



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MALZEME VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**POLİMERİK KAFES TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERDE MİNERAL KATKILI KARIŞIM
PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

Fatime EREZ

**Ağustos-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MALZEME VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**POLİMERİK KAFES TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERDE MİNERAL KATKILI KARIŞIM
PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

Fatime EREZ

**Danışman
Doç. Dr. Oktay ADIYAMAN**

**İkinci Danışman
Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

**Ağustos-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Fatime EREZ tarafından hazırlanan “POLİMERİK KAFES TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE MİNERAL KATKILI KARIŞIM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ” adlı tez çalışması 25/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Malzeme ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

.....

Danışman

Doç. Dr. Oktay ADIYAMAN

.....

İkinci Danışman

Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğretim Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

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 beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Fatime EREZ
Tarih:25/08/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLİMERİK KAFES TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE MİNERAL KATKILI KARIŞIM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Fatime EREZ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Malzeme ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Oktay ADIYAMAN

İkinci Danışman: Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN

2025, 66 Sayfa

Bu çalışmada, 3D yazıcı teknolojisi ile üretilen polimerik kafes sistemlerinin, çimento esaslı malzemelerin farklı tasarım parametreleri ile birlikte kullanılmasıyla üretilen kompozitin temel mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırmada temel bağlayıcı olan çimentoya ilave olarak uçucu kül, nano kalsit ve nano CaCO_3 içeren harçlar hazırlanmış, bu harçlar PETG malzemesiyle üretilmiş rombiküboktahedron geometrisindeki kafes yapılarla üretilen kompozitler halinde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, üretilen numunelerin 7, 28 ve 180 günlük kür yaşları için hem basınç dayanımı hem de ultrases dalgası geçiş hızı (UPV) deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, katkı malzemelerinin çimento esaslı kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve polimerik kafes yapılarla birlikte kullanıldığında bu etkinin daha da arttığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş polimerik kafes yapılar; geleneksel betonarme sistemlere alternatif ve hafif yapı çözümleri sunmaktadır. Araştırmanın bulguları, ileri üretim teknikleri ile malzeme mühendisliğinin birleşiminin yapı sektöründe sürdürülebilir ve verimli uygulamalara kapı aralayabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: 3D yazıcı, PETG, polimerik kafes, basınç dayanımı, UPV.

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECT OF MINERAL ADMIXTURE MIX PARAMETERS ON POLYMERIC LATTICE REINFORCED CEMENT BASED COMPOSITES

Fatime EREZ

Batman University Graduate Education Institute

Materials and Manufacturing Engineering Department of Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Oktay ADIYAMAN

Secondary Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serhat DEMİRHAN

2025, 66 Pages

In the current experimental research, the effects of polymeric lattice structures produced via 3D printing technology on the fundamental engineering properties of the lattice-reinforced cement-based composites were investigated in combination with various design parameters of cement-based materials. In addition to cement as the main binder, mortars incorporating supplementary materials of fly ash, nano calcite, and nano CaCO_3 were prepared and evaluated in composite form with PETG lattice structures with the geometry of rhombicuboctahedron. Within this scope, for each mixture, both compressive strength and ultrasonic pulse velocity tests were carried out for the curing ages of 7, 28, and 180 days. The experimental results revealed that the inclusion of supplementary materials significantly enhanced the mechanical properties of the cement-based composite, and this effect was further amplified when combined with polymeric lattice structures. In this context, polymeric lattice structures produced via 3D printing technology offer lightweight structural solutions as an alternative to conventional reinforced concrete systems. The findings of the study indicate that integrating advanced manufacturing techniques with materials engineering can facilitate the development of sustainable and efficient practices in the construction industry.

Keywords: 3D printing, PETG, polymeric lattice, compressive strength, UPV.

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tezini hazırlama sürecinde bilgi, tecrübe, destek ve katkılarıyla bana her zaman rehberlik eden kıymetli danışmanım Doç. Dr. Oktay Adıyaman'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez konumun belirlenmesinden araştırma planının oluşturulmasına her aşamada sunduğu bilimsel yönlendirme, yapıcı eleştiriler ve teşvik edici yaklaşım sayesinde bu çalışmayı başarıyla tamamlamam mümkün olmuştur. Kendisi, bilimsel bakış açısının pekiştirilmesi konularında bana önemli katkılar sağlamıştır. Bu süreçte gösterdiği sabır için kendisine minnettarım.

Akademik gelişimime değerli katkılar sağlayan, sahip olduğu bilgi birikimi, deneyimi ve bakış açısıyla tez çalışmamın her aşamasında bana ilham veren; tez konusunun kapsamının genişletilmesinden, literatür araştırmalarının yönlendirilmesine, üretim süreçlerinin planlanmasından deneysel çalışmaların yürütülmesine kadar her adımda sabır, anlayış ve özveriyle yanımda olan ikinci danışmanım Doç. Dr. Serhat Demirhan'a en içten şükranlarımı sunarım. Kendisi, yalnızca akademik rehberliği ile değil, aynı zamanda problem çözme konusundaki yapıcı yaklaşımı, teşvik edici desteği ve motive edici tavsiyeleri ile bu sürecin hem verimli hem de öğretici geçmesini sağlamıştır.

Deneysel aşamalarda gösterdiği destek ve öneriler ile sürecin kolaylaşmasını sağlayan Öğr. Gör. Mehmet Ali Erçetin'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu zorlu süreç boyunca manevi desteğini her zaman hissettiren, sabırları, sevgileri ve inançlarıyla yanımda olan kıymetli aileme sonsuz şükranlarımı sunarım. Onların verdiği güç ve motivasyon, bu çalışmanın temel yapı taşı olmuştur.

Tüm bu katkılar sayesinde, bilimsel ve kişisel gelişim sürecimi verimli ve anlamlı bir şekilde tamamlayabildim. Bu vesileyle, emeği geçen herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Fatime EREZ
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. 3D Baskı Teknolojisi	3
2.1.1. Tarihsel gelişim süreci	3
2.1.2. Temel 3D baskı yöntemleri.....	4
2.1.3. Teknolojinin evrimi: Masaüstünden endüstriyel ölçeğe	5
2.1.4. Malzeme çeşitliliğindeki gelişmeler	6
2.1.5. Akademik ve endüstriyel literatürde 3D baskı eğilimleri	7
2.1.6. 3D baskı ile beton yazdırma uygulamaları	8
2.1.7. 3D baskı teknolojisinde sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler	9
2.2. Beton, Betonarme ve Donatı Alternatifleri Üzerine Literatür Taraması	11
2.2.1. Beton, betonarme sistemler ve donatının yapısal rolü: Literatürde genel yaklaşım	11
2.2.2. Donatıya yönelik alternatif yaklaşımlar: malzeme ve geometri temelli çözümler.....	12
2.3. Polimerik Malzemeler ve 3D Baskı Teknolojisinin İnşaat Sektöründeki Kullanımı	14
2.3.1. Polimerlerin termal ve mekanik dayanım açısından değerlendirilmesi.....	16
2.4. Kafes (Lattice) Sistemler: Yapısal Özellikler ve Uygulama Alanları	17
2.5. Katkı Malzemeleri ve Beton Harç Teknolojileri	20
2.6. Mekanik Performansın Değerlendirilmesi.....	21
2.7. 3D Baskı ile Üretilen Kafes Sistemlerinin Betonla Entegrasyonu	23
3. MATERYAL ve YÖNTEM	25
3.1. Deneysel Tasarımın Genel Yapısı	25
3.2. Malzeme Özellikleri ve Seçim Kriterleri.....	26
3.2.1. Çimento (CEM I 42.5)	26
3.2.2. Uçucu kül (F Tipi)	27
3.2.3. Agregası ($d_{max} = 0.125$ mm).....	28
3.2.4. Karma suyu	29
3.2.5. Nano kalsit (NC).....	30
3.2.6. Nano $CaCO_3$ (NCC).....	31
3.2.7. Hiper akışkanlaştırıcı (Master Glenium 51)	33

3.2.8. PETG filament	34
3.3. Kafes Sistemlerin 3D Yazıcı ile Üretimi	35
3.4. Numune Üretim Süreci ve Kür Koşulları	38
3.4.1. Kalıp hazırlığı ve kafes yerleşimi	38
3.4.2. Malzemelerin tartımı ve homojen karışımı	40
3.4.3. Karma suyu	41
3.4.4. Harcın kalıplara dökülmesi ve vibrasyon uygulaması	41
3.4.5. Priz ve kalıptan çıkarma	42
3.4.6. Kürleme prosedürü ve saklama koşulları	43
3.5. Mekanik Test Protokolleri ve Uygulama Standartları	45
3.5.1. Basınç dayanımı testi	46
3.5.2. Ultra ses dalgası geçiş hızı testi (UPV)	47
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	49
4.1. Basınç Dayanımı Sonuçları	49
4.2. UPV Sonuçları ve Yapısal Yorumlar.....	52
4.3. Karşılaştırmalı Performans Analizi	55
4.3.1. Basınç dayanımı.....	55
4.3.2. UPV sonuçları.....	57
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
5.1. Sonuçlar	59
5.2. Öneriler	60
KAYNAKLAR	62

TABLÖLAR LİSTESİ

<u>Tablo No</u>	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Donatı Alternatiflerinin Karşılaştırması.....	14
Tablo 2.2. 3D Yazıcı Türlerinin Özellik Karşılaştırması.....	16
Tablo 2.3. Farklı Kafes Geometrilerinin Yapısal Karşılaştırması.....	19
Tablo 2.4. Nano Katkıların Betona Etkileri.....	21
Tablo 3.1. Kullanılan Malzeme Miktarları.....	25
Tablo 3.2. CEM I 42.5 R Çimento Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	27
Tablo 3.3. Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	28
Tablo 3.4. Agreganın Fiziksel Özellikleri.....	29
Tablo 3.5. NCC ve NC Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	31
Tablo 3.6. Karşılaştırmalı Yorumsal Analiz: UNC vs NCC.....	33
Tablo 3.7. Master Glenium 51 Teknik Özellikleri.....	34
Tablo 3.8. CCF Marka PETG Malzemesinin Özellikleri	35
Tablo 3.9. UPV Geçiş Hızı (km/s) ile Beton Kalitesi İlişkisi.....	48

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil No</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. RepRap Yazıcı Örneği.....	4
Şekil 2.2. Dubai 3D Printed Office Projesi.....	9
Şekil 2.3. TECLA Projesi.....	11
Şekil 2.4. 3D Baskı Süreci Şeması.....	15
Şekil 2.5. Farklı formasyonlarda Kafes Hücreleri Temsili.....	18
Şekil 3.1. Uçucu Kül Katkılı Betonun SEM Görüntüsü.....	28
Şekil 3.2. Kullanılan Agrega Örneği ve Eleme Anı.....	29
Şekil 3.3. NC SEM Görüntüsü.....	30
Şekil 3.4. NCC SEM Görüntüsü.....	32
Şekil 3.5. Master Glenium 51 Hiper Akışkanlaştırıcı.....	33
Şekil 3.6. Kullanılan PETG Filamentin Görüntüsü.....	34
Şekil 3.7. 3D Yazıcıda Kafes Elemanın Üretim Süreci.....	36
Şekil 3.8. 3D Yazıcı ile Üretilmiş Rombiküboktahedron Hücreli PETG Kafes Görüntüsü.....	37
Şekil 3.9. Kalıp Hazırlığı ve Kafes Yerleşimi.....	39
Şekil 3.10. Malzemeler.....	40
Şekil 3.11. Harcın El blenderı ile Karıştırılması.....	41
Şekil 3.12. Harcın Kalıba Dökülmesi.....	42
Şekil 3.13. Dökümü Tamamlanan Numuneler.....	43
Şekil 3.14. Farklı Günlerde Kürlen Numunelerin Saklama ve Kür Koşulları.....	44
Şekil 3.15. Tam Otomatik Üniversal Test Cihazı.....	45
Şekil 3.16. Basınç Testi Düzeneği.....	46
Şekil 3.17. UPV Testi Düzeneği.....	47
Şekil 4.1. Tüm Karışımlar İçin 7, 28 ve 180 Günlük Ortalama Basınç Dayanımı Sonuçları.....	52
Şekil 4.2. Tüm Karışımlar İçin 7, 28 ve 180 Günlük UPV Değerleri.....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Cm	: Santimetre
Ca(OH)₂	: Kalsiyumhidroksit
Km	: Kilometre
M	: Metre
Mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
NC	: Nano kalsit
NCaCO₃	: Nano kalsiyumkarbonat

Kısaltmalar

3D	: Üç Boyutlu
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
EBM	: Elektron Işınıyla Ergitme
FDM	: Eritilerek Biriktirme Modelleme
FRP	: Lif Donatılı Polimer
HPC	: Yüksek Performanslı Beton
PETG	: Polietilen Tereftalat Glikol
PLA	: Polilaktik Asit
RepRap	: Replicating Rapid Prototyper
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SLA	: Stereolitografi
SLM	: Seçici Lazer Ergitme
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
SP	: Hiper Akışkanlaştırıcı
TRC	: Tekstil Donatılı Beton
UHPC	: Ultra Yüksek Performanslı Beton
UPV	: Ultrases Geçiş Hızı

1. GİRİŞ

Yapı mühendisliği, insanlığın barınma, ulaşım ve altyapı gereksinimlerini karşılamaya yönelik olarak gelişimini sürdürmekte olan, çok disiplinli bir mühendislik dalıdır. Günümüz inşaat sektörü; yalnızca dayanıklı yapılar inşa etmeyi değil, aynı zamanda çevresel etkileri azaltan, enerji etkinliğini artıran ve sürdürülebilirliği temel alan sistemlerin geliştirilmesini hedeflemektedir. Bu dönüşüm, özellikle yapı malzemelerinin tasarımında yenilikçi yaklaşımları ve ileri üretim teknolojilerini zorunlu kılmıştır (Neville, 2011).

Bu bağlamda, çimento esaslı betonun dayanım ve şekillendirme kapasitesi ile çelik donatının yük taşıma kapasitesi birleşerek uzun yıllardır yapı sektörünün temelini oluşturmuştur. Ancak çelik donatıların yüksek maliyeti, korozyona açık yapısı, ağır oluşu ve montaj zorlukları gibi dezavantajları, alternatif malzeme arayışlarını beraberinde getirmiştir. Bu noktada, mühendislik polimerlerinin sunduğu hafiflik, şekil çeşitliliği ve korozyon direnci gibi avantajlar, yeni nesil donatı sistemlerinin tasarımında umut verici bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Gibson & Ashby, 1999).

Özellikle 3D yazıcı teknolojilerinin endüstriyel üretimde yaygınlaşmasıyla birlikte, polimerik malzemelerin yapı mühendisliğine entegrasyonu mümkün hâle gelmiştir. 3D baskı, tasarım özgürlüğü ve üretim esnekliği sunarken, kalıplama ihtiyacını ortadan kaldırarak hem malzeme israfını azaltmakta hem de üretim sürecinde zaman tasarrufu sağlamaktadır (Ngo et al., 2018). Bu teknolojik gelişmeler, yapı bileşenlerinin daha karmaşık ve optimize geometrilerle üretilmesini mümkün kılarken; mimari formların sınırlarını genişletmekte ve mühendislik hesaplarının doğrudan üretim süreçlerine aktarılmasına imkân tanımaktadır (Buswell et al., 2007).

3D yazıcı teknolojileri ile üretilen kafes (lattice) sistemleri, yapı mühendisliğinde hem yük taşıma kapasitesi hem de enerji emme özellikleriyle öne çıkan modüler tasarım elemanlarıdır. Bu sistemlerin belirli geometrik konfigürasyonlar ile düzenlenmesi sayesinde, birim hacim başına düşen malzeme miktarı azaltılmakta; buna karşın yapı elemanlarının taşıma performansı artırılmaktadır. Özellikle rombiküboktahedron gibi üç boyutlu yapılar, beton içerisine yerleştirildiklerinde yük aktarımı sırasında mikro çatlak ilerlemesini geciktirmekte ve kompozit davranışı iyileştirmektedir (Ashby, 2006).

Ancak polimerik kafes yapıların beton içerisine entegrasyonu, yalnızca kafes geometrisine bağlı değildir. Betonun iç yapısının homojenliği, akışkanlığı ve kafesle kurduğu bağ dayanımı da bu bütünleşik sistemin mekanik başarısını belirleyen temel unsurlar arasındadır. Bu nedenle, beton harcının içerdiği katkı maddeleri önemli bir rol üstlenmektedir. Uçucu kül, nano kalsit (NC), nano kalsiyum karbonat (NCaCO_3) ve süperakışkanlaştırıcı (SP) gibi katkıları; betonun basınç dayanımı, eğilme performansı, işlenebilirliği ve mikro yapı bütünlüğü üzerinde doğrudan etkilidir.

Literatürde yapılan çalışmalarda, nano boyuttaki katkıların betonun porozitesini azaltarak geçirimsizliğini düşürdüğü, bununla birlikte dayanımı ve dayanıklılığı artırdığı raporlanmıştı. Ayrıca, süperakışkanlaştırıcıların betonun kıvam kaybını minimize ederek yüksek dayanım sınıflarına ulaşılmasını sağladığı bilinmektedir. Tüm bu parametreler, polimerik kafes sistemlerle birleştirildiğinde yalnızca mekanik performansı artırmakla kalmaz, aynı zamanda yapının daha uzun ömürlü ve çevresel koşullara dayanıklı olmasını da sağlar.

Bu tez çalışmasında, 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak PETG malzemesinden üretilmiş rombikübohedron kafes sistemlerinin, katkı maddeleriyle zenginleştirilmiş beton harçları ile birlikte değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında üretilen numunelere, basınç dayanımı testleri uygulanmış; aynı zamanda ultrases geçiş süresi (UPV) testi ile beton iç yapısının sürekliliği ve homojenliği değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda, geleneksel betonarme yapı anlayışının ötesine geçerek; ileri üretim teknolojileri ile mühendislik malzemelerinin bir arada kullanıldığı, hafif, yüksek dayanımlı ve sürdürülebilir yapı sistemlerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen bulguların, yapı mühendisliğinde polimerik sistemlerin kullanım alanlarını genişletmeye yönelik katkı sağlayacağı ve bu alanda yapılacak olan ileri çalışmalar için bir temel oluşturacağı düşünülmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

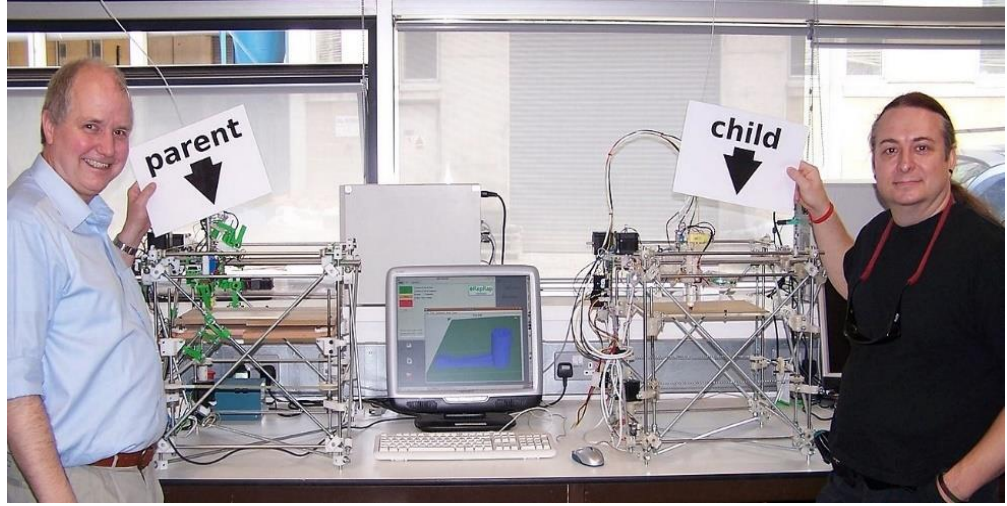
2.1. 3D Baskı Teknolojisi

2.1.1. Tarihsel gelişim süreci

Üç boyutlu (3D) baskı teknolojisi, üretim süreçlerinde devrim yaratacak potansiyele sahip bir imalat yöntemi olarak 1980'li yıllarda ortaya çıkmıştır. Bu teknolojinin temeli, nesnelerin dijital bir modelden yola çıkarak katman katman oluşturulması prensibine dayanmaktadır. 1984 yılında Charles W. Hull tarafından geliştirilen ve patentlenen stereolitografi (SLA) yöntemi, bu alandaki ilk ticari girişimlerden biri olarak kabul edilir (Hull, 1986). Hull'un kurduğu 3D Systems şirketi, ilk ticari 3D yazıcıyı piyasaya sürerek teknolojinin endüstriyel alanda kullanılmasının önünü açmıştır.

1990'lı yıllarda seçici lazer sinterleme (SLS) ve füzyonlu biriktirme modelleme (FDM) gibi farklı baskı tekniklerinin geliştirilmesiyle birlikte 3D baskı teknolojisinin kullanım alanları çeşitlenmiş, başta otomotiv, havacılık ve medikal sektörlerde olmak üzere prototipleme amacıyla yaygın biçimde benimsenmiştir (Kruth et al., 1998). Bu dönemde teknoloji, daha çok yüksek maliyetli ve özel üretim ihtiyaçlarını karşılamak üzere kullanılmıştır.

RepRap (Replicating Rapid Prototyper) hareketi, 2005 yılında Dr. Adrian Bowyer tarafından başlatılan ve açık kaynaklı bir 3D yazıcı geliştirme girişimidir. Bu hareketin temel amacı, kendi parçalarının büyük bir kısmını üretebilen düşük maliyetli yazıcıların geliştirilmesidir. Şekil 2.1'de gösterilmiştir. RepRap projeleri, CAD tasarımlarının ve yazılım kodlarının çevrim içi ortamda ücretsiz olarak paylaşılmasıyla geniş bir kullanıcı ve geliştirici topluluğu tarafından sahiplenilmiştir. Bu sayede 3D yazıcı teknolojisinin demokratikleşmesi hız kazanmış, bireyler, araştırmacılar ve küçük girişimler kendi yazıcılarını üretme imkânına kavuşmuştur. RepRap hareketi, özellikle FDM teknolojisinin yaygınlaşmasında ve günümüzdeki masaüstü yazıcıların temelinin atılmasında büyük rol oynamıştır.



Şekil 2.1. RepRap yazıcı örneği. Sağdaki makinenin tüm plastik parçaları soldaki makine tarafından üretilmiştir. (CharlesC, 2009)

2000’li yıllarla birlikte açık kaynak yazıcı projeleri (örneğin RepRap) ve masaüstü yazıcıların piyasaya sürülmesi, 3D baskı teknolojisini daha erişilebilir hale getirmiştir. Böylece bireysel kullanıcılar, akademik araştırmacılar ve küçük işletmeler de bu teknolojiye yararlanmaya başlamıştır (Jones et al., 2011). Aynı dönemde yazılım alanındaki gelişmeler, modelleme ve dilimleme (slicing) süreçlerini kolaylaştırmış; bu da kullanıcı deneyimini önemli ölçüde iyileştirmiştir.

Günümüzde 3D baskı teknolojisi, yalnızca prototipleme değil, doğrudan son kullanım ürünlerinin üretimi için de tercih edilmektedir. Yapay organlardan uzay aracı parçalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılmakta; yapı mühendisliği dahil olmak üzere birçok alanda yeni uygulama alanları ortaya çıkmaktadır. Bu gelişim süreci, teknolojinin yalnızca mühendislik ve üretim açısından değil, aynı zamanda toplumsal dönüşüm ve sürdürülebilir üretim pratikleri açısından da dönüştürücü bir rol üstlendiğini göstermektedir.

2.1.2. Temel 3D baskı yöntemleri

3D baskı teknolojisi, genel olarak katmanlı üretim prensibine dayanmakta olup farklı fiziksel mekanizmalara sahip birçok alt teknoloji barındırmaktadır. Bu yöntemler, kullanılan malzeme türü, enerji kaynağı ve üretim hassasiyeti gibi kriterlere göre sınıflandırılır. Literatürde en yaygın bilinen ve kullanılan başlıca yöntemler arasında

Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS) ve Binder Jetting bulunmaktadır (Gibson et al., 2015).

Fused Deposition Modeling (FDM), termoplastik polimerlerin eritilerek belirli bir yol boyunca katman katman biriktirilmesi esasına dayanır. Bu yöntem, düşük maliyetli olması ve kullanıcı dostu sistemlere uygunluğu nedeniyle hem hobi amaçlı hem de akademik prototipleme süreçlerinde en çok tercih edilen tekniktir. PETG, PLA ve ABS gibi malzemeler FDM sistemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Stereolithography (SLA), ışığa duyarlı reçinelerin bir lazer kaynağı ile noktasal olarak katılaştırılması prensibine dayanır. Bu yöntemle çok ince detaylara sahip, yüksek hassasiyetli parçalar üretilebilir. Özellikle diş hekimliği, takı ve medikal modelleme alanlarında tercih edilmektedir (Ngo et al., 2018).

Selective Laser Sintering (SLS) yöntemi, toz haldeki polimer veya metal malzemelerin yüksek güçlü bir lazer ile sinterlenerek (kısmen eritilerek) birleştirilmesini sağlar. Kalıp gerektirmemesi ve dayanıklı parçalar üretebilmesi nedeniyle endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. SLS, kompleks geometrilerin destek malzemesi olmadan üretilebilmesi açısından önemli avantajlara sahiptir.

Binder Jetting ise toz halindeki malzemenin üzerine bağlayıcı bir sıvının püskürtülmesi yoluyla katman oluşturma işlemidir. Genellikle kum, seramik veya metal bazlı uygulamalarda kullanılır ve yüzey işleme gibi sonradan uygulamalar gerektirebilir (Guo & Leu, 2013).

Bu temel 3D baskı yöntemleri, teknolojinin çeşitli alanlarda esnek kullanımına olanak tanımış ve yapı mühendisliğinden biyomedikale kadar birçok disiplinde özel uygulamaların geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

2.1.3. Teknolojinin evrimi: Masaüstünden endüstriyel ölçeğe

3D baskı teknolojisinin evrimi, ilk ortaya çıktığı dönemde daha çok küçük ölçekli prototipleme amaçlarına hizmet ederken, zamanla büyük ölçekli üretim ve endüstriyel uygulamalara uyarlanacak biçimde gelişmiştir. Bu geçiş süreci hem donanım kapasitelerinin artması hem de yazılım ve malzeme teknolojilerinin ilerlemesiyle mümkün olmuştur (Berman, 2012).

İlk nesil 3D yazıcılar çoğunlukla dar hacimli baskılar yapabilen, masaüstü tipi ve düşük hızlı cihazlardı. 2005 sonrası gelişen açık kaynaklı RepRap hareketi ile birlikte bu yazıcılar bireyler, araştırma laboratuvarları ve küçük işletmeler arasında yaygınlaşmaya

başlamıştır (Jones et al., 2011). Bu dönemde FDM tipi yazıcılar baskın hale gelmiş ve eğitim, hobi ve prototipleme alanlarında büyük ivme kazanmıştır.

Ancak 2010'lu yıllardan itibaren endüstri, 3D baskının nihai ürün üretimi için kullanılabilirliğini keşfetmeye başlamış, bu da yazıcı boyutlarının büyümesine ve üretim hızlarının artmasına neden olmuştur. Özellikle havacılık, otomotiv ve inşaat sektörlerinde büyük ebatlı ve fonksiyonel parçaların üretimi gündeme gelmiştir. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda, çok eksenli robotik sistemlere sahip, birkaç metre küplük hacimde üretim yapabilen endüstriyel 3D yazıcı sistemleri geliştirilmiştir (Perkins & Skitmore, 2015).

Yapı sektöründe, robot kollarına entegre edilen ekstrüzyon kafalarıyla doğrudan yapı elemanları üretilebilmiş, prefabrikasyon süreci otomasyona taşınmıştır. Örneğin, Çin'de Winsun firması tarafından tam boyutlu bina duvarlarının 3D baskı ile üretilmesi, teknolojinin ölçeklenebilirliğini gözler önüne sermiştir. Benzer şekilde Dubai'deki 3D baskı ofis projeleri, kamu yapılarında dahi bu teknolojinin kullanılabileceğini kanıtlamıştır (Paul et al., 2018).

Sonuç olarak, 3D baskı teknolojisi başlangıçta küçük ölçekli üretimler için tasarlanmış olsa da bugün inşaat dahil olmak üzere birçok sektörde endüstriyel üretim kapasitesine ulaşmış, üretim paradigmalarını kökten dönüştürmeye başlamıştır.

2.1.4. Malzeme çeşitliliğindeki gelişmeler

3D baskı teknolojisinin gelişiminde, yazıcı donanımları kadar kullanılabilir malzeme çeşitliliğindeki artış da belirleyici rol oynamıştır. İlk dönemlerde sadece sınırlı sayıda termoplastik ile çalışan bu sistemler, günümüzde polimer, metal, seramik, kompozit ve beton esaslı malzemelere kadar geniş bir yelpazede üretim yapılmasına olanak tanımaktadır (Ngo et al., 2018).

Termoplastikler, 3D yazıcılarda en yaygın kullanılan malzeme grubudur. Özellikle PLA, ABS ve PETG gibi polimerler, Fused Deposition Modeling (FDM) teknolojisiyle yüksek verimlilikte kullanılabilmekte; bu malzemeler düşük erime sıcaklıkları, işlenebilirlik ve çevresel dayanım açısından avantaj sunmaktadır. PETG, FDM sistemlerinde hem dayanım hem esneklik açısından tercih edilen mühendislik sınıfı bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Gibson et al., 2015).

Metal esaslı malzemeler, özellikle Selective Laser Melting (SLM) veya Electron Beam Melting (EBM) gibi yöntemlerle yüksek hassasiyetle üretilebilmektedir. Bu teknikler sayesinde titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum gibi mühendislik

metallerinden son kullanım ürünleri üretilebilmektedir. Havacılık ve biyomedikal sektörlerinde bu malzemelerin kullanımı oldukça yaygındır (Herzog et al., 2016).

Son yıllarda kompozit ve hibrit malzemeler de 3D baskı süreçlerine entegre edilmeye başlanmıştır. Örneğin karbon fiber takviyeli PLA, mukavemet gerektiren parçalarda tercih edilmekte; çimento esaslı karışımlar ise yapı sektöründe “beton yazdırma” uygulamalarında kullanılmaktadır (Buswell et al., 2018). Bu malzemeler, yapı mühendisliğinde kalıpsız üretim ve form özgürlüğü açısından yeni imkanlar sunmaktadır.

Ayrıca biyomalzemeler, gıda ürünleri ve doku mühendisliği gibi niş alanlarda kullanılmakta; bu da 3D yazıcılarda kullanılan malzeme yelpazesinin yalnızca teknik değil, aynı zamanda fonksiyonel olarak da çeşitlendiğini göstermektedir.

Malzeme teknolojisindeki bu gelişmeler, 3D baskının çok farklı sektörlerle uyarlanabilirliğini artırmakta; bu da teknolojinin gelecekte daha yaygın ve fonksiyonel kullanımının önünü açmaktadır.

2.1.5. Akademik ve endüstriyel literatürde 3D baskı eğilimleri

3D baskı teknolojisinin gelişimi, yalnızca teknik ilerlemelerle sınırlı kalmayıp, akademik literatür ve endüstriyel uygulamalarda da giderek artan bir ilgiyle karşılanmıştır. Özellikle 2010’lu yıllardan itibaren yapılan yayın sayısındaki hızlı artış, bu teknolojinin çok disiplinli bir araştırma alanına dönüştüğünü ortaya koymaktadır (Chia & Wu, 2015). Malzeme bilimi, makine mühendisliği, tıp, mimarlık ve inşaat mühendisliği gibi pek çok alanda 3D baskıya yönelik akademik çalışmalar artmakta; bu çalışmalar yeni uygulama alanlarını da beraberinde getirmektedir.

Literatürdeki eğilimler incelendiğinde, ilk dönem çalışmaların büyük ölçüde prototipleme ve ürün geliştirme süreçlerine odaklandığı görülmektedir. Ancak son dönemde yapılan yayınlarda odak noktası, doğrudan son kullanım ürünlerinin üretimi, özelleştirilmiş geometriler, biyouyumlu yapılar ve yapı ölçeğinde baskı sistemleri gibi daha gelişmiş uygulamalara kaymıştır. Özellikle yapı mühendisliği alanında, beton yazdırma ve kafes sistemlerin entegrasyonu gibi yenilikçi konular öne çıkmaktadır.

Endüstriyel alanda ise başta havacılık ve otomotiv olmak üzere, ağırlık optimizasyonu, parça sayısını azaltma, tasarım esnekliği ve stok ihtiyacını minimize etme gibi faydalar nedeniyle 3D baskı sistemleri benimsenmeye başlanmıştır (Gebler et al., 2014). Yapı sektöründe ise özellikle kalıpsız üretim, düşük iş gücü kullanımı ve sürdürülebilirlik hedefleriyle 3D baskı sistemleri pilot projelerle test edilmektedir.

Geleceğe yönelik araştırmalarda, çok malzemeli baskı sistemleri, akıllı malzeme entegrasyonu, yapısal analiz ile baskı optimizasyonunun birleşimi gibi konular literatürde sıkça önerilmektedir. Ayrıca sürdürülebilir üretim, çevresel etki analizleri ve döngüsel ekonomi modelleriyle ilişkili çalışmalar da artmaktadır (Ford & Despeisse, 2016).

Bu eğilimler, 3D baskı teknolojisinin hem bilimsel hem de ticari anlamda uzun vadeli bir potansiyele sahip olduğunu ve farklı sektörlerde kalıcı bir dönüşüm başlattığını göstermektedir.

2.1.6. 3D baskı ile beton yazdırma uygulamaları

Üç boyutlu (3D) baskı teknolojisinin yapı sektöründeki en dikkat çekici kullanım alanlarından biri, doğrudan beton yazdırma (concrete 3D printing) uygulamalarıdır. Geleneksel kalıplama yöntemlerine ihtiyaç duymadan, katman katman ekstrüzyon yöntemiyle beton yapı elemanlarının yerinde veya prefabrik olarak üretilmesini mümkün kılan bu teknoloji hem üretim hızı hem de tasarım esnekliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Beton yazdırma, özellikle kalıpsız üretim kabiliyeti, karmaşık geometrilerin uygulanabilirliği ve iş gücü maliyetlerinde azalma gibi nedenlerle sürdürülebilir inşaat vizyonunun parçası olarak değerlendirilmektedir (Buswell et al., 2018).

Beton yazdırma sistemleri genellikle robotik ekstrüzyon kolları ile çalışan ve yüksek akışkanlığa sahip, erken priz alan özel beton karışımları kullanmaktadır. Bu karışımlar hem ekstrüzyon sırasında akışkan olmalı hem de katmanlar arasında hızlı priz alarak bir sonraki katmanı taşıyabilecek mukavemete ulaşmalıdır. Bu ikili özellik dengesi, genellikle uçucu kül, nano katkıları ve süperakışkanlaştırıcılar içeren karışımlar aracılığıyla sağlanmaktadır (Le et al., 2012).

Dünyada bu teknoloji ile yapılan ilk örneklerden biri, Çin merkezli WinSun firmasının ürettiği 10 adet konutluk yapı kompleksidir. Bu yapılar, yaklaşık 24 saat içinde modüler olarak basılmış ve yerinde monte edilmiştir. Benzer şekilde Apis Cor adlı Rus firması, 2017 yılında soğuk hava koşullarına dayanıklı bir evin tek parça olarak 3D yazıcı ile basılmasını sağlamış ve bu üretimi 24 saatte tamamlamıştır (Perkins & Skitmore, 2015).

Dubai Belediyesi'nin "2030 yılına kadar tüm binaların %25'ini 3D baskı ile inşa etme" hedefi doğrultusunda yürüttüğü Dubai 3D Printed Office projesi, kamusal alanda beton baskı teknolojisinin ne derece uygulanabilir olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Bu projede, katmanlı üretimle oluşturulan yapı elemanları sahada monte

edilmiş, yapı hem estetik hem de fonksiyonel açıdan tam anlamıyla kullanılabilir hale getirilmiştir. Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Dubai 3D Printed Office projesi (Department of Economy and Tourism – Dubai, n.d.)

Bu uygulamaların ortak özellikleri arasında tasarım özgürlüğü, azaltılmış malzeme kullanımı, daha az atık üretimi ve zaman tasarrufu yer almaktadır. Ayrıca 3D baskı, form optimizasyonuna olanak tanıyarak yalnızca yapısal değil, aynı zamanda mimari açıdan da yenilikçi çözümler sunmaktadır. Ancak bu sistemlerin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engeller arasında standart eksikliği, yük taşıma kapasitesine yönelik deneysel veri yetersizliği ve uygun karışım tasarımı konusundaki belirsizlikler yer almaktadır.

Sonuç olarak, beton yazdırma uygulamaları, yapı mühendisliğinde hem üretim süreçlerini dönüştürebilecek hem de yapı malzemesi tasarımına yeni bir perspektif kazandırabilecek nitelikte bir teknolojik gelişimdir. Bu alanın, özellikle katkı malzemeleri ve yazıcı sistemleri açısından daha fazla optimize edilmesiyle birlikte, gelecekte konvansiyonel yapı üretim yöntemlerine ciddi bir alternatif sunması beklenmektedir.

2.1.7. 3D baskı teknolojisinde sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler

Günümüz inşaat sektöründe enerji verimliliği, atık azaltımı ve karbon salınımının düşürülmesi gibi sürdürülebilirlik kriterleri, yapı üretim süreçlerinin yeniden tasarlanmasını zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, katmanlı üretim (additive manufacturing) teknolojisi, hem çevresel etkileri azaltan bir üretim modeli sunması hem de kaynak

kullanımını optimize etmesi bakımından sürdürülebilir yapım teknikleri arasında öne çıkmaktadır. 3D baskı teknolojisi, üretim sırasında yalnızca ihtiyaç duyulan miktarda malzeme kullanılması, atık oluşumunun minimize edilmesi ve üretim sürecinde enerji tüketiminin düşürülmesi gibi avantajları sayesinde konvansiyonel yöntemlere kıyasla çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Ngo et al., 2018).

Özellikle karbon ayak izi açısından değerlendirildiğinde, 3D baskı sistemleri, kalıp, kesim, montaj gibi süreçlerin ortadan kaldırılması sayesinde karbon emisyonunu önemli ölçüde azaltabilmektedir. Buswell ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında, beton yazdırma yönteminin geleneksel kalıplı üretime göre %30–40 oranında daha düşük karbon salımı oluşturduğu raporlanmıştır. Ayrıca üretim sahasında harç israfının engellenmesi, yapı elemanlarının daha az miktarda malzeme ile üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum hem ekonomik hem de çevresel anlamda sürdürülebilirliği desteklemektedir.

Bir diğer önemli çevresel katkı, geri dönüştürülebilir filamentlerin kullanımıdır. Termoplastik esaslı filamentler (örneğin PLA, PETG), doğru işlem görmeleri hâlinde yeniden eritilerek tekrar kullanılabilir. Bu sayede üretim sırasında ortaya çıkan hatalı parçalar veya test örnekleri yeniden hammaddelere dönüştürülebilmekte; bu da döngüsel ekonomi prensiplerine hizmet etmektedir. Özellikle PETG gibi mühendislik sınıfı malzemelerin geri dönüştürülebilirliği, 3D yazıcı uygulamalarının çevresel etkisini daha da azaltmaktadır (Gebler et al., 2014).

3D baskı sistemlerinin enerji verimliliği de dikkat çeken bir diğer unsurdur. Konvansiyonel üretim yöntemleri çoğunlukla çok sayıda makine ve işleme gereksinim duyarken, 3D baskı tek bir entegre cihazla üretim gerçekleştirebilir. Ayrıca üretimin dijital model üzerinden doğrudan yapılması, tasarım sürecinde prototip ve revizyon tekrarlarını azaltarak hem zaman hem enerji tasarrufu sağlar.

Ancak 3D baskının sürdürülebilirliği yalnızca üretim aşamasıyla sınırlı değildir. Üretilen yapı elemanlarının hafif olması, nakliye sırasında oluşan karbon emisyonunu da azaltır. Bu durum özellikle modüler yapı sistemlerinde önem kazanmaktadır. Ayrıca üretimin yerinde (on-site) yapılabilmesi, taşıma ihtiyacını ortadan kaldırarak dolaylı çevresel etkileri de en aza indirir (Perkins & Skitmore, 2015).

Günümüzde 3D baskı teknolojileri yalnızca endüstriyel üretim süreçlerinde değil, aynı zamanda doğal malzemelerle sürdürülebilir konut çözümleri üretme amacıyla da kullanılmaktadır. Bu yaklaşıma örnek olarak, İtalya'nın Massa Lombarda kentinde WASP firması tarafından inşa edilen TECLA Projesi verilebilir. Kil, su ve lif gibi yerel

ve doğal hammaddeler kullanılarak 3D baskı ile üretilen bu konut prototipi, karbon ayak izinin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması açısından önemlidir. Şekil 2.3'te gösterilmiştir. (WASP, 2021).



Şekil 2.3. TECLA Projesi – 3D Baskı ile Doğal Malzeme Kullanımıyla İnşa Edilmiş Sürdürülebilir Konut Prototipi

Sonuç olarak, 3D baskı teknolojisinin yapı sektörüne entegrasyonu, yalnızca üretim esnekliği veya estetik özgürlük sunmakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli kazanımlar sağlamaktadır. Geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı, düşük atık üretimi ve enerji verimli üretim kabiliyeti, bu teknolojiyi geleceğin yeşil üretim sistemleri arasında önemli bir yere yerleştirmektedir.

2.2. Beton, Betonarme ve Donatı Alternatifleri Üzerine Literatür Taraması

2.2.1. Beton, betonarme sistemler ve donatının yapısal rolü: Literatürde genel yaklaşım

Beton, yüksek basınç dayanımı, kolay şekillendirilebilirliği ve yerinde döküm özelliği sayesinde modern yapı sektöründe en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Ancak betonun yapısal davranışı yalnızca basınca karşı dirençlidir; çekme gerilmelerine karşı oldukça zayıftır. Bu sınırlılık, mühendislik uygulamalarında çekmeye maruz kalan bölgelerde çatlak oluşumuna ve yapısal bütünlüğün bozulmasına neden olmaktadır

(Neville & Brooks, 2010). Bu zayıflığı telafi etmek amacıyla donatı kavramı geliştirilmiş ve böylece betonarme sistemler ortaya çıkmıştır.

Betonarme, betonun basınca, çeliğin ise çekmeye karşı dayanımını bir araya getirerek yapı elemanlarının hem dayanıklı hem de ekonomik olarak inşa edilmesini sağlar. Donatı olarak genellikle yüksek dayanımlı çelik çubuklar kullanılmakta, bu çubuklar beton içerisine stratejik olarak yerleştirilerek çekme kuvvetlerini absorbe etmektedir. Donatılar aynı zamanda çatlak kontrolü, süneklik, enerji yutma ve yapısal rijitlik gibi performans kriterlerini de doğrudan etkilemektedir (Mehta & Monteiro, 2014).

Literatürde betonarme sistemlere yönelik araştırmalar, yalnızca dayanım hesaplarıyla sınırlı kalmayıp, malzeme etkileşimi, donatı-beton aderansı, çevresel etkilere dayanım ve servis ömrü gibi çok yönlü alanlarda yoğunlaşmaktadır. Özellikle çelik donatıların korozyona uğraması, betonun geçirgenliğiyle birlikte yapıların ömrünü ciddi şekilde kısaltabilmektedir. Bu nedenle, modern çalışmalarda sadece yapısal yeterlilik değil, aynı zamanda dayanıklılık (durability) ve sürdürülebilirlik de değerlendirme kriteri haline gelmiştir (Thomas et al., 2007).

Son yıllarda sürdürülebilir malzeme araştırmaları, karbon ayak izinin azaltılması, geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı ve düşük enerjiyle üretilebilen sistemlerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu bağlamda donatı sistemlerinin evrimi de hız kazanmış; yalnızca çelik değil, farklı malzeme ve geometrilere sahip yenilikçi donatı sistemleri araştırmalarda ön plana çıkmıştır. Bu gelişmelerin ışığında, klasik betonarme sistemlerin literatürde hem teorik hem de deneysel olarak yeniden ele alındığı ve sürekli gelişen bir konu başlığı olduğu söylenebilir.

2.2.2. Donatıya yönelik alternatif yaklaşımlar: malzeme ve geometri temelli çözümler

Betonarme yapılarda geleneksel çelik donatıların sunduğu çekme dayanımı ve süneklik gibi avantajlar, bu sistemin uzun yıllar boyunca tercih edilmesini sağlamıştır. Ancak çelik donatıların korozyon riski, ağır oluşu, manyetik geçirgenliği ve çevresel etkilere duyarlılığı gibi dezavantajlar, mühendisleri alternatif donatı çözümleri geliştirmeye yöneltmiştir (Al-Kharabsheh et al., 2023). Bu bağlamda son yıllarda literatürde öne çıkan alternatifler hem malzeme hem de geometrik yapı açısından çeşitlenmiş ve yapı mühendisliği alanında dikkat çeken araştırma alanlarına dönüşmüştür.

Malzeme bazlı yaklaşımlar arasında Fiber Takviyeli Polimer (FRP) donatılar önemli bir yer tutmaktadır. Cam, karbon veya aramid liflerinden üretilen bu donatılar, çeliğe göre oldukça hafif, korozyona dayanıklı ve elektromanyetik olarak geçirimsizdir. Ayrıca FRP donatılar, özellikle tuzlu suya veya kimyasal etkilere maruz kalan altyapı projelerinde avantaj sağlamaktadır (ACI 440.1R-15, 2015). Bununla birlikte, gevrek kırılma davranışı ve yangın dayanımı gibi bazı sınırlamalar da literatürde tartışma konusu olmuştur.

Bir diğer yaklaşım ise tekstille güçlendirilmiş beton (TRC) sistemleridir. Bu sistemlerde, iki boyutlu veya çok eksenli tekstil örgüler, ince kesitli beton elemanların içinde yer almakta ve özellikle hafif yapı sistemlerinde donatı görevini üstlenmektedir. TRC sistemler çatlak kontrolü, enerji yutma kapasitesi ve estetik tasarım özgürlüğü açısından dikkat çekmektedir (Brameshuber, 2006).

Günümüzde ise geometri temelli alternatifler, özellikle 3D baskı teknolojileriyle üretilen polimerik kafes sistemler ile birlikte değerlendirilmektedir. Bu yapılar, geleneksel çubuk donatı yerine kafes formda yerleştirilen polimer ağlarla betonun içine gömülerek, mekanik dayanımı artırmakta ve çatlak yayılımını sınırlandırmaktadır (Bos et al., 2016). Literatürde yapılan bazı deneysel çalışmalar, bu sistemlerin özellikle çekme ve eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkiler sağladığını ortaya koymuştur.

Bu alternatif sistemler, klasik donatı kavramının yalnızca çelikle sınırlı olmadığını ve gelecekte malzeme-geometri uyumuna dayalı yeni donatı anlayışlarının yaygınlaşacağını göstermektedir. Özellikle sürdürülebilir yapı tasarımı hedefleri doğrultusunda, bu sistemlerin hem ekonomik hem de çevresel açılardan avantaj sağladığına dair bulgular gün geçtikçe artmaktadır. Donatı türlerinin özelliklerine göre karşılaştırılması Tablo 2.1.'de sunulmuştur.

Tablo 2.1. Donatı Alternatiflerinin Karşılaştırması

Donatı Türü	Malzeme Yapısı	Çekme Dayanımı	Korozyon Direnci	Ağırlık	Süneklik	Yangın Dayanımı	Üretim Teknolojisi
Çelik Donatı	Yüksek karbonlu çelik	Çok yüksek	Düşük	Ağır	Yüksek süneklik	Orta	Çekme haddeleme
FRP Donatı	Cam karbon aramid lifli polimer	Orta yüksek (türe göre)	Yüksek	Çok hafif	Düşük orta (gevrek)	Düşük	Pultrüzyon sargı
Tekstil Donatı	Cam veya karbon örgü tekstil Polimer	Orta	Yüksek	Çok hafif	Orta	Düşük	Düz örgü 3D tekstil
Kafes Donatı	bazlı 3D baskı yapılar	Deneysel Orta	Yüksek	Hafif	Geometriye bağlı	Malzemeye bağlı	3D baskı (FDM, SLS)

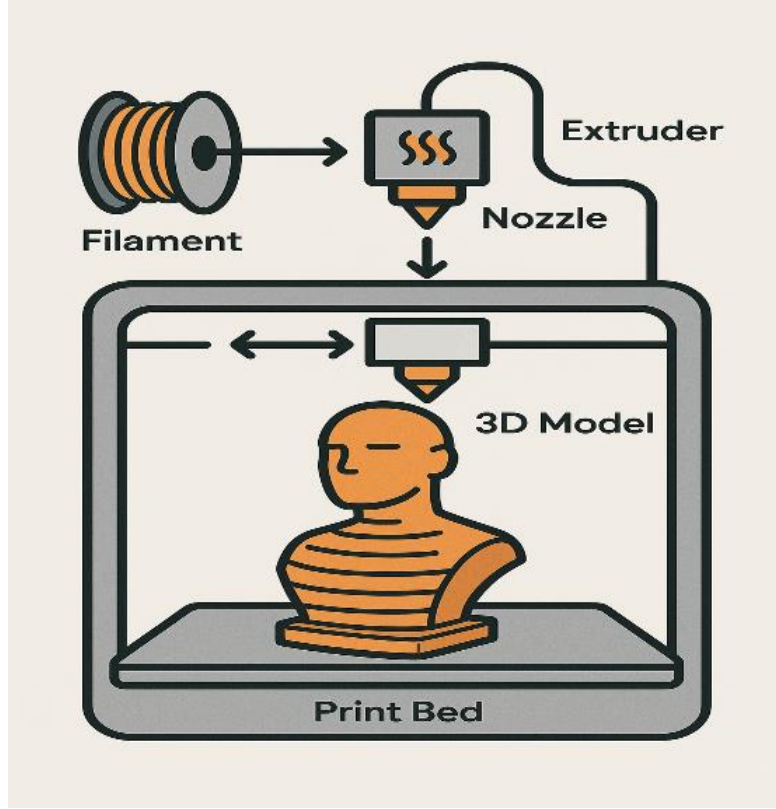
2.3. Polimerik Malzemeler ve 3D Baskı Teknolojisinin İnşaat Sektöründeki Kullanımı

Son yıllarda yapı mühendisliği uygulamalarında malzeme çeşitliliği ve üretim teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, polimer esaslı malzemelerin önemini artırmıştır. Özellikle 3D yazıcı teknolojinin yaygınlaşması ile birlikte, termoplastik polimerler yapı elemanlarının üretiminde alternatif malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, yapı sektöründe en çok tercih edilen polimer türlerinden biri olan PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol), hem dayanım hem de üretim kolaylığı açısından öne çıkan bir malzeme olarak dikkat çekmektedir (Ngo et al., 2018).

PETG, yüksek darbe dayanımı, kimyasal stabilitesi ve düşük termal deformasyon eğilimi ile yapı mühendisliği uygulamaları için uygun bir termoplastiktir. Aynı zamanda, 3D yazıcı teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan Fused Deposition Modeling (FDM) yöntemiyle sorunsuz şekilde üretilebilmekte ve karmaşık geometrik yapıların hayata geçirilmesine olanak sağlamaktadır (Rankouhi et al., 2016). Bu özellikleri, PETG'yi sadece modelleme amacıyla değil, aynı zamanda mekanik yük taşıyıcı sistemlerin üretiminde de tercih edilir hale getirmiştir.

3D yazıcı teknolojisi (Additive Manufacturing), geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha az malzeme israfı ile daha karmaşık yapıların üretimini mümkün kılar. Bu yöntem, katmanlı üretim tekniğine dayandığı için özellikle mimari formların özgürce

tasarlanmasına, istenilen toleranslarla uygulanmasına ve yerinde üretim imkânı sunmasına olanak tanır (Bos et al., 2016). Bu üretim süreci Şekil 2.4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4. 3D Baskı Süreci Şeması

Polimerik yapıların 3D yazıcılar ile üretilebilmesi, geleneksel kalıp ve donatı sistemlerine olan bağımlılığı azaltmakta; özellikle geçici yapı elemanları, modüler sistemler ve formu optimize edilmiş taşıyıcı unsurlar açısından maliyet ve zaman açısından avantaj sunmaktadır (Perkins & Skitmore, 2015). Bu teknoloji, mühendislik hesaplamalarına uygun şekilde modellenmiş ve üretim öncesi bilgisayarda doğrulanmış polimerik bileşenlerin üretilmesini sağlar.

Ayrıca, 3D baskı teknolojisinin yapı mühendisliği açısından en önemli katkılarından biri de üretim sürecinin otomasyonudur. İnsan hatasını azaltan, iş gücü ihtiyacını minimize eden ve seri üretime geçişi kolaylaştıran bu sistemler, endüstri 4.0 vizyonu doğrultusunda yapı sektöründe dijitalleşmeyi de desteklemektedir (Wu et al., 2016).

3D yazıcı teknolojileri, kullanılan malzeme türü, üretim hassasiyeti ve uygulama alanlarına göre farklı sınıflara ayrılmaktadır. Başlıca kullanılan sistemler arasında Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA) ve Selective Laser Sintering (SLS) yöntemleri yer almaktadır. Bu yöntemler; baskı hassasiyeti, yüzey kalitesi, üretim hızı ve malzeme çeşitliliği bakımından belirgin farklılıklar göstermektedir. Özellikle FDM yöntemi, PETG gibi termoplastik polimerlerle yüksek uyum göstermesi sayesinde, yapı mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Ngo et al., 2018; Gebler et al., 2014). Tablo 2.2'de, farklı 3D yazıcı türlerinin teknik özellikleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 2.2. 3D Yazıcı Türlerinin Özellik Karşılaştırması

Yazıcı Türü	Kullanılan Malzeme	Baskı Hassasiyeti	Üretim Hızı	Yüzey Kalitesi	Uygulama Alanı
FDM	PLA ABS PETG	Orta	Yüksek	Orta	Prototipleme İnşaat
SLA	Reçine	Yüksek	Düşük	Çok Yüksek	Medikal, Takı
SLS	Naylon, Poliamid	Yüksek	Orta	Yüksek	Otomotiv Havacılık

Bu bağlamda değerlendirildiğinde, polimerik malzemelerin 3D yazıcı teknolojisi ile üretimi, yapı mühendisliği alanında yalnızca formel tasarım avantajı değil, aynı zamanda mekanik performans, üretim hızı ve sürdürülebilirlik açısından da yenilikçi çözümler sunmaktadır. PETG gibi mühendislik polimerlerinin bu sistemlerle entegre edilerek yapı elemanlarına dönüştürülmesi, önümüzdeki yıllarda betonarme sistemlerin evriminde belirleyici bir rol oynayacaktır.

2.3.1. Polimerlerin termal ve mekanik dayanım açısından değerlendirilmesi

3D baskı teknolojisinde kullanılan polimer malzemelerin seçiminde, mekanik dayanımın yanı sıra termal kararlılık, yangın davranışı ve şekil deformasyon eğilimi gibi parametreler büyük önem taşır. İnşaat ve yapı mühendisliği uygulamaları açısından, bu malzemelerin taşıyıcı yapılarla entegrasyonu sırasında maruz kalacakları çevresel ve yapısal etkiler göz önünde bulundurularak uygun malzeme seçimi yapılmalıdır.

Yaygın olarak kullanılan üç ana polimer olan PETG (Polietilen Tereftalat Glikol), PLA (Polilaktik Asit) ve ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), farklı üretim ve kullanım

koşullarına sahip olup birbirlerinden önemli teknik farklarla ayrılır. PETG, FDM yöntemiyle kolay basılabilen, yüksek darbe dayanımına ve iyi kimyasal direnç özelliklerine sahip yarı kristal bir polimerdir. PLA, biyobozunur olması ve düşük üretim sıcaklıkları ile çevre dostu bir seçenek sunarken, ABS daha yüksek sıcaklıklara dayanabilen fakat baskı sırasında büzülme ve eğilme (warping) eğilimi yüksek olan bir mühendislik plastiğidir (Ngo et al., 2018).

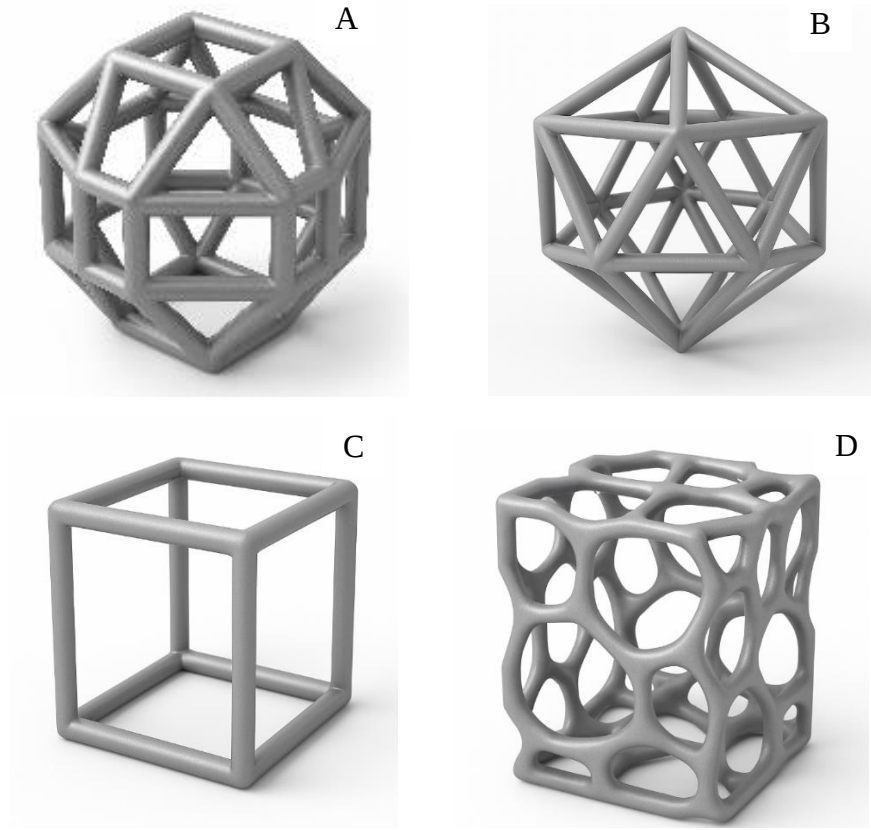
Termal davranış açısından değerlendirildiğinde, PETG'nin cam geçiş sıcaklığı (T_g) yaklaşık 80–90 °C, PLA'nın ise 60–65 °C civarındadır. ABS ise yaklaşık 105 °C ile en yüksek termal dayanım değerine sahiptir. Ancak ABS'nin baskı sürecinde emisyon üretmesi ve yangın altında toksik gaz salımı nedeniyle yapı mühendisliği uygulamalarında sınırlamaları vardır (Rankouhi et al., 2016).

Mekanik açıdan ise PETG, PLA'ya göre daha yüksek darbe ve çekme dayanımı gösterirken, ABS ise daha esnek bir yapı sunarak titreşim ve darbe emici özellikleriyle öne çıkar. PLA ise gevrek kırılma eğilimi gösterdiği için yüksek gerilme altındaki uygulamalarda sınırlıdır.

2.4. Kafes (Lattice) Sistemler: Yapısal Özellikler ve Uygulama Alanları

Kafes yapılar (lattice structures), düzenli ve tekrarlı geometrik birimlerden oluşan hafif ancak dayanıklı sistemlerdir. Bu tür yapılar, hem doğal organizmalarda (örneğin kemik dokusu ve deniz kabukları gibi biyolojik yapılarda) hem de mühendislik uygulamalarında karşılaşılmaktadır. Yapısal mühendislikte kafes sistemlerin kullanımı, malzeme kullanımını optimize etmek, ağırlığı azaltmak ve aynı zamanda yüksek mekanik performans elde etmek amacıyla son yıllarda hızla yaygınlaşmıştır (Gibson & Ashby, 1999).

Kafes yapılar genellikle tekrarlayan hücre geometrilerine sahiptir. Bu hücreler kübik, oktahedral, rombiküboktahedral gibi farklı formasyonlarda modellenebilir. (Şekil 2.5.) Bu yapıların önemli bir avantajı, yük taşıma yeteneklerini geometrik düzenlemeler yoluyla artırabilmeleridir. Örneğin rombiküboktahedron tipi yapı, çok yönlü yüklemeler altında dahi stabilite sağlayabilen izotropik özellik gösterir.



Şekil 2.5. Farklı Formasyonlarda Kafes Hücreleri Temsili

Yapı mühendisliği açısından bakıldığında, kafes sistemlerin en belirgin avantajlarından biri, özgül dayanımın (birim kütle başına düşen dayanım) yüksek oluşudur. Bu özellik sayesinde, düşük yoğunluklu polimerik malzemelerden üretilmiş bir kafes yapı bile geleneksel katı hacimli elemanlara benzer veya daha iyi mekanik performans sergileyebilir. Bu yapıların yüksek yüzey alanına sahip olması, beton gibi matris malzemeleri ile yapılan kompozit sistemlerde bağ dayanımını artırarak genel yapısal performansa katkı sağlar (Maskery et al., 2017). Farklı kafes geometrilerinin performans özellikleri Tablo 2.3'te özetlenmiştir.

Tablo 2.3. Farklı Kafes Geometrilerinin Yapısal Karşılaştırması

Kafes Geometrisi	Gözeneklilik (%)	Özgül Dayanım	Yük Taşıma Kapasitesi	Yapısal Uygulama Örneği
Rombiküboktahedron	65–75	Yüksek	Orta Yüksek	Betonarme dolgu, enerji emici eleman
Oktet Truss	70–80	Çok Yüksek	Yüksek	Havacılık, taşıyıcı iskelet
Kübik (Cubic)	50–60	Orta	Orta	Geçici yapı iskeleti
Tetrakaidekahedron	60–70	Yüksek	Yüksek	Biyomedikal iskelet yapıları
Voronoi	Değişken	Orta–Yüksek	Düşük Orta	Doğal biçim taklitli yapı yüzeyleri

Kafes yapıların üretimi, geleneksel imalat yöntemleriyle oldukça sınırlıydı. Ancak 3D baskı teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, karmaşık geometriye sahip bu sistemlerin üretimi pratik hâle gelmiştir. Fused Deposition Modeling (FDM) veya Selective Laser Sintering (SLS) gibi yöntemlerle üretilebilen bu yapılar, özellikle yapı sektöründe geçici kalıp sistemleri, form optimize taşıyıcılar ve hibrit donatı elemanları olarak kullanılmaktadır (Yang et al., 2020).

Kafes sistemlerin bir diğer uygulama alanı ise enerji emici yapılardır. Darbe yükleri altında enerji sönmüleme kapasiteleri sayesinde, çarpışma güvenliği gerektiren yapılarda veya sismik etkilerin absorpsiyonunda bu sistemler ideal çözümler sunmaktadır. Ayrıca, modüler olarak tasarlanabilmeleri ve montaj kolaylıkları, prefabrik yapı sistemlerinde entegre çözümler üretme potansiyelini ortaya koymaktadır (Gibson & Ashby, 1999; Zhu et al., 2010).

Bu yapıların inşaat mühendisliği dışında, havacılık, otomotiv ve biyomedikal alanlarda da yaygınlaştığı görülmektedir. Özellikle kemik doku mühendisliğinde kullanılan titanyum bazlı kafes implantlar, gözenekli yapıları sayesinde osteointegrasyon sürecini hızlandırmakta ve mekanik uyumluluk sağlamaktadır. Benzer şekilde, yapı mühendisliğinde de malzeme ve geometri optimizasyonu ile üretilen kafes sistemler, klasik donatılı betonarme elemanlara kıyasla daha düşük karbon ayak iziyle üretilebilmektedir (Chen et al., 2021).

Sonuç olarak, kafes yapı sistemleri sadece mimari estetik ve form çeşitliliği açısından değil, aynı zamanda mühendislik hesaplarıyla entegre edilebilen yüksek performanslı yapısal çözümler olarak öne çıkmaktadır. Gelecekte bu yapıların, özellikle sürdürülebilir ve dijital üretim süreçleriyle birlikte daha fazla yaygınlaşması beklenmektedir.

2.5. Katkı Malzemeleri ve Beton Harç Teknolojileri

Beton, yapı sektöründe en yaygın kullanılan kompozit malzeme olmakla birlikte, içeriğindeki bileşenlerin optimize edilmesi sayesinde performansı ve sürdürülebilirliği artırılabilir. Modern beton teknolojileri, yalnızca çimento, su, agrega karışımı ile sınırlı kalmayıp, çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler bakımından ileri düzey performans gösterebilecek yeni nesil beton karışımlarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, uçucu kül (fly ash), nano katkılar (örneğin Nano Kalsit (NC) ve Nano CaCO_3) ile süperakışkanlaştırıcı katkılar (superplasticizers) hem araştırma alanında hem de uygulamada sıklıkla tercih edilmektedir.

Uçucu kül, termik santrallerde kömür yakılması sonucu elde edilen ve puzolanik özellik gösteren bir yan üründür. İnce yapısı ve silis içeriği nedeniyle, çimento hidratasyon reaksiyonlarına katılarak ikincil C-S-H jel oluşumunu destekler. Bu durum, betonun geçirimsizliğini azaltırken, uzun vadede basınç dayanımını da artırmaktadır (Mehta & Monteiro, 2014). Ayrıca uçucu kül, betonun işlenebilirliğini artırdığı gibi, ısı oluşumunu da düşürerek büyük hacimli dökümlerde çatlama riskini azaltır.

Nano katkılar ise, son yıllarda beton teknolojisinde devrim niteliğinde yenilikler getiren bir diğer grup katkı malzemesidir. Özellikle NC yüksek özgül yüzey alanı sayesinde çimento hamuruna entegre olduğunda mikroyapısal boşlukları doldurarak yoğun bir yapı oluşturur. Bu durum, betonun hem erken yaş dayanımını hem de nihai mekanik dayanımını olumlu etkiler. Benzer şekilde NCaCO_3 , hem çekirdeklenme etkisiyle hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırmakta hem de C-S-H fazının daha homojen oluşmasını sağlamaktadır. Bu nano katkılar aynı zamanda betonun başlangıç reolojisini de etkilemekte ve homojen bir karışım elde edilmesini kolaylaştırmaktadır (Said et al., 2012).

Tablo 2.4'te çeşitli nano katkılarının betona olan etkileri özetlenmiştir. Buna göre, NC ve NCaCO_3 , içeren harçlar, referans numunelere kıyasla %15-30 oranında daha yüksek erken basınç dayanımı göstermektedir. Ayrıca, bu katkılarının mikro yapısal yoğunluğu artırarak karbonatlaşma derinliğini azalttığı da literatürde belirtilmektedir (Zhang et al., 2010).

Tablo 2.4. Nano Katkıların Betona Etkileri (Zhang et al., 2010)

Nano Katkı Türü	Erken Basınç Dayanımı Artışı (%)	Mikroyapısal Etki
Nano Kalsit (NC)	%20–30	Yoğun yapı – düşük boşluk oranı, karbonatlaşma azalması
Nano CaCO ₃	%15–25	Hidratasyon ürünlerinin artışı, daha sıkı yapı

Süperakışkanlaştırıcı katkıları (SP), beton karışımının işlenebilirliğini artırmak amacıyla kullanılan yüksek performanslı kimyasal katkı malzemeleridir. Bu katkıları sayesinde, katkısız karışımlara kıyasla %20–30 daha düşük su içeriğiyle benzer işlenebilirlik sağlanabilmektedir (Ramachandran et al., 2003).

Bu katkıların sinerjik kullanımı ise yüksek performanslı beton (HPC) veya ultra yüksek performanslı beton (UHPC) üretiminde kilit rol oynamaktadır. Örneğin, nano katkıları ile SP'lerin birlikte kullanılması sonucunda hem mikroyapısal yoğunluk artmakta hem de reolojik davranış optimize edilerek kalıplanabilirlik iyileştirilmektedir. Özellikle 3D baskı ile üretilen yapı elemanlarında karışımın hem ekstrüzyon hem de katmanlar arası yapışma açısından uygun viskozitede olması gerekmektedir. Bu da ancak bu tür katkı kombinasyonları ile sağlanabilmektedir (Le et al., 2012).

Ayrıca uçucu kül gibi mineral katkıları, çimento miktarının azaltılmasına yardımcı olarak karbon ayak izinin düşürülmesini sağlar. Bu durum, sürdürülebilir yapı üretiminde çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik önemli bir adımdır. Beton karışımlarında çimento yerine %25–40 oranında uçucu kül kullanımı hem ekonomik hem de çevresel avantajlar sunmaktadır.

Sonuç olarak, uçucu kül, nano katkıları ve süperakışkanlaştırıcıları gibi katkı malzemeleri, klasik beton harçlarından farklı olarak hem performans hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Bu katkıların uygun oranlarda ve birlikte kullanımı, 3D baskı teknolojisi ile entegre yapı sistemlerinin üretimi için kritik önemdedir. Modern beton teknolojilerinde bu tür katkılarıyla optimize edilmiş karışımlar, ileri düzey yapısal uygulamaların ve mühendislik çözümlerinin temelini oluşturmaktadır.

2.6. Mekanik Performansın Değerlendirilmesi

Yapı malzemelerinde mekanik performans hem güvenlik hem de kullanım ömrü açısından belirleyici en temel parametrelerden biridir. Betonun mekanik özellikleri, kullanılan agregaların türü, su/çimento oranı, kür koşulları ve katkı malzemelerinin

varlığı gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörlerin etkileşimi, betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü ve çatlama davranışı gibi mekanik parametrelerini doğrudan belirlemektedir. Özellikle katkı maddeleriyle geliştirilen beton karışımlarının 3D baskı teknolojileriyle üretimi, geleneksel üretim yöntemlerine göre daha optimize ve dayanıklı yapılar elde edilmesini sağlamaktadır.

Betonun mekanik dayanımı, en yaygın olarak basınç dayanımı (compressive strength) ile ifade edilmektedir. Bu parametre, özellikle yapı taşıyıcı sistemlerinde güvenli sınırların belirlenmesi açısından kritik önemdedir. Yapılan deneylerde uçucu kül, nano kalsit (NC), nano kalsiyum karbonat (NCaCO_3) içeren beton numuneleri arasında anlamlı dayanım farklılıkları gözlemlenmiştir.

Katkılı numunelerin erken yaşta gösterdiği dayanım performansı, özellikle nano katkıların mikroyapısal iyileştirici etkisinden kaynaklanmaktadır. Nano kalsit partikülleri, beton matrisine dağılmış şekilde yerleşerek mikro çatlak ilerlemesini baskılamakta ve çatlak başlangıçlarını minimize etmektedir (Zhang et al., 2010). Benzer şekilde, uçucu külün puzolanik etkisi sayesinde geç hidratasyon süreçleri tetiklenmekte ve uzun vadede dayanım değerleri artırılmaktadır.

Elastisite modülü (modulus of elasticity), betonun rijitliğini belirleyen bir parametredir ve yüksek dayanımlı betonlarda bu değer daha yüksektir. Katkılı karışımlarda gözlenen artış, mikroyapı sıklığı ve çimento matrisinin homojenliğindeki gelişmelerle ilişkilidir. (Li et al., 2006).

Ayrıca deneysel çalışmalarda, katkıların çatlak ilerleme hızı ve nihai kopma şekli üzerinde de belirgin etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Katkısız numunelerde gevrek kırılma davranışı ön plandayken, katkılı numunelerde plastik deformasyon eğilimi artmış ve çatlak gelişimi geciktirilmiştir.

Tüm bu sonuçlar göstermektedir ki; uçucu kül, NC, NCaCO_3 ve SP gibi katkı maddeleri, betonun sadece dayanımını değil, aynı zamanda kırılma karakterini ve enerji absorpsiyon kapasitesini de iyileştirmektedir. Bu da özellikle 3D yazıcı ile üretilen yapı elemanlarında hem üretim güvenliği hem de servis performansı açısından büyük avantajlar sunmaktadır.

2.7. 3D Baskı ile Üretilen Kafes Sistemlerinin Betonla Entegrasyonu

Yapı mühendisliğinde son yıllarda hızla gelişen dijital üretim teknolojileri, klasik malzeme kullanımına alternatif yaklaşımları beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda, 3D baskı yöntemiyle üretilen kafes sistemlerin betonarme yapılara entegre edilmesi, sadece yenilikçi bir malzeme çözümü değil, aynı zamanda tasarım ve üretim sürecinde devrimsel bir dönüşüm olarak değerlendirilmektedir. Kafes sistemlerin sağladığı geometrik esneklik, düşük yoğunluk ve fonksiyonel adaptasyon imkânı, onları geleneksel donatı sistemlerine kıyasla daha avantajlı hale getirmektedir. Özellikle serbest biçimli ve karmaşık geometrilere sahip yapıların üretiminde, 3D baskının sunduğu yerinde üretim kabiliyeti, malzeme israfını azaltmakta ve sürdürülebilir yapı tasarımlarına önemli katkılar sunmaktadır.

3D baskı teknolojisi ile üretilen PETG esaslı kafes sistemler, beton içerisinde hem donatı görevi gören bir takviye unsuru hem de çekirdek yapı olarak kullanılabilir. Bu tür hibrit sistemlerde polimer kafesin geometrik özellikleri, yük taşıma mekanizmasına doğrudan etki ederken; beton ile olan ara yüzey aderansı, sistemin bütüncül dayanımını belirleyen kritik bir faktör olmaktadır. Literatürde farklı kafes geometrilerinin performansını inceleyen çalışmalar, özellikle yüksek gözeneklilik oranına sahip olanların betonla daha iyi kenetlendiğini ve böylece yük aktarım kapasitesini artırdığını ortaya koymaktadır (Xu et al., 2024).

Entegrasyon sürecinde en dikkat çekici parametrelerden biri, polimer yüzeyinin beton matrisine tutunabilirliğini artıracak şekilde tasarlanmasıdır. 3D yazıcı ile katmanlı üretim sonucunda PETG yüzeyinde doğal olarak oluşan pürüzler, çimento matrisine mekanik kilitlenmeyi güçlendirmektedir. Bu etki, yüzeyin ek işlemlerle modifiye edilmesiyle daha da artırılabilir. Örneğin; mikro çıkıntılar, oluklar veya özel yüzey kaplamaları ile aderans kuvveti iyileştirilebilir. Benzer şekilde literatürde polimer yüzeylerin plazma ile işlenmesi veya kimyasal aşındırıcılarla modifikasyonu, ara yüzey dayanımını artırmada etkili yöntemler olarak rapor edilmiştir (Gibson et al., 2021).

DeneySEL çalışmalarda farklı geometriye sahip PETG kafeslerin betonla birleşim performansı incelendiğinde, özellikle rombiküboktahedron ve benzeri yüksek simetriye sahip yapılarda aderansın belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. Betonun taze halde kafesin gözenekli yapısına rahatça nüfuz etmesi, ara yüzeyde boşluk oluşumunu engelleyerek bütüncül bir yapı elde edilmesini sağlamaktadır. Bu durum, çatlak ilerlemesini sınırlandırmakta ve yük altında daha sünek bir davranış sergileyen beton elemanların

tasarlanmasına olanak vermektedir. Çatlak kontrolü, yapıların dayanıklılığı açısından kritik bir parametre olduğundan, 3D baskı ile üretilmiş kafes sistemlerin katkısı yalnızca mekanik dayanım artışıyla sınırlı kalmayıp, yapısal güvenilirliği de doğrudan etkilemektedir (Perkins & Skitmore, 2015).

Hibrit yapıların tasarımında beton ve polimerik kafes sistemin mekanik uyumu da büyük önem taşımaktadır. PETG malzemesinin elastisite modülünün betonunkinden düşük olması, tek başına yüksek taşıma kapasitesi sunmasını engelleyebilir. Ancak stratejik yerleştirme teknikleri, hibrit takviye tasarımı ve yüksek dayanımlı beton karışımları ile bu dezavantaj optimize edilebilmektedir. Örneğin; nano-silika, uçucu kül veya nano kalsit gibi katkı maddeleri ile zenginleştirilmiş yüksek dayanımlı betonlar ile PETG kafeslerin birlikte kullanımı, çekme gerilmelerinin karşılanmasında önemli katkılar sunabilmektedir. Bu tür hibrit yaklaşımlar, betonarme yapıların süneklik ve enerji yutma kapasitelerini artırarak deprem mühendisliğinde de uygulanabilir çözümler doğurmaktadır (Awoyera & Adesina, 2020).

Ayrıca 3D baskı ile üretilmiş bu kafes sistemler, sadece mekanik performansı değil, aynı zamanda yapısal izleme imkânlarını da geliştirmektedir. Kafes geometrisinin iç boşluklarına yerleştirilebilecek fiber optik sensörler veya gömülü piezoelektrik algılayıcılar, yapı sağlığı izleme (SHM) sistemlerinin beton içerisinde entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. Böylece yapının servis süresi boyunca deformasyon, çatlak oluşumu ve yük transferi gibi parametreler gerçek zamanlı izlenebilir hale gelmektedir. Bu durum, dijitalleşmenin ve yapay zekâ tabanlı analizlerin de katkısıyla akıllı yapı tasarımlarının önünü açmaktadır (Kantaros et al., 2025).

Sonuç olarak, 3D baskı ile üretilmiş PETG esaslı kafes sistemlerin betonarme yapılara entegrasyonu, yapısal performansı artırmanın yanı sıra sürdürülebilirlik, üretim kolaylığı ve fonksiyonel adaptasyon gibi çok boyutlu katkılar sunmaktadır. Önümüzdeki yıllarda hem araştırma dünyasında hem de uygulama alanlarında bu tür hibrit sistemlerin daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. Bu yaklaşım, yapı mühendisliğinde yalnızca dayanım odaklı değil, aynı zamanda çevresel, ekonomik ve dijitalleşme temelli yeni bir paradigma değişiminin habercisi niteliğindedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneysel Tasarımın Genel Yapısı

Bu çalışmada, farklı katkı malzemeleri içeren harçlarının ve 3D baskı ile üretilmiş polimerik kafes sistemlerin etkileşiminin çimento esaslı kompozitlerin mekanik performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneysel tasarım hem nanomalzeme hem de mineral katkıların etkilerini karşılaştırmalı olarak inceleyebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Bu doğrultuda toplam 6 farklı harç karışımı tasarlanmıştır. Her karışım için 3'er adet numune olmak üzere toplamda 18 numune üretilmiştir. Üretilen numuneler 7, 28 ve 180 günlük kür sürelerine tabi tutularak zaman içinde dayanım gelişimi değerlendirilmiştir.

Hazırlanan 6 farklı içerik aşağıda belirtilmiştir:

- M1: Katkısız referans harç
- M2: Uçucu kül katkılı harç
- M3: Nano kalsit katkılı harç
- M4: Uçucu kül + Nano kalsit katkılı harç
- M5: Nano CaCO_3 katkılı harç
- M6: Uçucu kül + Nano CaCO_3 katkılı harç

Karışıma göre değişkenlik göstermekle birlikte tüm karışımlar için kullanılan karışım malzemeleri çimento, uçucu kül (F tipi), nano kalsit (NC), nano kalsiyum karbonat (NCC, nano CaCO_3), agrega (maksimum dane boyutu 0.125 mm), içme suyu ve hiper akışkanlaştırıcıdır. Hiper akışkanlaştırıcı olarak yeni nesil polikarboksilat eter bazlı bir ürün olan Glenium 51 kullanılmıştır. Deneylerde her bir içerik için kullanılan malzeme miktarları Tablo 3.1'de metreküp bazlı kg cinsinden verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan Malzeme Miktarları (kg/m^3)

1 m^3								
Karışım #	ÇİMENTO	UÇUCU KÜL	AGREGA	SU	NC	NCC	W/B	A/B
M1	1042	-	622	420	-	-	0,40	0,60
M2	605	405	605	399	-	-	0,40	0,60
M3	1005	-	600	422	50,25	-	0,40	0,60
M4	565	405	580	404	48,50	-	0,40	0,60
M5	1005	-	600	422	-	50,25	0,40	0,60
M6	565	405	580	404	-	48,50	0,40	0,60

Deney sürecinde, her karışım için belirlenen bileşenler, karışım sırasına uygun olarak çimento harcı mikserine ilave edilmiştir. Öncelikle karışımın bileşenleri (çimento, agrega, katkı maddeleri) homojen bir dağılım sağlanacak şekilde mikser içerisine eklenmiş, ardından belirlenen oranlarda su ve süperakışkanlaştırıcı karışıma dahil edilmiştir. Karışım tamamlandıktan sonra elde edilen taze harç, kalıplara yerleştirilmek üzere hazırlanmıştır. Hazırlık aşamasında, kalıplar döküm öncesi yağlanmış ve birleşim noktalarına sıcak silikon uygulanarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Polimerik kafes sistemleri kalıba yerleştirildikten sonra çimento harcı dökümüne geçilmiştir.

Her içerik için karıştırma ve döküm süreci benzer şekilde yürütülmüştür. Malzemeler (çimento, agrega ve katkıları) önce homojen şekilde karıştırılmış, ardından su eklenerek ön karıştırma yapılmıştır. Sonrasında SP ilavesi ile birlikte tüm karışım blender kullanılarak 2-3 dakika süreyle homojen kıvam alana dek karıştırılmıştır. Harçlar, kalıplara yerleştirildikten sonra 4 dakika boyunca vibrasyon uygulanarak boşluk oluşumu en aza indirilmiştir.

Dökümden 24 saat sonra numuneler kalıptan çıkarılmış, kirece doymun su içeren kür koşullarına alınarak 7, 28 ve 180 günlük kür programına göre numaralandırılmış ve numunelerin test edileceği kür yaşına kadar numuneler kür koşullarında bekletilmiştir. Bu detaylı deneysel yaklaşım sayesinde katkı türleri ve kür süresi gibi değişkenlerin, çimento harcının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri sistematik biçimde analiz edilebilmiştir.

3.2. Malzeme Özellikleri ve Seçim Kriterleri

Bu çalışmada kullanılan tüm malzemeler, mekanik dayanım, işlenebilirlik, sürdürülebilirlik ve üretim teknolojisine uyumluluk kriterleri doğrultusunda özenle seçilmiştir. Aşağıda, çalışmada kullanılan her bir malzeme başlığı altında teknik özellikleri ve seçim gerekçeleri detaylı şekilde açıklanmıştır.

3.2.1. Çimento (CEM I 42.5)

Çimento olarak TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5 R Normal Portland çimentosu tercih edilmiştir. Bu tip çimento, erken ve nihai dayanım açısından kararlı bir performans sunmakta, hidrasyon ürünlerinin oluşumunu hızlandırmakta ve betonun ilk

sertleşme süresini optimize etmektedir. Kimyasal yapısı, en yüksek oranda klinker içeriğinden dolayı (%95-%100) mineral katkılarla yüksek uyumluluk göstermesi nedeniyle özellikle katkılı beton tasarımlarında tercih edilmektedir (Neville, 2011). Ayrıca çimentonun teknik özellikleri Tablo 3.2’de sunulmuştur.

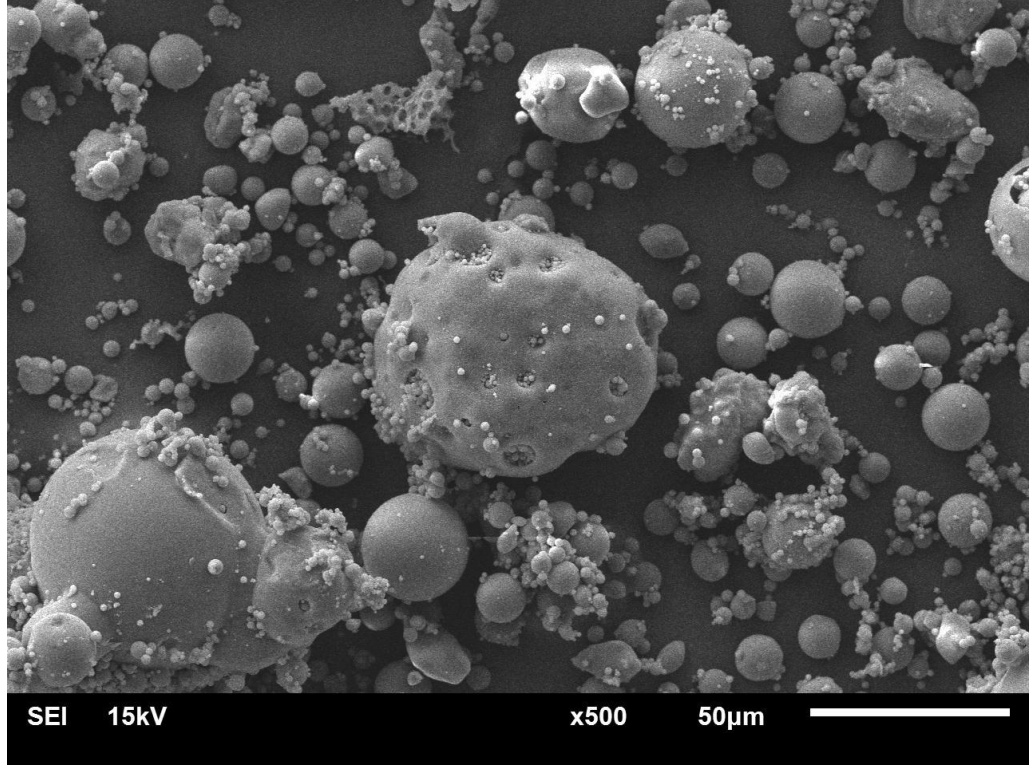
Tablo 3.2. CEM I 42.5 R Çimento Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014)

Özellik	Birim	Tipik Değer / Aralık
SiO ₂ (Silisyum Dioksit)	%	19 – 23
Al ₂ O ₃ (Alüminyum Oksit)	%	4 – 7
Fe ₂ O ₃ (Demir Oksit)	%	2 – 4
CaO (Kalsiyum Oksit)	%	60 – 65
MgO (Magnezyum Oksit)	%	≤ 5
SO ₃ (Sülfat)	%	≤ 3.5
Kızdırma Kaybı (LOI)	%	≤ 5
Özgül Ağırlık	g/cm ³	3.10 – 3.15
Blaine İncelik	cm ² /g	3200 – 3600
Priz Başlangıç Süresi	dakika	≥ 60
Priz Sonu Süresi	dakika	≤ 600
Basınç Dayanımı (2 gün)	MPa	≥ 20
Basınç Dayanımı (28 gün)	MPa	42.5 – 62.5 (sınıf aralığı)

3.2.2. Uçucu kül (F Tipi)

Uçucu kül, termik santrallerde kömür yanması sonucu oluşan ve puzolanik özellik taşıyan bir mineral katkı maddesidir. Kullanılan uçucu kül ASTM C618'e göre F Tipi sınıfındadır. Puzolanik reaksiyonlar sayesinde içeriğindeki Al₂O₃ veya SiO₂'nin reaksiyona girme durumuna göre çimentodaki Ca(OH)₂, sönmüş kireç, ile reaksiyona girerek C-A-H (Al₂O₃ tepkimeye girerse) veya C-S-H (SiO₂ tepkimeye girerse) jellerinin oluşumunu desteklemekte ve ileri yaş dayanımı artırmaktadır. Böylece oluşan ilave hidrasyon reaksiyonları ve fiziksel dolgunun da bir neticesi olarak gözenek yapısını düzenleyerek geçirimsizliği azaltmakta ve çevresel sürdürülebilirlik sağlamaktadır (Mehta & Monteiro, 2014).

Uçucu kül, çimento miktarını azaltarak betonun çevresel etkilerini düşürmek ve uzun vadeli dayanımını artırmak amacıyla çok sayıda çalışmada kullanılmıştır (Hemalatha & Ramaswamy, 2017). Şekil 3.1’de uçucu kül katkılı beton SEM görüntüsü sunulmuştur. Teknik özellikleri Tablo 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.1. Uçucu Kül Katkılı Betonun SEM Görüntüsü

Tablo 3.3. Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri (ASTM C618; Mehta & Monteiro, 2014).

Özellik	Birim	Değer
SiO ₂ (Silisyum Dioksit)	%	≥ 25
Al ₂ O ₃ (Alüminyum Oksit)	%	10 – 30
Fe ₂ O ₃ (Demir Oksit)	%	4 – 10
CaO (Kalsiyum Oksit)	%	<10 (Sınıf F için tipik)
Kızdırma Kaybı (LOI)	%	≤ 6
Na ₂ O + K ₂ O (Alkali Toplamı)	%	0.5 – 3
Özgül Ağırlık	g/cm ³	2.2 – 2.6
Blaine Yüzeyi	cm ² /g	3000 – 5000
Partikül Geçirgenlik (45 µm)	%	≤ 34
Reaktif Silika (SiO ₂ reaktif)	%	≥ 25

3.2.3. Agrega (d_{max} = 0.125 mm)

Bu çalışmada kullanılan ince agregası, doğal kaynaklardan elde edilmiş ve maksimum tane boyutu 0.125 mm olacak şekilde elenmiş doğal dere agregasıdır. İnce taneli yapısı sayesinde özellikle harç tipi karışımlarda homojen dağılım sağlamak ve çimentoyla iyi bir aderans oluşturmaktadır. Kullanılan agreganın su emme oranı, özgül ağırlığı ve tane dağılımı gibi özellikleri TS 706 EN 12620 standardına uygun şekilde

belirlenmiştir. Tane boyutunun düşük olması, özellikle 3D baskılı polimerik kafes yapılarla birlikte kullanıldığında, boşluklara daha iyi dolgu sağlaması açısından avantaj sunar. Şekil 3.2.'de deneylerde kullanılan agrega ve eleme süreci görülmektedir. Detaylı özellikler Tablo 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kullanılan Agrega Örneği ve eleme süreci

Tablo 3.4. Agreganın Fiziksel Özellikleri ($d_{max} = 0.125 \text{ mm}$) (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014)

Özellik	Birim	Değer
Özgül Ağırlık	g/cm^3	2,6-2,7
Su Emme Oranı	%	0,5*2,0
İncelik Modülü	-	2,0-3,0
Geçirgenlik (0.125 mm elekten)	%	100
Tane Yoğunluğu (Bulk Density)	kg/m^3	1400-1600

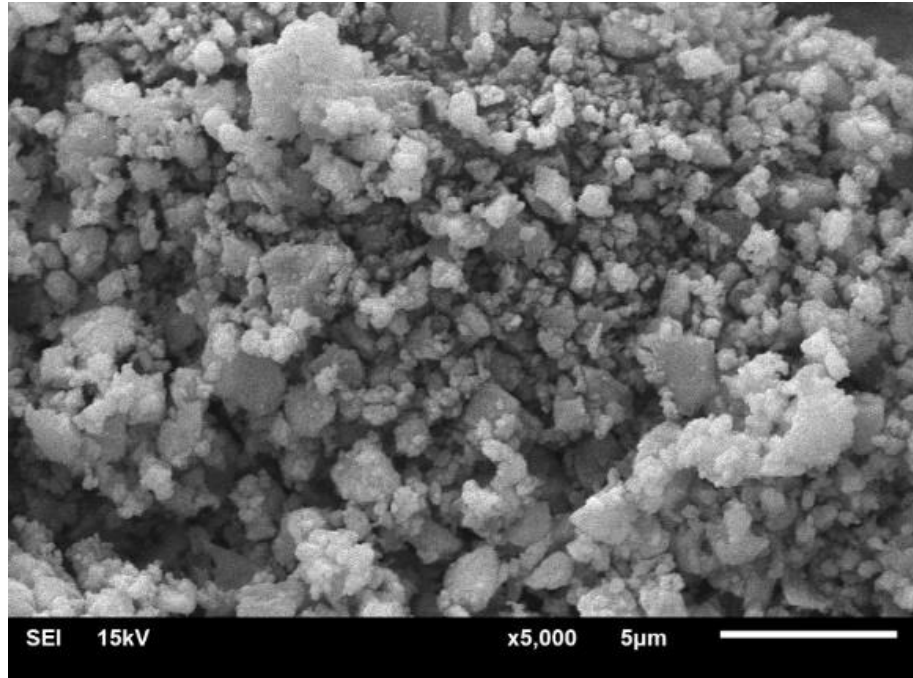
3.2.4. Karma suyu

Karışımlarda kullanılan su, içme suyu standardında olup içerisinde zararlı iyonlar (sülfat, klorür vb.) bulunmamaktadır. Su/bağlayıcı oranı, her karışımda katkı türüne göre optimize edilmiştir. Karışımın kıvamı ve işlenebilirliği dikkate alınmaktadır.

3.2.5. Nano kalsit (NC)

Son yıllarda çimento esaslı kompozitlerde nano katkı maddelerinin kullanımı, özellikle lif–matris geçiş bölgesinin yoğunluğunu artırarak mikroyapısal iyileşmeler sağlamaktadır. Bu bağlamda, nano kalsit (NC) gibi katkıları, lif takviyeli sistemlerde bağ arayüzünü iyileştirerek eğilme dayanımı, süneklik ve enerji yutma kapasitesi gibi mekanik özelliklerde belirgin artışlara neden olmaktadır (Demirhan, 2022; Su et al., 2024; Zhang & Han, 2025). Ayrıca, NC'nin erken yaş dayanımlarını artırdığı, hidratasyonu hızlandırdığı ve mikroyapı bütünlüğünü geliştirdiği çeşitli araştırmalarda rapor edilmiştir (Su et al., 2024; Zhang & Han, 2025).

Yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda, NC katkısı, erken yaş dayanımlarında diğer nano kalsiyum karbonat türlerine göre daha yüksek katkı sağlamıştır. Özellikle 7 günlük kür süresi sonunda, NC içeren karışımlar, katkısız referans karışımlara göre %18,6 oranında daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Bu artışın temel nedeni, NC'in daha düzensiz (amorfor) kristal yapıya sahip olması ve böylece erken yaşlarda çekirdeklenme etkisiyle hidratasyon ürünlerini teşvik etmesidir. Şekil 3.3'te NC'nin SEM görüntüsü yer almaktadır (Demirhan, 2022, s. 7).



Şekil 3.3. NC SEM Görüntüsü

Ayrıca NC, lif–matris arasındaki sürtünmeli bağ kuvvetini artırarak çatlak ilerlemesini geciktirmiş, daha fazla enerji absorpsiyonu sağlayan mikro çatlak yapılarının oluşumunu desteklemiştir. Bu mikro çatlaklar, liflerin çekilme sürecinde kırılmadan sistem dışına çıkmasına olanak tanımış ve böylece kompozitin sünek davranışı güçlenmiştir (Demirhan, 2022, s. 10).

NC'in top-down üretim yöntemiyle elde edilmesi, partikül boyut dağılımının daha dengeli olmasını sağlamakta; bu da bağlayıcı matrisle daha homojen bir yapı oluşturarak, yoğunluk artışı ve geçirimsilikte azalma gibi olumlu etkiler oluşturmaktadır. NC, bu yönleriyle hem düşük maliyetli hem de yüksek katkı potansiyeline sahip bir nano katkı olarak öne çıkmaktadır. Teknik özellikler Tablo 3.5'te verilmiştir (Demirhan, 2022, s. 12–13).

Tablo 3.5. NCC ve NC'in Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Özellik	NC	NCC
SiO ₂ (%)	-	0.01
Al ₂ O ₃ (%)	-	0.02
Fe ₂ O ₃ (%)	-	-
MgO (%)	0.05	0.55
CaO (%)	55.70	55.92
SO ₃ (%)	-	0.05
Yoğunluk (g/cm ³)	Şub.66	Şub.73
BET Yüzey Alanı (m ² /kg)	Tem.63	19.23

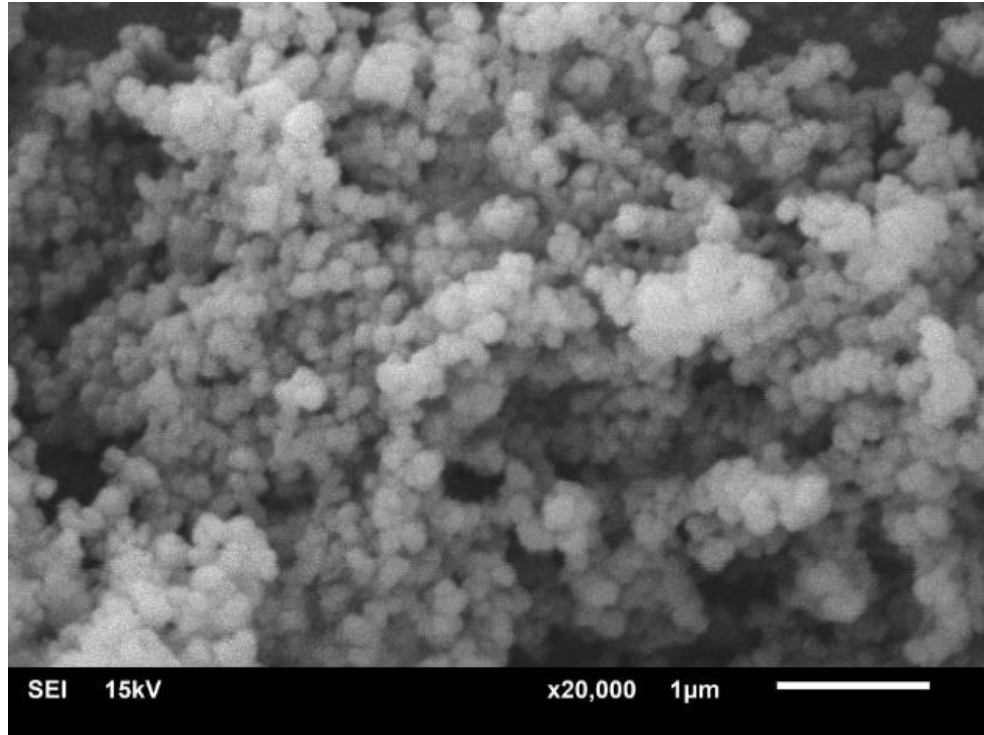
3.2.6. Nano CaCO₃ (NCC)

Çimento esaslı kompozitlerde nano boyutlu kalsiyum karbonat (CaCO₃) kullanımı, özellikle bağlayıcı sistemlerin erken yaş hidrasyonunu hızlandırarak mikroyapısal yoğunluğu artırmakta ve bunun sonucunda çeşitli mekanik iyileşmeler sağlamaktadır. Literatürde, nano CaCO₃ (NCC) katkısı ile modifiye edilen sistemlerin, katkısız referans karışımlara kıyasla daha yüksek dayanım artışı ve iyileştirilmiş lif–matris bağlanma özellikleri sergilediği bildirilmektedir (Demirhan, 2022; Liu et al., 2024; Lin et al., 2023).

NCC'nin kristalin yapısının belirginliği ve geniş özgül yüzey alanı, özellikle 28 ve 90 günlük kürlerde —yani uzun dönem kür yaşlarında— dayanım kazanımında etkili olmaktadır (Liu et al., 2024). 28 günlük kür sonunda, NCC katkısı kullanılan karışımlarda basınç dayanımı, katkısız karışımlara göre %6,54'e varan oranda artmıştır (Demirhan,

2022, s. 7–8). Bu artış, CaCO_3 ile C_3S arasındaki sinerjik hidrasyon etkisine bağlanmaktadır (Lin et al., 2023).

Ayrıca NCC'nin bağlayıcı sistemdeki alümina fazları ile reaksiyona girerek karboalüminat oluşumunu teşvik ettiği, bu reaksiyonların ise portlandit (sönmüş kireç) tüketimi yoluyla mikro yapıda boşlukları azaltarak yoğunluk sağladığı ifade edilmiştir (Liu et al., 2024; Lin et al., 2023). Şekil 3.4'te kullanılan NCC mineraline ait SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 3.4. NCC SEM Görüntüsü

Lif–matris geçiş bölgesindeki sürtünmeli bağ kuvvetlerinin artması, çatlak oluşumu ve yayılımını sınırlandırarak daha sünek bir davranışın ortaya çıkmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum, özellikle çekilme esnasında liflerin kırılmadan dışarı çıkmasına imkân tanımakta, bu sayede liflerin enerji yutma kapasiteleri artmaktadır (Demirhan, 2022, s. 10–11).

Ancak, NCC'nin bottom-up üretim yöntemiyle elde edilmesi nedeniyle partikül boyutu dağılımı daha tek tip (uniform) olup, topaklaşma eğilimi yüksektir. Bu durum, bazı karışımlarda katkının etkisinin sınırlı kalmasına neden olabilmektedir. Ayrıca, NCC'nin kristalin doğası ve mikroyapı içindeki homojenliğinin sınırlı olması, bazı durumlarda katkının sadece fiziksel dolgu görevi görmesine neden olmaktadır. Yine de

NCC'nin katkı sağladığı sistemlerde özellikle orta ve uzun vadeli dayanım gelişimi açısından önemli katkılar sunmaktadır. Özellikleri tablo 3.6’da listelenmiştir (Demirhan, 2022, s. 13).

Tablo 3.6 Karşılaştırmalı Yorumsal Analiz: UNC vs NCC

Özellik	UNC (Nano Kalsit)	NCC (Nano CaCO ₃)
Kristal Yapı	Amorf (düşük kristallilik)	Kristalin (yüksek kristallilik)
Üretim Yöntemi	Top-down	Bottom-up
Çekirdeklenme Etkisi	Güçlü	Orta düzey
Erken Yaş Dayanım Artışı	Yüksek (%18.6)	Düşük (%2.4)
Uzun Vadeli Dayanım	Orta–Yüksek (%9.8)	Yüksek (%9.6)
Topaklaşma Eğilimi	Düşük	Yüksek
SEM ile Arayüz Gözlemi	Yoğun fiber çevresi	Homojen fakat daha gevşek yapı
XRD Pik Şiddeti	Düşük – geniş (amorf)	Yüksek – dar (kristalin)

3.2.7. Hiper akışkanlaştırıcı (Master Glenium 51)

Hiper akışkanlaştırıcı olarak kullanılan Master Glenium 51, polikarboksilat eter (PCE) bazlı yeni nesil bir hiper akışkanlaştırıcıdır. Düşük su/bağlayıcı oranlarında daha yüksek akışkanlık sağlaması sayesinde hem işlenebilirliği artırmakta hem de katkıların beton içinde homojen dağılmasını kolaylaştırmaktadır. Bu durum, katkılı sistemlerde segregasyon riskini de en aza indirmektedir. Benzer şekilde, Hwang ve arkadaşları (2013), polikarboksilat esaslı katkıların beton reolojisi üzerindeki olumlu etkilerini göstermiştir. Şekil 3.5’te kullanılan hiper akışkanlaştırıcı örneği yer almaktadır. Özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Master Glenium 51 Hiper Akışkanlaştırıcı

Tablo 3.7. Master Glenium 51 Teknik Özellikleri (Master Builders Solutions, 2020)

Özellik	Değer	Açıklama
Kimyasal Yapı	Polikarboksilat eter (PCE)	Yeni nesil Hiper akışkanlaştırıcı
Görünüm	Açık sarı sıvı	-
Yoğunluk (20°C)	1,06 ± 0,02 g/cm ³	TS EN 934-2'ye göre
pH Değeri	4,0 ± 1	-
Klorür İçeriği	< 0,10 %	TS EN 934-2'ye uygun
Uygunluk Standardı	TS EN 934-2	Beton katkı maddesi standardı
Depolama Koşulları	5–35 °C	Donmaya karşı koruyunuz

3.2.8. PETG filament

Kafes sistemlerin üretiminde kullanılan filament, CCF marka siyah PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) olup, FDM (Fused Deposition Modeling) 3D yazıcı teknolojisi ile tam uyumludur. PETG, yüksek darbe dayanımı, iyi katman yapışması ve UV direnci sayesinde, beton içerisine gömülü olarak uzun vadeli yapısal bütünlük sağlar. Aynı zamanda düşük termal genleşme katsayısı, üretim sırasında geometrik stabiliteyi desteklemektedir (Rankouhi et al., 2016).

Benzer şekilde, Wang et al. (2022) tarafından da PETG kullanılarak farklı kafes geometrilerinin mekanik performansları değerlendirilmiştir. Şekil 3.6'da kullanılan PETG filamentin görüntüsü verilmiştir. Malzemenin özellikleri Tablo 3.8'de özetlenmiştir.



Şekil 3.6. Kullanılan PETG Filamentin Görüntüsü

Tablo 3.8. CCF Marka PETG Malzemesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (CCF PETG Technical Data Sheet, 2024.)

Özellik	Değer / Birim/Test Koşulu	Test Standardı
Yoğunluk (Density)	1.28 g/cm ³	ASTM D792
Erime Akış Hızı (MFI)	12 g / 10 min. / 220 °C	ASTM D1238
Tepe Erime Sıcaklığı	200–210 °C	ASTM D1525
Camsı Geçiş Sıcaklığı (Tg)	88 °C	ASTM D3418
Gerilme Dayanımı (TensileYS)	2175 MPa	ASTM D638
Elastik Modül (Flexural Strength)	62 MPa/min.	ASTM D790
Kopma Uzaması (Elongation)	%15/min.	ASTM D638
Çentikli Darbe Dayanımı	12 KJ/m ² at 23°C	ASTM D638

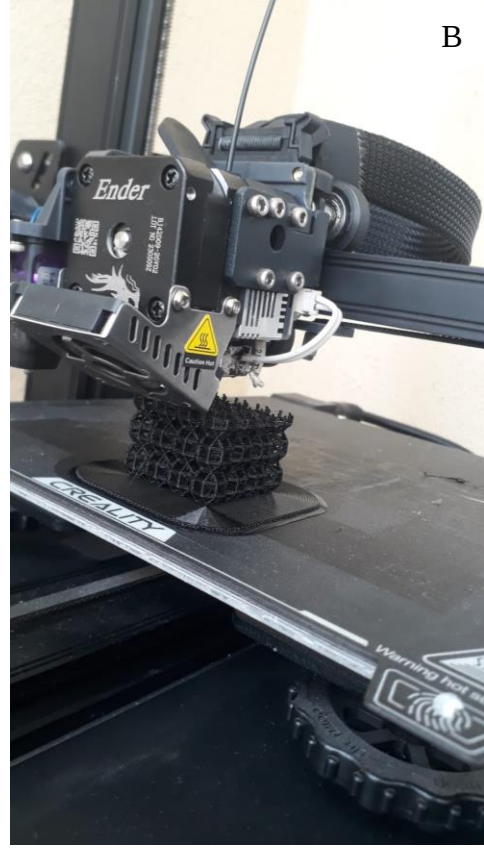
Not: Test numunesi dikey X/Y oryantasyonunda basılmıştır. Kullanılan baskı parametreleri: 0.2 mm katman kalınlığı, %100 doluluk, 100 mm/sn baskılama hızı, 235 °C nozzle sıcaklığı ve 75 °C tabla sıcaklığı.

3.3. Kafes Sistemlerin 3D Yazıcı ile Üretimi

Bu çalışmada kullanılan polimerik kafes sistemler, 3D yazıcı teknolojisi ile özel olarak üretilmiştir. Üretim süreci hem malzeme seçimi hem de üretim parametrelerinin belirlenmesi açısından detaylı bir planlamaya dayanmaktadır. Amaç, yapı içerisindeki mekanik yükleri taşıyabilecek, çimento esaslı malzeme ile yüksek aderans sağlayabilecek ve üretim sürecine uyumlu geometrik bütünlüğe sahip kafeslerin imal edilmesidir.

Üretim süreci için Creality Ender-3 S1 Pro marka Fused Deposition Modeling (FDM) teknolojisine sahip bir masaüstü 3D yazıcı kullanılmıştır. Filament olarak CCF marka siyah PETG tercih edilmiştir. PETG, çevresel etkilere karşı dayanımı sayesinde yapı uygulamaları için uygun bir polimer olarak değerlendirilmiştir. Malzemenin işlenebilirliği ve geometrik stabilitesi, üretimde karşılaşılan deformasyonları en aza indirmekte ve güvenilir yapı elemanları üretimine olanak sağlamaktadır.

Şekil 3.7’de PETG filament ile 3D yazıcıda kafes elemanın üretim süreci gösterilmektedir. Bu aşamada, modelin her katmanı ardışık şekilde yazıcı tarafından oluşturulmakta ve üretim tamamlanana kadar nozul başlığı boyunca termoplastik akış sürdürülmektedir.



Şekil 3.7. 3D Yazıcıda Kafes Elemanın Üretim Süreci

Kafes sistemlerin geometrik yapısı olarak rombiküboktahedron hücre formu tercih edilmiştir. Bu geometri, izotropik yük taşıma kapasitesi sağlaması, yüksek boşluk oranı ve yüzey alanı sayesinde çimento esaslı malzeme ile daha iyi bir aderans oluşturması açısından uygundur. Ayrıca bu tür yapılar, üç boyutlu yük aktarımı ve çatlak kontrolü gibi mekanik avantajlar da sunmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda farklı kafes geometrilerinin mekanik performansları karşılaştırılmış ve rombiküboktahedron yapısının, özellikle basınç yükleri altındaki dayanım ve enerji sönümleme özellikleri açısından üstün sonuçlar verdiği rapor edilmiştir (Wang et al., 2022). Bu nedenle, bu çalışmada da tercih edilen kafes yapısı olarak rombiküboktahedron kullanılmıştır. Şekil 3.8’de üretimi tamamlanmış rombiküboktahedron hücreli PETG kafes örneği gösterilmiştir



Şekil 3.8. 3D Yazıcı ile Üretilmiş Rombiküboktahedron Hücreli PETG Kafes Görüntüsü

Üretim süreci boyunca aşağıdaki parametreler sabitlenmiştir:

- Nozul çapı: 0.4 mm
- Katman kalınlığı: 0.2 mm
- Baskı sıcaklığı: 240 °C
- Tabla sıcaklığı: 80 °C
- Baskı hızı: 50 mm/s

Bu parametreler, filamentin üretici tavsiyeleri doğrultusunda optimize edilmiş ve kafes elemanlarında istenen boyutsal doğruluk sağlanmıştır. Üretilen kafesler, döküm öncesi çimento esaslı malzemenin ekleneceği kalıplara yerleştirilmiş ve merkezde kalacak şekilde konumlandırılmıştır. Kalıplara harç dökülmeden önce kalıp iç yüzeyleri yağlanmış ve kafesin kalıpla birleştiği noktalara sıcak silikon uygulanarak sızdırmazlık sağlanmıştır.

Üretim sonunda elde edilen PETG kafeslerin her biri, 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarındaki prizma numunelerin içine tam olarak entegre olacak şekilde üretilmiş ve her numune için özel olarak yerleştirilmiştir. Bu sistem sayesinde, polimerik kafes-çimento esaslı harç malzemesi ara yüzey davranışı deneysel olarak incelenebilir hâle getirilmiştir.

3.4. Numune Üretim Süreci ve Kür Koşulları

Bu araştırma kapsamında hazırlanan deney numuneleri, laboratuvar koşullarında üretilmiş ve belirlenen kür süreleri boyunca standartlara uygun şekilde saklanmıştır. Amaç, farklı katkı kombinasyonlarının ve 3D baskı ile üretilmiş polimer kafes sistemlerin çimento esaslı harçlarla olan etkileşimini doğrudan karşılaştırmalı olarak incelemektir. Toplam 6 farklı içerikte karışım hazırlanmış ve her karışımdan 3 adet olmak üzere toplam 18 numune üretilmiştir. Numuneler 7, 28 ve 180 günlük kürlere tabi tutulmuştur. Her üretim adımı, standardizasyonu sağlamak amacıyla sistematik biçimde aşağıdaki alt başlıklarda açıklanmıştır.

3.4.1. Kalıp hazırlığı ve kafes yerleşimi

Numunelerin üretileceği 40×40×160 mm boyutlarındaki prizmatik kalıplar, dökümden önce ince bir tabaka hâlinde yağlanmıştır. Bu işlem, çimento esaslı malzemenin kalıba yapışmasını önlemek ve yüzey düzgünlüğünü artırmak amacıyla yapılmıştır.

Şekil 3.9.a'da, kalıp iç yüzeylerinin yağlanma süreci görsel olarak sunulmuştur. Polimerik kafesin boyutsal aralıkları çok dar ve kısa olduğu ve bu durumun bir neticesi olarak agrega tane boyutu çok yüksek tutulamadığı için yüksek işlenebilirlikte üretilcek olan çimento harcının kalıp kenarlarından sızma potansiyeline binaen kalıpların iç birleşim noktalarına sıcak silikon uygulanarak sızdırmazlık sağlanmış ve harcın dışarı sızması engellenmiştir. Bu adım, özellikle katkılı harçların hassas dökümünde oldukça önemlidir. Şekil 3.9.b'de, kalıpların köşe birleşim yerlerine silikon uygulandığı aşama gösterilmiştir. Ardından her numune için önceden 3D yazıcıyla üretilmiş PETG kafes sistemleri, tam merkezde olacak şekilde kalıpların içine dikkatlice yerleştirilmiştir.

Şekil 3.9.c-d'de görüldüğü üzere, 3D yazıcı ile üretilmiş rombiküboktahedron hücreli PETG kafes elemanları, prizmatik kalıpların içerisine düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Bu yerleşim işlemi hem mekanik testlerin tekrarlanabilirliğini sağlamak hem de katkılı harçların kafesle olan etkileşimini analiz edebilmek adına kritik öneme sahiptir.



Şekil 3.9. Kalıp Hazırlığı ve Kafes Yerleşimi

3.4.2. Malzemelerin tartımı ve homojen karışımı

Karışımlar için önceden belirlenmiş oranlarda çimento, uçucu kül, agrega, NC ve/veya NCC hassas terazi yardımıyla gram cinsinden tartılmıştır. Şekil 3.10.a'da sunulmaktadır. Bu aşamada, özellikle ince granülometriye sahip nano katkıların topaklanmasını önlemek amacıyla karışım süresi en az 1 dakika olarak belirlenmiştir. Şekil 3.10.b'de, malzemeler sunulmaktadır.



Şekil 3.10. Malzemeler

3.4.3. Karma suyu

Kuru karışıma içme suyu, hesaplanan su/bağlayıcı oranına göre ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi önce ön karıştırma (yaklaşık 1 dk) ardından el blenderı kullanılarak nano malzeme içermeyen numuneler 2 dakika, nano malzeme içeren numuneler 3 dakika süresince karıştırma işlemi devam ettirilmiştir. Şekil 3.11’de harcın el blenderı ile karıştırma aşaması görsel olarak aktarılmaktadır. Bu sayede karışım homojen bir yapıya kavuşturulmuştur.



Şekil 3.11. Harcın el blenderı ile karıştırılması

3.4.4. Harcın kalıplara dökülmesi ve vibrasyon uygulaması

Homojen kıvama ulaşan harç, kalıba yerleştirilmiş PETG kafes sisteminin çevresini tamamen saracak şekilde dökülmüştür. Her kalıp için döküm sonrası yaklaşık 4 dakika süreyle titreşim masasında vibrasyon uygulanmış, böylece karışım içerisindeki hava boşlukları uzaklaştırılmış ve çimento harcının yoğunluğu artırılmıştır. Vibrasyon süresi her grup için eşit tutulmuştur. Şekil 3.12’de harcın kalıba dökülme aşaması görsel olarak aktarılmaktadır.



Şekil 3.12. Harcın kalıba dökülmesi

3.4.5. Priz ve kalıptan çıkarma

Dökümü tamamlanan numuneler, Şekil 3.13'te görüldüğü gibi daha sonra üzerleri plastik örtü ile kapatılarak oda sıcaklığında (20 ± 2 °C) 24 saat boyunca laboratuvar koşullarında kalıpta bekletilmiştir. Priz süresinin ardından numuneler kalıplardan dikkatlice çıkarılmış ve yüzey bozulması olup olmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 3.13. Dökümü Tamamlanan Numuneler

3.4.6. Kürleme prosedürü ve saklama koşulları

Kalıptan çıkarılan numuneler kirece doygun standart kür koşullarına göre yerleştirilmiştir. Numuneler etiketlenerek kür süresi bilgisiyle birlikte takip edilmiştir. Üç ayrı kür grubu oluşturulmuştur: 7 günlük, 28 günlük ve 180 günlük. Her grup, belirlenen sürenin sonunda testlere alınmak üzere laboratuvar ortamında muhafaza edilmiş olup Şekil 3.14.'te görülmektedir.



Şekil 3.14. Farklı günlerde kürlenen numuneler, saklama ve kür koşulları

Bu üretim süreci sayesinde, deneysel değişkenlerin dış faktörlerden etkilenmesi minimize edilmiştir. Katkı içeriği, kür süresi ve polimer kafes varlığı gibi parametrelerin mekanik performans üzerindeki etkileri bu yaklaşım sayesinde analiz edilmiştir.

3.5. Mekanik Test Protokolleri ve Uygulama Standartları

Çalışmada, harç numunelerin mekanik performanslarını değerlendirmek amacıyla iki temel test yöntemi uygulanmıştır: Basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı (UPV) testleri. Uygulanan test protokolleri TS EN 196-1 standardına ve ASTM C597-09 normlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm testlerde amaç, katkı maddelerinin ve PETG esaslı 3D baskı kafes sistemlerin harçların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak analiz etmektir.

Her karışım türü için 3 adet numune üretilmiş ve bu numuneler 7, 28 ve 180 günlük kür sürelerine tabi tutulmuştur. Tüm mekanik testler, SHIMADZU AG-IC marka tam otomatik universal test cihazı ile gerçekleştirilmiş olup Şekil 3.15'te görülmektedir.



Şekil 3.15. Tam Otomatik Üniversal Test Cihazı

3.5.1. Basınç dayanımı testi

Prizma numunelerin her bir yarısı, TS EN 196-1 standardına uygun olarak basınç testine tabi tutulmuştur. Testler yine SHIMADZU AG-IC cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yük altındaki davranışları dikkatle izlenmiş, maksimum yük değerleri kaydedilerek ortalama basınç dayanımı hesaplanmıştır. Şekil 3.16'da test düzeneği sunulmaktadır. Her bir karışım türüne ait sonuçlar, elde edilen ölçüm değerlerinin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.16. Basınç Testi Düzeneği

3.5.2. Ultra ses dalgası geçiş hızı testi (UPV)

UPV testi, numunelerin içyapı homojenliğini değerlendirmek amacıyla uygulanmış tahribatsız test yöntemlerinden biridir. Bu testte Proceq marka Pundit + cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.17’de görölmektedir. Cihazın vericisi ve alıcısı, numunenin karşılıklı yüzeylerine yerleştirilmiştir. Testler 7, 28 ve 180 günlük kür sürelerinin ardından gerçekleştirilmiştir. UPV değeri: ultra ses geçiş hızı (m/s), kaynak ile alıcı arası mesafe (m), ultra sesin geçiş süresi (s)’ne göre hesaplanmıştır. UPV sonuçları, numunenin iç yapısal kusurlar, boşluklar ve mikro çatlaklara karşı hassasiyetini değerlendirmede referans olarak kullanılmıştır. Tablo 3.9’da UPV geçiş hızı (km/s) ile beton kalitesi ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.17. UPV Testi Düzenegİ

Tablo 3.9. UPV Geçiş Hızı (km/s) ile Beton Kalitesi İlişkisi (Demirhan, 2020).

Geçiş Hızı (km/s)	Beton Kalitesi	Açıklama
> 4.5	Çok iyi	Yoğun, homojen ve yüksek mukavemetli
3.5 – 4.5	İyi	Ortalama dayanım, düşük boşluk
3.0 – 3.5	Orta	Bazı boşluklar ve ayrışmalar mevcut
2.0 – 3.0	Zayıf	Düşük yoğunluk, muhtemel çatlaklar
< 2.0	Çok zayıf	Bozulmuş yapı, muhtemel boşluk/çatlak

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

Basınç dayanımı, betonun temel mekanik performans kriterlerinden biri olup, özellikle taşıyıcı sistemlerdeki yük taşıma kapasitesini doğrudan etkiler. Bu çalışmada, her karışım için 7, 28 ve 180 günlük kür sürelerinin ardından elde edilen basınç dayanımı değerleri değerlendirilmiş, sonuçlar ortalama değerler üzerinden karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

7 günlük kür süresi sonunda en yüksek basınç dayanımı değeri M3 numunesinde (30.01 MPa) elde edilmiştir. Bu karışım temel bağlayıcı malzeme olan normal portland çimentosuna ilave olarak NC katkısı içermekte olup, nano katkıların erken yaşta temel hidrasyon ürünlerine ilave olarak oluşumlarına katkı sundukları karboalüminatların oluşumunu hızlandırarak matris yoğunluğunu artırdığı düşünülmektedir. Diğer yandan nano boyutlu herhangi bir mineral katkı içermeyen M1 numunesi NC katkılı karışıma kıyasen 28.22 MPa ortalama değeriyle daha düşük performans göstermiştir. NCC içeren karışımlarda ise 7 günlük kür yaşında kısmi bir düşüş veya muadil sonuçlar elde edilmiştir. NCC nano boyutlu minerali NC'ye kıyas edildiğinde daha kararlı bir yapıya sahip olduğu ve NC minerali ise daha fazla amorf olması nedeniyle NCC içeren karışımlarda elde edilen basınç dayanımı değerleri NC'ye kıyasen hem daha düşük elde edilmiş hem de kontrol karışımına kıyasen neredeyse hiçbir değişim olmayıp ihmal düzeyinde bir düşüş olarak gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, NC'nin CEM I katkılı çimento ile olan sinerjisi NCC'nin CEM I katkılı çimento ile olan sinerjisinden daha yüksek bir performansta tespit edilmiştir. Bu durum, direkt olarak nano boyutlu minerallerin kararlı yapıları ve amorf yapılarına bağlıdır. Çimento yerine ikame edilen uçucu kül (UK) kullanımı nedeniyle 7 günlük basınç dayanımında belirgin bir düşüş elde edilmiş olup, kontrol karışımına kıyasen %31 civarında bir düşüş tespit edilmiştir. UK özellikle 14. gün ile 150. günler arasında puzolanik aktiviteye bağlı olarak dayanıma ilave hidrasyon ürünleri ile katkı sunduğundan (Demirhan, 2020) dolayı bu durum UK'nin erken dönemde hidrasyon sürecine aktif dahil olmamasından kaynaklanmaktadır. NC ve NCC gibi kireçtaşı formasyonları hem CEM I hem de UK gibi mineral katkı gibi katkılarda

bulunan alüminat fazı ile kimyasal reaksiyona girerek erken dönemde ilave hidrasyon ürünlerinin oluşumuna katkı sunmaktadırlar. İlave bir ürün olarak karboalüminatların oluşum oranlarına bağlı olarak erken dönemde basınç dayanımında farklı seviyelerde iyileşme ve gelişmeler meydana gelmektedir. 7 günlük kür yaşı sonuçları değerlendirildiğinde NC ve NCC'nin UK ikamesi ile olan sinerji seviyeleri farklılık arz etmiştir. CEM I + UK (M2) karışımına kıyasen CEM I + UK + NC (M4) ve CEM I + UK + NCC (M6) karışımlarında %22,44 ve %12,38 oranlarında basınç dayanımında artış tespit edilmiştir. Nitekim NC içeren karışımlarda nispeten daha yüksek bir basınç dayanımının elde edilmesi bahse konu ilave karboalüminatların nispeten daha fazla oluşmasından kaynaklanmaktadır.

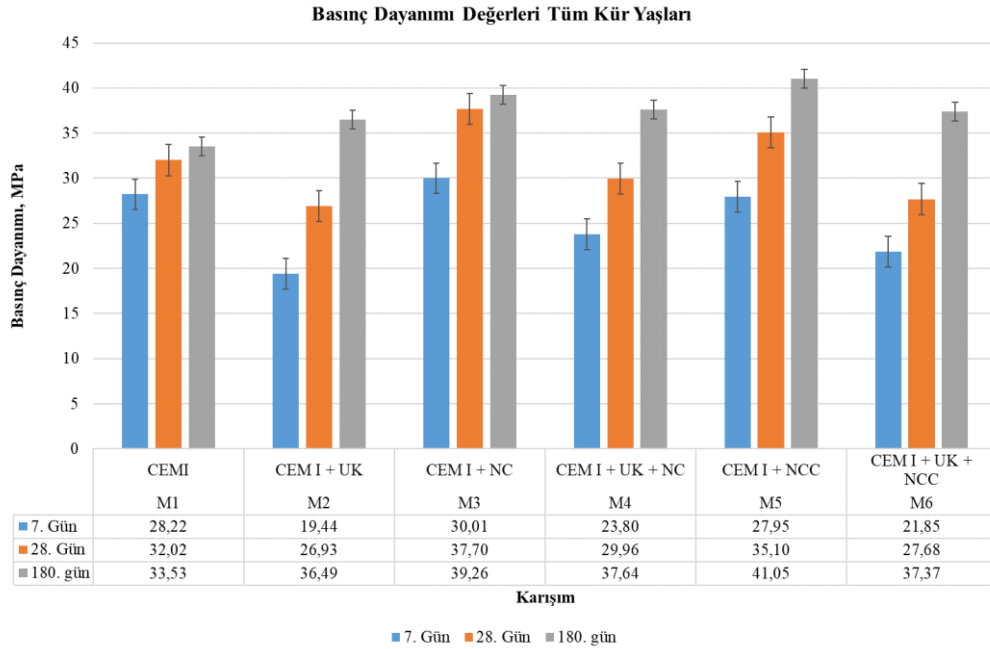
28 günlük sonuçlar incelendiğinde, 7 günlük kür yaşında olduğu gibi en yüksek dayanım M3 (37.70 MPa) karışımında gözlemlenmiş olup, M3 karışımını M5 karışımı 35,10 MPa değeriyle takip etmiştir. M3, sadece NC katkısı içerirken, M5 ise NCC içermektedir. Bu durum her iki nano katkının da orta yaşlarda dayanım artışına katkı sunduğunu göstermektedir. UK içeren karışımlarda ise 7 günlük kür yaşına kıyasen basınç dayanımında belirgin bir artış elde edilmiş olup, 28 günlük kür yaşı için hem M1 hem de UK içermeyen diğer karışımlardan daha düşük değerler elde edilmiştir. UK'nin puzolanik aktivitesi nedeniyle üretimine katkı sunacağı ilave hidrasyon ürünü olan C-S-H ve C-A-H ürünlerinin yeterli seviyeye ulaşmaması nedeniyle UK içermeyen karışımlarda kıyasen nispeten daha düşük bir dayanım elde edilmiştir. 28 günlük kür yaşında da 7 günlük kür yaşına benzer bir eğilim tespit edilmiş olup, NC içeren karışımlarda NCC'ye göre daha yüksek bir sonuç elde edilmiştir. Ayrıca, UK ve NC içeren karışımlardaki dayanım gelişimi sinerjik olarak daha yüksek bir performans sergilemiştir. 28 günlük kür yaşı sonuçları değerlendirildiğinde NC ve NCC'nin UK ikamesi ile olan sinerji seviyeleri farklılık arz etmiştir. CEM I + UK (M2) karışımına kıyasen CEM I + UK + NC (M4) ve CEM I + UK + NCC (M6) karışımlarında %11,23 ve %2,77 oranlarında basınç dayanımında artış tespit edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere 7 günlük erken dönemde NC ve NCC'nin dayanıma ve mikroyapısal gelişime olan katkısı 28 günlük kür yaşında nispeten daha düşük seviyelerde seyretmiştir.

180 günlük sonuçlar en yüksek basınç dayanımı değerinin M5 (41.05 MPa) ve M3 (39.26 MPa) numunelerinde elde edildiğini göstermiştir. En yakın değer olarak UK ve nano boyutlu minerallerin kombine edildiği M4 ve M6 karışımlarında gözlemlenmiş olup, sırasıyla 37.64 MPa ve 37.37 MPa ortalama basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Bu durum, uçucu kül ile nano katkının birlikte kullanımının geç yaş dayanımı

üzerinde sinerjik bir etki oluşturduğuna işaret etmektedir. Özellikle M6 numunesinde hem NCC hem de uçucu kül bulunmaktadır ve bu karışımda geç yaş dayanımının iyi olduğu gözlenmiştir. Bu bulgular, mineral katkıların uzun vadede puzolanik reaksiyonlarla ikinci faz C-S-H jel üretimini destekleyerek dayanımı artırdığına dair literatürle de uyumludur (Lothenbach et al., 2011). 180 günlük kür yaşlarında elde edilen mikro yapısal gelişim genel olarak 7 ve 28 günlük kür yaşlarına benzer olarak elde edilmiştir. NC ve NCC minerallerinin hem CEM I hem de UK içindeki Al_2O_3 alüminat fazı ile farklı seviyelerde ve performansta sinerji oluşturup, mikro yapısal gelişime katkı sunmuştur. NC daha çok erken dönemde NCC ise daha çok ileriki dönemlerde daha çok katkı sağlamıştır.

PETG malzeme ile 3D yazıcıda üretilmiş polimerik kafes yapılar, çimento esaslı malzeme içerisinde yük transferini optimize eden, homojen bir gerilme dağılımı sağlayan ve mikro yapı üzerinde stabilizasyon etkisi oluşturan elemanlar olarak görev yapmaktadır. Kafeslerin düzenli geometrik yapısı ve matris-kafes ara yüz özelliklerini artıran yüksek özgül yüzey alanı, çimento esaslı malzemenin içyapısıyla etkin bir kenetlenme sağlarken, aynı zamanda çatlak oluşumunu sınırlayıp dayanım sürekliliği sunmaktadır. FDM ile üretilen kafeslerin kenarlarındaki eliptik geometrinin, çimento matrisi ile mekanik kilitlenmeyi artırdığı literatürde gösterilmiştir. Örneğin, R. J. M. Bol ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, bu geometrik yapı sayesinde bağ dayanımının yaklaşık %56'ya kadar arttığı rapor edilmiştir (Bol et al., 2025). Bu, çalışmamızdaki PETG kafes-matris ara yüzey aderansının neden sınırlı olduğunu mikroyapısal düzeyde açıklamada önemli bir destek sunmaktadır.” Yukarıda belirtilen açıklamalara ilave olarak, kafes yapısının basınç dayanımına katkı sunmadığı aksine farklı seviyelerde dayanımda düşüş ile neticelendiği sonucuna varılmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere kontrol karışımı olan M1 karışımında 28 günlük standart kür yaşı için minimum 42.5 MPa ortalama basınç dayanımı değerini elde etmek gerekirken değil 28 günlük kür yaşı 180 günlük kür yaşında bile çimentonun minimum dayanım sınıfı olan değere yani 42.5 MPa’a yetişememiştir. Bu durum, kafes yapıların doğası gereğinde çok yüksek dayanıma sahip olmamasından ve özellikle polimerik kafeslerin matrisin mikro yapısal karakteristiğine kıyasen çok daha düşük bir dayanıma sahip olmasının ve ayrıca çimento matrisi ile PETG arasındaki bağ aderansının sınırlı kalmasının bir neticesi olarak kümülatif (matris + kafes yapı) dayanımda artış ile değil, azalış ile neticelenmiştir. Minimum karakteristik basınç dayanımı 42.5 MPa olduğu kabul edilirse 28 günlük kür yaşına göre %24,65 oranında bir azalış gözlemlenirken, 180 günlük kür yaşına göre ise

%21,10 oranında bir düşüş elde edilmiştir. Öte yandan, grafik üzerinde değerler arasında belirli farklılıklar gözlemlenmiş olsa da sayısal açıdan değerlendirildiğinde bu farkların oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Literatürde yer alan pek çok çalışmada (Demirhan, 2020; Demirhan, 2017), nano malzemelerin hem dayanım özelliklerini hem de arayüz bölgelerini iyileştirdiği ortaya konmuş olsa da bu çalışmada polimerik kafeslerin çimento matrisine dahil edilmesiyle birlikte mikroyapısal düzeyde zayıf bölgeler oluşmuş ve bu durum, ilave edilen nano ve mineral katkıların beklenen düzeyde mikro yapısal katkı sağlamasını kısıtlamıştır. Nitekim bu durum polimerik kafes yapıların çimento esaslı sistemlerde kullanılmasından karşılaşılan en büyük kısıtlardandır.



Şekil 4.1. Tüm karışımlar için 7, 28 ve 180 günlük ortalama basınç dayanımı sonuçları

4.2. UPV Sonuçları ve Yapısal Yorumlar

Ultrases dalgası geçiş hızı (UPV) testi, çimento esaslı malzemelerin iç yapısal bütünlüğü, boşluk düzeyi ve mikro çatlak varlığı gibi özelliklerinin tahribatsız bir test yöntemiyle değerlendirilmesine imkân tanır. Bu testte, ses dalgalarının numune içinden geçiş süresi ölçülerek hız değeri (km/s) hesaplanmakta ve bu değer numunenin mikro yapısal karakteristiği ile doğrudan ilişkilendirilmektedir.

7 günlük kür süresi sonunda, en yüksek UPV değeri M3 karışımında gözlemlenmiştir. Bu karışım, temel bağlayıcı malzeme olan normal Portland çimentosuna

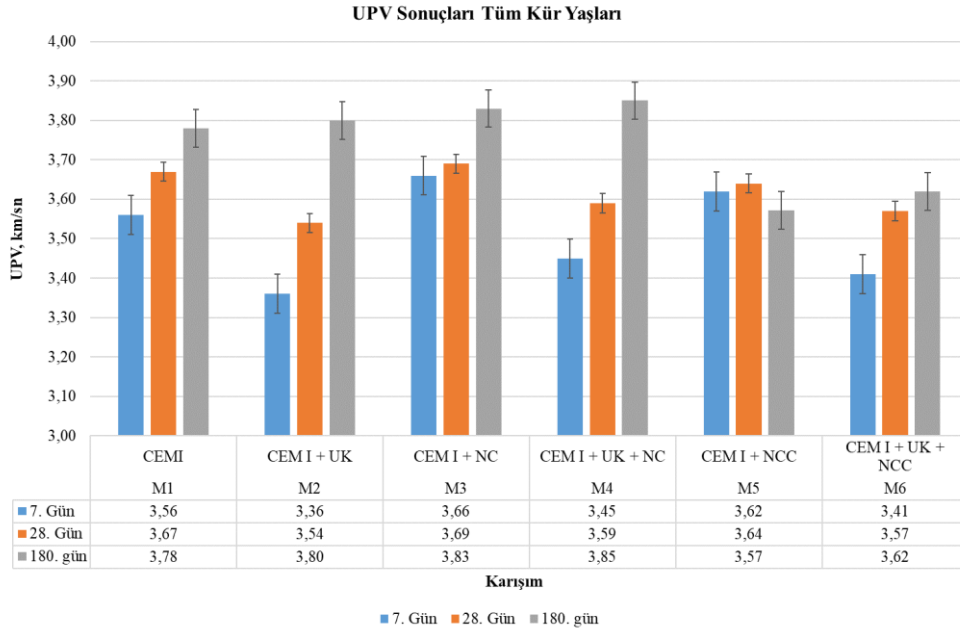
ek olarak NC katkısı da içermektedir. Nano katkıları, erken yaşlarda oluşan temel hidrasyon ürünlerinin yanında, özellikle karboalüminatların oluşumunu hızlandırarak çimento matrisinin yoğunluğunu artırmış ve bu sayede mikro yapısal açıdan önemli bir iyileşme sağlamıştır. Öte yandan, herhangi bir nano mineral katkı içermeyen M1 numunesi, NC katkılı M3 karışımına kıyasla daha düşük performans göstermesine rağmen, yine de görece olarak yakın bir UPV değeri sergilemiştir. NCC içeren karışımlarda, 7 günlük kür sonunda NC içeren karışımlarla benzer UPV değerleri elde edilmiştir. Ancak, NCC'nin nano boyutlu yapısının NC'ye kıyasla daha kristalin ve kararlı bir karaktere sahip olması, buna karşın NC'nin daha amorf bir yapıda bulunması nedeniyle, NCC katkılı karışımlarda ölçülen UPV değerleri NC katkılı karışımlara oranla daha düşük gerçekleşmiştir. Bu bağlamda, NC'nin CEM I tipi çimento ile gösterdiği etkileşim ve oluşturduğu sinerji, NCC'ye kıyasla daha yüksek performans sergilemiştir. Elde edilen bu sonuç, doğrudan nano minerallerin yapısal özellikleri —yani kristalin kararlılık ve amorfite derecesi— ile ilişkilidir. Ayrıca, çimentonun bir kısmının uçucu kül (UK) ile ikame edilmesi sonucunda, kontrol karışımına göre 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen UPV değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Basınç dayanımı bölümünde de vurgulandığı üzere, uçucu kül (UK), özellikle 14. günden itibaren başlayarak 150. güne kadar olan süreçte pozolanik reaksiyonlar yoluyla ilave hidrasyon ürünlerinin oluşmasına katkı sağlamakta ve bu sayede dayanım gelişimini desteklemektedir (Demirhan, 2020). Ancak UK'nin erken yaşta hidrasyon sürecine sınırlı şekilde dahil olması, başlangıç aşamalarında mikro yapının yeterince yoğunlaşamamasına neden olmuş ve bu durum nispeten daha düşük UPV değerleriyle sonuçlanmıştır. 7 günlük kür sonuçları incelendiğinde, NC ve NCC katkılarının UK ile olan etkileşim düzeylerinin farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. NC içeren karışımlarda daha yüksek UPV değerlerinin elde edilmesi, basınç dayanımı kısmında detaylıca ele alınan NC'nin karboalüminat oluşumunu daha fazla teşvik etmesine bağlanabilir. Bu durum, erken yaşta daha yoğun bir mikro yapı oluşumunu destekleyerek UPV performansını nispeten daha olumlu yönde etkilemiştir.

28 günlük kür sonuçları incelendiğinde, tıpkı 7 günlük sonuçlarda olduğu gibi en yüksek UPV değeri M3 karışımında gözlemlenmiştir. M3 karışımını sırasıyla M5 ve M1 karışımları takip etmiştir. Her ne kadar en yüksek UPV değeri M3 karışımında elde edilmiş olsa da, söz konusu üç karışım arasında ölçülen UPV değerleri birbirine oldukça yakın seviyelerde gerçekleşmiştir. M3 karışımı yalnızca NC katkısı içerirken, M5 karışımında Nano CaCO_3 (NCC) katkısı bulunmaktadır. Bu bulgular, her iki nano

katkının da orta yaş kür periyodunda çimento matrisinin mikro yapısal gelişimine olumlu katkı sağladığını ortaya koymaktadır. UK'nin puzolanik aktivitesine bağlı olarak üretimine katkı sağladığı C-S-H ve C-A-H gibi ilave hidrasyon ürünlerinin yeterli düzeyde oluşmaması, UK içeren karışımlarda, UK'siz karışımlara kıyasla nispeten daha düşük UPV değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur. 28 günlük kür sonuçları da 7 günlük kür yaşında gözlemlenen eğilimi teyit eder nitelikte olup, NC içeren karışımların NCC katkılı karışımlara göre daha yüksek UPV performansı sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, UK ve NC içeren karışımlarda UPV gelişimi sinerjik bir etkiyle daha yüksek bir performans sergilemiştir. 28 günlük kür sonuçları değerlendirildiğinde, NC ve NCC katkılarının UK ikamesiyle olan etkileşim düzeylerinin birbirinden farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, 7 günlük erken yaşta NC ve NCC'nin dayanım gelişimi ile birlikte ile mikro yapısal gelişime sağladığı katkının, 28 günlük kür süresine gelindiğinde göreceli olarak daha sınırlı düzeyde kaldığını ortaya koymuştur.

180 günlük sonuçlar en yüksek basınç dayanımı değerinin M4 ve M3 karışımlarında elde edilmiş olup, sırasıyla M2 ve M1 karışımlarından elde edilen UPV sonuçları da birbirine yakın olarak elde edilmiştir. 7 ve 28 günlük kür yaşlarına benzer sonuçlar elde edilmiş olup, 180 günlük kür yaşında nispeten daha kararlı bir mikro yapı elde edildiği tespit edilmiştir. Öte yandan, tüm kür yaşları dikkate alındığında UPV sonuçlarındaki değişim dramatik düzeyde olmayıp, M1-M5 karışımları için 7 günlük kür yaşına göre 180 günlük kür yaşına kadar meydana gelen değişim sırasıyla %6.2, %13.1, %4.6, %11.6, %-1.3 ve %6.2 olarak elde edilmiştir. Kafessiz kompozitlere kıyas edildiğinde literatürde elde edilen sonuçlara kıyasen bu şekilde düşük düzeyde bir mikro yapısal gelişimin temel nedenini çimento esaslı harç içine yerleştirilen kafeslerden kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir.

Öte yandan, UPV'nin sonuçlarında grafiksel verilere yansıyan farklılıklar her ne kadar görsel olarak belirgin olsa da, sayısal açıdan değerlendirildiğinde bu farkların oldukça sınırlı seviyelerde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Literatürde (Demirhan, 2017; Demirhan, 2020) nano katkı malzemelerinin gerek basınç dayanımında gerekse geçiş bölgelerinde belirgin iyileşmeler sağladığı sıkça raporlanmış olsa da, bu çalışmada kullanılan polimerik kafes yapılar, çimento matrisinde mikro düzeyde süreksizlikler oluşturarak zayıf bölgelerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu durum, eklenen nano ve mineral katkıların mikro yapıyı istenilen ölçüde güçlendirmesini engellemiş; dolayısıyla UPV performansındaki artışların da beklenenin altında kalmasına yol açmıştır.



Şekil 4.2. Tüm karışımlar için 7, 28 ve 180 günlük UPV sonuçları

4.3. Karşılaştırmalı Performans Analizi

4.3.1. Basınç dayanımı

Bu çalışmada, altı farklı harç karışımının 7, 28 ve 180 günlük kür yaşlarında elde edilen basınç dayanımı performansları değerlendirilmiştir. Tüm numuneler, PETG esaslı 3D baskı kafes sistemleri ile güçlendirilmiş olup, karşılaştırmalar bağlayıcı malzeme katkı türleri ve karışım parametrelerinin kombinasyonlarının etkisine odaklanarak yapılmıştır.

Erken yaş performans değerlendirmesinde en yüksek basınç dayanımı değeri M3 karışımında (30.01 MPa) elde edilmiştir. Bu karışım, normal Portland çimentosuna (CEMI) ek olarak NC içermektedir. NC'nin amorf yapısı sayesinde karboalüminat oluşumunu hızlandırarak matris yoğunluğunu artırdığı ve böylece erken yaş dayanımına önemli katkı sağladığı düşünülmektedir. Buna karşın, nano kalsiyum karbonat (NCC) içeren karışımlar, erken yaşta NC'ye kıyasla daha düşük performans sergilemiştir. NCC'nin daha kararlı kristal yapısının hidrasyon ürünleriyle etkileşimini sınırlaması, bu farkın temel nedenidir. Uçucu kül (UK) ikamesi yapılan karışımların (ör. M2), 7 günlük dayanımlarında kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %31 düşüş görülmüştür. Bu durum, UK'nin puzolanik aktivitesinin erken yaşta sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Bununla birlikte, UK ile NC veya NCC kombinasyonu, kontrol UK karışımına göre sırasıyla %22,44 ve %12,38 oranında dayanım artışı sağlamıştır. 28 günlük kür yaşında en yüksek değer yine NC katkılı M3 numunesinde (37.70 MPa) görülmüş, onu NCC katkılı M5 numunesi (35.10 MPa) takip etmiştir. UK içeren karışımlar erken yaşa kıyasla belirgin dayanım artışı göstermiştir; ancak UK'nin C-S-H ve C-A-H oluşumunu tam olarak hızlandıramaması nedeniyle UK'süz karışımların seviyesine ulaşamamıştır. NC katkısı, NCC'ye kıyasla hem CEM I hem de UK ile daha yüksek sinerji sağlamış; UK + NC içeren M4 karışımı, yalnızca UK içeren M2'ye göre %11,23 daha yüksek dayanım sergilemiştir. NCC katkılı UK karışımında (M6) ise bu artış %2,77'de kalmıştır. Bu sonuçlar, NC'nin orta yaşta da etkinliğini koruduğunu, ancak katkı etkisinin erken yaşa kıyasla nispeten azaldığını göstermektedir. 180 günlük kür yaşında, en yüksek basınç dayanımı M5 (41.05 MPa) ve M3 (39.26 MPa) karışımlarında elde edilmiştir. UK + nano katkı kombinasyonları, özellikle M4 (37.64 MPa) ve M6 (37.37 MPa), geç yaş dayanımında önemli artış sağlamıştır. Bu durum, UK'nin geç dönemde puzolanik reaksiyonlar yoluyla ikinci faz C-S-H jel oluşumunu artırması ve nano katkıların bu süreci desteklemesi ile açıklanabilir. Mikroyapısal gelişim eğilimi, erken ve orta yaşlarda olduğu gibi sürmüştür; NC erken dönemde, NCC ise daha çok geç dönemde etkili olmuştur.

PETG malzemeden üretilmiş 3D baskı kafesler, yük dağılımını homojenleştirme ve çatlak yayılımını yönlendirme işlevi görmüş; ancak dayanım açısından beklenen pozitif etki sağlanamamıştır. Polimerik kafeslerin düşük elastik modülü ve basınç dayanımı, matrisin yüksek dayanım özelliklerini desteklemek yerine, kümülatif dayanımı sınırlamıştır. Örneğin, kontrol numunesi M1'in 28 günlük kürde 42.5 MPa minimum karakteristik dayanım eşiğine ulaşması gerekirken, 180 günde dahi bu seviyeye çıkamamıştır. PETG kafeslerin kullanımı, 28 günlük dayanımda %24.65, 180 günlük dayanımda ise %21.10 oranında düşüşe yol açmıştır.

Deneysel bulgular, nano katkıların erken yaş dayanım gelişiminde belirleyici, UK'nin ise geç yaş dayanımında etkili olduğunu ortaya koymuştur. NC'nin amorf yapısı sayesinde CEM I ve UK ile daha yüksek sinerji sağladığı, NCC'nin ise daha kararlı yapısı nedeniyle etkisinin geç dönemde belirginleştiği anlaşılmıştır. PETG kafes sistemleri çatlak kontrolü ve deformasyon sınırlama açısından avantaj sağlasa da, düşük mekanik dayanımları nedeniyle nihai basınç dayanımına katkı sunmamış, hatta belirli oranlarda düşüşe neden olmuştur. Bu durum, polimerik kafeslerin çimento esaslı malzemelerde kullanılmasında dikkatli bir tasarım ve optimizasyon gerekliliğini vurgulamaktadır.

4.3.2. UPV sonuçları

UPV testi, çimento esaslı malzemelerin iç yapısal bütünlüğünü, boşluk oranını ve mikro çatlak oluşumunu tahribatsız olarak değerlendiren önemli bir yöntemdir. Ses dalgalarının numune içerisinden geçiş hızının (km/s) ölçülmesiyle elde edilen değerler, doğrudan malzemenin mikroyapısal yoğunluğu ve sürekliliği hakkında bilgi verir. Bu çalışmada, 7, 28 ve 180 günlük kür süreleri sonunda elde edilen UPV değerleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

7 günlük kür sonunda en yüksek UPV değeri, NC katkılı M3 karışımında ölçülmüştür. NC'nin amorf yapısı, erken yaşta karboalüminat oluşumunu hızlandırarak matris yoğunluğunu artırmış ve UPV performansını olumlu yönde etkilemiştir. Katkısız M1 numunesi, M3'e kıyasla daha düşük bir UPV değeri göstermiş olsa da, yapısal bütünlük açısından görece yakın bir seviyede bulunmuştur. NCC katkılı karışımlar, erken yaşta NC'ye kıyasla daha düşük UPV değerleri sergilemiş; bu fark NCC'nin kristalin yapısının hidrasyon ürünleriyle sınırlı etkileşiminden kaynaklanmıştır. Uçucu kül (UK) ikamesi yapılan karışımlar, erken yaşta kontrol numunesine göre daha düşük UPV değerleri elde etmiştir. Bu durum, UK'nin başlangıç döneminde hidrasyon sürecine sınırlı katkı sağlaması ve mikroyapının yeterince yoğunlaşmamasıyla ilişkilidir. Bununla birlikte, UK ile NC veya NCC kombinasyonu, yalnızca UK içeren karışımlara kıyasla daha yüksek UPV değerleri üretmiştir; bu fark, nano katkıların mikroyapı sıklığını artırıcı etkisinden kaynaklanmaktadır. 28 günlük kür yaşında, tıpkı erken yaşta olduğu gibi en yüksek UPV değeri yine M3 karışımında gözlemlenmiş; onu NCC katkılı M5 ve katkısız M1 numuneleri takip etmiştir. Üç karışımın UPV değerleri birbirine oldukça yakın olmakla birlikte, NC katkısının matris sürekliliğine sağladığı katkı net olarak görülmüştür. UK içeren karışımlar, pozolanik reaksiyonlar sonucu orta yaşta kısmen iyileşme göstermiş ancak UK'siz karışımların seviyesine ulaşamamıştır. NC içeren karışımlar, NCC içerenlere kıyasla daha yüksek UPV değerleri üretmiş ve UK + NC kombinasyonu sinerjik bir etkiyle en yüksek iyileşmeyi sağlamıştır. Ancak, erken yaşta kıyasla bu katkı etkisinin 28 günlük sürede nispeten azaldığı tespit edilmiştir. 180 günlük kür yaşında en yüksek UPV değeri M4 ve M3 karışımlarında elde edilmiştir. UK ve nano katkı kombinasyonlarının, geç yaşta daha kararlı ve yoğun bir iç yapı oluşturduğu görülmüştür.

M1–M6 karışımlarında, 7 günden 180 güne kadar olan UPV değişim oranları sırasıyla %6.2, %13.1, %4.6, %11.6, %-1.3 ve %6.2 olarak hesaplanmıştır. Bu artış oranlarının

görece düşük kalması, polimerik kafeslerin matris içerisinde mikro düzeyde süreksizlikler oluşturarak mikroyapısal iyileşmeyi sınırlaması ile ilişkilendirilmiştir. Tüm numunelerde kullanılan PETG kafesler, çatlak yayılımını yönlendirme ve yük dağılımını düzenleme açısından faydalı olsa da UPV performansına beklenen düzeyde katkı sunmamıştır. Literatürde nano katkıların geçiş bölgelerini iyileştirdiği sıkça rapor edilmesine rağmen, bu çalışmada PETG kafeslerin yarattığı mikro boşluklar ve zayıf ara yüz bölgeleri, nano ve mineral katkıların olumlu etkisini sınırlamıştır. UPV test sonuçları, nano katkıların mikroyapı yoğunluğunu artırmada erken yaşta daha belirgin, orta yaşta ise görece sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. NC, amorf yapısı sayesinde NCC'ye kıyasla daha yüksek performans sergilemiştir. UK'nin puzolanik aktivitesi ise geç yaşta belirginleşmiş; UK + nano katkı kombinasyonları, en yoğun mikroyapıyı sağlayarak UPV değerlerini yükseltmiştir. PETG kafes sistemleri, çatlak kontrolü açısından avantaj sunsa da düşük mekanik ve elastik özellikleri nedeniyle mikroyapısal gelişimi kısıtlamış, böylece UPV artışını sınırlı seviyelerde tutmuştur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışma, nano katkılar içerisinde özellikle NC ilavesinin erken yaşta çimento matrisinin mikroyapısal yoğunluğunu artırarak en yüksek basınç dayanımı ve UPV değerlerini sağladığını ortaya koymuştur. NC'nin amorf yapısı, hidrasyon sürecinde karboalüminat oluşumunu hızlandırmakta ve bu durum erken mekanik dayanımı önemli ölçüde iyileştirmektedir. Buna karşılık nano kalsiyum karbonat (NCC), kristalin yapısının hidrasyon ürünleriyle daha sınırlı etkileşimi nedeniyle erken yaşta düşük performans göstermiş, ancak geç yaşta dayanım açısından NC'ye yaklaşmış ve bazı durumlarda onu aşmıştır.

Uçucu kül (UK) ikamesi, erken yaşlarda hem basınç dayanımı hem de UPV değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Bu durum, UK'nin puzolanik reaksiyonlarının başlangıç aşamasında sınırlı olması ile açıklanmaktadır. Ancak 180 günlük kür sonunda UK, ikincil C-S-H jel oluşumunu teşvik ederek mikroyapısal yoğunluğu ve basınç dayanımını artırmıştır. Özellikle nano katkılarla birlikte kullanıldığında UK'nin geç yaş performans üzerindeki olumlu etkisi daha da belirginleşmiştir.

Katkı kombinasyonları incelendiğinde, UK + NC bileşimleri hem mekanik hem de mikroyapısal performans açısından UK + NCC karışımlarına kıyasla daha yüksek verim sağlamıştır. NC'nin amorf yapısı hem CEM I hem de UK ile güçlü bir sinerji oluştururken, NCC katkısının özellikle uzun kür sürelerinde etkinliğinin arttığı belirlenmiştir. Bu durum, katkı seçiminde hedeflenen performans zaman çizelgesinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

PETG esaslı 3D baskı kafes sistemlerinin, çatlak yönlendirme ve yük dağılımı açısından belirli avantajlar sağladığı, ancak düşük elastik modül ve basınç dayanımı nedeniyle nihai mekanik performansı sınırladığı görülmüştür. Deneyler, PETG kafeslerin 28 günlük basınç dayanımında yaklaşık %24.65, 180 günlük dayanımda ise %21.10'luk bir düşüşe yol açtığını ortaya koymuştur. UPV sonuçlarında da benzer şekilde, PETG kafeslerin mikro düzeyde süreksizlikler oluşturduğu ve nano katkılarının olumlu etkilerini kısmen sınırlandırdığı belirlenmiştir.

Yaş bazlı performans eğilimleri incelendiğinde, erken yaşta NC katkılı karışımların en yüksek dayanım ve mikroyapısal bütünlüğü sağladığı, orta yaşta NC'nin

etkisinin devam ettiği ancak göreceli olarak azaldığı, geç yaşta ise UK'nin puzolanik aktivitesinin belirginleşerek NCC katkılı karışımların performansını artırdığı görülmüştür. Bu durum, katkı etkilerinin zamanla değiştiğini ve uygulama amacına göre farklı katkı stratejilerinin benimsenmesi gerektiğini göstermektedir.

5.2. neriler

Erken yaş dayanımın kritik olduğu uygulamalarda NC katkısının tercih edilmesi önerilmektedir. NC, hidrasyon sürecini hızlandırarak kısa sürede yüksek mekanik dayanım elde edilmesini sağlamakta ve bu yönüyle hızlı kalıp sökümü veya erken yk alması gereken yapı elemanlarında önemli avantaj sunmaktadır. Buna karşılık, uzun vadeli performansın ön planda olduğu durumlarda nano kalsiyum karbonatın (NCC), özellikle uçucu kül ile birlikte kullanıldığında geç yaş dayanımını artırma potansiyeli değerlendirilebilir.

Uçucu kül, erken yaş dayanımı düşürmesine rağmen uzun servis ömrü hedeflenen yapı malzemelerinde geç yaşta sağladığı dayanım artışı ve mikroyapı yoğunluğu açısından avantajlıdır. Bu nedenle, yüksek dayanıklılık gerektiren altyapı projelerinde UK ile birlikte nano katkı kullanımı önerilmektedir. Böyle bir kombinasyon hem dayanım hem de uzun dönem mikroyapısal bütünlük açısından olumlu sonuçlar vermektedir.

PETG kafes sistemleri, mevcut haliyle mekanik dayanım açısından yeterli katkı sağlayamamaktadır. Bu nedenle, daha yüksek elastik modül ve basınç dayanımına sahip polimer veya kompozit malzemelerden üretilmiş yeni kafes tasarımları geliştirilmelidir. Ayrıca, kafes geometrisinin mikro boşluk oluşumunu en aza indirecek şekilde optimize edilmesi ve imento matrisi ile aderansı artıracak yüzey modifikasyon yöntemlerinin uygulanması tavsiye edilmektedir.

NC katkılı sistemler, erken açılacak kalıplarda veya hızlı yk taşıması gereken onarım harçlarında tercih edilebilirken; UK ve nano katkı kombinasyonları, özellikle uzun vadeli dayanım ve çevresel etkilere karşı direnç gerektiren altyapı uygulamaları için uygundur. Böylece, katkı seçimi yapının kullanım amacı, hedeflenen servis ömrü ve ekonomik faktörler göz önünde bulundurularak daha bilinçli şekilde yapılabilir.

Gelecek alışmalarda, PETG kafeslerin yüzey modifikasyonu ile imento matrisi ile aderansının artırılması, nano katkılarının farklı oran ve partikül boyutlarıyla performans değişimlerinin araştırılması ve yalnızca mekanik dayanım değil, rötre, donma-çözülme ve sülfat dayanımı gibi diğer dayanıklılık kriterlerinin de incelenmesi önerilmektedir.

Böylelikle, katkı ve kafes sistemlerinin gerçek saha koşullarındaki performansı hakkında daha kapsamlı ve güvenilir veriler elde edilebilir

KAYNAKLAR

- ACI Committee 440. (2015). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-15). American Concrete Institute.
- Al-Kharabsheh, B. N., Arbili, M. M., Majdi, A., Alogla, S. M., Hakamy, A., Ahmad, J., & Deifalla, A. F. (2023). Basalt fiber reinforced concrete: A compressive review on durability aspects. *Materials*, 16(1), 429. <https://doi.org/10.3390/ma16010429>
- Al-Sabagh, A. M., Yehia, A., & Mohamed, M. H. (2019). Effect of 3D printed polymeric lattices on mechanical performance of cementitious composites. *Materials Today: Proceedings*, 18, 5382–5389.
- Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattice materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15–30. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1678>
- Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. Cambridge University Engineering Department.
- ASTM. (2008). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (ASTM C618-08). American Society for Testing and Materials.
- ASTM C597-09. (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. American Society for Testing and Materials.
- ASTM C618. (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International.
- Awoyera, P. O., & Adesina, A. (2020). Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00330. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Bol, R. J. M., Xu, Y., Luković, M., & Šavija, B. (2025). Does printing direction influence the bond between 3D printed polymers and cementitious matrices? *Engineering Failure Analysis*. Retrieved from <https://framcos.org/FraMCoS-12/Full-Papers/1162.pdf>
- Bos, F. P., Wolfs, R. J. M., Ahmed, Z. Y., & Salet, T. A. M. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete

- printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209–225.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- Brameshuber, W. (Ed.). (2006). *Textile Reinforced Concrete: State of the Art Report of RILEM TC 201-TRC*. RILEM Publications.
- Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G., & Thorpe, A. (2007). Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16(2), 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49.
- CharlesC. (2009). *RepRap v2 Mendel 3D printer* [Illustration]. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7844781>
- CCF Filament. (2024). CCF PETG Filament – Technical Data Sheet.
- Chen, Y., Zhang, Y., Zheng, Q., & Wang, J. (2021). Mechanical performance and application of lattice structures in concrete reinforcement. *Construction and Building Materials*, 289, 123074. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123074>
- Chia, H. N., & Wu, B. M. (2015). Recent advances in 3D printing of biomaterials. *Journal of Biological Engineering*, 9(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s13036-015-0001-4>
- Demirhan, S. (2017). *Nano malzemeler ile modifiye edilmiş yüksek performanslı hibrid lif donatılı betonlar* (Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).
- Demirhan, S. (2020). Combined effects of nano-sized calcite and fly ash on hydration and microstructural properties of mortars. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(6), 1051–1067. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.825862>
- Demirhan, S. (2022). *Effect of different nanosized limestone formations on fiber–matrix interface properties of engineered cementitious composites*. *Structural Concrete*, 1–17. <https://doi.org/10.1002/suco.202100482>
- Department of Economy and Tourism – Dubai. (n.d.). *The Office of the Future* [Photograph]. Visit Dubai. <https://www.visitdubai.com/tr/places-to-visit/the-office-of-the-future>
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587.

- Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). *Cellular solids: Structure and properties* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2021). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
- Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215–243.
- Hemalatha, T., & Ramaswamy, A. (2017). A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 147, 546–559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- Hull, C. W. (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. U.S. Patent No. 4,575,330.
- Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C., & Bowyer, A. (2011). RepRap – The replicating rapid prototyper. *Robotica*, 29(1), 177–191.
- Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C., & Bowyer, A. (2011). RepRap – The replicating rapid prototyper. *Robotica*, 29(1), 177–191. <https://doi.org/10.1017/S026357471000069X>
- Kantaros, A., et al. (2025). Smart materials and embedded sensors within 3D-printed components enable predictive maintenance, structural health monitoring, and autonomous self-repair. *Applied Sciences*, 15(7), 3719. <https://doi.org/10.3390/app15073719>
- Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals*, 47(2), 525–540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5)
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45(8), 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>

- Lin, R., Huang, B., Yang, J., Liu, X., & Li, H. (2023). Effect of nano-CaCO₃ on hydration, microstructure and mechanical properties of cement paste. *Construction and Building Materials*, 363, 129901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129901>
- Liu, S., Zhang, Y., Xu, J., & Chen, H. (2024). Synergistic effects of nano-CaCO₃ on the hydration and strength development of Portland cement systems. *Cement and Concrete Composites*, 140, 105076. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105076>
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
- Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., & Hague, R. J. M. (2017). Compressive properties of titanium alloy lattice structures manufactured by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 16, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.04.003>
- Master Builders Solutions. (2020). MasterGlenium 51 – High-range water-reducing admixture (Technical Data Sheet). MBCC Group.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology* (2nd ed.). Pearson Education.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Paul, S. C., van Zijl, G. P. A. G., & Tan, M. J. (2018). A review on 3D printing in the construction industry. *Engineering Structures*, 173, 406–420.
- Perkins, I., & Skitmore, M. (2015). Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*, 15(1), 1–9. <https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1012136>
- Ramachandran, V. S., Beaudoin, J. J., & Feldman, R. F. (2003). *Concrete admixtures handbook: Properties, science and technology* (2nd ed.). William Andrew Publishing.
- Rankouhi, B., Javadpour, S., Delfanian, F., & Letcher, T. (2016). Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16, 467–481.

- Said, A. M., Zeidan, M. S., Bassuoni, M. T., & Tian, Y. (2012). Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials*, 36, 838–844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.044>
- Su, W., Liu, C., Bao, W., Zheng, Z., Ma, G., Deng, Y., & Ye, W. (2024). Study on the mechanical performance, durability, and microscopic mechanism of cement mortar modified by a composite of graphene oxide and nano-calcium carbonate. *Buildings*, 14(7), 2236. <https://doi.org/10.3390/buildings14072236>
- Thomas, M. D. A., Bentz, E. C., & Bamforth, P. B. (2007). Modeling the influence of cement composition on the corrosion resistance of concrete. *Materials and Structures*, 40(3), 297–306.
- Wang, Y., He, Y., & Zhang, H. (2022). Mechanical performance and energy absorption of polymer lattice structures with various unit cells fabricated by fused deposition modeling. *Construction and Building Materials*, 333, 127418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127418>
- Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>
- Xu, Y., Savija, B., & Bol, R. J. M. (2024). Elevating mechanical performance of cementitious composites with surface-modified 3D-printed polymeric reinforcements. *Developments in the Built Environment*, 19, 100522. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100522>
- Yang, Y., Chen, Z., Liu, Y., & Liu, X. (2020). Optimization and manufacturing of lattice structures for engineering applications. *Journal of Materials Science & Technology*, 44, 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.01.003>
- Zhang, M. H., Islam, J., & Peethamparan, S. (2010). Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash. *Construction and Building Materials*, 30, 152–161.
- Zhang, Y., Wang, K., Wang, X., & Shi, C. (2021). Effects of fly ash on the properties of concrete: A review. *Cement and Concrete Research*, 146, 106457.
- Zhang, M.-H., & Li, H. (2011). Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement. *Construction and Building Materials*, 25(2), 608–616.
- Zhang, Z., & Han, J. (2025). The effect of Nano-CaCO₃ on the properties of concrete: A review. *International Journal of Environmental and Health*, 7(3). <https://doi.org/10.54097/885f8h30>
- Zhu, F., Lu, G., & Wang, Z. (2010). Energy absorption characteristics of metallic lattice materials. *International Journal of Protective Structures*, 1(4), 507–530. <https://doi.org/10.1260/2041-4196.1.4.507>