



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KALSIYUM ALUMİNAT ÇİMENTOLU ÜÇLÜ
SİSTEMLERLE ÜRETİLEN BETONARME
PLAKLARIN DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Nuri Osman EMEKLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Nuri Osman EMEKLİ tarafından hazırlanan “KALSİYUM ALUMİNAT ÇİMENTOLU ÜÇLÜ SİSTEMLERLE ÜRETİLEN BETONARME PLAKLARIN DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 13/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

Danışman

Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL

Üye

Doç. Dr. Fatih Süleyman BALIK

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından 211004058 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.

Nuri Osman EMEKLİ

13/01/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

KALSIYUM ALUMİNAT ÇİMENTOLU ÜÇLÜ SİSTEMLERLE ÜRETİLEN BETONARME PLAKLARIN DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Nuri Osman EMEKLİ

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

**Danışman: Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL
2023, 138 Sayfa**

Jüri

**Danışman: Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL
Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
Doç. Dr. Fatih Süleyman BALIK**

Yapı inşa yöntemlerinin gelişmesi yer altı ve yer üstünde farklı yapı sistemlerine yönelimi arttırmıştır. Bu çalışma ile farklı yapı sistemlerinin ihtiyaçlarını karşılayabilmek için kalsiyum aluminat çimentolu üçlü sistemli karışımlar hazırlanmıştır. Kalsiyum aluminat çimentosunun geçirdiği dönüşüm reaksiyonundaki dengesizlikten kaynaklı ortaya çıkan gözenekli yapının dayanımda oluşturduğu düşüşlerin engellenmesi amacıyla silis dumanı ve alçı kullanılmıştır. Çalışmanın asıl amacı, yüksek erken yaş dayanımına, yüksek dayanıklılığa sahip, çevreci ve işlevsel beton karışımları hazırlayarak betonarme taşıyıcı elemanlarda kullanılabilirliğini araştırmaktır. Bu amaçlar doğrultusunda oluşturulan üçlü sistemlerle biri referans 3 farklı karışım ve portland çimentolu karışım hazırlanmıştır. Üçlü sistemli karışımlarda mikroyapı analizleri ile hidrasyon mekanizmaları incelenmiştir. 4 farklı karışım eğilme ve basınç dayanım testlerine tabi tutularak dayanım kazanma şekilleri incelenmiştir. Üçlü sistemli karışımlarla 1/3 ölçekli 6 adet 100x100x8 cm boyutlarında çift kat çelik hasırlı betonarme plaklar hazırlanmıştır. Plaklar 1. ve 28. gün sonunda zımbalama dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Plak karışımlarından alınan 15x15x15 cm küp numuneler üzerinde 1. ve 28. gün sonunda basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi gerçekleştirilerek portland çimentolu karışımlarla kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre üçlü sistemlerde kullanılan mineral katkıları betonarme plakları gevrekleştirerek referans numunelere kıyasla zımbalama hasarına karşı kötü performans sergilemiştir. Mineral katkıların neden olduğu yüksek etrenjit erken yaş dayanımını yükseltmiş ve su geçirgenliğini azaltmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kalsiyum aluminat çimentosu, su geçirgenliği, üçlü sistem, yüksek erken dayanım, zımbalama dayanımı

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE PLATES MANUFACTURED WITH CALCIUM ALUMINATE CEMENT TRIPLE SYSTEMS

Nuri Osman EMEKLİ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Alptuğ ÜNAL
2023, 138 Pages**

**Jury
Assoc. Prof. Dr. Alptuğ ÜNAL
Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
Assoc. Prof. Dr. Fatih Süleyman BALIK**

The development of building construction methods has increased the orientation to different building systems underground and above ground. In this study, triple system mixtures with calcium aluminate cement were prepared in order to meet the needs of different building systems. Silica fume and gypsum were used in order to prevent the decrease in the strength of the porous structure resulting from the imbalance in the transformation reaction of the calcium aluminate cement. The main purpose of the study is to investigate the usability of reinforced concrete bearing elements by preparing environmentally friendly and functional concrete mixtures with high early age strength, high durability. With the triple systems created for these purposes, 3 different mixtures, one of which is a reference, and a mixture with portland cement were prepared. Microstructure analysis and hydration mechanisms were investigated in ternary system mixtures. 4 different mixtures were subjected to flexural and compressive strength tests and their ways of gaining strength were examined. With triple system mixtures, 6 pieces of 1/3 scaled 100x100x8 cm double layer steel mesh reinforced concrete slabs were prepared. Plates were subjected to stapling strength test at the end of the 1st and 28th days. At the end of the 1st and 28th days on 15x15x15 cm cube samples taken from the slab mixes, the water penetration depth test was performed under pressure and compared with the portland cement mixes. According to the results obtained, the mineral additives used in the triple systems embrittled the reinforced concrete slabs and showed poor performance against punching damage compared to the reference samples. High ettringite caused by mineral additives increased early age strength and decreased water permeability.

Keywords: Calcium aluminate cement, high early strength, triple system, punch strength, water permeability,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, beni sabırla dinleyip fikirleriyle yolumu aydınlatan, maddi ve manevi hep yanımda olan danışmanım Sayın Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL'a, tez süreci boyunca gerek deney karışımlarının hazırlanmasında gerekse mikroyapı analizlerinin gerçekleştirilmesi ve tez yazımında beni hiç yalnız bırakmayan kıymetli hocam Sayın Arş. Gör. Dr. Murat SAYDAN 'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında laboratuvar imkanlarından faydalanmamı sağlayan ve her türlü yardımda bulunan İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Mehmet KAMANLI ve Sayın Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarıyla katkıda bulunan Sayın Arş. Gör. Furkan TÜRK'e ve laboratuvar sorumlusu Sayın Mehmet Emin GÜRHAN'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmada kullanılan kalsiyum aluminat çimentosu temininde katkılarından dolayı Sayın Fulya Gülen ŞAHİN, Sayın Sibel KURT, Sayın Soner ATILMIŞ ve Mersin Çimsa Çimento Sanayiye teşekkür ederim. Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıları temin eden Sayın Oytun EMRE, Sayın Hasan AKAN ve CHRYSO-KAT Katkı Malzemeleri Sanayiye teşekkür ederim. Çalışmada kullanılan agrega temininde katkılarından dolayı Öztaşoğlu firmasına teşekkür ederim.

Çalıştığım dönem boyunca desteklerini esirgemeyen Emay Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. bünyesinde görev alan şeflerim ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana destek olan, hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Namık EMEKLİ, annem Vahide EMEKLİ ve ablam Esra TUNA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nuri Osman EMEKLİ
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	4
1.2. Tezin Önemi	6
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. KAÇ ile İlgili Kaynak Araştırması	7
2.2. Üçlü Sistemler ile İlgili Kaynak Araştırması.....	11
2.3. Betonarme Plaklarla İlgili Kaynak Araştırması.....	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Materyal.....	22
3.1.1. KAÇ	22
3.1.2. SD	24
3.1.3. Alçı.....	25
3.1.4. Akışkanlaştırıcı	26
3.1.5. Agregası.....	27
3.1.6. PÇ.....	27
3.1.7. Lityum sülfat (LiSO_4)	28
3.1.8. Betonarme kalıp.....	28
3.1.9. Donatı.....	28
3.2. Yöntem.....	28
3.2.1. Deneme karışımları.....	28
3.2.2. Mekanik analizler için deney numunelerinin hazırlanması	34
3.2.2.1. Nihai karışım numunelerin hazırlanması	34
3.2.2.2. Betonarme plak numunelerin hazırlanması	37
3.2.2.2.1. Betonarme plak elemanların boyutlarının seçilmesi.....	37
3.2.2.2.2. Betonarme plakların malzeme özellikleri	38
3.2.2.2.3. Betonarme plakların ve numunelerin kürlenmesi	43
3.2.3. Mikroyapı analizi için deney numunelerinin hazırlanması.....	44
3.2.3.1. Mikroyapı analizi için malzeme hazırlama.....	44
3.2.3.2. Mikroyapı analizleri için hidratasyonun durdurulması.....	45
3.2.4. Mikroyapı deneyleri.....	45
3.2.4.1. XRD	45
3.2.4.2. FE-SEM	46
3.2.5. Mekanik deneyler	47

3.2.5.1. Nihai karışım 4x4x16 cm beton prizma deneyleri.....	47
3.2.5.1.1. Eğilme dayanımı	48
3.2.5.1.2. Basınç dayanımı.....	49
3.2.5.2. Betonarme plak numune deneyleri	50
3.2.5.2.1. Taze betonda kıvam (çökme-slump) deneyi.....	50
3.2.5.2.2. Beton basınç dayanımı tayini.....	52
3.2.5.2.3. Basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi	54
3.2.5.2.4. Zımbalama	59
3.2.5.2.4.1. Kirişsiz plak döşemeler.....	59
3.2.5.2.4.2. Betonarme plak döşeme zımbalama dayanımı	61
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	71
4.1. Mikroyapı Deney Sonuçları.....	71
4.1.1. XRD analiz sonuçları.....	71
4.1.1.1. Ref numunesi	71
4.1.1.2. TK ₅₀ SF ₄₀ numunesi.....	72
4.1.1.3. TK ₅₀ G ₄₀ numunesi	73
4.1.2. FE-SEM analiz sonuçları	74
4.1.2.1. Ref numunesi	74
4.1.2.2. TK ₅₀ SF ₄₀ numunesi.....	78
4.1.2.3. TK ₅₀ G ₄₀ numunesi	81
4.2. Mekanik Deney Sonuçları	84
4.2.1. Zımbalama deney sonuçları.....	84
4.2.1.1. Deney-1 (Ref_plak ₁).....	84
4.2.1.2. Deney-2 (Ref_plak ₂₈).....	88
4.2.1.3. Deney-3 (TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁).....	91
4.2.1.4. Deney-4 (TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈)	94
4.2.1.5. Deney-5 (TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁)	97
4.2.1.6. Deney-6 (TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈).....	100
4.2.1.7. Betonarme plakların karşılaştırılması	103
4.2.1.7.1. Yükleme yaşına göre karşılaştırma.....	104
4.2.1.7.2. Malzeme özelliklerine göre karşılaştırılması.....	114
4.2.1.7.3. Yükleme yaşı ve malzeme özelliklerine göre karşılaştırılması	120
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	125
5.1. Sonuçlar	125
5.2. Öneriler	131
KAYNAKLAR	132

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A°: Angström

B: Boşluk

ÇP: Çimento partikülü

CS: Kalsiyum sülfat

CS0.5H: Hemihidrat

C30: 28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 30 MPa olan beton

d: Döşeme etkili yüksekliği

d': Paspayı kalınlığı, mm

dk: dakika

E: Etrenjit

Fa: Zımbalama çevresi içinde kalan plak yüklerinin toplamıdır

fck: Karakteristik Basınç Dayanımı

fctk: Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı

fctd: Tasarım Eksenel Çekme Dayanımı

G: Alçı

h: Dairesel kolon çapı

K: Kalsiyum Aluminat Çimentosu

kg/m³: kilogram/metreküp

kN: Kilo Newton

kN/mm: Kilo Newton/milimetre

kN.mm: Kilo Newton milimetre

kV: kilo-volt

L: Lityum Sülfat

mA: Miliamper

mm : Milimetre

mm/sn: Milimetre/saniye

MPa: Mega Pascal (N/mm²)

N: Newton

Nd: Tasarım eksenel kuvveti

N/mm²: Newton/milimetrekare
N1, N2: Zımbalamada, alt ve üst kolon eksenel yükleri
P: Portland Çimentosu
S420: Donatı akma dayanımı 420 MPa olan donatı
SF: Silis Dumanı
STR: Straetlingit
T: Tomasit,
T: Sıcaklık
Up: Zımbalama çevresi
Vpd: Tasarım zımbalama kuvveti
Vpr: Zımbalama dayanımı
xx: Toplam bağlayıcı miktarı yüzdesi
 λ : Dalga boyu
% : Yüzde
°C: Santigrat derece
×: Ölçüm yapılmadı
Q: Kare Gözlü Çelik Hasır
 ϕ : Donatı çapı, mm
q: Döşeme yayılı yükü
 μ m: Mikrometre
 α : Alfa
0*: Dayanım elde edilememiştir
 β : Beta
 θ : Gelme-yansıma açısı
 γ : Eğilme etkisini yansıtan bir katsayıdır
↑: Arttırır
↓: Azaltır
↔: Değiştirmez
O: Ortak kanı yok
↓↑: Şartlara göre azaltıp arttırabilir

Kısaltmalar

ACI: Amerikan Beton Enstitüsü
AH3: Jipsit
ASTM: Amerikan Standardı
 Al_2O_3 : Alüminyum Oksit
B.E.T: Brunauer Emmett ve Teller
BS8110: British Standard
CA: Monokalsiyum aluminat
 $Ca(OH)_2$: Kalsiyum hidroksit
 $C_{12}A_7$: Dodekakalsiyum heptaaluminat
 C_4AF : Tetrakalsiyum aluminoferrit
 C_2AS : Dikalsiyum aluminosilikat
 C_2ASH_8 : Straetlingite
CFRP: Karbon lifle takviye edilmiş polimer
C-S-H: Kalsiyum silikat hidrat
 C_2S : Dikalsiyum Silikat
 C_3S : Trikalsiyum Silikat
Eurocode: Design of Concrete Structures (British Standard)
FE-SEM: Alan Emisyonlu-Taramalı Elektron Mikroskobu
FeSi: Ferrosilisyum
HLTB: Hibrit lif takviyeli beton
KAÇ: Kalsiyum aluminat çimentosu
 $LiSO_4$: Lityum Sülfat
LVDT: Lineer Variable Displacement Transducer
 $MgSO_4$: Magnezyum sülfat
MPEG: Metoksipolietilen glikol
MSİD: Maksimum su işleme derinliği
PÇ: Portland çimentosu
PVA: Polivinil alkol
SA: Süperakışkanlaştırıcı
SD: Silis dumanı
s/b: su/bağlayıcı oranı

TBDY2018: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

TGSK: Karbon bazlı tekstil ile güçlendirilmiş sıva katmanı

TS500: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları

UK: Uçucu kül

VPEG: Vinil eter polietilen glikol

YFC: Yüksek fırın cürufu

XRD: X Işını Difraktometresi



1. GİRİŞ

Gelişen teknolojik gelişmeler sayesinde yeryüzünde yaşayan insanların hayat kalitesi ve konforu yükselmiştir. Bu yükselişe bağlı olarak insanların ortalama yaşam süresi ve nüfusunda gözle görülür bir artış yaşanmaktadır. Nüfustaki artışa paralel olarak üretim ve tüketim miktarlarında da artış olmaktadır. Üretim ve tüketimdeki fazlalığa bağlı gıdadaki arz talep dengesizliğini önlemek adına ekilebilir tarım arazilerindeki ihtiyacın fazlalaşması kullanılabilir inşaat alanlarının azalmasına neden olmaktadır. Yer üstündeki kullanılabilir inşaat alanları artan nüfusun yapı ihtiyacını karşılamada yetersiz kalmaya başlamıştır. Bundan dolayı insanlar yer altı yapılarına ve yer üstünde çok katlı yapılara yönelmiştir. Farklı yapı sistemlerinin neden olduğu ihtiyaçlar doğrultusunda yapı sektöründe birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan teknolojik çalışmalar yapıyı kullanacak insanların yapıdan beklediği özellikleri karşılamaya yöneliktir. Teknolojik çalışmalar neticesinde insanların beklentileri doğrultusunda yapılarda beklenen konforun ve estetikliğin öneminin artmasından kaynaklı yapı alanını rahat ve etkin kullanma isteği betonarme yapılarda kirişsiz döşemelerin kullanılma gerekliliğini doğurmuştur.

Kirişsiz döşemeler betonarme plakların kirişlere mesnetlenmeden yüklerini doğrudan kolonlara aktardığı taşıyıcı sistemlerdir (Bozer, 2020). Kirişsiz döşemelerin betonarme yapılarda kullanılması mimari açıdan fayda sağlamaktadır. Kirişli betonarme döşemelerde kirişler, betonarme döşemelerden sarkarak yapı tavanlarında kötü görüntü oluştururken, döşemeden döşemeye olan kat yüksekliğini azaltmaktadır. Kirişli betonarme döşemelerde oluşan mimari kaynaklı olumsuzluk kirişsiz döşemelerde oluşmayarak düz yüzeyli bir tavan elde edilmesine ve döşemeden döşemeye olan kat yüksekliğinin artması sonucu olarak toplam bina yüksekliğinin azalmasına neden olmaktadır. Kirişsiz döşemeler mimari açıdan birçok avantaj sağlamasının yanında kalıp, döşeme, betonarme işçiliklerinin daha basit olmasına ve işçiliğin kolaylığından kaynaklı inşaat süresinin kısılmasına neden olur. Ayrıca kirişsiz döşemeli sistemlerin döşeme kalınlığının, kirişli döşeme sistemlerinin döşeme kalınlığından nispeten fazla olması ısı ve ses yalıtımı sağlar (Elmalı, 2006). Kirişsiz döşemeli sistemlerin birçok avantajının yanında birçok da dezavantajları mevcuttur. En büyük dezavantajlarından biri kirişsiz döşemeli yapıların yanal rijitliğinin, kirişli döşemeli yapıların yanal rijitliğinden daha az olmasıdır. Yanal rijitliğin az olmasından kaynaklı oluşan aşırı deformasyonlar hem yapısal olmayan elemanların hasar görmesine sebebiyet verebilmekte hem de ikinci mertebe etkilerinin daha fazla olmasına yol açtığından deprem davranışı açısından

dezavantajlıdır (Bozer, 2020). Kirişsiz döşemelerin en büyük dezavantajı kolon-döşeme birleşim bölgesinde oluşan çok gevrek bir güç tükenmesi türü olan zımbalama göçmesine yatkın olmasıdır. Kirişsiz döşemelerin diğer dezavantajları olarak da daha fazla beton ve donatı gerektirmesi, perde duvar gibi düşey taşıyıcı elemanlara duyulan ihtiyacın fazla olması neticesinde genellikle yapının zati ağırlığının yüksek olmasıdır. Ayrıca maliyetinin yapı amacına göre değişiklik göstermesiyle birlikte kirişli döşemelere kıyasla daha yüksek olması dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Zımbalamadan kaynaklı yapılarda oluşacak gevrek göçme hasarlarını tetikleyen unsurlar şu şekilde sıralanabilir (Mercimek, 2021);

- Tasarım yetersizliği (zımbalama etkisinin dikkate alınmaması),
- İşçilik kalitesinin düşük olması,
- Yeterli beton dayanımı oluşmadan yapının erken yüklenmesi,
- Yapının kullanım amacının değiştirilmesi sonucunda ortaya çıkan ek yükler.

Bu gibi göçme hasarını tetikleyen unsurları önlemede farklı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar genel hatları ile çelik plakalarla güçlendirme, lif takviyeleri ile güçlendirme, farklı zımbalama donatıları ile güçlendirme, ankrajlarla ardgerme ile güçlendirme vb. güçlendirme yöntemleridir. Bu güçlendirme yöntemleri ile yapılmış birçok çalışma literatürde yer almaktadır (Ezer (2010), Durucan (2015)). Fakat bu çalışmaların genelinde klasik beton tipleri ve çimentolar tercih edilmektedir. Son yıllarda deprem yönetmeliğinin ağır şartlar getirmesinden kaynaklı klasik betonlar yapıdan istenen şartları yerine getirmede eksik kalmaktadır. Günümüz yapılarında kullanılan betonlardan yüksek erken nihai dayanım, dayanıklılık (durabilite), uzun işlenebilirlik süresi, kolay yerleştirme, su ve zararlı maddelerin geçirimsizliği, ekonomiklik, estetiklik, çevreci olması vb. gibi özelliklere sahip olması istenilmektedir. Fakat bu özelliklerin sağlanabilmesi için tek başına kullanılan portland çimentosu (PÇ) ile hazırlanan karışımlar yetersiz kalabilmektedir. Betonda istenilen özelliklerin sağlanabilmesi için PÇ'li karışımlar farklı katkılarla desteklenmektedir. Bu katkılardan yaygın olarak tercih edilenler uçucu kül (UK), silis dumanı (SD) ve yüksek fırın cürufu (YFC) olarak gösterilebilir. UK, SD ve YFC katkılarının beton özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri Çizelge 1.1.'de verilmiştir (Gündeşli, 2008).

Çizelge 1.1. Mineral katkıların PÇ’li betonlara etkileri (Gündeşli, 2008)

Karışım	İşlenebilirlik	Basınç dayanımı	Rötre	Hidratasyon ısısı	Aşınma direnci	Sülfat direnci	Donma - çözünme direnci
UK katkılı	↑	↓	Kuruma R. ↓	○	↑	↑	↔
YFC katkılı	↑	↑	↔	↓	↓↑	↑	↔
SD katkılı	↓	↑	Otojen R. ↑	○	↑	↑ (MgSO ₄ ↓)	↔

((↑=arttırır), (↓=azaltır), (↔=değiştirmez), (○= Ortak kanı yok), (↓↑= Şartlara göre azaltıp arttırabilir), (MgSO₄=magnezyum sülfat))

Çizelge 1.1’de görüldüğü üzere mineral katkıları ilave edilerek hazırlanan PÇ’li ikili karışımlarda bazı özellikler iyileştirilirken diğer özellikler olumsuz etkilenmiştir. Bu yüzden PÇ esaslı yapılar şiddetli çevre koşullarına ve kimyasal etkilere maruz kaldığında farklı dayanıklılık sorunları ile yüz yüze gelmektedir (Eren ve ark., 2022). Dayanıklılığın servis ömrünü belirlemede etkisi göz önüne alınarak sadece PÇ’li karışımlar hazırlamak yerine birden fazla bağlayıcının bir araya getirilmesi ile ikili ve üçlü sistemli karışımlar oluşturulmuştur. Yaygın olarak kullanılan ikili sistemlerde PÇ’li karışımlara ilave edilen KAÇ (Kalsiyum alüminat çimentosu) ile alçı içerisindeki sülfat (SO₄⁻) iyonları, PÇ içerisindeki C₃A fazının yüzeyi yerine KAÇ tarafından salınan alüminat iyonları ile birleşerek etrenjit oluşturur (ÇİMSA, 2017c). Meydana gelen hidrate ürünler KAÇ ve PÇ’li ikili sistemlerinin dayanım gelişimini farklılaştırmaktadır. Kullanım oranlarına bağlı olarak KAÇ baskın sistemlerde; CAH₁₀, C₂AH₈ oluşumu ile birlikte etrenjit fazının sistemdeki mukavemet gelişimi üzerinde etkisi görülürken, PÇ baskın sistemlerde etrenjit, C-S-H (kalsiyum silikat hidrat), Ca(OH)₂, monosülfoalüminat hidratlar oluşmaktadır (Gu ve ark., 1997; Eren ve ark., 2022). Kalsiyum sülfatlar tükendiğinde ve hala alüminatlar mevcut olduğu durumda etrenjit ile alüminat faz reaksiyona girerek monosülfoalüminat oluşur (Bizzozero, 2014). Monosülfoalüminat poroziteye neden olur ve poroziteden kaynaklı dayanım düşüşleri görülebilmektedir. Ortama sülfat ilave edilerek etrenjitin monosülfoalüminat oluşumu azaltılabilir (Zhang ve ark., 2018). İkili sisteme eklenen sülfat kaynağı alçı ilavesi ile üçlü sistemli karışımlar oluşturulmuş olur. Karışımı oluşturan bağlayıcı malzemelerin oranlarına göre karışımlar farklı özellik kazanarak karışımdan istenen özelliklere göre kolayca revize edilebilir. Ayrıca karışımdaki bağlayıcı oranlarındaki değişikliğe ek olarak farklı bağlayıcılar kullanılarak da karışımlardan istenen özellikler karşılanmaya çalışılmıştır. Bu yüzden son yıllarda yaygın olarak kullanılan KAÇ, PÇ ve alçılı sistemlerden farklı YFC, UK, SD, zeolit vb.

bağlayıcıların farklı oranda kullanılmasıyla hazırlanmış ikili ve üçlü sistemler geliştirilmiştir (Erkmen, 2018; Türedi, 2019; Saydan, 2021)

1.1. Tezin Amacı

KAÇ tabanlı üçlü karışımlarla yüksek erken yaş dayanımına, yüksek dayanıklılığa sahip, çevreci ve işlevsel betonların üretilmesi amaçlanmıştır. Erken dayanımlı betonlar sayesinde yapıların inşaa sürelerinin kısaltılması hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilmesine katkı sağlanacaktır.

Zımbalama dayanımı hesapları 28 günlük beton dayanımı göz önünde bulundurularak yapılırken uygulamada bu 28 günlük dayanım sağlanmadan kalıplar sökülmeaktadır (Ezer, 2010). Beton yeterli dayanıma erişmeden kalıpların alınması ile kolon-döşeme birleşim bölgesinde sistemin kendi ağırlığından dolayı ortaya çıkan gerilmelerin karşılanamaması sonucu bölge göçme durumuna gelir. Birleşim bölgesinin göçmesi katın veya sabit yükü tamamlanmamış yapının göçmesine neden olur (Celep, 2015). KAÇ ile hazırlanan betonlar, PÇ ile hazırlanan betonların 28 gündeki basınç dayanım değerlerine 1 günden daha kısa bir sürede ulaşmasından dolayı erken kalıp almadan kaynaklı zımbalama hasarlarının önüne geçilebilmesi amaçlanmıştır.

Üçlü karışımlarda kullanılan mineral katkılarla KAÇ'ın geçirdiği dönüşüm reaksiyonundaki dengesizlikten kaynaklı porozitenin artması ve ortaya çıkan gözenekli yapının dayanımda oluşturduğu düşüşlerin engellenmesi amaçlanmıştır.

Özellikle suya maruz kalan yeraltı betonarme yapılarında yer altı su seviyelerine yakın çalışılmasından dolayı bu yapılar suyun taşıdığı başta klorür ve sülfat olmak üzere çeşitli zararlı maddelerin etkisindedir. Geçirimsizliği yüksek olan betonlarda bu tür zararlı maddelerin beton içine girişi kolaylaşarak betonun dayanımı ve dayanıklılığı azalır ve betonarme yapının da servis ömrü kısalır (Kandil, 2014). Betonun porozitesi ve permeabilitesi ne derece az ise, beton içine penetre olabilen klorür miktarı da o derece az, dolayısı ile de korozyon oluşum hızı da az olmaktadır (Doğan, 2009). Korozyona uğrayan donatı çelik çubukların kesit alanı korozyon etkisi arttıkça azalır. Şiddetli korozyona maruz kalan betonarme yapı elemanlarında yük taşıma kapasitelerinde önemli azalmalar oluşmaktadır. Yük taşıma kapasitelerindeki azalmalara ek olarak korozyona maruz kalmış betonarme elemanların rijitliği azaldığından korozyonsuz elemanlara göre düşük yük seviyelerinde bile yüksek deplasmanlara neden olabilmektedir. Ayrıca korozyon; döşemelerin eğilme dayanımı, sünekliği, donatı ile beton ara yüzündeki aderansa ve

göçme modu üzerinde önemli etkilere neden olmaktadır (Sezgin, 2021). Sonuç olarak mineral katkılarla düşük geçirgenliğe sahip karışımlar hazırlayarak durabilitesi yüksek betonlar oluşturulması amaçlanmıştır. Ayrıca durabilitesi yüksek betonlar sayesinde yapının servis ömrüne de fayda sağlanabileceği düşünülmektedir.

İkili sistemle hazırlanan KAÇ ve PÇ'li karışımlarda kritik miktardaki KAÇ, PÇ'nin ana reaksiyonlarını (Silikat reaksiyonu ve C_3A 'nın PÇ içinde yeniden çözünmesi) önemli ölçüde geciktirebilmektedir. Bu gecikme KAÇ ve PÇ ile oluşturulan ikili sistemli karışımlara yeterli miktarda sülfatın eklenmesiyle giderilebilmektedir (Nehring, 2020). KAÇ tabanlı üçlü sistemlerde sülfat (SO_4) kaynağı olarak kullanılan alçı ile KAÇ'dan gelen aluminat iyonları ile birleşerek ortaya ana hidratasyon ürünü etrenjit çıkmaktadır. Etrenjit oluşumu erken hidratasyon ve priz süresinde önemli rol oynamaktadır. KAÇ ve PÇ'li ikili sistemlere alçının eklenmesiyle oluşturulan üçlü sistemli karışımlarda yoğun etrenjit oluşumu amaçlanmıştır. Yoğun etrenjitin numune içindeki boşlukları kapatabileceği ve tanecikleri birbirine bağlayarak su geçirgenliğini azaltacağı düşünülmektedir. Genel olarak üçlü sistemlerde kullanılan alçı sayesinde erken dayanımlı ve düşük su geçirgenliğine sahip numunelerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Yüksek miktarlarda mineral katkıları kullanarak maliyeti yüksek olan KAÇ'ın beton içerisindeki oranı azaltarak klasik ve yaygın olarak kullanılan PÇ ile hazırlanan beton maliyetine yaklaştırılması amaçlanmıştır.

Yüksek miktarlarda kullanılan endüstriyel yan ürün olan SD ve alçı sayesinde çimento miktarındaki azalmaya bağlı olarak çevreye olan zararın en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

Bütün bu amaçlar doğrultusunda hazırlanan bu tez çalışmasında üçlü sistemlerle hazırlanan karışımların mikroyapı analizleri gerçekleştirilerek farklı karışım oranlarının oluşan hidrate yapıları üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Mikroyapı analizlerine ek olarak üçlü sistemlerle ve klasik yöntemle hazırlanan numuneler eğilme ve basınç deneylerine tabi tutularak mekanik özellikleri hakkında yorum yapılmıştır. Ayrıca üç farklı karışım kullanılarak hazırlanan betonarme plak numuneler zımbalama dayanım deneyine tabi tutularak üçlü sistemlerin ve dolayısıyla hidrate yapıların mekanik yapı üzerindeki etkileri ve KAÇ'ın yapı elemanlarında kullanılabilirliği hakkında yorumlamalar yer almıştır. Üçlü sistemlerle hazırlanan üç farklı karışıma ek olarak klasik yöntemlerle hazırlanan PÇ'li betonlar üzerinde basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi yapılarak su geçirimsizliği açısından üçlü sistemler PÇ ile kıyaslanmıştır.

1.2. Tezin Önemi

Bu tez çalışması kapsamında yüksek erken yaş dayanımına, yüksek dayanıklılığa sahip, çevreci ve işlevsel beton karışımlar hazırlayabilmek için KAÇ tabanlı üçlü sistemler kullanılmıştır. Karışımların oluşturulmasında üçlü sistemlerde yaygın olarak kullanılan PÇ yerine SD tercih edilmiştir. Üçlü sistemlerde PÇ yerine SD kullanılması ile hazırlanan ve farklı oranlarda KAÇ, SD ve alçı içeren üçlü sistemlerin betonarme taşıyıcı elemanda kullanılması bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan farklı ve özgün yanını ortaya koymuştur. KAÇ'ın betonarme taşıyıcı elemanlarda kullanılmamasının nedeni olarak geçirdiği dönüşüm reaksiyonlarının neden olduğu hidrate yapı dönüşümlerinden kaynakladığını ispat eden Bizzozero (2014), Scrivener ve Capmas (1998), vb. birçok çalışma mevcutken, KAÇ ile hazırlanmış taşıyıcı betonarme elemanlar üzerinde deneysel çalışmalar yok denecek kadar azdır. Bu çalışma sayesinde literatürde ifade edilen KAÇ'ın hidrate yapılarının geçirdiği reaksiyonun zararlı etkisinin yapı davranışına etkisini inceleyerek literatüre önemli katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Bunu yaparken de betonarme yapılarda en istenmeyen hasar tiplerinden biri olan zımbalama göçmesi karşısındaki davranışına bakarak KAÇ'ın yapı elemanlarında kullanılabilirliği hakkında net sonuçlara ulaşılabileceği düşünülmektedir. KAÇ tabanlı üçlü sistemlerin yapıda kullanılabilirliği hakkındaki sonuçlara ulaşırken sadece mekanik deneyler yapılmayarak mikroyapı analizleri ile betonarme plak elemanların davranışları altında yatan ana nedenler araştırılacaktır. Genellikle betonarme yapılarda istenen dayanım en önemli parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat dayanıklılıkta en az dayanım kadar önem arz etmektedir. Dayanıklılığın sağlanmasının en önemli şartlarından biri geçirimsizliktir. Hazırlanan üçlü sistemli karışımlar sayesinde düşük geçirgenlik özelliğe sahip betonarme taşıyıcı elemanlar üretilerek uzun servis ömürlü yapıların oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. KAÇ ile İlgili Kaynak Araştırması

KAÇ, PÇ kadar yaygın kullanılmamakla beraber PÇ'den farklı kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı özel saha uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu özel saha uygulamaları olarak yüksek erken dayanım gerektiren yol uygulamaları, yüksek aşınma direnci gerektiren endüstriyel zemin uygulamaları, yüksek sıcaklık direnci gerektiren refrakter uygulamaları, kimyasal ve biyolojik etmenlere karşı yüksek dayanım ve yüksek asit dayanımı gerektiren kanalizasyon uygulamaları vb. çalışmalarda tercih edilmektedir (Alpaslan ve Felekoğlu, 2019; Ay, 2021; Bodur ve ark., 2021). Alüminatlı çimentoların kimyasal bileşimi ana ham maddeler olan kireç taşları, hidratlı kireç, boksitler ve lateritlere bağlıdır. KAÇ'ın bileşimi, sınıflara ve uygulamalara göre değişiklik gösterir. Standart KAÇ içeriği yaklaşık olarak eşit miktarda kalsiyum ve alüminyum oksit içerirken (ağırlığın %36-42), ağırlığının %20'si kadar demir oksit ve oldukça az miktarda da silika içerir. KAÇ'da bulunan minör elementler, magnezyum oksit %2, titanyum oksit %1 ve %0.5 alkali'dir. Alkali içeriği genellikle ağırlığın %0.5'inden azdır, çünkü çok yüksek alkali içeriği istenmeyen hızlı donmalara sebep olabilir (Aydın, 2019).

Çizelge 2.1.'de üretilen çeşitli KAÇ sınıflarının yaklaşık bileşim aralıklarının bir özetini göstermektedir (Sucu ve Delibaş, 2015).

Çizelge 2.1. KAÇ içeriği ve oranları (Sucu ve Delibaş, 2015; Aydın, 2019)

	Al ₂ O ₃ %	CaO%	Fe ₂ O ₃ %	SiO ₂ %
Zengin-Al ₂ O ₃	>80	<20	<0.2	<0.2
Zenginleştirilmiş-Al ₂ O ₃	65-75	25-35	<0.5	<0.5
Düşük-Fe ₂ O ₃ +FeO'lu Al ₂ O ₃	48-60	36-42	1-3	3-8
Fe ₂ O ₃ +FeO zenginleştirilmiş Al ₂ O ₃	36-42	36-42	12-20	4-8

KAÇ'ın fazları majör ve minör olmak üzere iki başlık altında toplanmıştır. Bu fazlardan majör fazlar üzerinde durulacaktır. Ayrıca majör fazların KAÇ, PÇ ve alçı ile

hazırlanan üçlü karışımlara etkileri hakkında genel bilgi verilmiştir. Çimento fazları Çizelge 2.2.'de verilmiştir

Çizelge 2.2. KAÇ'ın majör fazları ve etkileri (Guirado ve Galí, 2006; Ramadevi ve Shri, 2015; ÇİMSA, 2017a; Aydın, 2019; Yarar, 2021)

FAZ	Ağırlıkça %	Denklem	Özelliği	Üçlü Sistemlere Etkisi
CA(monokalsiyum aluminat)	40-70	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ ↓ CA	Ana hidrolik fazdır.	Üçlü bağlayıcı sistemlerde hidrate olmuş KAÇ'ın erken mukavemetini sağlayarak üçlü sistemlerin 24 saatlik dayanımından sorumludur.
C_{12}A_7 (Dodekakalsiyum heptaaluminat) (mayenit)	0-10	$12\text{CaO} + 7\text{Al}_2\text{O}_3$ ↓ C_{12}A_7	CA'dan sonraki en yaygın fazdır.	Üçlü bağlayıcı sistemlerde alçı ile birlikte etrenjit oluşumu ve işlenebilirlik süresinden sorumludur. Diğer malzemelere göre çok hızlı hidratlandığı için 0-6 saat erken dönemde hidrasyon ısısının yükselmesine ve bunun sonucu olarak da yüzey çatlaklarının oluşmasında etkilidir.
C_2AS (Dikalsiyum aluminosilikat) (Gehlenit)	0-20	$2\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ ↓ C_2AS	Hidrasyonu yavaştır ve nihai yaş dayanımına katkıda bulunur.	Çimentoda yüksek miktarda oluşması neticesinde erken dayanımda düşüşe neden olabilir. Bu yüzden dikkat edilmelidir.
C_4AF (Tetrakalsiyum aluminoferrit)	10-30	$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ↓ C_4AF		Üçlü bağlayıcı sistemlerde CA ile birlikte uzun dönem dayanımında görev alır. Hammaddeden gelen Al^{3+} iyonu arttıkça oluşumu azalır.

KAÇ'ın PÇ'ye göre avantaj ve dezavantajları şu şekildedir;

- KAÇ ile PÇ arasındaki temel fark priz alma ve sertleşme sırasındaki aktif fazların farklı olmasıdır. PÇ, kalsiyum ve silisyum oksitleri ile C_2S ve C_3S fazlarını oluşturarak, su ile tepkimeye girdiğinde C-S-H ve C-H hidratları elde edilir. KAÇ'da ise kalsiyum oksit ve alüminyum oksitleri ile CA oluşturarak su ile tepkimesiyle kalsiyum aluminat hidratları oluşturur (Sucu ve Delibaş, 2015). Bu faz farklılığından kaynaklı PÇ hidrasyonunun %60-80'lik kısmını 28 günde gerçekleştirir. Kalan hidrasyonuna 28 günden sonra yavaşlayarak devam eder. Fakat KAÇ hidrasyonunun büyük bir kısmını 24 saat içerisinde gerçekleştirir (Kan ve ark., 2017). KAÇ hızlı priz alma erken dayanım kazanmasından dolayı PÇ'ye göre avantajlıdır.

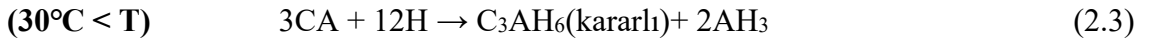
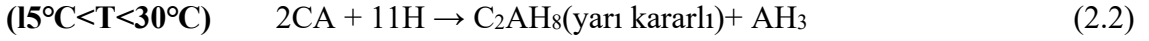
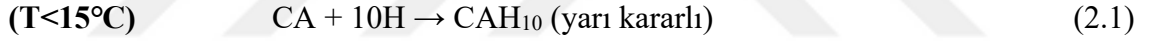
- Çimentolar bazik yapıya sahip olduğu için asidik ortamlardan olumsuz etkilenmektedir. Çimentonun asidik ortamdaki olumsuz etkilere dayanabilmesi bulunduğu asidik ortamı etkisiz hale getirmesi yani nötralize edebilmesine bağlıdır (Sucu ve Delibaş, 2015). PÇ ile yapılan betonlar pH 7 değerinin altında bir ortamda yani asidik bir ortamla karşılaştığında mukavemetten sorumlu C-S-H bu ortamda parçalanarak incelmeye ve aşınmaya başlar. KAÇ'da PÇ'deki bu faz oluşmaz. Mukavemetten sorumlu faz alumina esaslıdır (ÇİMSA, 2022a). Bu alumina hidratın pH değerinin 3-4 gibi asidik özelliğin yüksek olduğu ortamlarda bile, asit ataklarına karşı direnç gösterebilmektedir (Sucu ve Delibaş, 2015). KAÇ, PÇ'ye göre geçirdiği fazların farklılığından dolayı asidik ortamlara karşı daha dirençli olması sonucu olarak asidik ortamlardaki kütle kaybı KAÇ'da daha azdır.
- Yapılan çalışmalarda klinker agregası içeren yüksek alüminatlı çimento ile standart beton ve SD'li beton üzerinde yapılan aşınma testlerinde klinker agregası içeren yüksek alüminatlı çimentolu beton aşınmaya karşı diğer betonlara kıyasla daha iyi performans sergilemiştir. Bunun sonucu olarak fabrika zeminlerinde, barajların dolu savak imalatlarında, basınca maruz kalan boru iç çeperleri vb. aşınmaya maruz kalan uygulamalarda KAÇ betonları normal betonlar yerine tercih edilebilir (ÇİMSA, 2022a). Aşınma direnci, yüksek alüminatlı çimento ile hazırlanan betonlar PÇ ile hazırlanan betonlardan genellikle yüksek olduğu söylenebilir.
- KAÇ hamurunun termal genleşmesi PÇ'ye göre daha düşüktür (Bodur ve ark., 2021). Yapılan çalışmada uygun agrega kullanımı ile KAÇ'ın 1300°C sıcaklığa kadar dayanabileceği PÇ'nin ise 600°C de dağıldığı gözlemlenmiştir (ÇİMSA, 2022a). Yüksek sıcaklık etkisindeki betonların basınçları Çizelge 2.3.'de verilmiştir (ÇİMSA, 2022a).

Çizelge 2.3. ISIDAÇ 40 esaslı betonlar ile PÇ’li betonların yüksek sıcaklık altında basınç dayanımlarının karşılaştırılması (ÇİMSA, 2022a)

Karışım	ISIDAÇ 40 Çimentosu ve Klinker Agregalı Karışım	ISIDAÇ 40 Çimentosu ve Şamot Agregalı Karışım	ISIDAÇ 40 Çimentosu ve Boksit Agregalı Karışım	Gri Portland Çimentosu ve Kalker Agregalı Karışım
400 °C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	37.2	29.7	39.2	35.5
600 °C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	43.8	41.3	46.9	24.8
800 °C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	59.5	45.3	56.7	0
1100 °C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	32.4	25.1	30.2	0

- KAÇ’ın en yaygın kullanılma amaçlarından en önemli iki nedeni; hızlı priz alarak erken mukavemet kazanması ve sülfata dayanıklılıktır. Mangabhai (1990) çalışmasında KAÇ’ların PÇ gibi kalsiyum silikat bazlı çimentolardan daha iyi sülfat direncine sahip olduğunu savunurken Scrivener ve Capmas (2003), PÇ’nin aksine, sodyum sülfat çözeltilerinin KAÇ betonları için magnezyum sülfat çözeltilerinden daha agresif olabileceği görüşünü öne sürmüştür. KAÇ betonları uzun yıllardır sülfatlı sulara maruz kalan alanlarda kullanılarak sülfata karşı olumlu davranış sergilediğine dair sonuçlara ulaşılmıştır (Bodur ve ark., 2021). ÇİMSA (2022b) çalışmasında yer alan KAÇ (ISIDAÇ 40) ile PÇ’nin sülfata dayanımı kıyaslanması sonucu KAÇ’ın PÇ’ye göre sülfata karşı çok daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar ışığında deniz suyuna direkt maruz kalan yapılarda veya sulama kanalları gibi sülfat dayanımı ön planda olan yapılarda bu sebeplerle KAÇ kullanımının durabiliteye olumlu katkı sağlayabileceği açıktır.

- KAÇ'ın PÇ'e göre en büyük dezavantajlarından biri maliyetidir. KAÇ PÇ'den 6-8 kat daha maliyetlidir. Maliyetinden dolayı PÇ kullanıldığı her alanda maliyet açısından kullanılması uygun olmamaktadır (Aydın, 2019).
- KAÇ'ın PÇ'ye göre maliyetinden sonraki en büyük dezavantajı ve az tercih edilmesinin temel nedeni olarak hidrasyon reaksiyonundaki dengesizliktir. KAÇ'ın hidrasyon sürecinde yarı kararlı CAH_{10} , C_2AH_8 ve kararlı C_3AH_6 kalsiyum alumina hidratları oluşur. Altıgen yarı kararlı hidratlar, kararlı kübik hidratlara dönüşür (Scrivener ve Capmas, 2003; Yazar, 2021). Bu hidrasyon ürünlerinden yarı kararlı yapıların daha kararlı yapılara dönüşmesi olayı “dönüşüm reaksiyonları” olarak adlandırılır (Saydan, 2021). Kararlı kübik hidrat C_3AH_6 , yarı kararlı hidratlar CAH_{10} ve C_2AH_8 'den daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir ve dönüşüm reaksiyonu sonucu porozitenin artmasına neden olur. Hidrasyon sonucu porozitenin artmasından kaynaklı ortaya çıkan gözenekli yapı dayanımda azalmaya neden olabilmektedir (Bizzozero, 2014). Gözenekli yapı yüksek sıcaklık ve rutubetli ortamda hidrasyon ürünlerinin dönüşüme uğramasından kaynaklandığını söyleyebiliriz (Erkmen, 2018). Scrivener ve Capmas (2003), CA'nın sıcaklığa bağlı olarak hidrasyonu ve oluşan ürünler Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3'de verilmiştir. Dönüşüm reaksiyonları ise Denklem 2.4 ve 2.5'de verilmiştir.



2.2. Üçlü Sistemler ile İlgili Kaynak Araştırması

Günümüzde farklı ihtiyaçlar doğrultusunda yüksek sıcaklık, erken mukavemet, hızlı priz, çatlaksız yapı vb. istekleri karşılamak için farklı betonlar üretilmektedir. Bu sebeple sadece PÇ ile karışımlar hazırlamak yerine; PÇ, KAÇ ve kalsiyum sülfatın farklı oranlarda birleşmesiyle üçlü sistemler oluşturulmakta ve bu sistemdeki karışım oranları ihtiyaca göre revize edilmektedir. Betondan istenen özelliklere göre yukarıda ifade edilen bağlayıcı türlerini değiştirerek oluşturulmuş KAÇ, SD ve alçılı üçlü sistemlerde mevcuttur.

Saydan (2021), çalışmasında farklı oksit içeriklere sahip KAÇ, SD ve hemihidrat alçı ile üretilen ikili ve üçlü sistemler üzerinde gerçekleştirilen çeşitli mikroyapısal analiz yöntemleri ile bu sistemlerdeki hidratasyon mekanizmalarını incelemiştir. Ayrıca hazırlanan sistemlerde LiSO_4 (Lityum Sülfat) kullanılarak reaksiyonu hızlandırılmış sistemlerin hidratasyon kinetikleri ve hidratasyon sonucu oluşan ürünler incelenmiştir. Ek olarak bazı karışımlara eklenen nano silika ve nano sülfat katkıların üçlü sistemler üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deney sonuçlarına göre LiSO_4 kullanılarak hızlandırılmış bu sistemlerdeki ana hidratasyon ürününün etrenjit olduğu yüksek SD kullanılan sistemlerde straetlingit oluşumunun arttığı ve straetlingit oluşumunun dayanım düşüşlerini sınırlandırdığı sonucuna varmıştır. Karışımlara eklenen nano katkılar sistemlerin hidratasyon hızını artırmış ancak hidrate bileşiklerin türleri üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Erken yaşlarda yüksek miktarda etrenjit üreten karışımlarda hidratasyonun ileri aşamalarında bu etrenjit liflerinin inceli uzayarak hamur yapısında oluşturduğu boşluklu yapıdan kaynaklı harçlarda genleşmelere ve dayanım düşüşleri gibi olumsuzluklara neden olmuştur.

SD silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin indirgenme reaksiyonları sonucu elde edilen çok ince taneli yüksek puzolanik karakter gösteren tozdur (Yeğinobalı, 2011). İçeriğinde %90-95 miktarında amorf silikon dioksit vardır. Özgül ağırlıkları 2200-2300 kg/m^3 arası olup siyah ve beyaz renkte olmak üzere değişen bir renk aralığına sahiplerdir (Topçu ve Canbaz., 2002). SD'nin tane boyutları 0.1-0.2 μm arasında olup çimentodan yaklaşık olarak 100 kat daha incedir (Kandil, 2014). Brunauer Emmett ve Teller (B.E.T) teorisi yöntemi kullanılarak yüzey alan analizi deneyi ile ölçülen yüzey alanı 20.000 m^2/kg olarak bulunmuştur (Demirbilek, 2019).

SD'nin çimentoya göre tane boyutunun çok küçük olmasından kaynaklı agrega çimento hamuru ara yüzeyini kuvvetlendirerek ve boşluk oranını azaltarak betonun dayanım ve dayanıklılığına olumlu katkı sağlamaktadır. Cıvalı porozimetre ile yapılan deneyler SD katkısının sertleşmiş çimento hamur ve harçlarında iri gözenekleri azaltarak çok sayıda küçük gözenek oluşturduğunu göstermektedir. Fakat iç yapıdaki toplam gözeneklilik değişmemektedir (Yeğinobalı, 2011). Ancak büyük boşluklarda oluşan suyun irtibatının, çok küçük ve homojen boşluklarda oluşan irtibata göre daha az ve yavaş olmasını sağladığından geçirgenliği azaltmaktadır. SD'li betonların geçirgenliği daha az olduğundan zararlı birçok kimyasala karşı daha dayanıklı olabilmektedirler. Yüksek oranda (%12'den %20'ye kadar) SD kullanılarak hazırlanan katkılı betonlarda Ca(OH)_2

içeriği ve geçirgenliğinin azaldığı gözlenmektedir. Bu iki faktörden kaynaklı SD katkılı betonlar katkısızlara göre zararlı kimyasallara daha dirençlidir (Özcan, 2005). SD katkısının asitlerin betona olan zararlı etkisini geciktirdiği ve genellikle betonun sodyum sülfata karşı direncini artırdığı görülmüştür (Ekinci, 1995). Normal PÇ'ye %10-15 kadar SD katıldığında sülfatlara dayanıklı çimento (ASTM Tip V) benzeri bir çimento elde edilebilmektedir. SD katkısı özellikle sodyum sülfata karşı etkili olmaktadır (Dikme, 2010).

SD'nin betona ilavesi basınç dayanımını artırmaktadır. Basınç dayanımındaki artışa bağlı olarak SD katkılı betonlarda çekme ve eğilme dayanımları katkısız betonlara göre daha yüksektir. SD katkısının pozolanik aktivitesinin yüksekliği ve tanecik yapısının çok ince olması ile boşluk oranının azalması neticesinde agrega ile çimento hamurunun temas yüzeyini arttırarak kuvvetlenmesi beton dayanımını yükseltir (Dikme, 2010). Normal sıcaklıklarda, SD'nin beton dayanımına katkısı 3 gün ile 28 gün civarında yerini almaya başlar. Erken dayanımlı beton elde etmek için su/bağlayıcı (s/b) oranı 0.40 alınarak hazırlanan betonlarda çimentonun %30'una kadar katılan SD katkısı 3 günden önce beton dayanım artışlarında etkili olabilmektedir. Betonun 28 günlük dayanımını arttırmayı amaçlayan çalışmalarda SD'nin genellikle çimentonun %5-%20'si oranlarında betona katıldığı ve gerekli işlenebilmeyi sağlamak için %10'dan yüksek miktarların süperakışkanlaştırıcı (SA) katkılarla birlikte kullanıldığı görülmektedir (Yeğinoğlu, 2011). SD çok ince yapıya sahip olduğundan kullanımı genellikle betonun su gereksinimini arttırır (Kandil, 2014). Bu nedenle SD kullanılan betonlarda işlenebilirlikten kaynaklı sıkıntılarla karşılaşmamak için SA katkı kullanılması önerilmektedir.

SD'nin çok ince taneli ve yüksek oranda amorf silis içeriği ile etkin bir pozolan olduğu bilinmektedir. SD'nin dezavantajı ise, çok ince taneli olması sebebiyle beton karışım suyunu arttırması ve işlenebilirliğini azaltmasıdır. SA katkı maddelerinin beton üretiminde kullanımı ile birlikte bu dezavantaj da ortadan kalkmıştır. Ayrıca SD ve SA katkı maddelerinin betonun dayanım ve dayanıklılığını artırdığı bilinmektedir (Şimşek ve ark., 2007).

Beton karışımlara uygun oranlarda SD katkısı ve SA ile etkin bir şekilde akışkanlaştırılarak Yüksek Performanslı Beton üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Çalışmada, karışım kütlelerinin %90'ı oranında PÇ ve %10'u oranında SD kullanılarak çimento hamurları hazırlanmıştır. Sentezlenen polikarboksilat bazlı SA'ların genel

anlamda çimento hamuru işlenebilirliğini katkısız hamura kıyasla etkin bir şekilde koruduğu görülmüştür Erzengin (2019).

Alpaslan ve Felekoğlu (2019), çalışmasında düşük dozajlarda polikarboksilat bazlı SA kullanımı, KAÇ'a önemli derecede akışkanlık özelliği kazandırırken, normal PÇ ile kullanılması gereken katkı miktarından daha yüksek değerlerdedir. Vinil eter polietilen glikol (VPEG) kökenli A ve B SA katkıları çok düşük s/ç oranları ve dozajlarda (ağırlıkça %0.03) dahi KAÇ'ın hamurunun reolojik özelliklerini iyileştirmede, metokspolietilen glikol (MPEG) kökenli C SA katkısına kıyasla etkili olmuştur. KAÇ'ın bu çalışmada incelenen MPEG kökenli polikarboksilatla uyumsuz olduğu söylenebilir.

Kalsiyum sülfat minerali olarak bilinen alçıtaşı, bileşiminde iki molekülün kristalizasyon su bulundurmasıyla meydana gelen tür ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) yani jipstir. CaSO_4 olarak karşımıza çıkan mineral ise susuz kalsiyum sülfat Anhidrit alçı olarak isimlendirmiştir (Aydın, 2019). Üçlü karışımlarda kullanılabilen 3 çeşit alçı vardır. Bu alçılar şu şekildedir (Saydan, 2021);

Dihidrat Alçı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): Dihidrat, doğada bulunan, bünyesinde 2 su molekülü barındıran alçı türüdür. PÇ'nin üretiminde, klinkere karıştırılan alçı türü olarak kullanılmaktadır.

Hemihidrat Alçı (Paris Alçısı) ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$): Hemihidrat alçı, dihidrat alçının bünyesindeki 2 molekül suyun $\frac{3}{4}$ 'ünün kalsinasyon yöntemiyle giderilmesi sonucu üretilen bir alçı türüdür. Böylece bünyesinde yarım molekül su kalan hemihidrat, suyla karıştırıldığında hidratasyona girerek dihidrat formuna geri döner. Bu hidratasyon reaksiyonu sonucu oluşan yeni bağlar sayesinde, yoğun bir yapıya ve yüksek bir dayanıma sahip olduğundan dolayı, özellikle inşaat sanayinde yapı alçısı ve alçı levha üretiminde, sağlık sektöründe ortopedik alçı, diş ölçü alçısı olarak oldukça sık bir şekilde kullanılmaktadır. Hemihidrat alçının günümüzde üretilen 2 farklı türü mevcuttur. Bunlar α ve β hemihidratlardır. Günümüzde inşaat sektörü başta olmak üzere birçok sektörde en çok kullanılan tür β -hemihidratlardır (Paris alçısı). α -hemihidrat ise suyla hidratasyonu sonucu β -hemihidrata göre daha yüksek dayanımlara sahip olmasının yanında priz başlangıç ve bitiş süreleri de daha kısa olduğundan dolayı genellikle sağlık sektöründeki uygulamalarda tercih edilirler.

Anhidrat Alçı (Susuz Alçı) (CaSO_4): Anhidrat alçı veya susuz alçı, dihidrat alçının bünyesindeki tüm suyun kalsinasyonla tamamen çıkarılması ile üretilirler. Düşük çözünme hızlarına sahip olduklarından ve hidratasyonları da oldukça yavaş olduğundan

dolayı, yapısal uygulamalardan daha çok, sülfirik asit üretimi, kâğıt sanayi gibi farklı sanayi alanlarında kullanılmaktadırlar.

Alçı çeşidi ve miktarı hidrasyon ürünlerinde oldukça etkilidir. KAÇ ve alçının birleşimi ile etrenjit oluşum reaksiyonunda alçı yani kalsiyum sülfatın tamamen bitmesi sonucunda kalan aluminat fazları etrenjit ile reaksiyona girerek monosulfoaluminat fazının oluşumunu sağlar. Monosulfoaluminat oluşumunun neden olduğu porozite oluşumu sonucu dayanım azalmasına neden olur. Dayanım azalması ve porozitenin artması sonucu üçlü sistemlerle hazırlanan betondan beklenen performansın elde edilememesi anlamına geldiği için alçı önemli karışım elemanıdır. Bu üç alçı içerisinde çözünme hızı en fazla olan hemihidrat alçısıdır. Çözünme hızı ile etrenjit oluşumu paralellik gösterdiği için en fazla etrenjit hemihidrat alçısında görülürken en az da anhidrat alçısında görülür (ÇİMSA, 2018). ÇİMSA (2017b), çalışmasına göre genel olarak Alçı/KAÇ oranının 28 günde oluşan toplam etrenjit miktarına direk etkisi bulunmaktadır. Fakat artan Alçı/KAÇ oranındaki artışa bağlı olarak etrenjit konsantrasyonunda artış meydana gelmiştir. Etrenjit konsantrasyonunda artışa ek olarak Alçı/KAÇ oranındaki artış mukavemet artışında da etkili olmaktadır. Etrenjit oluşumunun yüksek olması harçların işlenebilirliğini azaltması ve hidrasyon sırasında çıkan ısıнын yükselmesine neden olmaktadır. Ayrıca ÇİMSA, (2022c) çalışmasında KAÇ baskın üçlü sistemlerle hazırlanan karışımlarda erken ve uzun süreli dayanımlarda hemihidrat alçılar en iyi performans sergilerken, yapışma dayanımında ise anhidrit alçı en iyi performans göstermiştir.

2.3. Betonarme Plaklarla İlgili Kaynak Araştırması

Elmalı (2006), çalışmasında iki doğrultuda çalışan kirişsiz döşemelerin statik hesabında kullanılan TS 500 ve ACI 318-02 kapsamındaki yaklaşık yöntemler ile sonlu elemanlar hesap yöntemini incelenmiş ve belirtilen hesap yöntemleri ile sayısal uygulamalar yapıp, sonuçlar karşılaştırmıştır. Ayrıca kirişsiz döşemeler için TS 500'de önerilen yaklaşık yöntemlerden Moment Katsayılar Yöntemi ve Eşdeğer Çerçeve Yöntemi ile ilgili Visual Basic programlama dili kullanarak bilgisayar programı geliştirmiştir.

Kişin (2006), çalışmasında donatı tipi, tel içeriği ve zemin yatak katsayısı değişiminin, tekil yük altındaki çelik tel ve çelik hasır donatılı beton plakların davranışına etkisini incelemiştir. Deneyleri tam ölçekli 3.0 x 3.0 x 0.15 m boyutlarında 2 adet plak

üzerinde yürütülmüştür. Tel içeren plak boyu 60 mm, çapı 0.75 mm, çekme dayanımı 1100 N/mm^2 ve miktarı 15 kg/m^3 olan iki ucu kancalı Dramix kullanılarak hazırlanmıştır. Donatı içeren plakta boy ve en aralığı 150 mm, çapı 6 mm, çekme dayanımı 550 N/mm^2 olan Q188/188 tipi çelik hasır kullanılarak oluşturulmuştur. Bütün plaklarda C30 beton sınıfı kullanılmıştır. Elastik zemini temsil etmesi amacıyla ekstrüde polistiren köpük levhalar kullanılmıştır. Deney plakların, merkezine yerleştirilen el ile yükleme yapan krikoyu yardımıyla 1'er tonluk yük artımları ile kırılana kadar yüklenmişlerdir. Yük krikodan plağa $0.15 \times 0.15 \text{ mm}$ boyutlarındaki çelik levha ile aktarılırken her yük adımında oluşan yer değiştirme değerleri plakların 16 noktasına yerleştirilen deplasman ölçerler yardımıyla okunarak kaydedilmiştir. Deney sonuçlarına göre aynı tür zemine oturan plaklarda yük taşıma kapasitesi çelik hasır kullanılarak hazırlanan plak elemanda 44.00 ton, çelik tel kullanılarak hazırlanan plak elemandan ise 34.60 ton çıkmıştır. Yük seviyelerinin aynı değerde olduğu durumlarda; çelik tel donatılı plakların yer değiştirme değerleri hasır donatılı olanlara göre daha küçük iken, çatlak genişlikleri daha büyük ve çatlak sayısı daha az çıkmıştır. Yük seviyelerinin tam göçme durumuna eriştiği esnada; çelik tel donatılı plakların en büyük çatlak genişlikleri hasır donatılı olanlara göre daha büyük olarak çıkmıştır.

Görkem (2009), bu çalışmada, geleneksel betonla yapılan döşemelerde oldukça kullanışlı olan plastik mafsal çizgileri yönteminin yüksek dayanımlı betonarme döşemelere uygulanıp uygulanamayacağını araştırmıştır. Bu döşemelerin davranışları, değişken mesnet koşulları, boyut etkisi geleneksel betonarme döşemelerle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca yüksek dayanımlı betonarme döşemelerde donatı aralıkları değiştirilerek donatı içeriğinin döşeme davranışına etkilerini araştırmıştır. Çalışmada betonarme döşemelere ek olarak günümüzde kullanımı yaygınlaşan çelik lifli beton döşemeleri incelenmiştir. Çelik lifli beton döşemeler üzerinde döşeme boyutları, beton özellikleri ve lif içerikleri gibi parametreleri değiştirerek incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek dayanımlı betonarme döşemelere plastik mafsal çizgileri yönteminin uygulanabileceğini gösterirken bu çalışmada denenen lifli beton döşemede, liflerde akma oluşmadığı için plastik mafsal çizgileri yöntemi uygulanamamıştır.

Ezer (2010), çalışmada kirişsiz döşemelerde, iç kolon-döşeme birleşiminde oluşan zımbalama etkisine karşı kullanılan zımbalama donatılarının davranışı incelenmiştir. Zımbalama göçmesi için tasarlanmış $1/2$ ölçekle sınırlandırılmış 5 adet kolon-döşeme birleşimi incelenmiştir. Döşeme boyutları $2300 \times 2300 \times 150 \text{ mm}$ olarak kolon boyutları da $300 \times 300 \text{ mm}$ olarak seçilmiştir. Aynı malzeme özelliklerine, aynı

boyutlara ve aynı donatı oranlarına sahip zımbalama donatısı içermeyen referans, çelik profiller, kapalı etriyeler ve yeni tasarlanan iki adet zımbalama donatısı içeren 5 adet numune incelenmiştir. Yeni tasarlanan zımbalama donatılarının şekil benzerliklerinden dolayı K ve M harflerine benzediği için isimleri K ve M olarak adlandırılmıştır. Numuneler büyük hareketli yüklere ve düşük döşeme yüksekliklerine göre dizayn edilmiş ve detaylandırılmıştır. Deneysel çalışmalar neticesinde kullanılan yeni zımbalama donatılarının kolon-döşeme birleşiminde sünek davranışa izin verdiği ve zımbalama kapasitesini artırdığı sonucuna varılmıştır.

Grimaldi ve ark., (2013), çalışmasında çelik liflerin köprü plakalarının zımbalama kesme davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Köprü tabliyesi döşemelerinin gerçek davranışının simülasyonuna uygun bir geometriye sahip, çelik lifli ve lifsiz betonarme döşemeler test edilmiştir. Ayrıca, mesnetlere yakın uygulanan ve kesme göçmesine neden olan yükün durumu deneysel olarak analiz edilerek, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında $2400 \times 2400 \times 200 \text{ mm}^3$ ve $2400 \times 4000 \times 200 \text{ mm}^3$ elemanlar üzerinde hacimce %0.5'lik lif ilavesi, yaklaşık %30-35 oranında zımbalama kesme taşıma kapasitesini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Salmani (2013), çalışmasında çift doğrultulu betonarme döşemelerde yer alan boşluk büyüklüğünün döşemenin zımbalama davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yürütülen deneysel çalışmada bir adet boşluksuz olmak üzere boşluk büyüklüğü değişim gösteren dört deney elemanı ile birlikte toplam beş deney elemanı test edilmiştir. $2000 \times 2000 \times 120 \text{ mm}$ boyutlarında üretilen çift doğrultulu betonarme döşeme deney elemanları $200 \times 200 \text{ mm}$ boyutlarındaki kolondan uygulanan eksenel zımbalama yükü etkisinde test edilmiştir. Deney elemanlarında 300×300 ve $500 \times 500 \text{ mm}$ boyutlarındaki 2 farklı büyüklükteki boşluk, kolona paralel bitişik ve çapraz bitişik yer alacak şekilde bırakılmıştır. Deney elemanlarının testleri sonucunda elde edilen taşıma güçleri, rijitlikleri ve enerji tüketim kapasiteleri incelenerek boşluk büyüklüğünün çift doğrultulu döşemelerin zımbalama performansı üzerindeki etkilerini yorumlamıştır. Deney elemanlarının taşıma gücü kapasiteleri ACI 318, Eurocode 2 ve TS 500 yönetmelikleri ile hesaplanarak deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve yönetmelik eşitliklerinin deney elemanlarının taşıma gücünü ne ölçüde hesaplayabildiği belirlemiştir. Deneysel sonuçlar ışığında boşluk büyüklüğü arttıkça zımbalama dayanımının düştüğü sonucuna varılmıştır.

Durucan (2015), çalışmasında kare geometriye sahip olan boşluklar içeren 8 adet $2000 \times 2000 \times 120 \text{ mm}$ boyutlarında döşemeler, dıştan yapıştırılan karbon lifle takviye edilmiş polimer (CFRP) şeritler kullanılarak güçlendirilmiştir. Betonarme döşeme

üzerine düşey zımbalama yükleri döşemenin ortasında döşeme ile birlikte dökülen 200x200 mm kare kolonlar vasıtasıyla uygulanmıştır. Döşemelerin alt ve üst yüzlerinde ızgara şeklinde donatılar kullanılmış ve döşemelerin güçlendirilmesi için döşeme alt yüzünde ve boşluk köşelerinde dıştan yapıştırılan CFRP şeritler kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında, uygulanan güçlendirme sisteminin başarılı sonuçlar verdiği, boşluksuz deney elemanının zımbalama dayanımının pratik güçlendirme işlemi sayesinde ortalama olarak yakalandığı görülmüştür. Ek olarak deney elemanlarının üç boyutlu sonlu eleman analizleri de bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Kurulan detaylı sonlu eleman modellerinde, deneylerde gözlenen köşe kalkması davranışı ve dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerin beton yüzeyinden sıyrılması dikkate alınmış ve CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımlarını tahmin etmede sonlu eleman modellerinin genel olarak başarılı olduğu görülmüştür. Detaylı şekilde oluşturulmuş sonlu eleman modellerinin, CFRP şeritlerle güçlendirilmiş boşluklu döşemelerin zımbalama dayanımlarını tahmin etmede kullanılabileceği fikri öne atılmıştır.

Nguyen ve ark., (2017), bu çalışmada, özellikle fiber oryantasyonunun etkisi göz önünde bulundurularak, kesme donatısı olmayan yüksek performanslı çelik fiber donatılı beton plakaların delme kesme davranışı üzerine deneysel bir çalışmanın sonuçlarını sunmaktadır. Deney sonuçlarına göre plakların üretiminde eklenen çelik fiber hacim oranı %0'dan %0.8'e ve %1.6'ya yükseltilmesi sonucunda kesme kapasiteleri sırasıyla 87 kN'dan 125 kN ve 168 kN değerlerine çıkarmıştır. Bu da %43 ve %93'lük bir kesme kapasitesine denk gelmektedir. Ayrıca çelik lif içeriğinin %0.8 ve %1.6 çıkarılması sonucunda ilk çatlak yükünde de sırasıyla %46 ve %96 artışlara neden olmuştur. Beton dökümü üç farklı yönden merkezden, bir kenardan ve bir köşeden olmak üzere farklı pozisyonda dökülmüştür. Beton dökümündeki en iyi pozisyon delme kesme davranışı açısından %0.8 çelik elyaf ilavesinde merkezden döküm en iyi performansı sergilerken %1.6 lif ilavesinde ise bir kenardan döküm en iyi performansı sergilemiştir.

Keleş (2019), çalışmada kirişli plak, kirişsiz döşemeli, tek doğrultulu dişli (asmolen) döşemeli ve iki doğrultulu dişli (kaset) döşemeli yapı sistemlerinin deprem performanslarını karşılaştırmıştır. 4 farklı döşeme tipinde TS500 ve TBDY (2018) yönetmeliklerinden yararlanarak 3, 4 ve 5 katlı binalar modellemiş ve deprem hesaplamalarını, eşdeğer deprem yükü yöntemine göre yapmıştır. Analiz sonuçlarından elde ettiği verileri; binaların doğal titreşim periyotları, taban kesme kuvvetleri, maksimum yatay yer değiştirmeleri ve görelî kat ötelemelerini karşılaştırmıştır.

Karşılaştırma sonucunda kirişli plak döşemeli sistemlerin en optimum sonuçları verdiği görülmüştür. Daha sonrada kirişli plak döşemeli sistemlerde kat yüksekliği ve kat adedi değişiminin taşıyıcı sistem davranışına etkisini görebilmek için farklı kat sayısı ve kat yüksekliklerinde modeller oluşturmuştur. Oluşturduğu bina modellerinin deprem hesaplamaları için de SAP2000 sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır.

Saatci ve ark., (2019), çalışmasında her iki yönde birbirine dik 0.004 (D1 serisi) ve 0.002 (D2 serisi) oranında boyuna donatı içeren 2150x2150x150 mm boyutlarında iki grup betonarme döşeme hazırlamışlardır. Betonarme döşemeler hacimce %0, %0.5, %1 ve %1.5 oranında çelik fiber katkısı içeren beton karışımlarıyla dökülmüştür. Üretilen toplam sekiz döşeme orta noktalarından statik yük altında teste tabi tutulmuştur. Deney sonucu çelik fiber katkısı olmayan numunelerde yüksek boyuna donatı oranına sahip döşeme boyuna donatısında akma gerçekleşmeden gevrek bir şekilde zımbalama göçmesi oluşurken düşük boyuna donatı oranına sahip döşeme zımbalama gerçekleşmeden önce çok daha sünek bir davranış göstermiştir. Çelik fiber katkısı her iki boyuna donatı oranında da iki kata varan oranlarda zımbalama dayanımı artışlarına sebep olmuştur. Ancak D1 serisi döşemelerde çelik fiber katkısı maksimum yer değiştirmeleri önemli ölçüde arttırırken, D2 serisinde maksimum yer değiştirmelerde önemli bir fark oluşmamış, bu döşemelerin yer değiştirmesi boyuna donatının akması tarafından kontrol edilmiştir. Çelik fiber katkısı oranının arttırılması D1 serisi döşemelerde dayanımın ve maksimum yer değiştirmelerin artmasına sebep olurken, D2 serisi döşemelerde %1'in üstü çelik fiber katkı oranları davranışta önemli bir fark oluşturmamıştır. Yapılan deneyler Kritik Kesme Çatlağı Teorisi kullanılarak analitik olarak modellenmiş ve bu tip modelleme ile ilgili bazı iyileştirmeler önermiştir.

Solak (2019), çalışmasında ardgerme ile güçlendirilmiş kirişsiz döşemelerin zımbalama davranışını sünekleştirmenin yollarını araştırmak, hem de mevcut ve yeni yapılacak kirişsiz döşeme sistemlerine kolay, uygulanabilir bir güçlendirme yöntemi sunmak amacıyla çelik levhalar, bulonlar ile kirişsiz döşemelere ankre edildikten sonra bulonlara ardgerme verilerek, güçlendirilen elemanın zımbalama davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneysel çalışmada 3'ü referans, 9'u güçlendirilmiş olmak üzere toplam 12 adet 1830x1830x30 mm boyutlarında döşeme deney elemanı tek düze yükler altında test edilmiştir. Çalışmada; çelik levha serbest boyu, bulon sayısı ve levha kalınlığı değişken olarak ele alınmıştır. Deneye tabi tutulan elemanlardan elde edilen sonuçlara göre süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından kıyaslamıştır. Elemanda ardgerme işlemi uygulanmış bulonlar ile çelik levhalar arasında yük aktarımı sağlanarak daha rijit

bir sistem oluşturulmuş, zımbalama göçmesi engellenmiş ve sistemin süneklik oranının önemli bir ölçüde artması sağlanmıştır. Bu güçlendirme yöntemi mevcut ve yeni yapılacak kirişsiz döşeme sistemlerinde kolaylıkla uygulanabilecek bir yöntem olduğu sonucu sunulmuştur.

Naseri (2020), bu çalışmasında iki veya daha fazla farklı lif türünü bir arada içeren yeni bir lif takviyeli beton türü olan Hibrit lif takviyeli beton (HLTB) kullanılarak hazırladığı plakların zımbalama davranışını deneysel olarak incelemiştir. Zımbalama deneyine tabi tutulacak HLTB ince panel numunelerinde üç farklı çelik lif tipi ve polivinil alkol (PVA) lif kullanmıştır. İnce panel numuneleri 1700 x 1700 mm² boyutlarında ve 50 mm kalınlığında 13 adet panel numunesi dökmüştür. Numuneler, kenarlar boyunca basit mesnetli olup, yer değiştirme kontrollü bir hidrolik aktüatör tarafından merkezde 150 mm'lik dairesel bir çelik plaka yardımıyla yüklenmiştir. Uygulanan yükü ölçmek için yük hücresi, düşey deplasmanları ölçmek için 15 adet Lineer Variable Displacement Transducer (LVDT) kullanmıştır. Deney sonuçlarına göre sadece çelik lif içeren numuneler direkt zımbalama göçmesine uğrarken PVA lifli hibrit lif takviyeli numunelerde eğilme göçmesi veya yüksek eğilme yer değiştirmeleri sonrasında zımbalama göçmesi gözlemlenmiştir. Deney verileri lif takviyeli betonun ince panellerin zımbalama dayanımı ve yer değiştirme kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucunu doğrulamıştır. Çelik ve PVA lifler gibi iki farklı tipte lifin hibritleştirilmesinin zımbalama yükü kapasitesi, yer değiştirme özellikleri ve göçme modu açısından avantajları olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Mercimek (2021), çalışmasında kirişsiz döşemelerde sonradan açılan boşluklar nedeniyle zımbalama dayanımı yetersiz olan kirişsiz döşeme-kolon bağlantılarının zımbalama dayanımını arttırmak için karbon bazlı tekstil ile güçlendirilmiş sıva katmanı (TGSK) ile güçlendirme yapılmış ve fan tipi ankrajlarla desteklenmiştir. Çalışma kapsamında $\frac{3}{4}$ ölçekli bir adet boşluksuz, dokuz adet boşluklu referans ve dokuz adet boşluklu güçlendirilmiş olmak üzere toplam on dokuz adet deney elemanı üretilmiş ve tekdüze merkezi statik yükleme ile test edilmiştir. Boşluklu deney elemanları, çift boşluklu olacak şekilde üretilmiştir. 300 mm x 300 mm boyutlu çift boşluk içeren deney elemanından üç adet, 500 mm x 500 mm boyutlu çift boşluk içeren deney elemanından üç adet ve 700 mm x 700 mm boyutlu çift boşluklu deney elemanından da üç adet olacak şekilde toplamda dokuz adet deney elemanı üretilmiştir. Boşluk konumları ise kolon çevresinde birbirine paralel, diyagonal ve bitişik olarak seçilmiştir. Dokuz adet boşluklu güçlendirilmiş elemanların boşluk boyutları ve konumları dokuz adet boşluklu referans

elemanlarıyla aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında TGSK ile güçlendirilmiş deney elemanlarının zımbalama dayanımları güçlendirilmemiş referans deney elemanlarına göre ortalama %67 oranında artmıştır. Deney elemanlarının deneysel zımbalama yükü taşıma kapasiteleri TS500, ACI 318-19, Eurocode-2 ve BS8110-97 yönetmeliklerine göre hesaplanan zımbalama yükü taşıma kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır. TGSK ile güçlendirilmiş döşemelerin zımbalama dayanımlarını TS500 ve ACI 318-19 yönetmeliklerine göre daha başarılı bir şekilde Eurocode-2 ve BS8110-97 yönetmelikleri tahmin etmiştir. Tahminlerin iyileştirilmesi için Eurocode-2 ve BS8110-97'nin sunduğu denklemlere bazı katsayılar önermiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında KAÇ tabanlı, yüksek erken dayanımlı ve düşük su geçirgenlik özelliğine sahip üçlü sistemli karışımlar hazırlanmıştır. Üçlü sistemlerin hazırlanmasında yüksek miktarlarda kullanılan mineral katkıları sayesinde KAÇ'ın beton içerisindeki miktarı azaltılmıştır. KAÇ'ın miktarının azaltılması, ucuz mineral katkıların oranlarının artırılması ile sık kullanılan PÇ'ye maliyet açısından yaklaştırılmaya çalışılmıştır. Ayrıca KAÇ'ın beton içerisindeki oranının azaltılması ile de çevreye verilen zarar en aza indirilmiştir. Katkıları yardımıyla KAÇ'ın hidrasyonu neticesinde oluşan, alüminat dönüşümünün bir sonucu olarak betondaki dayanım azalmasını ortadan kaldırmak ve servis ömrünü etkileyen en önemli parametre olan rötrenin neden olduğu yüzeysel ve derin çatlakların oluşumunun kontrol altında tutulabilmesi için mineral katkıları tercih edilmiştir. Üçlü sistemlerde sık kullanılan PÇ yerine bu çalışma özelinde SD tercih edilmiştir. SD'nin tercih edilmesinin en önemli sebebi Straetlingite (C_2ASH_8) oluşumunu sağlayarak KAÇ'lardaki dönüşüm reaksiyonlarının miktarını azaltmak ve bunun yerine daha kararlı bir yapının oluşmasını sağlamaktır.

Yukarıda ifade edilen amaçlar doğrultusunda oluşturulan üçlü sistemler üzerinde ilk olarak ön deneme karışımları hazırlanmıştır. Deneme karışımları eğilme ve basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Belirlenen oranlarda malzemeler üzerinde yapılan dayanım test sonuçları ve basınç altında su işleme derinliği tayini deney sonuçlarına göre nihai karışımlar oluşturulmuştur. Nihai karışımlarda kullanılacak malzemeler üzerinde X-ışını kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır. Daha sonra nihai karışımlar ile mekanik deneyler ve mikroyapı analizleri için numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde mikroyapı analizleri ve mekanik deneyler gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

3.1. Materyal

3.1.1. KAÇ

Tez kapsamında KAÇ tabanlı üçlü sistemlerle betonlar üretilmiştir. Çimento olarak ÇİMSA firmasına ait ISIDAÇ 40 KAÇ tercih edilmiştir. ISIDAÇ 40 çimentosuna ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1.'de, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir (ÇİMSA, 2022b).

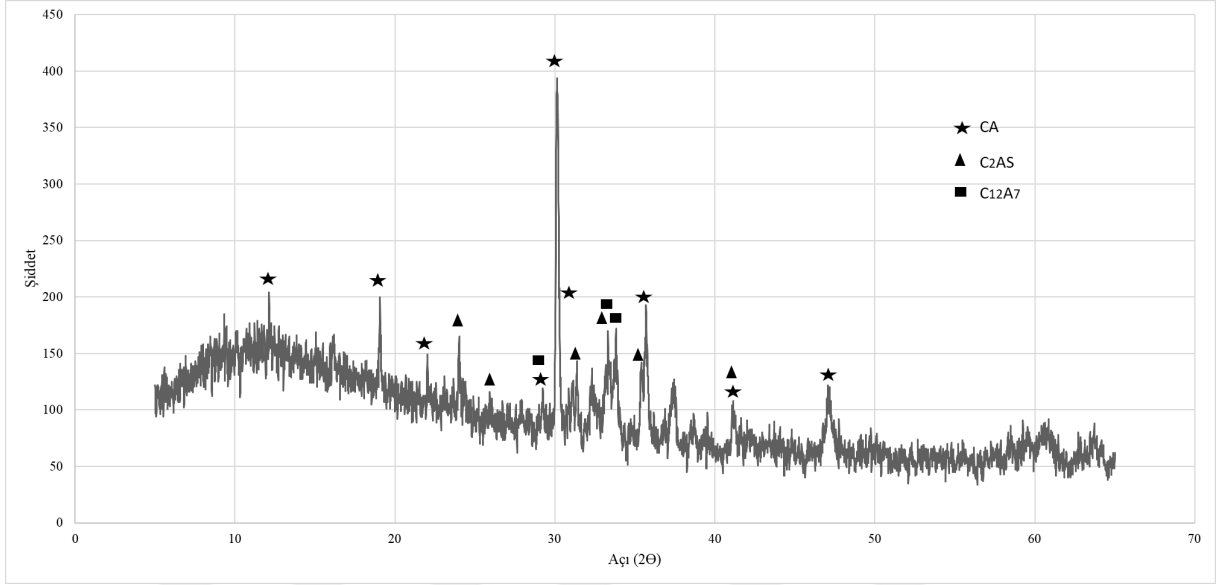
Çizelge 3.1. ISIDAÇ 40 çimentosu kimyasal özellikleri (ÇİMSA, 2022b)

Kimyasal Özellikler	Değer Cinsi	Çimsa Değerleri	EN 197-1 Limitleri	
			Min.	Maks.
SiO ₂	%	3.60	-	-
Al ₂ O ₃	%	39.80	35.0	58.0
Fe ₂ O ₃	%	17.05	-	-
CaO	%	36.20	-	-
MgO	%	0.65	-	-
SO ₃	%	0.04	-	0.50
Kızdırma Kaybı	%	0.30	-	-
Na ₂ Eq	%	0.16	-	0.40
Klorür (Cl ⁻)	%	0.0090	-	0.10
S (Sülfür)	%	0.01	-	0.10

Çizelge 3.2. ISIDAÇ 40 çimentosu fiziksel ve mekanik özellikleri (ÇİMSA, 2022b)

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Değer Cinsi	Çimsa Değerleri	EN 197-1 Limitleri	
			Min.	Maks.
Özgül Ağırlık	gr/cm ³	3.25	-	-
Özgül Yüzey (Blaine)	cm ² /gr	3000	-	-
(W/C: 0,45) Flow Test (ASTM C-109)	%	55	-	-
Priz Başlangıcı	Dakika	280	90.0	-
Priz Sonu	Dakika	295	-	-
Su	%	23.1	-	-
Hacim Sabitliği (Le Chatelier)	mm	1.0	-	-
0,045 mm Elekte Kalıntı	%	23.0	-	-
0,090 mm Elekte Kalıntı	%	6.5	-	-
6 Saat Basınç Dayanımı	MPa	47.0	18.0	-
24 Saat Basınç Dayanımı	MPa	70.0	40.0	-

Çalışma kapsamında kullanılan KAÇ'ın XRD deney sonucu Şekil 3.1.'de verilmiştir. XRD analizi sonucunda KAÇ malzemesinin bünyesinde varlığı tespit edilen fazlar XRD paterni üzerinde simgelerle gösterilmiştir. En fazla pik sayısı ve pik şiddeti CA (monokalsiyum aluminat) minerali olarak karşımıza çıkmaktadır. XRD analizinde CA minerali dışında C_2AS (Gehlenite) ve $C_{12}A_7$ (Mayenite) fazları görülmüştür.

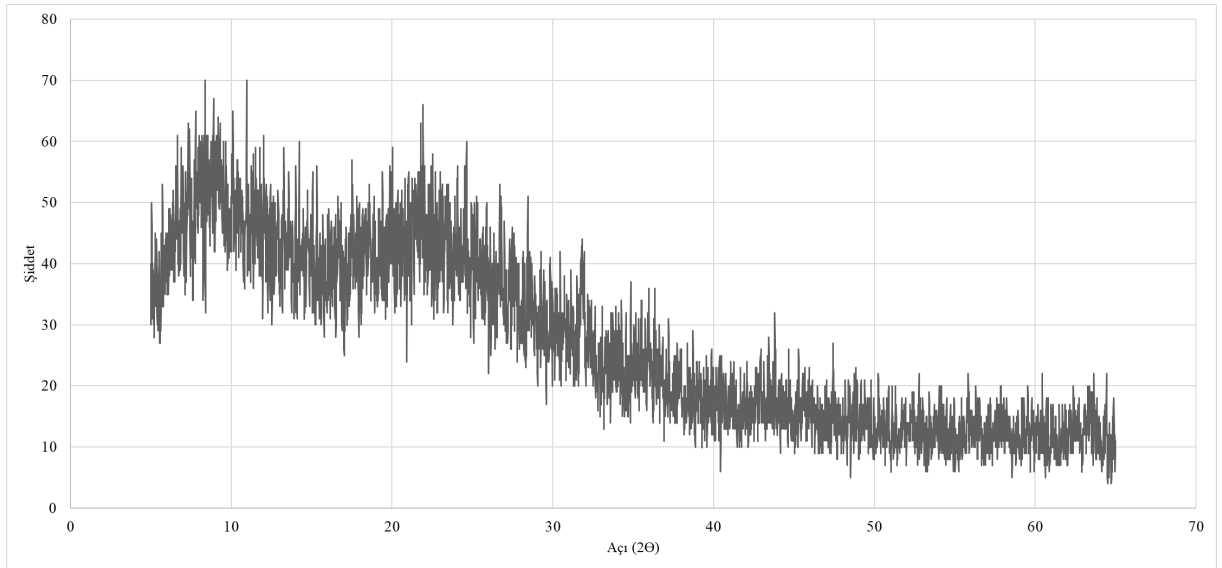


Şekil 3.1. KAÇ numunesinin 5-65° XRD deseni

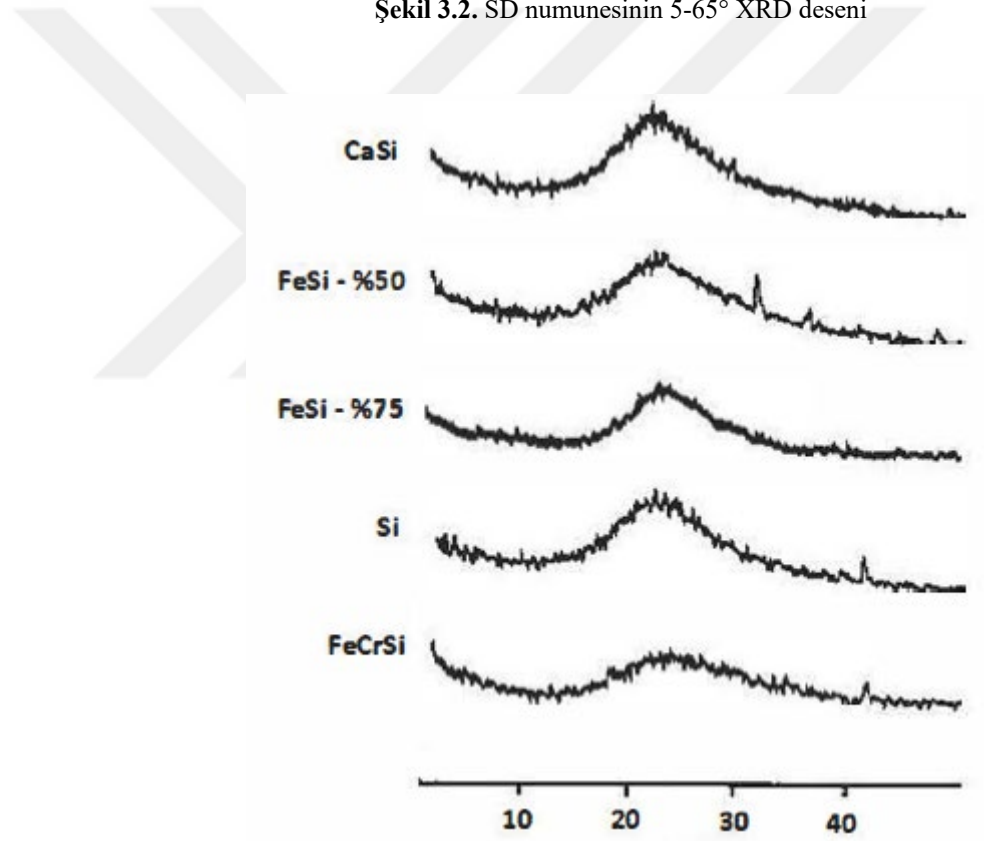
3.1.2. SD

Ana bağlayıcı madde KAÇ olup mineral katkı olarak SD ve alçı kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılan SD, Antalya ilinin Kepez ilçesinde bulunan ve ETİ Elektrometalurji A.Ş. bünyesinde üretim yapan tesisten elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan SD'nin XRD deney sonucu Şekil 3.2.'de verilmiştir. Elde edilen XRD paterninde belirgin bir kristal pikine rastlanmamıştır. XRD analizi düzenli geometriye sahip kristal yapıların tespitinde kullanıldığından, bu XRD sonuçlarından çalışmada kullanılan SD'nin yüksek oranda amorf olduğu söylenebilir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında değişik türdeki SD'lerin X-ışınları difraktogramları Şekil 3.3.'de gösterilmiştir (Tokyay, 2014). Bu şekilden de anlaşılabileceği üzere, çalışmada kullanılan SD yaklaşık 23° 2θ (teta) açısına karşı gelen bölgede gösterdikleri kambur nedeniyle, amorf silikadan oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.2. SD numunesinin 5-65° XRD deseni

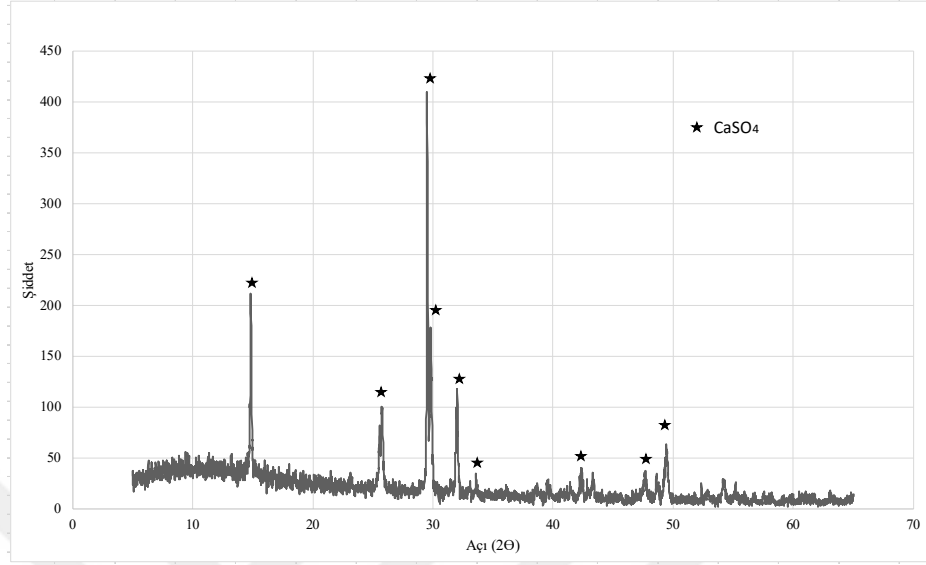


Şekil 3.3. Farklı SD'lerin X-ışınları difraktogramları (Aitcin ve ark., 1984)

3.1.3. Alçı

Çalışma kapsamında betonda kullanılan diğer bir mineral katkı alçının XRD deney sonucu Şekil 3.4.'de verilmiştir. XRD analizi sonucunda alçı malzemesinin bünyesinde varlığı tespit edilen mineral XRD paterni üzerinde simgeyle gösterilmiştir.

XRD deneyi sonucunda analiz edilen alçının beklendiği gibi çok yüksek oranda $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (Kalsiyum Sülfat) Hemihidrat alçıdan oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.4. Alçı numunesinin 5-65° XRD deseni

3.1.4. Akışkanlaştırıcı

Erken dayanımlı ve düşük su/bağlayıcı (0.4) oranında betonlar üretildiği için kıvam problemini önlemek adına kimyasal katkı olarak CHRYSO firmasına ait polikarboksilat esaslı SA Premia 196 kullanılmıştır. SA'nın teknik özellikleri Çizelge 3.3.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Premia 196 SA'nın teknik özellikleri (CHRYSO, 2022)

Özellikler	
Özgül ağırlık (20°C)	1.055 ± 0.010
pH	7.50 ± 2.00
Katı içerik (halojen)	$25.00\% \pm 1.20\%$
Katı içerik (EN 480-8)	$25.30\% \pm 1.20\%$
Na_2O eşdeğeri	$\leq 1.50\%$
Cl^- iyonları	$\leq 0.10\%$

3.1.5. Agrega

Karışımında kullanılan agrega Konya Aksaray çevre yolu Büyükkayacık OSB’de bulunan Öztaşoğlu Taş Ocağı’ndan ince agrega olarak 0-5 mm toz (kırmataş tozu) ve iri agrega olarak 5-12 mm kırmataş agregası temin edilmiştir. Erken dayanımlı betonlar üretileceğinden erken prizden kaynaklı betonların kalıba yerleştirilmesinde karşılaşılabilecek sıkıntıları önleyebilmek adına kuru karışım tercih edilmiştir. İlk olarak KAÇ, SD, alçı ve agrega karıştırılmış daha sonra karışım suyu ile birlikte akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir.

3.1.6. PÇ

Konya Çimento firmasına ait CEM II/A-M (P,L) 42.5R isimli çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4.’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. PÇ’nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

	Özellikler	Çimento değeri	TS EN 197-1’ e göre minimum değerler	TS EN 197-1’ e göre maksimum değerler
Fiziksel Özellikler	2. günün sonunda basınç dayanımı(MPa)	24.8	20	
	28. günün sonunda basınç dayanımı(MPa)	47.2	42.5	62.5
	Priz başlangıç süresi (dk)	190	60	10
	Hacim genleşme değeri (mm)	1		
Kimyasal Özellikler	SO ₃ değeri (%)	3.37		4.0
	CI değeri (%)	0.06		0.1
	Toplam katkı (%)	17	6	20
	K ₂ O değeri (%)	0.71		
	Na ₂ O değeri (%)	0.63		

3.1.7. Lityum sülfat (LiSO_4)

Üçlü sistemlerde hızlı dayanımı sağlamak ve hidrasyonun çözünme hızını ilk saatlerde arttırmak için Imerys Alüminat firması tarafından üretilen Çizelge 3.5.'de verilen Peramin AXL 80-lityum sülfat monohidrat ($\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) katkı kullanılmıştır.

Çizelge 3.5. LiSO_4 katkının kimyasal ve fiziksel özellikleri (Imerys Alüminat, 2022)

Peramin AXL 80 Limit Değerler	
$\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ içeriği (kütlece)	> %97
Su içeriği (kütlece)	%13-14.5
Renk	Beyaz
Granülometri (% < 125 μm)	> 87
Granülometri (% > 200 μm)	< 1

3.1.8. Betonarme kalıp

Betonarme kalıp için 18 mm kalınlığında parlak MDF levhalar kullanılmıştır.

3.1.9. Donatı

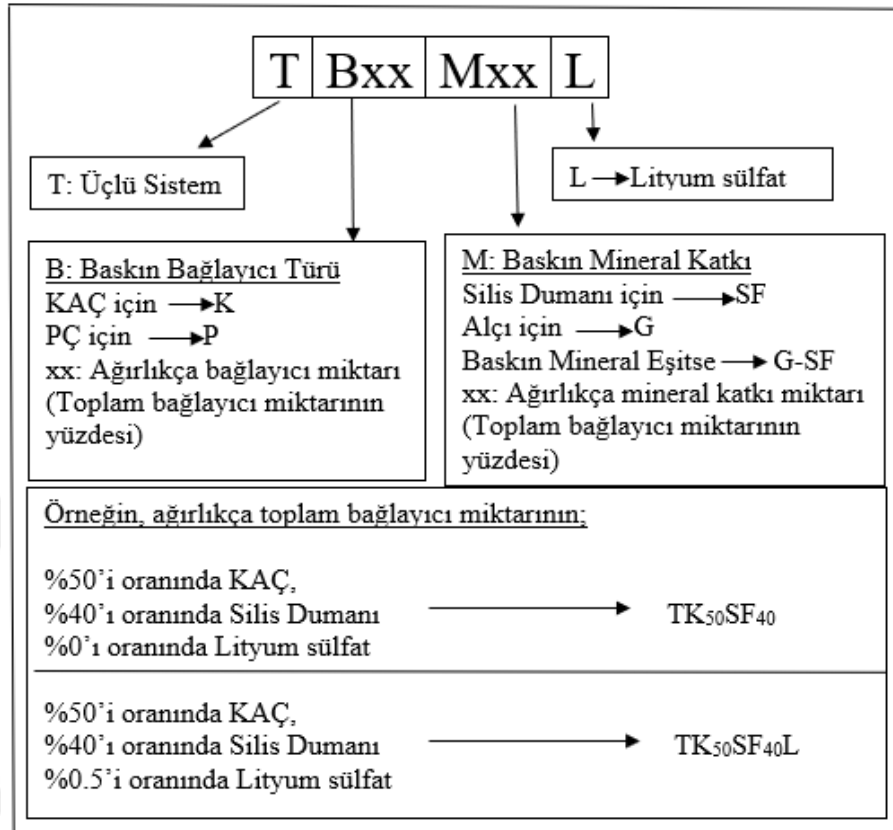
Çalışma kapsamında betonarme plaklarda kullanılacak çelik hasırlar için TS 708'e uygun $\phi 6$ 'lık nervürlü S420 sınıfı betonarme donatı çeliği kullanılmıştır. Ek olarak hazırlanmış çift kat çelik hasır alt ve üst donatısını ayırmak için $\phi 10$ 'luk nervürlü S420 sınıfı betonarme donatı çeliği sehpa olarak kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Deneme karışımları

Betonarme plakların üretimi öncesi kullanılacak karışımlar test edilmiştir. Bu kapsamda 10 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı (0.4) ve bağlayıcı/agrega oranı ise (1/3) olacak şekilde bütün karışımlarda sabit tutulmuştur. Karışımları hazırlarken dayanım tayini için hazırlanan numuneler TS EN 196-1'e göre en kesitleri 40 mm x 40 mm ve uzunlukları 160 mm olan üç adet prizma şekilli yatay bölmeden oluşan çelik kalıplar kullanılmıştır. Bütün karışımlarda 450 gr bağlayıcı, 1350

gr (0-5mm) agrega ve 180 gr su kullanılmıştır. Karışımların isimlendirilmesi Şekil 3.5.'de kullanılan malzemelerin bağlayıcı bileşenlerinin ve yüzdeleri Çizelge 3.6.'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Karışımların isimlendirilmesi

Çizelge 3.6. Üçlü sistemlerle hazırlanan deneme karışımları

NUMUNE	KAÇ	ALÇI	SD	PÇ	SA	Lityum sülfat (LiSO ₄)
TK ₅₀ SF ₄₀	50%	10%	40%	0%	1%	0%
TK ₅₀ SF ₄₀ L	50%	10%	40%	0%	1%	0.5%
TK ₅₀ G ₄₀	50%	40%	10%	0%	1%	0%
TK ₅₀ G ₄₀ L	50%	40%	10%	0%	1%	0.5%
TK ₄₀ SF ₃₀	40%	10%	30%	20%	1%	0%
TK ₄₀ SF ₃₀ L	40%	10%	30%	20%	1%	0.5%
TP ₄₀ SF ₃₀	20%	10%	30%	40%	1%	0%
TP ₄₀ SF ₃₀ L	20%	10%	30%	40%	1%	0.5%
TK ₄₀ G-SF ₂₀	40%	20%	20%	20%	1%	0%
TK ₄₀ G-SF ₂₀ L	40%	20%	20%	20%	1%	0.5%

Her karışım için Çizelge 3.6.'da verilen miktarlar 1 mg hassasiyetli elektronik teraziyle tartılmış ve mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılarak harçlar hazırlanmıştır. Her bir karışım için 1'er adet 40x40x160 mm prizma takımı hazırlanmıştır. Kalıplara alınan harç, minimum boşluk oranı ile yerleşmesi için sarsma makinası kullanılarak kalıp içerisine yerleştirilmiştir.

Numuneler 24 saat rutubetli ortamda bekletilmiştir (6 saatlik numuneler hariç). Harçlar kalıplardan çıkarılarak Şekil 3.6.'da gösterildiği gibi kür havuzuna alınmıştır. Numune hazırlama odası sıcaklığı 20 ± 2 °C, minimum %50 rutubet ortamı ve kür havuz suyu sıcaklığı 20 ± 1 °C'dir.



Şekil 3.6. Numunelerin küre tabi tutulması

Küre tabi tutulan numuneler içerisinde yaşı gelenler Şekil 3.7.'de gösterildiği şekilde basınç ve eğilme dayanım testine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.7. Deneme karışımları eğilme ve basınç deneyi

Bir takımı oluşturan üç adet numuneden elde edilen 6 saatlik eğilme dayanım sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmış ve Çizelge 3.7.'de verilmiştir. Bir takımda yer alan üç numune eğilme dayanım deneyinde ortadan kırılarak basınç dayanımı için altı adet numune oluşmuştur. Altı adet numunenin üç tanesi 6 saatlik diğer üç tanesi üzerinde 1 günlük basınç dayanım deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmış ve Çizelge 3.8.'de verilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarına göre seçilen karışımlar üzerinde basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi gerçekleştirilmiş ve nihai karışımlara karar verilmiştir.

Çizelge 3.7. 6 saatlik eğilme dayanım sonuçları (0*-6 saatlik eğilme dayanımı elde edilememiştir)

NUMUNE	KAÇ	ALÇI	SD	PÇ	SA	Lityum sülfat (LiSO ₄)	6 Saatlik
							EĞİLME
TK ₅₀ SF ₄₀	50%	10%	40%	0%	1%	0%	2.496 MPa
TK ₅₀ SF ₄₀ L	50%	10%	40%	0%	1%	0.5%	3.776 MPa
TK ₅₀ G ₄₀	50%	40%	10%	0%	1%	0%	2.906 MPa
TK ₅₀ G ₄₀ L	50%	40%	10%	0%	1%	0.5%	4.993 MPa
TK ₄₀ SF ₃₀	40%	10%	30%	20%	1%	0%	1.231 MPa
TK ₄₀ SF ₃₀ L	40%	10%	30%	20%	1%	0.5%	3.746 MPa
TP ₄₀ SF ₃₀	20%	10%	30%	40%	1%	0%	0* MPa
TP ₄₀ SF ₃₀ L	20%	10%	30%	40%	1%	0.5%	0* MPa
TK ₄₀ G-SF ₂₀	40%	20%	20%	20%	1%	0%	3.870 MPa
TK ₄₀ G-SF ₂₀ L	40%	20%	20%	20%	1%	0.5%	6.840 MPa

Çizelge 3.8. 6 saatlik ve 1 günlük basınç dayanım sonuçları (0*-6 saatlik basınç dayanımı elde edilememiştir, ×- ölçüm yapılmadı)

NUMUNE	KAÇ	ALÇI	SD	PÇ	SA	Lityum sülfat (LiSO ₄)	6 Saatlik	1 Günlük
							BASINÇ	BASINÇ
TK ₅₀ SF ₄₀	50%	10%	40%	0%	1%	0%	5.105 MPa	19.283 MPa
TK ₅₀ SF ₄₀ L	50%	10%	40%	0%	1%	0.5%	15.463 MPa	17.574 MPa
TK ₅₀ G ₄₀	50%	40%	10%	0%	1%	0%	9.704 MPa	38.802 MPa
TK ₅₀ G ₄₀ L	50%	40%	10%	0%	1%	0.5%	16.183 MPa	18.187 MPa
TK ₄₀ SF ₃₀	40%	10%	30%	20%	1%	0%	2.841 MPa	22.485 MPa
TK ₄₀ SF ₃₀ L	40%	10%	30%	20%	1%	0.5%	9.481 MPa	15.665 MPa
TP ₄₀ SF ₃₀	20%	10%	30%	40%	1%	0%	0* MPa	×
TP ₄₀ SF ₃₀ L	20%	10%	30%	40%	1%	0.5%	0* MPa	×
TK ₄₀ G-SF ₂₀	40%	20%	20%	20%	1%	0%	16.491 MPa	34.544 MPa
TK ₄₀ G-SF ₂₀ L	40%	20%	20%	20%	1%	0.5%	26.955 MPa	29.290 MPa

Deneme karışımlarından seçilen dört karışımdan 1'er adet 15x15x15 cm küp numuneler hazırlanmıştır. Bu karışımlar Çizelge 3.8.'deki 1 günlük basınç dayanımlarına göre lityum sülfat katkısız TK₅₀SF₄₀, TK₅₀G₄₀, TK₄₀SF₃₀ ve TK₄₀G-SF₂₀ numuneleri seçilmiştir. 1 ve 28. gün zımbalama deneyleri yapılacağı için 1 günlük basınç dayanımı önem arz etmektedir. Alınan dört farklı karışım 1. gün sonunda basınç altında su işleme derinliği tayini deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 3.8.'deki gibi cihaza yerleştirilen numuneler TS EN 12390-8 standardına göre (72 ± 2) saat süreyle (500 ± 50) kPa basınçlı su tatbik edilmiştir. (72 ± 2) saat süresi dolan numuneler deney düzeneğinden çıkarılarak Şekil 3.9.'da gösterilen yarmada çekme deney presi ile su basıncı uygulama yönünde ortadan iki eşit parça olacak şekilde ayrılmıştır. Yarılan yüzeylerde gözlemlenen maksimum su derinliği cetvel yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.10.). Test sonucunda elde edilen su işleme derinlikleri Şekil 3.11.'deki gibi kaydedilmiştir.



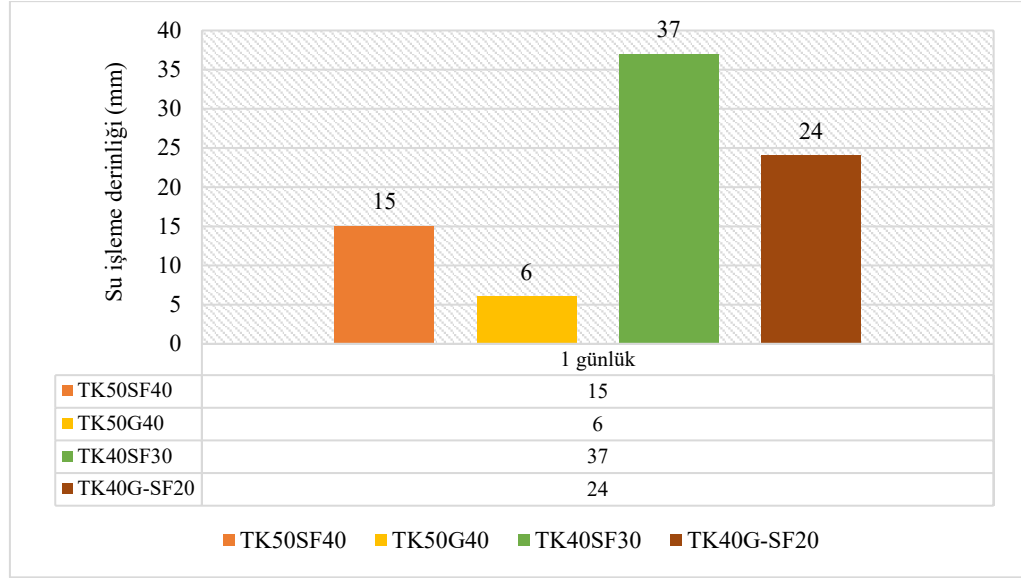
Şekil 3.8. Basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi



Şekil 3.9. Yarmada çekme deney presi



Şekil 3.10. Basınç altında su işleme derinliğinin ölçülmesi



Şekil 3.11. Su işleme derinliği

3.2.2. Mekanik analizler için deney numunelerinin hazırlanması

3.2.2.1. Nihai karışım numunelerin hazırlanması

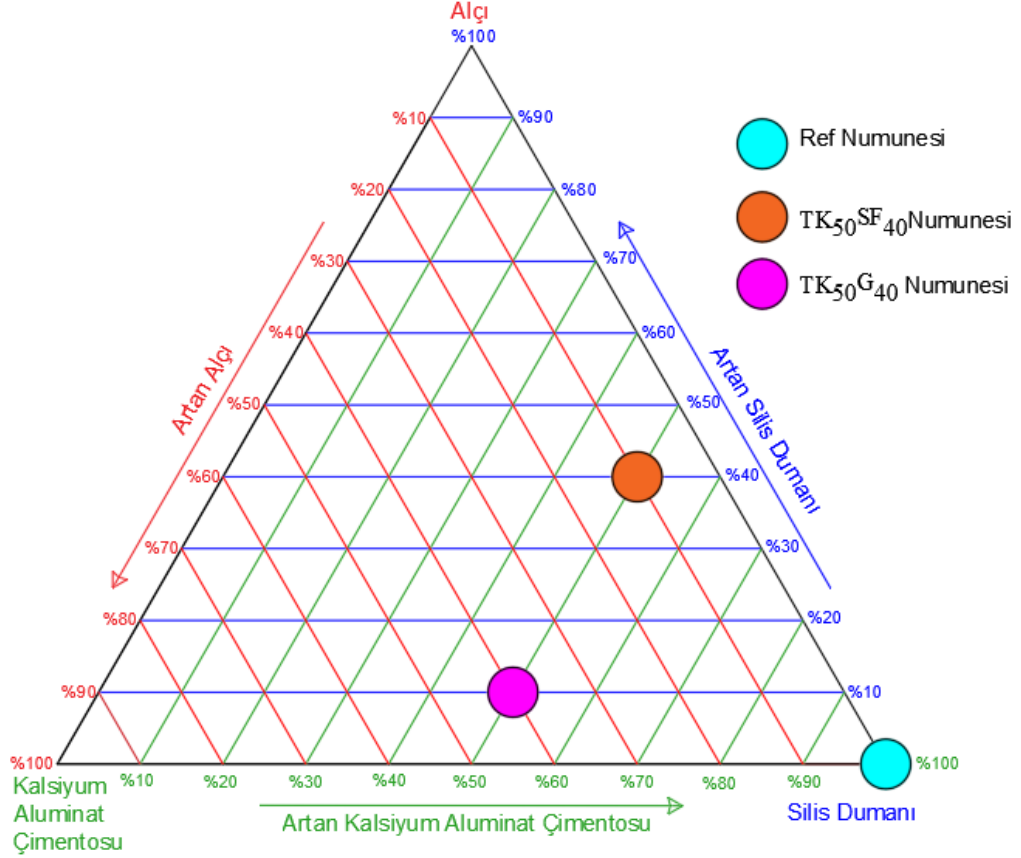
Betonarme plakların üretimi öncesi hazırlanan on farklı deneme karışımı üzerinde 6 saatlik eğilme ve basınç dayanım deneyi ve 1 günlük basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Çizelge 3.8.'de yer alan basınç dayanım sonuçlarına göre TK₅₀SF₄₀, TK₅₀G₄₀, TK₄₀SF₃₀ ve TK₄₀G-SF₂₀ karışımları 1 günlük basınç dayanım performansları baz alınarak seçilmiştir. Seçilen 4 karışım üzerinde 1. gün sonunda basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi yapılmıştır. Basınç altında su işleme derinliği tayini deneyinden Şekil 3.11.'de elde edilen sonuçlar ışığında su işleme derinliği en az olan TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ karışımları nihai karışım olarak seçilmiştir. Deneme karışımlarından seçilen KAÇ tabanlı üçlü sistemlerle hazırlanmış TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ karışımına referans olması adına Ref numunesi hazırlanmıştır. Ek olarak üçlü sistemlerle hazırlanan numunelerin yapılarda kullanılabilirliğinin yorumlanabilmesi adına klasik yöntemlerle N_{PÇ} karışımı hazırlanmıştır. Üretilen N_{PÇ} karışımı ile üçlü sistemlerle hazırlanmış karışımlar kıyaslanmış ve üçlü sistemli karışımların performanslarının yorumlanmasında kılavuzluk yapmıştır.

Bu kapsamda bölüm 3.2.1.'deki esaslara göre Ref, TK₅₀SF₄₀, TK₅₀G₄₀ ve N_{PÇ} dört farklı nihai karışım hazırlanmıştır. Nihai karışımların isimlendirilmesi ve kullanılan malzemelerin bağlayıcı bileşenlerinin yüzdeleri Çizelge 3.9.'da verilmiştir. Bu bağlayıcı

bileşenlerin yüzdelere göre hazırlanan üçlü sistemli Ref, TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ karışımların üçlü sistem diyagramı bu çalışma özelinde Şekil 3.12.'deki haline dönmüştür.

Çizelge 3.9. Nihai karışımlarının isimlendirilmesi ve bağlayıcı bileşenlerinin yüzdeleri

Numunelerin isimleri	KAÇ	ALÇI	SD	PÇ	SA
Ref	%100	—	—	—	%0.2
TK ₅₀ SF ₄₀	%50	%10	%40	—	%1
TK ₅₀ G ₄₀	%50	%40	%10	—	%1
NPÇ	—	—	—	%100	%0.4



Şekil 3.12. Üçlü sistem diyagramı

Her karışım için Çizelge 3.10.'da verilen miktarlar 1 mg hassasiyetli elektronik teraziyle tartılmış ve mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılarak harçlar hazırlanmıştır. 6 saatlik, 1 günlük, 3 günlük, 7 günlük, 14 günlük ve 28 günlük olmak üzere her bir zaman

dilimi için 1'er adet 40x40x160 mm prizma takımı hazırlanmıştır. Kalıplara alınan harç, minimum boşluk oranı ile yerleşmesi için sarsma makinası kullanılarak kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler Şekil 3.13.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Kullanılan beton bileşenlerin miktarları

Numunelerin İsimleri	BAĞLAYICI (450 gr)				AGREGA(gr) (0-5)mm	SU (gr)	SA (gr)
	KAÇ(gr)	ALÇI(gr)	SD(gr)	PÇ(gr)			
Ref	450	—	—	—	1350	180	0.9
TK ₅₀ SF ₄₀	225	45	180	—	1350	180	4.5
TK ₅₀ G ₄₀	225	180	45	—	1350	180	4.5
N _{PÇ}	—	—	—	450	1350	180	1.8



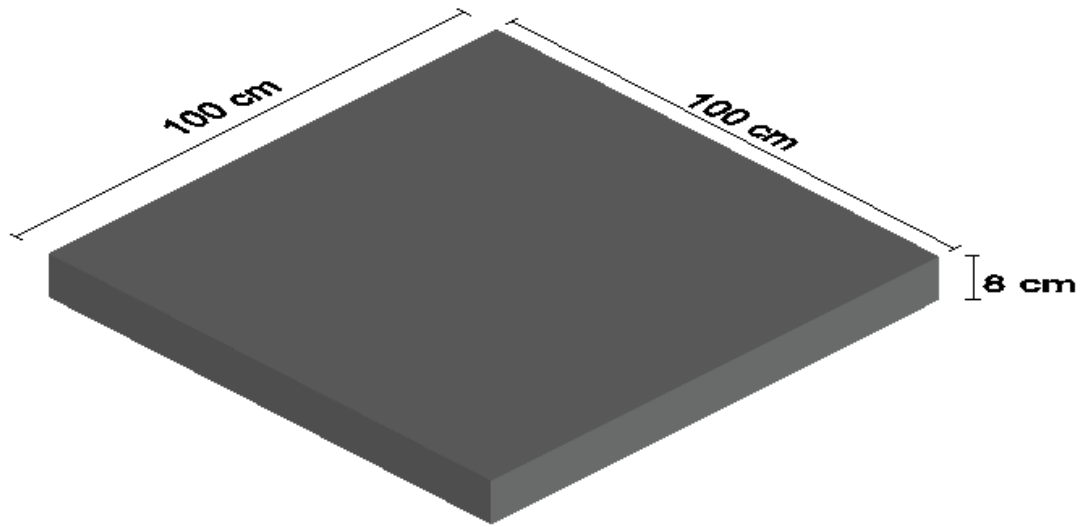
Şekil 3.13. Nihai karışım numunelerin hazırlanması

Bölüm 3.2.1.'deki esaslara göre hazırlanan numuneler küre tabi tutulmuştur. Küre tabi tutulan numuneler içerisinde yaşı gelenler basınç ve eğilme dayanım testine tabi tutulmuştur. Nihai karışımlarından alınan numuneler 6 saatlik, 1 günlük, 3 günlük, 7 günlük, 14 günlük ve 28 günlük zamanlarda eğilme ve basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Her bir karışımdan 18 adet 40x40x160 mm prizma numune hazırlanmıştır.

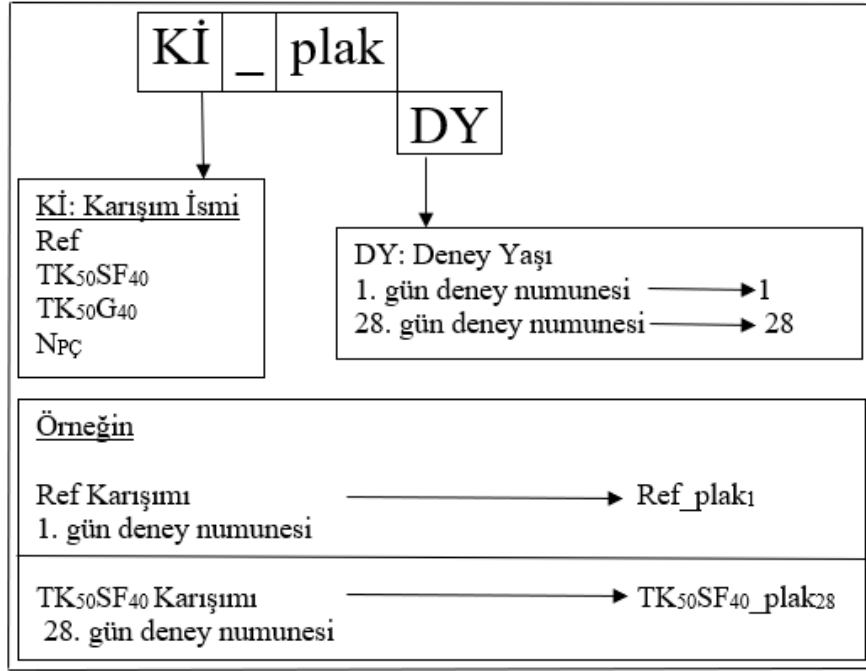
3.2.2.2. Betonarme plak numunelerin hazırlanması

3.2.2.2.1. Betonarme plak elemanların boyutlarının seçilmesi

Betonarme plak elemanlarının boyutları, laboratuvar ortamında üretilebilecek ve gerçeği yansıtabilecek şekilde 1/3 ölçeğinde seçilmiştir. Betonarme plakların boyutları 100x100x8cm boyutlarında Şekil 3.14.'deki gibi hazırlanmıştır. Hazırlanan betonarme plakların isimlendirmesi Şekil 3.15.'de verilmiştir.



Şekil 3.14. 1/3 ölçekli betonarme plakların boyutları



Şekil 3.15. Betonarme plakların isimlendirilmesi

3.2.2.2.2. Betonarme plakların malzeme özellikleri

Kalıp

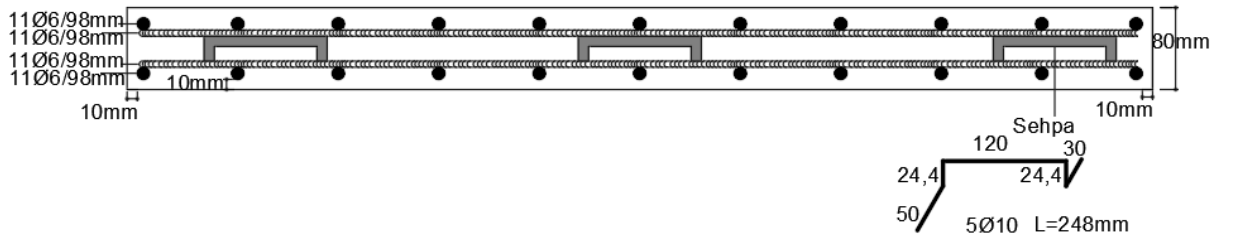
Betonarme kalıp için 18 mm kalınlığında parlak MDF levhalar kullanılmıştır. MDF levhalar 1/3 ölçekli 6 adet 100x100x8 cm boyutlarında taze betonun ağırlığını taşıyacak, yerleştirme sırasında darbe ve titreşimlere dayanıklı olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 3.16.).



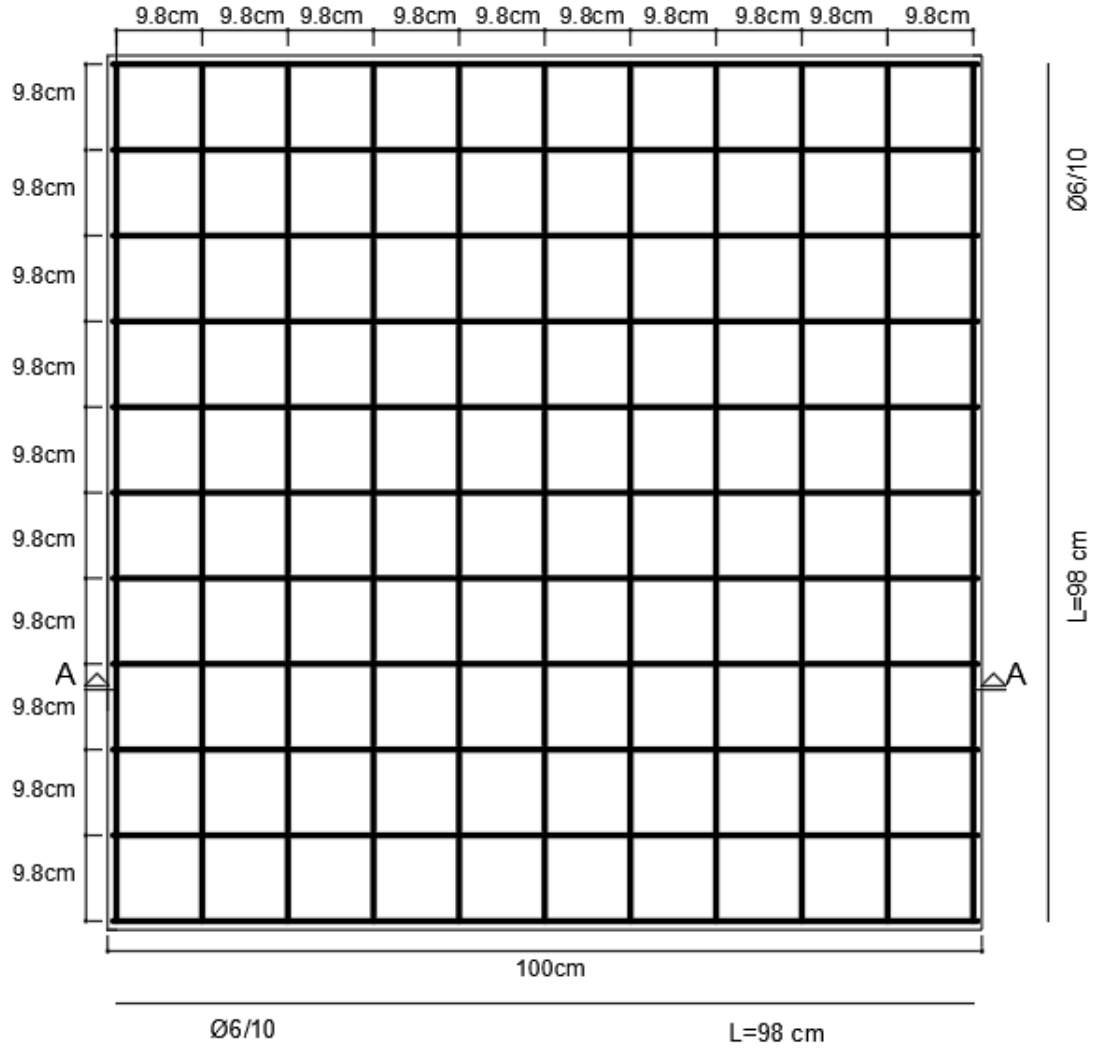
Şekil 3.16. Betonarme kalıp

Donatı

Betonun çekme dayanımı basınç dayanıma göre oldukça düşüktür. Yapılarda meydana gelen çekme gerilmelerini karşılayabilmek için donatı kullanılır. Uygun yerleştirilmiş donatı yapıya etkiyen yüklerden kaynaklı taşıyıcı elemanlarda oluşan çatlakların genişlemesini önlemede katkı sağlar. Tez çalışması kapsamında deneye tabi tutulacak betonarme plaklarda oluşacak çatlak genişliği ve uzunluğu önem arz etmektedir. Kişin (2006), çalışmasında çelik hasır ile donatılmış elemanlarda çatlaklar kontrol altına alınabileceğini fakat normal donatı ile donatılan elemanlarda yük altında donatı ve beton arasındaki aderans önceden çözülmesinden kaynaklı çatlakların oluşabileceği fikrini öne sürmüştür. Bu özelliklerinden dolayı taşıyıcı betonarme plak üretmek için hasır donatı tercih edilmiştir. Hasır donatıyı oluşturmak için TS 708 uygun $\phi 6$ 'lık nervürlü betonarme donatı çeliği kullanılmıştır. Donatı 100x100x8 cm kalıba uygun ve paspayı (d') = 1 cm olacak şekilde kesilmiştir. Kesilen çelik çubuklar birbirine dik doğrultuda yerleştirilerek iki çubuğun kesişme noktaları bağ teliyle yaklaşık 10 cm aralıklı kare gözlü çelik hasır şeklinde birleştirilmiştir. Her plak eleman için çift kat çelik hasır kullanılmıştır. Alt ve üst hasır donatıyı birbirinden ayırmak için 5 adet bir tanesi ortada diğerleri köşede olacak şekilde $\phi 10$ donatı çeliğiyle sehpa donatısı oluşturularak hasır donatıya bağ teliyle sabitlenmiştir. Donatılarının yerleştirilme şekli Şekil 3.17.'de detayları ise Şekil 3.18.'de verilmiştir. Hazırlanan çelik hasırlar Şekil 3.19.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Betonarme plak donatılarının yerleştirilme şekli



Şekil 3.18. Betonarme plakların alt ve üst 10x10 cm kare gözlü çelik hasır detayları



Şekil 3.19. Çelik hasır donatının kalıplara yerleştirilmesi

Beton

Deneme karışımlarından seçilen KAÇ tabanlı üçlü sistemlerle hazırlanan TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ numuneleri ve bunlara referanslık yapması için Ref karışımları kullanılarak 100x100x8 cm boyutlarında betonarme plaklar üretilmiştir. Betonarme plaklar 1. ve 28. gün sonunda zımbalama dayanım deneyine tabi tutulduğundan her bir karışımdan 2 adet olmak üzere 6 adet betonarme plaklar üretilmiştir. Betonarme plaklarda kullanılan malzemeler ve miktarları Çizelge 3.11.'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Betonarme plaklarda kullanılan malzemeler ve miktarları

Numunelerin İsimleri	BAĞLAYICI (Kg)			AGREGA(Kg)		SU	SA
	KAÇ(Kg)	ALÇI(Kg)	SD(Kg)	(0-5)mm	(5-12)mm	(Kg)	(Kg)
Ref_plak ₁	51.3	—	—	76.95	76.95	20.52	0.102
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁	25.66	5.13	20.52	76.95	76.95	20.52	0.513
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁	25.66	20.52	5.13	76.95	76.95	20.52	0.513
Ref_plak ₂₈	51.3	—	—	76.95	76.95	20.52	0.102
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈	25.66	5.13	20.52	76.95	76.95	20.52	0.513
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈	25.66	20.52	5.13	76.95	76.95	20.52	0.513

Çalışma kapsamında 1/3 ölçekli 6 adet 100x100x8 cm boyutlarında hazırlanmış kalıplara $\phi 6$ 'lık donatılarla hazırlanmış yaklaşık 10 cm aralıklı çift kat çelik hasır alttan, üstten ve kenarlardan 1cm paspayı olacak şekilde kalıplara yerleştirilmiştir. Üst çelik hasır için yeterli üst paspayı sağlamak, üst donatıyı desteklemek veya donatı tabakalarını ayırmak için $\phi 10$ 'luk donatılardan hazırlanan sehpa donatıları 5 adet olarak biri ortada diğerleri köşeye gelecek şekilde alt ve üst çelik hasıra bağ teliyle sabitlendi. Daha sonra Çizelge 3.11.'de yer alan malzemeler elektronik teraziyle tartılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan malzemeler KTÜN deprem laboratuvarında yer alan 0.35 m³'lük eğilebilen ve yatayda döner tekneli karıştırıcı betoniye yardımıyla öncelikle kuru karışımlar karıştırılmıştır. Homojen olarak karışan kuru karışıma su ve SA ilave edilmiştir. Her karışımdan 1. ve 28. gün olmak üzere iki numune hazırlanmıştır. Beton üretiminin yapılmasının ardından kalıplara yerleştirilen betonlarda istenmeyen hava boşluklarını önlemek için vibratör yardımıyla beton sıkılaştırılmıştır. Vibrasyon işleminde kalıba ve donatıya vibratörü değdirmemeye özen gösterilmiştir. En son olarak da çelik mala

yardımıyla beton yüzeyi düzeltilmiştir. Hazırlanan betonarme plaklar Şekil 3.20.'de verilmiştir.



Şekil 3.20. Betonarme plaklar

Toplamda 1 ve 28 günlük olmak üzere 3 farklı karışım hazırlanmıştır. Her bir karışımdan 6 tanesi basınç dayanım deneyi için 2 tanesi de su geçirgenlik deneyinde kullanılmak üzere 8 adet 15x15x15 cm'lik küp numune alınmıştır. Ek olarak KAÇ tabanlı üçlü sistemlerle hazırlanan numunelerin su geçirgenlik performanslarını tayin edebilmek için geleneksel yöntemlerle PÇ'li karışımlar hazırlanarak kıyaslanmıştır. Su geçirgenlik deneyi için PÇ ile hazırlanan N_{PÇ} numunesinden de 1 ve 28 günlük olmak üzere toplamda 2 adet 15x15x15 cm'lik küp numune hazırlanmıştır. Hazırlanan N_{PÇ} numunesinin isimlendirilmesi ve malzeme miktarları 1 adet 15x15x15 cm'lik küp numune ölçüsünde Çizelge 3.12.'de verilmiştir. Betonarme plak karışımlarından alınan küp numuneler Şekil 3.21.'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. N_{PÇ} numunesinin malzeme miktarları

Numune	BAĞLAYICI (1.98 kg)				AGREGA(kg)		SU (kg)	SA (gr)
	KAÇ(kg)	ALÇI(kg)	SD(kg)	PÇ(kg)	(0-5) mm	(5-12) mm		
N _{PÇ} -1	—	—	—	1.98	2.97	2.97	0.79	7.92
N _{PÇ} -28	—	—	—	1.98	2.97	2.97	0.79	7.92



Şekil 3.21. Beton karışımlarından alınan 15x15x15 cm'lik küp numuneler

3.2.2.2.3. Betonarme plakların ve numunelerin kürlenmesi

Hazırlanan beton numunelere kür uygulaması yapılmıştır. Hidratasyon olayının gerçekleşebilmesi ve normal hızda devam edebilmesi için, betondaki çimento hamurunun içerisinde yer alan kapiler boşluklarda yeterli miktarda suyun bulunması ve beton sıcaklığının çok düşük derecelerde olmaması gerekmektedir (Kişin, 2006). Bu koşulları sağlayabilmek adına beton kürü uygulanmıştır.

Çalışma kapsamında hazırlanan betonarme plaklarda plastik ve otojen rötre miktarını azaltmak için plaklar öncelikle ıslatılmış, daha sonra üzerlerine ıslak battaniye sarılarak yüksek nem şartlarında kürlenmesi sağlanmıştır. Alınan 15x15x15 cm'lik küp numuneler betonarme plaklarla aynı davranışı göstermesi adına oda sıcaklığı 20 ± 2 °C, minimum %50 rutubetli kür odasına koyularak üzerleri nemlendirilmiştir. Nemlendirme işlemine hem betonarme plaklarda hem de küp numunelerde 28 gün boyunca devam edilmiştir (Şekil 3.22.).



Şekil 3.22. Betonarme plak kür uygulaması

3.2.3. Mikroyapı analizi için deney numunelerinin hazırlanması

Mekanik deneylere tabi tutulacak betonarme plakların sergileyeceği davranışların doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için mikroyapı analizleri büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden betonarme plakları oluşturan üçlü sistemli karışımlar Ref, TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ numuneleri üzerinde mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.3.1. Mikroyapı analizi için malzeme hazırlama

Tez çalışması kapsamında mikroyapı analizi için deney numuneleri hazırlanmıştır. Deney numunelerini hazırlamak için Winnefeld ve ark. (2016) tarafından belirtilen işlem adımları takip edilmiştir. İlk olarak karışımdaki malzemeler hassas terazi yardımıyla tartılmıştır. Daha sonra toz bağlayıcılar el mikseri yardımıyla kuru karışım olacak şekilde 3 dk boyunca karıştırılmıştır. Karıştırılmış kuru karışıma su ve kimyasal katkı SA eklenmiştir. Kuru karışım ile sulu çözelti bol kabı içine alınarak el mikseriyle homojen karışım elde edilene kadar 2dk boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım mikroyapı deneyi için 20x40x20 mm boyutundaki silikon kalıplara dökülmüştür. Analiz yaşına gelen numuneler silikon kalıptan çıkarılarak elmas disk yardımıyla ince parçalar halinde kesilmiştir. FE-SEM (Alan emisyonlu-taramalı elektron mikroskobu) analizi için kesilen parçalar 1200 kum zımpara yardımıyla yüzeyleri parlatılmıştır. XRD analizi için

ise kesilen parçalar akik havanda dövülmüş ve toz haline getirilerek peletlenmiştir. XRD analizleri yaşına gelen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. FE-SEM analizleri ise hidrasyonu durdurulmuş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

3.2.3.2. Mikroyapı analizleri için hidrasyonun durdurulması

Tez kapsamında sertleşmiş numuneler üzerinde FE-SEM analizleri yapılmıştır. Sertleşmiş numunelerin mikroyapı analizlerinin daha doğru tespit edilebilmesi için kullanılan cihazın gereksinimlerinden dolayı ve herkesin kullanıma açık laboratuvarlarda yer alan cihazın uzun süreli erişiminin zor olmasından kaynaklı nem varlığında bile devam eden hidrasyonun durdurulması önem arz etmektedir (Saydan, 2021). Hidrasyon durdurma yöntemi ikiye ayrılmaktadır. Bunlar doğrudan kurutma (fırında kurutma, mikrodalga kurutma, vakumlu kurutma ve dondurarak kurutma) ve solvent değiştirme yöntemidir (Khmurovska ve ark., 2020). Hidrasyon durdurma yöntemlerindeki ortak amaç hidrasyonun devam etmesini sağlayan mikro ve makro boşluklardaki suyun uzaklaştırılmasıdır. Çalışma kapsamında hidrasyon durdurma yöntemlerinden solvent değiştirme yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemin tercih edilmesinin nedeni doğrudan kurutma yöntemlerinin KAÇ tabanlı üçlü sistemlerin hidrasyon ürünlerine ciddi zararlar verebileceğidir (Saydan, 2021). Solvent değiştirme yöntemi hidrate olmuş çimento numunesinin organik bir çözücü sıvının içerisine daldırılarak suyla dolu olan mikro ve makro boşluklara bu çözeltinin difüzyonla nüfuz etmesidir. Difüzyonla nüfuz edilmiş bu organik çözelti ısıtma veya vakum yöntemiyle numune içerisinden uzaklaştırılmaktadır (Zhang ve Scherer, 2011). Çözelti olarak farklı türde çözücüler aseton, metanol, etanol, izopropanol, tetrahidrofuran, dimetil sülfoksit, benzen, pentan vb. çözücüler kullanılmaktadır (Khmurovska ve ark., 2020). Tez kapsamında Winnefeld ve ark. (2016) çalışmasından hareketle çözücü olarak izopropanolün kullanılmasına karar verilmiştir.

3.2.4. Mikroyapı deneyleri

3.2.4.1. XRD

XRD analizi bir malzemenin faz belirleme, kimyasal kompozisyonu ve kristal yapısını tespit etmek için yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir (Şahin, 2003). XRD

yönteminde genellikle toz haldeki malzeme üzerine aynı mertebedeki dalga boyuna sahip X ışınlarını farklı açılarda gönderilerek malzemeyi oluşturan kristal yüzeye çarparak yansır ve bir alıcı tarafından tutulur (Saydan, 2021). Her bir kristal faz, X ışınları üzerine çarptığında kendine özgü morfolojiye sahip olmasından dolayı kendine has bir kırınım deseni oluşturur. Kendine özgü oluşan bu kırınım deseni sayesinde ilgili kristali diğer kristallerden ayırt edilmesini sağlar (Balaneji, 2017).

Bölüm 3.2.3.1.'de anlatılan şekilde hazırlanan numuneler üzerinde XRD deneyi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan her numune 10 dk boyunca taranmıştır. XRD deneyi gerçekleştirilirken Bruker D8 Discover cihazı kullanılmıştır. Analiz $\text{CuK}\alpha$ anot ile $\lambda=1.54\text{\AA}$ dalga boyunda, tarama aralığı 5° ila 65° (2θ), cihaz tarama adım boyu 0.020° , tarama hızı ise 0.014 sn/adım olacak şekilde ayarlanmıştır. XRD analizinde tam tur bu ayarlar doğrultusunda 60 sn de tamamlanırken X-Ray kaynağında 40 kV ve 40 mA güç ve enerjilerinde çalışılmıştır.

Yapılan incelemeler sonucu elde edilen XRD desenlerinin üzerindeki pikler, kırınım desenleri powder diffraction file - #pdf ile kıyaslanmış ve hangi pikin hangi kristal yapıyı ve/veya hidrasyon ürününü temsil ettiği desenlerin üzerinde gösterilmiştir.

3.2.4.2. FE-SEM

FE-SEM cihazı yüksek çözünürlüklerde ve büyütmelerde nano boyuttaki malzemelerin analizi için tasarlanmış görüntüleme tekniğidir. Taramalı Elektron Mikroskopisi'nde, elektron kaynağından koparılan elektronlar vakum altında bulunan bir kolonda toplayıcı mercekler yardımıyla numune üzerine düşürülmekte, numune yüzeyinde bulunan atomlarla elektron demetinin etkileşmesi sonucunda ortaya çıkan parçacıklar ve x-ışınları detekte edilerek, incelenmekte olan örneğin topoğrafyası ve kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi edinilmektedir (ESOGÜ, 2022).

Bu tez çalışması kapsamında, Bölüm 3.2.3.1.'de belirtildiği gibi, çok ince kesilip parlatıldıktan sonra bölüm 3.2.3.2.'de yer alan hidrasyon durdurma yöntemi kullanılarak durdurulmuş hidrasyon ve kurutulmuş numuneler üzerinde FE-SEM görüntüleme tekniği uygulanmıştır. Analiz için Zeiss firmasına ait GeminiSEM 500 cihazı kullanılmıştır. Numunelerin FE-SEM görüntülenmesi SE modunda 2 kV enerjide gerçekleştirilmiştir. Böylece üretilen üçlü sistemlerin içerisindeki hidrate olmuş yapıların yüzey görüntüleri, çok daha yüksek çözünürlüklü ve ayrıntılı olarak elde edilebilmiştir.

3.2.5. Mekanik deneyler

3.2.5.1. Nihai karışım 4x4x16 cm beton prizma deneyleri

Bölüm 3.2.2.1’de yer alan şekilde hazırlanan nihai karışımlarından (Ref, TK₅₀SF₄₀, TK₅₀G₄₀ ve N_{PÇ}) alınan numuneler 6 saatlik, 1 günlük, 3 günlük, 7 günlük, 14 günlük ve 28 günlük zamanlarda eğilme ve basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Her bir karışımdan 18 adet 40x40x160 mm prizma numune hazırlanmıştır. Deney için Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Şekil 3.23.’de yer alan Utest marka 250/15 kN Otomatik Çimento Basınç / Eğilme Deney Presi kullanılmıştır.



Şekil 3.23. Çimento basınç ve eğilme deney presi

3.2.5.1.1. Eğilme dayanımı

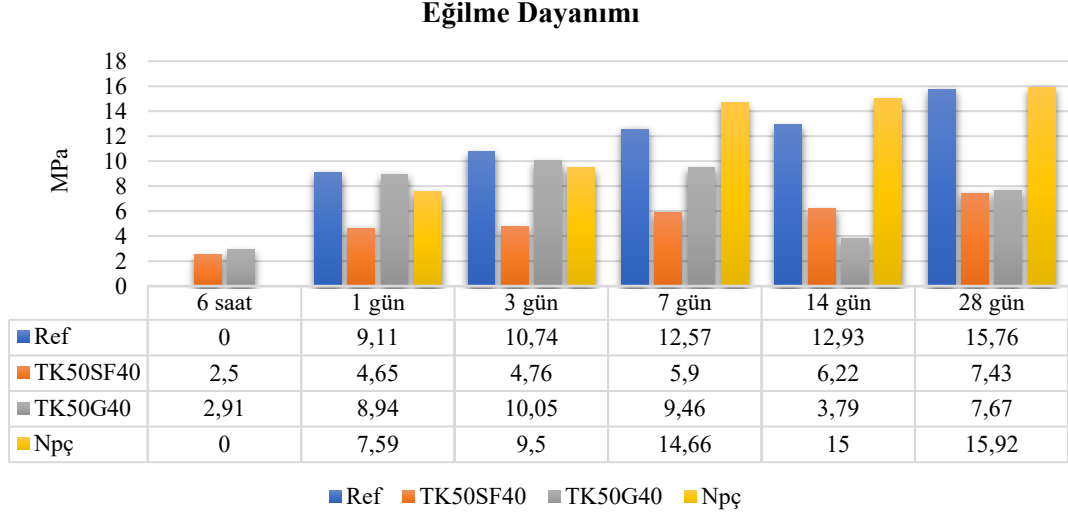
Hazırlanan 40x40x160 mm'lik numuneler eğilme dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Numuneler basınç ve eğilme deney cihazına TS EN 196-1 standardına uygun olarak Şekil 3.24.'deki gibi, numunelerin düz olan yan yüzeyleri mesnet silindirlerin üzerine ortalanarak yerleştirilmiştir. Yerleştirilen numunelerin yan yüzeyine dik bir şekilde kırılıncaya kadar cihaz tarafından kuvvet uygulanmış ve yük-zaman grafikleri elde edilmiştir. Bir takımı oluşturan üç adet numuneden elde edilen gerilme ve yük değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.13. ve Şekil 3.25.'de verilmiştir.



Şekil 3.24. Eğilme dayanımı

Çizelge 3.13. Eğilme dayanımı (0*-6 saatlik eğilme dayanımı elde edilememiştir.)

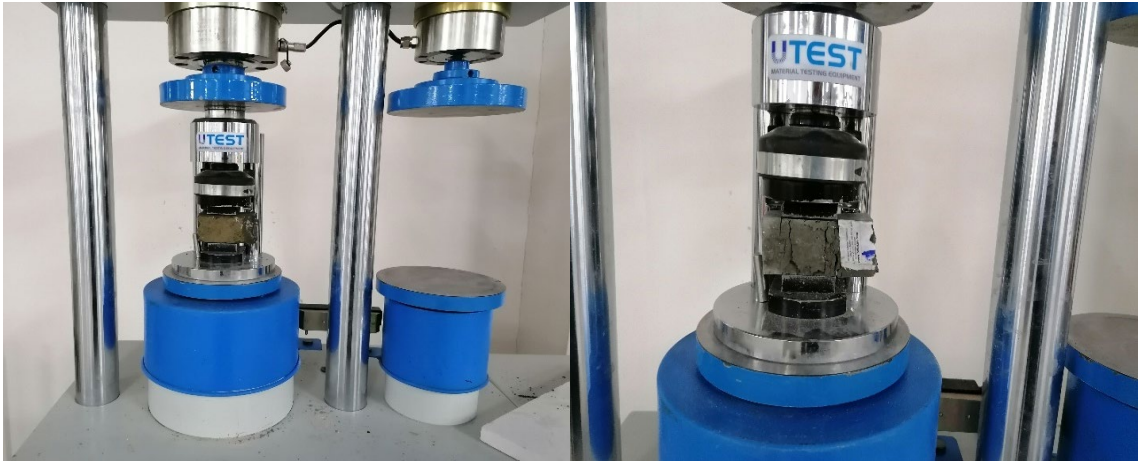
Numune		Eğilme Dayanımı							
		TÜR	Birimi	6 saatlik	1 Günlük	3 Günlük	7 Günlük	14 Günlük	28 Günlük
Ref	Ort.	Gerilme	MPa	0*	9.11	10.74	12.57	12.93	15.76
		Yük	kN	0*	3.93	4.60	5.39	5.51	6.77
TK ₅₀ SF ₄₀	Ort.	Gerilme	MPa	2.50	4.65	4.76	5.90	6.22	7.43
		Yük	kN	1.13	2.00	2.07	2.53	2.67	3.17
TK ₅₀ G ₄₀	Ort.	Gerilme	MPa	2.91	8.94	10.05	9.46	3.79	7.67
		Yük	kN	1.27	3.83	4.33	4.07	1.65	3.25
N _{PÇ}	Ort.	Gerilme	MPa	0*	7.59	9.50	14.66	15.00	15.92
		Yük	kN	0*	3.23	4.08	6.28	6.40	6.85



Şekil 3.25. 4x4x16 cm beton prizma eğilme dayanımı

3.2.5.1.2. Basınç dayanımı

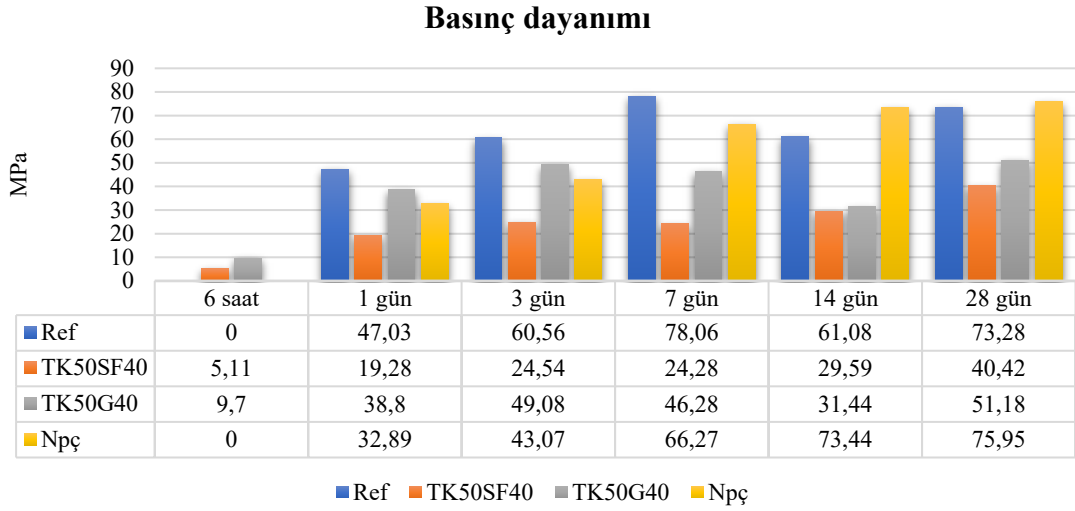
Bir takımda yer alan üç numune eğilme dayanım deneyinde ortadan kırılarak basınç dayanımı için 6 adet numune oluşmuştur. Bu numuneler eğilme dayanımında tarif edildiği gibi yan yüzlerine yük uygulanarak Şekil 3.26.'daki gibi basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Altı adet numuneden elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 3.14. ve Şekil 3.27.'de verilmiştir.



Şekil 3.26. Basınç dayanımı

Çizelge 3.14. Basınç dayanımı (0*-6 saatlik basınç dayanımı elde edilememiştir.)

Numune		Basınç Dayanımı							
		TÜR	Birimi	6 saatlik	1 Günlük	3 Günlük	7 Günlük	14 Günlük	28 Günlük
Ref	Ort.	Gerilme	MPa	0*	47.03	60.56	78.06	61.08	73.28
		Yük	kN	0*	75.27	97.05	124.94	97.75	115.10
TK ₅₀ SF ₄₀	Ort.	Gerilme	MPa	5.11	19.28	24.54	24.28	29.59	40.42
		Yük	kN	8.18	30.86	39.27	38.89	47.38	64.70
TK ₅₀ G ₄₀	Ort.	Gerilme	MPa	9.70	38.80	49.08	46.28	31.44	51.18
		Yük	kN	15.54	62.09	78.56	74.08	50.31	81.90
Npç	Ort.	Gerilme	MPa	0*	32.89	43.07	66.27	73.44	75.95
		Yük	kN	0*	52.64	68.93	106.05	117.53	121.55

**Şekil 3.27.** 4x4x4 cm beton prizma basınç dayanımı

3.2.5.2. Betonarme plak numune deneyleri

3.2.5.2.1. Taze betonda kıvam (çökme-slump) deneyi

Betonarme plak döşemeler için hazırlanan karışımlar kalıba yerleştirilmeden önce beton çökme değeri (slump) ölçülmüştür. Slump deneyi yapılırken deney numunesi TS EN 12350-1'e uygun olarak alınmıştır. Numune alırken betonu tam olarak temsil edecek şekilde ve homojen olmasına özen gösterilmiştir. İlk olarak çökme hunisinin iç yüzeyi yüzeyde serbest su kalmayacak şekilde nemlendirilmiş ve düz bir yüzeye huninin ağzının geniş kısmı zemine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Hazırlanan taze beton, mala yardımı ile huninin içerisini doldurularak beton hacminin yaklaşık üçte bir bölümleri halinde, yani

üç tabaka halinde yerleştirilmiştir. Her tabaka, şişleme çubuğu ile ayrı ayrı 25'er kez şişlenmiştir. En üst tabakanın şişlenmesi işlemi bittikten sonra kalıbın üstü mala ile tesviye edilmiştir. Bütün bu işlemlerden hemen sonra, huni, yandaki saplarından tutularak, yavaşça, düşey olarak yukarı çekilerek boş huni kalıbından kurtulan beton yığının yanına yerleştirilmiştir. Daha sonra şişleme çubuğu huninin üzerine yatay olarak konulmuştur. Çubuğun alt seviyesi ile çökme yapmış olan betonun üst yüzünün ortalama yüksekliği arasındaki mesafe metre yardımıyla Şekil 3.28.'deki gibi ölçülmüştür. TS-EN 12350-2 ye göre çökme sınıfı değerleri Çizelge 3.15.'de verilmiştir (MEB, 2015).



Şekil 3.28. Slump deneyi

Çizelge 3.15. Hazırlanan karışımların TS-EN 12350-2 ye göre çökme sınıfı değerleri

NUMUNE	Çökme (cm)	TS-EN 12350-2'ye göre çökme sınıfı değerleri				
		S1 (0-5cm)	S2 (5-10cm)	S3 (10-16cm)	S4 (16-22cm)	S5 (≥22cm)
Ref_plak ₁ Ref_plak ₂₈	20.0				X	
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁ TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈	21.5				X	
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁ TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈	18.5				X	

3.2.5.2.2. Beton basınç dayanımı tayini

Beton basınç dayanımının genel tanımı, “eksenel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyeti (eksenel basınç yükü etkisiyle, betonda oluşan maksimum gerilme)” olarak tanımlanmaktadır (Nergiz, 2007). Çalışma kapsamında üretilen betonarme plakların istenilen özelliklerde olup olmadığını kontrol etmek için taze betondan basınç dayanımını belirleyebilmek adına 3 adet 15x15x15 cm küp numune alınmıştır. Alınan küp numunelerin betonarme plaklarla aynı özelliklere sahip olması için numuneler kür odasına koyularak betonarme plaklarla eşit süre nemlendirilmiştir. Küp numuneler 1. ve 28. günde deneye tabi tutulmuştur. Deney yapılırken TS EN 12390-3 standardına dikkat edilerek numunelerin üzerindeki fazla su alınmış ve yük uygulama yönü numunenin yan yüzeyine dik olacak şekilde deney presine yerleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar kaydedilerek aritmetik ortalamaları alınmıştır. Taze beton basınç dayanım deneyinin yapılışı Şekil 3.29.'da 15x15x15 cm küp numunelerin ortalama basınç dayanımları sonuçları ise Çizelge 3.16.'da gösterilmektedir. Çizelge 3.16.'daki küp basınç dayanımları sonuçları ile TS 500 (2000) yönetmeliğinde yer alan beton sınıfları ve dayanımları çizelgesindeki değerlerden yararlanarak interpolasyon yöntemi yardımıyla karakteristik silindirik basınç dayanımları (f_{ck}) hesaplanmıştır. Hesaplanan f_{ck} değerleri ile betonun karakteristik eksenel çekme dayanımları (f_{ctk}) denklem 3.1'deki bağıntıdan hesaplanmıştır. Dayanım değerleri Çizelge 3.17.'de verilmiştir.

$$f_{ctk} = 0.35 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (3.1)$$



Şekil 3.29. Taze beton basınç dayanımı

Çizelge 3.16. 15x15x15 cm küp numunelerin ortalama basınç dayanımları

Numune İsmi	1 günlük ortalama basınç dayanımı		Numune İsmi	28 günlük ortalama basınç dayanımı	
	N	MPa		N	MPa
Ref_plak ₁	1.296x10 ⁶	57.59	Ref_plak ₂₈	1.272x10 ⁶	56.55
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁	3.463x10 ⁵	15.39	TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈	8.446x10 ⁵	37.53
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁	4.803x10 ⁵	21.405	TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈	1.105x10 ⁶	49.13

Çizelge 3.17. Betonarme plakların beton dayanımları

Numune	Birim	Ortalama Eşdeğer Küp (150x150x150 mm) Basınç Dayanımı	Karakteristik Silindir Basınç Dayanımı, f _{ck}	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı, f _{ctk}
Ref_plak ₁	MPa	57.59	47.59	2.41
Ref_plak ₂₈	MPa	56.55	46.55	2.38
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁	MPa	15.39	12.31	1.23
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈	MPa	37.53	30.33	1.93
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁	MPa	21.40	17.40	1.46
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈	MPa	49.13	39.13	2.19

3.2.5.2.3. Basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi

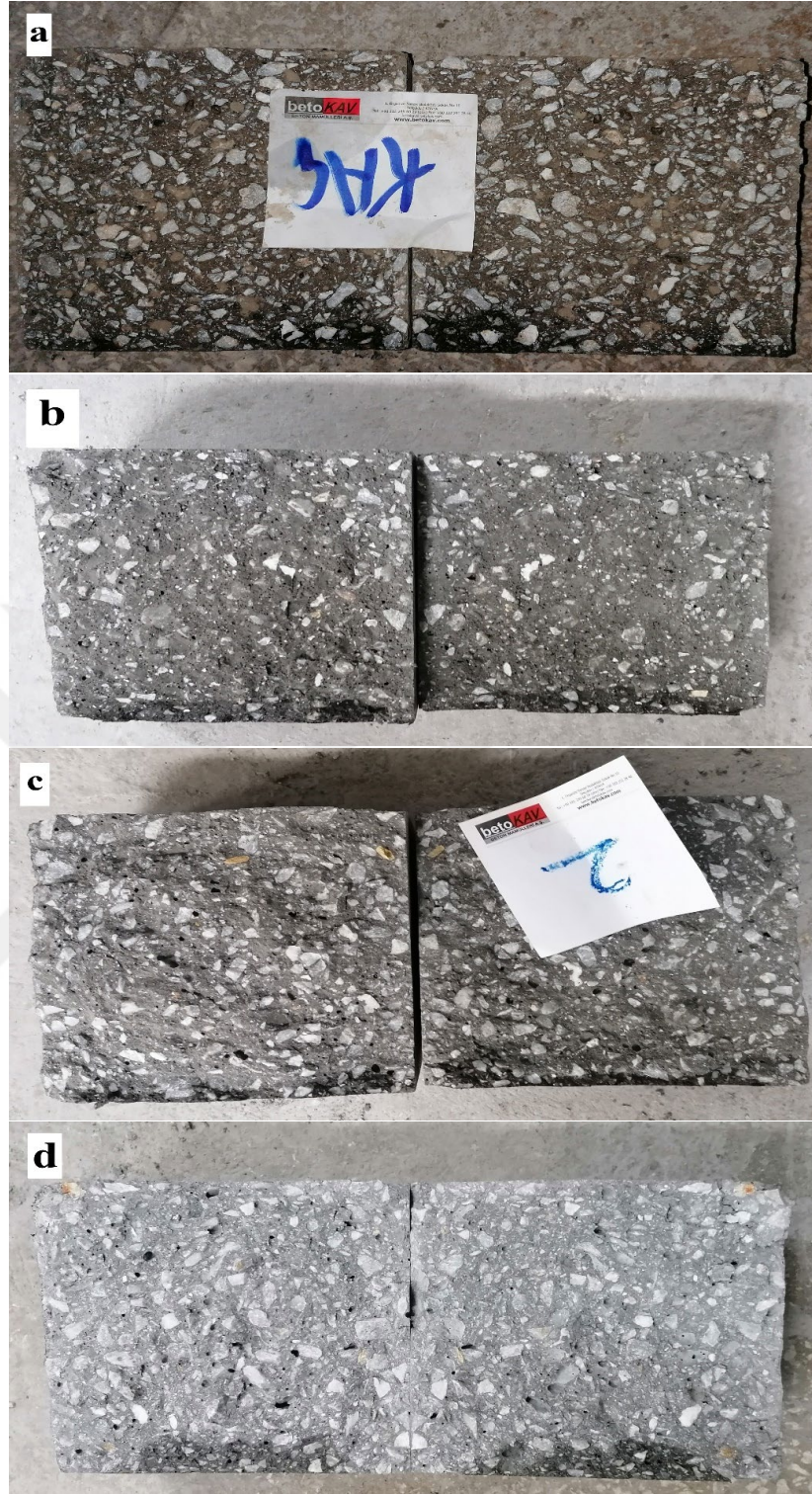
Betonda aranılan en önemli iki özellik dayanım ve dayanıklılıktır. Dayanıklı betonun elde edilmesindeki önemli parametrelerden biri geçirimsiz olmasıdır. Geçirimsizlik suya direkt maruz kalan metro istasyonları, tüneller, barajlar, sulama kanalları, yeraltı otopark vb. yapılarda büyük önem arz etmektedir. Bu tez özelinde erken yüksek dayanım kazanan, dayanıklı ve uzun servis sürelerine sahip beton karışımları oluşturulması amaçlandığından geçirimsizlik önemlidir. Bu yüzden karışımların geçirimsizlik özelliklerinin tayini için basınç altında su işleme derinliği tayin deneyi yapılmıştır. Basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi için betonarme plak üretiminde kullanılan 3 farklı karışımdan 2'şer adet 15x15x15 cm'lik küp numuneler alınmıştır. Alınan küplere ek olarak N_{PÇ}-1 ve N_{PÇ}-28 numunelerinden de 1'er adet 15x15x15 cm'lik küp numune üretilmiştir. Çalışma kapsamında erken dayanımlı beton üretildiği için 1. ve 28. gün sonunda basınç altında su işleme derinliği tayini deneyleri yapılmıştır. Deney için Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan UTEST marka 3 kapasiteli 0.2 bar hassasiyetle 12 bar'a kadar su basıncı uygulayabilen maksimum 15 barlık su basıncına dayanıklı beton geçirimsizlik aleti kullanılmıştır. Deney yapılırken ilk önce küp numunelerin su basıncı uygulanacak kısmı tel fırça ile pürüzlendirilmiştir. Daha sonra lastik contaların kenarlarından su sızdırmasını önlemek için gres yağı sürülmüştür. Şekil 3.30.'daki gibi cihaza yerleştirilen numuneler TS EN 12390-8 standardına göre (72 ± 2) saat süreyle (500 ± 50) kPa basınçlı su tatbik edilmiştir. (72 ± 2) saat süresi dolan numuneler deney düzeneğinden çıkarılarak Şekil 3.31.'de gösterilen yarmada çekme deney presi ile su basıncı uygulama yönünde ortadan iki eşit parça olacak şekilde ayrılmıştır. Yarılan yüzeylerde gözlemlenen maksimum su derinliği cetvel yardımıyla ölçülmüştür. 1. ve 28. gün sonunda (72 ± 2) saat süreyle basınç altında su işleme derinliği tayini deneyine tabi tutulan numuneler Şekil 3.32. ve Şekil 3.33.'de gösterilmiştir. Deney sonuçları Şekil 3.34.'de verilmiştir. Artan yaşa göre su işleme derinliği değişimi Şekil 3.35.'de verilmiştir.



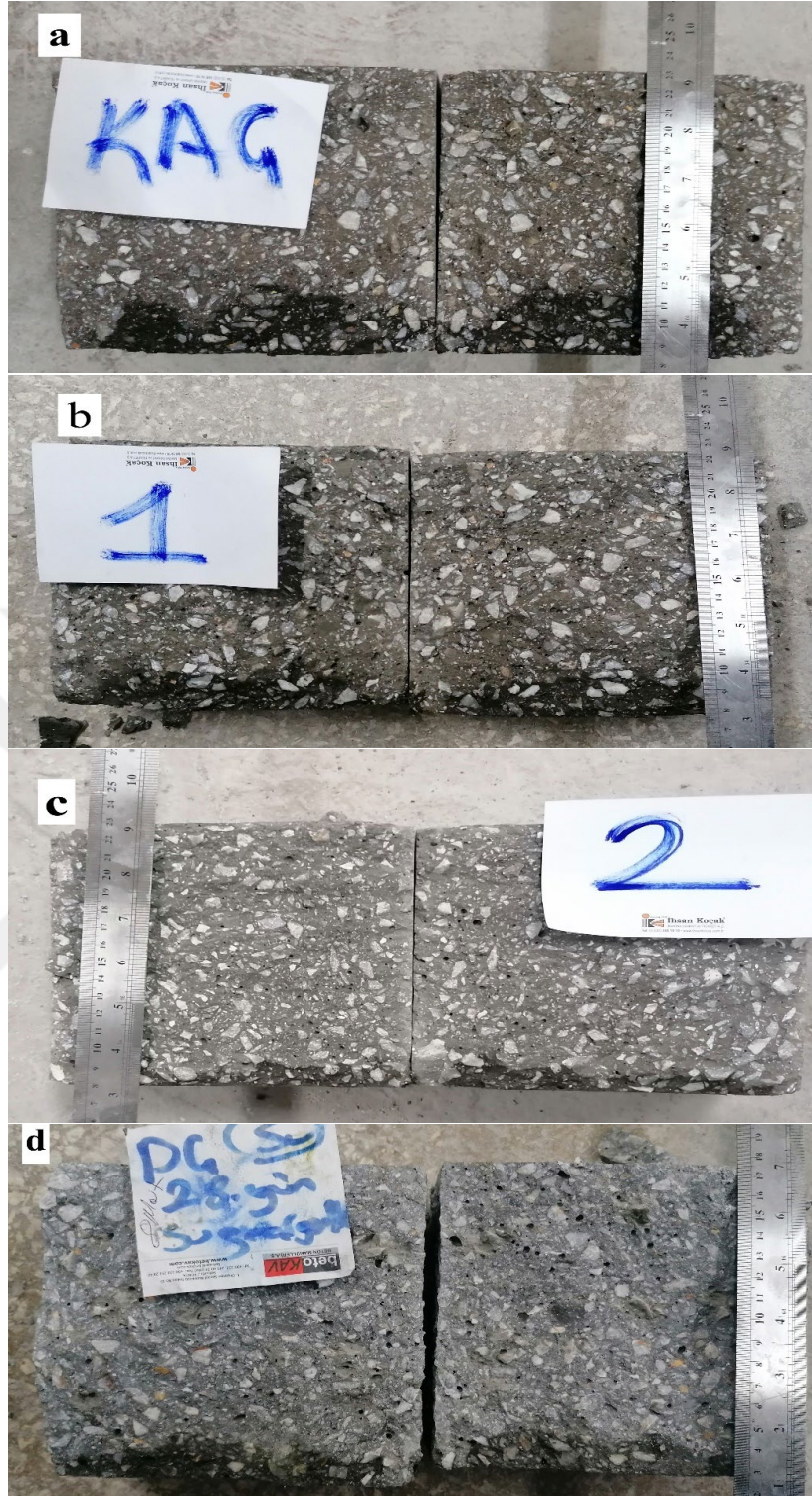
Şekil 3.30. Basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi



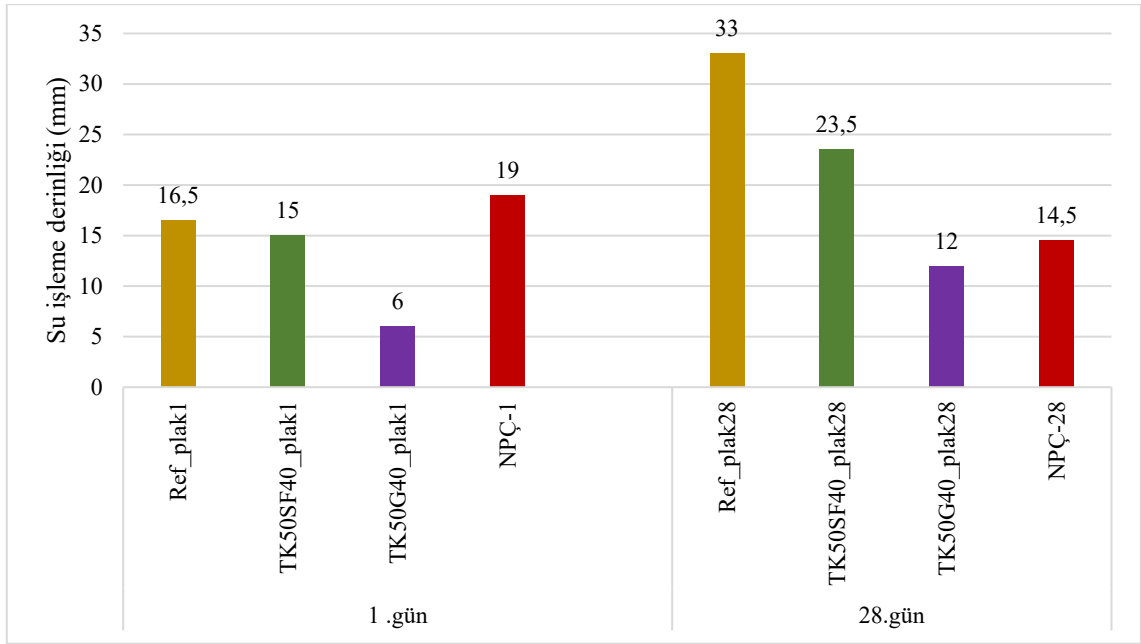
Şekil 3.31. Yarmada çekme deney presi



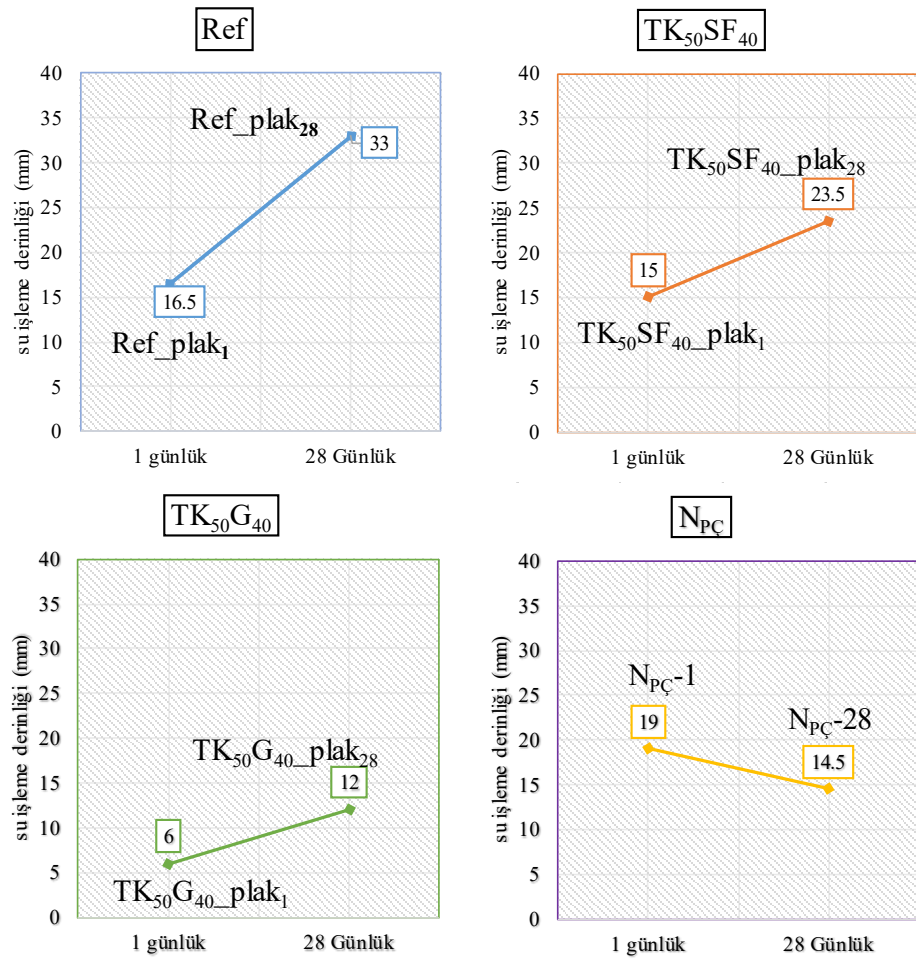
Şekil 3.32. 1 günlük basınç altında su işleme derinliği tayini deney sonuçları a) Ref_plak₁ numunesinin su işleme derinliği b) TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesinin su işleme derinliği c) TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesinin su işleme derinliği d) N_{PÇ}-1 numunesinin su işleme derinliği



Şekil 3.33. 28 günlük basınç altında su işleme derinliği tayini deney sonuçları a) Ref_plak₂₈ numunesinin su işleme derinliği b) TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ numunesinin su işleme derinliği c) TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numunesinin su işleme derinliği d) N_{pç}-28 numunesinin su işleme derinliği



Şekil 3.34. Basınç altında su işleme derinliği değerleri



Şekil 3.35. Artan yaşa göre su işleme derinliği değişimi

Basınç altında su işleme derinliği deney sonuçları ışığında, maksimum su işleme derinliği (MSİD) ile ilgili kriterler, TS EN 12390-8 standardında verilmiştir (Yavuz, 2011). Çalışma kapsamında hazırlanan karışımların MSİD'e göre değerlendirilmesi Çizelge 3.18.'de verilmiştir.

Çizelge 3.18. TS EN 12390-8'e göre betonda su işleme derinliğinin değerlendirme

Numune	Yaşı	Su İşleme Derinliği (mm)	Su İşleme Derinliği (mm)		
			Geçirimli Beton >50	Geçirimsiz Beton <50	Zararlı Ortamlara Karşı Geçirimsiz Beton <30
Ref_plak ₁	1.gün	16.5			X
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁	1.gün	15			X
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁	1.gün	6			X
N _{PÇ} -1	1.gün	19			X
Ref_plak ₂₈	28.gün	33		X	
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈	28.gün	23.5			X
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈	28.gün	12			X
N _{PÇ} -28	28.gün	14.5			X

3.2.5.2.4. Zımbalama

3.2.5.2.4.1. Kirişsiz plak döşemeler

Döşemeler, kalınlığı diğer iki boyutuna göre oldukça küçük olan genellikle düşey yüklerin doğrudan etkilediği taşıyıcı elemanlardır. Bu tür taşıyıcıların kalınlıklarının orta noktalarını birleştiren orta yüzeyin geometrik şekline göre plak veya kabuk adını alırlar. Orta yüzeyi düzlemsel olan sistemlere plak denir (Berktaş, 1992; Sevim, 2010). Döşemeler çalışma prensipleri ve mesnetlenme özelliklerine göre kirişli plak döşemeler, kirişsiz plak döşemeler, dişli döşemeler olarak sınıflandırılmaktadır (Keleş, 2019). Mesnet durumuna bağlı olarak yükünü bir veya iki doğrultuda ileten döşemeler kirişli plak döşemeler olarak isimlendirilir. Ana kirişlere mesnetli sık paralel kirişlerin olduğu sistem de dişli döşeme olarak isimlendirilir. Paralel kirişler diş olarak bilinir. Bu tür döşeme sisteminde yük dişler doğrultusunda mesnet kirişlerine iletilir. Kirişsiz plak döşemeler ise, kiriş olmaksızın doğrudan kolona mesnetli döşeme sistemidir (Celep, 2015). Günümüzdeki yapılarda kullanımı artan kirişsiz döşemeler genellikle otopark

alanları, köprüler, geniş ölçekli süpermarketler, alışveriş merkezleri, yer altı garajları, sanayi yapıları ve yüksek katlı yapılarda kullanılmaktadır (Durucan, 2015).

Kirişsiz plak döşemelerin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Mimari açıdan, yapı alanının rahat ve etkin kullanılabilmesi ve estetik olarak da düz yüzeyli bir tavan elde edilmesi (Elmalı, 2006).
- Kirişsiz döşemelerle oluşturulan yüksek katlı yapı ile aynı kat sayısına sahip kirişlerle oluşturulan çerçeveli betonarme yapı kıyaslanırsa, kirişsiz döşemeli yapıda toplam yapı yüksekliği daha az veya aynı yüksekliğe sahip olması durumunda ise kirişsiz döşemeli yapıda kullanılabilir hacim daha fazla olur. Bunun nedeni ise kirişli çerçeveli sistemlerde asma tavan kotu döşemeden kiriş yüksekliği kadar aşağıda başlamasından kaynaklıdır. Sarkan kiriş yüksekliğinin sebep olduğu kullanılabilir bina yükseklik kaybı 6 katta 1 kat kayba denk gelmektedir. Kirişsiz döşemenin meydana getirdiği bina yükseklik kaybının deprem sırasında katlara gelen kuvvet bileşenlerinin içerisinde yüksekliğin yer alması ve yüksekliğin azalmasından dolayı gelen yükün azalmasına neden olur (Ezer, 2010).
- Kirişsiz döşemelerin kalıp, döşeme, betonarme işçiliğinin daha basit olması, kalıp imalatının daha az olması, inşaat süresinin kısalması, kirişli döşemelere kıyasla döşeme kalınlığının fazla olması sebebiyle ısı ve ses yalıtımı açısından avantajlıdır (Elmalı, 2006).

Kirişsiz plak döşemelerin dezavantajları ise şu şekildedir;

- Kirişsiz döşemelerde döşeme kalınlığının, kirişli döşemeye oranla daha fazla olmasından dolayı, kullanılan beton ve donatının fazla olması yapı zati yükünün artmasına neden olur. Deprem yükünün bir bileşeni olan ağırlık etkisiyle, yapıya etkiyen deprem yükleri artmış olacaktır (Ezer, 2010). Bunun haricinde, döşeme zati yüklerinin artmasıyla, kolonlara gelen görelî yüklerde de artış olacaktır (Solak, 2019). Yük artışının neden olduğu asal çekme gerilmeleri döşeme-kolon birleşim bölgesinde eğilme dayanımına ulaşmadan zımbalama dayanımına ulaşarak çok gevrek güç tükenmesi türü olan zımbalama göçmesine neden olur.
- Kirişsiz döşemelerde yatay yüklerin taşınmasında perdelerin kullanılması tavsiye edilir. Yatay yüklerin taşınması için perde duvar gibi düşey taşıyıcı elemanlara daha fazla ihtiyaç duyulur (Celep 2015).

- Kirişsiz plak döşemeler kalıp ve işçilik açısından ekonomik olmasının yanında, kullanılan donatı ve beton miktarının fazla olması ekonomiklik açısından kirişsiz döşemeleri genellikle dezavantajlı hale getirmektedir.

3.2.5.2.4.2. Betonarme plak döşeme zımbalama dayanımı

Kirişsiz döşeme sistemlerinde betonarme plaklar üzerlerine gelen yükleri kolonlara aktarırken plak-kolon birleşim bölgesinde önemli kayma gerilmeleri oluşur. Bu tür gerilme durumunun karşılanmaması sonucu birleşim bölgesinde kolon ile plak arasındaki bağın kopması olayına zımbalama denir. Oluşan kayma gerilmeleri, eğik çekme gerilmelerine karşı geldiği için, zımbalamada da eğik çekme gerilmeleri etkili olur (Celep, 2015). Betonun çekme dayanımının basınç dayanımına göre çok düşük olmasından dolayı, zımbalama güvenliği yapı standartlarında betonun çekme dayanımına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Ezer 2010). Zımbalama olayının ortaya çıkmaması için kolon ve plak birleşim bölgesinde güvenli olarak kuvvet geçişinin oluşması için kesme kuvveti kapasitesinin iletilmesi gereken kuvvetten daha büyük olması gerekir. Kesme kuvveti şartının sağlanamadığı durumlarda aşağıdaki çarelere başvurulmalıdır (Karataş ve Erdoğan, 2006);

- a- Döşeme kalınlığı 25 cm'ye kadar artırılmalıdır,
- b- Başlık ya da tabla teşkil edilmelidir,
- c- Zımbalama donatısı atılmalıdır.

Burada zımbalama donatısı atılırken dikkat edilmesi gereken husus zımbalama donatısı ile arttırılacak zımbalama dayanımı, kesit zımbalama kapasitesinin %50 sini geçmemeli ve kullanılan donatılar veya çelik profillerin etkili olabilmesi için minimum plak kalınlığı 250 mm kalınlıkta olması gerekir (Celep, 2015). Celep (2015) çalışmasında yoğun olarak kullanılan zımbalama donatıların beton yerleşimini zorlaştıracığından, eklenen donatıların faydadan çok zararın olabileceğini bundan dolayı zorunlu olmadıkça zımbalama dayanımını arttırmak için donatı kullanılmaması, bunun yerine döşeme kalınlığının veya kolon boyutlarının arttırılmasını önermektedir. Kolon boyutlarının ve döşeme kalınlığının arttırılması durumunda yapının zati ağırlığının artması sonucunda yapıya etkiyen deprem yüklerinde de artış olabilmektedir. Bu yüzden araştırmacılar farklı çalışmalar yapma gereksinimi duymuştur. Solak (2019) yapılan çalışmaları şöyle sıralamaktadır;

- a) Epoksi bağlayıcı çelik plakalarla güçlendirme,

- b) Lif takviyeli polimerlerle güçlendirme,
- c) Lif takviyeli beton veya çekme dayanımı yüksek beton sınıfı ile güçlendirme,
- d) Beton ve çelik gergi ile güçlendirme,
- e) Zımbalamaya karşı geliştirilen yeni donatılarla güçlendirme,
- f) Betonarme elemanda ankraj bağlantıları veya dıştan kalıcı ankrajlarla ardgerme ile güçlendirmedir.

Bu kadar çok sayıda çalışmanın yapılma nedeni zımbalama göçmesinin çok gevrek bir güç tükenmesi türü olmasından kaynaklı yapıda oluşan zımbalama katın tamamen çökmesine ve alt katlarda oluşan ani yüklenme ile taşıyıcı sistemin tamamen göçmesine neden olabilmesindendir (Celep, 2015). Ani olarak gerçekleşen bu olay can ve mal kayıplarına sebep olabilmektedir.

a) TS500 (2000) tasarım şartları;

TS 500 2000'e göre sınırlı bir alana yayılmış yükler veya kolonlar tarafından yerel olarak yüklenen plakların bu bölgede güvenli olarak kuvvet geçişinin sağlanabilmesi için zımbalama dayanımının (V_{pr}) tasarım zımbalama kuvvetine (V_{pd}) eşit veya büyük olduğu gösterilmelidir.

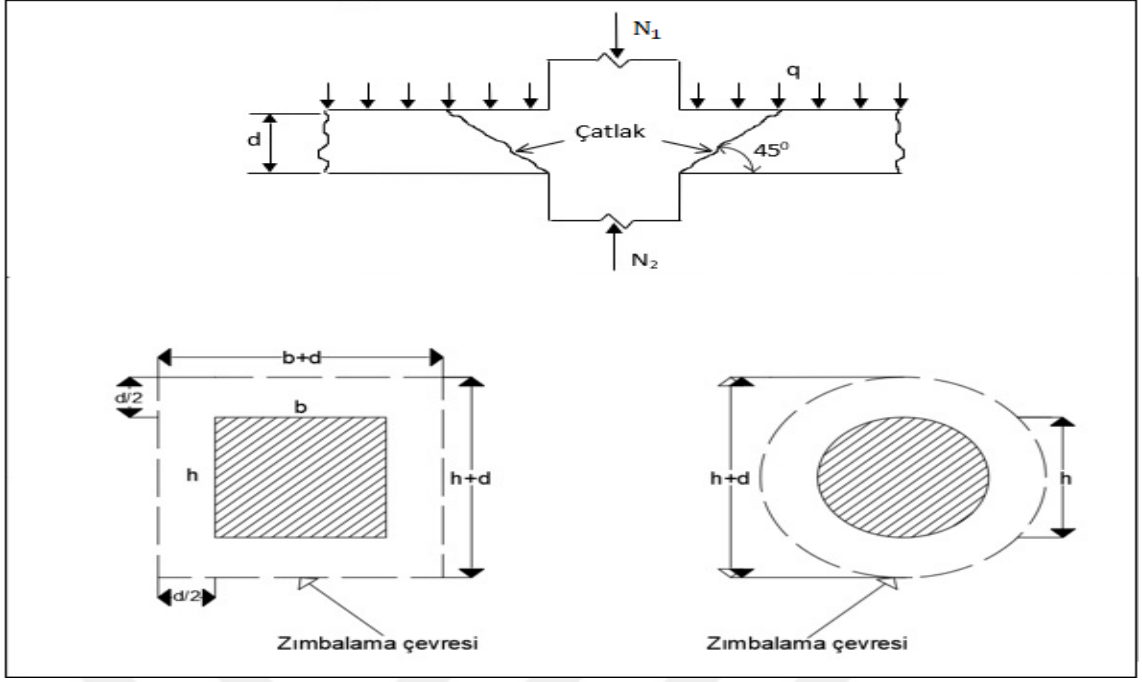
$$V_{pr} \geq V_{pd} \quad (3.2)$$

Kirişsiz döşemelerde tasarım zımbalama kuvveti tasarım eksen yükünden zımbalama çevresi yükünün çıkarılmasıyla elde edilerek hesaplanmaktadır. Zımbalama bölgesi özellikleri ve kuvvetleri Şekil 3.36.'da gösterilmiştir.

$$V_{pd} = N_2 - N_1 - F_a = F_d - F_a \quad (3.3)$$

F_a , zımbalama çevresi içinde kalan plak yüklerinin toplamıdır (döşemeler için döşeme yükü, temeller için zemin gerilmelerinin toplamı).

$$F_a = q (b + d) (h + d) \quad (3.4)$$



Şekil 3.36. Zımbalama bölgesi özellikleri ve kuvvetler (TS500-2000)

Zımbalama dayanımı orta kolon için zımbalama çevresi (U_p);

$$U_p = 2(h+b+2d) \quad (\text{dikdörtgen kolon}) \quad (3.5)$$

$$U_p = \pi(h+d) \quad (\text{dairesel kolon}) \quad (3.6)$$

Zımbalama dayanımı V_{pr} , aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmalıdır.

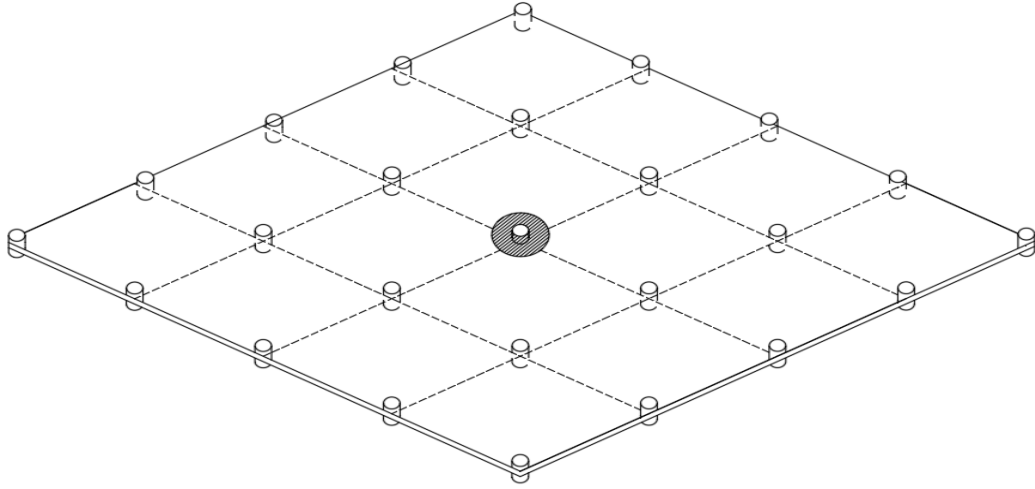
$$V_{pr} = \gamma f_{ctd} u_p d \quad (3.7)$$

Burada γ , eğilme etkisini yansıtan bir katsayıdır. Yapılan zımbalama deneyi eksenel yükleme durumunda olduğu için $\gamma = 1.0$ olarak alınmıştır.

b) Yapı Modeli;

Yapı modeli seçilirken Ezer (2010) çalışmasından yararlanılarak oluşturulmuştur. Betonarme plak numunelerin boyutları da literatürdeki Sağbaş (2002), Sevim (2010) vb. çalışmalar ile kıyaslamak için 1/3 ölçekli 100x100 cm seçilmiştir. Yapı modeli 4.00 m aks açıklıklı 4'e 4 açıklıklıdır. Yapı modelinde hesaplamaları yapılan betonarme plak

döşeme orta kolonlu ara kat döşemesidir. İncelenen kolon Şekil 3.37.'de gösterilmiştir. Döşeme yüksekliği 8 cm, pas payı 1 cm ve dairesel kolon çapı 11.6 cm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.37. Kirişsiz döşeme yapı modeli ve zımbalama dayanımı hesaplanacak kolon döşeme birleşimi

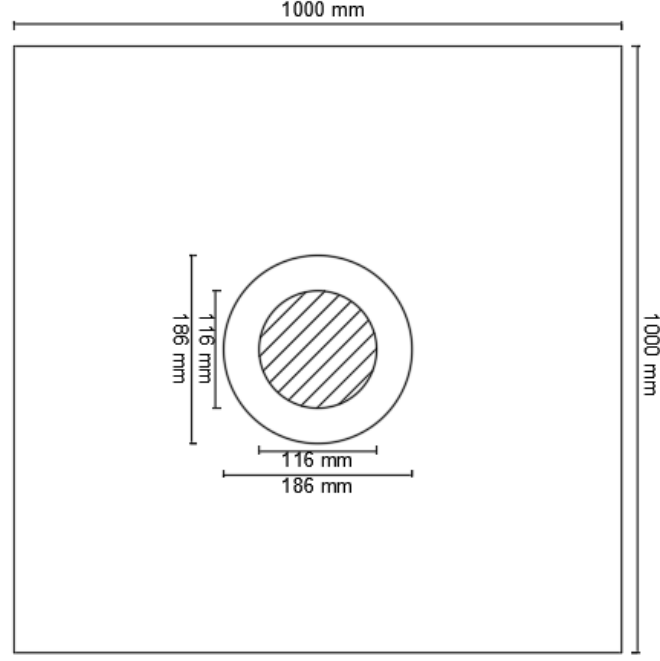
c) Zımbalama Dayanımının belirlenmesi;

Deney numunelerin zımbalama dayanımı TS 500 (2000) koşullarına göre hesaplanmıştır. Şekil 3.38.'de gösterildiği gibi zımbalama çevresi hesaplanmıştır.

$$U_p = \pi (h+d) = \pi D \quad (3.8)$$

$$D = h + (d/2 + d/2) = 11.6 + 7/2 + 7/2 = 18.6 \text{ cm} \quad (3.9)$$

$$U_p = \pi 18.6 = 584.33 \text{ mm} \quad (3.10)$$



Şekil 3.38. Betonarme plakların zımbalama çevresi

Ref_plak₁ Numunesinin zımbalama dayanımı;

$$\text{Zımbalama dayanımı} = V_{pr} = \gamma_{fctd} u_p d = 1 \times 2.41 \times 584.33 \times 70 = 98.576 \text{ kN} \quad (3.11)$$

Ref_plak₂₈ Numunesinin zımbalama dayanımı;

$$\text{Zımbalama dayanımı} = V_{pr} = \gamma_{fctd} u_p d = 1 \times 2.38 \times 584.33 \times 70 = 97.349 \text{ kN} \quad (3.12)$$

TK₅₀SF₄₀_plak₁ Numunesinin zımbalama dayanımı;

$$\text{Zımbalama dayanımı} = V_{pr} = \gamma_{fctd} u_p d = 1 \times 1.23 \times 584.33 \times 70 = 50.310 \text{ kN} \quad (3.13)$$

TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ Numunesinin zımbalama dayanımı;

$$\text{Zımbalama dayanımı} = V_{pr} = \gamma_{fctd} u_p d = 1 \times 1.93 \times 584.33 \times 70 = 78.943 \text{ kN} \quad (3.14)$$

TK₅₀G₄₀_plak₁ Numunesinin zımbalama dayanımı;

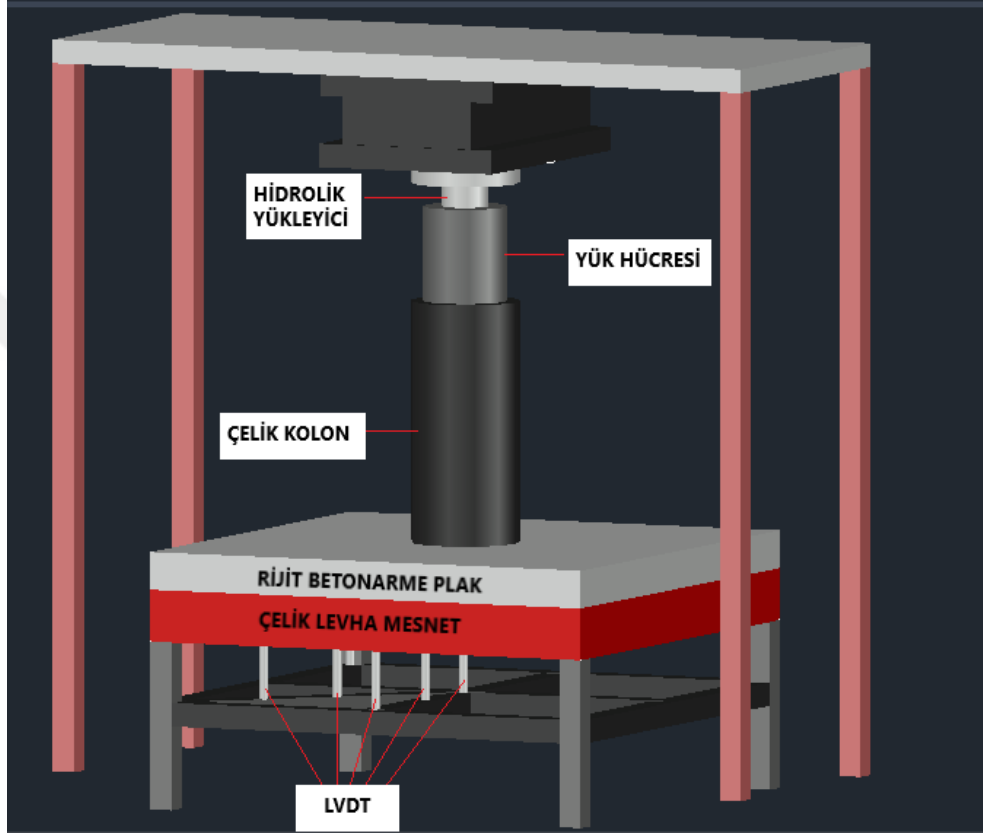
$$\text{Zımbalama dayanımı} = V_{pr} = \gamma_{fctd} u_p d = 1 \times 1.46 \times 584.33 \times 70 = 59.712 \text{ kN} \quad (3.15)$$

TK₅₀G₄₀_plak₂₈ Numunesinin zımbalama dayanımı;

$$\text{Zımbalama dayanımı} = V_{pr} = \gamma_{fctd} u_p d = 1 \times 2.19 \times 584.33 \times 70 = 89.578 \text{ kN} \quad (3.16)$$

d) Zımbalama deneyi;

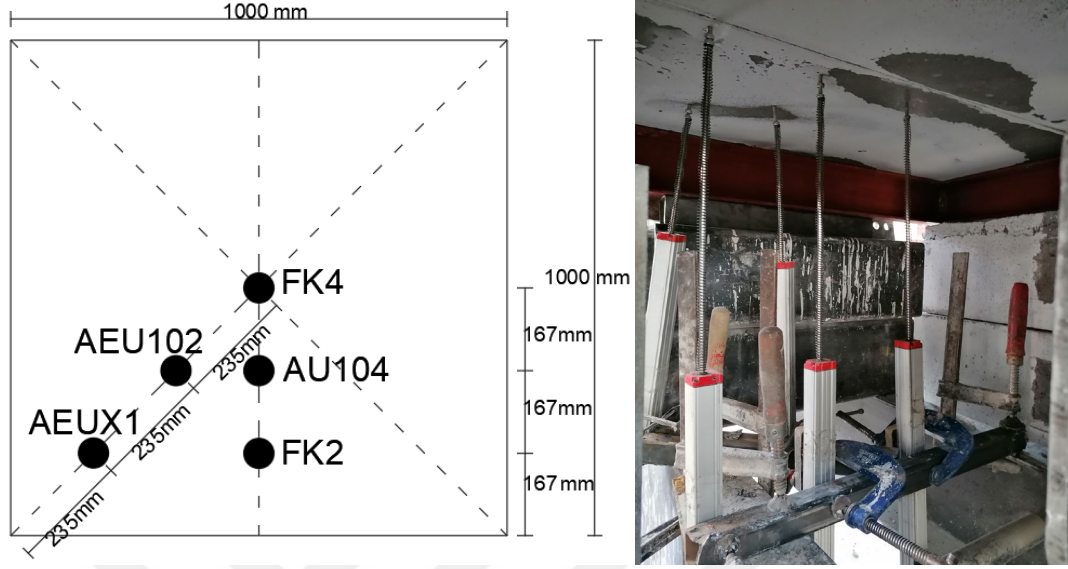
Zımbalama deney düzeneği oluşturulurken Görkem (2009), Grimaldi ve ark. (2013), Nguyen ve ark. (2017), Naseri (2020) ve Nassif ve ark. (2022) çalışmalarından yararlanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.39.'da verilmiştir.



Şekil 3.39. Zımbalama deney düzeneği

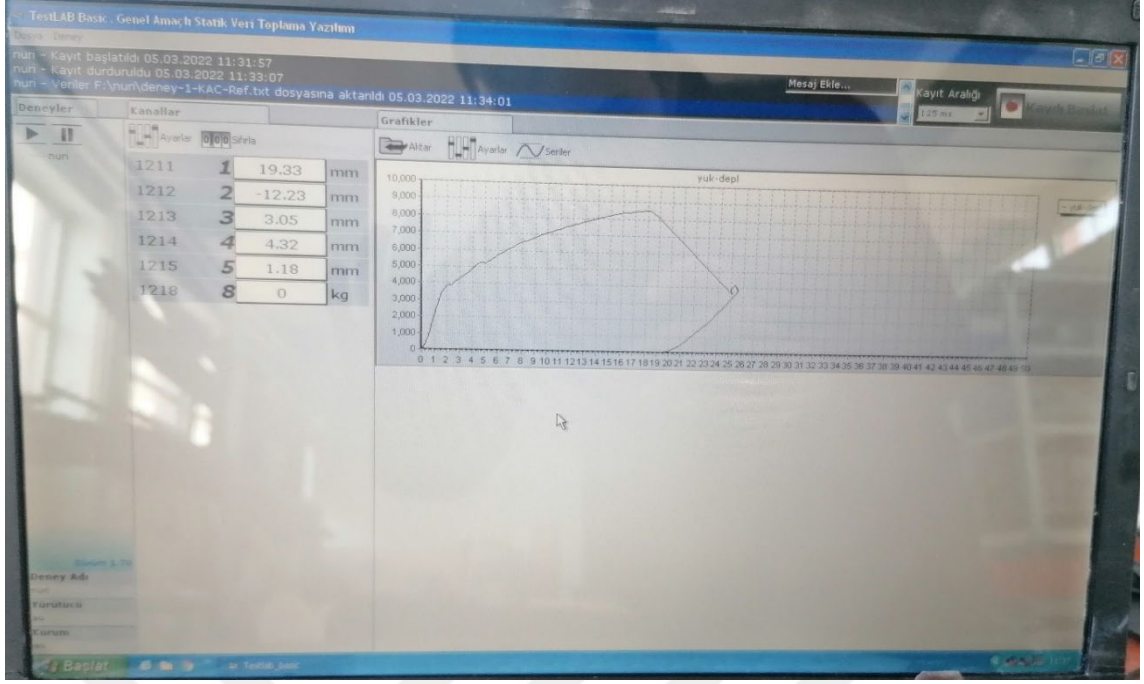
Zımbalama deney düzeneği tasarlanırken mesnet şartları literatürdeki (Binici ve Bayrak, 2005; Görkem, 2009; Durucan, 2015; Mercimek ve ark., 2021; Hamko, 2021) birçok çalışmada kullanılan basit mesnet olarak tercih edilmiştir. Binici ve Bayrak (2005), çalışmasında dört tarafından basit mesnetli döşemelerin mesnet şartlarının gerçeğe uygun olduğu fikrini öne sürmüştür. Zımbalama deneyi yapılırken ilk olarak hazırlanan betonarme plak elemanlar basit mesnet görevi gören, daha önceden imal edilmiş betonarme plaklarla aynı boyutta çelik çerçeve üzerine yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında betonarme plağın düşey yer değiştirmesini (deplasmanı) ölçebilmek için 0.01mm hassasiyetli 5 adet LVDT'den yararlanılmıştır. LVDT'ler yerleştirilmeden önce

$\pm 0,01$ mm hassasiyetle kalibrasyonu yapılarak Şekil 3.40.'da gösterilen noktalara gelecek şekilde deney düzeneğine mengene yardımıyla sabitlenmiştir.



Şekil 3.40. LVDT'lerin yerleştirilmesi

LVDT'ler yerleştirildikten sonra zımbalamaya neden olacak yükleme döşemenin ortasından uygulanacağı için, döşeme orta noktası işaretlenerek çelik kolon bu bölgeye yerleştirilmiştir. Eksenel yükleme 300 kN itme kapasiteli hidrolik silindir yükleyici ve kalibresi yapılmış 300 kN okuma kapasitesi olan yük hücresi aracılığı ile yapılmıştır. Tüm deneylerde monotonik yükleme yapılmış olup, numunelere yükleme hızı sabit 0.5 mm/sn olacak şekilde hidrolik pompa yardımıyla yükleme yapılmıştır. Hidrolik yükleyici ile çelik kolon arasına yerleştirilen yük hücresi ve LVDT'den elde edilen veriler bağlantı kabloları yardımıyla veri toplama sistemine oradan da bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Statik veri toplama yazılımı Testlab Basic (Şekil 3.41.) kullanılarak veriler kayıt altına alınmış ve alınan kayıtlar Excel programına aktarılmıştır.



Şekil 3.41. Statik veri toplama yazılımı (Testlab Basic)

Deney elemanlarının yük-deplasman eğrisi, rijitliği, süneklik ve enerji tüketim kapasitelerinin hesaplanmasında kullanılan yaklaşım Şekil 3.42.'de verilmiştir.

Yük- Deplasman eğrisi:

Deney esnasında yük hücresi ve LVDT'den alınan veriler bilgisayara aktarılarak yük-deplasman grafiği çizilmiştir. Deneyde toplam 5 adet LVDT kullanılmış ve beş ayrı noktadan deplasman ölçümü alınmıştır.

Rijitlik:

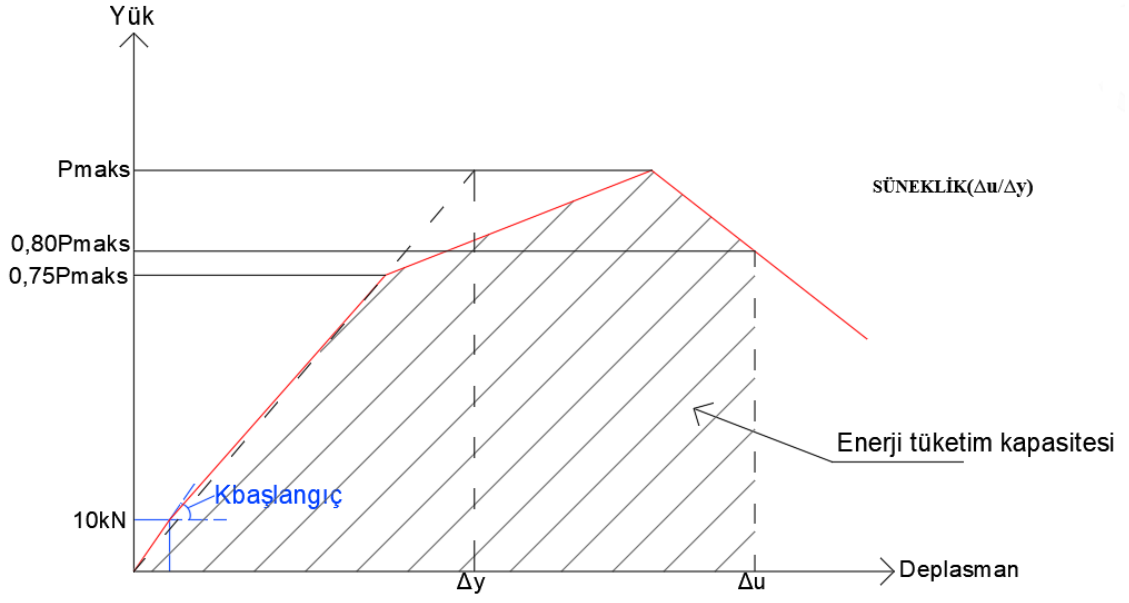
Rijitlik kuvvet altındaki elemanların veya yapıların şekil değiştirmeye, deformasyona karşı koyma direnci olarak ifade edilir. Betonarme plaklar üzerlerine etkiyen düşey yükleri kirişlere, perde duvarlara ya da direkt kolonlar aktarmak veya yapıya etkiyen yatay yükleri düşey taşıyıcı elemanlara iletirler. Yük iletiminin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için betonarme plaklar yeterli rijitliğe sahip olmalıdır. Bu yüzden rijitlik önemli yapısal performans parametrelerindendir. Betonarme plaklardaki çekme donatıları akma kapasitesi değerlerine ulaşmadan zımbalamaya maruz kaldığından, başlangıç rijitliği değerlerinin hesaplanması yeterli görülmüştür (Salmani, 2013). Rijitlik değerleri, deney elemanlarının yük-orta nokta deplasman grafiklerinde belirlenen, eğiminin değiştiği ilk noktayı orijine bağlayan doğrunun eğimi hesaplanarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında 10 kN yük değerindeki başlangıç rijitlikleri hesaplanmıştır.

Süneklik:

Bir malzeme, eleman veya yapının taşıma gücünde önemli bir azalma olmadan şekil ve yer değiştirme yapabilme, tekrarlı yükler altında enerji yutabilme özelliğine süneklik denir (Sevim, 2010). Zımbalama hasarının ani ve gevrek olmasından dolayı zımbalama açısından riskli eleman ve yapıların sünekliği önem arz etmektedir. Zımbalama açısından riskli eleman ve yapıların zımbalama kapasitesinin komşu kesitlerin eğilme kapasitesinin üstünde bulunacak şekilde tasarlanmalıdır (Celep, 2015). Etkiyen yükün kabul edilebilir seviyenin üzerinde bir artış göstermesi durumunda, zımbalama kapasitesine erişilmeden önce komşu kesitlerde sünek eğilme güç tükenmesi meydana gelerek sistem büyük şekil değiştirmeler ve yer değiştirmelerle yük artışından kaynaklı zorlamaları karşılar. Betonarme plakların süneklik değerleri yük orta nokta deplasman eğrilerinden hesaplanmıştır.

Enerji tüketim kapasitesi:

Yük- deplasman grafiğinin altında kalan alan enerji tüketim kapasitesini verir. Bu alan elemanın enerji tüketme gücünü gösterir. Enerji tüketme kapasitesi iki şekilde elastik ve plastik enerji tüketme olarak karşımıza çıkar. Betonarme elemanların elastik enerji tüketme gücünün az olmasının yanında plastik enerji tüketme gücü gerekli donatı ayrıntılarının (boyuna donatı oranı ve enine donatı adım aralığı) uygulanması ile büyük miktarlara çıkarılabileceği deneysel çalışmalarla desteklenmiştir (Merter ve Uçar, 2015; Koçer, 2016). Dış yükler tarafından betonarme sistemlere iletilen enerji elastik bölgede ise geri iletilmektedir. Fakat plastik bölgede yer alıyorsa gelen enerjinin bir kısmı deformasyon enerjisine dönüştürülürken bir kısmı da geri iletilmektedir. Dönüştürülen enerji, yük-deformasyon grafiğindeki plastik bölgenin uzunluğu ile genellikle doğru orantılı olarak karşımıza çıkar (Solak, 2019). Enerji tüketim kapasiteleri hesaplanırken yük deplasman grafiklerinin göçme noktasına kadar olan bölümleri kullanılarak deney elemanlarının enerji tüketim kapasiteleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.42. Deney elemanlarının yük-deplasman eğrisi, başlangıç rijitliği, süneklilik ve enerji tüketim kapasitelerinin hesaplanmasında kullanılan yaklaşım

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde mikroyapı deneyleri ve mekanik deney (betonarme plaklarda zımbalama deneyi) sonuçları verilmiştir.

4.1. Mikroyapı Deney Sonuçları

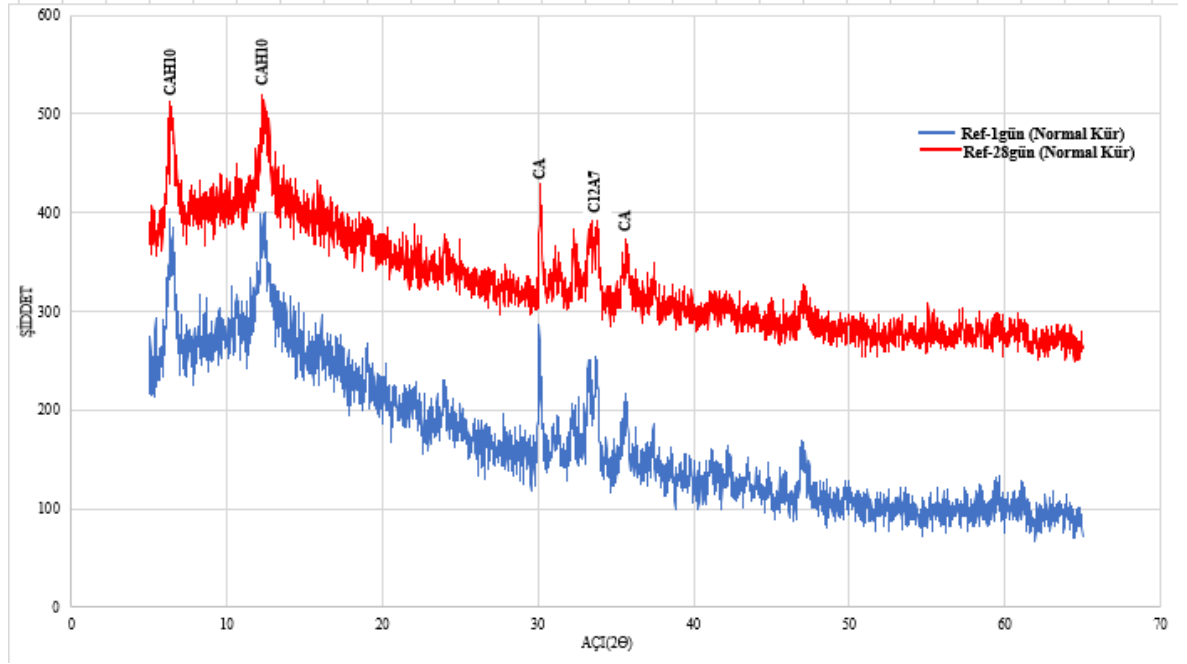
4.1.1. XRD analiz sonuçları

Çalışma kapsamında, farklı oranlarda KAÇ, SD, Alçı ve SA kullanılarak üretilmiş üçlü sistemlerin in-situ analizi sonucu elde edilen XRD analizleri verilmiştir. XRD desenlerinin üzerindeki pikler, referans toz kırınım desenleri (powder diffraction file-#pdf) ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda hangi pikin hangi kristal yapıyı ve/veya hidratasyon ürününü temsil ettiği desenlerin üzerinde gösterilmiştir. In-situ XRD analizlerinde numune, toz karışıma su ilave edildikten 2-3 dk gibi kısa bir süre sonra XRD numune tutucusuna yerleştirilmiş ve 10 dk'da bir tarama yapılmıştır. XRD analizi 1 ve 28. günlerde olmak üzere iki farklı yaşta gerçekleştirilmiştir.

4.1.1.1. Ref numunesi

Ref numuneleri üzerinde yapılan XRD sonucu elde edilen desenler Şekil 4.1.'de verilmiştir. İlk görülen faz yarı kararlı CAH₁₀ fazıdır. Yarı kararlı hidratlar, yüksek oranda su ve düşük yoğunluklara sahip olduklarından, orijinal olarak su ile kaplı olan alanı hızla doldururlar ve kararlı hidratların asıl oluşumundan önce geçici olarak değerlendirilen erken dayanım sağlarlar (Bodur ve ark., 2021). Sadece KAÇ'tan oluşan referans numunede de literatürle uyumlu olarak bu faz numunenin hem 1. günde hem de 28. günde baskın faz olarak gözlenmiştir. CAH₁₀ oluşumu yaklaşık 27°C sıcaklıklara kadar devam eder ve özellikle 10°C'nin altındaki sıcaklıklarda, CAH₁₀ baskın hidratasyon ürün haline gelmektedir (Erkmen, 2018). Ayrıca halihazırda numunelere uygulanan kür şartlarının, yarı kararlı olan bu fazın 28 gün içerisinde C₃AH₆ kararlı yapılarına dönüşmesini sağlamadığı da görülmektedir. Dönüşüm oranı çok çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörlerden bazıları şu şekildedir; sıcaklık (sıcaklığın yükselmesiyle daha hızlı dönüşüm), nem (bağıl nemin doygunluğun altına düşmesiyle daha yavaş dönüşüm), s/ç oranıdır (yüksek s/ç oranı yüksek dönüşüm hızı) (Yarar, 2021). Bu

faktörler içerisinde en önemlisi sıcaklıktır. CAH_{10} oluşumu $27^{\circ}C$ sıcaklığa kadar devam eder. $28^{\circ}C$, sıcaklıkta CAH_{10} oluşmaz ve bunun yerine C_2AH_8 veya C_3AH_6 oluşumu görülür. $50^{\circ}C$ 'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda ise kararlı bir C_3AH_6 fazı oluşur (Scrivener ve Capmas, 1998; Juenger ve ark., 2009; Odler, 2003; Erkmen, 2018) Genel olarak $27^{\circ}C$ üzerindeki sıcaklıkların yarı kararlı fazın, kararlı yapılarına dönüşmesini hızlandırır. Bunun dışında XRD analizi sonucu hidratasyona uğramamış bir miktar CA ve $C_{12}A_7$ fazları da görülmektedir.

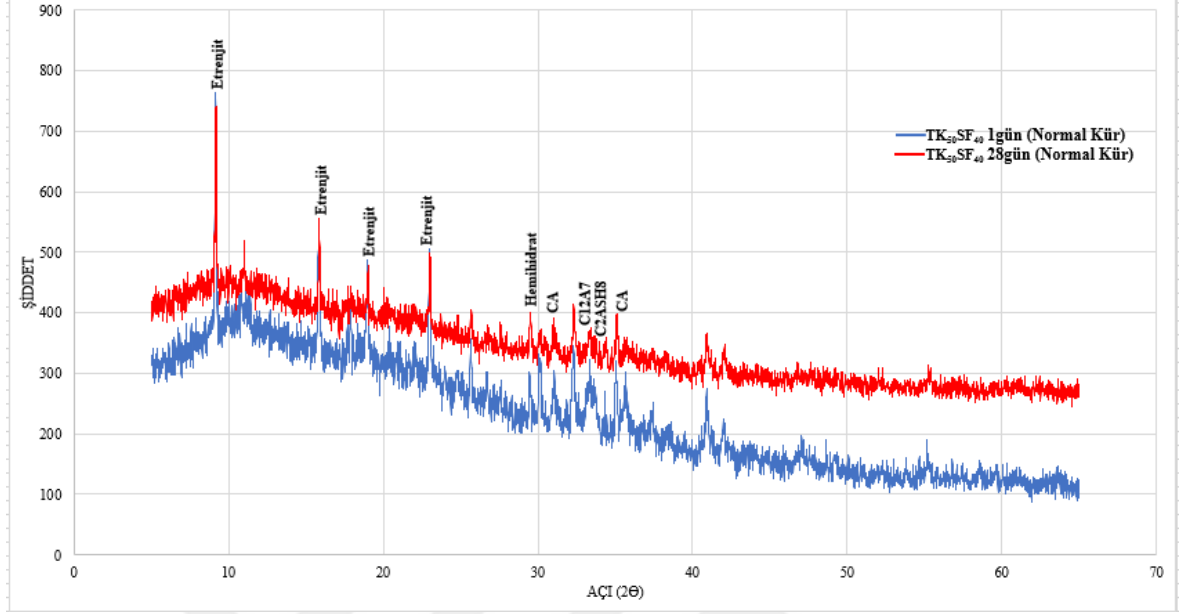


Şekil 4.1. Ref numunelerin 5-65° XRD deseni

4.1.1.2. TK₅₀SF₄₀ numunesi

TK₅₀SF₄₀ numuneleri üzerinde yapılan XRD sonucu elde edilen desenler Şekil 4.2.'de verilmiştir. TK₅₀SF₄₀ numunelerindeki hidratasyon ana fazı etrenjittir. Hidratasyon süresi arttıkça etrenjit piklerinde artış görülmektedir. Ayrıca oluşan etrenjitin erken dayanımı artırdığı da harç numunelerin referans numuneye göre kıyaslanması sonucu görülebilir. Karışımda yüksek oranda kullanılan SD sayesinde etrenjite göre daha kararlı bir yapı olan straetlingit oluşmuştur. KAÇ'a SD eklenmesi ile straetlingit oluşturarak KAÇ'ın uzun vadeli gücünün korunması yanı sıra yarı kararlı hidratların dönüşümünü geciktirerek yapısal bütünlük açısından etkili olmuştur (Son ve ark., 2018). Bu nedenlerden dolayı referans numunelerde görülen 7 ile 14 gün arasında basınç

dayanımındaki azalma TK₅₀SF₄₀ numunelerinde görülmemiştir. Ek olarak KAÇ'lerde beklenen CA ve C₁₂A₇ fazları oluşmuştur.

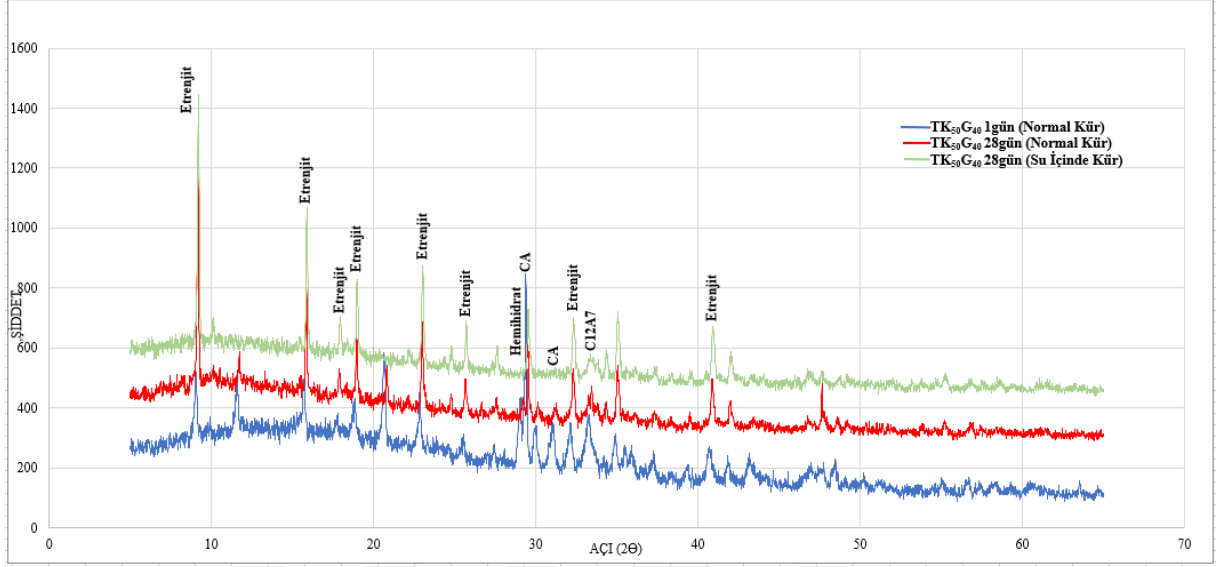


Şekil 4.2. TK₅₀SF₄₀ numunelerin 5-65° XRD deseni

4.1.1.3. TK₅₀G₄₀ numunesi

TK₅₀G₄₀ numuneleri üzerinde yapılan XRD sonucu elde edilen desenler Şekil 4.3.'de verilmiştir. TK₅₀G₄₀ numunelerinde de TK₅₀SF₄₀ benzer bir şekilde hidrasyon ana fazının etrenjit olduğu görülmüştür. Alçının yüksek oranda kullanılması sebebiyle yarı kararlı fazları yerine yoğun etrenjit oluşumu gözlenmiştir. Diğer numunelere kıyasla ortamda bulunan sülfat kaynağı alçının yüksek miktarda olması ilerleyen yaşlarda da etrenjitin çok yüksek seviyelerde oluşmasını sağlamıştır. Etrenjitin pik şiddeti artan yaşla birlikte artmış ve en yüksek pik şiddetine su içinde kürlenmiş numunede olduğu görülmüştür. Etrenjit bünyesinde büyük oranlarda su molekülü bağlayabilmektedir. Su ile kürelemede etrenjit fazının oluşumunda ortamdaki serbest suyun varlığı etrenjit fazını sınırlayıcı etkeni ortadan kaldırarak yüksek etrenjit oluşumunu sağlamıştır. Ayrıca yoğun etrenjit oluşumu erken hidrasyon ve priz süresinde önemli rol oynayarak 6 saatlik eğilme ve basınç dayanım değerlerinin diğer numunelere kıyasla yüksek çıkmasını sağlamıştır. Bu durum aynı zamanda diğer numunelerle kıyaslandığında etrenjit yapının artan miktarlarının basınç dayanımına olumlu etki gösterdiğini de ortaya koymaktadır. Buradaki istisna literatürde de belirtildiği üzere numunelerin aşırı genleşmeler sonucu

çatlaması ve parçalanmasıdır (Bizzozero, 2014). Ayrıca yoğun etrenjit oluşumu ve bu sebeple meydana gelen yoğun iç yapı sebebiyle basınç altında su işleme derinliği deneyinde düşük su işleme derinliklerinin elde edilmesinde etkili olmuştur. XRD analiz sonucu oluşan diğer fazlarda KAÇ'larda beklenen CA ve $C_{12}A_7$ fazlarıdır.



Şekil 4.3. TK₅₀G₄₀ numunelerin 5-65° XRD deseni

4.1.2. FE-SEM analiz sonuçları

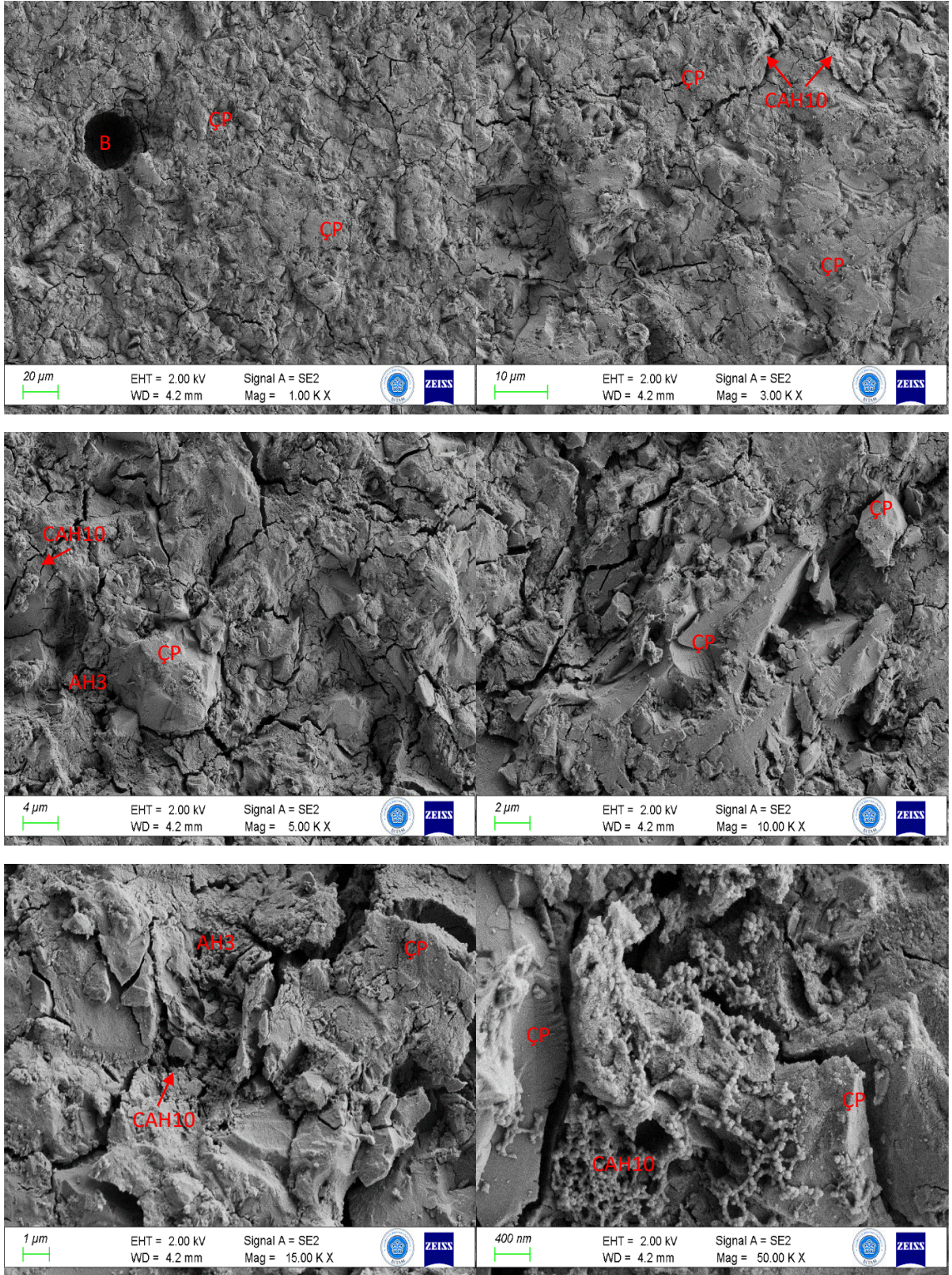
Çalışma kapsamında, Ref, TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ numuneleri üzerinde 1. ve 28. gün FE-SEM analizlerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

4.1.2.1. Ref numunesi

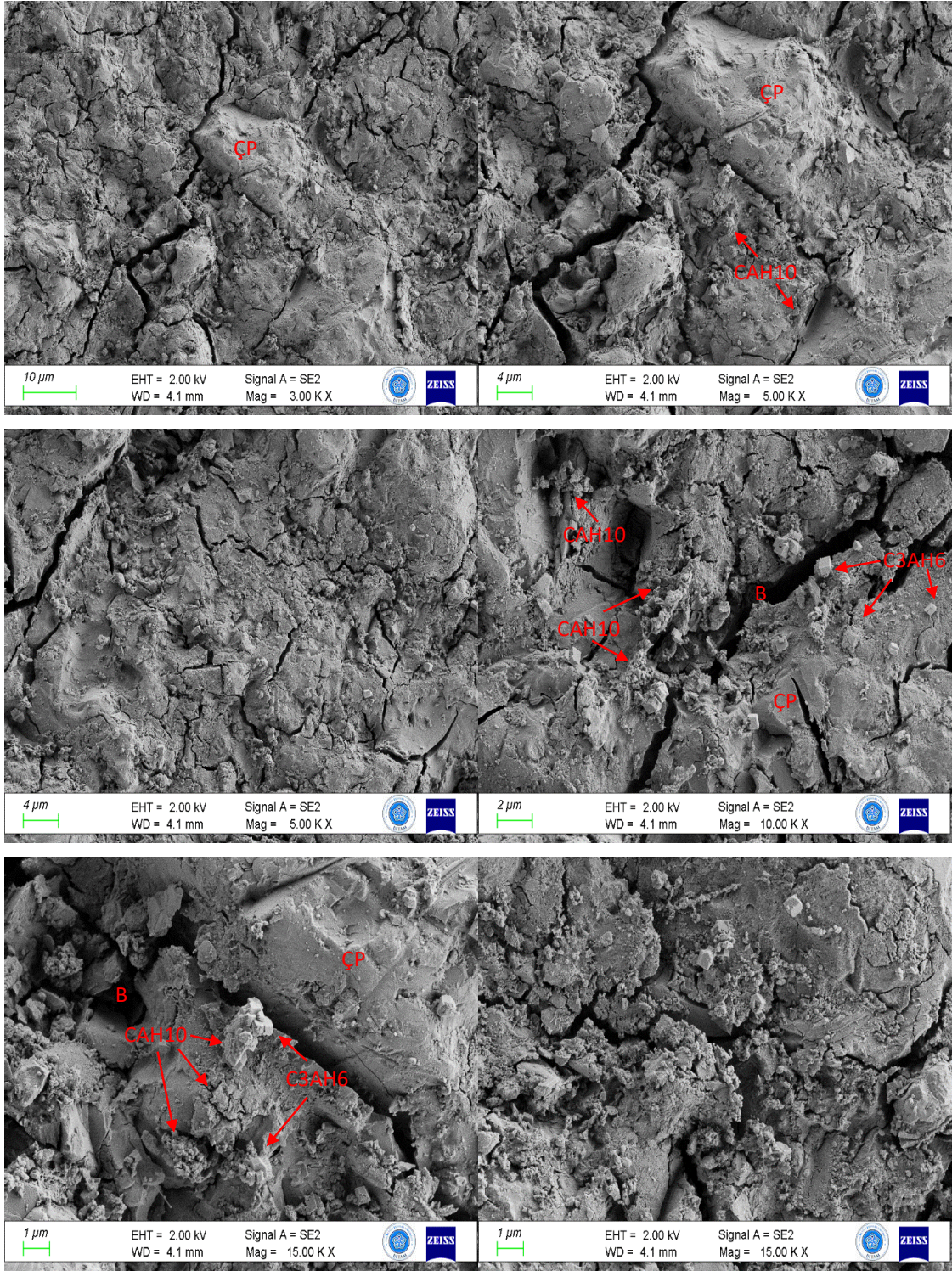
FE-SEM analizi sonucu elde edilen Ref numunesinin 1. ve 28. gün görüntüleri sırasıyla Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'de verilmiştir. 1. gün analizi sonucu elde edilen görüntü incelendiğinde hidratasyonun sonucu olarak bir kısım CAH₁₀ ve jipsit gibi kalsiyum hidrate ve alümina hidrate yapıların özellikle çimento partiküllerinin aralarındaki boşluklarda ve çimento partiküllerin yüzeylerinde gelişmeye başladığı görülmektedir (Şekil 4.4.). Buna rağmen çimento partikülleri de çok açık bir şekilde görülmektedir. Hidrate olmamış çimento partikülleri su/çimento oranının lokal olarak istenmeyen değişimi sonucunda heterojen ve gözenekli bir yapı meydana getirir (Uzbaş, 2019). 1. gün ve 28. gün analizleri sonucu elde edilen mikroyapı görüntüleri karşılaştırıldığında 1.

gün numunelerinde hidratasyon ve ürünler daha az olmasına karşın 28. gün numunesinde daha fazla boşluk ve çatlak oluşmuştur (Şekil 4.5.). Ayrıca numunelerde çok düşük miktarlarda C_3AH_6 yapılar da görülmüştür. CAH_{10} miktarıyla kıyaslandığında C_3AH_6 'nın Şekil 4.1.'deki XRD patternlerinde görünmemesi düşük miktarından dolayı pik olarak tespit edilememesinin bir sonucudur.





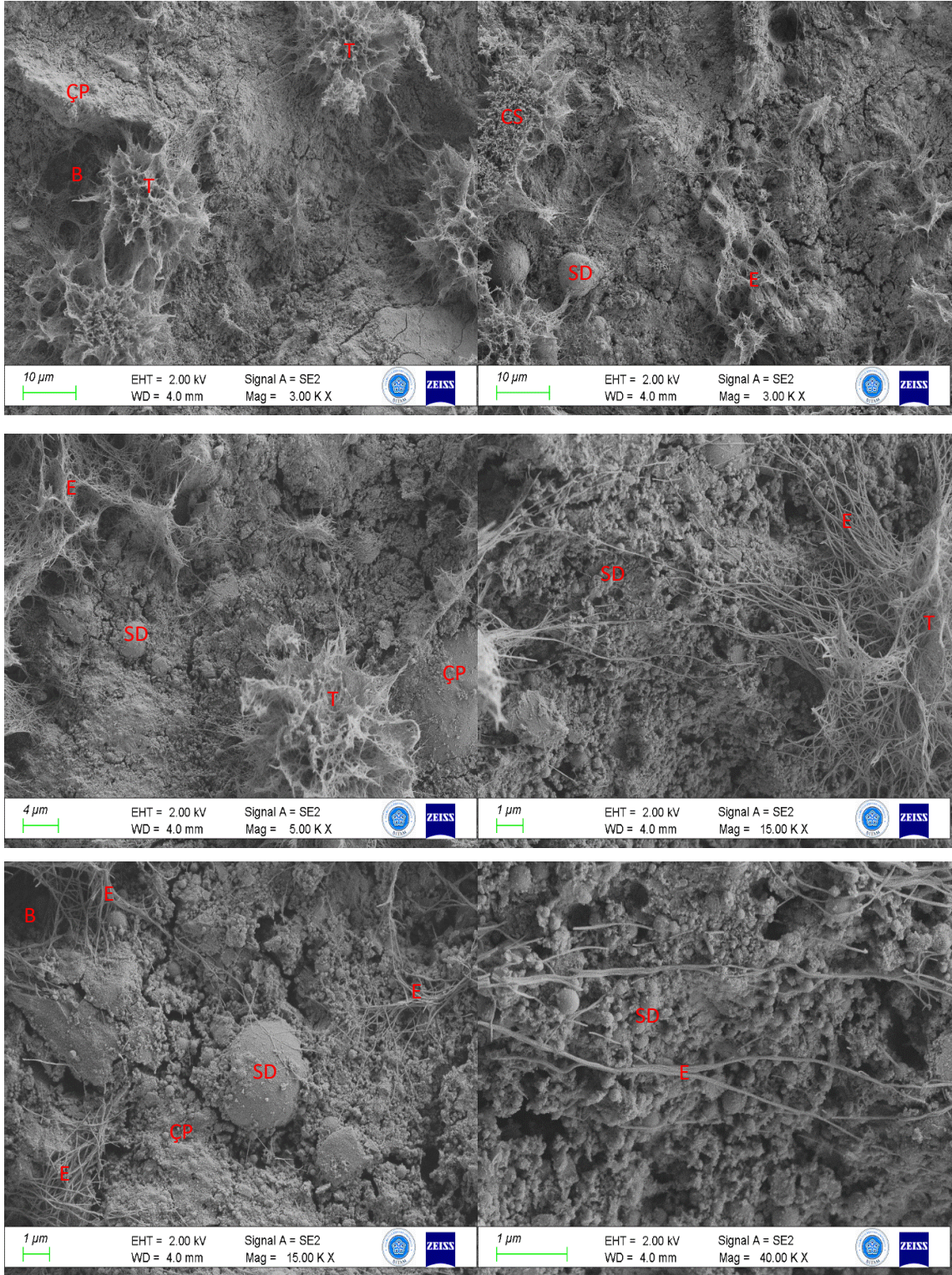
Şekil 4.4. Ref numunesinin 1. gün iç yapı görüntüleri (Görüntülerin ölçekleri birbirinden farklıdır)
(AH₃: Jipsit, CP: Çimento partikülü, B: Boşluk, CAH₁₀-C₃AH₆: Alümina hidrate yapıları)



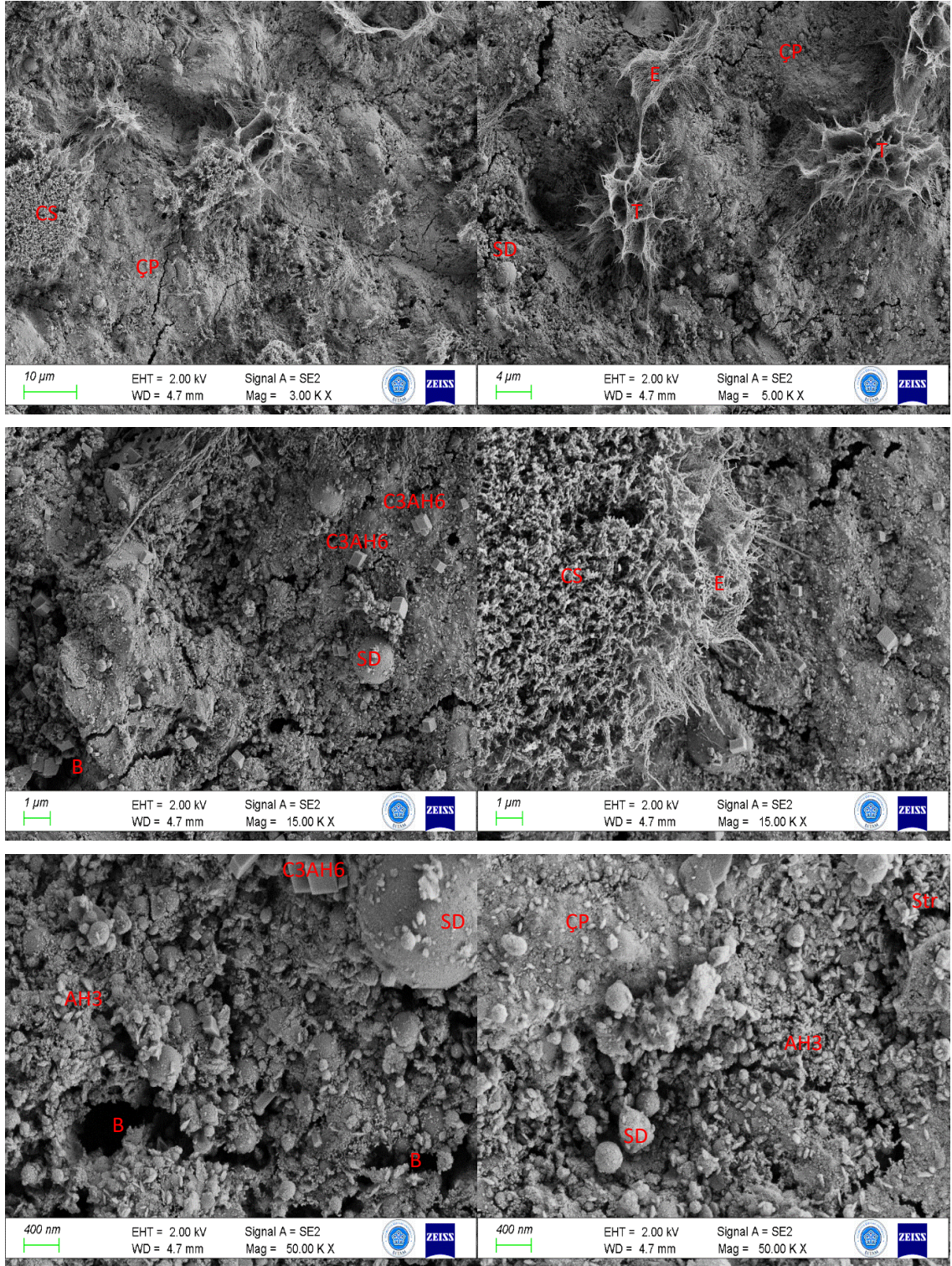
Şekil 4.5. Ref numunesinin 28. gün iç yapı görüntüleri (Görüntülerin ölçekleri birbirinden farklıdır) (ÇP : Çimento partikülü, B: Boşluk, CAH_{10} - C_3AH_6 : Alümina hidrate yapılar)

4.1.2.2. TK₅₀SF₄₀ numunesi

TK₅₀SF₄₀ numunesinin 1. ve 28. gün FE-SEM analizi sonucu elde edilen görüntüleri sırasıyla Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de verilmiştir. 1. gün deney sonuçları ışığında elde edilen görüntülerde yoğun bir iç yapı görülmüştür. Ancak bu yoğun iç yapının hidrate ürünlerden daha çok SD'nin dolgu etkisi sebebiyle oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.6.). Bunun dışında hidrasyon sonucu oldukça bol miktarda bir AFm fazı olan tomasit oluşumu görülmektedir. Bu tomasit yapılar üzerinde özellikle 28. gün yaşta etrenjit iğneleri de oluşmuştur (Şekil 4.7.). Yoğun olarak gerçekleşen tomasit oluşumunun beton dayanımını da olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Bunlara ek olarak hidrate olmamış çimento taneleri, kalsiyum sülfat ve az sayıda da boşluk yapıları da mevcuttur. Numunede basınç dayanımını artıran en önemli faktörün hidrate yapılardan daha çok SD'nin dolgu etkisi sebebiyle olduğu hem XRD hem de FE-SEM sonuçlarından görülmektedir. Hidrasyon ürünlerinin sayısının az olmasının bir diğer sonucu olarak da, erken yaşta su geçirgenlik özelliğini olumsuz etkilendiği düşünülmektedir. Boşluk yapısındaki artış referans numunelere kıyasla sınırlı olmuştur. Yüksek oranda kullanılan SD straetlingit oluşturarak yarı kararlı hidratların dönüşümünü geciktirmiş ve yapısal bütünlük sağlayarak boşluk yapısındaki artışı sınırlamıştır. Tüm bunların yanında numunede mikrokristalin yapıda olduğundan dolayı XRD ile tespit edilemeyen AH₃(jipsit)'de görülmüştür (Şekil 4.7.).



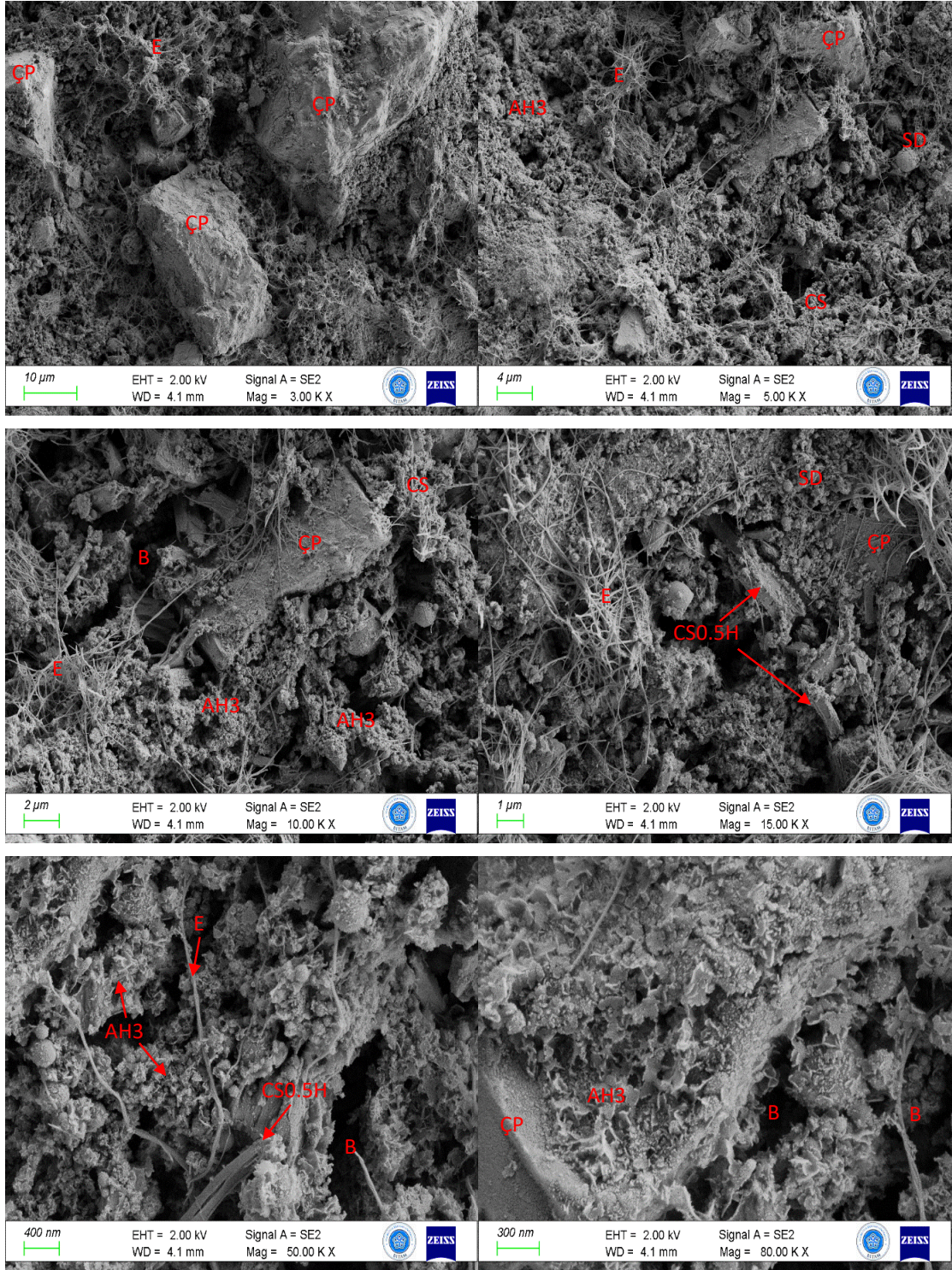
Şekil 4.6. TK₅₀SF₄₀ numunesinin 1.gün iç yapı görüntüleri (Görüntülerin ölçekleri birbirinden farklıdır) (E: Etrenjit, ÇP: Çimento partikülü, B: Boşluk, CS: Kalsiyum sülfat, SD: Silis dumanı, T: Tomasit)



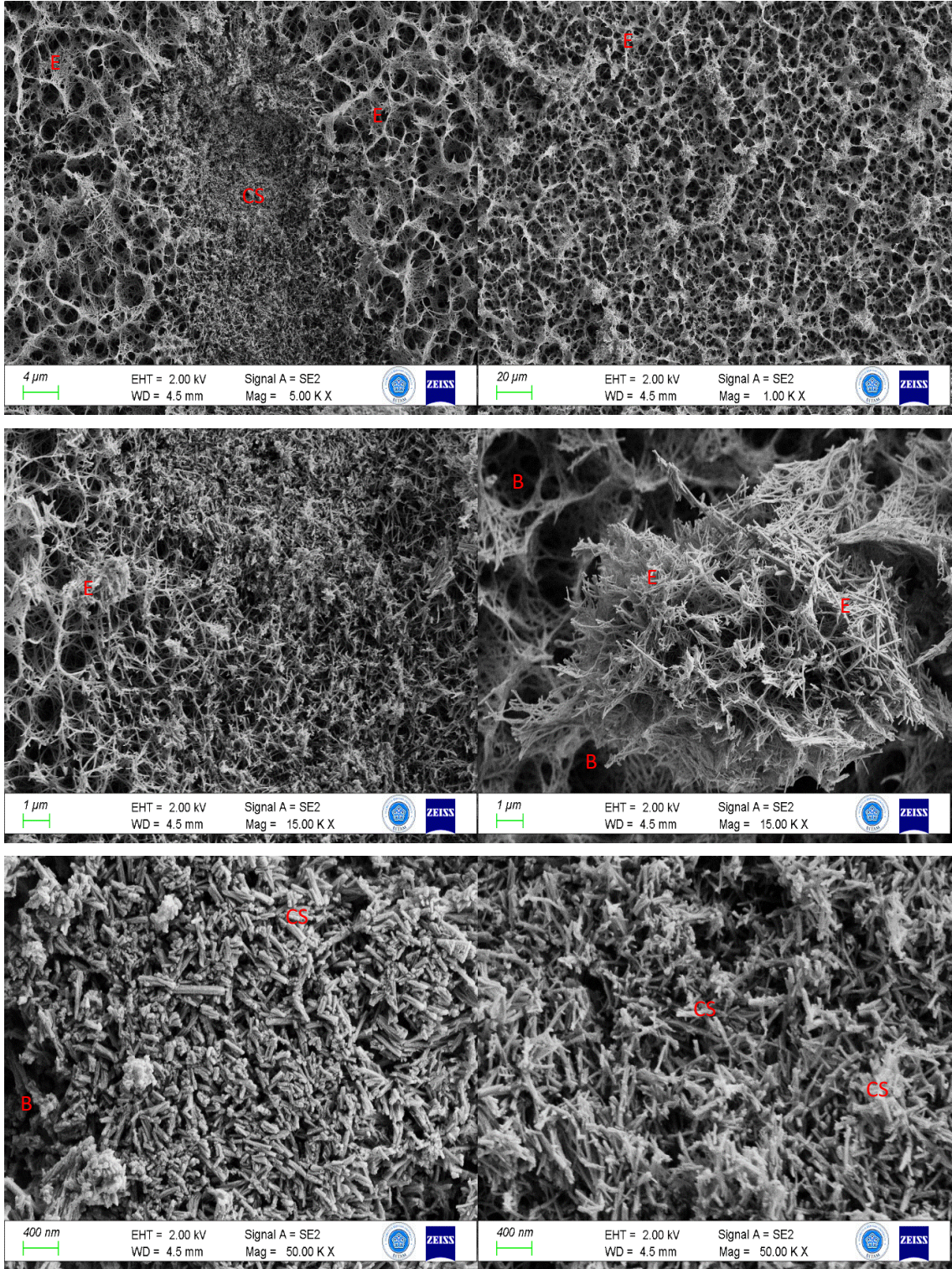
Şekil 4.7. TK₅₀SF₄₀ numunesinin 28. gün iç yapı görüntüleri (Görüntülerin ölçekleri birbirinden farklıdır) (AH₃: Jipsit, E: Etrenjit, ÇP: Çimento partikülü, B: Boşluk, CS: Kalsiyum sülfat, SD: Silis dumanı, CAH₁₀-C₃AH₆: Alümina hidrate yapılar, STR: Straetlingit, T: Tomasit)

4.1.2.3. TK₅₀G₄₀ numunesi

FE-SEM analizi sonucu elde edilen TK₅₀G₄₀ numunesinin 1. ve 28. gün görüntüleri sırasıyla Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da verilmiştir. TK₅₀G₄₀ numunesinin elde edilen 1 günlük görüntüler incelendiğinde yoğun bir şekilde etrenjit, çimento partikülleri üzerinde AH₃ ve boşluk yapısı görülmektedir (Şekil 4.8.). Bu durum 28. gün yaşta neredeyse bütün mikroyapının ve hidrate olmamış bileşikler dahil tüm yapıların etrenjitte kaplandığı Şekil 4.9.'dan anlaşılabılır. Ayrıca bir kısım yarım sulu alçının da sulu alçıya dönüştüğü görülmektedir (Şekil 4.9.). Ağsı etrenjit ve boşluk yapısının oluşmasının ana nedeni olarak yüksek oranda kullanılan hemihidrat alçının priz hızlandırma etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.9.'da yer alan 28. gün analizindeki görüntüler incelendiğinde, numune yaşının ilerlemesiyle ağsı etrenjit yapı liflerinin incilmesi ve uzaması sonucu olarak, numunelerin ileri yaşlarında mikroyapısında daha fazla sayıda ve daha büyük boyutlu boşluklara sahip hale gelebileceği düşünülmektedir (Saydan, 2021). Bu boşluk yapısında meydana gelecek olumsuzluk betonun dayanım ve dayanıklılığını olumsuz etkilemesine neden olmaktadır. Tüm görüntüler detaylı incelendiğinde ortak olan nokta boşlukların etrenjitte dolmasıdır. Etrenjitin iç yapıyı tamamen doldurması sebebiyle numunenin erken dönemlerinden başlayarak ileri yaşlarında artan oranlarda düşük geçirgenlik davranışı sergilediği görülmektedir. Ancak etrenjitin miktarının çok aşırı oluşması sonucu iç gerilmedeki artışların belirli bir gerilme eşik değerini aştığında numunenin parçalanabileceği göz önünde bulundurulmalı, karışım tasarımları yapılırken buna dikkat edilmelidir.



Şekil 4.8. TK₅₀G₄₀ numunesinin 1. gün iç yapı görüntüleri (Görüntülerin ölçekleri birbirinden farklıdır) (E: Etrenjit, CP: Çimento partikülü, B: Boşluk, AH₃: Jipsit, CS: Kalsiyum sülfat, CS0.5H: Hemihidrat, SD: Silis dumanı, CAH₁₀-C₃AH₆: Alümina hidrate yapılar)



Şekil 4.9. TK₅₀G₄₀ numunesinin 28. gün iç yapı görüntüleri (Görüntülerin ölçekleri birbirinden farklıdır) (E: Etrenjit, B: Boşluk, CS: Kalsiyum sülfat)

4.2. Mekanik Deney Sonuçları

4.2.1. Zımbalama deney sonuçları

Bu bölümde zımbalama etkisindeki betonarme plakların davranışı incelenmiştir. İlk olarak her plak eleman kendi içinde deney sonuçlarına göre yorumlanmıştır. Daha sonra betonarme plak elemanlar gruplandırılarak yükleme yaşına ve malzeme özelliklerine göre kıyaslanmıştır. En son olarak da bütün betonarme plaklar hem yükleme yaşına hem de malzeme özelliklerine göre kıyaslanarak yorumlanmıştır.

4.2.1.1. Deney-1 (Ref_plakı)

Ref_plakı plağı diğer 1. gün betonarme plaklara referans olması amacıyla bağlayıcı olarak mineral katkı kullanılmadan sadece KAÇ ile hazırlanmıştır. Referans numunesi üzerinde 1. gün sonunda sırasıyla Şekil 4.10.'daki gibi zımbalama deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda betonarme plakta oluşan çatlaklar, çatlak cetveli yardımıyla ölçülerek Şekil 4.11.'deki gibi markör kalemi ile işaretlenmiştir. Genişlikleri ölçülen çatlakların dağılımı sırasıyla 1. gün deney sonuçlarına göre Şekil 4.12.'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Referans numunesi 1.gün zımbalama deneyi



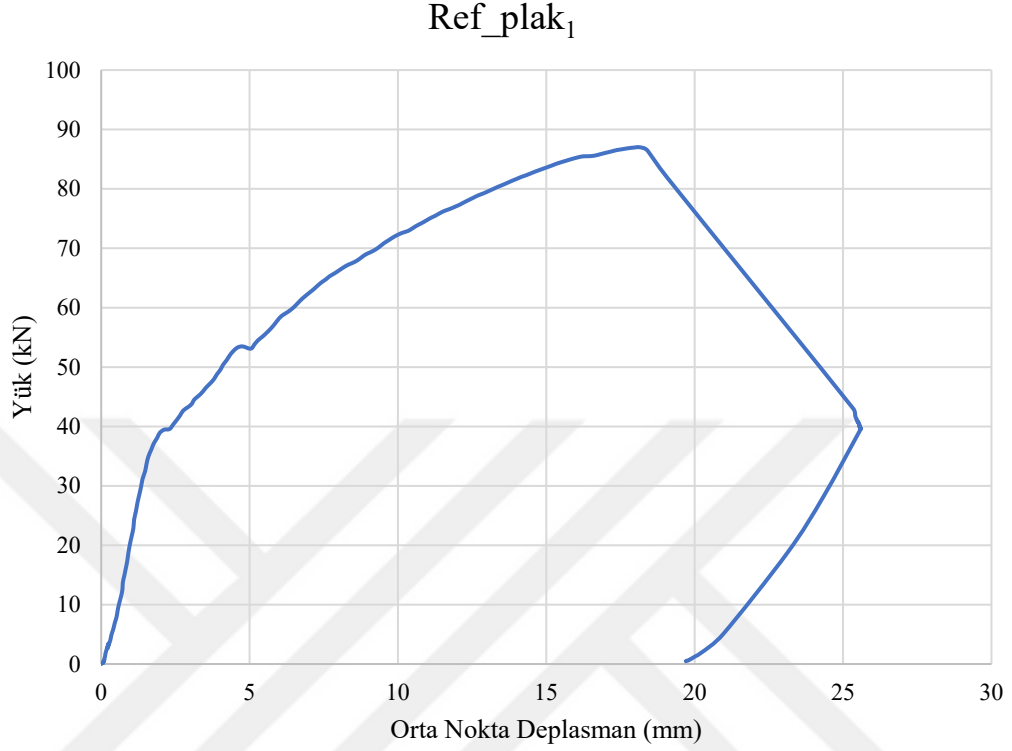
Şekil 4.11. Çatlakların ölçülmesi



Şekil 4.12. Referans numunesi 1.gün zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı

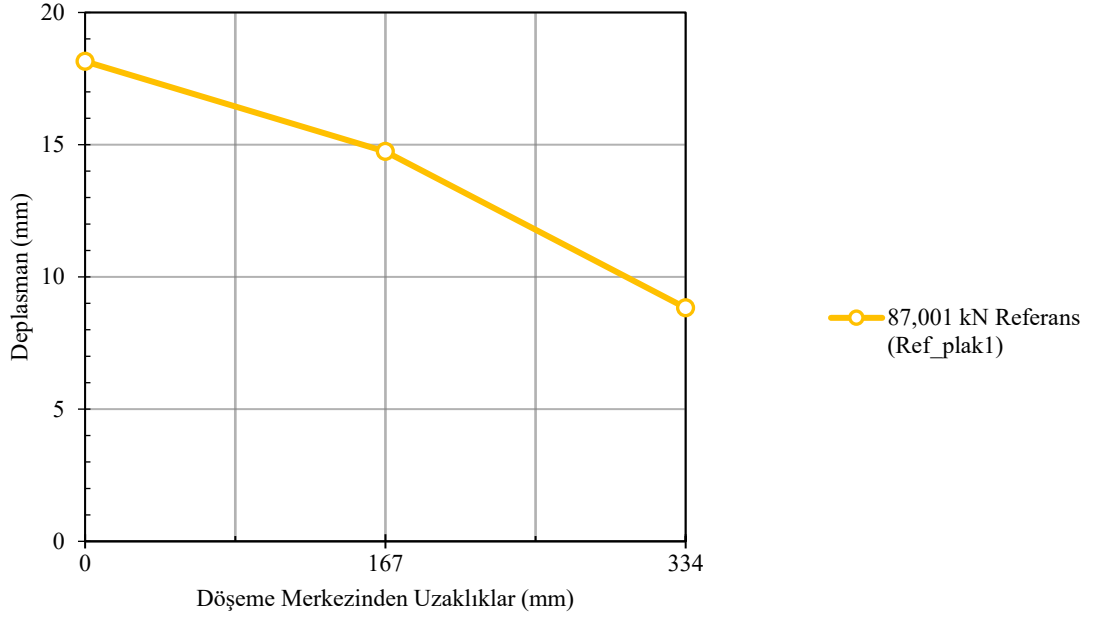
Referans numunesinin 1. gün zımbalama deneyinde ilk olarak kolon çevresinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamış ve yük arttıkça bu çatlaklar yük merkezinden numunenin kenarlarına doğru radyal çatlaklar şeklinde ilerlemiştir. Merkezden kenarlara doğru ilerleyen radyal çatlakların genişlikleri azalmıştır. Zımbalama çevresi dışında ortalama çatlak genişlikleri 0.2-0.3 mm iken zımbalama çevresi içerisinde 3.5 mm'den büyük çatlaklar mevcuttur. Yüklemedeki artışla beraber artan çatlak genişlikleri neticesinde zayıflayan kolon ve betonarme plak birleşim bölgesinde 1. gün deney sonucunda zımbalama çevresine teğet çatlaklar oluşarak ani ve gevrek şekilde zımbalama

göçmesi gerçekleşmiştir. Deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman sonuçları ise Şekil 4.13.'de verilmiştir.

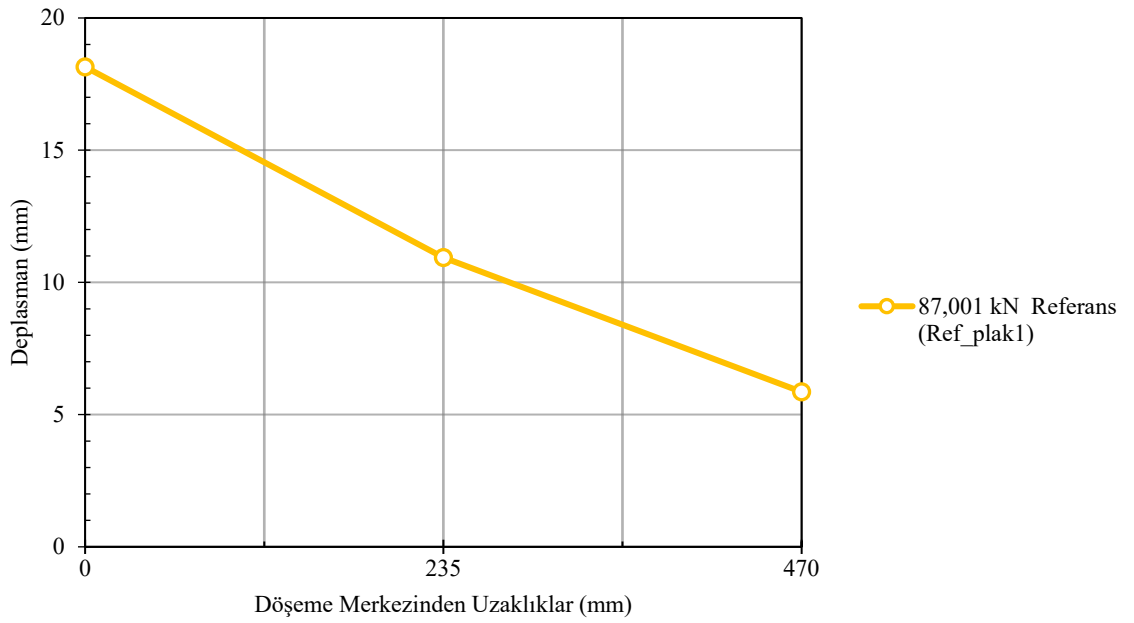


Şekil 4.13. 1. gün referans numunesi yük-orta nokta deplasman eğrisi

1. gün deney sonucunda 87.001 kN maksimum yükte zımbalama oluşurken, bu yükte 18.149 mm deplasman meydana gelmiştir. Yük-orta nokta deplasman eğrisinden 10 kN yük değerinde başlangıç rijitliği 16.84 (kN/mm), süneklik değeri de 2.05 olarak hesaplanmıştır. Yük deplasman grafiğinin göçme noktasına kadar olan bölümleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim kapasitesi 1540.28 (kN.mm) olarak hesaplanmıştır. Zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme eksenini yer değiştirmesi Şekil 4.14.'de ve döşeme diyagonal eksenini yer değiştirmesi ise Şekil 4.15.'de verilmiştir.



Şekil 4.14. Döşeme eksenli yer değiştirme grafiği



Şekil 4.15. Döşeme diyagonal eksenli yer değiştirme grafiği

Eksenel yüklemeye tabi tutulan betonarme plak numunenin eksenel yükün uygulandığı merkezden uzaklaştıkça oluşan deplasman değerleri azalmıştır.

4.2.1.2. Deney-2 (Ref_plak₂₈)

Ref_plak₂₈ plağı diğer 28. gün betonarme plaklara referans olması amacıyla bağlayıcı olarak mineral katkı kullanılmadan sadece KAÇ ile hazırlanmıştır. Referans numunesi üzerinde 28. gün sonunda sırasıyla Şekil 4.16.'daki gibi zımbalama deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda betonarme plakta oluşan çatlaklar, çatlak cetveli yardımıyla ölçülerek markör kalem ile işaretlenmiştir. Genişlikleri ölçülen çatlakların dağılımı sırasıyla 28. gün deney sonuçlarına göre Şekil 4.17.'de verilmiştir.

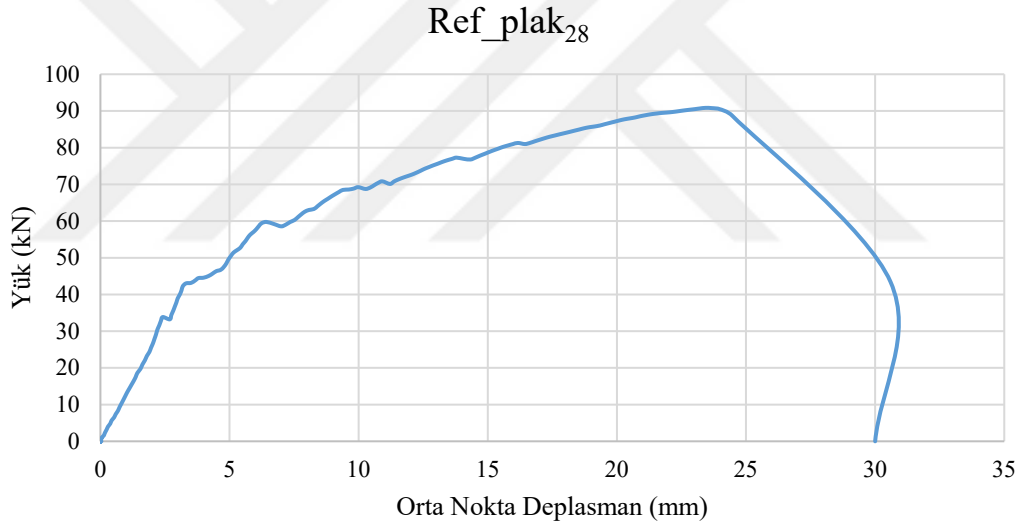


Şekil 4.16. Referans numunesi 28. gün zımbalama deneyi



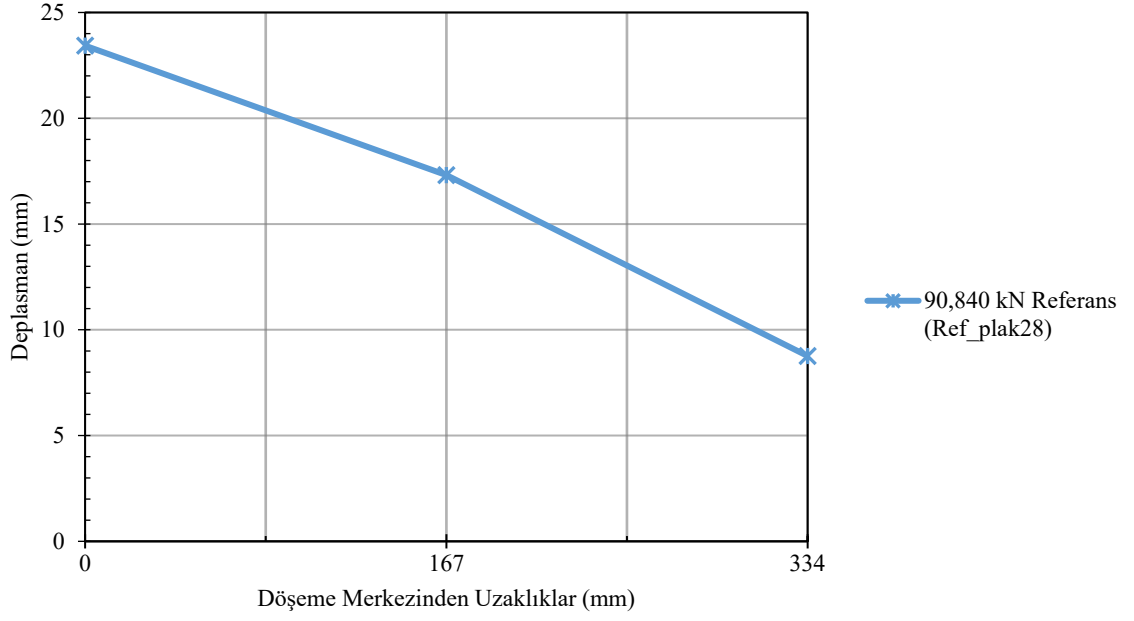
Şekil 4.17. Referans numunesi 28. gün zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı

Referans numunesinin 28. gün zımbalama deneyinde ilk olarak kolon çevresinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamış ve yük arttıkça bu çatlaklar yük merkezinden numunenin kenarlarına doğru radyal çatlaklar şeklinde ilerlemiştir. Merkezden kenarlara doğru ilerleyen radyal çatlakların genişlikleri azalmıştır. Zımbalama çevresi dışında ortalama çatlak genişlikleri 0.25-0.35 mm iken zımbalama çevresi içerisinde 3.5 mm'den büyük çatlaklar mevcuttur. Yüklemedeki artışla beraber artan çatlak genişlikleri neticesinde zayıflayan kolon ve betonarme plak birleşim bölgesinde 28. gün deney sonucunda zımbalama çevresine teğet çatlaklar oluşarak ani ve gevrek şekilde zımbalama göçmesi gerçekleşmiştir. Ek olarak zımbalama çevresi içerisindeki çatlak çekme donatısına doğru ilerledikten sonra çekme donatısı boyunca yatay yönde büyüyerek betonarme elemandaki paspayının ayrılmasına sebep olmuştur. Deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman sonuçları ise Şekil 4.18.'de verilmiştir.

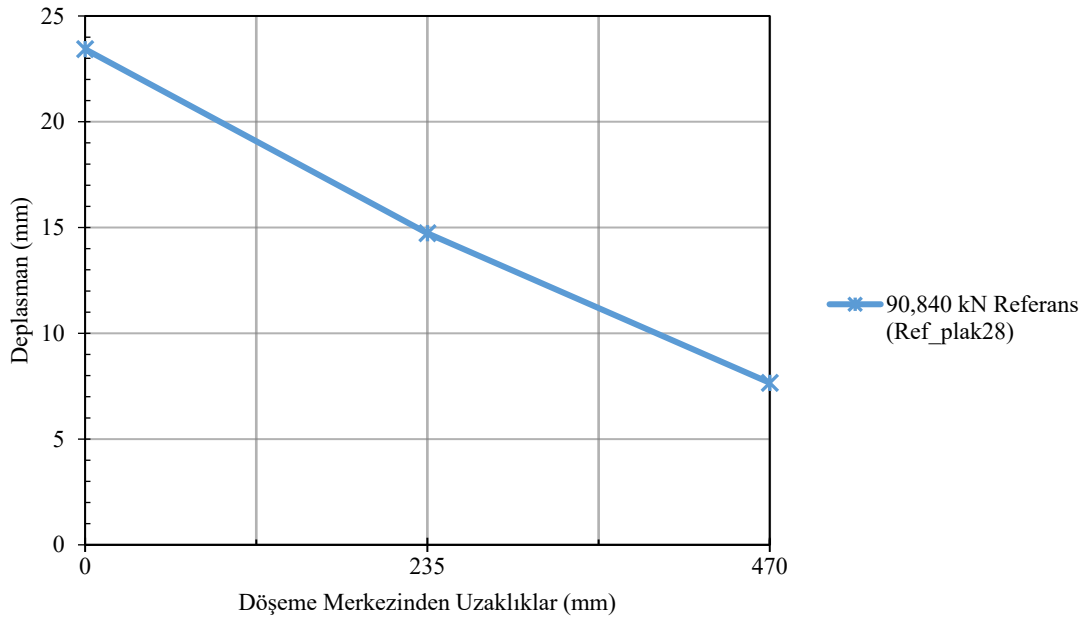


Şekil 4.18. 28. gün referans numunesi yük-orta nokta deplasman eğrisi

28. gün deney sonucunda 90.84 kN maksimum yükte zımbalama oluşurken, bu yükte 23.425 mm deplasman meydana gelmiştir. Yük-orta nokta deplasman eğrisinden 10 kN yük değerinde başlangıç rijitliği 12.62 (kN/mm), süneklik değeri de 1.99 olarak hesaplanmıştır. Yük deplasman grafiğinin göçme noktasına kadar olan bölümleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim kapasitesi 2030.81 (kN.mm) olarak hesaplanmıştır. Zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme eksenini yer değiştirmesi Şekil 4.19.'da ve döşeme diyagonal eksenini yer değiştirmesi ise Şekil 4.20.'de verilmiştir.



Şekil 4.19. Döşeme eksenli yer değiştirme grafiği



Şekil 4.20. Döşeme diyagonal eksenli yer değiştirme grafiği

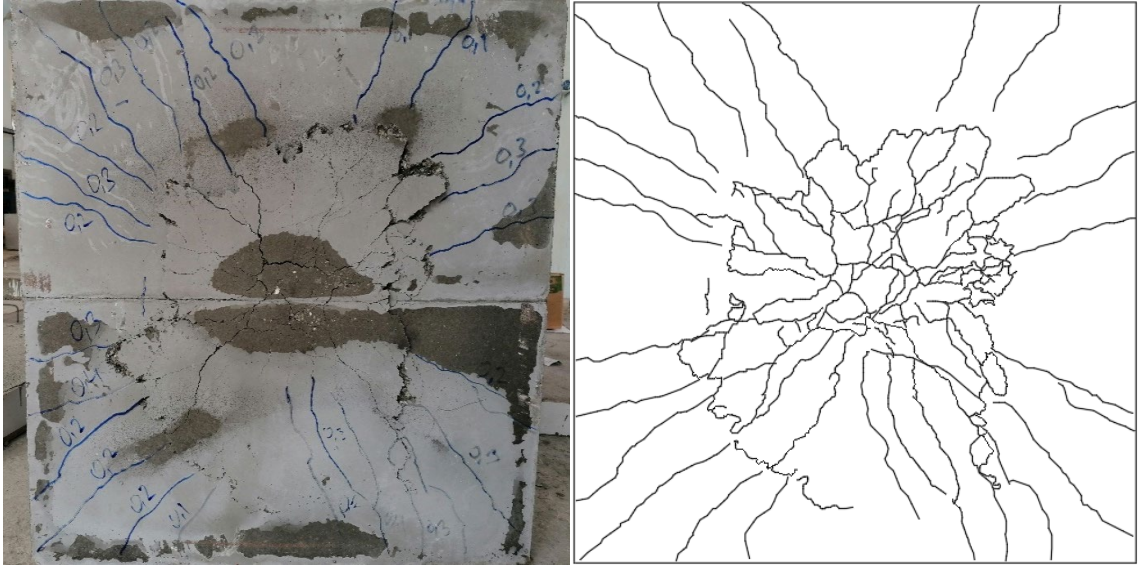
Eksenel yüklemeye tabi tutulan betonarme plak numunenin eksenel yükün uygulandığı merkezden uzaklaştıkça oluşan deplasman değerleri azalmıştır.

4.2.1.3. Deney-3 (TK₅₀SF₄₀_plak₁)

TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesi üzerinde 1. gün sonunda Şekil 4.21.'deki gibi zımbalama deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda betonarme plakta oluşan çatlaklar, çatlak cetveli yardımıyla ölçülerek markör kalemi ile işaretlenmiştir. Genişlikleri ölçülen çatlakların dağılımı 1. gün deney sonuçlarına göre Şekil 4.22.'de verilmiştir.

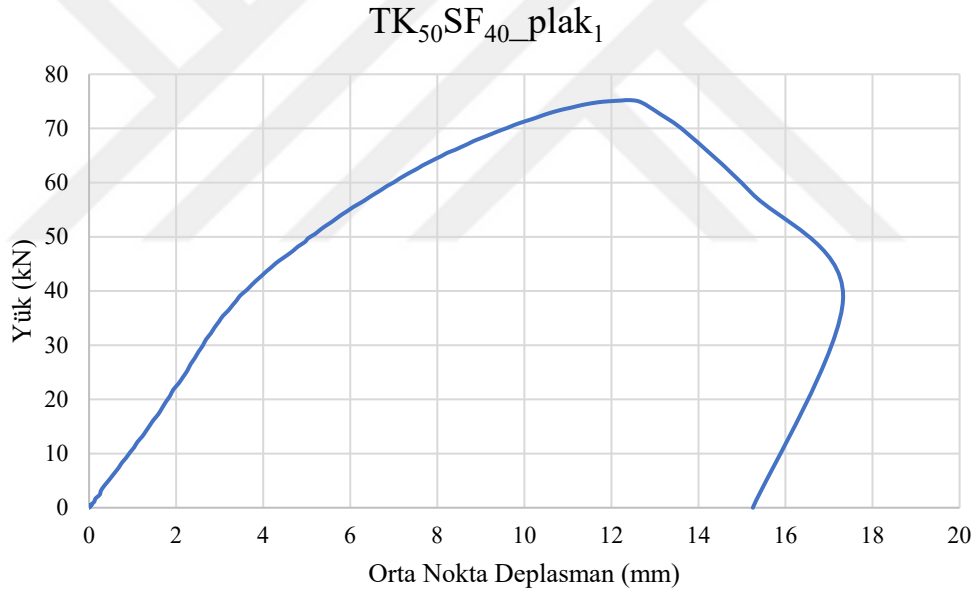


Şekil 4.21. TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesi zımbalama deneyi



Şekil 4.22. TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesi zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı

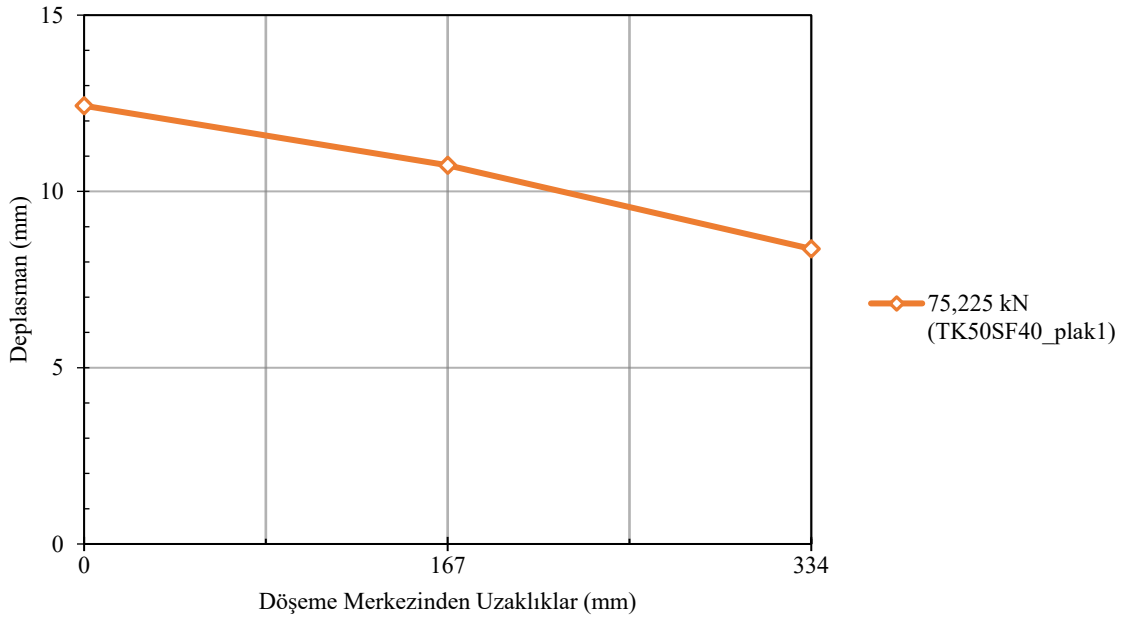
TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesinin 1. gün zımbalama deneyinde ilk olarak kolon çevresinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamış ve yük arttıkça bu çatlaklar yük merkezinden numunenin kenarlarına doğru radyal çatlaklar şeklinde ilerlemiştir. Yüklemedeki artışla beraber kolon kenarı ile deney elemanının kenarı arasında oluşan radyal çatlakların sayısı ve genişlikleri artmıştır. Merkezden kenarlara doğru ilerleyen radyal çatlakların genişlikleri azalmıştır. Zımbalama çevresinin dışında ortalama çatlak genişlikleri 0.2-0.3 mm iken zımbalama çevresi içerisinde 3.5 mm'den büyük çatlaklar mevcuttur. Yüklemedeki artışla beraber artan çatlak genişlikleri neticesinde zayıflayan kolon ve betonarme plak birleşim bölgesinde 1. gün deney sonucunda zımbalama çevresine teğet çatlaklar oluşarak ani ve gevrek şekilde zımbalama göçmesi gerçekleşmiştir. Deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman sonuçları ise Şekil 4.23.'de verilmiştir.



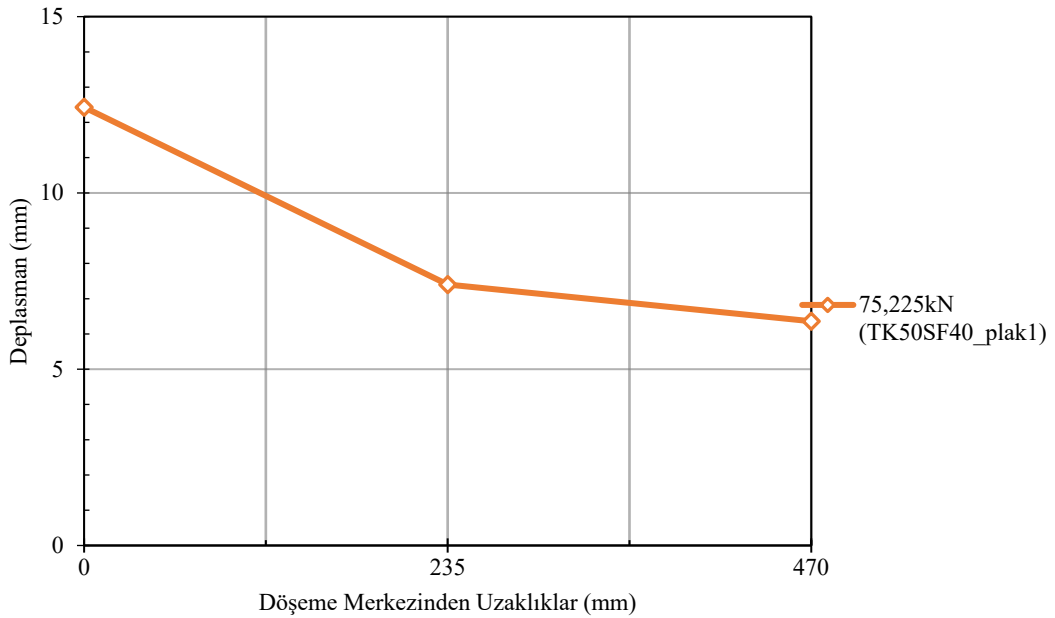
Şekil 4.23. TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesi yük-orta nokta deplasman eğrisi

1. gün deney sonucunda 75.225 kN maksimum yükte zımbalama oluşurken 12.432 mm deplasman yapmıştır. Yük orta nokta deplasman eğrisinden 10 kN yük değerinde başlangıç rijitliği 10.86 (kN/mm), süneklik değeri de 1.79 olarak hesaplanmıştır. Yük deplasman grafiğinin göçme noktasına kadar olan bölümleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim kapasitesi 874.68 (kN.mm) hesaplanmıştır. Zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme eksenini yer

değiştirmesi şekil 4.24.'de ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirmesi ise şekil 4.25.'de verilmiştir.



şekil 4.24. Döşeme ekseni yer değiştirme grafiği



şekil 4.25. Döşeme diyagonal ekseni yer değiştirme grafiği

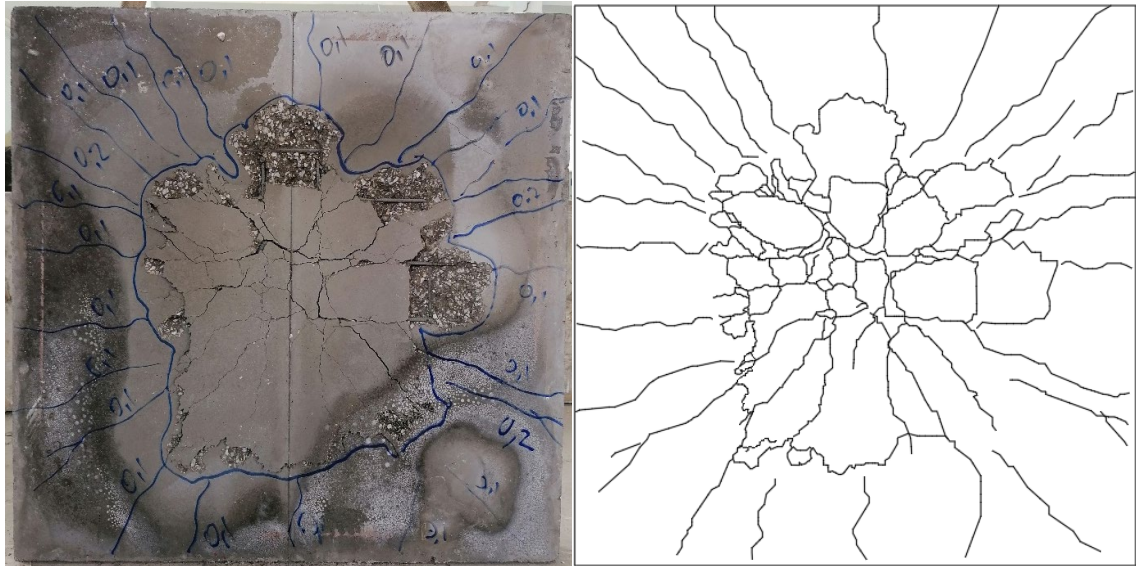
Eksenel yüklemeye tabi tutulan betonarme plak numunenin eksenel yükün uygulandığı merkezden uzaklařtıķa oluşan deplasman değerleri azalmıştır.

4.2.1.4. Deney-4 (TK₅₀SF₄₀_plak₂₈)

TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ numunesi üzerinde 28. gün sonunda Şekil 4.26.'daki gibi zımbalama deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda betonarme plakta oluşan çatlaklar, çatlak cetveli yardımıyla ölçülerek markör kalemi ile işaretlenmiştir. Genişlikleri ölçülen çatlakların dağılımı 28. gün deney sonuçlarına göre Şekil 4.27.'de verilmiştir.

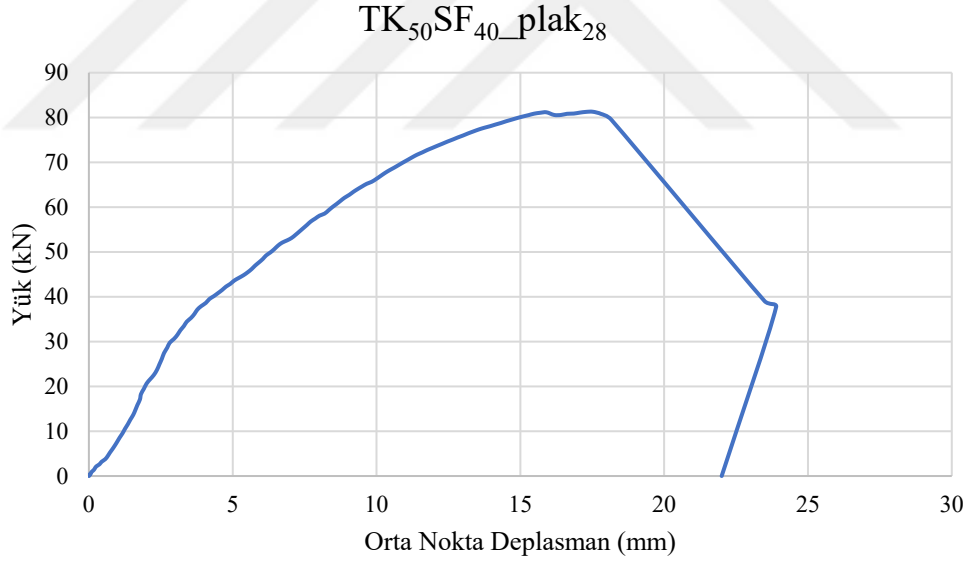


Şekil 4.26. TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ numunesi zımbalama deneyi



Şekil 4.27. TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ numunesi zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı

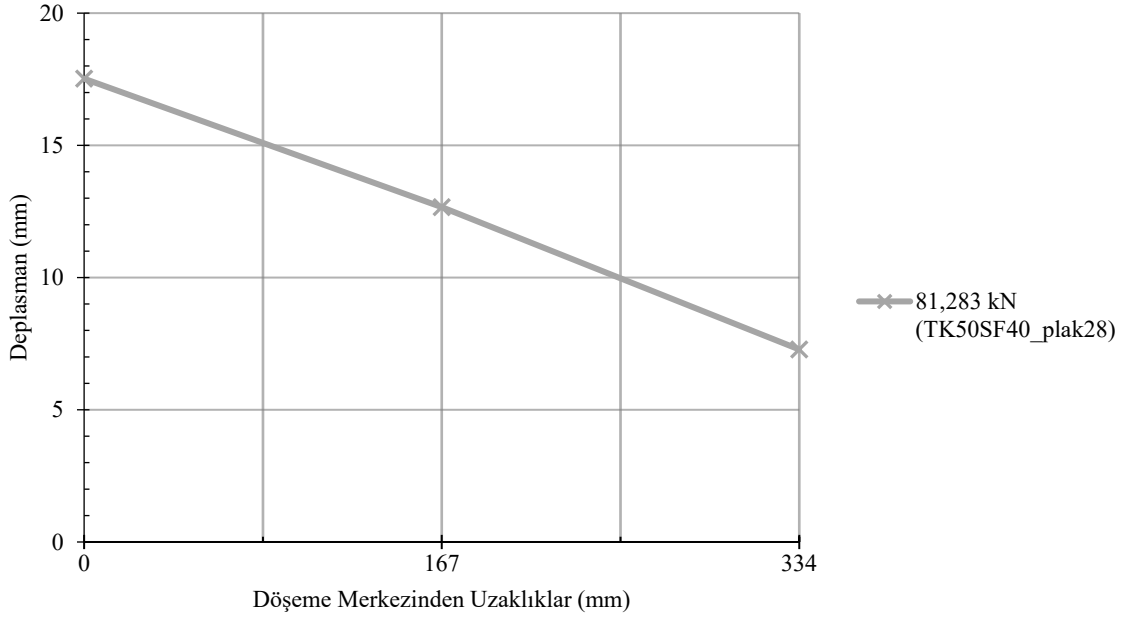
TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ numunesinin 28. gün zımbalama deneyinde ilk olarak kolon çevresinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamış ve yük arttıkça bu çatlaklar yük merkezinden numunenin kenarlarına doğru radyal çatlaklar şeklinde ilerlemiştir. Yüklemedeki artışla beraber kolon kenarı ile deney elemanının kenarı arasında oluşan radyal çatlakların sayısı ve genişlikleri artmıştır. Merkezden kenarlara doğru ilerleyen radyal çatlakların genişlikleri azalmıştır. Zımbalama çevresi dışında ortalama çatlak genişlikleri 0.1-0.2 mm iken zımbalama çevresi içerisinde 3.5 mm'den büyük çatlaklar mevcuttur. Yüklemedeki artışla beraber artan çatlak genişlikleri neticesinde zayıflayan kolon ve betonarme plak birleşim bölgesinde 28. gün deney sonucunda zımbalama çevresine teğet çatlaklar oluşarak ani ve gevrek şekilde zımbalama göçmesi gerçekleşmiştir. Ek olarak zımbalama çevresi içerisindeki çatlak çekme donatısına doğru ilerledikten sonra çekme donatısı boyunca yatay yönde büyüyerek betonarme elemandaki paspayının ayrılmasına sebep olmuştur. Deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman sonuçları ise Şekil 4.28.'de verilmiştir.



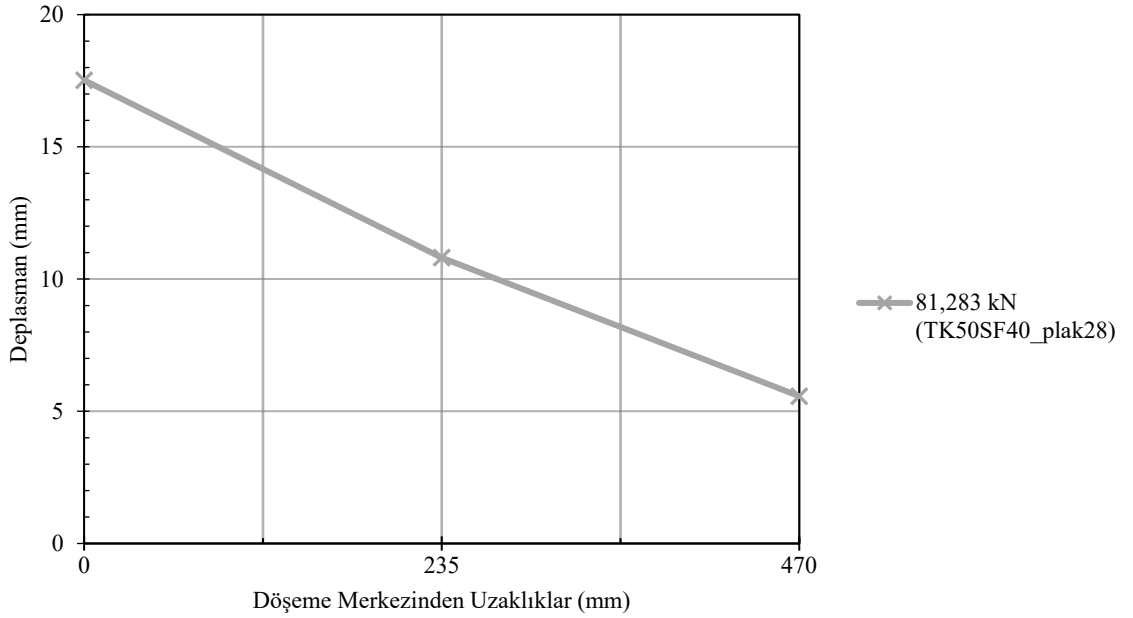
Şekil 4.28. TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ numunesi yük-orta nokta deplasman eğrisi

28. gün deney sonucunda 81.283 kN maksimum yükte oluşan zımbalamada 17.521 mm deplasman yapmıştır. Yük orta nokta deplasman eğrisinden 10 kN yük değerinde başlangıç rijitliği 8.39 (kN/mm), süneklik değeri de 1.58 olarak hesaplanmıştır. Yük-deplasman grafiğinin göçme noktasına kadar olan bölümleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim kapasitesi 1317.87 (kN.mm) olarak hesaplanmıştır. Zımbalama deney

sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme eksenini yer değiştirmesi Şekil 4.29.'da ve döşeme diyagonal eksenini yer değiştirmesi ise Şekil 4.30.'da verilmiştir.



Şekil 4.29. Döşeme eksenini yer değiştirme grafiği



Şekil 4.30. Döşeme diyagonal eksenini yer değiştirme grafiği

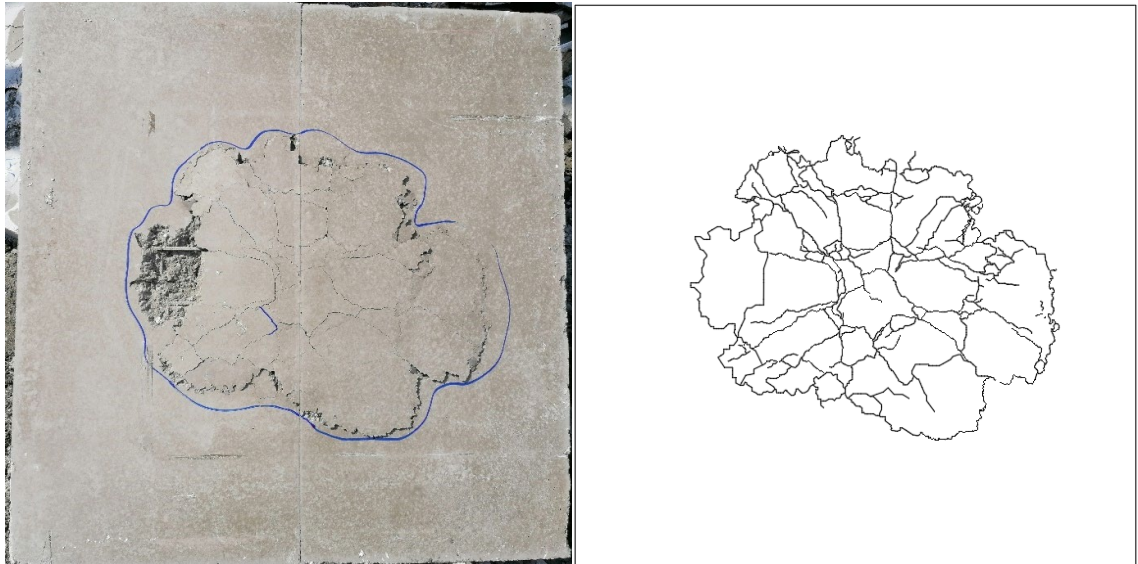
Eksenel yüklemeye tabi tutulan betonarme plak numunenin eksenel yükün uygulandığı merkezden uzaklaştıkça oluşan deplasman değerleri azalmıştır.

4.2.1.5. Deney-5 (TK₅₀G₄₀_plak₁)

TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesi üzerinde 1. gün sonunda Şekil 4.31.'deki gibi zımbalama deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda betonarme plakta oluşan çatlaklar, çatlak cetveli yardımıyla ölçülerek markör kalem ile işaretlenmiştir. Genişlikleri ölçülen çatlakların dağılımı 1. gün deney sonuçlarına göre Şekil 4.32.'de verilmiştir.

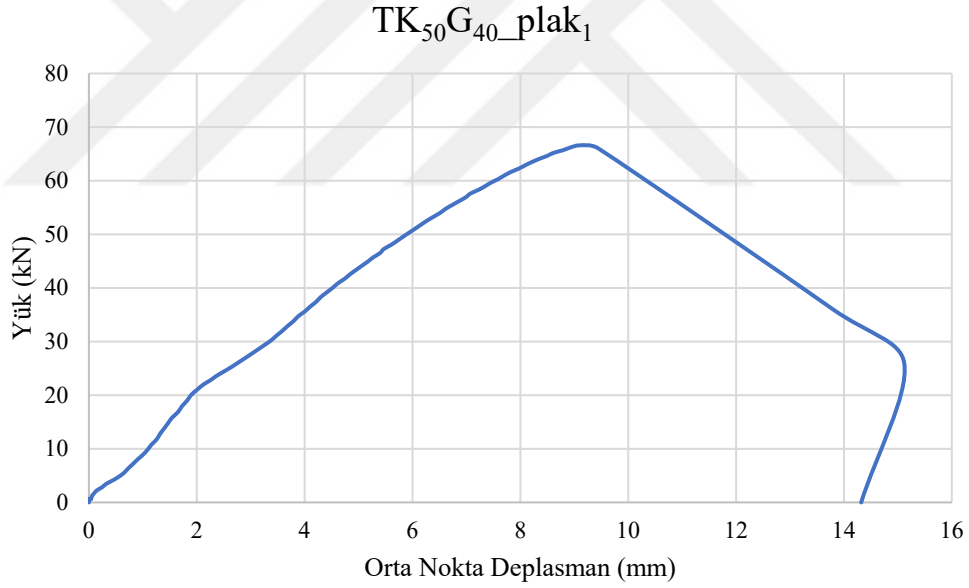


Şekil 4.31. TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesi zımbalama deneyi



Şekil 4.32. TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesi zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı

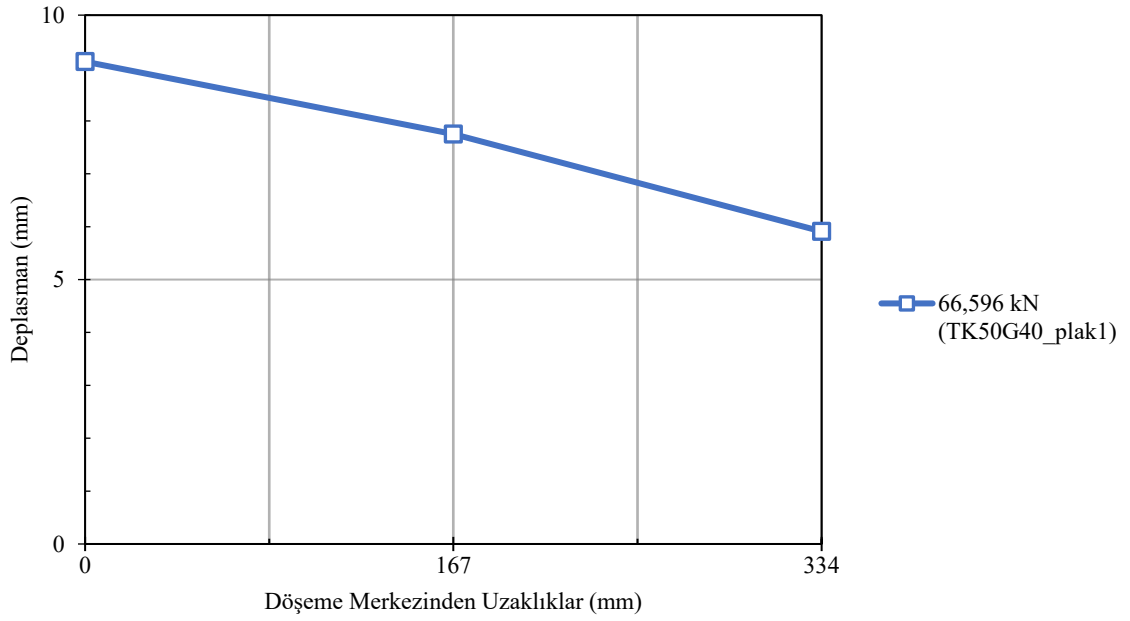
TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesinin 1. gün deneyinde ilk olarak kolon çevresinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Yüklemedeki artışla beraber zımbalama çevresi ile deney elemanının kenarı arasında oluşan radyal çatlaklar bu betonarme plak elemanda oluşmamıştır. Artan yüklerle beraber zımbalama çevresi içerisinde yer alan radyal çatlakların genişlemesi yüklemenin son aşamalarına doğru önemli ölçüde durmuş, artan orta nokta yer değiştirmesi neticesinde zımbalama çevresine teğet çatlaklar sonucu zımbalama gerçekleşmiştir. Merkezden kenarlara doğru ilerleyen radyal çatlaklar zımbalama çevresi içerisinde sınırlı kalmıştır. Zımbalama çevresi dışında çatlak oluşmazken zımbalama çevresi içerisinde 3.5 mm'den büyük çatlaklar mevcuttur. Ek olarak zımbalama çevresi içerisindeki çatlak çekme donatısına doğru ilerledikten sonra çekme donatısı boyunca yatay yönde büyüyerek betonarme elemandaki paspayının ayrılmasına sebep olmuştur. Deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman sonuçları ise Şekil 4.33.'de verilmiştir.



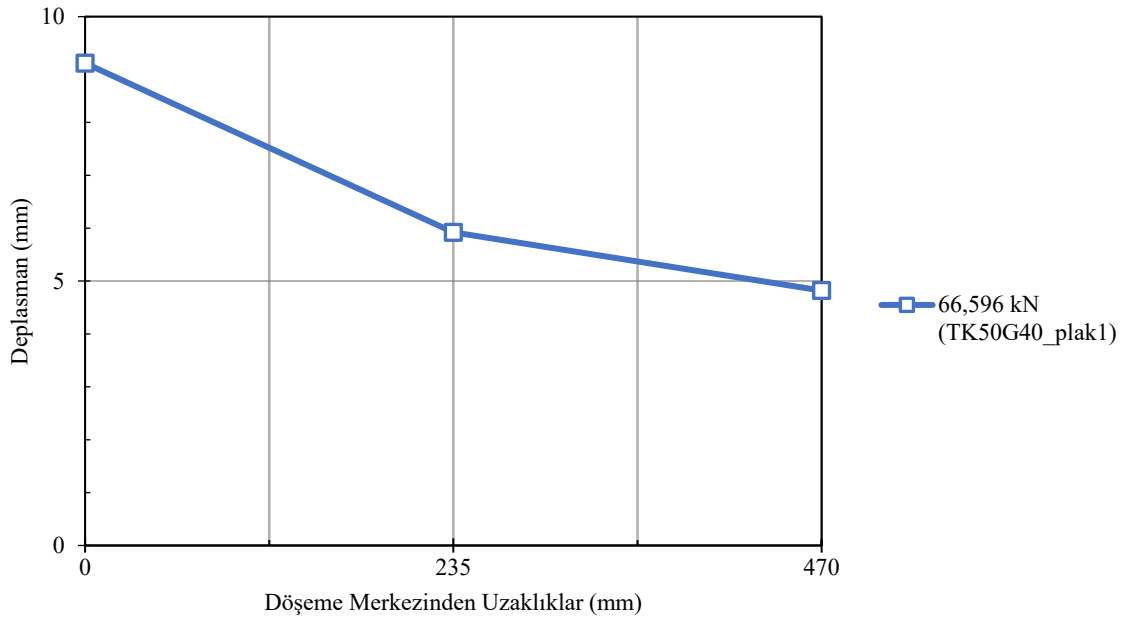
Şekil 4.33. TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesi yük-orta nokta deplasman eğrisi

Yük-orta nokta deplasman eğrisine göre 1. gün deney sonucunda 66.596 kN maksimum yükte zımbalama oluşurken 9.117 mm deplasman yapmıştır. Yük orta nokta deplasman eğrisinden 10 kN yük değerinde başlangıç rijitliği 9.28 (kN/mm), süneklik değeri de 1.36 olarak hesaplanmıştır. Yük deplasman grafiğinin göçme noktasına kadar olan bölümleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim kapasitesi 623.06 (kN.mm) olarak hesaplanmıştır. Zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme

ekseni yer değiştirmesi şekil 4.34.'de ve dōřeme diyagonal eksenini yer değiştirmesi ise şekil 4.35.'de verilmiştir.



şekil 4.34. Dōřeme eksenini yer değiştirme grafiği



şekil 4.35. Dōřeme diyagonal eksenini yer değiştirme grafiği

Ekseneli yŭklemeye tabi tutulan betonarme plak numunenin ekseneli yŭkŭn uygulandığı merkezden uzaklařtıķa oluşan deplasman değerleri azalmıştır.

4.2.1.6. Deney-6 (TK₅₀G₄₀_plak₂₈)

TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numunesi üzerinde 28. gün sonunda Şekil 4.36.'daki gibi zımbalama deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda betonarme plakta oluşan çatlaklar, çatlak cetveli yardımıyla ölçülerek markör kalemi ile işaretlenmiştir. Genişlikleri ölçülen çatlakların dağılımı 28. gün deney sonuçlarına göre Şekil 4.37.'de verilmiştir.

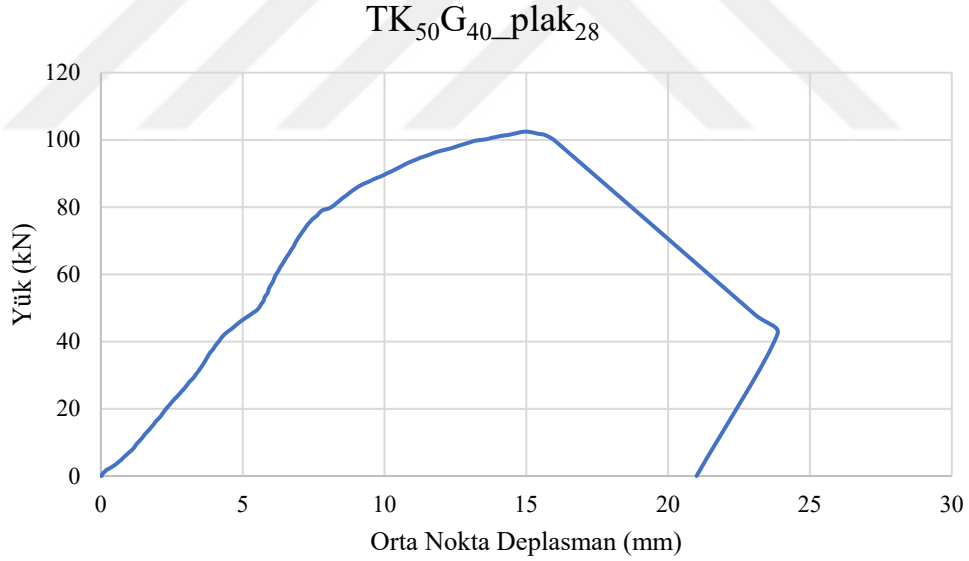


Şekil 4.36. TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numunesi zımbalama deneyi



Şekil 4.37. TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numunesi zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı

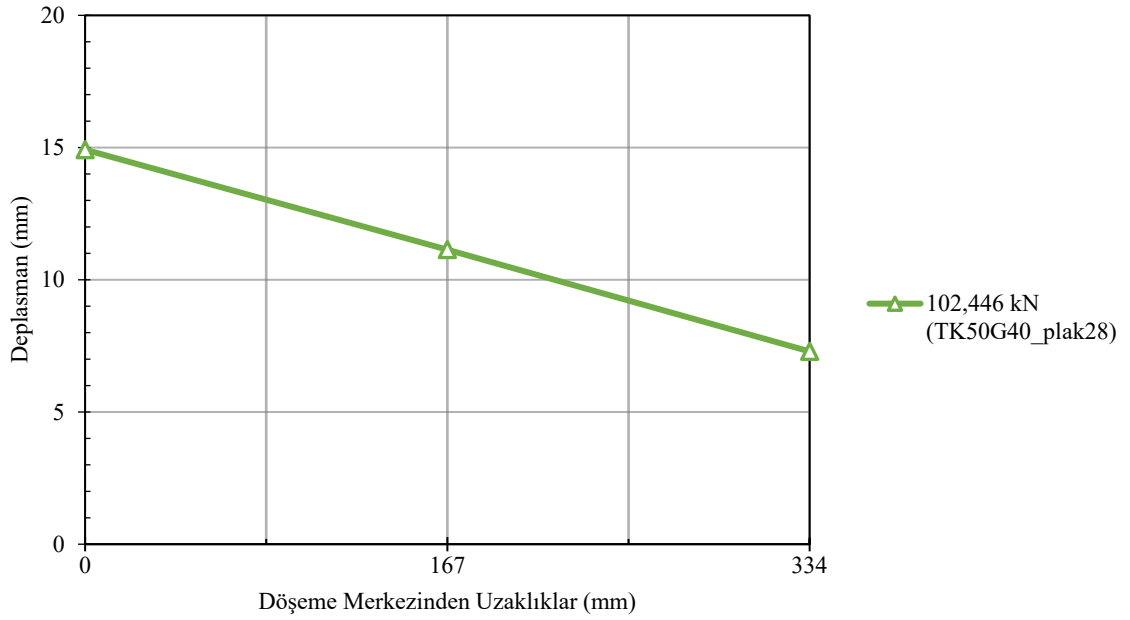
TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numunesinin 28. gün zımbalama deneyinde ilk olarak kolon çevresinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamış ve yük arttıkça bu çatlaklar yük merkezinden numunenin kenarlarına doğru radyal çatlaklar şeklinde ilerlemiştir. Yüklemedeki artışla beraber kolon kenarı ile deney elemanının kenarı arasında oluşan radyal çatlakların sayısı ve genişlikleri artmıştır. Merkezden kenarlara doğru ilerleyen radyal çatlakların genişlikleri azalmıştır. Zımbalama çevresi dışında ortalama çatlak genişlikleri 0.1-0.2 mm iken zımbalama çevresi içerisinde 3.5 mm'den büyük çatlaklar mevcuttur. Yüklemedeki artışla beraber artan çatlak genişlikleri neticesinde zayıflayan kolon ve betonarme plak birleşim bölgesinde 28. gün deney sonucunda zımbalama çevresine teğet çatlaklar oluşarak ani ve gevrek şekilde zımbalama göçmesi gerçekleşmiştir. Ek olarak zımbalama çevresi içerisindeki çatlak çekme donatısına doğru ilerledikten sonra çekme donatısı boyunca yatay yönde büyüyerek betonarme elemandaki paspayının ayrılmasına sebep olmuştur. Deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman sonuçları ise Şekil 4.38.'de verilmiştir.



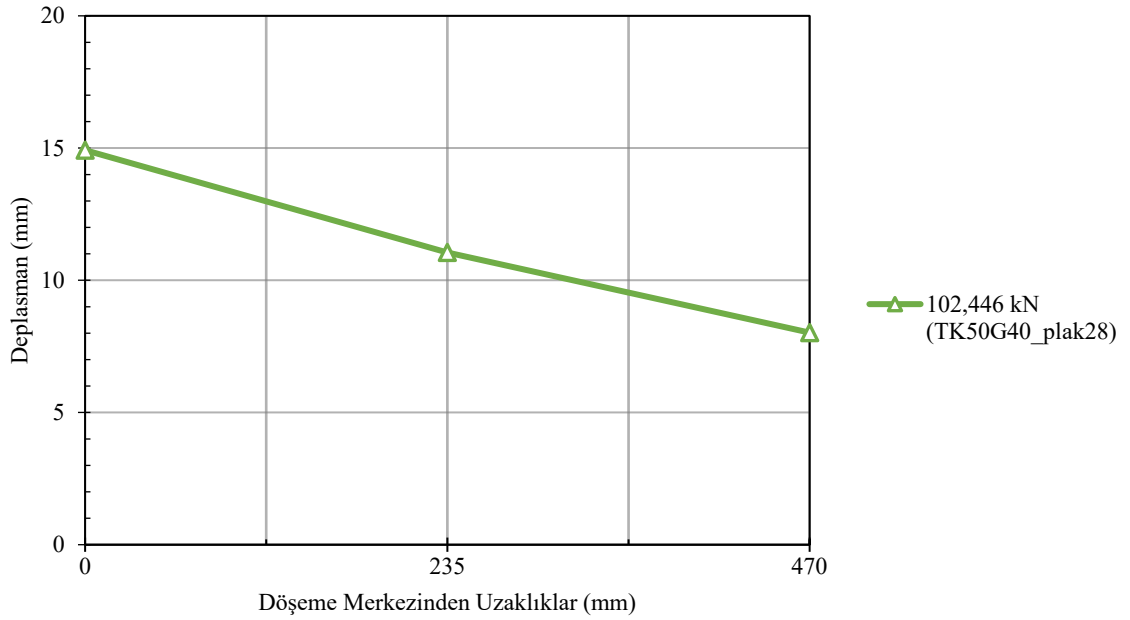
Şekil 4.38. TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numunesi yük-orta nokta deplasman eğrisi

Yük-orta nokta deplasman eğrisine göre 28. gün deney sonucu 102.446 kN maksimum yükte oluşan zımbalamada 14.921 mm deplasman yapmıştır. Yük orta nokta deplasman eğrisinden 10 kN yük değerinde başlangıç rijitliği 7.68 (kN/mm), süneklik değeri de 1.60 olarak hesaplanmıştır. Yük deplasman grafiğinin göçme noktasına kadar olan bölümleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim kapasitesi 1559.55 (kN.mm) olarak

hesaplanmıştır. Zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme eksenini yer değiştirmesi Şekil 4.39.'da ve döşeme diyagonal eksenini yer değiştirmesi ise Şekil 4.40.'da verilmiştir.



Şekil 4.39. Döşeme eksenini yer değiştirme grafiği



Şekil 4.40. Döşeme diyagonal eksenini yer değiştirme grafiği

Eksenel yüklemeye tabi tutulan betonarme plak numunenin eksenel yükün uygulandığı merkezden uzaklaştıkça oluşan deplasman değerleri azalmıştır.

4.2.1.7. Betonarme plakların karşılaştırılması

Bu bölümde, 6 adet betonarme plak numunenin deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Deney numunelerinin karşılaştırılması yapılırken gruplara ayrılmıştır. Çizelge 4.1.'de eleman grupları verilmiştir. Betonarme plak-kolon birleşim bölgesindeki, yükleme yaşının ve malzeme özelliğinin zımbalama hasarına etkisi incelenmiştir. Deney numuneleri karşılaştırılırken kullanılan şekil, grafikler ve değerler şunlardır:

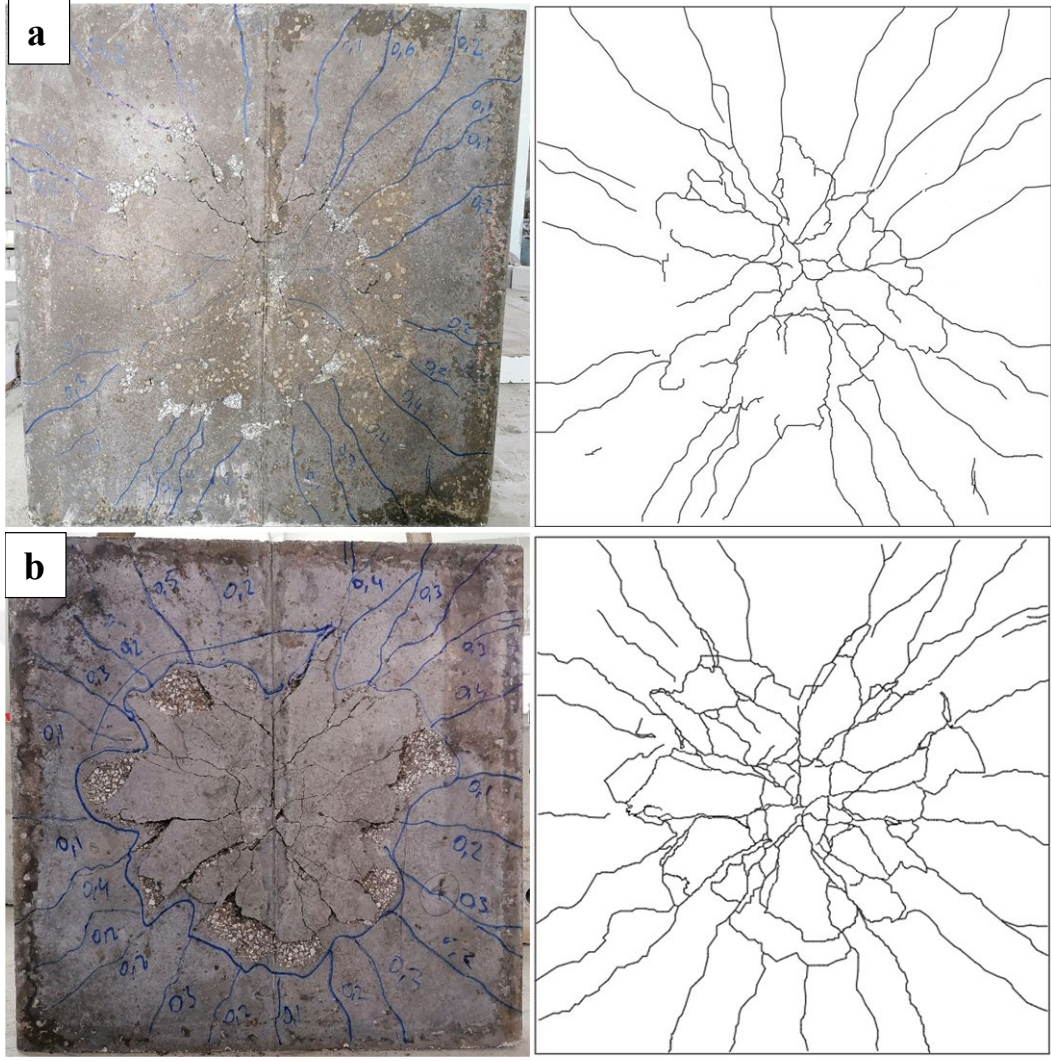
- ✓ Çatlak dağılım şekilleri,
- ✓ Başlangıç rijitliği değerleri,
- ✓ Süneklik değerleri,
- ✓ Yük-orta nokta deplasman eğrisi,
- ✓ Enerji tüketim kapasitesi değerleri,
- ✓ Yük taşıma kapasite değerleri,
- ✓ Döşeme diyagonal ekseni yer değiştirme ve döşeme ekseni yer değiştirme grafikleri.

Çizelge 4.1. Deney elemanları karşılaştırma grupları

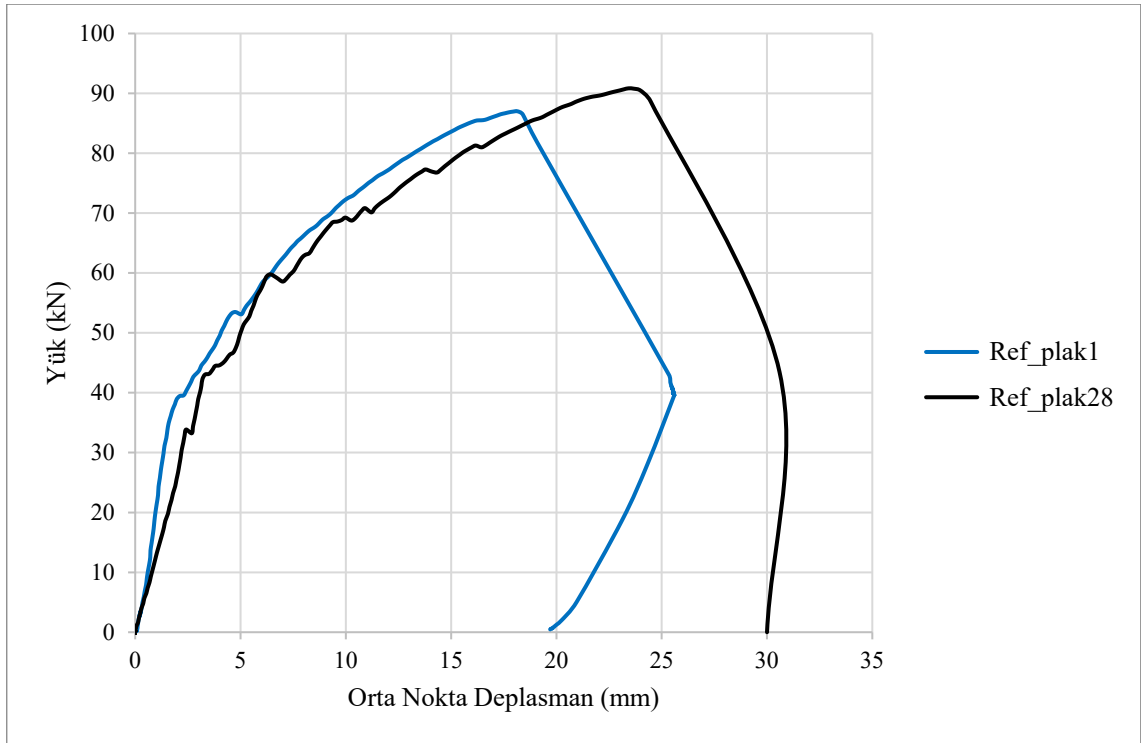
Grup	Karşılaştırma metodu	Kullanılan deney elemanı
1	Yükleme yaşına göre	a) Ref_plak ₁ b) Ref_plak ₂₈
2		a) TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁ b) TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈
3		a) TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁ b) TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈
4	Malzeme özelliklerine göre	a) Ref_plak ₁ b) TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁ c) TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁
5		a) Ref_plak ₂₈ b) TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈ c) TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈
6	Yükleme yaşı ve malzeme özelliklerine göre	a) Ref_plak ₁ b) TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁ c) TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁ d) Ref_plak ₂₈ e) TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈ f) TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈

4.2.1.7.1. Yüklemeye yaşına göre karşılaştırma

Grup 1'e göre hazırlanan numunelerin zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı Şekil 4.41.'de verilmiştir. Yüklemeye yaşındaki artışla doğru orantılı olarak zımbalama çevresi içerisinde yer alan çatlakların sayısı ve genişlikleri artmıştır. Zımbalama çevresi içindeki çatlaklardaki bariz artış kolon kenarı ile plak kenarı arasında oluşan radyal çatlaklarda görülmemiştir. Fakat 28. gün sonu deneye tabi tutulan numunelerde yük merkezinden numunenin kenarlarına doğru oluşan radyal çatlakların irtibatı 1. gün deneyine göre daha yüksek olduğu için zımbalama hasarı da daha yüksek olmuştur. Deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman sonuçları ise Şekil 4.42.'de verilmiştir. Maksimum yük artan yaşa göre %4.4 artış gösterirken maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerinde %29'luk bir artış gözlenmiştir. Ek olarak artan yüklemeye yaşıyla birlikte başlangıç rijitliği %25 oranında azalmış, süneklik değerinde ise bariz farklılık oluşmazken enerji tüketim kapasitesi yaklaşık %32 oranında yüksek çıkmıştır.

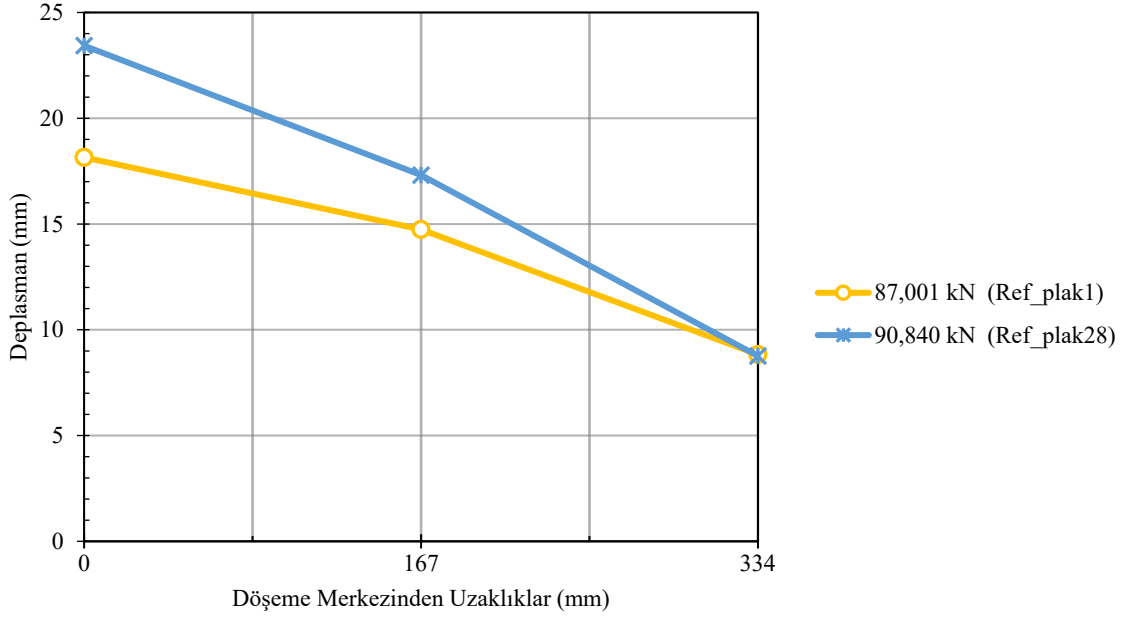


Şekil 4.41. 1. grup numunelerin zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı
(a-Ref_plak₁ numunesi, b-Ref_plak₂₈ numunesi)

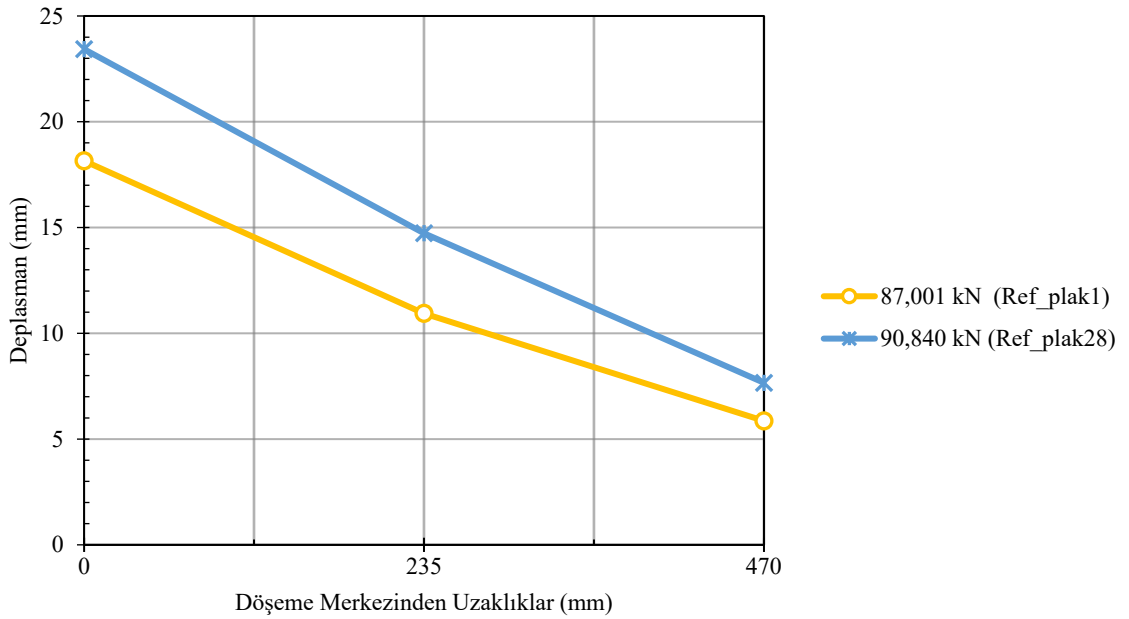


Şekil 4.42. Grup 1 yük-orta nokta deplasman eğrisi

Grup 1'e göre hazırlanan numunelerin zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme ekseni yer değiştirmesi Şekil 4.43.'de ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirmesi ise Şekil 4.44.'de verilmiştir. Döşeme ekseni yer değiştirmesi ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirme grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre 28. gün numunesinin uzaklığa bağlı deplasmandaki azalma oranı 1. gün deney numunesinden yüksektir.



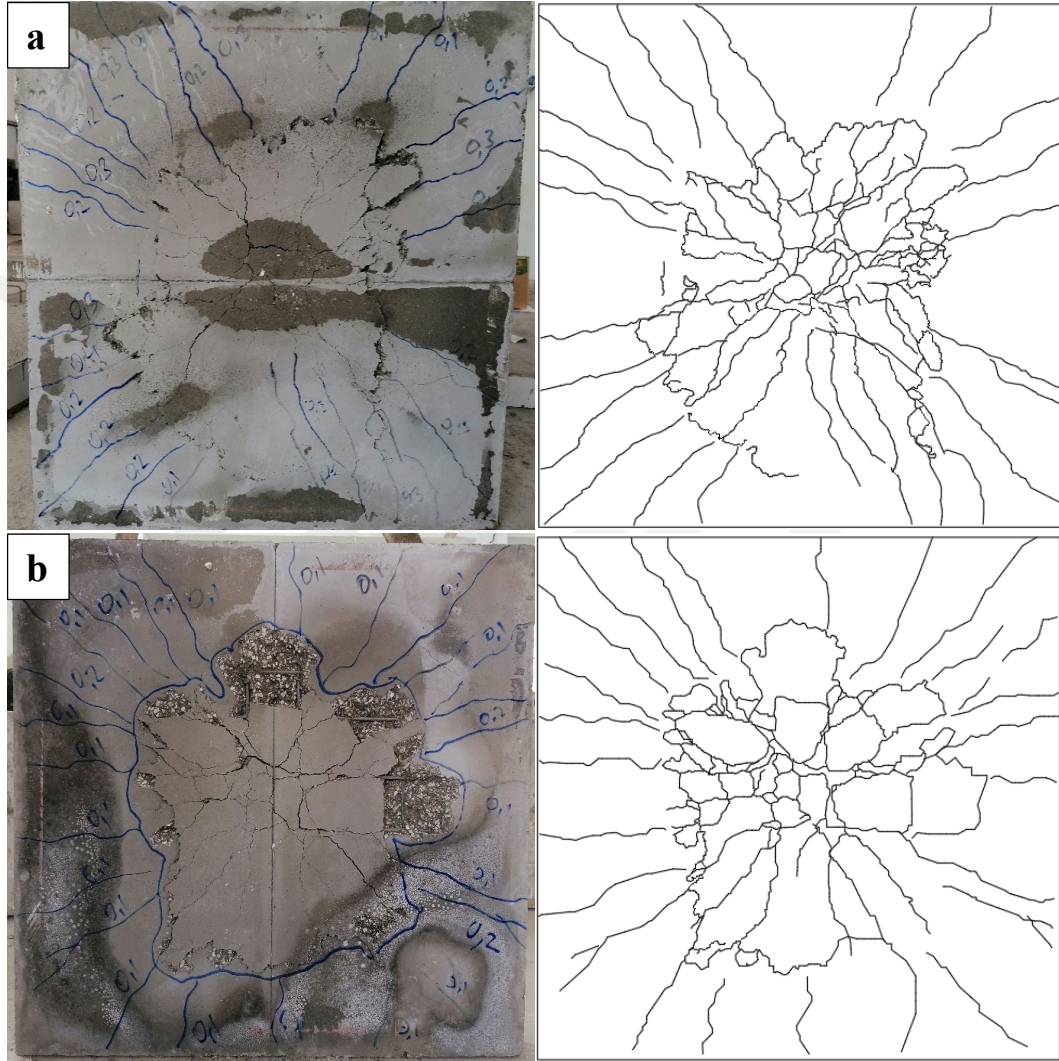
Şekil 4.43. Döşeme eksenli yer değiştirme grafiği



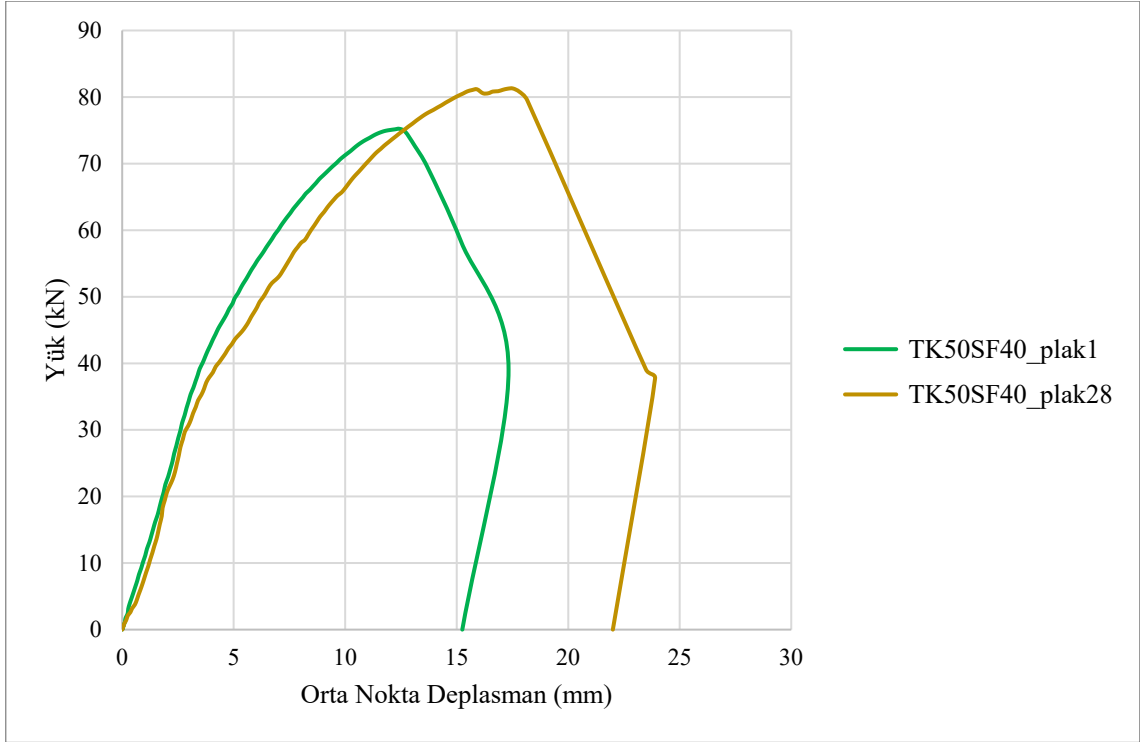
Şekil 4.44. Döşeme diyagonal eksenli yer değiştirme grafiği

Grup 2'e göre hazırlanan numunelerin zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı Şekil 4.45.'de verilmiştir. Zımbalama çevresi içerisinde yer alan kılcal çatlakların sayısı 1. gün numunesinde fazla iken 28. gün numunesinde radyal çatlakların sayısı ve genişlikleri fazladır. Ayrıca 28. gün deney numunesinde zımbalamaya neden olan teğet çatlakların genişlikleri daha fazladır. Deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman

sonuçları ise Şekil 4.46.'da verilmiştir. Maksimum yük artan yaşa göre %8'lik artış gösterirken maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerinde %40.94'lük bir artış gözlenmiştir. Artan yükleme yaşıyla birlikte başlangıç rijitliği %22.74 oranında azalmış, süneklik değeri de %11.73 oranında azalmıştır. Ek olarak artan yükleme yaşıyla birlikte enerji tüketim kapasitesi yaklaşık %50.66 oranında yüksek çıkmıştır.

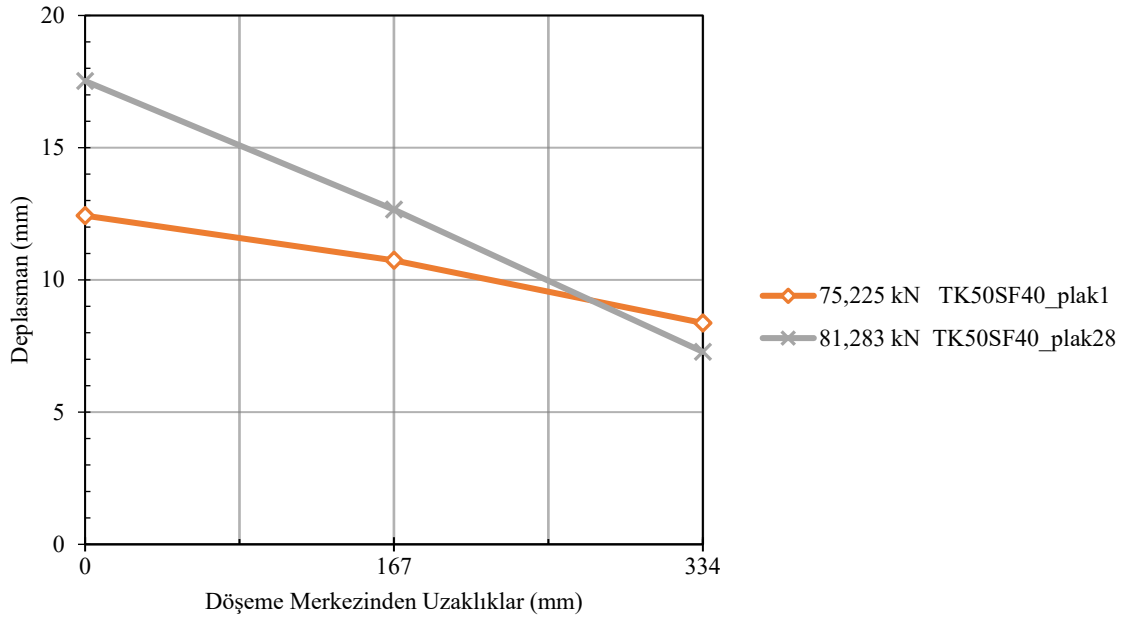


Şekil 4.45. 2. grup numunelerin zimbalama deney sonucu çatlak dağılımı (a-TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesi, b-TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ numunesi)

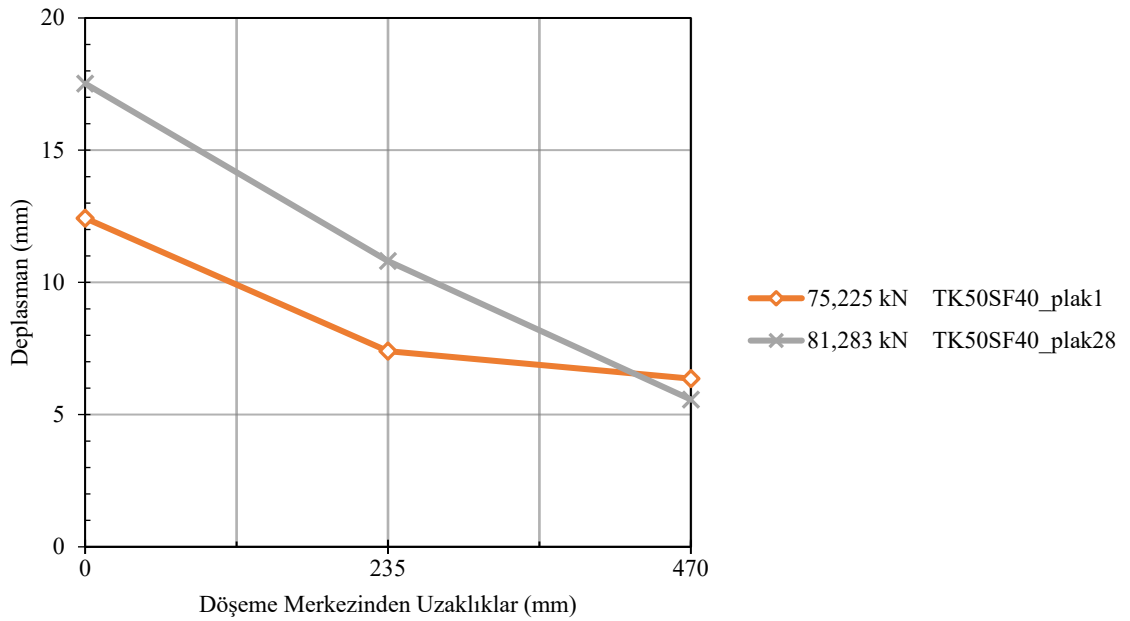


Şekil 4.46. Grup 2 yük-orta nokta deplasman eğrisi

Grup 2'ye göre hazırlanan numunelerin zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme ekseni yer değiştirmesi Şekil 4.47.'de ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirmesi ise Şekil 4.48.'de verilmiştir. Döşeme ekseni yer değiştirmesi ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirme grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre 28. gün numunesinin uzaklığa bağlı deplasmandaki azalma oranı 1. gün deney numunesinden yüksektir. Şekil 4.45.'deki çatlak dağılımından da görüleceği üzere 28. gün numunesinde zımbalama çevresinde oluşan teğet ve radyal çatlakların genişlikleri daha yüksektir.



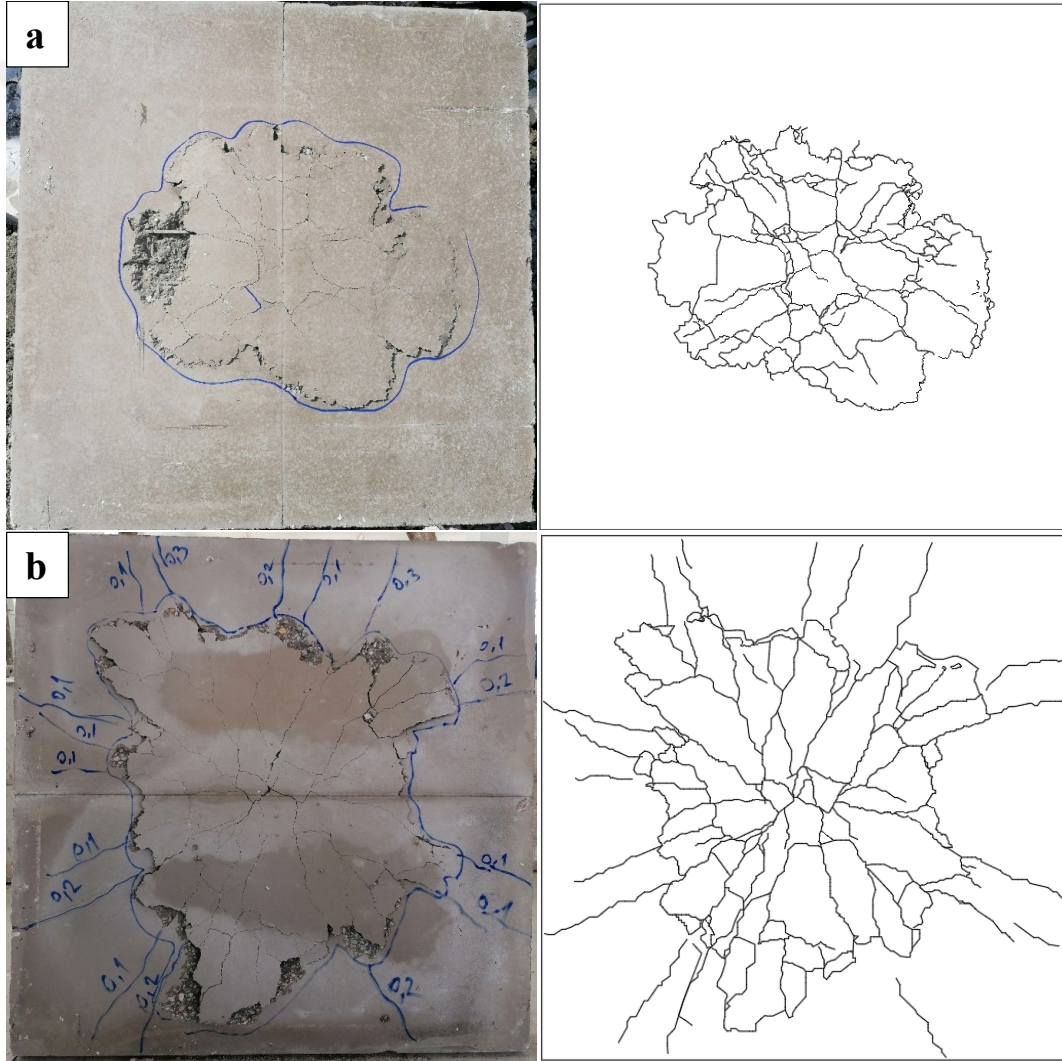
Şekil 4.47. Döşeme eksenî yer değiştirme grafiği



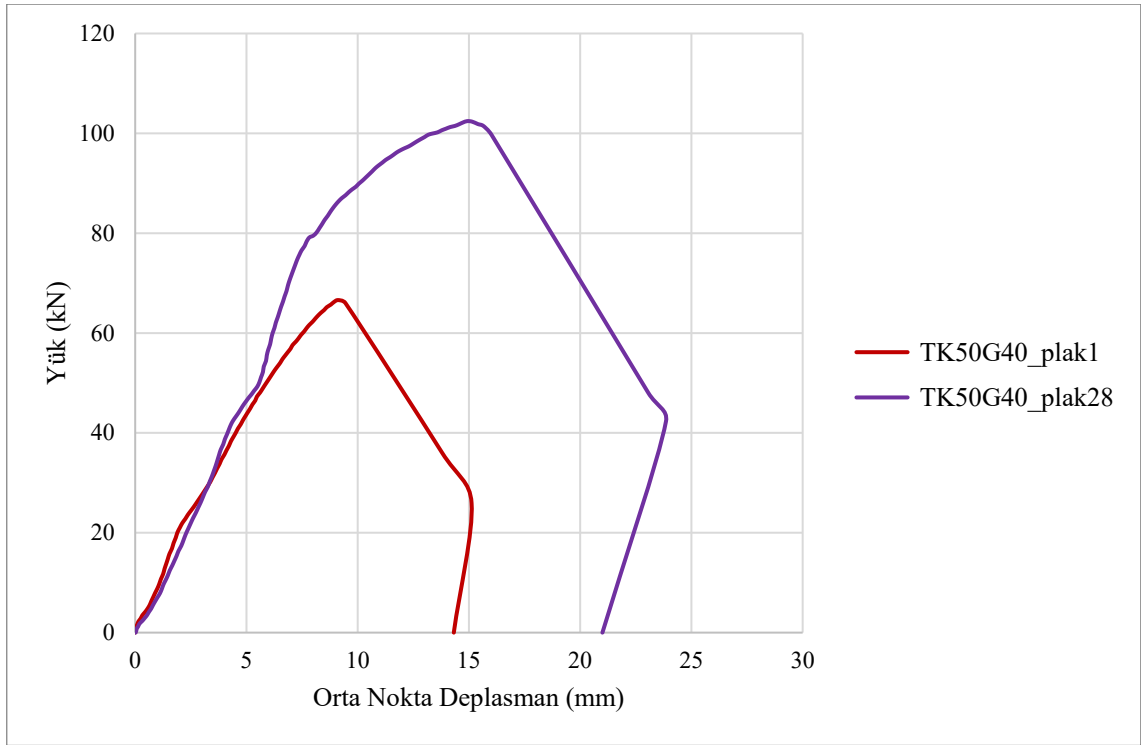
Şekil 4.48. Döşeme diyagonal eksenî yer değiştirme grafiği

Grup 3'e göre hazırlanan numunelerin zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı Şekil 4.49.'da verilmiştir. Yükleme yaşındaki artışla doğru orantılı olarak zımbalama çevresi içerisinde yer alan çatlakların sayısı ve genişlikleri artmıştır. 1. gün deney numunesinde zımbalama çevresi dışında, kolon kenarı ile plak kenarı arasında oluşan radyal çatlaklar görülmemiştir. Fakat yükleme yaşındaki artışa paralel olarak 28. gün

sonu deneye tabi tutulan numunede yük merkezinden numunenin kenarlarına doğru radyal çatlaklar olmuştur. Artan yaşla birlikte çatlaklar geniş alana yayılmışken erken yaştaki numunede çatlaklar zımbalama çevresindeki alanda olmuştur. Deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman sonuçları ise Şekil 4.50.'de verilmiştir. Maksimum yük artan yaşa göre %53.83 artış gösterirken maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerinde %63.59'luk bir artış gözlenmiştir. Artan yükleme yaşıyla birlikte başlangıç rijitliği %17.24 oranında azalmış, süneklik değeri ise %17.64 oranında artmıştır. Ek olarak artan yükleme yaşıyla birlikte enerji tüketim kapasitesi yaklaşık %150.30 oranında yüksek çıkmıştır.

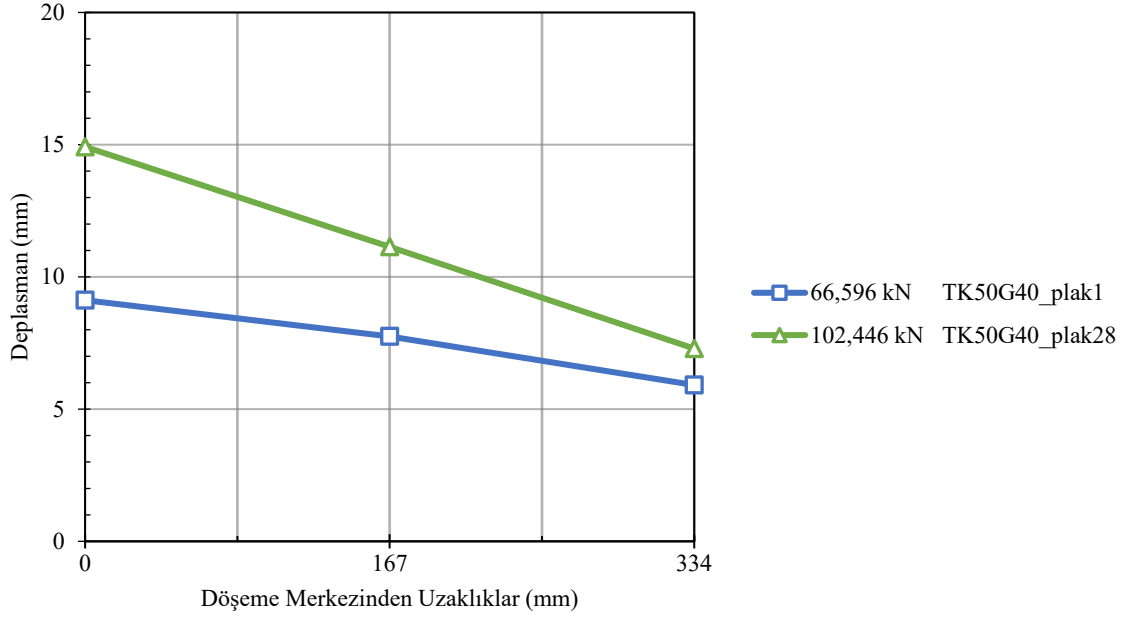


Şekil 4.49. 3. grup numunelerin zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı (a-TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesi, b-TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numunesi)

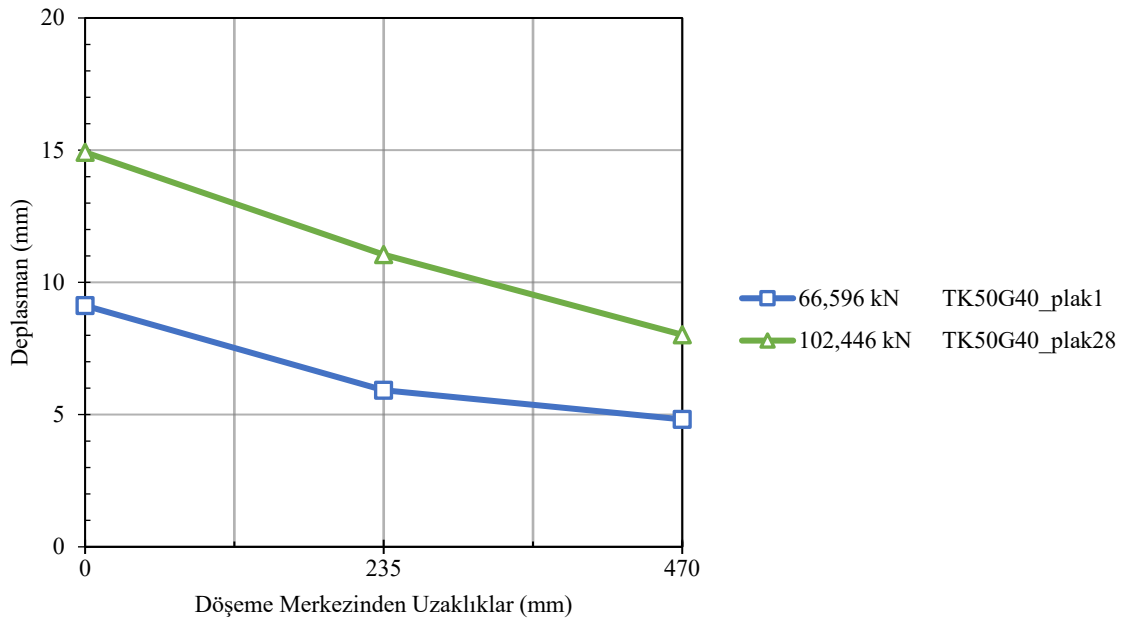


Şekil 4.50. Grup 3 yük-orta nokta deplasman eğrisi

Grup 3'e göre hazırlanan numunelerin zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme ekseni yer değiştirmesi Şekil 4.51.'de ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirmesi ise Şekil 4.52.'de verilmiştir. Döşeme ekseni yer değiştirmesi ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirme grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre 28. gün numunesinin uzaklığa bağlı deplasmandaki azalma oranı 1. gün deney numunesinden yüksektir.



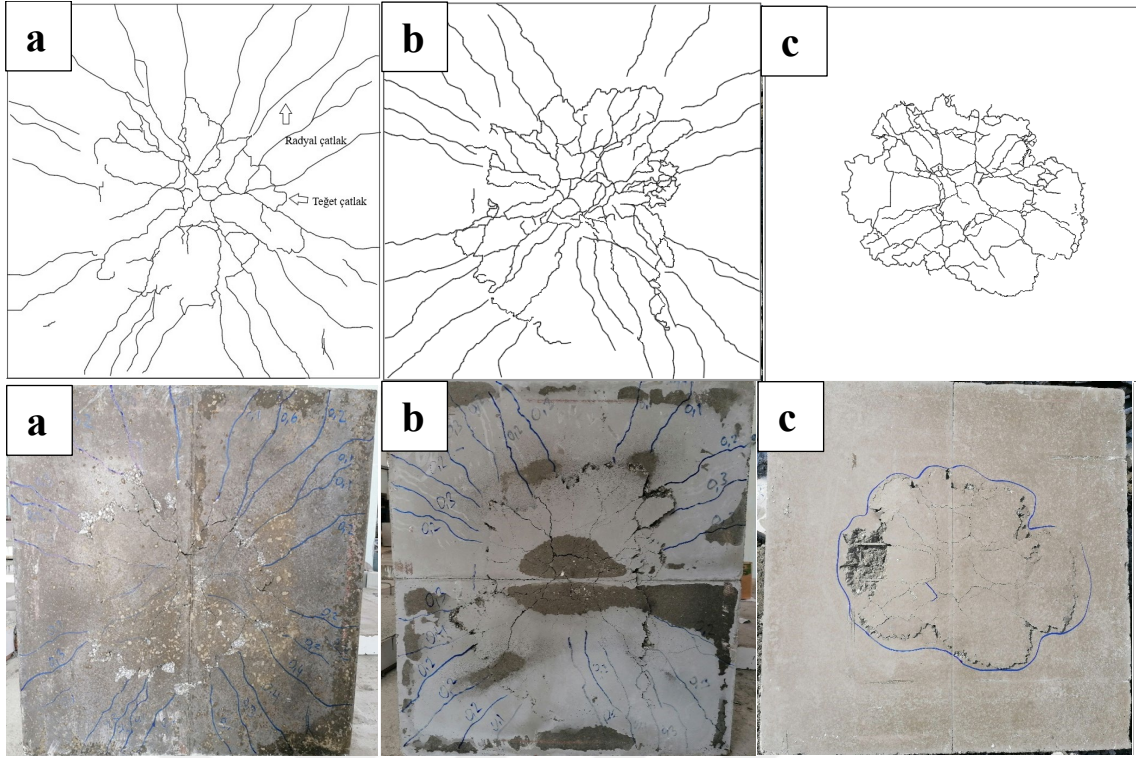
Şekil 4.51. Döşeme ekseni yer değiştirme grafiği



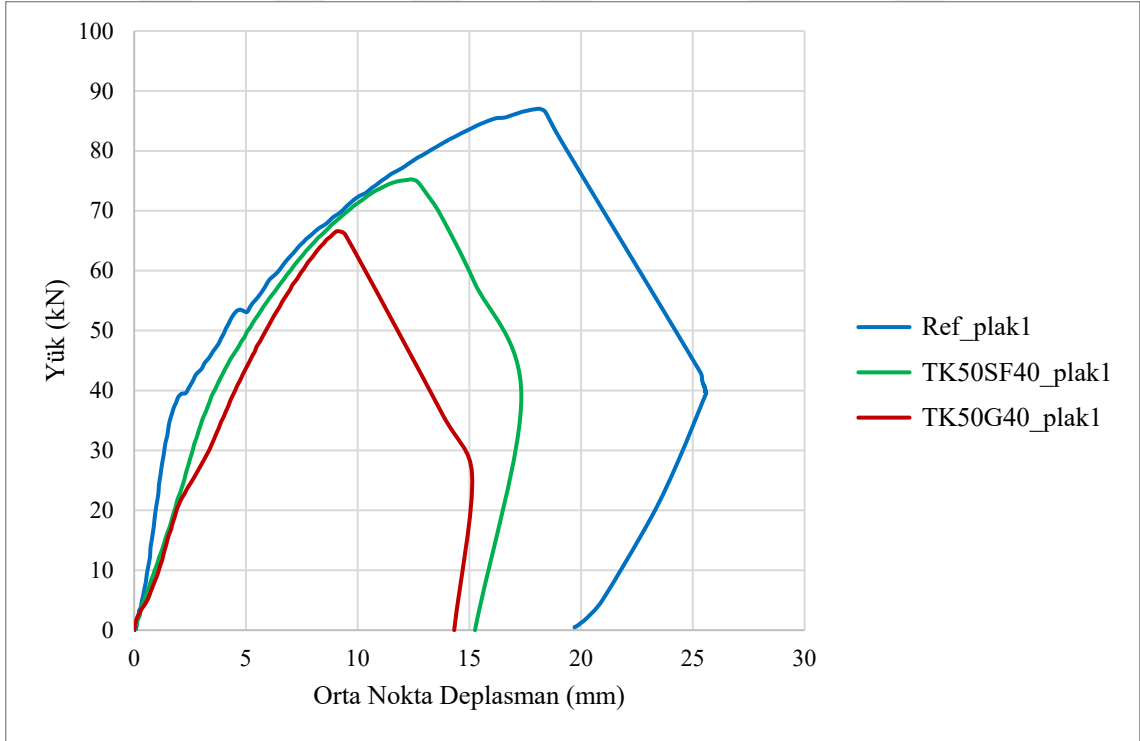
Şekil 4.52. Döşeme diyagonal ekseni yer değiştirme grafiği

4.2.1.7.2. Malzeme özelliklerine göre karşılaştırılması

Grup 4'e göre hazırlanan numunelerin 1. gün sonu zımbalama deneyinden elde edilen çatlak dağılımı Şekil 4.53.'de verilmiştir. Çatlak sayısı en fazla, %40 oranında SD minerali içeren TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesinde görülürken en az çatlak sayısı ve genişliği %40 oranında alçı içeren TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesinde görülmüştür. Zımbalama deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman eğrisi Şekil 4.54.'de verilmiştir. Maksimum yük en fazla referans numunesinde görülürken en azda %40 oranında mineral katkı alçı içeren TK₅₀G₄₀_plak₁ numunede görülmüştür. Referans numuneye göre TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesinin maksimum yük taşıma kapasitesi %13.53, TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesinin maksimum yük taşıma kapasitesi ise %23.45 daha düşüktür. Referans numuneye göre TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesinin maksimum yüke karşılık gelen deplasman değeri %31.5, TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesinin maksimum yüke karşılık gelen deplasman değeri ise %49.75 daha düşüktür. Başlangıç rijitliği açısından değerlendirildiğinde referans numuneye göre mineral katkılarla hazırlanan numunelerin başlangıç rijitliği düşük çıkmıştır. Mineral katkılı numunelerden TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesinin başlangıç rijitliği, TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesinden %17 daha fazladır. Referans numunenin süneklik değeri TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesinden %14.5, TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesinden ise %50.73 oranında daha yüksektir. Referans numunenin enerji tüketim kapasitesi TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesinden %76, TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesinden de %147.21 daha yüksektir.

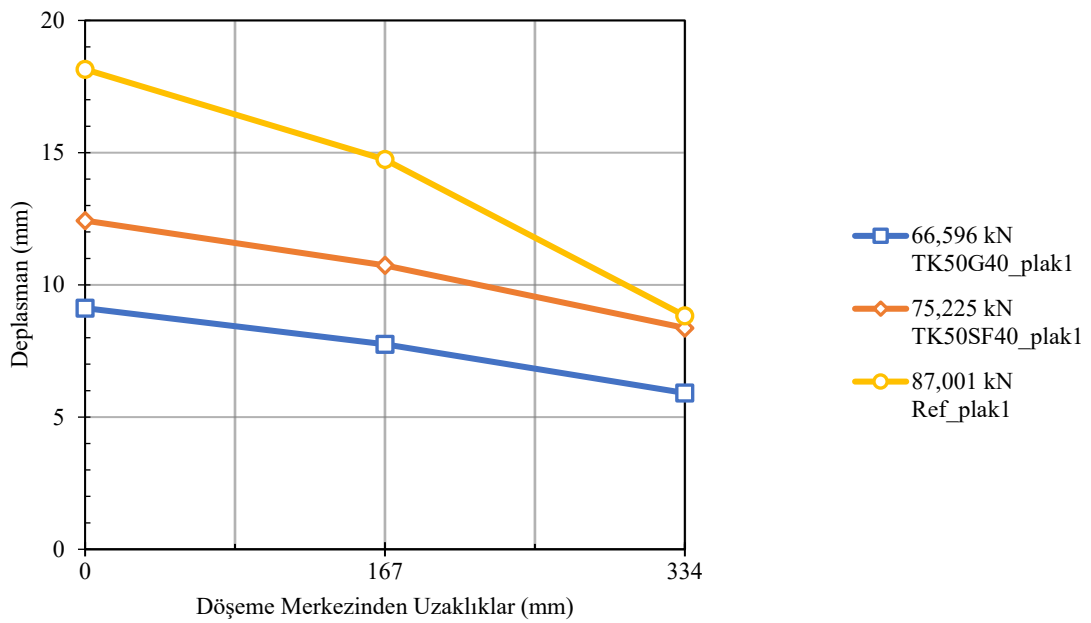


Şekil 4.53. 4. grup numunelerin zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı (a-Ref_plak₁ numunesi, b- TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesi, c-TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesi)

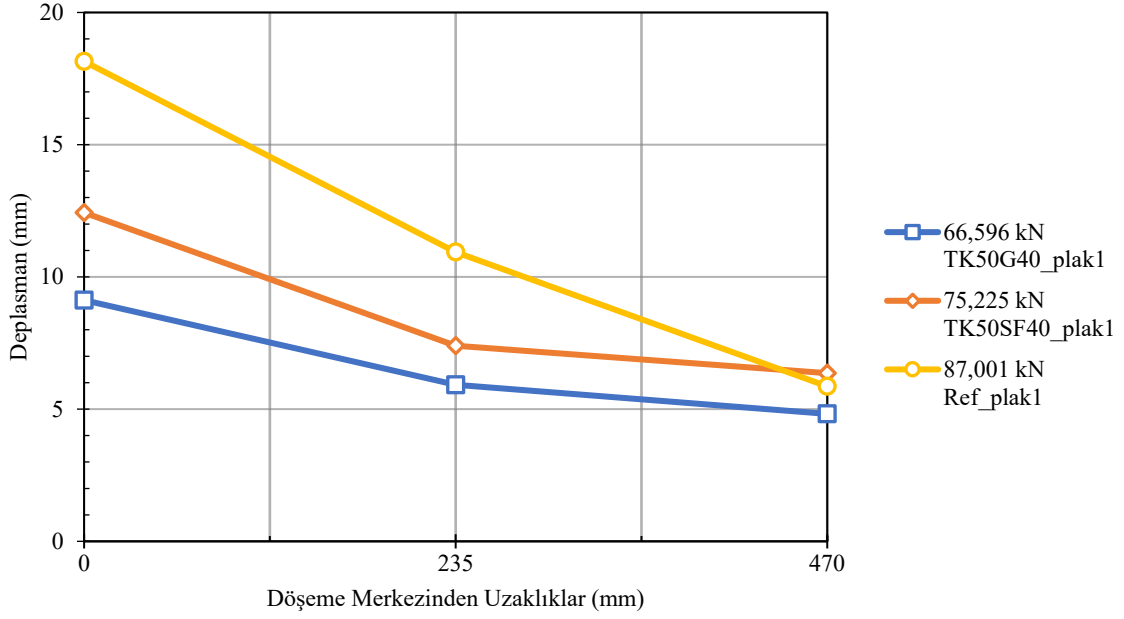


Şekil 4.54. Grup 4 yük-orta nokta deplasman eğrisi

Grup 4'e göre hazırlanan numunelerin zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme ekseni yer değiştirmesi Şekil 4.55.'de ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirmesi ise Şekil 4.56.'da verilmiştir. Döşeme ekseni yer değiştirmesi ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirme grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre referans Ref_plakı numunesinin uzaklığa bağlı deplasmandaki azalma oranı mineral katkılarla hazırlanan numunelere kıyasla bariz bir şekilde yüksek çıkmıştır. Alçı ve SD karışımı numunelerde döşeme merkezinden uzaklıktaki artışa bağlı olarak deplasman değerindeki azalma miktarları birbirine benzer şekilde gerçekleşmiştir.

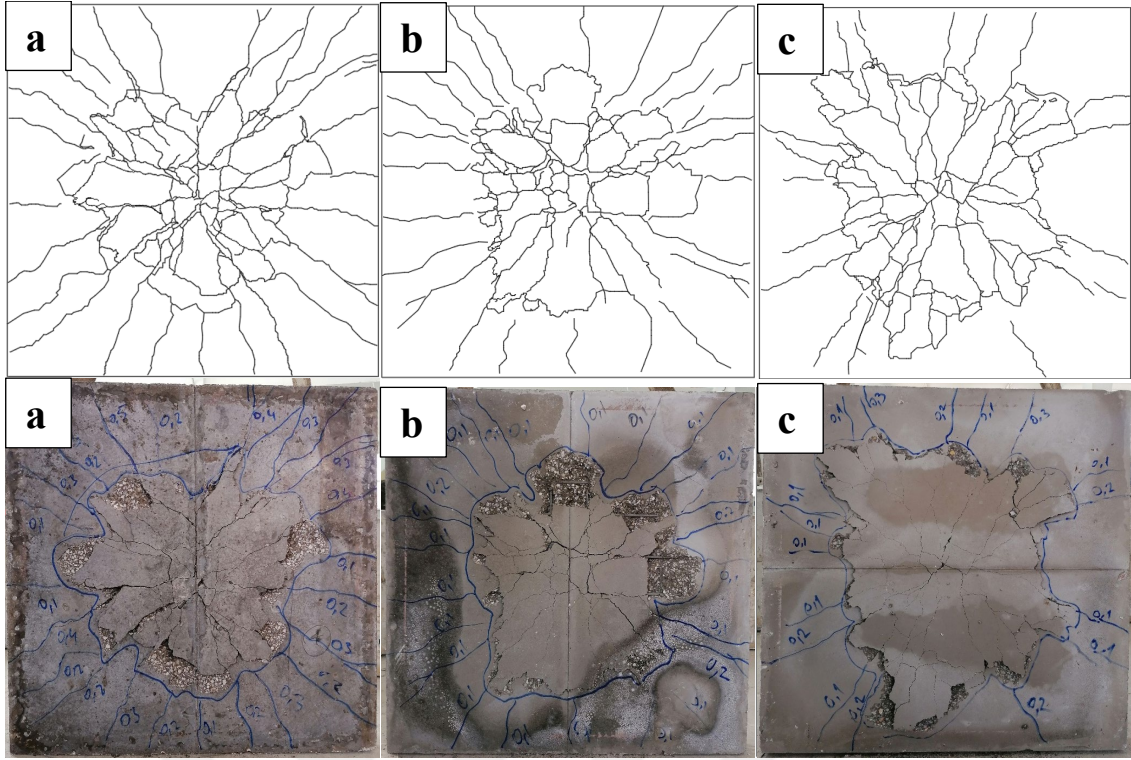


Şekil 4.55. Döşeme ekseni yer değiştirme grafiği

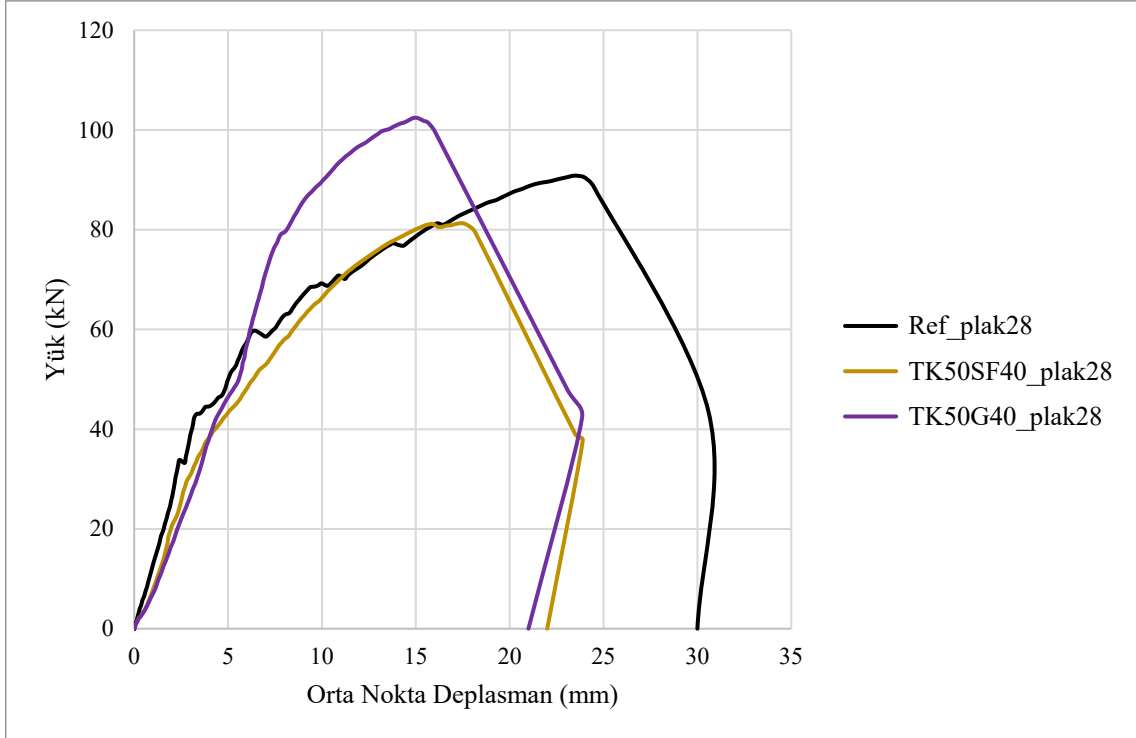


Şekil 4.56. Döşeme diyagonal eksenli yer değiştirme grafiği

Grup 5'e göre hazırlanan numunelerin 28. gün sonu zımbalama deneyinden elde edilen çatlak dağılımı Şekil 4.57.'de verilmiştir. Çatlak sayısı en az (kılcal çatlaklar hariç), %40 oranında alçı minerali içeren TK50G40_plak28 numunesinde görülürken en fazla çatlak sayısı referans numunesi Ref_plak28'de görülmüştür. Zımbalama deney sonucunda oluşan yük-orta nokta deplasman eğrisi Şekil 4.58.'de verilmiştir. Maksimum yük en fazla yüksek oranda alçı içeren TK50G40_plak28 numunesinde görülürken en az da yüksek oranda SD katkı içeren TK50SF40_plak28 numunesinde görülmüştür. Referans numuneye göre TK50SF40_plak28 numunesinin maksimum yük taşıma kapasitesi %10.52 düşük, TK50G40_plak28 numunesinin maksimum yük taşıma kapasitesi ise %12.77 daha yüksek çıkmıştır. Referans numuneye göre TK50SF40_plak28 numunesinin maksimum yüke karşılık gelen deplasman değeri %25.20, TK50G40_plak28 numunesinin maksimum yüke karşılık gelen deplasman değeri ise %36.30 daha düşüktür. Başlangıç rijitliği açısından değerlendirildiğinde referans numuneye göre mineral katkılarla hazırlanan numunelerin başlangıç rijitliği düşük çıkmıştır. Mineral katkılı numunelerden TK50SF40_plak28 numunesinin başlangıç rijitliği, TK50G40_plak28 numunesinden %9.24 daha fazladır. Referans numunenin süneklik değeri TK50SF40_plak28 numunesinden %25.94, TK50G40_plak28 numunesinden ise %24.37 oranında daha yüksektir. Referans numunenin enerji tüketim kapasitesi TK50SF40_plak28 numunesinden %54.10, TK50G40_plak28 numunesinden de %30.22 daha yüksektir.

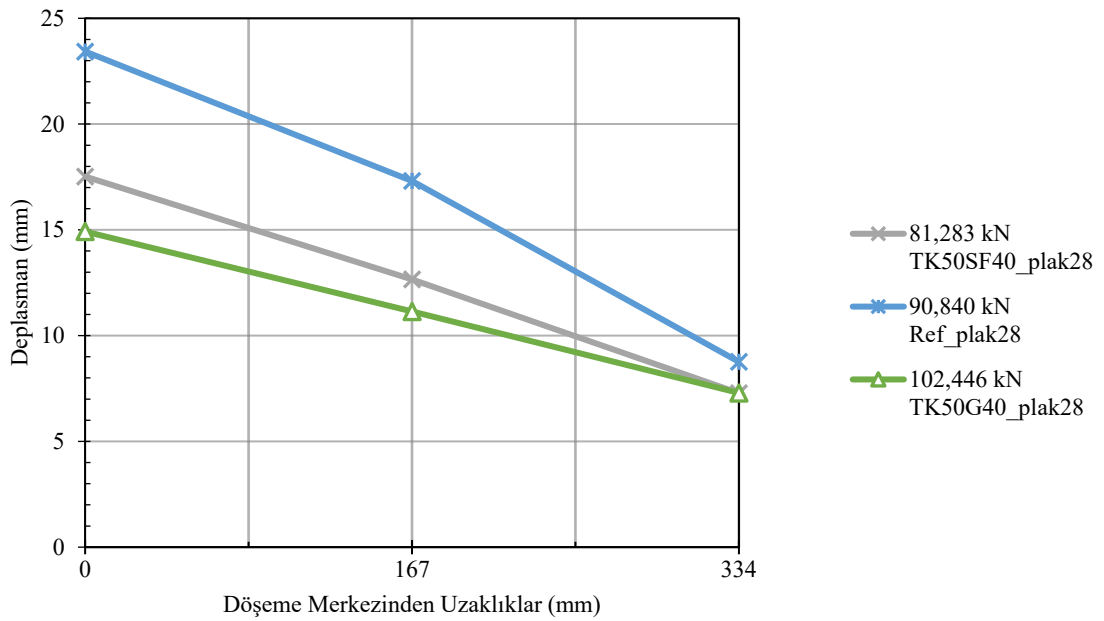


Şekil 4.57. 5. grup numunelerin zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı (a-Ref_plak28 numunesi, b- TK₅₀SF₄₀_plak28 numunesi, c- TK₅₀G₄₀_plak28 numunesi)

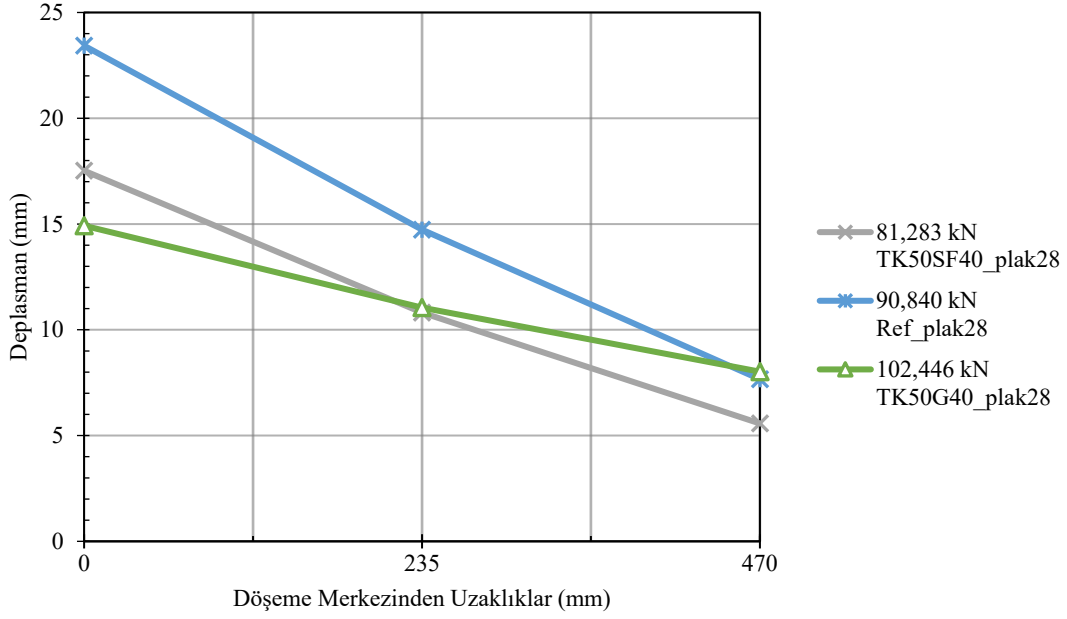


Şekil 4.58. Grup 5 yük-orta nokta deplasman eğrisi

Grup 5'e göre hazırlanan numunelerin zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme eksenini yer değiştirmesi Şekil 4.59.'da ve döşeme diyagonal eksenini yer değiştirmesi ise Şekil 4.60.'da verilmiştir. Döşeme eksenini yer değiştirmesi ve döşeme diyagonal eksenini yer değiştirme grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre referans Ref_plak28 numunesinin uzaklığa bağlı deplasmandaki azalma oranı mineral katkıyla hazırlanan numunelere kıyasla bariz bir şekilde yüksek çıkmıştır. Mineral katkılı numunelerden yüksek oranda SD içeren TK₅₀SF₄₀_plak28 numunesi, yüksek oranda alçı içeren TK₅₀G₄₀_plak28 numunesinden döşeme merkezinden uzaklıktaki artışa bağlı deplasman değerindeki azalma miktarları yüksek çıkmıştır. TK₅₀SF₄₀_plak28 numunesinin, TK₅₀G₄₀_plak28 numunesine göre döşeme merkezinden uzaklıktaki artışa bağlı deplasman değerindeki azalma miktarlarının yüksek olması TK₅₀SF₄₀_plak28 numunesinde görülen çatlak sayısı ve genişliğinin fazlalığındandır.



Şekil 4.59. Döşeme eksenini yer değiştirme grafiği



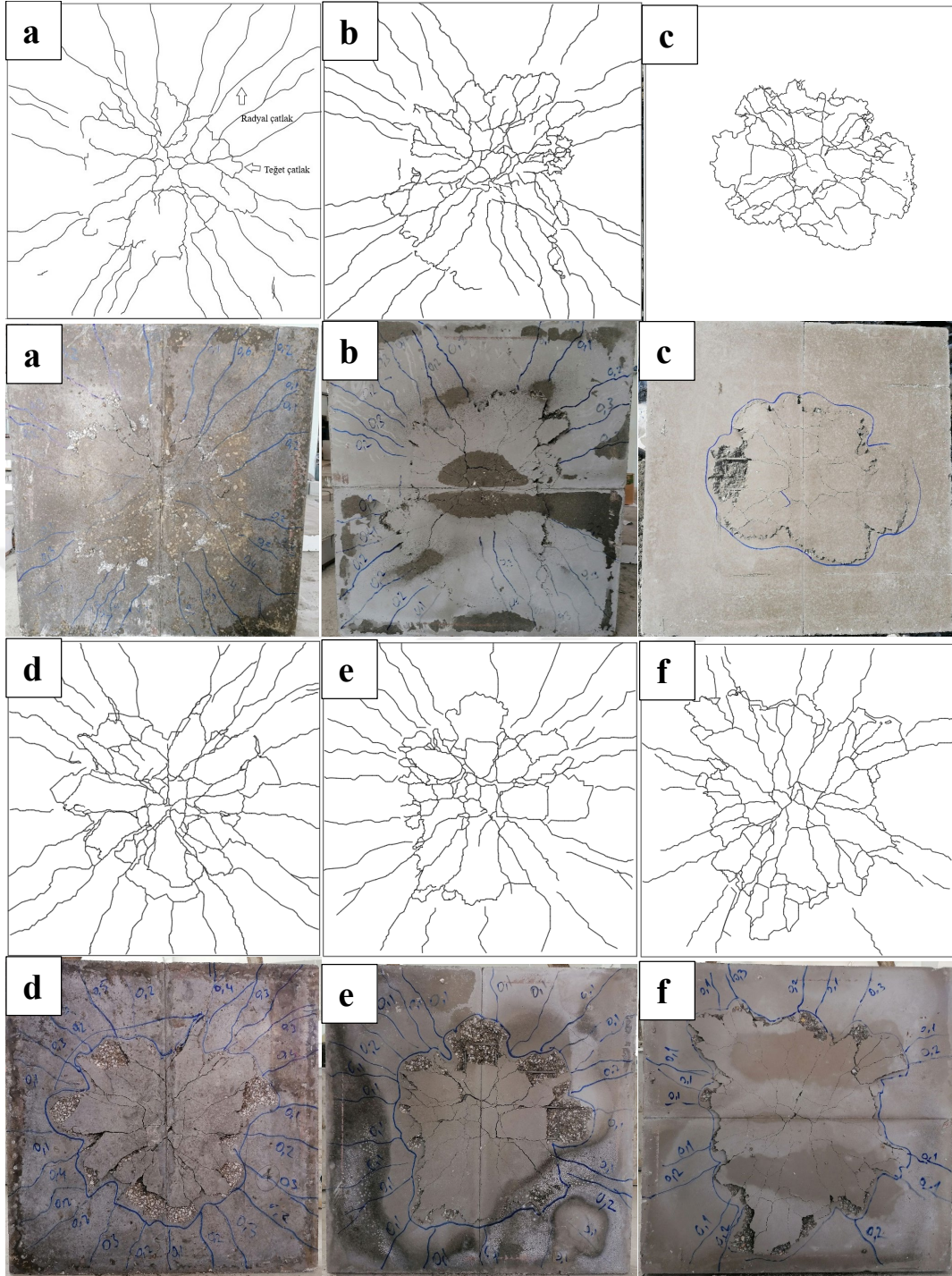
Şekil 4.60. Döşeme diyagonal eksenli yer değiştirme grafiği

4.2.1.7.3. Yükleme yaşı ve malzeme özelliklerine göre karşılaştırılması

Grup 6'ya göre hazırlanan numunelerin zımbalama deney sonucunda elde edilen çatlak dağılımları Şekil 4.61.'de verilmiştir. Çatlak sayısı en fazla Ref_plak28 numunesinde oluşurken en az çatlak sayısı %40 oranında alçı minerali içeren TK50G40_plak1 numunesinde görülmüştür. Ayrıca en büyük zımbalama çevresi ise TK50G40_plak28 numunesinde oluşmuştur. Ref_plak28 numunesindeki çatlak sayısındaki artışın çekme kuvvetlerinin daha iyi yayılması sonucu olduğu düşünülmektedir. Celep (2015), zımbalamada eğik çekme gerilmelerinin etkili olduğu fikrini öne sürmüştür. En derin teğet çatlaklar ise TK50SF40_plak28 numunesinde oluşmuş ve zımbalama çevresi içindeki çatlak çekme donatısına doğru ilerledikten sonra çekme donatısı boyunca yatay yönde büyüyerek betonarme elemandaki paspayının ayrılmasına sebep olmuştur. Bütün numunelerde artan yükleme yaşıyla orantılı olarak çatlak sayısı artmıştır. Maksimum yük, en yüksek TK50G40_plak28 numunesinde görülürken en az da TK50G40_plak1 numunesinde görülmüştür. Bu sonuç ışığında yüksek oranda kullanılan alçı erken yaşlarda maksimum yükü olumsuz etkilerken ileri yaşta olumlu etkileyerek en yüksek maksimum yük değerine ulaştırmıştır. Yüksek oranda SD kullanılarak hazırlanan TK50SF40_plak1 ve TK50SF40_plak28 numunelerinin maksimum yük değerleri aynı yaşlardaki referans numunelerinden sırasıyla %13.5 ve %10.52 oranında düşük çıkmıştır.

Maksimum yüke karşılık gelen en yüksek deplasman değerine Ref_plak₂₈ numunesi ulaşırken en az deplasman değerine TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesi ulaşmıştır. Artan yaşla birlikte deplasman değerleri de artmıştır. 10 kN yük değerindeki başlangıç rijitlikleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. En büyük başlangıç rijitliğine referans numuneleri ulaşmıştır. Başlangıç rijitliği artan yaşla birlikte azalmıştır. Betonarme plakların süneklik değerleri yük orta nokta deplasman eğrilerinden hesaplanarak Çizelge 4.3.'de verilmiştir. Enerji tüketim kapasiteleri Çizelge 4.4.'de verilmiştir. En yüksek enerji tüketim kapasitesi referans numune olan Ref_plak₂₈'de görülürken, en azda TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesinde görülmüştür. Genel olarak mineral katkı kullanımı ile enerji tüketim kapasiteleri azalırken, artan yaşla birlikte enerji tüketim kapasiteleri artmıştır.





Şekil 4.61. 6. grup numunelerin zımbalama deney sonucu çatlak dağılımı (a-Ref_plak₁ numunesi, b-TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesi, c-TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesi, d-Ref_plak₂₈ numunesi, e-TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ numunesi, f-TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numunesi)

Çizelge 4.2. 10 kN yük değerindeki başlangıç rijitlikleri

Numune	Zaman	Rijitlik (kN/mm)
Ref_plak ₁	1.gün	16.84
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁	1.gün	10.86
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁	1.gün	9.28
Ref_plak ₂₈	28.gün	12.62
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈	28.gün	8.39
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈	28.gün	7.68

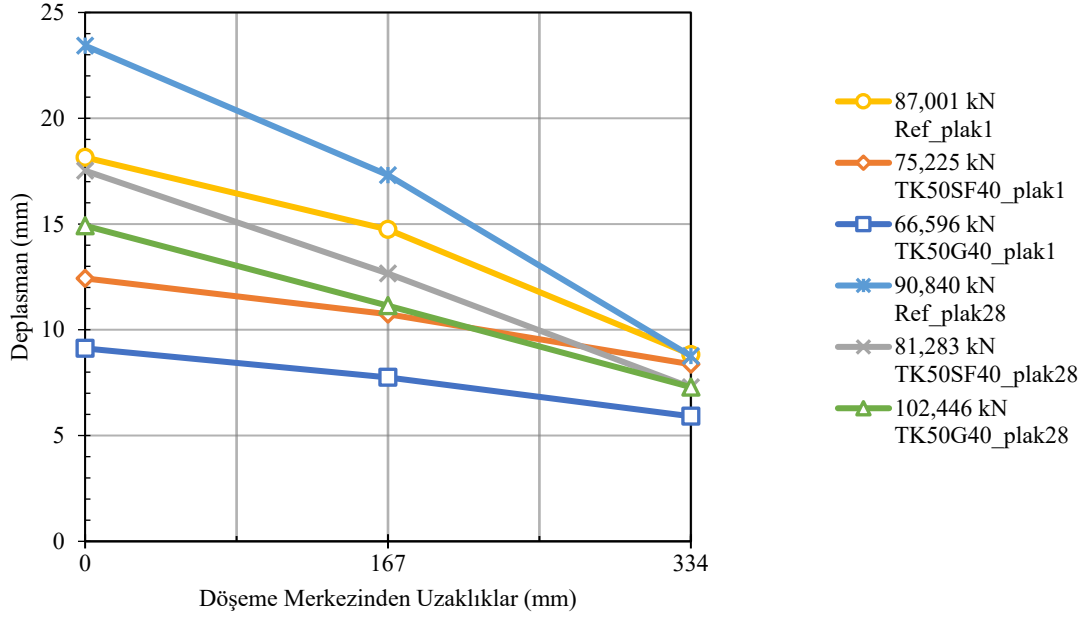
Çizelge 4.3. Deney elemanlarının süneklik oranları

Zaman	Numune	MAKS.		75%		80%		SÜNEKLİK ($\Delta u/\Delta y$)
		Yük kN	Depl. (mm)	Yük kN	Depl. (mm)	Yük kN	Depl. (mm)	
1. gün	Ref plak ₁	87.00	18.15	65.25	10.25	69.60	21.01	2.05
1. gün	TK ₅₀ SF ₄₀ plak ₁	75.22	12.43	56.42	8.36	60.18	14.94	1.79
1. gün	TK ₅₀ G ₄₀ plak ₁	66.59	9.12	49.95	8.32	53.28	11.29	1.36
28.gün	Ref plak ₂₈	90.84	23.42	68.13	13.39	72.67	26.64	1.99
28.gün	TK ₅₀ SF ₄₀ plak ₂₈	81.28	17.52	60.96	12.72	65.03	20.07	1.58
28.gün	TK ₅₀ G ₄₀ plak ₂₈	102.44	14.92	76.83	11.55	81.96	18.43	1.60

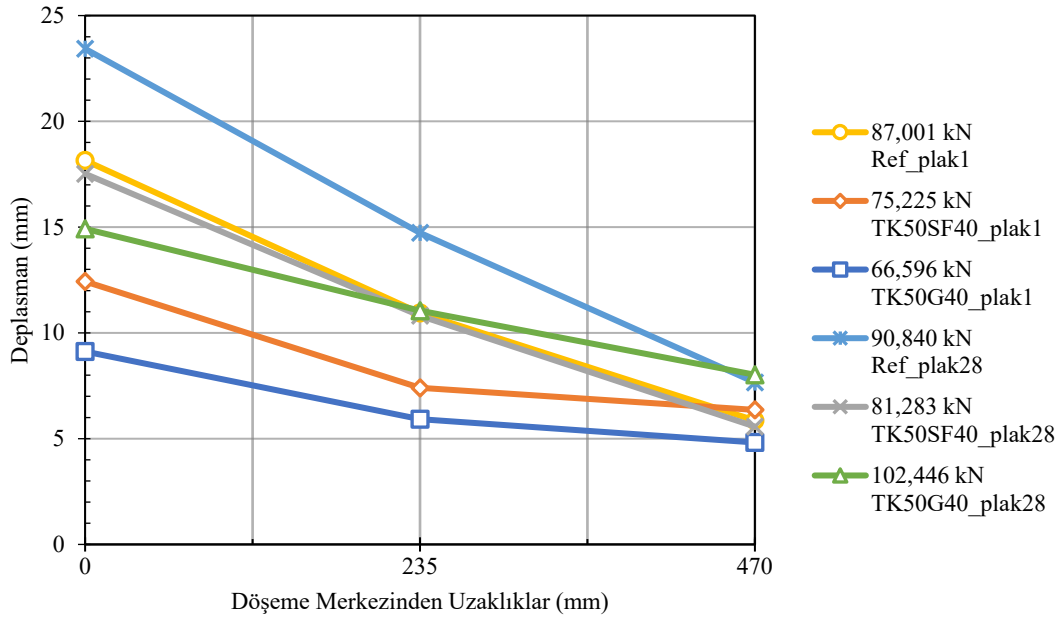
Çizelge 4.4. Deney elemanlarının enerji tüketim kapasiteleri

Numune	Zaman	Enerji (kN.mm)
Ref_plak ₁	1.gün	1540.28
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₁	1.gün	874.68
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₁	1.gün	623.06
Ref_plak ₂₈	28.gün	2030.81
TK ₅₀ SF ₄₀ _plak ₂₈	28.gün	1317.87
TK ₅₀ G ₄₀ _plak ₂₈	28.gün	1559.55

Zımbalama deney sonucunda maksimum yüke karşılık gelen döşeme ekseni yer değiştirmesi Şekil 4.62.'de ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirmesi ise Şekil 4.63.'de verilmiştir. Eksenel yüklemeye tabi tutulan betonarme plak numunelerin hepsinde eksenel yükün uygulandığı merkezden uzaklaştıkça oluşan deplasman değerleri azalmıştır. Elemanlarda oluşan çatlak hasarları yük merkezinden başlayarak plak numuneleri köşelerine doğru ilerlemiştir. Döşeme ekseni yer değiştirmesi ve döşeme diyagonal ekseni yer değiştirme grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre referans Ref_plak₂₈ numunesinin uzaklığa bağlı deplasmandaki azalma oranı en yüksek çıkmıştır. Ref_plak₂₈ numunesinde diğer numunelere oranla daha fazla çatlak oluşmuştur.



Şekil 4.62. Döşeme eksenli yer değiştirme grafiği



Şekil 4.63. Döşeme diyagonal eksenli yer değiştirme grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında özellikle yüksek erken yaş dayanımına, yüksek dayanıklılığa sahip, çevreci ve işlevsel beton karışımlar hazırlayabilmek adına KAÇ tabanlı üçlü sistemlerle 10 farklı karışım oluşturulmuştur. Oluşturulan bu 10 farklı karışım üzerinde eğilme ve basınç dayanım testleri yapılarak istenilen performansa sahip 4 karışım seçilmiştir. Seçilen 4 karışım üzerinde basınç altında su işleme derinliği tayini yapılarak düşük geçirgenliğe sahip TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ karışımları nihai karışım olarak seçilmiştir. Bu karışımlara referans olması adına Ref karışımı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu karışımların istenen özellikleri sağlayabilmesi ve taşıyıcı betonarme elemanlarda kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla bir dizi deneyler yapılmıştır. İlk olarak üçlü sistemlerde kullanılan bağlayıcı malzemeler üzerinde faz belirlenme, kimyasal kompozisyonu ve kristal yapı tespiti için XRD analizi yapılmıştır. XRD deneyinden sonra, Ref, TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ karışımları üzerinde 1. ve 28. gün sonunda mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Ref, TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ karışımlarına ek olarak klasik yöntemlerle NPÇ karışımı elde edilerek mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Hazırlanan 4 farklı karışım kullanılarak 6 saatlik, 1 günlük, 3 günlük, 7 günlük, 14 günlük ve 28 günlük olmak üzere 1'er adet 40x40x160 mm prizma takımı hazırlanmıştır. Hazırlanan prizma takımları üzerinde eğilme ve basınç dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üçlü sistemlerle hazırlanan üç farklı karışım kullanılarak 3 adet 1. gün deneyi ve 3 adet de 28. gün zımbalama deneyi için betonarme plak numuneler oluşturularak zımbalama dayanıma tabi tutulmuştur. Bu deney sayesinde üçlü sistemlerle hazırlanan plakların gevrek güç tükenmesi hasar türü olan zımbalama göçmesine karşı davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar sayesinde KAÇ tabanlı betonların betonarme taşıyıcı elemanlarda kullanılabilirliği hakkında fikir elde edilmeye çalışılmıştır. Hazırlanan betonarme plakların her bir karışımından 1. ve 28. günlerinden 4'er adet toplamda 24 adet 15x15x15 cm küp numune alınmıştır. Alınan küp numunelerin 3'er tanesi 1. gün sonunda diğer 3'er tanesi de 28. gün sonunda küp basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Ek olarak özellikle yeraltı yapılarındaki plak elemanlarda durabiliteyi belirleyen en önemli faktörlerden birisi olan betonun su geçirimsizliğini belirleyebilmek için küp numuneler üzerinde 1. ve 28. gün sonunda basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi gerçekleştirilmiştir. Su işleme derinliği tayini deneyinde KAÇ tabanlı üçlü

sistemlerle hazırlanan numunelerle kıyaslayabilmek için klasik yöntemlerle hazırlanmış NpÇ karışımından da 2 adet küp numune hazırlanarak 1. ve 28. günlerde deneye tabi tutulmuş ve su geçirgenlik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Çalışmada uygulanan deneyler sonucu elde edilen araştırma bulguları sayesinde çalışma hakkında aşağıdaki değerlendirmelere ulaşılmıştır:

Deney sonuçları ışığında 6 saatlik eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ karışımları, Ref ve NpÇ karışımlarına göre yüksek dayanım değerlerine ulaşmıştır. Erken dayanım açısından TK₅₀SF₄₀ ve TK₅₀G₄₀ karışımları daha üstün performans sergilemiştir. Bu erken yüksek dayanımın en önemli nedeninin XRD ve FE-SEM analizlerinden de görüldüğü üzere etrenjit miktarındaki artıştan kaynaklandığı görülmektedir. Ayrıca yüksek oranda SD kullanımının dolgu etkisi sebebiyle, özellikle erken yaşlardaki dayanımı yükselttiği de bilinmektedir.

Genel olarak eğilme ve basınç dayanım deneyinde 6 saatlikten 28 güne kadar olan deney sonuçlarına bakıldığında Ref numunesinin eğilme dayanımı sürekli artış eğilimindedir. Basınç dayanımı ise 7 günden sonra azalmaya başlamıştır. Basınç dayanımındaki bu azalma 14 güne kadar devam etmiş 14 günden sonra azalma yerini artışa bırakarak 28 güne kadar oluşan azalma telafi edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en büyük basınç dayanımına KAÇ tabanlı üçlü sistemlerle hazırlanan karışımlar içerisinde 78.06 MPa ile Ref numunesi ulaşmıştır. Ayrıca Ref numunesi 28. gün sonunda en büyük eğilme ve basınç dayanıma ulaşan NpÇ ile yakın dayanım değerlerine ulaşmıştır.

Elde edilen eğilme ve basınç deneylerine göre TK₅₀G₄₀ numunesinde de Ref numunesinde görülen dayanımdaki artış ve azalışın benzeri görülmüştür. 7 ile 14 gün arasında hem eğilme dayanımında hem de basınç dayanımında büyük düşüşler görülmüştür. Dayanımdaki artış ve azalışın nedeni olarak FE-SEM görüntülerinde ağsı etrenjit yapı liflerinin incilmesi ve uzaması sonucu numunelerin ileri yaşlarında mikroyapısında daha fazla sayıda ve daha büyük boyutlu boşluklara sahip hale gelerek dayanımda düşüşe neden olduğudur. TK₅₀G₄₀ numunelerinde görülen dayanımdaki düşüşler 14 günden sonra yerini artışa bırakarak 28 güne kadar oluşan dayanımdaki azalma referans numunelere benzer şekilde telafi edilmiştir. KAÇ ile hazırlanan karışımlardaki boşluk sayısındaki artışın nedeni olarak literatürde kalsiyum sülfatın tamamen bitmesi sonucu aluminat fazının etrenjit ile reaksiyona girmesidir. Aluminat fazının etrenjit ile reaksiyonu sonucu monosulfoaluminat fazının oluşumundan kaynaklı porozitedeki artışa bağlı dayanım düşüşlerine neden olmaktadır. Bu durumda ortama eklenen kalsiyum sülfat sayesinde monosulfoaluminat dönüşümü azalmaktadır. Bu

çalışma özelinde bu sorunun çözümü için kullanılan alçı sayesinde, benzer bir davranış sergilenerek boşluk artışı minimuma indirilmiştir. TK₅₀G₄₀ numunesinde kullanılan yüksek miktarda alçı KAÇ'daki C-A-H hidratlarını etrenjit yapısına dönüştürmüştür. Bu dönüşüm sonucu elde edilen etrenjit boşlukların arasında yoğunlaşarak numune içindeki boşlukları kapatması ve tanecikleri birbirine bağlamasından kaynaklı su geçirgenliği düşürmüştür. 1. ve 28. gün sonunda yapılan basınç altında su işleme derinliği tayini deney sonuçlarında en düşük su işleme derinliğine sırasıyla TK₅₀G₄₀_plak₁ ve TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numuneleri ulaşmıştır.

TK₅₀SF₄₀ ve NpÇ numunelerinde Ref ve TK₅₀G₄₀ numunelerinde görülen basınç ve eğilme dayanım azalmaları görülmemiştir. TK₅₀SF₄₀ ve NpÇ dayanımları 6 saatten 28. güne kadar sürekli artış eğilimindedir. TK₅₀SF₄₀ numunesinde kullanılan yüksek SD ve alçı sayesinde literatürde yer alan KAÇ'ın dezavantajı olan yarı kararlı fazlar yerine, ana hidratasyon ürünü olarak etrenjitin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca karışımda kullanılan yüksek orandaki SD sayesinde dolgu etkisi ve straetlingite oluşumu gerçekleşmiş böylece daha stabil bir mikroyapı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan çimento yerine ikame edilerek kullanılan yüksek orandaki SD sebebiyle, hidratasyon hızı ve reakte olabilecek oksitlerin miktarı azaldığı için numunelerin dayanımı referans numunelere kıyasla düşük çıkmıştır.

Basınç altında su işleme derinliği tayini deney sonuçlarına göre 28. gün referans Ref_plak₂₈ numunesi geçirimsiz beton sınıfı olarak değerlendirilirken diğer numuneler zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton sınıfın da değerlendirilmektedir. Referans numunelerin mineral katkılı numunelere kıyasla su işleme derinliği yüksek çıkmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek oranda alçı içeren TK₅₀G₄₀_plak₁ numunesinin su işleme derinliği 1 günlük deney sonucuna göre Ref_plak₁ numunesinden %63.63, TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesinden %60 ve NpÇ-1 numunesinden %68.42 daha düşüktür. TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numunesinin su işleme derinliği 28 günlük deney sonuçlarına göre ise Ref_plak₂₈ numunesinden %63.63, TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ numunesinden %48.93 ve NpÇ-28 numunesinden %17.24 daha düşüktür. Bütün sonuçlarda yüksek oranda alçı katkısı içeren TK₅₀G₄₀_plak₁ ve TK₅₀G₄₀_plak₂₈ numuneleri geçirimsizlik yönünden üstün performans sergilemiştir.

Çalışma kapsamında KAÇ tabanlı üçlü sistemlerde kullanılan mineral katkıları su geçirimsizliğini azaltmıştır. XRD ve FE-SEM analiz sonuçlarına göre kullanılan alçı sayesinde etrenjit yoğunluğunu arttırmıştır. Diğer bir mineral katkı olan SD sayesinde iri gözeneklerin azalması çok sayıda küçük gözenek oluşturmuş ve suyun boşluklardaki irtibatını azaltarak su geçişini yavaşlatmıştır.

Literatürdeki çalışmalarda klasik yöntemlerle üretilen karışımlarda genellikle beton mukavemet kazandıkça su geçirgenliklerinin düştüğü gözlenmektedir. Bu çalışmada Npç karışımı buna örnek gösterilebilir. Fakat üçlü sistemlerle üretilen numunelerde ileri yaşlardaki beton geçirgenliği ilk günlere göre yüksek çıkmaktadır. Ref karışımı ile hazırlanan referans numunelerde artan yaşla birlikte su geçirgenliğinde artış görülmüştür. FE-SEM analiz sonuçlarına göre bu artışın nedeni erken yaşta görülen düşük yoğunluklu yarı kararlı hidrat CAH_{10} , ilerleyen yaşla birlikte yüksek yoğunluğa sahip kararlı hidrat C_3AH_6 dönüşmesinden kaynaklı meydana gelen porozitedeki artıştır. Yüksek oranda SD kullanılan $TK_{50}SF_{40}$ karışımı ile hazırlanan numunelerde de artan yaşla su geçirgenliği artmıştır. $TK_{50}SF_{40_plak28}$ numunesinin su geçirgenliği, $TK_{50}SF_{40_plak1}$ numunesinin su geçirgenliğinden yüksektir. Artan yaşa bağlı meydana gelen su geçirgenliğinin artış nedeni olarak FE-SEM analiz sonuçlarında erken yaşta yoğun olarak görülen tomasittir. Tomasit artan yaşla birlikte boşlukların sayısında çok fazla etki etmemesine rağmen boşlukların birbiriyle irtibatlı olmasını sağlayarak geçirgenliği yükseltmiştir. $TK_{50}G_{40}$ karışımı ile hazırlanan numunelerde de artan yaşla birlikte su geçirgenliği artmıştır. $TK_{50}G_{40_plak28}$ numunesinin su geçirgenliği, $TK_{50}G_{40_plak1}$ numunesinin su geçirgenliğinden yüksektir. Su geçirgenliğindeki artışın nedeni olarak FE-SEM analizinden elde edilen görüntülerde artan yaşla birlikte aşırı etrenjit yapı liflerinin incelenmesi ve uzamasının neden olduğu görülmüştür. $TK_{50}G_{40}$ karışımı ile hazırlanan numunelerde artan yaşla görülen etrenjit lif yapısındaki değişiklik su geçirgenliğini arttırmıştır. Ayrıca özellikle yüksek oranda alçı içeren ve böylece yüksek oranda etrenjit oluşumu görülen ve suda kürlen numunelerde, etrenjitin bünyesine yüksek oranda su bağlama kapasitesine sahip olmasından dolayı aşırı genleşmeler ve buna bağlı mikro çatlaklar oluştuğundan, aşırı etrenjit oluşumunun basınç dayanımı gibi su geçirgenliğini de olumsuz etkileyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Diğer karışımlarla hazırlanan numunelere kıyasla $TK_{50}G_{40}$ numunelerin boşluklarında görülen yoğun etrenjit su geçirimsizlik yönünden $TK_{50}G_{40_plak1}$ ve $TK_{50}G_{40_plak28}$ numunelerin daha geçirimsiz olmasını sağlamıştır. $TK_{50}G_{40}$ karışımı ile hazırlanan numunelerin geçirimsizliğine etrenjitin yanında kullanılan SD katkısı da destek olmuştur.

Zımbalama deneyi sonuçlarına göre zımbalama göçmesine karşı en iyi performansı (yük taşıma kapasitesi, süneklik, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi gibi parametreler dikkate alındığında) referans Ref_plak1 ve Ref_plak28 numuneleri sergilemiştir.

TK₅₀SF₄₀ karışımları üzerinde yapılan XRD ve FE-SEM analizlerinde ana hidratasyon faz alçıdan kaynaklı etrenjit olduğu görülmüştür. Etrenjit yoğunluğunun fazla olması ve SD'nin dolgu etkisi sebebiyle 6 saatlik eğilme ve basınç dayanım değerlerinin referans numuneye kıyasla yüksek çıkmasını sağlamıştır. Fakat yüksek oranda kullanılan SD katkısının oluşturduğu dolgu etkisi erken yaş dayanımında artışa neden olurken hidratasyon ürünlerinin oluşumu azaltmış ve dayanım kazanma hızını yavaşlatarak ilerleyen yaşta referans numunelere kıyasla düşük eğilme ve basınç dayanımları elde edilmesine neden olmuştur. TK₅₀SF₄₀ karışımı kullanılarak hazırlanan TK₅₀SF₄₀_plak₁ ve TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ elemanlar üzerinde yapılan zımbalama dayanım deneylerinde elde edilen sonuçlara göre oluşan çatlak sayılarında bariz farklılık oluşmamıştır. Fakat FE-SEM görüntülerinde yoğun olarak gözlenen AFm fazı olan tomasitin olumsuz etkisi TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ numunesindeki zımbalama hasarında net bir şekilde görülmüştür. Zımbalamadan kaynaklı kuvvet altındaki TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ elemanında oluşan çatlakların genişlikleri ve derinlikleri TK₅₀SF₄₀_plak₁ numunesine kıyasla yüksek çıkmasına neden olmuştur. Ayrıca yüksek orandaki SD'nin oluşturduğu yoğun dolgu etkisi belirli bir seviyeye kadar olumlu etkilerken çok yüksek değerlerde olması bu çalışma özelinde değerlendirildiğinde TK₅₀SF₄₀_plak₂₈ elemanın süneklik değerinin TK₅₀SF₄₀_plak₁ elemana kıyasla düşük çıkmasına neden olmuştur. Artan yaşla birlikte süneklikte azalış referans numunede %2.93 iken, TK₅₀SF₄₀ karışımı ile oluşturulan plaklarda %11.73 oranında görülmüştür

TK₅₀G₄₀ karışımları üzerinde yapılan XRD ve FE-SEM analizlerinde yüksek miktardaki alçıdan kaynaklı etrenjitin çok yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür. 1. gün FE-SEM analiz görüntülerinde ağsı etrenjit yapı lifi numune boşluklarını kapatarak çimento taneciklerini birbirine bağlamıştır. Etrenjitin boşluk ve taneciklerde oluşturduğu bu bağ zımbalamadan kaynaklı kuvvet altındaki TK₅₀G₄₀_plak₁ elemanın şekil değiştirme ve deformasyona karşı dirençli hale getirmiştir. Bu direnç betonarme plak elemanın sünek davranışını olumsuz etkilerken çatlak oluşumunu da sınırlamıştır. Süneklik ve çatlak oluşumundaki olumsuzluklar sonucu TK₅₀G₄₀_plak₁ elemanın zımbalama dayanım deneyinde gevrek davranış sergilemesine neden olmuştur. Gevrek davranıştan kaynaklı düşük kuvvet altında zımbalama hasarına uğrayarak, düşük enerji tüketim kapasitesine erişilmesine neden olmuştur. TK₅₀G₄₀ karışımı üzerinde yapılan 28. gün FE-SEM analizden elde edilen görüntülerde erken yaşlarda oluşan ağsı etrenjit yapı lifi inceliyor uzayarak boşluklar ve taneciklerdeki bağın zayıflamasına neden olmuştur. Oluşan bu bağ zayıflaması şekil değiştirme ve deformasyona karşı direnci olumsuz etkileyerek

TK₅₀G₄₀_plak₂₈ elemanın TK₅₀G₄₀_plak₁ elemana kıyasla yüksek oranda çatlak oluşmasına neden olmuştur. Etrenjit lif yapısındaki değişiklikten kaynaklı TK₅₀G₄₀_plak₂₈ elemanın rijitliği azalırken sünekliğinde artış olmuştur. Süneklik ve çatlak sayısındaki artış enerji tüketim kapasitesini yükseltmiştir. Ayrıca TK₅₀G₄₀ karışımı üzerinde yapılan 28. gün XRD analiz sonuçlarında etrenjit yoğunluğu artan yaşla doğru orantılı şekilde arttığı görülmüştür. Artan etrenjit basınç dayanımına olumlu etkisi olduğu düşünülmektedir. 28. gün XRD ve FE-SEM analizlerinden elde edilen sonuçlar ışığında TK₅₀G₄₀_plak₂₈ elemanında görülen süneklik, çatlak sayısı ve basınç dayanımındaki artışın zımbalama dayanım deneyi sonucu en büyük maksimum zımbalama yüküne ulaşmasına neden olduğudur.

Zımbalama dayanımda beton basınç dayanımının etkisi belirgin bir şekilde deney sonuçlarına yansımıştır. Betonarme plaklardan alınan 15x15x15 cm küp numunelerin ortalama basınç dayanımlarındaki artış mineral katkılı betonarme plaklarının zımbalama dayanımlarındaki artışına destek olmuştur.

Referans plak numunelerin 1. günden 28. güne kadar geçen sürede sünekliği ve rijitliği azalmasına rağmen çatlak sayısı ve zımbalama yükündeki artışa bağlı olarak tüketilen enerji miktarında belirgin bir artış görülmüştür. KAÇ'da görülen hidratasyon reaksiyonundaki olumsuzluk sonucu porozitenin artması ve dayanımdaki düşüşlerin 28. gün sonundaki zımbalama dayanımına belirgin olumsuz bir etkisi olmamıştır.

Zımbalama deneyine tabi tutulan numunelerde zımbalama çevresi içerisinde derin teget çatlaklar çekme donatısına doğru ilerledikten sonra çekme donatısı boyunca yatay yönde büyüyerek betonarme elemandaki paspayının ayrılmasına sebep olmuştur. Bu durumdan kaynaklı yeraltı yapılarında kullanılan suya maruz kalan kırılsız betonarme plaklarda paspayının mutlaka korunması gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır.

Çalışma kapsamında betonarme plaklar üzerinde yapılan zımbalama deneyinde zımbalamaya neden olan maksimum yük değerleri Ref_plak₁ ve Ref_plak₂₈ referans numuneleri hariç diğer numunelerde TS 500'e göre hesaplanan zımbalama dayanım değerinin üzerinde bir değerde zımbalama hasarına uğramıştır. Bu çalışma özelinde TS 500 yönetmeliği referans numuneleri hariç diğer numuneler için güvenilir tarafta kalan sonuçlar vermiştir. TS 500 yönetmeliğinin mineral katkı kullanılmadan sadece bağlayıcı olarak KAÇ ile hazırlanan referans plaklarda güvenilir tarafta kalan sonuçlar vermemesinin sebebi referans plakların tam bir betonarme plak davranışı göstermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun yanında deney elemanları

içerisinde kullanılan mineral katkıları, üçlü sistemlerle oluşturulan plakların tam bir betonarme plak davranışı göstermesine katkı sağladığı düşünülmektedir.

5.2. Öneriler

Çalışma kapsamından üçlü sistemlerde kullanılan mineral katkı oranları hidrasyon mekanizmasının betonarme elemana etkisini belirgin şekilde görebilmek için yüksek tutulmuştur. Bu çalışmada kullanılan mineral katkı oranları değiştirilerek optimum oranlar belirlenebilir. Optimum oranlarda hazırlanan karışımlara çelik lif ilavesiyle betonarme plaklar üretilerek gevrek güç tükenmesi olan zımbalama göçmesine karşı betonarme plağın davranışı incelenebilir. İnceleme yapılırken 1. ve 28. gün deneylerine 7. ve 14. gün zımbalama deneylerinin eklenmesi çalışmanın önemini artırır. KAÇ tabanlı üçlü sistemlerde 7. ve 14. günde görülen dayanım kayıplarının zımbalama davranışına etkisi test edilerek, KAÇ tabanlı üçlü sistemlerin taşıyıcı sistemlerde kullanılabilirliği hakkında net sonuçlara varılabilir.

KAÇ'ın refrakter özelliği normal PÇ'ye göre oldukça üstün davranış sergilemektedir. KAÇ tabanlı üçlü sistemlerle üretilen betonarme plakların yüksek sıcaklığa karşı davranışları incelenebilir. Bu çalışma kapsamında üçlü sistemlerde kullanılan SD yerine YFC tercih edilerek üçlü sistemlerle betonarme plaklar oluşturulabilir. Agregası olarak da refrakter agregaları ile yüksek sıcaklıklara dayanıklı betonarme elemanlar elde edilebilir. Bu sayede yüksek sıcaklıklarda betonun yapısındaki bozulmalar sonucu meydana gelen hasarların önüne geçilerek yangına dayanıklı yapı tasarımına katkı sağlanabilir.

Çalışmada kullanılan KAÇ tabanlı üçlü sistemlerde yüksek oranda kullanılan KAÇ'ın geçirdiği hidrasyon reaksiyonlarından kaynaklı porozitedeki artışa bağlı dayanım kayıpları görülmüştür. Kullanılan KAÇ yerine piyasada süper beyaz çimento olarak isimlendirilen yüksek dayanımlı çimento ile literatürde olmayan farklı üçlü sistemler hazırlanabilir. Üçlü sistemlerle hazırlanan beton numuneleri üzerinde mikroyapı analizi ve mekanik deneyler yapılarak yüksek dayanımlı betonarme taşıyıcı elemanların üretilmesine katkı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Aitcin, P.C., Pinsonneault, P. and Roy, D.M., 1984 “Physical and Chemical Characterization of Condensed Silica Fume”, Bull. Am. Cer. Soc. 63, 1487-1491
- Alpaslan Ş. ve Felekoğlu T. K., 2019, Polikarboksilat Bazlı Süperakışkanlaştırıcıların Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Kıvam Koruma Performansı Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 140-154
- Ay, C., (2021), Atık cam tozu tabanlı geopolimer harçlarda kalsiyum alüminat çimentosu etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Nevşehir.
- Aydın, M., (2019), Kalsiyum alüminat çimentosu ile portland çimentosunun karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 3-106.
- Balaneji, H. H., (2017), Farklı mineral katkılı betonların sülfat direncinin belirlenmesi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 10-132
- Berktaş, İ., 1992, Plak Teorisi ve Uygulamaları (Küçük Sehimli ince Plaklar), Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul,
- Binici, B. ve Bayrak, O., (2005), Upgrading of slab–column connections using fiber reinforced polymers, *Engineering Structures*, 27, 97–107.
- Bizzozero, J., (2014). *Hydration and dimensional stability of calcium aluminate cement based systems*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. <https://infoscience.epfl.ch/record/202031>
- Bodur, B., Bayraktar, O. Y. ve Kaplan, G., 2021, Kalsiyum Alüminat Çimentolarının Köpük Beton Üretiminde Kullanımının İncelenmesi, *1. Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık Kongresi*, İstanbul, 338-361.
- Bozer, A., 2020, Betonarme Perdelerin Plandaki Yerleşimlerinin Kirişsiz Döşemeli Yapılara Etkisinin İncelenmesi, *Teknik Dergi*, 9733-9753
- Celep, Z., 2015, Betonarme Yapılar, *Beta yayınları*, İstanbul, 246-697.
- ÇİMSA, 2017a, Çimento Fazları ve Etkileri [online], Çimsa Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/71DDECEE521E470BA4ADA95A091840/08A3F1686F434950A997270398A76C51.pdf> [Ziyaret Tarihi: 16 Nisan 2022].
- ÇİMSA, 2017b, Etrenjit Oluşum Koşullarının Üçlü Sistem Performansına Etkisi [online], Çimsa Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi, <https://docplayer.biz.tr/59875147-Etrenjit-olusum-kosullarinin-uclu-sistem-performansina-etkisi.html> [Ziyaret Tarihi: 6 Ekim 2022].

- ÇİMSA, 2017c, Kalsiyum Alüminat Çimentosu Eklenmesi ile Portland Çimentosunun Priz Hızlanma Mekanizması [online], <https://docplayer.biz.tr/108835155-Kalsiyum-aluminat-cimentosu-eklenmesi-ile-portland-cimentosunun-priz-hizlanma-mekanizmasi.html> [Ziyaret Tarihi: 30 Kasım 2022].
- ÇİMSA, 2018, Kalsiyum Sülfat Miktarı ve Çeşidinin Kalsiyum Alüminat Çimento Bazlı Kendiliğinden Yayılan Şaplara Etkileri [online], Çimsa Formülhane, <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/71DDECEE521E470BA4ADA95A091840/F3AAF3D0857C47868BE73951B793B663.pdf> [Ziyaret Tarihi: 16 Mart 2022].
- ÇİMSA, 2022a, ISIDAÇ 40 Esaslı Yüksek Performanslı Beton[online], Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi, <https://docplayer.biz.tr/31550463-Isidac-40-esasli-yuksek-performansli-beton-cimento-arastirma-ve-uygulama-merkezi.html> [Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2022].
- ÇİMSA, 2022b, ISIDAÇ 40 yapı kimyasalları [online], <https://docplayer.biz.tr/10430864-Isidac-40-yapi-kimyasallari-ozel-urunlerin-icin-ozel-bir-cimento.html> [Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2022].
- ÇİMSA, 2022c, Üçlü Sistemler -1 [online], Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi, <https://docplayer.biz.tr/15249103-Uclu-sistemler-1-cimento-arastirma-ve-uygulama-merkezi.html> [Ziyaret Tarihi: 13 Mart 2022].
- CHRYSO, 2022, DECLARATION OF PERFORMANCE CHRYSO Premia 196 [online], <https://uk.chryso.com/p/6918/1/4331/en> [Ziyaret Tarihi: 19 Mart 2022].
- Demirbilek, A., (2019), Yüksek dayanımlı betonda su/bağlayıcı oranı ve kimyasal katkı oranı ilişkisinin dayanım ve işlenebilirlik üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elâzığ.
- Dikme, D., (2010), Doğal sülfat içeriği yüksek olan kumlarla üretilen harçlarda sülfat etkisinin incelenmesi ve mineral katkıların etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Doğan, M., 2009, Betonarme Yapılardaki Deprem Hasarlarına Korozyonun Etkisi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt:22, Sayı:1, 147-168.
- Durucan, C., (2015), CFRP şeritlerle güçlendirilmiş boşluklu çift doğrultulu betonarme döşemelerin zımbalama davranışının deneysel olarak incelenmesi ve davranışın sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Ekinci, C. E., (1995), Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi silis dumanlarının çimento ve betonda katkı maddesi olarak değerlendirilmesi, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elâzığ.
- Elmalı, İ., (2006), Betonarme kirişsiz döşemelerin çözüm yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 13-130.

- Eren, F., Keskinateş, M., Felekoğlu, B. ve Felekoğlu, K. T., 2022, Portland Çimentosu İkamisinin Kalsiyum Alüminat Çimentolu Harçların Taze Hal Özellikleri ve Uzun Dönemli Dayanım Performansına Etkileri, *2nd International Congress of Engineering and Natural Sciences (ICENSS 2022)*, Ankara, 222-237.
- Erkmen, C. K., (2018), Hydration behavior and strength development of mineral admixture incorporated calcium aluminate cements, Master Thesis, *a thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university*. <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12622831/index.pdf>
- Erzengin, S. G., 2019, Polikarboksilat-bazlı süperakışkanlaştırıcıların silis dumanı içeren çimento hamurlarının reolojik davranışına etkileri, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(6), 627-634
- ESOGÜ, 2022, Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) [online], (<https://arum.ogu.edu.tr/Sayfa/Index/80/alan-emisyonlu-taramali-elektron-mikroskobu-fe-sem>) [Ziyaret Tarihi: 19 Ekim 2022].
- Ezer, İ., (2010), Kirişsiz döşemelerde farklı zımbalama donatılarının deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 24-140.
- Görkem, Ş. E., (2009), Yüksek dayanımlı betonarme döşeme davranışlarının plastik mafsal çizgileri yöntemine göre incelenmesi, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Grimaldi, A., Meda, A. ve Rinaldi, Z., 2013, Experimental behaviour of fibre reinforced concrete bridge decks subjected to punching shear, *Composites: Part B* 45, 811–820
- Gündeşli, U., (2008), Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana
- Guirado, F., ve Galí, S. (2006). Quantitative Rietveld analysis of CAC clinker phases using synchrotron radiation. *Cement and concrete research*, 36(11), 2021-2032.
- Gu, P., Beaudoin, J. J., Quinn, E. G., Myers, R. E. (1997). Early strength development and hydration of ordinary Portland cement/calcium aluminate cement pastes. *Advanced cement based materials*, 6(2), 53-58.
- Hamko, H. J., (2021), Effect of steel fiber on punching shear capacity of two way reinforced concrete slab, Yüksek Lisans Tezi, *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van.
- Imerys Alüminat, (2022), Peramin AXL- accelerators for mortars and specialty binders, <https://www.imerys.com/product-ranges/peramin-axl> [Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2022].

- Juenger, M.C.G., Winnefeld, F., Provis, J.L. and Ideker, J.H., 2009, Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12):1232 – 1243, 2011. Conferences Special: Cement Hydration Kinetics and Modeling, Quebec City.
- Kandil, U., (2014), Uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Kan, Y., Pei, K. ve Cheng, M., 2017, A Study of Fracture Properties of High Alumina Shielding Concrete (HASC), 24th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, August 20-25, Busan, DivisionI:10p
https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.20/35829/SMiRT-24_01-05-04.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2022].
- Karataş, M. ve Erdoğan, A. S., 2006, Kirişsiz Döşemelerde Sürekli Tabla Teşkilinin Avantajı, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 90-93
- Keleş, Y., (2019), Bina taşıyıcı sistem davranışının farklı döşeme türleri için incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Khmurovska, Y., Štemberk, P., Němeček, J. ve Doleželová, M., 2020, Experimental and numerical investigation of cement paste microstructure and its hydration under short-term exposure to acetone, *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 26, 34–38
- Kişin E., (2006), Elastik zemine oturan çelik lif ve çelik hasır donatılı beton plakların mekanik davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 18-79
- Koçer, M., (2016), Fretli kolonların kesme, eğilme ve süneklik kapasitelerinin yapay sınır ağları ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya
- Mangabhai, R. J. (Ed.). (1990). *Calcium Aluminate Cements: Proceedings of a Symposium dedicated to HG Midgley*, London, July 1990 (First Edition.). New York: Taylor&Francis.
- Mercimek, Ö., (2021), Tekstil katkılı sıva ile zımbalamaya karşı güçlendirilen farklı boşluk konumuna ve büyüklüğüne sahip çift doğrultulu betonarme döşemelerin davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Mercimek, Ö., Ghoroubi, R., Anıl, Ö. ve Baran, M., 2021, Birden Fazla Boşluklu Çift Doğrultulu Betonarme Döşemelerin Zımbalama Performansının İyileştirilmesi için Tekstil ile Güçlendirilmiş Sıva Şeritler ile Güçlendirilmesi, *UMAGD (Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi)*, 13(2), 573-582.

- Merter, O. ve Uçar, T., 2015, Betonarme Kesitlerin Doğrusal Elastik Ötesi Davranışında Tüketilen Enerjiye Boyuna Donatı Oranının, Enine Donatı Aralığının ve Eksenel Yükün Etkisi, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 4, Sayı 1, 21-39
- Millî Eğitim Bakanlığı, 2015, Beton Kıvam ve Yoğunluk Deneyleri, İnşaat Teknolojisi, Ankara, 1-19
- Naseri, J., (2020), Punching behavior of hybrid fiber reinforced concrete panels, Yüksek Lisans Tezi, *İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Nassif, N., Zeiada, W., Al-Khateeb, G., Haridy, S. ve Altoubat, S., 2022, Assessment of Punching Shear Strength of Fiber-reinforced Concrete Flat Slabs Using Factorial Design of Experiments, *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 16, No. 1, 139-154.
- Nehring, J. 2020, Acceleration of ordinary Portland cement based systems by calcium aluminate cement: New insights into the hydration kinetics of C₃S, Doctoral thesis, Der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zur
- Nergiz, V., (2007), Yüksek dayanımlı betonlarda durabilite ve işlenebilirlik, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 111 s.
- Nguyen, T. N., Nguyen, T. T., ve Pansuk, W., 2017, Experimental study of the punching shear behavior of high performance steel fiber reinforced concrete slabs considering casting directions, *Engineering Structures*, 131, 564–573
- Odler, I., 2003, Special Inorganic Cements. Modern Concrete Technology. Taylor & Francis.
- Özcan, F., (2005), Silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri ve hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Ramadevi, K. ve Shri, S. D., (2015). Flexural behaviour of hemp fiber reinforced concrete beams. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10, 1819-6608.
- Saatci, S., Yaşayanlar, S., Yaşayanlar Y. ve Batarlar, B., 2019, Çelik fiber katkısının farklı boyuna donatı oranına sahip betonarme döşemelerin zımbalama davranışı üzerinde etkileri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34:2, 1045-1059
- Sağbaş, G., (2002), Betonarme döşemelerin dübeller ile güçlendirilmesi hakkında deneysel bir çalışma, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

- Saydan, M., (2021), Kalsiyum aluminat çimentosu tabanlı hızlı dayanım kazanan üçlü sistemlerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya
- Salmani, V., (2013), Çift doğrultulu betonarme döşemelerde boşluk büyüklüğünün zımbalama davranışı üzerindeki etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15-61.
- Scrivener K.L.ve Capmas, A., 1998,"Calcium Aluminate Cements, Chapter 13, in: P.C. Hewlett (Ed.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*", John Wiley - Sons, New York.
- Scrivener, K., ve Capmas, A. (2003). Calcium aluminate cements. *Advanced concrete technology*, 1-31.
- Sevim, C., (2010), Eğilmeye çalışan plak elemanlarda basınç bölgesinde oluşan çatlakların eleman taşıma gücü üzerine etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri,1-52.
- Sezgin, H. İ., (2021), Korozyona maruz kalmış betonarme döşemelerin eğilme yükü etkisindeki davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzincan.
- Son, H. M., Park, S. M., Jang, J. G. ve Lee, H. K. (2018). Effect of nano-silica on hydration and conversion of calcium aluminate cement. *Construction and Building Materials*, 169, 819–825. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.011
- Şahin, R., (2003), Normal portland çimentolu betonların don direncinin Taguchi Yöntemi ile optimizasyonu ve hasar analizi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 69
- Şimşek, O., Aruntaş Y. H. ve Demir, İ., 2007, Beton Üretiminde Süper Akışkanlaştırıcı Çeşiti ve Oranının Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 22, No 4, 829-835.
- Solak, O., (2019), Kirişsiz betonarme döşemelerin zımbalamaya karşı ardgerme ile güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Sucu, M. ve Delibaş, T., 2015, Kalsiyum Alüminat Çimentosu Bazlı Tamir Betonları, *Hazır Beton Dergisi*, 131, 88-94.
- Tokay M., 2014, Betonda UK, GYFC ve SD'nin Rolü: Mevcut Bilgi Birikimi, *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi*, 64-84
- Topçu, İ. B. ve Canbaz, M., 2002, Microstructural Analysis of Concrete with Silica Fume, *9th International Conference on Comp. Engineering*, San Diego, 793-794.
- TS 500, (2000) Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 197-1, (2002), “Genel Çimentolar- Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2, (2002). “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi.”
- TS EN 12390-3, (2003). “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini.”
- TS EN 12390-8, (2010), Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 8: Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini, T. S. E., Ankara.
- TS 708, 2016, “Çelik-Betonarme için -Donatı çeliği.”
- TS EN 196-1, (2016), “Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-1, (2019), “Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 1: Numune alma ve yaygın kullanılan cihazlar”
- Türedi, G., (2019), Production of self-compacting mortar with calcium aluminate cement, Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Muğla.
- Uzbaş, B., (2019), Çimento esaslı silis dumanlı uçucu küllü kompozitlerin sem ve xrd destekli görsel analizlerin yapay sinir ağları ile modellenmesi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum
- Winnefeld, F., Schöler, A. ve Lothenbach, B. (2016). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. (K. Scrivener, R. Snellings ve B. Lothenbach, Ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Yarar, G., (2021), Kalsiyum alüminat çimentolarının köpük beton üretiminde bazalt lif ile kullanımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu
- Yavuz, H. İ., (2011), Su geçirimsiz beton tasarımı ve örnek uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 7-87
- Yeğinoğlu, A., 2011, Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği AR-GE Enstitüsü*, Ankara,
- Zhang, J. ve Scherer, G. W., (2011). Comparison of methods for arresting hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, 41(10), 1024–1036. doi:10.1016/j.cemconres.2011.06.003
- Zhang, S., Xu, X., Memon, S. A., Dong, Z., Li, D. ve Cui, H., 2018, Effect of calcium sulfate type and dosage on properties of calcium aluminate cement-based self-leveling mortar, *Construction and Building Materials*, 167, 253–262