

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA PERLİT İKAMELİ BETONALARDA
EKSENEL ÇEKME TESTLERİNE DAYALI ADERANS-DONATI KAYMASI
DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

Onur GÜRSU

Danışman: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN
Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU
Dr. Öğr.Üyesi Ahmet İhsan TURAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Onur GÜRSU]. Yüksek Lisans Tezi.

Her hakkı saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU danışmanlığında, Onur GÜRSU tarafından hazırlanan bu çalışma 26.01.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği AnaBilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN

İmza:

Üye : Doç.Dr.Atila KUMBASAROĞLU

İmza:

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Ahmet İhsan TURAN

İmza:

Bu tez Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Yüksek sıcaklık etkisi altında perlit ikameli betonlarda eksenel çekme testlerine dayalı aderans-donatı kayması davranışının araştırılması” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 26/01/2026

(İmza)

Onur GÜRSU

ÖZET

YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA PERLİT İKAMELİ BETONALARDA EKSENEL ÇEKME TESTLERİNE DAYALI ADERANS-DONATI KAYMASI DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

Onur GÜRSU

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

2026, 54 sayfa

Betonarme yapılar, kullanım ömürleri boyunca çeşitli dış etkilere maruz kalmakta ve bu durum yapıların performans seviyelerinin hedeflenen tasarım kriterlerinden sapmasına neden olmaktadır. Betonarme yapılarda hasara yol açan en yaygın ve kritik dış etkilere biri yüksek sıcaklıktır. Yüksek sıcaklık, betonarme yapının iki ana bileşeni olan beton ve donatının mekanik özelliklerini zayıflatarak yapısal performansı olumsuz etkilemektedir. Bu performans kaybındaki en kritik parametrelerden biri, betonarme davranışının temel mekanizmasını oluşturan donatı ile beton arasındaki aderans ilişkisidir. Yüksek sıcaklık etkisiyle beton bünyesinde meydana gelen mikro ve makro çatlaklar, aderans dayanımında belirgin düşüşlere yol açmaktadır. Bu bağlamda gerçekleştirilen tez çalışmasında; betonarme elemanlarda aderans davranışının sıcaklık etkisi altındaki değişimi çekip çıkarma (pull-out) deneyleri ile incelenmiştir. Çalışmada, geleneksel agregaya kıyasla daha üstün ısı özelliklerine sahip perlit agregası kullanılarak üretilen ve donatı yerleştirilen 25 ve 40 MPa basınç dayanımlı numuneler ile bunların geleneksel agregalı muadilleri (kontrol numuneleri) kıyaslanmıştır. Tüm numuneler 25 (referans), 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklık etkileri altında test edilmiştir. Elde edilen bulgular, perlit agregalı betonların yüksek sıcaklık altında daha fazla kütle kaybetmesine rağmen, donatı-beton aderansını koruma konusunda geleneksel betona göre daha avantajlı ve kararlı bir performans sergilediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Perlit Agregalı Beton, Yüksek Sıcaklık, Çekip Çıkarma Deneyi, Aderans Dayanımı

ABSTRACT

MSc THESIS

Onur GÜRSU

**Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of of Civil Engineering**

Advisor: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

2026, 54 pages

Reinforced concrete structures are exposed to various external effects throughout their service life, which may cause deviations in structural performance from the intended design criteria. One of the most common and critical external factors leading to damage in reinforced concrete structures is high temperature. Elevated temperatures adversely affect structural performance by degrading the mechanical properties of both concrete and reinforcement, which are the two main components of reinforced concrete systems. One of the most critical parameters governing this performance degradation is the bond relationship between reinforcement and concrete, which constitutes the fundamental mechanism of reinforced concrete behavior. Micro- and macro-cracks that develop within the concrete matrix due to high-temperature exposure lead to significant reductions in bond strength. In this context, the present thesis investigates the variation of bond behavior in reinforced concrete elements under the influence of elevated temperatures through pull-out tests. The study compares reinforced concrete specimens with compressive strengths of 25 and 40 MPa produced using perlite aggregate—known for its superior thermal properties compared to conventional aggregates—with their conventional aggregate counterparts (control specimens). All specimens were tested under temperature exposures of 25 °C (reference), 200, 400, 600, and 800 °C. The results indicate that although perlite aggregate concretes exhibit greater mass loss under high temperatures, they demonstrate a more advantageous and stable performance in preserving the reinforcement–concrete bond compared to conventional concretes.

Keywords: Pull-out test, Perlite aggregate concrete, Bond strength, Elevated temperature

TEŞEKKÜR

Lisansüstü çalışmamın tüm aşamalarında akademik bilgi ve tecrübeleriyle, çözüm odaklı yaklaşımları ve özgün katkılarıyla bana rehberlik eden çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU'na; değerli katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Hakan YALÇINER'e, Dr. Öğr. Üyesi Ahmet İhsan TURAN'a ve Dr. Öğr. Üyesi Alper ÇELİK'e içten teşekkür ederim.

Bu çalışma, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından desteklenen “Korozyon ve yüksek sıcaklık etkisinde perlit ve geleneksel betonun aderans- kayma davranışlarının araştırılması” başlıklı ve FYL-2024-1020 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve BAP Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim

Varlıklarıyla en büyük desteğim olan, sevgileriyle her daim güç bulduğum inancını hiçbir zaman eksik etmeyen kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Onur GÜRSU

Ocak, 2026.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1.GİRİŞ	1
2.KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	5
3. YÖNTEM	16
3.1. Materyal	16
3.1.1. Çimento	16
3.1.2 İnce ve iri agrega (Perlit ve doğal agregalar)	16
3.1.3 Donatı çeliği	17
3.2. Karışım oranları ve numune tasarımı	17
3.3. Numune üretim süreci ve kodlama	18
3.4.Yüksek sıcaklık deneyleri	23
3.5. Sıcaklık rejimi	25
3.6. Ultrases geçiş hızı (UGH) deneyi	27
3.7. Kütle kaybı deneyi	28
3.8.Çekip-Çıkarma (Pull-Out) deneyi	29
3.8.1. Deneysel Olarak Tanımlanan Gömme Uzunlukları ve Aderans–Donatı Kayması İlişkileri	29
3.8.2. Deney düzeneği	32
3.8.3.Yükleme hızı ve ölçüm parametreleri	34
3.8.4.Deney protokolü	34
4.BULGULAR	35
4.1. Kütle Kayıpları	35
4.2. Renk Değişimleri	36
4.3. UPV Ölçümleri	38
4.4 Aderans-Donatı Kayması İlişkileri	40
4.5. Çatlak ve Hasar Mekanizmaları	44
5. SONUÇLAR	49
KAYNAKÇA	51

TABLÖLAR DİZİN

Tablo 1. 1.Dünya perlit rezervleri.....	3
Tablo 1. 2. Dünya perlit ihracat verileri (2015-2019).....	3
Tablo 2. 1. Yangın denetimi kontrol listesi.....	12
Tablo 3. 1.Çalışmada kullanılan geleneksel agregası ve ham perlit agregasının fiziksel özellikleri.....	20
Tablo 3. 2.Geleneksel ve Perlit agregalı betonların karışım oranları (kg/m ³).....	21
Tablo 4. 1. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan tüm küp numunelerin yüzeyleri.....	38
Tablo 4. 2. Yüksek sıcaklık yakım sonrası çatlak görselleri.....	45
Tablo 4. 3. 200° sıcaklık sonrası yüzey çatlak formasyonu.....	47
Tablo 4. 4. 400° sıcaklık sonrası yüzey çatlak formasyonu.....	47
Tablo 4. 5. 600° sıcaklık sonrası yüzey çatlak formasyonu.....	48
Tablo 4. 6. 800° sıcaklık sonrası yüzey” çatlak formasyonu.....	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

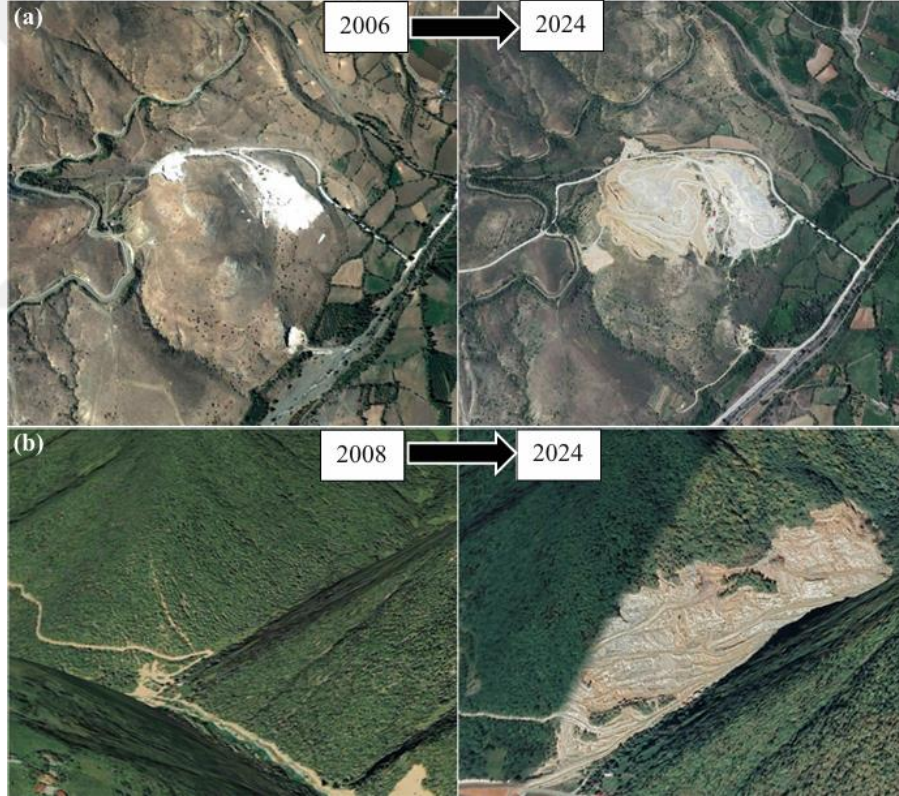
Şekil 1. 1. Taş ocaklarındaki çevresel tahribatın uydu görüntüleri: (a) Erzincan, Türkiye, (b) Rize, Türkiye.	1
Şekil 1. 2 a) perlit b) dolomit c) Keramzit.	2
Şekil 2. 1. Nervürlü donatı için çevresindeki betona yük aktarımı.	6
Şekil 2. 2. Donatı sıyrılması (düz donatı).	6
Şekil 2. 3. Tipik bağ gerilim-kayma eğrisi.	7
Şekil 2. 4. Merkezi çekme etkisindeki donatıdaki çekme ve aderans gerilmesi dağılımı.	8
Şekil 2. 5. Şematik görünüm: (a) çekip-çıkarma numunesi; (b) giriş ucu numunesi; (c) giriş ankraj numunesi; ve (d) bindirme boyu (ek) numunesi.	9
Şekil 2. 6. Betonda yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen fizikokimyasal bozulmalar.	10
Şekil 2. 7. RC yapı elemanlarının artık kapasitesinin değerlendirilmesi.	11
Şekil 2. 8. Sıcaklığa bağlı beton renk değişimi.	13
Şekil 3. 1. Numune ve donatı kesit özellikleri.	18
Şekil 3. 2. Numune üretim sürecine ait görseller: (a) Doğal perlit agregasının kurutulması (b) Doğal perlit agregasının elenmesi (c) Elenmiş perlit agregaları.	18
Şekil 3. 3. Elek analizi: (a) Perlit agregasının el ile elenmesi (b) Perlit agregasının elek üzerinde kalan kısmı (4-6 mm).	19
Şekil 3. 4. Beton döküm süreci: (a) Mobil beton mikseri (b) Agregası hazırlığı (c) Beton dökümü.	20
Şekil 3. 5. Deneysel program: (a) Geleneksel beton deney programı.	22
Şekil 3. 6. Deneysel program: (b) Perlitli beton deney programı.	22
Şekil 3. 7. Numune renklendirme ve etiketleme.	23
Şekil 3. 8. Etüve bırakılan tüm numuneler.	23
Şekil 3. 9. Yüksek sıcaklık deneyi için kullanılan fırın.	24
Şekil 3. 10. Numunelerde oluşan çatlak listesi.	24
Şekil 3. 11. Çatlak çizimi: (a) C5-200-1-6. Kenar çatlak çizimi (b) P25-400-1-2. Kenar çatlak çizimi (c) C40-600-3-6. Kenar çatlak çizimi (d) C25-800-3-4. Kenar çatlak çizimi.	25
Şekil 3. 12. UGH deneyi: (a) Deney düzeniği teorik gösterimi (b) Upv cihazı.	28
Şekil 3. 13. Yüksek sıcaklık deneyi öncesi ve sonrası tartımlar: (a) Yüksek sıcaklık öncesi yağırılık ölçümü (b) Yüksek sıcaklık sonrası yağırılık ölçümü.	29
Şekil 3. 14. Aderans-donatı kayması ilişkisi (a) Sezen ve Setzler'in elastik aderans gerilme modeli ve (b) Alsiwat ve Saatcioglu'nun aderans gerilme modeli.	30
Şekil 3. 15. Çekme testi aparat çizimi: (a) Aparat tüm kenarların çizimi (b) Üç boyutlu aparat çizimi.	33
Şekil 3. 16. Aparat düzeneği: (a) Aparat şematik gösterimi (b) Aparat üretim aşaması (c) Aparat ve numune kullanımı.	33
Şekil 4. 1. Kütle kayıpları.	36
Şekil 4. 2. UPV Ölçüm Değerleri	40
Şekil 4. 3. C25 Aderans-Donatı Kayma İlişkisi	41
Şekil 4. 4. C40 Aderans-Donatı Kayma İlişkisi	42
Şekil 4. 5. P25 Aderans-Donatı Kayma İlişkisi	43
Şekil 4. 6. P40 Aderans-Donatı Kayma İlişkisi	44

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
EPS	Genişletilmiş Polistiren
ERMCO	Avrupa Hazır Beton Birliği
LVDT	Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör
TS	Türk Standardı
TS EN	Avrupa Standardı Esas Alınarak Türk Standardı Hâline Getirilmiş Standart
Lb	Kenetlenme boyu
f_{yd}	Donatının tasarım akma dayanımı
f_{ctd}	Kullanılan betonun tasarım çekme dayanımı
$\emptyset$	Donatı çapı
f_{ctk}	Karakteristik çekme dayanımı
f_{ck}	Karakteristik basınç dayanımı
τ_b	Aderans gerilmes
τ_b	Aderans gerilmesi
f_y	Akma dayanımı
ψ_t	Gömme boyunu değiştirme faktörü
ψ_e	Donatı gömme boyunu değiştirme faktörü
ψ_g	Donatı kalitesine bağlı olarak gömme boyu faktörü
A_b	Donatı çubuk alan

1.GİRİŞ

Küresel anlamda lokomotif sektörlerden olan inşaat endüstrisinin giderek büyümesi, betonun en önemli hammaddesi konumunda olan agregaya olan ihtiyacı artırmıştır. (Neville, 1996; Singh vd., 2021) 2020 yılında, 14 milyar m³ tüketim oranıyla beton, sudan sonra dünya genelinde en çok tüketilen yapı malzemesi olmuştur. Bu artan ihtiyacı karşılamak için hem yüksek enerji harcanmakta hem de doğal kaynaklar hızla tüketilerek çevresel sorunlara yol açmaktadır (Manzi vd., 2013; Yang vd., 2011). Bu kapsamda, doğaya yönelik söz konusu tahribatı somut biçimde ortaya koymak amacıyla, Erzincan ve Rize illerinde beton santrallerine taş agregası temin eden ocaklara ait görüntüler Google Earth Pro (GEP) görüntüleri Şekil 1.1’de verilmiştir. Şekil 1.1’den 2000’li yıllarında başlarından günümüze kadar geçen sürede meydana gelen bozulma görülmektedir.



Şekil 1. 1.Taş ocaklarındaki çevresel tahribatın uydu görüntüleri: (a) Erzincan,Türkiye, (b) Rize, Türkiye (Atlı vd., 2025).

İnşaat sektörünün genel olarak CO₂ emisyonlarına birincil katkıda bulunan sektör olduğu bildirilmiştir (Ahmad vd., 2019). İnşaat sektöründe artan agrega tüketiminin önüne geçmek amacıyla doğal taş agregalarına alternatif olması amacıyla çeşitli atık malzemeler veya perlit,

dolamit, keramzit gibi hafif agregaların kullanılmaktadır. Şekil 1.2’de bu malzemelere ait örnek görseller gösterilmektedir.



Şekil 1. 2 a) perlit b) dolamit c) Keramzit.

Perlit madeni doğada doğal yollarla oluşumu meydana gelen amorf yapılı bir kayadır. Perlit yüksek sıcaklık etkilerine maruz kaldığında mikro yapısında büyük hacimsel genleşmeler meydana gelmektedir. Perlitte meydana gelen bu genleşme iç yapısındaki suyun ortamdan uzaklaşarak boşluklu mikro formuna ulaşmasını sağlayarak düşük yoğunluk ve düşük ısı iletkenliği gibi özellikler kazanmasına olanak sağlamaktadır. Perlitin inşaat, tarım, ilaç gibi sektörlerde yalıtım, filtrasyon ve dezenfeksiyon gibi çeşitli kullanım alanları vardır. İnşaat endüstrisi özelinde ise perlit genellikle yalıtım amaçlı kullanılmaktadır. Tablo 1.1’de gösterilen dünya perlit rezerv verilerinden dünya perlit rezervinin yaklaşık %77.9’u beş ülkede bulunmaktadır: Çin (%38.6), Yunanistan (%17.1), Türkiye (%8.1), ABD (%7.1), ve Macaristan (%7.0) (Brown vd., 2021).

Tablo 1. 1.Dünya perlit rezervleri.

Ülke	Tahmini Rezerv (milyon ton-%pay)		
	Çin	270	38.6%
	Yunanistan	120	17.1%
	Türkiye	57	8.1%
	ABD	50	7.1%
	Macaristan	49	7.0%
	Diğerleri	154	22.0%
	Toplam	700	100%

2019 yılı verilerine göre, Türkiye 528.943 tonluk ihracat miktarıyla dünya sıralamasında ilk sırada yer almaktadır. Fakat ton başına ürün fiyatı incelendiğinde ise bu listede son sıralarda yer almaktadır. Bu durum Türkiye'nin sahip olduğu bu büyük perlit satış miktarının, perlitin ekonomik anlamda ne ölçüde değerlendirildiğini düşündürmektedir.

Tablo 1. 2. Dünya perlit ihracat verileri (2015-2019)

Ülke (İhracatçı)	2015	2016	2017	2018	2019	2019 Ortalama Fiyat (\$/ton)
Türkiye	417.312	410.787	494.331	491.317	528.943	61
Yunanistan	454.894	444.868	442.443	470.988	413.812	72
Çin	336.373	328.132	281.527	286.154	261.166	112
Macaristan	44.258	48.002	45.054	60.514	59.041	88
Belçika	82.036	72.471	72.682	57.081	36.961	281
ABD*	18.000	16.000	18.000	16.000	13.000	555
Yeni Zelanda	5.276	9.669	9.913	7.132	3.909	134

* USGS (ABD Jeolojik Araştırmalar Kurumu) tahmini, ** yeniden ihracat (çoğunlukla Yunanistan ve Türkiye'den).

Deprem yönetmeliklerine ve tasarım prensiplerine uygun olarak inşa edilmiş betonarme (BA) yapılar, hizmet ömürleri boyunca rüzgar yükü, ölü yük, hareketli yük, kar yükü, sismik yükler ve çevresel etkiler dahil olmak üzere çok sayıda etkene maruz kalır. Ek olarak betonarme yapıların kullanım ömürleri süresince hasara uğramasına neden olan bir olgu da yangın etkisidir. Yangınlar sadece kazara değil deprem gibi doğal afetler sonrasında da meydana gelebilir. Betonarme yapılarda yangının oluşum aşamasından sonra sıcaklık 1000 °C'nin üzerine çıkarak betonun dayanım ve rijitlik gibi temel mekanik özelliklerinin bozulmasına neden olabilir (Chen vd., 2014; Khan vd., 2022) . Düşük dayanımlı kalitesiz malzeme ile inşa edilmiş yapılarda ise yangın yapı malzemelerinin geri dönüşü olmayan hasar durumlarına ulaşmasına sebep olarak ve yapıların yıkımlarıyla sonuçlanabilir (Buchanan ve Abu 2021).

Betonun yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen hasar mekanizması, beton bünyesindeki nemin buharlaşmasıyla oluşan buhar basıncı ve betonun dış yüzeyi ile iç çekirdek kısımlarında sıcaklık farklarından kaynaklanan termal genleşme sonucu oluşan çatlaklar ile açıklanmaktadır. (Peng vd., 2006; Chen vd., 2014). Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, beton üretiminde ince (0-5 mm) ve iri (5-12 mm) doğal agregaya yerine %100 oranında perlit agregası kullanılması durumunda, yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalındığında geleneksel betona kıyasla aderans-sıyrılma ilişkisinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu kapsamda, 25 MPa ve 40 MPa basınç dayanımına sahip küp numuneler 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve gömülü donatılar üzerinde çekip çıkarma (pull-out) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekip çıkarma deneylerine ek olarak, sıcaklığın hem agregaya tipi hem de basınç dayanımı üzerindeki karmaşık etkilerini daha kapsamlı değerlendirebilmek amacıyla UPV ölçümleri, kütle kayıpları ve UPV değişimleri gibi betonun malzeme ve mekanik özellikleri de incelenmiştir. Elde edilen tüm veriler, numunelerin hasar durumları ile birlikte değerlendirilerek, perlit agregasının yapısal beton üretiminde kullanılabilirliği geleneksel betonla karşılaştırmalı olarak ortaya konulacaktır. Ayrıca, Türkiye'nin sahip olduğu zengin perlit rezervleri göz önüne alındığında, bu çalışma kapsamında elde edilen bulguların, perlitin ekonomik değerinin artmasına ve katma değerli bir malzeme olarak değerlendirilmesine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

2.KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Betonarme yapıların tasarım aşamasında yapısal açıdan (yeterli süneklik, yeterli rijitlik, yeterli dayanım) öngörülen ideal davranış, beton ve donatının birlikte uyum içinde çalışması ile sağlanmaktadır (de Sousa Leal Neto ve de Sousa Leal Bonfim 2025). Aderans olarak adlandırılan bu durum betonarme yapının olası sismik yük etkisi altında yeterli düzeyde performans gösterebilmesinin temel koşuludur (Fib, 2013). Donatı ile beton arasındaki aderans dayanımı genel olarak kimyasal yapışma, sürtünme ve mekanik kenetlenmenin meydana getirdiği kayma gerilmeleri olarak tanımlanmaktadır (Lutz ve Gergely, 1967; Kankam, 2004; Zhang vd., 2001) Aderans dayanımı pas payı tabakası, beton basınç dayanımı, beton çekme dayanımı, donatı çapı, donatı akma dayanımı, kenetlenme boyu ve donatının nervür yapısına bağlıdır.

Beton çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki genel olarak $f_{ctk} \cong 0.1 \times f_{ck}$ şeklinde ifade edilmektedir. TS 500 (2014) yönetmeliğinde kenetlenme boyu için önerilen model dikkate alındığında doğrudan çekme dayanımına bağlı olduğu görülmektedir.

$$Lb = 0.12 \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \emptyset \quad (\text{Denklem 1})$$

Denklemden Lb: kenetlenme boyu, f_{yd} : donatının tasarım akma dayanımı, f_{ctd} : kullanılan betonun tasarım çekme dayanımı, $\emptyset$ ise donatı çapını göstermektedir. Aderans dayanımını etkileyen bir diğer parametre ise donatı çapıdır (Ichinose vd., 2004).

Donatı çapının artmasıyla birlikte, gömülü donatının yüzey alanı ve donatıya etki eden yük artmakta; buna karşın aderans gerilmesi azalmaktadır. Bir başka deyişle, donatı çapının azalması aderans gerilmelerinin artmasına neden olmaktadır. Daoud vd. (2002) donatı çapının etkisini incelemiş ve düz ile nervürlü donatının aderans dayanımını tahmin etmeye yönelik deneysel bir model önermiştir. Bu yaklaşıma göre, tasarım sürecinde donatı çapının artırılmasıyla azalan aderans gerilmesinin tolere edilebilmesi için kenetlenme boyunun artırılması önerilmektedir (Arslan, 2017). Düz donatılarda mekanik kenetlenme düşük seviyede iken, nervürlü donatılarda bu parametre büyük öneme sahiptir (Ersoy ve Özcebe, 2001). Nervürlü donatıdan çevresindeki betona yük aktarımı ise şematik olarak Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 1.Nervürlü donatı için çevresindeki betona yük aktarımı (Allen vd., 2003).

Donatının nervürlü yüzey yapısının aderans gerilmesi üzerindeki kritik önemi, hem çeşitli deneysel çalışmalar hem de depremler sonrasında gözlenen aderans problemleriyle açıkça ortaya konmuştur. Bu nedenle, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*'te (DBYBHY, 2007) nervürsüz donatı kullanımı yasaklanmıştır (DBYBHY, 2007). Şekil 2.2'de, deprem sonrasında hasar görmüş bir betonarme kolonda meydana gelen donatı sıyrılması örnek olarak gösterilmektedir.

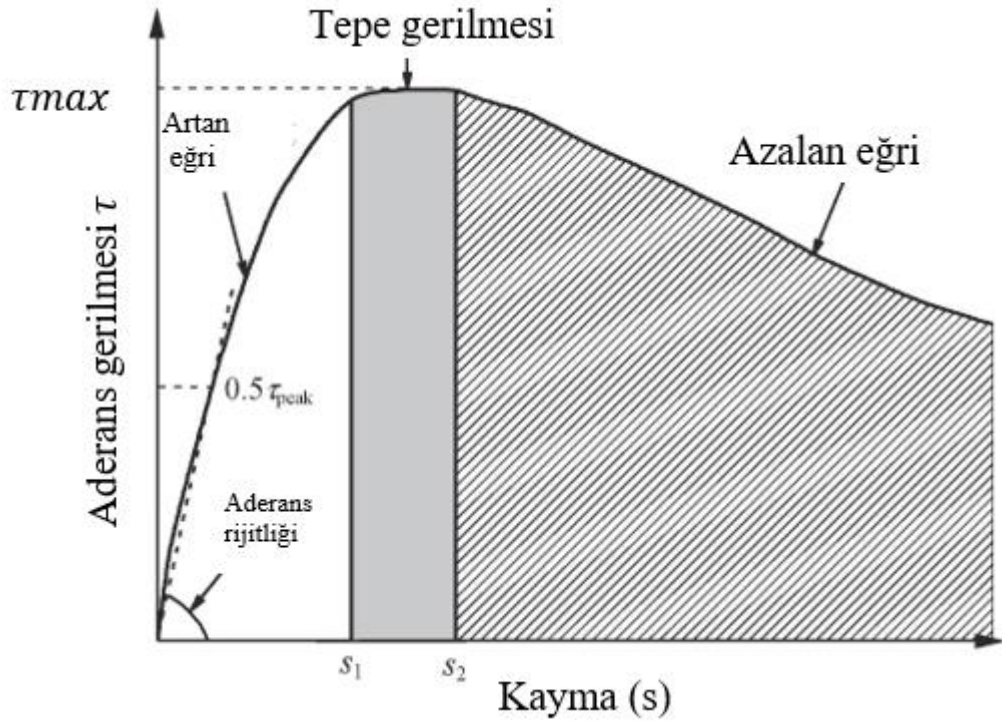


Şekil 2. 2.Donatı sıyrılması (düz donatı).

Betonarme yapılarda aderans dayanımını dolaylı olarak etkileyen bir diğer önemli parametre de betonun basınç dayanımıdır. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'te (ABYYHY-1998), betonarme yapılarda kullanılması gereken minimum beton basınç dayanımı 20 MPa olarak belirtilmiştir.

Ek olarak, beton kalitesini iyileştirmeye yönelik bir diğer önemli düzenleme, 2004 yılında Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından yayımlanan 248 sayılı Genelge ile elle karılmış beton dökümünün yasaklanması ve hazır beton kullanımının zorunlu hale getirilmesidir.

Uygun kenetlenme boyu, yük etkisi altında donatı akma dayanımına ulaştığında beton ile donatı arasında belirgin bir sıyrılmanın oluşmadığı boy olarak tanımlanabilmektedir. Ancak, kenetlenme boyunun artmasının aderans dayanımını azalttığı belirtilmektedir (Carvalho VD., 2018). Pas payının yeterli kalınlıkta olmaması ise yük etkisi altında betonun radyal olarak genişlemesine, dolayısıyla çatlak ve yer yer dökülmelere neden olarak aderans dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir (Tastani ve Pantazopoulou, 2013). Beton ve donatı arasındaki bu genel ilişki, şematik olarak Şekil 2.3'te sunulmuştur.

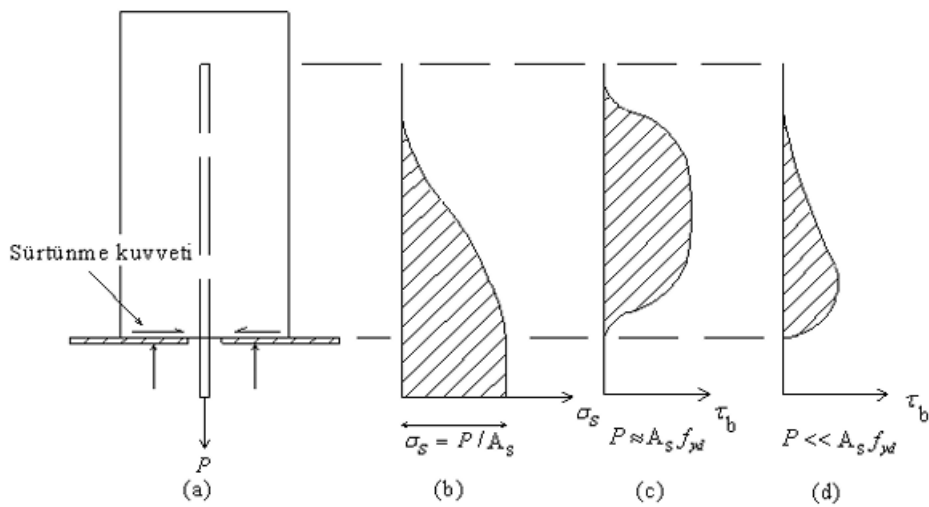


Şekil 2. 3. Tipik bağ gerilim-kayma eğrisi.

Şekil 2.3'te sunulan aderans gerilmesi–sıyrılma davranışı temel olarak üç aşamadan oluşmaktadır (Fib, 2013). Birinci bölüm, yüksek bir başlangıç rijitliğine sahiptir; artan mikro çatlaklar, eğrinin kademeli olarak azalan bir aderans rijitliği sergilemesine neden olmaktadır. İkinci bölümde gözlenen sürekli plato, beton ile donatının uyumlu aderans davranışı göstermesi sonucu oluşan plastisiteye bağlı sabit bir aderans dayanımını temsil etmektedir. Üçüncü bölüm ise donatıda meydana gelen sıyrılma ile birlikte betondaki çatlakların genişlemesi ve yer yer dökülmeler sonucunda aderans dayanımının azaldığı kısmı ifade etmektedir.

Mevcut literatür incelendiğinde, beton ve donatı arasındaki aderans davranışını belirlemeye yönelik çok sayıda deneysel çalışmanın farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Mevcut tasarım yönetmeliklerinde, donatı ile beton arasındaki aderans gerilmelerini belirlemek amacıyla çeşitli deney yöntemleri önerilmektedir. Örneğin, ASTM A944-10 (2015) standardında kiriş ucu çekip çıkarma deneyi, RILEM RC6 (1983) yönergesinde ise çekip çıkarma ve mafsallı kiriş deneyleri tanımlanmaktadır.

Beton numunelere gömülü donatıların çekilmesine yönelik gerçekleştirilen çekip çıkarma testi, beton ile donatı arasındaki aderans dayanımını belirlemek için en yaygın kullanılan test yöntemlerinden biridir (Mousavi vd., 2017). Çekip çıkarma testinde donatıda oluşan çekme ve kayma gerilmeleri şematik olarak Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Şekil 2.4 incelendiğinde, artan yük etkileri de dikkate alındığında, meydana gelen aderans gerilmelerinin donatı boyunca uniform dağılmadığı görülmektedir.



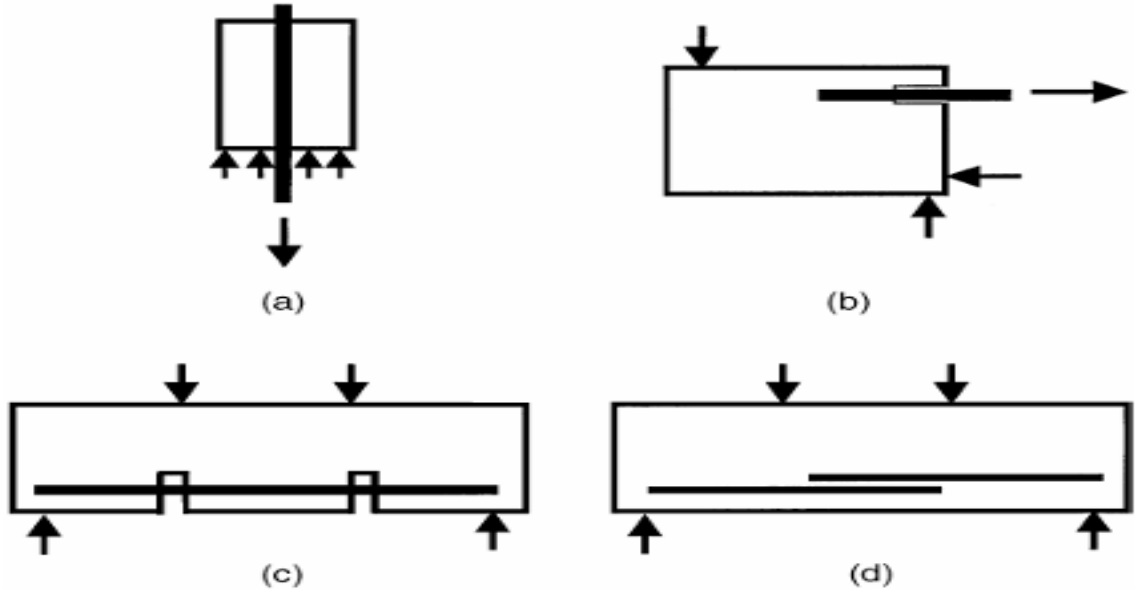
Şekil 2. 4.Merkezi çekme etkisindeki donatıdaki çekme ve aderans gerilmesi dağılımı.

Deney esnasında aderans gerilmelerinde bir değişiklik olmadığı varsayımında, kenetlenme boyu; aderans gerilmesi τ_b , ϕ donatı çapı, donatının akma dayanımı f_{yd} ’ ye bağlı olarak aşağıda sunulan Denklem 1 ile hesaplanabilmektedir.

$$\Sigma(\tau_b \times \text{birim alan}) = P, (\pi\phi)l_b = A_s f_{yd} = \frac{\pi\phi^2}{4} f_{yd} \text{ ise;} \quad (\text{Denklem 2})$$

$$l_b = \frac{f_{yd}}{4\tau_b} \phi \quad (\text{Denklem 3})$$

Çekip çıkarma testlerinde şuana kadar standartlaşmış ve genel kabul görmüş bir test yönteminin olmaması, elde edilen deneysel sonuçların birbirleri arasında doğrudan karşılaştırmasının önünde büyük bir engeldir (Chu ve Kwan, 2018). Benzer malzemeler ve testler ile yapılan deneylerde bile büyük bir değişkenlik gözlenmektedir (İsla vd., 2015). Çekip çıkarma testlerine ek olarak kiriş deneyleri eğilme yük etkisi altındaki elemanlarda aderans dayanımını belirlemede daha gerçekçi sonuçlar verdiği bildirilmiştir (Ehsani vd., 1997). Bu bağlamda gerçekleştirilen en yaygın dört konfigürasyon Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Numunenin detayları yalnızca ölçülen aderans dayanımını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda aderans davranışını bütünüyle etkiler.

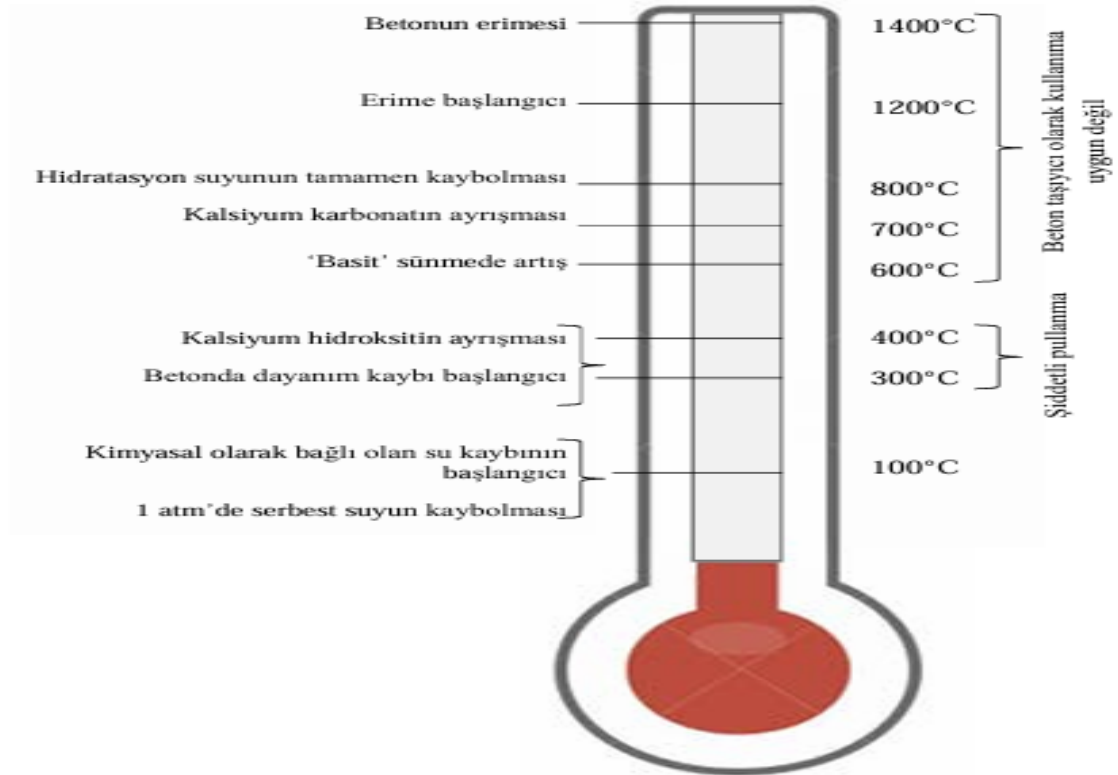


Şekil 2. 5. Şematik görünüm: (a) çekip-çıkarma numunesi; (b) kiriş ucu numunesi; (c) kiriş ankraj numunesi; ve (d) bindirme boyu (ek) numunesi.

Donatı ile beton arasındaki aderans ilişkisi; tasarım aşamasında öngörülme-yen aşırı yük etkileri, yüksek sıcaklık, asit maruziyeti, donma-çözünme döngüleri ve korozyon gibi çevresel etkiler nedeniyle betonarme elemanlarda oluşan olumsuz durumlardan önemli ölçüde etkilenmektedir. Depremlere ek olarak, betonarme yapıların hasar almasına neden olan bir diğer yıkıcı etki de yangındır.

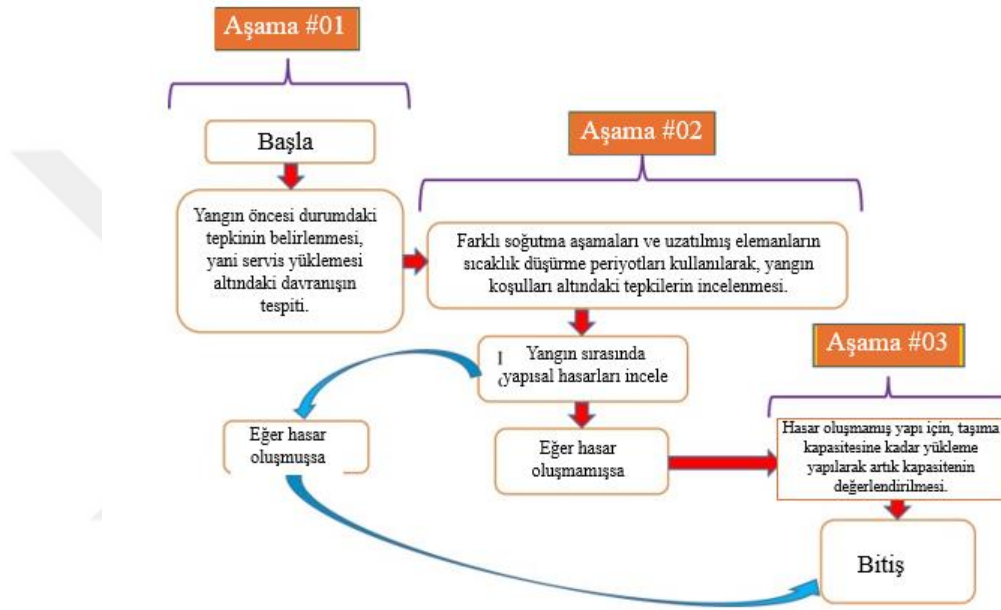
Diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında, betonun yangın etkisi altındaki bazı avantajları dikkat çekmektedir. Bunların başında, ahşap malzemeye göre yanmaz oluşu ve çeliğe kıyasla daha düşük ısı iletkenliğe sahip olması gelmektedir. Bununla birlikte, betonun yüksek sıcaklık altında zayıf sayılabilecek iki önemli dezavantajı bulunmaktadır. İlki, artan sıcaklıkla birlikte beton bünyesinde meydana gelen fizikokimyasal değişimler sonucunda, betonun karakteristik davranışını belirleyen mekanik özelliklerin bozulmasıdır.

Bu bozulmanın sıcaklıkla ilişkisi, Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 2.6 incelendiğinde, sıcaklığın beton içerisinde dökülmelere, çatlak oluşumlarına ve kesit kayıplarına yol açtığı; buna bağlı olarak mekanik özelliklerde belirgin azalmaların meydana geldiği görülmektedir (Khoury, 2000; Baradan vd., 2010)



Şekil 2. 6. Betonda yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen fizikokimyasal bozulmalar.

Yangın ile betonarme yapıda homojen bir hasar dağılımı yerine yangınla temas eden yüzeylerde daha ağır, diğer çekirdek elemanlarda daha hafif hasarlar gözlemlenir (Wróblewska ve Kowalski, 2020) Bir çok araştırmacı tarafından yüksek sıcaklık etkilerinin betonarme yapılar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yangın etkisinin değerlendirilmesi amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi de Agrawal ve Kodur (2020) tarafından önerilen Şekil 2.7’de akış şemasında gösterilen değerlendirmedir. Bu değerlendirme yöntemi ile yangın etkisine maruz kalmış betonarme yapının artık kapasitesi belirlenerek onarım gerekliliği açıklığa kavuşturulmaktadır.



Şekil 2. 7. RC yapı elemanlarının artık kapasitesinin değerlendirilmesi.

Betonarme yapılarda düşük veya yüksek sıcaklıklarda meydana gelen kısa süreli yangın etkileri, her zaman yalnızca görsel inceleme ile tespit edilemeyebilir. Bu durumda, betonun iç yapısına yönelik deneysel testlerin yapılması gerekmektedir. Buna karşılık, yüksek sıcaklıklara uzun süreli maruziyet söz konusu olduğunda, beton yüzeyinde çatlakların oluşması, pas payı tabakasında dökülmelerin meydana gelmesi ve belirgin renk değişimlerinin ortaya çıkması gibi etkiler gözle görülebilir hâle gelmektedir.

Bu bağlamda, tespit edilmesi hem pratik hem de kritik öneme sahip temel parametrelerden biri betonun basınç dayanımıdır. Yangın sonrası denetim sürecinde izlenecek adımlara ilişkin kontrol listesi Tablo 2.1’de sunulmaktadır.

Tablo 2. 1. Yangın denetimi kontrol listesi

Birincil çalışma			Detaylı inceleme	
Görsel değerlendirme	Basit inceleme	Mekanik test	Malzeme deneyi	Sayısal inceleme
Beton renk değişimi	Schmidt çekici testi;	Karot numune	UV spektrum yöntemi	UV spektrum yöntemi
Çatlak genişliği	Beton karbonatlaşma testi.	Donatı tespit	Mikrodalga kapasitesi;	Mikrodalga kapasitesi
Dökülmeler		Yükleme testi	Termo ölçümler	Termo ölçümler
			Ultrasonik test	Ultrasonik test
			X-ışını kırınım tekniği	X-ışını kırınım tekniği

Literatürde yüksek sıcaklığın betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi tahribatlı testler, mikro yapı analizleri ve gözlemsel incelemelerle kapsamlı biçimde incelenmiştir. Bu çalışmalar; basınç, çekme ve eğilme dayanımı, elastisite modülü ve gerilme–birim şekil değiştirme davranışının yanı sıra çatlak formasyonları, renk değişimleri ile SEM ve XRD analizleri gibi ek gözlemleri de içermektedir. (Castillo, 1987; Xu vd., 2001; Li ve Yuan, 2012)

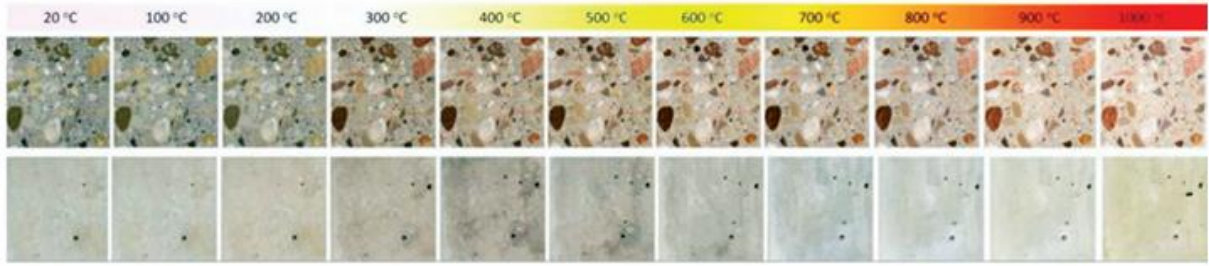
Bu çalışmalarda, 25 °C’deki referans beton numuneler genellikle 200-1000 °C aralığında değişen kademeli sıcaklık seviyeleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. (Wang vd., 2024)

Yüksek sıcaklığın mikro mekanizma özelinde incelendiğinde;

- 100 °C’de beton iç yapısındaki su buharlaşması ve geçirgenliğin artması ,
- 180 °C’de hidrat kalsiyum silikat dehidrate olmaya başladığı,
- 300 °C’de su buharının dışarı atılması nedeniyle beton matrisinde mikro çatlakların oluşmaya başladığı (Kodur vd., 2012)
- Sıcaklığın 400 °C’nin üzerine çıkmasıyla birlikte, bu çatlakların genişleyerek yer yer dökülmelere neden olduğu (Khaliq, 2018)
- 500 °C’de kalsiyum hidroksitin ayrışması
- Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelinin, bağlayıcı fazın yapısının bozulmasına bağlı olarak 400–600 °C sıcaklık aralığında parçalandığı belirtilmektedir. (Luccioni vd., 2003)

Bazı araştırmacılar ise yüksek sıcaklığın beton rengi üzerindeki değişimini ortaya koymuştur (Annerel ve Taerwe, 2011) Örneğin Annerel ve Taerwe, 300–600 °C sıcaklık aralığında çimento macununun gri renkten kırmızıya, 600–900 °C aralığında beyazımsı griye ve 900–1000 °C aralığında kahverengiye dönüştüğünü belirtmiştir. Bir diğer araştırmacı ise betonda

sıcaklıkla meydana gelen değişimleri, Şekil 2.8’de sunulduğu üzere, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ifade etmiştir.



Şekil 2. 8. Sıcaklığa bağlı beton renk değişimi.

Araştırmacılar, beton üretimini sürdürülebilir hâle getirerek doğal kaynak tüketimini azaltmanın yanı sıra, performanstan ödün vermeden daha hafif ve ekonomik beton üretimine odaklanmaktadır. Perlitli beton, teknik, ekonomik ve çevresel avantajları sayesinde çok yönlü bir yapı malzemesi sınıfı olarak öne çıkmış ve son yıllarda inşaat sektöründeki kullanımı giderek artmıştır (Haque ve ark., 2004). Perlitli betonun tercih edilmesinin başlıca nedenleri arasında, yapı yüklerinin azalmasıyla malzeme tasarrufu sağlanması ve düşük birim ağırlığı sayesinde yüksek ısı ve ses yalıtım özellikleri göstermesi yer almaktadır (Bomhard, 1980; Şişman vd., 2008).

Perlit agregası ile üretilen betonlar, kullanılan agrega türü ve beton özelliklerine bağlı olarak dayanım ve birim ağırlık açısından üç sınıfa ayrılmaktadır. Birinci sınıf, düşük dayanımlı (7–20 kgf/cm²) ve düşük birim ağırlığa (250–750 kg/m³) sahip betonları kapsamakta olup genellikle yalıtım amaçlı kullanılmaktadır. İkinci sınıf, orta dayanımlı (20–142 kgf/cm²) ve orta birim ağırlığa (1000–1400 kg/m³) sahip betonları içermekte ve çoğunlukla blok duvar yapımında tercih edilmektedir. Üçüncü sınıf ise yüksek dayanımlı (173–418 kgf/cm²) ve yüksek birim ağırlığa (1500–2000 kg/m³) sahip yapısal betonları ifade etmekte olup taşıyıcı elemanlarda kullanılmaktadır (Sarı ve Paşamehmetoğlu, 2005; Şişman ve ark., 2008).

Öztürk vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 25 ve 40 MPa basınç dayanımına sahip ve farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton numuneleri incelenmiş; perlit agregası ile üretilen betonların, artan sıcaklıklarda (600 °C) basınç ve eğilme dayanımı açısından geleneksel agrega ile üretilen betonlara kıyasla daha az performans kaybı gösterdiği belirtilmiştir. Perlitli betonun aderans dayanımını inceleyen bir diğer çalışma Ertaş vd. (2024) tarafından yürütülmüş olup,

doğal perlit agregası kullanılarak üretilen ve 25 ile 40 MPa basınç dayanımına sahip betonlarda, basınç dayanımındaki artışa paralel olarak aderans dayanımının da arttığı vurgulanmıştır.

Ergün vd. (2016), yüksek sıcaklıklara maruz kalan beton ile donatı çubuğu arasındaki aderansa malzeme özelliklerinin etkisini sıyrılma testleri kullanarak kapsamlı biçimde araştırmıştır. Çalışmada, 20, 34 ve 44 MPa basınç dayanımına sahip betonlar ile 12, 16 ve 20 mm çaplarında ve S220a, S420a ve S500a kalite sınıflarındaki donatılar kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, donatı ile beton arasındaki artık aderans dayanımının sıcaklık artışıyla birlikte azaldığını göstermiştir.

Li vd. (2017), yüksek performanslı lif takviyeli çimentolu kompozit (HPFRCC) içerisine gömülü çelik donatı çubuklarının arayüzey aderans dayanımlarını incelemiştir. Toplam 303 sıyrılma numunesinden 48 HPFRCC ve 3 normal beton numunesi ısıtılma tabii tutulmadan test edilirken, 240 HPFRCC ve 12 normal beton numunesi test öncesinde 2 saat süreyle 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklarda ısıtılmıştır. HPFRCC numunelerinde aderans dayanımı üzerine donatı çubuğunun şekli, çapı ve gömülme uzunluğunun etkileri araştırılmış; aderans dayanımının artan ısıtma sıcaklığı ile azaldığı gözlemlenmiştir.

Varona vd. (2018), polipropilen ve çelik lif içeren normal ve yüksek dayanımlı betonları 825 °C'ye kadar olan sıcaklıklara maruz bıraktıktan sonra, donatı ile beton arasındaki aderans dayanımındaki değişimi incelemiştir. Basınç ve sıyrılma testleri, numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakılıp oda sıcaklığına soğutulduktan sonra gerçekleştirilmiştir. Yüksek en-boy oranına sahip çelik lifler içeren hibrit lif katkısının, test edilen en yüksek sıcaklıklarda aderans dayanımına en fazla katkıyı sağladığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, 450 °C'ye maruz kalan yüksek dayanımlı betonlarda çelik lif ilavesi durumunda aderans dayanımındaki kayıpların daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Sharma vd. (2019), yüksek sıcaklıklarda betondaki donatının kalıcı aderans performansını kübik beton numuneler kullanarak deneysel olarak incelemiştir. Yüksek sıcaklığın aderans kopması ve aderans çatlaması davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla donatılar farklı beton örtü kalınlıklarına yerleştirilmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklığa maruz kalmasının ardından, beton örtüsünün aderans dayanımının mutlak değeri ve kırılma modu üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Sıyrılma sırasında oluşan çatlak genişliğinin sıcaklık artışıyla arttığı, bağ rijitliğinin ise hem kopma hem de çatlama kırılması durumlarında maruz kalma sıcaklığının artmasıyla kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir.

Albero vd. (2024), 600 °C'ye kadar ulaşan sıcaklıklara maruz bırakılan beton numuneleri üzerinde sıyrılma testleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada, korumasız, soğuk galvanizli, sıcak daldırma galvanizli ve paslanmaz çelik donatı çubukları kullanılmış; tüm donatılar için 12 ve 16 mm olmak üzere iki farklı çap incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çelik donatılarda kullanılan korozyon koruma yöntemlerinin, yüksek sıcaklıklara maruz kalma sonrasında aderans dayanımı açısından ciddi hasarlara yol açmadığını göstermiştir. Aderans dayanımındaki azalma eğiliminin, mevcut yönetmeliklerde belirtildiği üzere, yüksek sıcaklıklarda beton basınç dayanımındaki azalmaya benzer olduğu ifade edilmiştir.

Liu vd. (2025), betonun mekanik özellikleri ile donatı–beton aderans özelliklerindeki değişimi 150–350 °C sıcaklık aralığında deneysel olarak incelemiştir. Sonuçlar, numune kesitinde sıcaklık temel homojenliğe ulaştığında, aderans özelliklerinin artan ısıtma süresiyle azalmaya devam ettiğini, ancak belirli bir süreden sonra stabilize olarak değişmeden kaldığını göstermektedir. Isıtma süresinin 3 saatten 24 saate çıkarılmasıyla, aderans dayanımındaki azalmanın 150 °C'de %1,9'dan %3,4'e, 250 °C'de %5,9'dan %9,0'a ve 350 °C'de %12,4'ten %17,9'a yükseldiği belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda aderans özelliklerindeki bu azalmanın, beton dayanımındaki sürekli düşüş ve uzun süreli ısıtma sonucunda gelişen termal çatlaklardan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca, betonun basınç dayanımının 150, 250 ve 350 °C'de 24 saat maruz kalma sonrasında sırasıyla %7,0, %16,9 ve %28,7 oranında; çekme dayanımının ise sırasıyla %21,7, %31,8 ve %49,1 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.

3. YÖNTEM

Tezin bu bölümünde, deneysel çalışma kapsamında üretilen 48 adet beton küp numunenin yüksek sıcaklık dayanımı ve çekme (aderans) deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. Materyal

Yapılan bu deneysel çalışmada çimento, su, plywood kalıp malzemesi, geleneksel agrega ve perlit agregası kullanılmıştır.

3.1.1. Çimento

Çimento, yapı malzemeleri arasında hidrolik bağlayıcı özelliklere sahip, metalik olmayan ve inorganik bir malzemedir. Doğal kalker taşları ile kil karışımının yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması, öğütülmesi ve ardından bir veya daha fazla kalsiyum sülfat formunun ilave edilmesiyle üretilen çimento, genellikle gri renkli ince bir toz hâlinedir. Su ile birleştğinde mineral hidratlarının oluşumu sonucu sertleşen macunsu bir yapı meydana getirir. Çimento üretimi, CaCO_3 'ün ön kalsinasyon süreci ile başlamakta olup bu aşamada CaO oluşurken CO_2 açığa çıkmaktadır. Devam eden süreçte CaO , yüksek sıcaklıklarda (1400–1500 °C) silis, alümin ve demir oksitlerle reaksiyona girerek silikatlar, aluminatlar ve kalsiyum ferritlerden oluşan klinkeri meydana getirir. Elde edilen klinker, alçı taşı ve diğer katkı maddeleri ile birlikte öğütülerek çimento üretimi tamamlanır. Bu deneysel çalışmada, 50 kg'lık torbalar hâlinde temin edilen CEM I 32,5 R ve CEM I 42,5 R Portland çimentoları kullanılmıştır.

3.1.2 İnce ve iri agrega (Perlit ve doğal agregalar)

Agrega malzemesinin kaliteli olması, dayanıklı ve güvenli yapıların inşa edilmesini sağlayarak yaşam kalitesine doğrudan katkı sunar. Türkiye'nin deprem kuşağında yer aldığı ve bu bilinçle yapı üretiminin sürdürülmesi gerektiği dikkate alındığında, inşaat imalatlarında agrega ve betonun önemi daha da belirgin hâle gelmektedir (AGÜB, 2017). Agregalar; beton sınıfını, basınç dayanımını ve genel beton performansını doğrudan etkileyen temel bileşenlerdir. Bu durum, agreganın beton üretiminde ne denli kritik bir unsur olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. İnşaat sektörünün ana hammaddelerinden biri olan agregalar; kum, çakıl ve

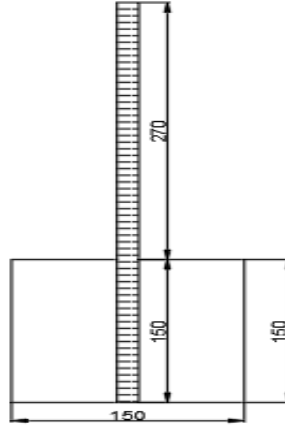
kırmataş gibi farklı malzemeleri kapsamakta ve beton hacminin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Tane boyutlarına göre agregalar ince agregalar (kum, kırma kum) ve kaba agregalar (çakıl, kırmataş) olarak sınıflandırılabilir.

3.1.3 Donatı çeliği

Donatı çeliği, betonarme yapılarda betonun çekme dayanımının düşük olması nedeniyle, betonun çekme etkileri altındaki performansını artırmak amacıyla kullanılan çelik çubuklardır. Donatılar kalıp içerisine yerleştirildikten sonra beton dökümüne geçilir. Beton basınç kuvvetlerini, çelik ise çekme kuvvetlerini taşır; bu iki malzemenin birlikte çalışmasıyla yüksek dayanımlı bir betonarme sistem elde edilir. Donatı çapları statik projelerde “Ø” sembolü ile gösterilmekte ve uygulamada çoğunlukla “f” terimi ile ifade edilmektedir. Bu çalışma kapsamında Ø14 çapında ve 420 mm boyunda donatı çeliği kullanılmıştır.

3.2. Karışım oranları ve numune tasarımı

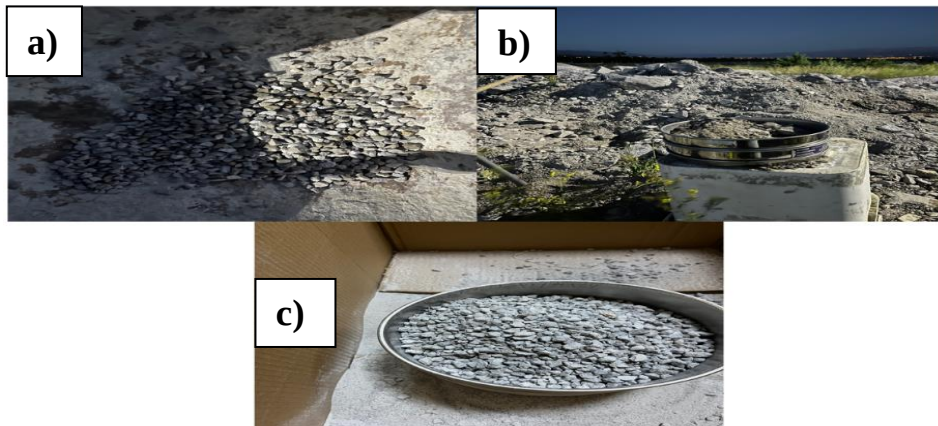
Küp numunelerin üretiminde geleneksel agregalar ve perlit agregası olmak üzere iki farklı agregalar türü kullanılmıştır. Geleneksel beton üretiminde, kaba agregalar olarak 4/8 mm ve 8/16 mm tane boyutlarında kireçtaşı kökenli kırmataş (özgül ağırlık: 2,66 g/cm³), ince agregalar olarak ise 0/1 mm, 1/2 mm ve 2/4 mm tane boyutlarında doğal dere kumu (özgül ağırlık: 2,64 g/cm³) tercih edilmiştir. Perlitli betonların üretiminde ise perlit agregaları 0/1 mm, 2/4 mm, 4/6 mm ve 6/8 mm tane boyutlarında ilgili eleklerden elenerek elde edilmiş; daha sonra beton dökümü öncesinde bu fraksiyonlar uygun oranlarda karıştırılarak perlitli beton karışımları hazırlanmıştır. Beton numuneler, 150 × 150 × 150 mm boyutlarında küp numune olacak şekilde, plywood malzeme kullanılarak hazırlanan düz betonarme kalıplar ile üretilmiştir. Kalıp düzeni ve donatı yerleşimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Donatı çelikleri, terazi ve gönye yardımıyla kalıpların tam orta noktasına, paspayı bırakılmadan, numune derinliği doğrultusunda 150 mm gömme boyu olacak şekilde sabitlenmiştir. Donatının numune dışındaki kalan kısmı ise kalıp dışında bırakılarak toplam donatı boyu 420 mm olacak şekilde düzenlenmiştir. Kullanılan donatı çeliği Ø14 çapında olup, çekme dayanımı 500 MPa’dır. Donatının birim ağırlığı 1,208 kg/m olarak alınmıştır. İnşaat sahasında donatılar genellikle 12 m boyunda üretilmekte olup, Ø14 donatının 12 m’lik bir çubuğunun toplam ağırlığı 14,496 kg olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3. 1. Numune ve donatı kesit özellikleri.

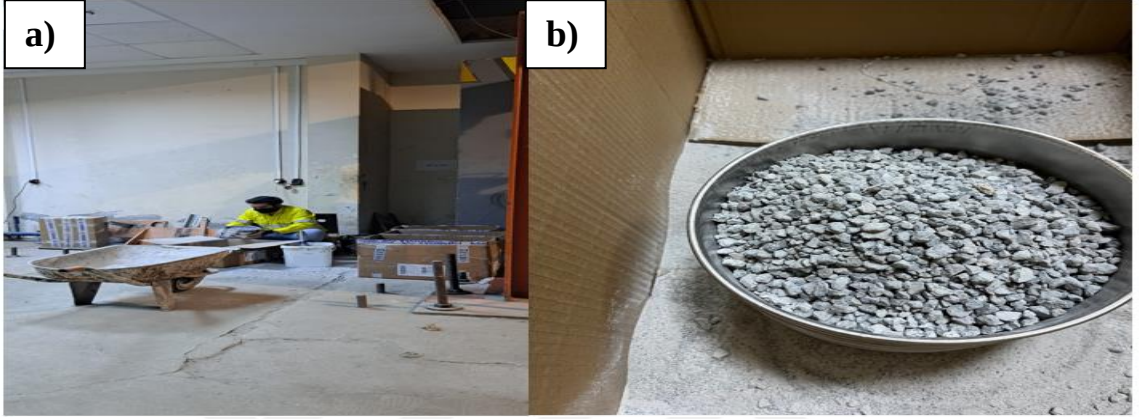
3.3. Numune üretim süreci ve kodlama

Bu kapsamda yürütülen ayrıntılı literatür taraması sonucunda, perlitli agregaların geleneksel agregalar yerine kullanılabilirliğini ele alan sınırlı sayıda çalışma bulunduğu tespit edilmiştir. Bu durumdan hareketle, perlitli agregalar kullanılarak deneysel bir çalışma yürütülmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Perlitli agregalar malzemesi, doğal hammadde olarak belirli bölgelerde ve ülkemizde zengin rezervlere sahip bir kaynak niteliğindedir. Çalışmada kullanılacak perlit agregası, kırma taşların işlenerek belirli tane boyutlarına getirildiği tesislerden temin edilmiştir. Bu kapsamda Perlit Madencilik Şti.'nden 0–2 mm, 0–4 mm, 0–8 mm ve 0–12 mm tane boyutlarında ham perlit agregası temin edilmiştir. Temin edilen agregalar, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarında kurutulması amacıyla belirli bir süre bekletilmiştir.



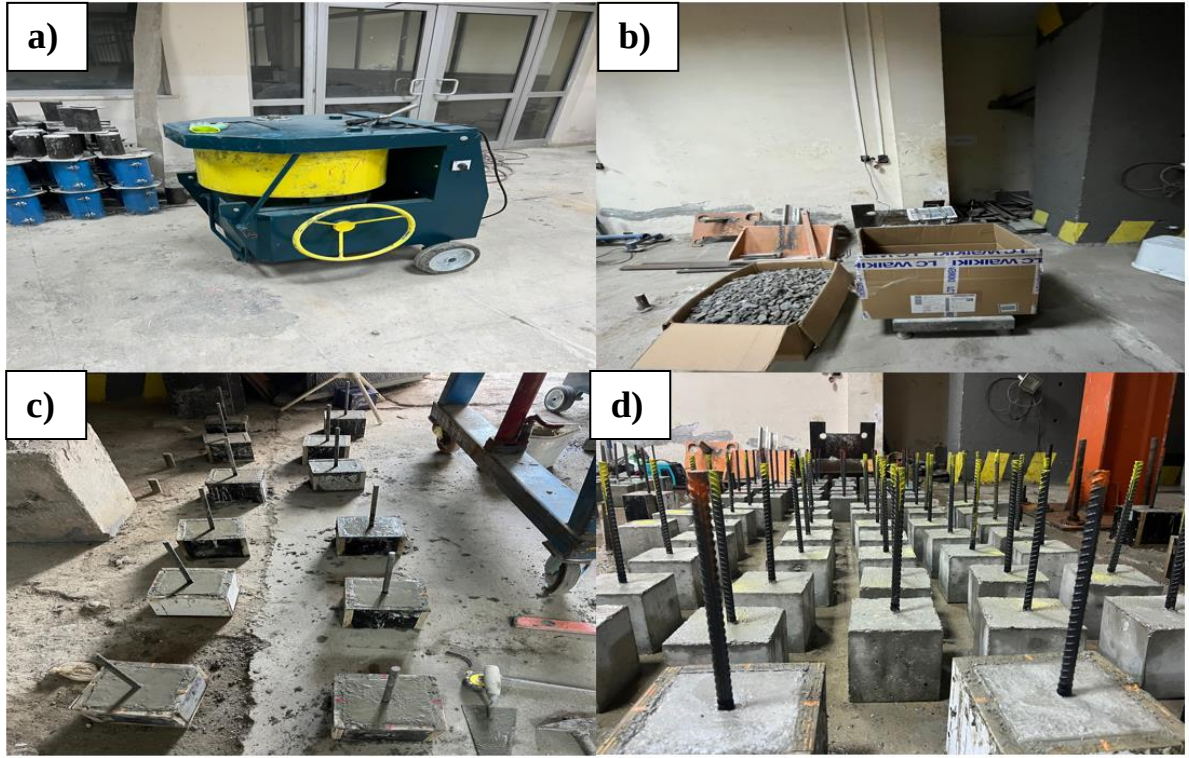
Şekil 3. 2. Numune üretim sürecine ait görseller: (a) Doğal perlit agregasının kurutulması (b) Doğal perlit agregasının elenmesi (c) Elenmiş perlit agregaları.

Çalışmada kullanılacak perlit agregaları, perlit madeninden farklı tane boyutlarını içerecek şekilde karışık olarak temin edilmiştir. Tasarım hesaplarında kullanılacak agregaların dane çaplarına göre ayrıştırılması amacıyla eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda perlit agregaları 0–1, 1–2, 2–4, 4–8 ve 8–12 mm dane çapı aralıklarında olacak şekilde, ilgili eleklerden elle elenerek elde edilmiştir. Elle gerçekleştirilen elek analizi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 3.Elek analizi: (a) Perlit agregasının el ile elenmesi (b) Perlit agregasının elek üzerinde kalan kısmı (4-6 mm).

Perlit agregaların elenmesinin ardından, geleneksel agregalarla birlikte beton dökümüne hazır hâle getirilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında üretilecek numuneler için ön çalışmalar gerçekleştirilmiş olup bu süreç Şekil 34.'de sunulmuştur. Çalışmada hedeflenen beton basınç dayanımı değerlerine ulaşabilmek amacıyla karışım reçeteleri belirlenmiş ve bu reçeteler Tablo 3.1'de verilmiştir. Agregalarla birlikte çimento ve su kullanılarak, beton karışımı mobil mikser yardımıyla hazırlanmış ve beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Mobil mikser ile elde edilen taze beton, 150 × 150 × 150 mm boyutlarındaki küp numune kalıplarına yerleştirilmiş; segregasyonu önlemek ve boşluksuz bir yerleşim sağlamak amacıyla demir çubuk yardımıyla şişleme işlemi uygulanmıştır. Betonun aderans davranışını incelemek amacıyla, küp numunelerin tam orta noktasına Ø14 mm çapında, 420 mm boyunda nervürlü donatı yerleştirilerek donatılı numuneler üretilmiştir. Numuneler, betonun priz sürecini tamamlamasının ardından 28 günlük basınç dayanımı süresi boyunca uygun kür koşullarında bekletilmiştir.



Şekil 3. 4. Beton döküm süreci: (a) Mobil beton mikseri (b) Agrega hazırlığı (c) Beton dökümü.

Tablo 3.1’de çalışmada kullanılan geleneksel agregâ ile ham perlit agregâsının fiziksel özellikleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. İnce (0–5 mm) ve iri (5–12 mm) fraksiyonlar için maksimum agregâ boyutu, özgül ağırlık (fırın kurusu ve yüzey kuru doygun durum), görünür özgül ağırlık ve su emme oranı değerleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, perlit agregâların hem ince hem de iri fraksiyonda geleneksel agregâlara kıyasla daha düşük özgül ağırlık değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, perlit agregânın gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Ayrıca perlit agregâların su emme oranlarının belirgin şekilde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yüksek su emme kapasitesi, karışım tasarımında su ayarlamalarını gerekli kılmakta ve iç kürlenme potansiyeli açısından önemli bir parametre oluşturmaktadır.

Tablo 3. 1.Çalışmada kullanılan geleneksel agregâ ve ham perlit agregâsının fiziksel özellikleri.

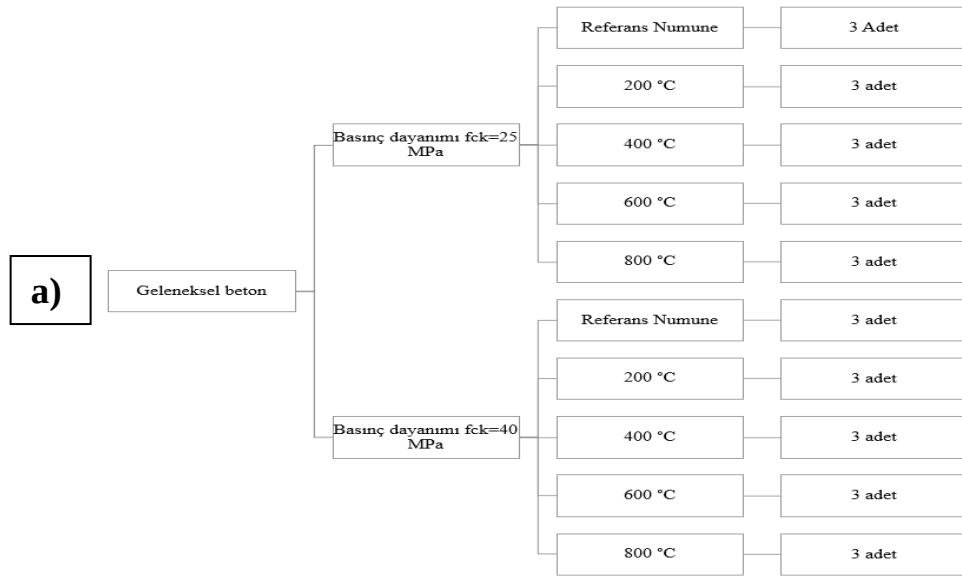
Fiziksel Özellikler	Geleneksel agregâ		Perlit agregâ	
	İnce agregâ (0-5 mm)	İri agregâ (5-12 mm)	İnce agregâ (0-5 mm)	İri agregâ (5-12 mm)
Maksimum agregâ boyutu (mm)	5	12	5	12
Özgöl ağırlık (Fırın kurusu durum)	2.48	2.65	1.88	2.01
Özgöl ağırlık (Yüzey kuru doygun durum)	2.57	2.67	2.05	2.14
Görünür özgül ağırlık	2.71	2.69	2.26	2.24
Su emme oranı (%)	3.51	0.59	9.02	4.98

Tablo 3.2’de ise geleneksel ve perlit agregalı beton karışımlarına ait oranlar kg/m^3 cinsinden verilmiştir. Karışımlar P25 ve P40 olarak ham perlit agregalı, C25 ve C40 ise geleneksel agregalı betonları temsil etmektedir. Tabloda su/çimento oranı, çimento miktarı, su miktarı ile ince ve iri agrega miktarları ayrı ayrı gösterilmiştir. Perlit agregalı karışımlarda geleneksel agreganın tamamen yerine ham perlit agregasının kullanıldığı, buna karşılık referans karışımlarda yalnızca geleneksel agregaların yer aldığı görülmektedir. Ayrıca su/çimento oranının beton sınıfına bağlı olarak değiştiği ve dayanım arttıkça w/c oranının azaldığı dikkat çekmektedir. Bu durum, hedeflenen mekanik performansın sağlanması amacıyla tasarım parametrelerinin optimize edildiğini göstermektedir.

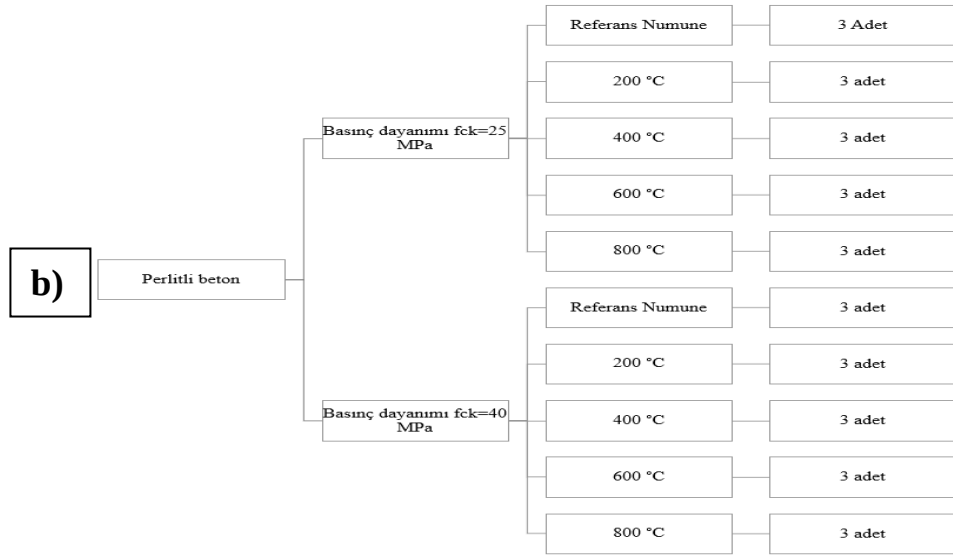
Tablo 3. 2.Geleneksel ve Perlit agregalı betonların karışım oranları (kg/m^3)

Beton karışımları	W/C oranı	Çimento (kg/m^3)	Su (kg/m^3)	Ham perlit agregası		Geleneksel agregası	
				İnce agregası (kg/m^3)	İri agregası (kg/m^3)	İnce agregası (kg/m^3)	İri agregası (kg/m^3)
P25	0.64	550	350	637	317	-	-
P40	0.56	550	305	792	399	-	-
C25	0.55	560	308	-	-	560	1120
C40	0.45	560	254	-	-	560	1120

Deneysel program kapsamında üretilen 48 adet numune, iki farklı basınç dayanımı sınıfı (C25 ve C40) ile iki farklı agrega türü (geleneksel ve perlit) kullanılarak C25, C40, P25 ve P40 grupları şeklinde üretilmiştir. Üretilen numuneler, ilk aşamada yüksek sıcaklık fırınında $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmak üzere dört farklı sıcaklık seviyesine maruz bırakılarak deneylere tabi tutulmuştur. Deneysel program Şekil 3.5 ve 3,6 ’da gösterilmiştir.



Şekil 3. 5. Deneysel program: (a) Geleneksel beton deney programı



Şekil 3. 6. Deneysel program: (b) Perlitli beton deney programı.

Bu deneysel çalışmada numunelerin adlandırılabilmesi ve deney sürecinde karışıklığın önlenmesi amacıyla, numuneler hem renklendirme hem de kodlama yöntemi kullanılarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda numuneler üzerindeki donatılar, sprej boya ile renklendirilmiş ve ayrıca aynı renkte etiket donatı üzerine sarılarak yapıştırılmıştır. Kodlama sistemi ise örneğin (PX-Y°-1,2,3) biçiminde oluşturulmuş olup burada; PX beton sınıfını (basınç dayanımını), Y° uygulanan yüksek sıcaklık seviyesini ve 1-2-3 ise aynı koşullarda üretilen numune numarasını ifade etmektedir. Örneğin (P25-200°-1) kodu, basınç dayanımı 25 MPa olan perlitli beton numunesinin 200 °C sıcaklığa maruz bırakıldığını ve bunun 1. numune olduğunu

göstermektedir. Bu sistem sayesinde numunelerin karışması önlenmiş; yüksek sıcaklık ve çekme deneyleri düzenli ve hatasız biçimde yürütülebilmiştir. Numunelerin renklendirilmesi ise aşağıdaki şekilde yapılmıştır: dört beton sınıfı, dört farklı renkle temsil edilmiştir. Buna göre Sarı (C25), Yeşil (C40), Turuncu (P25) ve Kırmızı (P40) olarak belirlenmiştir. Bu etiketleme ve renklendirme düzeni Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 7. Numune renklendirme ve etiketleme.

3.4.Yüksek sıcaklık deneyleri

Deneysel çalışma kapsamında üretilen küp numuneler, fırın yakımı öncesinde laboratuvar ortamında oda sıcaklığı koşullarında 28 günlük kür sürecini tamamlamıştır. Yüksek sıcaklık deneyleri öncesinde, numune bünyesindeki nemin yakım sırasında oluşturabileceği olumsuz etkileri (ani buhar basıncı, çatlama vb.) önlemek amacıyla küp numuneler etüvde belirli bir süre tutularak kurutma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3. 8. Etüve bırakılan tüm numuneler.

Deneyisel çalışma kapsamında üretilen küp numuneler, fırın yakımı öncesinde kür aşamasını tamamlamıştır. Yüksek sıcaklık deneyleri öncesinde, numunelerin bünyesinde bulunan nemin yakım sırasında oluşturabileceği olumsuz etkileri önlemek amacıyla küp numuneler etüvde belirli bir süre bekletilerek neminin uzaklaştırılması sağlanmıştır.



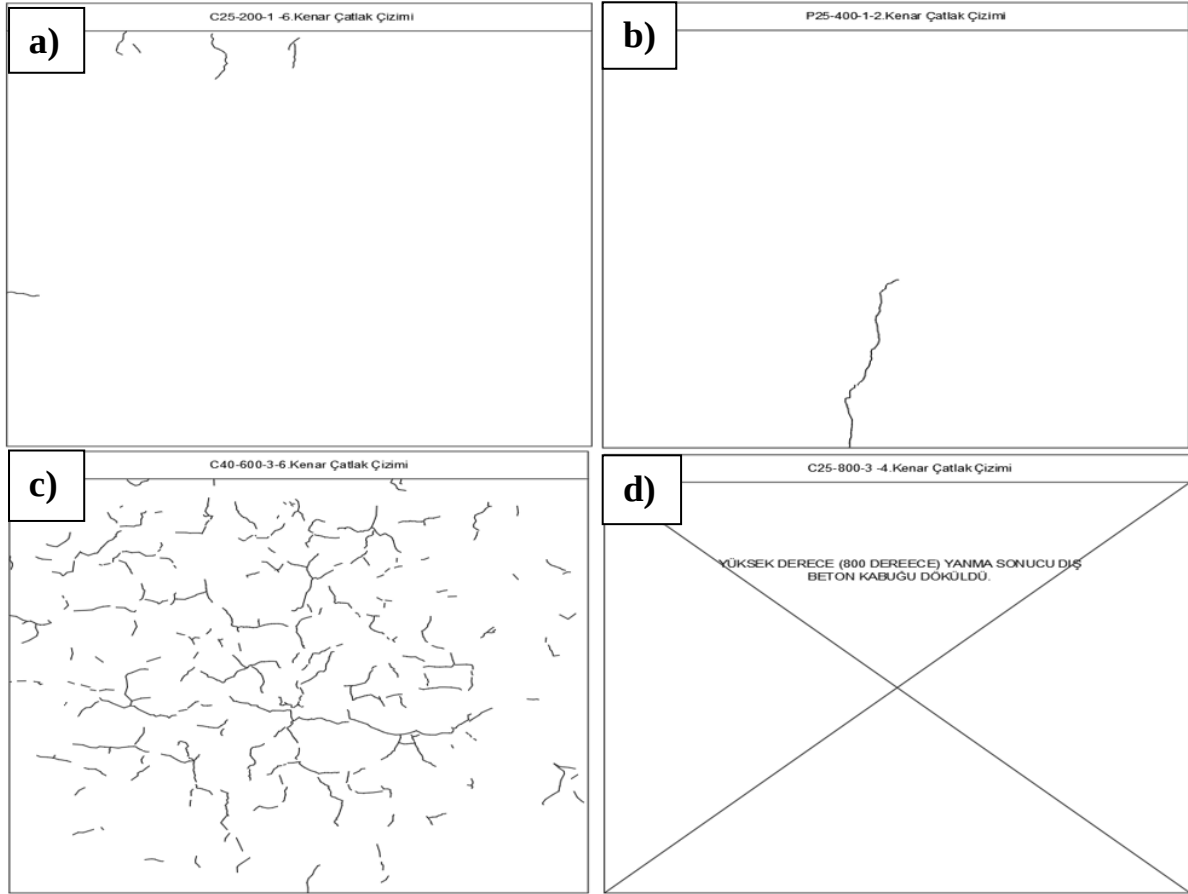
Şekil 3. 9. Yüksek sıcaklık deneyi için kullanılan fırın.

Betonarme yapılarda olası yangın etkisi altında meydana gelen çatlakların yapısal performans seviyesi üzerindeki olumsuz etkisini ortaya koymak amacıyla, yüksek sıcaklık deneyi sonrasında beton numuneler üzerinde oluşan çatlaklar numune isimlerine göre sınıflandırılmıştır. Küp numunelerin altı yüzeyinde gözlenen çatlaklar ise Şekil 3.10’da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

SICAKLIK	NUMUNE	1.KENAR	2.KENAR	3.KENAR	4.KENAR	5.KENAR	6.KENAR	SICAKLIK	NUMUNE	1.KENAR	2.KENAR	3.KENAR	4.KENAR	5.KENAR	6.KENAR
200°	C25-200-1	X	X	X	X	X	✓	400°	C25-400-1	X	X	X	X	X	X
	C25-200-2	X	X	X	X	X	X		C25-400-2	X	X	X	X	X	X
	C25-200-3	X	✓	X	X	X	X		C25-400-3	X	X	X	X	X	X
	C40-200-1	X	X	X	X	X	X		C40-400-1	X	X	X	X	X	X
	C40-200-2	X	X	X	X	X	X		C40-400-2	X	X	X	X	X	X
	C40-200-3	X	X	X	X	X	X		C40-400-3	X	X	X	X	X	X
	P25-200-1	X	✓	✓	✓	X	X		P25-400-1	✓	✓	X	✓	X	✓
	P25-200-2	X	✓	✓	✓	✓	✓		P25-400-2	✓	✓	✓	✓	X	✓
	P25-200-3	✓	✓	X	X	✓	✓		P25-400-3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	P40-200-1	X	X	✓	X	X	X		P40-400-1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	P40-200-2	X	X	✓	✓	✓	✓		P40-400-2	✓	✓	X	✓	✓	✓
	P40-200-3	X	X	X	✓	✓	✓		P40-400-3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
600°	C25-600-1	X	X	X	X	X	✓	800°	C25-800-1	X	X	X	X	X	X
	C25-600-2	✓	✓	✓	✓	✓	✓		C25-800-2	X	X	X	X	X	X
	C25-600-3	X	X	✓	✓	✓	✓		C25-800-3	X	X	X	X	X	X
	C40-600-1	✓	✓	✓	✓	✓	✓		C40-800-1	X	X	X	X	X	X
	C40-600-2	✓	✓	✓	✓	✓	✓		C40-800-2	X	X	X	X	X	X
	C40-600-3	✓	✓	✓	✓	✓	✓		C40-800-3	X	X	X	X	X	X
	P25-600-1	✓	✓	X	X	X	✓		P25-800-1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	P25-600-2	X	X	X	X	✓	✓		P25-800-2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	P25-600-3	X	X	X	X	X	✓		P25-800-3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	P40-600-1	✓	✓	✓	X	✓	✓		P40-800-1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	P40-600-2	X	✓	✓	✓	✓	✓		P40-800-2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	P40-600-3	✓	✓	✓	✓	✓	✓		P40-800-3	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Şekil 3. 10. Numunelerde oluşan çatlak listesi.

Şekil 3.10’da sunulan çatlak bilgileri doğrultusunda, numunelerin her bir yüzeyinde oluşan çatlaklar ayrıntılı olarak çizilmiştir. Şekil 3.11’de ise farklı sıcaklık seviyelerinde oluşan çatlaklara ait bazı örnekler gösterilmiştir.



Şekil 3. 11.Çatlak çizimi: (a) C5-200-1-6.Kenar çatlak çizimi (b) P25-400-1-2.Kenar çatlak çizimi (c) C40-600-3-6.Kenar çatlak çizimi (d) C25-800-3-4.Kenar çatlak çizimi.

3.5. Sıcaklık rejimi

Beton numunelerinin yüksek sıcaklık etkisine maruz kalması durumunda oluşan hasar düzeyini belirleyen başlıca parametreler; basınç dayanımı, elastisite modülü ve birim şekil değiştirme gibi temel mekanik özelliklerdir. Yangının ilerleme sürecini ve yapısal davranışı etkileyen ana faktörler ise kütle kaybı, ısı iletkenlik ve ısı genleşme gibi termal özelliklerdir. Betonun heterojen bir yapıya sahip olması ve yangın etkisinin çoğu zaman kesit boyunca homojen dağılmaması, yüksek sıcaklık sonrası oluşan deformasyonların ve hasar mekanizmalarının net biçimde değerlendirilmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle, yüksek sıcaklık deneyine tabi

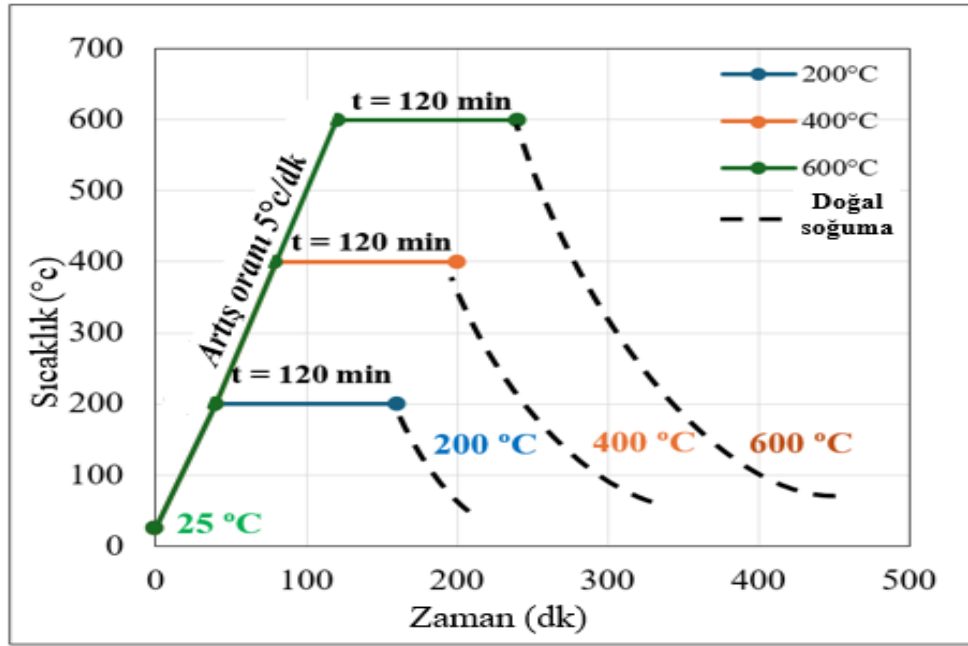
tutulan numunelerin termal maruziyet sonrası malzeme ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, davranışın doğru yorumlanabilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

Bu çalışmada uygulanan sıcaklık rejimi, yüksek sıcaklık fırınının dijital kontrol panelinde yer alan Adım 1, Adım 2, Adım 3 ve Adım 4 parametreleri kullanılarak tanımlanmıştır. Adım 1 ile hedef sıcaklık belirlenmiş, Adım 2 ile bu sıcaklığa ulaşma süresi tanımlanmıştır. Örneğin, hedef sıcaklık 800 °C olarak ayarlandıktan sonra, fırının maksimum performansta bu sıcaklığa ulaşma süresi belirlenmiştir. Hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra numuneler belirlenen süre boyunca bu sıcaklıkta tutulmuş ve ardından sistem kontrollü biçimde soğuma evresine geçirilmiştir.

Uygulanan sıcaklık–zaman programı Şekil 8’de sunulmaktadır. Numuneler ortam sıcaklığı olan 25 °C’den başlayarak yaklaşık 5 °C/dakika sabit ısıtma hızı ile hedef sıcaklıklara çıkarılmıştır. Çalışma kapsamında dört farklı maksimum sıcaklık seviyesi uygulanmıştır: 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C.

Her bir hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra numuneler bu sıcaklıkta 120 dakika boyunca sabit tutulmuştur. Bu bekletme süresi, kesit boyunca sıcaklığın dengelenmesini sağlamak ve gerçek yangın koşullarını temsil eden bir termal maruziyet oluşturmak amacıyla tercih edilmiştir. Isıtma ve sabit sıcaklık aşamasının ardından fırın kapatılmış ve numuneler doğal soğumaya bırakılmıştır. Maksimum sıcaklık seviyesi arttıkça soğuma süresinin uzadığı gözlemlenmiştir. Özellikle 600 °C ve 800 °C maruziyetlerinde daha yüksek düzeyde ısıl hasar meydana gelmekte ve ortam sıcaklığına dönüş süresi belirgin şekilde artmaktadır.

Uygulanan bu ısıtma–bekletme–soğutma protokolü, betonun yangın sonrası mekanik, fiziksel ve mikroyapısal özelliklerindeki değişimlerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.



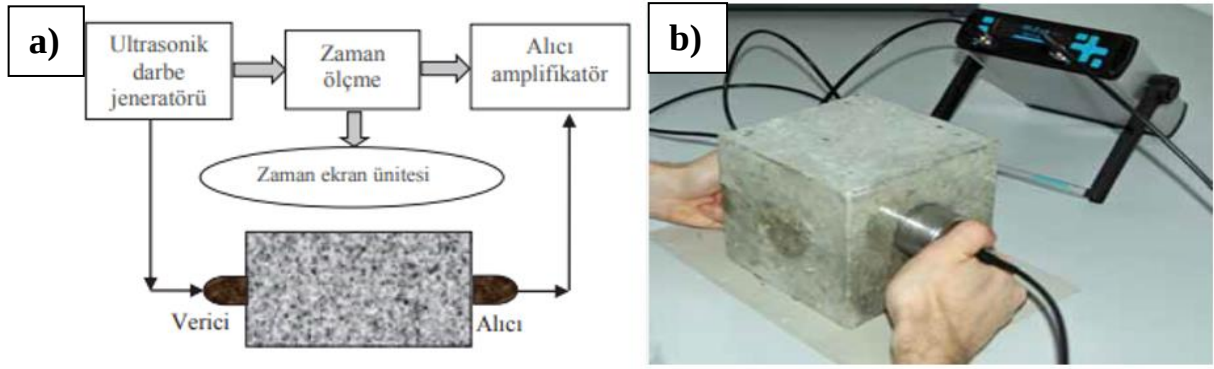
Şekil 3. 12. Sıcaklık rejimi

3.6. Ultrases geçiş hızı (UGH) deneyi

Ultrases geçiş hızı (UGH) deneyi, 28 gün kür süresini tamamlayan ve etüvde bekletilerek bünyesindeki fazla nemi uzaklaştırılan $150 \times 150 \times 150$ mm boyutlarındaki küp numunelere uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık deneyi öncesinde ve sonrasında UGH deneyine tabi tutulan numunelerin ultrases geçiş hızı ölçümleri, Şekil 3.12’de görüldüğü şekilde gerçekleştirilmiştir. UGH deneyi için Pundit Lab marka cihaz kullanılmıştır. Cihaz, 0,1 μ s duyarlılıkta olup 0,1–9999 μ s aralığında ölçüm yapabilmektedir. Deneyde kullanılan cihaz ve ölçüm yöntemi TS EN 12504-4, ASTM C 597-02, BS 1881 Part 203, ISO 1920-7:2004, IS 13311 ve CECS21 standartları ile uyumludur. Ultrases geçiş hızı değerleri Teorem 3.1’e göre hesaplanmıştır. Buna göre;

$$V=L \times T$$

Teorem 3.1. Ultrases geçiş hızını hesaplama formülü.



Şekil 3. 13. UGH deneyi: (a) Deney düzeneği teorik gösterimi (b) Upv cihazı.

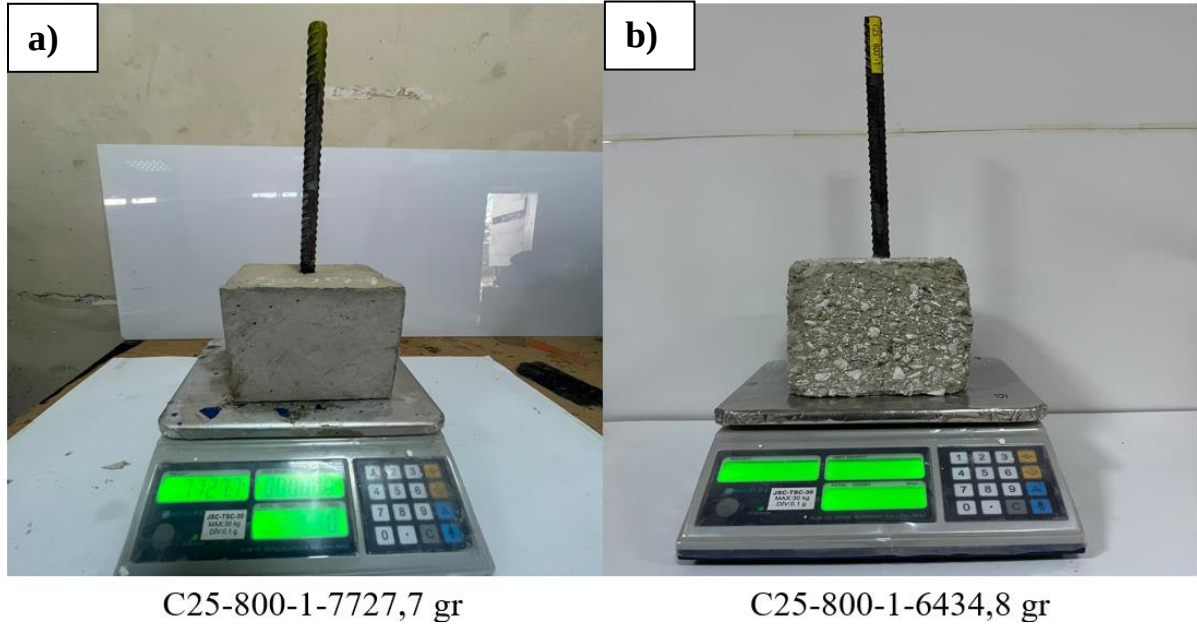
3.7. Kütle kaybı deneyi

Yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulan beton küp numunelerin, sıcaklığa bağlı kütle değişimleri; yüksek sıcaklık deneyi öncesinde ve sonrasında hassas terazi ile yapılan tartımlar sonucunda belirlenmiştir. Elde edilen kütle değerleri kullanılarak yüzde kütle kaybı aşağıda verilen teoreme göre hesaplanmıştır. Bu teoremde WK kütle kaybını (%), W_i ısıtıl işlem öncesi ilk kütleyi (kg) ve W_s ise ısıtıl işlem sonrası kütleyi (kg) ifade etmektedir (Teorem 4.1).

$$WK = (W_i - W_s / W_i) \times 100$$

Sıcaklığa bağlı sıcaklık değişim formülü.

Yapılan deneyler öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen tüm ölçümler kayıt altına alınmıştır. Kütle kaybı deneyinde elde edilen veriler kg cinsinden kütle kaybı olarak belirlenmiş; ultrases geçiş hızı (UGH) deneyinde ise yüksek sıcaklık yakımı öncesi ve sonrası ölçüm sonuçları ayrı ayrı kaydedilmiştir.



Şekil 3. 14. Yüksek sıcaklık deneyi öncesi ve sonrası tartımlar: (a) Yüksek sıcaklık öncesi yağırılık ölçümü (b) Yüksek sıcaklık sonrası ağırlık ölçümü.

3.8.Çekip-Çıkarma (Pull-Out) deneyi

Tez çalışmasının bu bölümünde gerçekleştirilen pull-out deneylerine ait tüm detaylar sunulmaktadır. Bu kapsamda, deneylerde kullanılan yükleme ve ölçüm düzenekleri, deney prosedürü, hesaplama yöntemleri ve elde edilen verilerin değerlendirilmesine ilişkin esaslar ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.8.1. Deneysel Olarak Tanımlanan Gömme Uzunlukları ve Aderans–Donatı Kayması İlişkileri

Gömme uzunluğu (Development length): Tez kapsamında, aderans-donatı kayması ilişkilerinde kullanılmak üzere, geleneksel ve perlitli betonların iki farklı beton basınç dayanımı seviyesinde, başlangıçta tüm numuneler için sabit $l_d=150$ mm olarak alınan donatı gömme uzunluklarının, özellikle elastik olmayan süreçteki kısımları, eksenel çekme deneyindeki ölçümlere göre, deneysel hesaplanmıştır. Çubuk uzunluğu boyunca her bir numuneye ait donatıda birim şekil değiştirmelerdeki (deformasyonlar) deneysel olarak elde edilen değişimler yardımıyla, test edilen her bir numune için elastik ($l_d=150$ mm) ve elastik olmayan (l'_d) ile (l''_d) gömme uzunlukları elde edilmiştir. Bilindiği üzere, elastik gömme uzunluğu ($l_d=150$ mm), donatı çubuğundaki sıfır gerilme noktasından, gerilmenin akma gerilmesine eşit olduğu noktaya kadar olan donatının gömülü uzunluğu olarak tanımlanır. Daha sonra, Şekil 1’de verilen, bir donatı çubuğu boyunca çizilen birim şekil değiştirme diyagramları, bir çubuktaki gerilmelerin birim

Şekil 3. 15. Aderans-donatı kayması ilişkisi (a) Sezen ve Setzler'in elastik aderans g modeli ve (b) Alsiwat ve Saatcioglu'nun aderans gerilme modeli.

Tez kapsamında hesap edilen elastik gömme uzunlukları, ACI 318-19 (ACI Komitesi 318 2019) tarafından tanımlanan modellere dâhil edilmiştir;

Burada: l_d , gömme boyudur (mm); f_y , öngerilmeli olmayan donatı için akma dayanımıdır; ψ_t , döküm yeri açısından gömme boyunu değiştirmek için kullanılan faktördür(=1,00); ψ_e , donatı kaplamasına bağlı olarak gömme boyunu değiştirmek için kullanılan faktördür(=1,00); ψ_g , donatı kalitesine bağlı olarak gömme boyunu değiştirmek için kullanılan faktördür(=1,00); d_b ,

donatı çapıdır; λ , aynı basınç dayanımına sahip normal ağırlıklı betona göre hafif betonun azaltılmış mekanik özelliklerini yansıtmak için kullanılan modifikasyon faktörüdür ($=1,00$); ve f'_c , betonun belirtilen basınç dayanımıdır.

Buna göre; elastik ve plastik gömme boyları, eksenel çekme testinde ölçülerek normalize edilen gerilme-deformasyon ilişkisine göre aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesap edilmiştir.

$$l_d = 150,00 \text{ mm}; \quad (0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y) \quad \text{Denklem (5)}$$

$$l'_d = \frac{(f_s - f_y)}{4 \times u'_b} \times d_b \quad (f_y \leq \varepsilon_s \leq f_s) \quad \text{Denklem (6)}$$

Burada: u'_b , deneysel eksenel çekme testi için kullanılabilen ve tüm numunelerde geçerli olmak üzere, ACI318-19 (ACI 318, 2019) tarafından tanımlanan modele göre $[u'_b = 0,5\sqrt{f'_c}]$ olarak hesaplara dâhil edildi.

$$l''_d = \Delta\varepsilon \times l'_d \quad (\varepsilon_s \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{nihai}) \quad \text{Denklem (7)}$$

Aderans-donatı kayması ilişkisi her bir numune için yürütülen eksenel çekme testleri ile deneysel verilerden hesap edilen elastik ($l_d=150 \text{ mm}$) ve elastik olmayan (l'_d) ile (l''_d) gömme uzunlukları, deneysel olarak elde edilen aderans gerilmesinin hesaplanmasında dikkate alınmıştır. Şekil 1'de, bir çubuktaki kuvvetlerin dengesine dayalı teorik aderans gerilmesi aşağıdaki Eşitlik 5 ile ifade edilebilir:

$$F = f_s A_b = u_b \pi d_b l_d \quad \text{Denklem (8)}$$

Burada: A_b , donatı çubuk alanıdır. Donatı çubuk alanını $\left(\frac{\pi d_b^2}{4}\right)$ yerine yazılarak, aderans gerilmesi deneysel verilere bağlı olarak aşağıdaki Eşitlik 6 ile hesaplanabilir.

$$u_b = \frac{f_s d_b}{4 l_d} \quad \text{Denklem (9)}$$

Deneysel verilerden hesap edilen elastik ($l_d=150$ mm) ve elastik olmayan (l'_d) ile (l''_d) gömme uzunlukları artık mevcut olduğu gerekçesiyle, Eşitlik 6; tüm numuneler için yürütülen eksenel çekme testinde ölçülen gerilme-deformasyon ilişkisindeki tüm değerler için geçerliliğini koruyabilir. Bir başka deyişle; Eşitlik 6'da kullanılan elastik ($l_d=150$ mm) gömme uzunluğu, elastik olmayan (l'_d) ile (l''_d) gömme uzunlukları için de aynen kullanılabilir ve böylece elastik (u_b) aderans gerilmesi hesabı, değişen gömme boylarından dolayı, elastik olmayan (u'_b) aderans gerilmesinin hesabında da değişmemektedir.

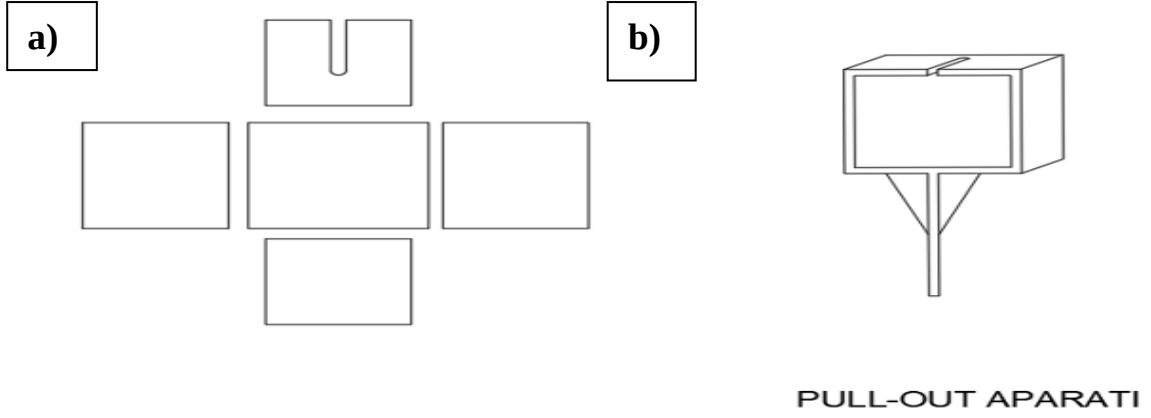
Şekil 3.14'deki model dikkate alındığında, donatı kaymasının, eksenel çekme testinden elde edilen donatı çubuğunun birim şekil değiştirmenin integrali olduğu açıktır. Bir başka deyişle, donatı kayması hesabında bu yaklaşım geçerli olabilir. Ancak, donatı kayması hesabının daha doğrusu, donatı çubuğunun birim şekil değiştirmesi ile betonun birim şekil değiştirmesi arasındaki farkın integralidir. Çünkü bu iki birim şekil değiştirmenin tam olarak birbirine eşit olması durumunda, kayma olmaz ve ikisi arasında tam bir aderans vardır kabul edilmektedir.

Aslında, beton birim şekil değiştirme kapasitesinin, donatı çubuğu birim şekil değiştirmesine kıyasla çok küçük olduğu göz önünde bulundurulduğunda, yüklemenin erken aşamalarında durumun böyle olması ve hemen sonrasında ise tam aderansın bozulması Şekil 1'deki modeli nispeten geçerli kılmaktadır. Buna göre donatı kayması aşağıdaki Eşitlik 7 ile temsil edilebilir.

$$Donatı\ kayması = \int_0^{l_d+l'_d} \varepsilon(x) dx \quad \text{Denklem (10)}$$

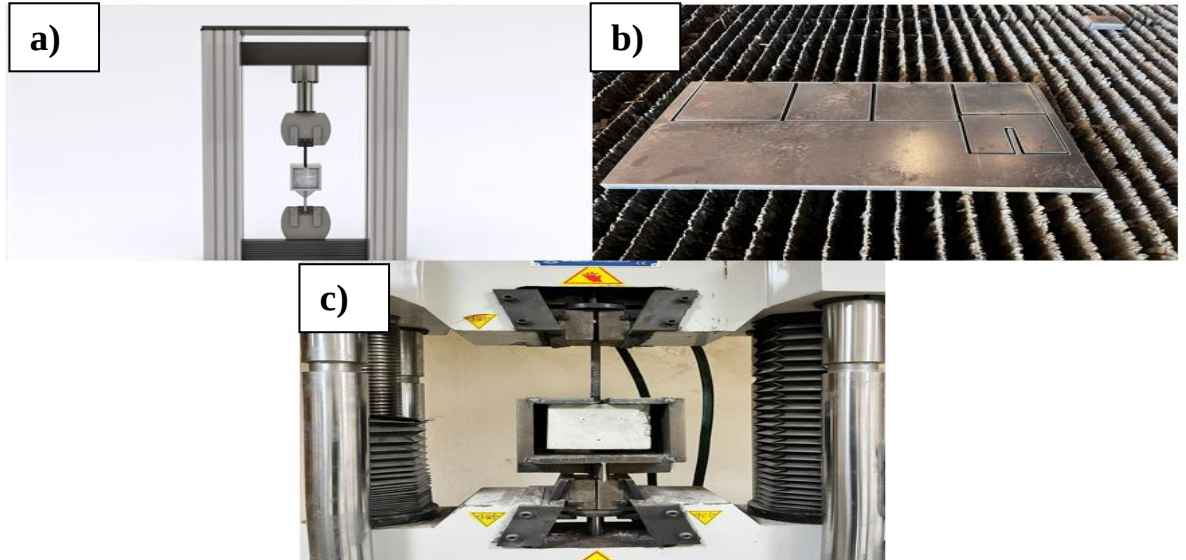
3.8.2. Deney düzeneği

Ø14 mm donatı çapına ve 150 mm donatı gömme boyuna sahip küp numunelere uygulanacak eksantrik çekme-çıkarma testlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, üst yüzeyine donatılı beton numunesinin yerleştirilebileceği $170 \times 170 \times 170$ mm boyutlarında ve 20 mm plaka kalınlığına sahip bir aparat tasarlanmış ve üretilmiştir. Aparat sistemine ait çizim Şekil 3.15'de gösterilmiştir. Geliştirilen bu aparat ile numunenin aparat içerisinde sıkı ve güvenli biçimde sabitlenmesi sağlanmış; çekme-çıkarma testleri sırasında numunelerin düzlem dışı kaymasının önlenmesi ve donatının çekme işleminin kontrollü ve başarılı şekilde uygulanması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda aparatın istenen performansı sağladığı görülmüştür.



Şekil 3. 16. Çekme testi aparat çizimi: (a) Aparat tüm kenarların çizimi (b) Üç boyutlu aparat çizimi.

Çekme deneyi için maksimum yük kapasitesi 300 kN olan MTS.E45.305 universal çekme test cihazı kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.16’da gösterilmektedir. Çekme testi uygulanan numunede yer değiştirme değerlerinin aşırı yüksek yükleme hızından daha az etkilenmesini sağlamak amacıyla 0,005 mm/s gibi düşük bir yer değiştirme yükleme hızı tercih edilmiştir (Nikolaou vd., 2004). Çekme testi sonuçları bilgisayar ortamında kaydedilerek beton–donatı aderans ilişkisi ve birim şekil değiştirme verileri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler, deneysel çalışmanın değerlendirilmesinde referans oluşturmıştır.



Şekil 3. 17. Aparat düzeneği: (a) Aparat şematik gösterimi (b) Aparat üretim aşaması (c) Aparat ve numune kullanımı.

3.8.3.Yükleme hızı ve ölçüm parametreleri

Çekme deneyi için maksimum yük kapasitesi 300 kN olan MTS.E45.305 üniversal çekme test cihazı kullanılmıştır. Çekme testi uygulanan numunede yer değiştirme değerlerinin aşırı hızlı yüklemeye oranından daha az etkilenebilmesi amacıyla 0,005 mm/s gibi düşük bir yer değiştirme yüklemeye hızı tercih edilmiştir (Nikolaou vd., 2004).

3.8.4.Deney protokolü

Bu deneysel çalışmada, 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilen tüm deneyler, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü tarafından belirlenen standartlara uyularak yürütülmüştür. Çalışmanın amacı; geleneksel ve perlit agregası kullanılarak üretilen betonların fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimlerin, beton davranışı üzerindeki etkisini incelemektir.

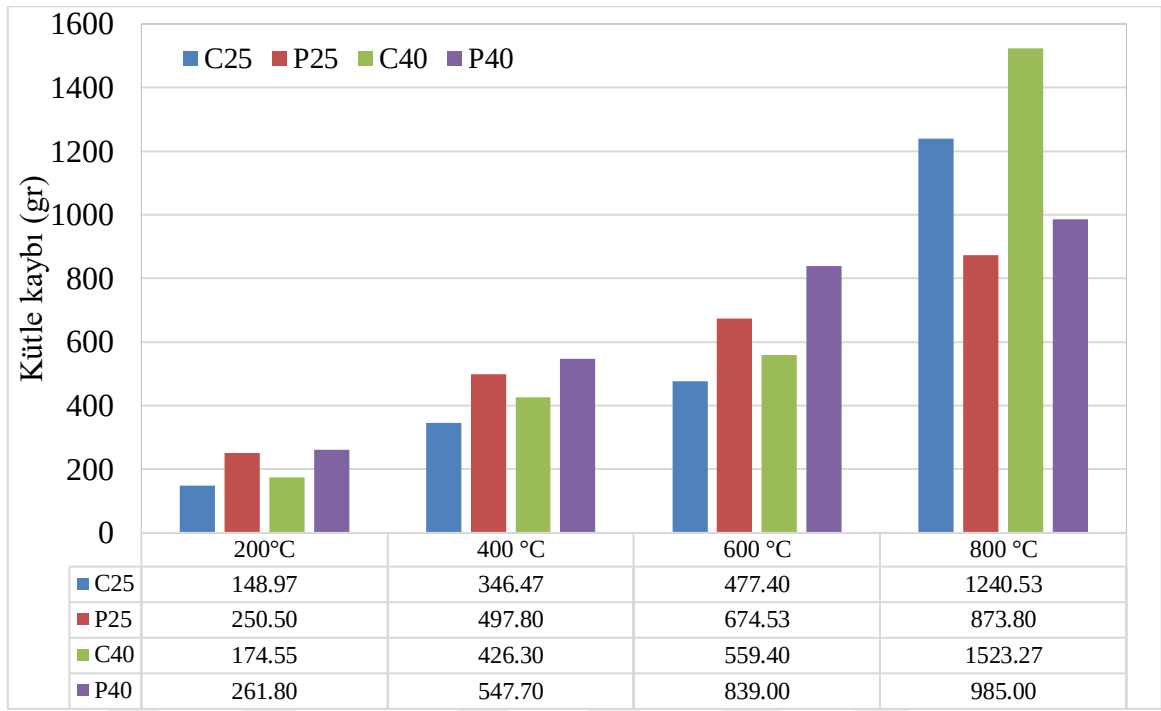
4.BULGULAR

4.1. K t le Kayıpları

Yüksek sıcaklığın etkisiyle numunelerde meydana gelen k t le kayıplarını belirlemek amacıyla, sıcaklık deneyleri öncesinde ve sonrasında ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak gözlemlenen bu k t le azalmaları; numunelerin bünyesindeki serbest ve bağlı suyun buharlaşması, uçucu maddelerin uzaklaşması ve karbon bazlı bileşenlerin yanması ile ilişkilidir. Şekil 4.1’de donatı gömülü küp numuneler için elde edilen ortalama k t le kayıpları (gr) sunulmaktadır.

Sıcaklık etkisi incelendiğinde, 200  C’de numunelerde 148.97 ile 261.80 gr arasında değişen sınırlı kayıplar meydana gelmiştir. Sıcaklık 400  C’ye ulaştığında ise C25 ve C40 numunelerindeki k t le kaybı sırasıyla 346.47 gr ve 426.30 gr olarak tespit edilirken; perlitli numunelerde (P25 ve P40) bu değerler sırasıyla 497.80 gr ve 547.70 gr seviyelerine çıkmıştır. 600  C maruziyeti sonrasında, C25 ve C40 numunelerindeki k t le kaybı artışı 400  C’ye kıyasla sırasıyla %37.79 ve %31.22 olurken; P25 ve P40 numunelerinde bu artış oranları %35.50 ve %53.18 olarak dikkat çekmektedir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, bu sıcaklık seviyesinde perlit agregalı betonların, geleneksel agregalı betonlara kıyasla yaklaşık %4–6 oranında daha fazla k t le kaybı yaşadığı görülmektedir. Bu durum, perlit agregasının gözenekli yapısı nedeniyle, yüksek sıcaklık altında bünyesindeki suyun daha yoğun bir şekilde uzakla masıyla açıklanabilir. 800  C etkisinde ise, özellikle C25 ve C40 numunelerindeki k t le kayıpları oldukça yüksek seviyelere ulaşmıştır.

Öte yandan, beton sınıfının C25’ten C40’a (veya P25’ten P40’a) yükselmesi, hem geleneksel hem de perlitli betonlarda k t le kaybını sınırlayıcı bir etki göstermiştir. Sonuçlar, perlitli betonların yüksek sıcaklık altında daha fazla k t le kaybı yaşamasına rağmen, bu durumun mekanik performansta her zaman aynı oranda bir d    e neden olmayacağını; değerlendirmelerin mikro yapısal değişimler ve aderans davranışlarıyla birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. 1. Kütle kayıpları.

4.2. Renk Değişimleri

Yüksek sıcaklık deneyleri sonrasında numunelerde meydana gelen renk değişimleri, yüzeysel çatlaklar ve beton örtüsünde oluşabilecek dökülmeler (spalling) görsel olarak izlenebilir niteliktedir. Yangına maruz kalmış yapıların saha değerlendirmelerinde de ilk gözlemler genellikle betonun renk değişimleri, çatlak oluşumu ve örtü betonu kayıpları üzerine yoğunlaşmaktadır. Renk farklılıkları, kesitin farklı bölgelerinin maruz kaldığı sıcaklık aralıklarının tahmin edilmesinde önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır.

Tablo 4.1’de, hem ortam sıcaklığı altında bulunan hem de 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklık etkilerine maruz bırakılan numunelerde gözlenen değişimler sunulmaktadır. Oda sıcaklığındaki (NŞA) numunelerde (P40, P25, C40, C25), beton yüzeylerinin genel olarak daha koyu gri ve homojen bir renge sahip olması; numunelerdeki serbest ve bağlı suyun büyük ölçüde korunmuş olmasına ve çimento hamurunda önemli bir mikroyapısal bozulma gerçekleşmemesine bağlanabilir.

Sıcaklık etkisi incelendiğinde, 200 °C ve 400 °C seviyelerinde hafif renk değişimleri başlamış; ancak bu sıcaklıklarda kabuk yüzeylerinde herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. 200 °C’de başlayan bu sınırlı renk değişimleri, serbest suyun buharlaşması ve hidratasyon

ürünlerinde kısmi su kaybı ile ilişkilendirilebilirken; 400 °C seviyesinde renk değişimlerinin daha belirgin hâle gelmesi, bağlayıcı fazda ilerleyen dehidrasyon sürecine işaret etmektedir. Sıcaklığın 600 °C ve 800 °C'ye çıkarılmasıyla birlikte numunelerin yüzey görünüşleri belirgin biçimde değişmiştir. Özellikle 600 °C'ye maruz bırakılan perlit agregalı numunelerde yüzey renginin açık gri–bej tonlarına dönmesi ve bu değişimin homojen olması; perlitin gözenekli yapısına bağlı olarak artan nem kaybı ve çimento hamurundaki yaygın dehidrasyon ile açıklanabilir. Betonda gözlenen bu renk değişimlerinin, genel olarak yüksek sıcaklık etkisiyle bileşenlerde meydana gelen kimyasal bozulmalarla ilişkili olduğu bilinmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte hidrasyon ürünlerinin bozulması ve Fe^{2+} içeren bileşiklerin oksidasyon yoluyla Fe^{3+} formuna dönüşmesi, yüzeyde kırmızımsı–kahverengi tonların oluşmasına neden olabilmektedir. Buna karşılık, yüksek sıcaklıklarda kalsiyum hidroksitin (CH) ayrışması ve serbest kireç (CaO) oluşumu beyazımsı renk değişimleriyle ilişkilendirilmektedir.

Yüzeysel çatlakların oluşumu ise, sıcaklık artışıyla beton bünyesinde oluşan su buharının yarattığı iç basıncın betonun çekme dayanımını aşması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda artan gözenek basıncı ve agrega–matris arasındaki termal genleşme farklılıkları, çatlakların ilerlemesini hızlandıran temel mekanizmalar arasında yer almaktadır. Tablo 4.1 detaylı incelendiğinde, 800 °C sıcaklık etkisi altında P25 ve P40 numunelerinin kabuk yüzeylerinde çatlak oluşumları gözlenirken; C25 ve C40 numunelerinde hasarların daha çok dökülme (spalling) formunda gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, doğal perlit agregalı betonların geleneksel agregalı betonlara kıyasla daha gözenekli bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır. Söz konusu davranış farklılığı; nem ve buharlaşma gibi çevresel etkilerin yanı sıra, malzemenin iç yapısındaki termal genleşme farklılıklarına ve bağlayıcı–agrega ara yüzeyindeki özelliklere atfedilebilir. Ayrıca literatürde belirtildiği üzere, agrega mineralojisi, çimento tipi ve mineral katkı içeriği gibi parametreler de yüksek sıcaklık altındaki renk değişimi ve hasar biçimini doğrudan etkileyebilmektedir.

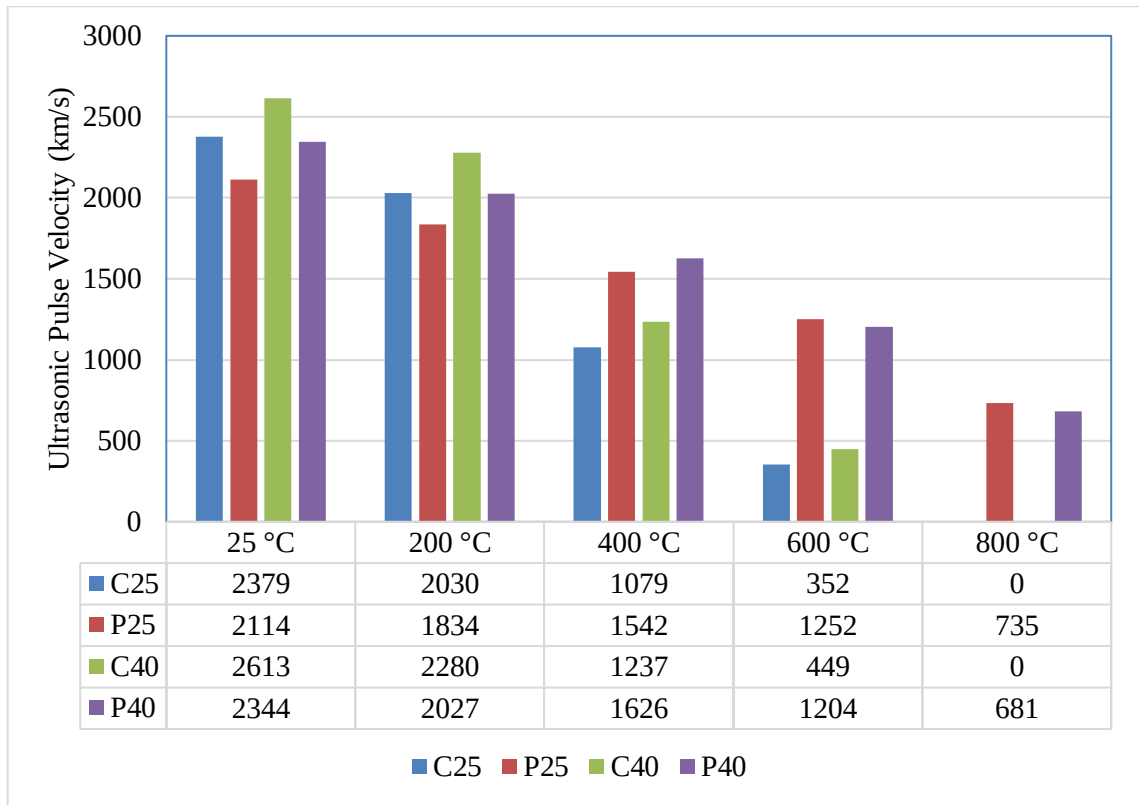
Tablo 4. 1. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan tüm küp numunelerin yüzeyleri

Numune	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
C25				
P25				
C40				
P40				

4.3. UPV Ölçümleri

Tahribatsız deney yöntemlerinden biri olan Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) testi, beton numunelerinin kalite ve homojenliğinin değerlendirilmesi amacıyla uygulanmıştır. UPV değerleri; betonun gözenek yapısı, yoğunluğu ve mekanik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Benaicaha vd., 2015; Bungey ve Grantham, 2006). Tekrarlı ölçümler arasındaki düşük varyasyon, uygulanan UPV prosedürünün güvenilirliğini ve numunelerin homojen döküm kalitesini doğrulamıştır. Şekil 4.2’de, farklı sıcaklık seviyelerine maruz bırakılan numunelerde

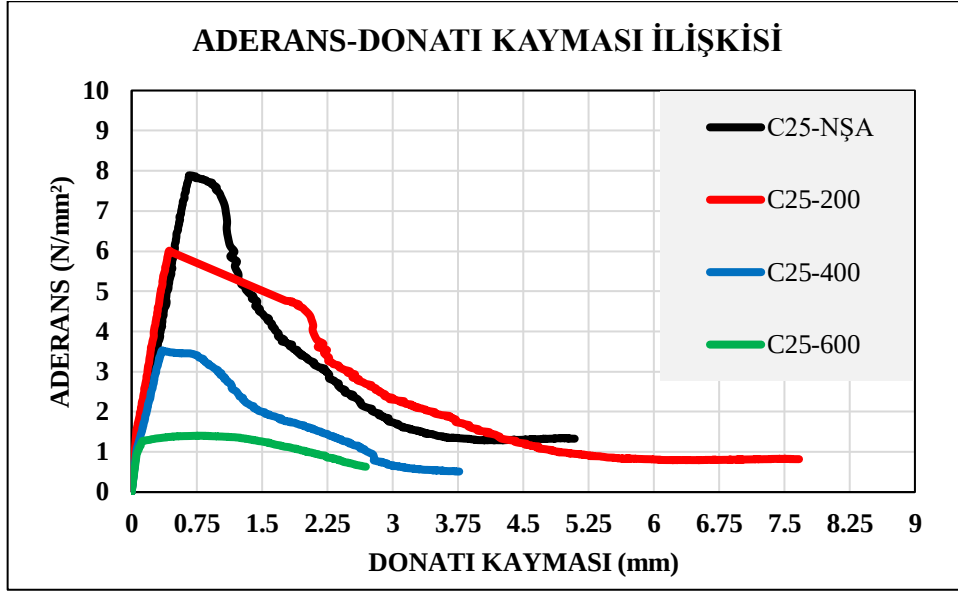
doğrudan iletim modu kullanılarak ölçülen UPV değerlerindeki değişimler ile bu değerlerin IS 13311:1992 standardına göre kalite sınıflandırması sunulmaktadır. Söz konusu standarda göre UPV değerleri “İyi (Good)”, “Orta (Medium)” ve “Şüpheli (Doubtful)” kalite kategorileri altında değerlendirilmektedir. Şekil 4.2 incelendiğinde, 200 °C ve 400 °C sıcaklıklarına maruz bırakılan numunelerde UPV değerlerinde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum, söz konusu sıcaklık seviyelerinde mikroyapısal bozulmanın sınırlı kaldığını ve ultrases dalga iletim kapasitesinin büyük ölçüde korunduğunu göstermektedir. Buna karşılık, 600 °C sıcaklık etkisi altında özellikle geleneksel betonla üretilen C25 ve C40 numunelerinde UPV değerlerinde sırasıyla %85,20 ve %82,81 oranlarında ciddi düşüşler meydana gelmiştir. Perlitli beton numunelerinde (P25 ve P40) ise UPV değerlerindeki azalış daha sınırlı kalmış ve sırasıyla %40,75 ve %48,63 olarak belirlenmiştir. C25 ve C40 numunelerinde UPV değerlerinin keskin biçimde azalmasının başlıca nedenlerinden birinin, yüksek sıcaklığın etkisiyle C-S-H jel yapısının bozulması ve buna bağlı olarak gözenek hacminin artması olduğu düşünülmektedir [18]. Yüksek sıcaklık altında meydana gelen iç nem göçü, mikro çatlak oluşumu ve agrega–matris arasındaki termal genleşme farklılıkları da ultrases dalgalarının yayılımını olumsuz yönde etkilemektedir. SEM temelli mikroyapı incelemelerinde belirlenen mikro çatlak genişlemeleri ve bağlayıcı fazdaki süreksizlikler, 600 °C’de gözlenen UPV kayıpları ile uyumludur. Sıcaklığın 800 °C’ye yükselmesiyle birlikte, C25 ve C40 numunelerinde artan dökülme (spalling) ve boşluklu yapı nedeniyle UPV ölçümü yapılamamıştır. Buna karşılık, P25 ve P40 numunelerinde referans duruma kıyasla UPV değerlerinde sırasıyla %62,23 ve %70,94 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Perlit agregaların gözenekli ve ısı yalıtım özelliği, yüksek sıcaklık altında çatlak birleşimini geciktirerek ultrases dalga iletim kapasitesinin geleneksel betonlara kıyasla daha etkin korunmasına katkı sağlamış olabilir. Ancak UPV ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin yüksek sıcaklık koşullarında yalnızca dayanım parametresiyle açıklanamayacağı; gözeneklilik, hidratasyon derecesi ve faz dönüşümleri gibi ilave mikroyapısal faktörlerin de bu ilişkiyi etkilediği dikkate alınmalıdır.



Şekil 4. 2. UPV Ölçüm Değerleri

4.4 Aderans-Donatı Kayması İlişkileri

Aderans-sıyrılma ilişkileri incelendiğinde; oda sıcaklığında (NŞA) geleneksel agregalı betonların (C25 ve C40), perlit agregalı muadillerine (P25 ve P40) kıyasla daha yüksek pik aderans değerleri sergilediği görülmektedir. Ayrıca beklendiği üzere, 40 MPa dayanım sınıfındaki numuneler 25 MPa serisine göre daha üstün bir performans göstermiştir. Geleneksel betonun oda sıcaklığındaki bu başarısı, daha yoğun ve az boşluklu matris yapısının donatı-beton ara yüzeyinde sağladığı etkin mekanik kilitlenme ile açıklanabilir. Buna karşın perlitli betonlarda agreganın gözenekli yapısı, ara yüzey aderans gelişimini sınırlayıcı bir etki yaratmıştır. Ancak 600 °C sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerde durum farklılaşmıştır. Yüksek sıcaklıkla birlikte tüm serilerde maksimum aderans belirgin biçimde azalmasına rağmen; perlit agregalı betonlar (hem P25 hem P40), geleneksel betonlara kıyasla daha yüksek artık aderans kapasitesi ve daha geniş bir kayma aralığında kararlı bir sıyrılma davranışı sergilemiştir. Bu bulgu, perlit agregasının gözenekli yapısı ve ısı uyumunun, yüksek sıcaklık sonrası donatı-beton ara yüzeyinde oluşan hasarı sınırlayarak aderans kaybını geciktirebildiğine işaret etmektedir.



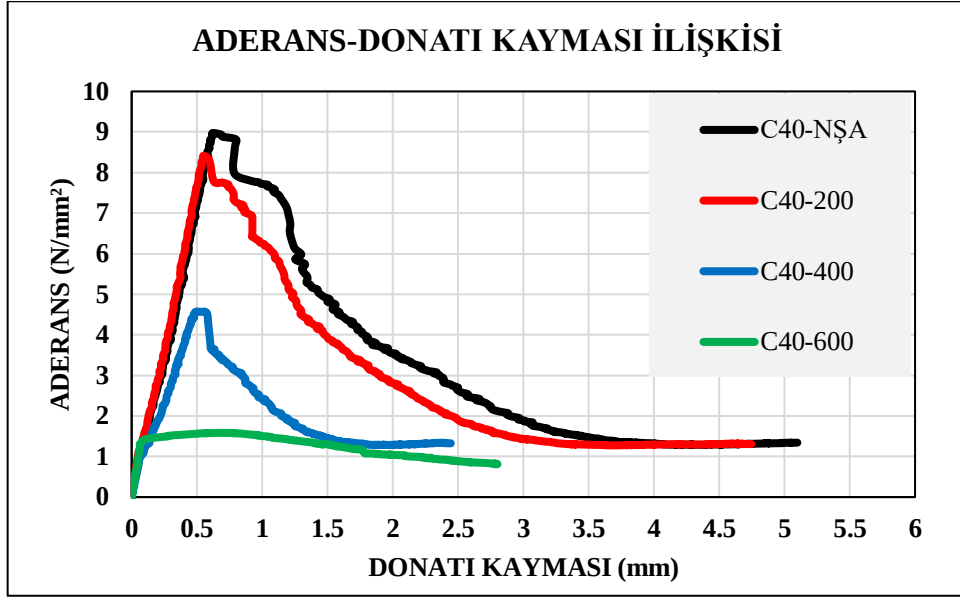
Şekil 4. 3. C25 Aderans-Donatı Kayma İlişkisi

Şekil 4.4'te C40 serisine ait aderans–donatı kayması ilişkisi, farklı yüksek sıcaklık seviyelerine bağlı olarak sunulmuştur. Aderans–sıyrılma eğrileri incelendiğinde, yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasında aderans kapasitesinin sıcaklık artışıyla birlikte belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Referans numune (C40-NŞA) en yüksek maksimum aderans gerilmesini göstermiş olup yaklaşık 9 MPa mertebesine ulaşmıştır.

200 °C maruziyetinde maksimum aderans gerilmesinde sınırlı bir azalma meydana gelmiş, ancak genel eğri formunun referans numuneye benzer karakter sergilediği görülmüştür. Buna karşılık 400 °C seviyesinde maksimum aderans gerilmesi önemli ölçüde düşmüş ve tepe noktasına daha düşük kayma değerlerinde ulaşılmıştır. 600 °C maruziyetinde ise hem maksimum aderans gerilmesi hem de kayma kapasitesi belirgin şekilde azalmıştır.

Başlangıç rijitliği açısından eğrilerin ilk bölümleri birbirine görece yakın olmakla birlikte, sıcaklık artışıyla birlikte maksimum aderans gerilmesinin azaldığı ve tepe noktasının daha düşük kayma değerlerine kaydığı dikkat çekmektedir. Meydana gelen hasarlar yalnızca gerilme kapasitesini değil, aynı zamanda deformasyon kapasitesini de sınırlandırmıştır.

Bu sonuçlar, yüksek sıcaklığın aderans mekanizmasını oluşturan sürtünme, kimyasal yapışma ve mekanik kenetlenme bileşenlerini olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, sıcaklık artışı C40 numunelerinde sıyrılma kapasitesini hem dayanım hem de süneklik açısından azaltmıştır.

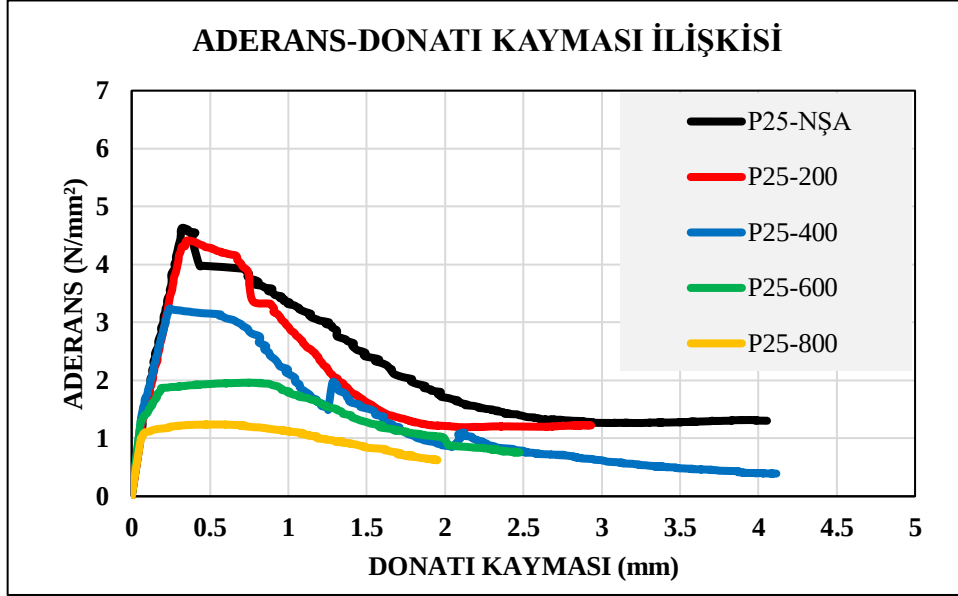


Şekil 4. 4. C40 Aderans-Donatı Kayma İlişkisi

Şekil 4.5'te P25 serisine ait aderans–donatı kayması ilişkisi yüksek sıcaklık seviyelerine bağlı olarak karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Aderans-sıyrılma ilişkileri incelendiğinde, yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası aderans kapasitesinde sıcaklık artışıyla birlikte belirgin azalmalar meydana geldiği görülmektedir. Referans numune en yüksek maksimum aderans gerilmesini göstermekte olup, 200 °C maruziyetinde sınırlı bir azalış gözlenirken, 400 °C, 600 °C ve özellikle 800 °C seviyelerinde kapasite kayıpları daha belirgin hale gelmiştir.

Başlangıç rijitliği açısından eğrilerin ilk bölümleri birbirine yakın davranış sergilese de, artan sıcaklıkla birlikte maksimum aderans gerilmesi düşmekte ve tepe noktasına daha düşük kayma değerlerinde ulaşılmaktadır. Yüksek sıcaklığın neden olduğu mikro çatlak oluşumu, matrisin zayıflaması ve ara yüzey geçiş bölgesindeki bozulma, donatı ile beton arasındaki mekanik kenetlenmenin azalmasına yol açmaktadır. Bu durum, hem gerilme kapasitesinin hem de deformasyon (kayma) kapasitesinin sınırlanmasına neden olmuştur.

Özellikle 600 °C ve 800 °C maruziyetlerinde eğrilerin daha erken yumuşama gösterdiği ve artık aderans gerilmesinin belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Bu davranış, yüksek sıcaklığın betonun aderans mekanizmasında önemli rol oynayan sürtünme, kimyasal yapışma ve mekanik kenetlenme bileşenlerini olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, sıcaklık artışı P25 numunelerinde sıyrılma kapasitesini hem dayanım hem de süneklik açısından azaltmıştır.



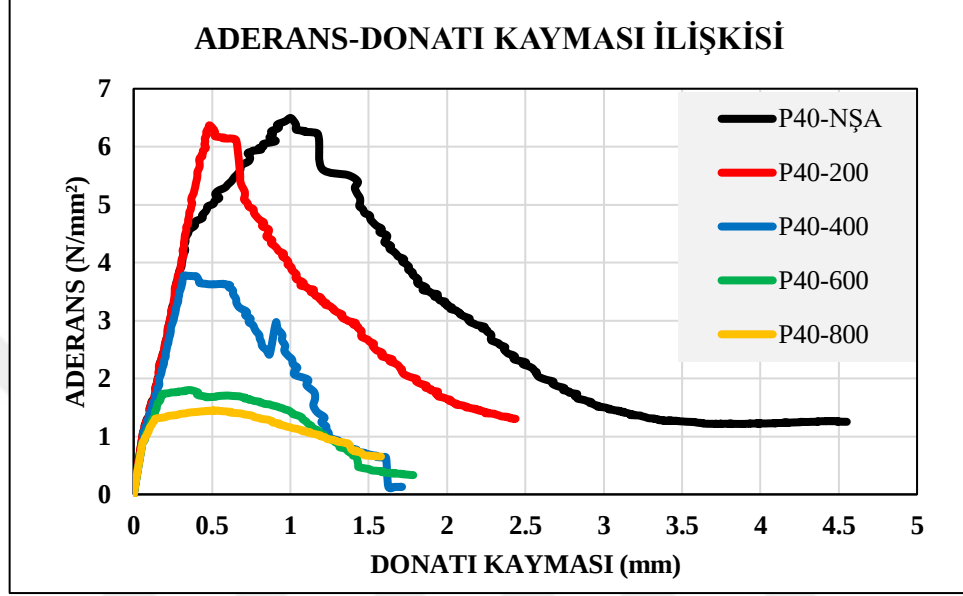
Şekil 4. 5. P25 Aderans-Donatı Kayma İlişkisi

Şekil 4.6'da P40 serisine ait aderans–donatı kayması ilişkisi, farklı yüksek sıcaklık seviyelerine bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur. Eğriler incelendiğinde, yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasında aderans kapasitesinin sıcaklık artışıyla birlikte belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Referans numune (P40-NŞA) en yüksek maksimum aderans gerilmesini göstermiş olup, yaklaşık yaklaşık 6.5 MPa mertebesine ulaşmıştır.

200 °C maruziyetinde (P40-200) maksimum aderans gerilmesinde sınırlı bir azalma meydana gelmiş, ancak eğrinin tepe noktasına daha düşük kayma değerinde ulaşıldığı gözlenmiştir. 400 °C sonrasında kapasite kaybı daha belirgin hale gelmiş; maksimum aderans gerilmesi önemli ölçüde düşmüş ve sıyrılma daha gevrek bir karakter kazanmıştır. 600 °C ve özellikle 800 °C maruziyetlerinde ise hem maksimum aderans gerilmesinde hem de kayma kapasitesinde ciddi azalmalar meydana gelmiş, eğriler erken yumuşama davranışı sergilemiştir

Başlangıç rijitliği açısından eğrilerin ilk bölümleri genel olarak benzer eğilim göstermekle birlikte, sıcaklık artışıyla birlikte tepe gerilmesine daha düşük kayma değerlerinde ulaşıldığı dikkat çekmektedir. Yüksek sıcaklığın neden olduğu mikro çatlak oluşumu, çimento matrisinin zayıflaması ve ara yüzey geçiş bölgesindeki bozulma, donatı ile beton arasındaki mekanik kenetlenmenin azalmasına yol açmıştır. Bu durum, yalnızca maksimum gerilme kapasitesinin değil, aynı zamanda artık aderans gerilmesinin ve deformasyon (kayma) kapasitesinin de azalmasına neden olmuştur.

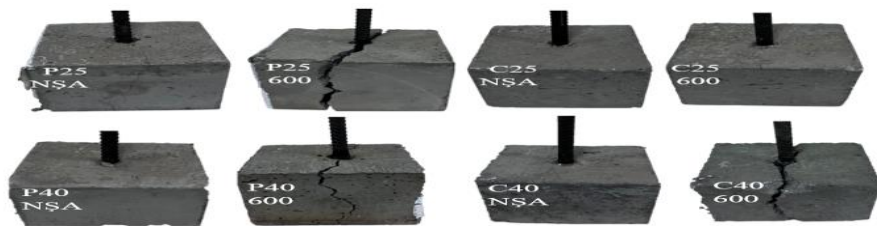
Özellikle 600 °C ve 800 °C seviyelerinde artık aderans gerilmesinin oldukça düşük değerlere indiği ve sünek davranışın belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak, sıcaklık artışı P40 numunelerinde sıyrılma kapasitesini hem dayanım hem de süneklik açısından önemli ölçüde azaltmıştır.



Şekil 4. 6. P40 Aderans-Donatı Kayma İlişkisi

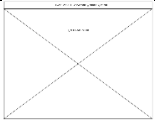
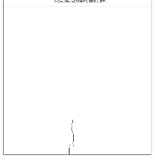
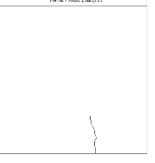
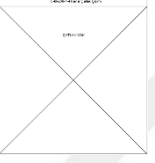
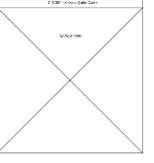
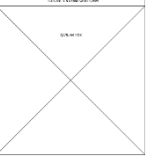
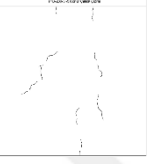
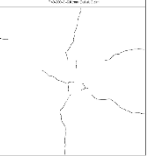
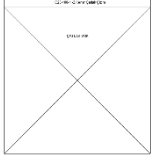
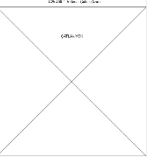
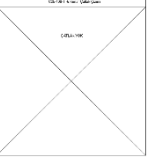
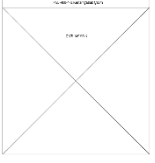
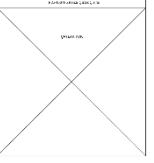
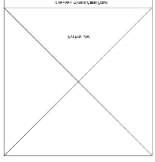
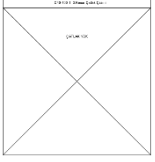
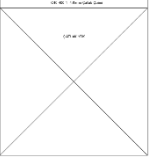
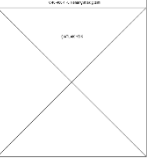
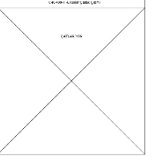
4.5. Çatlak ve Hasar Mekanizmaları

Oda sıcaklığında her iki beton türünde de mikro çatlaklar ihmal edilebilir seviyedeysen, 600 °C etkisiyle çatlakların belirginleştiği ve donatı çevresinde aderans kaybını tetikleyen ayrılmaların geliştiği gözlemlenmiştir. Bu hasar mekanizması, özellikle 25 MPa serisinde perlit agregalı numunelerde (P25-600), geleneksel numunelere (C25-600) göre daha şiddetli seyretmektedir. Buna karşılık, 40 MPa serisinde 600 °C sonrası hasar her iki beton türünde de benzer şekilde gözlenmiştir. Sonuç olarak; yüksek sıcaklık sonrası aderans-sıyrılma davranışı, beton dayanım sınıfı ve agrega kompozisyonuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.



Şekil 4. 7. Hasar görselleri

Tablo 4. 2. Yüksek sıcaklık yakım sonrası çatlak görselleri

200 °C						
	1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	4.Yüzey	5.Yüzey	6.Yüzey
C25						
P25						
C40						
P40						
400 °C						
	1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	4.Yüzey	5.Yüzey	6.Yüzey
C25						
P25						
C40						
P40						

600 °C						
	1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	4.Yüzey	5.Yüzey	6.Yüzey
C25						
P25						
C40						
P40						
800 °C						
	1.Yüzey	2.Yüzey	3.Yüzey	4.Yüzey	5.Yüzey	6.Yüzey
C25						
P25						
C40						
P40						

Tablo 4. 3. 200° sıcaklık sonrası yüzey çatlak formasyonu

SICAKLIK	NUMUNE KODU	1.KENAR	2.KENAR	3.KENAR	4.KENAR	5.KENAR	6.KENAR
200°	C25-200-1	X	X	X	X	X	P
	C25-200-2	X	X	X	X	X	X
	C25-200-3	X	P	X	X	X	X
	C40-200-1	X	X	X	X	X	X
	C40-200-2	X	X	X	X	X	X
	C40-200-3	X	X	X	X	X	X
	P25-200-1	X	P	P	P	X	X
	P25-200-2	X	P	P	P	P	P
	P25-200-3	P	P	X	X	P	P
	P40-200-1	X	X	P	X	X	X
	P40-200-2	X	X	P	P	P	P
	P40-200-3	X	X	X	P	P	P

X:Çatlak yok, P: Çatlak var

Tablo 4. 4. 400° sıcaklık sonrası yüzey çatlak formasyonu

SICAKLIK	NUMUNE KODU	1.KENAR	2.KENAR	3.KENAR	4.KENAR	5.KENAR	6.KENAR
400°	C25-400-1	X	X	X	X	X	X
	C25-400-2	X	X	X	X	X	X
	C25-400-3	X	X	X	X	X	X
	C40-400-1	X	X	X	X	X	X
	C40-400-2	X	X	X	X	X	X
	C40-400-3	X	X	X	X	X	X
	P25-400-1	P	P	X	P	X	P
	P25-400-2	P	P	P	P	X	P
	P25-400-3	P	P	P	P	P	P
	P40-400-1	P	P	P	P	P	P
	P40-400-2	P	P	X	P	P	P
	P40-400-3	P	P	P	P	P	P

X: Çatlak yok, P: Çatlak var

Tablo 4. 5. 600° sıcaklık sonrası yüzey çatlak formasyonu

SICAKLIK	NUMUNE KODU	1.KENAR	2.KENAR	3.KENAR	4.KENAR	5.KENAR	6.KENAR
600°	C25-600-1	X	X	X	X	X	P
	C25-600-2	P	P	P	P	P	P
	C25-600-3	X	X	P	P	P	P
	C40-600-1	P	P	P	P	P	P
	C40-600-2	P	P	P	P	P	P
	C40-600-3	P	P	P	P	P	P
	P25-600-1	P	P	X	X	X	P
	P25-600-2	X	X	X	X	P	P
	P25-600-3	X	X	X	X	X	P
	P40-600-1	P	P	P	X	P	P
	P40-600-2	X	P	P	P	P	P
	P40-600-3	P	P	P	P	P	P

X: Çatlak yok, P: Çatlak var

Tablo 4. 6. 800° sıcaklık sonrası yüzey çatlak formasyonu

SICAKLIK	NUMUNE KODU	1.KENAR	2.KENAR	3.KENAR	4.KENAR	5.KENAR	6.KENAR
800°	C25-800-1	X	X	X	X	X	X
	C25-800-2	X	X	X	X	X	X
	C25-800-3	X	X	X	X	X	X
	C40-800-1	X	X	X	X	X	X
	C40-800-2	X	X	X	X	X	X
	C40-800-3	X	X	X	X	X	X
	P25-800-1	P	P	P	P	P	P
	P25-800-2	P	P	P	P	P	P
	P25-800-3	P	P	P	P	P	P
	P40-800-1	P	P	P	P	P	P
	P40-800-2	P	P	P	P	P	P
	P40-800-3	P	P	P	P	P	P

X: Çatlak yok, P: Çatlak var

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada; perlit ve geleneksel agregalı betonların, oda sıcaklığı (NŞA), 200, 400, 600 ve 800°C yüksek sıcaklık etkisi altındaki aderans–sıyrılma davranışları, kütle kayıpları ve renk değişimleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Renk değişimleri incelendiğinde; oda sıcaklığındaki numunelerin koyu gri ve homojen bir görünüme sahip olduğu, 600 °C’ye maruz kalan numunelerde ise genel bir renk açılması meydana geldiği gözlenmiştir. Perlit agregalı betonlarda renk değişiminin homojen bir şekilde açık gri–bej tonlarına dönüşmesi, yüksek sıcaklıkta gerçekleşen yaygın dehidrasyon ve mikroyapısal dönüşümlerin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Geleneksel betonlarda ise renk değişimi daha sınırlı kalmış ve yerel koyulaşmalar tespit edilmiştir.
- Kütle kaybı analizleri, 600 °C sonrası perlit agregalı betonların geleneksel betonlara kıyasla daha yüksek kayıplar yaşadığını göstermiştir. Bu durum, perlit agregasının gözenekli yapısı sebebiyle bünyesinde barındırdığı yüksek miktardaki serbest ve bağlı suyun sıcaklık etkisiyle uzaklaşmasına atfedilmektedir. Ancak artan kütle kaybına rağmen perlitli betonların aderans performansını daha kararlı sürdürebilmesi, kütle kaybının mekanik performansla her zaman doğrusal bir ilişki içinde olmadığını ortaya koymaktadır.
- Aderans–sıyrılma davranışı açısından değerlendirildiğinde; oda sıcaklığında (NŞA) geleneksel agregalı betonların (C25 ve C40), perlit agregalı muadillerine (P25 ve P40) kıyasla daha yüksek pik aderans değerlerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca beklendiği üzere, 40 MPa dayanım sınıfındaki numuneler 25 MPa serisine göre daha üstün bir performans sergilemiştir. Geleneksel betonun oda sıcaklığındaki bu başarısı, daha yoğun ve az boşluklu matris yapısının donatı–beton ara yüzeyinde sağladığı güçlü mekanik kenetlenme ile açıklanabilir. Buna karşılık, perlitli betonlarda agreganın gözenekli yapısı, ara yüzeyde aderans gelişimini kısmen sınırlayıcı bir etki yaratmıştır.

- Bu bulgu, perlit agregasının gözenekli yapısı ve ısı uyumunun, yüksek sıcaklık sonrası donatı–beton ara yüzeyinde oluşan hasarı sınırlayarak aderans kaybını geciktirebildiğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak; perlit agregalı betonların yüksek sıcaklık altında daha fazla kütle kaybetmesine rağmen donatı–beton aderansını koruma konusunda avantajlı bir performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, perlit agregasının yüksek sıcaklık riski taşıyan yapısal beton uygulamalarında nitelikli bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.



KAYNAKÇA

- ACI Committee 318. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19)*. American Concrete Institute.
- Agrawal, A., & Kodur, V. K. R. (2020). A novel experimental approach for evaluating residual capacity of fire damaged concrete members. *Fire Technology*, 56(2), 715–735.
- Ahmad, M., Zhao, Z., & Li, H. (2019). Revealing stylized empirical interactions among construction sector, urbanization, energy consumption, economic growth and CO2 emissions in China. *Science of the Total Environment*, 657, 1085–1098.
- Albero, V., et al., High-temperature effects on bond behaviour between concrete and corrosion resistant steel reinforcements. *Construction and Building Materials*, 2024. 447.
- Allen, J. H., Felder, A. L., McDermott, J. F., Azizinamini, A., Frosch, R. J., Mitchell, D., ... & Matamoros, A. B. (2003). *Bond and development of straight reinforcing bars in tension* (Report No. ACI 408R-03). American Concrete Institute.
- Annerel, E., & Taerwe, L. (2011). Methods to quantify the colour development of concrete exposed to fire. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3989–3997.
- Arslan, T. (2017). *Beton dayanımı ve kenetlenme boyunun beton-donatı aderansına etkisinin mafsallı giriş deneyi ile incelenmesi* [Master's thesis, Düzce University].
- ASTM International. (2015). *Standard test method for comparing bond strength of steel reinforcing bars to concrete using beam-end specimens* (ASTM A944-10).
- Atlı, S., Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., Ayaz, Y., Turan, A. İ., Bulut, H. A., & Naimi, S. (2025). Experimental evaluation of reinforced concrete columns produced with natural perlite aggregates under cyclic loading. *Structural Concrete*.
- Baradan, B., Yazıcı, H., & Ün, H. (2010). *Beton ve betonarme yapılarda kalıcılık (durabilite)*. Türkiye Hazır Beton Birliği.
- Benaicha, M., Jalbaud, O., Alaoui, A. H., & Burtschell, Y. (2015). Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.047>
- Brown, T. J., Idoine, N. E., Wrighton, C. E., Raycraft, E. R., Hobbs, S. F., Shaw, R. A., & Kresse, C. (2021). *World mineral production 2015-2019*. British Geological Survey.
- Buchanan, A. H., & Abu, A. (2001). *Structural design for fire safety* (Vol. 273). Wiley.
- Bungey, J. H., & Grantham, M. G. (2006). *Testing of concrete in structures*. CRC Press.
- Bureau of Indian Standards. (1992). *Non-destructive testing of concrete-methods of test part 1 ultrasonic pulse velocity* (IS 13311: Part 1).
- Carvalho, E. P., Miranda, M. P., Fernandes, D. S., & Alves, G. V. (2018). Comparison of test methodologies to evaluate steel-concrete bond strength of thin reinforcing bar. *Construction and Building Materials*, 183, 243–252.
- Castillo, C. (1987). *Effect of transient high temperature on high-strength concrete* [Doctoral dissertation, Rice University].

- Chen, G. M., He, Y. H., Yang, H., Chen, J. F., & Guo, Y. C. (2014). Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 71, 1–15.
- Chu, S. H., & Kwan, A. K. H. (2018). A new method for pull out test of reinforcing bars in plain and fibre reinforced concrete. *Engineering Structures*, 164, 82–91.
- Daoud, A., Lorrain, M., & Elgonnoui, M. (2002). Résistance à l'arrachement d'armatures ancrées dans du béton autoplaçant. *Materials and Structures*, 35(7), 395–401.
- de Sousa Leal Neto, L., & de Sousa Leal Bonfim, V. L. (2025). Numerical investigation of pull-out tests: A comparative study between cylindrical and cubic specimens. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 47(10), 463.
- Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., & Tao, S. (1997). Bond behavior of deformed GFRP rebars. *Journal of Composite Materials*, 31(14), 1413–1430.
- Ergün, A., G. Kürklü, and M.S. Başpınar, The effects of material properties on bond strength between reinforcing bar and concrete exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 2016. 112: p. 691-698.
- Ersoy, U., & Özcebe, G. (2001). *Betonarme: Temel ilkeler TS-500-2000 ve Türk deprem yönetmeliğine göre hesap* (Extended new ed.). Evrim Yayınevi.
- Ertaş, R., Yalçiner, H., Kumbasaroğlu, A., Ayaz, Y., Turan, A. İ., & Çelik, A. (2024, March 16–17). *Geleneksel ve doğal perlitli beton ile donatı arasındaki aderans-donatı sıyrılması ilişkisinin araştırılması* [Paper presentation]. 19. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Ankara, Turkey.
- Ichinose, T., Kanayama, Y., Inoue, Y., & Bolander, J. E. (2004). Size effect on bond strength of deformed bars. *Construction and Building Materials*, 18, 549–558.
- International Federation for Structural Concrete (fib). (2013). *fib model code for concrete structures 2010*. John Wiley & Sons.
- Isla, F., Ruano, G., & Luccioni, B. (2015). Analysis of steel fibers pull-out: Experimental study. *Construction and Building Materials*, 100, 183–193.
- Kankam, C. K. (2004). Bond strength of reinforcing steel bars milled from scrap metals. *Materials & Design*, 25(3), 231–240.
- Khan, M., Cao, M., Chaopeng, X., & Ali, M. (2022). Experimental and analytical study of hybrid fiber reinforced concrete prepared with basalt fiber under high temperature. *Fire and Materials*, 46(1), 205–226.
- Khoury, G. A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), 429–447.
- Kodur, V., Kand, S., & Khaliq, W. (2012). Effect of temperature on thermal and mechanical properties of steel bolts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6), 765–774.
- Li, Q., Li, Z., & Yuan, G. (2012). Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material. *Construction and Building Materials*, 35, 687–692.

- Li, Y., Liu, Z. Y., & Jiang, J. Y. (2024). Microstructure and macroscopic properties of low-carbon concrete subjected to elevated temperature: State-of-the-Art Review. *Journal of Building Engineering*, 108731.
- Liu, S., et al., Experimental and numerical study on the reinforcement-concrete bond properties at sustained sub-high temperatures. *Engineering Structures*, 2025. 341.
- Luccioni, B. M., Figueroa, M. I., & Danesi, R. F. (2003). Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures. *Engineering Structures*, 25, 729–742.
- Lutz, L. A., & Gergely, P. (1967). Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete. *ACI Journal Proceedings*, 64(11), 711–721.
- Manzi, S., Mazzotti, C., & Bignozzi, M. C. (2013). Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 37, 312–318.
- Ministry of Public Works and Settlement. (1998). *Turkish earthquake code: Specification for structures to be built in disaster areas*. Government of Republic of Turkey.
- Ministry of Public Works and Settlement. (2007). *Turkish earthquake code: Specification for structures to be built in disaster areas*. Government of Republic of Turkey.
- Mousavi, S. S., Dehestani, M., & Mousavi, K. K. (2017). Bond strength and development length of steel bar in unconfined self-consolidating concrete. *Engineering Structures*, 131, 587–598.
- Nadeem, A., Memon, S. A., & Lo, T. Y. (2013). Qualitative and quantitative analysis and identification of flaws in the microstructure of fly ash and metakaolin blended high performance concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 38, 731–741.
- Neville, A. M. (1996). *Properties of concrete*. John Wiley & Sons.
- Öztürk, A. B., Kumbasaroğlu, A., Yalçiner, H., Ayaz, Y., Çelik, A., & Turan, A. İ. (2024, March 16–17). *Yüksek sıcaklık etkisinde perlitli betonun basınç ve eğilme dayanımlarının araştırılması* [Paper presentation]. 19. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Ankara, Turkey.
- Peng, G. F., Yang, W. W., Zhao, J., Liu, Y. F., Bian, S. H., & Zhao, L. H. (2006). Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 36(4), 723–727.
- RILEM. (1983). *RC 6 bond test for reinforcement steel. Part 2. Pull-out test*. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials.
- Sharma, A., J. Bošnjak, and S. Bessert, Experimental investigations on residual bond performance in concrete subjected to elevated temperature. *Engineering Structures*, 2019. 187: p. 384-395.
- Singh, B., Prasad, D., & Kant, R. R. (2021). Effect of lime filler on RCA incorporated bituminous mixture. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100166.
- Tastani, S. P., & Pantazopoulou, S. J. (2013). Reinforcement and concrete bond: State determination along the development length. *Journal of Structural Engineering*, 139(9), 1567–1581.
- Turkish Standards Institution. (2014). *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları* (TS 500).
- Varona, F.B., et al., Evolution of the bond strength between reinforcing steel and fibre reinforced concrete after high temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 2018. 176: p. 359-370.

- Wang, J., Guo, J., Su, J., Huang, R., Xu, L., Chen, S., ... & Wu, S. (2024). Improving the bonding performance of new and old cement pastes by high-temperature treatment on the surface of old cement pastes. *Journal of Building Engineering*, 90, 109482.
- Wróblewska, J., & Kowalski, R. (2020). Assessing concrete strength in fire-damaged structures. *Construction and Building Materials*, 254, 119122.
- Xu, Y., Wong, Y. L., Poon, C. S., & Anson, M. (2001). Impact of high temperature on PFA concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(7), 1065–1073.
- Yang, J., Du, Q., & Bao, Y. (2011). Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1935–1945.
- Zhang, J., Stang, H., & Li, V. C. (2001). Crack bridging model for fibre reinforced concrete under fatigue tension. *International Journal of Fatigue*, 23, 655–670.

