksekliğinin 400 mm olmasına karar verilmiştir. Bu yükseklikle, referans numunenin üç vuruş altında kırılması sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan çarpma test düzeneğinin şematik görünümü ve test numunenin detayları Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Bu çalışmada, çarpma yükü-zaman verileri 25 kHz örnekleme hızında kaydedilmiştir.

Test cihazındaki sürtünme ihmal edilerek çarpma anındaki hız ve her vuruşta uygulanan çarpma enerjisinin miktarı sırasıyla (3.12) ve (3.13) numaralı denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.12)$$

$$E = mgh = 0.5mv^2 \quad (3.13)$$

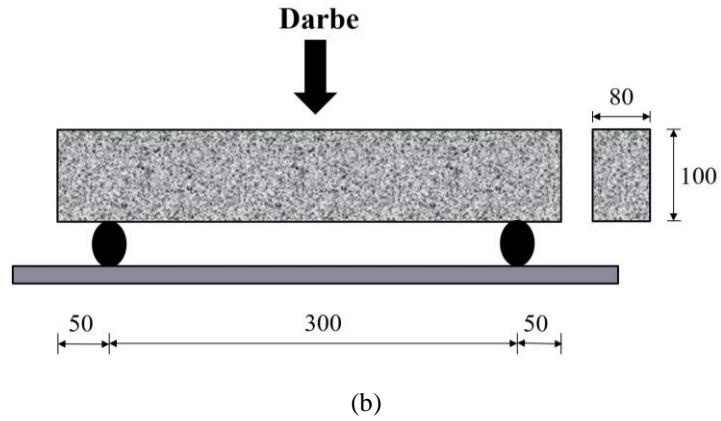
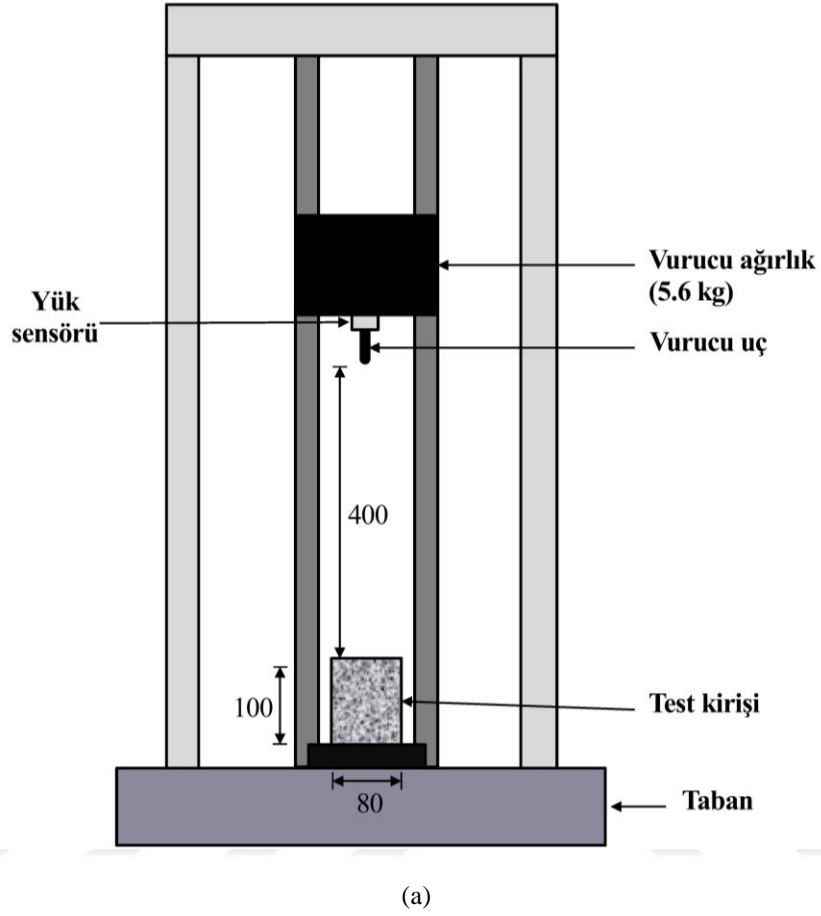
Burada v : çarpma hızı, g : yerçekimi ivmesi, h : çarpma yüksekliği, E : çarpma enerjisi, m : çekicinin ağırlığıdır. Çarpma hızı 2.8 m/s ve çarpma enerjisi 21.967 N.m olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada, farklı katkı maddeleri içeren beton kirişlerin çarpma dayanımı, ilk çatlağa kadar vuruş sayısı (N_1) ve kırılmaya kadar vuruş sayısı (N_2) kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, betonların çarpma enerji yutma kapasitesi de hesaplanmıştır. İlk çatlak çarpma enerjisi (E_1) ve kırılma çarpma enerjisi (E_2), (3.14) ve (3.15) numaralı denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Çatlak sonrası çarpma sayısındaki artış yüzdesi (ÇDSAY veya PINPB) de hesaplanmıştır. ÇDSAY, ilk çatlak oluşumundan sonra numunelerin şekil değiştirebilme ve enerji yutma kapasitesinin bir göstergesidir. ÇDSAY, denklem (3.16) kullanılarak elde edilmektedir (Gupta ve ark., 2015; J. J. Li ve ark., 2016).

$$E_1 = N_1mgh \quad (3.14)$$

$$E_2 = N_2mgh \quad (3.15)$$

$$\zeta\text{DSAY} = \frac{N_2 - N_1}{N_1} * 100 \quad (3.16)$$



Şekil 3.21. Ağırlık düşürme deneyi, a) test düzeneğinin şematik görünümü, b) test numunesi (boyutlar mm'dir)

3.2.4.6. SEM analizi

Farklı katkı maddelerinin betonun mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için bazı numuneler üzerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. SEM analizi, katkı maddelerinin betonun mikroyapısını nasıl

etkilediği hakkında net bir fikir verebilmektedir. Ayrıca betondan elde edilen test sonuçlarının bazı nedenlerini de açıklayabilmektedir (Döndüren ve Al-Hagri, 2022). SEM analizi, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan ZEISS EVO LS10 taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan SEM cihazının görünümü Şekil 3.22.'de verilmiştir. SEM analizi, basınç dayanımı testinde kullanılan numunelerden kesilmiş küçük numuneler üzerinde SE (ikincil elektron) modu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM analizi için kullanılan beton numuneler, iletken bir yüzey elde edilebilmesi için ilk önce altınla kaplanmaktadır (D. A. Silva ve ark., 2005). Kullanılan SEM analizi kaplama cihazının görünümü ve altın kaplanmış numuneler Şekil 3.23.'te gösterilmiştir.

SEM analizinde kullanılan numuneler çarpma dayanımına göre seçilmiştir. Her katkı maddesi grubunda en yüksek kırılma çarpma dayanımına sahip karışım seçilmiştir. Ayrıca, aynı katkı maddesi grubundaki benzer kullanım oranında diğer katkı maddelerini içeren karışımlar seçilmiştir. Sonuçta, SEM analizi için toplam 13 numune seçilmiştir. Ek olarak, bu çalışmada kullanılan nano malzemelerin SEM görüntüleri de elde edilmiştir (Bkz. Şekil 3.12.).



Şekil 3.22. ZEISS EVO LS10 SEM cihazı



(a)

(b)

Şekil 3.23. Numunelerin altınla kaplanması, a) SEM analizi kaplama cihazı, b) Altınla kaplanmış numuneler

3.2.4.7. Maliyet analizi

Farklı katkı maddelerinin beton maliyetine etkisini ve katkılı betonların ticari kullanımını değerlendirmek amacıyla hazırlanan tüm betonlar için maliyet analizi yapılmıştır. Maliyet analizinde, çimento, ince agrega, iri agrega, süper akışkanlaştırıcı, nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, çelik lif, PP lif, ince lastik kauçuk ve iri lastik kauçuğun güncel birim fiyatları kullanılmıştır. Maliyet analizi yapılmasında malzemelerin güncel fiyatı, satın alınan firmalardan alınmıştır. Analizde kullanılan malzemelerin birim fiyatına %18 KDV (Katma Değer Vergisi) ve varsa kargo ve nakliye maliyeti dâhil edilmiştir. Betonun fiyatı, bileşenlerinin fiyatının toplamı olarak hesaplanmıştır. Çalışmada, fiyatlar Türk lirası (TL) ve ABD doları cinsinden hesaplanmıştır. TL'den ABD dolarına değişim, 06/08/2022 tarihindeki Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası (TCMB, 2022) kurları baz alınarak yapılmıştır. Bu tarih, güncel fiyatların temin edildiği tarihtir. Buna göre 1 ABD doları = 17.9362 TL'dir.

Bu çalışmada su ve PET lif satın alınmadığından dolayı, bu malzemelerin maliyeti analizde dikkate alınmamıştır. Ayrıca, betonun fiyatı sadece betonun bileşenlerinin fiyatı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Kalıp, işçilik ve taşıma gibi diğer gider kalemlerinin maliyeti dikkate alınmamıştır. Ek olarak, yaşam döngüsü masrafları dikkate alınmamıştır.

3.2.4.8. Arzu edirlilik fonksiyonu analizi

İstatistiksel arzu edirlilik fonksiyonu yöntemi, birden fazla performans parametresi içeren karmaşık problemi tek yanıt içeren bir probleme dönüştürmek için kullanılmaktadır (Miranda de Souza ve ark., 2021). Bu çalışmada arzu edirlilik fonksiyonu, incelenen farklı özellikler dikkate alınarak betonların genel performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu yöntemde, genel performansına göre, betonlara 0 (en düşük istenilen) ile 1 (en yüksek istenilen) arasında bir değer verilmektedir. Arzu edirlilik fonksiyonu yöntemi, çoklu yanıtlar durumunda betonların performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak için çok avantajlıdır. Bu yaklaşım, üretilen her bir betonun diğer betonlara göre optimum duruma ne kadar yakın olduğunu göstermektedir.

Her yanıt için tekil arzu edirlilik fonksiyonu, yanıtın maksimize veya minimize edilmesi istenilmesine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Tepkinin maksimum değeri daha fazla istenilmesi durumunda denklem (3.17) kullanılmaktadır. Öte yandan, yanıtın minimum değeri daha çok istenildiğinde denklem (3.18) kullanılmaktadır (Omidinasab ve ark., 2022).

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \min f_i}{\max f_i - \min f_i} \right]^{t_i} \quad (3.17)$$

$$d_i = \left[\frac{\max f_i - Y_i}{\max f_i - \min f_i} \right]^{t_i} \quad (3.18)$$

Bu bağıntılarda d_i : i yanıtına ait arzu edirlilik fonksiyonu, Y_i : i yanıtının değeri, $\min f_i$: i yanıtının minimum değeri, $\max f_i$: i yanıtının maksimum değeri, t_i : dikkate alınan yanıtın ağırlık faktörüdür. Analizde, d_i , 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. 0 ve 1 değerleri, incelenen tepki açısından sırasıyla en kötü ve en iyi performans gösteren betonları temsil etmektedir.

Bu çalışmada arzu edirlilik fonksiyonu, betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma çarpma dayanımı ve maliyeti dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çalışmada incelenen her bir tepki için tekil arzu edirlilik fonksiyonu hesaplandıktan sonra değerlerin geometrik ortalaması olan kompozit arzu edirlilik (amaç fonksiyonu) (D) hesaplanmıştır. D, denklem (3.19) kullanılarak hesaplanmaktadır (Şimşek ve ark., 2013).

$$D = (d_1^{t_1} \times d_2^{t_2} \times d_3^{t_3} \times \dots \times d_n^{t_n})^{\frac{1}{\sum t_i}} \quad (3.19)$$

Burada, n : yanıtların sayısıdır. Kompozit arzu edilirlilik 0 (en az istenilen) ile 1 (en çok istenilen) arasında bir değer almaktadır. D değeri betonun ne kadar istenildiğini göstermektedir. D değerindeki artış betonun genel performansındaki artışı yansıtmaktadır.

Ağırlık faktörü (t_i) yanıtın önemine bağlıdır. Arzu edilirlilik fonksiyonu analizinde göz önüne alınan tüm tepkiler aynı önemi taşıdığına $t_i = 1$ olarak alınmaktadır. Bu tezin temel amacı farklı katkı maddeleri kullanılarak betonarme elemanların çarpma dayanımını artırmak olduğu için kırılma çarpma dayanımının ağırlık faktörü 3 olarak alınmıştır. Diğer tepkiler için bu faktör 1 olarak alınmıştır.

3.3. Betonarme Plakların Hazırlanması ve Test Edilmesi

Önceki aşamada çarpma dayanımı, küçük ebatta beton numuneler kullanılarak incelenmiştir. Bu aşamada, yapılarda kullanılan betonarme elemanların çarpma davranışını daha net bir şekilde yansıtmak üzere daha büyük ebatta betonarme elemanlar test edilmiştir. Önceki aşamada üretilen karışımların çarpma dayanımı açısından en yüksek performansa sahip karışım göz önüne alınarak betonarme plaklar üretilmiştir. Bu aşamada üretilen betonarme plaklar farklı tiplere ayrılmıştır. Bunlar, normal (referans) betondan üretilen betonarme plak, en iyi performans gösteren betondan üretilen betonarme plak, fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plaklar ve çelik levhali betonarme plaklardır. Toplam 9 adet betonarme plak üretilmiş ve ağırlık düşürme deneyi altında test edilmiştir.

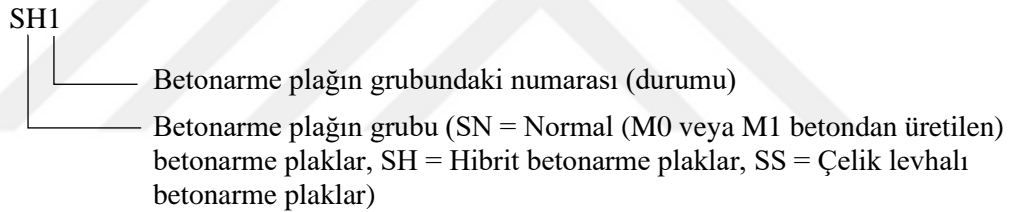
3.3.1. Betonarme plakların detayları

Çarpma dayanımı incelenen betonarme plakların üretiminde iki tür beton kullanılmıştır. Bunlar referans beton (M0) ve kırılma çarpma dayanımı açısından en iyi karışım (M1)'dir. Üretilen betonarme plaklardan bir adet referans betondan (M0) üretilmiş, bir adet M1 betonundan üretilmiş ve dört adet fonksiyonel derecelendirilmiş betondan üretilmiştir. Ayrıca, üç adet betonarme plak çelik levha içermektedir. Üretilen bu betonarme plaklar 1000×1000×120 mm ebatlarındadır. Tüm plaklarda aynı donatı

oranı ve detayları kullanılmıştır. İncelenen betonarme plakların kodu, tipi ve üretilmesinde kullanılan betonun tipi Çizelge 3.24.'te gösterilmiştir. Üretilen her betonarme plağa bir numune kodu verilmiştir. Betonarme plakların örnek kodlaması Şekil 3.24.'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, numune kodunda betonarme plağın grubu ve grubundaki numarası yazılmıştır.

Çizelge 3.24. İncelenen betonarme plakların kodu ve tipi

Numune kodu	Betonarme plağın tipi
SN1	M0 betonundan üretilen betonarme plak (Referans plak)
SN2	M1 betonundan üretilen betonarme plak
SH1	Hibrit betonarme plak – durum 1 (M0 üstte – M0 ortada – M1 altta)
SH2	Hibrit betonarme plak – durum 2 (M1 üstte – M0 ortada – M0 altta)
SH3	Hibrit betonarme plak – durum 3 (M0 üstte – M1 ortada – M0 altta)
SH4	Hibrit betonarme plak – durum 4 (M1 üstte – M0 ortada – M1 altta)
SS1	M1 betondan üretilen çelik levhalı betonarme plak – durum 1 – üst yüzeyde 1 mm kalınlıkta çelik levha bulunmaktadır.
SS2	M1 betondan üretilen çelik levhalı betonarme plak – durum 2 – alt yüzeyde 1 mm kalınlıkta çelik levha bulunmaktadır.
SS3	M1 betondan üretilen çelik levhalı betonarme plak – durum 3 – üst ve alt yüzeylerde 1 mm kalınlıkta çelik levha bulunmaktadır.

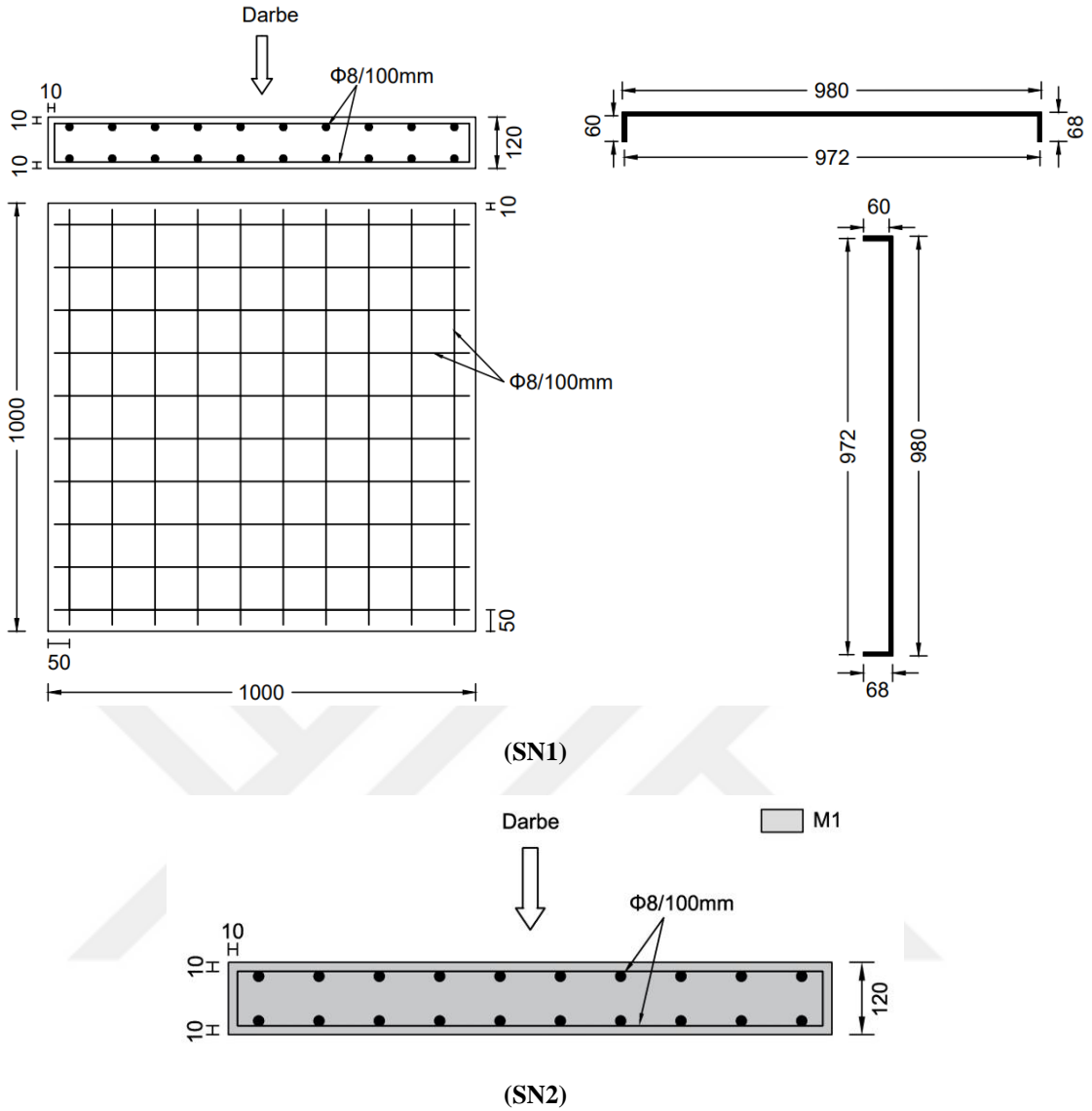


Şekil 3.24. Betonarme plakların kodlama yöntemi

3.3.1.1. SN1 ve SN2 betonarme plakları

SN1 plak referans betondan (M0) üretilen referans betonarme plaktır. SN2 plak M1 betonundan üretilmiş bir betonarme plaktır. SN1 ve SN2 betonarme plaklarının geometrik detayları Şekil 3.25.'te gösterilmiştir.

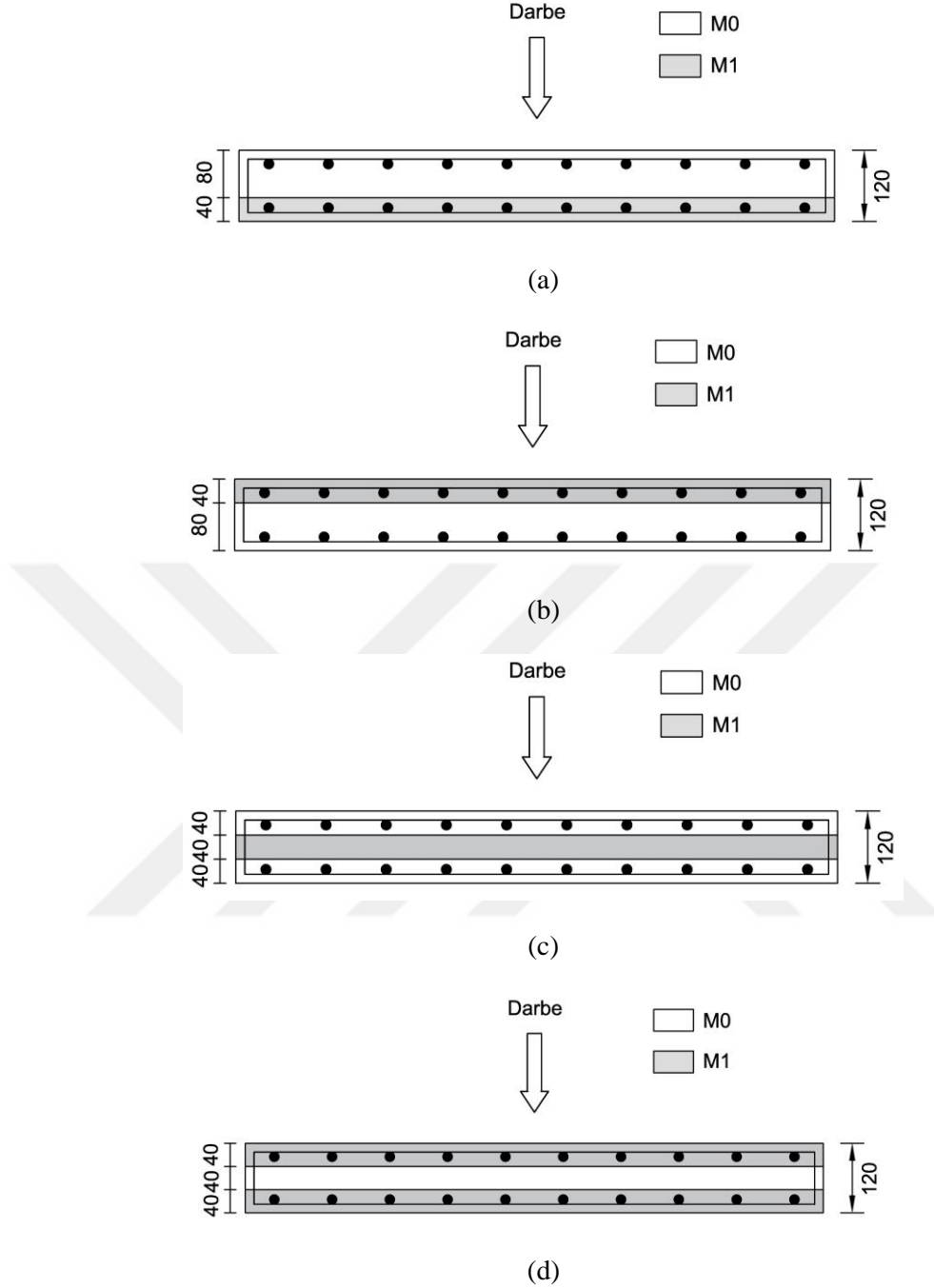
Daha önce de belirtildiği gibi, tüm betonarme plaklarda aynı donatı detayları kullanılmıştır. Betonarme plaklarda kullanılan çelik donatı detayları Şekil 3.25. (a)'da sunulmuştur. Betonarme plaklarda, (TS 708, 2016) standardına uygun 8 mm çaplı nervürlü S420a donatılar kullanılmıştır. Şekilden de anlaşılacağı üzere, betonarme plakların her iki doğrultusunda aynı miktarda çekme ve basınç donatısı kullanılmıştır. Kullanılan donatı aralığı 100 mm'dir. Çalışmada, 10 mm paspayı kullanılmıştır.



Şekil 3.25. SN1 ve SN2 betonarme plaklarının detayı

3.3.1.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plaklar

Bu çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plaklar aynı yükseklikte (40 mm) üç katmandan oluşmaktadır. Katmanlarda farklı beton tipi kullanılarak farklı durumlar elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, hibrit betonarme plaklarda iki tip beton (M0 ve M1) kullanılmıştır. Çalışmada dört farklı durum incelenmiştir. Bu durumların detayı Şekil 3.26.'da verilmiştir. Şekilde, her katmanda kullanılan betonun tipi de gösterilmiştir.

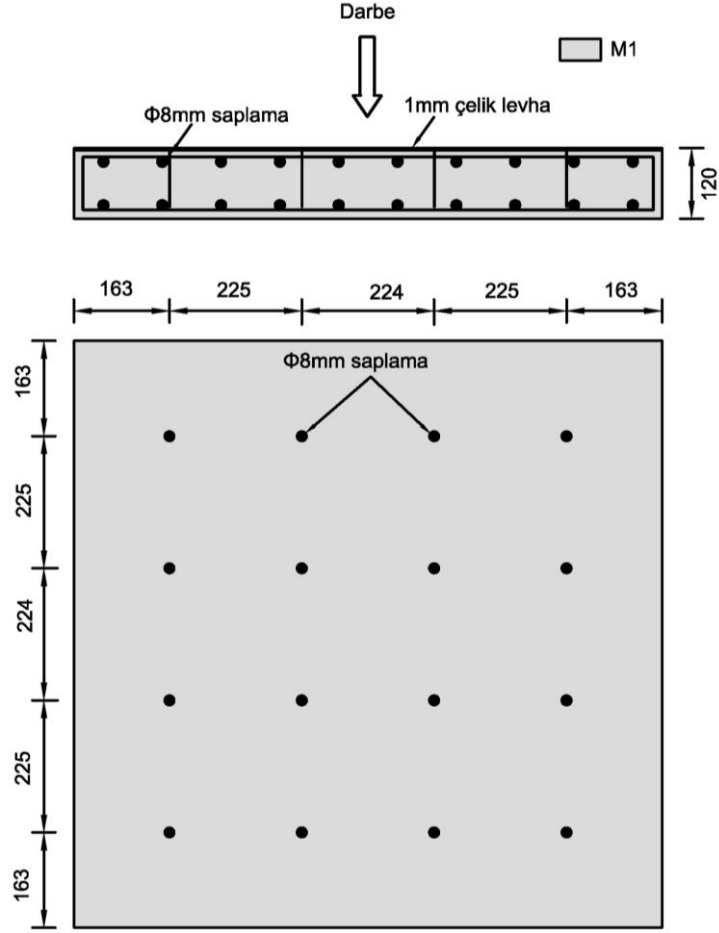


Şekil 3.26. Fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plakların detay1, a) SH1, b) SH2, c) SH3, 4) SH4

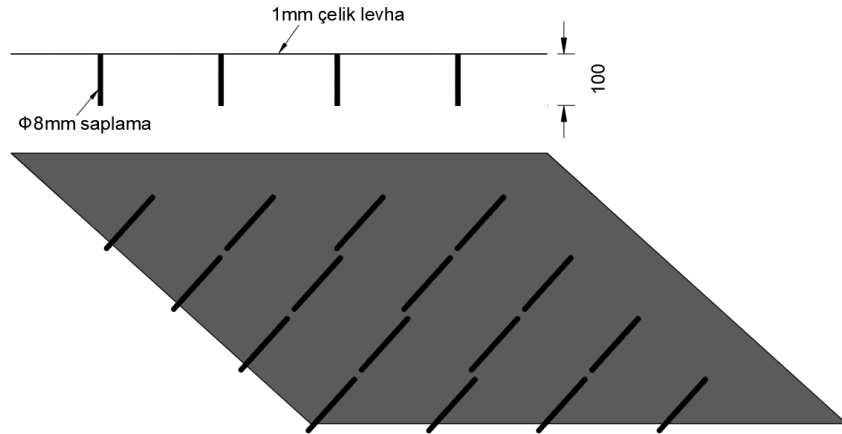
3.3.1.3. Çelik levhalı betonarme plaklar

Bu çalışmada, çelik levha kullanımının betonarme plakların çarpma davranışı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Çalışmada, üç adet çelik levhalı betonarme plak incelenmiştir. Çelik levhalı betonarme plakların ve çelik levhanın detayları Şekil 3.27. ve Şekil 3.28.'de gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, SS1 plağında çelik levha ön yüzeyde, SS2 plağında çelik levha arka yüzeyde ve SS3 plağında çelik levha ön ve arka

yüzeyde yerleştirilmiştir. Çelik levhalı betonarme plaklarda M1 betonu kullanılmıştır. Beton ve çelik levha arasında iyi bir bağlantı sağlamak için çelik plakaya 16 adet 8 mm çaplı nervürlü saplama kaynaklanmıştır. Saplama uzunluğu 100 mm'dir. Bu çalışmada kullanılan çelik levhanın kalınlığı 1 mm ve tipi S235'tir.

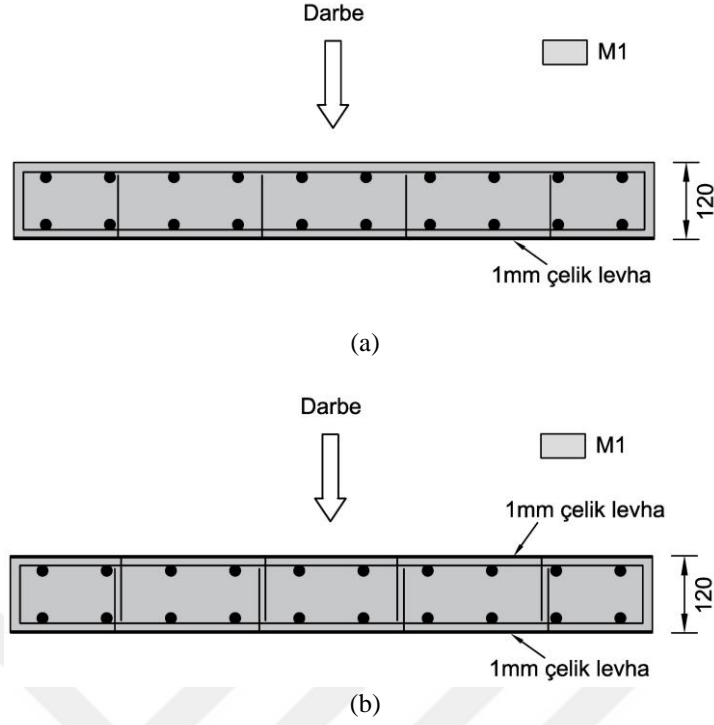


(a)



(b)

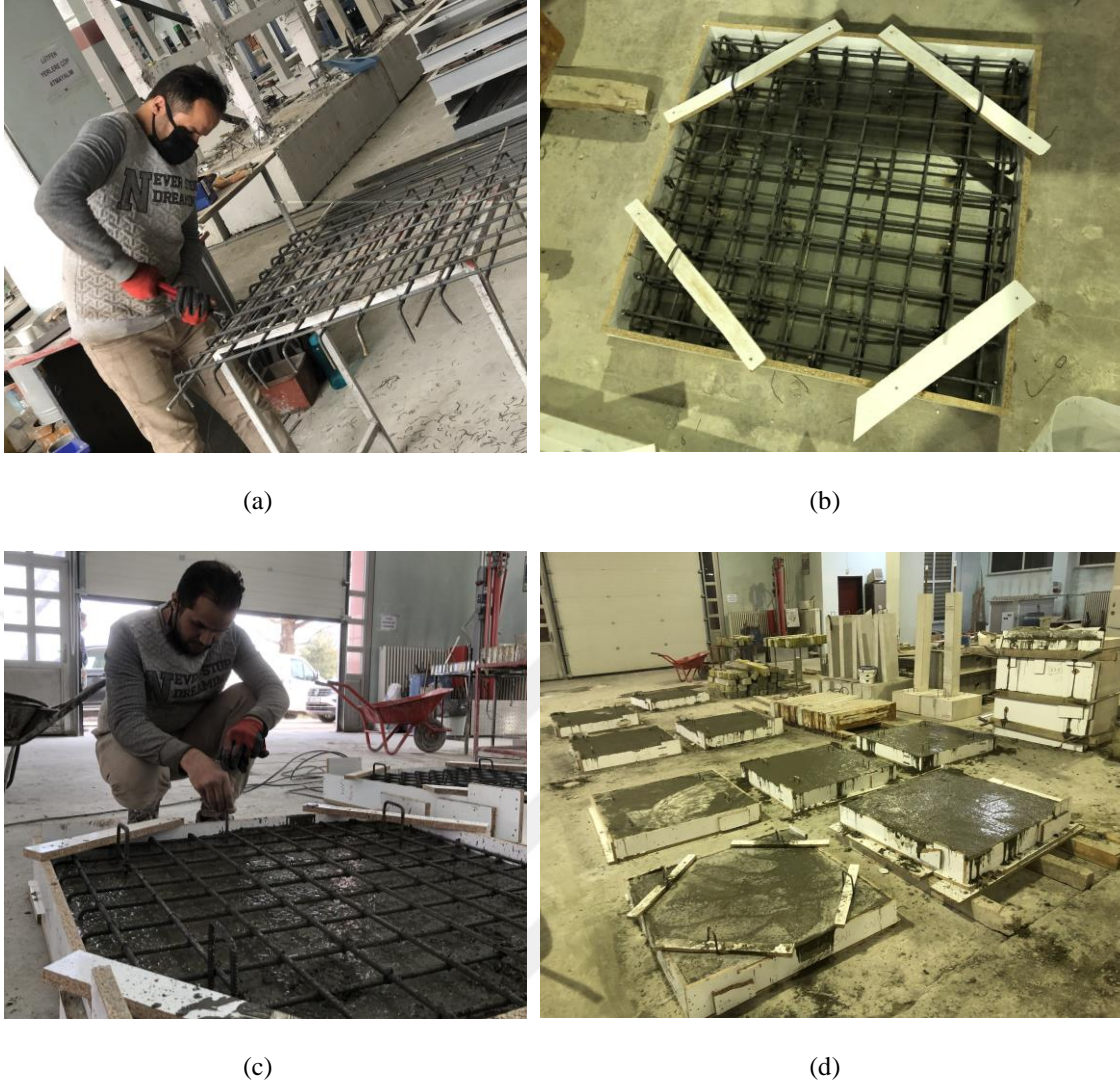
Şekil 3.27. Çelik levhalı betonarme plağın detayları, a) SS1 plağı, b) çelik levhanın detayları



Şekil 3.28. a) SS2 plağı, b) SS3 plağı

3.3.2. Betonarme plakların üretimi

Bu çalışmada incelenen betonarme plakalar Konya Teknik Üniversitesi yapı-deprem laboratuvarında üretilmiştir. Ahşap kalıplar ve donatılar hazırlandıktan sonra tüm betonarme plakların beton dökümü aynı günde gerçekleştirilmiştir. Betonarme plakların üretiminde 250 litre kapasiteli bir beton mikseri kullanılmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plaklar aynı anda iki mikser kullanılarak hazırlanmıştır. Hibrit betonarme plaklarda farklı katmanların betonu, aralarında 10-15 dakika ara verilerek dökülmüştür. Komşu iki katmanın betonu aynı olduğunda, iki katman bir katman gibi hazırlanmıştır. Numunelerin üretiminde beton vibratörü kullanılarak yeterli vibrasyon yapılmıştır. Hibrit numunelerde, katmanların betonu karışmaması için vibrasyon dikkatle az miktarda yapılmıştır. SS3 plağı, numunenin her iki tarafında çelik levha bulunduğu için dikey şekilde dökülmüştür. Betonarme plakların üretim sürecine ait bazı görüntüler Şekil 3.29.'da verilmiştir. Numuneler, üretimden bir süre sonra Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'ne götürülmüş ve ağırlık düşürme testi için hazırlanmıştır.



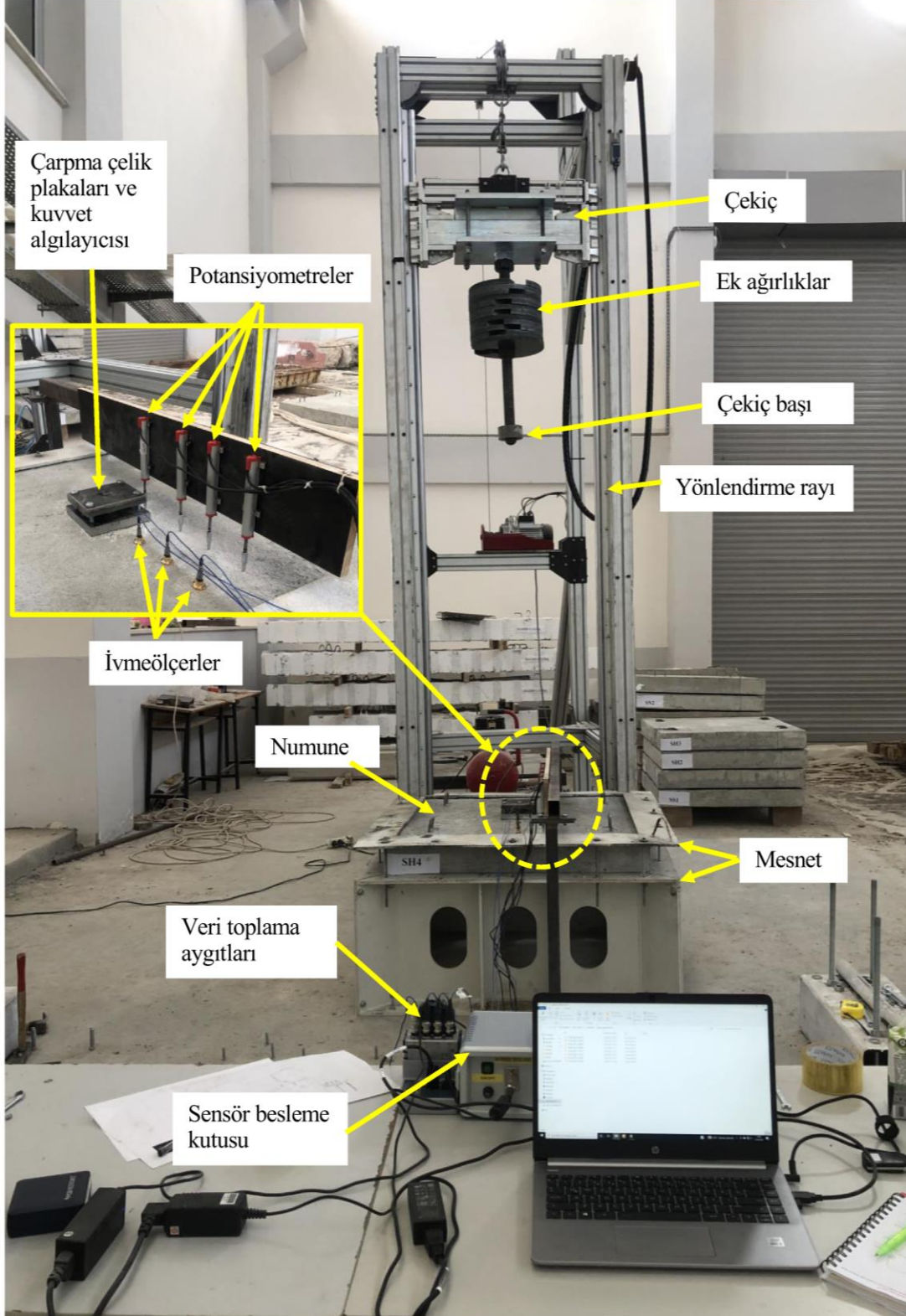
Şekil 3.29. Betonarme plakların üretimi, a) donatıların hazırlanması, b) hazırlanmış kalıp ve donatı (SS2 plağı), c) hibrit plakta katman yüksekliği kontrolü, d) hazır numuneler

3.3.3. Ağırlık düşürme test düzeneği

Betonarme plakların çarpma davranışı ağırlık düşürme testi kullanılarak incelenmiştir. Ağırlık düşürme deneyinde bir çekiç belirli bir yükseklikten serbestçe düşürülmektedir. Çarpma sırasında çekicinin potansiyel enerjisi çok kısa bir sürede numuneye kinetik enerji olarak aktarılmaktadır. Bu da numune boyunca ani gerilme dalgalarının ilerlemesine neden olmaktadır. Uygun ölçüm araçları kullanılarak numunelerin çarpma tepkileri ölçülebilir ve değerlendirilebilir.

Ağırlık düşürme deneyi Eskişehir Osmangazi Üniversitesi yapı laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ağırlık düşürme test cihazının detayları ve genel test düzeneği Şekil 3.30.'da gösterilmiştir. Bu cihaz kullanılarak kiriş, kolon ve döşeme gibi farklı betonarme

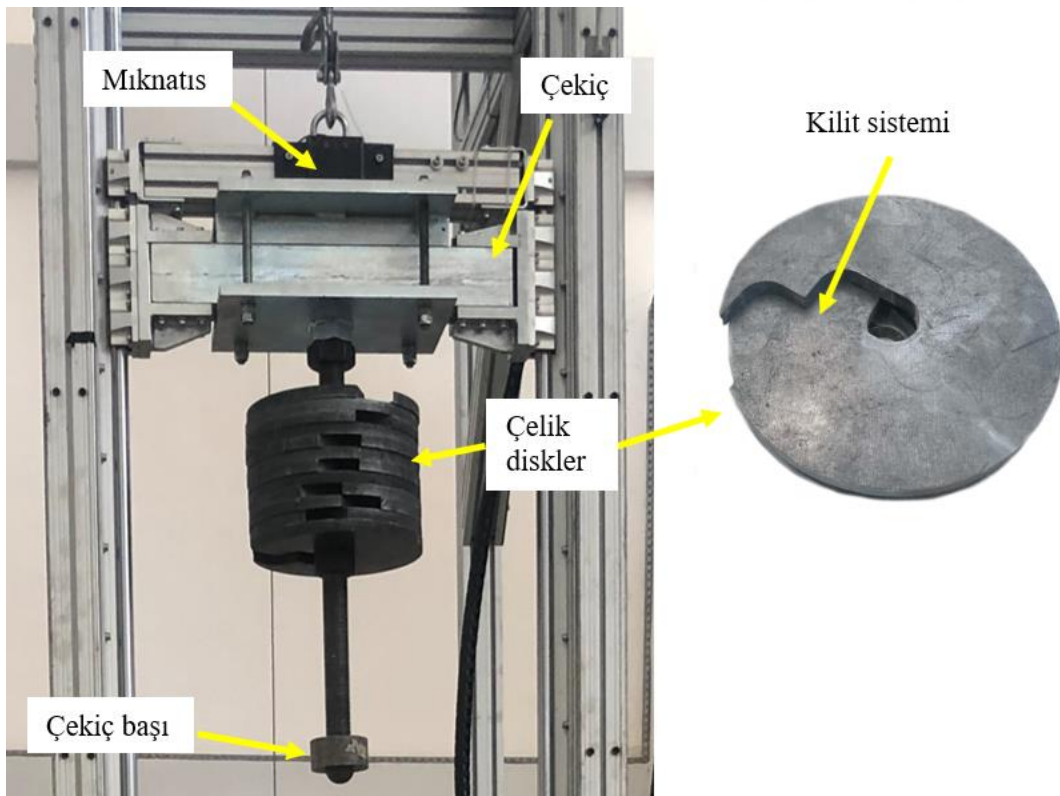
elemanlar test edilebilmektedir. Alüminyum gövdeli ağırlık düşürme test cihazı farklı çarpma enerjileri uygulama özelliğine sahiptir. İstenilen çarpma enerjisi, çarpma yüksekliği ve çarpma ağırlığı değiştirilerek ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.30. Ağırlık düşürme deney düzeneği genel görünümü

Çarpma cihazının 87 kg ağırlığında sabit bir çekici vardır. Ancak 75 cm uzunluğundaki ve 4.8 cm çapındaki çekicin metrik saplamasına ek çelik diskler eklenerek çarpma ağırlığı arttırılabilmektedir. Kullanılan ekstra çelik disklerin her birinin ağırlığı 9.3 kg'dır. Çelik disklerin çekice rijit bir şekilde bağlanabilmesi için uygun bir kilitleme sistemi bulunmaktadır. Düşen ağırlığın tasarımı ve çelik disklerin kilitleme sistemi Şekil 3.31.'de gösterilmiştir. Çarpma cihazında maksimum 16 adet çelik disk kullanılabilmektedir (T. Yılmaz, 2018). Sonuçta çarpma cihazı 87-235.8 kg arasında bir ağırlık uygulayabilmektedir. Çekiç, 100 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde silindirik bir başa sahiptir. Çekiç başının 50 mm çapında yarı küresel bir ucu vardır.

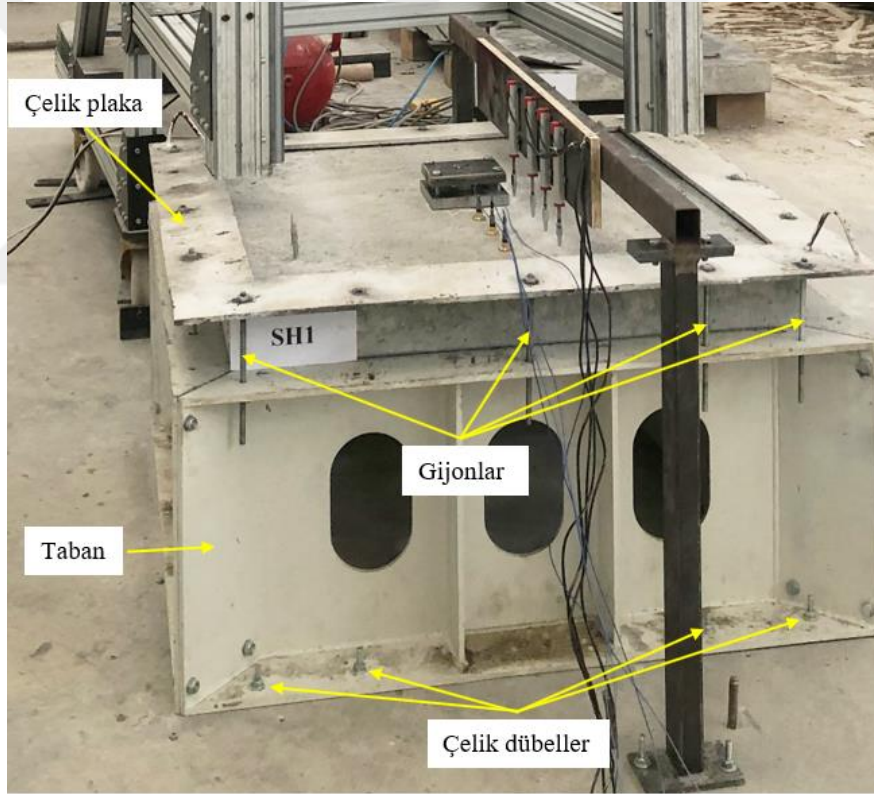
Çarpma cihazı, çekici 2.5 m'ye kadar farklı yüksekliklerden serbestçe düşürebilmektedir. Çekiç, motorlu kaldırma sistemi kullanılarak istenilen yüksekliğe kaldırılmaktadır. Çekiç, statik mıknatıs yardımıyla kaldırma sistemine bağlanmaktadır. Mıknatısın düşürme ve kilitleme durumları kompresör tarafından sağlanan hava basıncıyla pnömatik valf tarafından kontrol edilmektedir. Çekiç, hareket yönünü kontrol eden bir yönlendirme rayına bağlıdır. Test düzeneğinde sürtünmenin minimum seviyesine indirebilmesi için yönlendirme rayı pürüzsüz olarak imal edilmiştir. Ayrıca yönlendirme rayı testten önce yağlanmıştır.



Şekil 3.31. Vurucu ağırlık (kilitli pozisyonda)

3.3.4. Mesnet düzeneği

Bu çalışmada kullanılan mesnet, numuneyi pozisyonunda sıkıca tutacak ve numunenin istenmeyen hareketini engelleyecek şekilde tasarlanmıştır. şekil 3.32.'de çalışmada kullanılan mesnet düzeneği gösterilmiştir. şekilden anlaşılacağı üzere mesnet numuneleri alt ve üst taraftan sabitlemiştir. Mesnet iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım IPE 500 profilinden üretilen ortası boşluklu tabandır. Taban, betonarme plağı dört taraftan aşağıdan desteklemiştir. İkinci kısım, numuneyi yukarıdan tutan dikey hareketini engelleyen elik plakadır. elik plaka, her tarafta 3-4 gijonla tabana sıkıca bağlanmıştır. Taban, her tarafta 3-4 klipsli elik dübel kullanılarak zemine rijit bir şekilde bağlanmıştır. elik plaka ve tabanın üst flanşı, numuneyi her taraftan 50 mm genişlikte desteklemektedir. Sonuçta numuneler 900 mm'lik yüklü bir açıklığa sahiptir.



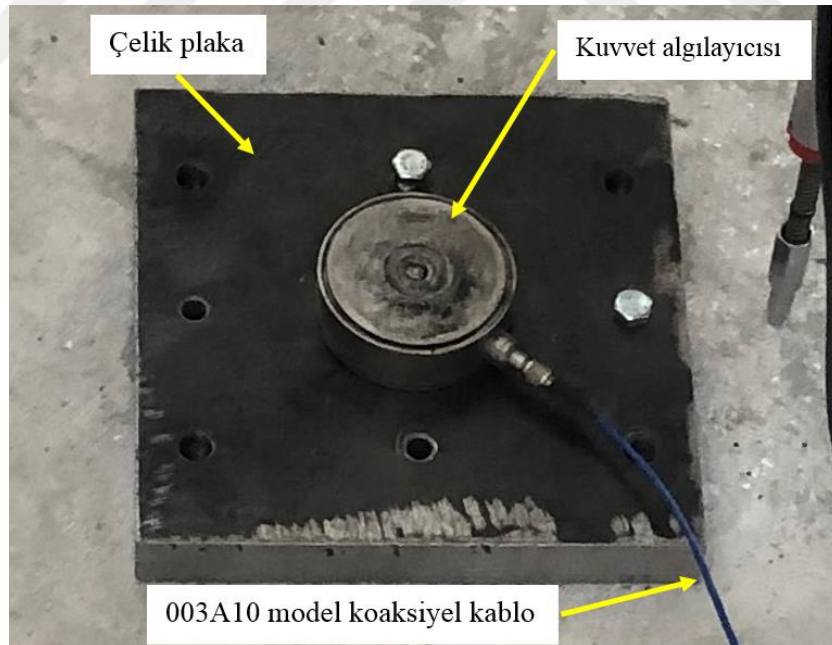
şekil 3.32. Mesnet düzeneği

3.3.5. Ölçüm aygıtları

Betonarme plakların çarpma davranışı incelenmek üzere bazı gerekli ölçüm aygıtları kullanılmıştır. Zamana bağlı çarpma yükünün ölçülmesinde kuvvet algılayıcısı, farklı konumlarda zamana bağlı deplasmanların elde edilmesinde potansiyometrik konum algılayıcıları ve farklı noktalarda ivmelerin tayin edilmesinde ivmeölçerler kullanılmıştır.

3.3.5.1. Kuvvet algılayıcısı

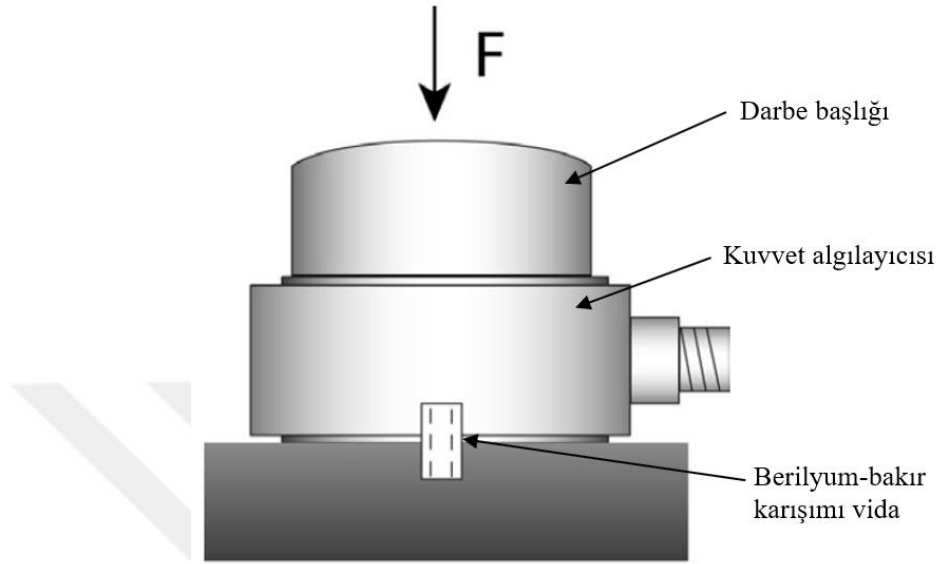
Bu çalışmada, zamana bağlı çarpma yükünü ölçmek için bir kuvvet algılayıcısı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kuvvet algılayıcısı, PCB Group firmasına ait 200C50 model ICP kuvars çarpma kuvveti algılayıcısıdır. 200C50 model kuvvet algılayıcısının maksimum ölçüm aralığı (basınç kuvveti) 222.4 kN, hassasiyeti (\pm %15) 22.48 mV/kN, maksimum statik basınç kuvveti 333.6 kN ve frekans aralığı 0,0003-30000 Hz'dir (PCB Piezotronics, 2022a; T. Yılmaz, 2018). Kullanılan kuvvet algılayıcısı Şekil 3.33.'te sunulmuştur.



Şekil 3.33. Kullanılan kuvvet algılayıcısı görünümü

Kuvvet algılayıcısının montajı, doğru ölçümler elde edebilmek için çok kritik bir adımdır. Çarpma deneyinde, Şekil 3.34'te gösterilen 200C ICP kuvars kuvvet algılayıcıları için serbest duruş montajının kullanılması üretici firma tarafından

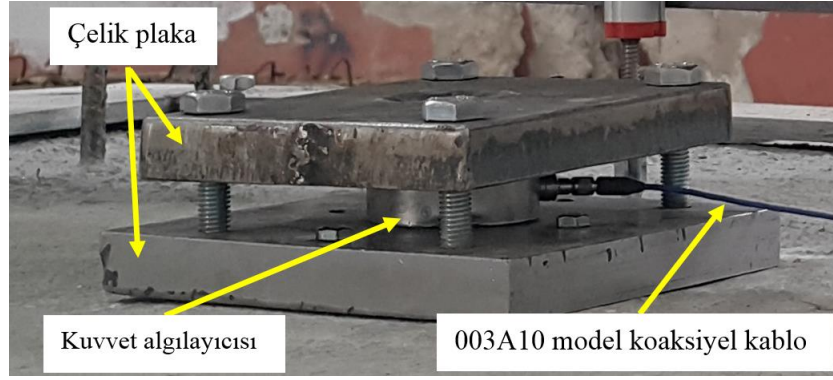
önerilmektedir. Ayrıca, montajda berilyum-bakır karışımı vida kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu tip vidalar elastik olduğu için sensörü yerinde tutarken sensöre kuvvet iletimini sağlamaktadır (PCB Piezotronics, 2022a; T. Yılmaz, 2018).



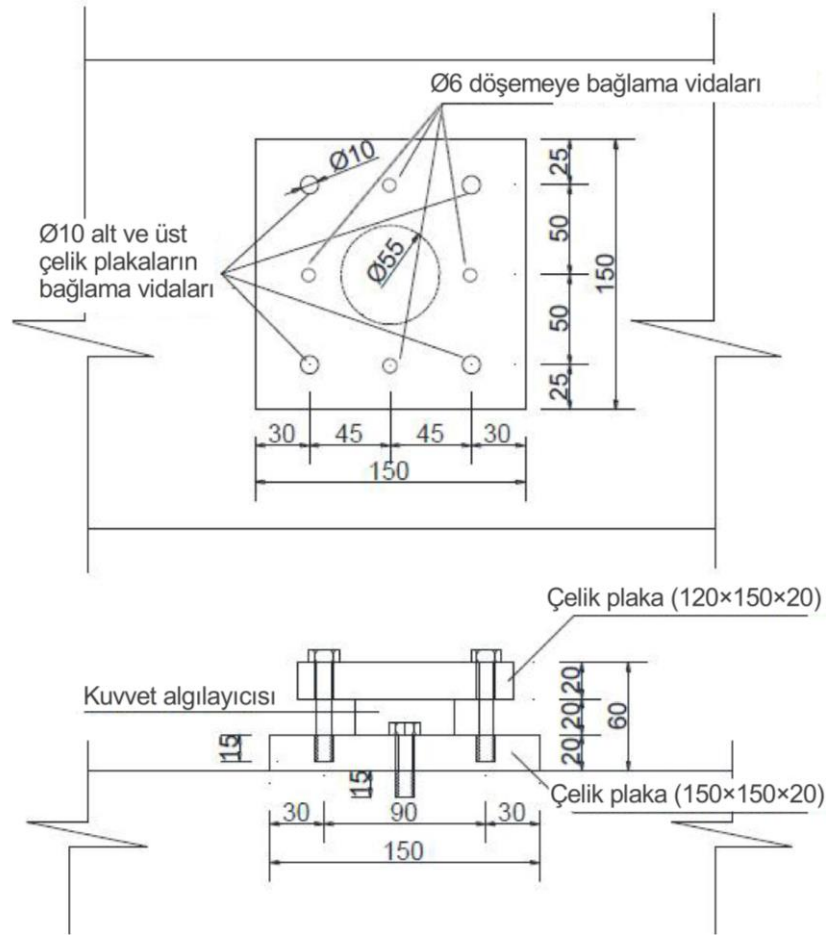
Şekil 3.34. Kuvvet algılayıcısının serbest duruş montaj şekli

Bu çalışmada kuvvet algılayıcısı, numune ortasında 20 mm kalınlığında iki çelik plaka arasına yerleştirilmiştir. Üst çelik plaka, kuvvet algılayıcısını çarpma altında oluşabilecek hasardan korumakta ve yükü kuvvet algılayıcısına iletmektedir. Kuvvet algılayıcısı, uygulanan çarpma yükünü ölçmekte ve yükü test numunesine bağlanan alt çelik plakaya aktarmaktadır. Alt çelik plaka, noktasal çarpma yükünün numuneye 150×150 mm'lik bir alan üzerinde üniform bir şekilde yayılmasını sağlayarak numunenin delme gibi yerel hasar görmesini engellemektedir. Kuvvet algılayıcısı montajının detayları Şekil 3.35.'te gösterilmektedir.

Kuvvet algılayıcısının montajı sırasında numunenin orta bölgesi temizlenmiş ve düzleştirilmiştir. Numunenin orta bölgesinde iki adet delik açılmış ve içine Ø6 mm çakmalı çelik dübeller yerleştirilmiştir. Alt çelik plaka, çarpma sırasında plakanın hareketini engelleyen iki adet Ø6 mm vidayla test numunesine bağlanmıştır. Kuvvet algılayıcısı alt çelik plakaya rijit bir şekilde bağlanmıştır. Üst çelik plaka, 4 adet Ø10 mm vidayla alt çelik plakaya bağlanmıştır. Böylece, kuvvet algılayıcısı iki çelik plaka arasında sabitlenmiştir. Kuvvet algılayıcısının ön yüklemesini önlemek ve üst çelik plakanın dikey hareketine izin vermek için vidalar biraz gevşek bağlanmıştır.



(a)



(b)

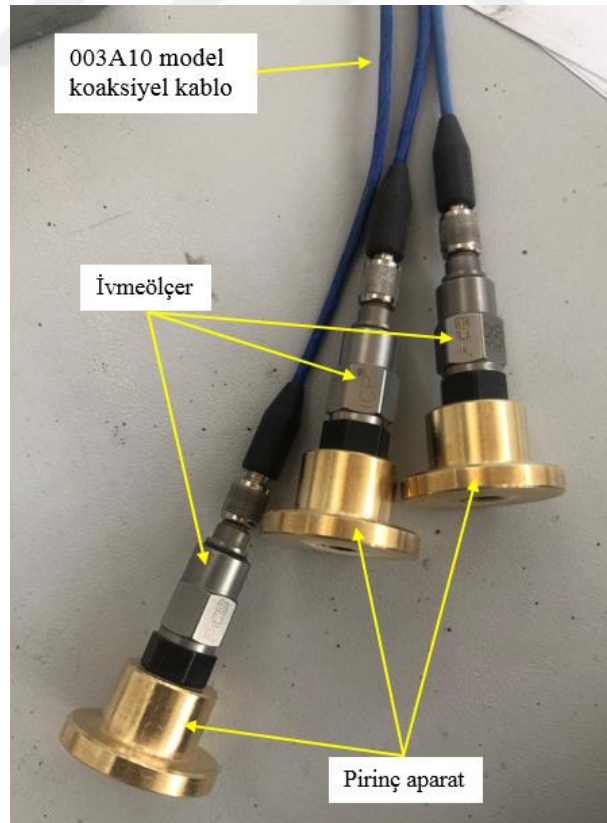
Şekil 3.35. Kuvvet algılayıcısının montaj şekli, a) montaj görünümü, b) montaj detayları

Kuvvet algılayıcısı ile ölçülen verilerin herhangi bir kayıp olmadan veri toplama aygıtına iletilmesi için özel tip kablo kullanılmıştır (Şekil 3.33. ve Şekil 3.35.). Bu kablo, PCB Group firması tarafından üretilen 003A10 model düşük gürültülü koaksiyel kablodur. Bu tip kablo, ICP sensörleri ile kullanılmakta, düşük ve yüksek sıcaklıklar durumu için ve düşük ve yüksek empedanslı voltaj sinyallerinin iletimi için uygundur.

Kablo çapı 2 mm olup, çalışma sıcaklık aralığı $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Kablonun empedansı 50 Ohm'dur (T. Yılmaz, 2018).

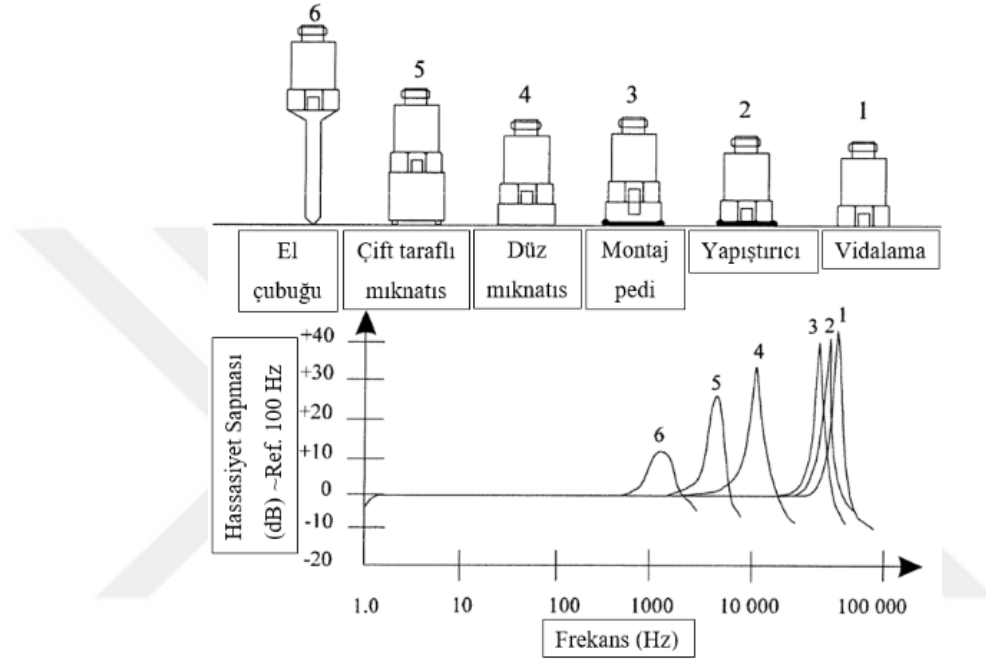
3.3.5.2. İvmeölçerler

Bu çalışmada, betonarme plakların ivme-zaman ölçümlerinin elde edilmesi için çarpma deneylerinde yaygın olarak kullanılan piezoelektrik ivmeölçer kullanılmıştır. Çalışmada üç adet ivmeölçer kullanılmıştır. Bunlar PCB Group firmasına ait ICP tipi 352B70 model piezoelektrik ivmeölçerlerdir. Bu tip ivmeölçerin ölçüm kapasitesi $\pm 5000\text{g}$, hassasiyeti ($\pm \%25$) 1 mV/g , frekans aralığı ($\pm \%5$) $0.7\text{-}9000\text{ Hz}$, rezonans frekansı $\geq 55\text{ kHz}$ 'dir. Bu tür ivmeölçer $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+121\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta düzgün bir şekilde çalışabilmektedir. Bu ivmeölçerlerde algılama elemanı seramik ve koruyucu malzeme titanyumdur (PCB Piezotronics, 2022b; T. Yılmaz, 2018). Bu çalışmada kullanılan piezoelektrik ivmeölçerler Şekil 3.36.'da gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, veri toplama cihazına iletim sırasında veri kayıplarını önlemek için ivmeölçerlerle 003A10 model koaksiyel kablolar kullanılmıştır.



Şekil 3.36. Kullanılan piezoelektrik ivmeölçer

İvmeölçerlerin montajı çok kritik bir adımdır. Sonuçlar, montaj tipinden oldukça etkilenmektedir. Kullanılabilecek birçok montaj türü bulunmaktadır. Şekil 3.37.'de, ivmeölçer montaj tipleri ve bunların yüksek frekanslar üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, sadece bazı montaj tipleri yüksek frekanslı durumlarda iyi performans göstermektedir. Şekilden, yüksek frekanslı durumlarda en iyi montaj tipinin vidalama olduğu da görülebilmektedir.



Şekil 3.37. İvmeölçerlerin montaj türleri ve yüksek frekansa etkileri (T. Yılmaz, 2018)

Bu çalışmada, çarpma testi sırasında yüksek frekans oluşabileceğinden vidalama tipi montaj yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.38.'de, ivmeölçer montajı gösterilmektedir. İvmeölçerler iletkenlik seviyesi yüksek olan pirinç aparatlara bağlanmıştır. Numunelerin üzerinde belirlenen noktalarda uygun delikler açılmış ve içine Ø6 mm'lik çakmalı çelik dübeller yerleştirilmiştir. Daha sonra ivmeölçere bağlanan montaj pirinç aparatı başsız vidalar kullanılarak numuneye bağlanmıştır. Daha iyi ölçüm için, ivmeölçerin monte edileceği yüzey temizlenmiş ve düzleştirilmiştir. Sonuçta, numuneye ivmeölçer arasında rijit bir bağlantı sağlanmıştır.

Üst yüzeyinde çelik levha bulunan numunelerde (SS1 ve SS3), ölçümlerin doğruluğunu sağlamak için, delikler çelik levhadan geçilerek betona kadar açılmıştır. İvmeölçerler, çelik levhanın oluşturabileceği istenmeyen titreşimleri önlemek için hem çelik plakaya hem de betona rijit bir şekilde bağlanmıştır (Şekil 3.39.).



Şekil 3.38. İvmeölçerlerin numuneye yerleşimi



Şekil 3.39. Üst yüzeyinde çelik levha bulunan betonarme plaklarda ivmeölçer montajı

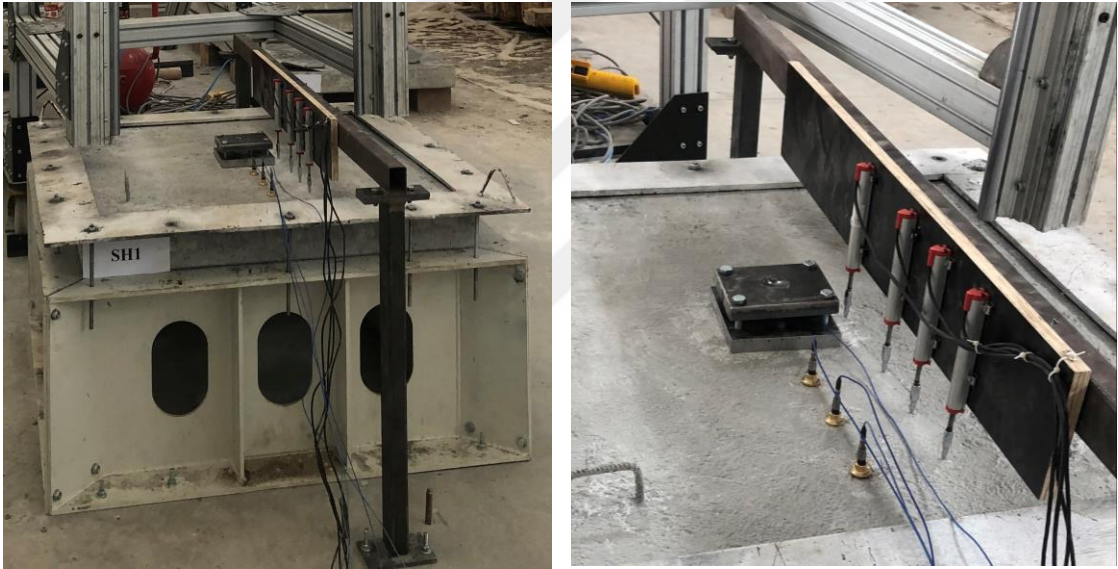
3.3.5.3. Potansiyometreler

Numunelerin deplasmanı 4 adet potansiyometre kullanılarak ölçülmüştür. Kullanılan potansiyometreler, Opkon firmasına ait SLPS 100 D 5K 10M model dıştan yaylı tipli potansiyometrelerdir. Kullanılan potansiyometrelerin ölçüm boyu 100 mm, doğrusallığı $\pm \%0.2$, tekrarlanabilirliği < 0.01 mm, çözünürlüğü sonsuz, direnci 5 kOhm ve çalışma sıcaklığı -20 °C - $+80$ °C'dir. Potansiyometrelerin kablo uzunluğu 10 m'dir (Opkon, 2021). SLPS model lineer potansiyometre Şekil 3.40.'ta gösterilmiştir.



Şekil 3.40. SLPS model potansiyometrik konum algılayıcısı

Bu çalışmada kullanılan dört potansiyometre bir eksen üzerinde yerleştirilmiştir. Potansiyometrelerin montajı Şekil 3.41.'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, potansiyometreler, zemine rijit bir şekilde bağlanmış çelik bir çerçeveye bağlı ahşap bir plakaya sabitlenmiştir.



Şekil 3.41. Potansiyometrik konum algılayıcısı montajı

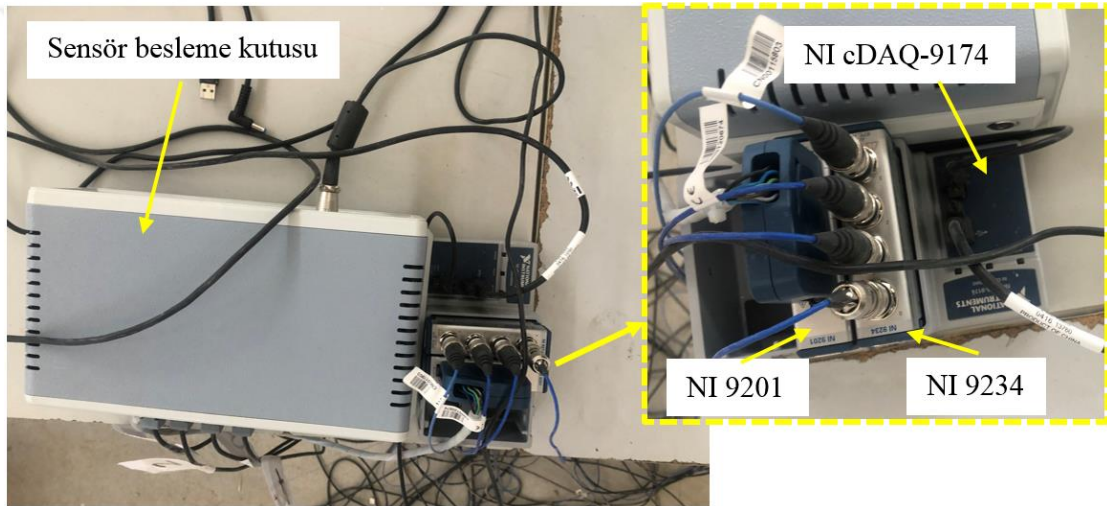
3.3.6. Veri toplama aygıtları

Çalışmada kullanılan ölçüm aygıtları uygun veri toplama aygıtlarına bağlanmıştır. Veri toplama cihazları sensörlerle ölçülen verileri toplayıp bilgisayar verilerine dönüştürmektedir. Bu çalışmada kullanılan veri toplama cihazları Şekil 3.42.'de gösterilmiştir. Kuvvet algılayıcısı ve ivmeölçerler NI 9234 model veri toplama cihazına koaksiyel kablolarla bağlanmıştır. NI 9234, National Instruments firması tarafından üretilen dört kanallı dinamik sinyal yakalayıcısıdır.

Potansiyometreler, Teknik Destek Grubu (TDG) firmasına ait 10 V'luk besleme gerilimli sensör besleme kutusuna bağlanmıştır (Şekil 3.43.). Bu cihaz,

potansiyometrelerin beslemesini sağlayan ve ölçülen deplasmanların verilerini veri toplama cihazına aktaran 8 kanallı bir sensör besleme kutusudur. Sensör besleme kutusu, National Instruments firması tarafından üretilen NI 9201 model veri toplama aygıtına bağlanmıştır. Kullanılan NI 9201, 8 kanallı vidalı terminale sahip bir veri toplama cihazıdır.

NI 9234 ve NI 9201 veri toplama cihazları, National Instruments firmasına ait NI cDAQ-9174 model kompakt veri toplama ana gövdesine bağlanmıştır. Bu veri toplama ana gövdesi, veri toplama aygıtlarından eşzamanlı veri aktarımını sağlayan 4 kanallı bir cihazdır. NI cDAQ-9174, eşzamanlı toplanan yük, ivme ve deplasman ölçümlerini USB bağlantısıyla bilgisayara aktarmaktadır.



Şekil 3.42. Veri toplama aygıtları



Şekil 3.43. Sensör besleme kutusu

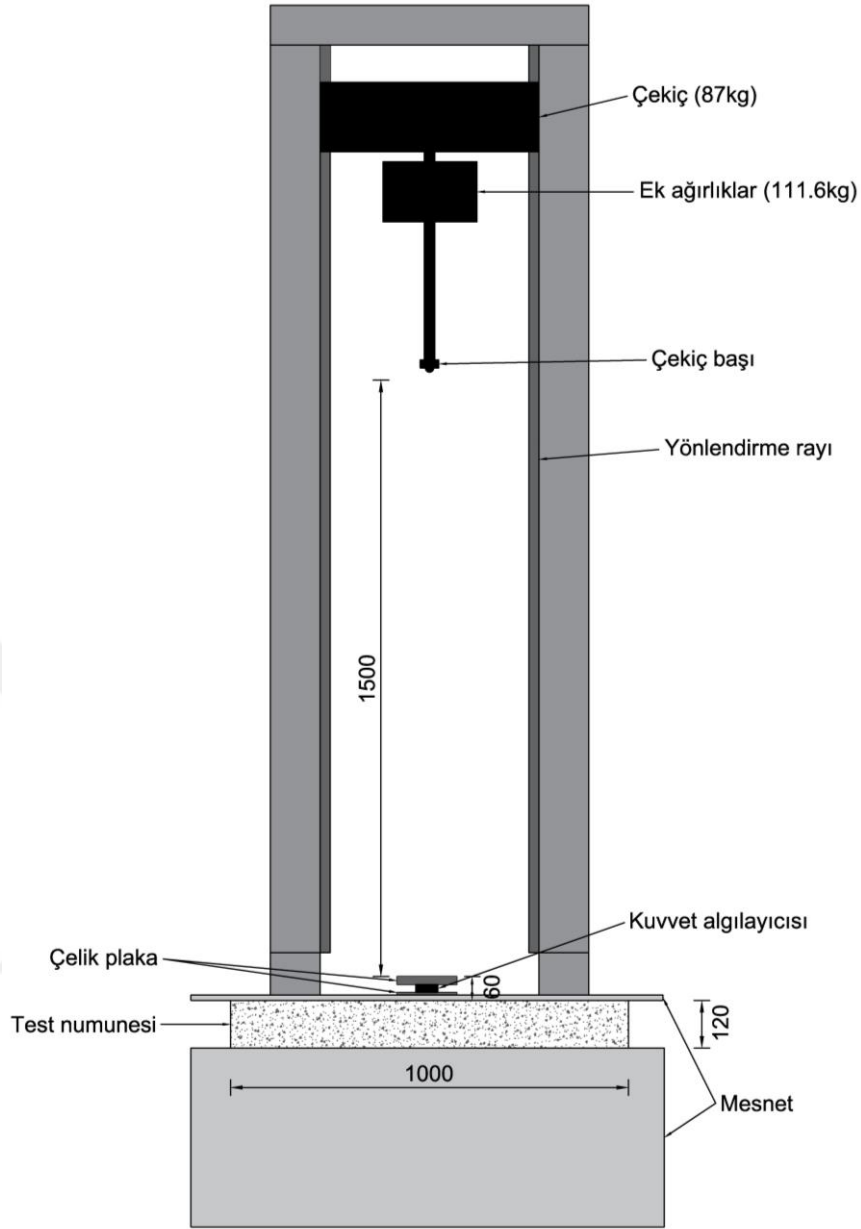
Bilgisayara iletilen ölçümler, National Instruments firması tarafından hazırlanan LabVIEW SignalExpress yazılımı kullanılarak kaydedilmiştir (Şekil 3.44.). Bu yazılım aynı zamanda sensörlerin kalibre edilmesi için de kullanılmaktadır. Bu çalışmada yük, ivme ve deplasman verileri 10 kHz'lik veri toplama hızında kaydedilmiştir.



Şekil 3.44. Deney verilerinin bilgisayara aktarımı

3.3.7. Betonarme plakların çarpma testinde kullanılan yöntem

Bu aşamada, düşük hızlı çarpma yüküne maruz kalan farklı tipte betonarme plakların davranışı araştırılmıştır. Bu çalışmada ağırlık düşürme deneyinde tek değişken betonarme plağın tipidir. Bu nedenle, test edilen tüm numuneler için aynı test parametreleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan test düzeneğinin şematik görünümü Şekil 3.45.'te sunulmuştur. Numunelere uygulanan çarpma enerjisine literatürde bulunan benzer çalışmalara, numunelerin boyutuna ve dayanımına ve sensörlerin kapasitesine göre karar verilmiştir. Bu çalışmada çekicinin sabit ağırlığına 12 adet ekstra çelik disk eklenmesine karar verilmiştir. Sonuçta, toplam 198.6 kg'lık bir çarpma ağırlığı kullanılmıştır. Bu ağırlık, numunenin ortasına 1.5 m'lik bir çarpma yüksekliğinden serbestçe düşürülmüştür. Sonuç olarak, her numuneye aktarılan kinetik enerjinin miktarı $E_k = m \times g \times h = 2922.40 \text{ N.m}$ 'dir. Çekicinin çarpma anındaki hızı $v = \sqrt{2g \times h} = 5.4 \text{ m/s}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.45 Test düzeneğinin şematik görünümü (boyutlar mm'dir)

Çalışmada gerçekleştirilen her çarpma testi sırasında, ilk önce numune mesnet üzerine yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Daha sonra sensörler numune üzerine monte edilmiştir. Bundan sonra vurucu ağırlığın yeri numunenin ortasına çarpacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra düşen ağırlık 1.5 m'ye yükseltilerek deney pozisyonuna getirilmiştir. LabVIEW SignalExpress programında zamana bağlı çarpma yükü, deplasman ve ivme verilerinin kaydedilmesine başlanmıştır. Bundan hemen sonra, manyetik kilit açılarak vurucu ağırlık serbestçe düşürülmüştür. Çarpma anındaki test numunesinin hali Şekil 3.46.'da gösterilmiştir. Çarpma sonrası numune sökülüp çatlak dağılımları tespit edilmiştir.



Şekil 3.46. Test numunesinin çarpma anındaki hali

Bu çalışmada, betonarme plağın farklı çarpma parametrelerinin incelenmesi planlanmıştır. Bu amaçla sekiz adet ölçüm aygıtı kullanılmıştır. Bunlar, bir adet 200C model ICP kuvars çarpma kuvveti algılayıcısı, üç adet 352B70 model ICP ivmeölçer ve dört adet SLPS 100 D 5K 10M model potansiyometredir. Ölçüm verileri sensörlerden veri toplama aygıtları yardımıyla toplanmış ve bilgisayara aktarılmıştır. Veriler bilgisayarda 10 kHz frekansla kaydedilmiştir.

Sensörlerin numune üzerindeki konumları, numunelerin çarpma davranışı hakkında daha fazla detay verebilecek şekilde seçilmiştir. Ölçüm aygıtlarının seçilen konumları Şekil 3.47.'de sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi, ivmeölçerlerin ve potansiyometrelerin anlaşılmasının kolaylaştırılması amacıyla farklı kodlar verilmiştir. Kodlamada, ivmeölçerin belirlenmesi için “a” harfi ve potansiyometrenin belirlenmesi için “d” harfi kullanılmıştır. Sensörün harfinden sonra, test numunesinin ortasından sırasına göre bir numara verilmiştir. Numunenin ortasına en yakın sensöre "1" numara

verilmiştir. Diğer sensörler için sırasına göre artan bir numara verilmiştir. Örneğin, a1 ve d1, sırasıyla numunenin ortasına en yakın ivmeölçer ve potansiyometreyi temsil etmektedir.

Şekil 3.47.'den de görüldüğü gibi, kuvvet algılayıcısı iki çelik plaka arasına numunenin ortasına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler, numunenin yatay simetri ekseninin yarısı üzerinde yerleştirilmiştir. Çarpma yüküne en yakın ivmeölçer (a1) çarpma etkisinden korunması için numunenin ortasından 150 mm uzaklıkta yerleştirilmiştir. a2 ve a3 ivmeölçerler, a1'den sırasıyla 100 mm ve 200 mm uzaklıkta yerleştirilmiştir. Potansiyometreler, ivmeölçerlerin yerleştirildiği eksene paralel ve 100 mm uzak bir eksene yerleştirilmiştir. d1 potansiyometresi numunenin dikey simetri ekseninde yerleştirilmiştir. d2, d3 ve d4 potansiyometreleri, sırasıyla d1'den 150 mm, 250 mm ve 350 mm uzaklıkta yerleştirilmiştir.

Sensörler için bu yerleşim düzeni kullanılarak aşağıdaki parametreler değerlendirilebilmiştir. Kuvvet algılayıcısı kullanılarak numunenin orta noktasında çarpma yükü bulunmuştur. Ayrıca, farklı noktalarda ivme-zaman ölçümleri ve deplasman-zaman ölçümleri elde edilmiştir.

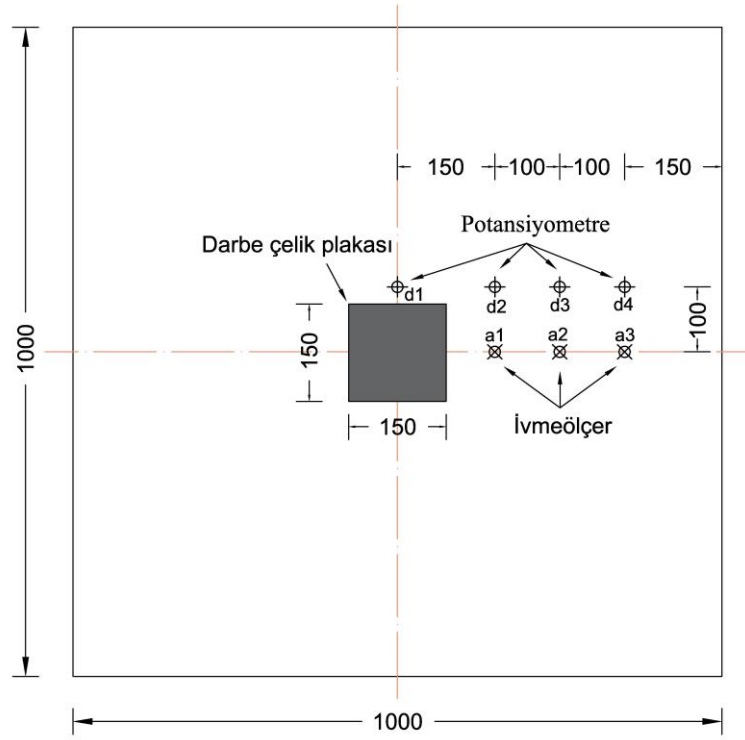
Numuneler tarafından emilen enerji miktarı da, impuls-momentum teoremi kullanılarak hesaplanmıştır. Impuls-momentum teoremine göre impuls, momentumdaki değişime eşittir (ΔM) (Othman, 2016; Othman ve Marzouk, 2016b; Yuan ve ark., 2022). Çarpma anındaki momentum değişimi denklem (3.20) kullanılarak hesaplanabilir. Impuls (I_p), çarpma yükü-zaman grafiğinin altındaki alan olarak hesaplanmaktadır. Impuls değeri kullanılarak geri tepme hızı (V_r) denklem (3.21) kullanılarak hesaplanmıştır. Numune tarafından emilen enerji (E_{ab}), denklem (3.22) kullanılarak çarpma enerjisinin ($E_{\text{Çarpma}}$) geri tepme enerjisinden çıkarılmasıyla hesaplanabilir (Yuan ve ark., 2022).

$$\Delta M = m \times (V_{\text{Darbe}} - V_r) = I_p \quad (3.20)$$

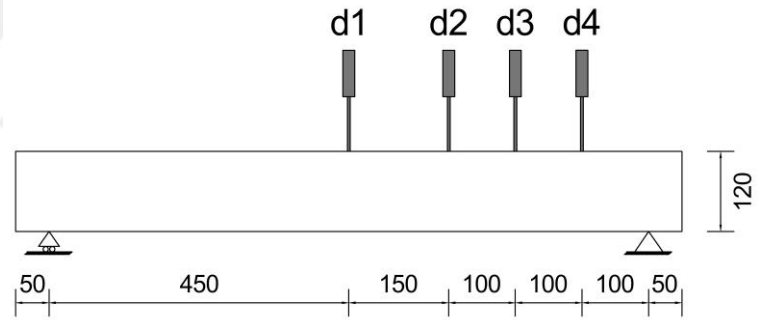
$$V_r = V_{\text{Darbe}} - \frac{I_p}{m} \quad (3.21)$$

$$E_{ab} = E_{\text{Darbe}} - 0.5 \times m \times V_r^2 \quad (3.22)$$

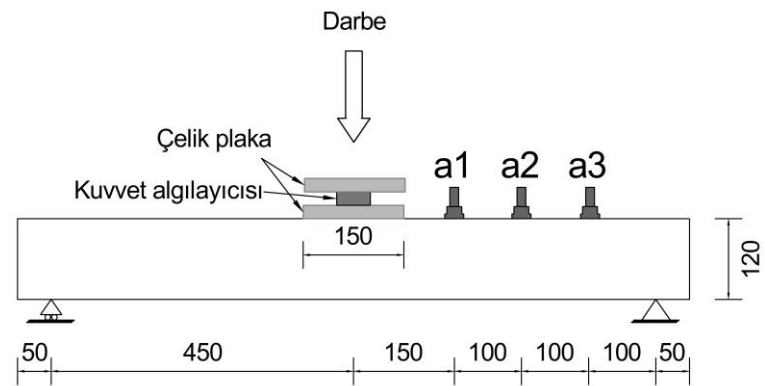
Burada ΔM : momentumdaki değişim, m : çekicinin ağırlığı (198.6 kg), $V_{\text{Çarpma}}$: çekicinin çarpma anındaki hızı (5.4 m/s), V_r : çekicinin çarpma sonrasında geri tepme hızı, I_p : impuls, E_{ab} : numune tarafından emilen enerji ve $E_{\text{Çarpma}}$: uygulanan çarpma enerjisidir (2922.4 J).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.47. Ölçüm aygıtlarının kodu ve konumu, a) Plan görünüşü, b) Potansiyometrelerin konumu (dikey görünüş), c) İvmeölçerlerin ve kuvvet algılayıcısının konumu (dikey görünüş)

Çarpma testinden sonra, numunelerin arka yüzeyinde oluşan çatlak dağılımları gözlenmiş ve işaretlenmiştir. SS2 ve SS3 plaklarında, arka yüzeyde çelik levha bulunmasından dolayı önce çelik levha çıkarılmış ve ardından çatlak dağılımları tespit edilmiştir. Çelik levha, ona kaynaklanan saplamaların etrafından yaklaşık 2×2 cm'lik alanlar kesilerek numuneden ayrılmıştır. SS2 plağının çelik levhanın çıkarılmasından önceki ve sonraki durumu Şekil 3.48.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.48. SS2 plaktan çelik levhanın çıkarılması

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Farklı Katkı Maddeleri İçeren Betonun Özellikleri

Bu çalışma kapsamında 8 katkı maddesi içeren betonun özellikleri araştırılmıştır. Araştırılan katkı maddeleri üç gruba ayrılmıştır. Bunlar, nano katkı maddeleri grubu, lifler grubu ve atık lastik kauçuklar grubudur. Katkı maddeleri arasındaki etkiler de incelenmiştir. Toplam 39 karışım hazırlanmıştır. Bu betonların bir takım sertleşmiş hal özellikleri elde edilmiştir. Bu kapsamda tespit edilen test sonuçları ve onlara bağlı tartışmalar bu bölümde sunulmuştur.

4.1.1. Birim ağırlık

Birim ağırlık test sonuçları Çizelge 4.1.'de sunulmuştur. Sonuçların daha kolay anlaşılması için nano katkı maddeleri, lifler ve atık lastik gruplarına ait birim ağırlıkların görelî yüzdesi grafiksel olarak da verilmiştir. Birim ağırlık görelî yüzdeleri referans betona (M0) kıyasla hesaplanmıştır.

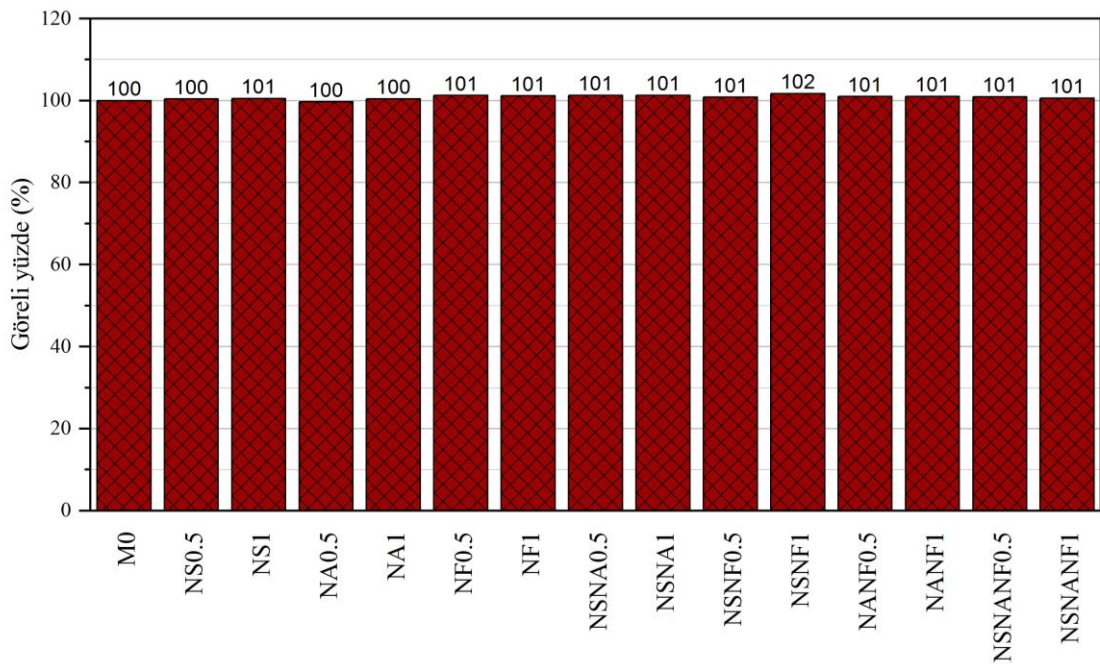
Çizelge 4.1. Birim ağırlık test sonuçları

Karışım grubu	Karışım No.	Karışım kodu	Birim ağırlık (Kg/m ³)
	1	M0	2385
	2	NS0.5	2394
	3	NS1	2397
	4	NA0.5	2377
	5	NA1	2395
	6	NF0.5	2414
	7	NF1	2412
Nano katkı maddeleri grubu	8	NSNA0.5	2415
	9	NSNA1	2415
	10	NSNF0.5	2404
	11	NSNF1	2426
	12	NANF0.5	2408
	13	NANF1	2409
	14	NSNANF0.5	2407
	15	NSNANF1	2399
	16	STF1	2465
	17	STF2	2512
	18	PETF1	2392
	19	PETF2	2214
Lifler grubu	20	PPF0.25	2358
	21	PPF0.5	2360
	22	STFPETF1	2446
	23	STFPETF2	2499
	24	STF0.5PPF0.125	2414
	25	STF1PPF0.25	2420

Çizelge 4.1. (Devam) Birim ağırlık test sonuçları

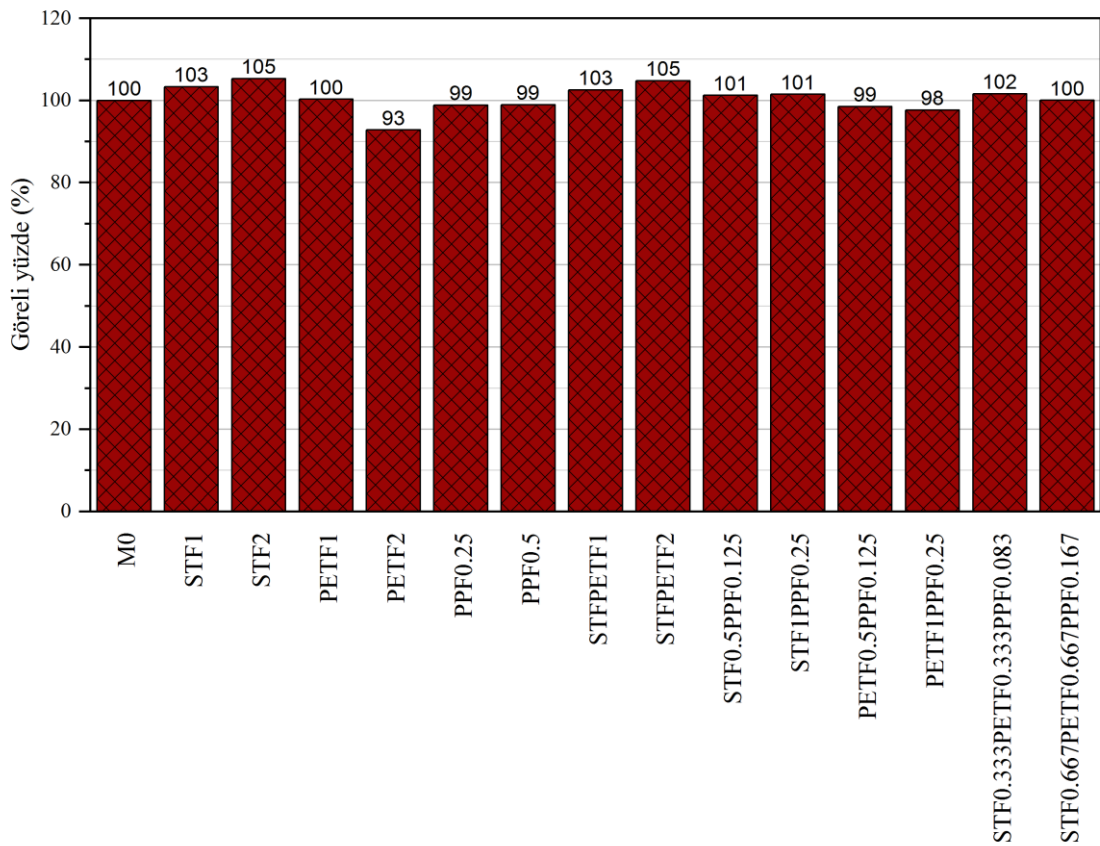
Karışım grubu	Karışım No.	Karışım Kodu	Birim Ağırlık (Kg/m ³)
Lifler grubu	26	PETF0.5PPF0.125	2350
	27	PETF1PPF0.25	2329
	28	STF0.333PETF0.333PPF0.083	2424
	29	STF0.667PETF0.667PPF0.167	2386
Atık lastik kauçuklar grubu	30	FR10	2271
	31	FR20	2072
	32	CR10	2324
	33	CR20	2247
	34	FRCR10	2299
	35	FRCR20	2184

Nano katkı maddeleri grubuna ait birim ağırlığın göreceli yüzdeleri Şekil 4.1.'de sunulmuştur. Şekilden de anlaşılacağı üzere türüne ve kullanım oranına bakılmaksızın nano katkı maddelerinin betonun birim ağırlığı üzerinde önemli bir etkisi bulunmamıştır. Nano katkı maddeleri grubunda birim ağırlıktaki referans betona göre en yüksek artış yüzdesi %2 olup NSNF1 betonundan elde edilmiştir. Bu, nano katkı maddelerinin düşük kullanım yüzdelerine bağlanabilir. Bu çalışmada, nano katkı maddeleri çimentonun yerine ağırlıkça maksimum %1 oranında kullanılmıştır. Bu da birim ağırlıkta yalnızca önemsiz bir değişikliğe yol açmıştır. Nano malzemeler kullanıldığında birim ağırlıktaki artış, bu malzemelerin betonun yapısındaki gözenekleri doldurarak kompaktlığını ve yoğunluğunu iyileştirmesinden kaynaklanmaktadır (Zareei ve ark., 2019).



Şekil 4.1. Nano katkı maddeleri grubuna ait birim ağırlığın göreceli yüzdesi

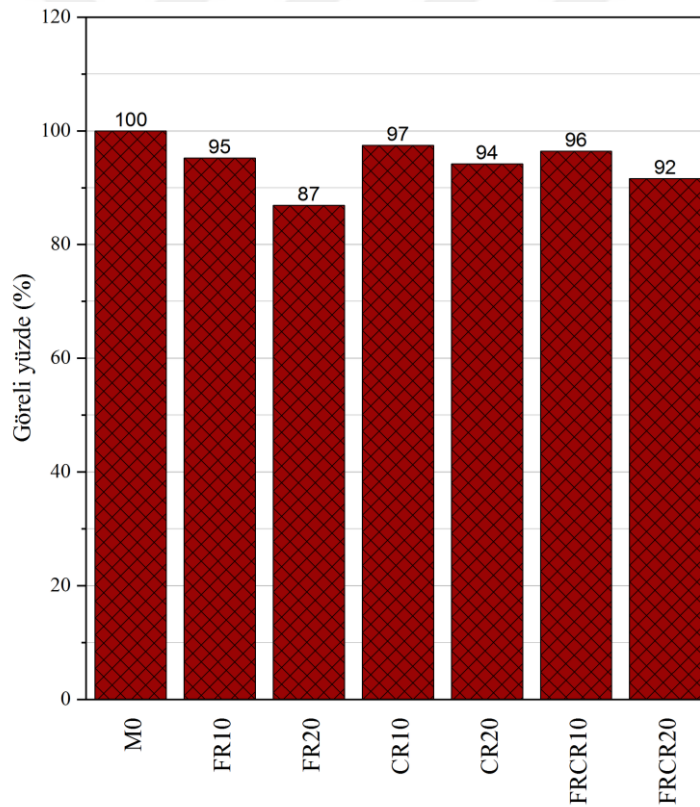
Lifler grubuna ait birim ağırlığın göreceli yüzdeleri Şekil 4.2.'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi liflerin betonun birim ağırlığı üzerindeki etkisi, tipine ve kullanım oranına bağlıdır. Çelik lif kullanımı betonun birim ağırlığını %5'e kadar artırmıştır. Çelik lif içeriği arttıkça betonun birim ağırlığı da artmıştır. Bu, çelik liflerin yüksek birim ağırlığına bağlıdır. Öte yandan, PET lif ve PP lif betonun birim ağırlığını azaltmaktadır. PP lif düşük yoğunluğuna (0.91 gr/cm^3) rağmen betonun birim ağırlığı üzerinde sadece hafif bir azalmaya yol açmıştır. Bu, PP liflerin düşük kullanım oranıyla alakalıdır. Öte taraftan, yüksek miktarda PET lif kullanımının betonun birim ağırlığını %7'e kadar azalttığını görülmüştür. Bu, PET liflerinin düşük özgül ağırlığına ve PET liflerin betonun gözenekliliğini artırmasına bağlanabilir (Ali ve ark., 2020). Şekilden de anlaşılacağı üzere, PP lif ve/veya PET lif ile birlikte çelik lifin kullanılması betonun birim ağırlığını referans betona göre arttırmıştır.



Şekil 4.2. Lifler grubuna ait birim ağırlığın göreceli yüzdesi

Atık lastik kauçuklar grubuna ait birim ağırlığın rölatif yüzdeleri Şekil 4.3.'te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, ince ve iri atık lastik kauçuklar betonun birim ağırlığını sırasıyla yaklaşık %13 ve %6'ya kadar azaltmıştır. Bu azalma, lastik kauçuk

içeriği arttıkça artmıştır. Benzer sonuçlar Eisa ve ark., (2020) ve Mendis ve ark., (2017) tarafından da bulunmuştur. İnce lastik kauçuğun betonun birim ağırlığını iri lastik kauçuğa göre daha fazla azalttığı gözlenmiştir. İki tip lastik kauçuk bir kombinasyon halinde kullanıldığında birim ağırlığın değerleri, iki tip ayrı ayrı kullanıldığındaki değerlerin ortalamasına yaklaşık olarak eşit olduğu gözlenmiştir. Bu, birim ağırlıktaki azalmanın karışımdaki her bir lastik kauçuk tipinin miktarına doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir. Atık lastik kauçukların kullanılmasında birim ağırlıkta oluşan azalma lastik kauçukların agregalara kıyasla daha düşük özgül ağırlığına, kauçuğun betonun gözenekliliğini, hava boşluklarını arttırmasına ve kauçuğun pürüzlü yüzey dokusu içinde havayı tutma kabiliyetine bağlanabilir (Eisa ve ark., 2020, 2021; Habib ve ark., 2020). Kauçuklu betonun birim ağırlığındaki azalma, bunun iç yapı ve mimari cepheler gibi mimari uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Aiello ve Leuzzi, 2010).



Şekil 4.3. Atık lastik kauçuklar grubuna ait birim ağırlığın görelî yüzdesi

Birim ağırlık test sonuçları, çelik lif, PET lif ve lastik kauçukların betonun birim ağırlığı üzerindeki etkisinin PP lif ve nano katkı maddelerine göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durum, bu katkı maddelerinin nano katkı maddeleri ve PP life kıyasla daha yüksek kullanım yüzdesine bağlıdır. Sonuçlar ayrıca, lastik kauçukların betonun

birim ağırlığı üzerindeki etkisinin diğer katkı maddeleri grubuna göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu da lastik kauçukların yüksek kullanım yüzdeleriyle (%10 - %20) daha ağır malzemelerin (doğal agregalar) yerine kullanılmasından kaynaklanmıştır. Test edilen tüm betonlar arasında en yüksek birim ağırlık %2 çelik lif içeren betonda (STF2) bulunmuştur. Bu betonun birim ağırlığı 2512 kg/m^3 olup referans betondan %5 daha yüksektir. Öte taraftan, en düşük birim ağırlık 2072 kg/m^3 olup %10 ince atık lastik kauçuk içeren betonda (FR10) bulunmuştur. Bu birim ağırlık normal betonundan %13 daha düşüktür.

4.1.2. Basınç dayanımı

Farklı katkı maddelerinin basınç dayanımı test sonuçları Çizelge 4.2.'de sunulmuştur. Şekil 4.4.'te nano katkı maddeleri grubuna ait basınç dayanımının rölatif yüzdeleri de gösterilmiştir. Çizelge ve şekilden de anlaşılacağı üzere nano katkı maddeleri betonun basınç dayanımını arttırmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi genel olarak incelenen tüm nano katkı maddeleri ve bunların kombinasyonları birbirine yakın performans göstermiştir. Genelde nano katkı maddeleri düşük içerikle ve kombinasyon halinde kullanıldığında betonun basınç dayanımının az miktarda daha iyi olduğu gözlenmiştir. Basınç dayanımı açısından en iyi sonuç %0.25 nano-SiO₂ ve %0.25 nano-Fe₂O₃ içeren betondan (NSNF0.5) elde edilmiştir. Bu betonun basınç dayanımı normal betona göre yaklaşık olarak %12 daha yüksektir.

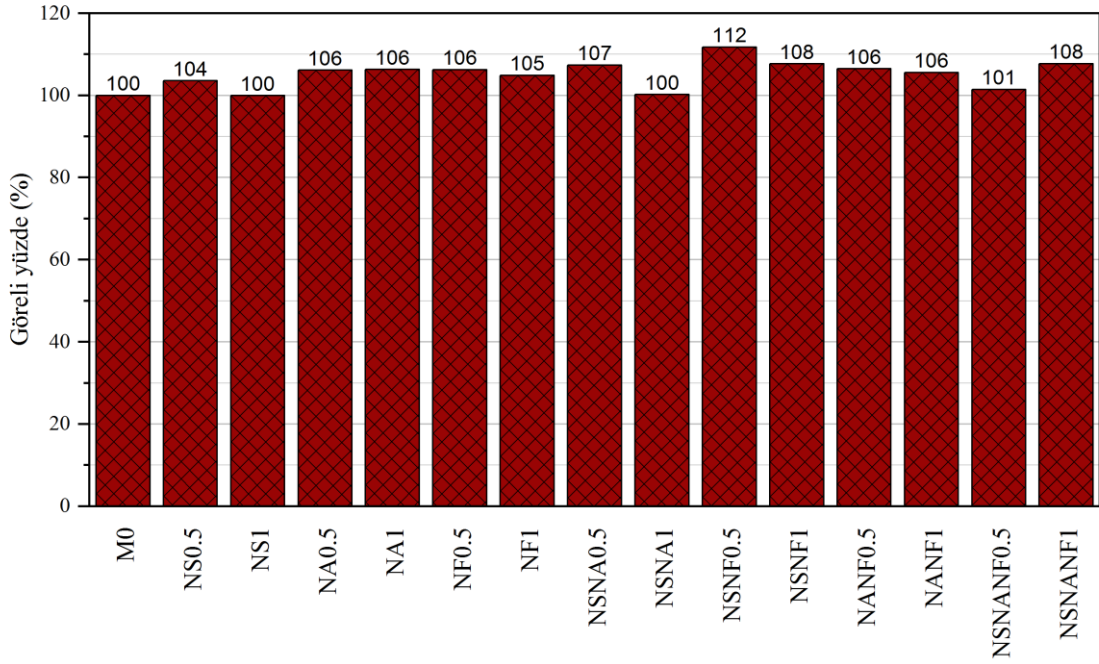
Basınç dayanımındaki artış, nano partiküllerin betonun gözenekliliğini azaltmak için bir dolgu maddesi olarak davrandığına bağlanabilir. Nano katkı maddeleri betonun mikroyapısının yoğunluğunu, kompaktlığını arttırmakta ve sonuç olarak dayanımı arttırmaktadır. Ayrıca, yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle nano katkı maddeleri hidrasyon sürecini hızlandırmak için bir aktivatör olarak davranmaktadır (Arif ve ark., 2020; Heikal ve ark., 2021; Kewalramani ve Syed, 2018; Siang Ng ve ark., 2020). Nano malzemeler betonun dayanımını azaltan büyük Ca(OH)₂ kristallerini azaltmakta ve çimento hidrasyonunun ana ürünü olan C-S-H oluşumunun yükselmesini sağlamaktadır (Al-Hagri ve Döndüren, 2022; Ankamma ve Srujan Kumar, 2022; Niewiadomski ve ark., 2018).

Ancak nano partiküller, yüksek özgül yüzey alanları nedeniyle topaklanma eğilimindedir (Bkz. Şekil 3.12.). Bu durum nano partiküllerin kullanım oranı arttıkça daha net olmaktadır. Dolayısıyla, nano partiküller içeriği arttıkça betonun basınç dayanımı

azalmaktadır. Dayanımın azalması, karışımda bulunan nano partiküllerin miktarının, serbest kalan Ca(OH)_2 partikülleri ile reaksiyona girmek için gereken miktardan daha fazla olmasından da kaynaklanabilir. Bu durumda, nano partiküller bağlayıcının yerini kısmen almakta, ancak dayanıma katkıda bulunmamaktadır. Bu da dayanımın azalmasına neden olmaktadır (Al-Hagri ve Döndüren, 2022; Mohseni ve Tsavdaridis, 2016; Seifan ve ark., 2020). Nano partiküller karışım suyunu fazlasıyla emebilmekte ve hidrasyon için gereken su miktarını yetersiz kılabilir. Bu durum, dayanımın azalmasına neden olmaktadır (Ghafari ve ark., 2014).

Çizelge 4.2. Basınç dayanımı test sonuçları

Karışım grubu	Karışım No.	Karışım kodu	Basınç dayanımı (MPa)
	1	M0	44.40
	2	NS0.5	45.98
	3	NS1	44.38
	4	NA0.5	47.13
	5	NA1	47.19
	6	NF0.5	47.17
	7	NF1	46.56
Nano katkı maddeleri grubu	8	NSNA0.5	47.67
	9	NSNA1	44.49
	10	NSNF0.5	49.61
	11	NSNF1	47.80
	12	NANF0.5	47.28
	13	NANF1	46.87
	14	NSNANF0.5	45.05
	15	NSNANF1	47.83
	16	STF1	48.50
	17	STF2	47.96
	18	PETF1	37.37
	19	PETF2	19.60
	20	PPF0.25	41.99
	21	PPF0.5	38.91
Lifler grubu	22	STFPETF1	36.96
	23	STFPETF2	39.62
	24	STF0.5PPF0.125	44.34
	25	STF1PPF0.25	45.40
	26	PETF0.5PPF0.125	40.85
	27	PETF1PPF0.25	34.01
	28	STF0.333PETF0.333PPF0.083	44.57
	29	STF0.667PETF0.667PPF0.167	34.17
	30	FR10	30.28
	31	FR20	17.81
Atık lastik kauçuklar grubu	32	CR10	36.54
	33	CR20	26.78
	34	FRCR10	35.74
	35	FRCR20	24.99

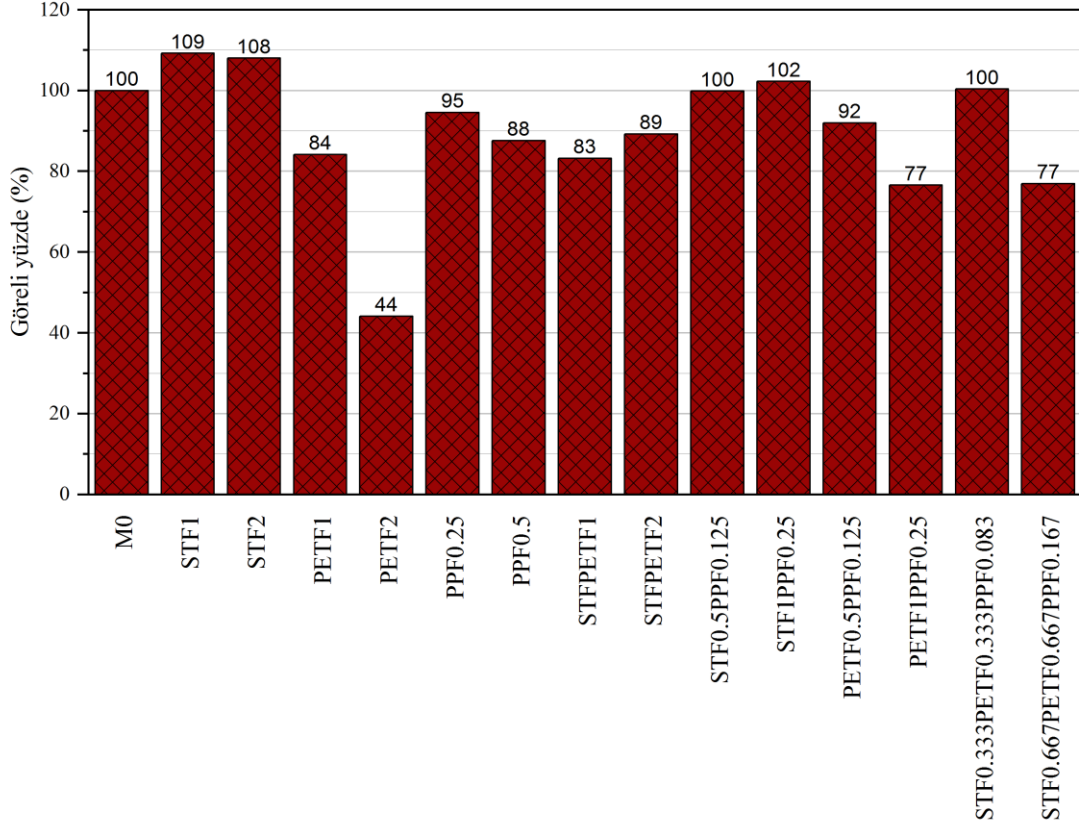


Şekil 4.4. Nano katkı maddeleri grubuna ait basınç dayanımının görelî yüzdesi

Lifler grubuna ait basınç dayanımının görelî yüzdeleri Şekil 4.5.'te sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi çelik lifler betonun basınç dayanımını arttırmışken PET ve PP lifler basınç dayanımını azaltmıştır. Bu, çelik liflerin yüksek dayanımı ve elastisite modülünden kaynaklanmaktadır. Bunun sayesinde çelik lifler diğer liflere göre daha etkili çatlak önleme ve köprüleme etkisine sahiptir (Afroughsabet ve Ozbakkaloglu, 2015). Ayrıca, çelik lifler diğer liflere göre beton karışımı ile daha iyi bir şekilde bağlanmaktadır. Bu da daha iyi bir arayüzey geçiş bölgesini sağlamaktadır. Öte yandan, PET ve PP lifler betonun gözenekliliğini artırarak dayanımı azaltmaktadır (Behzadian ve Shahrajabian, 2019; Pelisser ve ark., 2012; M. Zhang ve Li, 2011). Ayrıca, PET ve PP liflerin plastik yapısından dolayı sahip olduğu zayıf taşıma kapasitesi betonun mukavemetini azaltmaktadır (Nikbin ve ark., 2022).

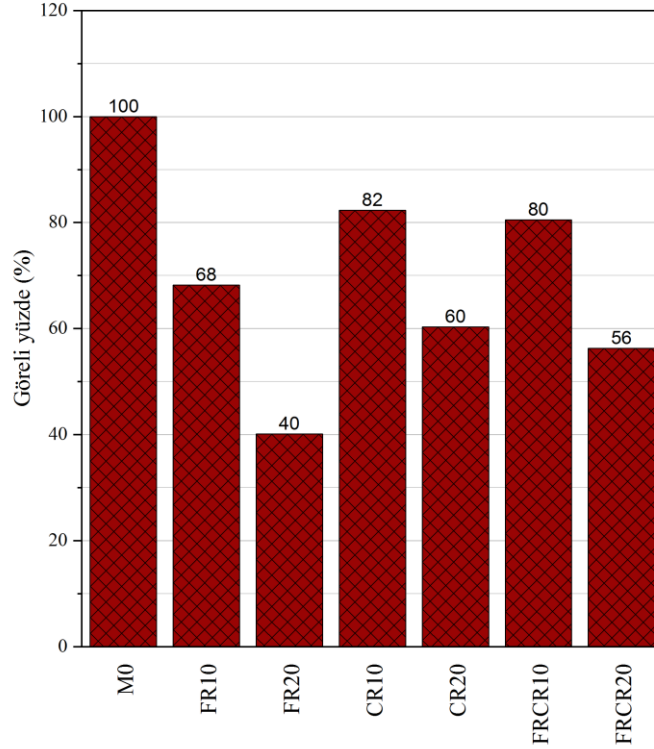
Şekil 4.5.'ten de görüldüğü gibi, genel olarak, lif içeriği arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Bu durum, liflerin kullanım oranı arttıkça artan betonun gözenekliliğinden kaynaklanmaktadır (Omidinasab ve ark., 2022). Şekilden ayrıca, PET liflerin, PP liflere göre daha düşük basınç dayanımına yol açtığı görülebilir. Bu da PET liflerin daha yüksek kullanım yüzdesine bağlanabilir. Şekilden de anlaşıldığı üzere, PET liflerin çelik lifler ve/veya PP liflerle bir bileşim halinde kullanılması, PET liflerin kullanılmasında oluşan basınç dayanımındaki kaybın %82'ye kadar geri kazanılmasına yardımcı olabilir. Ayrıca, PP liflerin, çelik liflerle bir kombinasyon şeklinde kullanılması, yalnızca PP liflerin

kullanımına kıyasla betonun basınç dayanımını arttırmaktadır. Deney sonuçlarından, basınç dayanımı açısından en iyi durumun sadece çelik lifin kullanımından elde edildiği anlaşılabilir. Lifler grubunda en iyi basınç dayanımı 48.50 MPa olup, %1 çelik lif içeren betondan (STF1) elde edilmiştir. Bu dayanım referans betondan %9 daha yüksektir.



Şekil 4.5. Lifler grubuna ait basınç dayanımının görelî yüzdesi

Şekil 4.6. atık lastik kauçuklar grubuna ilişkin basınç dayanımı test sonuçlarının rölatif yüzdelere göstermektedir. Sonuçlar, ince ve iri lastik kauçukların betonun basınç dayanımını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu azalma lastik kauçuk içeriğiyle doğru orantılıdır. İnce ve iri lastik kauçuklar yüksek oranda (%20) kullanıldığında basınç dayanımında sırasıyla %60 ve %40 civarında bir azalma oluşmuştur. Bu sonuçlar, Gerges ve ark. (2018) ve Habib ve ark. (2020) tarafından bulunan sonuçlarla uyumludur. İnce atık lastik kauçuğun basınç dayanımı üzerindeki azaltma etkisinin iri lastik kauçuktan daha yüksek olduğu izlenmiştir. Benzer bulgular L.-Y. Feng ve ark. (2021) ve Kadhim ve Al-Mutairee (2020) tarafından da bulunmuştur.



Şekil 4.6. Atık lastik kauçuklar grubuna ait basınç dayanımının görelî yüzdesi

Sonuçlardan anlaşıldığı gibi, ince ve iri lastik kauçukların bir kombinasyon halinde kullanılmasının basınç dayanımı üzerindeki azaltma etkisi ince lastik kauçuğun tek kullanılmasından daha düşüktür. %10 ince ve %10 iri lastik kauçuk, basınç dayanımını referans betona göre sırasıyla %31.8 ve %17.8 azaltmışken, %5 ince + %5 iri lastik kauçuk (FRCR10) basınç dayanımını %19.5 oranında azaltmıştır. Bu azalma yüzdesi, %10 iri lastik kauçuğun tek kullanılmasına kıyasla yaklaşık %2 daha düşüktür. FRCR20 betonunda da benzer eğilim gözlenmiştir. Bu durum, ince ve iri lastik kauçukların aynı karışımda kullanıldığında, iri lastik kauçuğun basınç dayanımı üzerinde ince lastik kauçuktan daha etkin olduğunu göstermektedir.

Atık lastik kauçuğun kullanımından kaynaklanan basınç dayanımındaki azalma, daha yüksek yük taşıma kapasitesine ve dayanıma sahip olan agregaların daha düşük performansa sahip olan lastik kauçuklarla değiştirilmesine bağlanabilir (C. Chen ve ark., 2021; Eisa ve ark., 2020; Habib ve ark., 2020). Ayrıca, agregalar ve çimento hamuru arasındaki bağa kıyasla, ara yüzey geçiş bölgesindeki (ITZ) çimento matrisi ve kauçuk partikülleri arasındaki zayıf bağdan da kaynaklanabilir. Bu da zayıf bölgelerin oluşmasına ve betonun hızlı bir şekilde hasar görmesine neden olur (Alwi Assaggaf ve ark., 2022; R. Kumar ve Dev, 2022; R. Zhang ve ark., 2022). Kauçuk partikülleri ve çimento hamuru

arasındaki zayıf bağ, kauçuk partiküllerin yüksek hidrofobikliği, dokusu ve şekli, kauçuk partiküllerin içindeki hava boşluğu, düşük işlenebilirlik, askıda kalan maddeler ve kauçuklu betonda ayrışma eğilimine bağlıdır (Alwi Assaggaf ve ark., 2022; C. Chen ve ark., 2021; Raffoul ve ark., 2016). Ayrıca lastik kauçuk partiküllerin çimento hamuruna göre daha yumuşak olması ve daha fazla şekil değiştirebilmesinden dolayı kauçuk partikülleri ile bunları çevreleyen çimento matrisi arasında rijitlik uyumsuzluğu meydana gelmektedir. Bu durum, ara geçiş bölgesinde çatlakların oluşmasına, daha hızlı yayılmasına ve sonuç olarak dayanımın azalmasına neden olur (R. Kumar ve Dev, 2022; Mousavimehr ve Nematzadeh, 2020). Yüksek Poisson oranı ve düşük rijitliği nedeniyle, kauçuk partiküller, kendilerini çevreleyen betonda dayanımı azaltan yanal çekme gerilmelerini uygulamaktadır (Raffoul ve ark., 2016). Ayrıca, düşük birim ağırlıkları nedeniyle, kauçuk partikülleri betonun hazırlanması sırasında yukarı doğru hareket edebilir ve üst katmanda yoğunlaşabilir. Bu düzensiz dağılım, basınç dayanımında da bir azalmaya neden olur (Eisa ve ark., 2020).

Farklı katkı gruplarından elde edilen basınç dayanımı test sonuçları karşılaştırıldığında, genel olarak nano katkı maddeleri ve çelik lifin, diğer katkı maddelerine göre daha iyi performans gösterdiği gözlenmiştir. Basınç dayanımı açısından en düşük performans gösteren karışım grubu ise lastik kauçuklar grubudur. Test edilen tüm betonlardan elde edilen en yüksek basınç dayanımı 49.61 MPa olup NSNF0.5 betonunda bulunmuş, en düşük basınç dayanımı ise 17.81 MPa olup FR20 betonunda bulunmuştur.

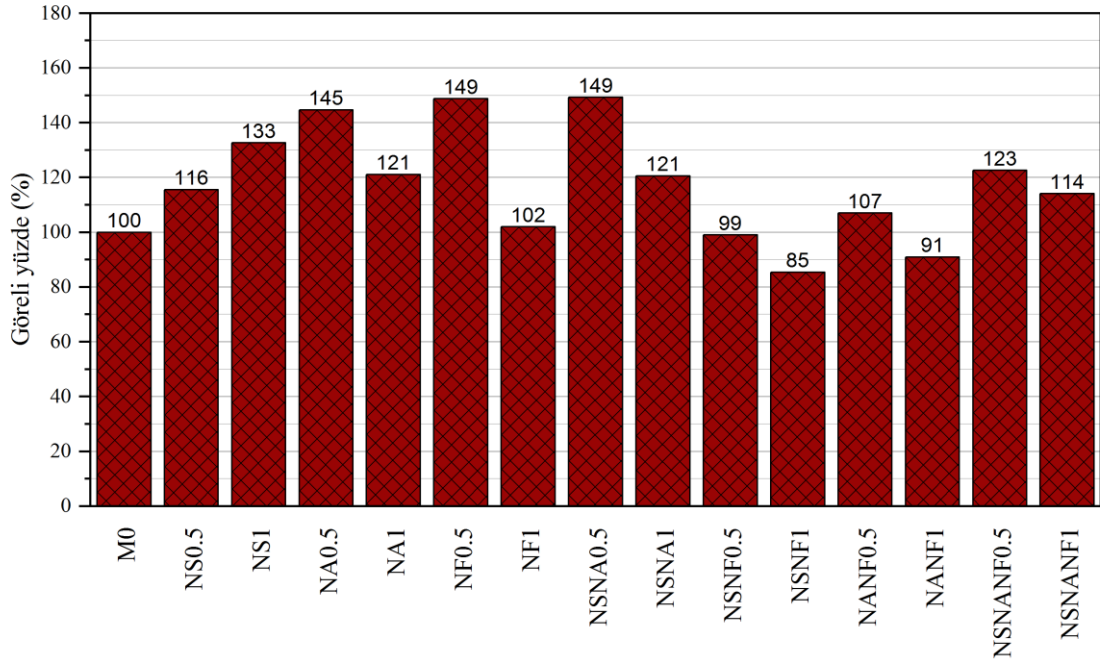
4.1.3. Yarmada çekme dayanımı

Yarmada çekme dayanımı test sonuçları Çizelge 4.3.'te verilmiştir. Şekil 4.7.'de ise nano katkı maddeleri içeren betonların yarmada çekme dayanımının referans betona göre rölatif değerleri sunulmuştur. Çizelge ve şekilden görülebildiği gibi, nano katkı maddeleri yarmada çekme dayanımını önemli ölçüde arttırabilmektedir. Nano katkı maddelerinin betonun yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi türüne ve kullanım oranına bağlıdır. Grafikten, NA ve NF'nin NS'den daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Nano katkı maddelerinin kombinasyonlar halinde kullanılması, tekil kullanımına göre yarmada çekme dayanımı üzerinde nispeten daha düşük bir etkiye sahiptir. Şekilden de görüldüğü gibi genel olarak nano katkı maddeleri içeriği arttıkça

yarmada çekme dayanımı azalmıştır. Bu grupta yarmada çekme dayanımındaki maksimum artış %40 olup, NF0.5 ve NSNA0.5 betonlarında bulunmuştur.

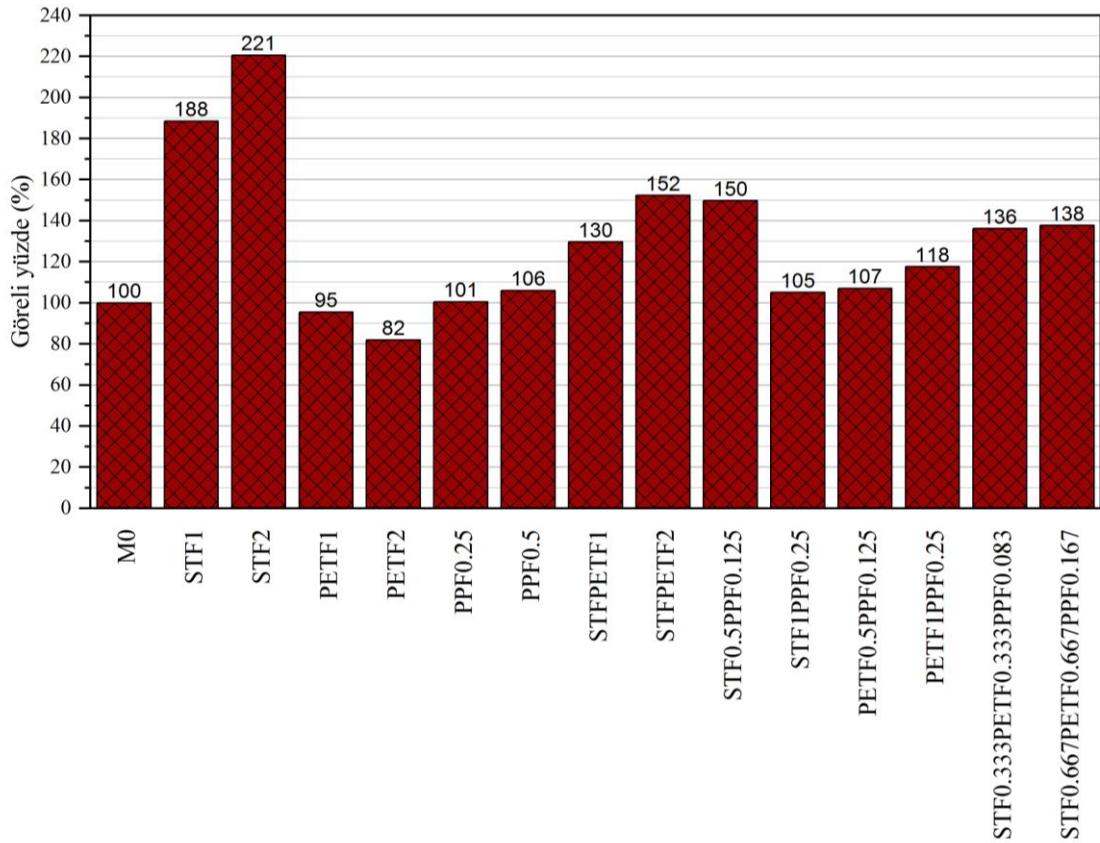
Çizelge 4.3. Yarmada çekme dayanımı test sonuçları

Karışım grubu	Karışım No.	Karışım kodu	Yarmada çekme dayanımı (MPa)
	1	M0	1.99
	2	NS0.5	2.30
	3	NS1	2.64
	4	NA0.5	2.88
	5	NA1	2.41
	6	NF0.5	2.96
	7	NF1	2.03
Nano katkı maddeleri grubu	8	NSNA0.5	2.97
	9	NSNA1	2.40
	10	NSNF0.5	1.97
	11	NSNF1	1.70
	12	NANF0.5	2.13
	13	NANF1	1.81
	14	NSNANF0.5	2.44
	15	NSNANF1	2.27
Lifler grubu	16	STF1	3.75
	17	STF2	4.39
	18	PETF1	1.90
	19	PETF2	1.63
	20	PPF0.25	2.00
	21	PPF0.5	2.11
	22	STFPETF1	2.58
	23	STFPETF2	3.03
	24	STF0.5PPF0.125	2.98
	25	STF1PPF0.25	2.09
	26	PETF0.5PPF0.125	2.13
	27	PETF1PPF0.25	2.34
	28	STF0.333PETF0.333PPF0.083	2.71
	29	STF0.667PETF0.667PPF0.167	2.74
Atık lastik kauçuklar grubu	30	FR10	2.32
	31	FR20	1.48
	32	CR10	2.11
	33	CR20	1.82
	34	FRCR10	2.40
	35	FRCR20	1.76



Şekil 4.7. Nano katkı maddeleri grubuna ait yarmada çekme dayanımının görelî yüzdesi

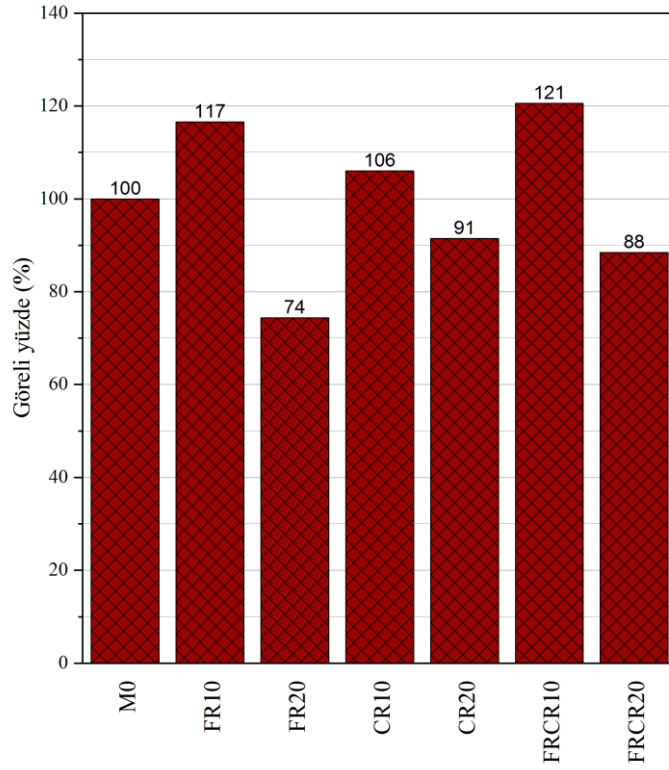
Lifler, özellikle çelik lifler, betonun yarmada çekme dayanımı üzerinde yüksek etkiye sahip olabilir. Bu durum, lifler grubuna ait yarmada çekme dayanımının görelî yüzdesini gösteren Şekil 4.8'den net bir şekilde görülebilir. Bu da liflerin çatlak köprüleme ve durdurma etkisine bağlıdır (J. J. Li ve ark., 2016). Şekilden de görüldüğü gibi, lif içeriği arttıkça yarmada çekme dayanımının genel olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca çelik lifler betonun yarmada çekme dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. PP liflerin betonun yarmada çekme dayanımı üzerinde önemli bir etki göstermediği de görülmektedir. Öte yandan, PET liflerin betonun yarmada çekme dayanımını azalttığı izlenmiştir. Çelik lifler PP ve PET liflere göre daha yüksek çekme dayanımına ve kendilerini çevreleyen betonla daha iyi aderansa sahiptir. Bu sayede çelik lifler betonun yarmada çekme dayanımını diğer liflerden çok daha fazla arttırmaktadır. Çelik lifler diğer liflerle kombinasyonlar şeklinde kullanıldığında, PET lifler ve/veya PP lifler içeren betonun yarmada çekme dayanımının çelik lifsiz duruma göre arttığı gözlenmiştir. Ancak sonuçlar çelik liflerin tekil olarak kullanıldığı duruma göre çok daha düşüktür. Lif grubunda en yüksek yarmada çekme dayanımı hacimce %2 çelik lif içeren betondan elde edilmiştir. Bu betonun yarmada çekme dayanımı 4.39 MPa olup referans betona kıyasla %121 daha yüksektir.



Şekil 4.8. Lifler grubuna ait yarmada çekme dayanımının görelî yüzdesi

Şekil 4.9. atık lastik kauçuk içeren betonların yarmada çekme dayanımının görelî yüzdelarını sunmaktadır. Şekil 4.9. ve Çizelge 4.3.'ten de anlaşılacağı üzere, lastik kauçuklar düşük oranla (hacimce %10'a kadar) kullanıldığında betonun yarmada çekme dayanımını arttırabilmektedir. Daha yüksek oranla kullanıldığında ise, yarmada çekme dayanımını önemli ölçüde azaltmaktadır. Benzer bir eğilim literatürde de verilmektedir (Manoharan ve ark., 2019). İnce atık lastik kauçuk %10 oranında kullanıldığında %10 iri atık lastik kauçuktan daha iyi bir yarmada çekme dayanımı göstermiştir. Ancak %20 kullanım oranı için ters bir durum gözlenmiştir. %5 İnce ve %5 iri lastik kauçuk bir kombinasyon halinde kullanılması yarmada çekme dayanımını %21 oranında arttırmıştır. Bu beton kauçuklar grubunda yarmada çekme dayanımının açısından en iyi performans gösteren betondur. Öte yandan, %10 FR + %10 CR kombinasyonu içeren beton daha düşük bir performans göstermiştir. Yarmada çekme dayanımındaki azalma, çimento matrisi ve kauçuk partiküller arasında bulunan ve doğal agregalara kıyasla zayıf olan bağa bağlanabilir. Bu nedenle, kauçuklu beton bir çekme gerilmesine maruz kaldığında, kauçuk partiküller ve etrafındaki çimento hamuru arasında bulunan boşlukların boyutu

hızlı bir şekilde artmakta ve dolayısıyla çekme dayanımı azalmaktadır (Eisa ve ark., 2020; R. Kumar ve Dev, 2022).



Şekil 4.9. Atık lastik kauçuklar grubuna ait yarmada çekme dayanımının görelî yüzdesi

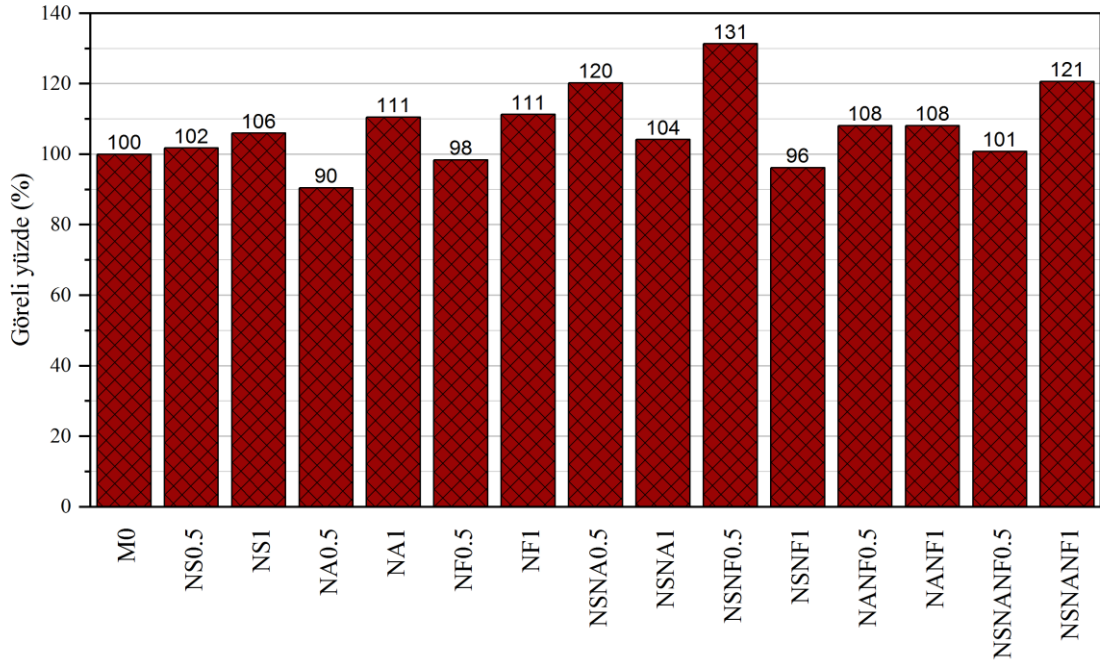
Yarmada çekme dayanımı test sonuçları incelendiğinde, bu çalışmada kullanılan tüm katkı maddeleri arasında en yüksek performans çelik lifte bulunmuştur. Bu da çelik liflerin çatlakların ilerlemesini engellemedeki etkisinin diğer katkı maddelerine göre daha üstün olduğuna bağlıdır. %2 çelik lif içeren betonun, yarmada çekme dayanımı açısından en yüksek performans gösteren beton olduğu bulunmuştur. Bu beton, normal betonunkinden %121 daha yüksek olan 4.39 MPa'lık yarmada çekme dayanımına sahiptir. Öte taraftan, atık lastik kauçukların diğer katkı maddelerine göre daha düşük performans gösterdiği izlenmiştir. Genel olarak elde edilen en düşük yarmada çekme dayanımı 1.48 MPa olup %20 ince lastik kauçuk içeren betondan bulunmuştur.

4.1.4. Eğilme dayanımı

Farklı katkı maddeleri gruplarına ait eğilme dayanımının test sonuçları Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Nano katkı maddeleri grubuna ait referans betona göre hesaplanan eğilme dayanımı görelî yüzdesi Şekil 4.10.'da gösterilmiştir. Test sonuçlarından nano katkı maddelerinin kullanımının betonun eğilme dayanımını arttırdığı görülmektedir. Bu katkı maddeleri grubunda en yüksek eğilme dayanımı %0.25 nano SiO₂ + 0.25 nano-Fe₂O₃ kombinasyonu içeren betonda bulunmuştur. Bu beton, normal betona göre %31 daha yüksek olan 6.62 MPa eğilme dayanımına sahiptir. Şekilden de anlaşılacağı üzere incelenen nano katkı maddelerinin kombinasyonlarının çoğu eğilme dayanımı üzerinde dikkate değer bir artış göstermemiştir.

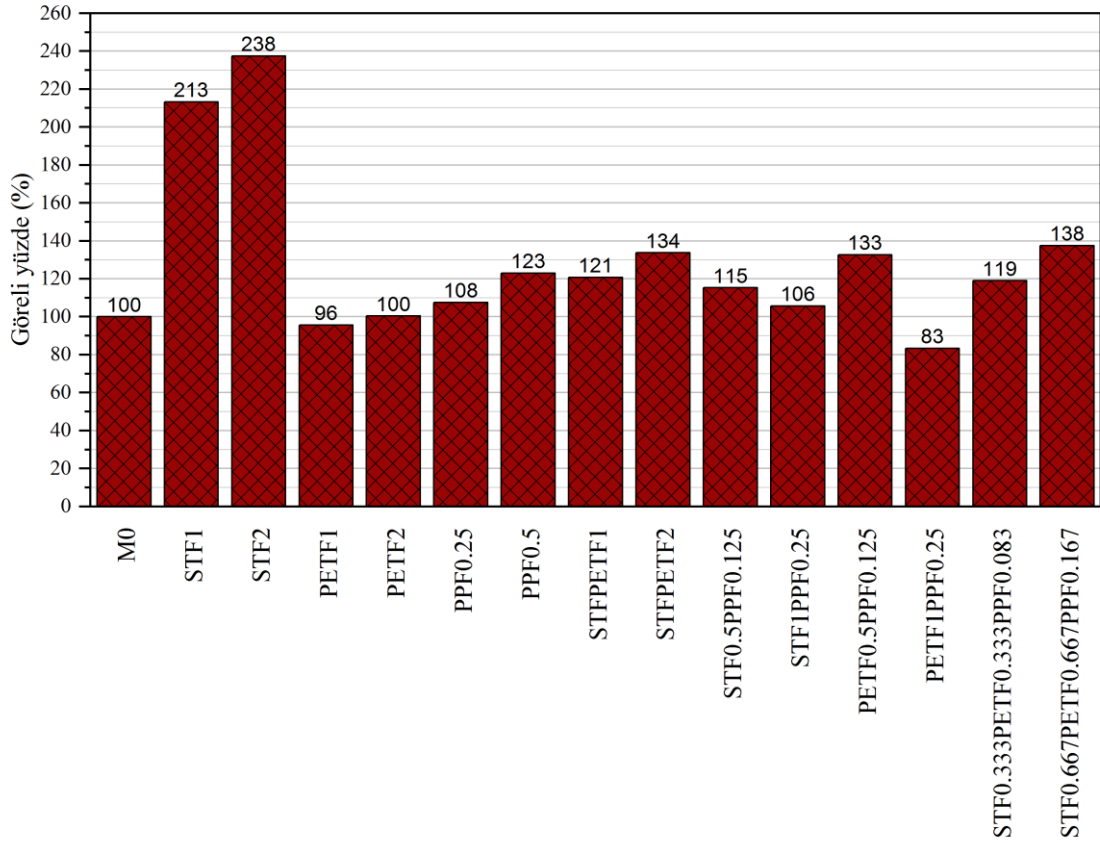
Çizelge 4.4. Eğilme dayanımı test sonuçları

Karışım grubu	Karışım No.	Karışım kodu	Eğilme dayanımı (MPa)
	1	M0	5.04
	2	NS0.5	5.13
	3	NS1	5.34
	4	NA0.5	4.56
	5	NA1	5.57
	6	NF0.5	4.96
	7	NF1	5.61
Nano katkı maddeleri grubu	8	NSNA0.5	6.06
	9	NSNA1	5.25
	10	NSNF0.5	6.62
	11	NSNF1	4.85
	12	NANF0.5	5.45
	13	NANF1	5.45
	14	NSNANF0.5	5.08
	15	NSNANF1	6.08
	16	STF1	10.75
	17	STF2	11.97
	18	PETF1	4.82
	19	PETF2	5.06
	20	PPF0.25	5.42
	21	PPF0.5	6.20
Lifler grubu	22	STFPETF1	6.09
	23	STFPETF2	6.74
	24	STF0.5PPF0.125	5.81
	25	STF1PPF0.25	5.33
	26	PETF0.5PPF0.125	6.69
	27	PETF1PPF0.25	4.20
	28	STF0.333PETF0.333PPF0.083	6.00
	29	STF0.667PETF0.667PPF0.167	6.93
	30	FR10	4.89
	31	FR20	3.24
Atık lastik kauçuklar grubu	32	CR10	5.15
	33	CR20	3.87
	34	FRCR10	4.94
	35	FRCR20	3.58



Şekil 4.10. Nano katkı maddeleri grubuna ait eğilme dayanımı görelî yüzdesi

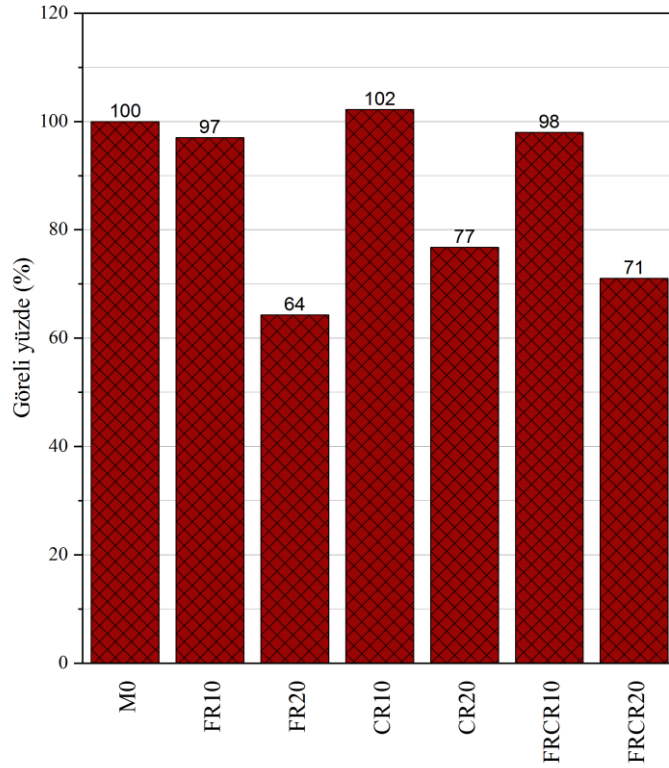
Şekil 4.11. lif donatılı betonlara ait eğilme dayanımı görelî yüzdelerini göstermektedir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, lifler betonun eğilme dayanımını arttırmaktadır. Bu artışın genellikle lif içeriğiyle doğru orantılı olduğu izlenmiştir. Bu artış liflerin çatlak köprüleme ve durdurma etkisine bağlanabilir (Dey ve ark., 2014; J. J. Li ve ark., 2016). Şekilden de görüldüğü gibi, çelik lifler diğer liflere göre üstün bir etkiye sahiptir. Bu da daha önce belirtildiği gibi, çelik liflerin daha yüksek çekme dayanımı ve çevreleyen betonla daha iyi bağlanmasına bağlıdır. Ayrıca PET liflerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi PP liflere göre daha düşüktür. Çelik lifin PET ve/veya PP lifler ile kombinasyon halinde kullanılması, çelik lifin kullanılmadığı duruma kıyasla eğilme dayanımını arttırmıştır. Ancak çelik lifin tekil olarak kullanılması çok daha yüksek performans göstermiştir. %1 ve %2 çelik lif kullanımı eğilme dayanımını sırasıyla %113 ve %138 oranlarında arttırmıştır.



Şekil 4.11. Lifler grubuna ait eğilme dayanımı görelî yüzdesi

Şekil 4.12. atık lastik kauçuklar grubuna ait eğilme dayanımı rölâtif yüzdelerinî göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, ince ve iri lastik kauçuğun kullanımının, özellikle yüksek oranlarla, genel olarak betonun eğilme dayanımını azalttığı bulunmuştur. Azalmanın betondaki lastik kauçuk içeriği ile orantılı olduğu görülmüştür. Benzer bir eğilim literatürde bulunan diğeri araştırmalarda da görülmüştür (C. Chen ve ark., 2021; Eisa ve ark., 2020; W. Feng ve ark., 2018, 2019; Thomas ve Chandra Gupta, 2016; Zafar ve ark., 2022). CR10 hariç bu çalışmada incelenen tüm kauçuklu betonlar, normal betondan daha düşük eğilme dayanımı göstermiştir. CR10, referans betona göre %2.26 oranında daha yüksek bir eğilme dayanımı göstermiştir. Bu da FR10 ve FRCR10 betonlarına göre sırasıyla %5.32 ve %4.25 daha yüksektir. FR'nin eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin CR'den daha kötü olduğu gözlenmiştir. Bu farkın, yüksek kullanım oranlarında daha da yüksek olduğu bulunmuştur. %20 CR eğilme dayanımı üzerinde %20 FR'den %19.44 daha iyi bir etki göstermiştir. Literatürde de benzer sonuçlar sunulmuştur (Kadhim ve Al-Mutairee, 2020). FR ve CR'nin bileşimlerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin, FR ve CR'nin tekil etkilerinin ortalamasına yakın olduğu bulunmuştur. Atık lastik kauçuk içeren betonun normal betona kıyasla daha düşük eğilme dayanımının ana

nedeni kauçuk partikülleri ve çimento matrisi arasındaki zayıf bağıdır (Eisa ve ark., 2020; Gravina ve Xie, 2022; Mousavimehr ve Nematzadeh, 2020).



Şekil 4.12. Atık lastik kauçuklar grubuna ait eğilme dayanımı görelî yüzdesi

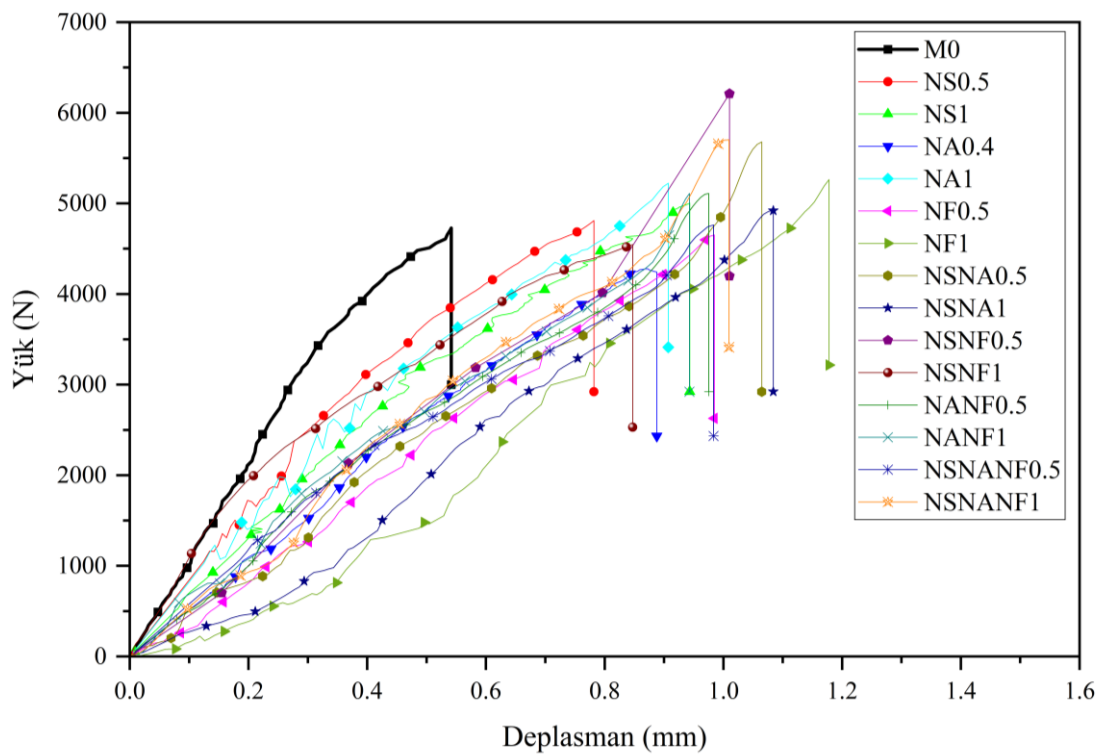
Farklı katkı maddeleri gruplarının eğilme dayanımı testinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde liflerin eğilme dayanımı üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu ve bunlardan sonra nano katkı maddelerinin geldiği izlenmiştir. En kötü performans atık lastik kauçuklar grubunda görülmüştür. Ayrıca incelenen tüm katkı maddeleri arasında en yüksek etkinin çelik liflerden elde edildiği bulunmuştur. Öte yandan en düşük eğilme mukavemeti, %20 ince lastik kauçuk içeren betonda izlenmiştir. Bu beton, referans betona göre %36 oranında daha düşük olan 3.24 MPa eğilme dayanımına sahiptir.

4.1.5. Tokluk özellikleri

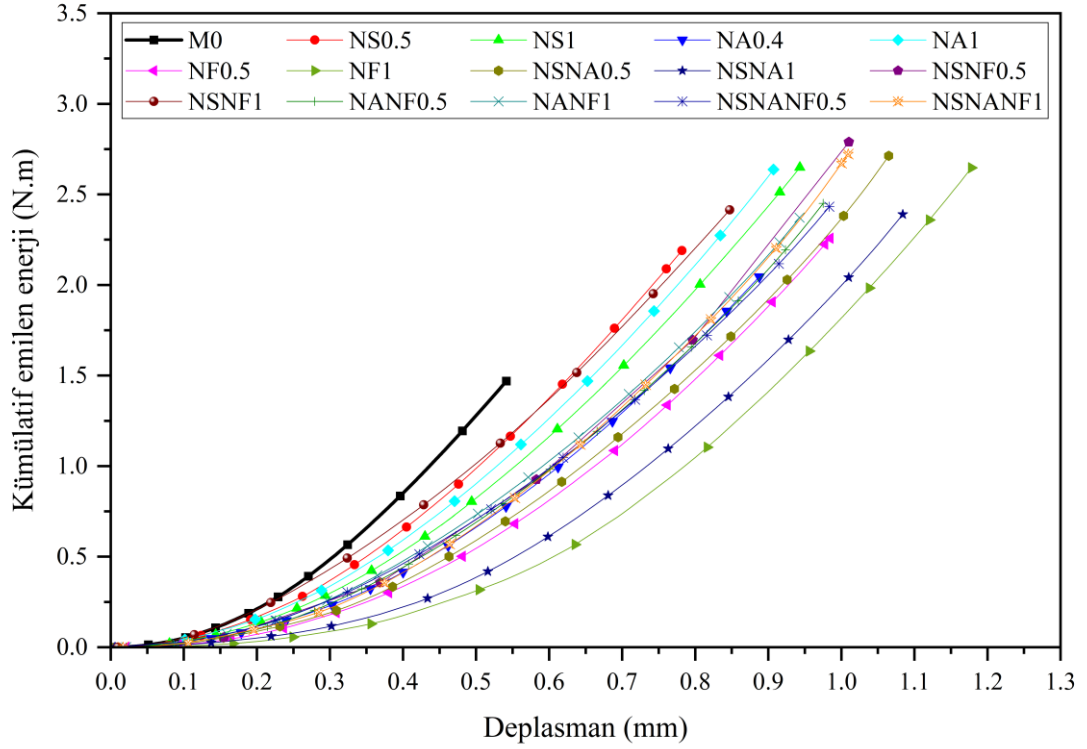
4.1.5.1. Yük-deplasman ve kümülatif emilen enerji-deplasman eğrileri

Gerçekleştirilen dört nokta eğilme deneyinde farklı numunelerin yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler kullanılarak kümülatif emilen enerji-deplasman eğrileri de bulunmuştur. Nano katkı maddeleri grubuna ait yük-deplasman eğrileri ve kümülatif

emilen enerji-deplasman eğrileri sırasıyla Şekil 4.13. ve Şekil 4.14.'te verilmiştir. Kümülatif emilen enerji, yük-deplasman grafiğinin altındaki alandan hesaplanmıştır. Şekil 4.13.'ten de görüldüğü gibi referans beton ve nano katkı maddeleri içeren betonlar gevrek bir davranış göstermiştir. Bu betonlar, yükün maksimum değerine ulaştığında ani bir şekilde kırılmıştır. Ayrıca eğilme yükü altında, nano katkı maddeleri, türüne ve kullanım oranına bakılmaksızın yakın bir davranış göstermiştir. Bu davranış normal betonun davranışına benzemektedir. Bunun dışında nano katkı maddeleri içeren betonlar normal betona göre daha yüksek bir deplasman altında kırılmıştır. Bu da betonun enerji yutma kapasitesinin artmasını sağlamıştır.



Şekil 4.13. Nano katkı maddeleri grubuna ait yük-deplasman eğrileri

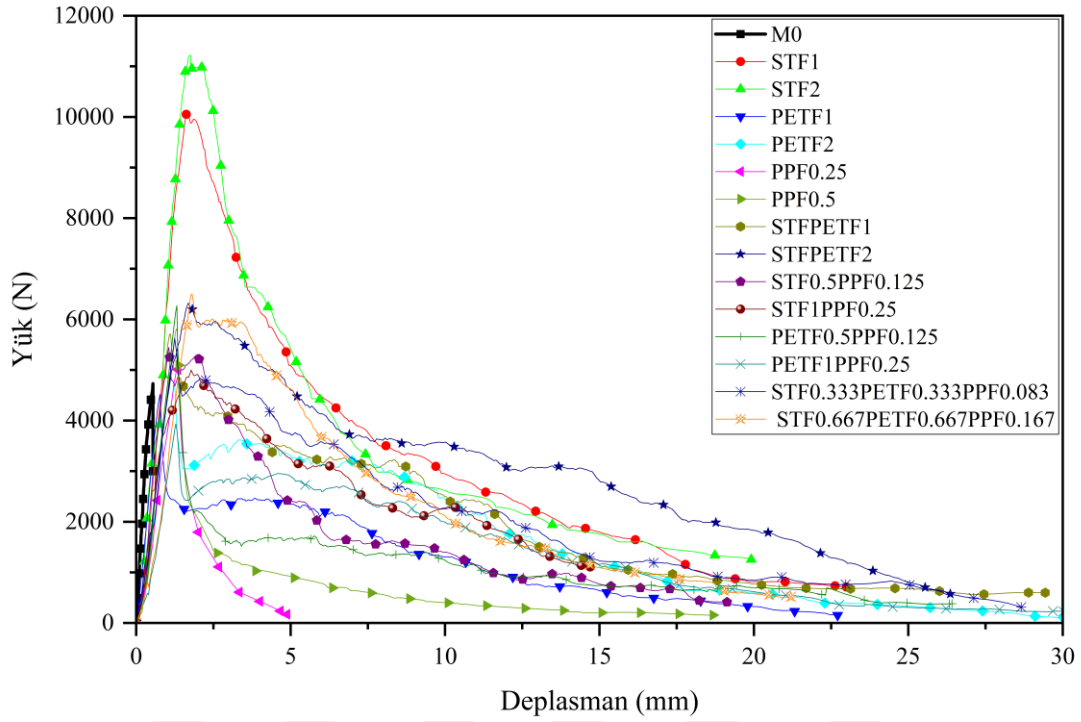


Şekil 4.14. Nano katkı maddeleri grubuna ait kümülatif emilen enerji-deplasman eğrileri

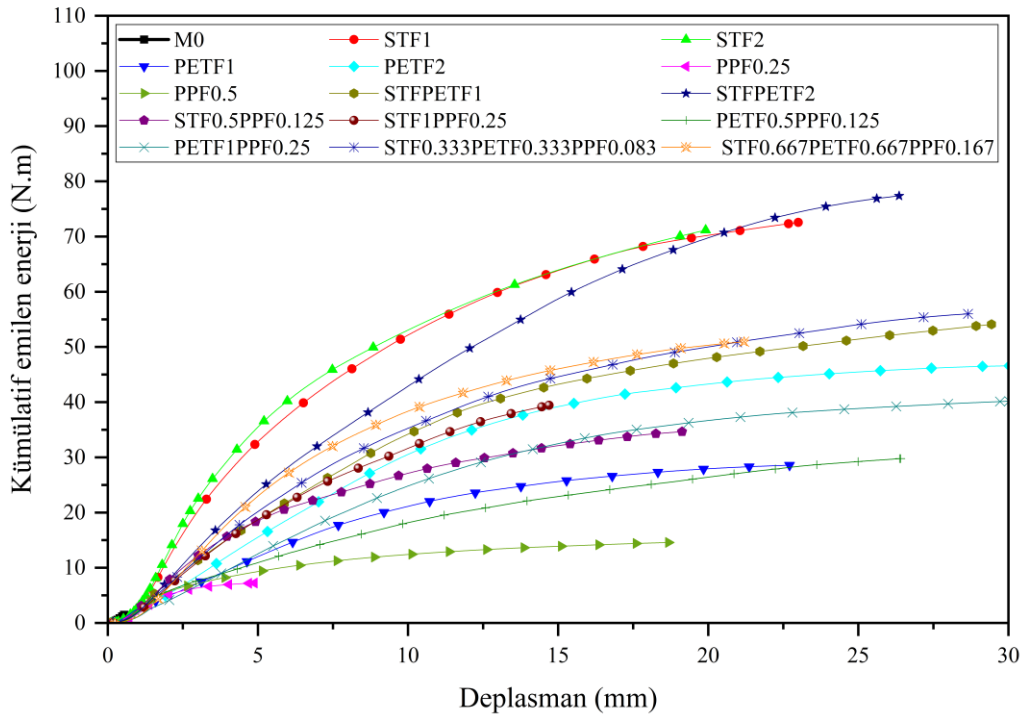
Şekil 4.15. lifler grubuna ait yük-deplasman grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.16.'da ise bu gruba ait kümülatif emilen enerji-deplasman grafikleri sunulmuştur. Şekillerden de görüldüğü gibi lifler betonun sünekliğini önemli ölçüde arttırmaktadır. Lif donatılı betonlar, ilk çatlak oluşumundan sonra gevrek bir şekilde kırılmayıp önemli miktarda enerji yutmayı devam etmektedir. Lifler, çatlakların ilerlemesini engellemekte ve çatlakların iki tarafı arasında köprüler oluşturmaktadır. Bu, gerilmenin çatlakların iki tarafı arasında aktarılmasını ve betonun gevrek davranışının daha sünek bir davranışa dönüşmesini sağlamaktadır. Şekil 4.17. liflerin çatlak köprüleme etkisini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, lifler, çatlakların iki tarafı arasında uzanmıştır. Bu etkinin sayesinde betonun sünekliği ve enerji yutma kapasitesi önemli ölçüde artmıştır.

Şekillerden de anlaşılacağı üzere, çelik lifler betonun sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini PET ve PP liflerine kıyasla çok daha fazla arttırmıştır. Çelik lifler diğer liflerden daha yüksek çekme dayanımına ve betonla daha iyi bir aderansa sahiptir. Ayrıca kanca uçlu çelik lifin iki yanında bulunan kancalar beton ve lif arasındaki bağı güçlendirerek lifin sıyrılmasını engellemektedir (Omidinasab ve ark., 2022). Öte yandan, PET ve PP lifler, daha düşük çekme dayanımına sahip olan nispeten düz liflerdir. Ayrıca, PET liflerin pürüzsüz bir yüzeyi bulunmaktadır. Bu nedenle PET lifler genelde kopmadan

betondan hızlı bir şekilde sıyrılmaktadır. Betondan sıyrılan bir PET lifin örneği Şekil 4.17.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Lifler grubuna ait yük-deplasman eğrileri



Şekil 4.16. Lifler grubuna ait kümülatif emilen enerji-deplasman eğrileri

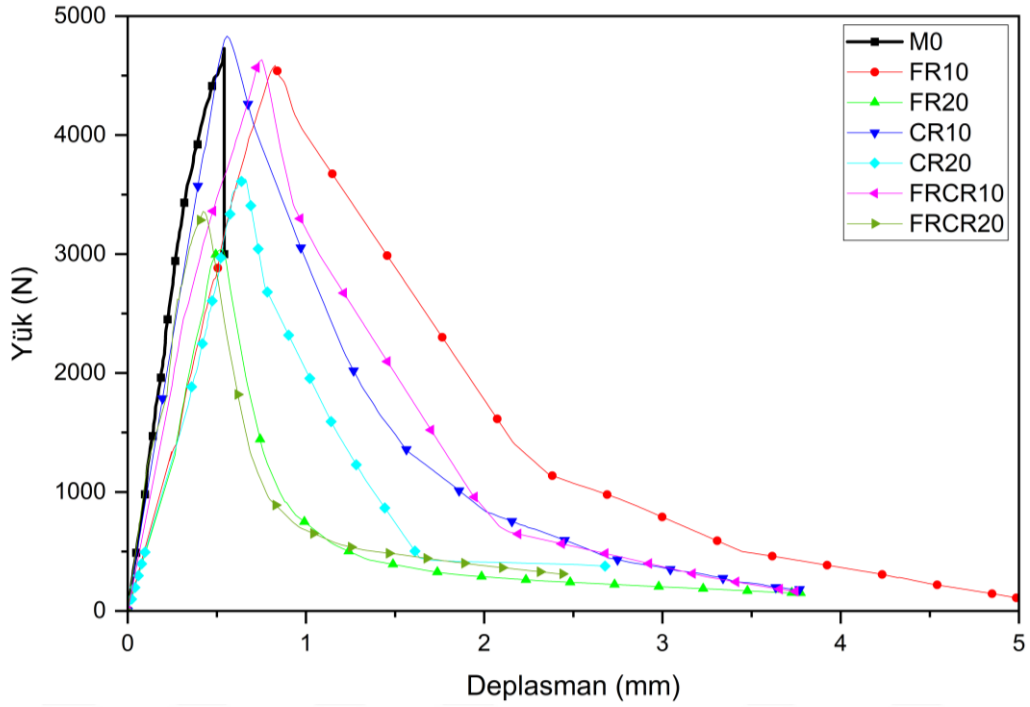


Şekil 4.17. Liflerin çatlak köprüleme etkisi

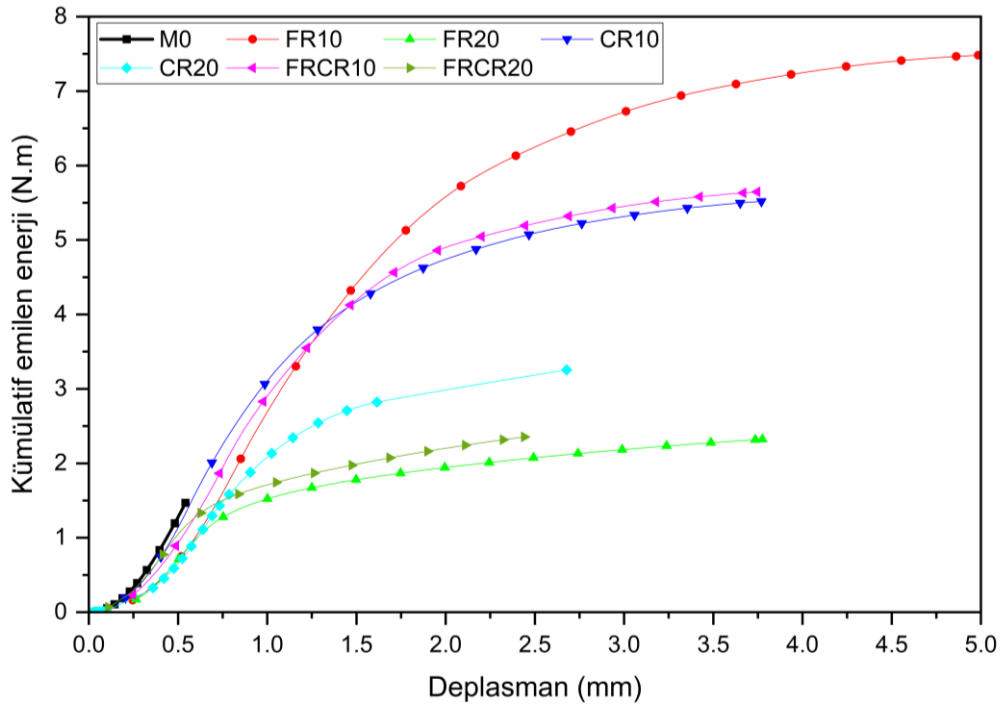
Şekil 4.18. ve Şekil 4.19. lastik kauçuk içeren betonların sırasıyla yük-deplasman eğrilerini ve kümülatif yutulan enerji-deplasman eğrilerini göstermektedir. FR ve CR'nin betonun yük taşıma kapasitesini azalttığı, ancak enerji yutma kapasitesini ve sünekliğini önemli ölçüde arttırdığı şekillerden anlaşılmaktadır. Yük-deplasman eğrilerinden görülebileceği gibi, FR ve CR'nin kullanılması, betonun gevrek davranışını daha sünek bir davranışa dönüştürmüş ve betona birim deformasyon yumuşama davranışı kazandırmıştır. Lastik kauçuk içeren beton maksimum yükten sonra bir miktar enerji emmeye devam etmiştir. Bu da kauçuklu betonda çatlak ilerlemesinin normal betona göre daha yavaş olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, şekillerden de görüldüğü gibi, betonun sünekliği ve enerji yutma kapasitesi önemli ölçüde artmıştır. Bu sonuçlar, FR ve CR'nin betonun şekil değiştirme kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Bu, lastik kauçuk partiküllerin yüksek plastik enerji yutma kapasitesine ve çatlak ucundaki gerilmelerin konsantrasyonunu azaltma etkisine bağlanabilir. Bu da, mikro çatlakların birleşmesini ve yayılmasını geciktirmektedir (Al-Tayeb, Abu Bakar, Akil, ve ark., 2013; Habib ve ark., 2020). Reda Taha ve ark. (2008)'ye göre kauçuklu betonun enerji yutma kapasitesi, lastik kauçuk partiküllerin çatlak hizasında betondan sıyrılmasıyla ve lastik kauçuk partiküllerin içindeki yoğun mikro çatlama ile daha da fazla artmaktadır. Şekil 4.20. çatlak yolunda betondan sıyrılmış lastik kauçuk partiküllerini göstermektedir.

Sonuçlar, bu davranışın lastik kauçuk az içerikle kullanıldığında daha net olduğunu göstermiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere, lastik kauçuğun yüksek oranla kullanılması betonun enerji emme kapasitesini ve sünekliğini az kullanım oranına göre azaltmaktadır. Bu, lastik kauçuk kullanımı nedeniyle betonun dayanımında oluşan ciddi

azalmaya bağlanabilir. Ayrıca, lastik kauçuk kullanım oranı yükseldikçe betonun gözenekliliği de artmaktadır (Gupta ve ark., 2015; Pelisser ve ark., 2011). Bu da çatlakların daha hızlı yayılmasına ve numunelerin daha hızlı kırılmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.18. Atık lastik kauçuklar grubuna ait yük-deplasman eğrileri



Şekil 4.19. Atık lastik kauçuklar grubuna ait kümülatif emilen enerji-deplasman eğrileri



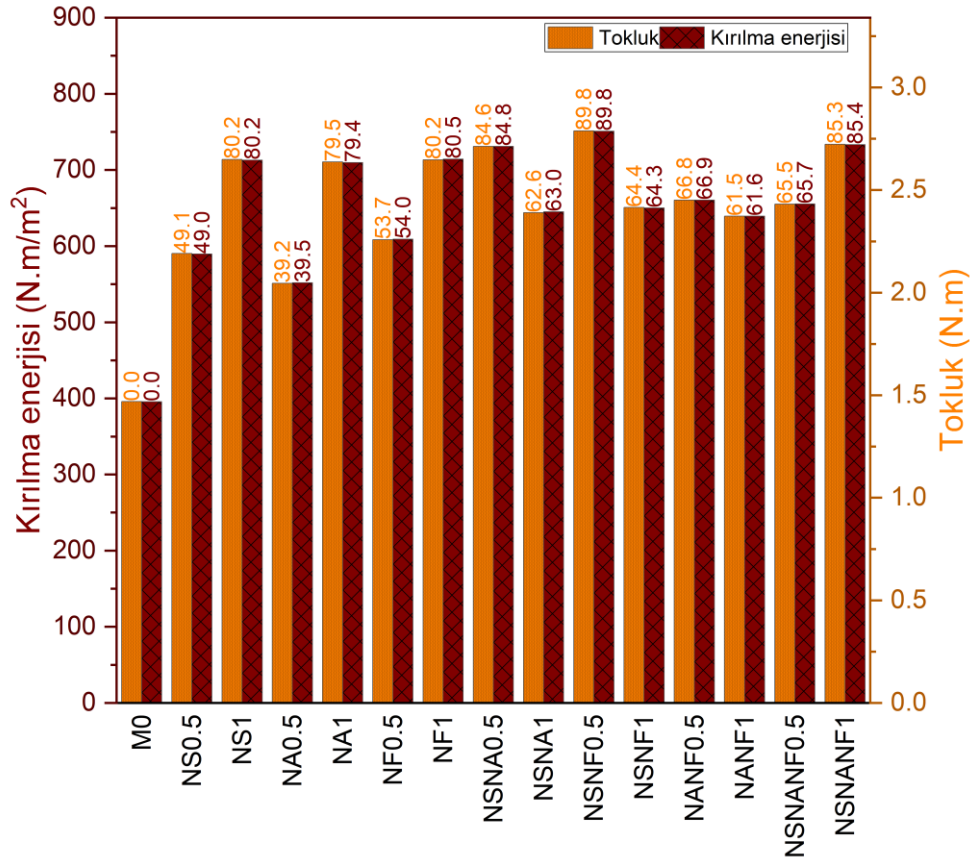
Şekil 4.20. Çatlak yolundaki kauçuk partiküllerinin sıyrılması

Farklı katkı maddeleri gruplarından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, liflerin betonun süneklik ve enerji emme kapasitesini arttırmada en etkili katkı maddeleri olduğu görülmüştür. Bu durum, liflerin çatlak yolunda köprü oluşturmada ve çatlakların yayılmasını engellemede çok etkili olmasına bağlıdır. Süneklik ve enerji emme kapasitesi açısından en yüksek performans çelik lif içeren betonlarda bulunmuşken en düşük performans referans beton ve nano katkı maddeleri içeren betonlarda bulunmuştur.

4.1.5.2. Eğilme tokluğu ve kırılma enerjisi

İncelenen betonlar için eğilme tokluğu ve kırılma enerjisi elde edilmiştir. Şekil 4.21. nano katkı maddeleri içeren betonların kırılma enerjisi ve tokluğunu göstermektedir. Şekilde sütunlardaki değerler, referans betona kıyasla kırılma enerjisi ve tokluktaki artış yüzdesini temsil etmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, nano katkı maddeleri betonun tokluğunu ve kırılma enerjisini %90'a kadar arttırmıştır. Nano katkı maddeleri ayrı ayrı kullanıldığında, kullanım oranı arttıkça kırılma enerjisi ve tokluğun arttığı de izlenmiştir. Nano katkı maddeleri kombinasyon halinde kullanıldığında ters bir durum görülmüştür. Bu grupta en iyi sonuçlar NSNF0.5 içeren betonda bulunmuştur. Bu kombinasyon, normal betonun kırılma enerjisini ve tokluğunu sırasıyla 395.65 N.m/m^2 ve 1.47 N.m değerlerinden 731.01 N.m/m^2 ve 2.71 N.m 'ye değerlerine yükseltmiştir. Şekilden kırılma enerjisi ve tokluktaki artış yüzdelerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, tokluğun 2 mm deplasmana kadar hesaplanmış olmasıdır. Bu gruptaki tüm numuneler 2 mm'den daha az bir deplasman altında kırılmıştır. Tokluk ve kırılma

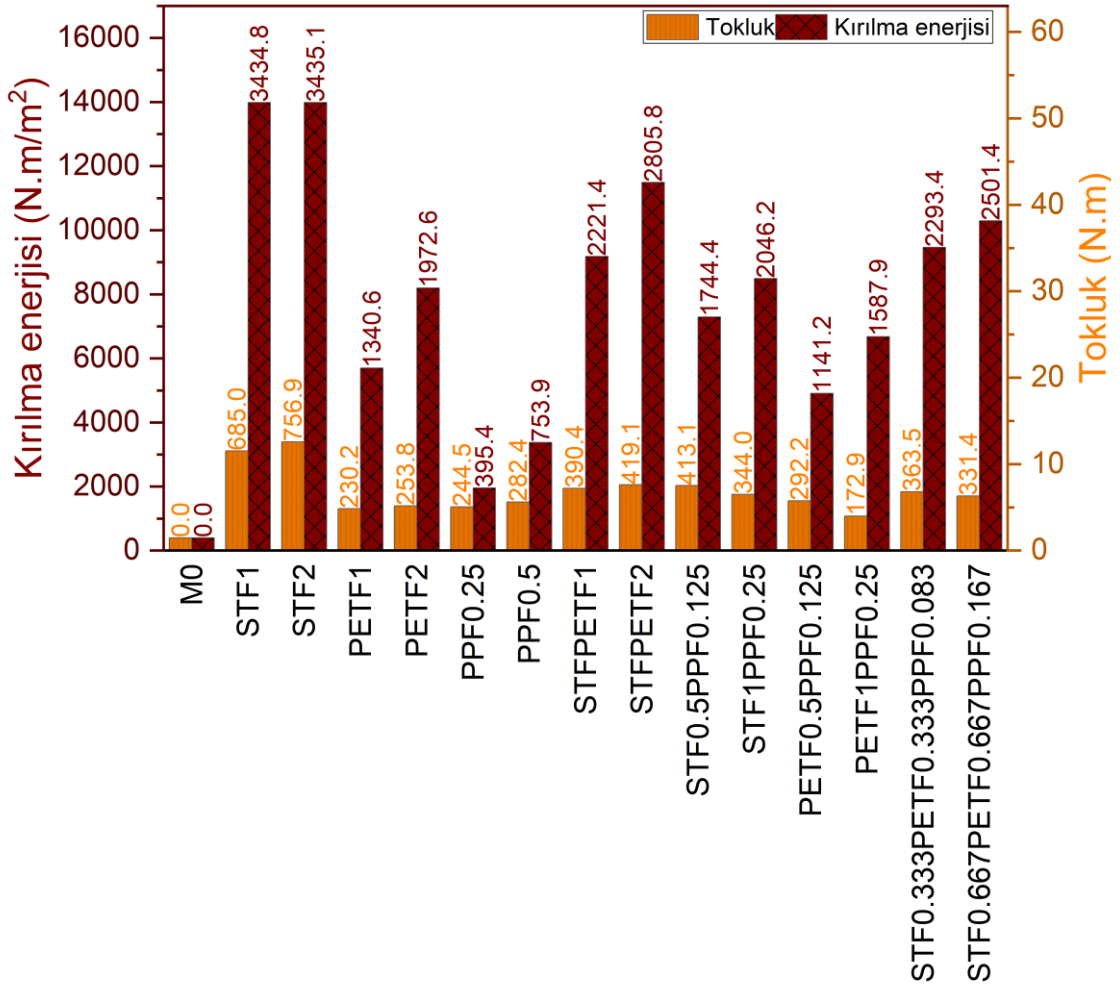
enerjisindeki artış yüzdelерinin yakın olması numunelerin öz ağırlığının kırılma enerjisi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir (Bkz. denklem (3.5)). Bu da, testte kullanılan numunenin küçük boyutlara sahip olmasına bağlıdır.



Şekil 4.21. Nano katkı maddeleri grubuna ait kırılma enerjisi ve eğilme tokluğu

Lif donatılı betonların kırılma enerjisi ve tokluğu Şekil 4.22.'de gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, lifler betonun kırılma enerjisini ve tokluğunu kayda değer ölçüde arttırmıştır. Bu artışın liflerin kullanım yüzdeleri ile orantılı olduğu izlenmiştir. Liflerin kırılma enerjisi üzerindeki etkisinin, tokluk üzerindeki etkisinden çok daha fazla olduğu da görülmektedir. Bu, tokluk yalnızca 2 mm'lik bir deplasmana kadar ve kırılma enerjisi 10 mm'lik bir deplasmana kadar hesaplandığından kaynaklanmaktadır. Şekil, çelik liflerin tokluğu ve kırılma enerjisini PET ve PP liflere göre çok daha fazla arttırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca PP liflerin kırılma enerjisi üzerindeki etkisinin PET liflere göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, PP liflerin kullanım oranının daha düşük olmasına bağlanabilir. Ayrıca PP lifler, PET liflerden daha kısadır. Bu da PET liflere göre PP liflerin betondan daha hızlı sıyrılmasına neden olmaktadır. Çelik liflerin,

PET ve/veya PP liflerle birlikte kullanıldığında çelik lifsiz duruma göre betonun tokluğunu ve kırılma enerjisini arttırdığı da izlenmiştir. Ancak sadece çelik lif kullanımına göre performansın çok daha düşük olduğu bulunmuştur. Kırılma enerjisi ve tokluktaki en iyi performans %2 çelik lif içeren betondan elde edilmiştir. Bu betonun kırılma enerjisi ve tokluğu normal betondan sırasıyla %757 ve %3435 daha yüksektir.

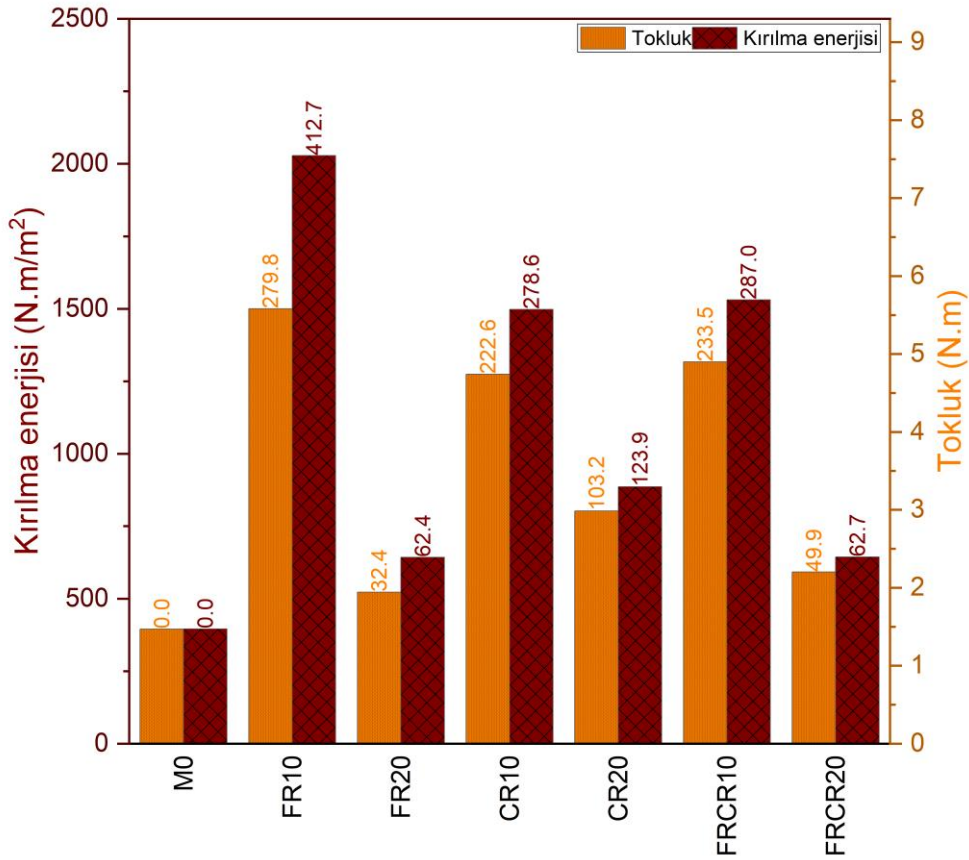


Şekil 4.22. Lifler grubuna ait kırılma enerjisi ve eğilme tokluğu

Atık lastik kauçuk içeren betonun eğilme tokluğu ve kırılma enerjisi sonuçları Şekil 4.23'te sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi, FR ve CR, özellikle düşük kullanım yüzdelerinde betonun eğilme tokluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Benzer sonuçlar literatürde de belirtilmiştir (Habib ve ark., 2020). Sonuçlar, lastik kauçuk içeriği %10'dan fazla arttığında, eğilme tokluğu üzerindeki etkisinin önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, FR ve CR %20 oranında kullanıldığında, betonun tokluğunda yine de iyi bir performans ortaya çıkmıştır. Sonuçlar ayrıca, lastik kauçuk

kullanım oranı %10 olduğunda, FR'nin betonun tokluğunu CR'den çok daha fazla arttırdığını göstermiştir. Daha yüksek kullanım oranı durumunda ise, CR daha iyi bir performans göstermiştir. İki tip lastik kauçuk bir kombinasyon halinde kullanıldığında tokluk değerleri tekil olarak kullanıldığında ortalama değerlerinden biraz daha düşük olmuştur.

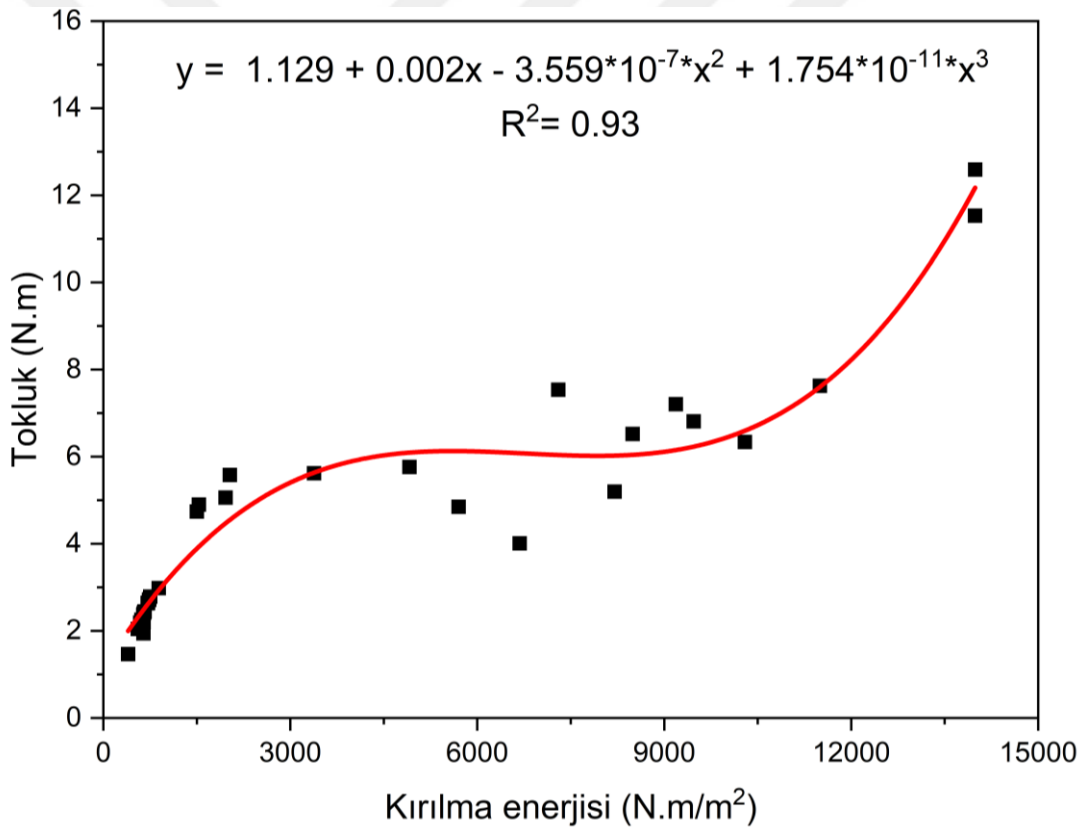
Şekil 4.23.'ten görülebileceği gibi, betonun kırılma enerjisi için de benzer bir eğilim gözlenmiştir. Kırılma enerjisindeki maksimum artış M0, CR10 ve FRCR10'dan sırasıyla %412.7, %35.4 ve %32.5 oranlarında daha yüksek kırılma enerjisine sahip olan FR10'da bulunmuştur. Benzer kırılma enerjisi davranışı literatürde de rapor edilmiştir. Han ve ark. (2018) ve Grinys ve ark. (2013) yaptıkları çalışmalarda, lastik kauçuk partiküllerinin miktarı belirli bir orana kadar arttığında kauçuklu betonun kırılma enerjisinin arttığını ve daha yüksek oranlarda kademeli olarak azalmaya başladığını bulmuşlardır. Sonuçlar ayrıca, lastik kauçukların kırılma enerjisi üzerindeki etkisinin tokluk üzerindeki etkisinden daha fazla olduğunu da göstermektedir.



Şekil 4.23. Atık lastik kauçuklar grubuna ait kırılma enerjisi ve eğilme tokluğu

Yukarıda bahsedilen sonuçlardan anlaşıldığı üzere, liflerin eğilme tokluğu ve kırılma enerjisi üzerindeki etkisi lastik kauçukların etkisinden çok daha yüksektir. Nano katkı maddeleri tokluk ve kırılma enerjisi üzerinde en az etki gösteren katkı maddeleridir. İncelenen tüm betonlar arasında en yüksek kırılma enerjisi ve tokluk performansı %2 çelik lif içeren betonda bulunmuştur.

Kırılma enerjisi ile tokluk arasındaki ilişki Şekil 4.24.'te gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, kırılma enerjisi ile tokluk arasında üçüncü derecede denklemle bir ilişki kurulabilir. Elde edilen denklemin determinasyon katsayısının (R^2) değeri 0.93 olduğu bulunmuştur. Gupta ve ark. (2015) ve Rahmani ve ark. (2012)'ye göre R^2 değerinin ≥ 0.7 olması fonksiyonun uygunluğunu göstermektedir. Buna göre elde edilen denklem kayda değer seviyede uygundur.



Şekil 4.24. Kırılma enerjisi ve tokluk arasındaki ilişki

4.1.5.3. Tokluk indeksleri ve artık mukavemet faktörleri

Çizelge 4.5.'te betonların tokluk indeksleri ve artık mukavemet faktörleri sunulmuştur. Lifli ve liffsiz betonların tokluk indeksleri için (ASTM C1018, 1997) standardında verilen kriterler Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Tokluk indeksleri, betonun

elasto-plastik davranışının göstergesi olduğundan (Pereira de Oliveira ve Castro-Gomes, 2011), Çizelge 4.5.'ten de anlaşılacağı üzere normal beton ve nano katkı maddeleri içeren betonlar gevrek bir davranış göstermiştir. Betonların tokluk indekslerinin 1'e ve artık mukavemet faktörlerinin 0'a eşit olması bu duruma kanıt niteliğindedir. Bu da ilk çatlak oluşumundan sonra betonların artık mukavemet göstermediğini ve gevrek bir şekilde kırıldığını göstermektedir.

Öte yandan, lif donatılı betonlar elasto-plastik bir davranış göstermiştir. PET lifin diğer malzemelere göre daha yüksek tokluk indeksleri gösterdiği izlenmiştir. Bu, PET liflerin plastisitesine bağlıdır. PET lif içeren betonların, iyi bir artık dayanıma sahip olduğu da bulunmuştur. Bu, artık mukavemet faktörlerinin yüksek değerlerinden anlaşılmaktadır. Çelik lifler de iyi tokluk indeksleri ve artık mukavemet faktörlerine sahiptir. Öte yandan PP lif içeren betonlar, nispeten daha düşük elasto-plastik davranışa ve artık mukavemete sahiptir. PET lifin, çelik ve/veya PP liflerle kombinasyonlar halinde kullanılması, PET lifsiz durumlara kıyasla betonun performansını daha fazla iyileştirmiştir. Bu katkı maddesi grubunda en yüksek elasto-plastik davranış, %1 PET lif ve %0.25 PP lif içeren betondan (PETF1PPF0.25) elde edilmiştir. Bu betonda, I_5 , I_{10} ve I_{20} tokluk indeksleri sırasıyla 4.42, 8.71 ve 14.76 değerlerini eşittir. Bu değerler, sırasıyla 5, 10 ve 20 olan ideal elasto-plastik davranış değerlerine çok yakındır. Ancak deplasman arttıkça ideal elasto-plastik davranış değerleri ile bu betondan elde edilen değerler arasındaki fark artmaktadır. Elde edilen tüm lif donatılı betonların tokluk indeksleri incelendiğinde Çizelge 4.6.'da sunulan ilgili standartta verilen kriterlerle uyumlu olduğu bulunmuştur.

Çizelge 4.5.'ten de anlaşılacağı üzere, lastik kauçuk içeren betonlar da elasto-plastik davranış göstermiştir. Ancak bu davranışın lifli betonlara göre daha idealden uzak olduğu görülmüştür. Bu davranışın, lastik kauçukların düşük kullanım oranında daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. FR10 ve CR10, bu gruptaki diğer betonlara göre ideale en yakın elasto-plastik davranış göstermiştir. FR10 ve CR10'un I_5 değerleri sırasıyla 3.19 ve 3.13, I_{10} değerleri ise sırasıyla 3.8 ve 3.81'dir. Sonuçlar, kauçuklu betonların elasto-plastik davranışının deplasman arttıkça ($3\delta_0$ 'den fazla) idealden uzaklaştığını göstermiştir. Ayrıca, incelenen bazı betonlar nispeten düşük deplasman değerinde kırılmıştır. CR20 ve FRCR10'un $5.5\delta_0$ deplasman değerine ulaşamadığı görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde kauçuk partiküllerin kullanım oranı arttıkça elasto-plastik davranış üzerindeki etkisinin önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur. Bu durum, lastik kauçuk kullanım oranının artmasıyla betonun gözenekliliğinin artmasına bağlanabilir (H.

Wang ve ark., 2022). Sonuçlar, FR ve CR'nin aynı betonda az bir içerikle kullanıldığında iki malzemenin tekil kullanımına kıyasla daha kötü bir elasto-plastik davranış gösterdiği izlenmiştir. Ancak, daha yüksek kullanım oranında, FR ve CR'nin birleşik etkisi, iki malzemenin tekil kullanımının ortalama değerine yakın çıkmıştır. Kauçuk içeren betonların tokluk indeksleri incelendiğinde, Çizelge 4.5.'te verilen lif donatılı beton kriterlerini sağladığı izlenmiştir.

Artık mukavemet faktörünün ($R_{5,10}$) sonuçları, deplasman değerinin $3\delta_0$ 'yi geçmesiyle artık dayanımların keskin bir şekilde azaldığını ortaya koymuştur. Bu, FR ve CR'nin betona yalnızca düşük deplasmanlarda elasto-plastik bir davranış kazandırabildiğini, ancak yüksek deplasmanlarda ($3\delta_0$ 'den fazla) etkilerinin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Bu, lastik kauçukların çatlakların ilerlemesini yavaşlatma etkisinin sadece küçük deplasmanlarda etkili olduğunu göstermektedir. Bu durum, çatlak yolunda bulunan lastik kauçuk partiküllerin betondan sıyrılmasına neden olan lastik kauçuklar ile çevreleyen çimento hamuru arasındaki zayıf bağdan kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.5. ayrıca yük-deplasman eğrisi altındaki toplam alan olarak hesaplanan numuneler tarafından yutulan toplam enerjiyi de göstermektedir. Toplam yutulan enerji değerleri ile ilk çatlağın oluşumuna kadar yutulan enerji (T_d) karşılaştırıldığında, liflerin ilk çatlağa kadar ve kırılmaya kadar emilen enerjinin miktarını önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Bununla birlikte, liflerin toplam emilen enerji üzerindeki etkisinin, T_d üzerindeki etkilerinden çok daha fazla olduğu izlenmiştir. Bu da liflerin temel etkisinin (çatlakların ilerlemesini engellemek ve çatlakları köprülemek) çatlak oluşumundan sonra başladığını göstermektedir. Kauçuklu beton için, ince lastik kauçuğun kullanım oranı az olduğunda T_d 'nin arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek lastik kauçuk içeriği, T_d değerlerinde bir azalmaya neden olmuştur. Bu, kauçuk içeriğindeki artış nedeniyle betonun dayanımındaki büyük azalmaya ve dolayısıyla çatlak oluşumuna karşı daha az direnç göstermesine bağlanabilir. Öte yandan, lastik kauçuğun betonun çatlak sonrası enerji emme kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Normal beton ve nano katkı maddeleri içeren betonlar için ilk çatlağa kadar ve toplam yutulan enerji miktarları aynıdır. Bu, ilk çatlağın oluşumundan sonra numunelerin daha fazla enerji yutamadığını göstermektedir.

Çizelge 4.5. Farklı betonlara ait tokluk indeksleri ve artık mukavemet faktörleri

Karışım grubu	Karışım No.	Karışım kodu	δ_0 (mm)	Tokluk değerleri				Toplam emilen enerji (N.m)	Tokluk indeksleri			Artık mukavemet faktörleri	
				T_{80} (N.m)	T_{38} (N.m)	$T_{5,58}$ (N.m)	$T_{10,58}$ (N.m)		I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
Nano katkı maddeleri grubu	1	M0	0.54	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.00	1.00	1.00	0	0
	2	NS0.5	0.78	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	1.00	1.00	1.00	0	0
	3	NS1	0.94	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	1.00	1.00	1.00	0	0
	4	NA0.5	0.89	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	1.00	1.00	1.00	0	0
	5	NA1	0.91	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	1.00	1.00	1.00	0	0
	6	NF0.5	0.99	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	1.00	1.00	1.00	0	0
	7	NF1	1.18	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	1.00	1.00	1.00	0	0
	8	NSNA0.5	1.07	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	1.00	1.00	1.00	0	0
	9	NSNA1	1.08	2.39	2.39	2.39	2.39	2.39	1.00	1.00	1.00	0	0
	10	NSNF0.5	1.01	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	1.00	1.00	1.00	0	0
	11	NSNF1	0.85	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	1.00	1.00	1.00	0	0
	12	NANF0.5	0.98	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	1.00	1.00	1.00	0	0
	13	NANF1	0.94	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	1.00	1.00	1.00	0	0
	14	NSNANF0.5	0.98	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	1.00	1.00	1.00	0	0
	15	NSNANF1	1.01	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	1.00	1.00	1.00	0	0
Lifler grubu	16	STF1	1.67	8.28	32.86	49.55	67.83	72.57	3.97	5.99	8.19	40.34	22.08
	17	STF2	1.73	9.67	36.50	51.79	70.24	71.17	3.78	5.36	7.27	31.63	19.08
	18	PETF1	0.77	1.78	5.56	10.19	18.40	28.58	3.12	5.72	10.34	51.97	46.14
	19	PETF2	1.23	2.69	11.07	21.21	36.39	46.79	4.12	7.89	13.54	75.45	56.49
	20	PPF0.25	1.32	3.07	6.94	6.94	6.94	7.22	2.26	2.26	2.26	0	0
	21	PPF0.5	1.29	3.40	8.22	10.96	13.58	14.59	2.42	3.22	3.99	16.08	7.71
	22	STFPETF1	1.11	3.06	12.70	22.40	38.18	54.11	4.15	7.33	12.49	63.49	51.62
	23	STFPETF2	1.68	5.71	24.11	40.25	65.25	77.39	4.22	7.05	11.43	56.55	43.81
	24	STF0.5PPF0.125	1.06	2.81	12.82	20.43	28.51	34.66	4.56	7.27	10.15	54.20	28.77
	25	STF1PPF0.25	1.78	5.47	19.78	31.18	31.18	39.43	3.62	5.70	5.70	41.68	0
	26	PETF0.5PPF0.125	1.32	3.68	9.19	14.46	22.00	29.78	2.50	3.93	5.98	28.65	20.50
	27	PETF1PPF0.25	1.28	2.07	9.17	18.06	30.59	41.81	4.42	8.71	14.76	85.70	60.46

Çizelge 4.5. (Devam) Farklı betonlara ait tokluk indeksleri ve artık mukavemet faktörleri

Karışım grubu	Karışım No.	Karışım kodu	δ_0 (mm)	Tokluk değerleri				Toplam emilen enerji (N.m)	Tokluk indeksleri			Artık mukavemet faktörleri	
				T_{δ_0} (N.m)	$T_{3\delta}$ (N.m)	$T_{5.5\delta}$ (N.m)	$T_{10.5\delta}$ (N.m)		I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
Lifler grubu	28	STF0.333PETF0.333PPF0.083	1.25	3.26	14.97	26.77	41.79	56.002	4.60	8.23	12.84	72.53	46.13
	29	STF0.667PETF0.667PPF0.167	1.81	5.20	24.86	38.25	49.71	50.960	4.79	7.36	9.57	51.56	22.05
	30	FR10	0.83	1.95	6.23	7.41	7.41	7.482	3.19	3.80	3.80	12.12	0
Atık lastik	31	FR20	0.53	0.81	1.82	2.17	2.17	2.323	2.26	2.70	2.70	8.83	0
	32	CR10	0.56	1.40	4.40	5.34	5.34	5.520	3.13	3.81	3.81	13.45	0
kauçukla r grubu	33	CR20	0.65	1.14	2.96	2.96	2.96	3.256	2.59	2.59	2.59	0	0
	34	FRCR10	0.75	1.96	5.08	5.08	5.08	5.647	2.60	2.60	2.60	0	0
	35	FRCR20	0.42	0.80	1.87	2.32	2.32	2.355	2.33	2.89	2.89	11.23	0

Çizelge 4.6. Tokluk indeksleri için (ASTM C1018, 1997) standardında verilen kriterler

	I_5	I_{10}	I_{20}
Lifsiz beton	1	1	1
Lifli beton	1-6	1-12	1-25

4.1.6. Çarpma test sonuçları

4.1.6.1. Çarpma dayanımı ve çarpma enerjisi

Farklı katkı maddeleri içeren betonların çarpma test sonuçları Çizelge 4.7.'de sunulmuştur. Nano katkı maddeleri içeren betonlara ait ilk çatlığa kadar ve kırılmaya kadar toplam emilen çarpma enerjisi grafiksel olarak Şekil 4.29.'da gösterilmiştir. Şekilde çarpma enerjisinde referans numuneye göre oluşan artış yüzdesi (sütunlar üzerinde verilen değerler) de verilmiştir. Çizelge ve şekilden de görüldüğü gibi, nano katkı maddelerinin bazı kombinasyonları betonun çarpma dayanımını arttırabilmektedir. Ancak, incelenen nano katkı maddelerinin bileşimleri çoğunlukla çarpma dayanımı üzerinde olumlu bir etki göstermemiştir. Nano katkı maddeleri arasında çarpma performansı üzerinde en yüksek etki nano-Fe₂O₃'ten elde edilmiştir. Bu grupta en yüksek çarpma dayanımı %0.5 nano demir içeren betonda bulunmuştur. Bu betonun çarpma dayanımı normal betondan 67% oranında daha fazladır. Nano katkı maddeleri içeren betonların çarpma yükü altında gevrek bir şekilde kırıldığı da izlenmiştir. Bu da ilk çatlak sonrası çarpma sayısındaki artış yüzdesi (ÇDSAY) değerinin sıfır olmasından anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.7. Çarpma dayanımı test sonuçları

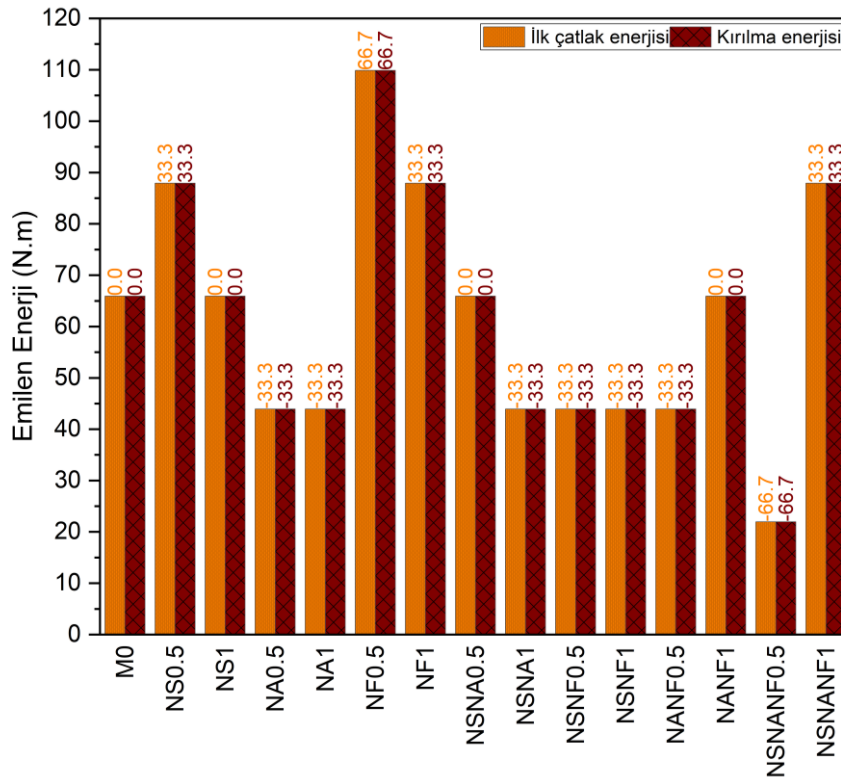
Karışım grubu	Karışım No.	Karışım kodu	İlk çatlak dayanımı (N1) (Vuruş sayısı)	Kırılma dayanımı (N2) (Vuruş sayısı)	ÇDSAY* (%)
	1	M0	3	3	0
	2	NS0.5	4	4	0
	3	NS1	3	3	0
	4	NA0.5	2	2	0
	5	NA1	2	2	0
	6	NF0.5	5	5	0
	7	NF1	4	4	0
Nano katkı maddeleri grubu	8	NSNA0.5	3	3	0
	9	NSNA1	2	2	0
	10	NSNF0.5	2	2	0
	11	NSNF1	2	2	0
	12	NANF0.5	2	2	0
	13	NANF1	3	3	0
	14	NSNANF0.5	1	1	0
	15	NSNANF1	4	4	0
Lifler grubu	16	STF1	10	55	450
	17	STF2	10	53	430
	18	PETF1	10	14	40

* Çatlak sonrası çarpma sayısındaki artış yüzdesi

Çizelge 4.7. (Devam) Çarpma dayanımı test sonuçları

Karışım grubu	Karışım No.	Karışım kodu	İlk çatlak dayanımı (N1) (Vuruş sayısı)	Kırılma dayanımı (N2) (Vuruş sayısı)	ÇDSAY* (%)
Lifler grubu	19	PETF2	8	13	62.5
	20	PPF0.25	2	2	0
	21	PPF0.5	5	5	0
	22	STFPETF1	10	29	190
	23	STFPETF2	3	25	733.3
	24	STF0.5PPF0.125	19	31	63.2
	25	STF1PPF0.25	12	35	191.7
	26	PETF0.5PPF0.125	2	5	150
	27	PETF1PPF0.25	5	10	100
	28	STF0.333PETF0.333PPF0.083	16	20	25
	29	STF0.667PETF0.667PPF0.167	18	46	155.6
Atık lastik kauçuklar grubu	30	FR10	12	12	0
	31	FR20	10	11	10
	32	CR10	6	6	0
	33	CR20	3	3	0
	34	FRCR10	3	3	0
	35	FRCR20	11	12	9.1

* Çatlak sonrası çarpma sayısındaki artış yüzdesi



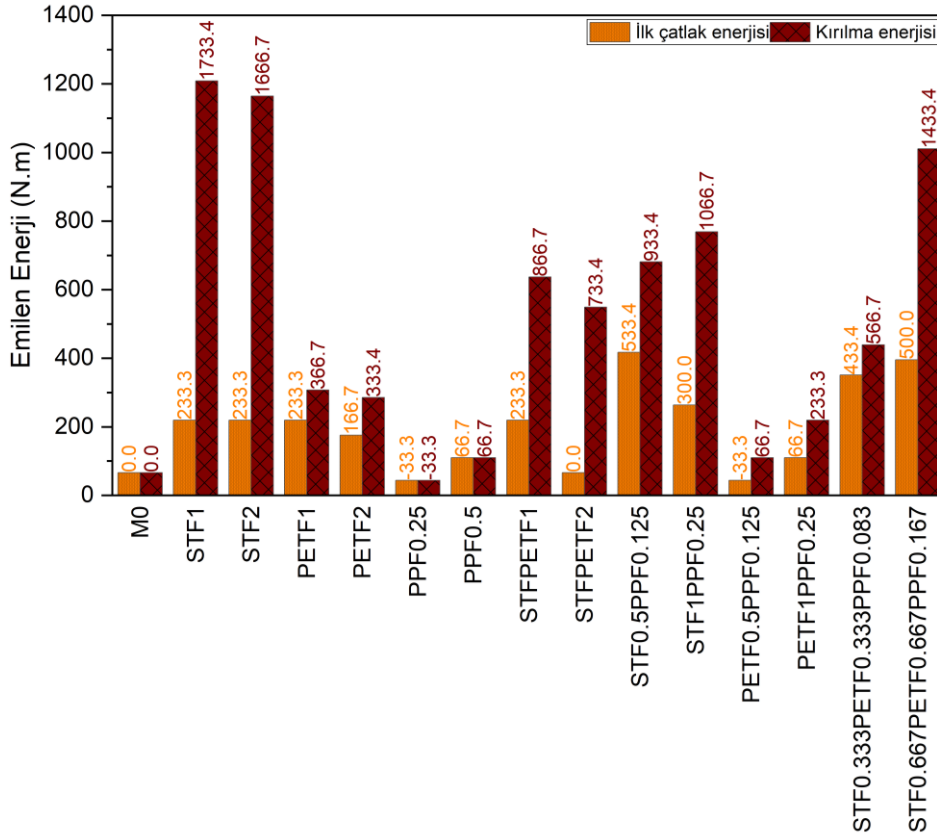
Şekil 4.25. Nano katkı maddeleri grubuna ait çarpma enerjisinin değeri ve artış yüzdesi

Şekil 4.26. lif donatılı betonun çarpma enerjisi değerlerini ve bunların artış yüzdesini göstermektedir. Çizelge 4.7. ve Şekil 4.26.'da gösterilen sonuçlardan liflerin

betonun çarpma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı anlaşılmaktadır. Bu artışın çelik liflerde, PET ve PP liflere göre daha fazla olduğu izlenmiştir. Bu durum, çelik liflerin betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırması ve çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engellemede çok etkili olmasına bağlanmaktadır. Sonuç olarak, ilk çatlak ve kırılma çarpma dayanımları kayda değer bir şekilde artmıştır. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, kırılma çarpma dayanımı açısından en yüksek performans %1 çelik lif içeren betondan elde edilmiştir. Bu betonun ilk çatlak ve kırılma çarpma dayanımı normal betona göre sırasıyla %233.3 ve %1733.4 daha yüksektir. Sonuçlar, STF2 betonunun STF1 betonundan daha düşük çarpma dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Bu durum, düşük işlenebilirlik ve heterojenlik problemine bağlanabilir (Soltani ve ark., 2020).

PET lifler de iyi bir çarpma dayanımı göstermiştir. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi, incelenen lifler arasında çarpma dayanımı üzerinde en düşük etki gösteren lif PP lifidir. %0.5 PP lif kullanımı betonun çarpma dayanımını %67 oranında arttırmışken %0.25 PP lif kullanımı çarpma dayanımının azalmasına neden olmuştur. Bu durum PP liflerin kullanım yüzdesinin düşük olmasına bağlı olabilir. Çelik lifin, PP ve PET liflerle birlikte kullanılmasının çelik lifsiz betonların çarpma performansını arttırdığı izlenmiştir. Ancak, çelik lifin tekil olarak kullanılmasına göre çarpma dayanımının azaldığı görülmüştür.

Test sonuçları, liflerin kırılma çarpma dayanımı üzerindeki etkisinin, ilk çatlak çarpma dayanımı üzerindeki etkisinden çok daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum betonun çatlak sonrası çarpma dayanımındaki artış yüzdesini temsil eden ÇDSAY değerlerinin yüksek çıkmasından anlaşılmaktadır. Bu da, liflerin ana etkisinin çatlamadan sonra başladığını göstermektedir. Lifler, çatlağın iki tarafını köprüleyerek çatlakların oluşumunu engellemekte ve ilerlemesini geciktirmektedir. Bu sayede betonun enerji yutma kapasitesi ve çatlak sonrası performansı önemli ölçüde artmaktadır. Bu etki, lifin özellikleri (çekme dayanımı, uzunluğu, narinlik oranı vb.), lifler ile çevreleyen beton arasındaki aderans, çatlak yolunda bulunan lif sayısı ve yönü gibi farklı parametrelere bağlıdır. Bu nedenle çelik lifler, daha yüksek performansı sayesinde incelenen lifler arasında en yüksek etkiyi göstermiştir. %1 çelik lif, çatlak sonrası çarpma dayanımını %450 arttırmıştır. PP liflerin betonun çarpma sonrası dayanımını arttırmada etkili olmadığı görülmüştür. Çatlak sonrası en iyi performans %1 çelik lif + %1 PET lif içeren betonda bulunmuştur. Bu kombinasyon, betonun çatlak sonrası çarpma dayanımını %733.3 oranında arttırmıştır.

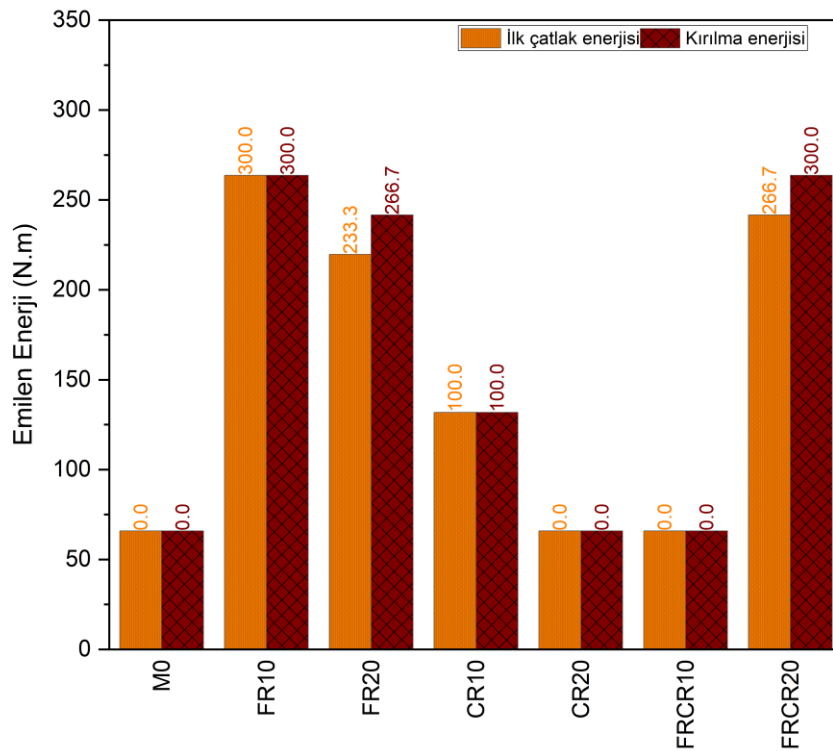


Şekil 4.26. Lifler grubuna ait çarpma enerjisinin değeri ve artış yüzdesi

Atık lastik kauçuk içeren betonların çarpma enerjisi değerleri ve artış yüzdeleri Şekil 4.27.'de gösterilmektedir. Sonuçlardan FR ve CR'nin betonun çarpma dayanımını önemli ölçüde arttırabildiği görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, incelenen tüm kullanım oranlarında ince lastik kauçuk iri lastik kauçuktan çok daha yüksek performans sergilemiştir. %10 ve %20 FR, betonun kırılma çarpma dayanımını normal betona göre sırasıyla %300 ve %267 oranlarında arttırmışken, %10 CR dayanımı %100 oranında arttırmıştır. %20 CR'nin, çarpma dayanımı üzerinde bir etkisi bulunmamıştır. FR ve CR'nin birleşik etkisi farklı bir davranış göstermiştir. %5 FR + %5 CR, betonun çarpma dayanımını arttırmamışken, %10 FR + %10 CR önemli ölçüde arttırmıştır. Bu durumda, referans betona kıyasla kırılma çarpma dayanımında %300'lük bir artış izlenmiştir. Lastik kauçuk içeren betonların çarpma dayanımındaki artış, kauçuk betonun normal betona kıyasla daha yüksek şekil değiştirme kabiliyetine bağlıdır. Bu da numunenin şekil değiştirmesiyle çarpma enerjisinin daha yüksek bir şekilde yutulmasını sağlamaktadır. Ayrıca lastik kauçuk partikülleri, mikro çatlakların yayılma hızını azaltarak numunenin daha fazla enerji yutmasını sağlamaktadır. Çarpma yükleri altında, mikro çatlaklar kısa bir yoldan hızla yayılmaya zorlanmaktadır. Bu yol genellikle yüksek sönümleme

kabiliyetine sahip kauçuk partikülleri içermektedir (Al-Tayeb, Abu Bakar, Akil, ve ark., 2013; Al-Tayeb, Abu Bakar, Ismail, ve ark., 2013; Demirhan ve ark., 2019; Gupta ve ark., 2015).

ÇDSAY sonuçları, normal betona benzer şekilde, kauçuklu betonların çarpma yükü altında gevrek bir davranış gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu, çarpma yükü altında, lastik kauçukların çatlak genişliğinin küçük olduğu durumda (mikro çatlaklar) yayılmasını yavaşlatabildiğini göstermektedir. Ancak çatlaklar büyüdükçe etkileri önemli ölçüde azalmaktadır. Bu, çimento hamuru ile kauçuk partikülleri arasındaki zayıf bağ ile ilişkilendirilebilir. Bu durum da, çoğunlukla sıfıra eşit olan ÇDSAY değerlerinden anlaşılabilir. Çizelge 4.7.'den de görüldüğü gibi, çatlak sonrası bir miktar çarpma dayanımı gösteren FR20 ve FRCR20 betonları bile gözle görülür ilk çatlaktan sonra yalnızca bir adet vuruşa daha dayanabilmiştir.

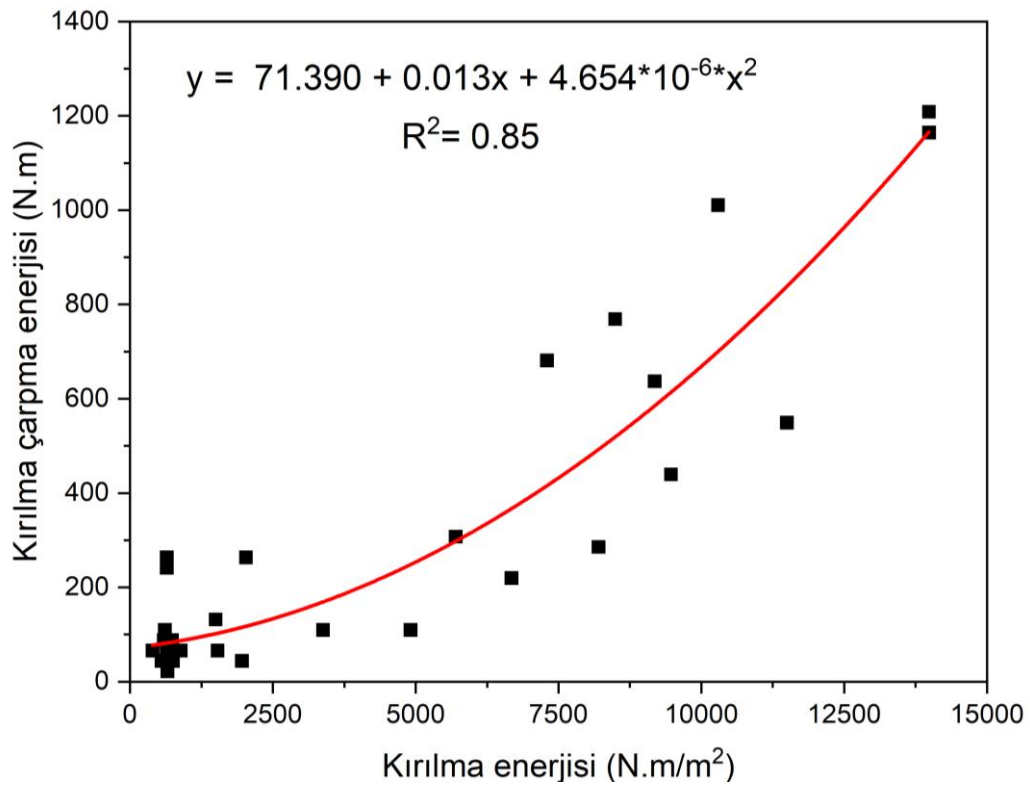


Şekil 4.27. Atık lastik kauçuklar grubuna ait çarpma enerjisinin değeri ve artış yüzdesi

Farklı katkı maddeleri grubundan elde edilen çarpma test sonuçları karşılaştırıldığında, çarpma dayanımı açısından en iyi performansın liflerden elde edildiği anlaşılmaktadır. Lifler, özellikle çelik lifler, üstün çarpma performansı göstermiştir. Bu, kırılma çarpma dayanımları karşılaştırıldığında daha da belirgindir. İlk çatlak çarpma

dayanımları karşılaştırıldığında, ince kauçukların da iyi performans gösterdiği görülmüştür. Genel olarak nano katkı maddelerinin iyi bir çarpma performansı göstermediği izlenmiştir. Bu grupta elde edilen en iyi çarpma dayanımı %1 çelik lif içeren betonda (STF1) bulunmuştur. Bu beton toplam 55 vuruşa dayanabilmişken, normal beton sadece 3 vuruşa dayanabilmiştir.

Kırılma enerjisi ile kırılma çarpma enerjisi arasındaki ilişki Şekil 4.28.'de gösterilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere, bu ilişki ikinci dereceden bir denklemle makul bir şekilde tanımlanabilir. Elde edilen denklemin R^2 değeri 0.85'e eşittir.



Şekil 4.28. Kırılma enerjisi ve kırılma çarpma enerjisi arasındaki ilişki

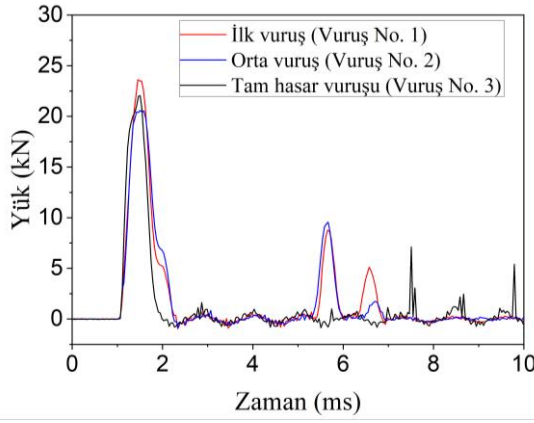
4.1.6.2. Çarpma yükü-zaman grafikleri

Çarpma yükü-zaman grafikleri, çarpma cihazında bulunan yük sensörü vasıtasıyla elde edilmiştir. Test edilen her kiriş için ve her vuruş için bir yük-zaman grafiği elde edilmiştir. Bu grafiklerin sayısı çok olduğundan ve daha net bir karşılaştırma yapılabilmek amacıyla her beton için dört eğri seçilmiştir. Bunlar, ilk vuruş eğrisi, orta vuruş eğrisi, ilk çatlak vuruş eğrisi ve tam hasar vuruş eğrisidir. Betonlara ait çarpma-yükü zaman grafikleri Şekil 4.29.'da sunulmuştur. Gösterilen grafikler, test edilen iki kirişin sonuçlarının ortalamasını temsil etmektedir. Şekillerde ilk vuruş, orta vuruş, ilk

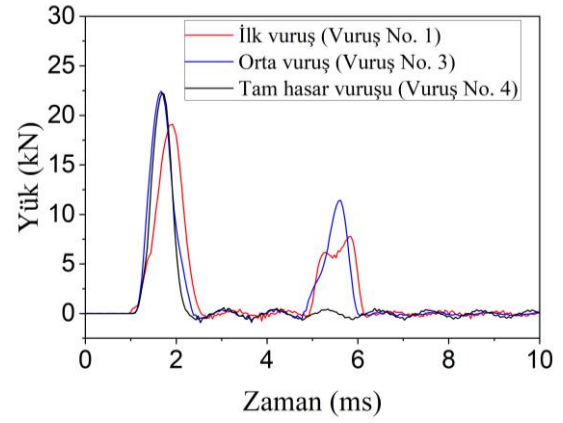
çatlak vuruşu ve tam hasar vuruşunun testte hangi vuruşu temsil ettiği parantez içinde verilmiştir. Çarpma olayı çok küçük bir zaman aralığında meydana gelmektedir. Bu nedenle, yük-zaman grafikleri 10 ms'ye kadar sunulmuştur. Genellikle, çarpma yükü etkisinin bu süre içinde tamamlandığı kabul edilebilir.

Şekillerden yük-zaman eğrilerinin farklı aşamalardan oluştuğu gözlenebilir. Düşen ağırlık numuneye çarptığında, atalet ve reaksiyon kuvvetleri nedeniyle çarpma yükünde ani bir artış meydana gelir ve ilk pik noktası oluşur. Bundan sonra çekiç numuneden ayrılır ve yük keskin bir şekilde azalır. Ardından serbest titreşim aşaması başlar ve sönüm nedeniyle yük zamanla sifıra ulaşır. Bazı durumlarda ikiden fazla pik gözlenmiştir. Bu durum, düşen ağırlık ve test numunesi arasındaki tekrarlanan temas ve ayrılmaya bağlanabilir (Nguyena ve ark., 2014). Son vuruşta genellikle ikinci bir pik izlenmemiştir. Bu durumda, ilk pik yükünden sonra, numunede tam hasar oluştuğu için numune direncini kaybetmektedir. Sonuçta, çekiç ve numune arasında tam bir ayrılma meydana gelmektedir.

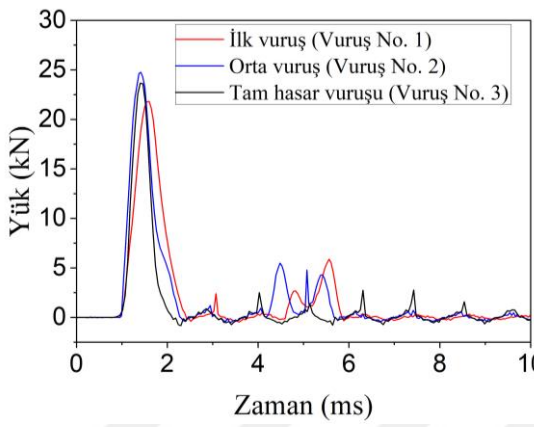
Pik yükün değeri, düşen ağırlığın kütlesi ve hızı, vurucu ucun şekli, test numunesinin rijitliği ve kalınlığı gibi birçok parametreden etkilenebilmektedir (Nguyena ve ark., 2014; Şengel ve ark., 2022; M. C. Yılmaz ve ark., 2021). Bu çalışmada, tüm bu parametreler sabit tutulduğu için, pik yükler beton tipine göre değerlendirilebilmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi lastik kauçukların eklenmesiyle ilk pik yükün oluşma süresi artmış ve pik yük miktarı azalmıştır. Bu etkinin lastik kauçuk içeriği ile orantılı olduğu ve FR durumunda CR'den daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Pik yükteki azalma ve temas süresindeki artış, daha yüksek çarpma enerjisi dağılımı ve sönümleme kapasitelerinin göstergesidir (Foti ve Paparella, 2014). Bu durum, kauçuk partikül varlığından dolayı numunelerin esnekliğinin artması ve elastisite modülünün azalmasına bağlanabilir (Gupta ve ark., 2015). Şekilden de anlaşılacağı gibi, son vuruşta numuneye çekiç arasındaki temas süresi genellikle ilk vuruştan daha azdır.



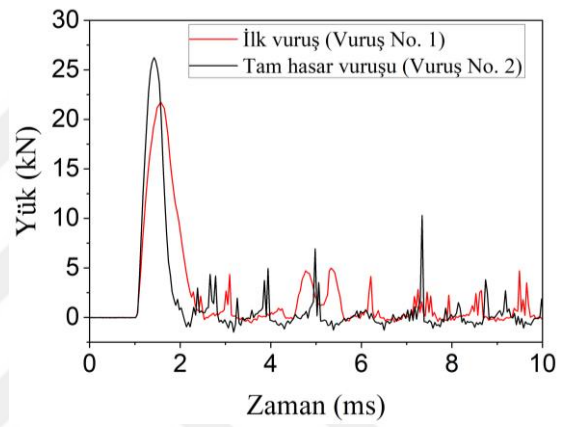
(M0)



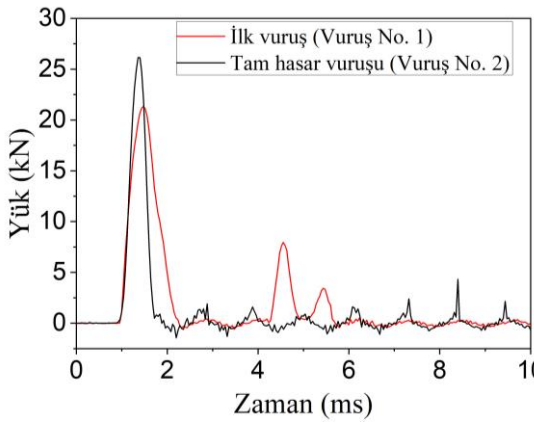
(NS0.5)



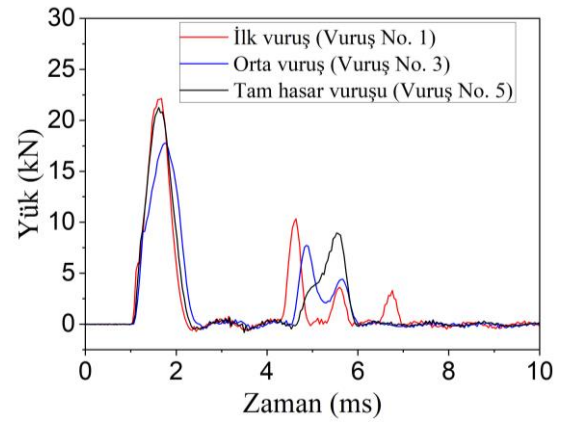
(NS1)



(NA0.5)

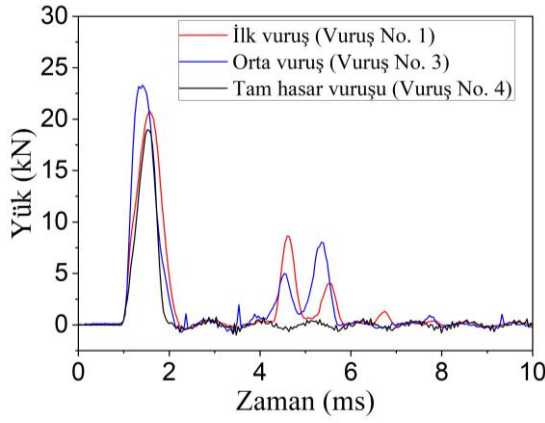


(NA1)

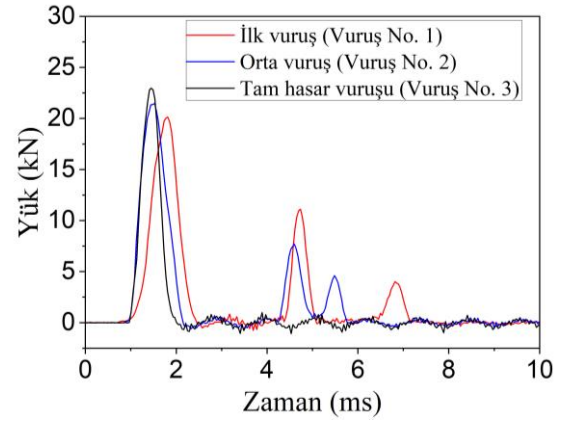


(NF0.5)

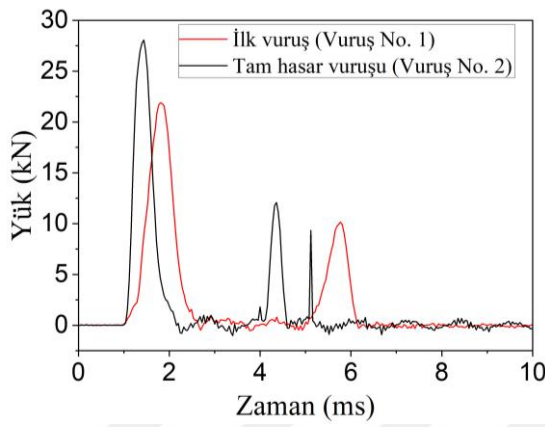
Şekil 4.29. Çarpma yükü-zaman grafikleri



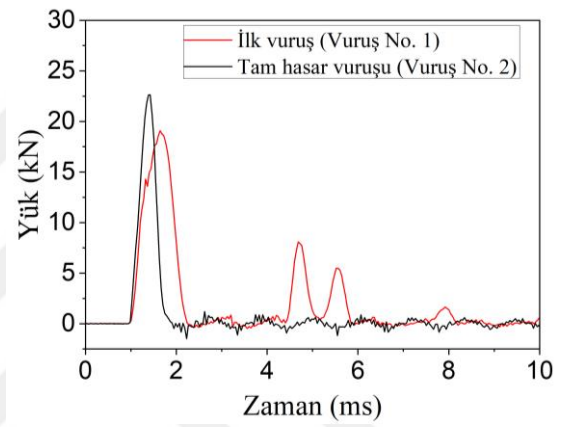
(NF1)



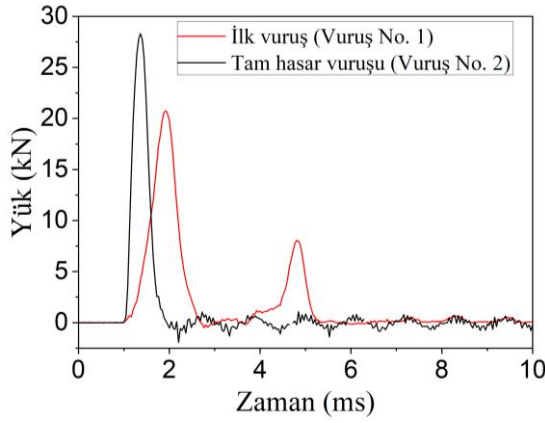
(NSNA0.5)



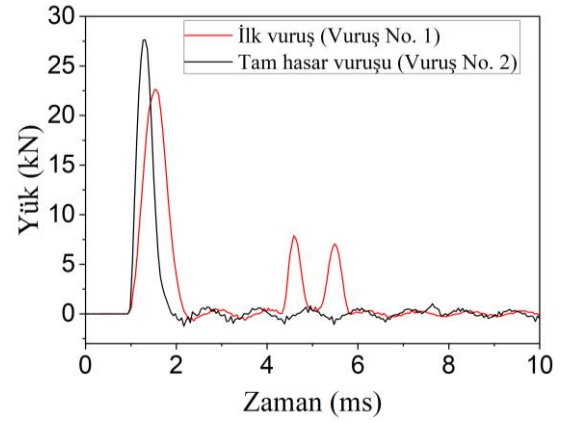
(NSNA1)



(NSNF0.5)

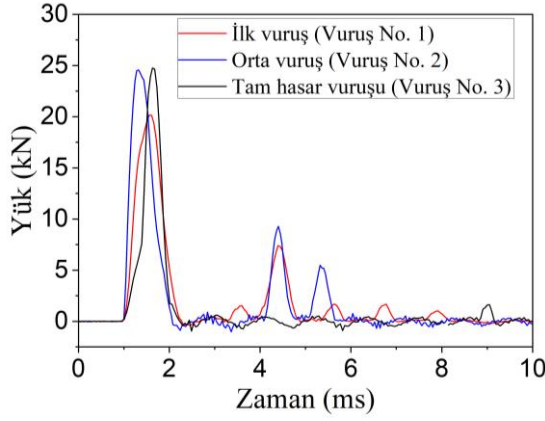


(NSNF1)

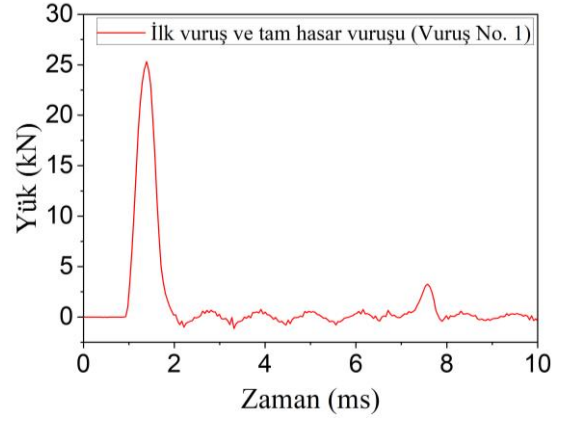


(NANF0.5)

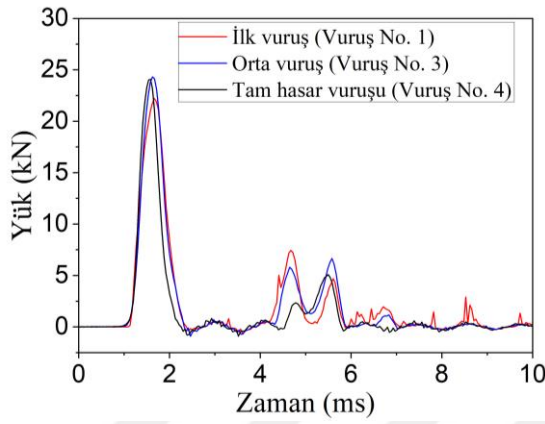
Şekil 4.29. (Devam) Çarpma yükü-zaman grafikleri



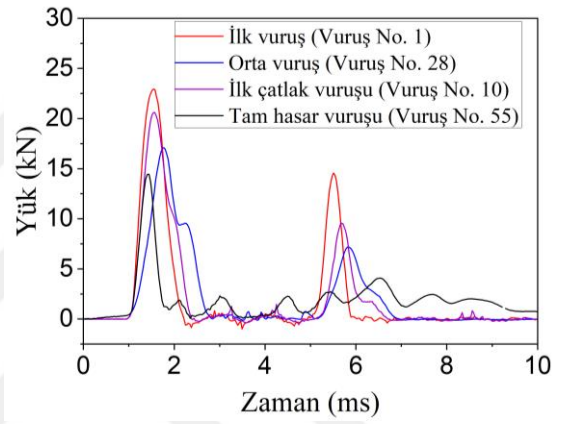
(NANF1)



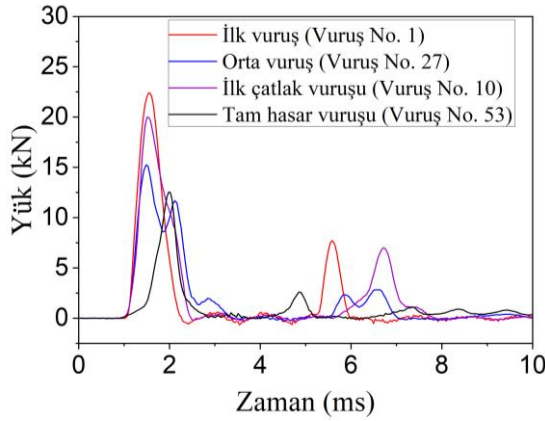
(NSNANF0.5)



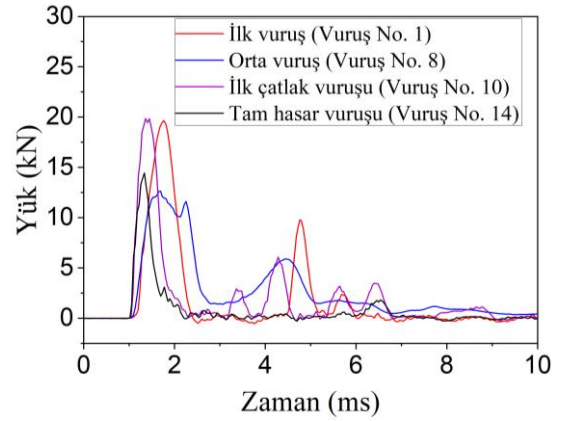
(NSNANF1)



(STF1)

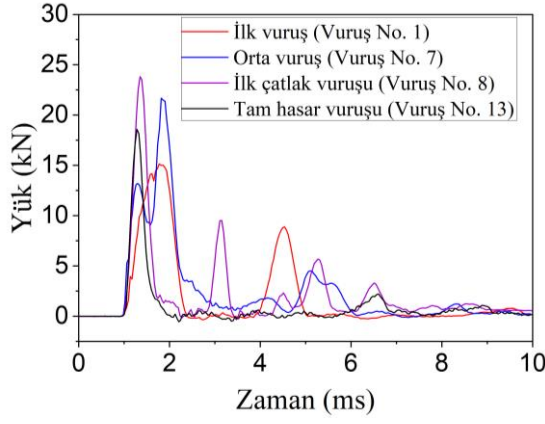


(STF2)

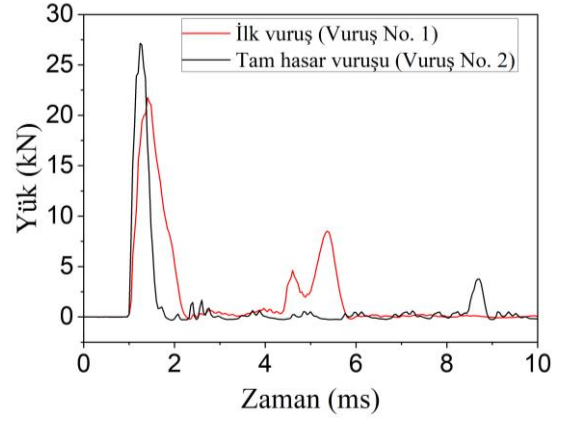


(PETF1)

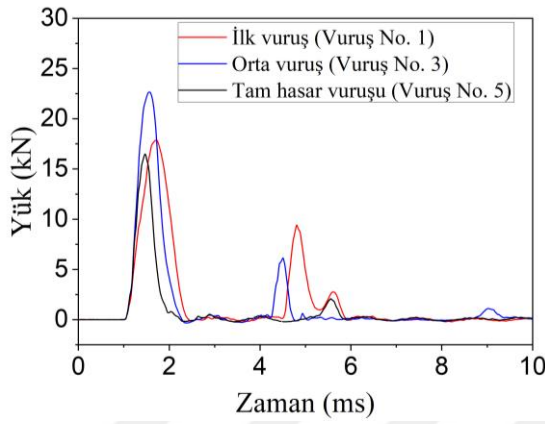
Şekil 4.29. (Devam) Çarpma yükü-zaman grafikleri



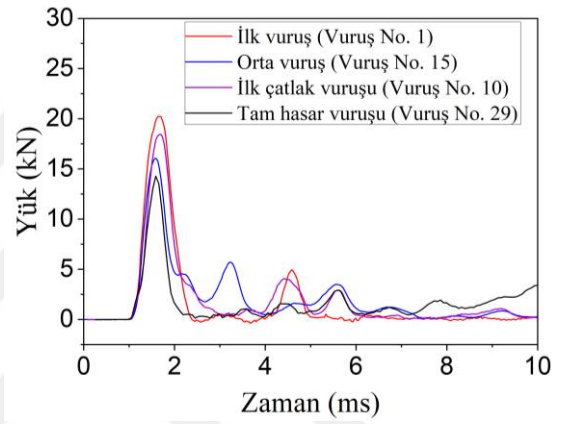
(PETF2)



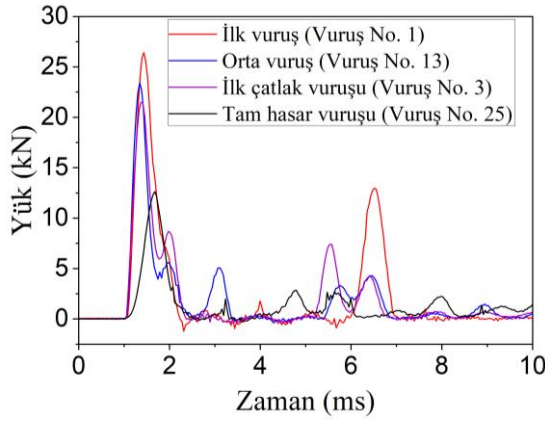
(PPF0.25)



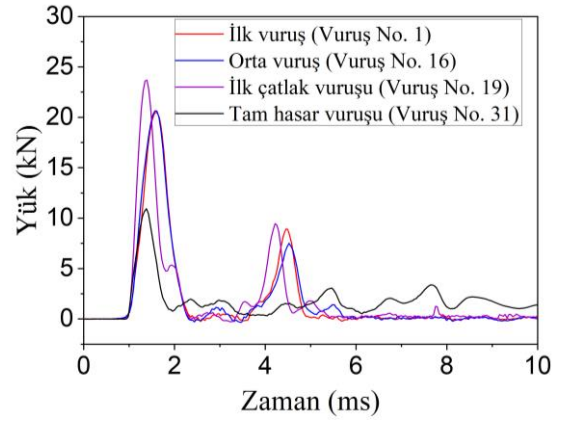
(PPF0.5)



(STFPETF1)

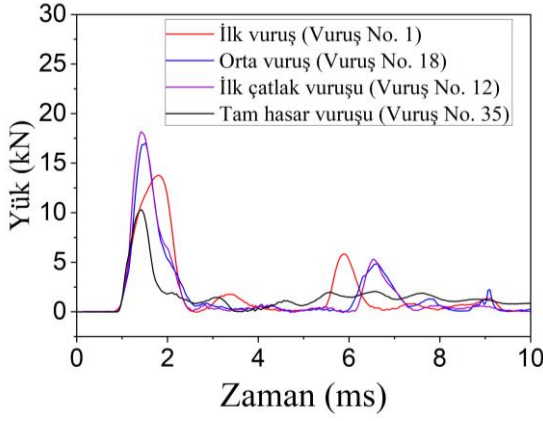


(STFPETF2)

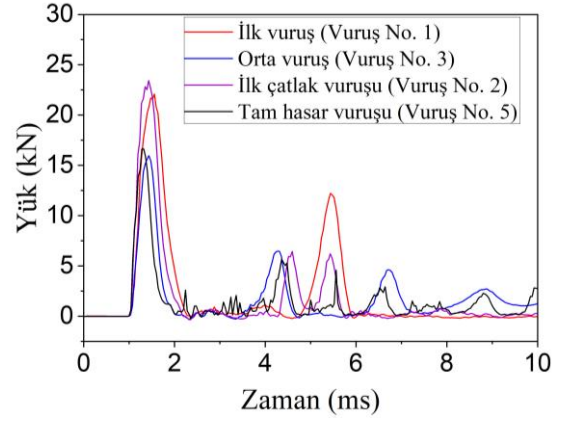


(STF0.5PPF0.125)

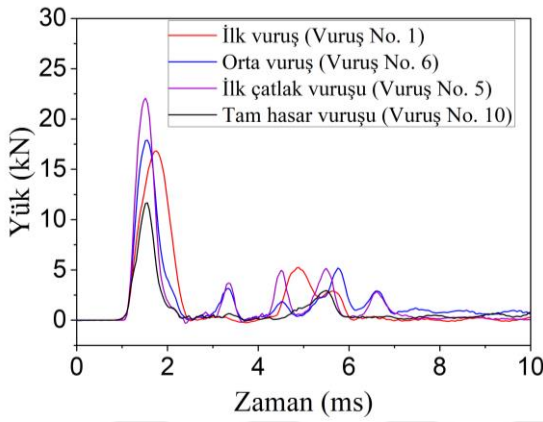
Şekil 4.29. (Devam) Çarpma yükü-zaman grafikleri



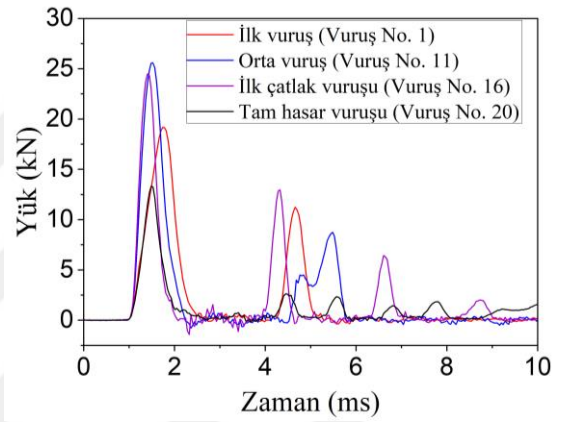
(STF1PPF0.25)



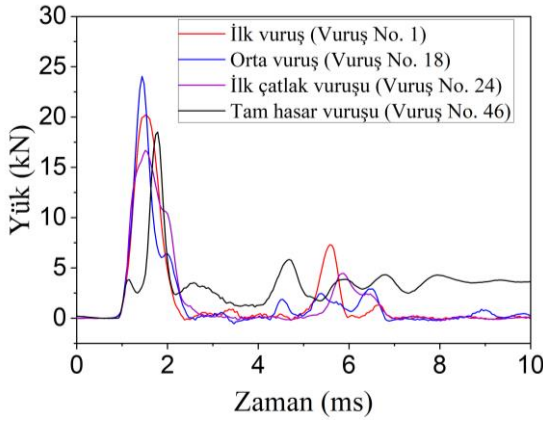
(PETF0.5PPF0.125)



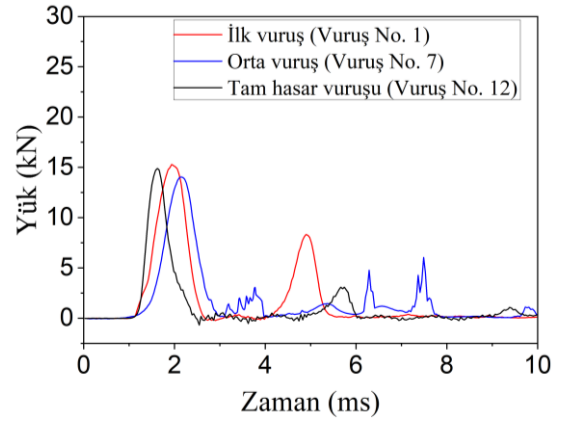
(PETF1PPF0.25)



(STF0.333PETF0.333PPF0.083)

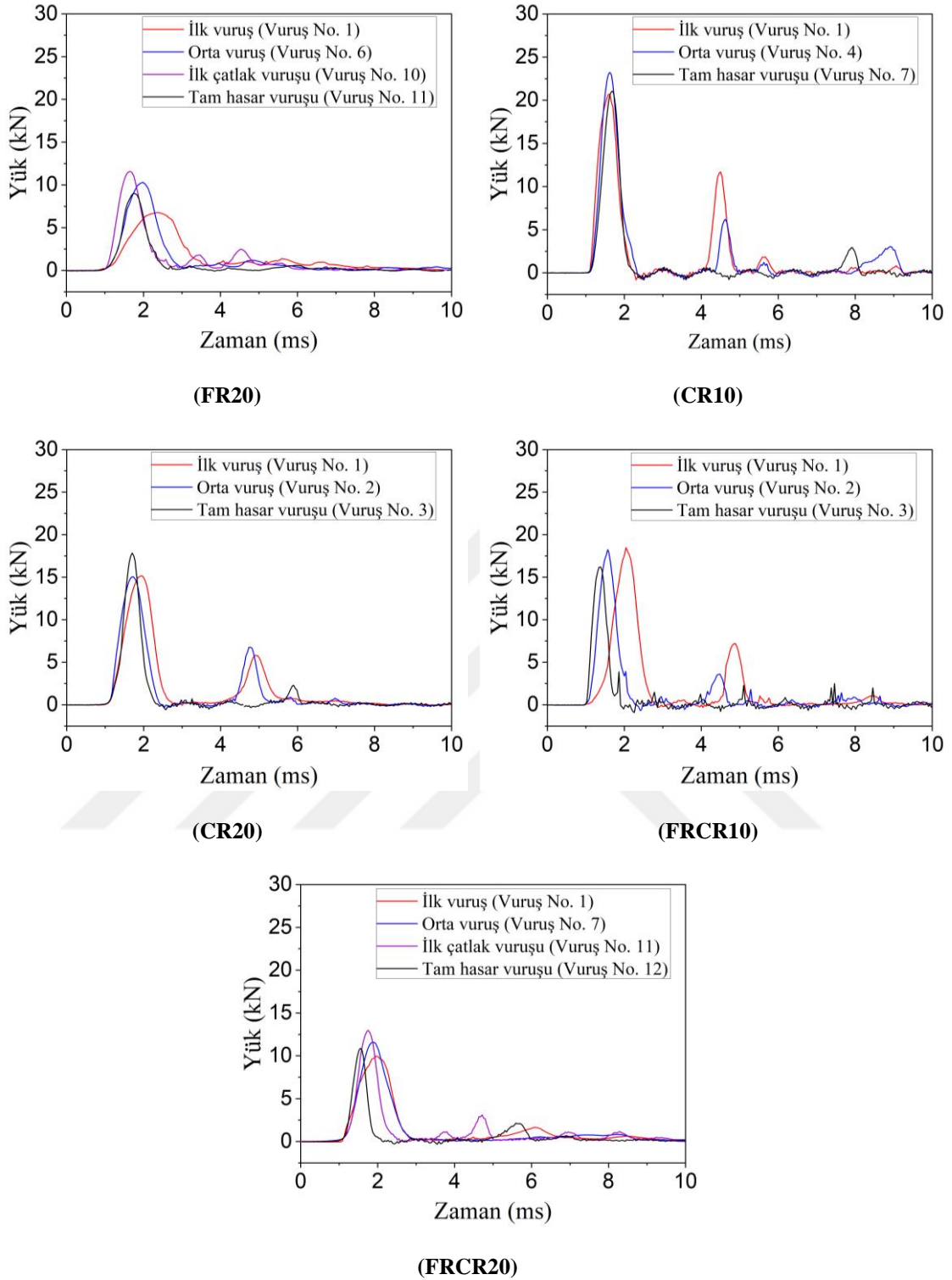


(STF0.667PETF0.667PPF0.167)



(FR10)

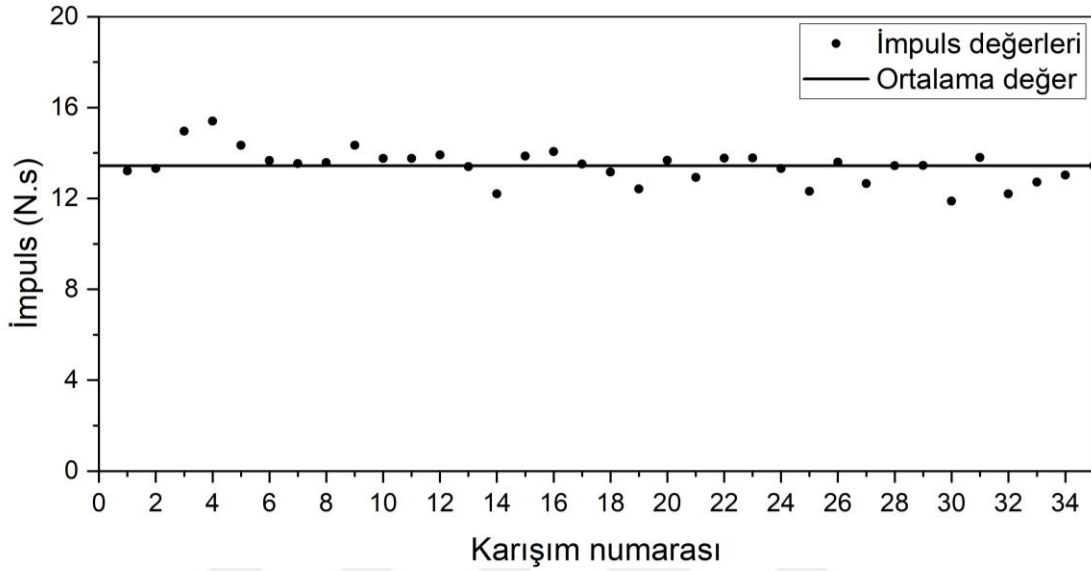
Şekil 4.29. (Devam) Çarpma yükü-zaman grafikleri



Şekil 4.29. (Devam) Çarpma yükü-zaman grafikleri

Şekil 4.30. farklı betonların ilk çarpma impuls değerlerini göstermektedir. İmpuls, yük-zaman grafiğinin altındaki alandır. İmpuls değeri, test numunesi detaylarından bağımsız olarak aynı test düzeneği (çekicinin ağırlığı ve çarpma yüksekliği) için değişmemelidir (Othman, 2016; Othman ve Marzouk, 2016b). Bu çalışmada tüm

numuneler aynı çarpma ağırlığı ve yüksekliği altında test edildiğinden, tüm numunelerin aynı impuls değerine sahip olması gerekmektedir. Şekilden görülebileceği gibi, test edilen numuneler, ortalama 13.43 N.s değeri ve 0.73 N.s standart sapması ile yaklaşık olarak aynı impuls değerine sahiptir.



Şekil 4.30. Karışımların impuls değerleri

4.1.7. Karışım gruplarının test sonuçlarının karşılaştırılması ve en uygun karışımın seçilmesi

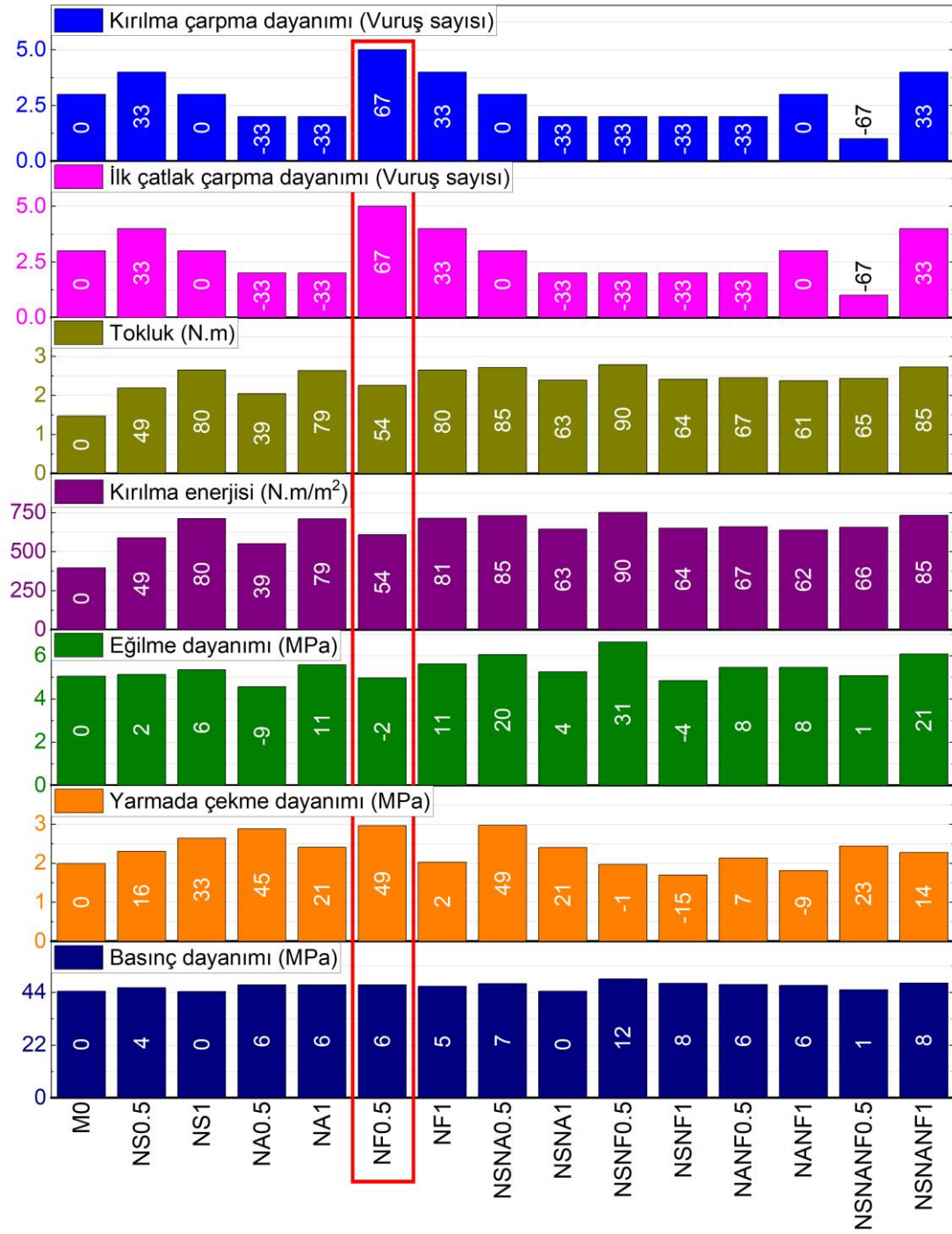
Bu bölümde, her bir karışım grubunda bulunan farklı betonların genel performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. Betonun performansının karşılaştırılmasında basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, tokluk, kırılma enerjisi, ilk çatlak çarpma dayanımı ve kırılma çarpma dayanımı dikkate alınmıştır. Ayrıca her bir karışım grubunda en yüksek performans gösteren beton da seçilmiştir. Bu çalışmanın temel hedeflerinden biri farklı katkı maddeleri kullanılarak betonun çarpma dayanımının artırılması olduğundan en iyi beton seçilirken kırılma çarpma dayanımına daha fazla önem verilmiştir.

4.1.7.1. Nano katkı maddeleri grubu

Şekil 4.31. nano katkı maddeleri içeren betonların sonuçları arasında bir karşılaştırma sunmaktadır. İncelenen her sonucun referans betona göre artış yüzdesi ilgili sütunda verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, nano katkı maddelerinin özellikle tekil

halinde kullanıldıklarında betonun yarmada çekme dayanımını iyileştirmeye etkisi, basınç dayanımı ve eğilme dayanımına olan etkisinden daha fazladır. Nano katkı maddeleri yarmada çekme dayanımını %49'a kadar arttırmışken, basınç dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %12 ve %31'e kadar arttırmıştır. Test edilen tüm nano katkı maddeleri basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etki göstermemişken bazıları yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %15 ve %9'a varan oranlarda azaltmıştır. Öte yandan, tüm nano katkı maddelerinin betonun tokluğunu ve kırılma enerjisini arttırdığı izlenmiştir. Bu etkinin, diğer mekanik özellikler üzerindeki etkiye göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Çarpma dayanımı açısından nano katkı maddelerinin yüksek performans göstermediği bulunmuştur. Sadece bazı nano katkı maddeleri betonun çarpma dayanımı üzerinde bir artırma etkisi göstermiştir.

Nano katkı maddeleri grubunda en uygun karışımın seçilmesi için öncelikle betonların çarpma dayanımının karşılaştırılması gerekmektedir. Şekilden de görüleceği üzere en yüksek çarpma dayanımı %0.5 nano-Fe₂O₃ (NF0.5) içeren betonda bulunmuştur. Bu betonun çarpma dayanımının normal betona göre %67 oranında daha yüksek olduğu izlenmiştir. Ayrıca, bu beton incelenen diğer özellikler üzerinde iyi bir performans göstermiştir. NF0.5 betonun basınç dayanımının, yarmada çekme dayanımının, tokluğunun ve kırılma enerjisinin referans betona göre sırasıyla %6, %46, %54 ve %54 oranlarında daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca NF0.5 betonun eğilme dayanımı yaklaşık olarak normal betonun dayanımına eşittir. Sonuç olarak nano katkı maddeleri grubunda en yüksek performans gösteren beton NF0.5 betonu olarak seçilmiştir.



Şekil 4.31. Nano katkı maddeleri grubuna ait sonuçların karşılaştırılması

4.1.7.2. Lifler grubu

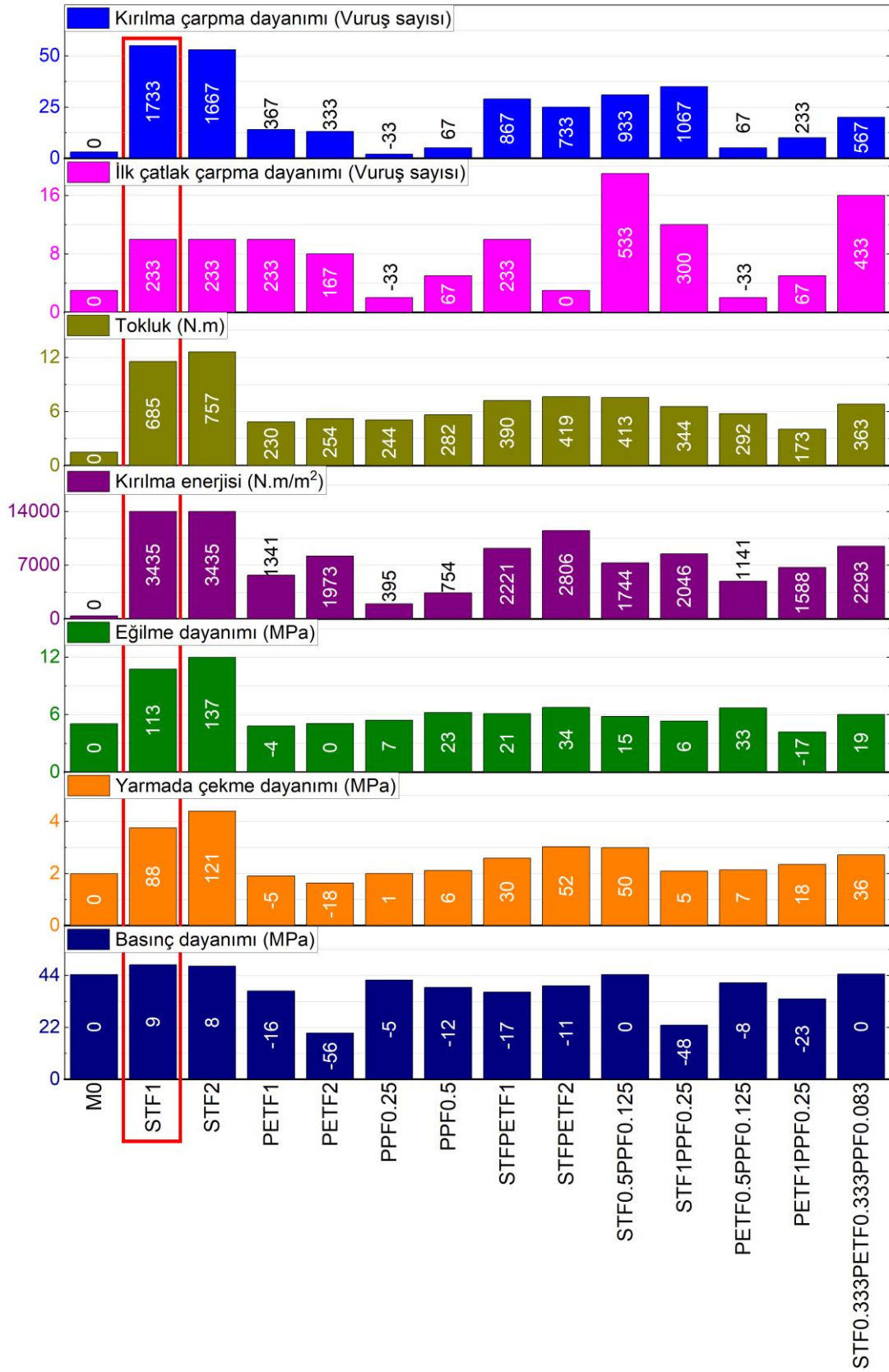
Farklı liflerin betonun özellikleri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması Şekil 4.32.'de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, betonun performansını iyileştirmede incelenen tüm lifler arasında en iyi etki çelik liflerden elde edilmiştir. Çelik lifler, betonun mekanik özelliklerini, enerji yutma kapasitesini ve çarpma dayanımını önemli ölçüde

arttırmıştır. Çelik liflerin çatlak sonrası özellikler üzerindeki etkisinin, ilk çatlak özellikleri üzerindeki etkisinden çok daha yüksek olduğu da izlenmiştir. Sonuçlar, çelik liflerin kırılma enerjisi, tokluk ve çarpma dayanımı üzerindeki etkisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisinden çok daha fazla olduğunu göstermiştir. Mekanik özellikler açısından bakıldığında, çelik liflerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin, yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı üzerindeki etkisinden daha yüksek olduğu görülebilir.

Öte yandan, PET lifler betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı üzerinde olumsuz bir etki göstermiştir. Ancak, PET lifler betonun kırılma enerjisini, tokluğunu ve çarpma dayanımını önemli ölçüde arttırmıştır. Sonuçlar ayrıca, PP lifler betonun basınç dayanımını azaltmışken diğer mekanik özelliklerini, tokluğunu ve kırılma enerjisini arttırmıştır. PP lifler, çarpma dayanımı açısından yüksek bir performans göstermemiştir.

Sonuçlar, çelik liflerin diğer liflerle kombinasyonlar halinde kullanımının, çelik liflerin tekil kullanımına kıyasla betonun özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni, bu kombinasyonlarda daha yüksek performanslı olan çelik liflerin miktarının azaltılması ve daha düşük performanslı liflerle (PET ve PP lifler) değiştirilmesidir.

Şekilde verilen sonuçlar karşılaştırıldığında, %1 ve %2 çelik lif içeren betonların birbirine yakın performans gösterdiği görülmektedir. Ancak %1 çelik lif içeren beton (STF1), %2 çelik lif içeren betona göre daha yüksek kırılma çarpma dayanımı göstermiştir. Sonuç olarak, lifler grubunda en yüksek performans gösteren beton STF1 olarak seçilmiştir. STF1, referans betona göre %1733 oranında daha yüksek bir kırılma çarpma dayanımına sahiptir. Ayrıca STF1 betonunun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma enerjisi, tokluğu ve ilk çatlak çarpma dayanımı normal betona göre sırasıyla %9, %88, %113, %3435, %685 ve %233 oranlarında daha yüksektir.



Şekil 4.32. Lifler grubuna ait sonuçların karşılaştırılması

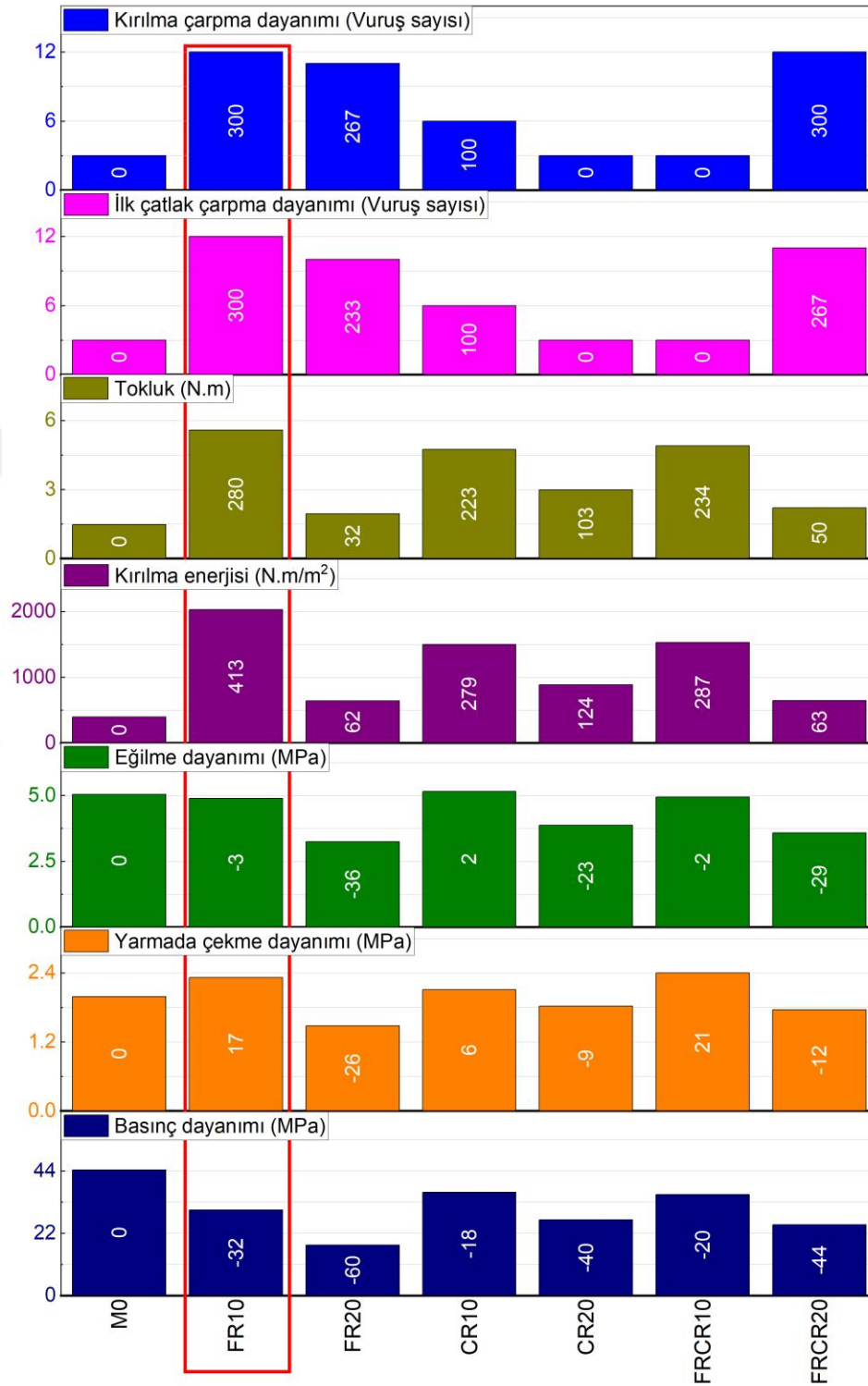
4.1.7.3. Atık lastik kauçuklar grubu

İnce ve iri lastik kauçuklar içeren betonların özellikleri arasındaki karşılaştırma Şekil 4.33.'te sunulmuştur. Şekilden de anlaşılacağı üzere, FR ve CR partikülleri tekil ve birleşim şeklinde yüksek oranla kullanıldığında betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımında keskin bir azalma izlenmiştir. Genel olarak CR, bu özellikler açısından FR'den daha iyi bir performans göstermiştir. FR ve CR'nin bir kombinasyon şeklinde kullanılması, tekil olarak kullanılmasına göre mekanik özellikler üzerinde ortalama bir etki göstermiştir. Öte yandan, FR ve CR'nin tekil ve birleşimler şeklinde kullanımı, betonun tokluğunu ve kırılma enerjisini önemli ölçüde arttırmıştır. Bu özellikler açısından en yüksek performans %10 FR'den elde edilmiştir. Ancak lastik kauçuk içeriğinin %10'dan fazla artırılması, bu özellikler üzerindeki etkisinin ciddi şekilde azalmasına neden olmuştur.

Sonuçlar ayrıca, lastik kauçukların uygun bir şekilde kullanımının betonun çarpma dayanımında önemli bir artışa yol açabildiğini göstermiştir. İnce atık lastik kauçuğun çarpma dayanımı üzerindeki etkisinin iri atık lastik kauçuğa göre çok daha yüksek olduğu izlenmiştir. Ayrıca, %10 FR, %20 FR'den daha yüksek bir etki göstermiştir. Şekilden de anlaşıldığı üzere %10 FR içeren beton diğer betonlara göre daha iyi statik ve dinamik enerji yutma kapasitelerine sahiptir. Uygun bir lastik kauçuk içeriği (%10) kullanıldığında, iyi bir basınç dayanımına (30 MPa'dan daha yüksek) sahip bir beton üretilebilir. Bu betonun eğilme dayanımı 44.4 MPa basınç dayanımına sahip olan normal betonuna yakındır. Ayrıca bu betonun yarmada çekme dayanımı, 44.4 MPa basınç dayanımına sahip olan normal betondan daha yüksektir. Ayrıca, bu kauçuklu beton, normal betona kıyasla üstün statik ve dinamik enerji yutma kapasitelerine, tokluğa, kırılma enerjisine ve çarpma dayanımına sahip olabilir.

Şekilden de anlaşıldığı üzere, en yüksek kırılma çarpma dayanımı %10 ince lastik kauçuk içeren betondan ve %10 ince lastik kauçukla %10 iri lastik kauçuk kombinasyonu içeren betondan elde edilmiştir. Bu iki betonun kırılma çarpma dayanımı referans betona göre %300 oranında daha yüksektir. Ancak, incelenen diğer özellikler açısından FR10'un, FRCR20'a göre çok daha yüksek bir performans sergilediği görülmüştür. Bu sayede, atık lastik kauçuklar grubunda en uygun beton FR10 olarak seçilmiştir. FR10, 30.28 MPa'lık bir basınç dayanımına sahiptir. Bu beton aynı zamanda referans betona göre %17 daha yüksek yarmada çekme dayanımına, yalnızca %3 daha düşük eğilme dayanımına, %280

daha yüksek tokluğa, %413 daha yüksek kırılma enerjisine ve %300 daha yüksek çarpma enerjisi yutma kapasitesine sahiptir.

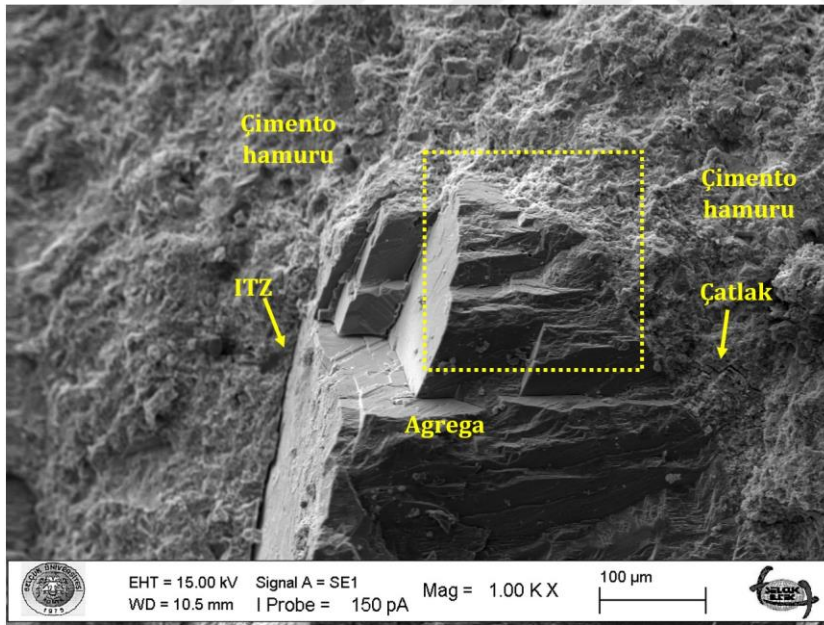


Şekil 4.33. Atık lastik kauçuklar grubuna ait sonuçların karşılaştırılması

4.1.8. SEM analizi

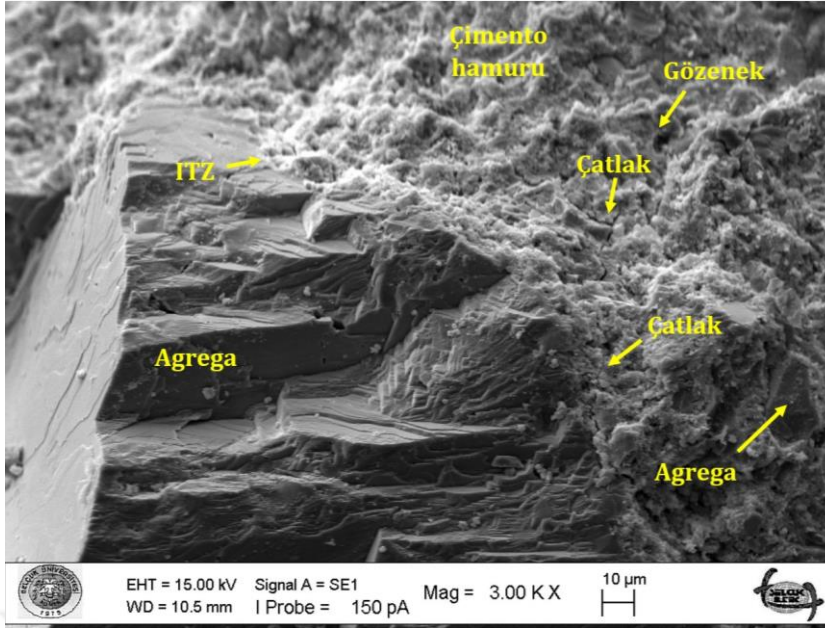
SEM analizi, her bir karışım grubundan seçilen bazı numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İncelenen her bir katkı maddesinin ve katkı maddelerinin bazı kombinasyonlarının betonun mikro yapısal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. SEM analizi, katkı maddelerinin betonun mikro yapısını nasıl etkilediğini göstermektedir. SEM analizinde karşılaştırılacak görüntüler aynı büyütme oranına sahip olmalıdır. Buna göre bu çalışmada, SEM analizi görüntülerinin karşılaştırılması için iki büyütme oranı seçilmiştir. Bunlar 1000X ve 3000X'tir. Farklı betonlar için SEM analizi görüntüleri bu iki büyütme oranı kullanılarak analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Referans betona ait SEM analizi görüntüleri Şekil 4.34.'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, beton az sayıda mikro çatlak ve az gözenekliliği olan yoğun ve kompakt bir mikro yapıya sahiptir. Ayrıca, bu betonda agrega ve çimento hamuru arasında iyi bir bağ bulunduğu görülmektedir. Bu da agrega ve çimento hamuru arasındaki ara yüzey geçiş bölgesi (ITZ) yoğun olduğundan anlaşılmaktadır.



M0, 1000X

Şekil 4.34. Referans betona ait SEM analizi görüntüleri



M0, 3000 X

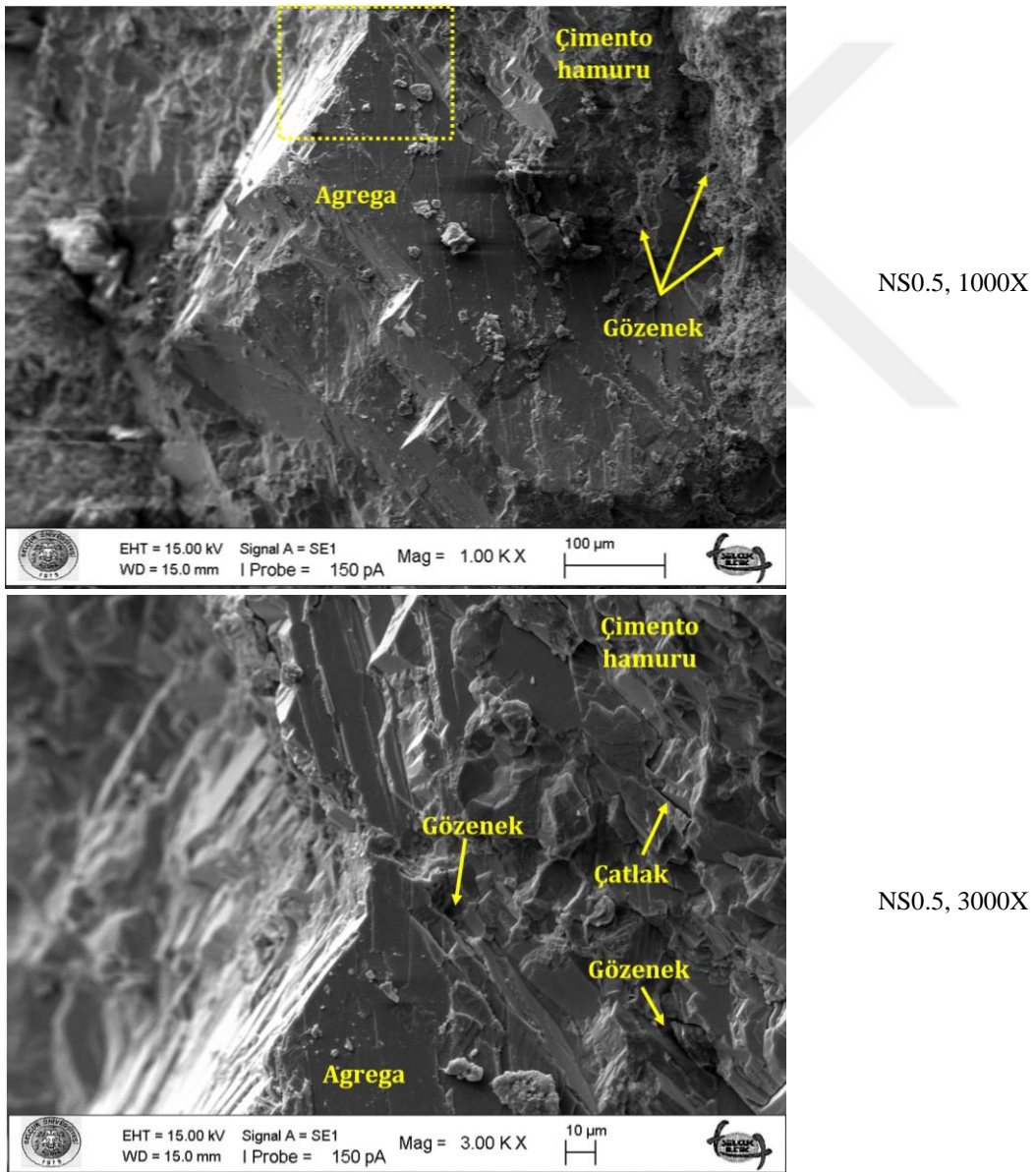
Şekil 4.34. (Devam) Referans betona ait SEM analizi görüntüleri

Nano katkı içeren betonların SEM analizi görüntüsü Şekil 4.35.'te gösterilmektedir. Şekilde, %0.5 nano-SiO₂ (NS0.5), %0.5 nano-Al₂O₃ (NA0.5), %0.5 nano-Fe₂O₃ (NF0.5) ve %0.167 nano-SiO₂ + %0.167 nano-Al₂O₃ + %0.167 nano-Fe₂O₃ (NSNANF0.5) içeren betonların SEM analizi görüntüsü gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere nano katkı maddeleri betonun mikro yapısının yoğunluğunu ve kompaktlığını arttırmaktadır. Nano katkı maddeleri içeren betonların mikro yapısında çok az sayıda mikro çatlak ve gözenek gözlenmiştir. Ayrıca, agrega ve çimento hamuru arasında çok yoğun bir ITZ de görülmüştür. Nano katkı maddelerinin betonun mikro yapısını iyileştirme etkisi, nano partiküllerin mikro yapıda bulunan gözenekleri ve boşlukları doldurmak için dolgu maddeleri olarak davrandığına bağlanmaktadır (Cibilakshmi ve Jegan, 2020; R. Liu ve ark., 2020; Senff ve ark., 2009; Zhuang ve Chen, 2019). Ayrıca nano katkı maddeleri büyük puzolanik reaktiviteleri sayesinde çimento hamurunun hidrasyonunu hızlandırmak için bir aktivatör olarak davranmaktadır (Choolaei ve ark., 2012; Jalal ve ark., 2015; Senff ve ark., 2015; Zhuang ve Chen, 2019). Ca(OH)₂ kristalleri betonun performansı üzerinde azaltıcı bir etkiye sahiptir. Nano partiküllerinin eklenmesi bu kristallerini azaltmaktadır (Ardalan ve ark., 2017; Bahadori ve Hosseini, 2012; Du ve ark., 2015; Jalal ve ark., 2015).

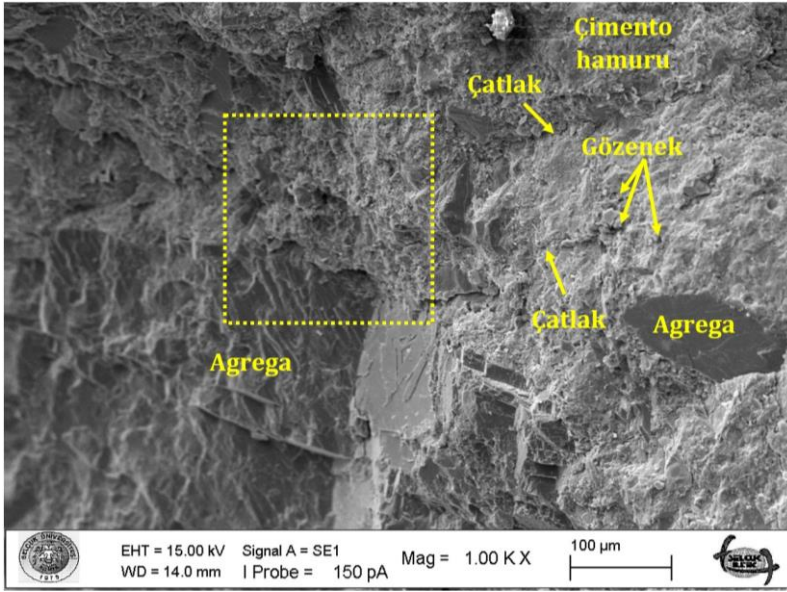
Şekil 4.35.'ten nano silikanın betonun mikro yapısı üzerindeki iyileştirme etkisinin nano alümina ve nano demire göre daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu nano silikadaki yüksek silika içeriğine bağlıdır. Bu da Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek betonun

yoğunluğunu arttıran kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ürünlerinin miktarını arttırmaktadır. Pengkun Hou ve ark., (2013), NS'nin kullanılmasıyla rijitliği düşük olan C-S-H ürünlerinin miktarının azaldığını ve rijitliği yüksek olan C-S-H ürünlerinin miktarının arttığını belirtmişlerdir.

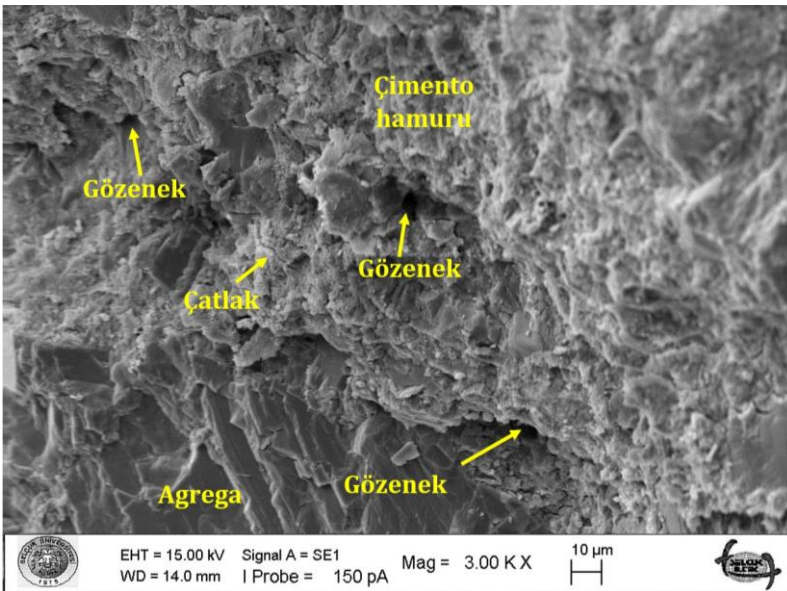
Şekil 4.34. ve Şekil 4.35. karşılaştırıldığında, normal betonun mikro yapısı zaten yoğun ve kompakt olduğundan, nano katkı maddelerinin mikro yapının yoğunluğu üzerindeki etkisinin çok büyük olmadığı anlaşılabilir. Bu, nano katkı maddeleri kullanıldığında betonun mekanik özelliklerinin önemli ölçüde artmamasının nedenini açıklayabilir.



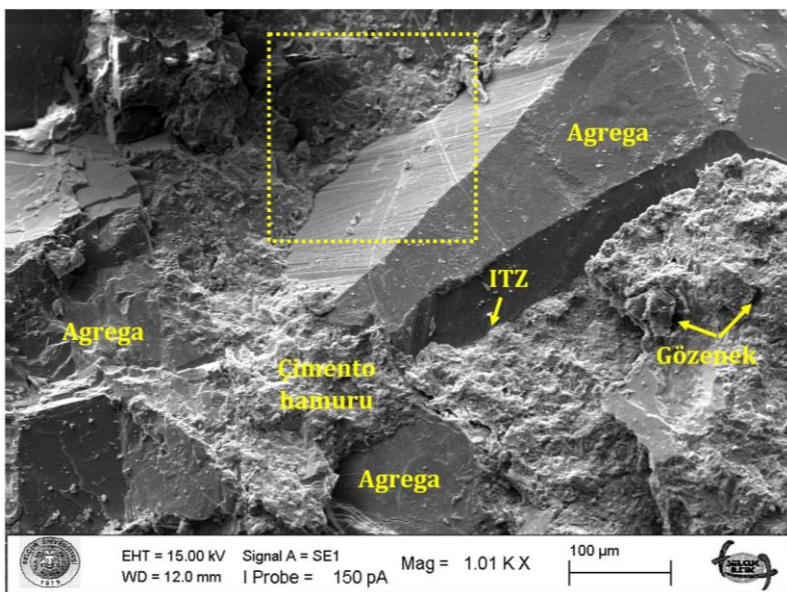
Şekil 4.35. Nano katkı maddeleri içeren betonlara ait SEM analizi görüntüleri



NA0.5, 1000X

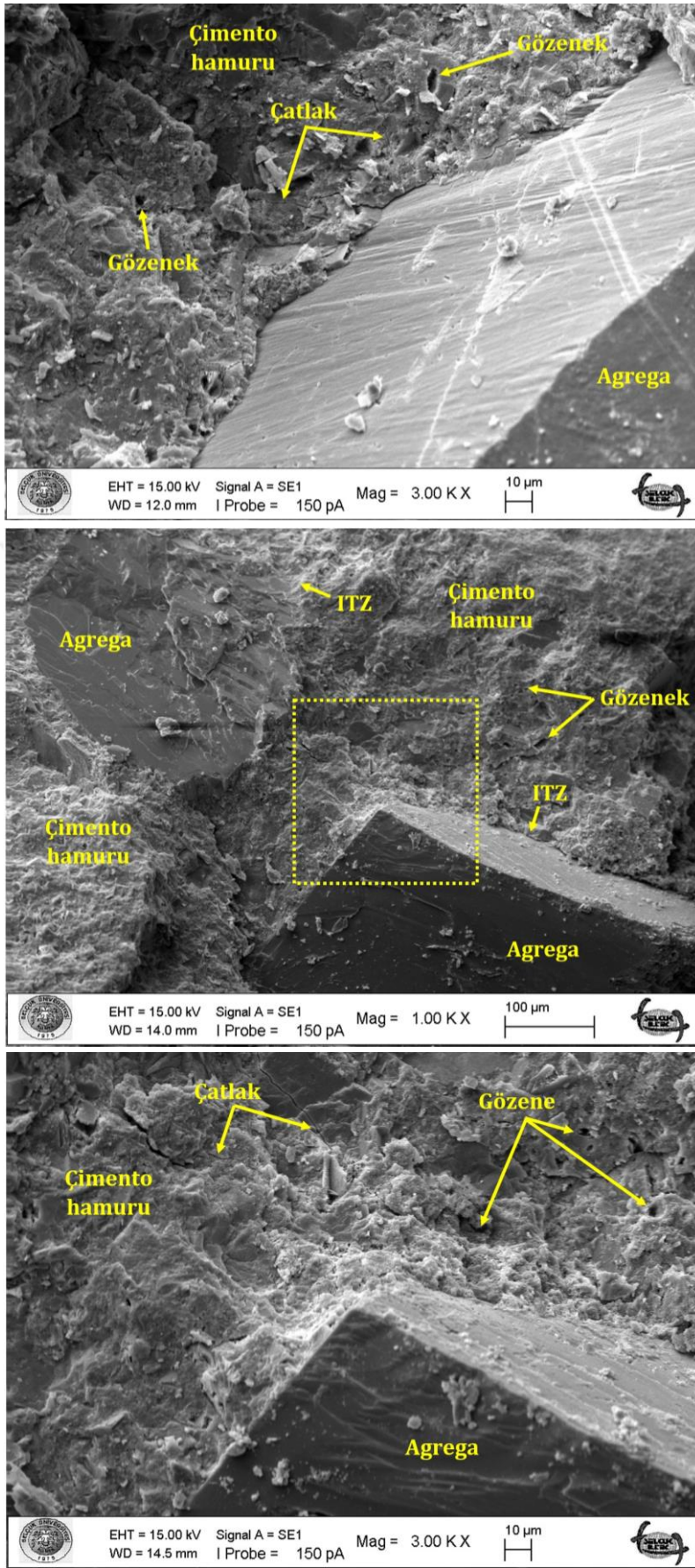


NA0.5, 3000X



NF0.5, 1010X

Şekil 4.35. (Devam) Nano katkı maddeleri içeren betonlara ait SEM analizi görüntüleri



NF0.5, 3000X

NSNANF0.5, 1000X

NSNANAF0.5, 3000X

Şekil 4.35. (Devam) Nano katkı maddeleri içeren betonlara ait SEM analizi görüntüleri

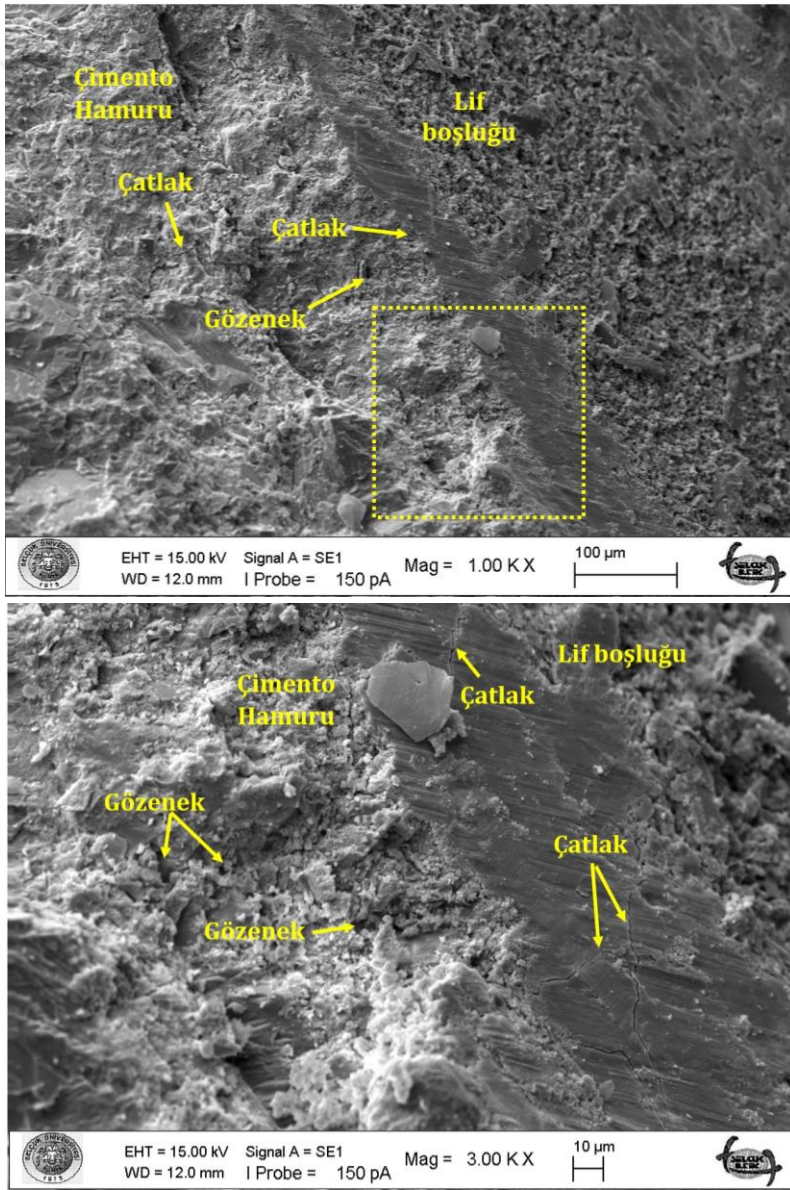
Lif içeren betonların bazılarının SEM analizi görüntüsü Şekil 4.36.'da gösterilmektedir. Şekilde, %1 çelik lif (STF1), %1 PET lif (PETF1), %0.25 PP (PPF0.25) lif ve %0.333 çelik lif + %0.333 PET lif + 0.083 PP lif (STF0.333PETF0.333PPF0.083) içeren betonların SEM analizi görüntüsü verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, %1 çelik lif içeren beton, bazı mikro çatlaklara ve gözeneklere sahip kompakt bir mikro yapıya sahiptir. Çelik lif boşluğu, sadece birkaç mikro çatlak içeren pürüzlü bir yüzeye sahiptir. Bu, çelik lif ve çevreleyen beton arasındaki iyi bağı açıklayabilir. Bu bağ, çelik lif içeren betonun yüksek performans göstermesinin ana nedenlerinden biridir.

Benzer şekilde, %1 PET lif içeren betonun mikro yapısında az çatlak ve gözenekler izlenmiştir. Bununla birlikte, PET lif boşluğu pürüzsüz bir yüzeye sahiptir. Ayrıca bu PET lif boşluğunda bazı çatlaklar görülmüştür. Çatlak boyutunun, çelik lif durumundan daha büyük olduğu izlenmiştir. PET lif boşluğunun pürüzsüz yüzeyi, PET lifin pürüzsüz yüzeyi nedeniyle oluşmuştur. Bu, PET lifler ile beton arasında zayıf bir bağa ve liflerin yüklemeye altında betondan sıyrılmasına neden olmaktadır (Bui ve ark., 2018). Bu zayıf bağı bir sonucu olarak, daha önce tartışılmış sonuçlardan da kanıtlandığı gibi, PET lif içeren betonun çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve çarpma dayanımı, çelik lif içeren betona kıyasla daha azdır.

Öte yandan, PP liflerin betonun gözenekliliğini arttırdığı gözlenmiştir. Şekil 4.36.'dan da anlaşılacağı üzere, PP lif içeren betonun mikro yapısı, çelik ve PET liflere kıyasla daha fazla sayıda çatlak ve gözenek içermektedir. PP lif durumundaki çatlakların boyutu da daha büyüktür. Benzer sonuçlar M. Zhang ve Li (2011) tarafından da bildirilmiştir. PP liflerin betonun gözenekliliğini, zararlı gözenek miktarını ve gözenek çapını arttırdığını rapor etmişlerdir. Bu etkinin, PP lif içeriği arttıkça arttığını da bulmuşlardır. Şekilden de görüldüğü gibi, PP lifler ile beton arasındaki ITZ çok zayıf ve gözenekler ve boşluklarla doludur. Bu, PP lif ile beton arasındaki zayıf bağı açıklayabilir. Bu zayıf bağ, önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi, betonun mekanik ve çarpma özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir.

Şekilden de görüldüğü gibi çelik, PET ve PP lifler birleşim şeklinde kullanıldığında, PP lifler betonun mikro yapısı üzerinde büyük bir etki göstermemiştir. Bu da PP liflerin çok düşük içeriğine bağlıdır. Sonuç olarak, bu betonun gözenekliliğinin PP lif içeren betonun gözenekliliğine göre çok daha az olduğu gözlenmiştir. Çelik lifle PET lif boşlukları arasındaki fark, bu betonun SEM analizi görüntülerinden de net bir şekilde görülebilmektedir.

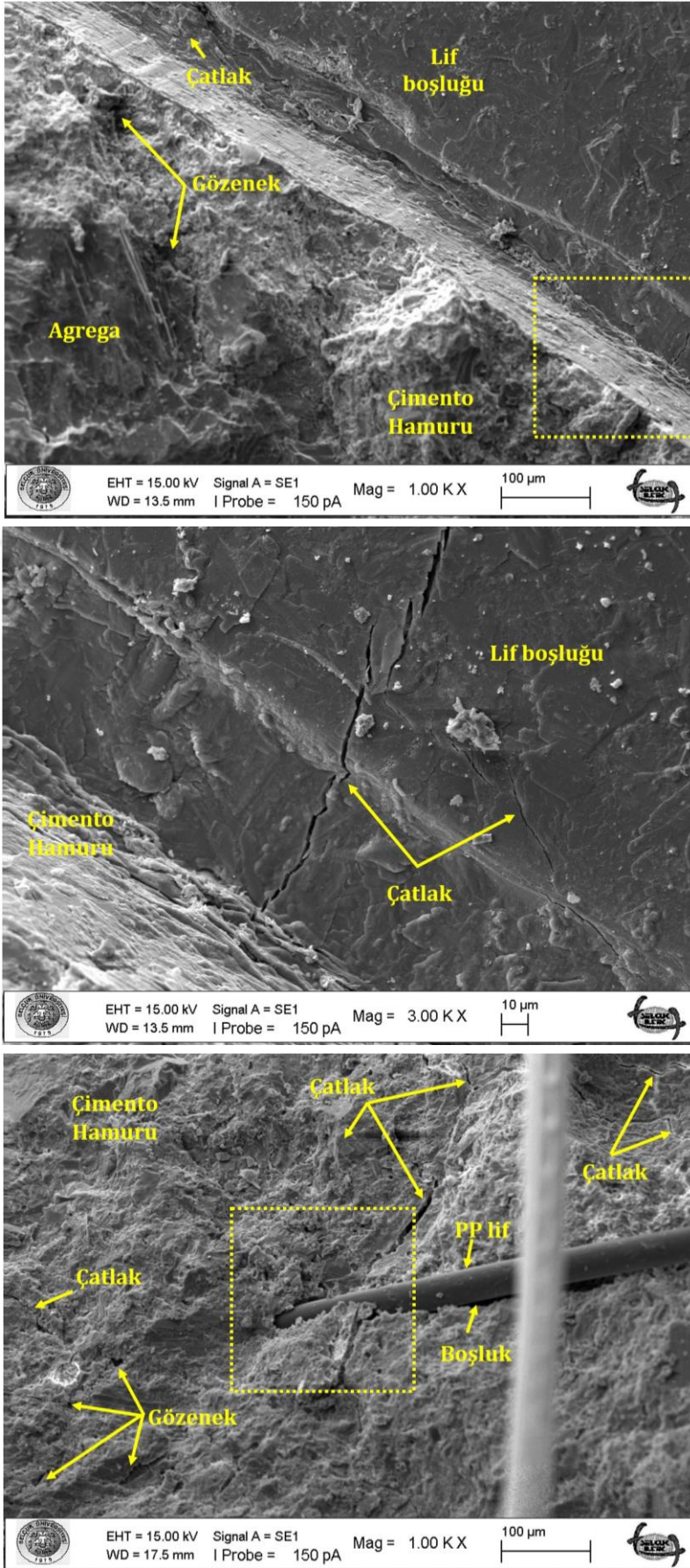
Çelik, PET ve PP liflerin mikro yapısı karşılaştırıldığında, çelik lif içeren betonun, PP ve PET lif içeren betonlara göre daha iyi ITZ ve mikro yapıya sahip olduğu izlenmiştir. Bu durum, çelik liflerin hidrofilik olmasına karşın PET ve PP liflerin hidrofobik olmasıyla ilişkilendirilebilir. Çelik liflerin hidrofilisitesi, çevreleyen betonun uygun şekilde hidratasyonuna yardımcı olmaktadır. Bu da daha yoğun bir ITZ'yi sağlamaktadır. Öte yandan, PET ve PP liflerin hidrofobikliği, hidratasyon için gerekli suyun yapıya girmesini kısıtlamaktadır. Ayrıca, bu lifler daha fazla hava kabarcıkları tutarak daha zayıf bir ITZ'ye neden olmaktadır (Hannawi ve ark., 2016). Mikro yapı özellikleri arasındaki farklar, betonun mekanik ve çarpma özelliklerine de yansımaktadır.



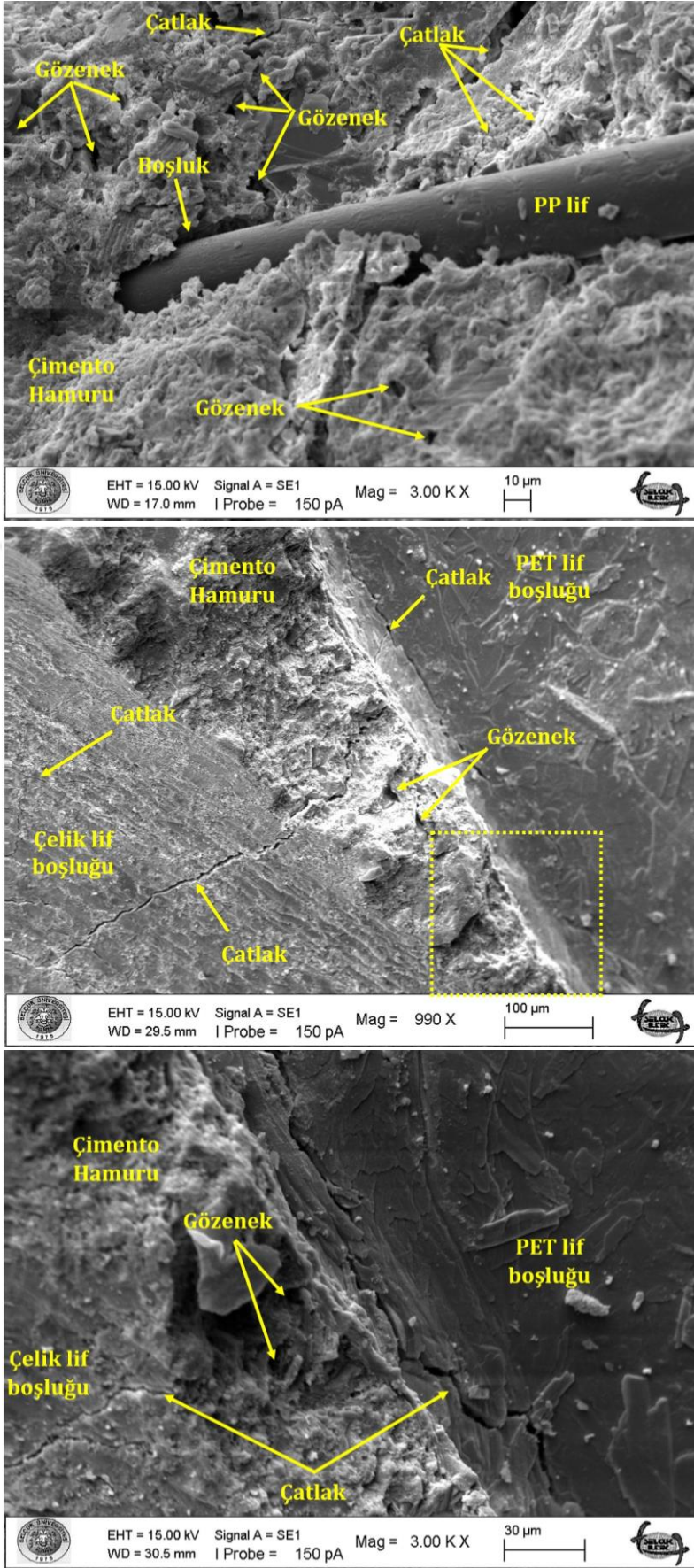
STF1, 1000X

STF1, 3000X

Şekil 4.36. Lifler içeren betonlara ait SEM analizi görüntüleri



Şekil 4.36. (Devam) Lifler içeren betonlara ait SEM analizi görüntüleri



PPF0.25, 3000X

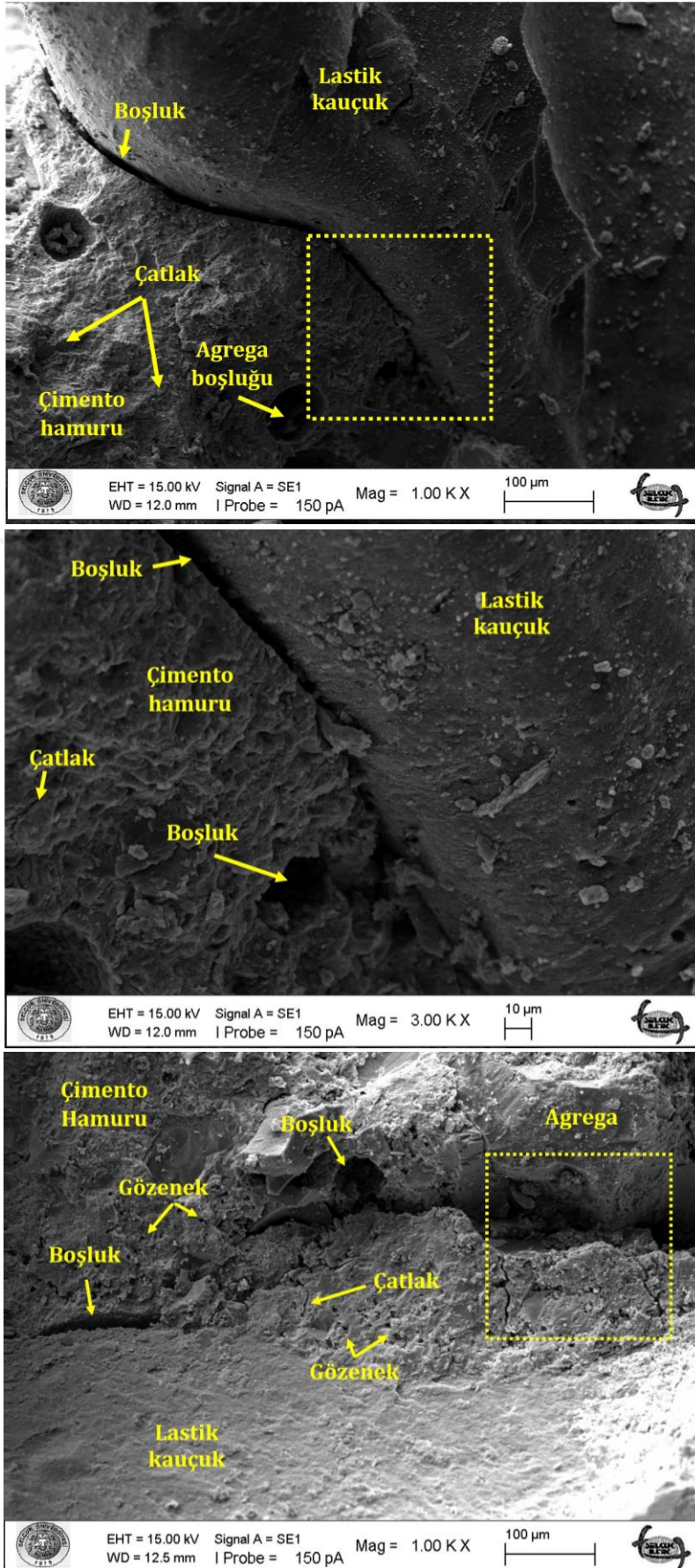
STF0.333PETF0.333
PPF0.083, 990XSTF0.333PETF0.333
PPF0.083, 3000X

Şekil 4.36. (Devam) Lifler içeren betonlara ait SEM analizi görüntüleri

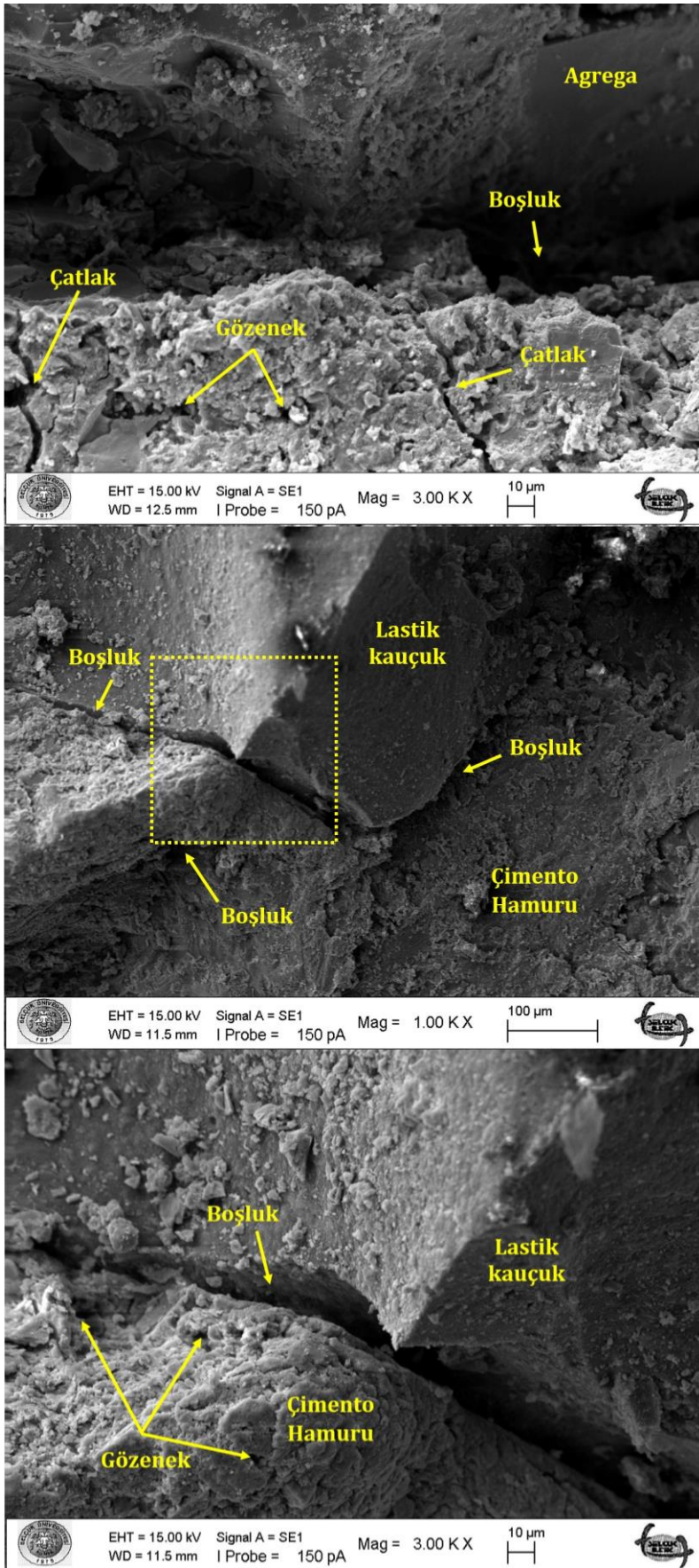
Atık lastik kauçuk içeren betonların SEM analizi görüntüsü Şekil 4.37.'de gösterilmektedir. SEM analizi için bu karışım grubundan üç numune seçilmiştir. Bunlar %10 ince kauçuk içeren beton (FR10), %10 iri kauçuk içeren beton (CR10) ve %5 ince kauçuk + %5 iri kauçuk içeren betondur (FRCR10). SEM analizi görüntülerinden de anlaşılacağı üzere, kauçuklu betonların mikro yapısı görece olarak yüksek miktarda çatlaklar, gözenekler ve boşluklar içermektedir. Ayrıca, lastik kauçuk partikülleri ve çevreleyen çimento matrisi arasındaki ITZ boşluklar içermektedir. ITZ'nin zayıf özellikleri kauçuk partiküllerinin hidrofobikliğinden oluşmaktadır. ITZ'deki boşluklar bu iki malzeme arasındaki bağı ve aderansı ciddi bir şekilde azaltmaktadır. Bu da lastik kauçuk partikülleri ile çimento matrisi arasında bulunan ayrılmadan da anlaşılabilir.

Çimento hamuru ile lastik kauçuk partikülleri arasındaki ITZ ve çimento hamuru ile agregalar arasındaki ITZ arasındaki fark, CR10'un SEM analizi görüntülerinde net bir şekilde görülebilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, çimento hamuru doğal agregalara güçlü bir şekilde bağlanmıştır. Öte yandan, çimento hamuru ile lastik kauçuk partikülleri arasında büyük bir boşluk bulunmaktadır. Lastik kauçuk içeren betonların normal betona kıyasla daha yüksek gözenekliliğe ve daha az kompakt mikro yapıya sahip olduğu da izlenmiştir. Kauçuklu betonlarda da çatlak sayısı ve genişliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenlerle, daha önce görüldüğü gibi lastik kauçuk içeren betonların mekanik özellikleri düşük olmuştur. Bu bulguların, literatürde yayınlanan sonuçlarla uyumlu olduğu bulunmuştur (Abdelmonem ve ark., 2019; Thomas ve Chandra Gupta, 2016; Werdine ve ark., 2021).

Kauçuklu betonda boşlukların ve gözeneklerin miktarının yükselmesi, esas olarak, betonların karıştırılması sırasında kauçuk partiküllerinin yüzeyine yapışık hava kabarcıklarından kaynaklanmaktadır (Werdine ve ark., 2021). Bu, matristeki en kritik bölge olan ITZ'nin çok kırılmalı olmasına ve genel olarak mikro yapının daha az kompakt olmasına neden olur. Lastik kauçuk partikülleri ile çimento hamuru arasındaki zayıf aderans ve kauçuk partiküllerinin zayıf direnci nedeniyle kauçuk partikülleri matriste boşluklar gibi davranmaktadır. Bu nedenlerle, betonun mekanik özellikleri azalmaktadır. (Werdine ve ark., 2021). Bu zayıf bölgelerin miktarı, kauçuk partiküllerinin kullanım oranı arttıkça artmaktadır. Bu davranış, daha önce bahsedilen sonuçlarla doğrulanabilir.



Şekil 4.37. Atık lastik kauçuklar içeren betonlara ait SEM analizi görüntüleri



Şekil 4.37. (Devam) Atık lastik kauçuklar içeren betonlara ait SEM analizi görüntüleri

4.1.9. Karışım grupları arasındaki etkiler

Bu aşamada, önceki aşamada hazırlanan her karışım grubunda en yüksek performansı gösteren karışım dikkate alınarak yeni katkı maddelerinin birleşimlerini içeren karışımlar hazırlanmıştır. Daha önce görüldüğü gibi, nano katkı maddeleri grubunda, lifler grubunda ve atık lastik kauçuklar grubunda en uygun karışım sırasıyla NF0.5, STF1 ve FR10'dur. Bu aşamada, bu üç karışım kullanılarak farklı karışım grupları arasındaki etkiler incelenmiştir. Bu amaçla, bu üç karışımda kullanılan katkı maddeleri kullanılarak yeni katkı maddelerinin kombinasyonları araştırılmıştır. Bu katkı maddelerinin birleşimleri ile yeni betonlar üretilmiş ve test edilmiştir.

Bu aşamada, toplam dört yeni karışım hazırlanmıştır. Bu aşamada üretilen betonların karışım oranları Çizelge 4.8.'de sunulmuştur. Kolaylık için NF0.5 yerine N, STF1 yerine F, FR10 yerine R yazılmıştır. Karışımlar hazırlandıktan sonra kür edilmiş ve 28 gün sonra test edilmiştir. Yeni üretilen betonların birim ağırlığı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, eğilme tokluk özellikleri, SEM analizi ve çarpma dayanımı incelenmiştir.

Hazırlanan betonların birim ağırlık ve statik özelliklerine ait test sonuçları Çizelge 4.9.'da verilmiştir. Sonuçların daha kolay karşılaştırılabilmesi için referans betona kıyasla görelî yüzdeler Şekil 4.38.'de gösterilmiştir. Farklı N, F ve R kombinasyonlarının etkisinin daha iyi bir şekilde değerlendirilebilmesi için bunların tekil etkisi de şekilde gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, N, F ve R'nin farklı kombinasyonlarda kullanılması betonun birim ağırlığında önemli bir etki yaratmamıştır. N+F'nin kullanılması betonun birim ağırlığını yaklaşık %5 oranında arttırmıştır. R'nin, N ve/veya F ile birlikte kullanılması, R'nin yalnız kullanılmasında birim ağırlıkta meydana gelen azalmanın bir kısmını geri kazandırmıştır.

Çizelge 4.8. Yeni üretilen betonların karışım oranları

Karışım No.	Karışım kodu	Çimento	Su	İnce agrega	İri agrega	Süper akışkanlaştırıcı (0.8%)	Nano-Fe ₂ O ₃		Çelik lif		İnce lastik kauçuk	
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	%	kg/m ³	%	kg/m ³
36	N+F	348.25	189.85	953.86	774.99	2.8	0.5	1.75	1	78.5		
37	N+R	348.25	189.85	858.47	774.99	2.8	0.5	1.75			10	48.1
38	F+R	350	189.85	858.47	774.99	2.8			1	78.5	10	48.1
39	N+F+R	348.25	189.85	858.47	774.99	2.8	0.5	1.75	1	78.5	10	48.1

Çizelge 4.9. Yeni üretilen betonların birim ağırlık ve statik özelliklerine ait test sonuçları

Karışım No.	Karışım Kodu	Birim Ağırlık (Kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
36	N+F	2493	40.87	3.38	6.99
37	N+R	2321	29.14	1.87	4.63
38	F+R	2291	29.32	2.58	6.39
39	N+F+R	2360	33.59	3.00	9.31

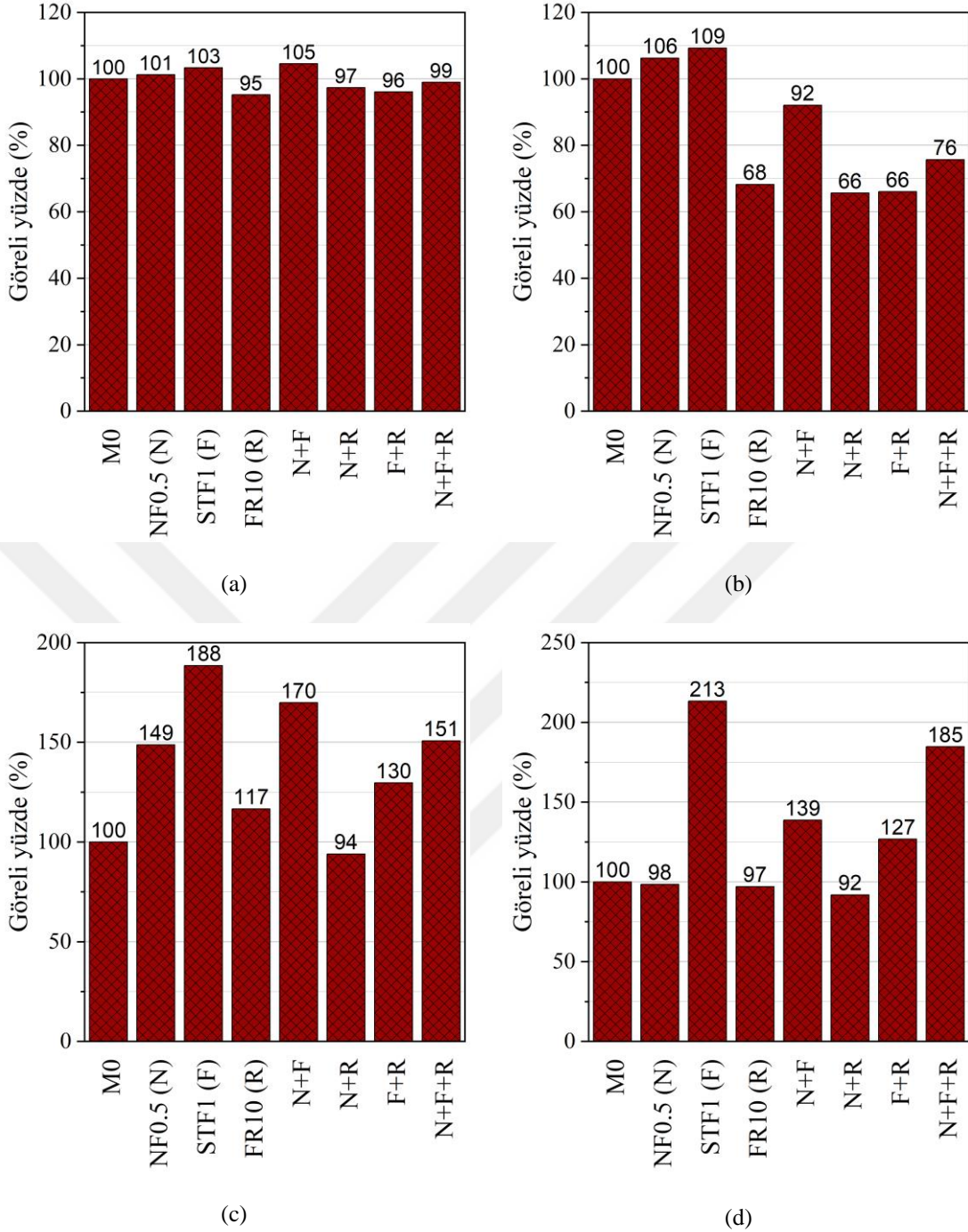
Çizelge 4.10. Yeni üretilen betonlara ait tokluk indeksleri ve artık mukavemet faktörleri

Karışım No.	Karışım kodu	δ_0 (mm)	Tokluk değerleri				Toplam emilen enerji (N.m)	Tokluk indeksleri			Artık mukavemet faktörleri	
			T ₈₀ (N.m)	T ₃₈ (N.m)	T _{5.58} (N.m)	T _{10.58} (N.m)		I ₅	I ₁₀	I ₂₀	R _{5,10}	R _{10,20}
36	N+F	1.83	6.12	20.39	28.22	35.88	36.26	3.33	4.61	5.87	25.59	12.53
37	N+R	0.60	1.07	3.48	4.13	4.13	4.24	3.25	3.85	3.85	12.01	0
38	F+R	1.70	5.58	20.81	30.68	42.97	44.78	3.73	5.50	7.70	35.40	22.04
39	N+F+R	1.83	9.69	29.50	42.67	57.06	60.11	3.04	4.40	5.89	27.17	14.85

Çizelge 4.11. Yeni üretilen betonlara ait çarpma dayanımı test sonuçları

Karışım No.	Karışım kodu	İlk çatlak dayanımı (N1) (Vuruş sayısı)	Kırılma dayanımı (N2) (Vuruş sayısı)	ÇDSAY* (%)
36	N+F	5	17	240
37	N+R	2	2	0
38	F+R	8	19	137.5
39	N+F+R	14	51	264.3

* Çatlak sonrası çarpma sayısındaki artış yüzdesi

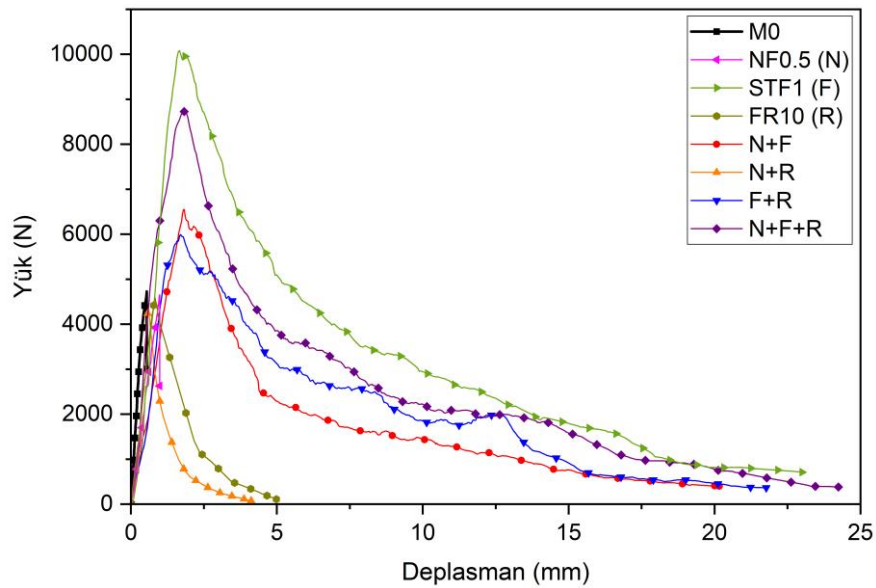


Şekil 4.38. Yeni üretilen betonların test sonuçlarının görelî yüzdesi, a) birim ağırlık, b) basınç dayanımı, c) yarmada çekme dayanımı, d) eğilme dayanımı

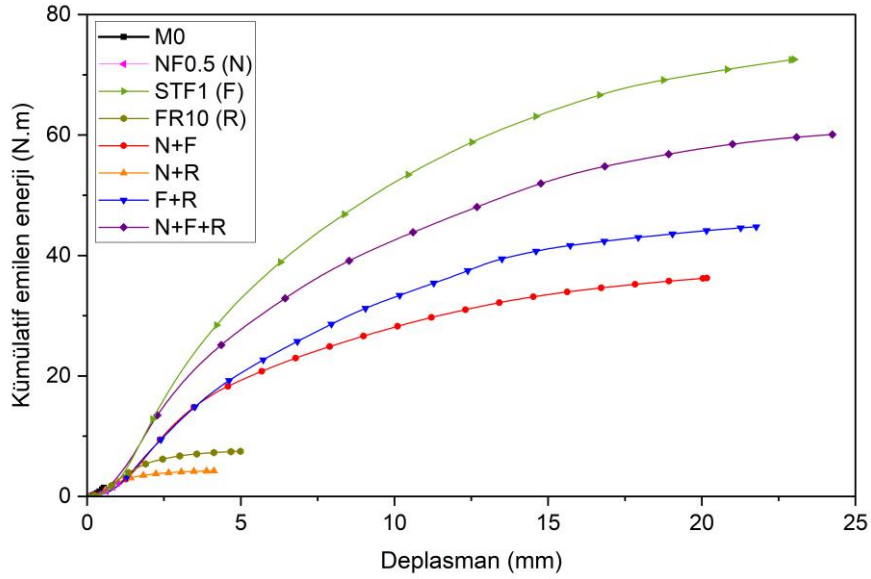
Çizelge 4.9. ve Şekil 4.38.'den de anlaşıldığı gibi, N, F ve/veya R'nin kombinasyonlarının betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı üzerinde genel olarak olumsuz bir etkisi olmuştur. İncelenen tüm yeni betonların basınç dayanımında normal betona göre azalma izlenmiştir. İncelenen yeni kombinasyonların bazıları yarmada çekme dayanımında ve eğilme dayanımında artış göstermiştir. Ancak, bu kombinasyonların etkisi, içinde bulunan en iyi performansa sahip

katkı maddesinin tekil etkisinden daha azdır. Örneğin, N+F kombinasyonu içeren betonun yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı referans betona kıyasla sırasıyla %70 ve %39 oranlarında daha yüksektir. Ancak bu değerler, F ile karşılaştırıldığında sırasıyla %18 ve %74 oranlarında daha az çıktığı görülmüştür.

Bu aşamada üretilen betonların yük-deplasman grafikleri, kümülatif emilen enerji-deplasman grafikleri Şekil 4.39. ve Şekil 4.40.'ta gösterilmektedir. Betonların tokluk indeksleri ve artık mukavemet faktörleri ise Çizelge 4.10.'da sunulmuştur. Şekiller ve çizelgeden de anlaşılacağı üzere, N, F ve R farklı kombinasyonlarda kullanıldığında betonun sünekliği ve enerji yutma kapasitesi artmıştır. Bu artışın çelik lif içeren betonlarda daha yüksek olduğu görülmüştür. Çelik lif içermeyen betonda (N+R) sünekliğin çok yüksek olmadığı izlenmiştir. Lif kullanılmadığı durumda çatlaklar daha hızlı oluşup yayılmıştır. Sonuçlarda ayrıca, F+R kombinasyonunun betonun sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini N+R kombinasyonundan daha fazla arttırdığı izlenmiştir. Bu da F+R kombinasyonunun betonun enerji yutma kapasitesini ve sünekliğini arttıran iki katkı maddesi içermesiyle sağlanmıştır. Betonun eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesi açısından yeni test edilen kombinasyonlar arasında en yüksek performans N+F+R kombinasyonunda bulunmuştur. Ancak, N+F+R betonunun performansı, %1 çelik lif içeren betonun performansı ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu izlenmiştir. Bu sonuçlar, tokluk indeksleri ve artık mukavemet faktörleri değerleriyle de desteklenmektedir. Ayrıca, toplam emilen enerji ve ilk çatlığa kadar emilen enerji değerleri karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edilmiştir.

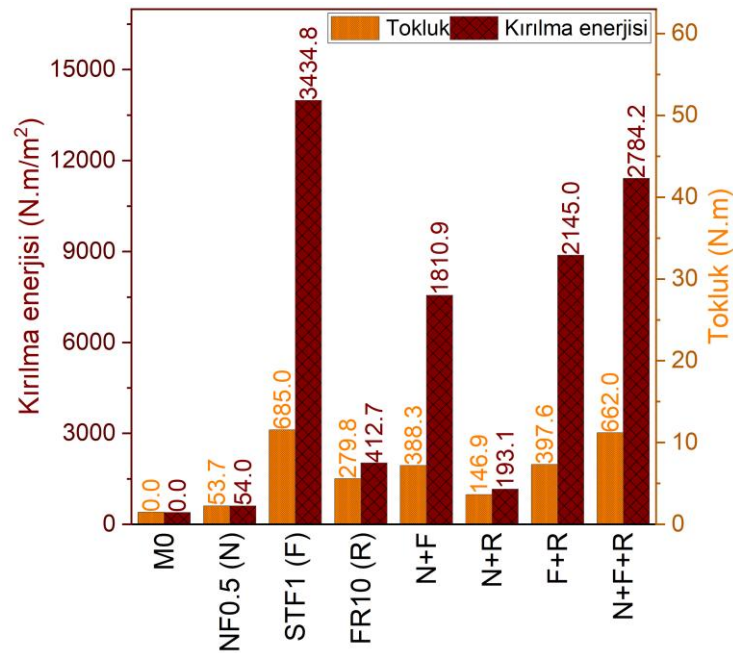


Şekil 4.39. Yeni üretilen betonlara ait yük-deplasman eğrileri



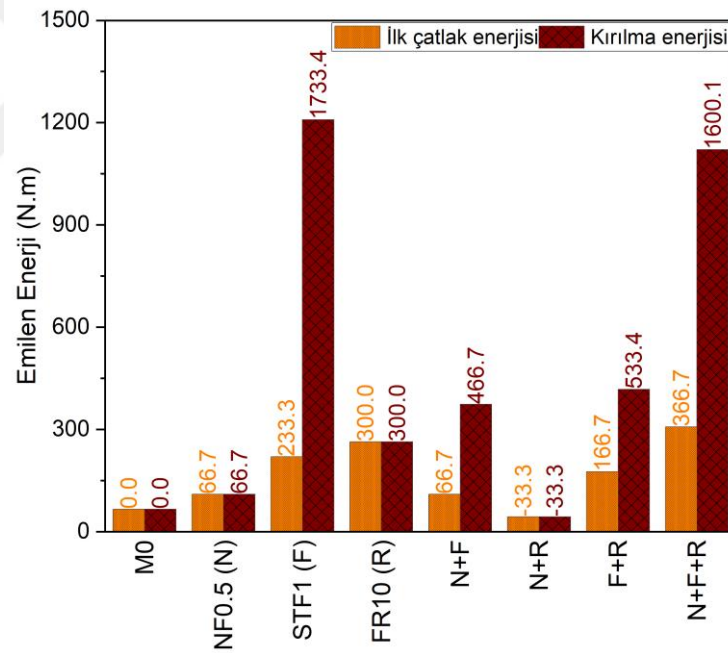
Şekil 4.40. Yeni üretilen betonlara ait kümülatif emilen enerji-deplasman eğrileri

Yeni katkı maddeleri kombinasyonlarını içeren betonun kırılma enerjisinin ve tokluğunun değerleri ve artış yüzdeleri Şekil 4.41.'de gösterilmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, kırılma enerjisi ve toklukta, daha önce enerji yutma kapasitesinde bulunana benzer bir eğilim izlenmiştir. F'nin, N ve/veya R ile birlikte kullanılması, çelik lif içermeyen durumlara kıyasla betonun tokluğunu ve kırılma enerjisini arttırmıştır. Bu artışın kırılma enerjisinde tokluğa göre daha belirgin olduğu izlenmiştir. Ancak, bu sonuçlar sadece çelik lif içeren betonun performansından çok daha düşüktür.

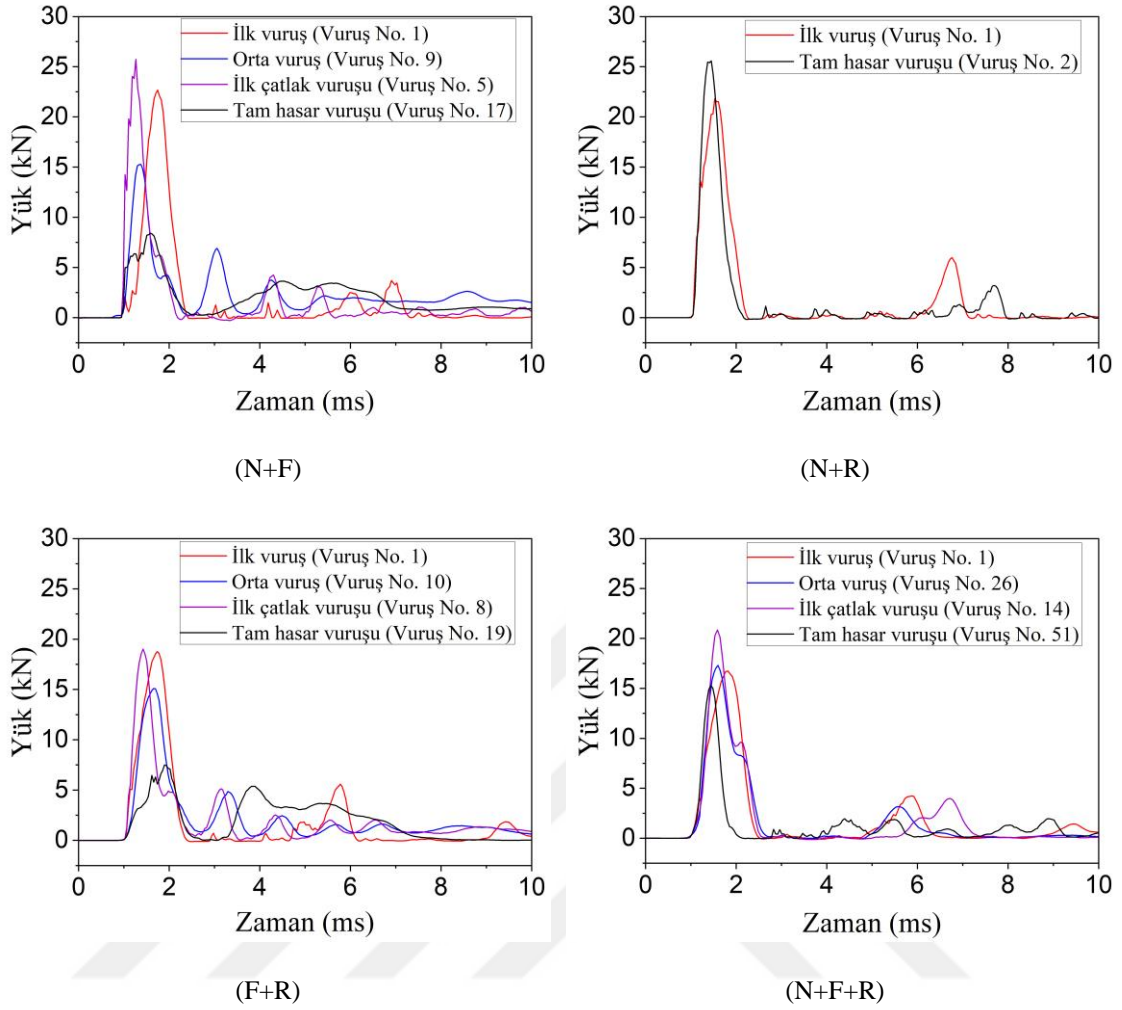


Şekil 4.41. Yeni üretilen betonlara ait kırılma enerjisi ve tokluk değerleri ve artış yüzdeleri

Yeni üretilen betonların çarpma dayanımı test sonuçları Çizelge 4.11.'de verilmiştir. Betonların çarpma enerjisinin değeri ve artış yüzdesi grafiksel olarak Şekil 4.42.'de sunulmuştur. Testten elde edilen çarpma yükü-zaman grafikleri ise Şekil 4.43.'te gösterilmiştir. Çarpma test sonuçları, çelik lif içeren karışımların çarpma dayanımının ve çarpma enerjisinin referans betonunkilerden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Öte yandan, lif içermeyen karışım (N+R), referans betona göre daha düşük bir çarpma performansı göstermiştir. Çarpma dayanımını arttırmada, incelenen yeni katkı maddeleri kombinasyonları arasında en yüksek etki N+F+R kombinasyonunda bulunmuştur. N+F+R betonu %1 çelik lif içeren betondan daha yüksek bir ilk çatlak çarpma dayanımı göstermişken F betonu daha yüksek bir kırılma çarpma dayanımı göstermiştir. N+F+R ve F betonlarının ilk çatlak çarpma dayanımı normal betona göre sırasıyla %367 ve %233 daha yüksekken betonların kırılma çarpma dayanımı sırasıyla %1600 ve %1733 daha yüksektir.



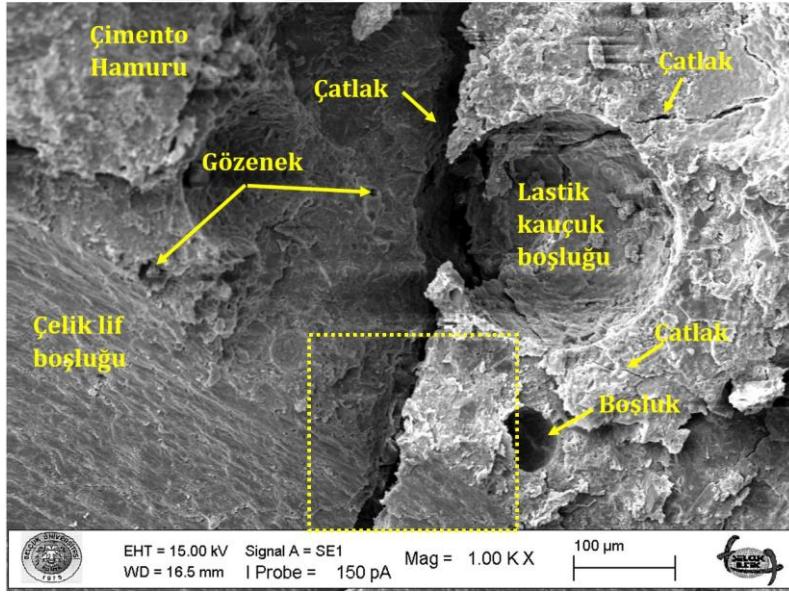
Şekil 4.42. Yeni üretilen betonlara ait çarpma enerjisi değerleri ve artış yüzdeleri



Şekil 4.43. Yeni üretilen betonlara ait çarpma yükü-zaman grafikleri

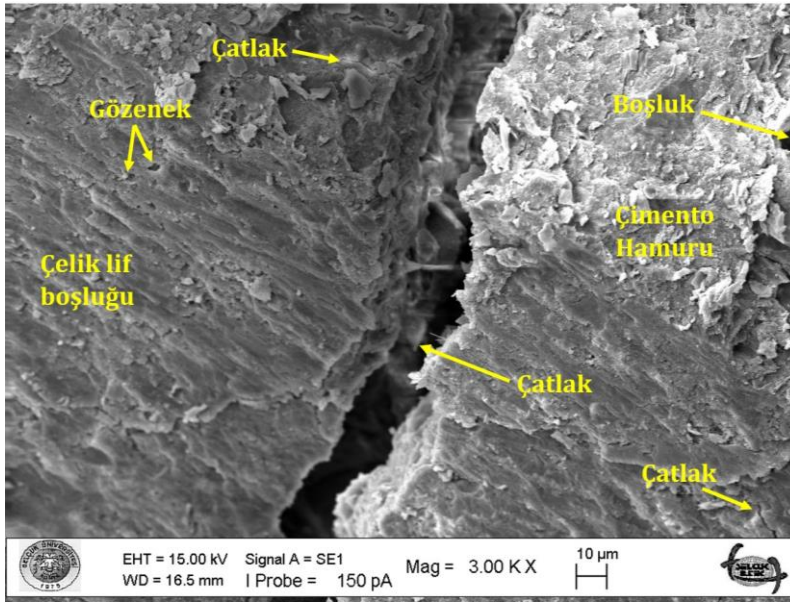
Farklı test sonuçları karşılaştırıldığında, yeni kombinasyonları içeren betonların performansının referans betondan daha yüksek olduğu izlenmiştir. %1 çelik lifin, %0.5 nano-Fe₂O₃ ve/veya %10 ince lastik kauçukla birlikte kullanılması, bu iki katkı maddesini içeren betonların performansını yükseltmiştir. Genel olarak, incelenen yeni kombinasyonlar arasında en yüksek performans N+F+R kombinasyonunda bulunmuştur. N+F+R betonu en yüksek çarpma dayanımına sahip olduğu için yeni test edilen betonların arasında en uygun beton N+F+R olarak seçilmiştir. Normal betona göre, N+F+R betonunun kırılma çarpma enerjisi %1600.1 oranında, ilk çatlak çarpma enerjisi %336.7 oranında, yarmada çekme dayanımı %51 oranında, eğilme dayanımı %85 oranında, kırılma enerjisi %2784.2 oranında ve tokluğu %662 oranında daha yüksektir. Ancak bu betonun basınç dayanımı 33.59 MPa olup normal betona göre %24 oranında daha düşüktür.

N+F+R betonunun SEM analizi görüntüleri elde edilmiş ve Şekil 4.44.'te gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, bu betonun mikro yapısında bazı mikro çatlaklar, gözenekler ve boşluklar izlenmiştir. Ayrıca, mikro yapıda nispeten büyük bir mikro çatlak da görülmüştür. Bu çatlak test numunesinin alınmasında veya hazırlanmasında oluşmuş olabilir. Şekil ayrıca çelik lif ve lastik kauçuk boşluklarını da göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, çelik lif boşluğu yoğun bir beton hamuruna sahipken, lastik kauçuk boşluğunda çatlaklar ve boşluklar izlenmiştir. Bu, çelik lif ile beton arasındaki iyi bağı ve lastik kauçuk ile beton arasındaki zayıf bağı açıklayabilir. N+F+R'nin SEM analizi görüntüleri ile STF1'in SEM analizi görüntüleri (Bkz. Şekil 4.36.) karşılaştırıldığında, STF1'in mikro yapısının daha kompakt ve yoğun olduğu ve daha az çatlaklara ve gözenekliliğe sahip olduğu görülebilir. N+F+R betonunun mikro yapısındaki çatlak sayısının ve gözenekliliğin miktarının artması lastik kauçuk varlığına bağlanabilir. N+F+R ve STF1 betonlarının mikro yapısında izlenen fark, N+F+R betonuna kıyasla STF1 betonunun daha yüksek performansa sahip olduğunu da yansıtmaktadır.



N+F+R, 1000X

Şekil 4.44. N+F+R betonuna ait SEM analizi görüntüleri



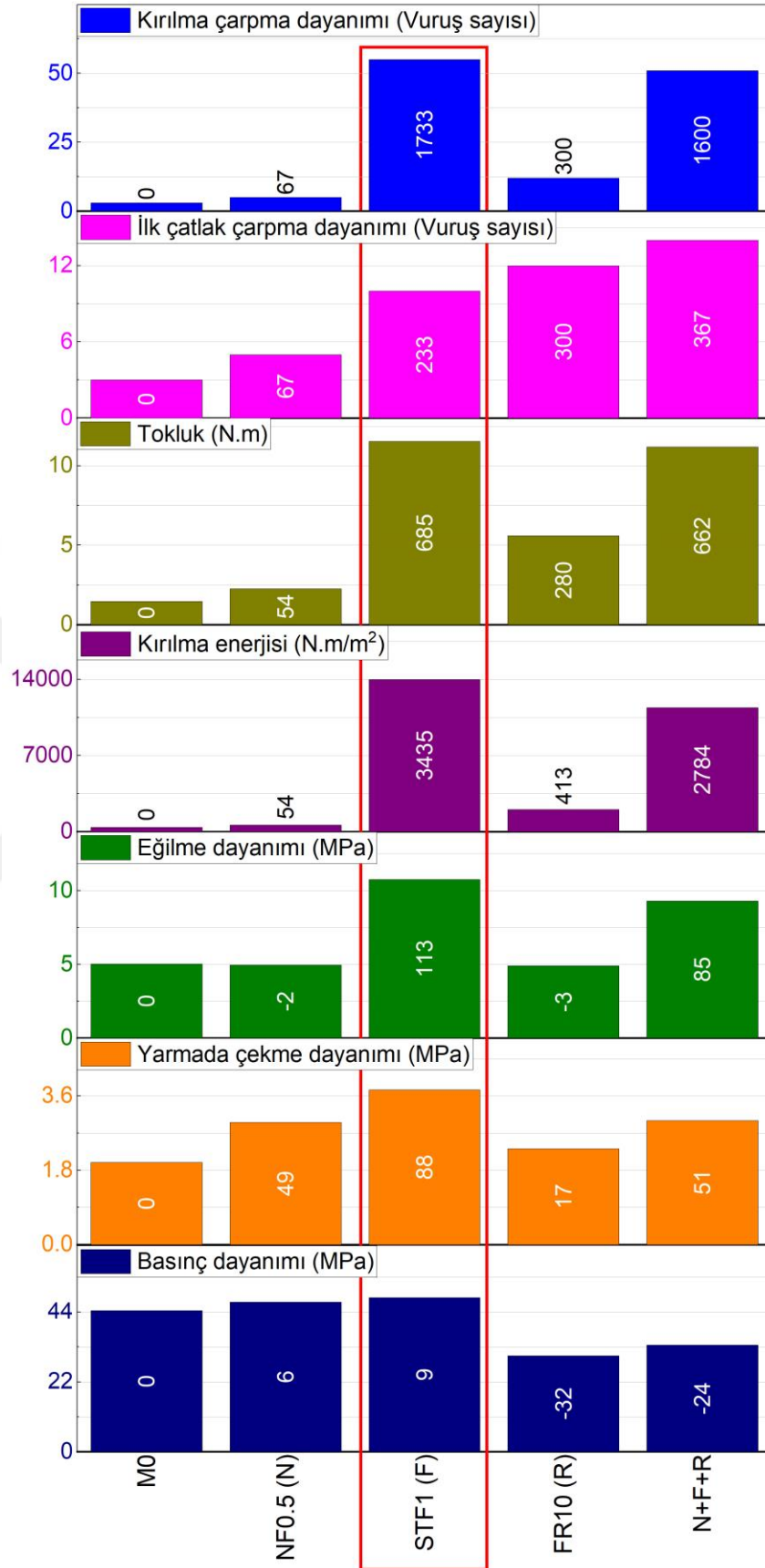
N+F+R, 3000 X

Şekil 4.44. (Devam) N+F+R betonuna ait SEM analizi görüntüleri

4.1.10. Genel olarak en uygun karışımın seçilmesi

Bu çalışma kapsamında üretilen 39 karışım arasında en uygun karışımın seçilmesi için karışım grupların ve yeni üretilen betonların en uygun karışımları arasında bir karşılaştırma yapılması gerekmektedir. Daha kolay bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla bu betonların test sonuçları Şekil 4.45.'te gösterilmiştir. Daha önce söylendiği gibi bu çalışmanın odak noktası çarpma dayanımı olduğu için en uygun karışımının seçilmesinde kırılma çarpma dayanımına daha fazla önem verilmiştir.

Şekilden de görüldüğü gibi, NF0.5 ve FR10 betonları, STF1 ve N+F+R betonlarına göre çok daha düşük bir performans göstermiştir. İlk çatlak çarpma dayanımı açısından en yüksek performans N+F+R karışımında çıkmıştır. Bu karışım, basınç dayanımı hariç, diğer testlerde iyi performans göstermiştir. Ancak, kırılma çarpma dayanımı ve incelenen diğer özellikler açısından en yüksek performans gösteren karışım %1 çelik lif içeren karışım (STF1) olmuştur. Bu sayede, çalışmada genel olarak en yüksek performans gösteren karışım STF1 olarak seçilmiştir. Daha önce gösterildiği gibi, %1 çelik lifin kullanılması betonun basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını, eğilme dayanımını, ilk çatlakta statik enerji yutma kapasitesini, kırılmada statik enerji yutma kapasitesini, tokluğunu, kırılma enerjisini, ilk çatlak çarpma dayanımını ve kırılma çarpma dayanımını sırasıyla %9.2, %88.4, %113.4, %463.3, %4838.3, %685, %3434.8, %233.3 ve %1733.4 oranlarında arttırmıştır. Bu beton farklı tipte betonarme plaklar üretmek için kullanılmıştır.



Şekil 4.45. Genel olarak en uygun karışımın seçilmesi

4.1.11. Maliyet analizi

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin birim fiyatı Çizelge 4.12.'de verilmiştir. Birim fiyatlar Türk lirası (TL) ve ABD doları olarak verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi, katkı maddelerinin birim fiyatı çimento ve doğal agregalara göre yüksektir. Ayrıca nano katkı maddelerinin en pahalı malzemeler olduğu da görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan en pahalı malzeme nano-Fe₂O₃'tür. Bu katkı maddesinin birim fiyatı 4716.34 TL/kg (262.95 ABD doları/kg)'dir. Bu da çimentonun birim fiyatına göre %254,837 daha yüksektir. Nano katkı maddelerinin yüksek maliyeti, bu malzemelerin üretimi sırasında kullanılan pahalı teknoloji ve ekipmandan kaynaklanmaktadır (Crucho ve ark., 2018). PP lifler, çelik lifler ve süper akışkanlaştırıcı da çimentoya göre pahalı malzemelerdir. Çizelgeden de anlaşıldığı üzere, katkı maddelerinin en ucuzu atık malzemelerden üretilen katkı maddeleridir. Bunlar ince ve iri atık lastik kauçuklardır. Daha önce de belirtildiği gibi, bu çalışmada kullanılan PET lifler atık PET su şişelerinden elle üretilmiştir. Bu nedenle maliyet analizinde PET liflerin maliyeti göz önüne alınmamıştır.

Bu çalışmada incelenen betonların 1 m³'lük maliyeti hesaplanmış ve Çizelge 4.13.'te verilmiştir. Referans betonun maliyetine kıyasla betonların maliyet değerlerinin göreceli yüzdesi Şekil 4.46.'da verilmiştir. Çizelge ve şekilden de görüldüğü gibi katkı maddelerinin kullanılmasıyla beton maliyeti oldukça artmıştır. Katkı maddesi içeriği arttıkça beton maliyetinin arttığı da izlenmiştir. Sonuçlar, nano katkı maddelerini, özellikle nano-Fe₂O₃, içeren betonların en pahalı betonlar olduğunu göstermektedir. Çelik lif içeren betonların maliyetinin diğer lif katkılı betonlara göre daha yüksek olduğu da izlenmiştir. Sonuçlar ayrıca, atık lastik kauçuklar ve PET lifler gibi atık malzemelerden üretilen katkı maddeleri içeren betonların katkılı betonlar içerisinde en ucuz olduğunu göstermektedir.

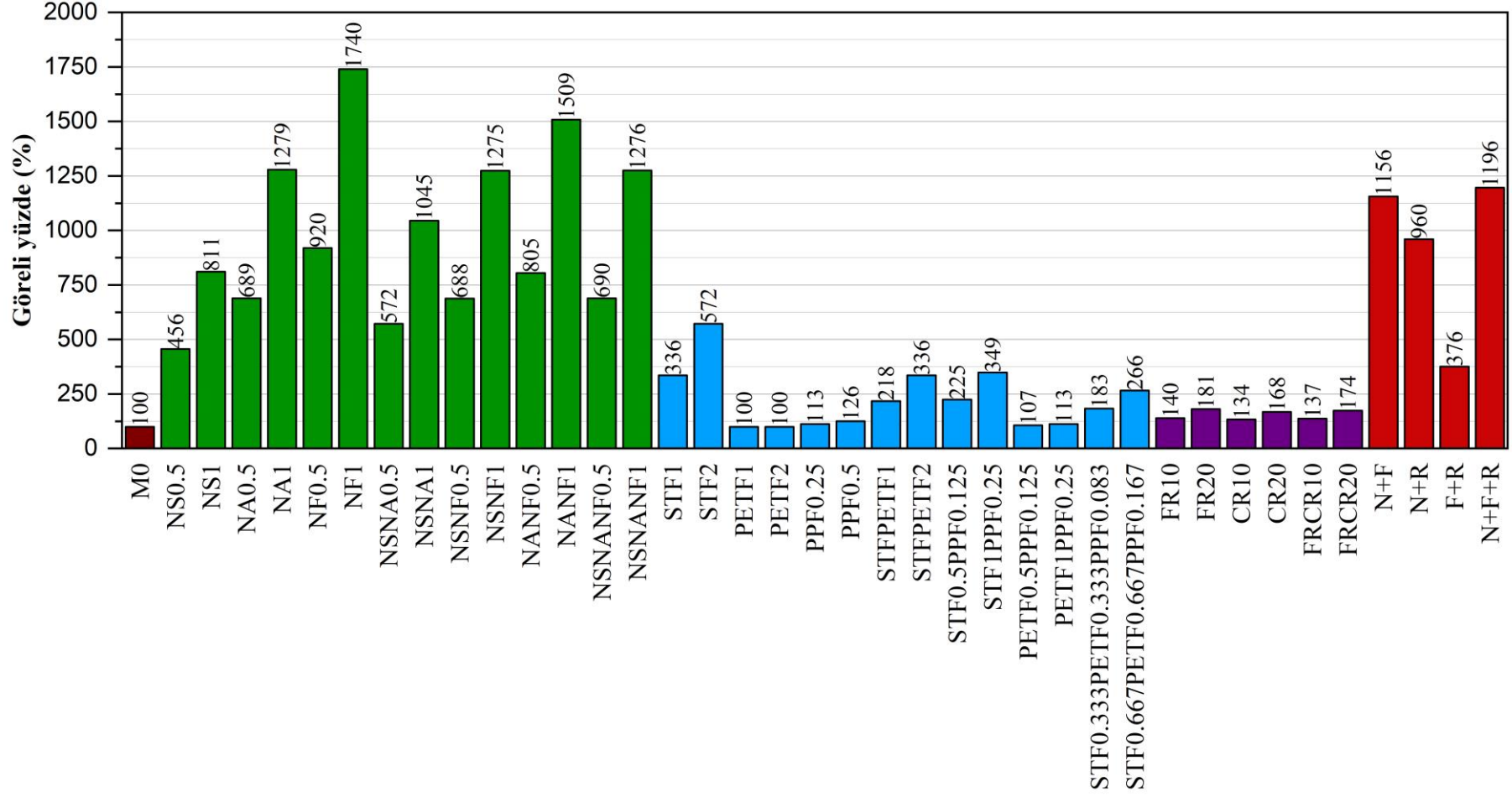
Katkı maddeleri, özellikle nano katkı maddeleri, içeren betonların yüksek maliyeti, çok avantajına rağmen inşaat sektöründe kullanımlarını kısıtlamıştır (Adamu ve ark., 2021; Al-Hagri ve Döndüren, 2022; Crucho ve ark., 2018; Döndüren ve Al-Hagri, 2022; Sowjanya ve Adishesu, 2022; Varisha ve ark., 2021). Katkı maddelerinin betonda ticari kullanılabilirliğini değerlendirmek için, betonun özellikleri ve maliyeti üzerindeki etkisinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada bu değerlendirme bir sonraki bölümde verilen arzu edirlilik fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 4.12. Kullanılan malzemelerin birim fiyatı

Malzeme	Çimento	İnce agrega	İri agrega	Süper akışkanlaştırıcı
Birim fiyat (TL/kg)	1.85	0.18	0.165	22.702
Birim fiyat (ABD doları/kg)	0.103	0.01	0.009	1.266
Malzeme	Nano-SiO ₂	Nano-Al ₂ O ₃	Nano-Fe ₂ O ₃	Çelik lif
Birim fiyat (TL/kg)	2046.376	3391.174	4716.336	30.28
Birim fiyat (ABD doları/kg)	114.092	189.069	262.951	1.688
Malzeme	PP lif	İnce lastik kauçuk	İri lastik kauçuk	
Birim fiyat (TL/kg)	57.807	8.782	8.782	
Birim fiyat (ABD doları/kg)	3.223	0.49	0.49	

Çizelge 4.13. Betonların fiyatı

Karışım No.	Karışım kodu	Betonun fiyatı	
		TL/m ³	ABD doları/m ³
1	M0	1006.40	56.11
2	NS0.5	4584.31	255.59
3	NS1	8162.23	455.07
4	NA0.5	6937.72	386.80
5	NA1	12869.04	717.49
6	NF0.5	9256.69	516.09
7	NF1	17507.17	976.08
8	NSNA0.5	5760.93	321.19
9	NSNA1	10515.64	586.28
10	NSNF0.5	6920.50	385.84
11	NSNF1	12834.61	715.57
12	NANF0.5	8097.30	451.45
13	NANF1	15188.02	846.78
14	NSNANF0.5	6943.10	387.10
15	NSNANF1	12839.27	715.83
16	STF1	3383.13	188.62
17	STF2	5759.67	321.12
18	PETF1	1006.40	56.11
19	PETF2	1006.40	56.11
20	PPF0.25	1137.87	63.44
21	PPF0.5	1269.34	70.77
22	STFPETF1	2194.67	122.36
23	STFPETF2	3383.13	188.62
24	STF0.5PPF0.125	2260.50	126.03
25	STF1PPF0.25	3514.60	195.95
26	PETF0.5PPF0.125	1072.05	59.77
27	PETF1PPF0.25	1137.87	63.44
28	STF0.333PETF0.333PPF0.083	1841.51	102.67
29	STF0.667PETF0.667PPF0.167	2679.49	149.39
30	FR10	1411.58	78.70
31	FR20	1816.94	101.30
32	CR10	1349.16	75.22
33	CR20	1692.10	94.34
34	FRCR10	1380.37	76.96
35	FRCR20	1754.52	97.82
36	N+F	11633.42	648.6
37	N+R	9662.41	538.71
38	F+R	3788.66	211.23
39	N+F+R	12039.14	671.22



Şekil 4.46. Betonların fiyatlarının görelü yüzdesi

4.1.12. Arzu edilirlilik fonksiyonu

İncelenen farklı betonların özellikleri ve maliyeti göz önünde bulundurularak betonun genel performansını değerlendirmek için arzu edilirlilik fonksiyonu kullanılmıştır. Arzu edilirlilik fonksiyonu analizi, betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma çarpma dayanımı ve maliyeti dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.14. incelenen betonların her bir tepkisinin tekil arzu edilirlilik fonksiyonunu ve betonların kompozit arzu edilirliliğini göstermektedir.

Çizelgeden de görüldüğü gibi, basınç dayanımı açısından en yüksek arzu edilirlilik fonksiyonu değeri %0.25 nano-SiO₂ + %0.25 nano-Fe₂O₃ içeren betonda (NSNF0.5) bulunmuşken, en düşük değeri ise %20 ince lastik kauçuk içeren betonda (FR20) bulunmuştur. Yarmada çekme dayanımı açısından en yüksek ve en düşük arzu edilirlilik fonksiyonu değerleri sırasıyla %2 çelik lif içeren betondan (STF2) ve FR20'den elde edilmiştir. Benzer sonuçlar eğilme dayanımında da izlenmiştir. Betonun maliyeti bakımından en yüksek arzu edilirlilik fonksiyonu değeri M0, PETF1, PETF2 ve PETF0.5PPF0.125'te bulunmuştur. En düşük arzu edilirlilik fonksiyonu değeri ise, %1 nano-Fe₂O₃ (NF1) içeren betonda bulunmuştur.

Çarpma dayanımı açısından bakıldığında, en yüksek arzu edilirlilik fonksiyonu değeri, %1 çelik lif içeren betonda (STF1) bulunmuştur. Öte yandan, birçok betonda çok düşük arzu edilirlilik fonksiyonu değeri bulunmuştur. İncelenen betonların yarısından fazlasının arzu edilirlilik fonksiyonu yaklaşık olarak sifıra eşittir. Bu, en yüksek performanslı beton (STF1) ile bu betonların performansı arasındaki büyük farkı göstermektedir. Bu da arzu edilirlilik fonksiyonu analizi betonların performansının göreceli bir değerlendirme yapmasına bağlıdır. Daha önce de belirtildiği gibi, bu çalışmada çarpma dayanımının betonun diğer özelliklerinden daha önemli olduğu için çarpma dayanımının ağırlık faktörü 3 olarak seçilmiştir. Diğer özellikler için ağırlık faktörü 1 olarak alınmıştır. Sonuç olarak çarpma dayanımının arzu edilirlilik fonksiyonunun şekli 1. dereceden lineer eğri (ağırlık faktörü 1 için) yerine 3. dereceden parabolik eğri (ağırlık faktörü 3 için) olmuştur (Bkz. denklem (3.17)). Lifler, özellikle çelik lifler, diğer katkı maddelerine kıyasla çarpma dayanımı üzerinde çok yüksek etkiye sahip olduğundan çoğu betonun arzu edilirlilik fonksiyonu değeri sifıra yakın olmuştur.

Kompozit arzu edilirlilik, incelenen farklı özellikler göz önünde bulundurularak betonun genel performansının bir değerlendirmesini vermektedir. Farklı betonların kompozit arzu edilirlilik değerleri Çizelge 4.14.'te verilmiştir. Betonların genel

performansının karşılaştırılmasını kolaylaştırmak için, Şekil 4.47.'de betonlar kompozit arzu edilirlık değerine göre sıralanmıştır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, en yüksek kompozit arzu edilirlık değerleri çelik lif içeren betonlarda bulunmuştur. Bu, çelik liflerin betonun genel performansını oldukça arttırdığını göstermektedir. Genel olarak, en yüksek kompozit arzu edilirlık değeri 0.92 olup %1 çelik lif içeren betonda bulunmuştur. Bu, STF1'in incelenen tüm betonlar arasında en yüksek genel performansa sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, STF1'in daha önceden en uygun beton olarak seçildiği sonucunu desteklemektedir (Bkz. bölüm 4.1.10.). Şekilden çelik lif içermeyen betonların düşük kompozit arzu edilirlık değerine sahip olduğu görülmektedir. Çelik lif içermeyen betonlar arasında en yüksek kompozit arzu edilirlık değeri 0.09 olup %1 PET lif içeren betonda bulunmuştur.

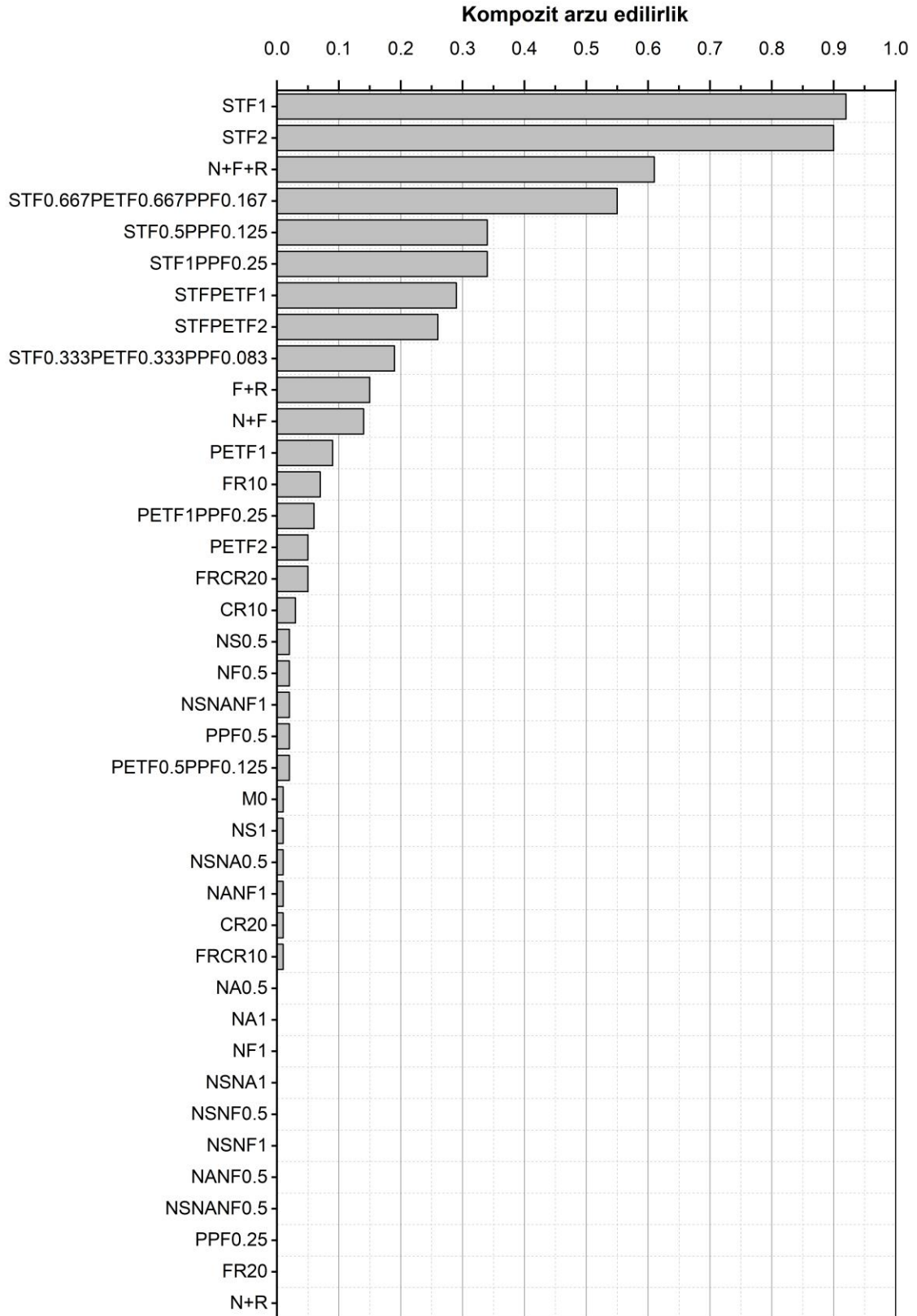
Sonuçlar ayrıca, lastik kauçuklar grubunda en yüksek kompozit arzu edilirlık değeri 0.07 olduğunu ve %10 ince kauçuk içeren betonda bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu beton daha önce lastik kauçuklar grubunda en iyi performansa sahip beton olarak da seçilmiştir. Tüm katkı grupları arasında en düşük performans nano katkı maddeleri grubunda bulunmuştur. Bu grupta kompozit arzu edilirlığın en yüksek değeri 0.02 olup NF0.5, NS0.5 ve NSNANF1'de bulunmuştur. NF0.5 daha önce nano katkı maddeleri grubunda en uygun beton olarak seçilmiştir. Farklı katkı gruplarından seçilen katkı maddesi kombinasyonları içeren betonların (N+R, N+F, F+R ve N+F+R) kompozit arzu edilirlığının en yüksek değeri N+F+R betonundan elde edilmiştir. N+F+R, daha önce bu betonlar arasında en iyi beton olarak seçilmiştir. Sonuçlar, arzu edilirlık fonksiyonu analizinin sonuçları daha önceden elde edilen sonuçları desteklediğini göstermiştir.

Çizelge 4.14. Arzu edilirlık fonksiyonu

Karışım No.	Karışım kodu	Tekil arzu edilirlık fonksiyonu					Kompozit arzu edilirlık
		Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Eğilme dayanımı	Kırılma çarpma dayanımı	Maliyet	
1	M0	0.84	0.18	0.21	0.0001	1	0.01
2	NS0.5	0.89	0.28	0.22	0.0002	0.78	0.02
3	NS1	0.84	0.40	0.24	0.0001	0.57	0.01
4	NA0.5	0.92	0.48	0.15	0	0.64	0
5	NA1	0.92	0.32	0.27	0	0.28	0
6	NF0.5	0.92	0.51	0.20	0.0004	0.50	0.02
7	NF1	0.90	0.19	0.27	0.0002	0	0
8	NSNA0.5	0.94	0.51	0.32	0.0001	0.71	0.01
9	NSNA1	0.84	0.32	0.23	0	0.42	0
10	NSNF0.5	1	0.17	0.39	0	0.64	0
11	NSNF1	0.94	0.08	0.18	0	0.28	0
12	NANF0.5	0.93	0.22	0.25	0	0.57	0
13	NANF1	0.91	0.11	0.25	0.0001	0.14	0.01
14	NSNANF0.5	0.86	0.33	0.21	0	0.64	0
15	NSNANF1	0.94	0.27	0.33	0.0002	0.28	0.02
16	STF1	0.97	0.78	0.86	1	0.86	0.92
17	STF2	0.95	1	1	0.893	0.71	0.90
18	PETF1	0.62	0.14	0.18	0.014	1	0.09
19	PETF2	0.06	0.05	0.21	0.011	1	0.05
20	PPF0.25	0.76	0.18	0.25	0	0.99	0
21	PPF0.5	0.66	0.22	0.34	0.0004	0.98	0.02
22	STFPETF1	0.60	0.38	0.33	0.1394	0.93	0.29
23	STFPETF2	0.69	0.53	0.40	0.0878	0.86	0.26
24	STF0.5PPF0.125	0.83	0.52	0.29	0.1715	0.92	0.34
25	STF1PPF0.25	0.87	0.21	0.24	0.2496	0.85	0.34
26	PETF0.5PPF0.125	0.72	0.22	0.40	0.0004	1	0.02
27	PETF1PPF0.25	0.51	0.30	0.11	0.0046	0.99	0.06

Çizelge 4.14. (Devam) Arzu edilirlilik fonksiyonu

Karışım No.	Karışım kodu	Tekil arzu edilirlilik fonksiyonu					Maliyet	Kompozit arzu edilirlilik
		Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Eğilme dayanımı	Kırılmada çarpma dayanımı			
28	STF0.333PETF0.333PPF0.083	0.84	0.42	0.32	0.0436	0.95	0.19	
29	STF0.667PETF0.667PPF0.167	0.51	0.43	0.42	0.5787	0.9	0.55	
30	FR10	0.39	0.29	0.19	0.0085	0.98	0.07	
31	FR20	0	0	0	0.0064	0.95	0	
32	CR10	0.59	0.22	0.22	0.0008	0.98	0.03	
33	CR20	0.28	0.12	0.07	0.0001	0.96	0.01	
34	FRCR10	0.56	0.32	0.19	0.0001	0.98	0.01	
35	FRCR20	0.23	0.10	0.04	0.0085	0.95	0.05	
36	N+F	0.73	0.65	0.43	0.026	0.36	0.14	
37	N+R	0.36	0.13	0.16	0	0.48	0	
38	F+R	0.36	0.38	0.36	0.037	0.83	0.15	
39	N+F+R	0.50	0.52	0.70	0.7938	0.33	0.61	



Şekil 4.47. Kompozit arzu edilirlilik değerleri

4.2. Betonarme Plakların Çarpma Testi Sonuçları

Önceki aşamada bulunan en iyi performansa sahip beton kullanılarak farklı tiplerde betonarme plaklar hazırlanmıştır. Daha önce görüldüğü üzere, test edilen betonlar arasında en yüksek performans %1 çelik lif içeren betonda (STF1) bulunmuştur. Bu beton, referans beton ile birlikte farklı tiplerde betonarme plaklar (normal betondan üretilen betonarme plak, çelik lif içeren betondan üretilen betonarme plak, fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plaklar ve çelik levhalı betonarme plaklar) hazırlamak için kullanılmıştır. Toplam 9 adet betonarme plak hazırlanmış ve ağırlık düşürme testi altında test edilmiştir. Test edilen betonarme plakların detayı Çizelge 4.15.'te verilmiştir. Önceki bölümlerde de görüldüğü gibi, betonarme plakların üretilmesinde kullanılan referans betonun ve %1 çelik lif içeren betonun basınç dayanımı, 150 mm kenar uzunluğu olan üçer kübik numune kullanılarak tayin edilmiş ve sırasıyla 44.4 MPa ve 48.5 MPa olarak elde edilmiştir. Bu bölümde, betonarme plakların test bulgularından bahsedilmiş ve tartışılmıştır.

Çizelge 4.15. Test edilen betonarme plakların detayı

Numune kodu	Betonarme plağın tipi	Beton tipi
SN1	Referans betondan üretilen	M0
SN2	Çelik lif donatılı betondan üretilen	STF1
SH1	Fonksiyonel derecelendirilmiş (M0 üstte – M0 ortada – STF1 altta)	M0+STF1
SH2	Fonksiyonel derecelendirilmiş (STF1 üstte – M0 ortada – M0 altta)	M0+STF1
SH3	Fonksiyonel derecelendirilmiş (M0 üstte – STF1 ortada – M0 altta)	M0+STF1
SH4	Fonksiyonel derecelendirilmiş (STF1 üstte – M0 ortada – STF1 altta)	M0+STF1
SS1	Çelik levhalı (üst yüzeyde)	STF1
SS2	Çelik levhalı (alt yüzeyde)	STF1
SS3	Çelik levhalı (üst ve alt yüzeylerde)	STF1

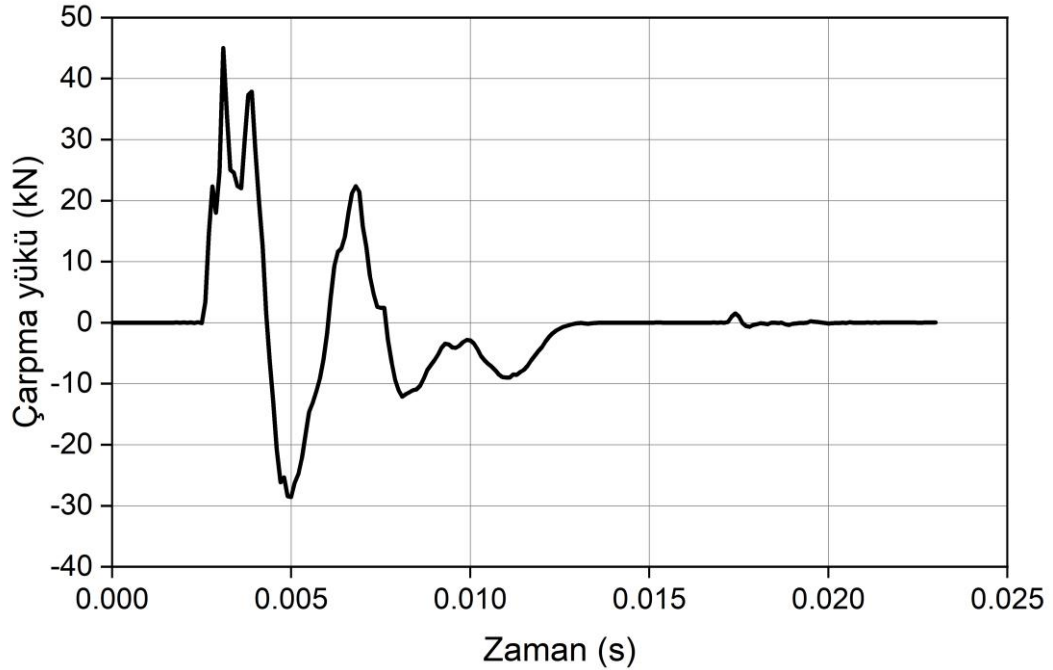
4.2.1. Betonarme plakların test bulguları

Çalışmanın bu bölümünde, çarpma test sonuçları incelenen her bir betonarme plak için ayrı ayrı sunulmuştur. Ağırlık düşürme testinde her bir betonarme plağın çarpma yük-zaman grafiği, ivme-zaman grafikleri, deplasman-zaman grafikleri elde edilmiştir. İvme-zaman grafikleri, farklı konumlardaki 3 adet ivmeölçer kullanılarak elde edilmiştir. Bunlar, betonarme plağın merkezinden 150 mm, 250 mm ve 350 mm uzaklıklarda yerleştirilmiş sırasıyla a1, a2 ve a3 ivmeölçerleridir. Deplasmanlar, 4 potansiyometre kullanılarak farklı noktalardan ölçülmüştür. Bunlar, d1, d2, d3 ve d4 potansiyometreleri olup betonarme plağın simetri ekseninden sırasıyla 0 mm, 150 mm, 250 mm ve 350 mm

uzaklıklarda yerleştirilmiştir. Çarpma enerjisine maruz kalan betonarme plaklarda oluşan çatlak dağılımı de incelenmiştir. İncelenen tüm test numuneleri, değeri 2992.4 J olan çarpma enerjisine maruz bırakılmıştır.

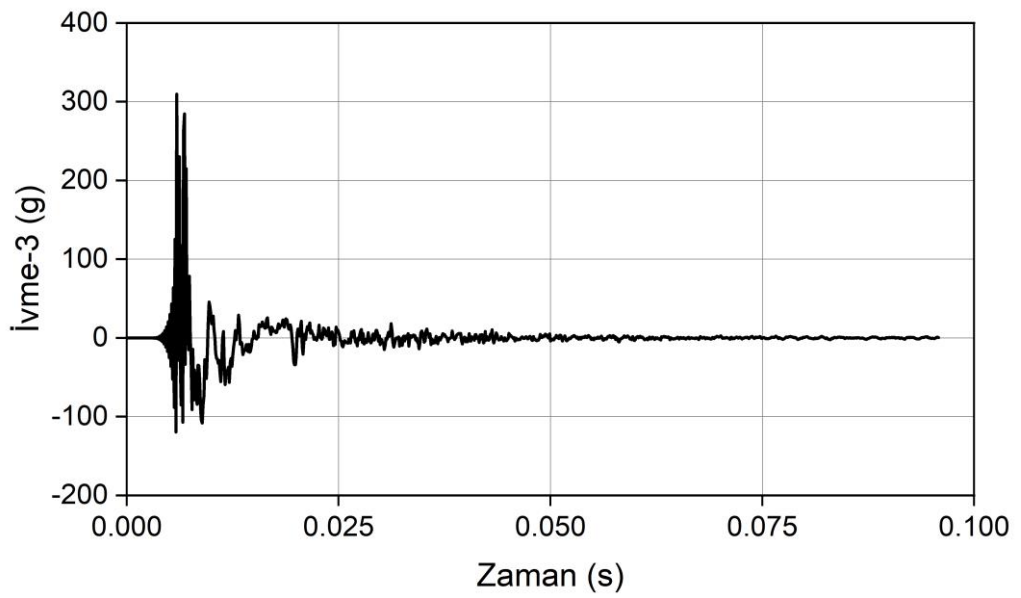
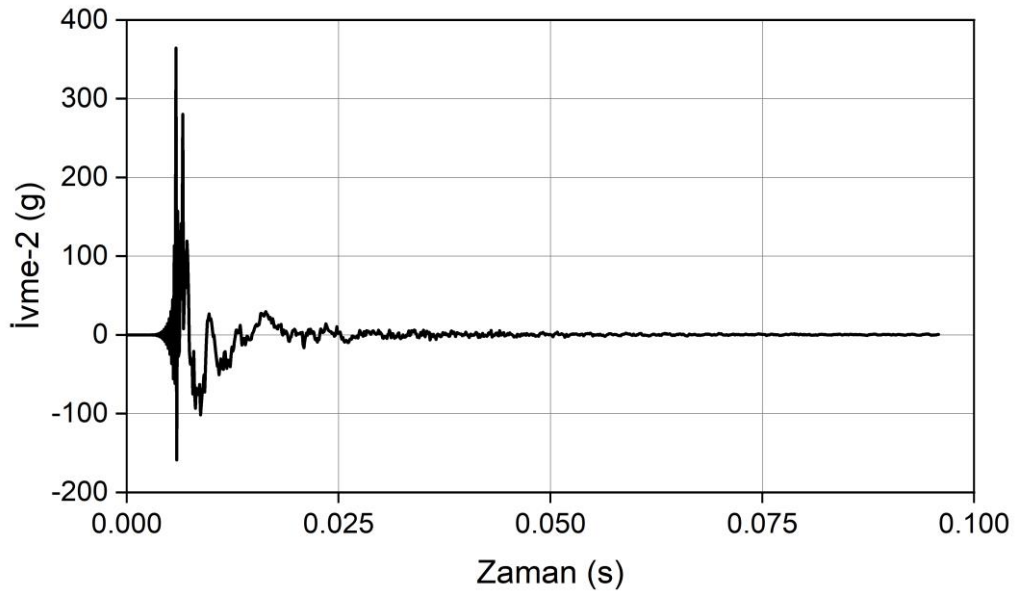
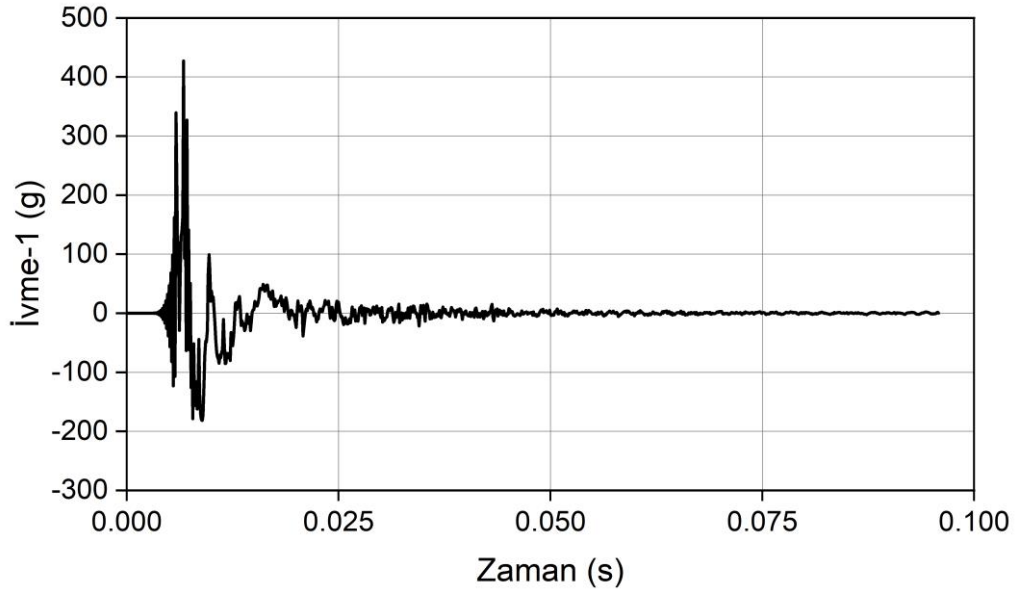
4.2.1.1. SN1 betonarme plağı

SN1 betonarme plağı, referans beton (M0) kullanılarak üretilmiş bir betonarme plaktır. SN1 test numunesine ait çarpma yükü-zaman grafiğı Şekil 4.48.'de gösterilmiştir. Uygulanan 2992.4 J'lik çarpma enerjisi altında, bu numunede kaydedilen maksimum çarpma yükü 45.02 kN ve minimum çarpma yükü -28.55 kN'dir.



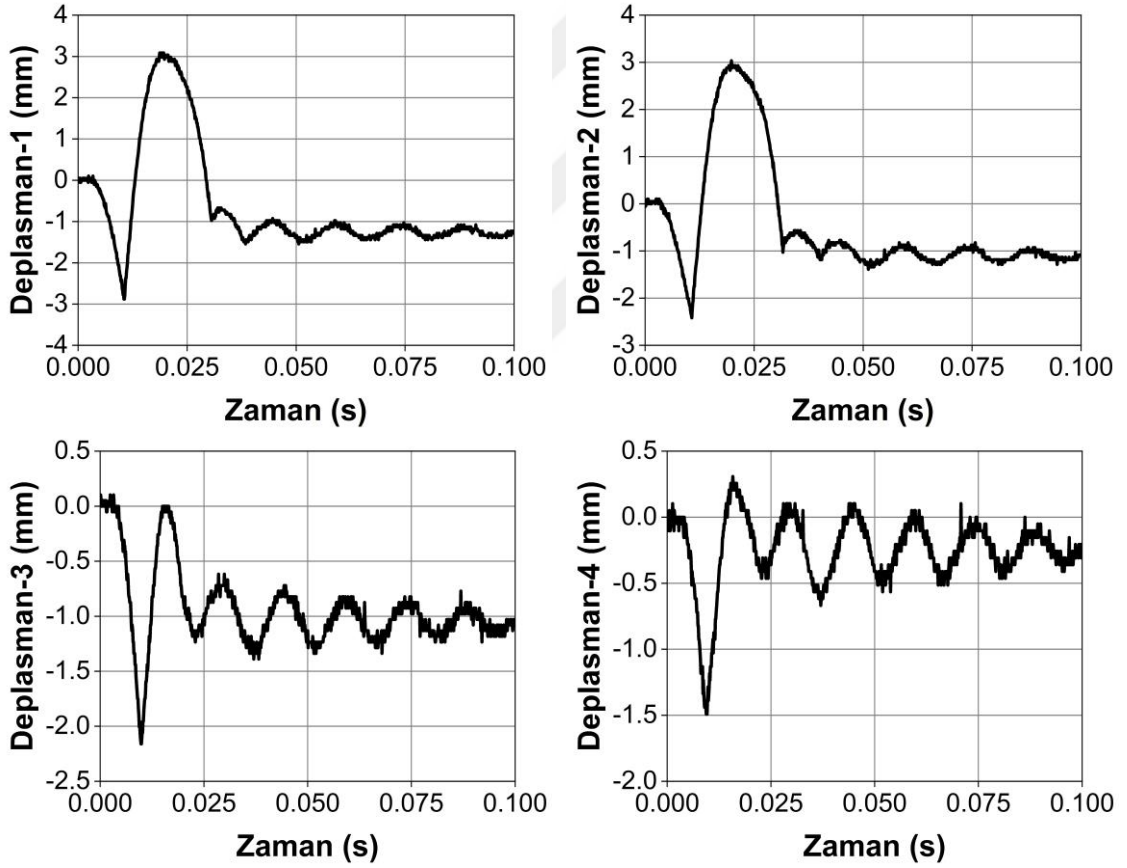
Şekil 4.48. SN1 deney elemanına ait çarpma yükü-zaman grafiğı

SN1 betonarme plağına ait a1, a2 ve a3 ivmeölçerlerinden elde edilen ivmelerin zaman tanım alanında değışimi Şekil 4.49.'da sunulmuştur. Kolaylık için grafiklerde sadece ilgili ivmeölçerin numarası verilmiştir. a1 ivmeölçerinden ölçülen maksimum ve minimum ivme sırasıyla 427.33 g ve -181.99 g'dir. a2 ivmeölçerinden elde edilen maksimum ivme 364.27 g ve minimum ivme -158.96 g olarak bulunmuştur. Deney elemanının merkezinden 350 mm uzaklıkta elde edilen maksimum ve minimum ivmeler sırasıyla 309.76 g ve -119.69 g olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.49. SN1 deney elemanına ait ivme-zaman grafikleri

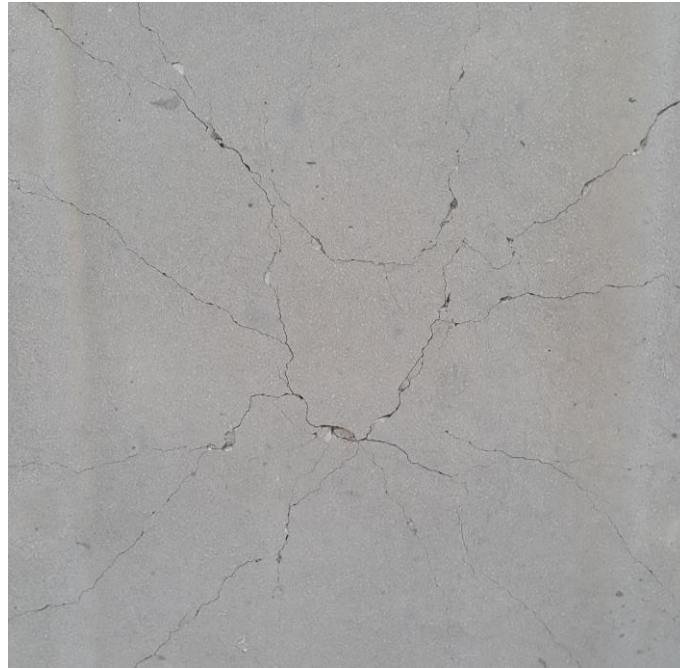
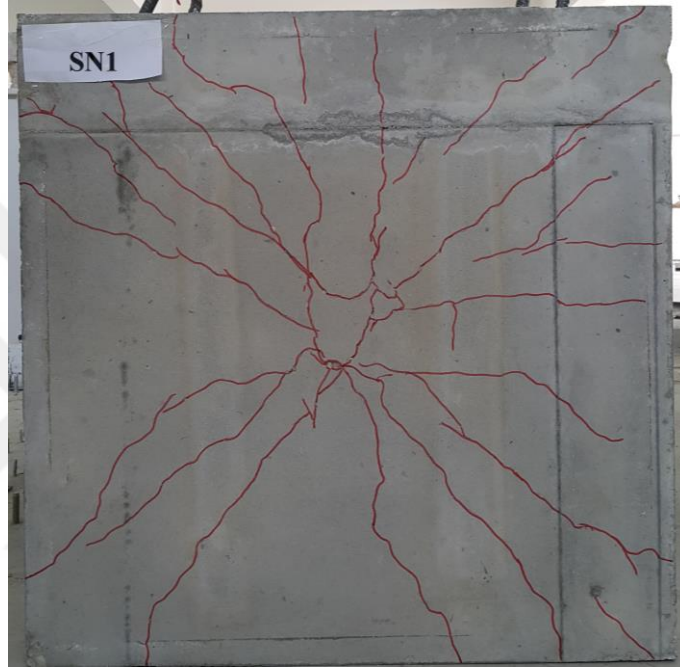
SN1 betonarme plağına ait deplasman-zaman grafikleri Şekil 4.50.'de verilmiştir. Kolaylık olması amacıyla grafiklerde sadece ilgili potansiyometrenin numarası gösterilmiştir. Deplasman-zaman grafikleri kullanılarak incelenen her konumda maksimum ve kalıcı deplasmanların değeri elde edilmiştir. Kalıcı deplasman, çarpma yükünden kaynaklanan titreşim hareketinin sönümlenmesinden sonra test numunesinde ölçülen plastik deplasman olarak tanımlanmaktadır (T. Yılmaz ve ark., 2022). SN1 betonarme plağında çarpma yükü altında simetri ekseninde maksimum deplasman 5.97 mm ve kalıcı deplasman 1.29 mm olarak kaydedilmiştir. d2, d3 ve d4 potansiyometrelerinden ölçülen maksimum deplasmanlar sırasıyla 5.45 mm, 2.26 mm ve 1.80 mm'dir. Kalıcı deplasmanlar ise yine sırasıyla 1.18 mm, 1.08 mm ve 0.26 mm'dir.



Şekil 4.50. SN1 deney elemanına ait deplasman-zaman grafikleri

Çarpma deneyinden sonra numunede oluşan çatlak dağılımı incelenmiştir. Şekil 4.51. SN1 betonarme plağının arka yüzeyinde oluşan çatlak dağılımını göstermektedir. Çatlak dağılımının daha iyi bir şekilde değerlendirilebilmesi için, numunenin en kritik bölgesi olan arka yüzeyinin orta bölgesinde oluşan çatlak dağılımının yakından çekilmiş görüntüsü de şekilde gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, numunenin arka

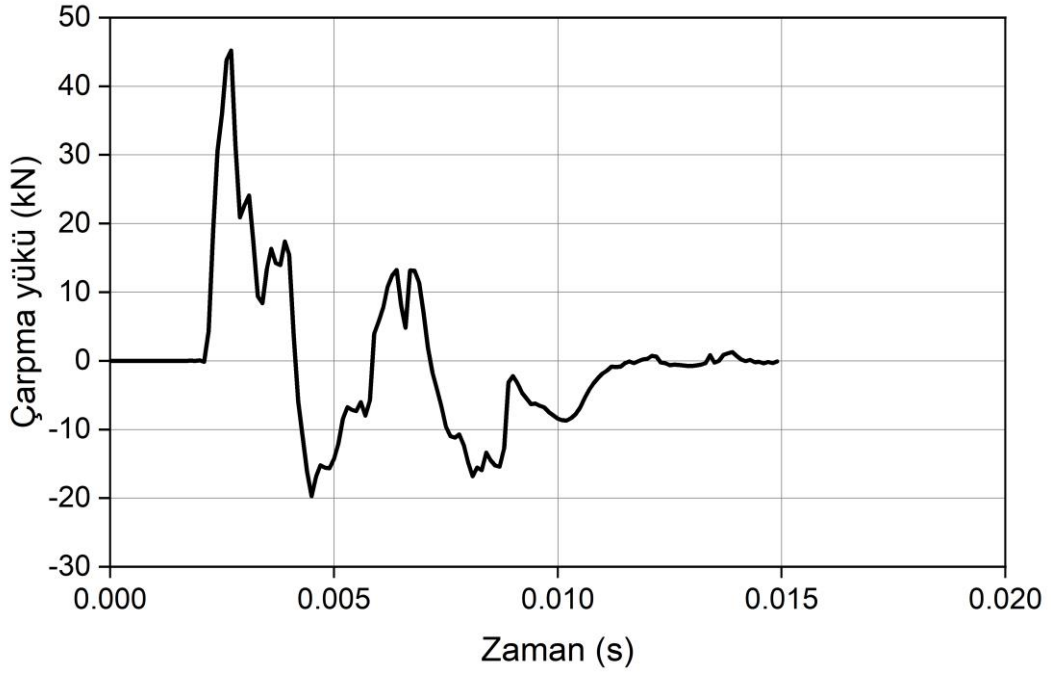
yüzeyinde kılcal çatlaklar izlenmiştir. Çatlaklar numunenin orta bölgesinden başlayıp mesnetlere doğru uzamıştır. Numunede oluşan hasar esas olarak diyagonal ve radyal çatlaklar şeklinde oluşmuştur. Testten sonra numunenin arka yüzeyinde dökülme izlenmemiştir. Çatlak genişliğinin orta bölgede daha fazla olduğu ve mesnetlere doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. Diyagonal çatlakların genişliği radyal çatlakların genişliğinden daha fazladır. Çarpma yükü uygulandıktan sonra numunenin ön yüzeyinde hiçbir çatlak görülmemiştir.



Şekil 4.51. SN1 numunesinde oluşan çatlak dağılımı

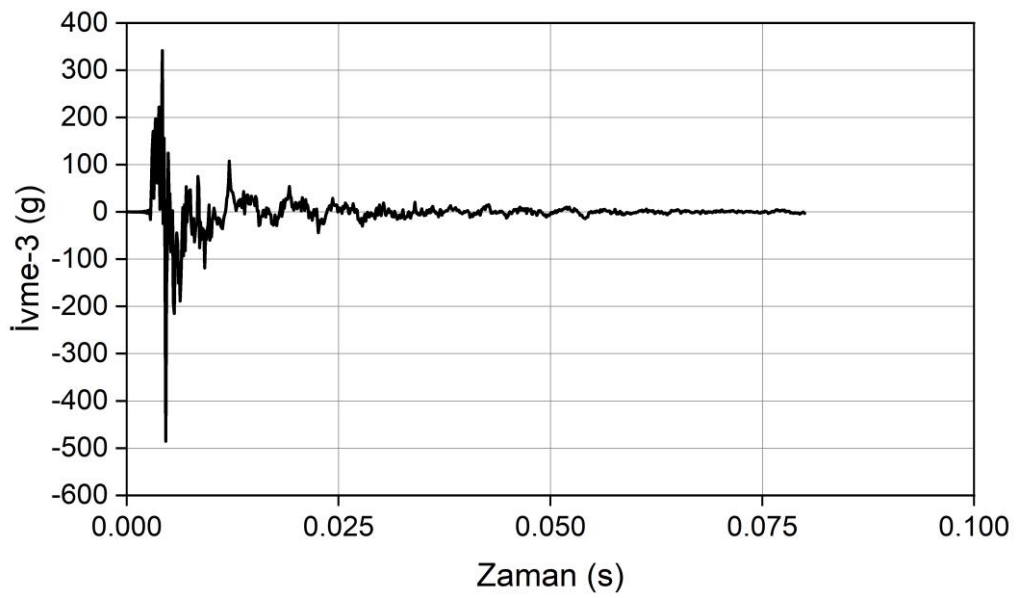
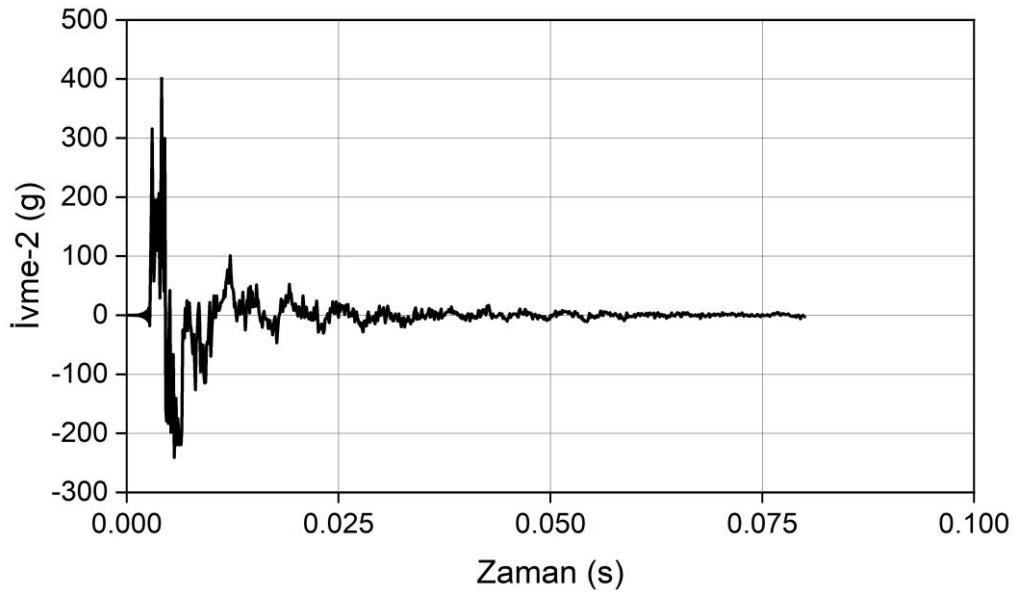
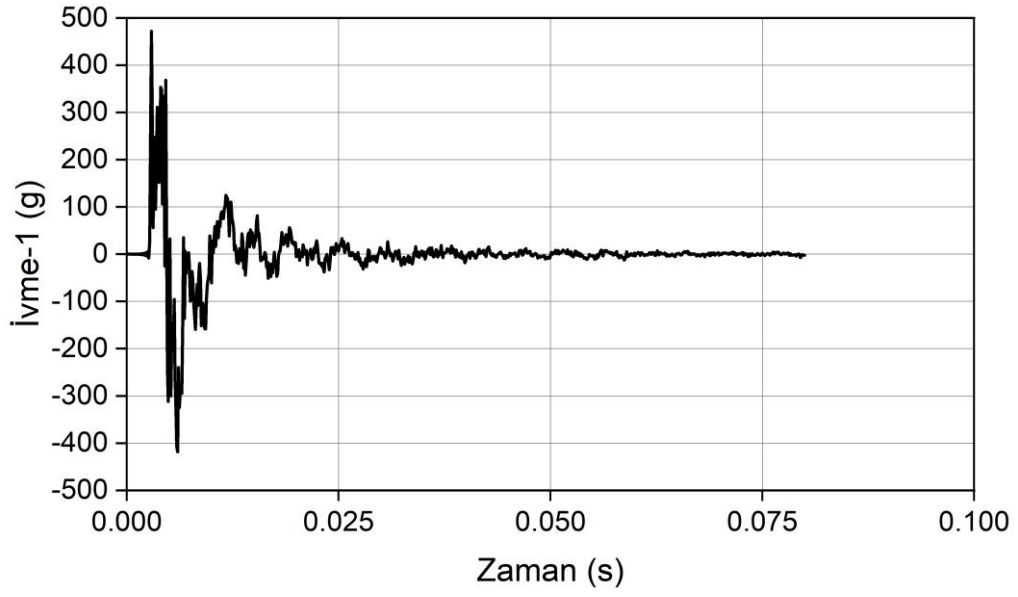
4.2.1.2. SN2 betonarme plağı

SN2 test numunesi, SN1 betonarme plağına benzemektedir. Ancak bu numunenin üretiminde referans beton yerine hacimce %1 çelik lif içeren beton (STF1) kullanılmıştır. SN2 betonarme plağına ait çarpma yükünün zaman tanım alanında değişimi Şekil 4.52.'de sunulmuştur. Uygulanan çarpma enerjisi altında, maksimum çarpma yükü 45.02 kN ve minimum çarpma yükü -19.72 kN olarak ölçülmüştür.



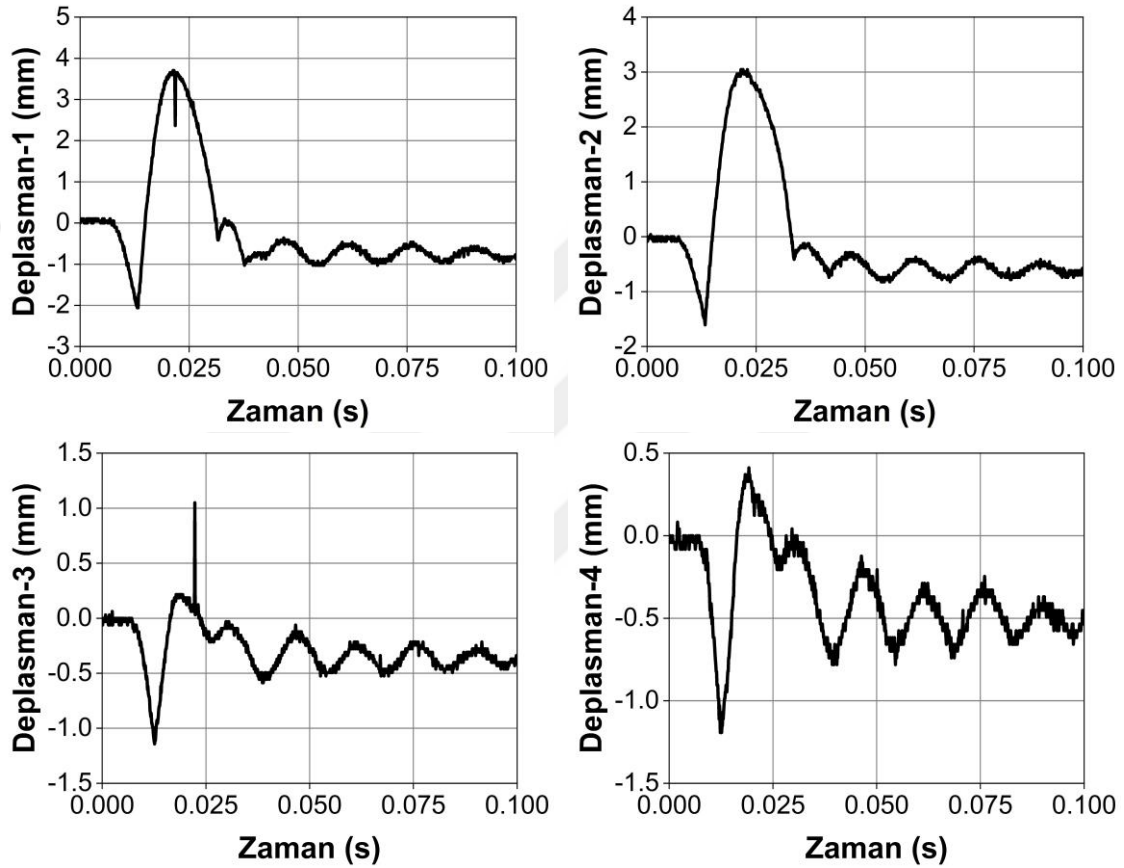
Şekil 4.52. SN2 deney elemanına ait çarpma yükü-zaman grafiği

SN2 betonarme plağının ivme-zaman grafikleri Şekil 4.53.'te gösterilmiştir. Uygulanan çarpma yükü altında, simetri ekseninden 150 mm uzaklığındaki a1 ivmeölçeri tarafından ölçülen maksimum ivme 472.46 g ve minimum ivme -418.68 g'dir. a2 ivmeölçerinden kaydedilen maksimum ve minimum ivmeler sırasıyla 401.36 g ve -241.30 g'dir. Simetri ekseninden 350 mm uzaklığındaki a3 ivmeölçerinin ölçtüğü maksimum ve minimum ivmeler sırasıyla 341.40 g ve -485.99 g'dir.



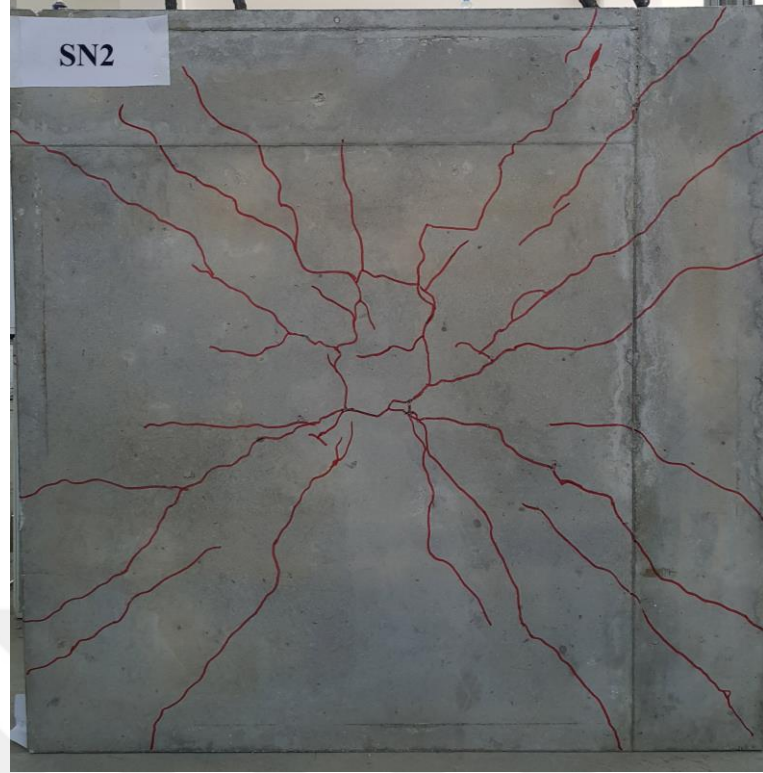
Şekil 4.53. SN2 deney elemanına ait ivme-zaman grafikleri

Şekil 4.54. SN2 betonarme plağına ait deplasmanın zaman tanım alanında değişimini sunmaktadır. Numunenin simetri ekseninde d1 potansiyometresinden ölçülen maksimum deplasman 5.76 mm ve kalıcı deplasman 0.77 mm'dir. d2, d3 ve d4 potansiyometrelerinden kaydedilen maksimum deplasmanlar sırasıyla 4.65 mm, 2.19 mm ve 1.60 mm'dir. Bu potansiyometrelerden ölçülen kalıcı deplasmanlar ise sırasıyla 0.62 mm, 0.34 ve 0.49 mm'dir.



Şekil 4.54. SN2 deney elemanına ait deplasman-zaman grafikleri

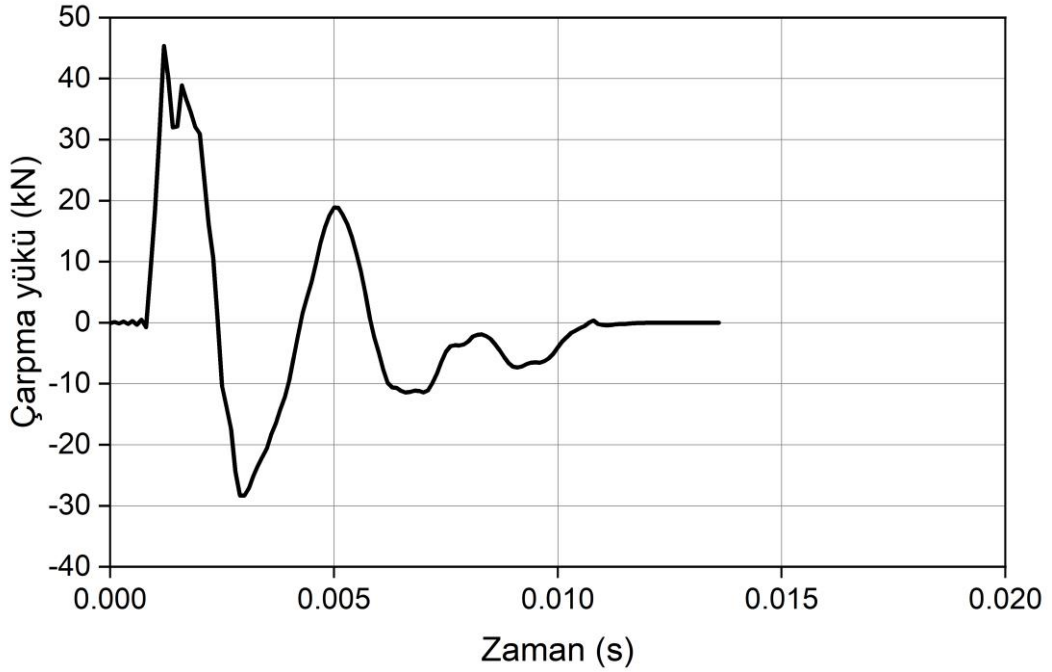
Çarpma testi sonrasında SN2 betonarme plağının arka yüzeyinde oluşan çatlak dağılımı Şekil 4.55'te gösterilmiştir. Kılcal eğilme diyagonal ve radyal çatlakları gözlenmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, bu numunede oluşan çatlakların çoğu diyagonal çatlaklardır. Bu çatlaklar numunenin merkez bölgesinde başlamış ve numunenin köşelerine çapraz olarak uzanmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi, çatlakların genişliği mesnetlere doğru gidildikçe önemli ölçüde azalmıştır. SN2 betonarme plağının ön yüzeyinde gözle görülür bir çatlak gözlenmemiştir.



Şekil 4.55. SN2 numunesinde oluşan çatlak dağılımı

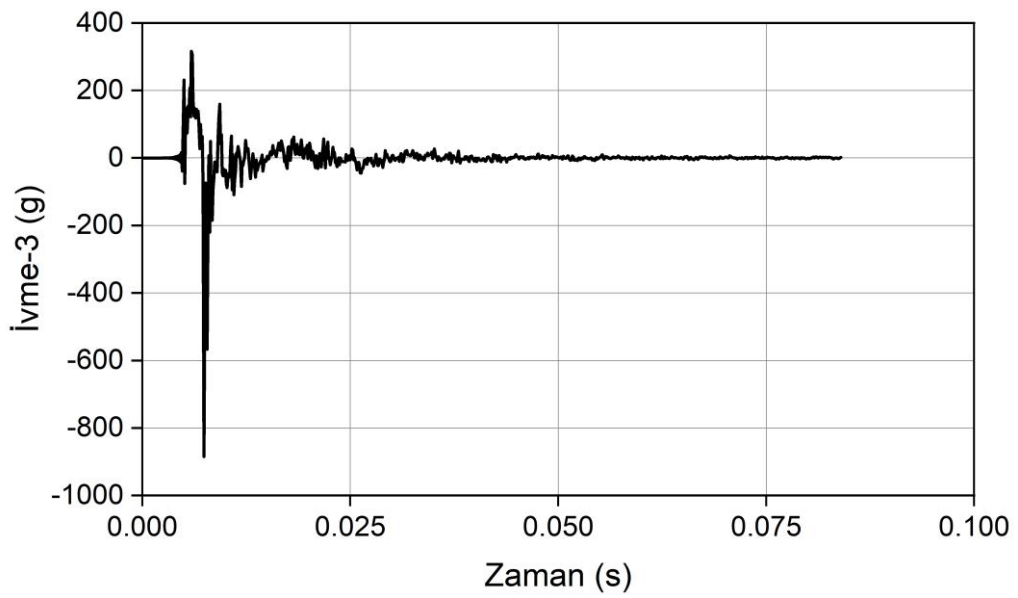
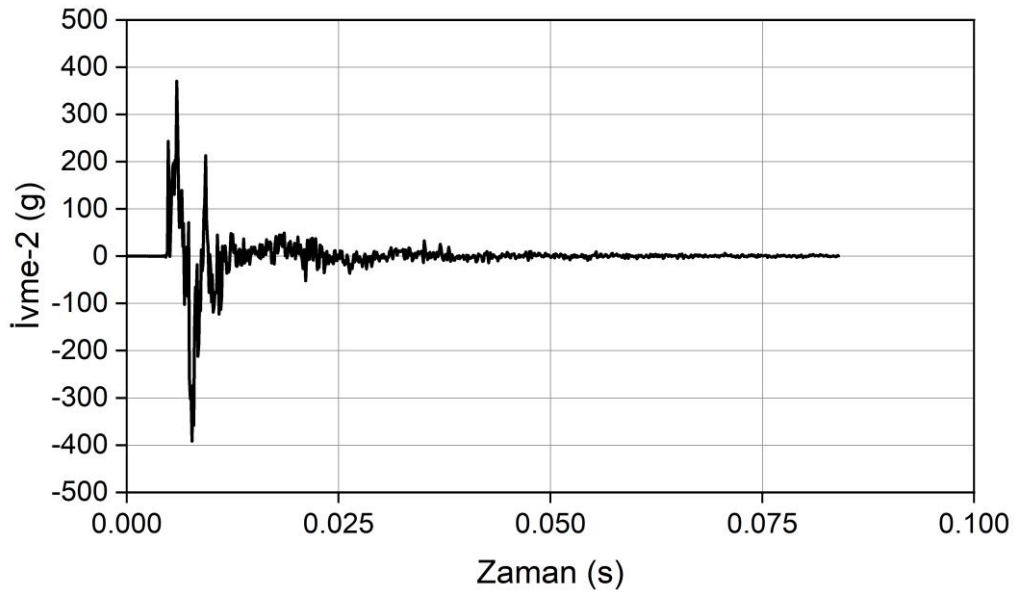
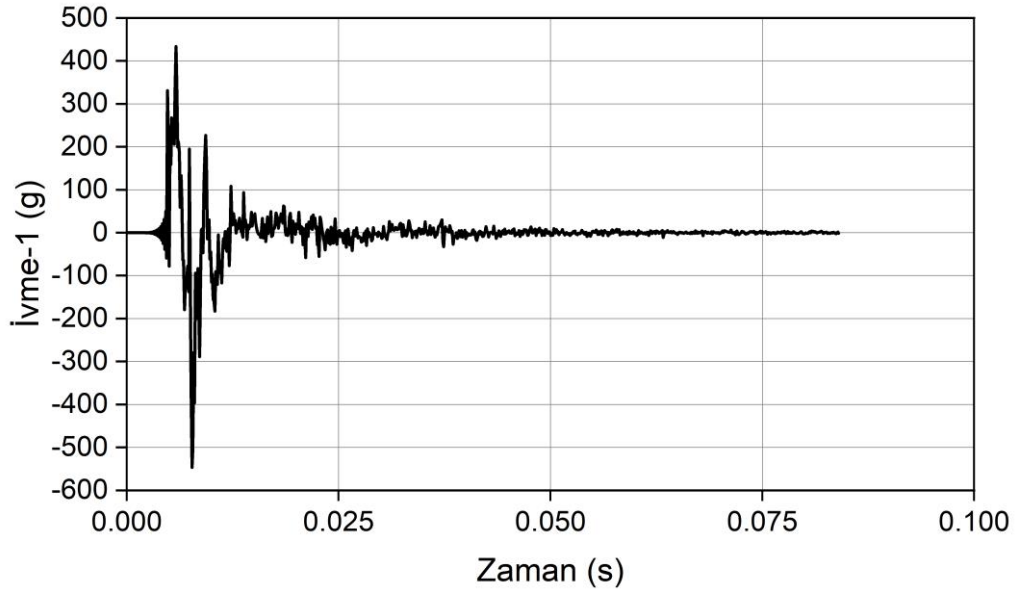
4.2.1.3. SH1 betonarme plağı

SH1 test numunesi, fonksiyonel derecelendirilmiş (hibrit) betonarme plaktır. Bu plak, her biri 40 mm kalınlığında üç katmandan oluşmaktadır. Her katmanda farklı beton (M0 veya STF1) kullanılmıştır. SH1 betonarme plağının alt katmanı (toplam kalınlığın 1/3'ü) %1 çelik lif içeren betondan yapılmıştır. Üst iki katmanında (toplam kalınlığın 2/3'ü) ise referans beton kullanılmıştır. Bu betonarme plağa ait çarpma yükü-zaman grafiğı Şekil 4.56.'da verilmiştir. Uygulanan çarpma enerjisi altında maksimum yük 45.35 kN ve minimum yük -28.32 kN olarak ölçülmüştür.



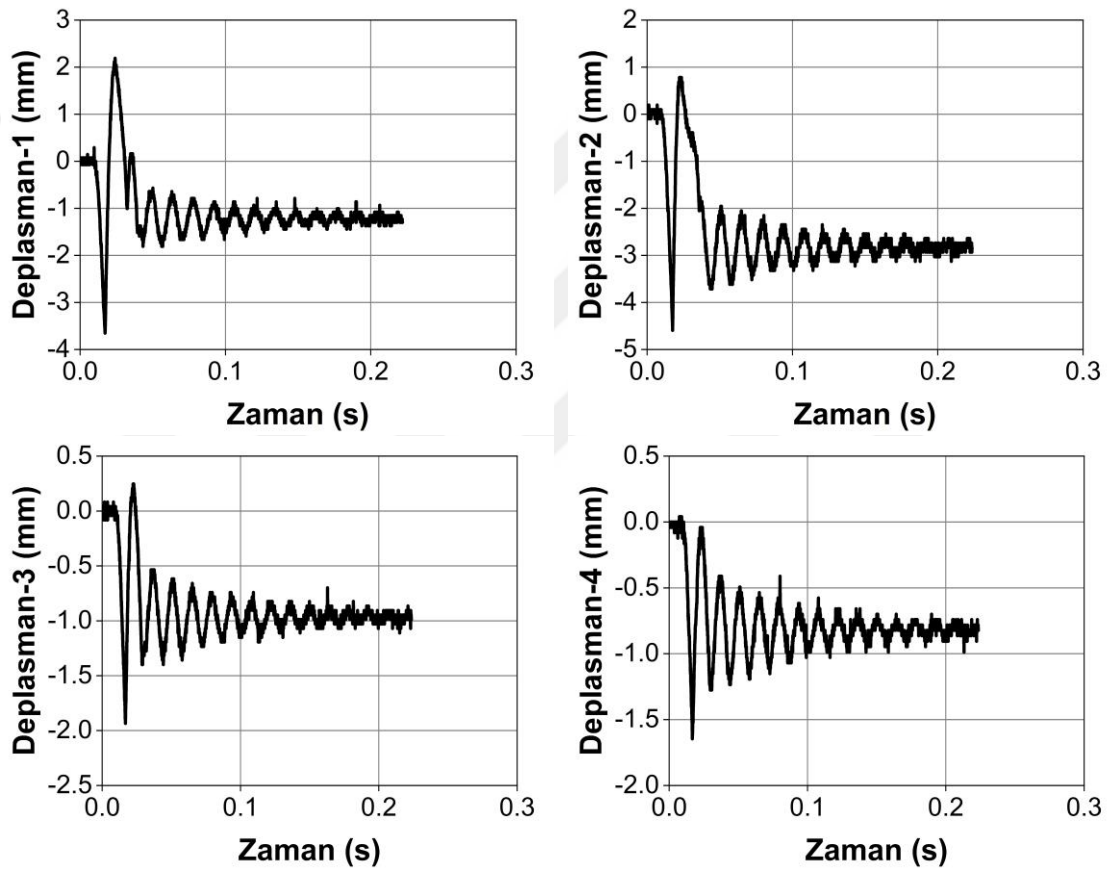
Şekil 4.56. SH1 deney elemanına ait çarpma yükü-zaman grafiğı

Şekil 4.57.'de SH1 betonarme plağına ait ivmenin zaman tanım alanında değışimi sunulmuştur. a1 ivmeölçerinden ölçülen maksimum ivme 433.64 g'dir. Minimum ivme ise -547.10 g'dir. a2 ivmeölçerinden kaydedilen maksimum ve minimum ivmeler sırasıyla 370.67 g ve -392.05 g'dir. a3 ivmeölçerinden ölçülen maksimum ve minimum ivme değerleri sırasıyla 316.46 g ve -885.42 g'dir.



Şekil 4.57. SH1 deney elemanına ait ivme-zaman grafikleri

Çarpma testi sırasında elde edilen SH1 betonarme plağına ait deplasman-zaman grafikleri Şekil 4.58.'de sunulmuştur. Numunenin simetri ekseninde, d1 ivmeölçerinden 5.84 mm'lik bir maksimum deplasman ve 1.29 mm'lik bir kalıcı deplasman ölçülmüştür. Simetri ekseninden 150 mm uzaklıkta maksimum ve kalıcı deplasmanlar sırasıyla 5.38 mm ve 2.83 mm olarak kaydedilmiştir. Simetri ekseninden 250 mm uzaklıkta ise elde edilen maksimum deplasman 2.18 mm ve kalıcı deplasman 0.99 mm'dir. Simetri ekseninden 350 mm uzaklıkta yerleştirilen d4 potansiyometresinden ölçülen maksimum ve kalıcı deplasmanlar sırasıyla 1.69 mm ve 0.82 mm'dir.



Şekil 4.58. SH1 deney elemanına ait deplasman-zaman grafikleri

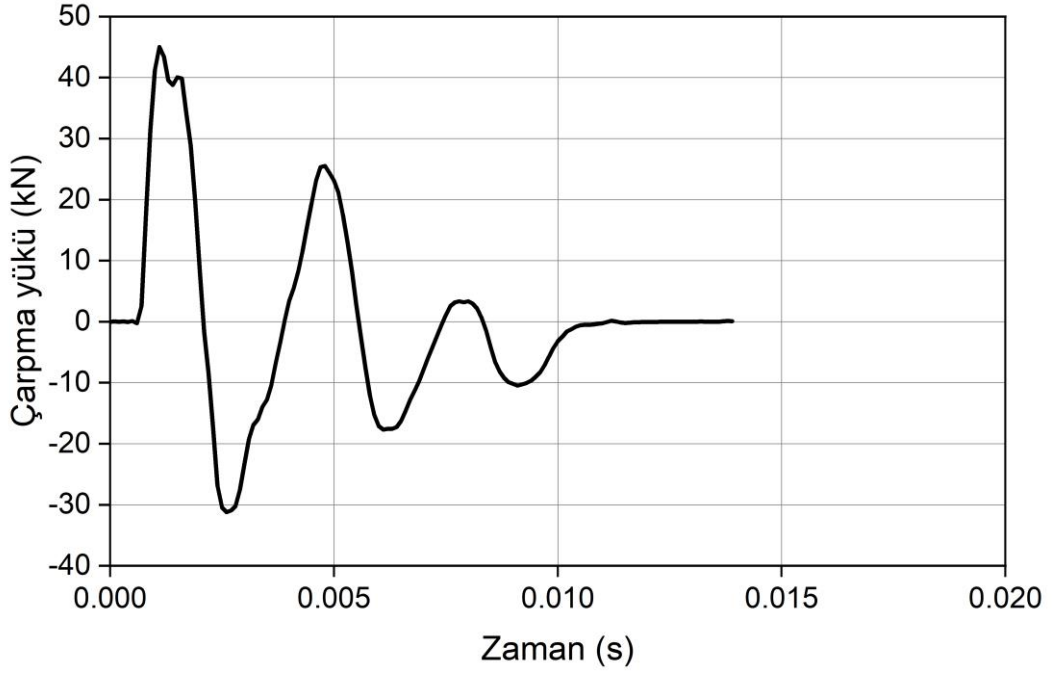
Çarpma yüküne maruz kalmış SH1 betonarme plağının arka yüzeyinde izlenen çatlak dağılımı Şekil 4.59.'da gösterilmiştir. Numunenin ön yüzeyinde herhangi bir çatlak tespit edilmemiştir. Arka yüzeyde ise kılcal diyagonal ve radyal eğilme çatlakları gözlenmiştir. Bu çatlaklar numunenin orta bölgesinde yoğunlaşmıştır. Çatlakların genişliği orta bölgeden uzaklaştıkça önemli ölçüde azalmıştır.



Şekil 4.59. SH1 numunesinde oluşan çatlak dağılımı

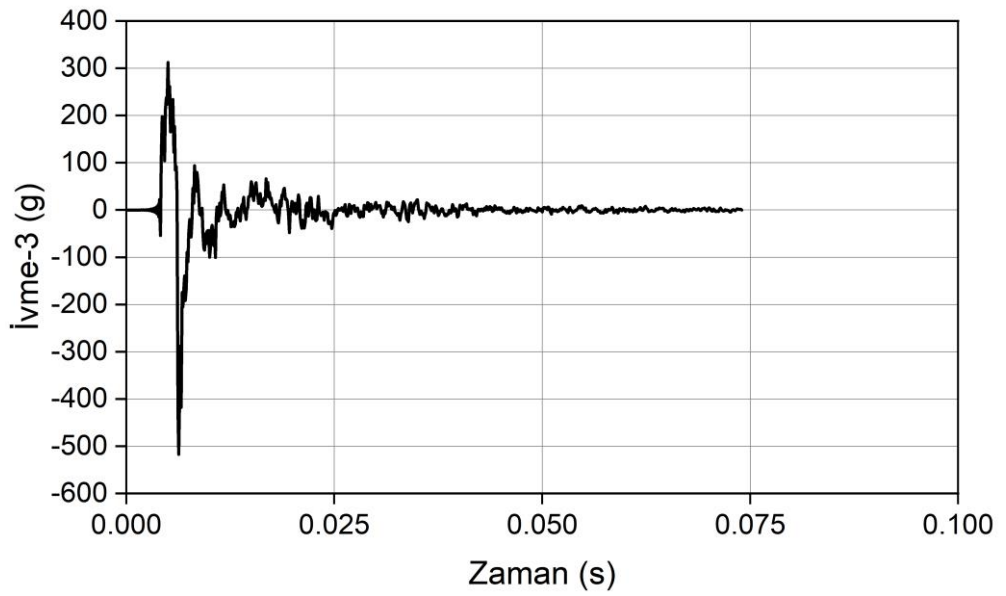
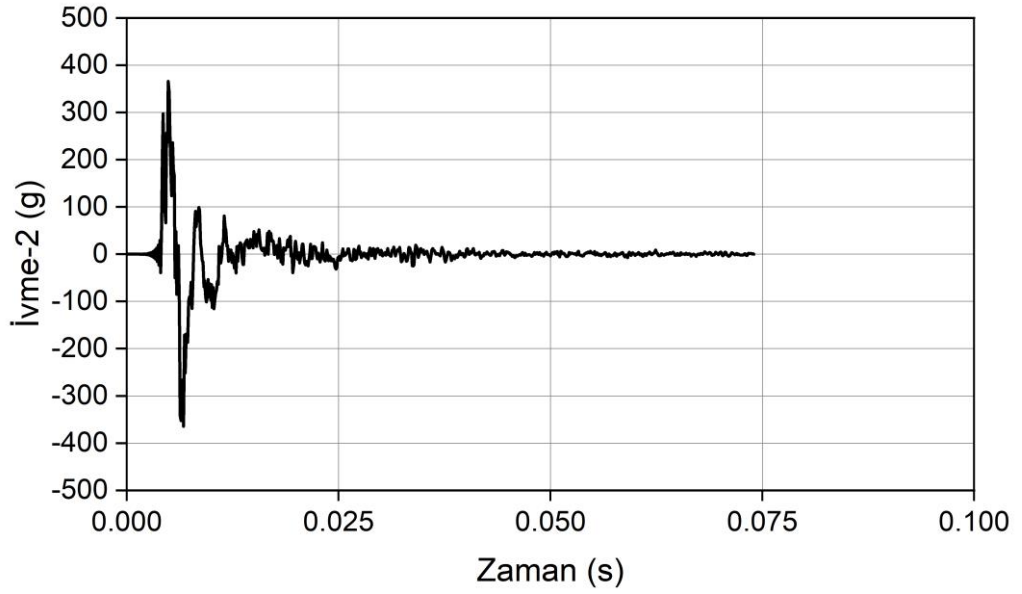
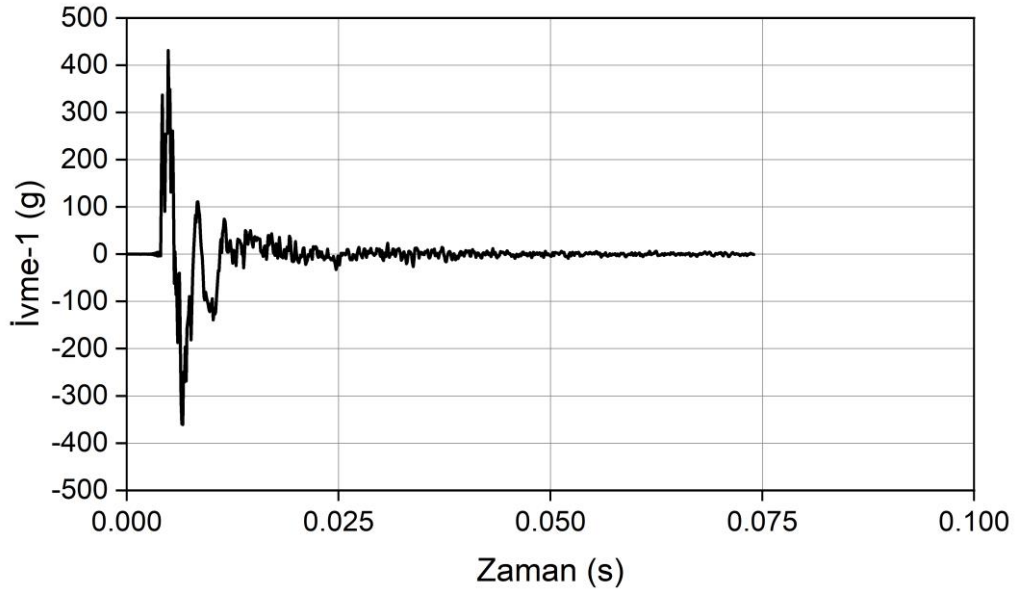
4.2.1.4. SH2 betonarme plağı

SH2 deney elemanı fonksiyonel derecelendirilmiş bir betonarme plaktır. Bu plağın 40 mm kalınlığında olan üst katmanı %1 çelik lif içeren betondan yapılmıştır. Toplam 80 mm kalınlığında olan diğer iki katmanı ise normal betondan yapılmıştır. SH2 betonarme plağına ait çarpma yükünün zaman tanım alanında değişimi Şekil 4.60.'ta sunulmuştur. Çarpma sırasında, bu numunede kaydedilen maksimum çarpma yükü 45.01 kN'dir. Minimum çarpma yükü ise -31.22 kN'dir.



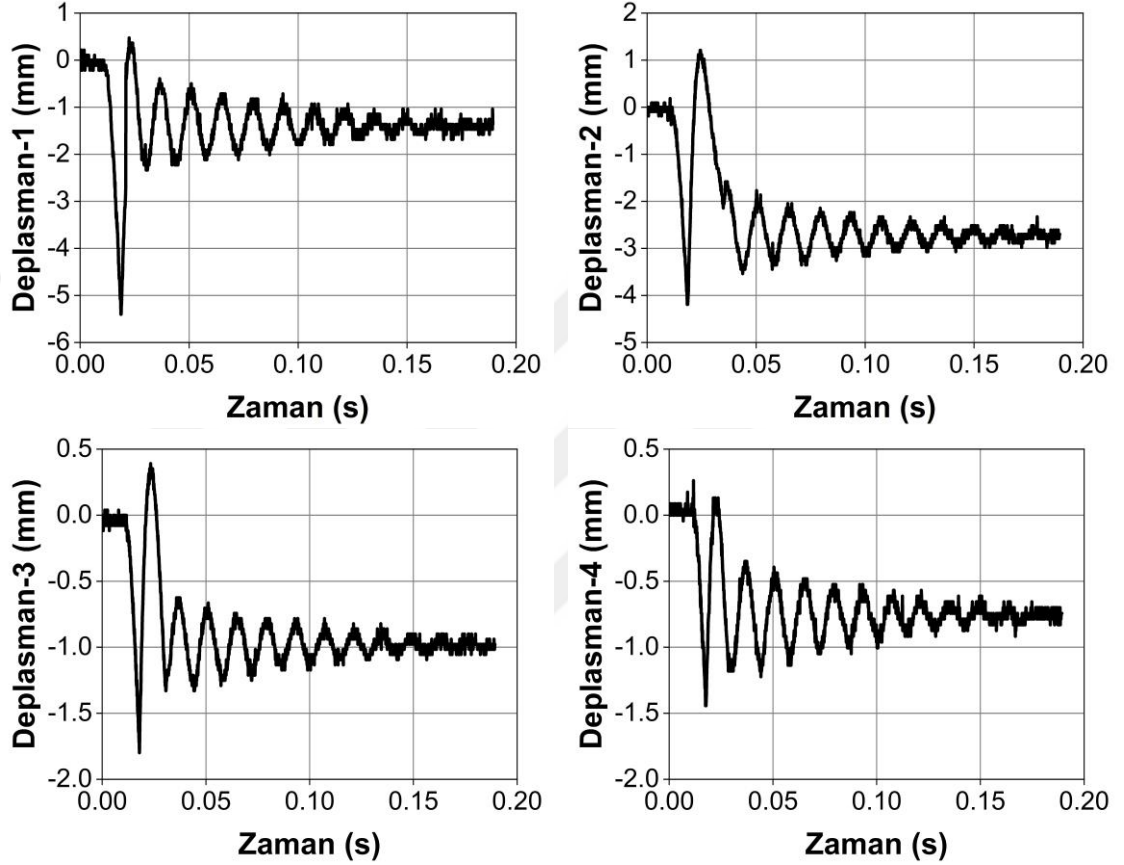
Şekil 4.60. SH2 deney elemanına ait çarpma yükü-zaman grafiği

Şekil 4.61.'de çarpma testi sırasında elde edilen SH2 betonarme plağına ait ivmenin zaman tanım alanında değişimi sunulmuştur. a1, a2 ve a3 ivmeölçerlerinden elde edilen maksimum ivme değerleri sırasıyla 431.46 g, 365.89 g ve 312.19 g'dir. Minimum ivme değerleri ise sırasıyla -361.28 g, -364.65 g ve -517.50'dir.



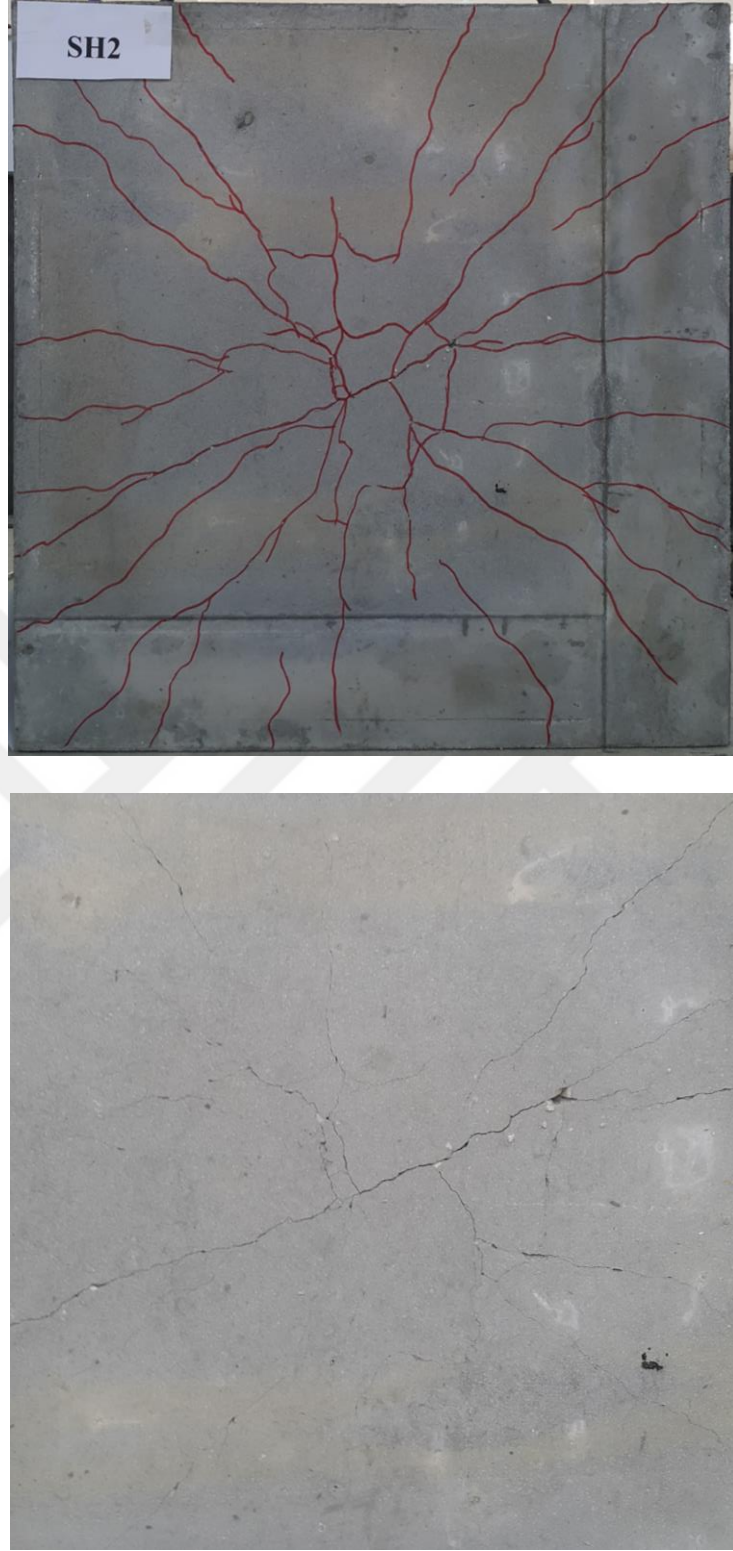
Şekil 4.61. SH2 deney elemanına ait ivme-zaman grafikleri

SH2 betonarme plağına ait deplasman-zaman grafikleri Şekil 4.62.'de sunulmuştur. Bu numunede, d1, d2, d3 ve d4 potansiyometrelerinden sırasıyla 5.87 mm, 5.40 mm, 2.19 mm ve 1.70 mm değerlerinde maksimum deplasmanlar ölçülmüştür. Bu potansiyometrelerden ölçülen kalıcı deplasmanlar ise sırasıyla 1.31 mm, 2.70 mm, 0.98 mm ve 0.74 mm'dir.



Şekil 4.62. SH2 deney elemanına ait deplasman-zaman grafikleri

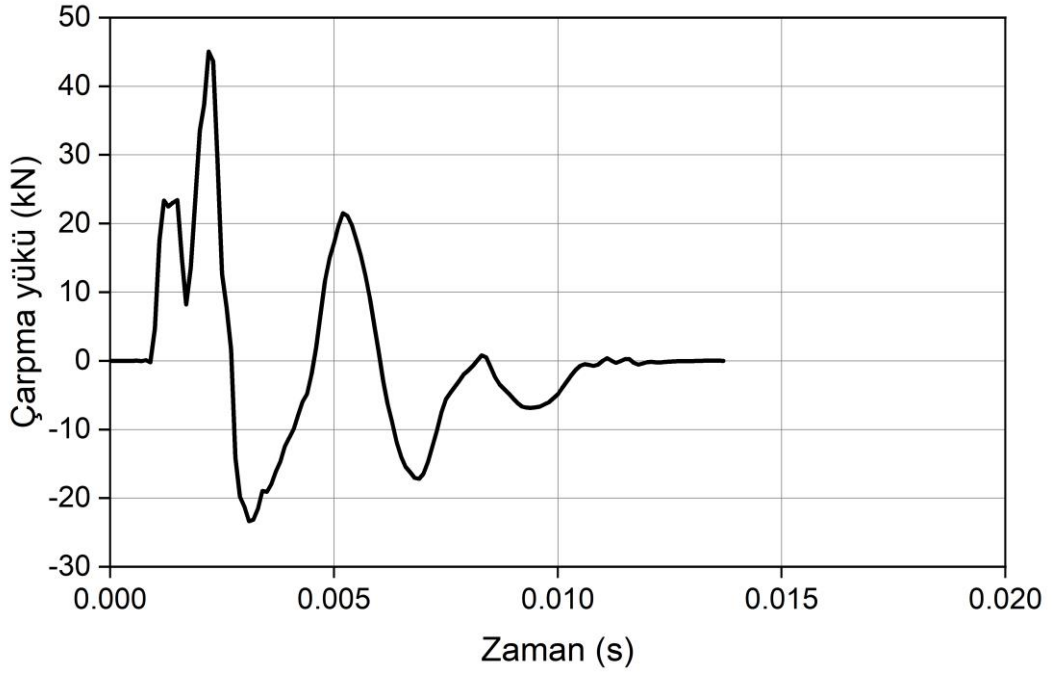
Uygulanan çarpma enerjisi altında SH2 betonarme plağında oluşan çatlak dağılımı Şekil 4.63.'te gösterilmektedir. Numunenin arka yüzeyinde kılcal eğilme radyal ve diyagonal çatlaklar gözlenmiştir. Çatlaklar mesnet bölgelerine kadar uzamıştır. Arka yüzeyin orta bölgesindeki çatlakların genişliğinin diğer bölgelere göre daha büyük olduğu izlenmiştir. Numunenin üst yüzeyinde hiçbir hasar gözlenmemiştir.



Şekil 4.63. SH2 numunesinde oluşan çatlak dağılımı

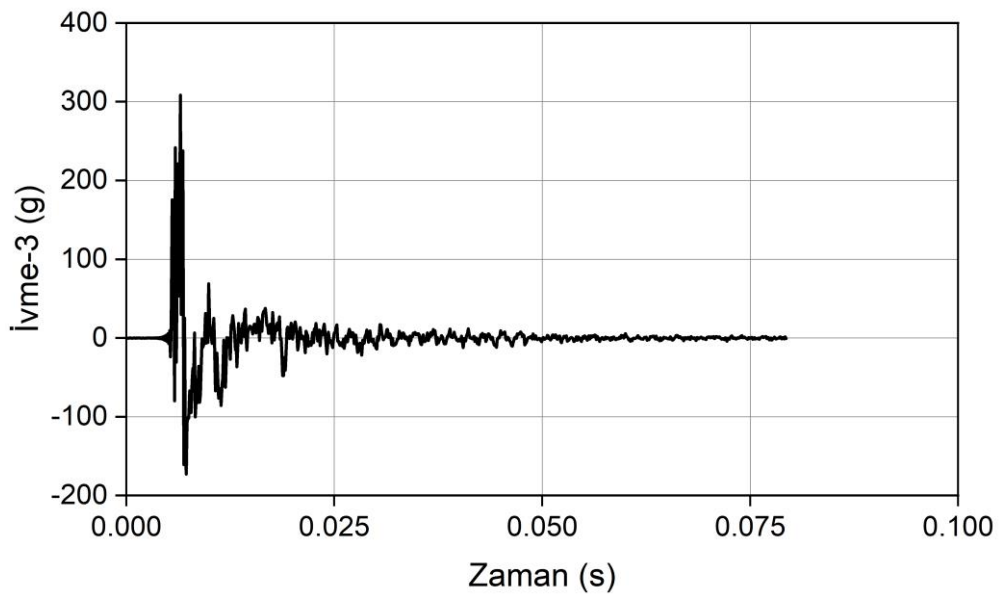
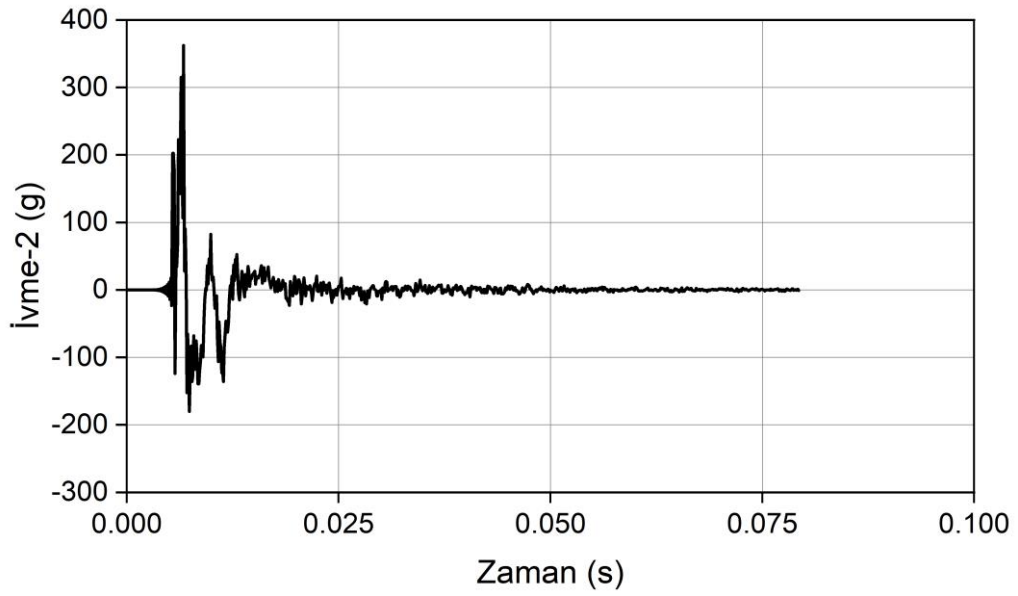
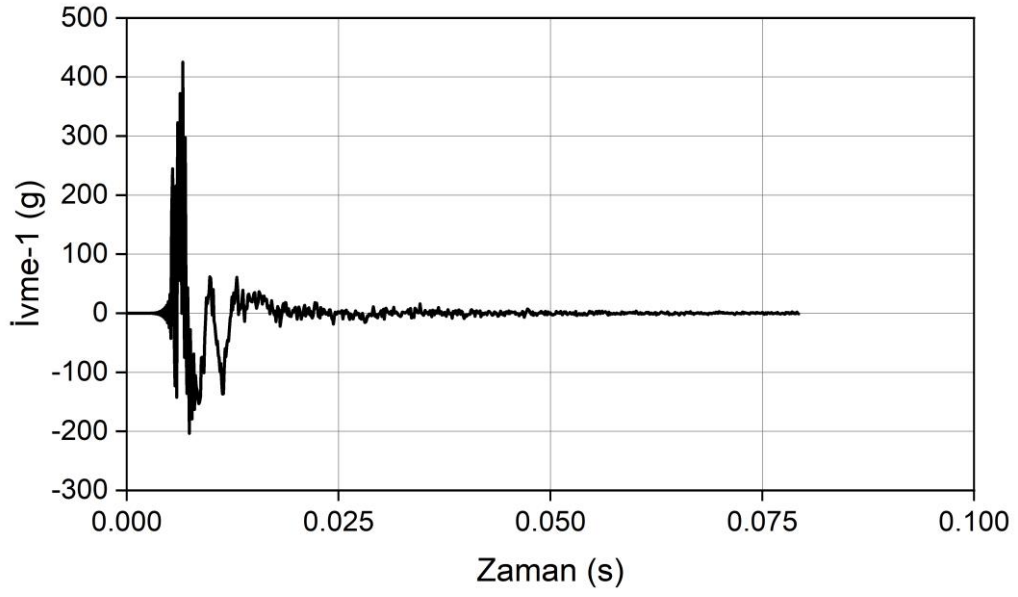
4.2.1.5. SH3 betonarme plağı

SH3 deney elemanı, üç katmandan oluşan hibrit bir betonarme plaktır. Orta katman %1 çelik lif donatılı beton, üst ve alt katmanlar ise normal beton kullanılarak üretilmiştir. Uygulanan çarpma enerjisi altında bu plağa ait çarpma yükünün zaman tanım alanında değişimi Şekil 4.64.'te verilmiştir. Bu numunede maksimum çarpma yükünün değeri 45.04 kN ve minimum çarpma yükünün değeri -23.38 kN olarak ölçülmüştür.



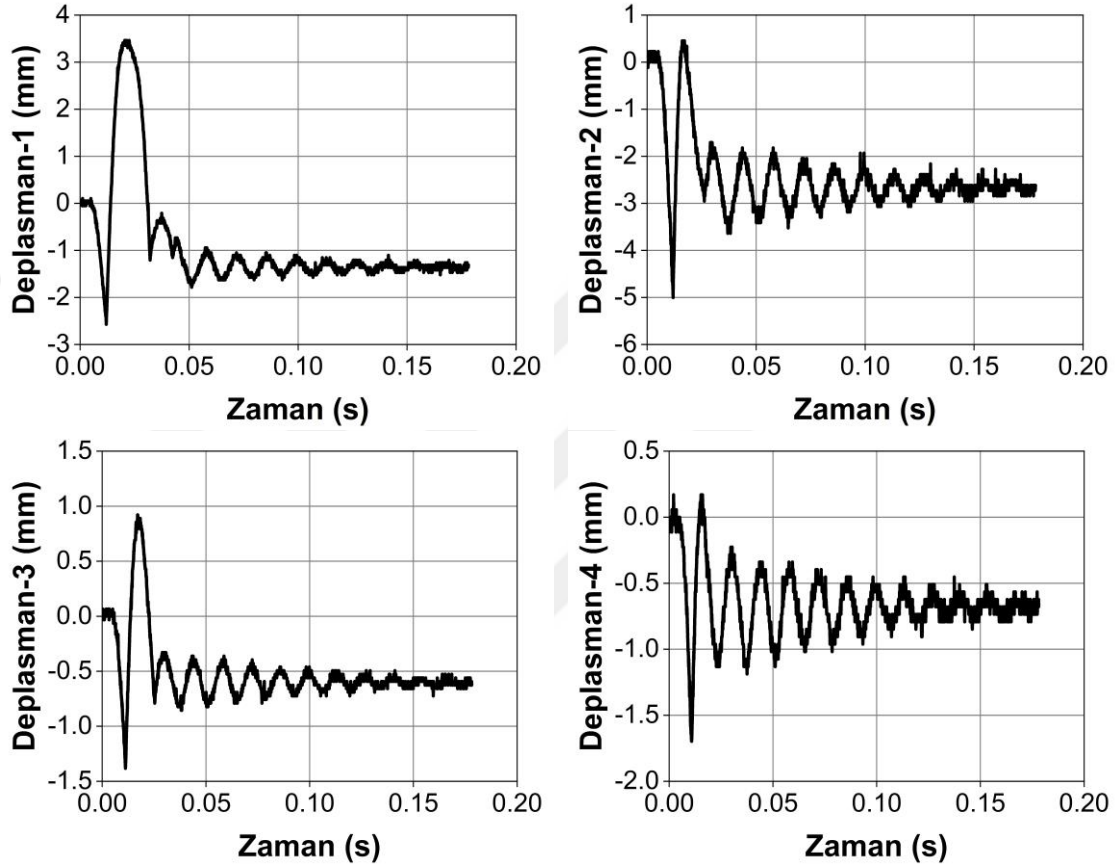
Şekil 4.64. SH3 deney elemanına ait çarpma yükü-zaman grafiği

Şekil 4.65. uygulanan çarpma enerjisi altında SH3 betonarme plağına ait ivme-zaman grafiklerini göstermektedir. Çarpma sırasında a1 ivmeölçerinden ölçülen maksimum ivme değeri 425.41 g ve minimum ivme değeri -203.66 g'dir. a2 ve a3 ivmeölçerlerinden kaydedilen maksimum ivme değerleri sırasıyla 362.49 g ve 308.54 g'dir. Bu ivmeölçerlerden ölçülen minimum ivme değerleri ise sırasıyla -180.37 g ve -173.08 g'dir.



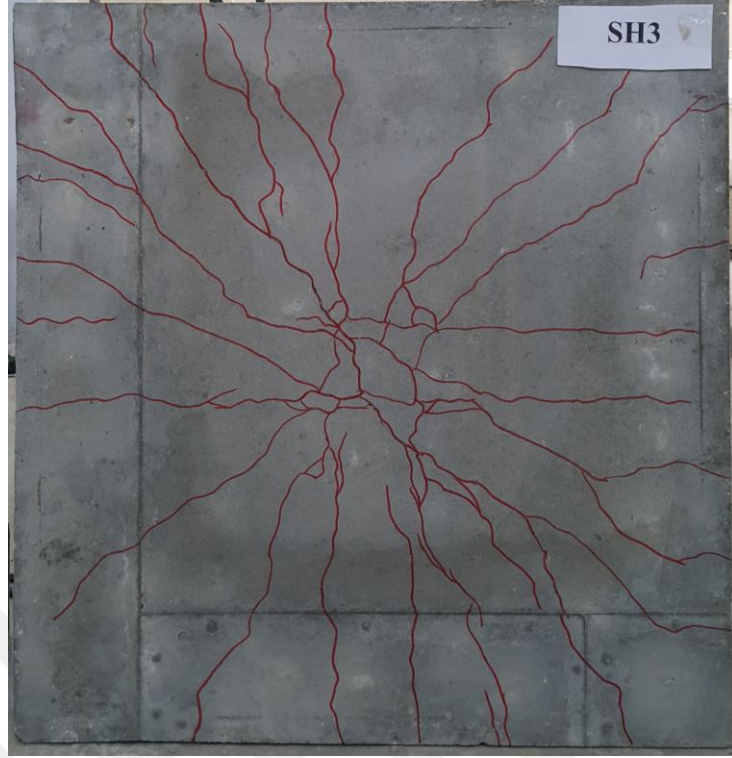
Şekil 4.65. SH3 deney elemanına ait ivme-zaman grafikleri

SH3 betonarme plağına ait deplasmanın zaman tanım alanında değişimi Şekil 4.66.'da sunulmuştur. Bu numunenin simetri ekseninden 0 mm, 150 mm, 250 mm ve 350 mm uzaklıklarda olđülen maksimum deplasmanlar sırasıyla 6.03 mm, 5.46 mm, 2.30 mm ve 1.87 mm'dir. Bu uzaklıklarda kalıcı deplasmanlar sırasıyla 1.31 mm, 2.61 mm, 0.63 mm ve 0.69 mm olarak olđülmüřtür.



Şekil 4.66. SH3 deney elemanına ait deplasman-zaman grafikleri

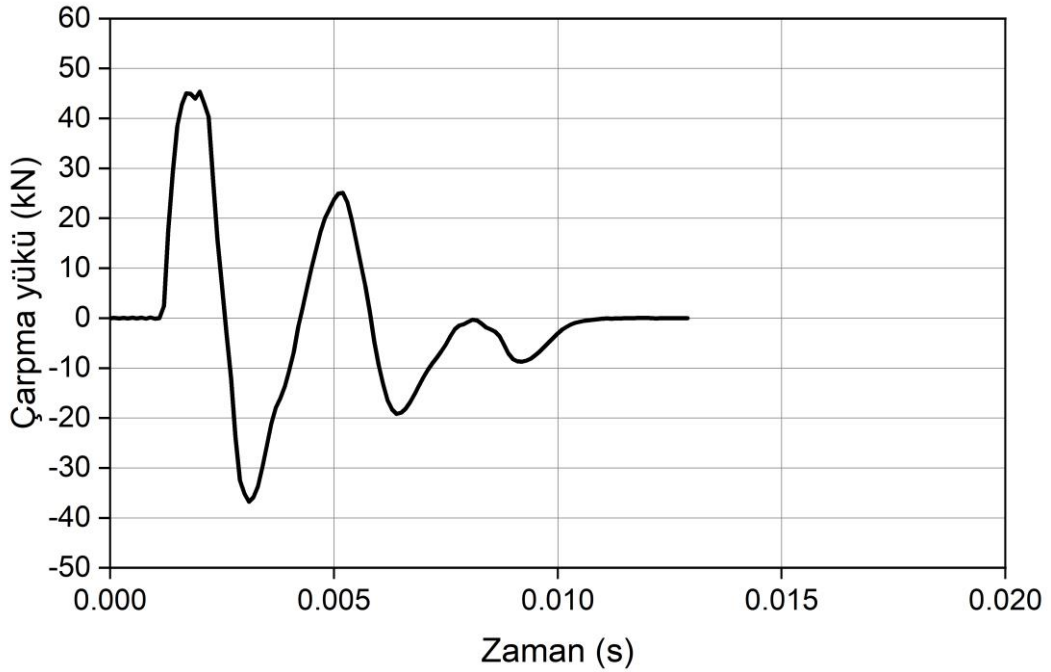
Çarpma testi sonunda SH3 betonarme plağının arka yüzeyinde gözlenen çatlak dağılımı Şekil 4.67.'de sunulmuştur. Numunenin orta bölgesinde mesnetlere doğru uzanan kılcal diyagonal ve radyal çatlaklar görülmüştür. Şekilde görüldüğü gibi, numunenin orta bölgesinden sol üst köşeye ve sağ alt köşeye doğru uzanan bir ana diyagonal çatlak gözlenmiştir. Çarpma testi sonrasında numunenin ön yüzeyinde herhangi bir çatlak izlenmemiştir.



Şekil 4.67. SH3 numunesinde oluşan çatlak dağılımı

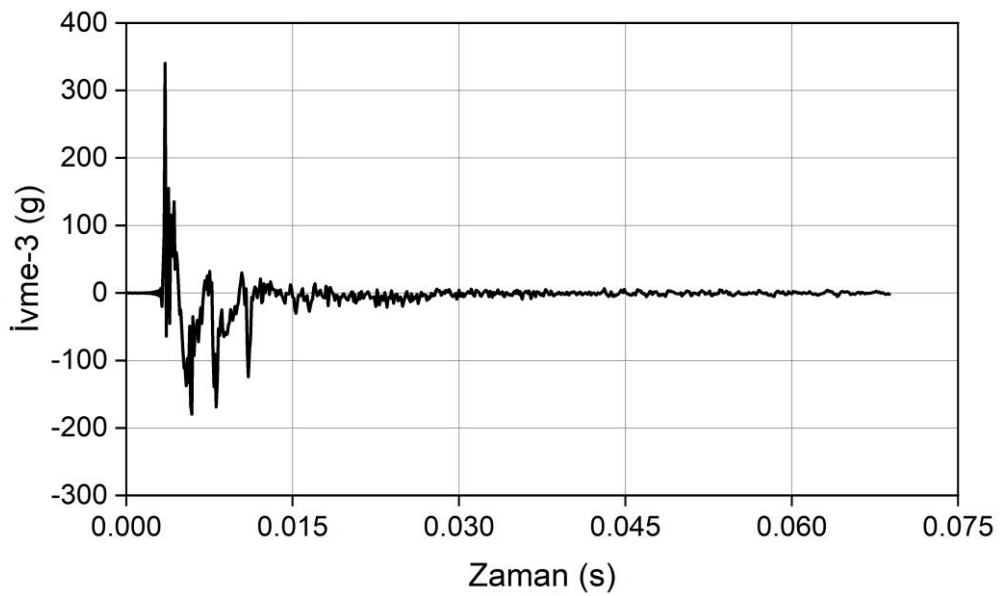
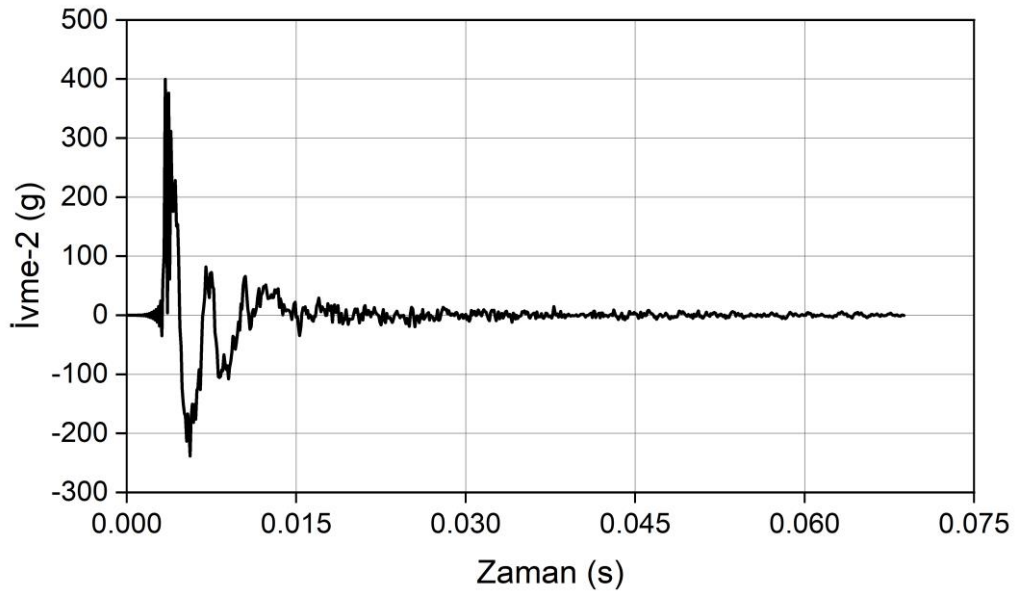
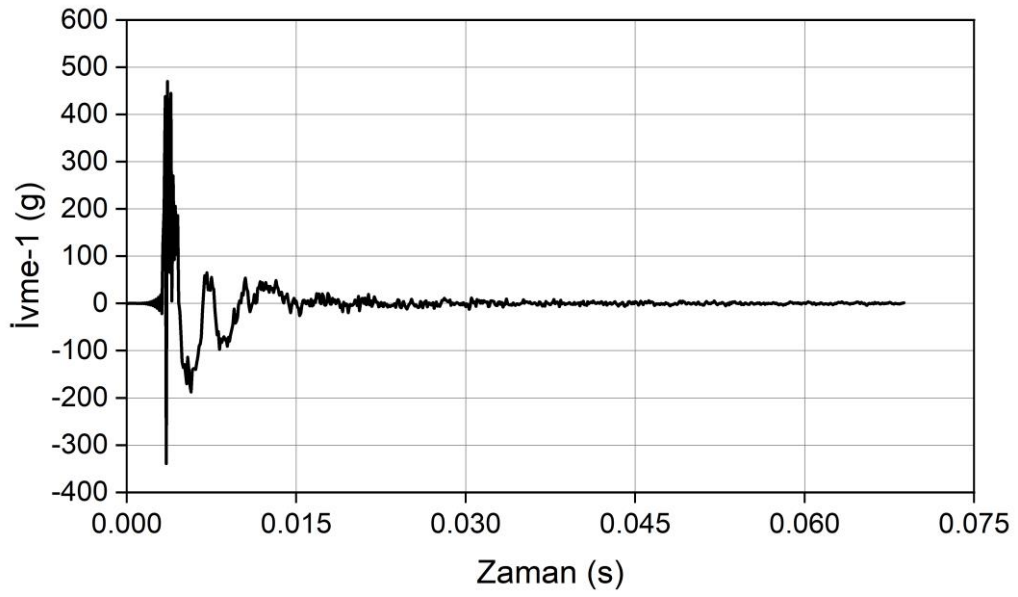
4.2.1.6. SH4 betonarme plağı

SH4 deney elemanı, üç katmandan oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş bir betonarme plakadır. Bu betonarme plakta üst ve alt katmanlarda %1 çelik lif içeren betondan, orta katman ise normal betondan yapılmıştır. Bu plağa ait yük algılayıcısı vasıtasıyla ölçülen yük-zaman grafiğı Şekil 4.68.'de gösterilmiştir. Yük algılayıcısı tarafından ölçülen maksimum çarpma yükü 45.34 kN ve minimum çarpma yük -36.78 kN'dir.



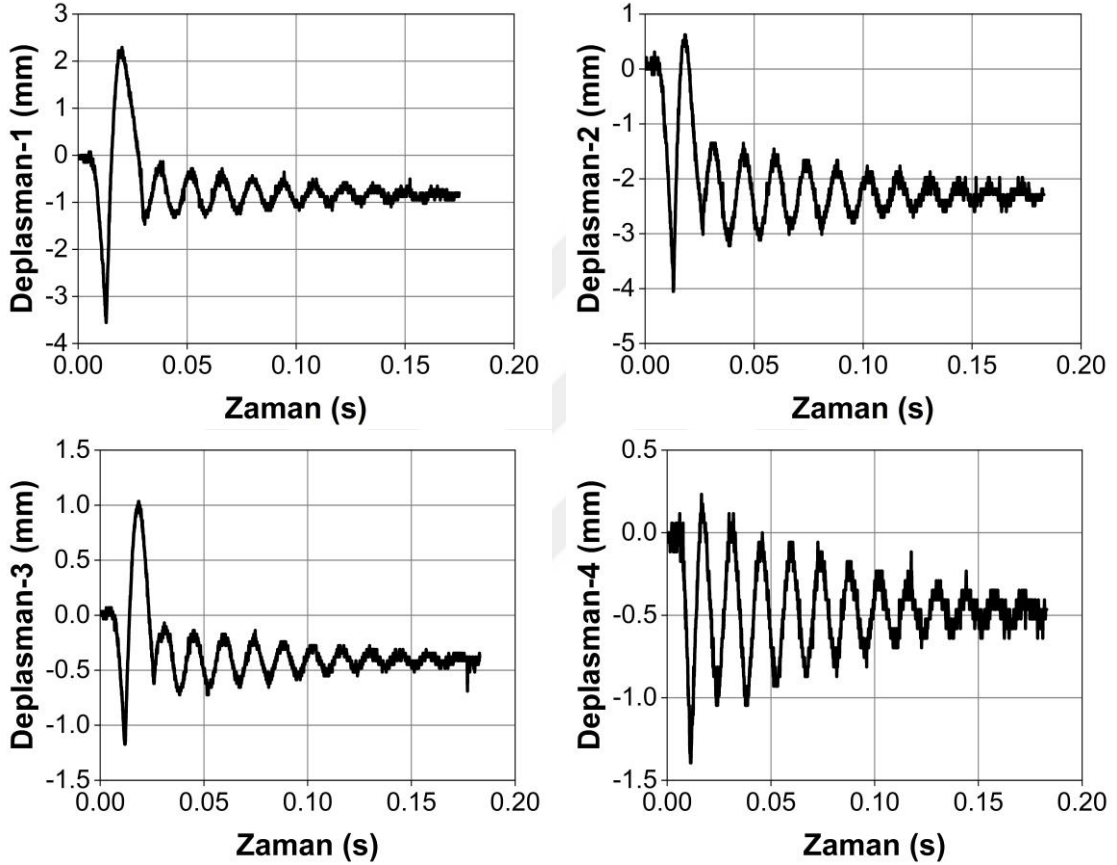
Şekil 4.68. SH4 deney elemanına ait çarpma yükü-zaman grafiğı

SH4 betonarme plağına ait a1, a2 ve a3 ivmeölçerlerinden ölçülen ivme-zaman grafikleri Şekil 4.69.'da sunulmuştur. a1 ivmeölçerinden elde edilen maksimum ve minimum ivme değerleri sırasıyla 470.12 g ve -339.48 g'dir. a2 ve a3 ivmeölçerlerinden ölçülen maksimum ivme değerleri sırasıyla 399.92 g ve 340.45 g'dir. Minimum ivme değerleri ise sırasıyla -238.78 g ve -179.72 g'dir.



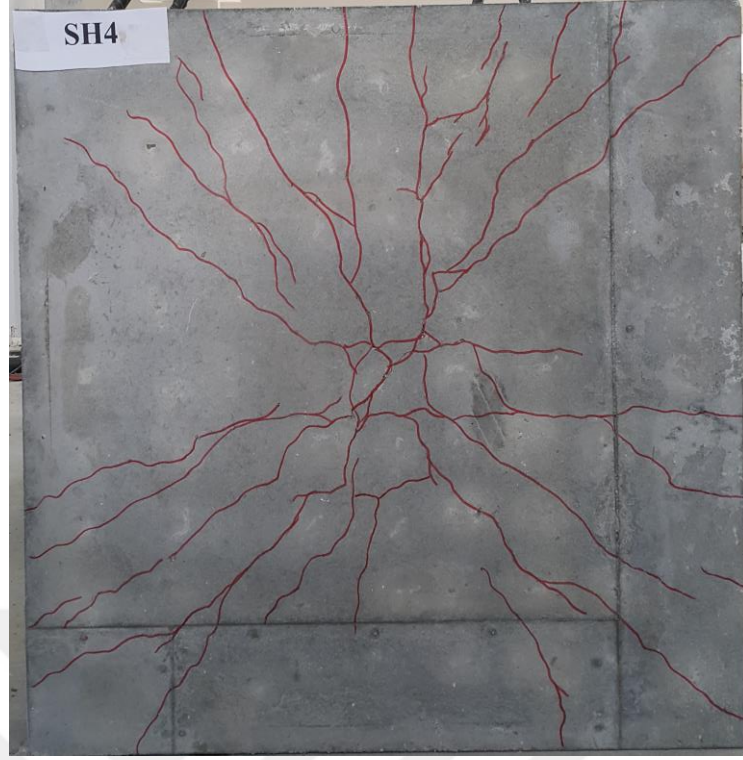
Şekil 4.69. SH4 deney elemanına ait ivme-zaman grafikleri

SH4 betonarme plağına ait deplasmanın zaman tanım alanında değişimi Şekil 4.70.'te verilmiştir. Plağın simetri ekseninde yerleştirilen d1 potansiyometresinden ölçülen maksimum deplasman 5.85 mm'dir. Bu konumdaki kalıcı deplasman 0.8 mm olarak kaydedilmiştir. Simetri ekseninden 150 mm, 250 mm ve 350 mm mesafelerde ölçülen maksimum deplasmanlar sırasıyla 4.68 mm, 2.21 mm ve 1.63 mm'dir. Kalıcı deplasmanlar ise sırasıyla 2.29 mm, 0.38 mm ve 0.46 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.70. SH4 deney elemanına ait deplasman-zaman grafikleri

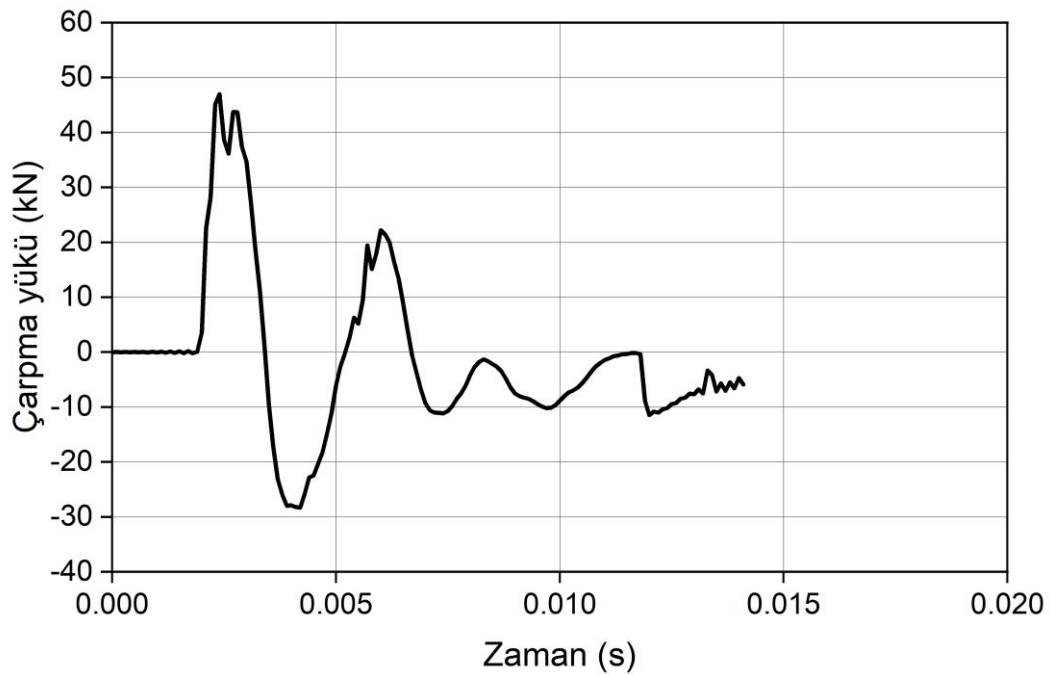
Şekil 4.71. çarpma testi bittikten sonra SH4 betonarme plağının arka yüzeyinde tespit edilen çatlak dağılımını göstermektedir. Bu numunenin orta bölgesinde kılcal diyagonal çatlaklar izlenmiştir. Çatlaklar çapraz olarak numunenin köşelerine doğru uzamıştır. Ayrıca, bazı kılcal radyal çatlaklar da gözlemlenmiştir. Numunenin ön yüzeyinde hiçbir çatlak gözlenmemiştir.



Şekil 4.71. SH4 numunesinde oluşan çatlak dağılımı

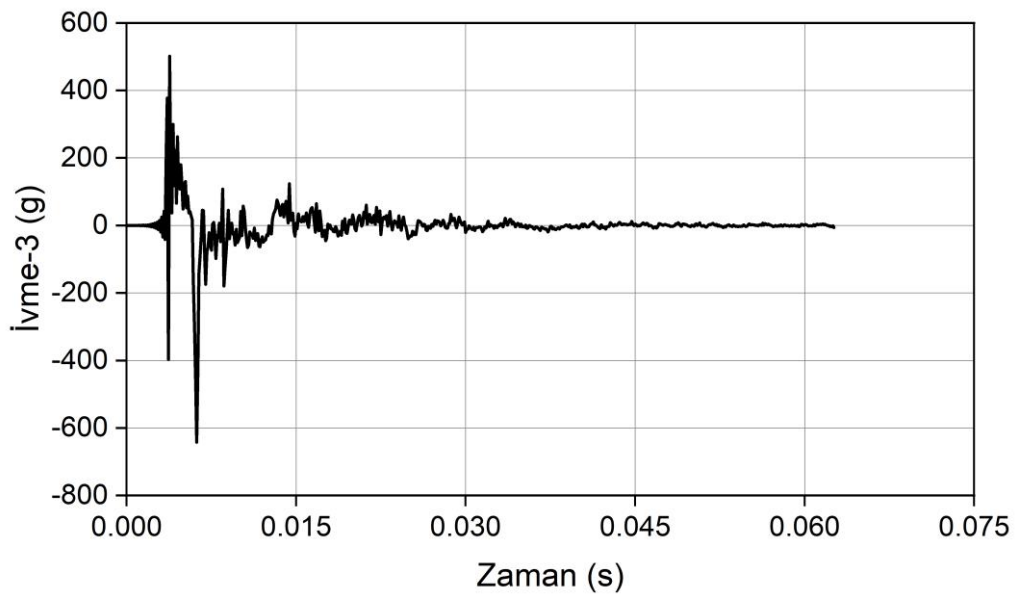
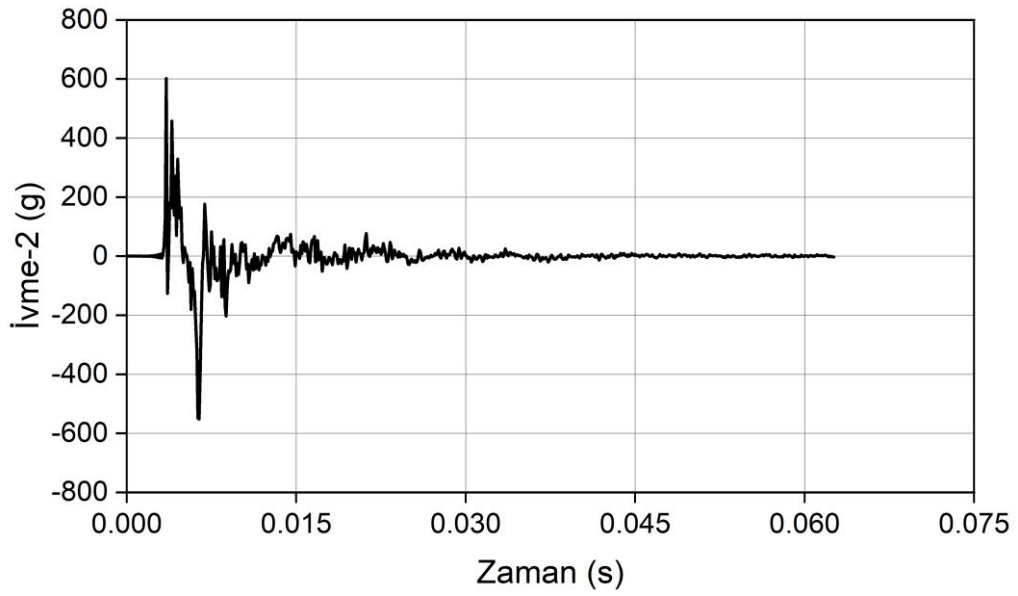
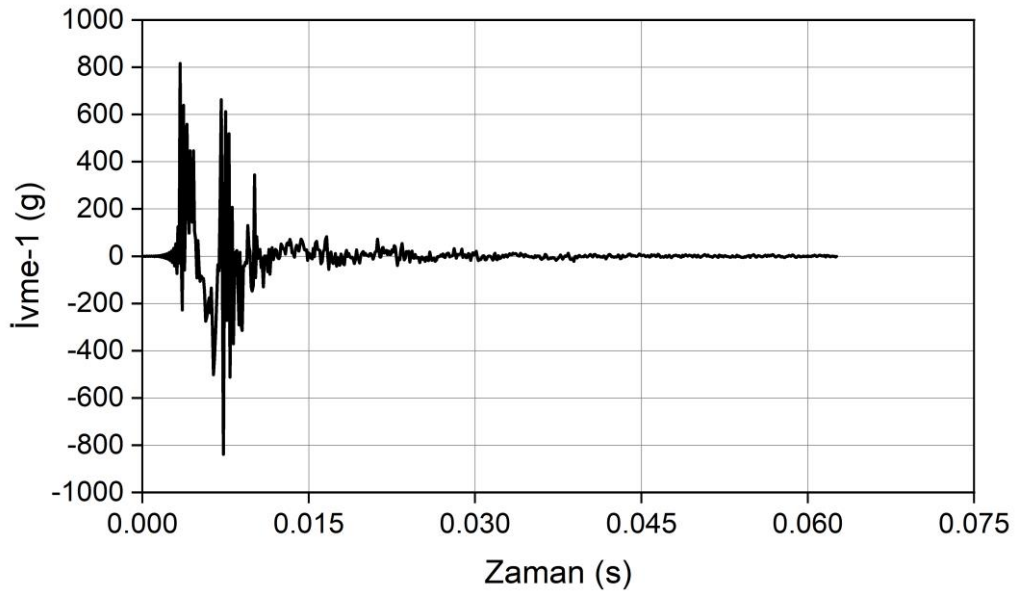
4.2.1.7. SS1 betonarme plağı

SS1 deney elemanı, üst yüzeyinde çelik levha kullanılan bir betonarme plaktır. Bu betonarme plak %1 çelik lif içeren betondan yapılmıştır. Çarpma testi sırasında SS1 betonarme plağına ait çarpma yükünün zaman tanım alanında değişimi Şekil 4.72.'de sunulmuştur. Uygulanan çarpma enerjisi altında hesaplanan maksimum çarpma yükü 46.98 kN iken minimum çarpma yükü -28.30 kN'dir.



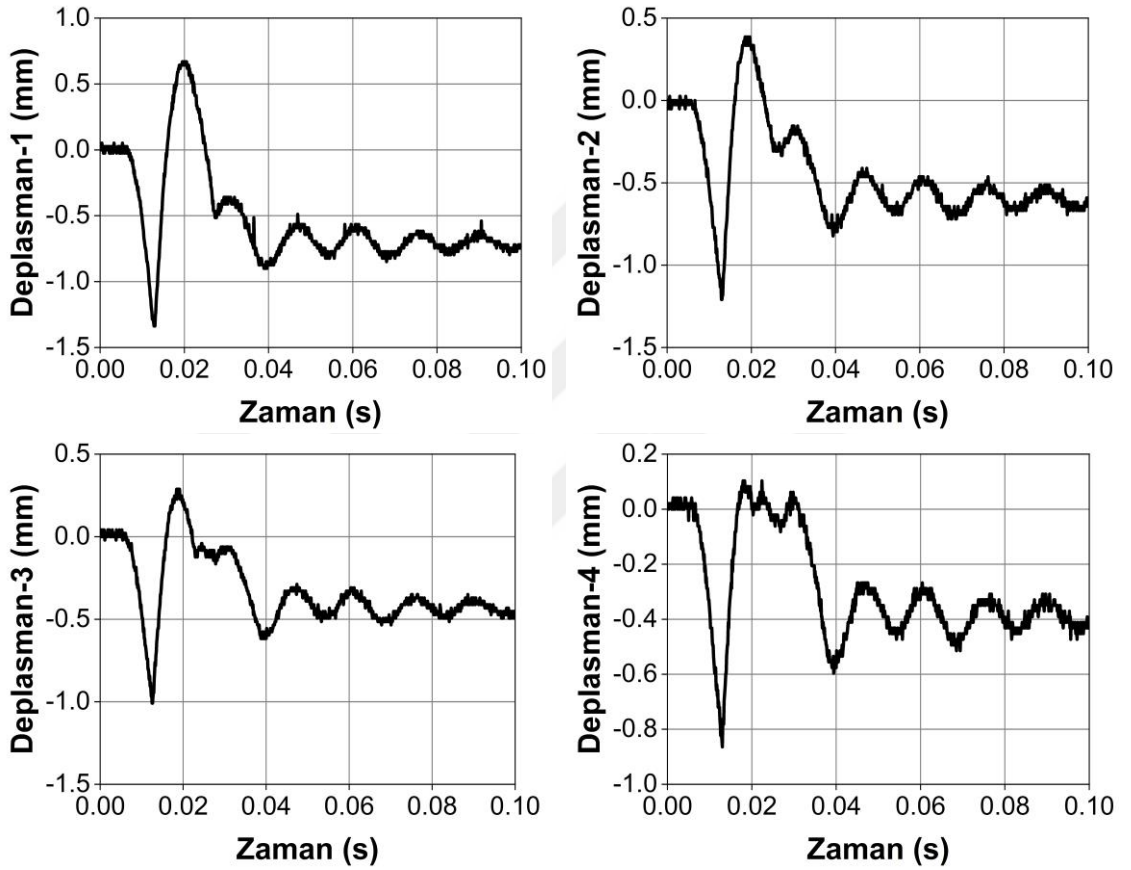
Şekil 4.72. SS1 deney elemanına ait çarpma yükü-zaman grafiği

SS1 betonarme plağına ait ivme-zaman grafikleri Şekil 4.73.'te gösterilmiştir. Bu plağın simetri ekseninden 150 mm uzaklıkta bulunan a1 ivmeölçerinden ölçülen maksimum ivme değeri 816.85 g'dir. Minimum ivme değeri ise -839.53 g'dir. a2 ivmeölçerinden kaydedilen maksimum ve minimum ivme değerleri sırasıyla 602.14 g ve 552.41 g'dir. a3 ivmeölçerinden ölçülen maksimum ve minimum ivme değerleri ise sırasıyla 501.99 g ve -642.66 g'dir.



Şekil 4.73. SS1 deney elemanına ait ivme-zaman grafikleri

Uygulanan çarpma yükü altında SS1 betonarme plağına ait deplasman-zaman grafikleri Şekil 4.74.'te sunulmuştur. Numunenin simetri ekseninde d1 potansiyometresi tarafından ölçülen maksimum deplasman değeri 2.01 mm ve kalıcı deplasman değeri 0.72 mm'dir. d2, d3 ve d4 potansiyometrelerinden ölçülen maksimum deplasmanlar sırasıyla 1.59 mm, 1.30 mm ve 0.97 mm'dir. Kalıcı deplasmanlar ise sırasıyla 0.62 mm, 0.41 mm ve 0.39 mm'dir.



Şekil 4.74. SS1 deney elemanına ait deplasman-zaman grafikleri

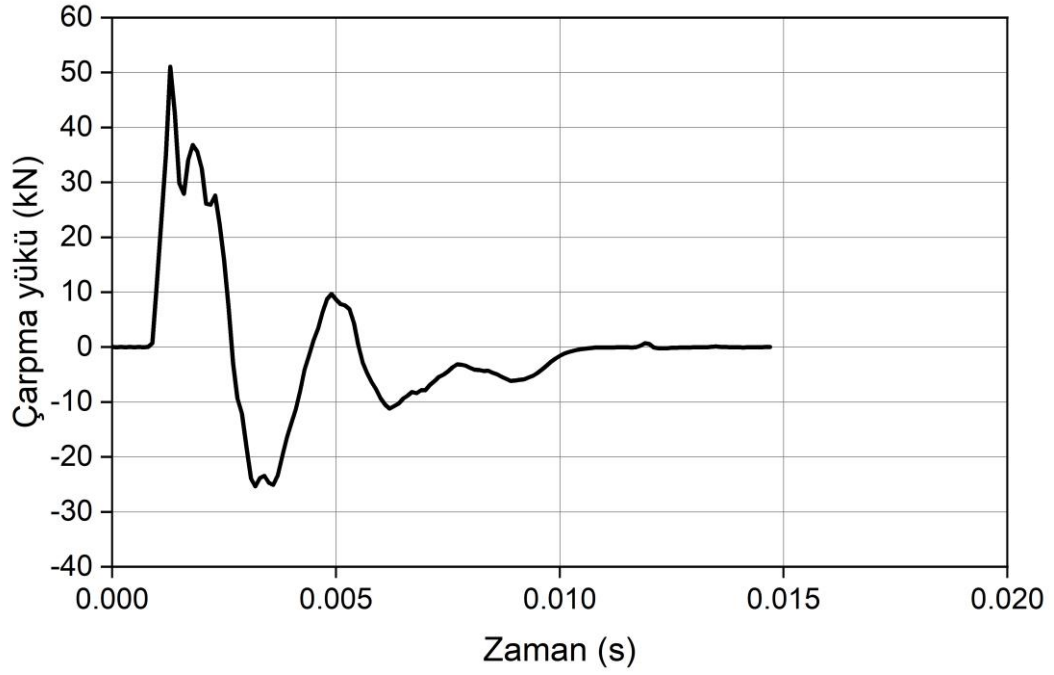
Çarpma testi sonrasında SS1 betonarme plağında tespit edilen çatlak dağılımı Şekil 4.75. 'te gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, numunenin arka yüzeyinde kılcal diyagonal ve radyal çatlaklar gözlenmiştir. Numunenin orta bölgesindeki çatlak dağılımının yakından çekilmiş görüntüsünde net bir şekilde görülebilen yalnızca birkaç çatlak vardır. Bu, çatlakların çoğunun genişliğinin çok küçük olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu genişliğin, numunenin mesnetlenmiş bölgesine doğru gidildikçe oldukça azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.75. SS1 numunesinde oluşan çatlak dağılımı

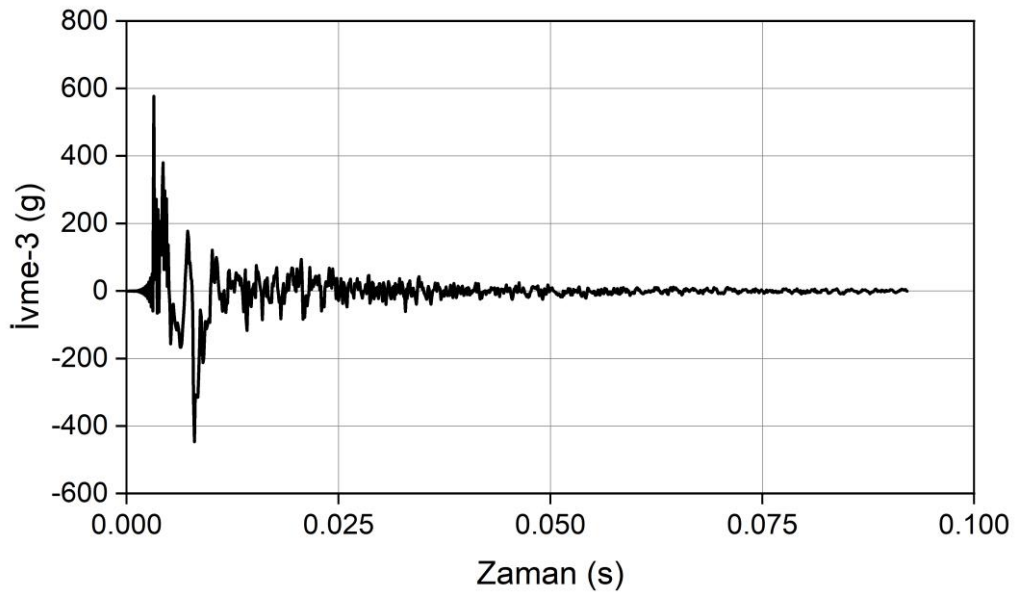
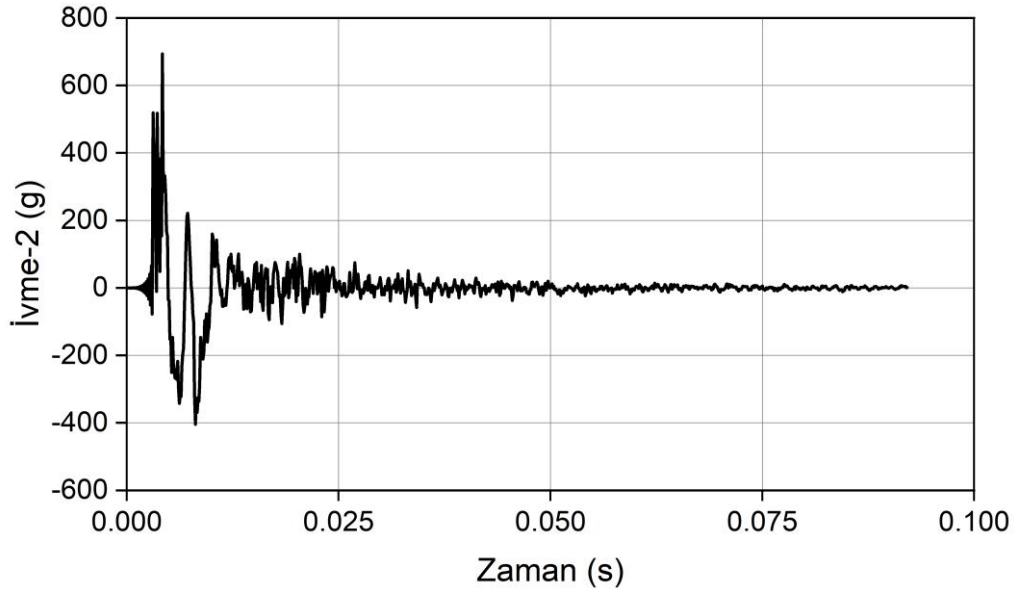
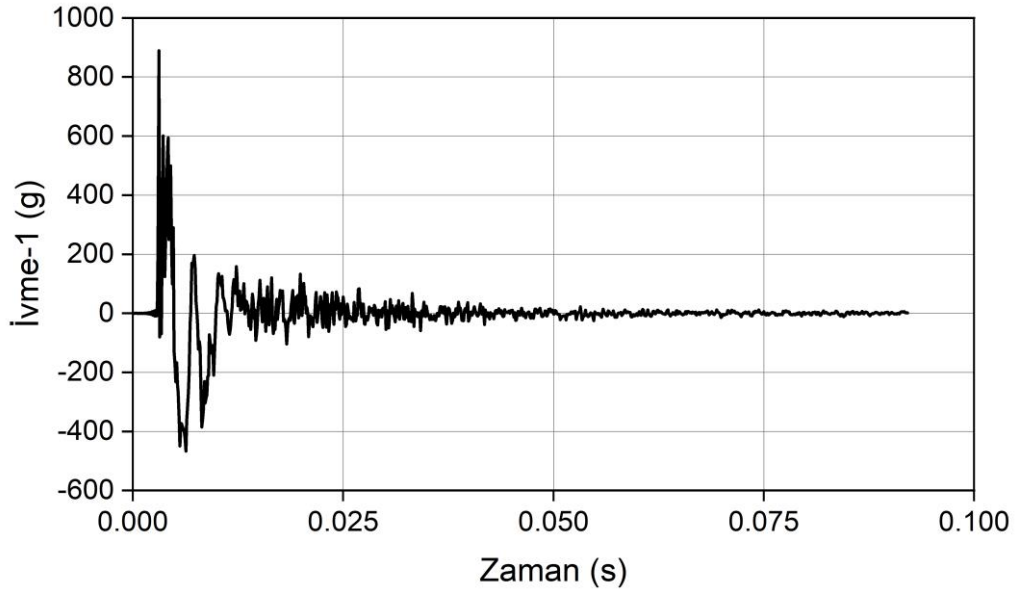
4.2.1.8. SS2 betonarme plağı

SS2 deney elemanı, hacimce %1 elik lif içeren betondan üretilmiş ve arka yüzeyinde elik levha kullanılmış bir betonarme plaktır. Çarpma enerjisinin uygulanmasında kaydedilen çarpma yükü-zaman grafiği Şekil 4.76.'da verilmiştir. Çarpma testi sırasında maksimum çarpma yükü 51.08 kN ve minimum çarpma yükü - 25.36 kN olarak ölçülmüştür.



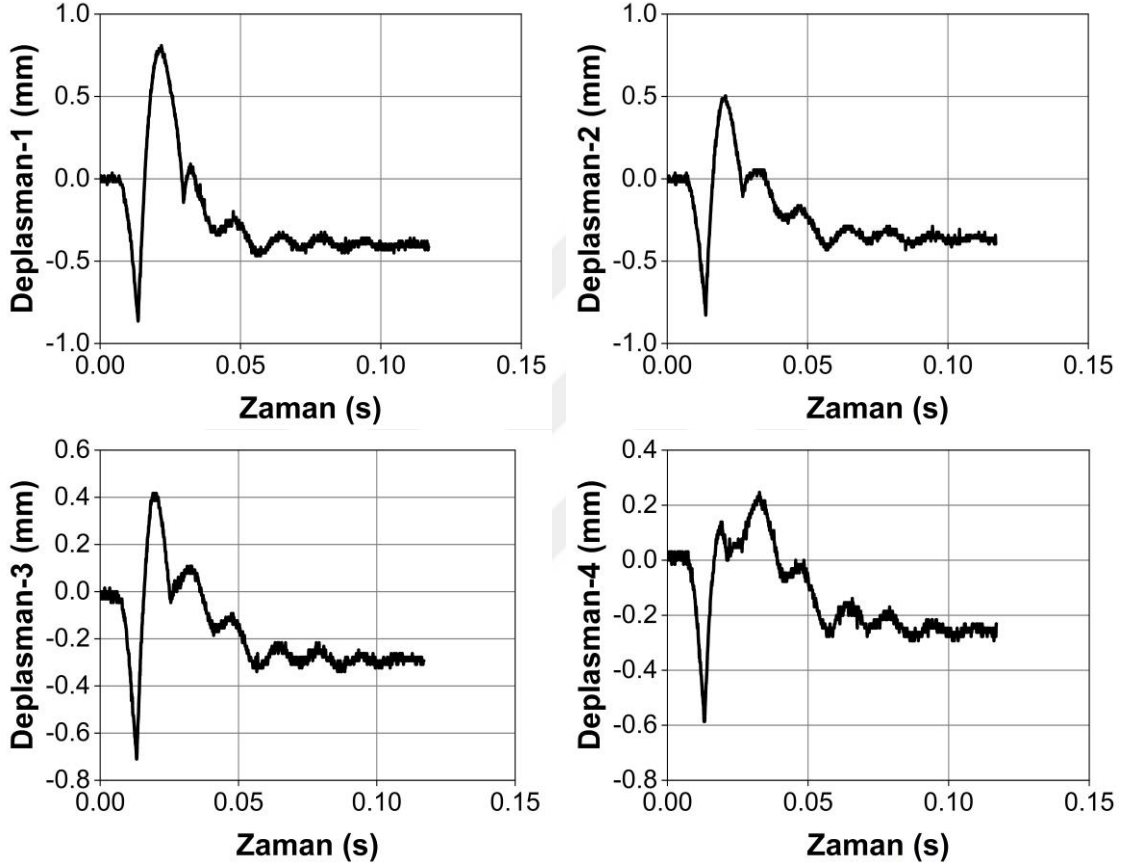
Şekil 4.76. SS2 deney elemanına ait çarpma yükü-zaman grafiği

SS2 betonarme plağına ait ivme-zaman grafikleri Şekil 4.77.'de gösterilmiştir. a1 ivmeölçerinden ölçülen maksimum ivme değeri 889.27 g ve minimum ivme değeri -467.00 g'dir. Simetri ekseninden 250 mm ve 350 mm uzaklıklarda kaydedilen maksimum ivme değerleri sırasıyla 693.52 g ve 577.33 g'dir. Minimum ivme değerleri ise sırasıyla -404.79 g ve -446.75 g'dir.



Şekil 4.77. SS2 deney elemanına ait ivme-zaman grafikleri

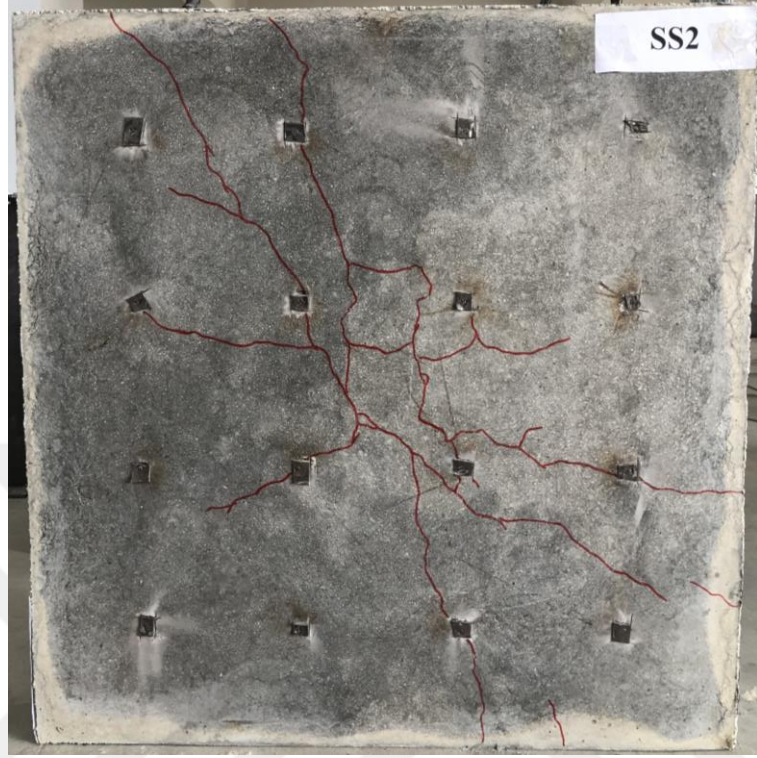
Şekil 4.78. SS2 betonarme plağına ait uygulanan çarpma enerjisi altında elde edilen deplasman-zaman grafiklerini göstermektedir. d1 potansiyometresinden ölçülen maksimum deplasman 1.67 mm'dir. Kalıcı deplasman ise 0.41 mm olarak ölçülmüştür. d2, d3 ve d4 potansiyometrelerinden kaydedilen maksimum deplasmanlar sırasıyla 1.33 mm, 1.13 mm ve 0.83 mm'dir. Kalıcı deplasmanlar ise sırasıyla 0.40 mm, 0.29 mm ve 0.23 mm'dir.



Şekil 4.78. SS2 deney elemanına ait deplasman-zaman grafikleri

Çarpma testi bittikten sonra numunenin arka yüzeyinde bulunan çelik levha kaldırılmış ve betonarme plakta meydana gelen çatlak dağılımı incelenmiştir. Elde edilen çatlak dağılımı Şekil 4.79.'da gösterilmiştir. Numunenin arka yüzeyinde az sayıda çok ince kılcal çatlak gözlenmiştir. Şekilde gösterildiği gibi, bu çatlaklar esas olarak numunenin orta bölgesinden sol üst ve sağ alt köşelerine çapraz olarak uzamıştır. Numunenin orta bölgesinin yakından çekilmiş görüntüsüne bakıldığında neredeyse hiçbir çatlak gözükmemektedir. Bu, çatlak genişliğinin çok küçük olduğunun açık bir göstergesidir. Bu numuneye ait çatlak dağılımı incelendiğinde, çatlaklar özellikle orta bölgeden uzaklaştıkça zorlukla görülmüştür. Bu da, çatlakların mikro çatlak seviyesinde

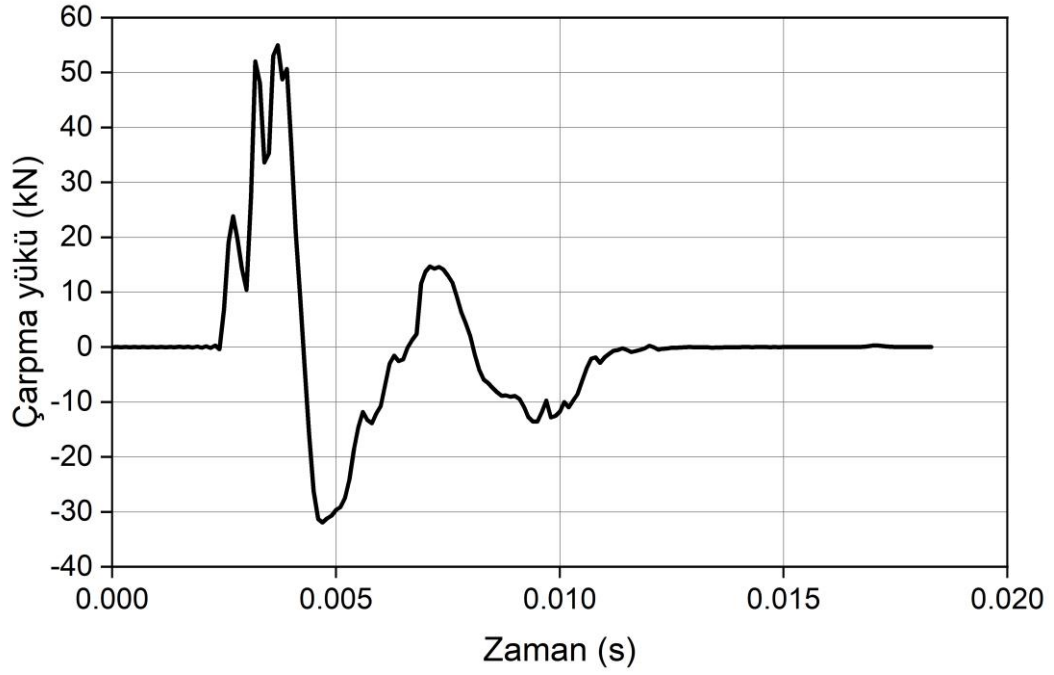
olmasından kaynaklanmıştır. Bu numunenin ön yüzeyinde gözle görünür bir çatlak bulunmamıştır.



Şekil 4.79. SS2 numunesinde oluşan çatlak dağılımı

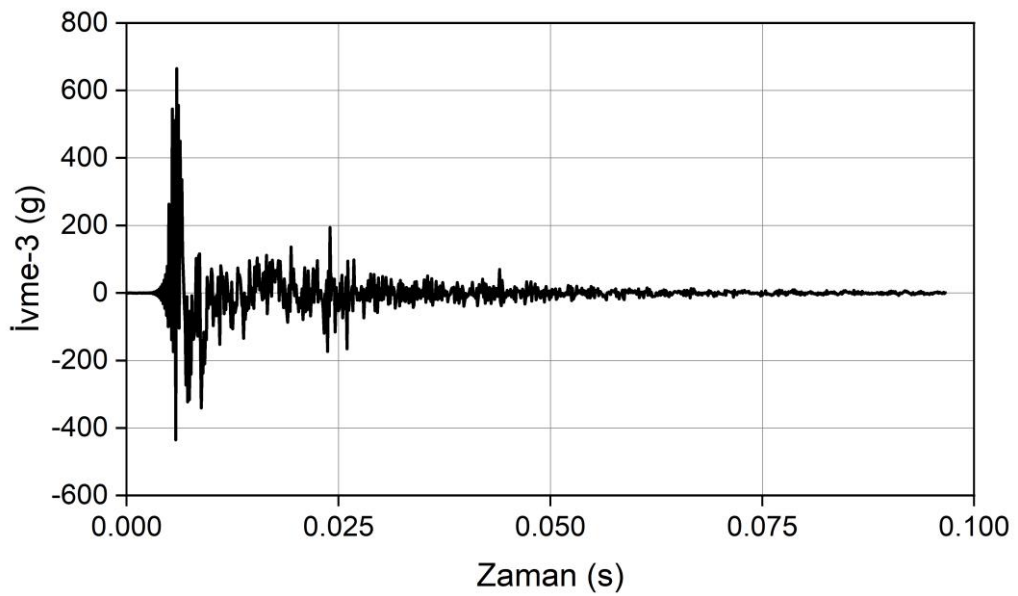
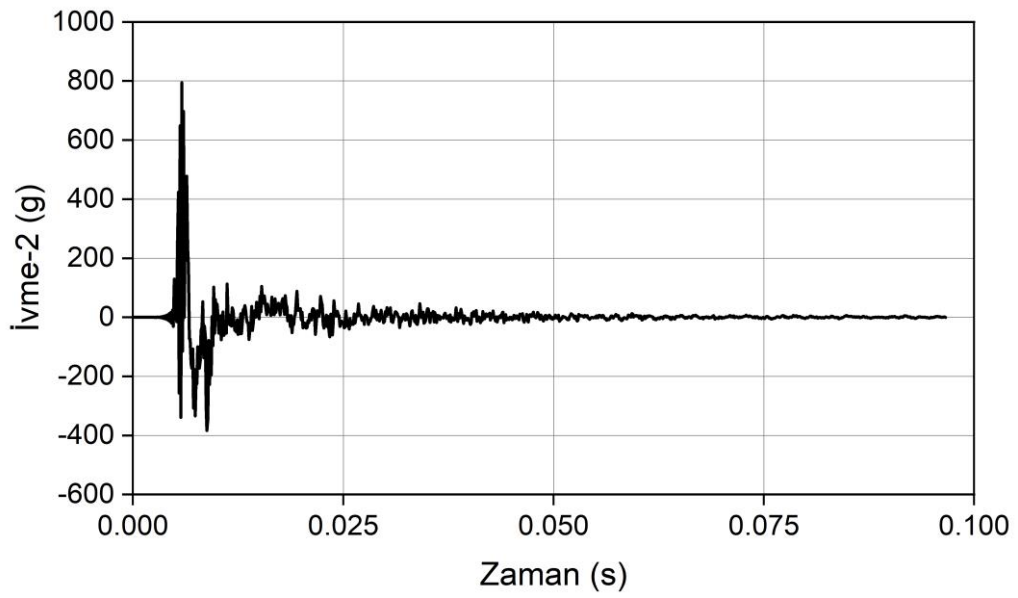
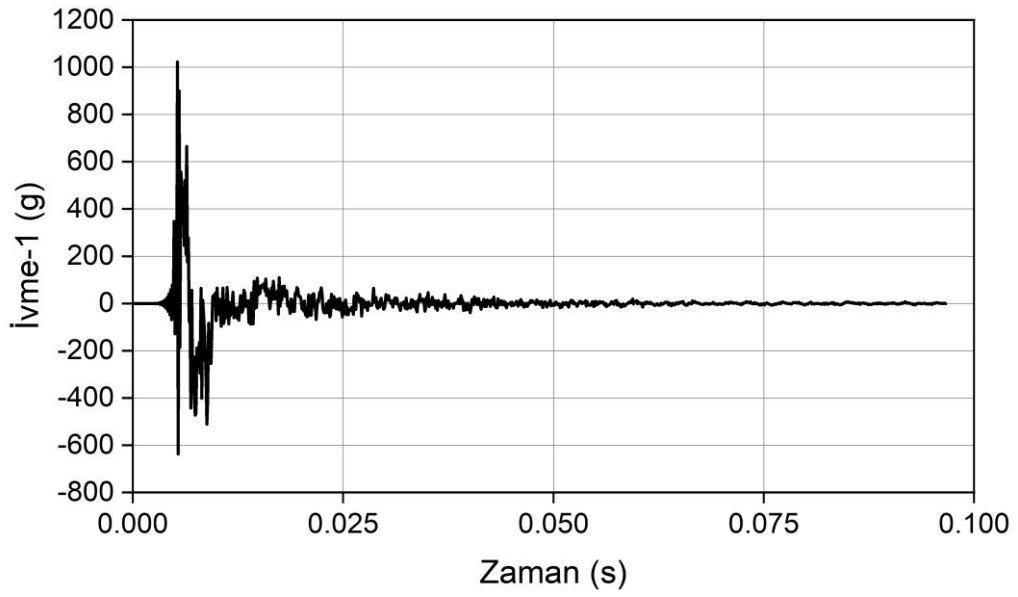
4.2.1.9. SS3 betonarme plağı

SS3 test elemanı, üst ve alt yüzeylerinde 1 mm kalınlığında çelik levha bulunan betonarme plakdır. Bu betonarme plak %1 çelik lif içeren betondan üretilmiştir. Uygulanan 2992.4 J çarpma enerjisi altında SS3 betonarme plağına ait çarpma yükünün zaman tanım alanında değişimi Şekil 4.80.'de gösterilmiştir. Bu plakta kaydedilen maksimum çarpma yük 54.97 kN'dir. Minimum çarpma yükü ise -31.96 kN'dir.



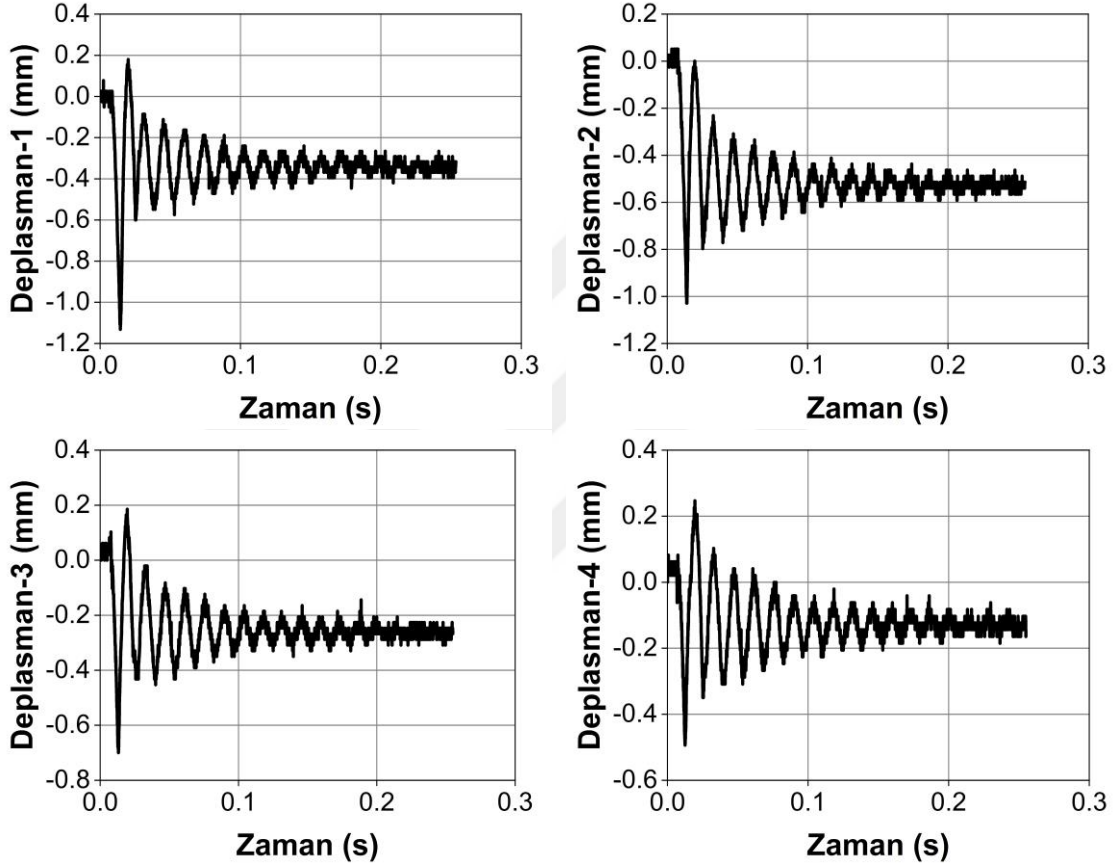
Şekil 4.80. SS3 deney elemanına ait çarpma yükü-zaman grafiği

Uygulanan çarpma enerjisi altında SS3 betonarme plağına ait ivme-zaman grafikleri Şekil 4.81.'de sunulmuştur. a1, a2 ve a3 ivmeölçerlerinden ölçülen maksimum ivme değerleri sırasıyla 1022.59 g, 794.37 g ve 665.14 g'dir. Bu ivmeölçerlerden ölçülen minimum ivme değerleri ise sırasıyla -637.75 g, -383.56 g ve -435.62'dir.



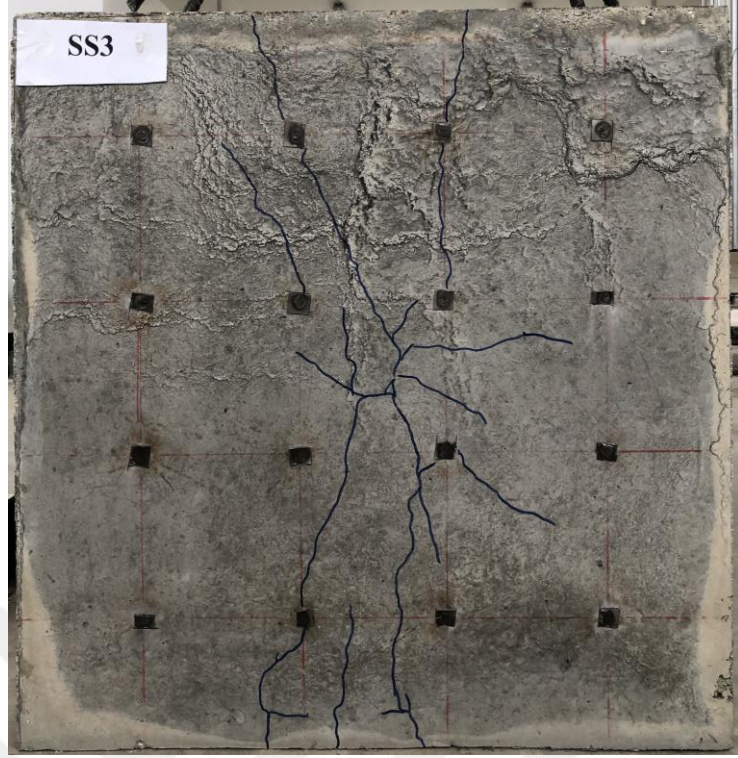
Şekil 4.81. SS3 deney elemanına ait ivme-zaman grafikleri

SS3 betonarme plağına ait deplasman-zaman grafikleri Şekil 4.82.'de sunulmuştur. Numunenin simetri ekseninde d1 potansiyometresi ile ölçülen maksimum deplasman 1.31 mm ve kalıcı deplasman 0.32 mm'dir. Numunenin simetri ekseninden 150 mm, 250 mm ve 350 mm uzaklıklarda maksimum deplasmanlar sırasıyla 1.08 mm, 0.88 mm ve 0.74 mm olarak ölçülmüştür. d2, d3 ve d4 potansiyometrelerinden ölçülen kalıcı deplasmanlar sırasıyla 0.51 mm, 0.27 mm ve 0.16 mm'dir.



Şekil 4.82. SS3 deney elemanına ait deplasman-zaman grafikleri

Çarpma testinden sonra SS3 betonarme plağında oluşan çatlak dağılımı Şekil 4.83.'te gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, numunenin arka yüzeyinde sınırlı sayıda çok ince radyal çatlaklar gözlenmiştir. Bu numunenin çatlak dağılımının tespit edilmesi sırasında, çatlaklar mikro seviyede olduğu için zorlukla görülmüştür. Bu da, orta bölgenin yakından çekilmiş görüntüsünden kanıtlanabilir. Şekilden de görüldüğü gibi, orta bölgede bulunan çatlaklar neredeyse hiç gözükmemektedir. Mesnetlere doğru gidildikçe çatlakların genişliği daha da küçülmüştür.



Şekil 4.83. SS3 numunesinde oluşan çatlak dağılımı

4.2.2. Betonarme plakların test sonuçlarının tartışılması

Tezin bu bölümünde, betonarme plaklar üzerinde gerçekleştirilen çarpma testinin sonuçları tartışılmıştır. Her bir betonarme plağın maksimum ivme değerleri, maksimum ve kalıcı deplasman değerleri, çarpma yükü ve çatlak dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Numuneler tarafından emilen çarpma enerjisinin miktarı da hesaplanmıştır. Ayrıca numunelerin simetri ekseninden uzaklığa göre maksimum ivme ve deplasman değerlerinin değişimi de araştırılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen test sonuçları Çizelge 4.16.'da sunulmuştur.

Çizelge 4.16. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar

Deney elemanı	Maksimum ivme (g)		Deplasman (mm)		Çarpma yükü (kN)
	Maksimum	Minimum	Maksimum	Kalıcı	
SN1	427.33	-181.99	5.97	1.29	45.02
SN2	472.46	-418.76	5.76	0.77	45.20
SH1	433.64	-547.10	5.84	1.29	45.35
SH2	431.46	-361.28	5.87	1.31	45.01
SH3	425.41	-203.66	6.03	1.31	45.04
SH4	470.12	-339.48	5.85	0.80	45.34
SS1	816.85	-839.53	2.01	0.72	46.98
SS2	889.27	-467.00	1.67	0.41	51.08
SS3	1022.59	-637.75	1.31	0.32	54.97

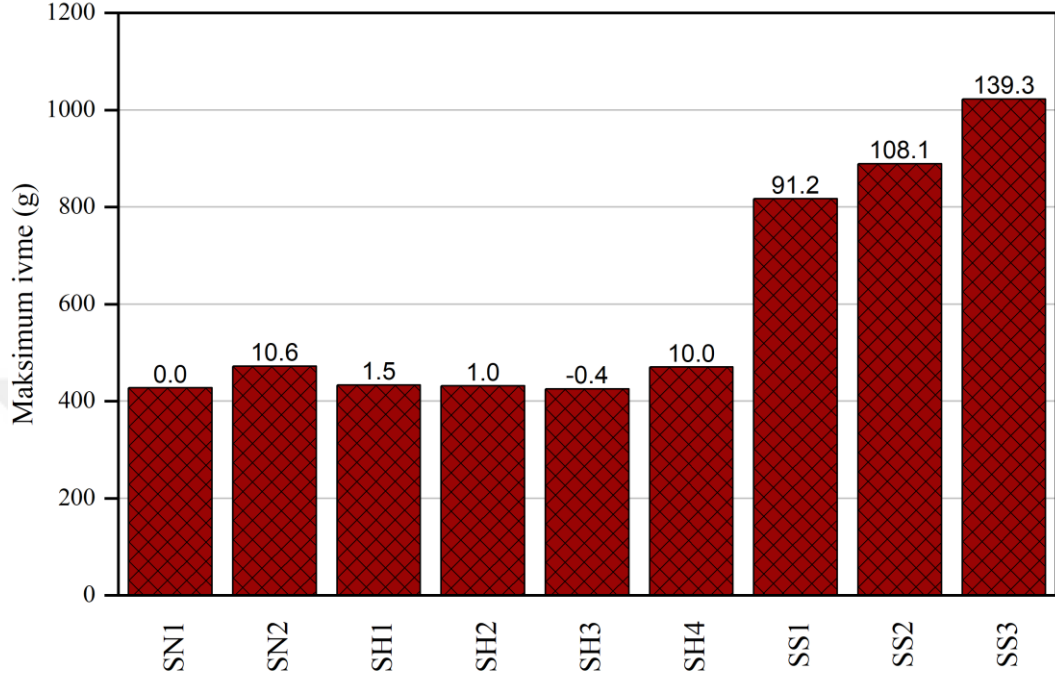
Çizelgeden de görüldüğü gibi çarpma yükünün değerleri birbirine yakındır. Numuneler aynı çarpma enerjisine maruz kaldığından bu beklenen bir durumdur. Bu da test cihazında sürtünmeden oluşabilen enerji kaybının ihmal edilebilecek seviyede olduğunu ve cihazın çarpma testlerinde kullanılmak için uygun olduğunu göstermektedir. Çarpma yükünde gözlenen az farklılıklar, test edilen betonarme plakların rijitliğindeki ve dayanımındaki farklılıklara bağlıdır (T. Yılmaz, 2018; T. Yılmaz ve ark., 2019; T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Hoşkal, 2020; Yuan ve ark., 2022). Normal betondan üretilen, çelik lif donatılı betondan üretilen ve fonksiyonel derecelendirilmiş betondan üretilen betonarme plakların, ortalama değer 45.16 kN olmak üzere yaklaşık olarak aynı çarpma yükü değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu betonarme plakların çarpma yükünde bulunan maksimum fark %0.7 civarındadır. Bu, bahsedilen bu betonarme plakların dayanımlarının ve rijitliklerinin birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Bu da, bu betonarme plakların üretiminde kullanılan M0 ve STF1 betonlarının basınç dayanımlarının birbirine yakın olmasına bağlanabilir.

Öte yandan, çelik levha kullanıldığında çarpma yükünün arttığı gözlenmiştir. Bu durum, çelik levha kullanımının betonarme plağın rijitliğini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. Bu artışın, numunenin alt yüzeyinde çelik levha kullanıldığında daha fazla olduğu görülmüştür. SS2 betonarme plağı, SN1 betonarme plağından %13.5 oranında daha yüksek çarpma yüküne sahiptir. Bu çalışmada elde edilen en yüksek çarpma yükü 54.97 kN olup, alt ve üst yüzeylerinde çelik levha kullanılmış olan SS3 betonarme plağında bulunmuştur. Bu plakta belirlenen çarpma yükü, SN1 betonarme plağına göre %22.1 oranında daha fazladır.

Çarpma testinin deneysel sonuçları incelendiğinde, çelik lifin ve çelik levhanın kullanılmasının maksimum ivme değerlerini arttırdığı görülmüştür. Bu artışın, çelik levha kullanıldığında çok daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durum, ivmenin maksimum değerlerini ve artış yüzdelerini gösteren Şekil 4.84.'ten de net bir şekilde görülebilir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, %1 çelik lif kullanımı çelik lifsiz betonarme plağa göre maksimum ivme değerini %10.6 oranında arttırmıştır. Bu durum, çelik lifin kullanılmasının betonarme plağın çarpma dayanımını arttırdığını göstermektedir. Maksimum ivme değerindeki artış, betonarme plağın dayanımı, rijitliği ve tokluğundaki artışa bağlanmaktadır. Bu sonuç literatürde bulunan çalışmalar tarafından kanıtlanmıştır (M. C. Yılmaz ve ark., 2021; T. Yılmaz, 2018; T. Yılmaz ve ark., 2019; T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Kaçaran, 2020; T. Yılmaz ve ark., 2022). Betonarme plağın rijitliği ve tokluğu arttırılarak ivme dalgaları ivmeölçerlere sönümlenmeden daha hızlı bir şekilde ulaşmaktadır (T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Kaçaran, 2020). Daha önce, %1 çelik lif kullanımı betonun basınç dayanımını %9.2 oranında, tokluğunu ise %685 oranında arttırdığı bulunmuştur. Betonun basınç dayanımı ve tokluktaki bu artış, betonarme plağın rijitliğini ve tokluğunu arttırmakta ve sonuç olarak betonarme plağın çarpma dayanımı artmaktadır.

Şekil 4.84.'ten de görüldüğü gibi, fonksiyonel derecelendirilmiş plaklarda STF1 betonu plağın kalınlığının sadece üçte biri kadar kullanıldığında (SH1, SH2 ve SH3 betonarme plakları) maksimum ivme değerlerinde SN1 betonarme plağına göre önemli bir fark gözlenmemiştir. Bu betonarme plaklarda, SN1 betonarme plağına göre ivme değerleri arasındaki maksimum farkın yaklaşık olarak %1.5 olduğu bulunmuştur. Bu durum, STF1 betonunun betonarme plak kalınlığının sadece üçte biri kadar kullanılmasının plağın genel rijitliğini ve tokluğunu değiştirmek için yeterli olmadığını göstermektedir. Ancak betonarme plağın üst ve alt yüzeylerinde %1 çelik lif içeren beton kullanıldığında (SH4 betonarme plağı) maksimum ivme değerinde SN1 betonarme

plağına göre yaklaşık %10'luk bir artış gözlenmiştir. Bu artış, %1 çelik lif donatılı betondan üretilen SN2 betonarme plağında bulunan artışla yaklaşık olarak aynıdır. Bu da, bu iki betonarme plağın rijitliği ve çarpma dayanımı yakın olduğunu göstermektedir.

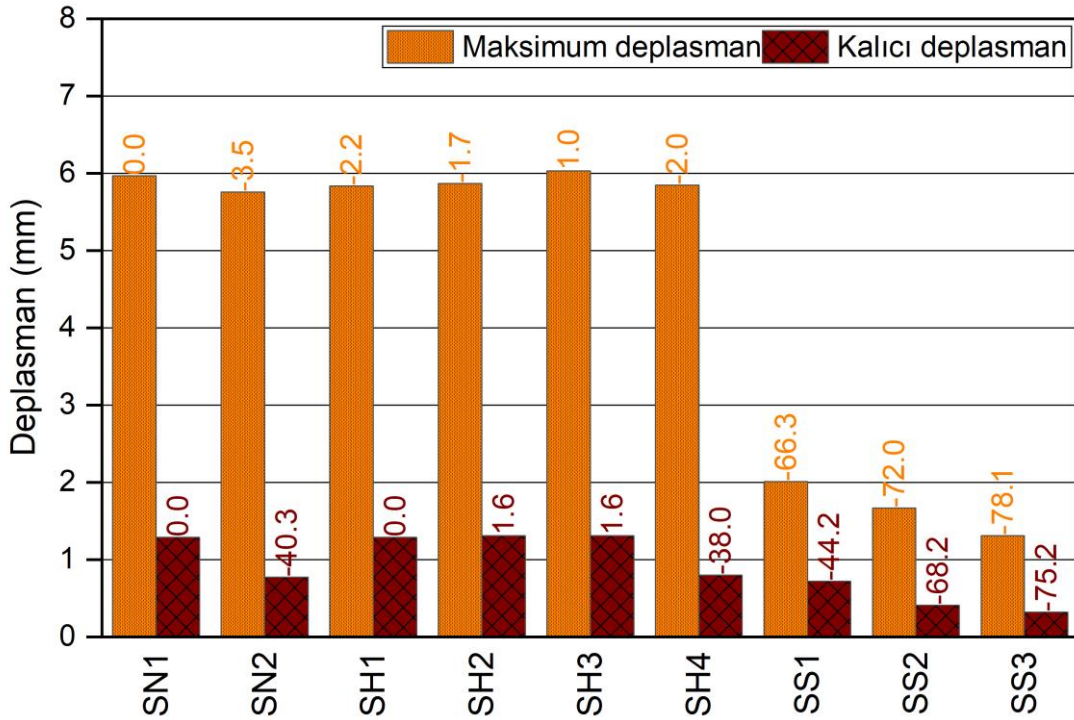


Şekil 4.84. Numunelerden elde edilen maksimum ivmelerin değeri ve değişim yüzdesi

Sonuçlar, %1 çelik lif donatılı beton ile birlikte çelik levha kullanımının, betonarme plağın maksimum ivme değeri ve çarpma dayanımı üzerinde dikkate değer bir artırma etkisine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu etki çelik levhaların sayısına ve konumlarına bağlıdır. Betonarme plağın ön yüzeyinde çelik levha kullanılması (SS1 betonarme plağı) maksimum ivme değerlerini SN1 ve SN2 betonarme plaklarına göre sırasıyla %91.2 ve %72.9 oranlarında arttırmışken, arka yüzeyinde kullanılması sırasıyla %108.1 ve %88.2 oranlarında arttırmıştır. Bu durum, çekme tarafında çelik levhanın kullanılmasıyla sağlanan betonarme plağın tokluğundaki artışa bağlanabilir. Ayrıca çelik levhanın çekme tarafında kullanılması betonarme plağın eğilme dayanımını da arttırmaktadır. Bu durum da, ivme değerlerini arttırmaktadır (T. Yılmaz, Kırış, Anıl, Erdem, ve Kaçaran, 2020). İvmenin maksimum değerindeki en yüksek artış ön ve arka yüzeylerinde birer adet çelik levha kullanılan SS3 betonarme plağında bulunmuştur. Bu plağın maksimum ivme değerinde SN1 ve SN2 betonarme plaklarına göre sırasıyla %139.3 ve %116.4 oranlarında artış gözlenmiştir. Bu da, iki adet çelik levha kullanımının betonarme plağın rijitliğini ve tokluğunu kayda değer bir ölçüde arttırdığını

göstermektedir. Sonuç olarak, çarpma dayanımı da önemli ölçüde artmaktadır. Çelik levhalı betonarme plakların rijitliğinin artması, kesme saplamalarının kullanılmasına da bağlanabilir. Bu saplamaların betonarme plakların çarpma dayanımını arttırdığı bildirilmiştir (Lu ve ark., 2021).

Çarpma yükü altında d1 potansiyometresi kullanılarak numunelerin simetri ekseninde ölçülen maksimum ve kalıcı deplasman değerleri Şekil 4.85.'te sunulmuştur. Şekilde, SN1 betonarme plağına göre hesaplanan değişim yüzdeleri de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, maksimum ve kalıcı deplasman değerlerinde, maksimum ivme değerlerindeki benzer bir eğilim gözlenmiştir. %1 çelik lif kullanımının, maksimum deplasmanı SN1 betonarme plağına göre %3.5 oranında azalttığı görülmüştür. Bununla birlikte, kalıcı deplasmanda daha yüksek bir azalma gözlenmiştir. %1 çelik lif kullanımı kalıcı deplasmanı %40.3 oranında azaltmıştır. Çelik liflerin kullanılmasıyla maksimum ve kalıcı deplasmanın azalması, çelik liflerin çatlakların yayılmasını önlemesine ve betonarme plağın rijitliğini ve tokluğunu arttırmasına bağlanabilir. Görüldüğü gibi, çelik liflerin kalıcı deplasman üzerindeki etkisi, maksimum deplasmana göre çok daha fazladır. Bu durum, çelik lif donatılı betonun, normal betondan daha iyi gerinim toparlanmasına sahip olmasıyla ilişkilidir.



Şekil 4.85. Numunelerden elde edilen maksimum ve kalıcı deplasmanların değeri ve değişim yüzdesi

Sonuçlar ayrıca M0 ve STF1 betonlarının hibrit şeklinde kullanımının maksimum deplasman değerlerinde önemli bir değişiklik göstermediğini ortaya koymuştur. STF1 betonunun, betonarme plağın alt katmanında kullanılması (SH1 ve SH4 betonarme plakları), maksimum deplasman değerlerini SN1 betonarme plağına göre yaklaşık %2 oranında azaltmıştır. Benzer şekilde STF1 betonu, betonarme plağın kalınlığının sadece üçte biri oranında kullanıldığında, kalıcı deplasmanda önemsiz bir değişiklik gözlemlenmiştir. Ancak fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plağın üst ve alt katmanlarında STF1 betonunun kullanılması kalıcı deplasmanı %38 oranında azaltmıştır. Bu azalma yüzdesi SN2 betonarme plağındakine yakındır. Bu durum daha önce de bulunduğu gibi, SH4 betonarme plağının rijitliği, tokluğu ve sonuç olarak çarpma dayanımının SN2 betonarme plağındakine yakın olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.85.'ten, çelik levhanın ile çelik lifin birlikte kullanılmasının, maksimum ve kalıcı deplasman değerlerini önemli ölçüde azalttığı görülebilir. STF1 betonundan üretilen betonarme plağın ön yüzeyinde çelik levha kullanılması (SS1 betonarme plağı), SN1 ve SN2 betonarme plaklarına göre maksimum deplasman değerlerini sırasıyla %66.3 ve %65.1 oranlarında, kalıcı deplasman değerlerini ise %66.3 ve %6.5 oranlarında azaltmıştır. Çelik levhanın konumu betonarme plağın ön yüzeyinden arka yüzeyine değiştirildiğinde daha yüksek bir azalma gözlenmiştir. Bu durumda, maksimum deplasman değerlerinde SN1 ve SN2 betonarme plaklarına göre sırasıyla %72 ve %71 oranlarında azalma gözlenmiştir. Kalıcı deplasmanlarda ise bu azalmalar sırasıyla %68.2 ve %46.8 olarak bulunmuştur. Maksimum ve kalıcı deplasmandaki en yüksek azalma, çelik levhanın betonarme plağın ön ve arka yüzeyinde kullanıldığı durumda gözlenmiştir. SS3 betonarme plağının, SN1 ve SN2 betonarme plaklarına göre sırasıyla %78.1 ve %77.3 daha az maksimum deplasmana ve %75.2 ve %58.4 daha az kalıcı deplasmana sahip olduğu görülmüştür. SS1, SS2 ve SS3 betonarme plakları ile diğer betonarme plakların maksimum ve kalıcı deplasman değerleri arasındaki büyük fark, çelik levhanın çelik lifle birlikte kullanılmasından dolayı tokluk, rijitlik ve çarpma dayanımında oluşan büyük artışı göstermektedir.

Çarpma testi sonrasında numunelerde oluşan çatlak dağılımı karşılaştırıldığında, çatlakların ağırlıklı olarak numunenin arka yüzeyinin orta bölgesinde oluştuğu görülmüştür. Numunelerin hiçbirinin ön yüzeyinde gözle görülen bir çatlak tespit edilmemiştir. Ayrıca, numunelerin arka yüzeyinde herhangi bir dökülme izlenmemiştir. Çatlaklar ağırlıklı olarak arka yüzeyin orta bölgesinde yoğunlaşmış ve bu bölgeden uzaklaştıkça genişliğinin çok azaldığı gözlemlenmiştir. Numunelerin arka yüzeyinde

gözlenen çatlaklar diyagonal ve radyal çatlaklardır. Bu durum, numunenin deformasyonunun numune genelinde bir eğilme deformasyonu olduğunu göstermektedir (Yuan ve ark., 2022). Diyagonal çatlakların genişliğinin radyal çatlakların genişliğinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu da diyagonal çatlakların radyal çatlaklardan önce başladığını ve daha fazla enerji yuttuğunu göstermektedir. Sonuç olarak, radyal çatlakların genişliği azalmıştır.

Çelik lifin kullanılmasıyla çatlak genişliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çelik liflerin çatlak durdurma ve köprüleme etkisi betonarme plaklarda çoklu çatlama davranışını sağlamaktadır. Sonuç olarak, çatlak genişliği azalmıştır. Benzer sonuçlar literatürde yayınlanan çalışmalarda da rapor edilmiştir (T. Hrynyk, 2013; T. D. Hrynyk ve Vecchio, 2014). Bu davranış, çekme tarafında (alt katmanda) çelik liflerin kullanıldığı fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plaklarda da gözlenmiştir. Öte yandan, çekme tarafında normal beton kullanıldığında çatlak genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

Çelik levhanın çelik lifle birlikte kullanılması, çatlakların sayısını ve genişliğini büyük ölçüde azaltarak hasarı önemli ölçüde sınırlandırmıştır. Bu durum, plakaların daha yüksek rijitliğine ve tokluğuna bağlıdır. Çelik levhanın betonarme plağın arka tarafında kullanılması ön tarafında kullanılmasına göre hasar seviyesini daha da fazla azaltmıştır. Betonarme plağın arka yüzeyinde çelik levha kullanılması betonarme plağın çekme dayanımını ve çatlama direncini kayda değer ölçüde arttırmıştır. Sonuç olarak, çatlakların sayısı ve genişliği önemli ölçüde azalmıştır.

Betonarme plaklar tarafından yutulan enerji, impuls-momentum teoremi kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 4.17.'de gösterilmiştir. Çarpma enerjisi hesaplandığında hava direnci ve test cihazındaki sürtünmeden oluşan enerji kaybı ihmal edilmiştir. Ayrıca, numune tarafından emilen enerji hesaplandığında, numunenin titreşimiyle ve mesnet tarafında emilen enerji ve gürültü ve ısıdan kaynaklanan enerji kayıpları ihmal edilmiştir (Yuan ve ark., 2022). Çarpma çekici numuneye çarptığında, çarpma enerjisinin bir kısmı numune tarafından deformasyon ve çatlama yoluyla emilmekte, enerjinin geri kalanı geri tepmektedir. Buna göre hasar seviyesinin yüksek olması, çatlama ile emilen enerji miktarının yüksek olduğunu göstermektedir. Az hasar gören numunelerde, enerji geçici olarak elastik deformasyonla depolanabilmektedir. Bu depolanan enerji, elastik deformasyon toparlanmasında çekice geri dönecektir (Yuan ve ark., 2022).

Çizelge 4.17. Deney elemanları tarafından yutulan enerjinin hesaplanması

Deney elemanı	$E_{\text{Çarpma}}$ (Joule)	$V_{\text{Çarpma}}$ (m/s)	I_p (N-s)	V_r (m/s)	E_{ab} (Joule)
SN1	2922.4	5.4	122.00	4.81	624.98
SN2	2922.4	5.4	105.38	4.89	547.93
SH1	2922.4	5.4	121.37	4.81	624.98
SH2	2922.4	5.4	137.40	4.73	700.77
SH3	2922.4	5.4	113.58	4.85	586.61
SH4	2922.4	5.4	136.85	4.74	691.37
SS1	2922.4	5.4	141.91	4.71	719.52
SS2	2922.4	5.4	110.46	4.87	567.31
SS3	2922.4	5.4	134.19	4.75	681.94

$E_{\text{Çarpma}}$: çarpma enerjisi; $V_{\text{Çarpma}}$: çarpma hızı; I_p : impuls; V_r : geri tepme hızı; E_{ab} : yutulan enerji

Farklı betonarme plakların test sonuçları karşılaştırıldığında, çelik lif ve çelik levha kullanımının çarpma performansını iyileştirdiği görülmüştür. Çelik lif kullanımı betonarme plağın maksimum ivme değerlerini arttırmış, maksimum ve kalıcı deplasman değerlerini azaltmıştır. Çelik lif, betonun basınç, çekme dayanımı, tokluğunu ve enerji yutma kapasitesini arttırmaktadır. Ayrıca çelik lif çatlak oluşumunu ve ilerlemesini geciktirmektedir. Sonuç olarak, betonarme plağın rijitliği, tokluğu ve çarpma dayanımı artmaktadır. Bu sonuç, Şekil 4.51.'te gösterilen SN1 ve Şekil 4.55.'te gösterilen SN2'nin çatlak dağılımı karşılaştırılarak doğrulanabilir. Çelik lif kullanımının, çatlakların genişliğini azaltarak ve betonarme plağa çoklu çatlama davranışı kazandırarak plakta oluşan hasarı azalttığı gözlemlenmiştir. Çelik liflerin betonarme elemanların çarpma dayanımını arttırdığı literatürde diğer araştırmacılar tarafından da bildirilmiştir (T. Hrynyk, 2013; T. D. Hrynyk ve Vecchio, 2014; Othman, 2016; Othman ve Marzouk, 2016a; Soltani ve ark., 2020).

Sonuçlar ayrıca, fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plakların performansının, STF1 betonundan yapılan katman sayısına bağlı olduğunu göstermiştir. STF1 betonunun sadece bir katmanda kullanılması, M0 betonundan üretilen betonarme plağa (SN1) benzer davranış göstermiştir. Bununla birlikte, STF1 betonu iki adet katmanda (SH4 betonarme plağı) kullanılması plağın performansını nispeten arttırmış ve STF1 betonundan üretilen SN2 betonarme plağının performansına yakın hale getirmiştir. SN2 betonarme plağına göre, SH4 betonarme plağının maksimum ivme değeri yalnızca %0.5 daha düşük, maksimum ve kalıcı deplasman değerleri ise sırasıyla %1.6 ve %3.9 daha yüksektir. Bu betonarme plaklarda benzer çatlak dağılımı olduğu da gözlemlenmiştir.

Çarpma testi sonuçları, çelik lif ile çelik levhanın birlikte kullanımının betonarme plakların çarpma performansını kayda değer ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Çelik

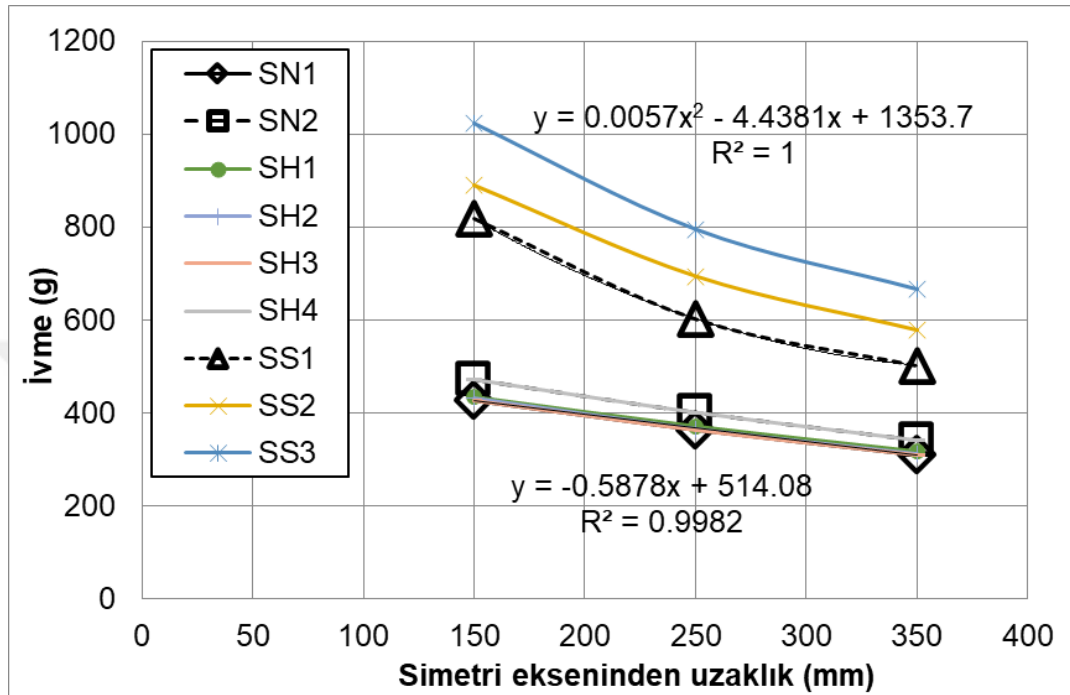
levhanın STF1 betonundan üretilen betonarme plakta kullanılması, maksimum ivme değerlerini kayda değer ölçüde arttırmış, maksimum ve kalıcı deplasmanları ise önemli ölçüde azaltmıştır. Ayrıca, çarpma yükünün değerini nispeten arttırmıştır. Bu durum, çelik lif ile çelik levhanın birlikte kullanımının betonarme plağın rijitliğini, tokluğunu, dayanımını ve sonuç olarak çarpma performansını önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, uygulanan çarpma enerjisi altında betonarme plakta meydana gelen hasarlar oldukça sınırlı seviyede kalmıştır. Çelik levhanın betonarme elemanların çarpma dayanımını arttırmadaki etkisi daha önceden gerçekleştirilmiş çalışmalarda da kanıtlanmıştır (Abdel-Kader ve Fouda, 2014; Lu ve ark., 2021).

Betonarme plağın çarpma performansındaki iyileşmenin, çelik levhanın betonarme plağın kritik tarafı olan çekme tarafında kullanıldığında çok daha yüksek olduğu gözlenmiştir. SS1 betonarme plağına kıyasla SS2 betonarme plağının maksimum ivme değeri %8.9 daha yüksek, maksimum deplasman değeri ise %16.9 daha az olmuştur. Kalıcı deplasman değerinde de %43.1'lik bir azalma gözlenmiştir. Bu aynı zamanda çatlak sayısı ve genişliğindeki azalmaya da yansımıştır. Çelik levhanın ön ve arka yüzeyde kullanılması, sadece bir tarafta kullanılmasına göre çarpma performansı daha da fazla yükseltmiştir. SS3 betonarme plağı, SS1 ve SS2 betonarme plaklarından sırasıyla %25.2 ve %15 daha yüksek maksimum ivmeye, %34.8 ve %21.6 daha düşük maksimum deplasmana ve %55.6 ve %22 daha düşük kalıcı deplasmana sahiptir. SS3 betonarme plağın çarpma dayanımının daha yüksek olması sonucunda hasar seviyesi önemli ölçüde azalmıştır.

Betonarme plakların çarpma performansları karşılaştırıldığında, çelik levha içermeyen betonarme plakların birbirine yakın performans gösterdiği görülmüştür. Bu betonarme plaklar arasında en yüksek çarpma performansı gösteren plaklar SN2 ve SH4'tür. Öte yandan, çelik levhanın çelik lifle birlikte kullanılmasının, betonarme plağın çarpma performansını önemli ölçüde arttırdığı izlenmiştir. İncelenen tüm betonarme plaklar arasında en iyi çarpma performansı SS3 betonarme plağı tarafından sergilenmiştir.

Test numunelerinden elde edilen maksimum ivme ve deplasman değerlerinin simetri ekseninden uzaklığa göre değişimi de incelenmiştir. Şekil 4.86. numunelerden ölçülen maksimum ivmelerin simetri ekseninden uzaklığa göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, çelik levha içermeyen betonarme plaklarda maksimum ivme değerleri, simetri ekseninden uzaklaştıkça doğrusal olarak azalmıştır. Çelik levhali betonarme plaklarda ise ivme değerlerinin simetri ekseninden uzaklığa göre değişimi 2. dereceden parabolik eğriyle tanımlanabilir. Maksimum ivme

ile simetri ekseninden uzaklık arasındaki ilişkiyi temsil eden fonksiyonlar Çizelge 4.18.'de özetlenmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi, tüm fonksiyonlarda, fonksiyonun doğruluğunu gösteren determinasyon katsayısının (R^2) değerleri 1'e yakındır. Şekil 4.86.'da SN1 ve SS1 betonarme plaklarına ait bağıntılar örnek olarak sunulmuştur.



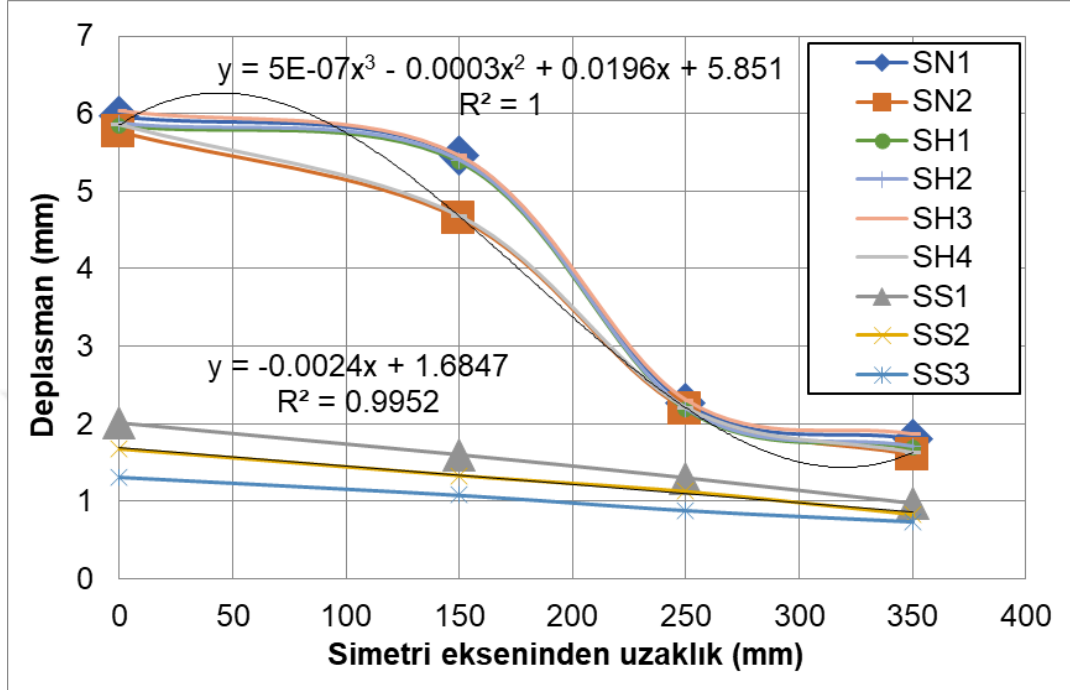
Şekil 4.86. Numunelerden ölçülen ivmelerin simetri ekseninden uzaklığa göre değişimi

Çizelge 4.18. Numunelerin maksimum ivmeleri ve simetri ekseninden uzaklık arasındaki bağıntılar

Deney elemanı	Bağıntılar	R^2
SN1	$y = -0.5878x + 514.08$	0.9982
SN2	$y = -0.6553x + 568.9$	0.9976
SH1	$y = -0.5859x + 520.06$	0.9981
SH2	$y = -0.5964x + 518.94$	0.9967
SH3	$y = -0.5843x + 511.57$	0.9980
SH4	$y = -0.6483x + 565.58$	0.9977
SS1	$y = 0.0057x^2 - 4.4381x + 1353.7$	1
SS2	$y = 0.004x^2 - 3.5489x + 1332.1$	1
SS3	$y = 0.0049x^2 - 4.2618x + 1550.5$	1

Simetri ekseninden uzaklığa göre betonarme plakların maksimum deplasman değerlerinin değişimi Şekil 4.87.'de gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, çelik levhasız betonarme plaklarda maksimum deplasman değerlerinin simetri ekseninden uzaklığa göre değişimi 3. dereceden fonksiyonla tanımlanabilir. Öte yandan, çelik levhali betonarme plaklarda bu değişimin lineer olduğu bulunmuştur. Test edilen betonarme plaklara ait maksimum deplasmanın simetri ekseninden uzaklığa göre değişimini

tanımlayan bağıntılar Çizelge 4.19.'da özetlenmiştir. Elde edilen tüm fonksiyonlar 1'e yakın R^2 değerine sahiptir. SH4 ve SS2 betonarme plaklarına ait bağıntılar örnek olarak Şekil 4.87.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.87. Numunelerden ölçülen deplasmanların simetri ekseninden uzaklığa göre değişimi

Çizelge 4.19. Numunelerin maksimum deplasmanları ve simetri ekseninden uzaklık arasındaki bağıntılar

Deney elemanı	Bağıntılar	R^2
SN1	$y = 7E-07x^3 - 0.0004x^2 + 0.0404x + 5.9662$	1
SN2	$y = 5E-07x^3 - 0.0003x^2 + 0.0203x + 5.7604$	1
SH1	$y = 7E-07x^3 - 0.0004x^2 + 0.041x + 5.8427$	1
SH2	$y = 7E-07x^3 - 0.0004x^2 + 0.0412x + 5.8743$	1
SH3	$y = 7E-07x^3 - 0.0004x^2 + 0.0392x + 6.033$	1
SH4	$y = 5E-07x^3 - 0.0003x^2 + 0.0196x + 5.851$	1
SS1	$y = -0.003x + 2.0204$	0.9981
SS2	$y = -0.0024x + 1.6847$	0.9952
SS3	$y = -0.0017x + 1.3148$	0.9974

4.2.3. Betonarme plakların maliyet analizi

Bu bölümde üretilen betonarme plakların maliyeti araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Betonarme plakların üretiminde kullanılan betonun maliyeti daha önce bölüm 4.1.11.'de hesaplanmıştır. Referans betonun (M0) maliyetinin 1006.40 TL/m^3 ($56.11 \text{ ABD doları/m}^3$), %1 çelik lif içeren beton (STF1) maliyetinin ise 3383.13 TL/m^3 ($188.62 \text{ ABD doları/m}^3$) olduğu bulunmuştur. İncelenen tüm betonarme plaklarda aynı

donatı detayları kullanılmıştır. Numunelerde kullanılan çelik donatı 8 mm çaplı nervürlü S420a donatılardır. Çelik donatının birim fiyatı KDV dahil olmak üzere 15.05 TL/kg'dir (0.839 ABD doları/kg).

SS1, SS2 ve SS3 betonarme plaklarında S235 tipi çelik levha kullanılmıştır. Çelik levhanın kalınlığı 1 mm ve alanı 1000×1000 mm'dir. Her bir çelik levhaya toplam 16 çelik saplama kaynaklanmıştır. Çelik sapsamalar 100 mm uzunluğunda olup betonarme plaklarda kullanılan çelik donatılardan yapılmıştır. Çelik levhanın, kaynak, sapsamalar ve KDV dahil olmak üzere birim fiyatı 29.667 TL/kg (1.654 ABD doları/kg)'dir. Betonun, donatının ve çelik levhanın birim fiyatları kullanılarak işçilik, kalıp maliyetleri gibi diğer maliyetler göz ardı edilerek her bir betonarme plağın maliyeti hesaplanmıştır. İncelenen betonarme plakların üretim maliyeti Çizelge 4.20.'de sunulmuştur. Maliyetler 120 mm olan betonarme plağın kalınlığı dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.20. Betonarme plakların üretim maliyeti

Betonarme plak	Maliyet		Artış yüzdesi %
	TL/m ²	ABD doları/m ²	
SN1	382.04	21.30	0
SN2	667.23	37.20	74.6
SH1	477.10	26.60	24.9
SH2	477.10	26.60	24.9
SH3	477.10	26.60	24.9
SH4	572.16	31.90	49.8
SS1	909.54	50.71	138.1
SS2	909.54	50.71	138.1
SS3	1152.04	64.23	201.5

Çizelgeden de anlaşılacağı üzere, %1 çelik lifin kullanılması betonarme plakların maliyetini arttırmıştır. Bu artış betonarme plakta kullanılan STF1 betonunun miktarıyla orantılıdır. Bunun nedeni, betona ekstra olarak ilave edilen çelik liflerin yüksek maliyetidir. Daha önce görüldüğü gibi çelik lifin birim fiyatı 30.28 TL/kg'dir (1.688 ABD doları/kg). Sonuç olarak çelik lifin maliyeti betonarme plağın maliyetine de ekstra olarak eklenmiştir. %1 çelik lif içeren betondan yapılan betonarme plak (SN2), normal betondan yapılan betonarme plağa (SN1) göre yaklaşık olarak %75 oranında daha yüksek maliyete sahiptir. Fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plaklarda ise bu maliyet azalmıştır. STF1 betonunun tek katmanda kullanılması SN1 betonarme plağına göre maliyeti yaklaşık %25 arttırmışken, iki katmanda kullanılmasında bu maliyet iki katına çıkmıştır.

Önceden görüldüğü gibi SH4 ve SN2 betonarme plakları neredeyse aynı çarpma performansını göstermiştir. Öte yandan SH4 betonarme plağının maliyeti SN2 betonarme

plağına göre %14.2 daha düşüktür. Bu durum, fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plakların kullanımının, tek katmanlı betonarme plaklara kıyasla aynı performansa sahip ve daha ekonomik bir seçenek olabileceğini göstermektedir.

Çizelgeden elik levha içeren betonarme plakların maliyetinin diğer betonarme plaklara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, elik lifin maliyetine ek olarak elik levhaların ek maliyetinden kaynaklanmıştır. Bir adet elik levha içeren betonarme plaklar (SS1 ve SS2), SN1 betonarme plağına göre %138 daha yüksek maliyete sahiptir. SS1 ve SS2 betonarme plaklarının maliyetinde bulunan artışın %54.1'i elik liften, %45.9'u ise elik levhadan kaynaklanmıştır. Maliyet açısından en yüksek artış, elik lif donatılı betondan üretilen ve iki elik levha içeren SS3 betonarme plağında bulunmuştur. Bu plağın maliyeti, SN1 betonarme plağından yaklaşık %202 daha yüksektir. SS3 betonarme plağının maliyetinde oluşan artışın %37'si elik liften, %63' ise elik levhalardan kaynaklanmıştır. SS3 betonarme plağının maliyeti SS2 betonarme plağına göre %27 civarında daha yüksektir.

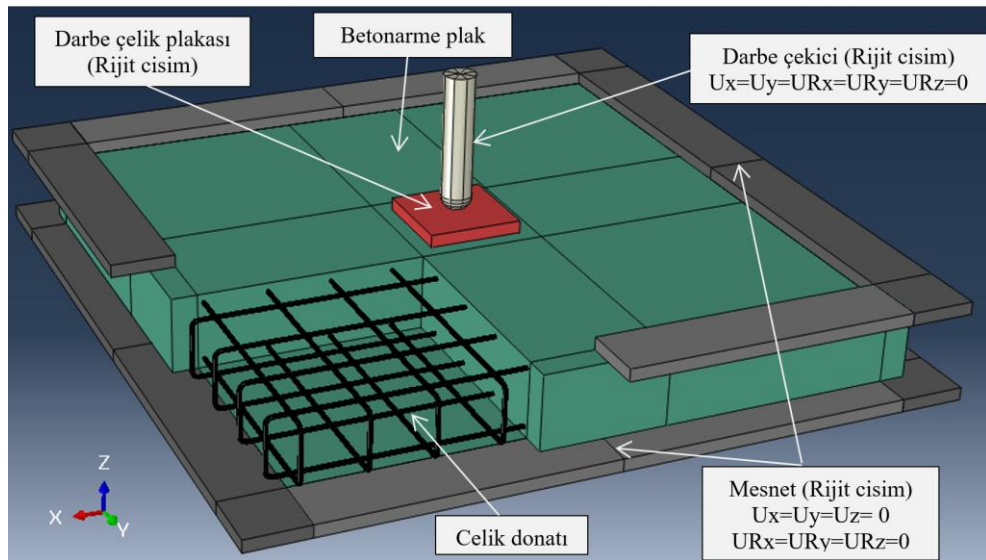
elik levhanın elik lifle birlikte kullanılması betonarme plağın maliyetini arttırmasına rağmen betonun çarpma performansını önemli ölçüde arttırmıştır. SS2 ve SS3 betonarme plakları SN1 betonarme plağına göre sırasıyla %138 ve %202 daha yüksek maliyete sahipken, bu plaklar sırasıyla %108.1 ve %139.3 daha yüksek ivme değerlerine, sırayla %72 ve %78.1 daha düşük maksimum deplasmanlara ve sırasıyla 68.2% ve 75.2% daha düşük kalıcı deplasmanlara sahiptir. Bu betonarme plakların çarpma performansında sağlanan yüksek gelişme, bunların kullanımını uygun kılabilir.

5. NÜMERİK ÇALIŞMA

Tez kapsamında test edilen betonarme plakların 3 boyutlu sonlu eleman (SE) modelleri Abaqus versiyon 2020 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Abaqus, farklı yük türlerine maruz kalan çeşitli malzemeden üretilen elemanların davranışını modelleme yeteneğine sahip bir simülasyon programıdır. Bu çalışmada, numuneler çarpma yüküne maruz kaldığı için bunların sonlu eleman modelleri Abaqus/Explicit çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Explicit (açık) çözücüsü, çarpma ve patlama gibi sürekli olmayan doğrusal olmayan dinamik problemleri verimli bir şekilde çözmek için özellikle tasarlanmıştır (Simulia, 2016). Explicit çözücüsü artımlı dinamik analiz yapabilmekte ve çok çeşitli malzeme modellerini sağlamaktadır (M. C. Yılmaz ve ark., 2021). Çarpma yükü altında test edilen numunelerin gerilmelerinin ve birim şekil değiştirmelerinin dağılımı 3 boyutlu olduğu için doğru simülasyon 3 boyutlu modellemeyle sağlanacaktır (Elnagar ve ark., 2019). Abaqus sonuçları, önceki bölümde sunulan betonarme plakların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

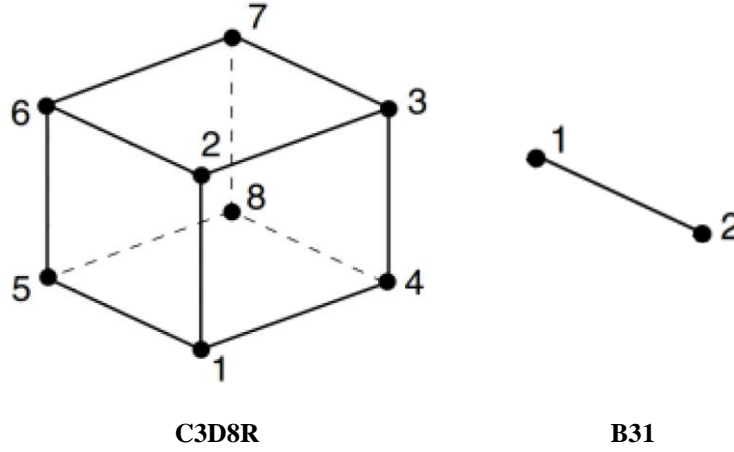
5.1. Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Sonlu eleman analizi yapılmadan önce numunelere ve test düzeneğine benzeyen 3 boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerde kullanılan geometri detayları, deneysel çalışmada kullanılanlarla aynıdır. Oluşturulan SE modelinin detayları Şekil 5.1.'de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen model SN1 betonarme plağının SE modelini temsil etmektedir.



Şekil 5.1. SE modelinin detayları (SN1 betonarme plağı)

SE modellerinde, betonun doğrusal olmayan davranışı beton hasar plastisite (CDP, concrete damaged plasticity) modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Beton plak modellenmesinde, 3 boyutlu, 8-düğüm noktalı ve azaltılmış integrasyon özelliğine sahip C3D8R elemanı kullanılmıştır. Sıfır enerji modlarının oluşumunu durdurmak amacıyla kumsaati (hourglass) kontrolü viskoz seçeneğiyle uygulanmıştır (Senthil ve ark., 2021). Çelik donatı tel eleman kullanılarak oluşturulmuş ve 2-düğüm noktalı kiriş elemanı (B31) kullanılarak modellenmiştir. Şekil 5.2. analizde kullanılan C3D8R ve B31 elemanlarını göstermektedir. Bu iki eleman, çarpma yüklerine maruz kalan betonarme elemanlarda betonun ve çelik donatının modellenmesinde başarıyla kullanılmıştır (Anas ve ark., 2022b; Anas ve Alam, 2022; Elnagar ve ark., 2019; Othman ve Marzouk, 2014, 2018; Senthil ve ark., 2021). Çelik donatı mekanik davranışı klasik metal plastisite modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Çelik donatı ve beton arasındaki etkileşim gömülü bölge (embedded region) özelliği kullanılarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.2. SE analizinde kullanılan eleman tipleri

Deneysel çalışmada kullanılan mesneti modellemek için farklı parçalar kullanılmıştır. Kolaylık için modellerde yalnızca mesnetin tabanının üst flanş ve mesnetin üst çelik plakası modellenmiştir. Bu amaçla SE modelinde 8 parça üretilmiştir. Bu parçalara çelik malzemesi tanımlanmış ve C3D8R elemanı kullanılarak modellenmiştir. Parçalar, bağ özelliği (tie constraint) kullanılarak birbirine bağlanmıştır. Sonuçta SE modelinde, deneysel çalışmada kullanılan mesnet düzeneği uygun bir şekilde simüle edilmiştir. Modelde kullanılan mesnet parçalarına rijit cisim (rigid body) özelliği uygulanmıştır. Rijit cisimlerin referans noktalarında ankastre mesnet tanımlanmıştır.

Çarpma çekici ve çelik plakası C3D8R elemanı kullanılarak modellenmiştir. Bu iki parçaya rijit cisim özelliği uygulanmıştır. Deneysel çalışmada çarpma çelik plakası, betonarme plağa çelik dübeller kullanılarak bağlandığı için SE modellerinde de bağ özelliği kullanılarak bağlanmıştır. Analiz süresini kısaltmak amacıyla SE modelinde çekiç betonarme plağa yakın bir konuma yerleştirilmiştir. Çekicinin uç noktası ile çarpma çelik plakasının üst yüzeyi arasındaki dikey mesafe 1 mm olarak seçilmiştir. Buna uygun olarak, deneysel çalışmadaki çarpma anındaki hız göz önüne alınarak çekice önceden tanımlanmış (“predefined fields” kısmında) 5.4 m/s’lik bir hız atanmıştır. SE modelinde çekicinin yalnızca dikey yönde hareket etmesine izin verilmiştir.

SE modelinde bulunan parçaların yüzeyleri arasındaki temas genel temas (General contact) özelliği kullanılarak tanımlanmıştır. Temas etkileşimi için teğetsel ve normal davranış tanımlanmıştır. Modeldeki farklı parçalar arasında meydana gelebilecek sürtünmenin göz önüne alınabilmesi için temas özelliğinde 0.5 sürtünme katsayısı tanımlanmıştır. Bu sürtünme katsayısı değeri literatürde bulunan araştırmalarda da kullanılmıştır (C. Li ve ark., 2017; Othman ve Marzouk, 2018). Test numuneleri kendi

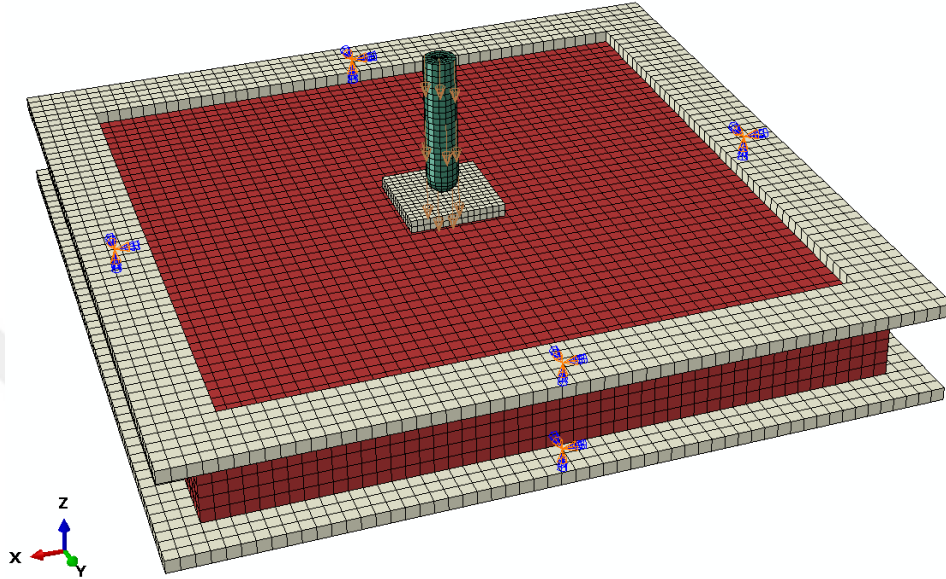
ağırlığı altında düşürülen çekicinin etkisine maruz kaldığı için SE modelinde yalnızca yerçekimi kuvveti tanımlanmıştır. Gerçek duruma benzetmek amacıyla modele 9.81 m/s^2 'lik yerçekimi ivmesi atanmıştır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plakların modellenmesi sırasında, plağın katmanlarının göz önüne alınabilmesi için her biri 40 mm kalınlığında üç katı parça modellenmiştir. Bu parçaların her birisi, fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plağın bir katmanını temsil etmektedir. Parçalar, bağ özelliği kullanılarak birbirine bağlanmıştır. Gerçek duruma benzer şekilde her bir parçaya farklı beton özellikleri atanmıştır. SS1, SS2 ve SS3 betonarme plaklarında kullanılan çelik levha C3D8R elemanı kullanılarak modellenmiştir. Çelik levhaya kaynaklanmış saplamalar, çelik levhayı betonarme plağa sıkıca bağlamaktadır. Buna göre çelik levha ile betonarme plak arasında bağ özelliği tanımlanmıştır.

Sonlu eleman analizinde güvenilebilir sonuçların elde edilebilmesi için modelde bulunan parçalar küçük sonlu elemanlara bölünmektedir. Ağ (mesh) boyutu küçüldükçe sonuçların güvenilirliği artmaktadır. Bununla birlikte, ağ boyutu küçüldükçe analiz süresi önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle, optimum ağ boyutunun bulunması, analizde çok önemli bir adımdır. Bu amaçla farklı ağ boyutları incelenerek hassasiyet analizi yapılmıştır. İncelenen ağ boyutları 10 mm, 20 mm, 30 mm ve 40 mm'dir. Değerlendirme için SN2 betonarme plağının maksimum deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. 10 mm, 20 mm, 30 mm ve 40 mm ağ boyutu için göreceli maksimum deplasmanların sırasıyla 1, 1.066, 1.459 ve 1.846 olduğu bulunmuştur. 10 mm ve 20 mm ağ boyutu durumlarındaki maksimum deplasmanlar arasındaki fark ihmal edilebilecek seviyededir. Öte yandan, 20 mm ağ boyutu durumundaki analiz süresi, 10 mm ağ boyutundakine göre yaklaşık %76 oranında azalmıştır. Buna göre, SE analizi için ağ boyutu 20 mm olarak seçilmiştir. Hassasiyet analizinde mesnetin, çarpma çelik plakasının ve çekicinin ağ boyutları sabit tutulduğuna dikkat edilmelidir. Çekiç ve çarpma çelik plakası 10 mm aralıkla sonlu elemanlara bölünmüştür. Modellerde bulunan diğer parçalar ise 20 mm aralıkla sonlu elemanlara bölünmüştür. Betonarme plaklarının toplam sonlu eleman ve düğüm sayıları Çizelge 5.1.'de sunulmuştur. Analiz sırasında modellerin adım aralığı program tarafından otomatik olarak belirlenmiştir. Ortalama adım aralığı yaklaşık 6.5×10^{-7} s olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.3. SN1 betonarme plağına ait sonlu elemanlara bölünmüş modeli göstermektedir.

Çizelge 5.1. Toplam eleman ve düğüm noktası sayısı

Betonarme plak	Eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı
SN1, SN2	20914	27489
SH1, SH2, SH3, SH4	20914	32691
SS1, SS2	23414	32691
SS3	25914	37893

**Şekil 5.3.** Sonlu elemanlara bölünmüş SN1 betonarme plağının modeli

5.2. Malzeme Özellikleri

5.2.1. Beton özellikleri

İyi modelleme sonuçlarını elde edebilmek için malzemelerin uygun bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Buna göre, malzeme davranışını düzgün yansıtabilen uygun bir malzeme modeli seçilmelidir. Betonun doğrusal olmayan davranışını modellemek için Abaqus yazılımının malzeme kütüphanesinde bulunan beton hasar plastisite (CDP, concrete damaged plasticity) modeli kullanılmıştır. Bu model, beton için kullanılan plastisite tabanlı sürekli bir hasar modelidir (T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Hoşkal, 2020).

CDP modelinde, betonun çekmedeki ve basınçtaki tek eksenli gerilme şekil değiştirme ilişkileri tanımlanmalıdır. Bu modelde kullanılan gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri Şekil 5.4.'te gösterilmiştir. Basınçta, ilk akma gerilmesine (σ_{c0}) kadar, gerilme ve şekil değiştirme arasında doğrusal bir ilişki olduğu kabul edilmektedir. σ_{c0} 'dan

sonra maksimum gerilmeye (σ_{cu}) kadar pekleşme davranışı ile betonun plastik davranışı başlamaktadır. σ_{cu} gerilmesinden kırılmaya kadar bir gerilme yumuşama davranışı oluşmaktadır. Çekmede ise, maksimum gerilmeye kadar doğrusal elastik bir davranış dikkate alınmaktadır. Bu aşamadan sonra mikro çatlaklar oluşmaktadır. Dolayısıyla maksimum gerilmeden sonra gerilme yumuşaması meydana gelmektedir.

CDP modelinde, betonun basınç davranışını modellemek için basınç gerilmesi ($\sigma_c \geq \sigma_{c0}$) ve elastik olmayan birim şekil değiştirme ($\tilde{\varepsilon}_c^{in}$) verileri belirtilmelidir. Betonun çekme davranışının modellenmesi için ise çekme gerilmesi ($\sigma_t \geq \sigma_{t0}$) ve çatlama birim şekil değiştirmesi ($\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$) verileri tanımlanmalıdır. $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$ ve $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (5.1)$$

$$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (5.2)$$

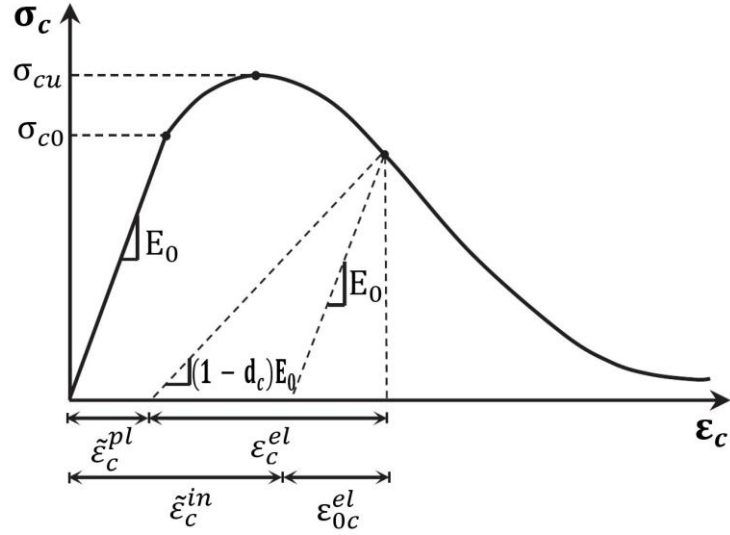
Burada, ε_c ve ε_t : sırasıyla toplam basınç ve çekme şekil değiştirmeleri, σ_c ve σ_t : sırasıyla ε_c ve ε_t 'ye karşılık gelen basınç ve çekme gerilmeleri ve E_0 : başlangıç elastisite modülüdür.

CDP modeli, çatlama nedeniyle betonun rijitliğinde meydana gelen değişimi dikkate alabilmektedir (Othman ve Marzouk, 2018; T. Yılmaz, Kırac, Anıl, Erdem, ve Kaçaran, 2020). Bu amaçla iki hasar parametresi kullanılmaktadır. Bunlar basınç için d_c parametresi ve çekme için d_t parametresidir. d_c ve d_t parametreleri tam dayanım kaybı durumunda 0, hasarsız durumda ise 1 alınmaktadır. Buna göre, basınç ve çekme gerilmeleri ve birim şekil değiştirme arasındaki ilişki sırasıyla (5.3) ve (5.4) denklemleriyle tanımlanabilir.

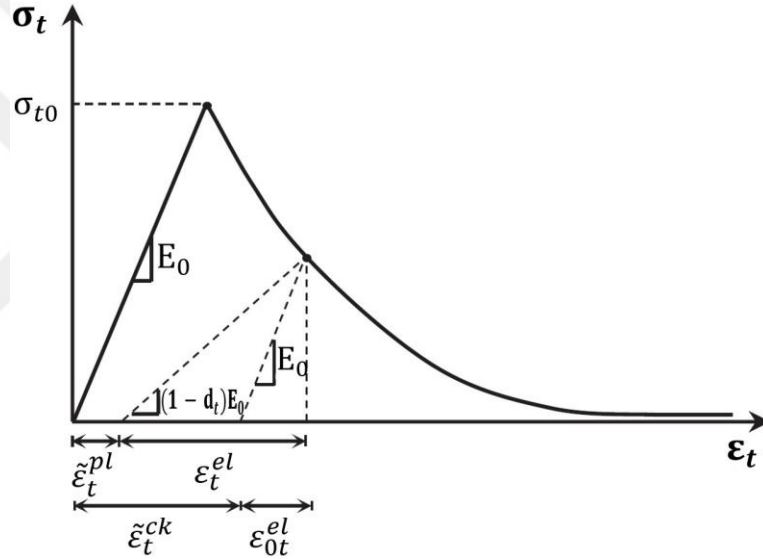
$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (5.3)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (5.4)$$

Burada, $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ ve $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$: sırasıyla basınç ve çekmede eşdeğer plastik birim şekil değiştirmeleridir.



Basınç



Çekme

Şekil 5.4. CDP modelinde gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi

Hasar parametrelerinin (d_c ve d_t) hesaplanmasında aşağıdaki denklemler kullanılmıştır (Othman ve Marzouk, 2018; L. M. e Silva ve ark., 2021).

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_c'} \quad (5.5)$$

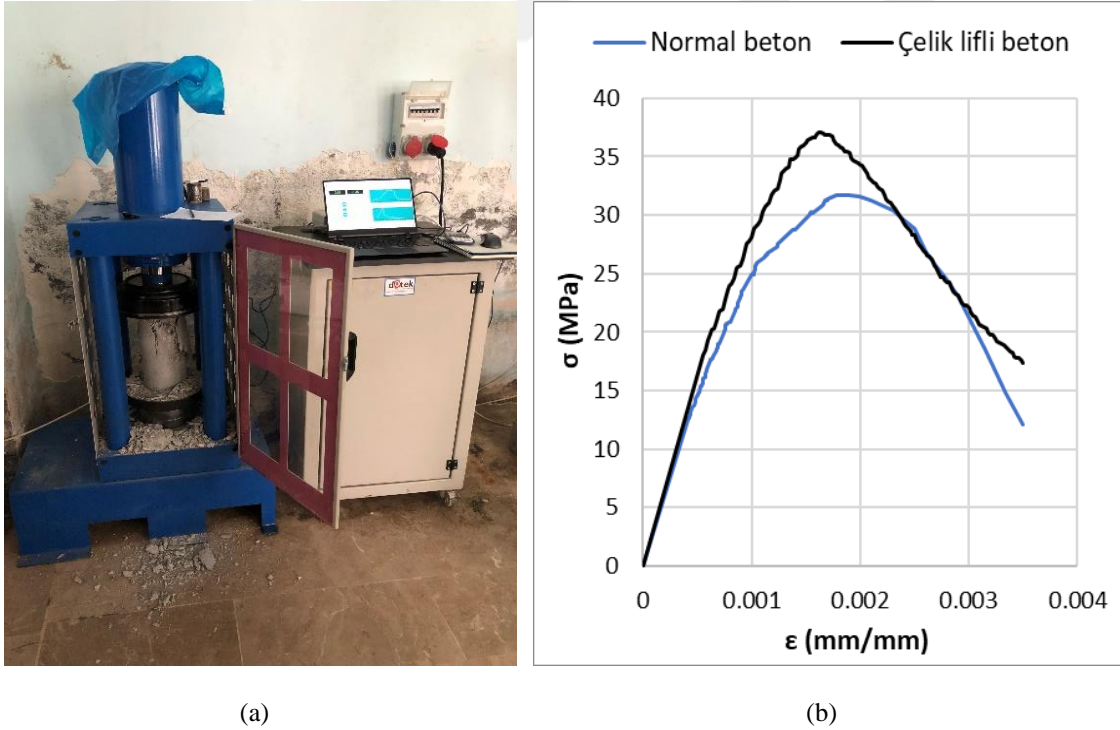
$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_t'} \quad (5.6)$$

Burada, σ_c' : basınç dayanımı, σ_t' : çekme dayanımıdır.

CDP modelinde bazı plastisite parametrelerinin de tanımlanması gerekmektedir. Bunlar dilatasyon açısı (ψ), eksantrisite parametresi (e), iki eksenli başlangıç basınç akma

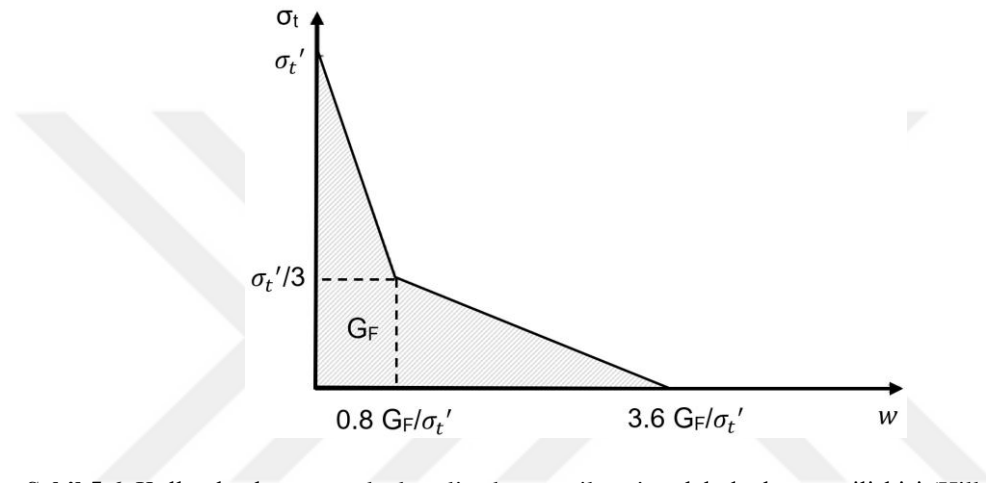
gerilmesinin tek eksenli başlangıç basınç gerilmesine oranı ($\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$), meridyenler arası uzaklık oranı (K_c) ve viskozite parametresidir (μ). Bu parametreler, malzemenin viskozitesini, akma yüzeyinin fonksiyonunu ve potansiyel akışını tanımlamaktadır (T. Yılmaz ve ark., 2022). Bu çalışmada, e , $\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$, K_c ve μ sırasıyla 0.1, 1.16, 0.6667 ve 0.0001 olarak alınmıştır. Dilatasyon açısı için 25° - 40° arasında farklı değerler denenmiştir. Sonuç olarak normal ve çelik lif içeren betonlar için dilatasyon açısı sırasıyla 40° ve 25° olarak seçilmiştir.

Bu çalışmada, normal ve hacimce %1 çelik lif içeren betonların basınçtaki tek eksenli gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi deneysel olarak elde edilmiştir. Bu amaçla her beton için 3 adet 150×300 mm silindir numunesi kullanılmış ve ortalama değeri hesaplanmıştır. Normal ve çelik lifli betonun basınç dayanımı sırasıyla 31.74 MPa ve 37.08 MPa'dır. Elastisite modülü de ise yine sırasıyla 30281.13 MPa ve 32309.38 MPa'dır. Kullanılan basınç dayanımı testi cihazı ve elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 5.5.'te gösterilmektedir. Önceden de görüldüğü gibi normal ve çelik lifli betonların yoğunluğu sırasıyla 2385 kg/m^3 ve 2465 kg/m^3 'tür. Betonlar için Poisson oranı 0.2 olarak alınmıştır.



Şekil 5.5. Basınç dayanımı testi, a) Basınç dayanımı testi cihazı, b) Normal ve çelik lifli betonların eksenel basınç gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

Betonun çekme davranışını tanımlamak için gerilme-şekil değiştirme yöntemi yerine Hillerborg ve ark. (1976) tarafından geliştirilmiş olan kırılma enerjisi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, analiz sonuçlarının ağ boyutuna bağımlılığını azaltmak için kırılma enerjisi-çatlama kriterini kullanmaktadır (Aktas ve Sumer, 2014; Genikomsou ve Polak, 2015; Othman ve Marzouk, 2017). Bu modelde eksenel çekme gerilmesi-çatlak deplasmanı ilişkisi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, betonun eksenel çekme gerilmesi-çatlak deplasmanı ilişkisi için literatürde yaygın olarak kullanılan Hillerborg (1985) modeli kullanılmıştır (Şekil 5.6).

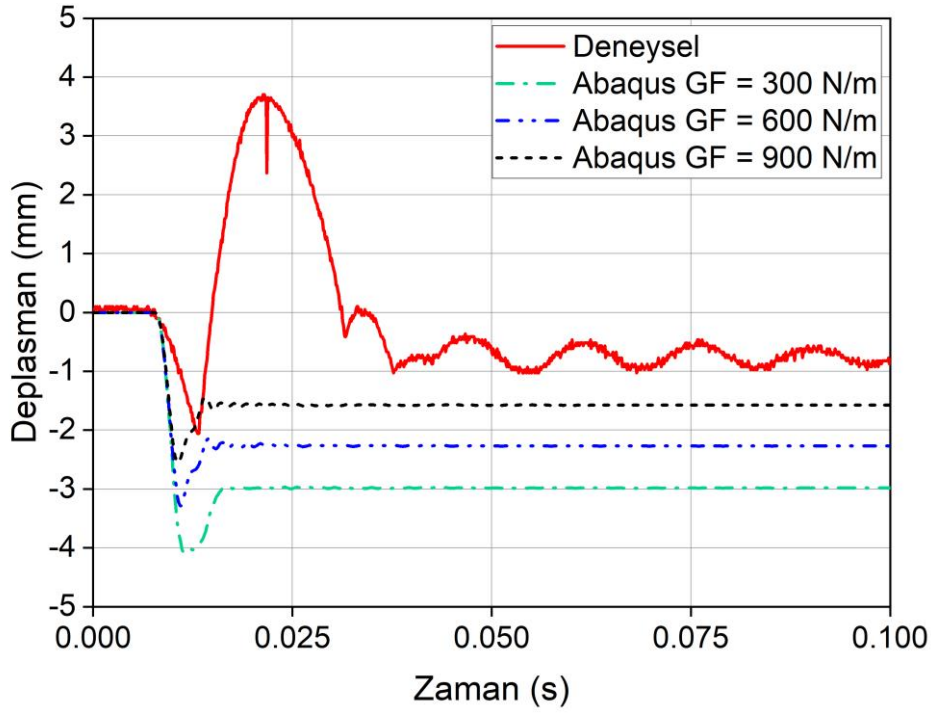


Şekil 5.6. Kullanılan betonun tek eksenli çekme gerilmesi-çatlak deplasmanı ilişkisi (Hillerborg, 1985)

Hillerborg (1985) modelinde, betonun kırılma enerjisi (G_F) ve çekme dayanımı (σ_t') tanımlanmalıdır. Kırılma enerjisi, eksenel çekme gerilmesi-çatlak deplasmanı eğrisinin maksimum çekme gerilmesinden sonraki kısmının altındaki alanı temsil etmektedir. G_F , beton kalitesine ve agrega boyutuna bağlıdır (Genikomsou ve Polak, 2015). Normal betonun kırılma enerjisi, 20 - 40 MPa basınç dayanımı için yaklaşık 40-120 N/m arasında değişmektedir (Simulia, 2016). Buna göre, bu çalışmada normal betonun kırılma enerjisi 100 N/m olarak seçilmiştir.

Çelik lif betonun kırılma enerjisini arttırdığından dolayı (Alwesabi ve ark., 2021; Köksal ve ark., 2013; Noaman ve ark., 2017), çelik lif donatılı betonun kırılma enerjisi için normal betona göre daha yüksek değerler kullanılmalıdır. Bu amaçla bu beton için 300 N/m, 600 N/m ve 900 N/m olmak üzere üç farklı kırılma enerjisi incelenmiştir. Şekil 5.7. kırılma enerjisinin SN2 betonarme plağına ait maksimum deplasman-zaman grafiği üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi kırılma enerjisinin artması maksimum ve kalıcı deplasmanları azaltmıştır. Kırılma enerjisi 900 N/m

olduğunda deneysel sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre bu çalışmada çelik lif donatılı betonun kırılma enerjisi 900 N/m olarak seçilmiştir.



Şekil 5.7. Kırılma enerjisinin deplasman-zaman grafiği üzerindeki etkisi (SN2 betonarme plağı)

Bu çalışmada, betonun çekme dayanımı, yarmada çekme dayanımı kullanılarak hesaplanmıştır. Normal betonun tek eksenli çekme dayanımı, yarmada çekme dayanımının %90'ı - %100'ü arasında alınabilir (CEB-FIP, 2010; Othman ve Marzouk, 2018). Bu çalışmada betonun çekme dayanımı, yarmada çekme dayanımının %95'i olarak alınmıştır. Çizelge 5.2. normal ve çelik lif donatılı betonun mekanik özelliklerini ve plastisite parametrelerini özetlemektedir.

Çizelge 5.2. Normal ve çelik lif donatılı betonların özellikleri

	Normal beton	Çelik lif donatılı beton
Yoğunluk (kg/m ³)	2385	2465
Basınç dayanımı (MPa)	31.74	37.08
Çekme dayanımı (MPa)	1.89	3.56
Elastisite modülü (MPa)	30281.13	30281.13
Poisson oranı	0.2	0.2
ψ	40	25
e	0.1	0.1
$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	1.16	1.16
K_c	0.6667	0.6667
μ	0.0001	0.0001

5.2.2. Çelik donatı özellikleri

Çelik donatı, malzemenin çekme ve basınç davranışları aynı olduğu göz önüne alınan klasik metal plastisite modeli kullanılarak modellenmiştir. Bu modelde, çelik donatı için aksenal çekme deneyinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi yerine gerçek gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi dikkate alınmaktadır. Gerçek gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi çekme deneyi sırasında çelik donatının enkesit alanında oluşan azalma göz önüne alınarak elde edilmektedir.

Gerçek gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Maksimum çekme gerilmesinden (σ_u) sonraki gerçek gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinin lineer olduğu kabul edilmiştir (Tu ve ark., 2020).

$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon) \quad (5.7)$$

$$\sigma_g = \sigma * (1 + \varepsilon) \quad \sigma \leq \sigma_u \quad (5.8)$$

$$\sigma_g = \sigma_{u,g} * \varepsilon_g + \sigma_{u,g} * (1 - \varepsilon_{u,g}) \quad \sigma_u < \sigma \leq \sigma_{kopma} \quad (5.9)$$

Bu bağıntılarda, σ_g : gerçek çekme gerilmesi, ε_g : gerçek birim şekil değiştirme, σ : deneysel çekme gerilmesi, ε : deneysel birim şekil değiştirme, σ_u : maksimum deneysel çekme gerilmesi, σ_{kopma} : deneysel kopma gerilmesi, $\sigma_{u,g}$: σ_u 'ya karşılık gelen gerçek gerilme ve $\varepsilon_{u,g}$: $\sigma_{u,g}$ 'ye karşılık gelen gerçek şekil değiştirmedir. Klasik metal plastisite modelinde toplam birim şekil değiştirme (ε_g) yerine plastik birim şekil değiştirme (ε_g^{pl}) kullanılmaktadır. ε_g^{pl} aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

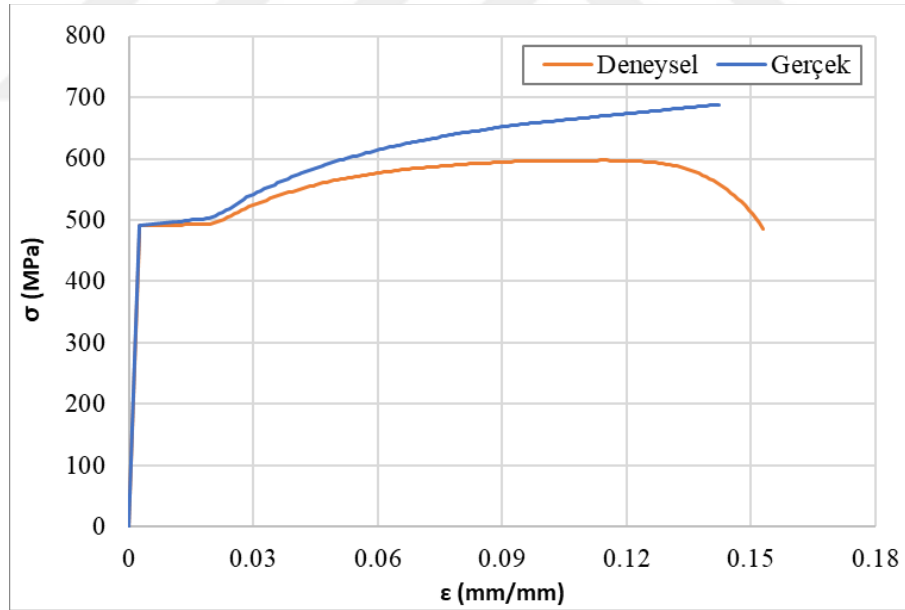
$$\varepsilon_g^{pl} = \varepsilon_g - \frac{\sigma_g}{E_s} \quad (5.10)$$

Burada, E_s : çelik donatının elastisite modülüdür.

Bu çalışmada çapı 8 mm olan nervürlü S420a çelik donatılar kullanılmıştır. Çelik donatının gerilme şekil değiştirme ilişkisi 42 cm uzunluğa sahip 6 adet numune test edilerek bulunmuştur. Şekil 5.8. kullanılan çelik donatı çekme testi cihazını göstermektedir. Şekil 5.9. ise deneysel ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerini sergilemektedir. Çelik donatının akma dayanımı 491.73 MPa, çekme dayanımı 597.22 MPa ve elastisite modülü 203965.67 MPa olarak bulunmuştur. Çelik donatı için Poisson oranı ve yoğunluk sırasıyla 0.3 ve 7850 kg/m³ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.8. Çelik donatı çekme testi cihazı



Şekil 5.9. Çelik donatının gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

5.2.3. Diğer malzemelerin özellikleri

Çarpma çekici, çarpma çelik plakası ve mesnet plakaları, 200 GPa elastik modülüne ve 0.3 Poisson oranına sahip lineer elastik malzemeler olarak modellenmiştir. Çarpma çelik plakasının ve mesnet plakalarının yoğunluğu 7850 kg/m^3 olarak alınmıştır.

Çekicinin ağırlığını dikkate alabilmek için modelde çekicinin yoğunluğu $4668 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ olarak kullanılmıştır. Bu yoğunluk, gerçek çekicinin ağırlığının, modelde kullanılan çekicinin hacmine bölünmesiyle bulunmuştur. Sonuç olarak modeldeki çekicinin ağırlığı 198.6 kg olarak elde edilmiştir. SS1, SS2 ve SS3 betonarme plaklarında kullanılan çelik levhanın tipi S235'tir. Bu levha, 235 MPa akma dayanımına sahip ideal elasto-plastik malzeme olarak modellenmiştir. Levhanın yoğunluğu ve Poisson oranı sırasıyla 7850 kg/m^3 ve 0.3 olarak alınmıştır.

5.2.4. Gerinim hızı etkisi

Çarpma yükleri, numuneye kısa sürede yüksek miktarda enerji aktarmaktadır. Bu nedenle statik duruma göre yüksek bir gerinim hızı meydana gelmektedir. Beton ve çelik donatı özellikleri gerinim hızına göre değişmektedir. Bu malzemelerin çekme ve basınç dayanımları yüksek gerinim hızı altında artmaktadır. Dinamik problemlerin modellenmesinde gerinim hızı dahil edilmesi, modelleme sonuçlarının doğruluğunda kritik bir role sahiptir (Şengel ve ark., 2022). Gerinim hızının etkisi, genellikle uygun bir dinamik artış faktörü (DIF) belirlenerek dikkate alınmaktadır. Dinamik artış faktörü, dinamik dayanımın yarı-statik dayanıma oranı olarak tanımlanmaktadır. Abaqus yazılımı, malzemenin özelliklerinin gerinim hızına göre değişimini otomatik olarak analize katmamaktadır. Bu nedenle, analizde gerinim hızı etkisinin göz önüne alınabilmesi için manuel olarak hesaplanması gerekmektedir. Buna göre, uygun bir dinamik artış faktörü kullanılarak malzemenin özellikleri arttırılmalı ve bu özellikler Abaqus yazılımına tablo şeklinde girilmelidir. Farklı gerinim hızı değerleri denenerek en uygun değeri seçilebilir. Her gerinim hızına ait DIF değerleri ve malzeme özellikleri hesaplanmakta ve nümerik sonuçlar üzerindeki etkisi değerlendirilmektedir. Deneysel sonuçlara en yakın sonuçları veren gerinim hızı değeri göz önüne alınmakta ve bu gerinim hızına ait malzeme özellikleri kullanılmaktadır.

Literatürde DIF'nin hesaplanması için kullanılacak birçok ampirik denklem bulunmaktadır (Adhikary ve ark., 2016; Othman, 2016). Bu çalışmada, betonun basınçtaki dinamik artış faktörü aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır (CEB-FIP, 1990).

$$DIF_{\sigma_c} = \frac{\sigma_{cd}'}{\sigma_c'} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1.026\alpha_s} \quad \dot{\epsilon}_d \leq 30 \text{ s}^{-1} \quad (5.11)$$

$$DIF_{\sigma_c} = \frac{\sigma_{cd}'}{\sigma_c'} = \gamma_s \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1/3} \quad 30 \leq \dot{\epsilon}_d \leq 300 \text{ s}^{-1} \quad (5.12)$$

$$\alpha_s = \frac{1}{5 + 9 \frac{\sigma_c'}{10}} \quad (5.13)$$

$$\log \gamma_s = 6.156 \alpha_s - 2 \quad (5.14)$$

Burada, σ_{cd}' (MPa): $\dot{\epsilon}_d$ 'ye karşılık gelen dinamik basınç dayanımı, σ_c' (MPa): yarı-statik basınç dayanımı ve $\dot{\epsilon}_d$ (s^{-1}): göz önüne alınan gerinim hızıdır. Denklemlerde belirtilen $30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ değeri dikkate alınan standartta basınçtaki referans yarı-statik gerinim hızıdır.

Betonun çekmedeki dinamik artış faktörü Y. Hao ve Hao (2014) tarafından belirtilen ve (5.15), (5.16) ve (5.17) denklemlerinde sunulan bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır (Selim Şengel ve ark., 2022; Şengel ve ark., 2022).

$$DIF_{\sigma_t} = \frac{\sigma_{td}}{\sigma_t'} = 0.26(\log \dot{\epsilon}_d) + 2.06 \quad \dot{\epsilon}_d \leq 1 \text{ s}^{-1} \quad (5.15)$$

$$DIF_{\sigma_t} = \frac{\sigma_{td}}{\sigma_t'} = 2(\log \dot{\epsilon}_d) + 2.06 \quad 1 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon}_d \leq 2 \text{ s}^{-1} \quad (5.16)$$

$$DIF_{\sigma_t} = \frac{\sigma_{td}}{\sigma_t'} = 1.44331(\log \dot{\epsilon}_d) + 2.2276 \quad 2 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon}_d \leq 150 \text{ s}^{-1} \quad (5.17)$$

Burada, σ_{td} : $\dot{\epsilon}_d$ 'ye karşılık gelen dinamik çekme dayanımı ve σ_t' : yarı-statik çekme dayanımıdır.

Bu çalışmada gerinim hızı ($\dot{\epsilon}_d$) 10 s^{-1} olarak alınmıştır. Gerinim hızının bu değeri, ağırlık düşürme testinde gerinim hızı için beklenen değerler aralığındadır (Anas ve ark., 2022a; CEB-FIP, 1988; Daudeville ve Malécot, 2011; Othman ve Marzouk, 2017). Bu gerinim hızı, ağırlık düşürme deneyi altında test edilen betonarme plakların modellenmesinde başarıyla kullanılmıştır (Othman, 2016; Othman ve Marzouk, 2017, 2018). Kırılma enerjisi ve çatlak deplasmanı 23 s^{-1} 'lik gerinim hızına kadar etkilenmedikleri için gerinim hızının bu özellikler üzerindeki etkisi dikkate alınmamıştır (Othman, 2016).

Çelik donatının dinamik artış faktörü yaygın olarak kullanılan Malvar ve Crawford (1998) modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Bu model, 290 - 710 MPa akma gerilmesi ve 10^{-4} - 225 s^{-1} gerinim hızı için geçerlidir. Bu modele göre çelik malzeme için dinamik artış faktörü (5.18) denklemi kullanılarak hesaplanabilir.

$$DIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{10^{-4}} \right)^a \quad (5.18)$$

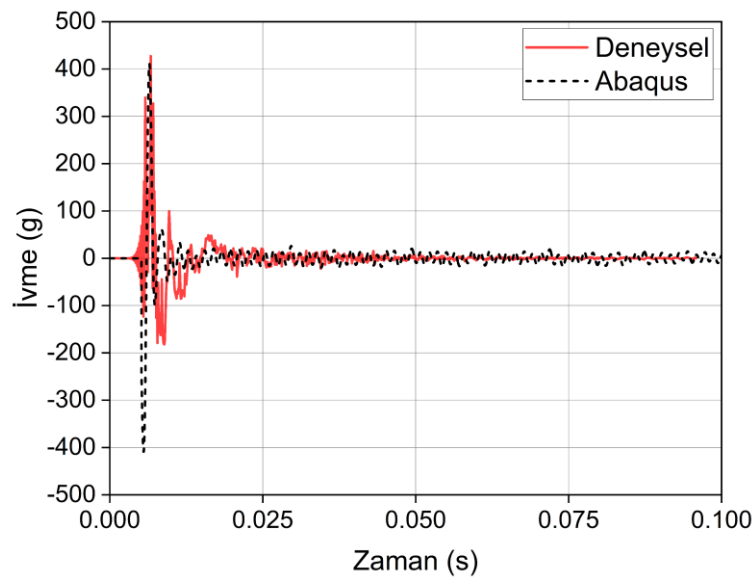
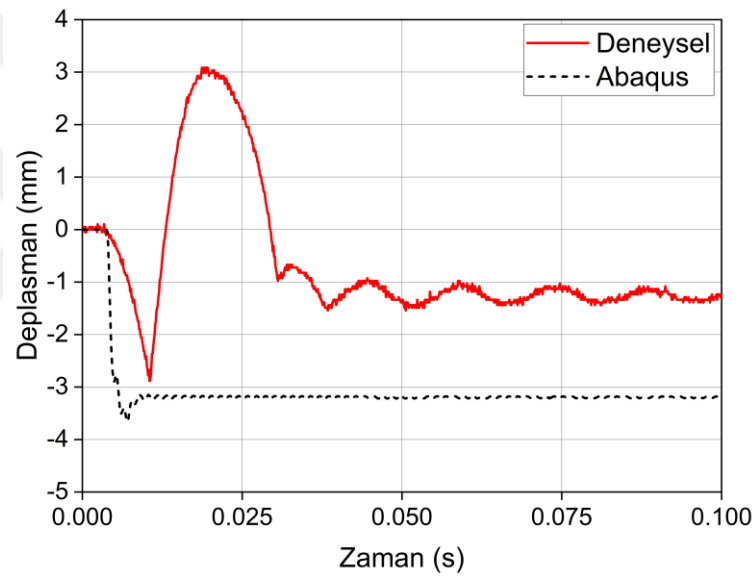
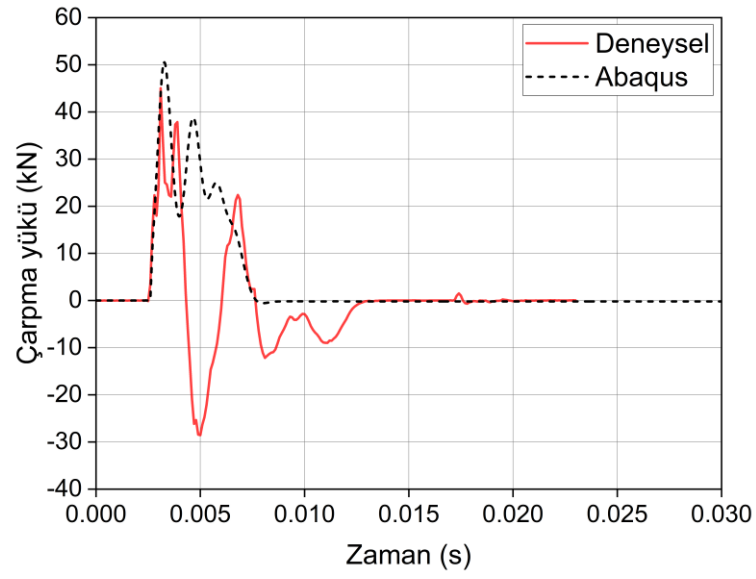
Burada, akma dayanımı için $a = 0.074 - 0.04 (f_y/414)$, maksimum dayanım için ise $a = 0.019 - 0.009 (f_y/414)$ olup, burada f_y (MPa) akma dayanımını ifade etmektedir. Gerinim hızının elastisite modülü ve maksimum birim şekil değiştirme üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek seviyede olduğu için (Malvar ve Crawford, 1998) bu çalışmada dikkate alınmamıştır. SS1, SS2 ve SS3 betonarme plaklarında kullanılan çelik levhanın dinamik artış faktörü Malvar ve Crawford (1998) modeli kullanılarak hesaplanmıştır.

5.3. Nümerik Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

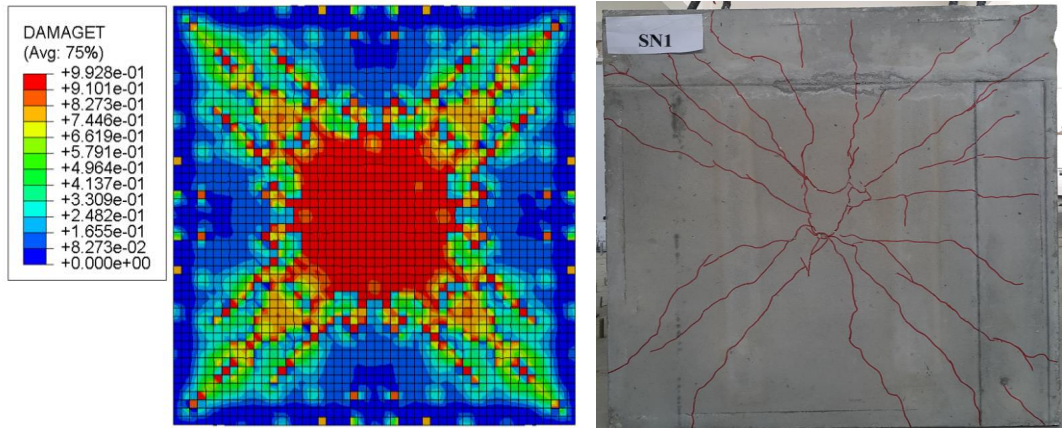
Sonlu eleman analizinden sonra yük-zaman, ivme-zaman, deplasman-zaman grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler sırasıyla kuvvet algılayıcısı, a1 ivmeölçeri ve d1 potansiyometresi konumlarına benzer noktalardan toplanan verilerden elde edilmiştir. Nümerik sonuçlar, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, betonarme plakların çekme tarafında oluşan hasar dağılımı, DAMAGET (çekme hasarı) fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ve deneysel çatlak dağılımı ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde, nümerik sonuçlar her bir betonarme plak için ayrı ayrı sunulmuştur. Karşılaştırma için ilgili grafiklerde deneysel sonuçlar da gösterilmiştir.

5.3.1. SN1 betonarme plağı

SN1 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması Şekil 5.10.'da gösterilmiştir. SE analizinden elde edilen çarpma yükü, maksimum deplasman, kalıcı deplasman, maksimum ivme ve minimum ivme sırasıyla 50.51 kN, 3.66 mm, 3.18 mm, 410.40 g ve -409.08 g'dir.



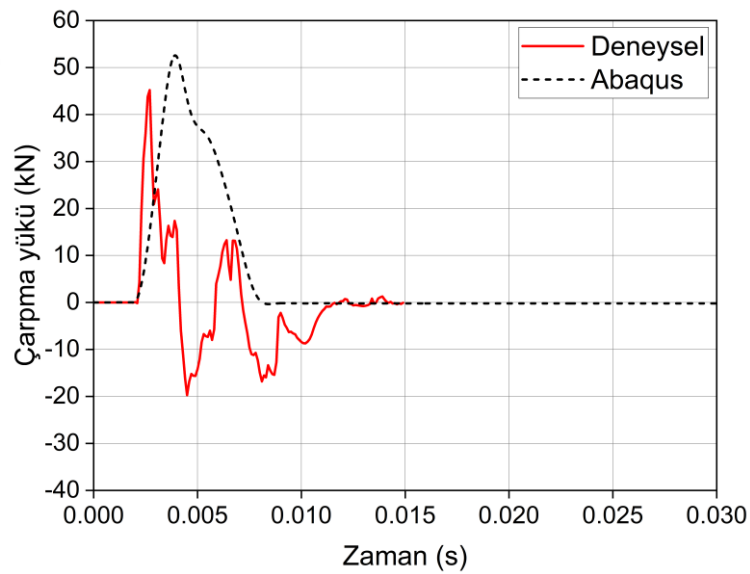
Şekil 5.10. SN1 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması



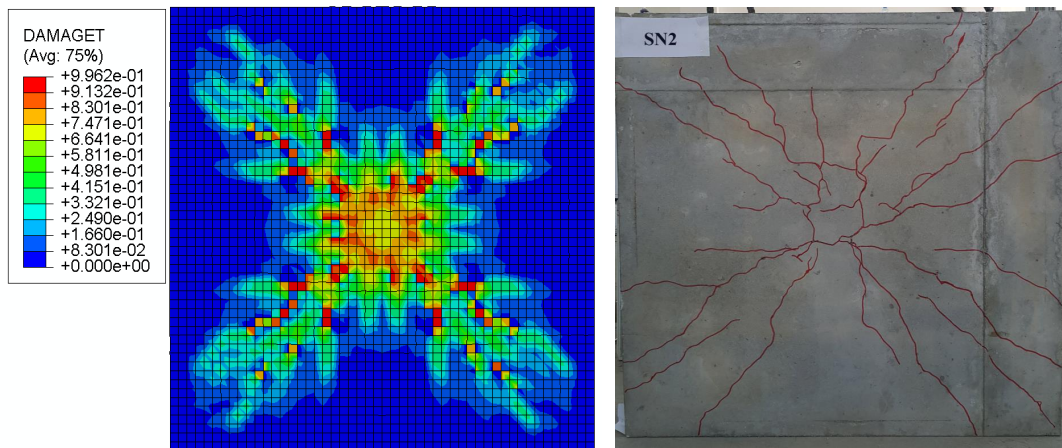
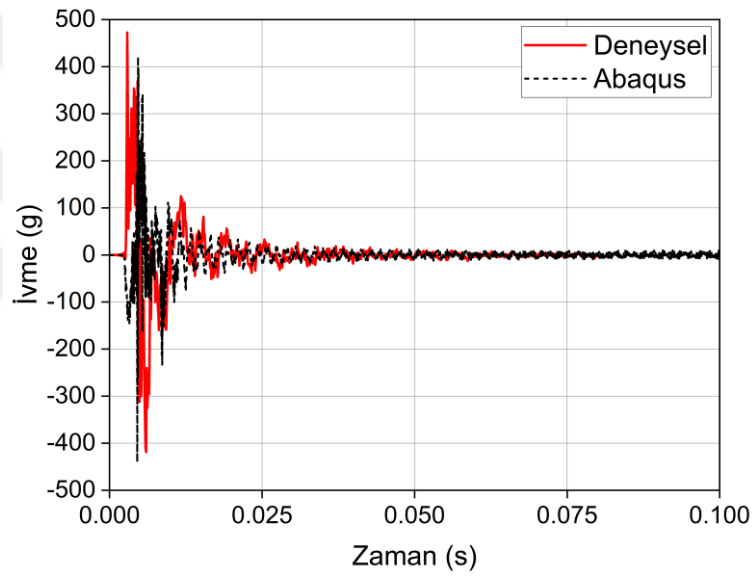
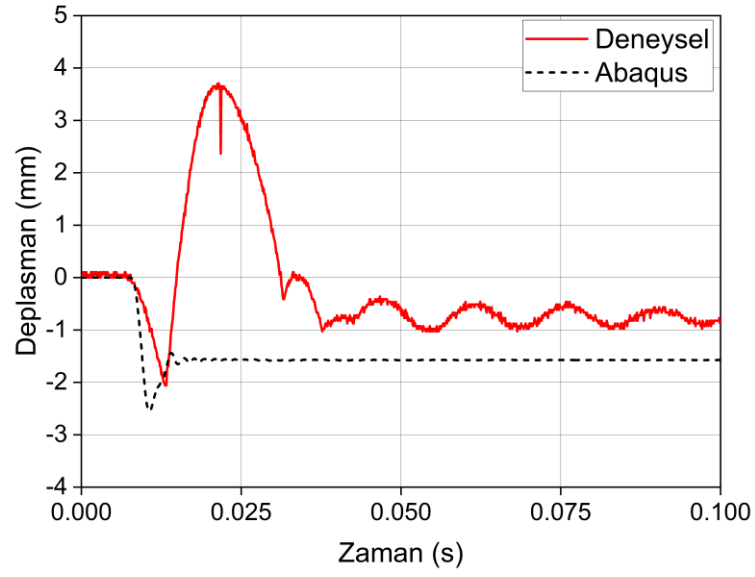
Şekil 5.10. (Devam) SN1 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması

5.3.2. SN2 betonarme plağı

SN2 betonarme plağına ait deneysel ve SE analizinden elde edilen sonuçların karşılaştırması Şekil 5.11.'de sunulmuştur. Nümerik çarpma yükü 52.57 kN, maksimum deplasman 2.55 mm, kalıcı deplasman 1.57 mm, maksimum ivme 420.79 g ve minimum ivme -440.12 g olarak elde edilmiştir.



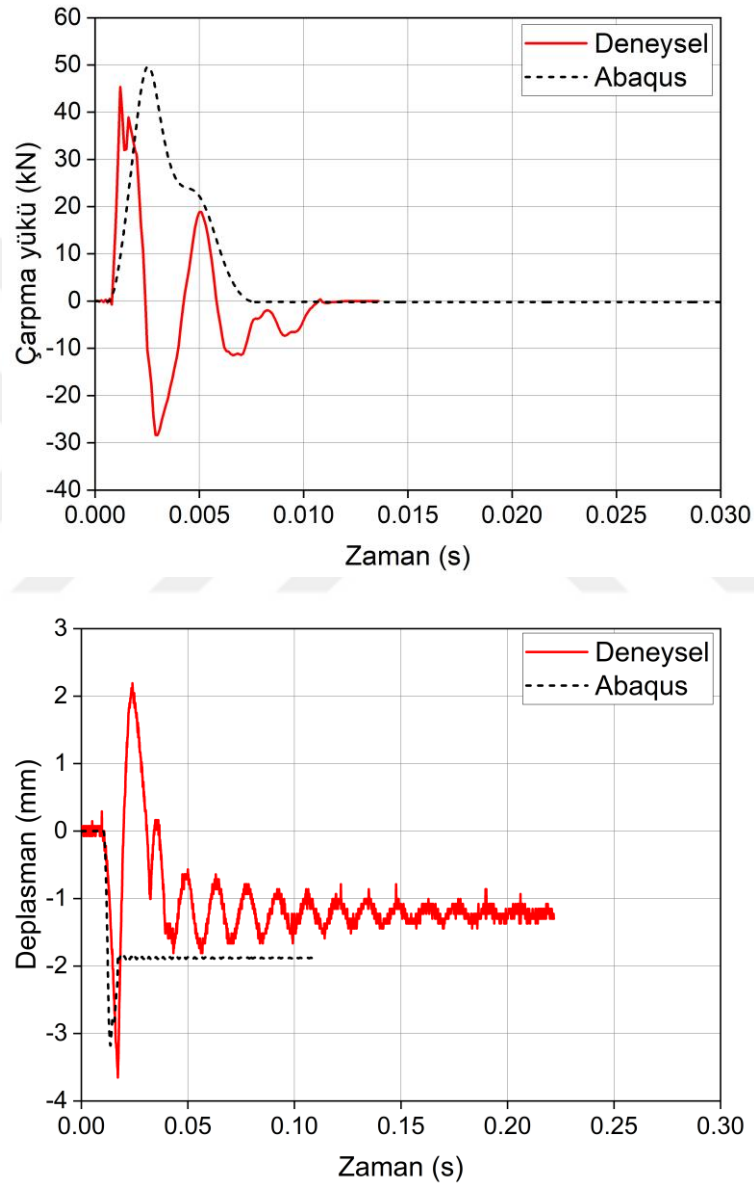
Şekil 5.11. SN2 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması



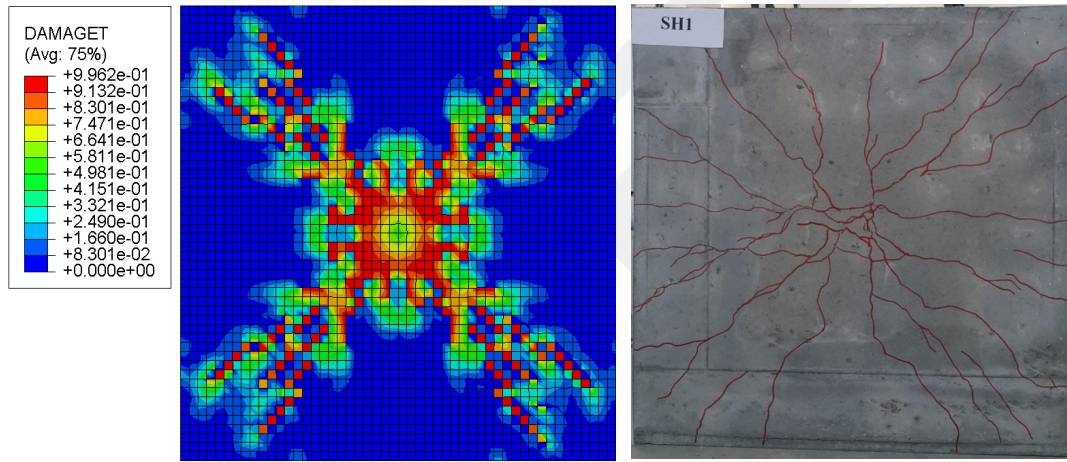
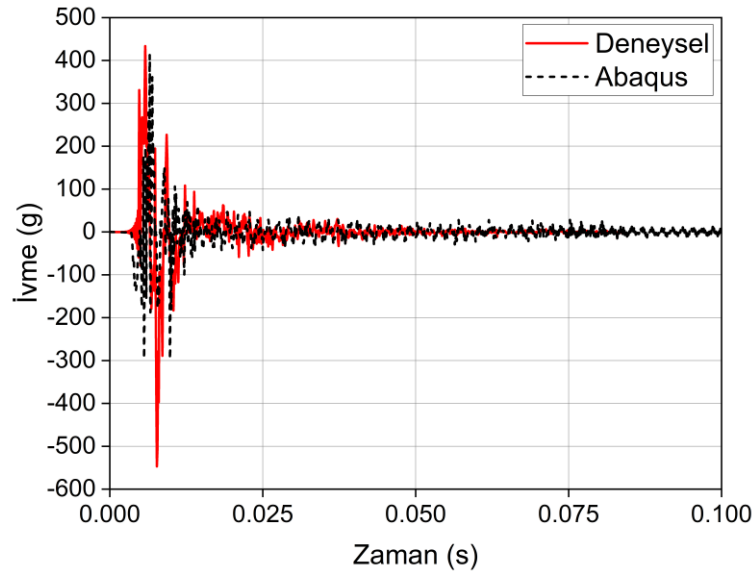
Şekil 5.11. (Devam) SN2 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması

5.3.3. SH1 betonarme plağı

SH1 betonarme plağına ait Abaqus sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırması Şekil 5.12.'de gösterilmiştir. Abaqus yazılımından elde edilen çarpma yükü 49.69 kN, maksimum deplasman 3.18 mm, kalıcı deplasman 1.88 mm, maksimum ivme 412.66 g ve minimum ivme -296.92 g olarak elde edilmiştir.



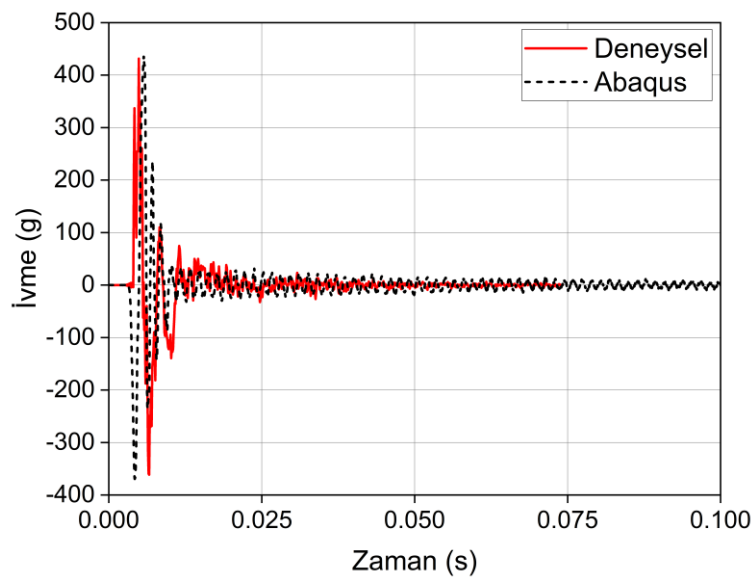
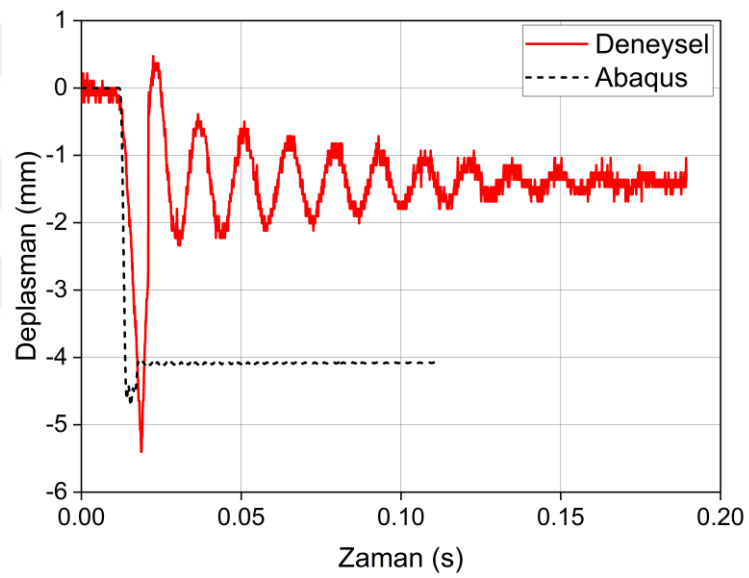
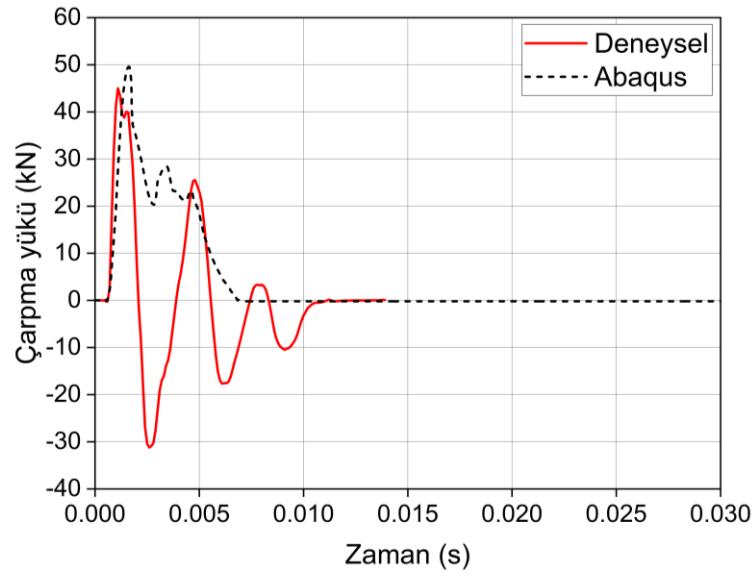
Şekil 5.12. SH1 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması



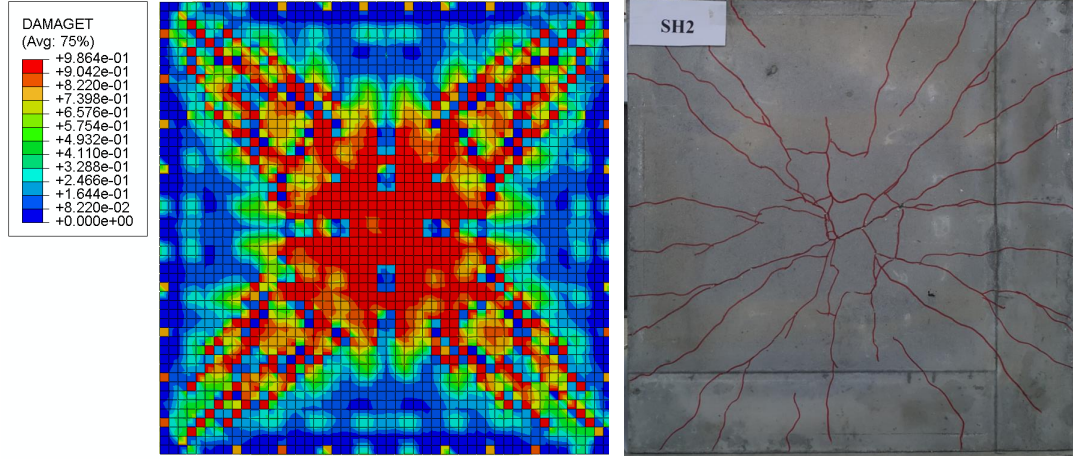
Şekil 5.12. (Devam) SH1 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması

5.3.4. SH2 betonarme plağı

SH2 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması Şekil 5.13.'te sunulmuştur. Nümerik çalışmadan elde edilen çarpma yükü 49.58 kN'dir. Maksimum deplasman, kalıcı deplasman, maksimum ivme, minimum ivme ise sırasıyla 4.72 mm, 4.08 mm, 436.96 g ve -369.53 g'dir.



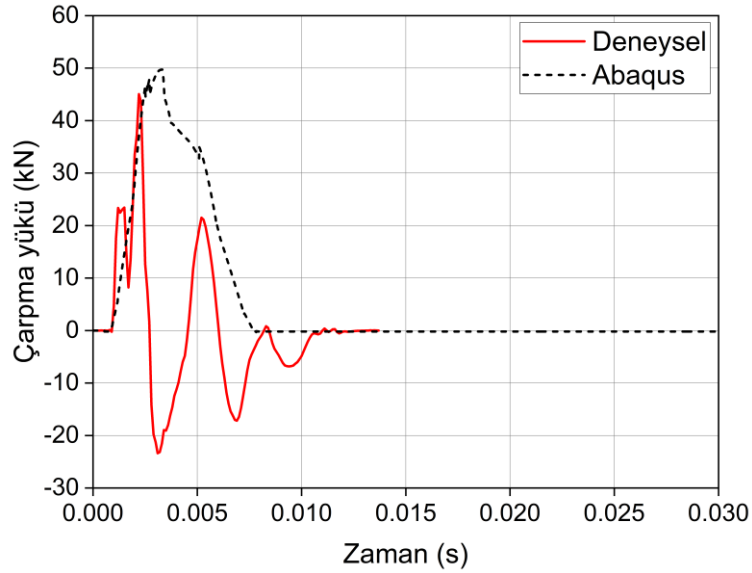
Şekil 5.13. SH2 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması



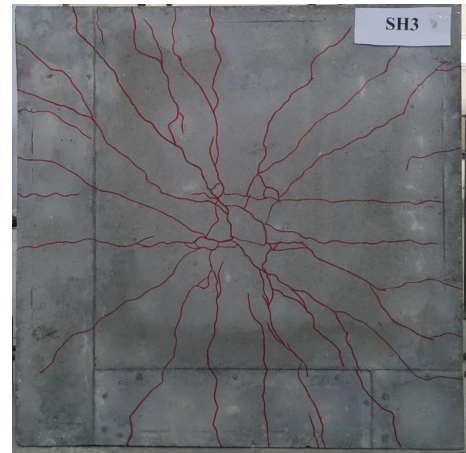
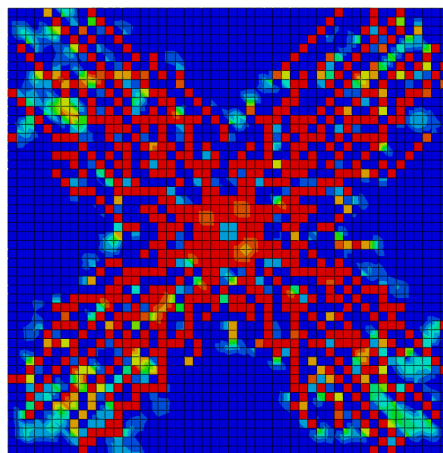
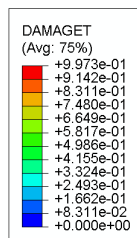
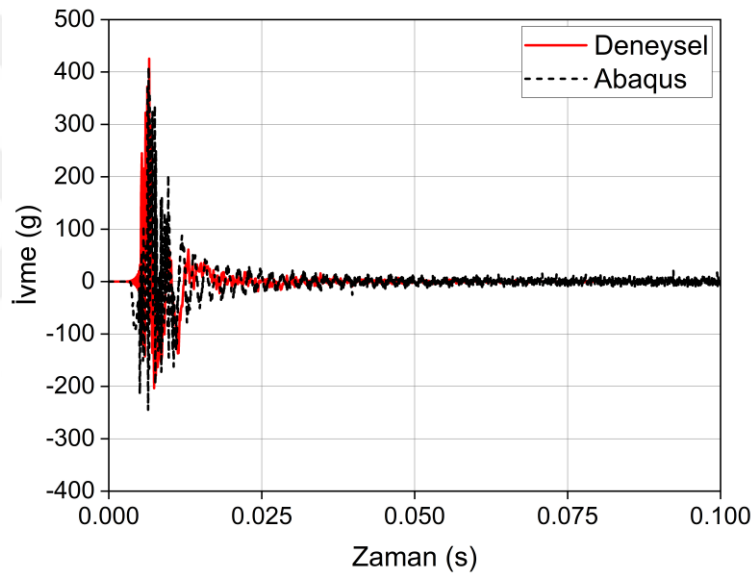
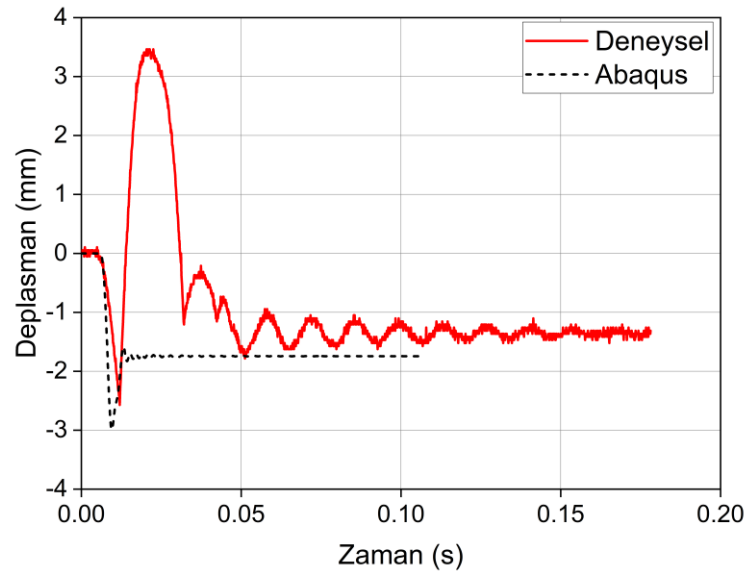
Şekil 5.13. (Devam) SH2 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması

5.3.5. SH3 betonarme plağı

Şekil 5.14.'te SH3 betonarme plağına ait deneysel sonuçlar ile Abaqus sonuçlarının karşılaştırması verilmiştir. Sonlu eleman analizinden elde edilen çarpma yükü 49.72 kN, maksimum deplasman 2.99 mm, kalıcı deplasman 1.74 mm, maksimum ivme 409.15 g ve minimum ivme -244.83 g'dir.



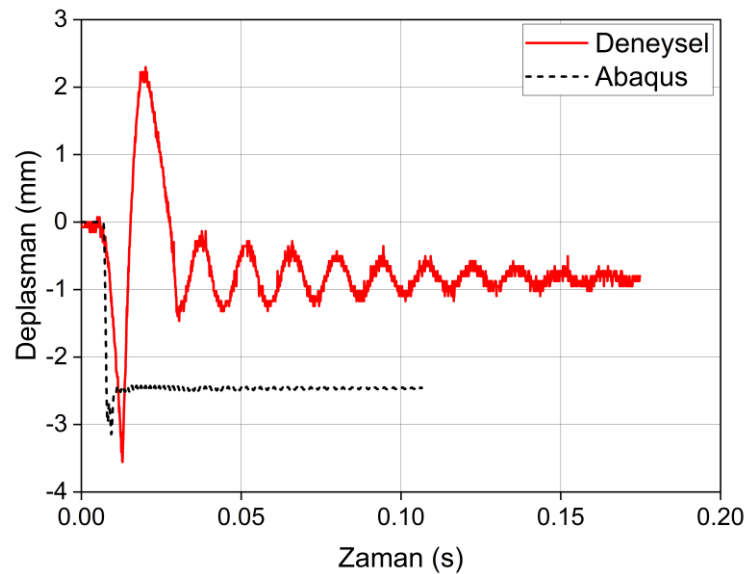
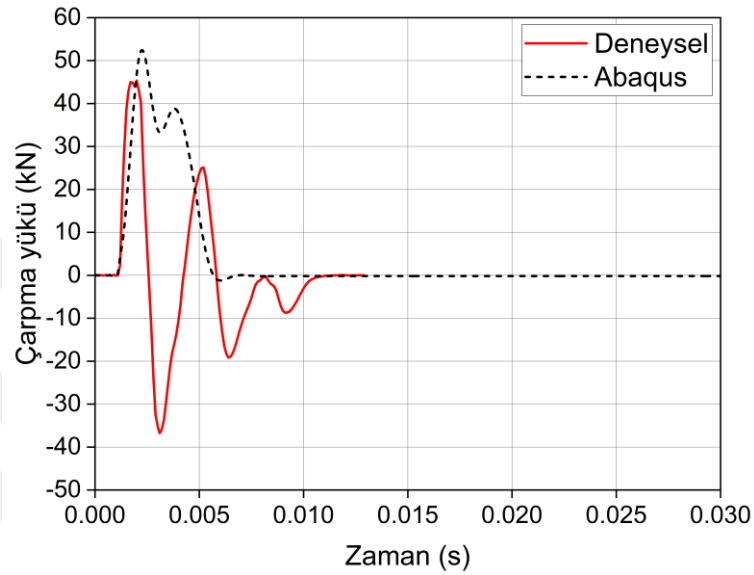
Şekil 5.14. SH3 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması



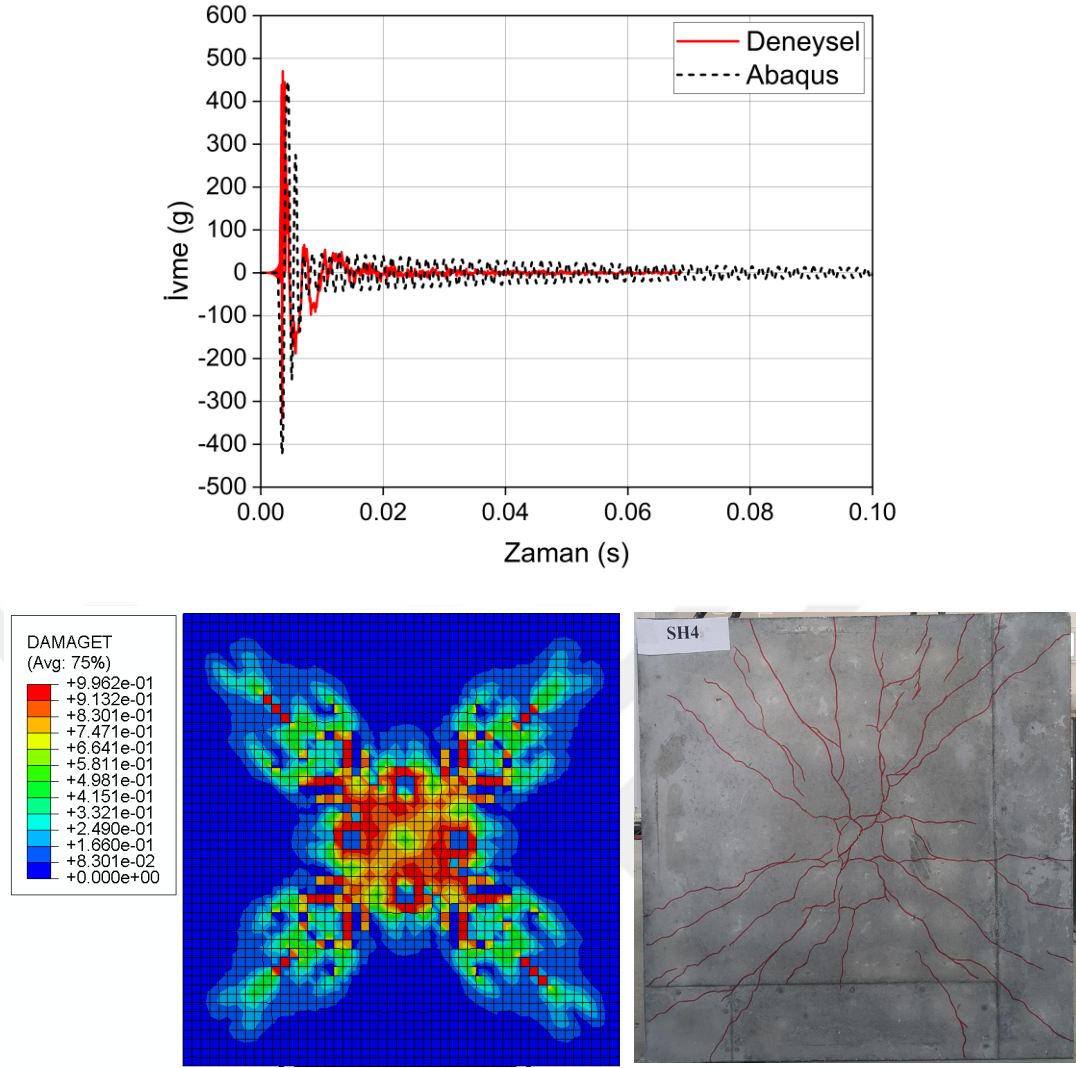
Şekil 5.14. (Devam) SH3 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması

5.3.6. SH4 betonarme plağı

Şekil 5.15. SH4 betonarme plağına ait deneysel ve SE analizinden elde edilen sonuçların karşılaştırmasını sunmaktadır. Nümerik çalışmadan bulunan çarpma yükü 52.42 kN, maksimum deplasman 3.14 mm, kalıcı deplasman 2.46 mm, maksimum ivme 444.95 g ve minimum ivme -422.81 g'dir.



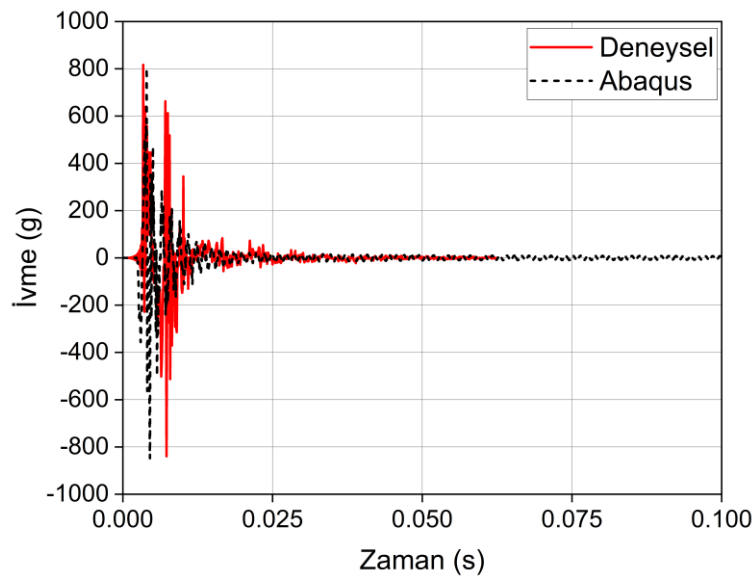
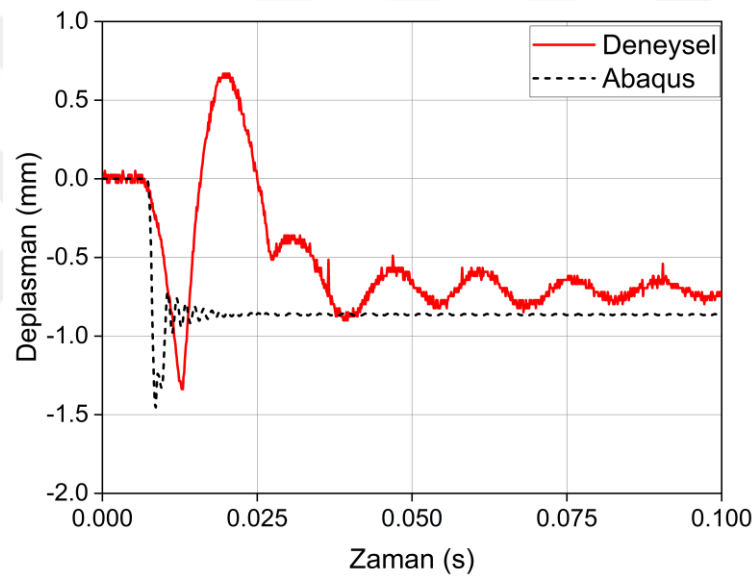
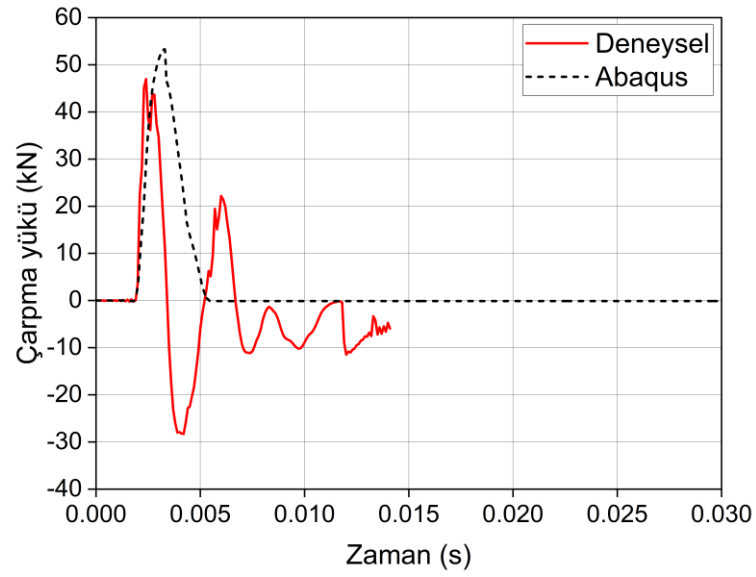
Şekil 5.15. SH4 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması



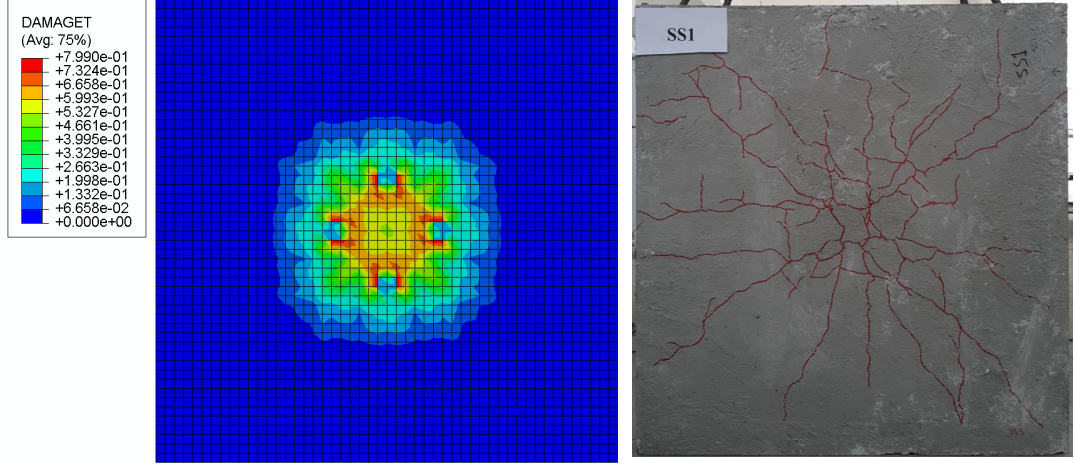
Şekil 5.15. (Devam) SH4 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması

5.3.7. SS1 betonarme plağı

SS1 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması Şekil 5.16.'da verilmiştir. Bu plağına ait nümerik çarpma yükü 53.28 kN, maksimum deplasman 1.45 mm, kalıcı deplasman 0.87 mm, maksimum ivme 803.94 g ve minimum ivme -848.17 g olarak bulunmuştur.



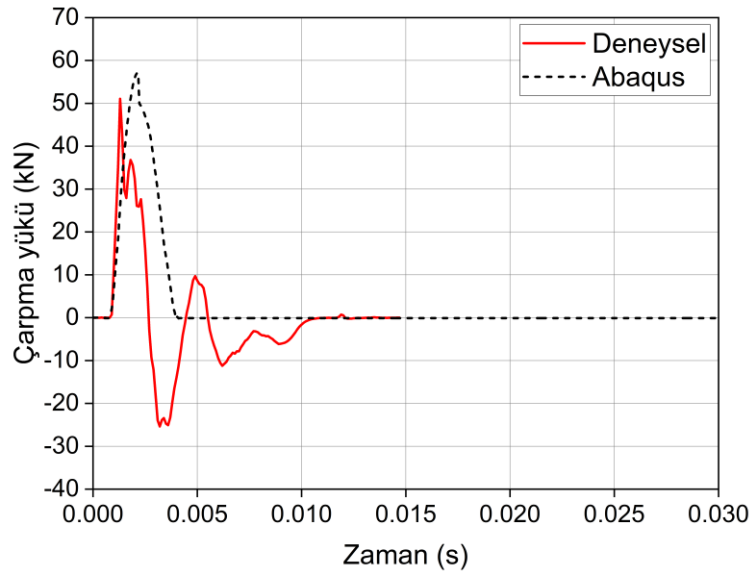
Şekil 5.16. SS1 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması



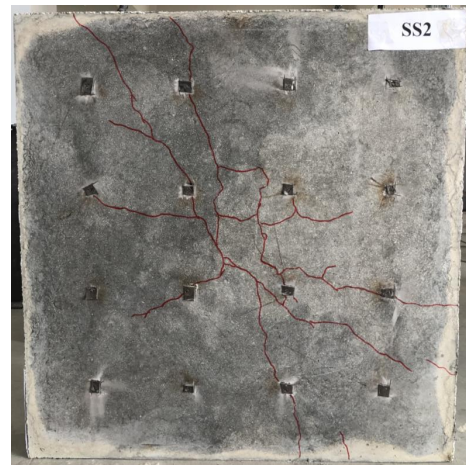
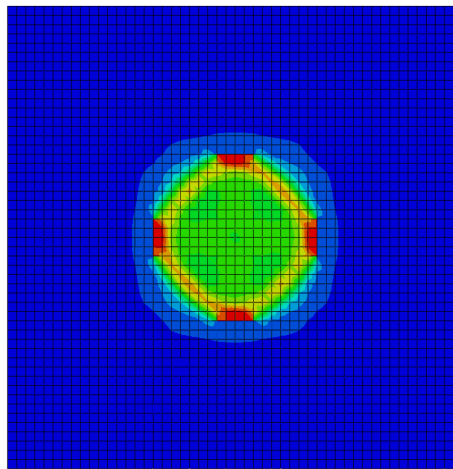
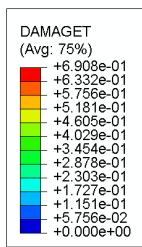
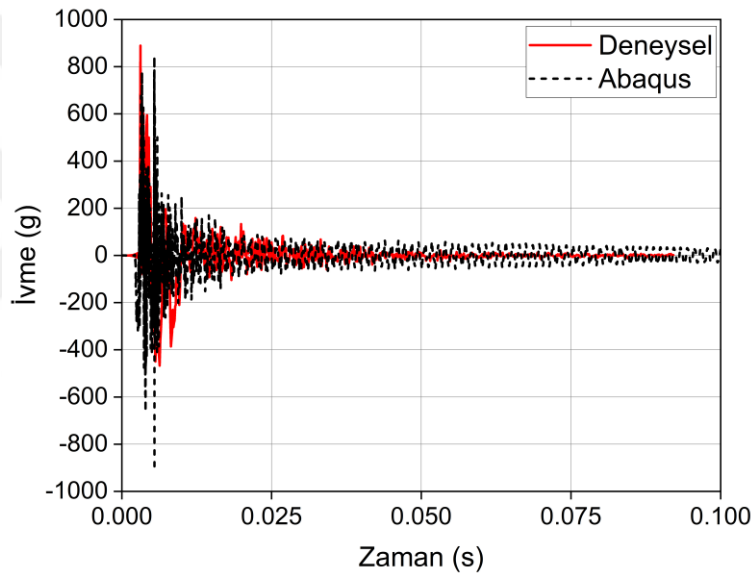
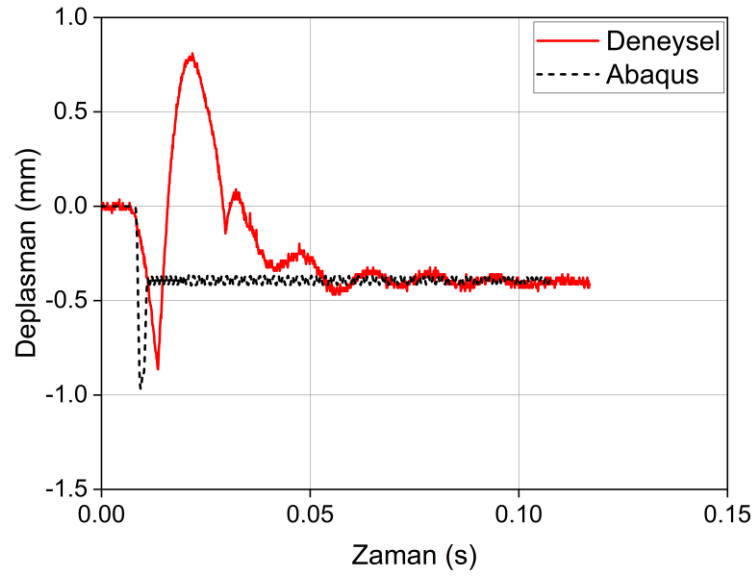
Şekil 5.16. (Devam) SS1 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması

5.3.8. SS2 betonarme plağı

Şekil 5.17. SS2 betonarme plağına ait SE analizi sonuçlarıyla deneysel sonuçların karşılaştırmasını göstermektedir. SS2 betonarme plağına ait nümerik çarpma yükü, maksimum deplasman, kalıcı deplasman, maksimum ivme ve minimum ivme sırasıyla 57.14 kN, 0.97 mm, 0.38 mm, 842.48 g ve -909.56 g'dir.



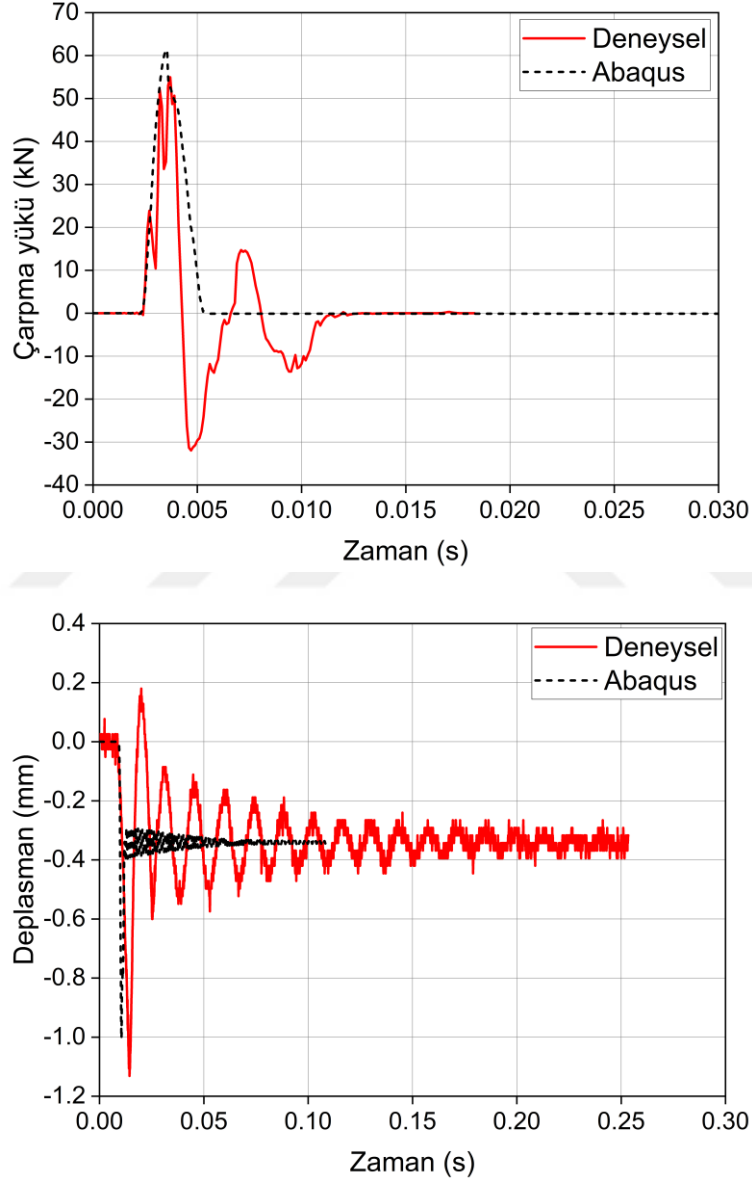
Şekil 5.17. SS2 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması



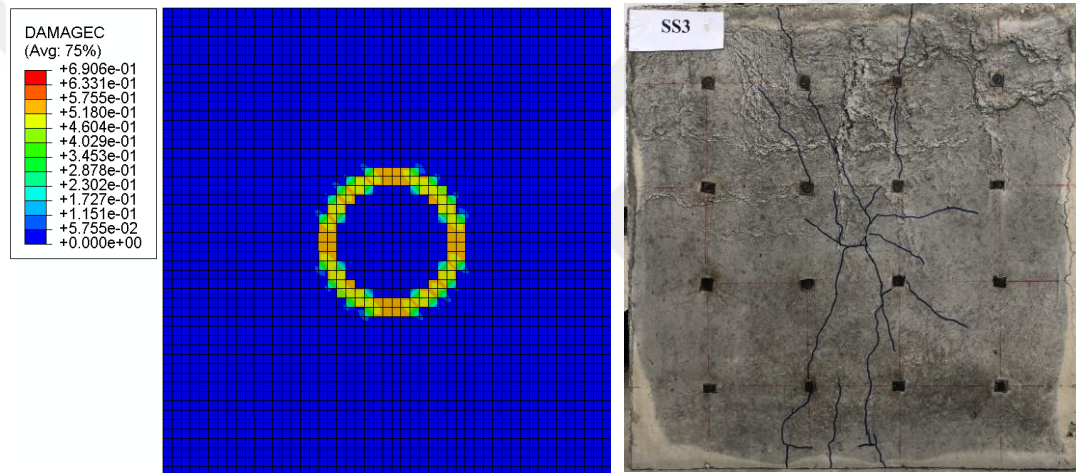
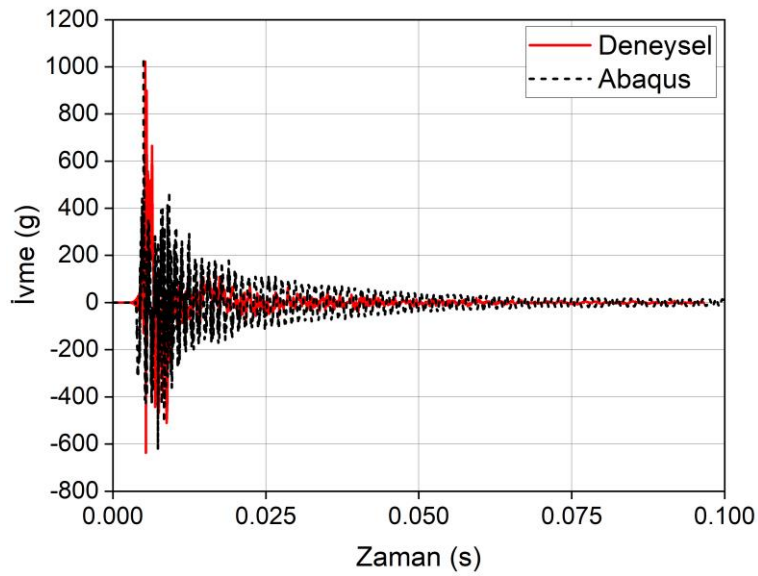
Şekil 5.17. (Devam) SS2 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması

5.3.9. SS3 betonarme plağı

Şekil 5.18. SS3 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırmasını sunmaktadır. SS3 betonarme plağına ait nümerik çarpma yükü 61.44 kN, maksimum deplasman 1.01 mm, kalıcı deplasman 0.34 mm, maksimum ivme 1038.89 g ve minimum ivme -622.88 g olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.18. SS3 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması



Şekil 5.18. (Devam) SS3 betonarme plağına ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırması

5.4. Nümerik Sonuçların Değerlendirilmesi

Betonarme plaklara ait nümerik ve deneysel maksimum ivme, minimum ivme, maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerlerinin karşılaştırması Çizelge 5.3.'te sunulmuştur. Nümerik ve deneysel maksimum ivme değerleri karşılaştırıldığında, tüm SE modellerinin bu değerleri iyi bir doğrulukla tahmin edebildiği görülebilmektedir. Maksimum ivme değerinin deneysel/ nümerik oranlarının 0.99 ile 1.12 aralığında olduğu bulunmuştur. Deneysel sonuçların nümerik sonuçlara ortalama oranı 1.04 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, önceki bölümde sunulan deneysel ve nümerik ivme-zaman grafikleri arasındaki karşılaştırmayla da desteklenmektedir. Benzer şekilde, deneysel ve nümerik çarpma yükü-zaman grafikleri karşılaştırıldığında, grafikler arasında iyi bir

uyum gözlemlenmiştir. Çarpma yükünün deneysel/ nümerik oranının 0.86 ila 0.91 aralığında olduğu bulunmuştur. Ortalama oran ise 0.89 olarak bulunmuştur.

Öte yandan Çizelge 5.3.'ten de görülebildiği gibi, modeller maksimum ve kalıcı deplasman değerlerini doğru bir şekilde tahmin edememiştir. Tüm modellerde, nümerik maksimum deplasman değerlerinin deneysel olanlara göre daha az olduğu görülmüştür. Deneysel maksimum deplasmanın nümerik olana oranları 1.24 ile 2.26 arasında değişmektedir. Kalıcı deplasman değerleri karşılaştırıldığında, modellerin çoğunun deneysel sonuçlara göre daha yüksek sonuçlar gösterdiği gözlenmiştir. Yalnızca birkaç model kalıcı deplasmanı kabul edilebilir bir doğrulukla tahmin edebilmiştir. Kalıcı deplasmanın deneysel/nümerik oranı 0.32 ile 1.08 arasında değiştiği görülmüştür. Nümerik maksimum deplasman değerlerinin deneysel değerlere göre çok daha düşük olması, modellerin gerçek numunelere göre daha rijit davrandığını göstermektedir.

Ayrıca deneysel ve nümerik grafikler incelendiğinde çarpışma sonrası oluşan titreşimin nümerik grafiklerde daha hızlı durduğu gözlenmiştir. Bununla beraber pik değerlerinden sonra başlayan sönümlenme aşamasına ait genlik deneysel grafiklerde nümerik grafiklerden daha yüksektir. Bu eğilim deplasman grafiklerinde daha net bir şekilde görülebilmektedir. Bu durum deney numunelerinin nümerik modellere göre daha sünek davrandığını göstermektedir (T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Kaçaran, 2020; T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Hoşkal, 2020).

Nümerik ve deneysel sonuçlar arasında bulunan farklılıklar betonun heterojenliğine ve anizotropisine ve mesnet durumuna bağlanabilir. SE yazılımlarındaki malzeme modelleri, betonu tamamen homojen ve izotropik olarak kabul etmektedir. Modellemede betonun heterojenliğini ve anizotropisini dikkate almak mümkün değildir. Ayrıca betonun homojenliği, çevre koşulları, kür durumu, sıkıştırma ve bakım gibi bazı faktörlerden etkilenmektedir (Selim Şengel ve ark., 2022). Öte yandan, SE modellemesinde kullanılan mesnet durumu gerçek duruma tam olarak benzemeyebilmektedir. Modellemede, tanımlanan mesnet koşulları için kesin bir şekilde sağlanmaktadır. Ancak çarpma testi sırasında hafif bir mesnet hareketi oluşabilmektedir (M. C. Yılmaz ve ark., 2021; T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Hoşkal, 2020).

Çizelge 5.3. Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırması

Numune	İvme (g)				Oran*	Maksimum deplasman (mm)			Kalıcı deplasman (mm)		
	Deneysel		Abaqus			Oran**	Deneysel	Abaqus	Oran***	Deneysel	Abaqus
	Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum							
SN1	427.33	-181.99	410.40	-409.08	1.04	5.97	3.66	1.63	1.29	3.18	0.41
SN2	472.46	-418.76	420.79	-440.12	1.12	5.76	2.55	2.26	0.77	1.57	0.49
SH1	433.64	-547.10	412.66	-296.92	1.05	5.84	3.18	1.84	1.29	1.88	0.69
SH2	431.46	-361.28	436.96	-369.53	0.99	5.87	4.72	1.24	1.31	4.08	0.32
SH3	425.41	-203.66	409.15	-244.83	1.04	6.03	2.99	2.02	1.31	1.74	0.75
SH4	470.12	-339.48	444.95	-422.81	1.06	5.85	3.14	1.86	0.80	2.46	0.33
SS1	816.85	-839.53	803.94	-848.17	1.02	2.01	1.45	1.39	0.72	0.87	0.83
SS2	889.27	-467	842.48	-909.56	1.06	1.67	0.97	1.72	0.41	0.38	1.08
SS3	1022.59	-637.75	1038.89	-622.88	0.98	1.31	1.01	1.30	0.32	0.34	0.94

* Deneysel maksimum ivme değerlerinin Abaqus sonuçlarına oranı

** Deneysel maksimum deplasman değerlerinin Abaqus sonuçlarına oranı

*** Deneysel kalıcı deplasman değerlerinin Abaqus sonuçlarına oranı

Nümerik ve deneysel sonuçlar arasındaki farklılığın bir diğer nedeni de SE analizinde modellerin küçük boyuta sahip sonlu elemanlara bölünmesidir. Bununla birlikte, gerçek durumda, numuneler daha büyük sürekli yapısına sahip tek bir hacimden oluşmaktadır. Küçük boyutlu elemanlar, direncini daha düşük gerilmeler altında kaybetmektedir. Büyük elemanlar ise direncini kaybetmeden önce daha yüksek gerilmelere dayanabilmektedir. Bu fark, nümerik model ile deneysel numune arasında farklı bir davranışa yol açmaktadır. Sonuç olarak deneysel ve nümerik deplasman değerleri arasında farklılıklar oluşmuştur (Şengel ve ark., 2022; T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Hoşkal, 2020).

Buna ek olarak Abaqus yazılımı, gerinim hızının malzemenin özellikleri üzerindeki etkisinin otomatik olarak tanımlanmasını yapamamaktadır. Abaqus yazılımında gerinim hızının etkisi göz önüne alınabilmesi için ilk önce belirli bir gerinim hızının malzemenin özellikleri üzerindeki etkisinin hesaplanması gerekmektedir. Bundan sonra, bu özellikler tablo şeklinde yazılıma girilmelidir. Ancak bu yöntem, gerinim hızının beton davranışı üzerindeki etkisini tamamen yansıtmayabilir (M. C. Yılmaz ve ark., 2021). Ayrıca, çarpma yüklemesi için uygun gerinim hızı bulmak zor bir problemdir. Bu durum, daha önce birçok araştırmacı tarafından önerildiği gibi, CDP modelinin malzemenin özelliklerinin gerinim hızına göre değişimini otomatik olarak göz önüne almasının gerektiğini göstermektedir (Demirhan ve ark., 2019; Yıldırım ve ark., 2020; M. C. Yılmaz ve ark., 2021; T. Yılmaz ve ark., 2022; T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Hoşkal, 2020). ANSYS ve LSDYNA gibi bazı SE yazılımlarında, gerinim hızı etkisinin modellemeye dahil edilmesinin daha kolay olduğu da ayrıca belirtilmelidir. Çarpma yüküne maruz kalan betonarme elemanların modellenmesi sırasında karşılaşılan ve yukarıda bahsedilen problemler, literatürde birçok çalışmada da rapor edilmiştir (Demirhan ve ark., 2019; Şengel ve ark., 2022; M. C. Yılmaz ve ark., 2021; T. Yılmaz ve ark., 2022; T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Hoşkal, 2020; T. Yılmaz, Kıraç, Anıl, Erdem, ve Kaçaran, 2020).

Nümerik çalışmada incelenen son parametre çatlak dağılımıdır. Bu amaçla DAMAGET fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon numunelerde oluşan çekme hasar dağılımını göstermektedir. Deneysel ve nümerik çatlak dağılımı karşılaştırıldığında iyi bir tutarlılık gözlemlenmiştir. Modellerde, çatlaklar ağırlıklı olarak arka yüzeyin orta bölgesinde yoğunlaşmış ve mesnetlere doğru genişlemiştir. Ayrıca, çekme tarafında (alt katmanda) çelik lif donatılı beton bulunan numuneler, SN1 betonarme plağına göre daha

az hasar görmüştür. Hasar seviyesi, çelik levhalar kullanıldığında oldukça sınırlı seviyede kalmıştır. Bu bulgular, deneysel çalışmada bulunan sonuçlarla uyumludur.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, farklı katkı maddelerinin (nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, çelik lif, polipropilen lif, PET lif, ince atık lastik kauçuk ve iri atık lastik kauçuk) betonun statik özellikleri, mikro yapısal özellikleri, çarpma performansı ve maliyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Katkı maddeleri ayrı ayrı ve farklı kombinasyonlarda kullanılmıştır. Toplam 39 beton test edilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu betonlar arasında en yüksek performansa sahip beton seçilmiştir. Bu beton, normal betonla birlikte, farklı tipte (normal betondan üretilen, çelik lif donatılı betondan üretilen, fonksiyonel derecelendirilmiş betondan üretilen ve çelik levhalı) betonarme plaklar üretmek için kullanılmıştır. Toplam 9 adet betonarme plak üretilmiş ve ağırlık düşürme deneyi kullanılarak test edilmiştir. Deneylerin sonucunda çarpma dayanımına karşı en etkili olan numune bulunmuştur. Testte kullanılan çarpma ağırlığı ve yüksekliği sırasıyla 198.6 kg ve 1.5 m'dir. Deneye tabi tutulan betonarme plakların çarpma yükü-zaman grafikleri, ivme-zaman grafikleri, deplasman-zaman grafikleri ve çatlak dağılımları incelenmiştir. Plakların maliyeti de değerlendirilmiştir. Ayrıca, betonarme plakların sonlu eleman modelleri Abaqus yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Sonuçların daha net bir şekilde anlaşması için farklı katkı maddelerinin betonun özellikleri üzerindeki etkisine ait sonuçlar ve betonarme plakların çarpma testine ait sonuçlar aşağıdaki alt bölümlerde ayrı ayrı sunulmuştur.

6.1.1. Farklı katkı maddelerinin betonun özellikleri üzerindeki etkisine ait sonuçlar

Bu çalışmanın ilk aşamasında, çeşitli katkı maddelerinin betonun statik ve çarpma özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kullanılan katkı maddeleri üç gruba ayrılmıştır. Bunlar nano katkı maddeleri grubu, lifler grubu ve atık lastik kauçuklar grubudur. Ayrıca, bu karışım gruplarının her birisinde kırılma çarpma dayanımı açısından en yüksek performans gösteren karışım göz önüne alınarak yeni betonlar hazırlanmış ve test edilmiştir. Farklı betonun özellikleri açısından karışım gruplarından elde edilen en yüksek performans ve bu performansın hangi karışımda bulunduğu Çizelge 6.1.'de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Farklı betonun özellikleri açısından karışım gruplarından elde edilen maksimum performans

Betonun özellikleri	Referans beton (M0)	Nano katkı maddeleri grubu	Lifler grubu	Atık lastik kauçuklar grubu	N, F ve R kombinasyonları
Basınç dayanımı (MPa)	44.40	49.61 (11.7) ^a (NSNF0.5) ^b	48.50 (9.2) ^a (STF1) ^b	36.54 (-17.7) ^a (CR10) ^b	40.87 (-8) ^a (N+F) ^b
Yarmada çekme dayanımı (MPa)	1.99	2.97 (49.2) ^a (NSNA0.5) ^b	4.39 (120.6) ^a (STF2) ^b	2.40 (20.6) ^a (FRCR10) ^b	3.38 (69.8) ^a (N+F) ^b
Eğilme dayanımı (MPa)	5.04	6.62 (31.4) ^a (NSNF0.5) ^b	11.97 (137.5) ^a (STF2) ^b	5.15 (2.3) ^a (CR10) ^b	9.31 (84.7) ^a (N+F+R) ^b
Tokluk (N.m)	1.47	2.79 (89.8) ^a (NSNF0.5) ^b	12.59 (756.9) ^a (STF2) ^b	5.58 (279.8) ^a (FR10) ^b	11.20 (662) ^a (N+F+R) ^b
Kırılma enerjisi (N.m/m ²)	395.65	750.84 (89.8) ^a (NSNF0.5) ^b	13986.70 (3435.1) ^a (STF2) ^b	2028.61 (89.8) ^a (FR10) ^b	11411.48 (2784.2) ^a (N+F+R) ^b
Enerji yutma kapasitesi (N.m)	1.47	2.79 (89.8) ^a (NSNF0.5) ^b	77.37 (5165.1) ^a (STFPETF2) ^b	7.48 (409.2) ^a (FR10) ^b	60.11 (3990.9) ^a (N+F+R) ^b
İlk çatlak çarpma dayanımı (vuruş sayısı)	3	5 (66.7) ^a (NF0.5) ^b	19.00 (533.3) ^a (STF0.5PPF0.125) ^b	12.00 (300) ^a (FR10) ^b	14 (366.7) ^a (N+F+R) ^b
Kırılma çarpma dayanımı (vuruş sayısı)	3	5 (66.7) ^a (NF0.5) ^b	55.00 (1733.3) ^a (STF1) ^b	12.00 (300) ^a (FR10) ^b	51 (1600) ^a (N+F+R) ^b

a: Referans betona göre artış yüzdesi

b: İncelenen betonun özelliği açısından ilgili karışım grubunda maksimum performans gösteren beton

Nano katkı maddeleri ve lifler betonun birim ağırlığı üzerinde önemli bir etki göstermemişken, atık lastik kauçuklar bunu %13.1 (FR20 betonunda bulunmuş) oranına kadar azaltmıştır. Bu azalma, lastik kauçuk içeriği ile orantılı olup iri lastik kauçuğa göre ince lastik kauçukta daha yüksektir.

Çizelge 6.1.'den de görüldüğü gibi, nano katkı maddeleri betonun basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %11.7 (NSNF0.5 betonunda bulunmuş), %49.2 (NSNA0.5 betonunda bulunmuş) ve %31.4 (NSNF0.5 betonunda bulunmuş) oranlarına kadar arttırmıştır. Bu durum, nano katkı maddelerinin bir dolgu malzemesi olarak ve betonun hidrasyon sürecini hızlandırmada bir aktivatör olarak davranmasına bağlıdır.

Çelik lifler, betonun basınç dayanımını %9.2 (STF1 betonundan elde edilmiş) oranına kadar arttırmışken, PP ve PET lifler bunu sırasıyla %12.4 (PPF0.5 betonunda

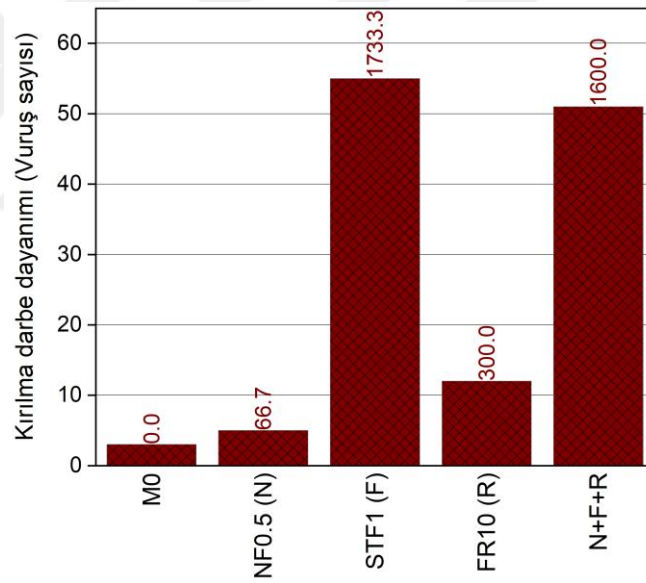
izlenmiş) ve %55.9 (PETF2 betonunda bulunmuş) oranlarına kadar azaltmıştır. Öte yandan, lifler betonun yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %120.6 ve %137.5 oranlarına kadar iyileştirmiştir. Bu maksimum artış yüzdeleri STF2 betonundan elde edilmiştir. Yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımındaki artış çelik lif durumunda diğer liflere göre daha belirgindir.

Lastik kauçuklar, betonun basınç dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %59.9 ve %35.7 oranlarına kadar azaltmıştır. Bu maksimum azalma yüzdeleri FR20 betonundan elde edilmiştir. Azalmanın lastik kauçuk içeriği arttıkça arttığı gözlenmiştir. Bu azalma, esas olarak, lastik kauçuk partiküller ve çevreleyen beton arasındaki zayıf bağ ile ilişkilidir. Öte yandan, lastik kauçuk %10 oranında kullanıldığında betonun yarmada çekme dayanımının %20.6 (FR10 betonunda izlenmiş) oranına kadar arttığı bulunmuştur. Bununla birlikte, lastik kauçuğun daha yüksek oranda kullanılması betonun yarmada çekme dayanımının azalmasına neden olmuştur.

İncelenen tüm katkı maddelerinin bileşimleri, betonun enerji yutma kapasitesini, tokluğunu ve kırılma enerjisini önemli ölçüde arttırmıştır. Nano katkı maddeleri, lifler ve atık lastik kauçuklar betonun enerji yutma kapasitesini sırasıyla %89.8 (NSNF0.5), %5165.1 (STFPETF2) ve %409.2 (FR10), tokluğunu %89.8 (NSNF0.5), %756.9 (STF2) ve %279.8 (FR10), kırılma enerjisini %89.8 (NSNF0.5), %3435.1 (STF2) ve %89.8 (FR10) oranlarına kadar arttırmıştır. Bu etki lifler durumunda, özellikle çelik lifte daha belirgindir. Bu da liflerin çatlak köprüleme ve durdurma etkisine bağlıdır. Bu özellikler açısından nano katkı maddeleri diğer katkı maddelerine göre daha düşük performans göstermiştir.

SEM analizi, nano katkı maddelerinin betonun mikro yapısının gözenekliliğini ve mikro çatlak sayısını azalttığını ve yoğunluğunu ve kompaktlığını arttırdığını ortaya koymuştur. SEM analizi ayrıca çelik lifi çevreleyen çimento hamurunun PET ve PP liflere göre daha pürüzlü olduğunu ve daha az gözenekliliğe ve çatlaklara sahip olduğunu göstermiştir. PET lifi çevreleyen çimento hamurunun ise pürüzsüz olduğu gözlenmiştir. PP lif söz konusu olduğunda, çevreleyen betonun çatlaklar, gözenekler ve boşluklarla dolu olduğu görülmüştür. Bu durum, çelik lif ile beton arasındaki aderansın diğer liflere kıyasla daha güçlü olduğunu açıklayabilir. SEM analizi görüntüleri ayrıca, lastik kauçukların mikro yapıdaki çatlak ve gözenek sayısını arttırdığını ortaya çıkarmıştır. Lastik kauçuk partiküller ile beton arasında zayıf bağa neden olan boşluklu ve zayıf bir ara yüzey geçiş bölgesi de gözlemlenmiştir.

Çarpma dayanımı açısından nano katkı maddeleri, lifler ve lastik kauçuklar gruplarında en iyi performansa sahip betonlar sırasıyla NF0.5 (%0.5 nano-Fe₂O₃ içermekte), STF1 (%1 çelik lif içermekte) ve FR10 (%10 ince lastik kauçuk içermekte) olarak bulunmuştur. Bu betonların, referans betona göre sırasıyla %66.7, %1733.4 ve %300 oranlarında daha yüksek çarpma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca bu betonların, statik özellikler açısından yüksek performans gösterdiği gözlenmiştir. NF0.5 (N), STF1 (F) ve FR10'un (R) kombinasyonlar halinde kullanılmasının, STF1'in tekil kullanımına göre daha düşük statik özelliklere ve çarpma performansına sahip olduğu görülmüştür. N, F ve R kombinasyonları arasından en yüksek çarpma performansı N+F+R kombinasyonundan elde edilmiştir. Referans betona göre, N+F+R betonun çarpma dayanımı %1600 daha yüksektir. Karışım gruplarında en yüksek performans gösteren betonların kırılma çarpma dayanımının değeri ve artış yüzdesi grafiksel olarak Şekil 6.1.'de gösterilmiştir.



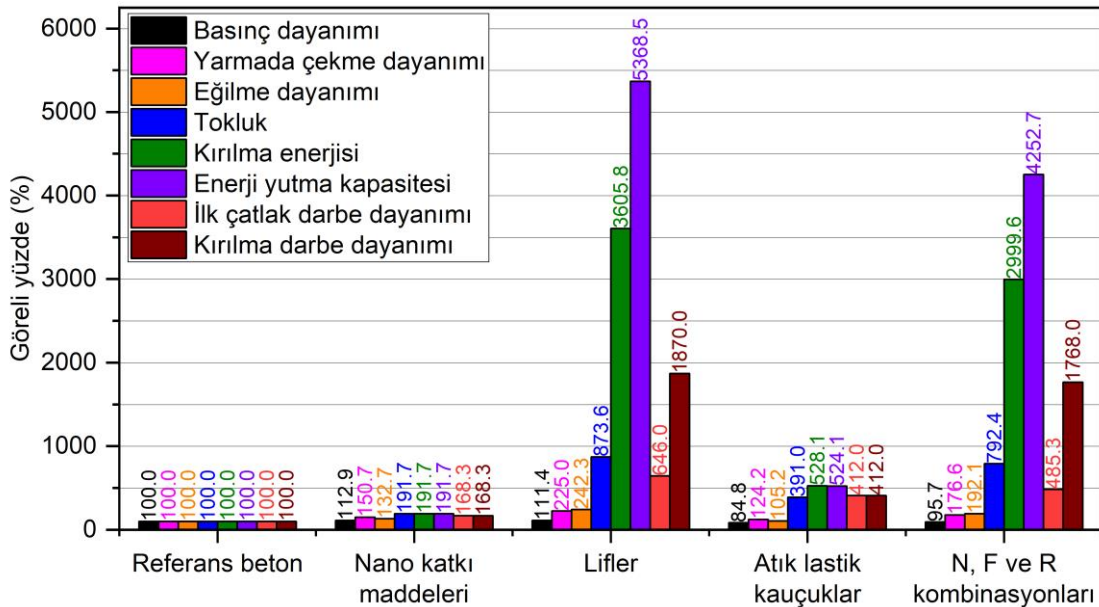
Şekil 6.1. Karışım gruplarında en yüksek performans gösteren betonların kırılma çarpma dayanımının değeri ve artış yüzdesi

İncelenen tüm betonlar arasında çarpma dayanımı açısından en yüksek performansa sahip beton, STF1 betonu olarak seçilmiştir. Referans betona kıyasla, bu betonun basınç dayanımı %9.2, yarmada çekme dayanımı %88.4, eğilme dayanımı %113.4, enerji yutma kapasitesi %4838.3, tokluğu %685, kırılma enerjisi %3434.8, ilk çatlak çarpma dayanımı %233.3 ve kırılma çarpma dayanımı %1733.4 daha yüksektir. Bu sonuç arzu edilirlilik fonksiyonu analizi sonuçlarıyla da desteklenmiştir.

Nano katkı maddeleri betonun çarpma performansı üzerinde iyi bir etki sağlayamamışken, lifler ve lastik kauçuklar çarpma dayanımını kayda değer ölçüde arttırmıştır. Bu etkinin, liflerde, özellikle çelik lifte daha yüksek olduğu görülmüştür.

Normal beton ve nano katkı maddeleri içeren betonlar yarı-statik yük altında gevrek bir davranış göstermişken, lifler ve lastik kauçuklar içeren betonlar sünek bir davranış göstermiştir. Çarpma yükü altında ise, PP lif hariç olmak üzere lif içeren betonlar sünek bir davranış göstermiştir. Bu davranışın, çelik lif durumunda daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu da çelik lifin daha yüksek çekme dayanımına ve çevreleyen betonla daha güçlü aderansa sahip olmasına bağlanabilir. Diğer betonlar çarpma yükü altında gevrek bir şekilde kırılmıştır.

Farklı karışım gruplarının genel performansının karşılaştırılması için, farklı betonun özellikleri açısından karışım gruplarından elde edilen en yüksek performansa ait görelî yüzdeler Şekil 6.2.'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, basınç dayanımı açısından nano katkı maddeleri diğer karışım gruplarına göre daha yüksek performans göstermiştir. Ancak nano katkı maddeleri grubundaki basınç dayanımında bulunan maksimum artış (%12.9), lifler grubundaki buluna kıyasla yalnızca %2.3 daha yüksektir. Öte yandan, incelenen diğer tüm özellikler açısından lifler grubu diğer karışım gruplarından daha yüksek performans göstermiştir. Genel olarak, bu etkinin çelik lifin tekil kullanıldığında diğer katkı maddeleri kombinasyonlarına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

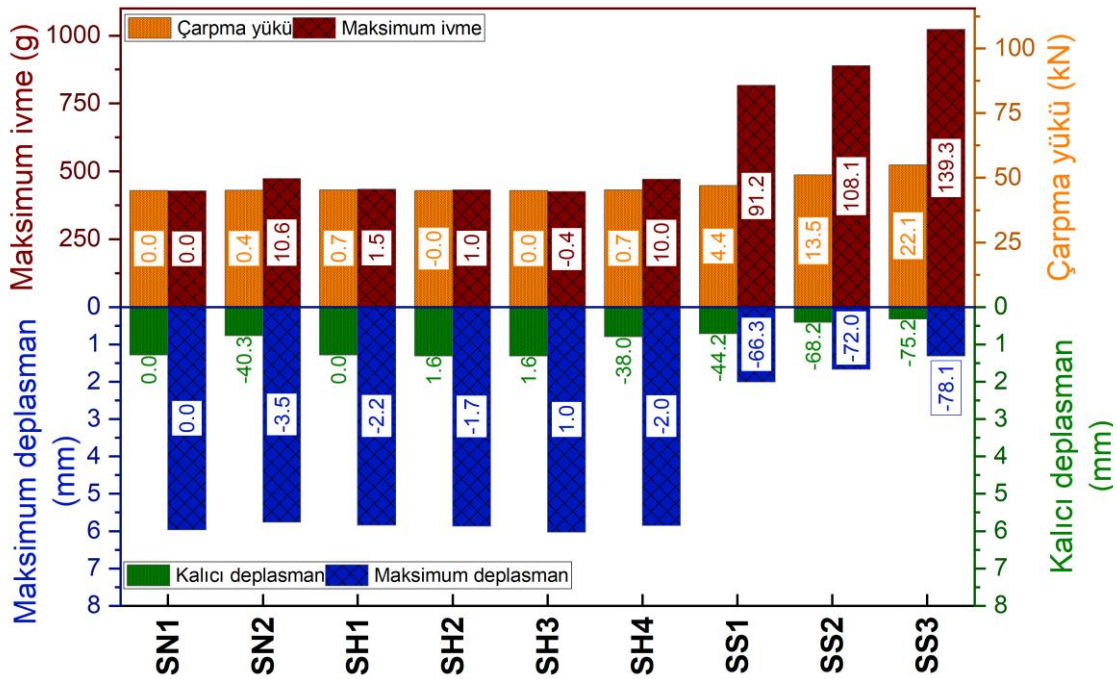


Şekil 6.2. Farklı betonun özellikleri açısından karışım gruplarından elde edilen en yüksek performansa ait görelî yüzdeler

Katkı maddeleri betonun maliyetini arttırmaktadır. Bu artış, katkı maddeleri içeriğiyle orantılı olup nano katkı maddelerinin kullanıldığı durumda daha yüksektir. Betonun maliyeti açısından referans betona göre en yüksek artış %1639.6 olup %1 nano-Fe₂O₃ içeren betonda (NF1) bulunmuştur. Beton maliyeti açısından en düşük etki yaratan malzemeler atık malzemelerden üretilen katkı maddeleri olmuştur.

6.1.2. Betonarme plakların çarpma testine ait sonuçlar

İncelenen betonlar arasında çarpma dayanımı açısından en yüksek performans gösteren beton (STF1), referans betonla birlikte farklı tipte betonarme plakları üretmek için kullanılmıştır. Betonarme plaklar, ağırlık düşürme deneyi kullanılarak test edilmiştir. Betonarme plaklardan elde edilen çarpma yükünün, maksimum ivmenin, maksimum deplasmanın ve kalıcı deplasmanın değerleri ve değişim yüzdeleri Şekil 6.3.'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Numunelerden elde edilen çarpma yükünün, maksimum ivmenin, maksimum deplasmanın ve kalıcı deplasmanın değerleri ve değişim yüzdeleri

Şekilden de görüldüğü gibi, farklı betonarme plaklardan yakın değerlere sahip olan çarpma yükü elde edilmiştir. Bu durum, test düzeneğinin etkinliğini ve sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybının ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu göstermektedir.

Çarpma yükünde gözlenen az farklılıklar, numunelerin dayanımındaki ve rijitliğindeki farklılıklara bağlıdır.

Normal betona kıyasla, çelik lif kullanımının betonarme plağın çarpma performansını arttırdığı gözlenmiştir. Çelik lif, maksimum ivme değerini %10.6 oranında arttırmış ve maksimum ve kalıcı deplasman değerlerini sırasıyla %3.5 ve %40.3 oranlarında azaltmıştır. Çelik lifler ayrıca betonarme plağın arka yüzeyinde oluşan çatlakların genişliğini azaltmıştır. Öte yandan, çelik lif kullanımının betonarme plağın maliyetini arttırdığı görülmüştür.

Çelik lif donatılı betonun fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plağın yalnızca bir katmanında kullanılması çarpma performansı üzerinde referans betonarme plağa göre önemli bir etki yaratmamıştır. Bu durumda, maksimum ivme açısından en yüksek artış %0.7 (SH1 betonarme plağı), maksimum ve kalıcı deplasmanlar açısından en yüksek azalma ise sırasıyla %2.2 (SH1 betonarme plağı) ve %1.6'dır (SH2 ve SH3 betonarme plakları). Bununla birlikte, çelik lifli betonun üst ve alt katmanlarda kullanılması (SH4) çarpma performansını tamamen çelik lifli betondan üretilen betonarme plağına (SN2) yakın bir düzeye çıkarmıştır. SN2 betonarme plağına göre, SH4 betonarme plağından elde edilen maksimum ivme yalnızca %0.5 daha düşük, maksimum ve kalıcı deplasmanlar ise sırasıyla %1.6 ve %3.9 daha yüksektir. Fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plaklar, SN2 betonarme plağına göre daha düşük maliyete sahiptir. Bu durum, fonksiyonel derecelendirilmiş betonarme plakların uygun şekilde tasarlanması durumunda ekonomik bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Çelik lif donatılı betondan üretilmiş olan betonarme plakta çelik levha kullanılması, betonarme plağın maliyetini daha da arttırmasına rağmen rijitliğini, tokluğunu ve dayanımını da önemli ölçüde arttırmıştır. Sonuç olarak, çarpma dayanımı kayda değer ölçüde artmış ve çatlakların sayısı, genişliği ve yayılımı önemli ölçüde sınırlandırılmıştır. Bu artış çelik levhanın betonarme plağın çekme tarafında kullanıldığı durumda daha yüksek olmuştur. SN1 betonarme plağına göre, SS1 betonarme plağından (çelik levha ön yüzeyinde bulunmakta) elde edilen maksimum ivme %91.2 oranında daha yüksek, maksimum ve kalıcı deplasmanlar ise sırasıyla %66.3 ve %44.2 oranlarında daha düşüktür. Öte taraftan, arka yüzeyinde çelik levha bulunan betonarme plakta (SS2 betonarme plağı) maksimum ivmedeki artış SN1 betonarme plağına göre %108.1, maksimum ve kalıcı deplasmanlardaki azalma ise sırasıyla %72 ve %68.2'dir.

İncelenen tüm betonarme plaklar arasında en yüksek çarpma performansı gösteren plak, 2 adet çelik levha (1 adet ön yüzeyde ve 1 adet arka yüzeyde) içeren betonarme

plaktır. Bu betonarme plak, referans betonarme plağa kıyasla %22.1 oranında daha yüksek maksimum çarpma yüküne, %139.3 oranında daha yüksek maksimum ivmeye, %78.1 oranında daha düşük maksimum deplasmana ve %75.2 oranında daha düşük kalıcı deplasmana sahiptir.

Abaqus yazılımından elde edilen nümerik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında SE modellerinin test numunelerine göre daha rijit davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. SE modelleri, maksimum çarpma yükü değerlerini, maksimum ivme değerlerini ve çatlak dağılımını doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir. Öte yandan, nümerik ve deneysel maksimum ve kalıcı deplasman değerleri arasında bazı farklılıklar görülmüştür. Bu farklılıklar, SE modellerinde dikkate alınamayan fakat gerçek durumda bulunan betonun heterojenliğine ve anizotropisine bağlıdır. Ayrıca, SE modelleri tanımlanan mesnet koşullarını tam anlamıyla uygulayabiliyorken gerçek çarpma testi sırasında hafif bir mesnet hareketi oluşabilmektedir.

6.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen bulgular ve sonuçlar göz önüne alınarak gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik bazı öneriler aşağıda verilmiştir.

- Nano katkı maddelerinin, çelik lifin, PET lifin, atık lastik kauçukların kullanım oranları bu çalışmada incelenenlerden daha yüksek olmaması önerilmektedir. PP lif az miktarda daha fazla oranlarda kullanılabilir.
- Bu çalışmada incelenenlerden farklı katkı maddelerinin kombinasyonları araştırılabilir.
- Katkı maddelerinin, özellikle nano katkı maddeleri, daha az maliyetle üretilmesine yönelik tekniklerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.
- Bu çalışmada, çelik lifin beton kiriş elemanların çarpma dayanımı üzerindeki etkisi, daha yüksek çarpma enerjisine maruz kalan betonarme plakların çarpma performansı üzerindeki etkisinden çok daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılığı öngörebilmek için kapsamlı bir çalışma yapılması çok faydalı olacaktır.
- Fonksiyonel derecelendirilmiş betonda kullanılan katman sayısının ve her katmanda kullanılan beton tipinin betonarme elemanların performansı üzerindeki etkisi daha detaylı bir şekilde araştırılabilir.

- Çelik levhanın boyutlarının ve kalınlıklarının, kullanılan saplamanın türlerinin ve sayısının betonarme plakların çarpma dayanımına etkisi araştırılabilir.
- SE analizinde gerinim hızının malzemenin özellikleri üzerindeki etkisini otomatik olarak uygulayacak şekilde CDP modelinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.



KAYNAKLAR

- Abbas, H., Gupta, N. K. and Alam, M., 2004, Nonlinear response of concrete beams and plates under impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 30 (8–9), 1039–1053.
- Abdel-Kader, M. and Fouda, A., 2014, Effect of reinforcement on the response of concrete panels to impact of hard projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, 63, 1–17.
- Abdelmonem, A., El-Feky, M. S., Nasr, E.-S. A. R. and Kohail, M., 2019, Performance of high strength concrete containing recycled rubber, *Construction and Building Materials*, 227, 116660.
- Abid, S. R., Gunasekaran, M., Ali, S. H., Kadhum, A. L., Al-Gasham, T. S., Fediuk, R., Vatin, N. and Karelina, M., 2021, Impact performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete against repeated drop weight impact, *Crystals*, 11 (2), 91.
- Adamu, M., Ibrahim, Y. E., Al-Atroush, M. E. and Alanazi, H., 2021, Mechanical properties and durability performance of concrete containing calcium carbide residue and nano silica, *Materials*, 14 (22), 6960.
- Adhikary, S. Das, Li, B. and Fujikake, K., 2016, State-of-the-art review on low-velocity impact response of reinforced concrete beams, *Magazine of Concrete Research*, 68 (14), 701–723.
- Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T., 2015, Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers, *Construction and Building Materials*, 94, 73–82.
- Aiello, M. A. and Leuzzi, F., 2010, Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state, *Waste Management*, 30 (8–9), 1696–1704.
- Aktas, M. and Sumer, Y., 2014, Nonlinear finite element analysis of damaged and strengthened reinforced concrete beams, *Journal of Civil Engineering and Management*, 20 (2), 201–210.
- Al-Bayati, A. J. and Al-Zubaidi, H. A., 2018, Inventory of nanomaterials in construction products for safety and health, *Journal of Construction Engineering and Management*, 144 (9), 6018004.
- Al-Hadithi, A. I. and Hilal, N. N., 2016, The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers, *Journal of Building Engineering*, 8, 20–28.
- Al-Hadithi, A. I., Noaman, A. T. and Mosleh, W. K., 2019, Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC), *Composite Structures*, 224, 111021.

- Al-Hagri, M. G. and Döndüren, M. S., 2022, Effect and optimization of incorporation of nano-SiO₂ into cement-based materials – a review, *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 13 (1), 36.
- Al-Tayeb, M. M., Abu Bakar, B. H., Akil, H. M. and Ismail, H., 2013, Performance of rubberized and hybrid rubberized concrete structures under static and impact load conditions, *Experimental Mechanics*, 53 (3), 377–384.
- Al-Tayeb, M. M., Abu Bakar, B. H., Ismail, H. and Akil, H. M., 2013, Effect of partial replacement of sand by recycled fine crumb rubber on the performance of hybrid rubberized-normal concrete under impact load: experiment and simulation, *Journal of Cleaner Production*, 59, 284–289.
- Alavi Nia, A., Hedayatian, M., Nili, M. and Sabet, V. A., 2012, An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 46, 62–73.
- Ali Emadi, A. and Modarres, A., 2021, Impact of crumb rubber particles on the fracture parameters of concrete through WFM, SEM and BEM, *Construction and Building Materials*, 305, 124693.
- Ali, T. K. M., Hilal, N., Faraj, R. H. and Al-Hadithi, A. I., 2020, Properties of eco-friendly pervious concrete containing polystyrene aggregates reinforced with waste PET fibers, *Innovative Infrastructure Solutions*, 5 (3), 1–16.
- Alwesabi, E. A. H., Bakar, B. H. A., Alshaikh, I. M. H., Zeyad, A. M., Altheeb, A. and Alghamdi, H., 2021, Experimental investigation on fracture characteristics of plain and rubberized concrete containing hybrid steel-polypropylene fiber, *Structures*, 33, 4421–4432.
- Alwi Assaggaf, R., Uthman Al-Dulaijan, S., Maslehuddin, M., Baghabra Al-Amoudi, O. S., Ahmad, S. and Ibrahim, M., 2022, Effect of different treatments of crumb rubber on the durability characteristics of rubberized concrete, *Construction and Building Materials*, 318, 126030.
- Aly, M., Hashmi, M. S. J., Olabi, A. G., Messeiry, M., Abadir, E. F. and Hussain, A. I., 2012, Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar, *Materials & Design*, 33, 127–135.
- Amin, M. and Abu el-Hassan, K., 2015, Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 80, 116–124.
- Anadolu Ajansı, 2022, *Samsun'da heyelan nedeniyle iki katlı bina zarar gördü* [online], <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/samsunda-heyelan-nedeniyle-iki-katli-bina-zarar-gordu/2574180> [Ziyaret Tarihi: 17 Eylül 2022].
- Anas, S. M. and Alam, M., 2022, Role of shear reinforcements on the punching shear resistance of two-way RC slab subjected to impact loading, *Materials Today:*

Proceedings.

- Anas, S. M., Alam, M. and Shariq, M., 2022a, Damage response of conventionally reinforced two-way spanning concrete slab under eccentric impacting drop weight loading, *Defence Technology*.
- Anas, S. M., Alam, M. and Shariq, M., 2022b, Behavior of two-way RC slab with different reinforcement orientation layouts of tension steel under drop load impact, *Materials Today: Proceedings*.
- Anıl, Ö., Durucan, C., Erdem, R. T. and Yorgancilar, M. A., 2016, Experimental and numerical investigation of reinforced concrete beams with variable material properties under impact loading, *Construction and Building Materials*, 125, 94–104.
- Anıl, Ö., Kantar, E. and Yılmaz, M. C., 2015, Low velocity impact behavior of RC slabs with different support types, *Construction and Building Materials*, 93, 1078–1088.
- Ankamma, V. and Srujan Kumar, A., 2022, Investigation study of enhance the strength by using hybrid nano-composites on conventional cement concrete, *Materials Today: Proceedings*.
- Ardalan, R. B., Jamshidi, N., Arabameri, H., Joshaghani, A., Mehrinejad, M. and Sharafi, P., 2017, Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-SiO₂ oxide and spraying nanosilicon practices, *Construction and Building Materials*, 146, 128–135.
- Arefi, M. R., Javeri, M. R. and Mollaahmadi, E., 2011, To study the effect of adding Al₂O₃ nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of cement mortar, *Life Science Journal*, 8 (4), 613–617.
- Arif, M., Al-Hagri, M. G., Shariq, M., Rahman, I., Hassan, A. and Baqi, A., 2020, Mechanical properties and microstructure of micro- and nano-additives-based modified concrete composites: a sustainable solution, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 101 (1), 89–104.
- Arora, H., Hooper, P. A. and Dear, J. P., 2011, Dynamic response of full-scale sandwich composite structures subject to air-blast loading, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (11), 1651–1662.
- ASTM C1018, 1997, Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (Using beam with third-point loading), ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C1609, 2010, Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading), ASTM International, West Conshohocken.
- Atahan, A. O. and Yücel, A. Ö., 2012, Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation, *Construction and Building Materials*, 36, 617–622.

- Bahadori, H. and Hosseini, P., 2012, Reduction of cement consumption by the aid of silica nano-particles (investigation on concrete properties), *Journal of Civil Engineering and Management*, 18 (3), 416–425.
- Banyhussan, Q. S., Yıldırım, G., Anıl, Ö., Erdem, R. T., Ashour, A. and Şahmaran, M., 2019, Impact resistance of deflection-hardening fiber reinforced concretes with different mixture parameters, *Structural Concrete*, 20 (3), 1036–1050.
- Barbhuiya, S. and Qureshi, M., 2015, Applications of Nanotechnology in Cement and Concrete Science, Handbook of Research on Diverse Applications of Nanotechnology in Biomedicine, Chemistry and Engineering, IGI Global, 624–639.
- BBC, 2018, *Car hurled into upper floor of California building* [online], <https://www.bbc.com/news/world-us-canada-42688747> [Ziyaret Tarihi: 17 Eylül 2022].
- Behfarnia, K. and Salemi, N., 2013, The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete, *Construction and Building Materials*, 48, 580–584.
- Behzadian, R. and Shahrajabian, H., 2019, Experimental study of the effect of nano-silica on the mechanical properties of concrete/PET composites, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23 (8), 3660–3668.
- Beigi, M. H., Berenjian, J., Omran, O. L., Nik, A. S. and Nikbin, I. M., 2013, An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting concrete, *Materials & Design*, 50, 1019–1029.
- Benaicha, M., Hafidi Alaoui, A., Jalbaud, O. and Burtschell, Y., 2019, Dosage effect of superplasticizer on self-compacting concrete: correlation between rheology and strength, *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (2), 2063–2069.
- Bhuvaneshwari, B., Sasmal, S. and Iyer, N. R., 2011, Nanoscience to nanotechnology for civil engineering: proof of concepts, *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Recent Researches in Geography, Geology, Energy, Environment and Biomedicine (GEMESD'11)*, 230–235.
- Bi, J., Pane, I., Hariandja, B. and Imran, I., 2012, The use of nanosilica for improving of concrete compressive strength and durability, *Applied Mechanics and Materials*, 204–208, 4059–4062.
- Bignozzi, M. C. and Sandrolini, F., 2006, Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 36 (4), 735–739.
- Biricik, H. and Sarier, N., 2014, Comparative study of the characteristics of nano silica-, silica fume- and fly ash-incorporated cement mortars, *Materials Research*, 17 (3), 570–582.
- Bolhassani, M. and Samani, M., 2015, Effect of type, size, and dosage of nanosilica and microsilica on properties of cement paste and mortar, *ACI Materials Journal*, 112

(2), 1–7.

- Bui, N. K., Satomi, T. and Takahashi, H., 2018, Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study, *Waste Management*, 78, 79–93.
- CEB-FIP, 1988, Concrete structures under impact and impulsive loading: Synthesis report, Comite Euro-International Du Beton, Bulletin D'Information, Lausanne, Switzerland.
- CEB-FIP, 1990, CEB-FIP model code: Design code, International Federation for Structural Concrete.
- CEB-FIP, 2010, CEB-FIP. Model code for concrete structures., International Federation for Structural Concrete.
- Chen, C., Chen, X. and Zhang, J., 2021, Experimental study on flexural fatigue behavior of self-compacting concrete with waste tire rubber, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28 (16), 1691–1702.
- Chen, W., Pham, T. M., Elchalakani, M., Li, H., Hao, H. and Chen, L., 2020, Experimental and numerical study of basalt frp strip strengthened rc slabs under impact loads, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20 (06), 2040001.
- Choolaei, M., Rashidi, A. M., Ardjmand, M., Yadegari, A. and Soltanian, H., 2012, The effect of nanosilica on the physical properties of oil well cement, *Materials Science and Engineering: A*, 538, 288–294.
- Cibilakshmi, G. and Jegan, J., 2020, A DOE approach to optimize the strength properties of concrete incorporated with different ratios of PVA fibre and nano-Fe₂O₃, *Advanced Composites Letters*, 29, 2633366X20913882.
- Çivici, F., 2006, Çelik lif donatılı betonun eğilme tokluğu, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 (2), 183–188.
- Crucho, J. M. L., Neves, J. M. C. das, Capitão, S. D. and Picado-Santos, L. G. de, 2018, Mechanical performance of asphalt concrete modified with nanoparticles: Nanosilica, zero-valent iron and nanoclay, *Construction and Building Materials*, 181, 309–318.
- Daudeville, L. and Malécot, Y., 2011, Concrete structures under impact, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15 (sup1), 101–140.
- Demirhan, S., Yıldırım, G., Banyhussan, Q. S., Koca, K., Anıl, Ö., Erdem, R. T. and Şahmaran, M., 2019, Impact behaviour of nano-modified deflection-hardening fibre reinforced concretes, *Magazine of Concrete Research*, 1–23.
- Dey, V., Bonakdar, A. and Mobasher, B., 2014, Low-velocity flexural impact response of fiber-reinforced aerated concrete, *Cement and Concrete Composites*, 49, 100–110.

- Döndüren, M. S. and Al-Hagri, M. G., 2022, A review of the effect and optimization of use of nano-TiO₂ in cementitious composites, *Research on Engineering Structures and Materials*, 8 (2), 283–305.
- Du, H., Du, S. and Liu, X., 2015, Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 82, 114–122.
- Eisa, A. S., Elshazli, M. T. and Nawar, M. T., 2020, Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 252, 119078.
- Eisa, A. S., Gab Allah, A., Mahmoud, R. S. and Ibrahim, A., 2021, Flexural and shear behavior of rubberized high strength reinforced concrete beams strengthened with CFRP, *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 10 (3), 98–105.
- El-Dieb, A. S., 2009, Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers, *Materials & Design*, 30 (10), 4286–4292.
- Elnagar, A. B., Afefy, H. M., Baraghith, A. T. and Mahmoud, M. H., 2019, Experimental and numerical investigations on the impact resistance of SHCC-strengthened RC slabs subjected to drop weight loading, *Construction and Building Materials*, 229, 116866.
- Faghih, F. and Ayoub, A. S., 2019, Structural performance of steel-concrete sandwich beams with carbon nanofiber reinforcement, *Engineering Structures*, 187, 177–198.
- Feng, L.-Y., Chen, A.-J. and Liu, H.-D., 2021, Effect of waste tire rubber particles on concrete abrasion resistance under high-speed water flow, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15 (1), 37.
- Feng, W., Liu, F., Yang, F., Li, L. and Jing, L., 2018, Experimental study on dynamic split tensile properties of rubber concrete, *Construction and Building Materials*, 165, 675–687.
- Feng, W., Liu, F., Yang, F., Li, L., Jing, L., Chen, B. and Yuan, B., 2019, Experimental study on the effect of strain rates on the dynamic flexural properties of rubber concrete, *Construction and Building Materials*, 224, 408–419.
- Foti, D., 2011, Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers, *Construction and Building Materials*, 25 (4), 1906–1915.
- Foti, D. and Paparella, F., 2014, Impact behavior of structural elements in concrete reinforced with PET grids, *Mechanics Research Communications*, 57, 57–66.
- Genikomsou, A. S. and Polak, M. A., 2015, Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS, *Engineering Structures*, 98, 38–48.

- Ghafari, E., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A. and Durães, L., 2014, The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete, *Materials & Design*, 59, 1–9.
- Givi, A. N., Rashid, S. A., Aziz, F. N. A. and Salleh, M. A. M., 2010, Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete, *Composites Part B: Engineering*, 41 (8), 673–677.
- Gravina, R. J. and Xie, T., 2022, Toward the development of sustainable concrete with Crumb Rubber: Design-oriented Models, Life-Cycle-Assessment and a site application, *Construction and Building Materials*, 315, 125565.
- Grinys, A., Sivilevičius, H., Pupeikis, D. and Ivanauskas, E., 2013, Fracture of concrete containing crumb rubber, *Journal of Civil Engineering and Management*, 19 (3), 447–455.
- Güneyisi, E., Gesoglu, M., Özturan, T. and İpek, S., 2015, Fracture behavior and mechanical properties of concrete with artificial lightweight aggregate and steel fiber, *Construction and Building Materials*, 84, 156–168.
- Gupta, T., Sharma, R. K. and Chaudhary, S., 2015, Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume, *International Journal of Impact Engineering*, 83, 76–87.
- Habib, A., Yildirim, U. and Eren, O., 2020, Mechanical and dynamic properties of high strength concrete with well graded coarse and fine tire rubber, *Construction and Building Materials*, 246, 118502.
- Han, Q.-H., Yang, G. and Xu, J., 2018, Experimental study on the relationship between acoustic emission energy and fracture energy of crumb rubber concrete, *Structural Control and Health Monitoring*, 25 (10), e2240.
- Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W. and Raghavan, B., 2016, Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes, *Composites Part B: Engineering*, 86, 214–220.
- Hao, X., Wei, Y., Zhang, T., Chen, Z., Zhang, C. and Teng, T., 2022, Comparative study of the effects of different nanomaterials on the failure process of saturated concrete in an underground reservoir of a coal mine, *Energy Exploration & Exploitation*, 014459872211096.
- Hao, Y. and Hao, H., 2014, Influence of the concrete DIF model on the numerical predictions of RC wall responses to blast loadings, *Engineering Structures*, 73, 24–38.
- Haruehansapong, S., Pulngern, T. and Chucheepsakul, S., 2014, Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO₂, *Construction and Building Materials*, 50, 471–477.

- He, X. and Shi, X., 2008, Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2070, 13–21.
- Heikal, M., Zaki, M. E. A. and Ibrahim, S. M., 2021, Characterization, hydration, durability of nano-Fe₂O₃-composite cements subjected to sulphates and chlorides media, *Construction and Building Materials*, 269, 121310.
- Hillerborg, A., 1985, The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete, *Materials and Structures*, 18 (4), 291–296.
- Hillerborg, A., Modéer, M. and Petersson, P.-E., 1976, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 6 (6), 773–781.
- Hou, P., Kawashima, S., Kong, D., Corr, D. J., Qian, J. and Shah, S. P., 2013, Modification effects of colloidal nanoSiO₂ on cement hydration and its gel property, *Composites Part B: Engineering*, 45 (1), 440–448.
- Hou, P., Kawashima, S., Wang, K., Corr, D. J., Qian, J. and Shah, S. P., 2013, Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash–cement mortar, *Cement and Concrete Composites*, 35 (1), 12–22.
- Hrynyk, T., 2013, Behaviour and modelling of reinforced concrete slabs and shells under static and dynamic loads, *PhD Thesis, Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada*.
- Hrynyk, T. D. and Vecchio, F. J., 2014, Behavior of steel fiber-reinforced concrete slabs under impact load, *ACI Structural Journal*, 111 (5).
- Hsie, M., Tu, C. and Song, P. S., 2008, Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete, *Materials Science and Engineering: A*, 494 (1), 153–157.
- Iqbal, M. A., Kumar, V. and Mittal, A. K., 2019, Experimental and numerical studies on the drop impact resistance of prestressed concrete plates, *International Journal of Impact Engineering*, 123, 98–117.
- Jalal, M. and Jalal, H., 2020, Behavior assessment, regression analysis and support vector machine (SVM) modeling of waste tire rubberized concrete, *Journal of Cleaner Production*, 273, 122960.
- Jalal, M., Pouladkhan, A., Harandi, O. F. and Jafari, D., 2015, Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 94, 90–104.
- Jalal, M., Ramezani-pour, A. A. and Pool, M. K., 2013, Split tensile strength of binary blended self compacting concrete containing low volume fly ash and TiO₂ nanoparticles, *Composites Part B: Engineering*, 55, 324–337.

- Jayapalan, A. R., Lee, B. Y. and Kurtis, K. E., 2013, Can nanotechnology be 'green'? Comparing efficacy of nano and microparticles in cementitious materials, *Cement and Concrete Composites*, 36, 16–24.
- Joshaghani, A., Balapour, M., Mashhadian, M. and Ozbakkaloglu, T., 2020, Effects of nano-TiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ on rheology, mechanical and durability properties of self-consolidating concrete (SCC): An experimental study, *Construction and Building Materials*, 245, 118444.
- Juenger, M. C. G. and Siddique, R., 2015, Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, *Cement and Concrete Research*, 78, 71–80.
- Kadhim, A. A. and Al-Mutairee, H. M. K., 2020, An experimental study on behavior of sustainable rubberized concrete mixes, *Civil Engineering Journal*, 6 (7), 1273–1285.
- Kavya Sameera, V. and Keshav, L., 2022, Properties and performance of steel fiber reinforced concrete beam structure – Review, *Materials Today: Proceedings*.
- Kawashima, S., Hou, P., Corr, D. J. and Shah, S. P., 2013, Modification of cement-based materials with nanoparticles, *Cement and Concrete Composites*, 36, 8–15.
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J. and Wu, Y.-F., 2021, Application of waste tire rubber and recycled aggregates in concrete products: A new compression casting approach, *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105353.
- Kewalramani, M. A. and Syed, Z. I., 2018, Application of nanomaterials to enhance microstructure and mechanical properties of concrete, *International Journal of Integrated Engineering*, 10 (2), 98–104.
- Khalid Ali, O., Ismail Al-Hadithi, A. and Tareq Noaman, A., 2022, Flexural performance of layered PET fiber reinforced concrete beams, *Structures*, 35, 55–67.
- Khan, M. and Ali, M., 2018, Effect of super plasticizer on the properties of medium strength concrete prepared with coconut fiber, *Construction and Building Materials*, 182, 703–715.
- Khan, M., Cao, M., Xie, C. and Ali, M., 2022, Effectiveness of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete under compression, *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00941.
- Khoshakhlagh, A., Nazari, A. and Khalaj, G., 2012, Effects of Fe₂O₃ nanoparticles on water permeability and strength assessments of high strength self-compacting concrete, *Journal of Materials Science & Technology*, 28 (1), 73–82.
- Köksal, F., Şahin, Y., Gencel, O. and Yiğit, İ., 2013, Fracture energy-based optimisation of steel fibre reinforced concretes, *Engineering Fracture Mechanics*, 107, 29–37.
- Kumar, R. and Dev, N., 2022, Mechanical and microstructural properties of rubberized concrete after surface modification of waste tire rubber crumb, *Arabian Journal for*

Science and Engineering, 47, 4571–4587.

- Kumar, V., Iqbal, M. A. and Mittal, A. K., 2017, Impact resistance of prestressed and reinforced concrete slabs under falling weight indenter, *Procedia Structural Integrity*, 6, 95–100.
- Kyivpost, 2021, *Two people killed after gas blast hits apartment building in Russia* [online], <https://www.kyivpost.com/eastern-europe/reuters-two-people-killed-after-gas-blast-hits-apartment-building-in-russia.html> [Ziyaret Tarihi: 17 Eylül 2022].
- Lazaro, A., Yu, Q. L. and Brouwers, H. J. H., 2016, Nanotechnologies for sustainable construction, *Sustainability of Construction Materials (Second Edition)*, 55–78.
- Lee, J., Mahendra, S. and Alvarez, P. J. J., 2010, Nanomaterials in the construction industry: a review of their applications and environmental health and safety considerations, *ACS Nano*, 4 (7), 3580–3590.
- Lee, S. F. and Jacobsen, S., 2011, Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar, *Materials and Structures*, 44 (8), 1451–1465.
- Li, C., Hao, H. and Bi, K., 2017, Numerical study on the seismic performance of precast segmental concrete columns under cyclic loading, *Engineering Structures*, 148, 373–386.
- Li, H., Xiao, H. G., Yuan, J. and Ou, J., 2004, Microstructure of cement mortar with nanoparticles, *Composites Part B: Engineering*, 35 (2), 185–189.
- Li, J. J., Niu, J. G., Wan, C. J., Jin, B. and Yin, Y. L., 2016, Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 118, 27–35.
- Li, W., Luo, Z., Long, C., Wu, C., Duan, W. H. and Shah, S. P., 2016, Effects of nanoparticle on the dynamic behaviors of recycled aggregate concrete under impact loading, *Materials & Design*, 112, 58–66.
- Liu, F., Chen, G., Li, L. and Guo, Y., 2012, Study of impact performance of rubber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 36, 604–616.
- Liu, R., Xiao, H., Geng, J., Du, J. and Liu, M., 2020, Effect of nano-CaCO₃ and nano-SiO₂ on improving the properties of carbon fibre-reinforced concrete and their pore-structure models, *Construction and Building Materials*, 244, 118297.
- Lu, J., Wang, Y. and Zhai, X., 2021, Response of flat steel-concrete-corrugated steel sandwich panel under drop-weight impact load by a hemi-spherical head, *Journal of Building Engineering*, 44 (May), 102890.
- Máca, P., Sovják, R. and Konvalinka, P., 2014, Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact, *International Journal of Impact Engineering*, 63, 158–163.

- Madandoust, R., Mohseni, E., Mousavi, S. Y. and Namnevis, M., 2015, An experimental investigation on the durability of self-compacting mortar containing nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃ and nano-CuO, *Construction and Building Materials*, 86, 44–50.
- Malvar, L. J. and Crawford, J. E., 1998, Dynamic increase factors for concrete, Naval Facilities Engineering Service Center Port Hueneme CA.
- Manoharan, P., Ravichandran, P. T., Annadurai, R. and Kannan Rajkumar, P. R., 2019, Studies on properties of concrete using crumb rubber as fine aggregate, *International Computing and on Intelligent Conference Applications Proceedings of ICICA 2018*, 197–203.
- Marthong, C. and Marthong, S., 2016, An experimental study on the effect of PET fibers on the behavior of exterior RC beam-column connection subjected to reversed cyclic loading, *Structures*, 5, 175–185.
- Medine, M., Trouzine, H., de Aguiar, J. B. and Djadouni, H., 2020, Life cycle assessment of concrete incorporating scrap tire rubber: comparative study, *Revue Nature et Technologie*, 12 (2), 1–11.
- Mendis, A. S. M., Al-Deen, S. and Ashraf, M., 2017, Effect of rubber particles on the flexural behaviour of reinforced crumbed rubber concrete beams, *Construction and Building Materials*, 154, 644–657.
- Mhaya, A. M., Baghban, M. H., Faridmehr, I., Huseien, G. F., Abidin, A. R. Z. and Ismail, M., 2021, Performance evaluation of modified rubberized concrete exposed to aggressive environments, *Materials*, 14 (8), 1900.
- Miranda de Souza, A., Soares de Lima, G. E., Nalon, G. H., Salgado Lopes, M. M., Luís de Oliveira Júnior, A., Rodrigues Lopes, G. J., José de Andrade Olivier, M., Pedroti, L. G., Lopes Ribeiro, J. C. and Franco de Carvalho, J. M., 2021, Application of the desirability function for the development of new composite eco-efficiency indicators for concrete, *Journal of Building Engineering*, 40, 102374.
- Mohseni, E., Khotbehsara, M. M., Naseri, F., Monazami, M. and Sarker, P., 2016, Polypropylene fiber reinforced cement mortars containing rice husk ash and nano-alumina, *Construction and Building Materials*, 111, 429–439.
- Mohseni, E., Miyandehi, B. M., Yang, J. and Yazdi, M. A., 2015, Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-TiO₂ on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash, *Construction and Building Materials*, 84, 331–340.
- Mohseni, E. and Tsavdaridis, K. D., 2016, Effect of nano-alumina on pore structure and durability of class f fly ash self-compacting mortar, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9 (2), 323–333.
- Morales-Alonso, G., Cendón, D. A., Gálvez, F., Erice, B. and Sánchez-Gálvez, V., 2011, Blast response analysis of reinforced concrete slabs: experimental procedure and numerical simulation, *Journal of Applied Mechanics*, 78 (5), 51010.

- Mousavimehr, M. and Nematzadeh, M., 2020, Post-heating flexural behavior and durability of hybrid PET–Rubber aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 265, 120359.
- Murali, G. and Ramprasad, K., 2018, A feasibility of enhancing the impact strength of novel layered two stage fibrous concrete slabs, *Engineering Structures*, 175 (July), 41–49.
- Nazari, A. and Riahi, S., 2011, The effects of curing medium on the flexural strength and water permeability of cementitious composites containing Fe_2O_3 nanofillers, *International Journal of Materials Research*, 102 (10), 1312–1317.
- Nguyena, V. D., Ríoa, O. and Sánchez-Gálvezb, V., 2014, Performance of hybrid cement composite elements under drop-weight impact load, *Materiales de Construcción*, 64 (314), e017.
- Niewiadomski, P., Hoła, J. and Ćwirzeń, A., 2018, Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18 (3), 877–886.
- Nikbin, I. M., Dezhampannah, S., Charkhtab, S., Mehdipour, S., Shahvareh, I., Ebrahimi, M., Pournasir, A. and Pourghorban, H., 2022, Life cycle assessment and mechanical properties of high strength steel fiber reinforced concrete containing waste PET bottle, *Construction and Building Materials*, 337, 127553.
- Nili, M. and Afroughsabet, V., 2010a, Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 37 (8), 879–886.
- Nili, M. and Afroughsabet, V., 2010b, The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 24 (6), 927–933.
- Nili, M., Ghorbankhani, A. H., AlaviNia, A. and Zolfaghari, M., 2016, Assessing the impact strength of steel fibre-reinforced concrete under quasi-static and high velocity dynamic impacts, *Construction and Building Materials*, 107, 264–271.
- Noaman, A. T., Abu Bakar, B. H., Akil, H. M. and Alani, A. H., 2017, Fracture characteristics of plain and steel fibre reinforced rubberized concrete, *Construction and Building Materials*, 152, 414–423.
- Noorvand, H., Ali, A. A. A., Demirboga, R., Farzadnia, N. and Noorvand, H., 2013, Incorporation of nano TiO_2 in black rice husk ash mortars, *Construction and Building Materials*, 47, 1350–1361.
- Oke, A. E., Aigbavboa, C. O. and Semenya, K., 2018, Impacts of Nanotechnology Adoption on Sustainable Construction, *Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes Conference*, 286–293.
- Öksüzer, N., 2021, Kirişlerde Eğilme Yüklemesi Etkisinde Şekil Değiştirme Sertleşmesi

- Gösteren Çimento Bağlayıcılı Kompozitlerin Kendiliğinden İyileşme Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.*
- Oltulu, M. and Altun, M. G., 2018, Betonun çarpma dayanımının tespitinde ağırlık düşürme deney yöntemi ve yapılan çalışmalar, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), 155-163.
- Oltulu, M. and Şahin, R., 2011, Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume, *Materials Science and Engineering: A*, 528 (22–23), 7012–7019.
- Oltulu, M. and Şahin, R., 2013, Effect of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study, *Energy and Buildings*, 58, 292–301.
- Omidinasab, F., Moazami Goodarzi, S. and Sahraei Moghadam, A., 2022, Characterization and optimization of mechanical and impact properties of steel fiber reinforced recycled concrete, *International Journal of Civil Engineering*, 20 (1), 41–55.
- Opkon, 2021, *Test makinesi: pozisyon ölçüm sensörleri* [online], <https://www.opkon.com.tr/Content/media/file-fb29cd7f.pdf> [Ziyaret Tarihi: 17 Ekim 2022].
- Othman, H., 2016, Performance of ultra-high performance fibre reinforced concrete plates under impact loads, *PhD Thesis, Ryerson University, Toronto, Ontario, Canada.*
- Othman, H. and Marzouk, H., 2014, Numerical investigation of reinforced concrete slabs under impact loading, *10th Fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, 263–270.
- Othman, H. and Marzouk, H., 2016a, Impact response of ultra-high-performance reinforced concrete plates, *ACI Structural Journal*, 113 (6), 1325–1334.
- Othman, H. and Marzouk, H., 2016b, An experimental investigation on the effect of steel reinforcement on impact response of reinforced concrete plates, *International Journal of Impact Engineering*, 88, 12–21.
- Othman, H. and Marzouk, H., 2017, Finite-element analysis of reinforced concrete plates subjected to repeated impact loads, *Journal of Structural Engineering*, 143 (9), 4017120.
- Othman, H. and Marzouk, H., 2018, Applicability of damage plasticity constitutive model for ultra-high performance fibre-reinforced concrete under impact loads, *International Journal of Impact Engineering*, 114, 20–31.
- Öz, A., 2014, Uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen hibrid lifli betonların bazı özelliklerinin araştırılması, *Doktora Tez, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk*

Üniversitesi, Erzurum.

- Ozturk, O. and Ozyurt, N., 2022, Sustainability and cost-effectiveness of steel and polypropylene fiber reinforced concrete pavement mixtures, *Journal of Cleaner Production*, 363, 132582.
- PCB Piezotronics, 2022a, *Model 200C50 ICP® force sensor installation and operating manual* [online], <https://www.pcb.com/products?m=200C50> [Ziyaret Tarihi: 09 Ekim 2022].
- PCB Piezotronics, 2022b, *Test & measurement sensors and instrumentation* [online], <http://www.pcb.com/Resources/ProductLiterature/PCBTestMeasurementSensorsInstrumentationCatalog> [Ziyaret Tarihi: 09 Ekim 2022].
- Pelisser, F., Montedo, O. R. K., Gleize, P. J. P. and Roman, H. R., 2012, Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete, *Materials Research*, 15 (4), 679–686.
- Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T. A. and Bernardin, A. M., 2011, Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition, *Journal of Cleaner Production*, 19 (6–7), 757–763.
- Pereira de Oliveira, L. A. and Castro-Gomes, J. P., 2011, Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar, *Construction and Building Materials*, 25 (4), 1712–1717.
- Raffoul, S., Garcia, R., Pilakoutas, K., Guadagnini, M. and Medina, N. F., 2016, Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation, *Construction and Building Materials*, 124, 391–404.
- Rahmani, T., Kiani, B., Shekarchi, M. and Safari, A., 2012, Statistical and experimental analysis on the behavior of fiber reinforced concretes subjected to drop weight test, *Construction and Building Materials*, 37, 360–369.
- Ramana, P. V and Surendranath, A., 2022, Assessment of endurance and microstructural properties effect on polypropylene concrete, *Materials Today: Proceedings*, 52, 2184–2191.
- Rasheed, L. S., Shaban, A. M. and Abdulrasool, A. T., 2022, Mechanical and structural characteristics of pet fiber reinforced concrete plates, *Smart Science*, 10 (3), 198–212.
- Reches, Y., 2018, Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives, *Construction and Building Materials*, 175, 483–495.
- Reda Taha, M. M., El-Dieb, A. S., Abd El-Wahab, M. A. and Abdel-Hameed, M. E., 2008, Mechanical, fracture and microstructural investigations of rubber concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20 (10), 640–649.
- RILEM 50-FMC Draft Recommendation, 1985, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point tests on notched beams, *Materials and*

- Structures*, 18 (106), 287–290.
- Safiuddin, M., Gonzalez, M., Cao, J. and Tighe, S. L., 2014, State-of-the-art report on use of nano-materials in concrete, *International Journal of Pavement Engineering*, 15 (10), 940–949.
- Sahraei Moghadam, A., Omidinasab, F. and Dalvand, A., 2021, Flexural and impact performance of functionally graded reinforced cementitious composite (FGRCC) panels, *Structures*, 29 (January), 1723–1733.
- Seifan, M., Mendoza, S. and Berenjian, A., 2020, Mechanical properties and durability performance of fly ash based mortar containing nano- and micro-silica additives, *Construction and Building Materials*, 252, 119121.
- Selim Şengel, H., Erol, H., Yılmaz, T., Anıl, Ö., Can Gürdal, H. and Muhammed Uludoğan, A., 2022, Low-velocity impact behavior of two-way RC slab strengthening with carbon TRM strips, *Structures*, 44 (August), 1695–1714.
- Senff, L., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., Hotza, D. and Repette, W. L., 2009, Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars, *Construction and Building Materials*, 23 (7), 2487–2491.
- Senff, L., Modolo, R. C. E., Tobaldi, D. M., Ascensão, G., Hotza, D., Ferreira, V. M. and Labrincha, J. A., 2015, The influence of TiO₂ nanoparticles and polyacrylonitrile fibers on the rheological behavior and hardened properties of mortars, *Construction and Building Materials*, 75, 315–330.
- Şengel, S., Erol, H., Yılmaz, T. and Anıl, Ö., 2022, Investigation of the effects of impactor geometry on impact behavior of reinforced concrete slabs, *Engineering Structures*, 263, 114429.
- Senthil, K., Kubba, Z., Sharma, R. and Thakur, A., 2021, Experimental and numerical investigation on reinforced concrete slab under low velocity impact loading, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1090 (1), 012090.
- Shaikh, F. U. A., 2020, Tensile and flexural behaviour of recycled polyethylene terephthalate (PET) fibre reinforced geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, 245, 118438.
- Siang Ng, D., Paul, S. C., Anggraini, V., Kong, S. Y., Qureshi, T. S., Rodriguez, C. R., Liu, Q. and Šavija, B., 2020, Influence of SiO₂, TiO₂ and Fe₂O₃ nanoparticles on the properties of fly ash blended cement mortars, *Construction and Building Materials*, 258, 119627.
- Silva, D. A., Betioli, A. M., Gleize, P. J. P., Roman, H. R., Gómez, L. A. and Ribeiro, J. L. D., 2005, Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, 35 (9), 1741–1746.
- Silva, J. V., Ismael, R., Carmo, R. N. F., Lourenço, C., Soldado, E., Costa, H. and Júlio, E., 2016, Influence of nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ additions on the shear strength and

- the bending moment capacity of RC beams, *Construction and Building Materials*, 123, 35–46.
- Silva, L. M. e, Christoforo, A. L. and Carvalho, R. C., 2021, Calibration of Concrete Damaged Plasticity Model parameters for shear walls, *Matéria (Rio de Janeiro)*, 26 (1).
- Şimşek, B., Tansel İç, Y. and H Şimşek, E., 2013, A full factorial design based desirability function approach for optimization of properties of C 40/50 concrete class, *Mathematical and Computational Applications*, 18 (3), 330–339.
- Simulia, 2016, ABAQUS 6.14 User's Manuals, Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Sobolev, K., Lin, Z., Flores-Vivian, I. and Pradoto, R., 2016, Nano-engineered cements with enhanced mechanical performance, *Journal of the American Ceramic Society*, 99 (2), 564–572.
- Sohaib, N., Mamoon, R., G, S. and F, S., 2018, Using polypropylene fibers in concrete to achieve maximum strength, *Eighth International Conference On Advances in Civil and Structural Engineering - CSE 2018*, 37–42.
- Soltani, H., Khaloo, A. and Sadraie, H., 2020, Dynamic performance enhancement of RC slabs by steel fibers vs. externally bonded GFRP sheets under impact loading, *Engineering Structures*, 213 (February), 110539.
- Sovják, R., Vavřiník, T., Zatloukal, J., Máca, P., Mičunek, T. and Frydrýn, M., 2015, Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets, *International Journal of Impact Engineering*, 76, 166–177.
- Sowjanya, S. and Adishesu, S., 2022, Statistical analysis of the physical properties of ternary blended concrete, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7 (1), 10.
- Su, Y., Li, J., Wu, C., Wu, P. and Li, Z.-X., 2016, Influences of nano-particles on dynamic strength of ultra-high performance concrete, *Composites Part B: Engineering*, 91, 595–609.
- Tang, R., Wei, Q., Zhang, K., Jiang, S., Shen, Z., Zhang, Y. and Chow, C. W. K., 2022, Preparation and performance analysis of recycled PET fiber reinforced recycled foamed concrete, *Journal of Building Engineering*, 57, 104948.
- TCMB, 2022, *Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları* [online], https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kurlar_tr.html [Ziyaret Tarihi: 06 Ağustos 2022].
- Teizer, J., Venugopal, M., Teizer, W. and Felkl, J., 2011, Nanotechnology and its impact on construction: bridging the gap between researchers and industry professionals, *Journal of Construction Engineering and Management*, 138 (5), 594–604.
- Thomas, B. S. and Chandra Gupta, R., 2016, Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber, *Journal of Cleaner Production*, 113, 86–92.

- TS 706 EN 12620, 2009, Beton agregaları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS 708, 2016, Çelik - Betonarme için - donatı çeliği, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS 802, 2016, Beton karışım tasarımı hesap esasları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2013, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğuve su emme oranının tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2019, Beton–sertleşmiş beton deneyleri–Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2019, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6, 2010, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7, 2019, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2012, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Tu, S., Ren, X., He, J. and Zhang, Z., 2020, Stress–strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: A review, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43 (1), 3–19.
- Uygunoğlu, T., 2008, Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete, *Materials and Structures*, 41 (8), 1441–1449.
- Vadivel, T. S., Thenmozhi, R. and Doddurani, M., 2014, Experimental behaviour of waste tyre rubber aggregate concrete under impact loading, *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 38 (C1+), 251–259.
- Varisha, Zaheer, M. M. and Hasan, S. D., 2021, Mechanical and durability performance of carbon nanotubes (CNTs) and nanosilica (NS) admixed cement mortar, *Materials Today: Proceedings*, 42, 1422–1431.
- Verma, M., Prem, P. R., Rajasankar, J. and Bharatkumar, B. H., 2016, On low-energy impact response of ultra-high performance concrete (UHPC) panels, *Materials & Design*, 92, 853–865.
- Wang, H., Wu, Y. and Cheng, B., 2022, Mechanical properties of alkali-activated concrete containing crumb rubber particles, *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00803.
- Wang, Y., Zhang, S., Niu, D. and Fu, Q., 2022, Quantitative evaluation of the characteristics of air voids and their relationship with the permeability and salt

- freeze–thaw resistance of hybrid steel–polypropylene fiber–reinforced concrete composites, *Cement and Concrete Composites*, 125, 104292.
- Werdine, D., Oliver, G. A., de Almeida, F. A., de Lourdes Noronha, M. and Gomes, G. F., 2021, Analysis of the properties of the self-compacting concrete mixed with tire rubber waste based on design of experiments, *Structures*, 33, 3461–3474.
- Wu, Z., Shi, C., He, W. and Wu, L., 2016, Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 103, 8–14.
- Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H. and Wan, S., 2016, Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC), *Cement and Concrete Composites*, 70, 24–34.
- Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H. and Xie, L., 2018, Effect of SCM and nano-particles on static and dynamic mechanical properties of UHPC, *Construction and Building Materials*, 182, 118–125.
- Xiao, Y., Li, B. and Fujikake, K., 2017, Behavior of reinforced concrete slabs under low-velocity impact, *ACI Structural Journal*, 114 (3), 643–658.
- Yavaş, A., Birol, T., Türker, K., Hasgül, U. and Yazıcı, H., 2020, Improvement on flexural performance of uhpfrc with hybrid steel fiber, *Teknik Dergi*, 10379-10397.
- Yazdi, N. A., Arefi, M. R., Mollaahmadi, E. and Nejand, B. A., 2011, To study the effect of adding Fe₂O₃ nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar, *Life Science Journal*, 8 (4), 550–554.
- Ying, J., Zhou, B. and Xiao, J., 2017, Pore structure and chloride diffusivity of recycled aggregate concrete with nano-SiO₂ and nano-TiO₂, *Construction and Building Materials*, 150, 49–55.
- Yıldırım, G., N, Khiavi, F. E., Anıl, Ö., Şahin, O., Şahmaran, M. and Erdem, R. T., 2020, Performance of engineered cementitious composites under drop-weight impact: Effect of different mixture parameters, *Structural Concrete*, 21 (3), 1051–1070.
- Yılmaz, M. C., Mercimek, Ö., Ghoroubi, R., Anıl, Ö. and Gültop, T., 2021, Investigation of support type effect on plastic hinges in RC beam under impact load, *Structural Concrete*, 22 (4), 2049–2069.
- Yılmaz, T., 2018, Betonarme Kolonların Çarpma Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir*.
- Yılmaz, T., Anıl, Ö. and Tuğrul Erdem, R., 2022, Experimental and numerical investigation of impact behavior of RC slab with different opening size and layout, *Structures*, 35 (May 2021), 818–832.
- Yılmaz, T., Kırac, N. and Anıl, Ö., 2019, Experimental investigation of axially loaded

- reinforced concrete square column subjected to lateral low-velocity impact loading, *Structural Concrete*, 20 (4), 1358–1378.
- Yılmaz, T., Kırış, N., Anıl, Ö., Erdem, R. T. and Hoşkal, V., 2020, Experimental and numerical investigation of impact behavior of reinforced concrete slab with different support conditions, *Structural Concrete*, 21 (6), 2689–2707.
- Yılmaz, T., Kırış, N., Anıl, Ö., Erdem, R. T. and Kaçaran, G., 2020, Experimental investigation of impact behaviour of RC slab with different reinforcement ratios, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 24 (1), 241–254.
- Yılmaz, T., Kırış, N., Anıl, Ö., Erdem, R. T. and Sezer, C., 2018, Low-velocity impact behaviour of two way RC slab strengthening with CFRP strips, *Construction and Building Materials*, 186, 1046–1063.
- Yoo, D.-Y., Yoon, Y.-S. and Banthia, N., 2015, Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content and strain-rate, *Cement and Concrete Composites*, 64, 84–92.
- Yu, R., van Beers, L., Spiesz, P. and Brouwers, H. J. H., 2016, Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC) under pendulum impact loadings, *Construction and Building Materials*, 107, 203–215.
- Yuan, J., Wu, J., Su, T. and Lin, D., 2022, Dynamic Response of Reinforced Recycled Aggregate Concrete Pavement under Impact Loading, *Applied Sciences (Switzerland)*, 12 (17).
- Yusof, M. A., Norazman, N., Ariffin, A., Zain, F. M., Risby, R. and Ng, C. P., 2010, Normal strength steel fiber reinforced concrete subjected to explosive loading, *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 1 (2), 127–136.
- Zafar, I., Rashid, K., Tariq, S., Ali, A. and Ju, M., 2022, Integrating technical-environmental-economical perspectives for optimizing rubber content in concrete by multi-criteria analysis, *Construction and Building Materials*, 319, 125820.
- Zareei, S. A., Ameri, F., Bahrami, N., Shoaiei, P., Moosaei, H. R. and Salemi, N., 2019, Performance of sustainable high strength concrete with basic oxygen steel-making (BOS) slag and nano-silica, *Journal of Building Engineering*, 25 (October 2018), 100791.
- Zhang, H., Liu, Y., Sun, H. and Wu, S., 2016, Transient dynamic behavior of polypropylene fiber reinforced mortar under compressive impact loading, *Construction and Building Materials*, 111, 30–42.
- Zhang, H., Wang, L., Bai, L., Addae, M. and Neupane, A., 2019, Research on the impact response and model of hybrid basalt-macro synthetic polypropylene fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 204, 303–316.
- Zhang, M. and Li, H., 2011, Pore structure and chloride permeability of concrete

- containing nano-particles for pavement, *Construction and Building Materials*, 25 (2), 608–616.
- Zhang, P., Sha, D., Li, Q., Zhao, S. and Ling, Y., 2021, Effect of nano silica particles on impact resistance and durability of concrete containing coal fly ash, *Nanomaterials*, 11 (5), 1296.
- Zhang, P., Xie, N., Cheng, X., Feng, L., Hou, P. and Wu, Y., 2018, Low dosage nano-silica modification on lightweight aggregate concrete, *Nanomaterials and Nanotechnology*, 8, 1–8.
- Zhang, R., Cheng, X., Hou, P. and Ye, Z., 2015, Influences of nano-TiO₂ on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage, *Construction and Building Materials*, 81, 35–41.
- Zhang, R., Wang, H., Ji, J., Suo, Z. and Ou, Z., 2022, Influences of different modification methods on surface activation of waste tire rubber powder applied in cement-based materials, *Construction and Building Materials*, 314, 125191.
- Zhao, W. and Guo, Q., 2018, Experimental study on impact and post-impact behavior of steel-concrete composite panels, *Thin-Walled Structures*, 130, 405–413.
- Zheng, W., Shih, H.-R., Lozano, K. and Mo, Y.-L., 2010, Impact of nanotechnology on future civil engineering practice and its reflection in current civil engineering education, *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 137 (3), 162–173.
- Zhu, W., Bartos, P. J. M. and Porro, A., 2004, Application of nanotechnology in construction, *Materials and Structures*, 37 (9), 649–658.
- Zhuang, C. and Chen, Y., 2019, The effect of nano-SiO₂ on concrete properties: a review, *Nanotechnology Reviews*, 8 (1), 562–572.