

## DONATI-BETON ADERANSI, YÜKSEK SICAKLIKLARIN BETON DAYANIMINA VE ADERANSA ETKİLERİ KONUSUNDA BİR DERLEME

Ahmet Ferhat BİNGÖL, Rüstem GÜL\*

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Erzurum

### Özet

Yapılarda karşılaşılabilecek tehlikelerden birisi olan yangın neticesinde yapı elemanları yüksek sıcaklıklara maruz kalır. Bu sebeple yüksek sıcaklık etkilerinden sonra beton ve betonarme elemanların davranışlarının bilinmesi mühendisler için önemlidir. Yüksek sıcaklık etkileriyle beton başlangıç basınç mukavemetinin bir kısmını kaybeder. Basınç mukavemetindeki azalma miktarı, kullanılan malzemelerin özelliklerine ve ulaşılan en yüksek sıcaklık, ısıtma hızı, ısıtma süresi, soğutma şekilleri gibi değişkenlere göre farklılık gösterir. Ancak 300°C'nin üzerinde sıcaklıklarda betonun basınç dayanımında belirgin kayıplar olduğu teknik literatürdeki ağırlıklı görüştür. Beton ve çelik çubuklardan oluşan bir yapı elemanının betonarme olarak davranabilmesi için çubukların betona kenetlenmesi gerekir. Bu kenetlenme; betonun çekme dayanımı, çeliğin akma dayanımı, çubuğun yüzey geometrisi, donatı çapı, kenetlenme boyu, donatı etrafındaki beton örtü kalınlığı (pas payı), kullanılan agreganın cinsi ve katkı maddeleri gibi bir çok değişkenden etkilenir.

Bu çalışmada yüksek sıcaklıklardan sonra beton davranışı, aderans ve yüksek sıcaklıklardan sonra beton-donatı aderansı teknik literatür ışığında irdelenmiş ve genel bir değerlendirme yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek sıcaklıklar, yangın, basınç mukavemeti, aderans

## A REASSESSMENT ON THE BOND STRENGTH BETWEEN REINFORCEMENT AND CONCRETE AND THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURES ON THE CONCRETE AND ON THE BOND BETWEEN CONCRETE AND REINFORCEMENT

### Abstract

Structural members expose to the elevated temperatures as a result of the fire, which is one of the dangers that can be faced in buildings. For this reason, to know the behavior of concrete and reinforced concrete after elevated temperature effect is important for engineers. Concrete loses some of the initial compressive strength with the effect of high temperatures. Decrease ratio of the compressive strength depends on many factors as; material properties and experimental factors like heating rate, heating duration and cooling regimes. But many researchers agree that concrete loses considerably strength above 300°C. Reinforcement bars must make a bond with concrete for acting as reinforcement structural member. This bond is influenced by many parameters like; tensile strength of concrete, yield strength of the steel, bar's surface geometry, diameter of the bar, bond length, concrete cover thickness around the bar, type of the aggregate and admixtures.

In this study concrete behavior after high temperatures, concrete-reinforcement bond and the concrete-reinforcement bond after high temperatures were considered with technical literature and a reassessment is made.

**Key Words:** High temperatures, fire, compressive strength, concrete-reinforcement bond strength

\* E-posta: rgul@atauni.edu.tr

## 1. Giriş

Yangın, binalarda her zaman karşılaşılabilecek bir tehlikedir. Gelişen teknoloji ve sanayileşmenin artması, nüfusun giderek çoğalmasına paralel olarak toplu yerleşim bölgelerin fazlalaşması yangın riskinin ve buna bağlı olarak yangının maddi ve manevi zararlarının artmasına neden olmaktadır.

Avrupa Birliği içinde yangın konusunda ülkeler arasında farklılıklar söz konusudur. Almanya’da DIN normları, İngiltere’de BSI standartları kullanılmaktadır. Birlik içerisinde ortak standart henüz oluşturulamamıştır. Bu konudaki çalışmalar ve tartışmalar halen sürmektedir. Yangın Standardı olarak Türkiye’de TSE son on yılda yangınla ilgili EN standartları çevrilmeye başlanmıştır. Tercümesi yapılan 13000 serisi standartlar yürürlüğe girdikçe kullanılmaya başlanmaktadır. Çıkarılan bu standartlar daha çok testlere dönük standartlardır. Yönetmelikler açısından olaya bakmak gerekirse, ilk olarak 1992 yılında “İstanbul Belediyesi Yangından Korunma Yönetmeliği” hazırlanmıştır. Bu yönetmeliği esas alarak diğer bazı belediyeler de benzeri çalışmaları yapmışlar, ancak farklı uygulamalar ve belediye sınırları dışında kalan alanların durumu sebebiyle bazı karışıklıklar çıkmıştır. Fakat bu konudaki ilk basamak olarak değerlendirilmesi gereken bir yönetmelik olması nedeniyle önemli bir aşamadır. Aksaklıkların ve farklılıkların ortadan kaldırmak için uzun ve özverili çalışmalar sonucunda, Türkiye genelinde geçerli olan, kamu ve özel kurum ve kuruluşlar ile gerçek kişilerce kullanılan bina, tesis ve işletmelerin, tasarımı, yapımı, işletimi, bakımı ve kullanımı aşamalarında, herhangi şekilde çıkan yangının can ve mal kaybının en aza indirilerek söndürülmesini sağlayan tedbirler ile organizasyon, eğitim ve denetimi sağlamak amacıyla Sivil Savunma Genel Müdürlüğü’nün koordinatörlüğünde, çok sayıda sivil toplum örgütünün katkılarıyla Türkiye Yangından Korunma Yönetmeliği hazırlanmıştır [1].

Binalardaki yangınlarda 1200<sup>0</sup>C’ye kadar çıkan sıcaklıklar ölçülmüştür. Yapı malzemeleri bu sıcaklığa kadar ısıtıldığında ahşabın yandığı, çeliğin yumuşayıp mukavemet kaybettiği, beton veya taşların ise parçalanıp döküldüğü görülmektedir. Şu halde önemli yapı malzemelerinin hiç biri bu derece yüksek sıcaklıklara dayanamaz. Ancak bunlar arasında beton, diğerlerine kıyasla biraz daha dayanıklıdır ve biraz daha uzun sürede parçalanır [2].

Betonarme yapıların yangına karşı dayanım kabiliyeti, beton ve donatının ısınma ve soğuması sırasında oluşan birbiriyle bağımlı karmaşık değişikliklere bağlıdır. Beton normal sıcaklıklarda süner fakat yüksek sıcaklıklarda sünme oranı çok artar. Young modülünün azalması hızlanarak artan sünme ve çatlak oluşumu yüksek ısı ve yük altında mukavemetteki azalma soğuma döneminde gevrek betonun yapısını değiştirir. Betonun mukavemeti çok azalmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda sünek hale gelir. Bir yangında betonun içindeki suyun kuruyarak çekilmesi betonda büzülme, kristal yapının ve elastikiyetinin değişmesine, mukavemetin düşmesine, renkte ve kimyasal yapıda değişimlere neden olur [3].

Beton ve çelik çubuklardan oluşan bir yapı elemanının betonarme olarak davranabilmesi için çubukların betona kenetlenmesi gerekir. Kenetlenmeyi sağlayan, çelik çubuk ile beton arasındaki kayma gerilmelerine “aderans” denir. Betonarmede, donatı beton kütle içine yeterli uzunlukta gömülmüş ise çubuğu çekip çıkartmak mümkün değildir. Gömülme boyunun yeterli olmadığı durumlarda ise, çubuk yüzeyinin geometrisine bağlı olarak çubuk sıyrılıp çıkabilir veya etrafındaki beton kütleli yarabilir. Betona gömülen çubuk boyu “Kenetlenme boyu” olarak adlandırılır ve bu tür aderansa da “Kenetlenme aderansı” denir. Aderansın üç temel nedene dayandığı kabul edilmektedir. Bunlar;

- Çelik ve beton arasında “yapışma” olarak nitelendirilebilecek moleküler ve kapiler bağ kuvvetleri
- Beton ve çelik çubuk arasında oluşan sürtünme kuvvetleri
- Donatı çubuğu ve beton arasındaki mekanik dış kuvvetleri

Aderans birçok değişkenden etkilenir. Bu değişkenlerden başlıcaları; betonun çekme dayanımı, çeliğin akma dayanımı, çubuğun yüzey geometrisi, donatı çapı, kenetlenme boyu, donatı etrafındaki beton örtü kalınlığı (pas payı), kullanılan agreganın cinsi ve katkı maddeleri olarak sıralanabilir [4].

Bugüne kadar aderans dayanımının ve kenetlenme boyunun hesaplanmasına yönelik pek çok deney türü geliştirilmiştir. Ancak bu deney elemanlarının hiçbiri tam anlamı ile gerçek durumu yansıtmamaktadır. Sorunun karmaşıklığı ve olayı etkileyen faktörlerin fazlalığı nedeniyle ideal bir aderans deneyinin henüz geliştirilmediği, belki de hiçbir zaman da geliştirilemeyeceği söylenebilir.

Aderans üzerinde yapılan deneyler incelemeye yöneldikleri özellikler bakımından iki ana gruba ayrılabilirler:

- a. Aderansla doğrudan doğruya ilgili özellikleri (kenetlenme, bindirme, sınır-gerilme) konu alan deneyler
- b. İç aderans denilen çatlama özelliklerini konu alan kiriş deneyleri

Birinci gruba giren deneyler içerisinde en basit olanı ve en yaygın olarak kullanılanı çekip-çıkarma (pull-out) deneyidir [5].

Çekip-çıkarma deney elemanında donatıya dik kesme kuvvetinin bulunmayışı, mesnedin uyguladığı yerel basınç gerilmeleri ve beton örtüsünün gerçekte olandan çok büyük olması ve çekme çatlaklarının oluşmaması gibi sakıncalar vardır. Bu sebeple bu deney elemanı aderans dayanımı ve kenetlenme boyunun saptanmasında uygun değildir. Ancak iki tür donatının izafi aderans ve kenetlenme özelliklerinin saptanıp karşılaştırılmasında bu tür deneylerden yararlanılabilir. Çekip-çıkarma deneylerinin eğilmeye çalışan bir elemandaki gerçek durumu yansıtmamasından dolayı kiriş deneyleri geliştirilmiştir. Kiriş deneylerinden en yaygın olarak kullanılanları; Bureau of Standards Deneyi, Texas Deneyi, Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi ve bileşik eğilmeye maruz büyük boyutlu betonarme kirişler üzerinde yapılan aderans deneyidir [6].

## 2. Teknik literatür değerlendirmesi

Bu bölümde yüksek sıcaklıklar, aderans ve yüksek sıcaklıklarda aderans konularında daha önceden yapılmış olan çalışmalar üç ayrı bölümde özetlenmiştir. Her bölüm kendi içerisinde tarih sırasına göre sunulmuştur.

### 2.1. Yüksek sıcaklıkların beton davranışına etkisi konusunda bazı çalışmalar

Gustaferrero *et al.* (1971) hafif, yalıtkan betonların yangın dayanımları ile ilgili olarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada 500-1600 kg/m<sup>3</sup> lük birim ağırlığa sahip betonların yangın dayanımı incelenmiş; numunelerin nem içeriği ve bağıl rutubet arasındaki ilişkiler belirtilmiştir. Deney programında boşluklu hafif beton, perlit betonları, vermikülit betonları kullanılmıştır. Döşeme kalınlığı ile yangın dayanımı arasındaki ilişki değişik birim ağırlığa sahip betonlar için incelenmiştir. Çalışmanın en önemli sonucu olarak, birim ağırlıktaki artışın her beton türü için yangın dayanımında azalmaya sebep olduğu gösterilmiştir [7].

Zoldners and Wilson (1973) yaptıkları çalışmada, genişmiş şist ve cüruf agregaları kullanarak hazırladıkları beton karışımlarını yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakmışlardır. Bazı karışımlarda çimento yerine %25-40 arasında oranlarda uçucu kül, silis dumanı, şist külü gibi mikrofiller malzeme kullanılarak bu malzemelerin beton davranışına etkisi incelenmiştir. Numuneler fırında oda sıcaklığından 1000°C'ye kadar sıcaklıklara ısıtılmış, sonra kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda farklı sıcaklık etkilerinde, tam hafif betonların yarı hafif betonlara göre daha iyi dayanım gösterdiği, yüksek fırın cürufu kullanılmasının yangın etkilerinde bir avantaj sağlamayıp aksine betonun eğilme mukavemetini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca portland çimentosu yerine mikro filler malzeme kullanımının 500°C'ye kadar hafif betonun ısı dayanımını iyileştirdiği, silis dumanının basınç mukavemetinde %20, eğilme mukavemetinde %10 artış sağlayarak en belirgin iyileştirmeye sebep olduğu bildirilmiştir [8].

Rostasy *et al.* (1980) 900°C'ye kadar olan yüksek sıcaklıkların betonun gözenek yapısı üzerindeki etkisini cıva porozimetresi yöntemiyle incelemiş ve yüksek sıcaklıkların toplam gözenek hacminde artışa sebebiyet verdiğini belirtmişlerdir [9].

Ataman (1991) yaptığı çalışmada, yangın etkisinde kalan betonun mekanik özelliklerini belirleyebilmek, yüksek sıcaklığın ve soğutma türlerinin betonun eğilme ve basınç mukavemetleri üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Agregaların genişmesi, çimentonun büzülmesi, beton boşluklarındaki ve çimento birleşimindeki suyun dehidratasyonu gibi fiziksel ve kimyasal olaylar sonucu beton mukavemetinin azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun hava ve su ortamlarında soğutulmaları sonucu elde edilen mukavemetlerdeki azalmaların, su ortamında soğutulanlarda daha küçük olduğu ifade edilmiş ve bu durum beton numunelerinin su içerisinde iken yeniden hidrasyon yapabilecek ortamı bulması ve bunun sonucunda mukavemetin bir kısmının geri kazanılmasıyla açıklanmıştır [10].

Kristensen and Hansen (1994)'in yangın etkisi veya ısı şoktan dolayı çimento hamuru ve beton örneklerinde oluşan çatlakları incelediği çalışma iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, numunelerde çatlak oluşmasının beklendiği, hesaplanan değerler ile deneysel olarak çatlakların gözle görülebildiği sıcaklık değerleri arasındaki ilişki incelenmiş, ikinci bölümde ise 0°C-90°C, 0°C-80°C, 0°C-70°C ve 0°C-50°C'ye kadar ısıtarak ultrasonik dalga hızı ölçümlerinde oluşan değişiklikler belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar ve hesaplamalara dayanarak çimento hamuru numunelerinde 30°C sıcaklıkta çatlaklar gözlemlendiğini, beton numunelerinde ise 50°C sıcaklıkta iç çatlakların oluştuğu belirtilmiştir [11].

Saad *et al.* (1996) normal portland çimentosu yerine ağırlıkça %10, %20, %30 oranlarında silis dumanı içeren betonların mekanik ve fiziksel özelliklerine yüksek sıcaklıklarda etkisini incelemiştir. Numuneler her bir inceleme için 200-600°C arası sıcaklıklarda 100°C aralıklarla üçer saat fırında bekletilmiştir. Isı yükseltme işlemi tamamlandıktan sonra numuneler deneylerin yapılacağı koşul olan oda sıcaklığına soğutulmuştur. %10 silis dumanı içeren beton numunelerin bütün sıcaklıklarda daha düşük porozite ve en yüksek basınç mukavemeti değerlerine sahip oldukları, 600°C'ye ısıtılan betonda basınç mukavemetlerinin normal betona göre %64,6 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte %20-30 arasında silis dumanı içeren betonların 600°C'ye ısıtıldığında normal portland çimentosu ile yapılan betonlara göre mukavemetlerindeki artışın sadece %28 olduğu bildirilmiştir [12].

Lin *et al.* (1996) tarafından yapılan çalışmada laboratuvar şartlarında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak soğutulan veya arazide yangın görmüş binalardan alınan örnekler üzerinde stereo mikroskop ölçümleri yapılarak ve SEM fotoğrafları kullanılarak, yüksek sıcaklıklara maruz kalmış betonların mikro yapıları incelenmiştir. Isıtma süresince çatlama ve parçalanmalar ve soğutma esnasındaki dağılımlar yangın esnasında betonda gözlenen yaygın davranışlar olarak ifade edilmiştir. Çalışmada portland çimentosu ve silis agregası kullanılarak üretilen standart silindirik numuneler 20°C, 100°C, 250°C, 400°C, 550°C, 750°C ve 900°C yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakılmıştır. SEM ve polarize ışık mikroskobu deneylerinde, ince çatlaklar hariç, 300°C sıcaklığın altında çatlak gelişimleri gözlenmediği bu sıcaklığın altında betonda bölgesel bağ çatlaklarının belirgin olduğu belirtilmiştir. 300°C-500°C arasındaki sıcaklıklarda agrega parçacıklarının bağlarında ve ara yüzeylerde çatlaklar gözlemlendiği, 500°C'nin üstünde ise çimento hamuru ile agrega parçacıkları arasında çok önemli çatlaklar oluştuğu bildirilmiştir. Yangında zarar görmüş betonların tamir edilmesinin pratikte bir mühendislik problemi olduğu, bu sebeple tamirde yeni tekniklerin geliştirilmesi için çalışmalar yapılması gerektiği vurgulanmıştır [13].

Karaca vd (1997) hafif betonun yangın dayanımını incelemek için hazırladıkları prizmatik numuneleri 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C ve 1200°C sıcaklık etkilerine bırakmışlardır. Çalışmanın neticesinde, yüksek sıcaklık etkisine bırakılan hafif betonların eğilme mukavemetlerinin tanık numunelerinkine göre, sıcaklık arttıkça azaldığı ancak bu azalmanın normal betonunkilerden daha az olduğu belirtilmiştir. 600°C'den sonraki sıcaklıklarda havada soğutulan numunelerin mukavemetlerinin son derece azaldığı, suda soğutulan numunelerin ise ayrılarak dağıldığı ve 1000°C ve daha yüksek sıcaklık etkisinden sonra havada ve suda soğutulan numunelerin basınç mukavemetlerinin son derece düşük olduğu ifade edilmiştir. Betonların yangın dayanımlarının; üretimlerinde kullanılan agrega, petrografik yapı ve mineralojik birleşimiyle yangın söndürme yönteminden bağımsız olamayacağı vurgulanmıştır [14].

Phan and Carino (1998) yüksek sıcaklık etkilerinde, yüksek mukavemetli betonların mekanik özelliklerini inceledikleri deneysel çalışmada, normal ağırlıklı, kalkerli ve silisli agregalar ve hafif agregalar kullanmışlardır. Bazı karışımlarda normal portland çimentosu, bazılarında da silis dumanı, uçucu kül, çelik lif gibi katkıları kullanılmıştır. Sıcaklıkların etkisiyle beraber yüksek mukavemetli betonların malzeme özelliklerinin normal mukavemetli betonlarınkinden farklılık gösterdiği ve bu farklılıkların 25°C ile 400°C arasında daha belirgin olduğu belirtilmiştir. Bu aralıkta yüksek mukavemetli betonlar normal mukavemetli betonlara göre daha hızlı bir mukavemet kaybı

göstermiştir. 300°C sıcaklık değeri bütün betonlar için elastisite modülünün daha yüksek hızlarda düşmeye başladığı değer olarak bildirilmiştir. Hafif agrega betonlarının normal ağırlıklı betonlara göre orijinal elastisite modüllerinin daha büyük bir oranını muhafaza ettikleri de belirtilmiştir [15].

Chan *et al.* (1999) basınç dayanımları 39 MPa, 76 MPa ve 94 MPa olan normal ve yüksek dayanımlı betonları 1200°C'ye kadar ısıtarak, bu sıcaklıklarda 1 saat süreyle bekletmiş ve oda sıcaklığına kadar soğuttuktan sonra basınç ve çekme mukavemetlerini belirlemişlerdir. Çalışmada ayrıca normal ve yüksek dayanımlı betonların gözenek yapıları da incelenmiştir. Deney sonuçlarında yüksek sıcaklıkların etkisi 20°C-400°C, 400°C-800°C ve 800°C üzeri olmak üzere üç aralıkta belirtilmiştir. İlk aralıkta normal dayanımlı betonların aksine yüksek dayanımlı betonların mukavemetlerini koruduğu, ikinci aralıkta özellikle 600°C'nin üzerinde her iki betonunda da mukavemetlerinin önemli kısmını kaybettiği vurgulanmıştır. 800°C üzerinde ise her iki betonunda mukavemetinin çok az bir kısmı kalmıştır. Normal betona benzer olarak YDB da çekme mukavemetindeki azalma basınç mukavemetine göre çok daha keskindir. Yüksek sıcaklıkların etkisiyle gözenek yapısında irileşme etkisi ortaya çıktığı ve bunun da betonun durabilitesini azalttığı ifade edilmiştir [16].

Lawson *et al.* (2000)'un çalışmasında yüksek sıcaklıklara maruz kalan yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinden önce basınç mukavemetleri 40-100 MPa arasında değişen betonların üç grubu yüksek dayanımlı, biri ise normal dayanımlı kontrol grubudur. Numuneler ısıtılmadan önce her beton grubu için fiziksel boyutlar, kütle ve boyuna titreşim frekansları ölçülmüştür. Çalışmada belirlenen 100°C, 200°C, 300°C ve 450°C sıcaklıklara 5°C/dak artış hızı ile ulaşılmıştır. Isıtma işleminden sonra numuneler fırında oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve tartılarak tekrar boyuna titreşim frekansı ölçülmüştür. Her numunenin basınç mukavemeti ve dinamik elastisite modülü belirlenmiştir. Çalışmada 240°C-280°C arasında silis dumanı içeren iki farklı grup yüksek dayanımlı betonun patlayarak parçalandığı ancak silis dumanı içermeyen diğer karışımda patlama olayına rastlanmadığı belirtilmiştir. Patlayarak parçalanma olayının doğrudan sudaki kimyasal bağların açılması anında meydana gelen iç basıncın etkisiyle olduğu ifade edilmiştir [17].

Chan *et al.* (2000) yaptıkları çalışmada 800°C ve 1100°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra kademeli ve ani olarak soğutulmuş yüksek dayanımlı ve normal betonların davranışlarını incelemişlerdir. Hedef sıcaklığa kadar ısıtılan numuneler bu sıcaklıklarda 1 saat süreyle bekletildikten sonra oda sıcaklığına kadar havada yavaş yavaş ve suda aniden olmak üzere iki farklı şekilde soğutulmuştur. YDB'ların basınç mukavemetlerinde normal betona kıyasla daha keskin bir azalma belirlenmiştir. YDB 800°C'de, yavaş yavaş ve ani soğutma için sırasıyla başlangıç mukavemetinin %26-34 ve %22-28'ini koruyabilmiştir. Bu değerler 1100°C için ise %8-12 ve %8-10'dur. Bununla beraber ani soğutmayla oluşan termal şokun betonun parçalanarak bozulmasında belirgin bir artışa sebep olmadığı bildirilmiştir [18].

Kalifa *et al.* (2000) tarafından yapılan çalışmada; kalker agregası kullanılarak üretilen C30 ve C100 betonları, patlayarak parçalanmanın görülebileceği aralık olan 450°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve numunelerin farklı yüzeylerinde basınç ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Her iki beton grubunun da benzer termal özellikler gösterdiği ve gözenek basınç eğrilerinin benzer şekilde pik değerler yaptığı belirtilmiştir. Bu pik noktalar C100'de 38 bar C30'da ise 18 bar olarak ölçülmüştür [19].

Vydra *et al.* (2001) betonun çimento jelindeki yapısal değişiklikler üzerine 25°C-910°C aralıklarında ısı yüklerinin etkisini araştırmışlardır. Bu değişimler nitrojenin fiziksel absorpsiyonu ve cıva porozimetresi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Gözeneklerin yüzeylerinin ve hacimlerinin yaklaşık 500°C'ye kadar arttığı belirtilmiştir. Daha sonraki sıcaklıklarda ise gözeneklerin yüzey ve hacimlerinin azaldığı ve dolayısıyla sıcaklık etkisiyle gözenek yapısının ilişkisinin parabolik kabul edilebileceği söylenmiştir [20].

Poon *et al.* (2001) silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren yüksek mukavemetli betonların 800°C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve durabilite performanslarını karşılaştırmışlardır. 600°C'nin altındaki sıcaklıklarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren betonların sadece çimento ile üretilen kontrol gruplarına kıyasla en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Yüksek mukavemetli betonların yüksek sıcaklıklarda normal betonlarınkine benzer bir mukavemet azalması gösterdiği ancak arta kalan mukavemetlerinin göreceli olarak çok daha fazla olduğu belirtilmiştir [21].

Jonatka and Bagel (2002), 800°C'ye kadar sıcaklıkların betonun mukavemet karakteristikleri, boşluk yapısı ve hesaplanan geçirimsizlik katsayısına etkilerini deneysel olarak incelenmişlerdir. Çalışma sonucunda 400°C'ye kadar olan sıcaklıkların, test edilen numunelerin elastisite modülü, mukavemet, ortalama boşluk çapı ve hesaplanan geçirimsizlik katsayıları üzerinde çok belirgin değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. 400°C-800°C aralığında boşluk yapısının irileşmesiyle mukavemet azalmıştır. Betonun yapısal bütünlüğünün bozulmasının ise 800°C'de gerçekleştiği belirtilmiştir [22].

Handoo *et al.* (2002) tarafından kimyasal, mineralojik ve fiziksel özellikleri bilinen normal portland çimentosu ile küp numuneler üretilerek 100°C aralıklarla 1000°C'ye kadar beşer saat süreyle ısıtılmış ve betonun hidrate fazında meydana gelen mineralojik değişiklikler incelenmiştir. Betonun fiziksel durumu ise ultrasonik ses dalgası ölçümleri ve basınç mukavemetine bağlı değerlendirmeler ile belirlenmiştir. Ultrasonik ses dalgası ölçümleri betonun 300°C üzerinde hızlıca bozulduğunu göstermiştir. Morfolojik çalışmalar ise, iyi gelişmiş kalsiyum hidroksit kristallerinin ve C-S-H jelinin 600°C üzerinde bozulduğunu ortaya koymuştur. Bir yangında sıcaklığın 500°C üzerine çıkması durumunda detaylı bir çalışma yapılarak yapısal elemanların durumlarının gözden geçirilmesi gerektiği bildirilmiştir [23].

Bingöl and Gül (2004) yaptıkları çalışmada normal agregaya yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza kullanmak yoluyla hafif betonlar üreterek 750°C'ye kadar ısıtmış ve hafif betonların yüksek sıcaklık etkilerinden sonra dayanımını normal betonunki ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Sıcaklık artışıyla beraber bütün beton gruplarının başlangıç mukavemetlerinin bir kısmını kaybettiği ancak kullanılan hafif agregaya oranının artmasıyla mukavemetlerdeki kayıp oranlarının azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıklara maruz kalma süresi de çalışmanın parametrelerinden birisi olarak belirlenmiş ancak ısıtma süresinin mukavemet kaybı üzerinde çok belirgin bir etki göstermediği, ısıtılan sıcaklığın mukavemet kayıplarında daha önemli rol oynadığı belirtilmiştir [24].

Chen and Liu (2004) yüksek dayanımlı ve lifli yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklık etkilerinden sonra arta kalan mukavemetlerini incelemişlerdir. Hazırladıkları numuneleri 20°C, 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara üçer saat süreyle maruz bırakmışlardır. Numuneler doğal yolla oda sıcaklığına soğutulmuş ve basınç mukavemeti ve çekme mukavemeti belirlenmiştir. YDB'da yüksek sıcaklıklarda patlayarak parçalanma görülmüştür. Karbon ve çelik lif kullanımının patlama zamanını geciktirdiği, polipropilen lifin ise bu olayı ortadan kaldırdığı belirtilmiştir. Lifli YDB'ların arta kalan basınç ve çekme mukavemetlerinin lifsiz YDB'larından daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yüksek erime noktalı (karbon veya çelik gibi) liflerin düşük erime noktalı (polipropilen gibi) lifler ile karıştırılarak kullanılmasının YDB'ların yüksek sıcaklık etkilerinden sonraki özellikleri üzerinde belirgin iyileştirici katkı sağladığı vurgulanmıştır [25].

Li *et al.* (2004) C40, C60 ve C70 betonlarının yüksek sıcaklık etkilerinden sonra basınç, çekme ve eğilme mukavemetlerini incelemiştir. Üretilen numuneler 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıklara kadar ısıtılmış, hedef sıcaklığa ulaşıldığında fırın kapatılarak numuneler oda sıcaklığına soğutulmuştur. Bahsedilen sıcaklıklarda C70 betonu başlangıç basınç mukavemetinin sırasıyla %82,3, %62,3, %58,1 ve %27,3'ünü koruyabilmiştir. Numune boyutu arttıkça mukavemetteki kaybın daha az olduğu da belirtilmiştir. Ayrıca 800°C üzerinde betonun su içeriğinin basınç mukavemeti üzerinde çok etkisi olmadığı ifade edilmiştir [26].

Savva *et al.* (2005) farklı oranlarda puzolanik malzeme içeren betonların yüksek sıcaklık etkilerinden sonra mekanik özelliklerini tahribatsız deney metotları ile belirlemişlerdir. Kireç taşı ve silis agregaları kullanılarak üretilen numuneler 100,300,600 ve 750°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Çalışma sonuçları betonun arta kalan özelliklerinin agregaya ve binder türü ile çok ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. 300°C'ye kadar olan sıcaklıklarda puzolanik malzeme kullanılarak üretilen betonların sadece portland çimentosu ile üretilenlere oranla daha iyi sonuç verdiğini ancak sonraki sıcaklıklarda bu betonların daha hassas olduğu belirtilmiştir. 100°C-300°C arasında bütün karışımlarda başlangıç mukavemetine göre bir miktar artış olduğu ve bu artışın silis agregalı betonlarda daha fazla olduğu, 300°C-750°C aralığının ise betonda mukavemet kaybı için kritik değerler olduğu bildirilmiştir. Her sıcaklıkta elastisite modülünde düşüş görülmüş ve bu düşüşün kireçtaşı agregaları ile üretilen betonlarda daha fazla olduğu ifade edilmiştir [27].

Sakr and El-Hakim (2005), yüksek sıcaklıkların (250,500,750 ve 950°C) ve bu sıcaklıklara maruz bırakılma sürelerinin (1,2 ve 3 saat) ağır betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. İmenit ile üretilen betonlarının en yüksek yoğunluk, elastisite modülü ve en düşük absorpsiyon yüzdesine sahip olduğu ifade edilmiştir.

Ayrıca çakıl ve barit betonuna kıyasla, ilmenit betonlarında daha fazla basınç, çekme, eğilme ve bağ mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Bütün beton türleri için ısıtma süresinin mekanik özellikler ile ters orantılı olarak ilişkisi belirlenmiştir. Suda soğutmanın beton özelliklerinde büyük hasara sebebiyet vermesinden dolayı köpük ile veya havada soğutmanın daha iyi bir teknik olduğu vurgulanmıştır [28].

Hüsem (2006) tarafından normal ve yüksek dayanımlı mikro betonların yüksek sıcaklıklarda basınç ve eğilme mukavemeti değişimleri incelenmiştir. Mikro beton numuneleri 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklık etkilerine bir saat süreyle maruz bırakılmışlardır. Daha sonra numunelerin bir kısmı havada bir kısmı ise suda soğutulmuştur. Prizmalar üzerinde eğilme deneyi yapılmış, basınç deneyi ise eğilmede kırılan parçalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda sıcaklığın artmasıyla eğilme ve basınç mukavemetlerinin azaldığı, bu azalmanın suda soğutulan numunelerde daha fazla olduğu belirtilmiştir. Normal betonun dayanımı düzenli olarak azalırken, YDB'un basınç mukavemeti 200-400°C arasında havada soğutulan numunelerde %13, suda soğutulanlarda %5 oranında artmıştır. Ayrıca YDB'da 400°C-500°C arasında patlayarak parçalanma görülürken normal betonda bu etkiye rastlanmadığı bildirilmiştir [29].

Chang *et al.* (2006) tarafından betonun 100°C ile 800°C arası sıcaklıklarda ısıtılmasından sonra arta kalan gerilme-deformasyon ilişkisinin belirlenmesi için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Betonların başlangıç mukavemetleri 27 MPa ve 40 MPa olarak belirlenmiştir. Bütün numuneler silis agregası ile üretilmiştir. Çalışma sonucunda, yüksek sıcaklıkların etkisiyle en fazla kayıpların sırasıyla elastisite modülü, çekme mukavemeti ve basınç mukavemetinde görüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca betonun başlangıç mukavemetinin, arta kalan basınç mukavemeti, elastisite modülü ve çekme mukavemeti oranı üzerinde çok belirgin bir etkisi olmadığı ifade edilmiştir [30].

Sancak ve Şimşek (2006) bims agregası ile üretilen taşıyıcı hafif beton (HB) ve normal yoğunluklu agregası ile üretilen normal betonların (NB) karşılaştırmalı olarak 1000°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki ağırlık kaybı ve kalan basınç dayanımlarını araştırmışlardır. Çalışmada silis dumanı (SD), mineral katkı olarak %0, %5 ve %10 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. HB'ların birim ağırlıkları, NB'lara göre %23 daha düşüktür. Çalışma sonucunda 20°C, 100°C ve 400°C sıcaklıklara maruz bırakıldıklarında, NB'ların HB'lara kıyasla daha dayanıklı oldukları görülmüştür. 800°C ve üstündeki sıcaklıklarda, SD kullanım oranına bağlı olarak basınç dayanımı kaybının arttığı belirtilmiştir. Hafif betonlardaki ağırlık kaybı değerlerinin; 400°C-800°C'lerde normal betonlardan fazla iken, 1000°C'de düşük kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca hafif ve normal betonların basınç dayanımlarının 100°C'ye kadar önemli oranda azalma göstermediği, hatta bir miktar arttığı bildirilmiştir [31].

Terro (2006) yaptığı çalışmada ince ve iri agregası yerine atık cam kullanımının yüksek sıcaklıklarda betonun özelliklerine etkisini araştırmıştır. İnce agregası, iri agregası ve her ikisi yerine %0-100 arası oranlarda atık cam kullanılmıştır. 700°C'ye kadar sıcaklıklarda atık cam kullanımının beton mukavemetini orijinal değerine kıyasla %20 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Genel olarak, %10 oranında atık cam kullanımının daha büyük miktarlardaki kullanımlara göre normal ve yüksek sıcaklıklarda daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Ayrıca sadece ince agregası yerine cam kullanılan numunelerde, iri agregası yerine ve ince-iri agregasının her ikisi yerine cam kullanılan numunelerden, normal ve yüksek sıcaklıklarda, daha yüksek basınç mukavemeti değerleri elde edilmiştir [32].

Lau and Anson (2006) yaptıkları çalışmada %1 oranında çelik lif içeren betonların 105°C-1200°C arasında değişen yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra basınç, eğilme mukavemetleri, elastisite modülleri ve porozitelerini incelemişlerdir. Çalışmada 10 cm boyutlu küp ve 10x20 cm boyutlu silindir numuneler kullanılmıştır. 400°C'nin altındaki sıcaklıklarda basınç mukavemeti kaybının çok az olduğu görülmüştür. Bütün beton grupları için 400°C sıcaklıktan itibaren basınç mukavemetlerinde büyük azalmalar başlamıştır. 600°C 'den itibaren YDB, normal betona göre daha fazla mukavemet kaybı göstermiştir. Lif kullanımının ısıtılmış betonda 1200°C'ye kadar olumsuz bir etkisi olmadığı aksine betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır [33].

Arıöz (2007) normal portland çimentosu, kırılmış kalker ve dere agregaları ile üretilen farklı beton karışımların 200°C-1200°C arası yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 7x7x7 cm boyutlu küp numuneler 20°C/dakika artış hızıyla hedef sıcaklıklara kadar ısıtılmış, bu sıcaklıklarda 2 saat süreyle bekletildikten sonra oda sıcaklığına soğutulmuş ağırlık kayıpları ve basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Sıcaklığın 600°C'ye ulaşmasıyla yüzey çatlaklarının görünür hale geldiği, 800°C'de daha da arttığı, 1000°C'de ise

iyice arttığı görülmüştür. 1200<sup>0</sup>C’de betonlar tamamen bozulmuştur. Betonların ağırlıklarının, sıcaklığın artmasıyla 800<sup>0</sup>C’ye kadar kademeli olarak azaldığı bu sıcaklıktan itibaren ise çok keskin düşüşler gösterdiği belirtilmiştir. Sıcaklığın etkisinin dere agregası ile üretilen betonlarda daha belirgin olduğu bunun sebebinin ise silis içeriği olabileceği belirtilmiştir [34].

Aydın and Baradan (2007) tarafından pomza ve uçucu kül içeren çimento harçlarının yüksek sıcaklık etkilerinden sonra mekanik özellikleri incelenmiştir. Farklı miktarlarda uçucu kül içeren dört farklı karışım 300<sup>0</sup>C, 600<sup>0</sup>C ve 900<sup>0</sup>C sıcaklıklara üç saat süreyle maruz bırakılmıştır. Pomza ile üretilen harçların 600<sup>0</sup>C’ye kadar yüksek sıcaklıklara karşı iyi dayanım sergilediği ve bu sıcaklıkta basınç ve eğilme mukavemetlerindeki kayıpların sırasıyla %4 ve %32 olduğu belirtilmiştir. Ancak 900<sup>0</sup>C’de mukavemette çok keskin düşüşler görülmüştür. Soğutma tekniğinin mukavemet kaybında etkili olduğu ve suda soğutulan numunelerin havada soğutulanlara kıyasla daha fazla mukavemet kaybettiği bildirilmiştir. Yüksek sıcaklıklara karşı en iyi sonuç %60 oranında uçucu kül kullanılan numunelerden elde edilmiştir [35].

Peng *et al.* (2007) 200<sup>0</sup>C-800<sup>0</sup>C arasında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış lifli betonların soğutulması esnasında termal şokun betonların mekanik özelliklerine etkisi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Doğal soğutma, 5 ile 60 dakika arasında değişen sürelerde su püskürtme ve su içinde tutma gibi farklı soğutma şekilleri uygulanmıştır. Su içinde tutma ve 30 dakikadan fazla sürelerde su püskürtme gibi hızlı soğutma tekniklerinin termal şoka sebep olduğu belirlenmiştir. Hızlı soğutma yöntemlerinin daha fazla hasara sebebiyet verdiği ve betonun basınç mukavemeti, çekme mukavemeti ve kırılma enerjisi özelliklerinde, doğal soğutmaya kıyasla daha fazla kayıplara yol açtığı belirtilmiştir. 30 dakika ve üzerinde su püskürtmenin suda bekletme ile eşdeğer hasara yol açtığı, ayrıca çelik ve polipropilen lif kullanımının hem mukavemet hem de kırılma enerjisi özelliklerine olumlu etki yaptığı açıklanmıştır [36].

Aydın *et al.* (2008) tarafından normal dayanımlı (NDB), su kürlü ve otoklav kürlü yüksek dayanımlı (YDB) harçlar üzerinde 900<sup>0</sup>C’ye kadar yüksek sıcaklıkların etkisi araştırılmıştır. Basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti, elastisite modülü ve ağırlık kaybı gibi mekanik özellikler belirlenmiştir. Yüksek oranda puzolanik malzeme kullanımı ile 28 günlük su küründe yüksek mekanik özellikler elde edildiği, ayrıca otoklav kür ile daha kısa sürede mekanik özelliklerin iyileştirildiği belirtilmiştir. 300<sup>0</sup>C sıcaklıkta bütün betonlarda bir mukavemet artışı görüldüğü ve 900<sup>0</sup>C’de hem su kürü hem de otoklav kür için NDB’ların YDB’lara kıyasla daha fazla mukavemet kaybettiği söylenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıkların basınç dayanımına oranla, eğilme dayanımı ve elastisite modülü üzerinde daha belirgin bozucu etki gösterdiği belirtilmiştir. Öte yandan çelik liflerin yüksek sıcaklıklarda betonun dayanımına olumlu bir katkısı olmadığı ifade edilmiştir [37].

### 2.1.1. Değerlendirme

Konu ile ilgili daha önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yüksek sıcaklık etkilerinden sonra betonların mekanik özelliklerinde çok önemli değişiklikler olduğu belirlenmiştir. Beton yanmaz bir malzeme olup, yangına karşı diğer yapı malzemelerine göre daha dayanıklıdır. Ancak sıcaklık etkileriyle betonun basınç, çekme ve eğilme mukavemetlerinde azalmalar olur. Bunun yanında 200<sup>0</sup>C sıcaklıklara kadar beton özelliklerinde bozulma olmayabileceği hatta bir miktar mukavemet artışı olabileceği de farklı kaynaklarda belirtilmiştir. Bu mukavemet artışları sıcaklık etkisiyle oluşan enerjinin hidrate olmamış çimento tanelerinin hidratasyonunu tamamlamasına sebep olması ile açıklanmaktadır. Mukavemet kayıpları ise betonda oluşan mikro ve makro düzeydeki çatlaklar, agregadaki hacim genleşmesi ve çimento hamurundaki hidrate kalsiyum silikat (C-S-H) bağlarının bozulması gibi farklı sebeplerle açıklanabilir. Sıcaklık etkilerinde yüksek mukavemetli betonlar daha farklı davranış sergilerken, bu betonlarda en önemli problem patlayarak parçalanma olayı olarak gösterilmiştir. Lif kullanımının bu problemin çözümünde etkili olabileceği, ayrıca hafif betonların diğer betonlara kıyasla daha iyi bir yangın performansı sergilediği de teknik literatür ışığında ulaşılan sonuçlardır. Yüksek sıcaklık etkilerinden sonra soğutma şekillerinin de beton özelliklerine etkisi olduğu ve suda soğutma sonucunda numunenin iç sıcaklığındaki ani değişimden dolayı gelişen termal şokun betonda daha fazla hasara sebep olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıklardan sonra beton davranışının belirlenmesinde numune özellikleri ve deney şartlarının önemli parametreler olduğu, bu sebeple elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar olabileceği unutulmamalıdır. Bu sebeple verilen sonuçlar sadece belirtilen malzemeler ve deney şartları için geçerlidir.

### 2.2. Beton-donatı aderansı konusunda bazı çalışmalar



Larrard *et al.* (1993) tarafından basınç mukavemeti 95 MPa olan yüksek performanslı beton ile donatı çubukları arasındaki bağ kuvveti incelenmiştir. Çalışmada 10 mm, 16 mm ve 25 mm çaplarında nervürlü çubuklar ile 25 mm çapında düz çubuklar kullanılmıştır. Kontrol grubu olarak 42 MPa dayanımlı betonlar seçilmiştir. Deney sonuçları yüksek performanslı beton kullanımının bağ mukavemetini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Bu artışlar 10 mm çaplı donatılar için %80, 25 mm çaplı donatılar için ise %30 dolayında belirlenmiştir. Bağ kuvvetindeki bu artışın betonun çekme mukavemetinin artmasından dolayı olabileceği ifade edilmiştir [38].

Benmokrane *et al.* (1996) yaptıkları çalışmada çimento ile yerleştirilmiş GFRP ankraj çubuklarının yük taşıma kapasitelerini ve bağ kuvvetlerini çelik çubuklar ile karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Dayanımları 83 MPa olan beton bloklar içerisine bağ uzunlukları çaplarının 2,5 ve 5 katı (6,35 cm, 12,7 cm) olacak şekilde çubuklar yerleştirilerek pull-out deneyleri yapılmıştır. GFRP çubuklarda oluşan yüzey deformasyonunun bağ mukavemetinde ve yük-sıyrılma davranışında önemli rol oynadığı ve GFRP çubukların bağ kuvvetlerinin çelik çubuklarınkinden daha düşük olduğu belirtilmiştir. GFRP çubukların bağ uzunluklarının çubuk türüne göre farklılık gösterdiği ve çelik çubuklara nazaran kritik bağ uzunluklarının daha uzun olduğu bildirilmiştir. Ayrıca bu çubukların yük-sıyrılma davranışının çelik çubuklarınki ile benzer olduğu ifade edilmiştir [39].

Fu and Chung (1997)'a göre, su/çimento oranının artmasıyla betonun basınç ve çekme mukavemetinin azalması, rötre miktarının artması gibi bilinen nedenlerden dolayı, pratikte bu oranın kabul edilebilir sınırlar içerisinde en düşük seviyede tutulmak istenir. Donatı ile beton arasındaki bağ kuvvetinin basınç mukavemetinin artmasıyla arttığı literatürde belirtilmiş, dolayısıyla s/ç oranının artmasıyla bağ kuvvetinin azalacağı düşünülmüştür. Ancak pull-out deneyleri ve elektro mekanik test yöntemi kullanılan bu çalışmada s/ç oranının artmasının bağ kuvvetini artırdığı görülmüştür. Ayrıca rölatif nemliliğin artmasını ve donatının kuru olarak değil de ıslatılarak kullanılmasının da bağ kuvvetini artırdığı belirtilmiştir [40].

Shannag *et al.* (1997)'un yaptığı çimento esaslı harçlardan çelik liflerin pull-out testi ile çekilmesinin etraflı olarak irdelendiği deneysel çalışmada; normal çimento hamuru, yüksek dayanımlı çimento harcı, lifin gömme boyu ve lifin hacim yüzdesi parametreleri incelenmiştir. Harçların basınç dayanımları 40 MPa ve 150 MPa, liflerin gömme boyları 6 mm, 12 mm ve 18 mm, liflerin hacimce oranı ise %3 ve %6 olarak seçilmiştir. Harç mikro numunelerinin ortasına lifler belirtilen uzunluklarda gömülmüş ve pull-out deneyleri yapılmıştır. Gömme boyunun artmasının maksimum pull-out yükünü 2-3 kat kadar, lif hacmi oranının artmasının da maksimum pull-out yükünü %20 kadar artırdığı sonuçları bildirilmiştir. Ayrıca yüksek dayanımlı harcın da geleneksel çimento hamuruna kıyasla bağ kuvvetini belirgin şekilde artırdığı bildirilmiştir [41].

Ünal (1998), çelik donatı ile beton arasındaki aderansın agrega tane büyüklüğü ve beton sınıfına bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemiştir. Çalışmada 12 mm çapında nervürlü çelik çubuklar, numunelerin orta eksenlerine gömme boyu 10 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Uygulanan pull-out deneyleri neticesinde kullanılan agrega tane çapı büyüdükçe pull-out kuvvetinin de büyüdüğü, benzer şekilde beton basınç mukavemeti arttıkça pull-out kuvvetinin de arttığı belirlenmiştir. Ayrıca aderans dayanımı arttıkça çelik çubuktaki sıyrılmanın da azaldığı belirtilmiştir [42].

Karaduman (1998) yüksek mukavemetli beton elemanlarda nervürlü donatı tipi için kenetlenme özelliklerini incelemek ve gerekli kenetlenme boylarını saptayabilmek için yaptığı çalışmada; donatı çapını, beton basınç dayanımını ve beton örtü kalınlığını parametre olarak dikkate almıştır. Çalışma sonucunda donatı çapı arttıkça aderans kuvvetinin azaldığı belirtilmiş dolayısıyla donatı çapları arttıkça ankraj uzunluğu ve beton örtüsü kalınlığının da artırılması gerektiği ifade edilmiştir. Beton mukavemetinin artmasının bağ mukavemetini de artırdığı, ayrıca beton örtüsü kalınlığının artmasının da bağ mukavemetini artırdığı ancak bu etkinin belirli bir değerden sonra ortadan kalktığı belirtilmiştir [43].

Tighiouart *et al.* (1998) tarafından, FRP çubukların bağ kuvvetleri çelik çubuklar ile karşılaştırmalı olarak incelenmiş; 12,7 mm, 15,9 mm, 19,1 mm ve 25,4 mm çaplarında FRP ve çelik çubuklar çaplarının 6 katı, 10 katı ve 16 katı boylarda betona gömülerek çekme deneyleri yapılmıştır. Deneyler neticesinde GFRP çubukların bağ mukavemetlerinin çelik çubuklarınkinden daha düşük olduğu ve bu çubuklarda bağ kuvvetini etkileyen parametrelerin yapışma ve sürtünme olduğu belirtilmiş, donatı çapının artması ile maksimum bağ kuvvetinin azaldığı bildirilmiştir [44].

Chiang and Tang (1999) tarafından yapılan farklı çimento/kum oranları için ses dalgası hızı ile bağ gerilmeleri arasındaki ilişkinin incelendiği çalışmanın bir bölümü olan pull-out deneyleri için 19 mm çapında çelik çubuklar beton numunelerinin içine gömülmüştür. Pull-out yükünün artmasıyla ses dalgası hızının azaldığı belirlenmiştir. Bu durumun pull-out yükünün yada numunenin bağ kuvvetinin maksimuma yaklaştığı anda çok daha belirgin olduğu belirtilmiştir. Yük ve ses dalgası hızı yöntemi kullanılarak çelik donatılı beton elemanların bağ durumlarının kolaylıkla belirlenebileceği ifade edilmiştir [45].

Çınar (2000), aderansın nedenleri, mekanizması ve aderans davranışının belirlenmesinde kullanılan deney metotlarına değinmiş, hafif beton ve normal beton numunelerini çekip çıkarma deneyine tabi tutarak normal beton için verilen donatı kenetlenme boyunun hafif beton için de geçerli olup olmadığı araştırmıştır. Tüm deneylerde donatı ve beton sınıfı sabit tutulmuştur. Çalışmada aderansın bir çok etkiye bağlı olarak değiştiği, ancak bu etkilerden en önemlilerinin donatı ve beton özellikleri ile betonarme kesit ve elmanın türü olduğu ifade edilmiştir. Kenetlenme boyu için TS 500'de verilen değer hafif beton için yetersiz olduğu belirtilmiş, dolayısıyla hafif betonda %20 artırılarak kullanılması önerilmiştir [46].

Çolak (2001), çelik ankraj çubukların betona yapışması üzerinde, epoksi yapıştırıcının türü, gömme boyu ve bağ kalınlığının etkisini incelemiştir. Çalışma için 35-45 MPa arası mukavemete sahip betonlar üretilmiş ve çelik ankraj çubukları 5 cm, 7,5 cm ve 10 cm derinliklerde betona gömülmüştür. Çubukların yük taşıma kapasitelerinin gömme boyu ile doğrusal olarak artmadığı tespit edilmiş dolayısı ile 10 cm den fazla bağ uzunluklarının kullanılmasının bir avantaj sağlamayacağı belirtilmiştir. Pull-out deneylerinde iki temel kırılma şekli ile karşılaşılmıştır. Bunlardan ilkinde kırılma epoksi ile çelik arasında gerçekleşirken, yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla epoksi-çelik ara yüzeyine ilave olarak betonda da kırılma oluştuğu belirtilmiştir [47].

Yerlici ve Özturan (2002)'in yaptıkları çalışmada; donatı çapı, beton basınç dayanımı, beton örtü kalınlığı ve gövde sarma donatısı miktarının, yüksek dayanımlı betonlardaki aderans dayanımı ve gerekli minimum kenetlenme boyu üstündeki etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Çalışmanın kapsamı içinde, beton basınç dayanımları, donatı çapları, beton örtü kalınlıkları değişen tek donatılı elemanlar ile, gövde sarma donatısı bulunmayan ve değişik miktarda gövde donatısına sahip, çift donatılı elemanlar üstünde, dışmerkezli, tek yüklemeli çekip-çıkarma aderans deneyi yapılmıştır. Sonuç olarak beton basınç dayanımı, beton örtü kalınlığı ve gövde donatısı miktarındaki artışların aderans dayanımını arttırdığı, donatı çapındaki artışın ise aderans dayanımını azalttığı belirtilmiştir [48].

Chang *et al.* (2002) tarafından epoksi ile kaplanmış donatıların bağ kuvvetlerini iyileştirmek için tasarlanan çalışmada farklı boyutlardaki dere kumu ve ağırlıkça kum/epoksi oranları incelenmiştir. Yaklaşık 23 MPa basınç mukavemetine sahip numunelerin merkezine 12 mm çapında çelik donatılar 4 cm derinlikte gömülmüştür. Pull-out deneyleri neticesinde sıradan donatıların bağ mukavemetleri 7,43 MPa, epoksi ile kaplananları ise 6,52 MPa olarak tespit edilmiş ve epoksi kaplamanın bağ mukavemetinde %12 oranında azalmaya sebep olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, bağ kuvvetinin kullanılan kumun tane büyüklüğü ile kum ve epoksinin miktarına bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir [49].

Lee *et al.* (2002) tarafından donatı ile beton arasındaki bağ özelliklerine korozyonun etkisini incelemek için, hızlandırılmış elektrik korozyon metodu kullanılarak paslandırılmış donatılar betonun içine gömülerek pull-out deneyleri yapılmıştır. Deneylerde su/çimento oranı 0,45, 0,55 ve 0,65 olan betonlar kullanılmış ve beton örtü kalınlıkları donatı çapının 1,5, 2,5 ve 3,5 katı olacak şekilde seçilmiştir. Beton mukavemetinin artmasıyla beraber bağ kuvvetinin de arttığı ve basınç mukavemeti ile bağ mukavemeti arasında çok yüksek bir korelasyon olduğu ifade edilmiştir. Paslandırılmış numunelerin pull-out deneyleri neticesinde ise, pas oranının artmasıyla beraber bağ kuvvetinin ve bağ rijitliğinin azaldığı belirtilmiştir [50].

De Lorenzis *et al.* (2002)'in FRP ile beton arasındaki bağın mekanizmasının belirlenmesi ve bağ kuvveti üzerinde etkili parametrelerin analiz edilmesi için yaptıkları çalışmada; FRP çubuğun türü, yivleri dolduran malzemenin özellikleri, bağ uzunluğu ve yiv boyutu gibi değişkenler incelenmiştir. Epoksi ile tutturulan FRP çubuklu numunelerin tümünde kırılmanın epoksi-beton ara yüzeyinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Bağ uzunluğu ve yiv boyutunun artmasıyla epoksi-beton ara yüzeyindeki ortalama bağ kuvvetinin azaldığı belirtilmiştir. Çimento hamuru kullanılması durumunda ise epoksi kullanılan numunelere göre daha düşük yük değerleri elde edilmiştir [51].

Ichinos *et al.* (2004) tarafından beton ile donatı arasındaki bağ kuvvetine boyut etkisinin araştırıldığı çalışmada; çubuk çapı, nervür şekli, örtü kalınlığı gibi parametreler incelenmiştir. Donatı çapları 17,4 mm, 34,8 mm ve 52,2 mm olarak seçilmiş beton örtü kalınlıkları ise donatı çapının 1,22 katı ve 2,44 katı, bağ uzunluğu ise donatı çapının 4,6 katı olarak alınmıştır. Deneylerden elde edilen veriler neticesinde bağ kuvveti üzerinde çok belirgin bir boyut etkisi gözlemlenmiştir [52].

Chan and Chu (2004) tarafından reaktif pudra betonların harcı içindeki çelik liflerin bağ kuvveti, çekip-çıkarma enerjisi gibi bağ karakteristiklerine silis dumanının etkisi incelenmiştir. Karışımlarda %0-40 arasında değişen oranlarda silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanının lif-matris ara yüzey özelliklerini, özellikle de çekip-çıkarma enerjisini etkili şekilde geliştirdiği görülmüştür. Ayrıca bağ karakteristiklerini iyileştirmede en optimum silis dumanı

oranının %20-30 arasında olduğu belirtilmiştir. Optimum oranda kullanımda çekip-çıkarma enerjisinin yaklaşık %100, bağ kuvvetinin ise %14 arttığı ifade edilmiştir [53].

Kankam (2004), az gelişmiş ülkelerde hala kullanılmakta olan, hurda demirlerin çekilmesi ile elde edilmiş donatı çubuklarının bağ kuvvetlerini giriş ve pull-out deneyleri yaparak incelemiştir. Çalışmada 12 mm ve 16 mm çapında çubuklar kullanılmıştır. Farklı fabrikalardan temin edilen çubukların bağ kuvvetlerinin; 12 mm çaplı donatılar için  $7,2 \text{ N/mm}^2$ ,  $8,0 \text{ N/mm}^2$  ve  $9,7 \text{ N/mm}^2$  ve 16 mm çaplı donatılar için ise  $7,0 \text{ N/mm}^2$ ,  $7,2 \text{ N/mm}^2$  ve  $8,6 \text{ N/mm}^2$  olduğu belirtilmiştir. Ayrıca donatıların çok gevrek olduğu, bundan dolayı üretim aşamasında dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır [54].

Söylev (2004) taze betonun terleme, çökme ve ayrışmasına bağlı olarak ortaya çıkan çelik-beton aderans kusurlarını incelemiştir. Normal beton, yüksek mukavemetli beton, kendiliğinden yerleşen beton gibi farklı karışımlar test edilmiştir. Aderans kusurları pull-out testi ile ölçülen ortalama aderans gerilmesi ve donatı altındaki kusur uzunluğu video-mikroskopla tespit edilmiştir. Kullanılan donatı 10 mm çaplı, nervüzsüz çeliktir. Bu çalışma ile daha önce bazı betonarme yönetmeliklerinde dikkate alınan, donatı kusurlarının varlığı doğrulanmıştır [55].

Gallego (2004) yaptığı çalışmada beton ile çelik arasındaki bağı, siyah çelik ve galvanizli çelik olmak üzere iki farklı tür için karşılaştırmalı olarak çekme deneyleri neticesinde sunmuştur.  $20 \times 20 \times 20$  cm.lik küp numuneler kullanılmış ve bunların ortasına çapı 12mm, bağ uzunluğu 5 cm olacak şekilde çelikler gömülmüştür. 7 gün, 14 gün, 21 gün, 28 gün ve 90 günlük olmak üzere farklı beton yaşlarında bağ kuvvetleri araştırılmıştır. Çalışma sonuçları siyah çelik ile daha fazla bağ kuvveti elde edildiği için siyah çeliğin galvanizli çeliğe oranla kullanımının daha uygun olduğunu ve beton yaşının artmasıyla bağ kuvvetinin de arttığı göstermiştir [56].

Cheng *et al.* (2005) tarafından yapılan, çinko ile kaplanmış donatının korozyon dayanımının ve kaplamanın beton ile çelik donatı arasındaki bağ kuvvetine etkisinin incelendiği çalışmada numuneler %3,5 NaCl çözeltisini etkisine maruz bırakılmıştır. Basınç dayanımları 32 MPa olan betonların merkezine 12,7 mm çapındaki donatılar 10 cm bağ uzunluğu olacak şekilde gömülmüştür. Korozyon testinden önce, çinko ile kaplanmış çubukların bağ kuvvetlerinin kaplanmamış olanlardan %5-10 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Korozyon oranının artmasıyla donatı-beton ara yüzeyindeki bağ kuvvetinin azaldığı belirtilmiştir. 14 günlük hızlandırılmış korozyon işleminden sonra, bağ kuvvetindeki azalma oranının kaplanmamış donatıda çinko kaplanmış donatıya göre daha fazla olduğu bildirilmiştir [57].

Banholzer *et al.* (2006) bağ kuvveti-kayma ilişkisi vasıtasıyla bağ karakteristiklerini belirlemek için nümerik bir çözüm sunarak çekme deneylerinden elde edilen veriler ile doğrulamışlardır. Bu deneysel çalışmada 0,3-2,5 mm arası çaplardaki lifler 10-40 mm arası boylarda betona gömülerek çekme deneyleri yapılmıştır. Bağ kuvveti-kayma ilişkisinin çap ve gömme boyu gibi geometrik özelliklere bağlı olmadığı belirtilmiştir [58].

Jendele and Cervenka (2006) tarafından, donatı çubukları ile beton arasındaki bağı belirlemek için nümerik bir model sunulmuştur. Model donatı çubuğunun tek boyutlu geometrisine dayanır ve ara yüzey özelliklerini hesaba katmaktadır. Model, laboratuarda yapılan pull-out ve giriş deneylerinden elde edilen sonuçlar ile doğrulanmış ve betonarme elemanların gerçek davranışının belirlenmesinde faydalı olduğu belirtilmiştir [59].

Tanyıldızı ve Yazıcıoğlu (2006) mineral katkıların betonarme demiri ve beton arasındaki aderans dayanımına etkisini araştırmışlardır. Mineral katkılar çimentoya ağırlıkça, %15 uçucu kül ve %10 silis dumanı olarak katılmıştır. 14 mm çapındaki düz ve nervürlü demirler beton içerisinde 15 cm kalacak şekilde gömülmüştür. Numunelerin 3 gün, 7 gün, 14 gün ve 28 gün sonunda aderans ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Çalışmanın sonuçlarına göre silis dumanı katkılı betonların basınç ve aderans dayanımlarının her yaşta daha yüksek olduğu belirtilmiştir. %15 uçucu kül katkılı betonların ise kontrol betonuna göre 3 gün sonunda daha düşük dayanım gösterirken; 7 gün, 14 gün ve 28 gün sonunda daha yüksek dayanım gösterdiği bildirilmiştir. Düz demirlerin aderans dayanımları nervürlü demirlere göre her yaşta daha düşük olarak belirlenmiştir [60].

Teo *et al.* (2007) tarafından iri agrega olarak OPS (oil palm shell) kullanılan hafif betonların yapısal bağ özellikleri pull-out deneyleri kullanılarak diğer hafif agregalı betonlarınkiler ile kıyaslanmıştır. 10 mm, 12 mm ve 16mm çaplarındaki donatılar, her numunenin ortasına bir tek donatı olacak şekilde, 15 cm boyunda gömülmüştür. Sonuçlar OPS hafif betonlarının bağ özelliklerinin diğer hafif betonlarınkine benzer olduğunu ayrıca deneysel olarak elde edilen bağ kuvvetlerinin hesaplanan bağ kuvvetlerinden çok daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Durabilite

açısından ise OPS betonunun kür şartlarından çok etkilendiği ve suda kür edilen betonların daha iyi durabilite performansı gösterdiği belirtilmiştir [61].

Lee *et al.* (2007) tarafından yapılan çalışmada reaktif pudra betonunun bağ durabilitesi, 1000 donma-çözülme çevrimi yapılarak normal betonları ile kıyaslanmıştır. Çalışmada referans olarak 30 MPa dayanımlı normal beton ve yüksek dayanımlı çimento esaslı onarım harcı kullanılmıştır. Pull-out deneyleri için silindir betonların tam merkezine 3,5 cm bağ uzunluğunda donatılar epoksi ile yerleştirilmiştir. Deney sonuçları reaktif pudra betonunun sadece çelik ile bağ kuvvetini değil aynı zamanda bağ durabilitesini de artırdığını göstermiştir. Reaktif pudra betonunun bağ kuvveti ve durabilitesinin referans betonlarına kıyasla daha fazla olduğu vurgulanmıştır [62].

### 2.2.1. Değerlendirme

Teknik literatürdeki mevcut çalışmalar değerlendirildiğinde; aderansın çok karmaşık bir mekanizması olduğu, aderans kuvvetlerinin belirlenmesinde çok farklı deney metotları kullanıldığı ancak bunların hiç birisinin aderans davranışını tam olarak ortaya koymadığı vurgulanmıştır. Bu deneyler içerisinde en yaygın olarak kullanılanı çekip-çıkarma deneyi, kenetlenme özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi için uygun ve diğerlerine göre daha kolay bir yöntemdir.

Bununla birlikte aderans kuvvetlerinin beton ve donatı özelliklerine bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir. Betonun basınç mukavemetinin artmasının aderans kuvvetlerinde de artışa sebep olduğu belirtilmektedir. Donatının gömme boyunun artması donatı kenetlenme kuvvetlerini artırırken, donatı çapındaki artış sonucu aderans kuvvetlerinin azaldığı bildirilmiştir. Donatının korozyona uğramış olması durumunda da aderans kuvvetlerinde azalmalar belirtilmiştir. Ayrıca silis dumanı ve uçucu kül gibi katkı maddelerinin belirli bir orana (genellikle %10-%20 arası) kadar kullanılmasının da aderans kuvvetleri üzerinde olumlu etki yaptığını dikkat çekilmiştir.

### 2.3. Yüksek sıcaklıkların aderansa etkisi konusunda bazı çalışmalar

Binalarda yangın dayanımı ve arta kalan yapısal performansın tam olarak anlaşılabilmesi için yüksek sıcaklıkların beton-donatı arasındaki bağ kuvvetine etkisinin bilinmesi önemlidir. Morley and Royles (1980) yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklıklar etkisinde ve sonrasında betonun ve çeliğin mukavemetlerini özetlemişlerdir. Daha sonra ortam sıcaklığında bağ kuvvetinin tespiti için kullanılan metotlar sıralanmıştır. Yüksek sıcaklıklarda bağ kuvveti ile ilgili çalışmalar değerlendirilmiş ve yapısal performansa uygunluğu ile ilgili öneriler yapılmıştır [63].

Diederichs and Schneider (1981) yüksek sıcaklıklarda çelik ile beton arasındaki aderansı incelemiştir. Yangın etkisinde betonarme binaların davranışını belirlemede en önemli olayın aderans olmasına rağmen bu problem hakkında yeterli bilgi olmadığını belirtmişlerdir. Kısa gömme boylarında çelik çubuklar silindir numunelere yerleştirilerek çekip-çıkarma deneyleri yapılmıştır. Nervürlü ve düz çubukların betonla yaptığı bağ kuvvetlerinde çok büyük farklılıklar olduğu ifade edilmiştir [64].

Eş zamanlı olarak yüksek sıcaklık ve dış yüklerin etkilerine maruz bırakılan donatılı beton elemanların davranışını tahmin etmek için bir model geliştirmek amacıyla, son yıllarda Japonya'da bir seri deney yapılmıştır. Yamazaki *et al.* (1995), yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklıklar altında beton ve donatının malzeme özelliklerini sunmuşlardır. Ayrıca yüksek sıcaklıklar etkisinde, kalın duvarların ısı transfer özellikleri ve yüksek sıcaklıklara maruz donatılı kirişlerin yapısal davranışı da incelenmiştir. Donatılı beton elemanların yüksek sıcaklık etkilerinde lineer olmayan davranışını tahmin etmek için model oluşturulmak üzere yapılan deneylerden 800°C'ye kadar veriler sağlanmıştır.

Deneyler ısıtma süresinde ve numuneler soğutulduktan sonra yapılarak, betonların sıcak durumdaki ve soğutulduktan sonraki arta kalan özellikleri belirlenmiştir. Betonun ısıl genişleme katsayısı 200°C'ye kadar küçük değerlerde olmasına karşın, 600°C civarında çok hızlı bir artış göstermiştir. Bunun sebebi kullanılan agreganın içerdiği kuvarz miktarıdır. Çünkü 573°C'de alfa kuvarzdan beta kuvarza dönüşüm gerçekleşir, bunun neticesinde %15 civarında hacim artışı olur. Betonun ısıl iletkenlik katsayısında sıcaklık artışıyla azalma tespit edilmiştir. Betonun basınç mukavemetinde ise 200°C civarında bir artış olmuş, bundan sonra ise sıcaklık artışıyla mukavemette hızlı azalmalar görülmüştür. Kalsiyum silikat hidratinin bozulması sonucunda 700°C'de çok belirgin kayıplar olmuş, bu sıcaklıkta mukavemet başlangıç değerinin %20'si olarak ölçülmüştür.

Çelik çubukların ısı genleşme katsayıları sıcaklığın artmasıyla 400<sup>0</sup>C'ye kadar artmış, 400<sup>0</sup>C-700<sup>0</sup>C aralığında sabit kalmış, daha sonra azalmış ve 800<sup>0</sup>C civarında yaklaşık sıfıra düşmüştür. Akma mukavemetlerinde 300<sup>0</sup>C'ye kadar küçük değişimler belirlenmiş, ancak daha sonra sıcaklığın artmasıyla mukavemetler doğrusal şekilde azalmıştır [65].

El-Hawary and Hamoush (1996) yüksek sıcaklık etkilerinde beton ile donatı ara yüzeyindeki bağ modülünün belirlenmesi için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmanın amacı adersana sıcaklığın, ısıtma süresinin ve soğutma şeklinin etkisini belirlemek ve bağ modülünün donatı çapından bağımsız olduğunu ispatlamaktır. Ayrıca adersanı belirlemede, bağ modülünün de uygun bir parametre olarak kullanılabilirliğinin sağlanması da amaçlanmıştır.

Deneysel 10 cm uzunluğundaki, 6 mm, 8 mm ve 10 mm çaplı çelik çubuklar numunenin içerisinde ve dışarısında 5 cm kalacak şekilde betona gömülmüştür. Gömme boyunun yetersiz seçilmesinin gerekçesi; hasarın, çeliğin akması şeklinde değil beton-çelik arasındaki bağın zayıflaması neticesinde oluşmasının sağlanmasıdır. Numuneler 100<sup>0</sup>C, 300<sup>0</sup>C ve 500<sup>0</sup>C sıcaklıklarda 2 saat 4 saat ve 8 saat sürelerde bekletilmiştir. Daha sonra numuneler ya kendiliğinden havada yavaş yavaş soğumaya bırakılmış ya da suda ani olarak soğutulmuştur. Soğutulan numunelerde çekip-çıkarma deneyleri (pull-out) yapılarak donatı betondan çekilmiştir. Isıtılmamış numunelerde de aynı işlem yapılarak kontrol grubu olarak kullanılmıştır.

Çalışma sonucunda 100<sup>0</sup>C'de kısa süreyle ısıtılan numunelerin adersan kuvvetlerinde bir artış belirlenmiştir. Bu artışın sebebi betondaki suyun buharlaşması neticesinde rötre yapması ve daha iyi bir kenetlenme sağlanmasıdır. Ancak daha sonraki sıcaklıklarda, sıcaklığın ve ısıtma süresinin artmasıyla adersanın azaldığı bu azalmanın suda soğutulan numunelerde daha fazla olduğu belirlenmiştir. Isıtma süresi arttıkça adersan kuvvetlerinde azalmalar görülmüştür [66].

Katz and Berman (2000), FRP güçlendirme çubukları ile beton arasındaki bağa yüksek sıcaklıkların etkisini araştırmışlardır. Çalışmada 12,7 mm çapındaki çubuklar, çapın beş katı olacak şekilde 63 mm, betona gömülmüştür. Beton ile donatı arasındaki farklı bağlanma mekanizmalarını temsil etmesi açısından çekip-çıkarma deneylerinde dört farklı tür FRP çubuk kullanılmıştır.

Ortalama adersan kuvvetleri, maksimum çekip-çıkarma yükünü gömme boyuna bölmek yolu ile belirlenmiştir. Böylelikle çubuğun tüm uzunluğu boyunca üniform bir gerilme dağılımı olduğu varsayılmıştır. Sıcaklığın artmasıyla bütün çubuklar için maksimum kenetlenme kuvvetinde azalmalar tespit edilmiştir. 210<sup>0</sup>C sıcaklıkta ise FRP çubuklar taşıma kapasitelerini büyük ölçüde kaybetmişler ve başlangıç değerlerinin ancak %10-%20'si kadarını koruyabilmişlerdir. Çelik çubuklar kullanılan numunelerde de sıcaklığın artmasıyla sürekli adersan azalmaları tespit edilmiştir. Bu çalışmada denenilen sıcaklık aralığında elde edilen en büyük kayıp %33'tür. Ayrıca çalışma sonucunda yüksek sıcaklıkların etkisiyle adersanın tahmini için bir model önerilmiştir [67].

Chiang *et al.* (2000), yangın hasarından sonra, beton ve donatı arasındaki adersanın belirlenmesi için ses iletim ve çekip-çıkarma kombinasyonlarından oluşan bir seri deney yapmışlardır. Beton numunelerin ortasına 10 mm çapında donatılar gömülmüş, numuneler belirlenen sıcaklıklarda 1, 2 ve 3 saat süreyle bekletildikten sonra oda sıcaklığına soğutularak deneyler yapılmıştır. Sıcaklık-ses dalgası hızı ve uygulanan yük arasındaki ilişki incelenmiştir. Isıtma süresinin artmasıyla harç numunelerinde dalga hızının oldukça düştüğü belirlenmiştir. En düşük hız 500 m/s ile 500<sup>0</sup>C'de 3 saat boyunca ısıtılan numunelerden elde edilmiştir. Oda sıcaklığındaki numuneler ile karşılaştırıldığında, bu değer adersansta %75'lik bir kayıp olacağını ifade etmektedir. Isıtma süresi arttıkça numunelerin dalga hızlarındaki azalmalar daha düşük seviyede kalmıştır. Sıcaklığın ve ısıtma süresinin artmasıyla bağ kuvvetlerinde azalmalar olduğu sonucuna varılmıştır.

Buna ilaveten, çalışmada literatürdeki deneysel veriler kullanılarak ses dalgası hızı değişiminden adersan değişiminin belirlenebilmesi için matematiksel analizler yapılmıştır. Akustik dalga hızındaki azalmaların yüksek sıcaklık etkilerinden sonra bağ kuvvetlerinde de azalmalar olduğunu gösterdiği ancak bu konuda pratikte geçerli olacak kesin bir ilişki kurmada mevcut verilerin yeterli olmadığı belirtilmiştir [68].

Chiang and Tsai (2003), yaptıkları çalışmada yangın etkisinden sonra yapının kullanılabilirliğine, güçlendirilmesi gerektiğine veya yapının kullanımından vazgeçilmesi gerektiğine karar verebilmek için donatılı betondaki hasarın boyutunun tahmin edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca uzun süreli yüksek sıcaklık etkilerinde donatılı betonun davranışının belirlenmesi sıcak iklim bölgelerindeki yapıların hizmet ömürlerinin bilinmesi açısından da önemlidir. Bu çalışmanın amacı, yüksek sıcaklık etkilerinden sonra bağ kuvvetlerindeki değişiklikleri hesaplayarak artık mukavemetler için basit bir eşitlik fonksiyonu geliştirmektir. Deneysel çalışma için donatılar düşey olarak 6 cm ve 8 cm boylarında 49,2 MPa basınç mukavemetindeki betona gömülmüştür. Isıtma işlemi için 3 kademeli bir yöntem izlenmiştir. İlk kademede numuneler fırında; 30<sup>0</sup>C/dak artış hızıyla oda sıcaklığından 240<sup>0</sup>C, 320<sup>0</sup>C, 400<sup>0</sup>C, 500<sup>0</sup>C ve 550<sup>0</sup>C'ye kadar ısıtılmıştır. İkinci kademede numuneler belirlenen sıcaklıklarda 30 dak, 60 dak, 90 dak,

120 dak, 150 dak ve 180 dak sürelerde sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Üçüncü kademede numuneler;  $T=T_c-345\log_{10}(8t_c+1)$  eşitliğine uygun olarak soğutulmuştur. Burada (T) sıcaklığı ( $t_c$ ) ise soğutma süresini ifade etmektedir. Oda sıcaklığına getirildikten bir gün sonra numuneler fırından çıkarılmış ve çekip-çıkarma deneyleri yapılmıştır. Donatılar betondan 1 cm/dak hızla çekilmiştir. En büyük çekip-çıkarma kuvveti kenetlenme kuvveti olarak kaydedilmiştir, çünkü gömme boyları farklıdır ve kısa olan (6 cm) gömme boyundaki donatılar hep betondan çıkmıştır. Her grupta ısıtılmamış numuneler de üretilmiş ve gerçek aderansın belirlenmesinde ve ısıtılan numunelerin aderans değişimlerinin belirlenmesinde referans numune olarak kullanılmıştır. Isıtılan numunelerden elde edilen değerler referans numune değerine bölünerek artık aderans oranları belirlenmiştir. Sıcaklık 200°C'yi aştığında aderans önemli kayıplar olduğu görülmüştür [69].

Haddad and Abendeh (2004), ısıtma-soğutma çevrimine maruz bırakılan beton-donatı arasındaki aderansı korumak için, sentetik ve pirinç kaplı kısa çelik liflerin etkisini araştırmıştır. Aderans hesaplanırken, 18 mm çapındaki donatılar tüm uzunluğunca 75x150 mm boyutlarındaki silindirik numunelere gömülmüş ve sonrasında çekip-çıkarma deneyleri yapılmıştır. Numuneler hacimce %0,15 ve 0,30 polipropilen lif veya %0,5 oranında çelik lif kullanılarak üretilen betonlardan oluşturulmuştur. Numuneler 35-150°C sıcaklık aralığında 4 saat boyunca ısıtılmış, sonra 20 saat boyunca soğutulmuştur. Çekme mukavemeti ve bağ kuvveti değerleri 80 çevrim sonrasında belirlenmiştir. Lifli betonlarda aderansın normal betondakine göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçları 80 çevrim sonucunda numunelerin belirgin şekilde olumsuz etkilendiğini ve çekme mukavemetinin %44, bağ kuvvetinin ise %28'e varan oranlarda azaldığını göstermiştir. Isıtma soğutma etkisinin lifli betona nazaran normal betonda daha belirgin olduğu ifade edilmiştir. Örneğin; 80 çevrim sonunda normal beton için aderans %44 azalırken bu oran polipropilen lifli betonda %23, çelik lifli betonda ise %12 düzeyinde kalmıştır. Isıtma-soğutma çevrim sayısı arttıkça; bağ kuvvetindeki azalma hızı lifli betonda belirgin şekilde azalırken, normal betonda değişmemiştir. Aynı çevrim sayısında, lifli betondaki donatının nihai sıyrılma miktarının normal betondaki miktardan daha fazla olduğu kaydedilmiştir [70].

Xiao and König (2004) tarafından, betonun yüksek sıcaklıklar etkisinde ve sonrasında mekanik davranışını belirlemek için Çin Halk Cumhuriyeti'nde son 20 yıl içerisinde yapılmış olan deneysel veriler tartışılarak daha sonraki çalışmalar için öneriler belirtilmiştir. Öncelikle mukavemet, elastisite modülü, maksimum deformasyon, poisson oranı gibi temel mekanik davranışlar ele alınmış, daha sonra yüksek sıcaklıkların donatının akma mukavemeti ve elastisite modülüne etkisi ortaya konulmuştur. Son olarak ise yüksek sıcaklıkların beton ile donatı arasındaki bağa etkisi incelenmiştir.

Yüksek sıcaklıklardan sonra betonun basınç mukavemeti incelendiğinde, oda sıcaklığından 400°C'ye kadar çıktığında, mukavemette önce küçük azalmalar, sonra bir miktar artma ve daha sonra yeniden azalma olduğu belirtilmiştir. Genellikle bu arada mukavemetin çok fazla değişmediği kabul edilebilir. Sıcaklık 400°C'ye ulaştığında mukavemet çok belirgin şekilde azalmaya başlar. 800°C'de ise başlangıç mukavemetinin sadece %20'si korunabilir. Ancak farklı agregalardan üretilmiş betonların sıcaklık etkisinde çok farklı davranış göstereceği unutulmamalıdır.

Soğutma şeklinin etkisi dikkate alındığında; suda soğutulan numunelerde, havada soğutulanların aksine sıcaklığın artmasıyla beraber mukavemette düzenli bir azalma olduğu görülür. Bu azalma hızı 400°C'ye kadar yavaş, ondan sonra daha hızlıdır. 400°C'ye kadar olan sıcaklıklarda suda soğutulan numunelerdeki mukavemet kayıpları havada soğutulanlardan fazla iken 600°C ve üzerinde soğutma şeklinin etkisinin belirginliği ortadan kalkmaktadır. Suda soğutma neticesinde sıcaklık farklılıkları havada soğutulanlara göre daha fazla olduğundan, numunede hasar miktarı artar.

Sıcaklığın oda sıcaklığından 400°C'ye çıkmasıyla çeliğin mukavemeti bir miktar artar, ancak düktilitesi azalır. Bunun üzerindeki sıcaklıklarda çeliğin mukavemeti düzenli olarak azalır ve 700°C'de başlangıç mukavemetinin ancak %20'si kalır. Çeliğin elastisite modülü de sıcaklığın artmasıyla beraber düzenli olarak azalır.

Yüksek sıcaklıklarda betonun ısıl genleşmesi donatı çeliğinin genleşmesinden çok daha düşük olduğundan, betonun donatıyı etrafına sıkması, beton ve donatı arasındaki sürtünmeyi artırır. Öte yandan betonun çekme mukavemeti azalır. Bu nedenle yüksek sıcaklık etkileriyle değişmiş olan beton ile donatı arasındaki aderans yangına maruz kalmış betonarme elemanların çatlak, deformasyon ve yük taşıma kapasitesine etki eder. Yüksek sıcaklık etkilerinden sonra beton-donatı aderansının çok belirgin şekilde değiştiği söylenebilir. Aderanstaki bozulma miktarı, betonun basınç mukavemetindeki hasardan daha fazla miktardadır. Bunun sebebi de betonun çekme mukavemetindeki azalma oranıdır. Aderans, düz donatılarda nervürlü donatılara göre daha çok azalır. Düz çubuklarda 100°C, nervürlü çubuklarda ise 300°C'ye kadar aderansta küçük artışlar belirlenmekle beraber, bundan sonraki sıcaklıklarda bağ kuvvetleri önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca donatının pas durumunun da aderans üzerinde etkisi olduğu, paslı ve passız donatıların farklı davranış sergilediği belirtilmiştir [71].

Haddad and Shannis (2004) doğal puzolanlı yüksek mukavemetli beton ile donatı çeliği arasındaki kenetlenmeyi yangın etkisi sonrasında incelemişlerdir. Çalışmada yüksek mukavemetli betonlar üretilmiştir. Ayrıca çimento yerine ağırlıkça %10, %15 ve %25 oranlarında doğal puzolanlar kullanılmıştır. Üretilen numunelerin içerisine donatı çubukları düşey olarak yerleştirilmiştir. Numuneler 600°C ve 800°C sıcaklık etkilerine bırakılarak basınç mukavemeti ve çekip-çıkarma deneyleri yapılmış ve aderanstaki azalmayı tahmin etmekte kullanılacak ampirik bağıntılar verilmiştir.

Sıcaklığın artmasıyla beton gruplarında mukavemet kayıpları görülmüştür. 600°C ve 800°C sıcaklıklarda doğal puzolan kullanılmayan betonların mukavemet kayıpları %40 ve %67'dir. %25 doğal puzolan kullanılan betonlarda ise bu oranlar sırasıyla %48 ve %77'dir. Çelikte ise sıcaklığın artmasıyla akma mukavemeti azalmış ancak duktilitesi artmıştır. Çeliğin geometrik özelliklerinde ise sıcaklığın etkisi görülmemiştir.

Sıcaklığın beton-donatı aderansı üzerindeki etkisi ise araştırmacılar tarafından şu şekilde açıklanmıştır: Nispeten daha düşük çekip-çıkarma kuvvetleri etkisinde yüksek sıcaklıklardan dolayı oluşan, sıyrılmaya sebep olan çatlaklar, kapanma eğilimindedir. Çatlaklar kapandığında sıyrılmaya karşı direnç artar ve sonraki sıyrılmalar için ilave çekip-çıkarma kuvvetlerine ihtiyaç duyulur. Böylece kenetlenme kuvveti-sıyrılmaya eğrilerinin değişim hızı artar.

Ayrıca çalışma sonucunda, betonun donatı çapına oranı arttıkça aderanstaki düşüşün daha fazla olduğu belirtilmiştir. 600°C ve 800°C sıcaklıkların etkisiyle aderans kuvvetlerinde sırasıyla %24 ve %74 azalmalar tespit edilmiştir. Yangın etkisinde en iyi performansı puzolan kullanılmayan betonlar göstermiş, kullanılan puzolan miktarı arttıkça aderans kuvvetleri azalmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, basınç mukavemetindeki azalma ile aderans kuvvetindeki azalma arasındaki ilişkinin bir bağıntı yardımıyla hesaplanabileceği belirtilmiş ve bu ilişki için aşağıdaki ifade önerilmiştir:

$$RBS = 0,0104 x (RCS)^{2,02}$$

Burada RBS, betonun basınç mukavemetindeki azalma; RCS, aderans kuvvetindeki azalma olarak tanımlanmıştır [72].

Hashimoto and Takiguchi (2004) betonun dökümü esnasında yerleştirilmiş ankraj çubuklarının yüksek sıcaklık (500°C'ye kadar) etkileri sırasında ve sonrasında davranışını belirlemek için deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmada 24x24x12 cm boyutlu prizmatik numunelere uzunluğu 80 mm olan ankraj çubukları yerleştirilmiştir. Kullanılan betonlar normal beton olup, basınç mukavemetleri 30 MPa'dır. Sıcaklıklar 100°C, 150°C, 200°C, 300°C, 350°C, 400°C, 500°C olmak üzere 7 farklı değerdedir. Betona yerleştirilmiş ankraj çubuklarının çekip-çıkarma kuvvetinin, sıcaklığın artmasıyla beraber azaldığı tespit edilmiştir. 500°C'de çekip-çıkarma kuvvetlerinin oda sıcaklığındakinin %50'si kadarı olduğu belirlenmiştir. Bu azalma ile sıcaklık arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu bildirilmiştir. Ayrıca hedef sıcaklığa kadar ısıtılmış ve sonra soğutulmuş olan numunelerde de çekip-çıkarma kuvvetinin ısıtılan hedef sıcaklığa bağlı olarak azaldığı belirtilmiştir. Sıcaklık etkilerinden sonra gözlenen kırılma şekillerinin, oda sıcaklığındaki numunelerin kırılma şekilleri ile aynı olduğu ifade edilmiştir [73].

Yuan *et al.* (2005), farklı yüksek sıcaklıklar ve soğutma şekillerinin etkisinden sonra donatılı betonlarda aderans performanslarını incelemişlerdir. Numuneler 250°C, 450°C ve 650°C sıcaklıklara kadar ısıtıldıktan sonra ya havada ya da yüzeylerine su püskürtülerek soğutulmuştur. Sonuçlar sıcaklığın ve soğutma şeklinin aderans özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Havada soğutulan numunelere kıyasla su ile soğutulan numunelerin aderans kuvvetleri daha belirgin bir şekilde azalmış, sıyrılmaya miktarları ise artmıştır. Bu sonuçlara dayanılarak yüksek sıcaklıklardan sonra numunelerin aderans kuvvetlerinin belirlenmesi için istatistiksel bir formül ortaya konulmuştur [74].

Abbasi and Hogg (2005) tarafından suyun ve alkali şartların beton ile donatı arasındaki aderansa ve GFRP donatı çubukların rijitliğine, 20-120°C sıcaklıklar arasındaki etkisi araştırılmıştır. Üç tür GFRP çubuk 60°C'de alkali çözeltisinde 30, 120 ve 240 günlük sürelerde bekletilmiştir.

Çalışmada basınç mukavemeti 40 MPa olan betonlar üretilmiştir. Çekip-çıkarma deneyleri 10 cm boyutlu küp numunelere GFRP çubuklar gömülerek yapılmıştır. Gömme boyu çapın 5 katı olacak şekilde 60 mm seçilmiştir.

Sıcaklığın artmasıyla lif-beton ara yüzeyinin bozulduğu tespit edilmiştir. Aderanstaki azalmanın sebebi olarak beton ile donatı arasındaki gerilme transferindeki değişimler gösterilmiştir. Oda sıcaklığında ara yüzey aderansı zamanla artmıştır. Alkali etkisi ve yüksek sıcaklıkların cam lifin mukavemetini ve elastisite modülünü azalttığı belirtilmiştir [75].

Wang and Kodur (2005) tarafından yüksek sıcaklıklarda FRP güçlendirme çubuklarının mukavemet ve rijitlik özelliklerini incelemek için detaylı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Karbon lif (CFRP) ve cam lif (GFRP) olmak üzere iki farklı tür FRP çubuk kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar FRP donatıların geleneksel çelik donatılar ile karşılaştırılmasında kullanılmıştır. FRP donatı çubukların elastisite modülü için 350°C'nin kritik sıcaklık olduğu, bu sıcaklığın altında orijinal değerlerinin %90 kadarını korudukları bildirilmiştir. GFRP ve CFRP çubuklar için mukavemet kaybında kritik sıcaklıklar ise sırasıyla 325°C ve 250°C'dir. Bu sıcaklıklarda mukavemetler yarıya düşmüştür. Çelik için ise bu sıcaklık 580°C'dir. Donatı için belirlenen kritik sıcaklıkların betonarme elemanların yangın dayanımları açısından çok önemli olduğu vurgulanmıştır [76].

Gamage *et al.* (2006) yaptıkları çalışmada CFRP-beton kompozitlerin yangın etkisinde davranışını tahmin etmek için üç boyutlu bir model geliştirmeyi amaçlamışlardır. Model, deneysel verilerle doğrulanmıştır. Hem deneysel hem de modelden elde edilen sonuçlar neticesinde yüksek sıcaklıklarda beton ile CFRP arasındaki bütünlüğü sağlamak için epoksi sıcaklığının 70°C'yi aşmaması gerektiği saptanmıştır. Aderansın CFRP bağ uzunluğuna bağlı olmadığı belirtilmiştir. CFRP ve beton arasındaki bozulmanın kenetlenme boyuna değil bağlayıcı malzemenin sıcaklığına bağlı olduğu hem deneysel verilerle hem de model tahminleriyle belirlenmiştir [77].

Galati *et al.* (2006) termal yükler altında FRP donatılar ile beton arasındaki bağı, mevcut olan bağ-kayma ilişkilerine ait verilere dayanarak analiz etmiş ve maksimum 70°C'ye kadar sıcaklıklarda donatılı beton numuneleri üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ısıl etkilerden sonra çekip-çıkarma deneyleri yapılmıştır. Çekip-çıkarma deneyleri için 9,5 mm çapındaki GFRP çubuklar farklı gömme boylarında beton numunelere yerleştirilmiştir. Betonların basınç mukavemetleri 27,6 MPa'dır. GFRP çubuklar ise yüzey geometrilerine göre örgülü ve kum kaplı türlerdir. Çoğu numunede ısıl işlemin bağ kuvvetinde cüzi bir azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir. Bağ uzunluğu donatı çapının 15 katı olan numunelerde bu uzunluğun çok fazla olduğu ve bazı numunelerde donatının sıyrılmadan kırıldığı belirlenmiştir. Ayrıca ısıl işlemin etkilerinin beton örtüsü kalınlığının az olduğu durumlarda çok daha belirgin olduğu ifade edilmiştir [78].

Ünlüoğlu vd. (2007), yüksek sıcaklıklara maruz kalan donatıların özelliklerine pas payının büyük ölçüde etki ettiğini belirtmiştir. S420 nervürlü betonarme yapı çelikleri kullanılarak betonarmede en fazla kullanılan üç farklı donatı çapı (10 mm, 16 mm ve 20 mm) seçilmiş, belirli pas paylarındaki elemanlar farklı yüksek sıcaklıklara tabi tutulmuşlardır. Pas payı harçları, CEM I 42.5 çimentosu ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında uçucu kül ile yer değiştirilerek hazırlanmıştır. Numunelere 20°C, 100°C, 200°C, 300°C, 500°C, 800°C ve 950°C'lik sabit sıcaklıklar 3 saat süreyle uygulanmıştır. Soğumuş numuneler içinden çıkarılan donatılarda çekme deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, yüksek sıcaklıklarda harç ile sağlanan 25 mm pas payının, donatıları koruyarak, akma ve çekme mukavemeti kayıplarını azalttığı, pas paysız donatılara göre mukavemetlerin yüksek olduğu görülmüştür. Sıcaklık 500°C'ye kadar çıkarıldığında, ısıl işlem görmemiş numunelerle yaklaşık olarak aynı akma ve çekme mukavemetlerine sahip olduğu görülen pas paylı numunelerin, bu sıcaklık aşıldığında mukavemet kayıplarına uğradığı bulunmuştur. 500°C üzerinde donatı mekanik özelliklerinin korunamadığı görülmüştür. Ultrasesin numune üzerindeki geçiş yolunun %15'i harç, geri kalanı çelik üzerindedir. Çalışmada yapılan ultrases geçiş süresi deneyleri sonucunda, donatılı numunelerde hesapla bulunan ultrases geçiş hızlarının yüksek sıcaklık etkisi ile gittikçe düştüğü görülmüştür. Yalıtımsız numunelerin harç kaplı donatılara göre yaklaşık 250°C daha önce tepkide bulunduğu belirlenmiştir. Bu davranıştan yola çıkarak 25 mm pas payının, yüksek sıcaklık etkisi altında yaklaşık olarak içerisindeki donatıları dış ortam sıcaklığından 250°C daha düşük sıcaklıkta koruyabildiği belirlenmiştir [79].

Wang *et al.* (2008), beton yapılarında kullanılan FRP güçlendirme çubuklarının yüksek sıcaklıklardan sonra mekanik özellikleri deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada karbon lif (CFRP) ve cam lif (GFRP) olmak üzere iki çeşit FRP çubuklar kullanılmıştır. Deney sonuçları, kırılma anına kadar, yüksek sıcaklıklarda FRP çubuklar için gerilme-deformasyon ilişkisinin hemen hemen doğrusal olduğunu ortaya koymuştur. Elastisite modülünde 300-400°C'ye kadar değişim olmayıp bu sıcaklıktan sonra çok keskin bir düşüş olmuştur [80].

Bingöl and Gül (2008), yüksek sıcaklıklardan sonra beton-donatı arasındaki bağ kuvvetini incelemiştir. 700°C'ye kadar 13 farklı sıcaklık değerine maruz bırakılan numuneler havada yavaş yavaş ve suda hızlıca soğutulmuştur. 150°C'den itibaren, sıcaklıkların artmasıyla beraber betonun basınç mukavemetinde ve beton-donatı aderansında kayıplar belirlenmiştir. Kayıpların suda soğutulan numunelerde daha fazla olduğu, bunun sebebinin de ani sıcaklık



değişimlerinden oluşan termal şok olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca betonun basınç mukavemeti ile aderans kuvveti arasında doğrusal bir ilişki olduğu belirtilmiştir [81].

### 2.3.1. Değerlendirme

Yüksek sıcaklıkların beton-donatı aderansına etkisini konu alan bazı çalışmalar yukarıda özetlenmiştir. Farklı parametrelerin incelendiği bu çalışmalardan beton-donatı arasındaki aderansın; ulaşılan sıcaklığa, soğutma şekline, kullanılan malzemelerin özelliklerine, beton mukavemetine, deney yöntemine ve kenetlenme boyuna bağlı olarak değiştiği sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda aderansın belirli bir değere kadar bozulma olmadığı, hatta bir miktar artış olduğu belirlenmiştir. Bu sıcaklık değeri farklı çalışmalarda 100°C'den 400°C'ye kadar bildirilmiştir. Ancak genellikle 200°C üzerindeki sıcaklıklarda aderans kuvvetlerinde azalmalar olduğu ifade edilmiştir. Nervürlü donatıların beton ile kenetlenmesinin düz donatılara kıyasla daha fazla olduğu ve yüksek sıcaklık etkilerinden sonra havada soğutulan numunelerin suda soğutulanlara oranla daha iyi aderans değerlerine sahip olduğu da çalışmalardan çıkarılabilecek sonuçlardır. Ancak soğutma şekillerinin etkisinin çok yüksek sıcaklıklardan sonra (genellikle 500°C ve üzeri) azaldığı da bildirilmiştir.

### Kaynaklar

- [1] <http://www.dortteknik.com/yanginyalitim.html>
- [2] Kocataşkın F., Yapı Malzemesi Bilimi. Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [3] Bilal, F., "Yangın ve Beton". İzolasyon Dünyası, 60, s: 70-72. 2006.
- [4] Ersoy, U., Betonarme. Evrim Yayınevi, 1985.
- [5] Aka, İ., Keskinel, F., Arda, T.S., Betonarmeye Giriş. Birsen Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [6] Türk, K., Bileşik eğilmeye maruz betonarme elemanlarda donatı aderansının beton özelliklerine bağlı olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [7] Gustaferro, A.H., Abrams, M.S. and Litvin, A., "Fire Resistance of Lightweight Insulating Concrete." Lightweight Concrete, ACI Publication SP29, p: 161-180, 1971.
- [8] Zoldners, N.G. and Wilson, H.S., "Effect of sustained and cyclic temperature exposures on lightweight concrete, Behavior of concrete under temperature extremes." ACI Publication, (39) 9, p: 149-178, 1973.
- [9] Rostasy, F.S., Weiss, R. and Wiedemann, G., "Changes of pore structure of cement mortars due to temperature." Cement & Concrete Research, 10, p: 157-164, 1980.
- [10] Ataman, R., Beton Yapıların Yangın Dayanımlarının İncelenmesi. Y.Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1991.
- [11] Kristensen, L. and Hansen, T.C., "Cracks in concrete core due to fire on thermal heating shock." ACI Materials Journal, 91 (5), p: 453-459, 1994.
- [12] Saad, M., El-Enein, A., Hanna, G.B. and Kotkata, M.F "Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume." Cement and Concrete Research, 26, p: 669-675, 1996.
- [13] Lin, W.M., Lin, T.D. and Powers-Couche, L.J., "Microstructures of Fire Damaged Concrete." ACI Materials Journal, 93 (3),p: 199-205, 1996.
- [14] Karaca, Z., Durmuş, A. ve Hüsem, M., "Hafif Betonun Yangın Dayanımının İncelenmesi." İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 3. Teknik Kongre, Ankara, 1997.
- [15] Phan, L.T. and Carino, N.J., "Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperatures." Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.10, p: 58-64, 1998.
- [16] Chan, Y. N., Peng, G. F. and Anson, M., "Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures." Cement and Concrete Composites, 21, p: 23-27, 1999.
- [17] Lawson, J.R., Phan, L.T. and Davis, F., "Mechanical properties of high performance concrete after exposure to elevated temperatures," Department of Commerce Technology Administration. NIST, USA, 2000.
- [18] Chan, S.Y.N., Luo, X. and Sun, W., "Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete." Construction and Building Materials, 14, p: 261-266, 2000.
- [19] Kalifa, P., Menneteau, F.D. and Quenard, D., "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures." Cement and Concrete Research, 30, p: 1915-1927, 2000.
- [20] Vydra, V., Vodak, F., Kapickova, O. and Hoskova, S., "Effect of temperature on porosity of concrete for nuclear-safety structures." Cement and Concrete Research, 31, p: 1023-1026, 2001.

- [21] Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M. and Wong, Y.L., "Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures." *Cement and Concrete Research*, 31, p: 1291-1300, 2001.
- [22] Janotka, I. and Bagel, L., "Pore structures, permeabilities and compressive strengths of concrete at temperatures up to 800°C." *ACI Materials Journal*, 99 (2), p: 196-200, 2002.
- [23] Handoo, S.K., Agarwal, S. and Agarwal, S.K., "Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures." *Cement and Concrete Research*, 32, p: 1009-1018, 2002.
- [24] Bingöl, A.F., and Gül, R., "Compressive strength of lightweight aggregate concrete exposed to high temperatures." *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 11, p: 68-72, 2004.
- [25] Chen, B. and Liu, J., "Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures." *Cement and Concrete Research*, 34, p: 1065-1069, 2004.
- [26] Li, M., Qian, C. and Sun W., "Mechanical properties of high-strength concrete after fire." *Cement & Concrete Research*, 34, p: 1001-1005, 2004.
- [27] Savva, A., Manita, P. and Sideris, K.K., "Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates." *Cement and Concrete Composites*, 27, p: 239-248, 2005.
- [28] Sakr, K. and El-Hakim, E., "Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties." *Cement and Concrete Research*, 35, p: 590-596, 2005.
- [29] Hüsem, M., "The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete." *Fire Safety Journal*, 41, p: 155-163, 2006.
- [30] Chang, Y.F., Chen, Y.H., Sheu, M.S. and Yao, G.C., "Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures." *Cement and Concrete Research*, 36, p: 1999-2005, 2006.
- [31] Sancak, E. ve Şimşek, O., "Yüksek sıcaklığın silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkı hafif betona etkileri." *Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 21 (3), s: 443-450, 2006.
- [32] Terro, M.J., "Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures." *Building and Environment*, 41 (5) p: 633-639, 2006.
- [33] Lau, A. and Anson, M., "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete." *Cement and Concrete Research*, 36, p: 1698-1707, 2006.
- [34] Arıöz, Ö., "Effects of elevated temperatures on properties of concrete." *Fire Safety Journal*, 42, p: 516-522, 2007.
- [35] Aydın, S. and Baradan, B., "Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars." *Cement and Concrete Research*, 37 (6), p:988-995, 2007.
- [36] Peng, G.F., Bian, S.H., Guo, Z.Q., Zhao, J., Peng, X.L. and Jiang, Y.C., "Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures." *Construction and Building Materials*, 22, p: 948-955, 2008.
- [37] Aydın, S., Yazıcı, H. and Baradan, B., "High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers." *Construction and Building Materials*, 22(4), p: 504-512, 2008.
- [38] Larrard, F., Schaller, I. and Fuchs, J., "Effect of bar diameter on the bond strength of passive reinforcement in high-performance concrete." *ACI Materials Journal*, 90 (4), p: 333-339, 1993.
- [39] Benmokrane, B., Xu, H. and Bellavance, E., "Bond strength of cement grouted glass fiber reinforced plastic (GFRP) anchor bolts." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, V:33, No:5, p: 455-465, 1996.
- [40] Fu, X. and Chung, D.D.L., "Improving the bond strength between steel rebar and concrete by increasing the water/cement ratio." *Cement and Concrete Research*, 27 (12), p: 1805-1809, 1997.
- [41] Shannag, M.J., Brincker, R. and Hansen, W., "Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites." *Cement and Concrete Research*, 27 (6), p: 925-936, 1997.
- [42] Ünal, Y., Aderansın betonun agrega tane çapı ve dayanımına bağlı olarak değişimi üzerine bir araştırma. Y. Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.
- [43] Karaduman, M.C., "An investigation on anchorage bond properties of reinforcement in high strength concrete." Y.Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.
- [44] Tighiouart, B., Benmokrane, B. and Gao, D., "Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars." *Construction Building Materials*, 12, p: 453-462, 1998.
- [45] Chiang, C., Tang, C., "Experimental study on the acoustic wave velocity in steel-reinforced mortar under external pull-out load." *Ultrasonics* 37, p: 223-229, 1999.
- [46] Çınar, B., Karapınar volkanik agregasından imal edilen hafif betonların aderans davranışı üzerine deneysel bir inceleme. Y. Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.

- [47] Çolak, A., "Parametric study of factors affecting the pull-out strength of steel rods bonded into precast concrete panels." *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 21, p: 487-493, 2001.
- [48] Yerlici, V. ve Özturan, T., "Yüksek dayanımlı beton elemanlarda aderans dayanımı." *TMMOB Teknik Dergi*, Cilt 13, (1), 2002.
- [49] Chang, J.J., Yeih, W. and Tsai, C.L., "Enhancement of bond strength for epoxy-coated rebar using river sand." *Construction and Building Materials*, 16, p: 465-472, 2002.
- [50] Lee, H., Noguchi, T. and Tomosawa, F., "Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion." *Cement and Concrete Research*, 32, p: 1313-1318, 2002.
- [51] De Lorenzis, L., Rizzo, A. and La Tegola, A., "A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete." *Composites: Part B* 33, p: 589-603, 2002.
- [52] Ichinose, T., Kanayama, Y., Inoue, Y. and Bolander Jr. J.E., "Size effect on bond strength of deformed bars." *Construction and Building Materials*, 18, p: 549-558, 2004.
- [53] Chan, Y.W. and Chu, S.H., "Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete." *Cement and Concrete Research*, 34, p: 1167-1172, 2004.
- [54] Kankam, C.K., "Bond strength of reinforcing steel bars milled from scrap metals." *Materials and Design* 25, p: 231-238, 2004.
- [55] Söylev, T.A., "Çelik-beton ara yüzey kalitesinin incelenmesi." *Beton 2004 Kongresi Bildirileri*, İstanbul, 2004.
- [56] Gallego, A., "Comprassion between concrete-black steel and concrete-galvanized steel bond via the pull-out test supplied with acoustic emission." *DGZfP-Proceedings BB 90-CD Poster 3 EWGAE*, 2004.
- [57] Cheng, A., Huang, R., Wu, J.K. and Chen, C.H., "Effect of rebar coating on corrosion resistance and bond strength of reinforced concrete." *Construction and Building Materials*, 19, p: 404-412, 2005.
- [58] Banholzer, B., Bramshuber, W. and Jung, W., "Analytical evaluation of pull-out tests—The inverse problem." *Cement & Concrete Composites* 28, p: 564-571, 2006.
- [59] Jendele, L. and Cervenka, J., "Finite element modelling of reinforcement with bond." *Computres and Structures*, 84 (28), p: 1780-1791, 2006.
- [60] Tanyıldızı, H. ve Yazıcıoğlu, S., "Betonarme demiri ve beton arasındaki aderans dayanımına mineral katkıların etkisi." *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 18, (3), s: 351-357, 2006.
- [61] Teo, D.C.L., Mannan, M.A., Kurian, V.J. and Ganapathy, C., "Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties." *Building and Environment*, 42 (7), p: 2614-2621, 2007.
- [62] Lee, M., Wang, Y. and Chiu, C., "A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material." *Construction and Building Materials*, 21, p: 182-189, 2007.
- [63] Morley, P.D. and Royles, R., "The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete." *Fire Safety Journal*, 2 (4), p: 243-255, 1980.
- [64] Diederichs, U. and Schneider, U., "Bond strength at high temperatures." *Magazine of Concrete Research*, 33(115), p: 75-84, 1981.
- [65] Yamazaki, N., Yamazaki, M., Mochida, T., Mutoh, A., Miyashita, T. and Ueda, M., "Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures." *Nuclear Engineering and Design*, 156 (1-2), p: 121-138, 1995.
- [66] El-Hawary, M. and Hamoush, S.A., "Bond shear modulus of reinforced concrete at high temperatures." *Engineering Fracture Mechanics*, 55, p: 991-999, 1996.
- [67] Katz, A. and Berman, N., "Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete." *Cement & Concrete Composites*, 22, p: 433-443, 2000.
- [68] Chiang, C.H., Tsai, C.L. and Kan, Y.C., "Acoustic inspection of bond strength of steel-reinforced mortar after exposure to elevated temperatures." *Ultrasonics*, 38, p: 534-536, 2000.
- [69] Chiang, C.H. and Tsai, C.L., "Time-temperature analysis of bond strength of a rebar after fire exposure." *Cement and Concrete Research*, 33, p: 1651-1654, 2003.
- [70] Haddad, R.H. and Abende, R., "Effect of thermal cycling on bond between reinforcement and fiber reinforced concrete." *Cement and Concrete Composites*, 26, p: 743-752, 2004.
- [71] Xiao, J. and König, G., "Study on concrete at high temperature in China-an overview." *Fire Safety Journal*, 39, p: 89-103, 2004.
- [72] Haddad, R.H. and Shannis, L.G., "Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel." *Construction and Building Materials*, 18, p: 425-435, 2004.
- [73] Hashimoto, J. and Takiguchi, K., "Experimental study on pullout strength of anchor bolt with an embedment depth of 30 mm in concrete under high temperature." *Nuclear Engineering and Design*, 229, p: 151-163, 2004.

- [74] Yuan, G.L., Guo, C., Li, Q.T. and Lu, Z.T., "Bond damage in reinforced concrete caused by cooling after high temperature." *Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao/Journal of China University of Mining and Technology*, 34 (5), p: 605-608, 2005.
- [75] Abbasi, A. and Hogg, P.J., "Temperature and environmental effects on glass fiber rebar: modulus, strength and interfacial bond strength with concrete." *Composites: Part B* 36, p: 394-404, 2005.
- [76] Wang, Y.C. and Kodur, V., "Variation of strength and stiffness of fibre reinforced polymer reinforcing bars with temperature." *Cement and Concrete Composites*, 27, p: 864-874, 2005.
- [77] Gamage, J.C.P.H., Al-Mahaidi, R. and Wong, M.B., "Bond characteristics of CFRP plated concrete members under elevated temperatures." *Composite Structures*, 75, p: 199-205, 2006.
- [78] Galati, N., Nanni, A., Dharani, L.R., Focacci, F. and Aiello, M.A., "Thermal effects on bond between FRP rebars and concrete." *Composites: Part A*, 37, p: 1223-1230, 2006.
- [79] Ünlüoğlu, E., Topçu, İ.B. ve Yalaman, B., "Yüksek sıcaklıkta kalmış yapılarda paspayının betonarme çelik donatı özelliklerine etkisi." *İMO Teknik Dergi*, Yazı 273, s: 4145-4155, 2007.
- [80] Wang, Y.C., Wong, P.M.H. and Kodur, V., "An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures." *Composite Structures*, 80, p: 131-140, 2007.
- [81] Bingöl A.F. and Gül R., "An experimental study on the compressive strength of concrete and bond strength between steel bars and concrete exposed to elevated temperatures up to 700°C." *3<sup>rd</sup> International Conference on the Concrete Future Proceedings*, p: 83-90, 2008.