

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARDA  
KULLANILAN MİNERAL KATKILARIN YÜKSEK  
SICAKLIK PERFORMANSINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harun KARAGÖZ

DANIŞMAN

Doç.Dr. Tayfun UYGUNOĞLU  
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Haziran, 2013

Bu tez çalışması 110M246 numaralı proje ile Tübitak tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARDA KULLANILAN MİNERAL  
KATKILARIN YÜKSEK SICAKLIK PERFORMANSINA ETKİSİ**

**Harun KARAGÖZ**

**DANIŞMAN**

**Doç.Dr. Tayfun UYGUNOĞLU**

**YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**Haziran, 2013**

## TEZ ONAY SAYFASI

Harun KARAGÖZ tarafından hazırlanan “Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Kullanılan Mineral Katkıların Yüksek Sıcaklık Performansına Etkisi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca ...../...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yapı Eğitimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç.Dr. Tayfun UYGUNOĞLU

**Başkan** : Prof.Dr. Bahri ERSOY İmza

Mühendislik Fakültesi,

**Üye** : Doç.Dr. Tayfun UYGUNOĞLU İmza

Mühendislik Fakültesi,

**Üye** : Yrd.Doç.Dr. İsmail ZORLUER İmza

Teknik Eğitim Fakültesi,

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

...../...../..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN

Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

.../.../...

**İmza**

**Harun KARAGÖZ**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARDA KULLANILAN MİNERAL KATKILARIN YÜKSEK SICAKLIK PERFORMANSINA ETKİSİ

Harun KARAGÖZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç.Dr. Tayfun UYGUNOĞLU

Bu çalışmada, farklı agrega ve mineral tipleri kullanılarak üretilen beton numunelerin, yüksek sıcaklık sonrası fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Harç üretimleri 0.50 su/bağlayıcı oranında ve %2 kimyasal katkı içeriğinde üretilmiştir. Mineral katkı tipi olarak da uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC), tuğla tozu (TT) ve kırma-taş tozu (KTT) kullanılmıştır. Mineral katkılar, %0, %10, %20 ve %30 oranlarında çimentoyla yer değiştirilerek kullanılmıştır. Harçların üretimlerinde çimento ve mineral katkıların toplamı olan bağlayıcı miktarı tüm serilerde 500 kg/m<sup>3</sup> olarak sabit tutulmuştur. Agrega olarak da 0-1 mm elek aralığında kırma kum kullanılmıştır. Beş farklı mineral katkı ve dört farklı mineral katkı içeriği olmak üzere toplam 20 farklı kendiliğinden yerleşen harç (KYH) serisi tasarlanmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde basınç ve eğilme dayanımı, fiziksel özelliklerin belirlenmesinde birim hacim ağırlık, görünen porozite ve su emme, ısı performansında ise ısı genleşme değerleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak yüksek sıcaklığa maruz kalacak yapıların betonlarında kireçtaşı esaslı agregaların tercih edilmesi sonucunda beton yapıların 800 °C'ye kadar deforme olması büyük ölçüde önlenmiş olunacağı saptanmıştır.

**2013, x + 80 sayfa**

**Anahtar kelimeler:** Kendiliğinden Yerleşen Beton; Kırma Kum; Mineral Katkılar; Fiziksel Özellik; Mekanik Özellik; Isıl Performans.

## **ABSTRACT**

Master's Thesis

### **EFFECT OF MINERAL ADDITIVES ON HIGH TEMPERATURE PERFORMANCE OF SELF-COMPACTING MORTARS**

Harun KARAGÖZ

Afyon Kocatepe University, Institute of Science  
Department of Education Building

**Supervisor:** Assoc.Prof. Tayfun UYGUNOĞLU

In this study, different types of mineral aggregate and concrete samples produced using the high-temperature post-analyzed changes the physical and mechanical properties. Mortars of 0.50 water / binder ratio of 2% and the content of the adduct produced. Type of mineral additives as fly ash (UK), silica fume (SD), blast furnace slag (YFC), brick dust (TT) and the breaking-stone powder (KTT) is used. Mineral additives, 0%, 10%, 20% and 30% in the modified cement used. Fees on the amount of binder which is the sum of all production batches of cement and mineral admixtures were kept constant at 500 kg/m<sup>3</sup>. Crushed sand is used as aggregate in the range of 0-1 mm sieve. Five different additives and 20 for a total of four different mineral additive content of different self-compacting mortar (KYH) is designed series. The determination of mechanical properties, compressive and flexural strength, determination of physical properties of bulk density, porosity and water absorption, thermal performance of the thermal expansion of the calculated values. As a result, the limestone-based concrete structures exposed to high temperatures as a result of aggregate concrete structures prefer to be deformed up to 800 °C whereabouts were largely prevented.

**2013, x + 80 pages**

**Key words:** Self-Compacting Concrete, Crushed Sand, Mineral Additives, Physical Properties, Mechanical Properties, Thermal Performance.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamı sürdürdüğüm dönemde, bana daima güler yüzlülüğüyle destek olan, çalışma disiplini sağlayan, gösterdiği büyük sabrı, öneri, eleştiri ve düzenlemeleriyle çalışmamın gerçekleşmesine büyük katkıda bulunan tez danışmanım saygıdeğer hocam, Sayın **Doç.Dr. Tayfun UYGUNOĞLU**' na,

Bu çalışmam da 110M246 Nolu Projesi tarafından beni destekleyen Tubitak'a,

Tez çalışmam süresince her türlü konuda desteklerini esirgemeyen Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Öğretim elemanlarının her birine ayrı ayrı teşekkür ederim. Deneysel çalışmaların yapımında destek sağlayan Sayın Kadir AKYÜZ' e,

Tez çalışmam ve akademik yaşantım boyunca gösterdiği büyük sabır, ilgi, hoşgörüsü ve manevi desteğinden dolayı sevgili eşime ve

Tüm yaşantım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok kıymetli aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Harun KARAGÖZ  
AFYONKARAHİSAR, 2013

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	4
2.1. Puzolan Katkılı Betonlar Ve Özellikleri.....	4
2.2. Betonun Yüksek Sıcaklık Altındaki Davranışı.....	6
2.3. Yüksek Sıcaklıkta Betonun Yapısı .....	6
2.4. Konu İle İlgili Yapılan Deneyler .....	7
3. MATERYAL ve METOT .....	10
3.1. Çimento.....	10
3.2. Silis Dumanı .....	10
3.3. Uçucu Kül .....	11
3.4. Yüksek Fırın Curufu .....	11
3.5. Tuğla Tozu.....	12
3.6. Taş Tozu .....	12
3.7. Harç Üretimleri .....	13
3.8. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	16



3.9. Isıl Performans Testlerinin Yapılması .....	18
4. BULGULAR .....	21
4.1. Taze Harç Özellikleri .....	21
4.2. Fiziksel Özelliklere Ait Sonuçlar .....	25
4.3. Mekanik Özelliklere Ait Sonuçlar .....	38
4.3.1. Eğilme ve Basınç Dayanımları .....	38
4.4. Isıl Performans Ait Sonuçlar .....	48
4.4.1. Isıl Genleşme .....	48
4.4.2. Isıl Faz Değişimleri .....	51
5. SONUÇLAR .....	55
6. KAYNAKLAR .....	57
ÖZGEÇMİŞ .....	61
EKLER .....	62

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

<b><math>\alpha</math></b>	Isıl Genleşme Katsayısı
<b>dL</b>	Birim Boy Değişimi
<b>dT</b>	Sıcaklık Farkı
<b>L<sub>0</sub></b>	Numunenin İlk Boyu
<b>W<sub>w</sub></b>	Kütlece Su Emme
<b>W<sub>0</sub></b>	Etüv Kurusu Halindeki Ağırlıkları
<b>W<sub>1</sub></b>	Suya Doygun Havada Ağırlıkları
<b>W<sub>2</sub></b>	Su İçerisinde Ağırlıkları

---

### Kısaltmalar

---

<b>BHA</b>	Birim Hacim Ağırlık (kg/dm <sup>3</sup> )
<b>CSH</b>	Kalsiyum Silika Hidrat
<b>GP</b>	Görünen Porozite
<b>KTT</b>	Kırma Taş Tozu
<b>KYB</b>	Kendiliğinden Yerleşen Beton
<b>KYH</b>	Kendiliğinden Yerleşen Harç
<b>PÇ</b>	Portland Çimentosu
<b>SD</b>	Silis Dumanı
<b>TT</b>	Tuğla Tozu
<b>UK</b>	Uçucu Kül
<b>YFC</b>	Yüksek Fırın Curufu

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Çimentonun ara yüz bölgesi.....	5
Şekil 3.1. CEM I-42.5/R tipi Portland çimentosu .....	10
Şekil 3.2. Silis dumanı.....	10
Şekil 3.3. Uçucu kül .....	11
Şekil 3.4. Yüksek fırın curufu .....	11
Şekil 3.5. Tuğla tozu .....	12
Şekil 3.6. Taş tozu .....	12
Şekil 3.7. a) Mini-çökmede yayılma ve b) harcın yayılma miktarının ölçümü.....	15
Şekil 3.8. (a)Harç yerleştirilmiş kalıplar (b)Kür havuzu.....	15
Şekil 3.9. Basınç ve eğilme presini .....	17
Şekil 3.10. Numunelere yüksek sıcaklığın uygulandığı kül fırını.....	17
Şekil 3.11.Yüksek sıcaklık uygulama periyodu .....	18
Şekil 3.12. Isıl genişlemenin ölçülmesinde kullanılan dilatometre.....	19
Şekil 3.13. Isıl genişleme numuneleri ve dilatometrede numune haznesi.....	19
Şekil 4.1. Harç yayılmasına UK mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi.....	22
Şekil 4.2. Harç yayılmasına SD mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi.....	23
Şekil 4.3. Harç yayılmasına YFC mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi.....	23
Şekil 4.4. Harç yayılmasına TT mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi.....	24
Şekil 4.5. Harç yayılmasına KTT mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi.....	24
Şekil 4.6. UK ' lı harçların birim hacim ağırlıkları.....	26
Şekil 4.7. SD ' li harçların birim hacim ağırlıkları .....	26
Şekil 4.8. YFC ' li harçların birim hacim ağırlıkları.....	27
Şekil 4.9. TT ' li harçların birim hacim ağırlıkları .....	27
Şekil 4.10. KTT ' li harçların birim hacim ağırlıkları.....	28
Şekil 4.11. UK ' lı harçların görünen porozite değerleri .....	28
Şekil 4.12. SD ' li harçların görünen porozite değerleri .....	29
Şekil 4.13. YFC ' li harçların görünen porozite değerleri .....	29
Şekil 4.14. TT ' li harçların görünen porozite değerleri .....	30

Şekil 4.15. KTT ' li harçların görünen porozite değerleri .....	30
Şekil 4.16. UK ' lı harçların ağırlıkça su emme değerleri .....	31
Şekil 4.17. SD ' li harçların ağırlıkça su emme değerleri .....	31
Şekil 4.18. YFC ' li harçların ağırlıkça su emme değerleri .....	32
Şekil 4.19. TT ' li harçların ağırlıkça su emme değerleri .....	32
Şekil 4.20. KTT ' li harçların ağırlıkça su emme değerleri .....	33
Şekil 4.21. Mineral katkı içeriği %10 olan harçlarda birim hacim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması.....	34
Şekil 4.22. Mineral katkı içeriği %20 olan harçlarda birim hacim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması.....	34
Şekil 4.23. Mineral katkı içeriği %30 olan harçlarda birim hacim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması.....	35
Şekil 4.24. Mineral katkı içeriği %10 olan harçlarda görünen porozite değerlerinin karşılaştırılması.....	35
Şekil 4.25. Mineral katkı içeriği %20 olan harçlarda görünen porozite değerlerinin karşılaştırılması.....	36
Şekil 4.26. Mineral katkı içeriği %30 olan harçlarda görünen porozite değerlerinin karşılaştırılması.....	36
Şekil 4.27. Mineral katkı içeriği %10 olan harçlarda su emme değerlerinin karşılaştırılması.....	37
Şekil 4.28. Mineral katkı içeriği %20 olan harçlarda su emme değerlerinin karşılaştırılması.....	37
Şekil 4.29. Mineral katkı içeriği %30 olan harçlarda su emme değerlerinin karşılaştırılması.....	38
Şekil 4.30. UK ' lı harçların basınç dayanımları .....	39
Şekil 4.31. SD ' li harçların basınç dayanımları .....	40
Şekil 4.32. YFC ' li harçların basınç dayanımları .....	40
Şekil 4.33. TT ' li harçların basınç dayanımları .....	41
Şekil 4.34. KTT ' li harçların basınç dayanımları .....	41
Şekil 4.35. Mineral katkı içeriği %10 olan harçlarda basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.....	42

<b>Şekil 4.36.</b> Mineral katkı içeriği %20 olan harçlarda basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.....	42
<b>Şekil 4.37.</b> Mineral katkı içeriği %30 olan harçlarda basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.....	43
<b>Şekil 4.38.</b> UK ' lı harçların eğilme dayanımları.....	44
<b>Şekil 4.39.</b> SD ' li harçların eğilme dayanımları .....	44
<b>Şekil 4.40.</b> YFC ' li harçların eğilme dayanımları.....	45
<b>Şekil 4.41.</b> TT ' li harçların eğilme dayanımları.....	45
<b>Şekil 4.42.</b> KTT ' li harçların eğilme dayanımları.....	46
<b>Şekil 4.43.</b> Mineral katkı içeriği %10 olan harçlarda eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.....	46
<b>Şekil 4.44.</b> Mineral katkı içeriği %20 olan harçlarda eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.....	47
<b>Şekil 4.45.</b> Mineral katkı içeriği %30 olan harçlarda eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.....	47
<b>Şekil 4.46.</b> UK ' lı harçların ısı genleşme katsayıları .....	48
<b>Şekil 4.47.</b> SD ' li harçların ısı genleşme katsayıları.....	49
<b>Şekil 4.48.</b> YFC ' li harçların ısı genleşme katsayıları .....	49
<b>Şekil 4.49.</b> TT ' li harçların ısı genleşme katsayıları .....	50
<b>Şekil 4.50.</b> KTT ' li harçların ısı genleşme katsayıları .....	50
<b>Şekil 4.51.</b> UK ' lı harçların sıcaklığa bağlı ısı faz değişimleri.....	52
<b>Şekil 4.52.</b> SD ' li harçların sıcaklığa bağlı ısı faz değişimleri .....	52
<b>Şekil 4.53.</b> YFC ' li harçların sıcaklığa bağlı ısı faz değişimleri.....	53
<b>Şekil 4.54.</b> TT ' li harçların sıcaklığa bağlı ısı faz değişimleri.....	53
<b>Şekil 4.55.</b> KTT ' li harçların sıcaklığa bağlı ısı faz değişimleri.....	54

## ÇİZELGELER DİZİNİ

**Sayfa**

<b>Çizelge 2.1.</b> Mineral katkıların taze betona etkileri .....	5
<b>Çizelge 2.2.</b> Mineral katkıların sertleşmiş betona etkileri.....	5
<b>Çizelge 3.1.</b> Çimento ve mineral katkıların karakteristik özellikleri .....	13
<b>Çizelge 3.2.</b> Numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler.....	16

## 1. GİRİŞ

Beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla oluşturulan bir yapı malzemesidir. Betonun oluşturulmasında çimento hamurunun işlevi, agrega tanelerinin yüzeylerini kaplamak, agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurmak ve agrega tanelerini bir arada tutacak tarzda bağlayıcılık sağlamaktır. Bu bakımdan beton, çimento hamurundan ve agregalardan oluşan kompozit bir malzeme olarak da tanımlanabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Beton yeni karıldığında taze beton adını alırken, katılaşıp dayanım kazanınca sertleşmiş beton adını alır. Taze betonda işlenebilirlik, sertleşmiş betonda ise dayanım ve dayanıklılık özellikleri betonda aranan en mühim özelliklerdir. Öte yandan büyük miktarlarda kullanıldığı için betonun en ekonomik şekilde üretilmesi beton teknolojisi için çok önemlidir. Kaliteli bir beton, kaliteli malzemeler ve deneyimli elemanlarla belirli kurallara ve standartlara uyularak yapılabilir (Topçu, 2006).

Betonda dayanıklılık problemine neden olan başlıca fiziksel etkilerden biri yüksek sıcaklıktır. Yüksek sıcaklık yapılar da kalıcı hasarlar oluşturarak, yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına sebep olabilmektedir (Aydın ve Baradan, 2003).

Bu kadar sık tüketilen bir malzemenin de teknolojiye eşdeğer gelişme göstermesi kaçınılmazdır. Bileşenleri açısından önceleri sadece su, çimento ve agregadan oluşan beton, bünyesine kimyasal ve mineral katkıların girmesiyle pek çok olumlu özellik kazanmıştır. Günümüzün modern beton teknolojisinde neredeyse kimyasal ve mineral katkısız bir beton üretilmez hale gelmiştir (Felekoğlu vd., 2004).

Yüksek oranda su azaltma yeteneğine sahip akışkanlaştırıcılar aynı zamanda taze betonun işlenebilirliğini de arttırmaktadır. Yüzyılımızda beton teknolojisini yepyeni boyutlara taşıyan farklı tipteki süperakışkanlaştırıcı katkıları sayesinde beton,

performansı açısından yüksek dayanımı, dayanıklılığı ve taze haldeki işlenebilirliği ile “yüksek performanslı beton” olarak anılmaya başlanmıştır (Ünal vd., 2006; Özkul, 2005).

Yüksek dayanımlı beton sınıfında olan bir beton türü de kendiliğinden yerleşen betondur. Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), dahili veya harici vibrasyon kullanılmadan kalıbına yerleştirilen ve sıkıştırılan betonlar olarak tanımlanmaktadır. KYB’ler konuldukları kabın içerisine yüksek akışkanlıklarından dolayı herhangi bir vibrasyon yapılmaksızın kendi ağırlıklarıyla boşluksuz bir şekilde yerleşir, donatının etrafını sıkıca sarar ve beton içerisinde çok düşük oranda boşluk kalarak (porozitesi düşük) kalıbı doldurur (Leemann vd., 2006).

KYB’nin özel reolojik gereksinimlerinden dolayı hem hidrasyon ısısından dolayı çimento miktarını düzenlemek hem de viskoziteyi düzenleyerek ve akışkanlığı sağlayarak işlenebilirliği düzenlemek için filler (dolgu) malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemeler genellikle kırmataş tozu, uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş cam tozu gibi filler malzemelerdir (Efnarc, 2002). Ancak gün geçtikçe KYB üzerine yapılan çalışmalarla bu filler malzemelerden başka, özellikle atık durumdaki malzemelerin filler malzeme olarak KYB içerisinde kullanımları araştırılmaktadır. Bu malzemelerden bazıları da öğütülmüş tuğla tozu ve mermer tozudur. KYB’de kullanılacak olan filler malzemelerde aranan en önemli özelliklerden biri en büyük tane çapı olup genellikle 0.125 mm’nin altında olması istenir. Bu durumda KYB üretiminde kullanılan kum ve agregta içerisinde bulunabilecek 0.125 mm altındaki ince maddeler de filler malzeme içerisine dahil edilmelidir. Filler malzemelerin optimum kullanım miktarları bu maddelerin mineralojik kökenine ve mekanik performansına bağlıdır. Örneğin, silis dumanı toplam toz miktarının (çimento+silis dumanı) 400 ile 450 kg/m<sup>3</sup> arasında olduğu bir KYB’de 50 kg/m<sup>3</sup> içeriğinde kullanılırken, uçucu kül toplam toz miktarının 500 ile 600 kg/m<sup>3</sup> arasında olan bir KYB’de 100 ile 150 kg/m<sup>3</sup> içeriğinde kullanılmaktadır (Uygunoğlu, 2008).



Bu çalışmada, farklı agrega ve mineral tipleri kullanılarak üretilen beton numunelerin, yüksek sıcaklık sonrası fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Beton numunelerinde kullanılan malzemelerin oranlara bağlı olarak ortaya çıkan değişiklikler, farklı mineral katkıların yüksek sıcaklık sonrası değişimlerine bağlıdır.

Amaç; deneyler sonucu ortaya çıkan farklılıkları, mineral tipi ve uygulanan yüksek sıcaklık göz önünde bulundurarak kendi aralarında bir değerlendirme sunmaktır.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1. Puzolan Katkılı Betonlar Ve Özellikleri

Puzolanik malzemenin yeterli bağlayıcılığı gösterebilmesi için aşağıdaki koşulları sağlamış olması gerekmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2006):

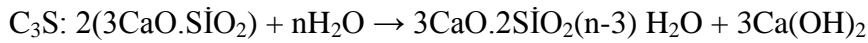
- İçerdiği silika ve alümina miktarı yüksek olmalıdır. (Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzolanlardaki “SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>” miktarının en az %70 olması istenmektedir.)
- Amorf yapıya sahip olmalıdır.
- Doğal haliyle çok ince taneli durumda, veya öğütülerek en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmalıdır.

Puzolanik katkı maddelerinin dışında kalan her türdeki katkı maddesinin beton karışımında kullanıldıkları miktarlar çok az olmakla birlikte, puzolanik katkı maddelerinin kullanıldıkları miktarlar, genel olarak, çimento miktarının %10 - %50’si kadardır (Erdoğan ve Erdoğan, 2006; Ramachandran, 1995).

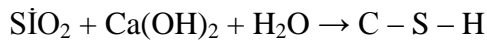
Puzolanik aktivite; (Ün, 2007)

Çimentonun karma oksitlerinin hidratasyonu sonucu Ca(OH)<sub>2</sub> oluşur,

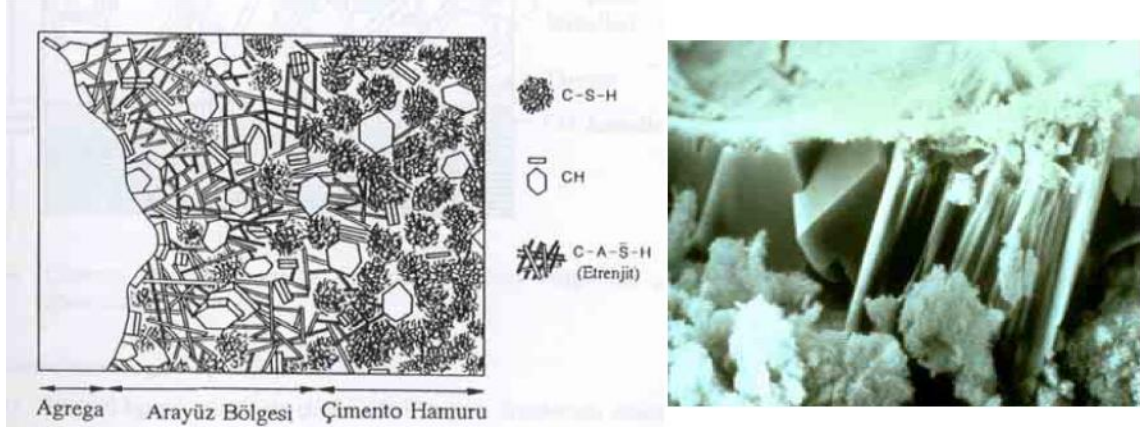
C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>S



Bu Ca(OH)<sub>2</sub> ile bünyesinde aktif silis içeren puzolan reaksiyona girerek C-S-H oluşturur.



Şekil 2.1’de gösterildiği gibi çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)<sub>2</sub> genelde agrega üzerine çöker, puzolanlar Ara yüz bölgesini puzolanik etki nedeniyle güçlendirirler (Ün, 2007).



Şekil 2.1. Çimentonun ara yüz bölgesi (Ün, 2007)

Sonuç olarak Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de mineral katkıların taze ve sertleşmiş betona etkileri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Mineral katkıların taze betona etkileri (Ün, 2007)

	↓ Azalır ↑ Artar	↔ Hiç/Az Etki ↔ Değişir	Uçucu kül	Curuf	Silika Dumanı	Doğal Puzolan
Su İhtiyacı	↓	↔	↓	↓	↑	↔
İşlenebilirlik	↑	↔	↑	↑	↓	↑
Terleme, Ayrışma	↓	↔	↓	↔	↓	↔
Hava miktarı	↓	↔	↓	↔	↓	↔
Hidratasyon Isısı	↓	↔	↓	↓	↔	↓
Priz süresi	↑	↔	↑	↑	↔	↔
Mastarlanma	↑	↔	↑	↑	↔	↑

Çizelge 2.2. Mineral katkıların sertleşmiş betona etkileri (Ün, 2007)

	↓ Azalır ↑ Artar	↔ Hiç/Az Etki ↔ Değişir	Uçucu kül	Curuf	Silika Dumanı	Doğal Puzolan
Dayanım kazanma hızı	↔	↔	↔	↔	↑	↔
Sürtünme dayanımı	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Donma-çözülme buz çözücü tuzlara karşı dayanım	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Kuruma büzülmesi, sünme	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Geçirimsizlik	↓	↔	↓	↓	↓	↓
Alkali Silika Reaksiyonu	↓	↔	↓	↓	↓	↓
Kimyasal dayanıklılık	↑	↔	↑	↑	↑	↑

## 2.2. Betonun Yüksek Sıcaklık Altındaki Davranışı

Yangın, binalarda her zaman karşılaşılabilecek bir tehlikedir. Gelişen teknoloji ve sanayileşmenin artması, nüfusun giderek çoğalmasına paralel olarak toplu yerleşim bölgelerin fazlaşması yangın riskinin ve buna bağlı olarak yangının maddi ve manevi zararlarının artışına neden olmaktadır (Bingöl, 2009).

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 (Kocataşkın, 2000).

Beton bir bütün olarak düşünüldüğünde, genellikle içindeki bileşenlerin (agrega ve çimento hamuru) termal genleşmelerinin birbirinden farklı olduğu bilinir. Bu nedenle betonda sıcaklık değişimleri içindeki bileşenlerde, birbirinden farklı hacim değişmelerine, çatlak oluşumuna ve betonun dayanıklılığının azalmasına sebep olur. Bu olay "betondaki bileşenlerin termal uyumsuzluğu" olarak bilinmektedir (Riley, 1991; Hammer, 1995).

## 2.3. Yüksek Sıcaklıkta Betonun Yapısı

Yangın sırasında sıcaklık 600 °C yi aşmakta hatta 1200 °C ye ulaşmaktadır. Betonun yüksek sıcaklıktan etkilenmesi betonun bileşenlerine, betondaki nem miktarına, beton yaşına, çimento, mineral ve agrega tipine bağlı olarak değişir (Akman, 2000).

Jel yapıyı oluşturan CSH (kalsiyum silika hidrat) katı ögeleri adsorpsiyon suyu ile birbirlerine bağlanırlar. Jel adsorbe suyu ve CSH jelinin hidrat suları kolaylıkla buharlaşmazlar. Bununla birlikte daha geniş boşluklarda bulunan serbest su 100 °C

civarında buharlaşıp uçabilir. Yangının ilk aşamasında buharlaşan bu su, betonun büzülmesine neden olur. Çimento türüne ve su-çimento oranına bağlı olarak serbest su, sıcaklığın artışıyla betonun % 4'üne kadar ulaşır. Bu suyun kaybı ile oluşacak büzülme ve beton içinde beliren buhar basıncı, beton örtüsünün çatlamasına ve parçalanarak kopmasına yol açar. Çimento hamurunda CSH yanında bulunan diğer bileşen de  $\text{Ca(OH)}_2$  (kalsiyum hidroksit)'dir.

CSH'in kimyasal suyu ve jel suyu 300 °C'den itibaren kaybolmaya başlar ve 530 °C civarında  $\text{Ca(OH)}_2$  suyunu kaybederek  $\text{CaO}$ 'de dönüşür. Yangın esnasında sıkılan su, oluşan  $\text{CaO}$ 'in tekrar  $\text{Ca(OH)}_2$  dönüşmesini sağlar. Boşluklu bir yapıya dönmüş olan betonda yangın sonrası yapılan incelemelerde kireç lekeleri gözlenmektedir (Türker, 2003; Aydın ve Baradan, 2003).

#### **2.4. Konu İle İlgili Yapılan Deneyler**

Betonların yüksek sıcaklık altında davranışları, içinde yaşayanların can güvenliği ve yapıların durabilitesi açısından oldukça önemlidir. Günümüze kadar betonun yüksek sıcaklık altındaki davranışları üzerine gerçekleştirilmiş olan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Zoldners ve Wilson (1973) yaptıkları çalışmada, genleşmiş 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.

Saad vd (1996) normal Portland çimentosu yerine ağırlıkça %10, %20, %30 oranlarında silis dumanı içeren betonların mekanik ve fiziksel özelliklerine yüksek sıcaklıkların etkisini incelemişlerdir. 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.

Phan ve 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.

Poon vd (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.

Aydın ve 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.

Çalışmamız yukarıdaki literatür çalışmalarına kıyasla, bağlayıcıya eklenen mineral katkı çeşidi ve oranları, yüksek sıcaklık miktarları bakımından çok kapsamlı bir proje gerçekleştirilmiştir. Projemiz kapsamındaki hedefimiz, istenilen teknolojiyi elde etmeye çalışmaktır.

### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1. Çimento

Harç karışımlarının hazırlanmasında hidrolik bağlayıcı olarak TS EN 197-1 (2008) standardına uygun olarak üretilmiş olan CEM I-42.5/R tipi Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır (Şekil 3.1). Çimentonun özgül ağırlığı 3.07 olup toplam alkali içeriği %0.65'dir. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. CEM I-42.5/R tipi Portland çimentosu

#### 3.2. Silis Dumanı

Silis dumanı Etibank Antalya Elektrometalürji Sanayi işletmesi kurumundan temin edilmiştir (Şekil 3.2). Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Silis dumanı



### 3.3. Uçucu Kül

Uçucu kül Tunçbilek termik santralinden temin edilmiştir (Şekil 3.3). Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Uçucu kül

### 3.4. Yüksek Fırın Curufu

Yüksek fırın cürufu Bolu’da bir çimento fabrikasından temin edilmiştir (Şekil 3.4). Yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Yüksek fırın curufu

### 3.5. Tuğla Tozu

Tuğla tozu, tuğla fabrikalarında pişmiş olan tuğlaların nakliye veya taşıma sırasında veya inşaatlarda kırılması sonucu kullanılamaz hale gelen atık tuğlaların öğütülmeleri sonucunda elde edilmiştir. Tuğla kırıkları öğütülerek toz haline getirilmiş ve 0.125 mm'lik elekten geçirilerek kullanılmıştır (Şekil 3.5). Tuğla tozuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Tuğla tozu

### 3.6. Taş Tozu

Taş tozları bir hazır beton fabrikasından temin edilmiş ve 0.125 mm'lik elekten geçirilerek kullanılmıştır (Şekil 3.6). Taş tozuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Taş tozu

Çizelge 3.1. Çimento ve mineral katkıların karakteristik özellikleri

Bileşen, %	Çimento	Yüksek F. Üçucu Cürufu	Uçucu Kül	Silis Dumanı	Tuğla Tozu	Kırmetaş Tozu
CaO	63.6	39.8	6.66	1.48	4.56	51.4
SiO <sub>2</sub>	16.6	32.8	47.4	74.7	50.7	2.96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.72	11.8	19.8	0.46	23.8	1.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.27	1.45	11.8	0.84	8.32	0.2
<i>S+A+F</i>	-	<i>46.05</i>	<i>79.0</i>	<i>76.0</i>	<i>82.8</i>	<i>4.3</i>
MgO	1.91	4.15	4.76	3.64	2.28	1.0
Na <sub>2</sub> O	0.34	0.51	0.57	0.85	0.98	0.03
K <sub>2</sub> O	1.06	0.91	2.62	5.05	4.34	0.14
SO <sub>3</sub>	4.72	2.06	1.86	2.48	0.98	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.02	0.13	2.83	0.03	-
TiO <sub>2</sub>	0.41	0.63	0.88	0.63	1.1	0.07
K.K.	2.69	2.2	2.76	5.97	2.45	42.9
Özgül ağırlık	3.07	2.8	1.99	2.44	2.73	2.72
İncelik						
(Özgül yüzey alanı), cm <sup>2</sup> /g	3312	4982	3126	14000	3954	2427

Çimento ve mineral katkıların karakteristik özelliklerine bakıldığında; bağlayıcılık oranına büyük etkisi olan CaO miktarının en yüksek değerleri çimento ve yüksek fırın curufunda bulunmaktadır, betonun işlenebilirliği ve boşluksuz bir yapı oluşturabilmek için ise özgül yüzey alanında cm<sup>2</sup>/g olarak en yüksek değer silis dumanına aittir.

### 3.7. Harç Üretimleri

Harç üretimleri 0.50 su/bağlayıcı oranında ve %2 kimyasal katkı içeriğinde üretilmiştir. Mineral katkı tipi olarak da uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC), tuğla tozu (TT) ve kırma-taş tozu (KTT) kullanılmış olup bu katkıların

karakteristik özellikleri Çizelge 3.1’te sunulmuştur. Mineral katkıları, %0, %10, %20 ve %30 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Harçların üretimlerinde çimento ve mineral katkıların toplamı olan bağlayıcı miktarı tüm serilerde  $500 \text{ kg/m}^3$  olarak sabit tutulmuştur. Agrega olarak da 0-1 mm elek aralığında kırma kum kullanılmıştır. Beş farklı mineral katkı ve dört farklı mineral katkı içeriği olmak üzere toplam 20 farklı kendiliğinden yerleşen harç (KYH) serisi tasarlanmıştır. Kendiliğinden yerleşen harç, kırma kum olmayan çimento hamuruna denilmektedir.

Harç üretimleri, kapasitesi yaklaşık 5 lt olan harç mikseri ile gerçekleştirilmiştir. Harçların karışımında, agrega ve ince malzemeler ile 1 dakika boyunca kuru karışım yapıldıktan sonra karışım suyunun yaklaşık üçte ikisi karışıma ilave edilmiştir. Kalan su içerisinde kimyasal katkı çözülerek karışıma katılmış ve 3 dakika daha karışıma devam edilmiştir. Her karışımında, yüzeyi düzgün metal bir tabla üzerinde mini-çökmede yayılma deneyi gerçekleştirilmiştir. Her deneyden önce çökmede-yayılma konisi nemli bir bezle nemlendirilmiş ve harç ile metal yüzey arasındaki sürtünmeler ihmal edilmiştir. Çökmede-yayılma deneyi için yüksekliği 50 mm; alt ve üst genişlikleri de sırasıyla 100 mm ve 50 mm olan koni kullanılmıştır. Çökme deneyinden sonra yayılan harcın çapı birbirine dik iki doğrultuda ölçülerek iki ölçümün aritmetik ortalaması alınmıştır (Şekil 3.7).



(a)

(b)

Şekil 3.7. a) Mini-çökmede yayılma ve b) harcın yayılma miktarının ölçümü

Hazırlanan karışımlar 40x40x160 mm boyutlu prizmatik kalıplara konulmuştur. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan alınarak  $20\pm 2$  °C kirece doymun su içerisinde kür edilmiştir (Şekil 3.8).



(a)

(b)

Şekil 3.8. (a)Harç yerleştirilmiş kalıplar (b)Kür havuzu

Numuneler üzerinde belirlenen mekanik, fiziksel ve ısıl özellikler aşağıdaki Çizelge 3.2’de verilmiştir:

Çizelge 3.2. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler

Özellik	Deney adı	Numune boyutu ve tipi (mm)	Numune yaşı (gün)	Maruz bırakılacak sıcaklık (°C)	İlgili standart
Isıl Performans	Isıl genleşme	Ø5x25	28	20-1000 °C	ASTM
		silindirik			E228-11
Mekanik Özellik	Eğilmede dayanımı	40x40x160 prizma	28	20, 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C	TS EN 12390-5
	Basınç Dayanımı	40x40x40 küp	28	20, 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C	TS EN 12390-3/AC
Fiziksel Özellik	Su emme (ağırlıkça)	40x40x160 prizma	28	20, 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C	TS EN 12390-7
	Birim hacim ağırlık	40x40x160 prizma	28	20, 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C	TS EN 12390-7
	Görünen porozite	40x40x160 prizma	28	20, 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C	TS EN 12390-7

### 3.8. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Deneyle mekanik özelliklerden başlanılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde Şekil 3.9’da verilen tam otomatik basınç ve eğilme presi kullanıldı. Basınç presinin kapasitesi 200 kN olup, eğilme presinin kapasitesi de 50 kN’dur. Eğilme deneyi ortadan yükleme tipiyle 120 mm mesnet açıklığında gerçekleştirildi. Eğilme testi sırasında ikiye ayrılan numuneler TS 12390-3 standardına göre basınç testi için kullanılmıştır. Numunelerin alt ve üstüne aynı düşey eksen çizgisindeki mesafeye gelecek şekilde

40x40 mm plakalar yerleştirilmiştir. Bu halde basınç presi tablaları arasına yerleştirilen numunelere basınç yükü uygulanarak ilgili yaşlarda dayanım değerleri belirlenmiştir.

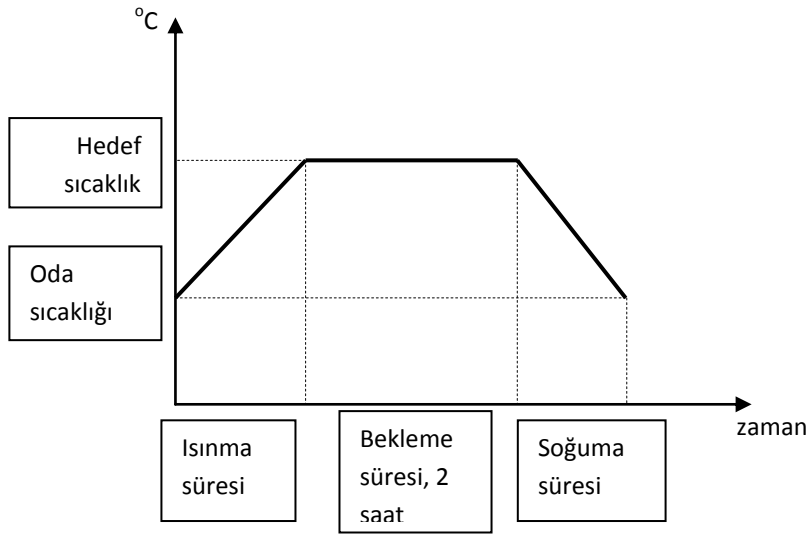


Şekil 3.9. Basınç ve eğilme presi

Mekanik özellikler, Çizelge 3.2 'de belirtildiği gibi 28 günlük numuneler ile farklı sıcaklıklara tabi tutulan numunelerde de yukarıda anlatıldığı şekilde belirlenmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklığa dayanıklılık testine maruz bırakılmadan önce nem farkından dolayı deney sonuçlarının farklılık göstermemesi için 105 °C'de etüv kurusu duruma getirilmişlerdir. Daha sonra Çizelge 3.2' de verilmiş olan sıcaklıklarda Şekil 4.4'de verilen 5 °C/dak ısınma sağlayan Protherm marka kül fırını içerisinde 2 saat net olarak bekletildiler. Bütün numuneler (40x40x160 mm) fırın içerisine yan yüzeylerin eşit sıcaklığa maruz kalmalarını sağlamak amacıyla alın kısımları ısınan tellere bakacak şekilde yerleştirildi. Fırın içerisindeki yüksek sıcaklıkta bekletilen süre sonunda fırın kapatılarak numunelerin fırın içerisinde oda sıcaklığına kadar soğuması sağlanmıştır. Şekil 3.11'de uygulanan yüksek sıcaklık programı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Numunelere yüksek sıcaklığın uygulandığı kül fırını



Şekil 3.11. Yüksek sıcaklık uygulama periyodu

Oda sıcaklığına ulaşan numuneler üzerinde mekanik özellikler ile birim hacim ağırlık, görünen porozite ve ağırlıkça su emme gibi fiziksel özellikler belirlenmiştir. KYH'lerin fiziksel özellikleri kapsamında, oda koşullarından başlayarak 1000 °C'ye kadar yüksek sıcaklığa dayanıklılık testine maruz bırakılmış olan numunelerde Arşimet prensibine göre numunelerin etüv kurusu halindeki ( $W_o$ ) suya doymun havada ( $W_1$ ) ve su içerisinde ( $W_2$ ) ağırlıkları alındıktan sonra Denklem 1, Denklem 2 ve Denklem 3 kullanılarak sırasıyla yoğunluk (BHA) ve görünen porozite (GP) ve ağırlıkça su emme ( $W_w$ ), değerleri belirlenmiştir.

$$BHA = \frac{W_o}{(W_1 - W_2)} \quad (3.1)$$

$$GP = \frac{(W_1 - W_o)}{(W_1 - W_2)} \times 100 \quad (3.2)$$

$$W_w = \frac{W_o}{(W_1 - W_o)} \times 100 \quad (3.3)$$

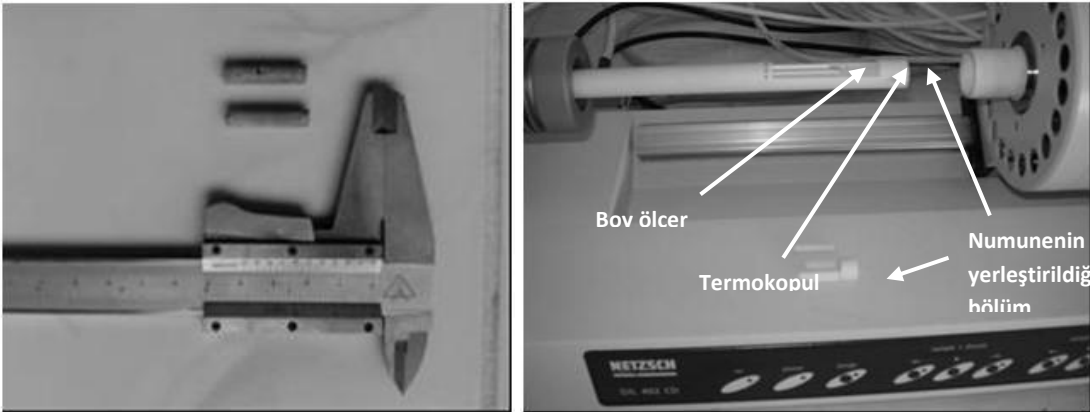


### 3.9. Isıl Performans Testlerinin Yapılması

Farklı tipte mineral katkı içeren kendiliğinden yerleşen betonların harç fazının doğrusal boy değişimlerinin ölçülmesiyle ısıl genleşme ve buna bağlı parametreler elde edilmiştir. Bunun için Şekil 3.12’de verilen çapı 5 mm ve boyu 25 mm olan silindirik numuneler ile termal expansion olarak adlandırılan ve diğer adıyla dilatometre olarak bilinen -180~1600 °C arasında sıcaklık uygulayabilen NETZSCH DIL 402 CD/4 tipi dilatometre kullanılmıştır.



Şekil 3.12. Isıl genleşmenin ölçülmesinde kullanılan dilatometre



Şekil 3.13. Isıl genleşme numuneleri ve dilatometrede numune haznesi

Dilatometrenin numune haznesinde iki adet numune koyma yeri, numune yüzey sıcaklıklarını ölçen termokopul ve numunelerin sıcaklık değişimiyle boylarında oluşan değişimi doğrusal olarak ölçen boy ölçer bulunmaktadır (Şekil 3.13). Numune haznesine silindirik veya kare biçimi ve en fazla 5 mm çapında veya kalınlığında numune yerleştirilebilmektedir. Deneysel çalışmalarda 5 mm çapında ve 25 mm boyunda silindirik harç numuneleri kullanılmıştır. Numuneler 50 °C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelinceye kadar etüvde kurutulmuşlardır. Kurutma işlemi tamamlanmış olan numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra, ikişer adet olmak üzere dilatometre cihazının numune bölümüne yerleştirilmiş ve raylı sistem üzerinde yatay olarak hareket eden fırın bölümü numunelerin üzerine getirilerek sabitlenmiştir. Daha sonra cihaza bağlı bilgisayar yazılımları ve güç kaynakları ile dilatometreye sıcaklık uygulanmaya başlanmıştır. Numuneye sıcaklık uygulanmasında sıcaklık aralığı başlangıç 17 °C, bitiş sıcaklığı da 1000 °C olarak dinamik sıcaklık uygulama programı seçilmiştir. Sıcaklık artışı 5 °C/dak olarak belirlenmiştir. Her bir deney 3 saat 17 dak sürmüştür. Ölçüm işlemi tamamlandıktan sonra, bilgisayarda cihaza ait program yazılımı aracılığıyla analiz yapılarak, numunede sıcaklık değişimine bağlı olarak oluşan doğrusal boy değişimi elde edilebilmektedir. Isıl genleşme katsayısı ( $\alpha$ ) aşağıda verilen Denklem (5) yardımıyla belirlenmiştir.

$$dL = \alpha \cdot L_0 \cdot dT \quad (3.4)$$

KYB'nin ısıl genleşme katsayısı ( $\times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ );  $dL$ , numunede oluşan birim boy değişimi (mm);  $dT$ , sıcaklık farkı ( $^\circ\text{C}$ );  $L_0$ , numunenin ilk boyunu simgelemektedir.

## 4. BULGULAR

### 4.1. Taze Harç Özellikleri

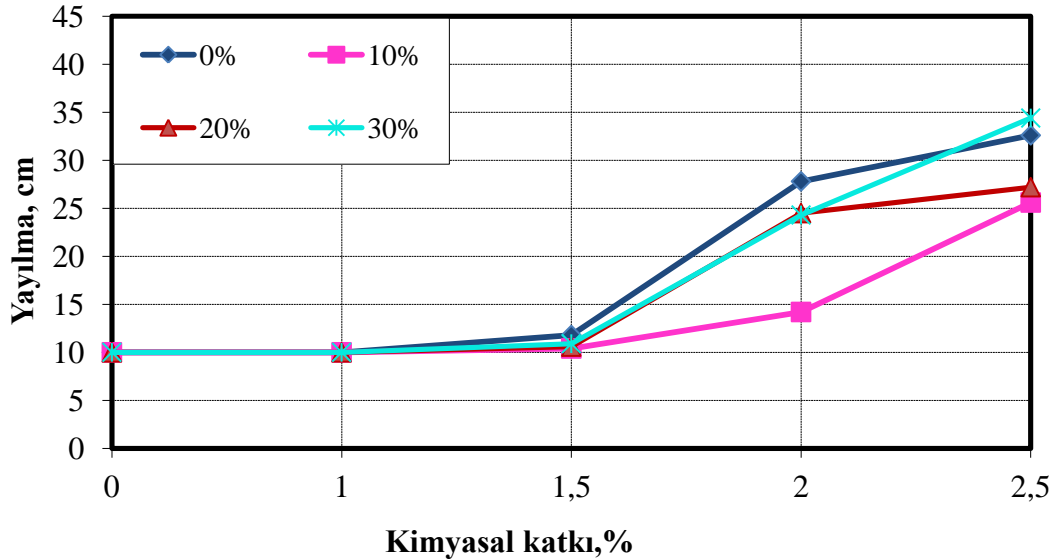
Farklı tip ve oranlarda mineral katkı ve yine değişik oranlarda kimyasal katkı içeren KYH'lerin serbest mini-çökmede yayılma deneyleri kırma kum ile gerçekleştirilmiş olup, kırma kumla üretilen harçlar için Şekil 3.7'de verilmiştir. Genel olarak mineral katkının çimentoyla yer değiştirilme oranı arttıkça harçlarda özgül ağırlıkları çimentoya göre daha düşük olan mineral katkıların daha fazla yüzey alana sahip olmaları nedeniyle artan su gereksiniminden dolayı yayılma özellikleri azalmıştır. Ancak UK ve YFC serilerinde %20 üzeri yer değiştirme oranlarındaki harçlarda kontrol harçlara göre yaklaşık aynı özellikte yayılma elde edilmiştir. Bu da mineral katkıların yüzey yapılarından dolayı harcın işlenebilirliği arttırdığının göstergesidir. Diğer yandan KTT'nin kullanıldığı harçlarda, KTT yer değiştirme oranı arttıkça harçların yayılma özellikleri de artmıştır. KTT, çimentoya göre daha iri tane büyüklüğüne sahip olduğundan yer değiştirme oranı arttıkça harç içerisindeki suyla kaplanacak yüzey alanı da azalmış ve buna bağlı olarak da su gereksinimi de azalmıştır. Dolayısıyla herhangi bir kimyasal içeriğinde KTT'nin yer değiştirme oranının artırılmasıyla daha fazla yayılma değerine sahip KYH'ler elde edilmiştir. Tüm mineral katkı içerikleri için yaklaşık %1.5 oranında kimyasal katkı içeriğine kadar KYH'lerde önemli derecede yayılma özeliği elde edilmemiştir. Bununla birlikte %2 oranı ve sonrasında belirgin bir şekilde harçların yayıldığı görülmüştür. Sabit su-bağlayıcı oranındaki harçlarda %1.5 kimyasal katkı içeriğine kadar taneciklerin etrafını saracak ve arada film tabakası oluşturarak taneler arasındaki sürtünmenin azaltılması ve böylece "kayma eşik gerilmesinin" aşılması sağlanamamıştır (Roussel vd., 2005).

Ancak %2 katkı sonrasında harçlardaki eşik gerilmeleri aşılabildiğinden KYH'lerde fark edilir derecede yayılmalar elde edilmiştir. Özellikle %1 kimyasal katkı oranından sonra kimyasal katkı miktarının artmasıyla birlikte harçlar akışkanlık kazanarak yayılma çapları artmaya başlamasıyla birlikte en fazla yayılma değerleri %2.5 kimyasal katkı içeriğinde elde edilmiştir. Hem mineral hem de kimyasal katkı kullanımıyla yayılma özelliklerinde %1.5 oranına kadar önemli bir değişim görülmezken, %2 ve %2.5

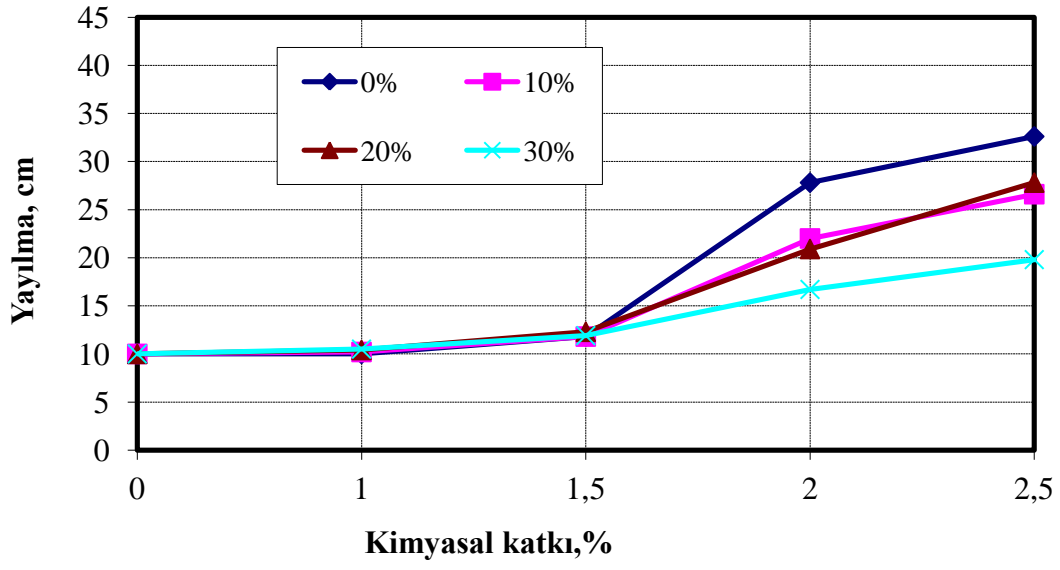
oranında kimyasal katkı kullanılması durumunda çimento-mineral-kimyasal katkı etkileşimi ortaya çıkmıştır.

UK ve SD'nin kullanıldığı harçlarda %2 kimyasal katkı oranında yayılma değerleri yaklaşık olarak 15 ile 27 cm arasında değerler almıştır. YFC'li harçlarda %2 katkı oranında yayılma çapları 28-30 cm arasında iken TT ve KTT serilerinde yayılma çapları aynı katkı içeriğinde yaklaşık 24-28 cm arasında değerler almıştır. En fazla yayılma çapı %2.5 kimyasal katkı oranında %30 UK içeren serilerde elde edilmiştir. YFC'li serilerde 34 cm yayılma çapı elde edilirken, diğer mineral katkıların kullanıldığı serilerde de en fazla yayılma değeri 33 cm olarak elde edilmiştir.

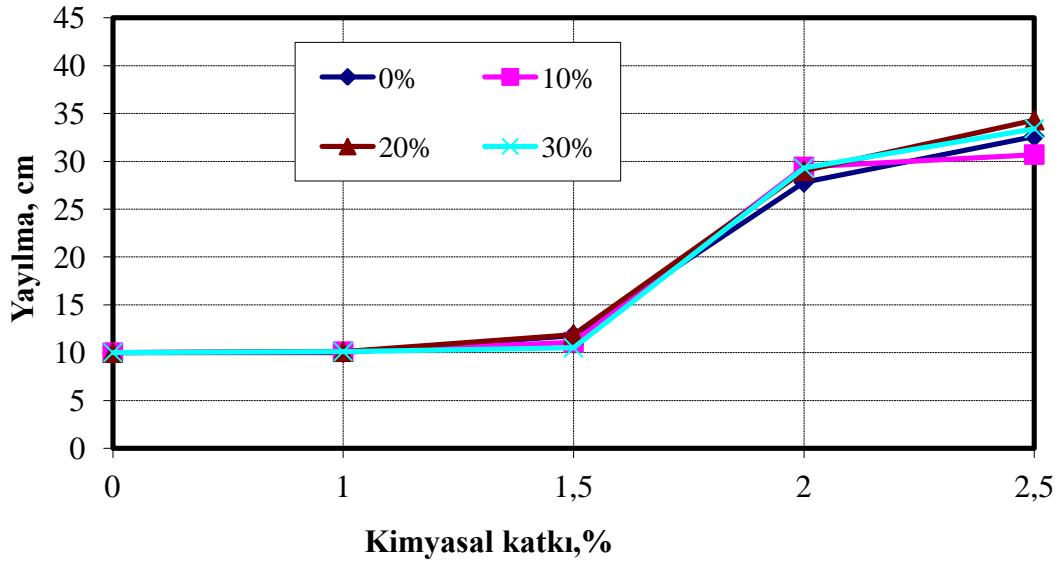
Daha önce de bahsedildiği gibi burada mineral katkıların yer değiştirmedeki özgül ağırlığından dolayı kapladıkları hacim ve yüzey alanı gibi faktörler etkili olmuştur (Topçu ve Uygunoğlu, 2010; Schwartzentruber v.d., 2006).



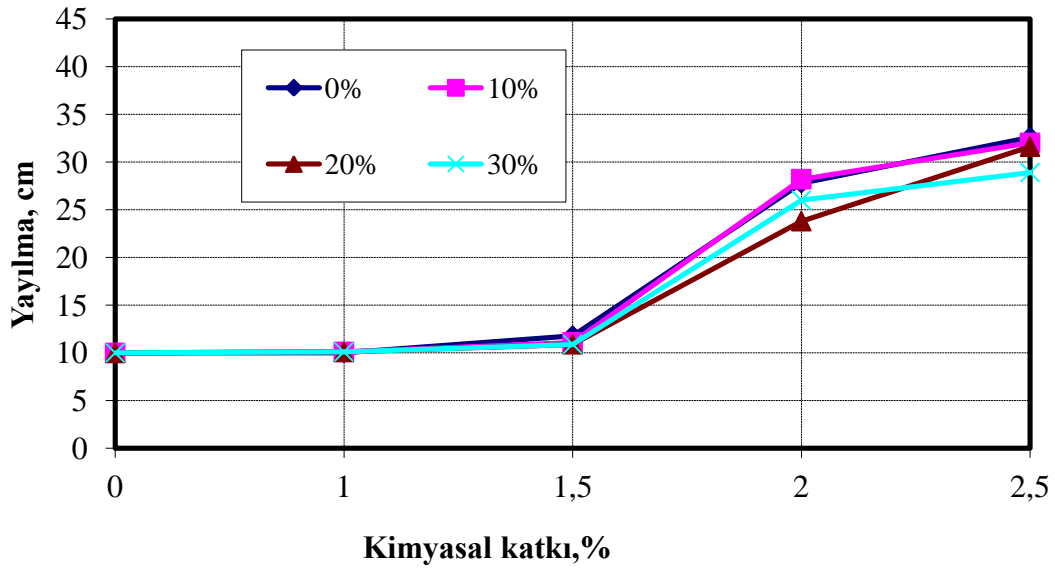
Şekil 4.1. Harç yayılmasına UK mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi



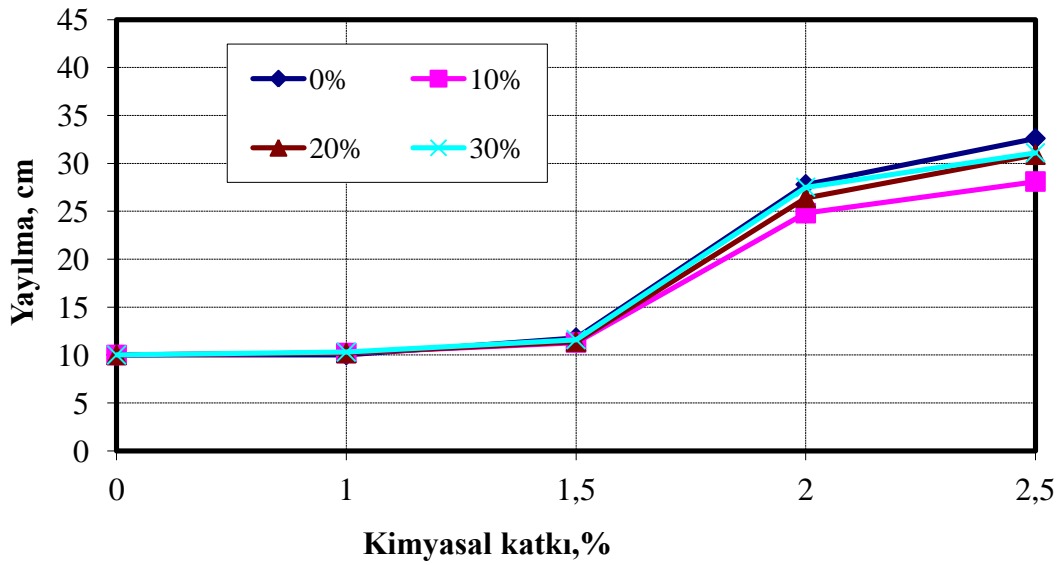
Şekil 4.2. Harç yayılmasına SD mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi



Şekil 4.3. Harç yayılmasına YFC mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi



Şekil 4.4. Harç yayılmasına TT mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi



Şekil 4.5. Harç yayılmasına KTT mineralinin ve kimyasal katkı miktarının etkisi

Diğer serilerde mineral katkı yer değiştirme oranı artışıyla birlikte yayılma çapları azalmıştır. Bunların nedenleri yukarıda tartışıldığı için burada tekrar edilmemiştir. Harçlar %1 katkı içeriğinden itibaren eşik gerilmelerini aşarak yayılmışlardır. %1 katkı

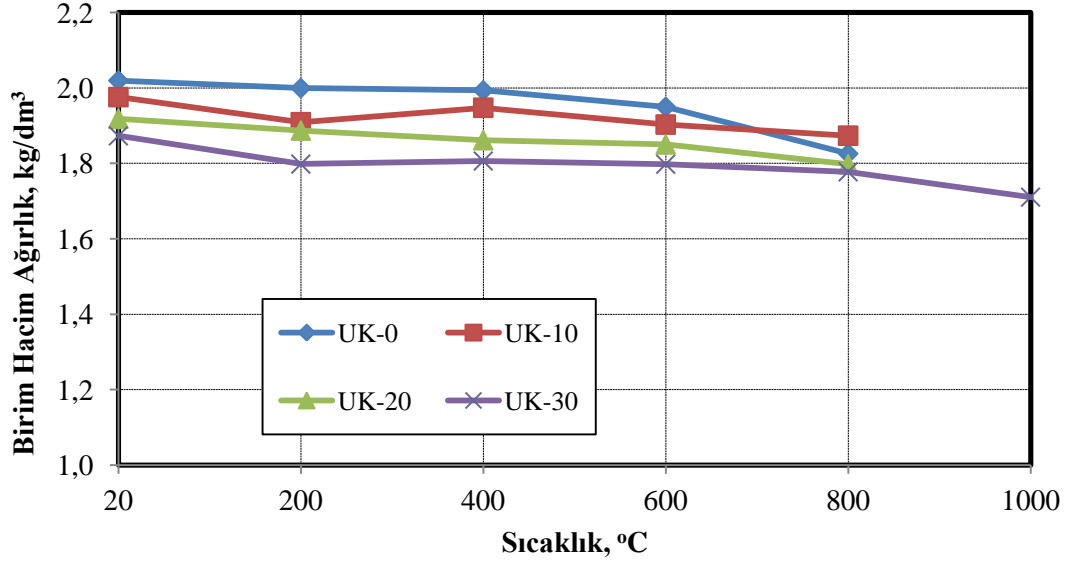
içeriğinde SD'li seriler hariç diğer tüm mineral katkı serilerde 23-25 cm arasında yayılma değerleri elde edilmiştir. Tabii ki buradaki yayılma değerlerinde agreganın etkisi oldukça büyüktür. Bununla birlikte yüzeyleri film tabakasıyla kaplanmış olan ince malzemelerin dağılmasında kimyasal katkı etkisini daha belirgin bir biçimde göstermiştir. Burada karşılaşılan ilginç bir durum da çoğu seride %2 katkı oranından sonra, özellikle mineral katkı kullanımı durumunda, katkı miktarının artırılmasına rağmen yayılma çaplarının fazla değişmemesidir. Bunun nedeni de artan ince malzeme miktarı ile işlenebilirlik artmış, ancak daha fazla artırılmasıyla kimyasal katkı etkisini kaybetmeye başlamıştır. Dolayısıyla belirli bir yayılma değerini elde etmek için ya kimyasal katkının ya da mineral katkının artırılması gerektiği; her ikisinin de artırıldığında, özellikle tane boyutu çok ince olanların (SD ve YFC gibi), kimyasal katkının etkisinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.1 - Şekil 4.5).

#### **4.2. Fiziksel Özelliklere Ait Sonuçlar**

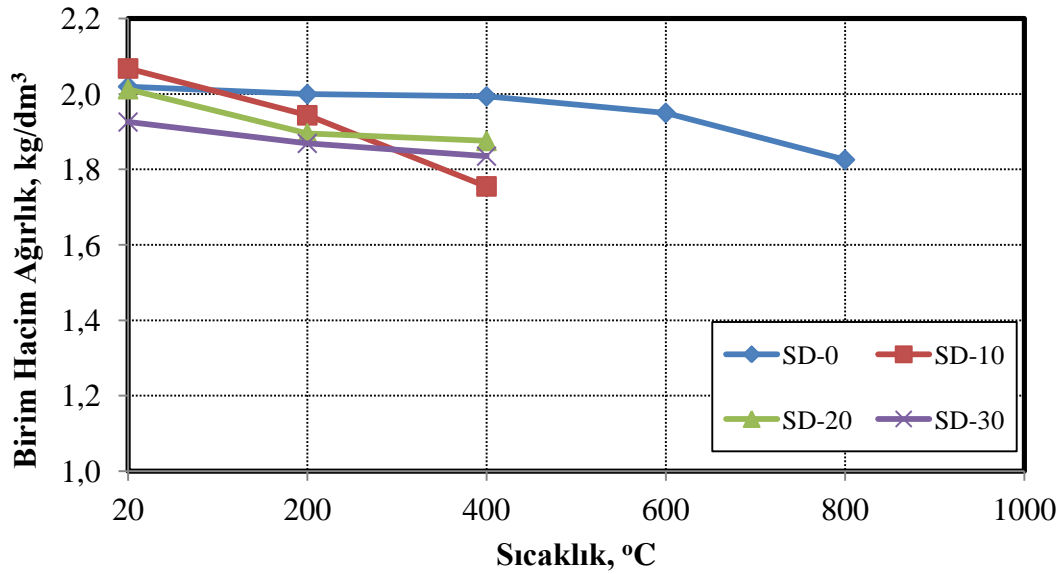
KYH'lerin yüksek sıcaklığa dayanıklılık testi sonrasında birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiş ve bu testlere ait sonuçlar kırma kumlu seriler için sırasıyla Şekil 4.6 - Şekil 4.10'da sunulmuştur. Sonuçların tablo verisi Ek-1'de verilmiştir. Harçların yüksek sıcaklığa maruz bırakılmasıyla birlikte birim hacim ağırlıkları azalmıştır. Kırma kumla üretilen harçların birim ağırlıkları sıcaklık derecesinin 20-1000 °C arasında değişmesiyle 2 ile 1.4 kg/dm<sup>3</sup> arasında değerler almıştır. Diğer yandan, mineral katkı harçların birim ağırlıkları şahit numunelerle aynı veya daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Mineral katkı etkisi incelendiğinde, katkı kullanım oranı artırılmasıyla birlikte UK-10 ve KTT serileri haricinde serilerin birim ağırlıkları sıcaklık artışıyla birlikte azalma eğilimindedir. En fazla azalma da %20 ve %30 katkı içeriklerinde görülmüştür.

Kırma kumlu harçların 800 °C sonrasında sıcaklık etkisinden dolayı numuneler dağılmıştır. Hatta SD'li serilerde 400 °C'den sonra numuneler suda dağılmışlardır. Bu nedenle birim ağırlıkları belirlenememiştir. Sıcaklık değerinin artışıyla birlikte

numunelerdeki bağılı sular buharlaşmış ve sıcaklığın daha da artmasıyla hidrate ürünlerin yapısı bozularak oksit kaybından dolayı numunelerin ağırlıkları azalmıştır. Bazı sıcaklık değerlerinde numunelerde oluşan büzölmelerden dolayı birim hacim ağırlık değerlerinde az da olsa bir artış da görölmüştür.

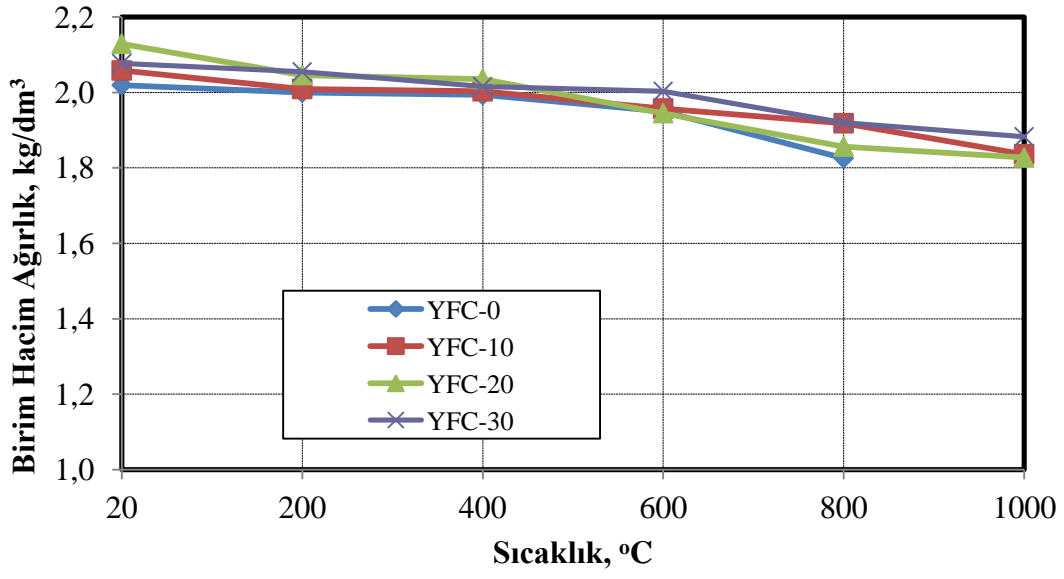


Şekil 2. UK ' lı harçların birim hacim ağırlıkları

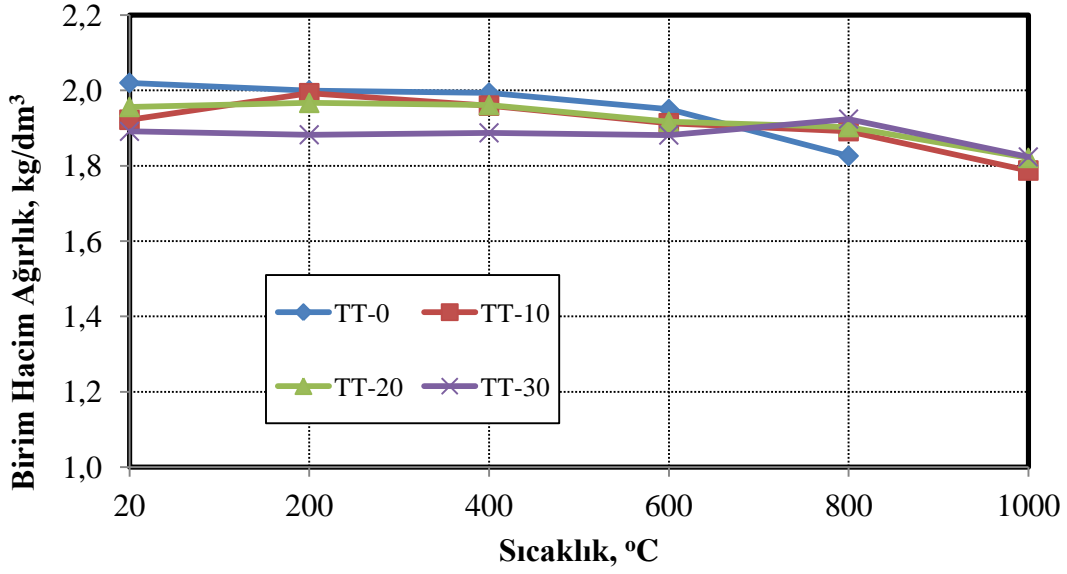


Şekil 4.7. SD ' li harçların birim hacim ağırlıkları

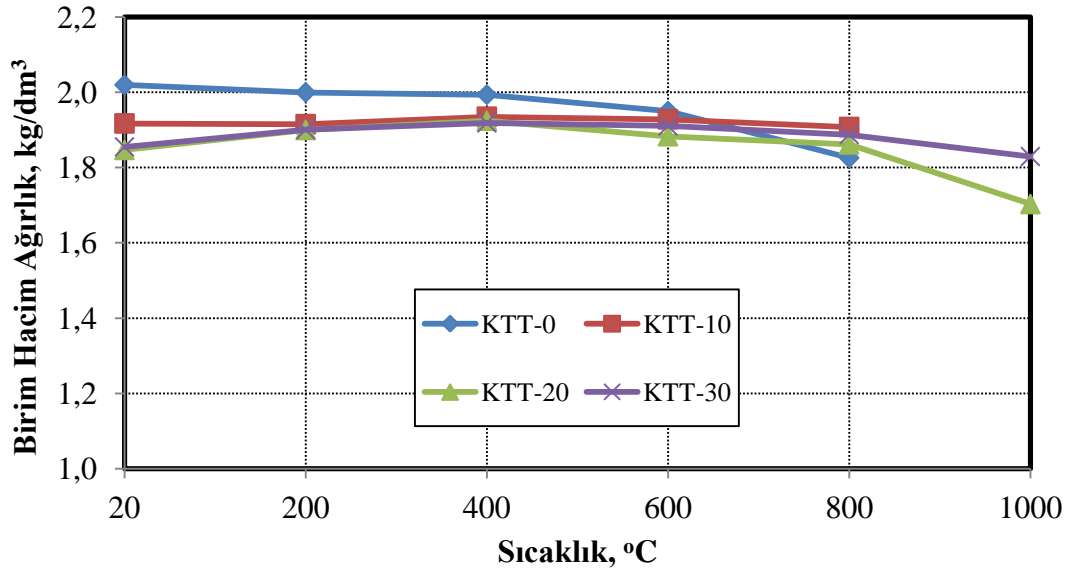




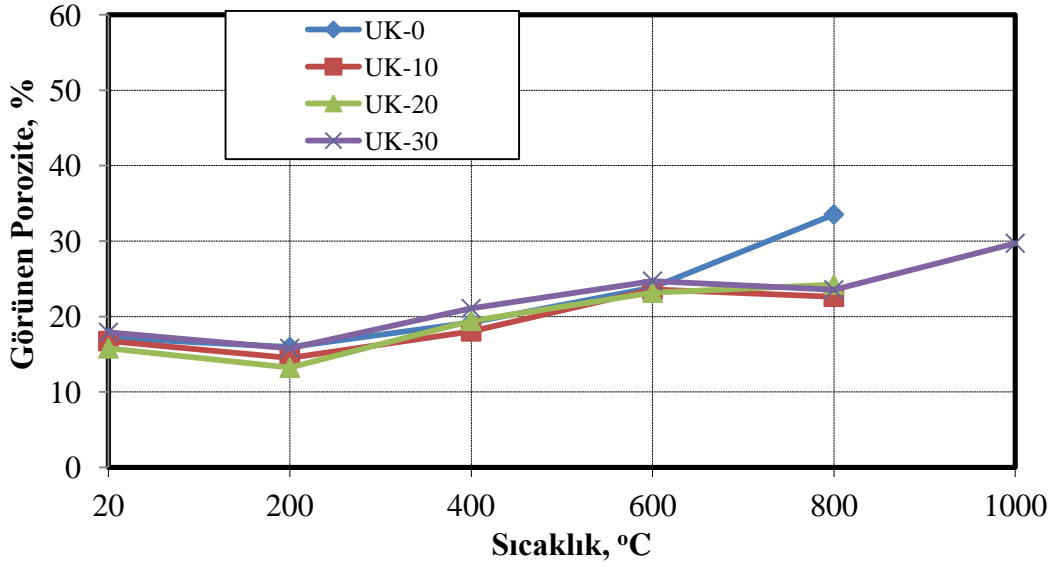
Şekil 4.8. YFC ' li harçların birim hacim ağırlıkları



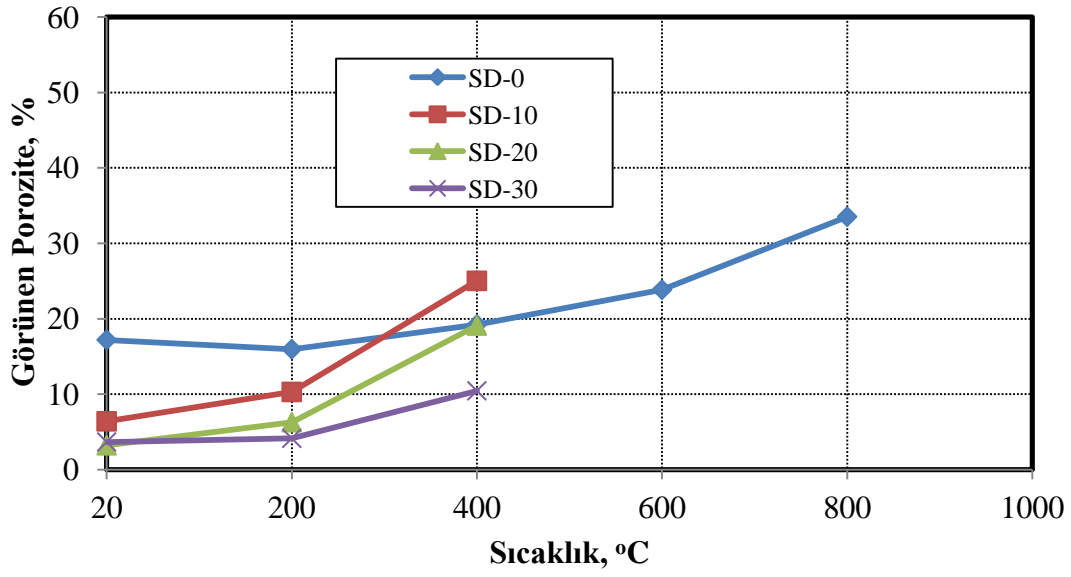
Şekil 4.9. TT ' li harçların birim hacim ağırlıkları



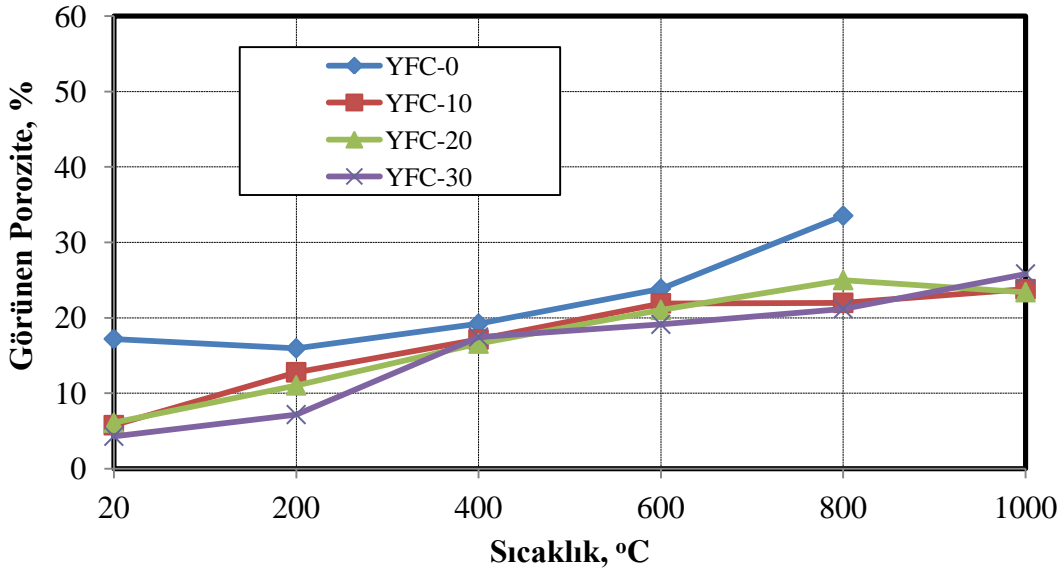
Şekil 4.10. KTT ' li harçların birim hacim ağırlıkları



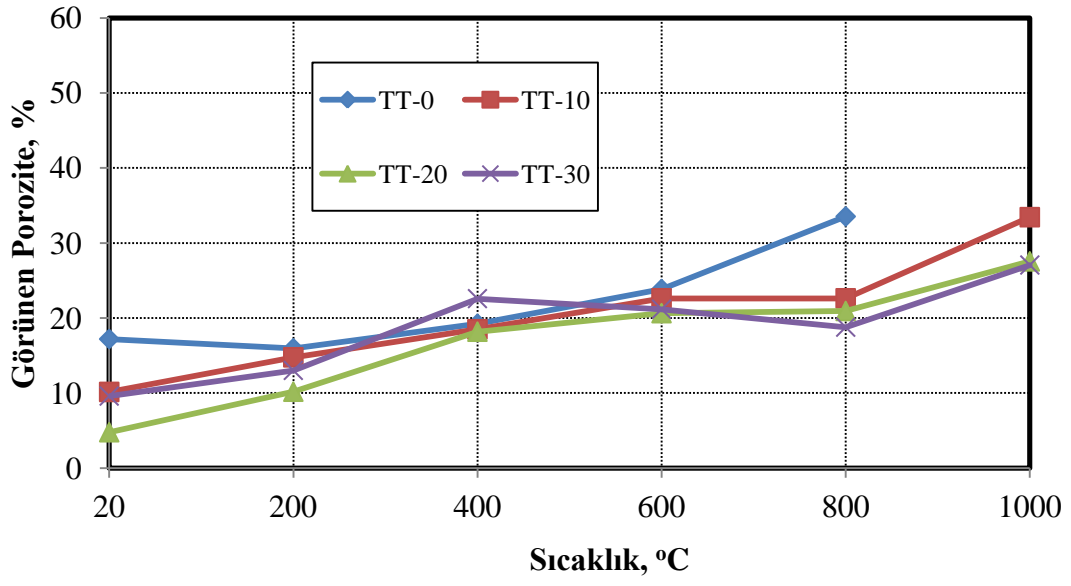
Şekil 4.11. UK ' lı harçların görünen porozite değerleri



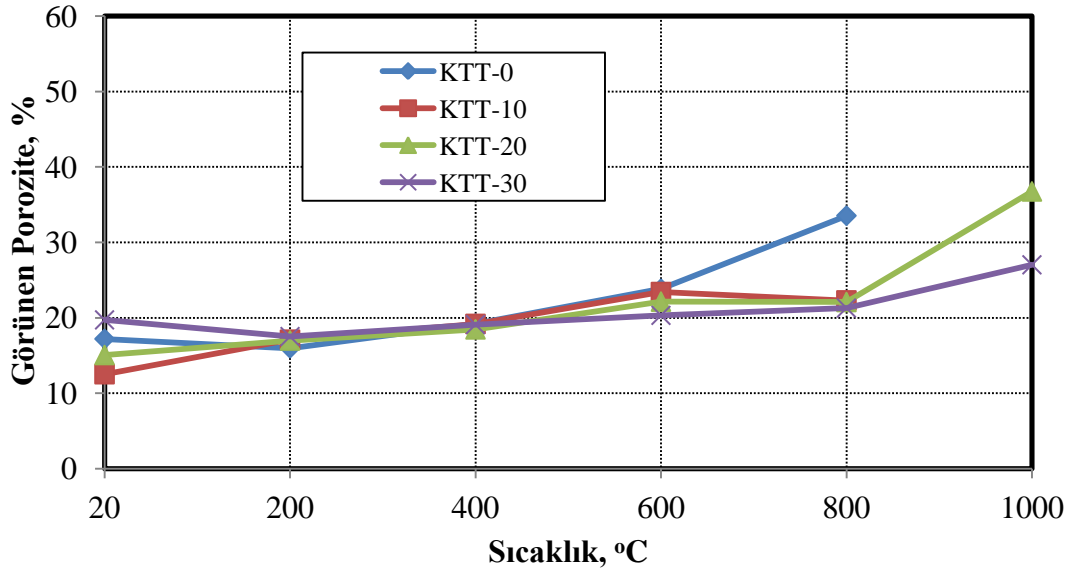
Şekil 4.12. SD ' li harçların görünen porozite değerleri



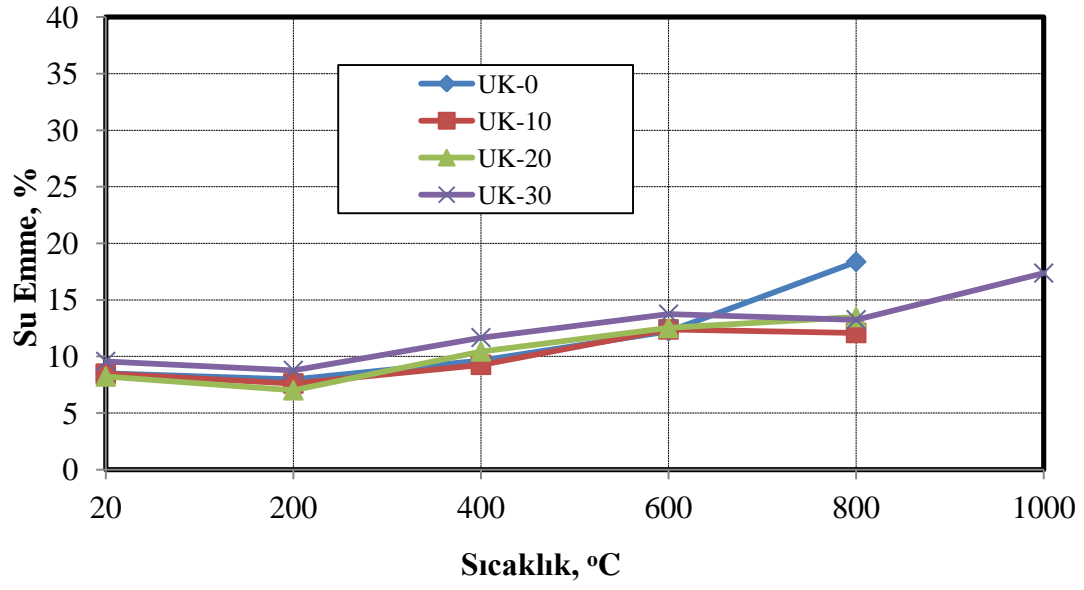
Şekil 4.13. YFC ' li harçların görünen porozite değerleri



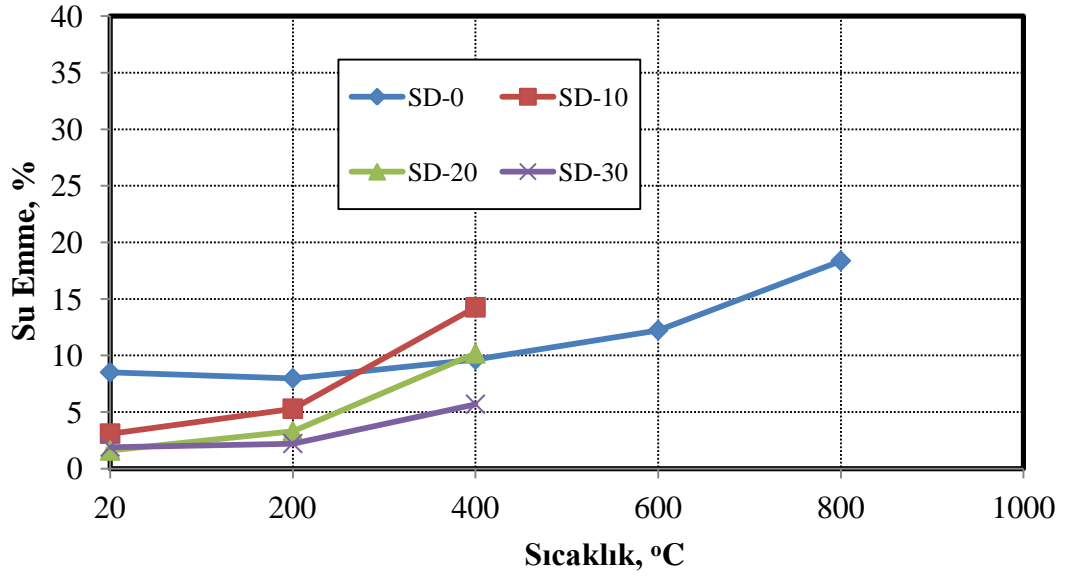
Şekil 4.14. TT ' li harçların görünen porozite değerleri



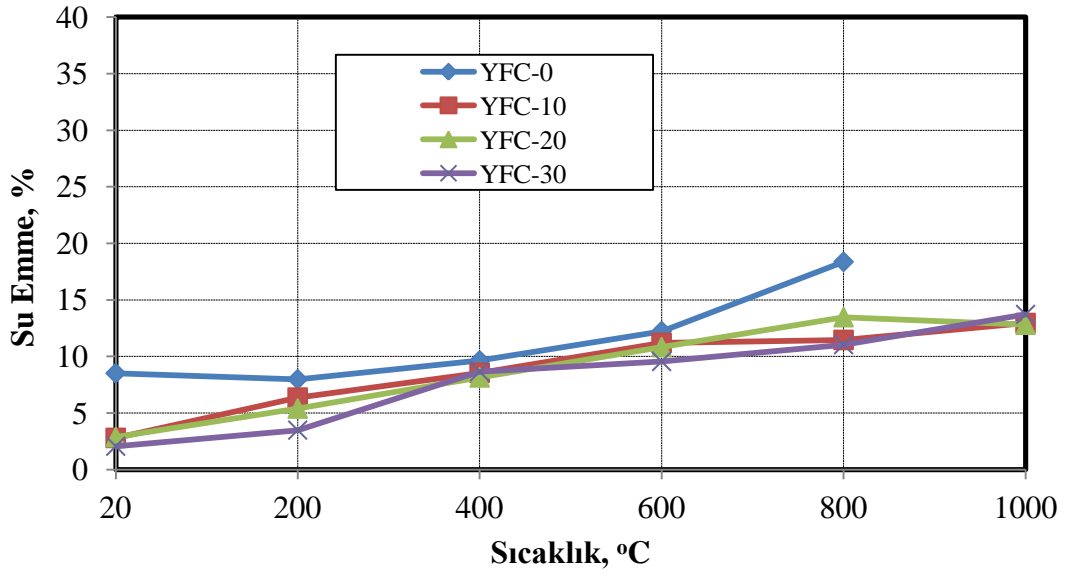
Şekil 3. KTT ' li harçların görünen porozite değerleri



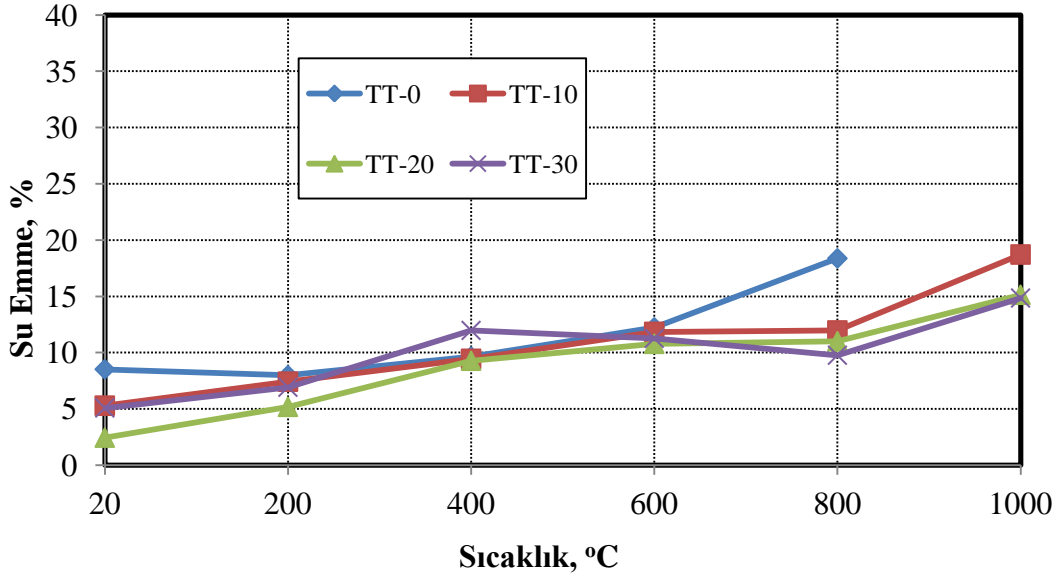
Şekil 4.16. UK ' lı harçların ağırlıkça su emme değerleri



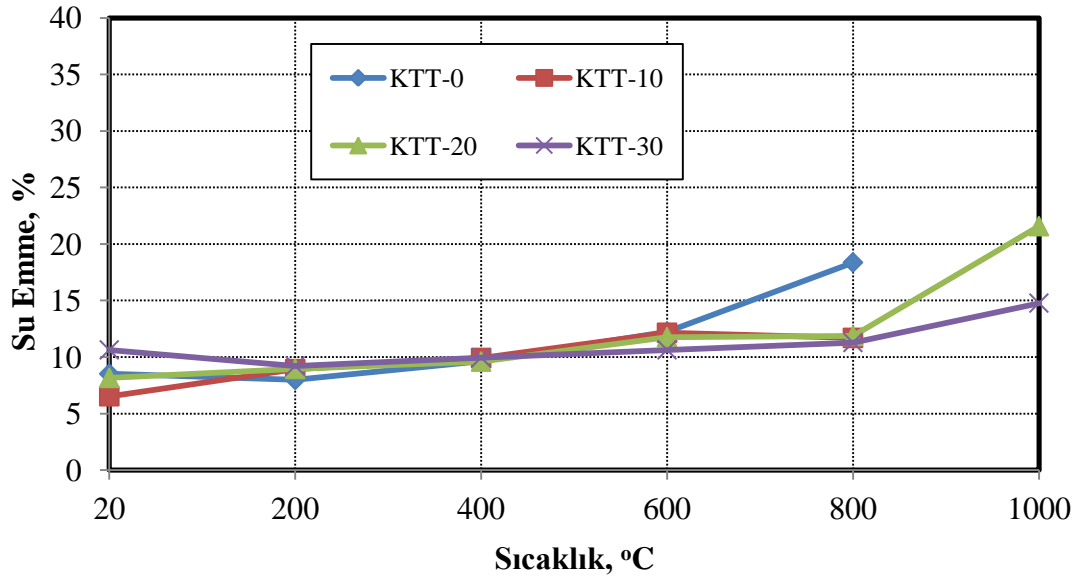
Şekil 4.17. SD ' li harçların ağırlıkça su emme değerleri



Şekil 4.18. YFC ' li harçların ağırlıkça su emme değerleri



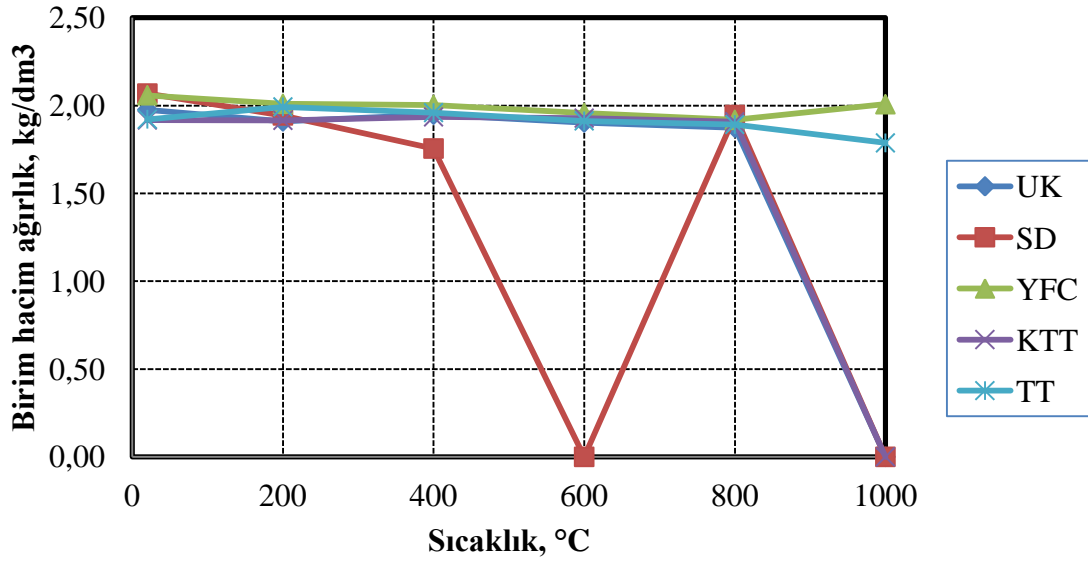
Şekil 4.19. TT ' li harçların ağırlıkça su emme değerleri



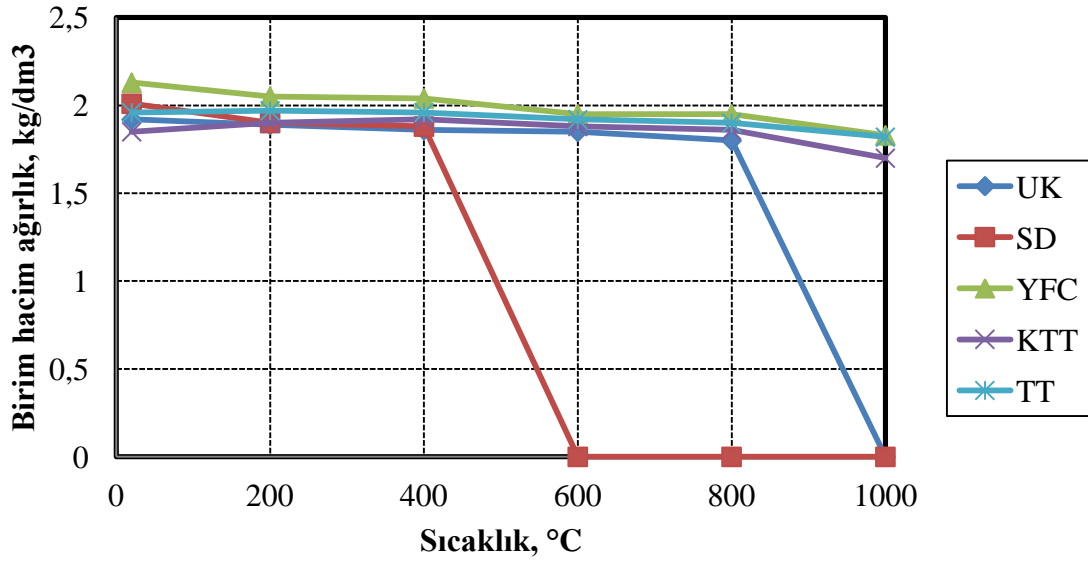
Şekil 4.20. KTT ' li harçların ağırlıkça su emme değerleri

Birim ağırlıkların sıcaklığa bağlı olarak azalması sonucunda dışarı çıkan su veya diğer oksitlerden dolayı görünen porozite değerleri de artmıştır (Şekil 4.11 - Şekil 4.15). Sonuçların tablo verisi Ek-2'de verilmiştir. Genel olarak mineral katkı kullanım oranı arttıkça porozite değerleri azalmıştır. Kırma kumun kullanıldığı şahit harç numunelerin görünen porozite değerleri de aynı sıcaklık değerinde %33 oranına kadar yükselmiştir. Diğer yandan kırma kumla üretilen harçların oda sıcaklığındaki görünen porozite değerleri de düşük değerler aldığı görülmüştür. Bunun nedeni de kırma kum içerisinde fazla ince malzeme olması ve buna bağlı olarak da filler etkisi yaparak yüksek sıcaklıklarda daha az gözenek oluşmasıdır.

Kırma kumla üretilen harçların görünen porozite değerlerine paralel olarak ağırlıkça su emme değerleri de değişim göstermektedir. Hem mineral katkıların kullanımı hem de kırma kumdaki ince malzeme miktarının artışına bağlı olarak su emme değerleri azalmıştır (Şekil 4.16 – Şekil 4.20). Sonuçların tablo verisi Ek-3'de verilmiştir. Aşağıda da mineral katkı içeriğinin sabit oranda ki mineral katkı tiplerinin yüksek sıcaklığa bağlı değerleri verilmiştir (Şekil 4.21- Şekil 4.29).

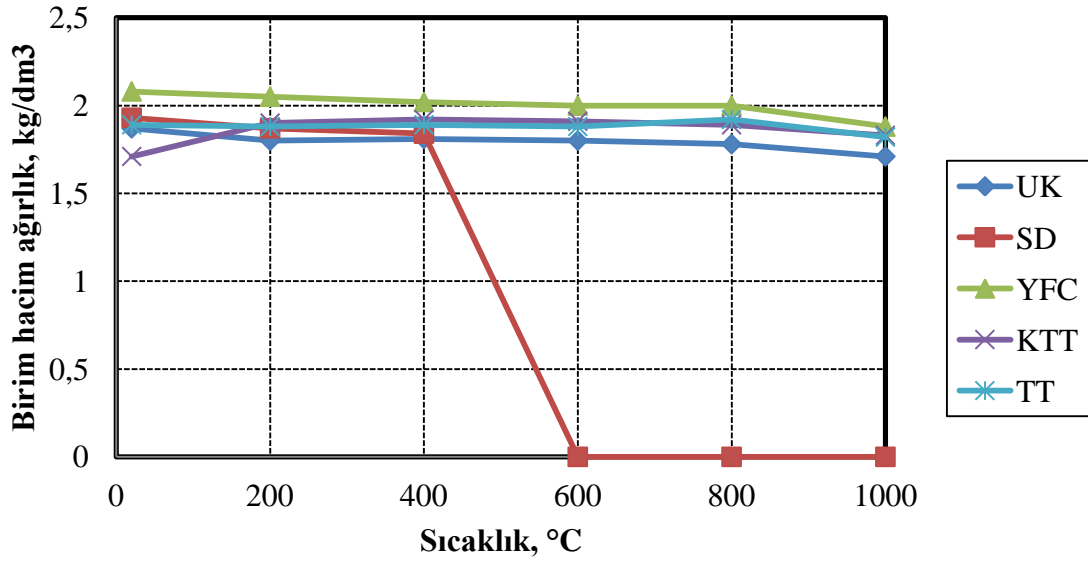


Şekil 4.21. Mineral katkı içeriği %10 olan harçlarda birim hacim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması

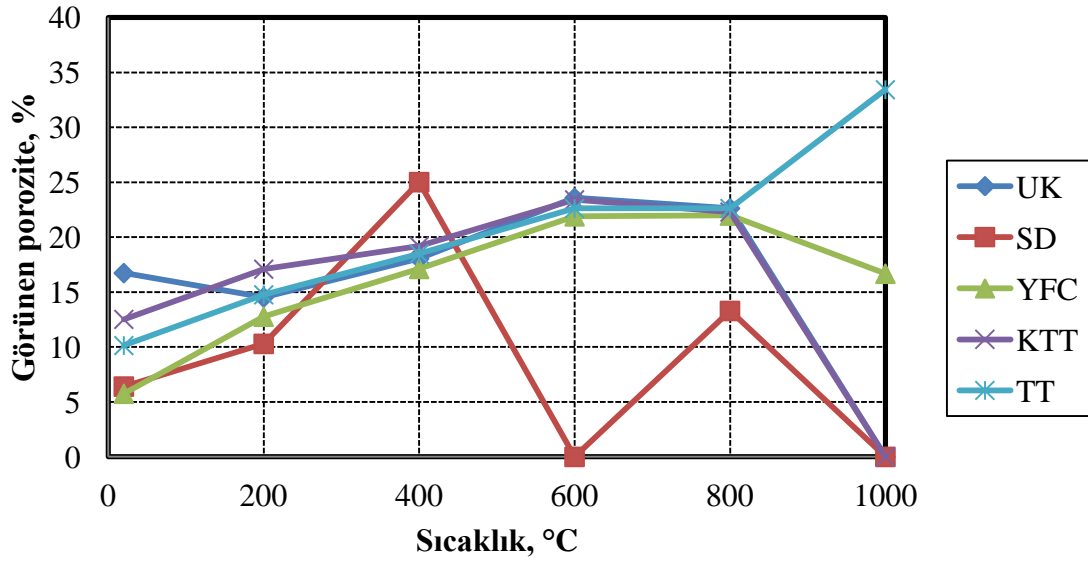


Şekil 4.22. Mineral katkı içeriği %20 olan harçlarda birim hacim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması

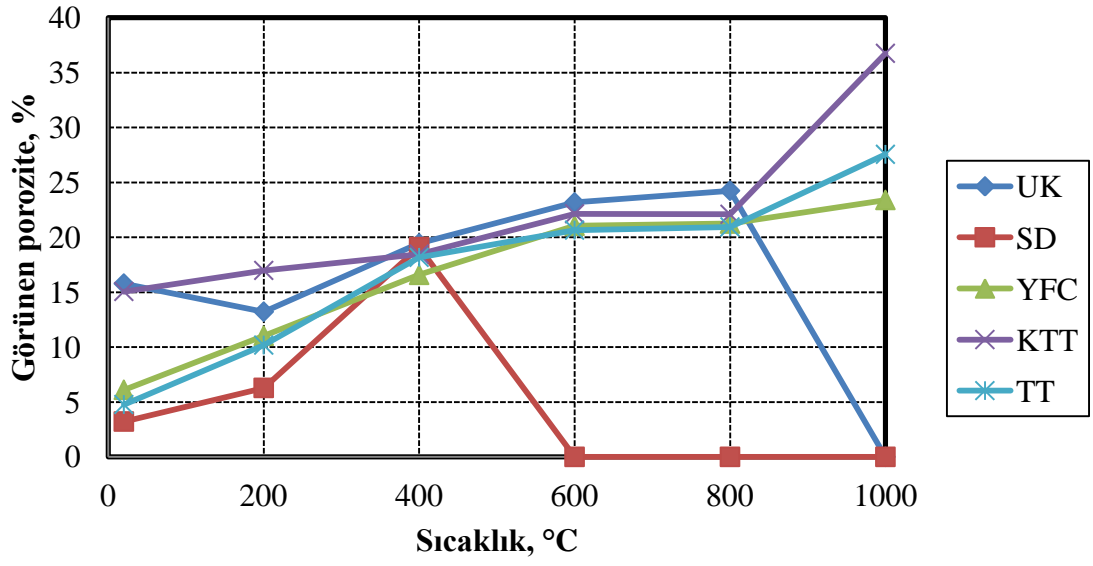




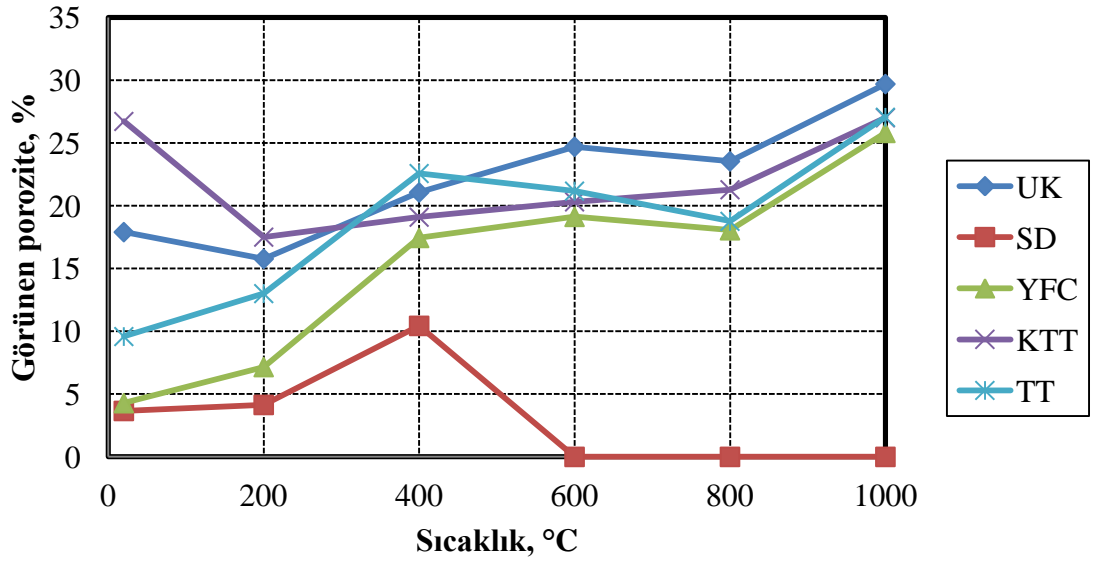
Şekil 4.23. Mineral katkı içeriği %30 olan harçlarda birim hacim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması



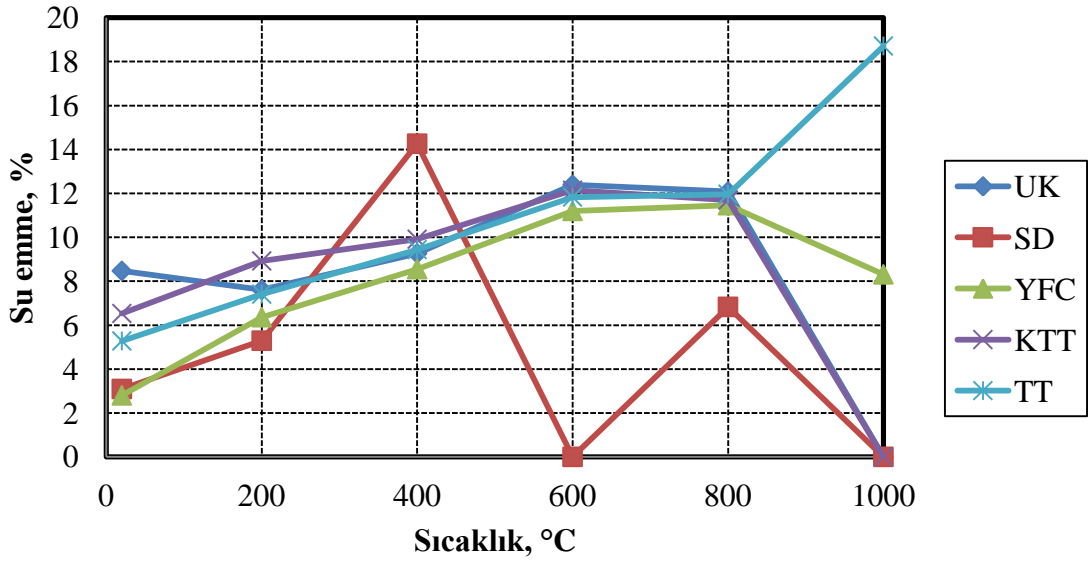
Şekil 4. Mineral katkı içeriği %10 olan harçlarda görünen porozite değerlerinin karşılaştırılması



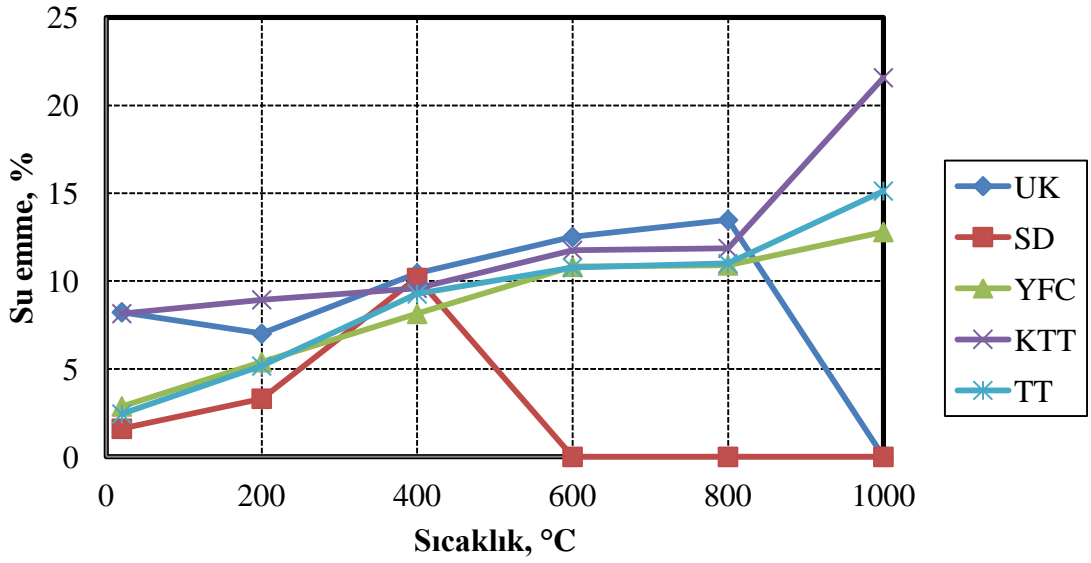
Şekil 4.25. Mineral katkı içeriği %20 olan harçlarda görünen porozite değerlerinin karşılaştırılması



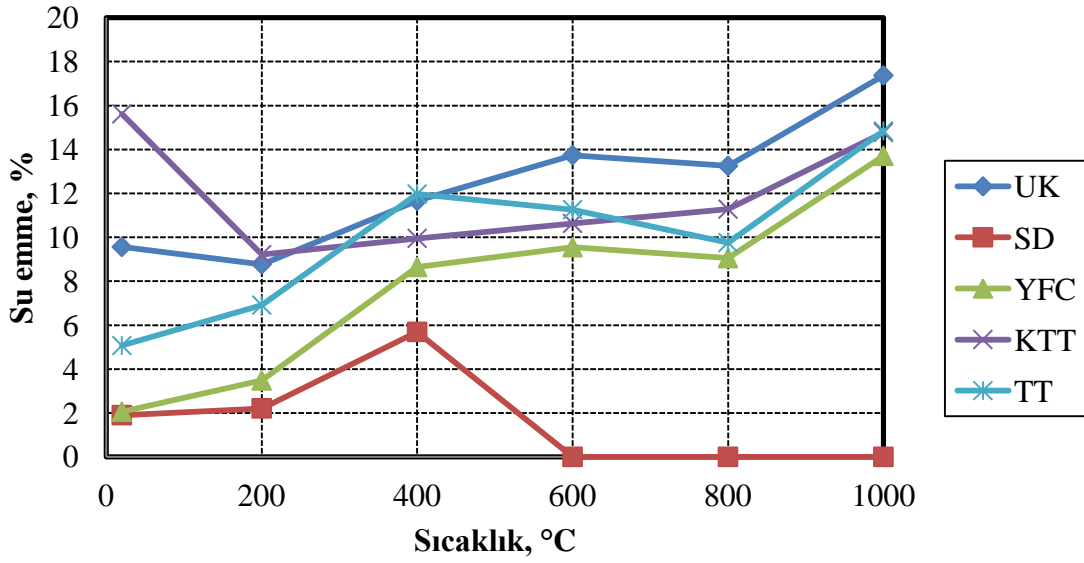
Şekil 4.26. Mineral katkı içeriği %30 olan harçlarda görünen porozite değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.27. Mineral katkı içeriği %10 olan harçlarda su emme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.28. Mineral katkı içeriği %20 olan harçlarda su emme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5. Mineral katkı içeriği %30 olan harçlarda su emme değerlerinin karşılaştırılması

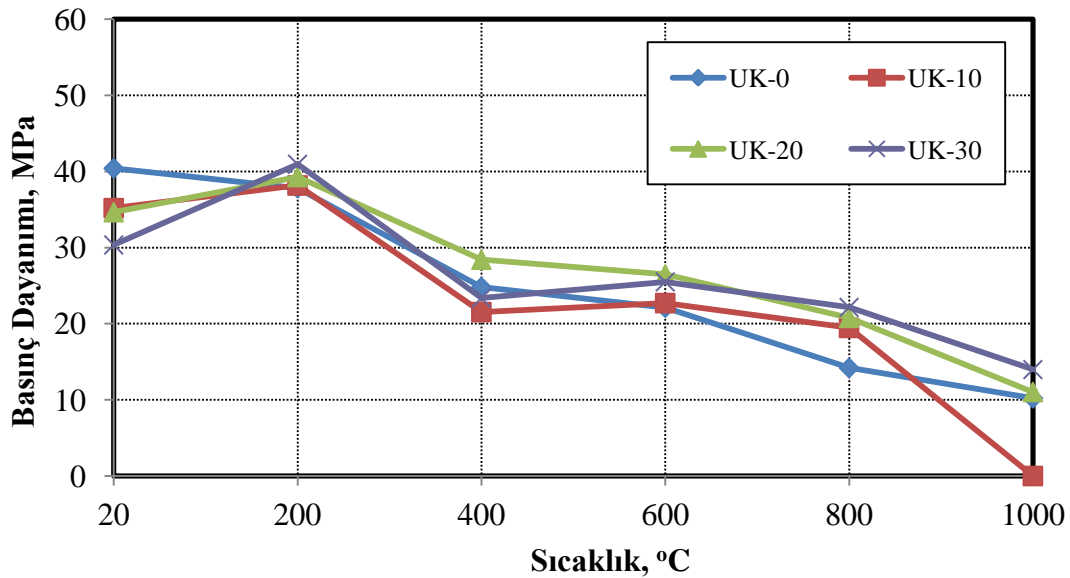
### 4.3. Mekanik Özelliklere Ait Sonuçlar

#### 4.3.1. Eğilme ve Basınç Dayanımları

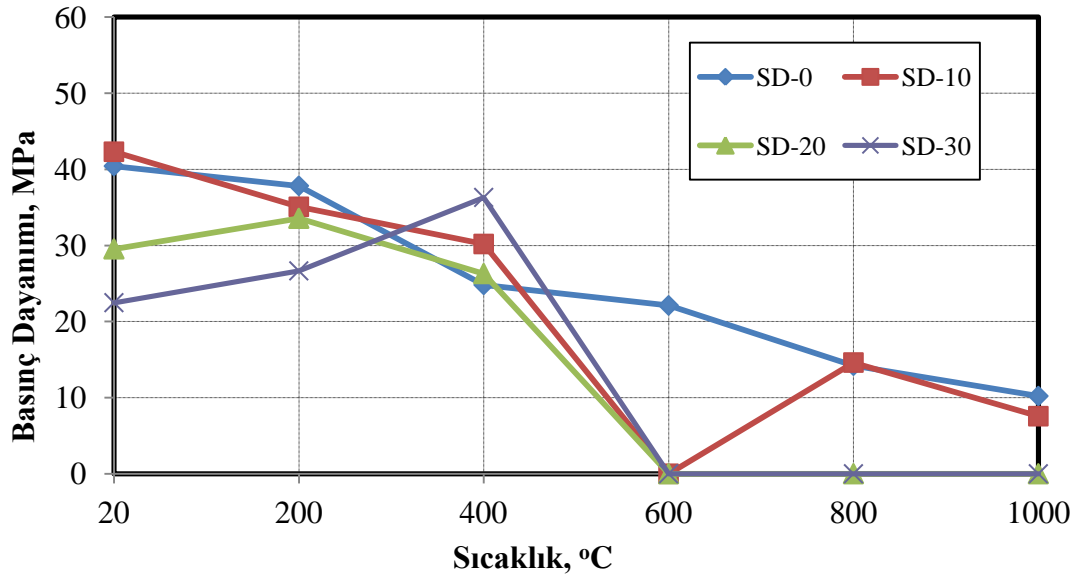
Yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığa bağlı olarak KYH'lerin basınç dayanımlarındaki değişimler Şekil 4.30 - Şekil 4.34'te sunulmuştur. Sonuçların tablo verisi Ek-4'de verilmiştir. Ayrıca aşağıda da mineral katkı içeriğinin sabit oranda ki mineral katkı tiplerinin yüksek sıcaklığa bağlı değerleri verilmiştir (Şekil 4.35 – Şekil 4.37). Sıcaklığın 200 °C'ye arttırılmasıyla birlikte harçların basınç dayanımlarında artış görülmüştür. Daha sonra sıcaklığın daha da arttırılmasıyla basınç değerleri azalma eğilimine geçmiştir. Bu durum 200 °C civarında çimento hamurunun büzülmesi ve buna bağlı olarak da dayanımın bir miktar artmasını sağlamasından dolayı oluşmaktadır (Yüzer vd, 2004). 200 °C'deki dayanım artışı kırma kumlu serilerin bir kaçında gözlenmiştir. Bunun nedeni de kırma kumlu serilerde 150-250 °C arasında oluşan büzülmenin fazla olmayışdır.

Çimento hamuru jel yapıdadır. Jel yapıyı oluşturan CSH (kalsiyum-silikat-hidrat) katı ögeleri adsorpsiyon suyu ile birbirlerine bağlanırlar. Jel adsorbe suyu ve CSH jelinin hidrat suları kolaylıkla buharlaşmazlar. Buna karşılık daha geniş boşluklarda bulunan serbest su 100 °C civarında buharlaşıp uçabilir. Yüksek sıcaklığa maruz betonlarda ilk aşamasında buharlaşan bu su, betonun rötre yapmasına neden olur. Çimento türüne ve su/çimento oranına bağlı olarak serbest su, betonun %4'üne kadar ulaşır. Sıcaklığın daha fazla artmasıyla bu suyun kaybı ile oluşacak büzülme betonun dayanımını arttırdığı gibi beton içinde beliren buhar basıncı, beton örtüsünün çatlamasına ve parçalanarak kopmasına yol açabilir. Çimento hamurunda CSH yanında bulunan diğer bileşen de Ca(OH)<sub>2</sub> (kalsiyum hidroksit)'dir. CSH'ın kimyasal suyu ve jel suyu 300 °C den itibaren kaybolmaya başlar ve 530 °C civarında Ca(OH)<sub>2</sub> suyunu kaybederek CaO'de dönüşür (Khoury, 1996). Bazı sıcaklıklarda ortaya çıkan hasarlar betonların mukavemetinin büyük oranda düşmesine, hatta yok olmasına sebep olurlar (Poon vd, 2001).

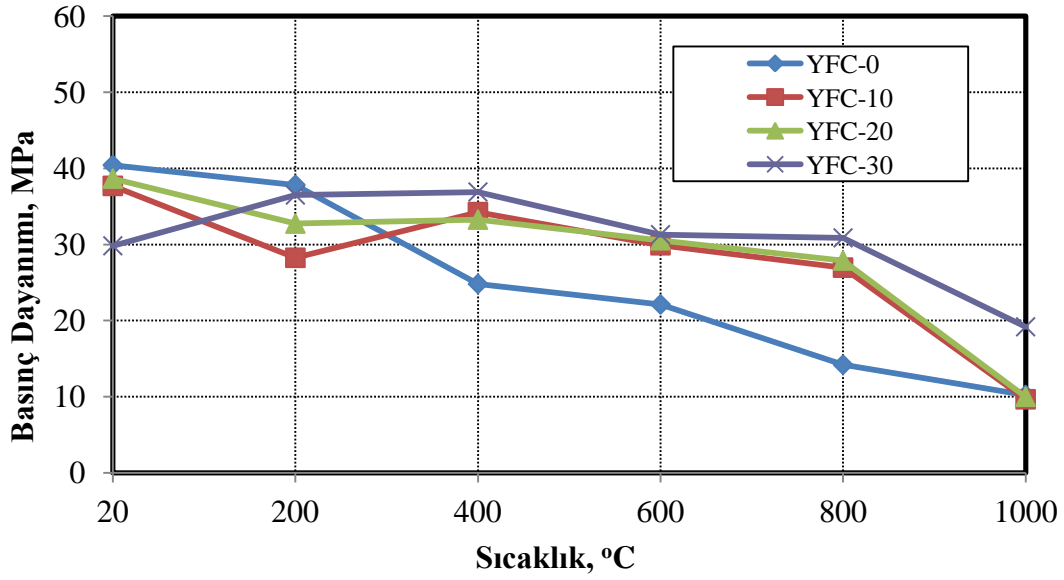
Bu arada betonun rengi değişir. 300-600 °C arasında renk pembeleşir, 600 °C nin üstünde beyaz-gri bir renk alır ve 900 °C nin üstünde bej renk olur (Yüzer, 2003; Kızılkant, 2008). Kırma kumla üretilen harçlarda en düşük basınç dayanımları 1000 °C sıcaklıkta görülmüştür.



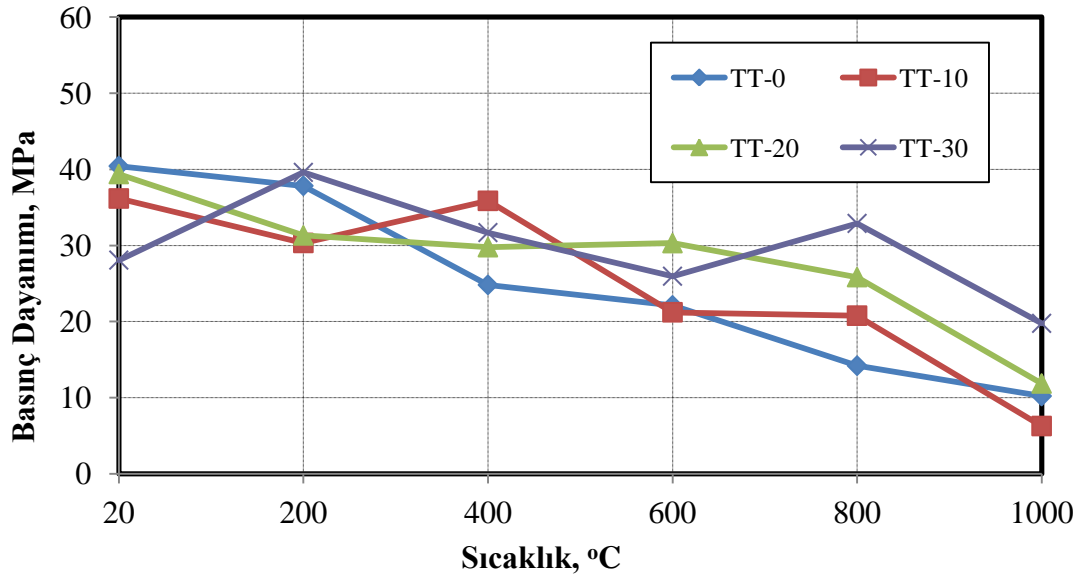
Şekil 4.30. UK ' lı harçların basınç dayanımları



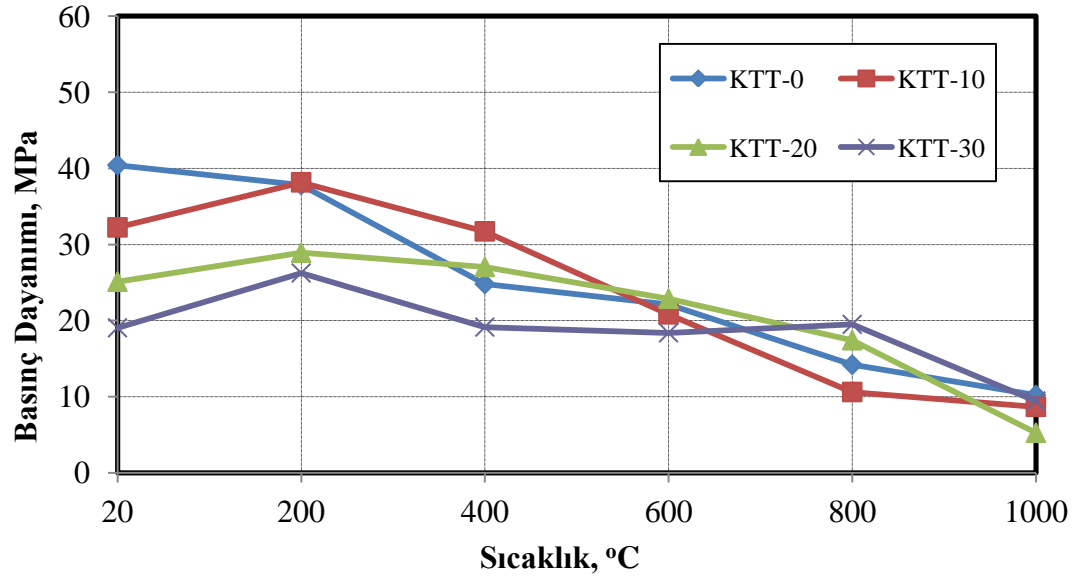
Şekil 4.31. SD ' li harçların basınç dayanımları



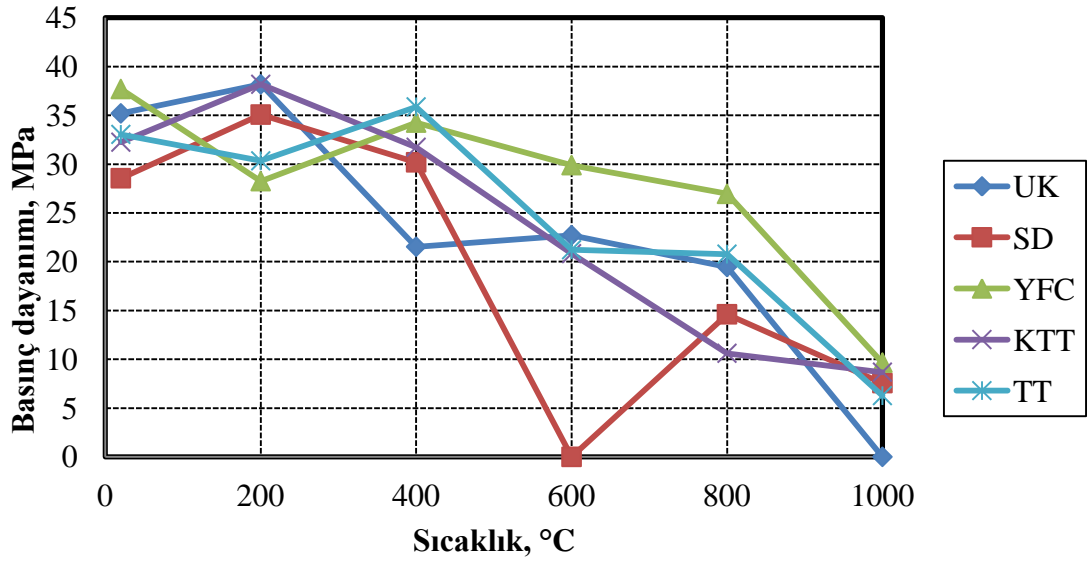
Şekil 4.32. YFC ' li harçların basınç dayanımları



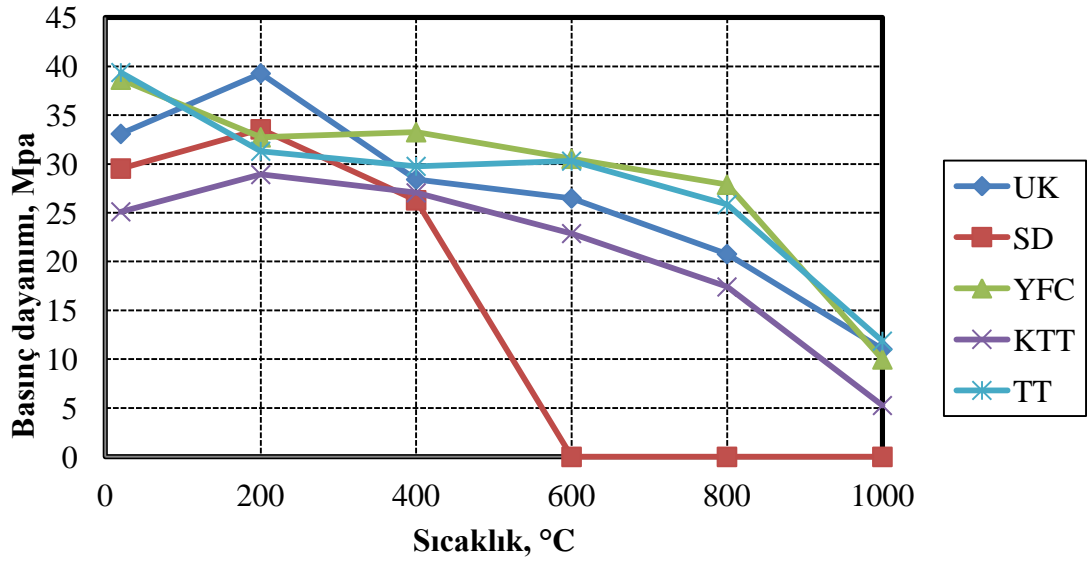
Şekil 4.33. TT ' li harçların basınç dayanımları



Şekil 4.34. KTT ' li harçların basınç dayanımları

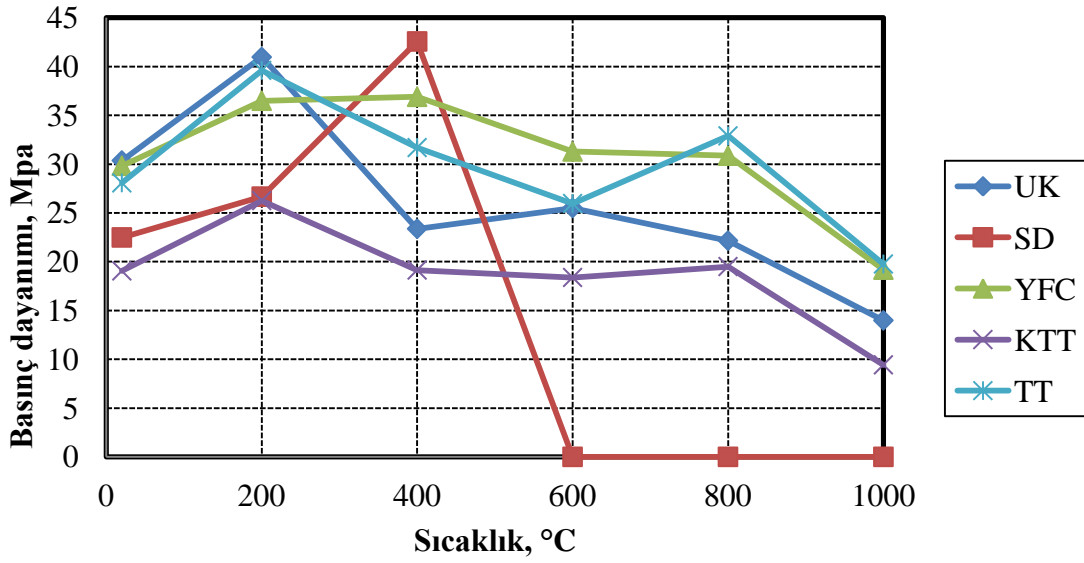


Şekil 4.35. Mineral katkı içeriği %10 olan harçlarda basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6. Mineral katkı içeriği %20 olan harçlarda basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması

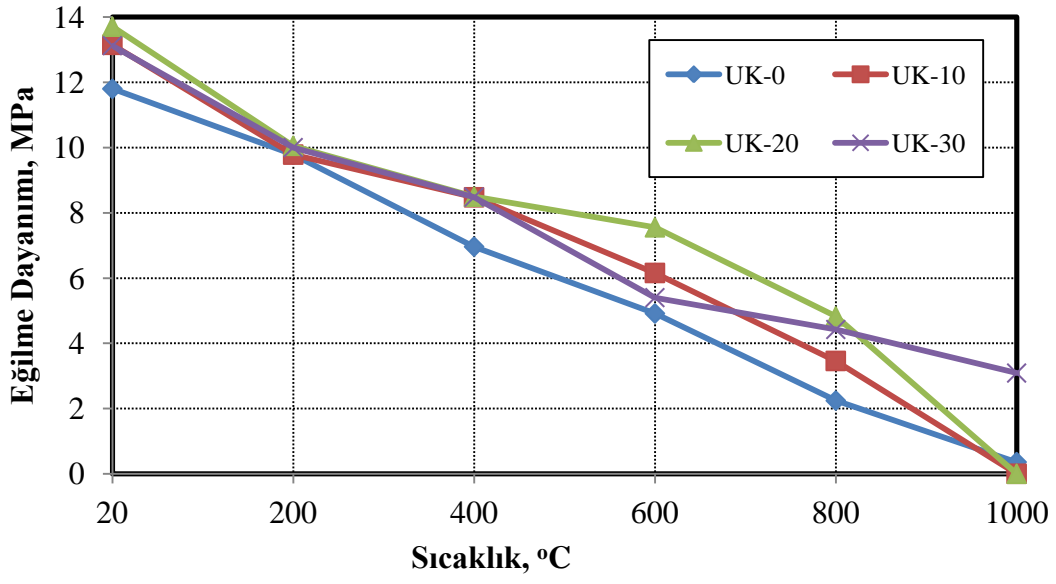




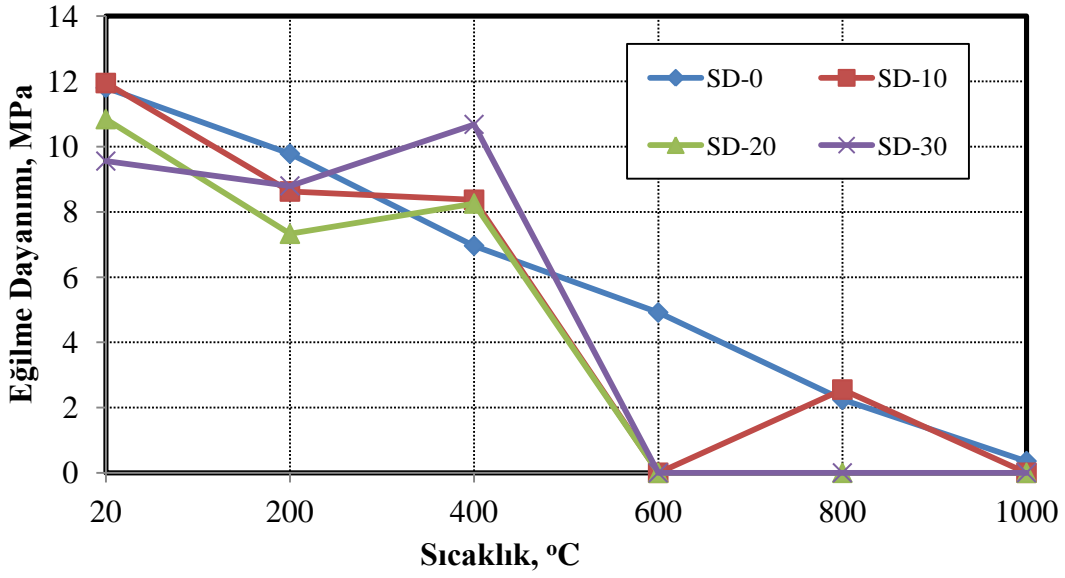
Şekil 4.37. Mineral katkı içeriği %30 olan harçlarda basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması

1000 °C sıcaklıktaki basınç dayanım değerleri 0-20 MPa arasında değerler almıştır. Harçlarda 20 MPa basınç değerine sahip olan seriler %30 oranında YFC ve TT içerenlerdir. Serilerde mineral katkı oranının artmasıyla basınç dayanımı genel olarak artış göstermiştir. Yine bunun en önemli temel sebebi ısıl genleşme katsayılarıyla açıklanabilir (Sellevold, 2006).

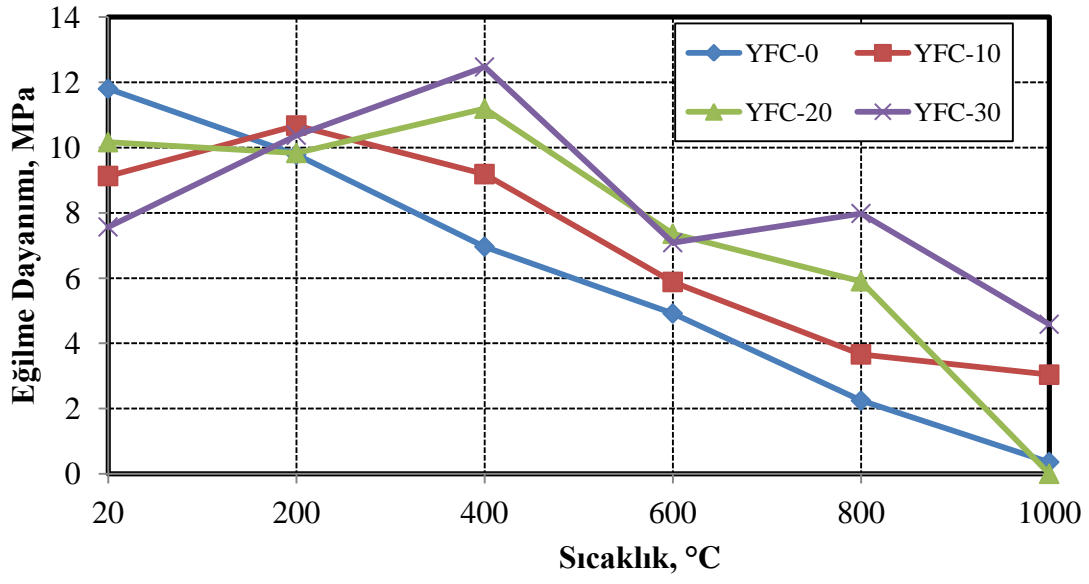
Tıpkı basınç dayanımlarında olduğu gibi harçların eğilme dayanımlarında da çok benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.38 - Şekil 4.42). Sonuçların tablo verisi Ek-5'de verilmiştir. Aşağıda da mineral katkı içeriğinin sabit oranda ki mineral katkı tiplerinin yüksek sıcaklığa bağlı değerleri verilmiştir (Şekil 4.43 – Şekil 4.45). Buradaki en önemli sonuç ise kırma kumlu serilerin eğilme dayanımlarının oda sıcaklığında fazla olmasına rağmen sıcaklığın 1000 °C'ye ulaşmasıyla daha düşük değerler almış olmalarıdır. Hatırlanacağı gibi kırma kumlu seriler 900 °C üzerindeki sıcaklık değerlerinde büzülerek deforme olmaktadır.



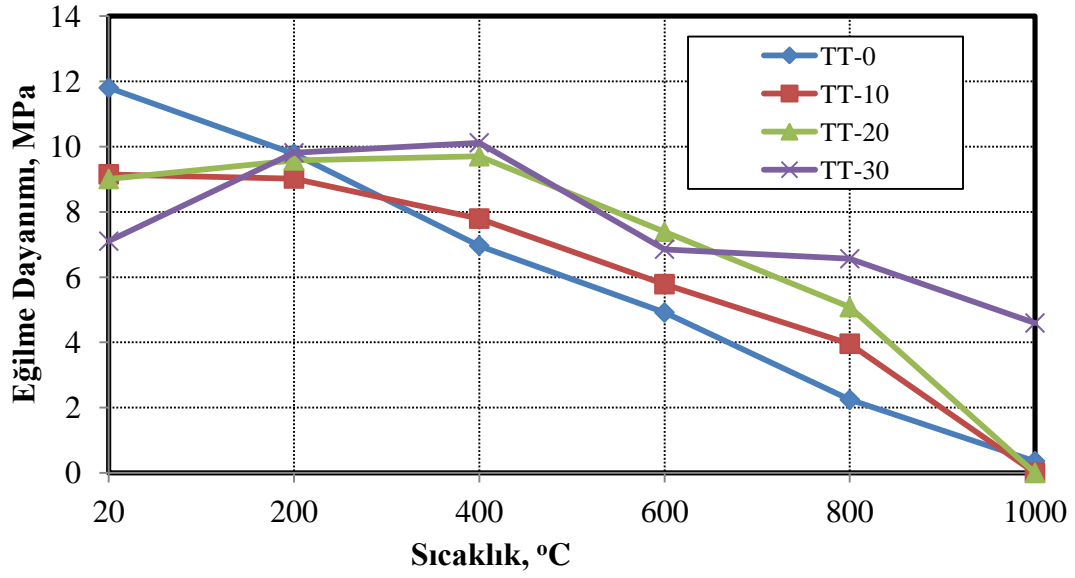
Şekil 4.38. UK ' lı harçların eğilme dayanımları



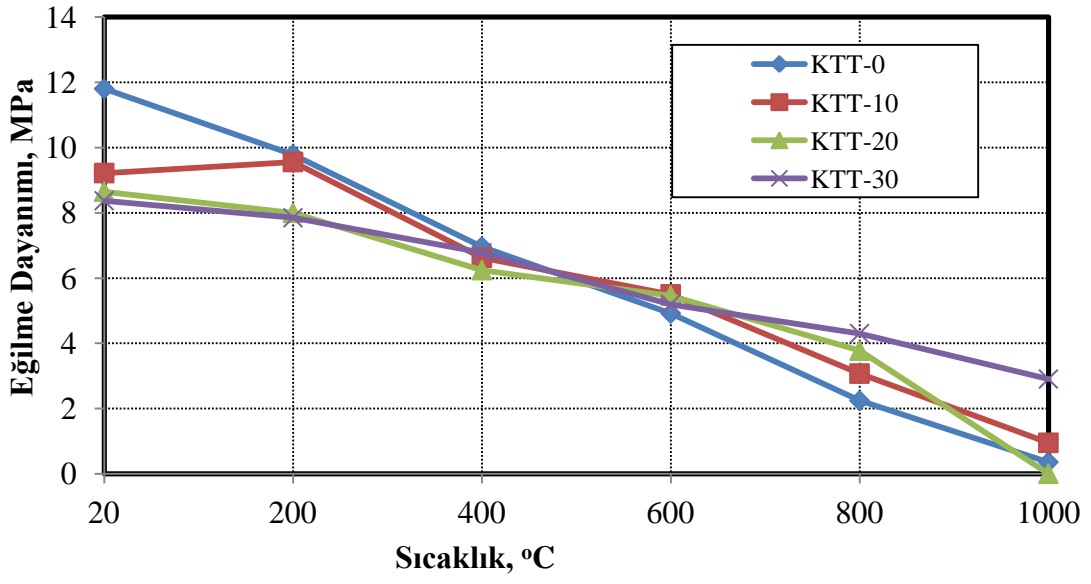
Şekil 4.39. SD ' li harçların eğilme dayanımları



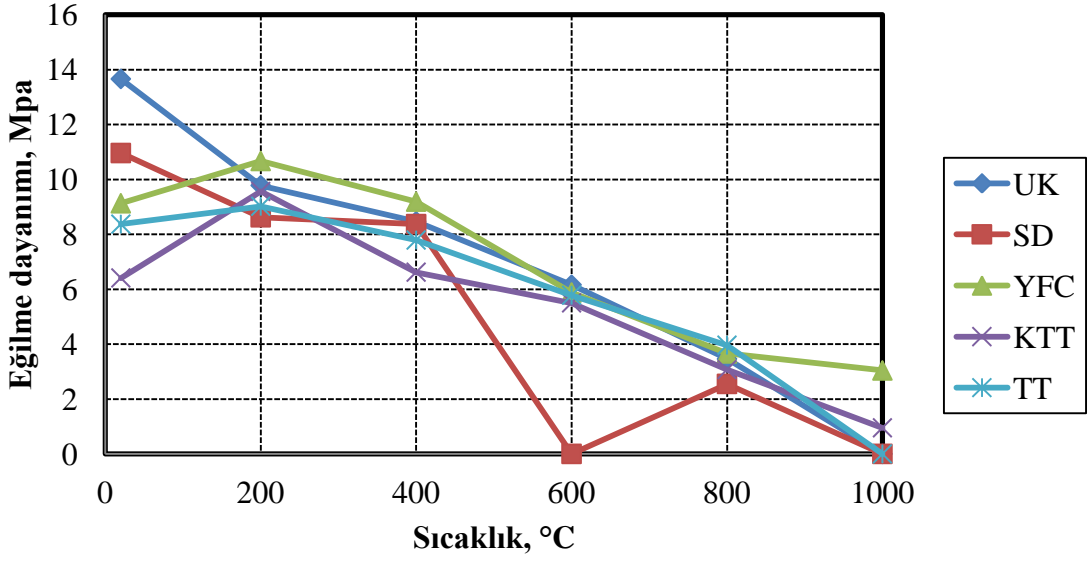
Şekil 4.40. YFC ' li harçların eğilme dayanımları



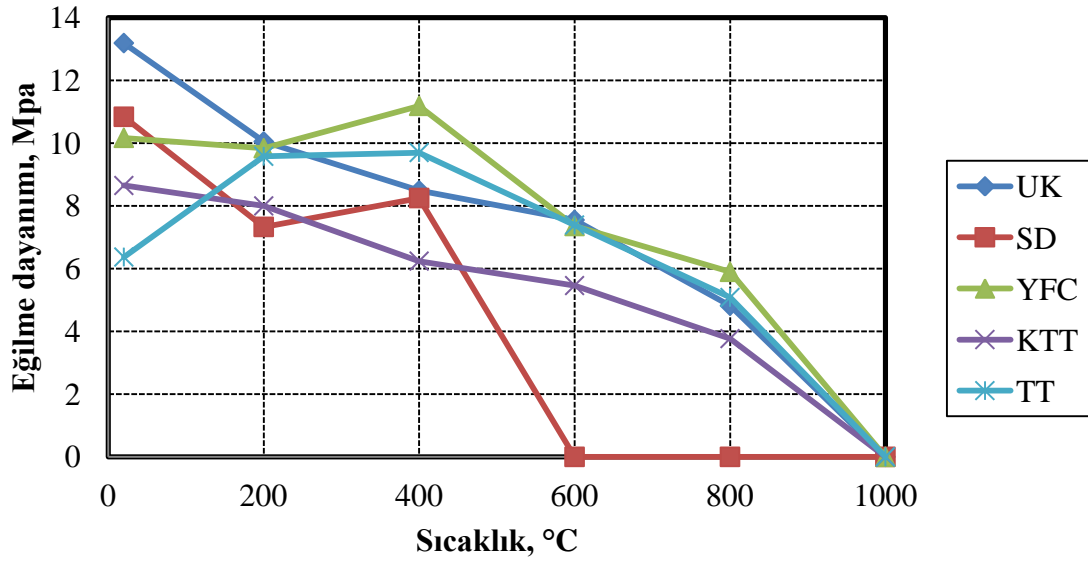
Şekil 4.41. TT ' li harçların eğilme dayanımları



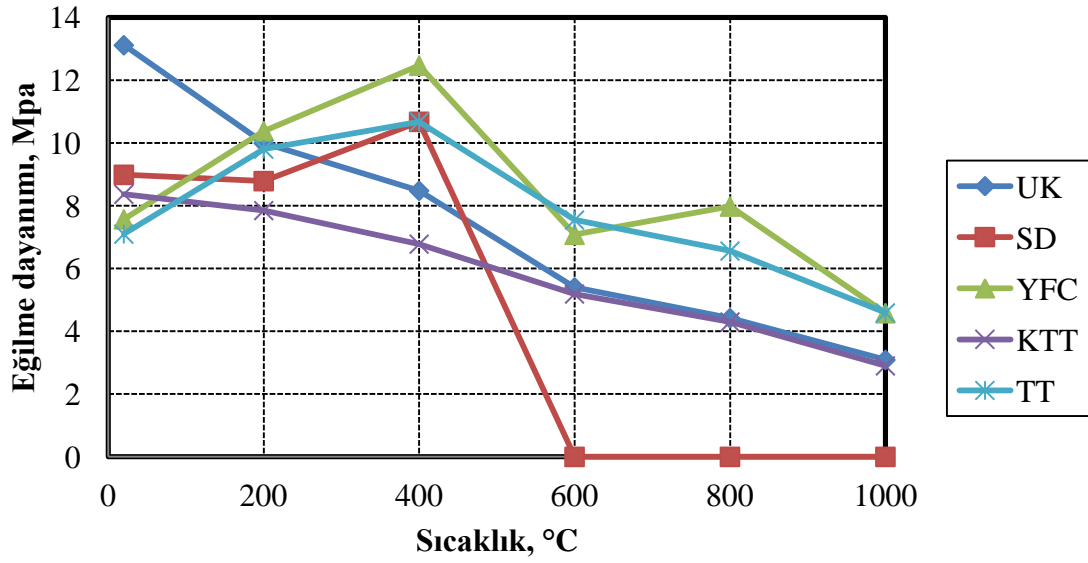
Şekil 4.42. KTT ' li harçların eğilme dayanımları



Şekil 7. Mineral katkı içeriği %10 olan harçlarda eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 8. Mineral katkı içeriği %20 olan harçlarda eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması

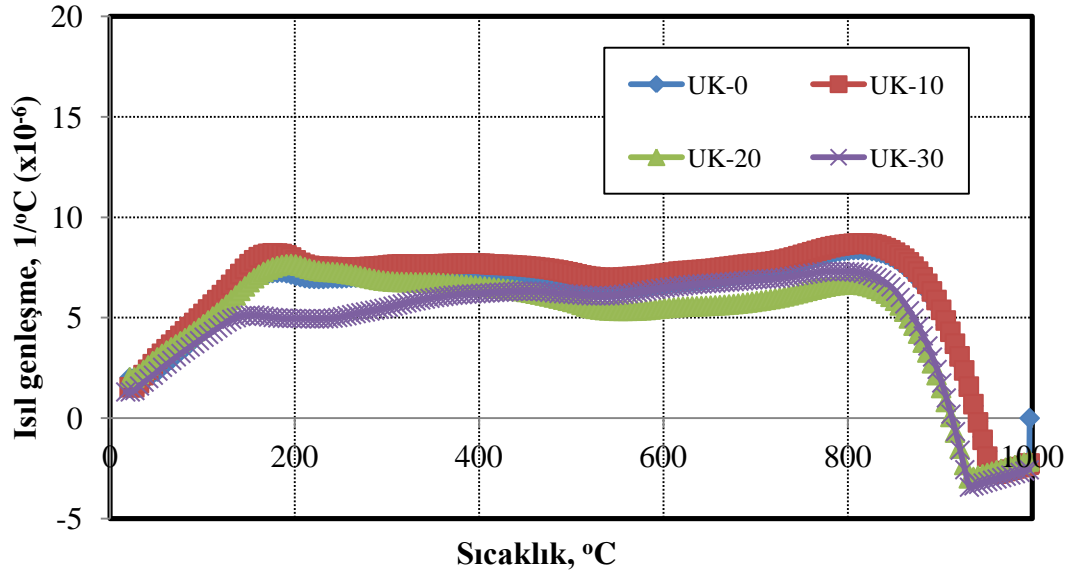


Şekil 9. Mineral katkı içeriği %30 olan harçlarda eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması

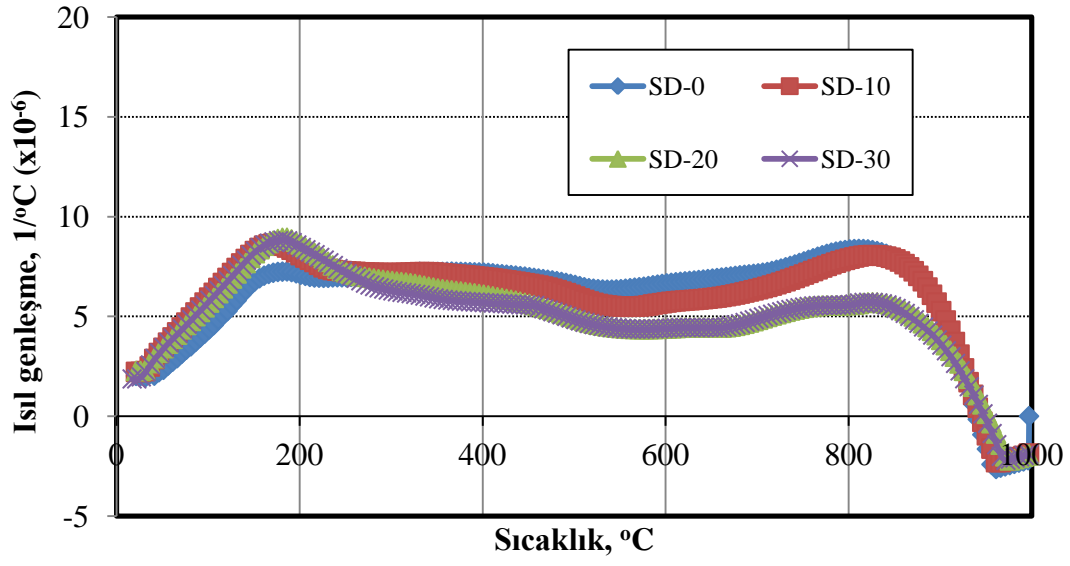
#### 4.4. Isıl Performans Ait Sonuçlar

##### 4.4.1. Isıl Genleşme

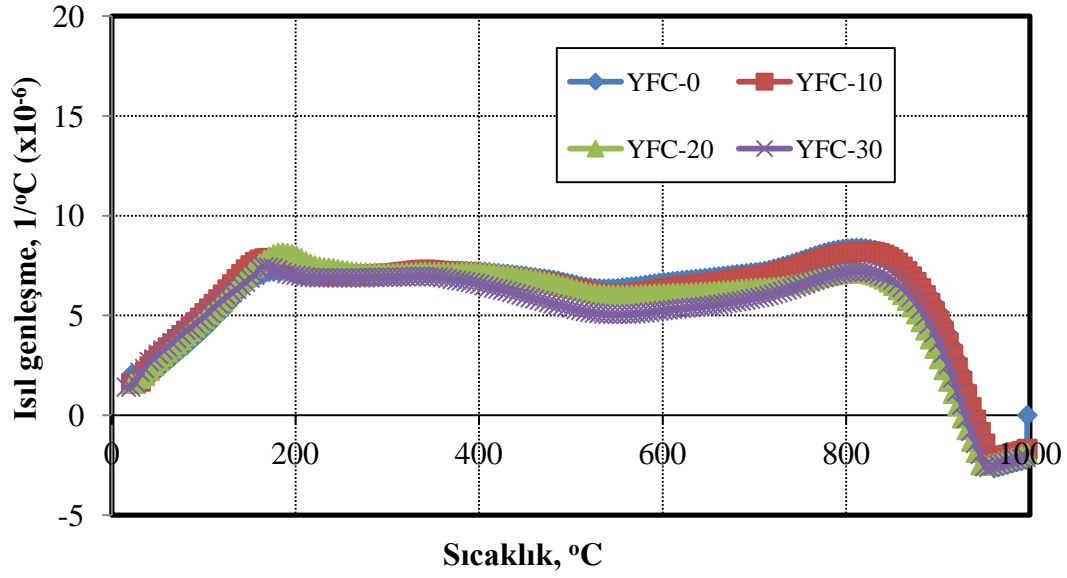
Belirlenen ısı özelliklerinden birisi de KYH'lerin ısı genleşme katsayılarıdır. Isıl genleşme katsayısı, betonun ısı etkisiyle genleşmesinin belirlenmesi için kullanılan katsayıdır. Kırma kumlu harçlar için belirlenmiş olan ısı genleşme katsayıları Şekil 4.46 - Şekil 4.50'de verilmektedir. Tüm mineral katkı içeriklerinde üretilen harçların ısı genleşme katsayıları 200 °C sıcaklık değerine kadar numunelerdeki serbest suyun bünyeyi terk etmesi ve bu sırada oluşturduğu iç basınç nedeniyle artmıştır. Serilerde KTT haricinde %20 ve %30 oranlarında mineral katkı kullanımıyla genel olarak çimento hamurundaki CH miktarı azaldığından dolayı ısı genleşme katsayıları azalmıştır (Shui vd, 2010).



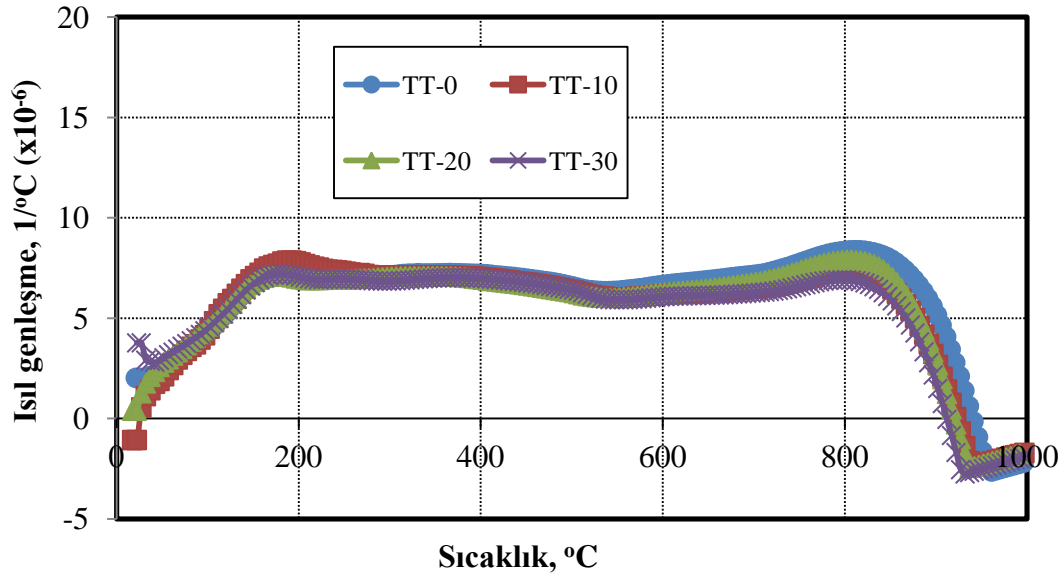
Şekil 10. UK ' lı harçların ısı genleşme katsayıları



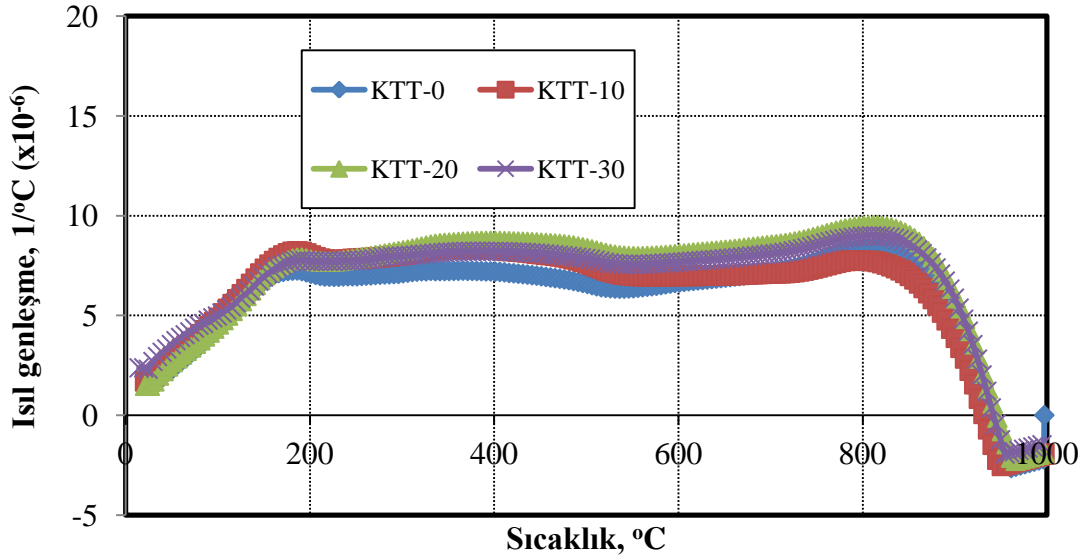
Şekil 11. SD ' li harçların ısı genleşme katsayıları



Şekil 12. YFC ' li harçların ısı genleşme katsayıları



Şekil 13 . TT ' li harçların ısıl genişleme katsayıları



Şekil 14. KTT ' li harçların ısıl genişleme katsayıları

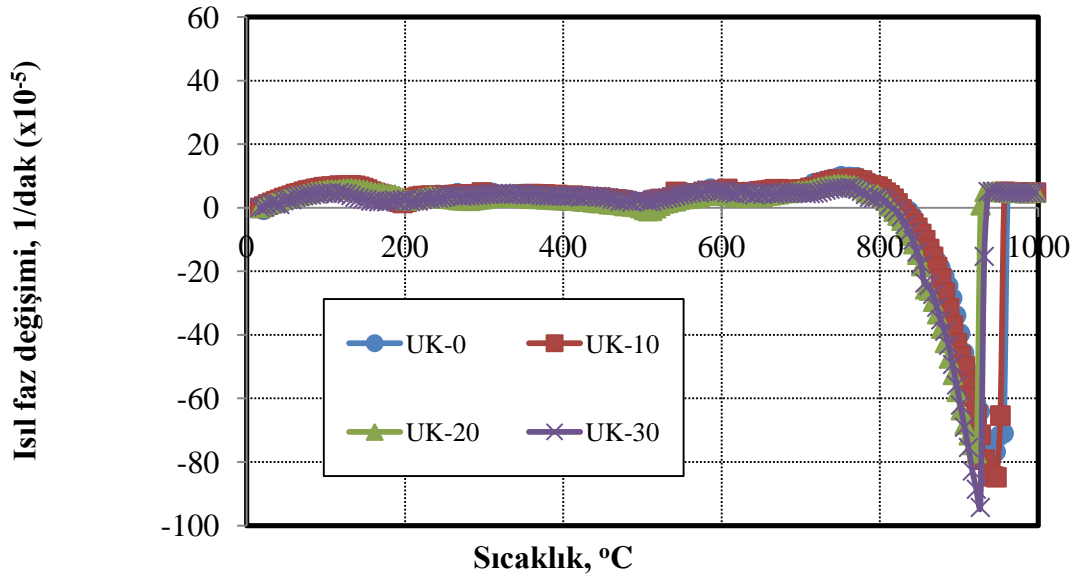
Mineral katkıları arasında en fazla ısıl genişleme katsayısı KTT serilerinde elde edilmiştir. En fazla ısıl genişleme katsayısı 800 °C'de iken, sıcaklık değerinin artışıyla numunelerin ısıl genişleme katsayıları azalarak 1000 °C'de negatif değerler almıştır yani



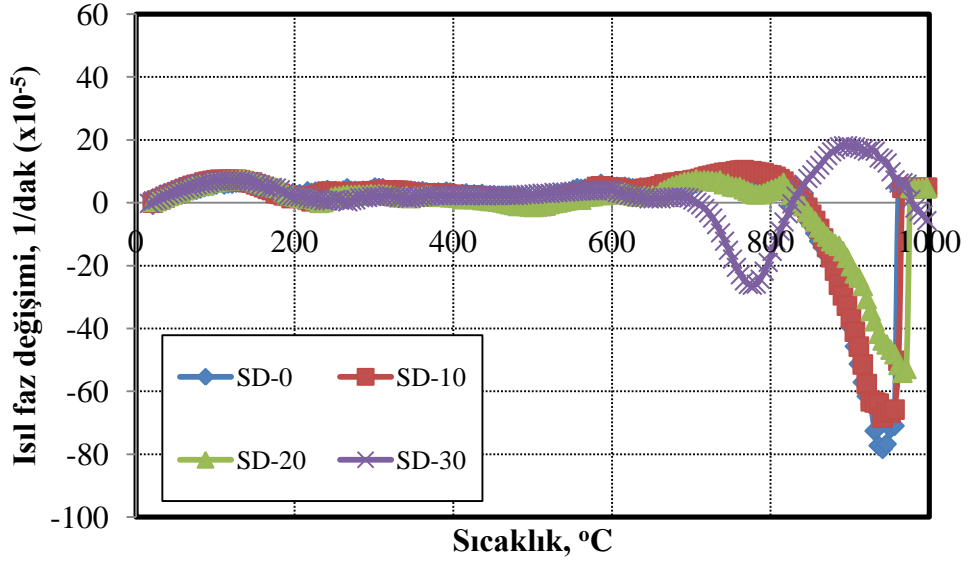
büzülmüştür. Sonuç olarak yüksek sıcaklık riski altında olan betonlar için en uygun agrega tipi kireçtaşı esaslı olan agregalar olup, ısıl genleşme katsayısının doğal silisli agregaların kullanıldığı betonlara göre %100 oranında azalmasını sağlamaktadır. Kireçtaşıyla birlikte mineral katkıların kullanılması ısıl genleşme katsayısının daha da azaltılmasını sağlamıştır. Bu azalma, 800 °C sıcaklık değerinde şahit seriye göre UK-30, SD-30 ve YFC-30 ve TT-30 serilerinde sırasıyla %20, %60, %20 ve %30 oranlarındayken, KTT-30 serisinde %5 oranında artmıştır.

#### **4.4.2. Isıl Faz Değişimleri**

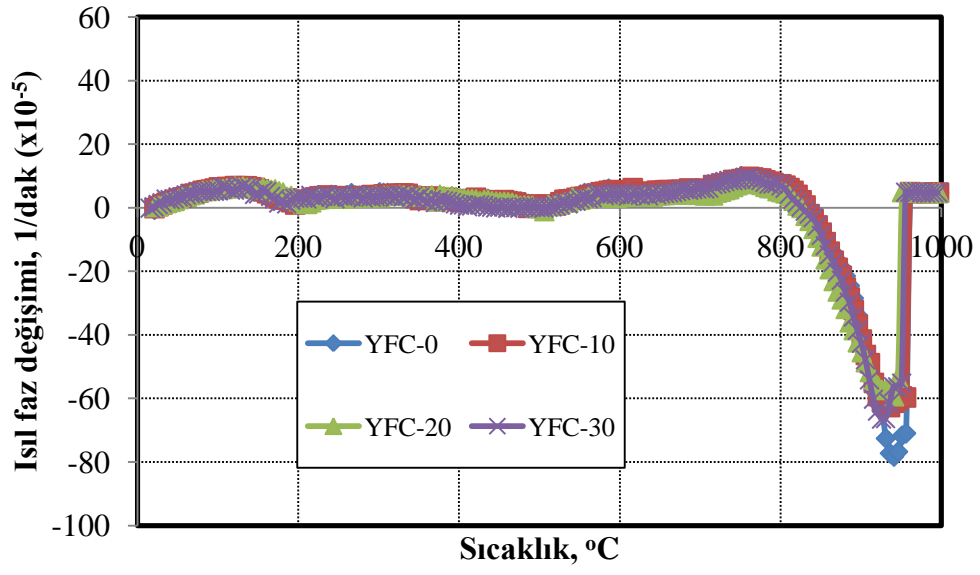
Kırma kumlu serilerde 800 °C'den sonra doğrudan keskin bir şekilde harçların ısıl şekil değiştirme oranları azalarak büzülme eğilimine geçmişlerdir. Buradaki şekil değiştirmelerin doğal kum ve kırma kum için farklı olmasının başlıca nedeni agrega tipinin farklı olmasıdır. Bununla birlikte harç içerisindeki çimento hamuru da önemli derecede etkilidir. Yaklaşık olarak 530 °C'de çimento hamurunda bulunan  $\text{Ca(OH)}_2$  yapısındaki suyu kaybetmeye başlar ve  $\text{CaO}$ 'e dönüşür. Kırma kumla üretilen serilerin genel olarak en fazla şekil değiştirme oranları 850 ile 900 °C arasında elde edilmiştir (Şekil 4.51 – Şekil 4.55). Bunun nedeni de, kireç taşıdan oluşan kırma-kum agregalarının 800 ile 900 °C arasında su kaybederek sönmemiş kirece ( $\text{CaO}$ ) dönüşmesi ve açığa çıkan su buharının etrafına yaptığı basınçtan dolayı betonun genleşmesini arttırmasıdır.  $\text{CaO}$ 'de dönüşüm gerçekleştikten sonra harçlar hızla büzülmektedir. Bu esnada agrega-çimento ara-yüzü ve agregada önemli derecede çatlamlar görülmektedir. Kırma-kumlu serilerde agregadan dolayı 900 °C'de su kaybederek büzülen harçların büyük bir bölümü çatlayarak deforme olmuş ve dağılmışlardır. Kırma-kumla üretilen harçlarda 900 °C'de görülen faz değişimi doğal kumda 600 °C'de görülen faz değişimine göre iki kat daha fazladır. Dolayısıyla doğal kumdaki harçlarda çatlaklar oluşurken kırma kumlu harçlar tamamen deforme olabilmektedirler. Yangın gibi yüksek sıcaklığa kalan yapılarda sıcaklık derecesi 800 °C'ye ulaşmadığı durumda  $\text{CaCO}_3$  esaslı agregalar önerilebilir. Ancak daha yüksek sıcaklıklara maruz kalacak yapılarda kireçtaşı yanı sıra mutlaka doğal agrega da kullanılması önerilmektedir.



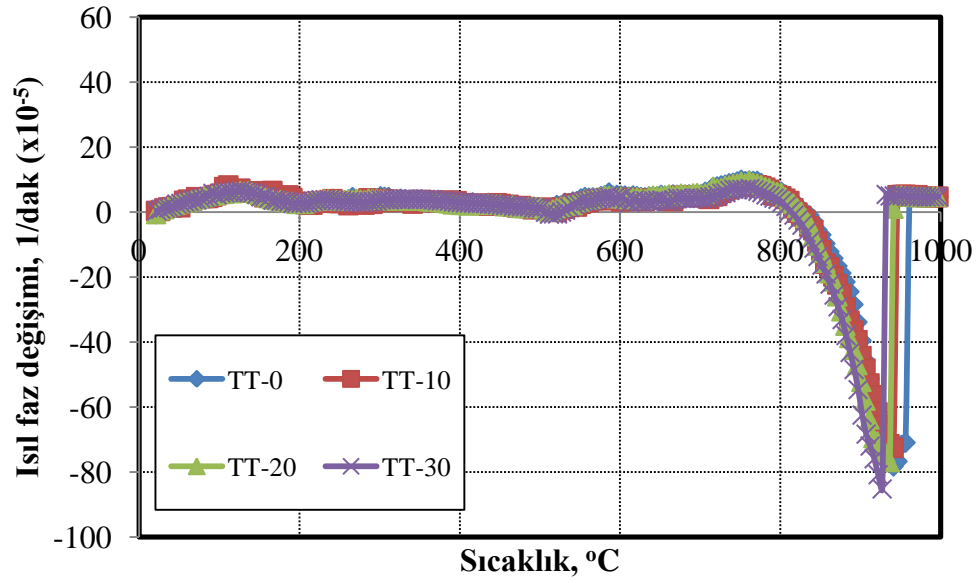
Şekil 15. UK ' lı harçların sıcaklığa bağılı ısıf faz değışimleri



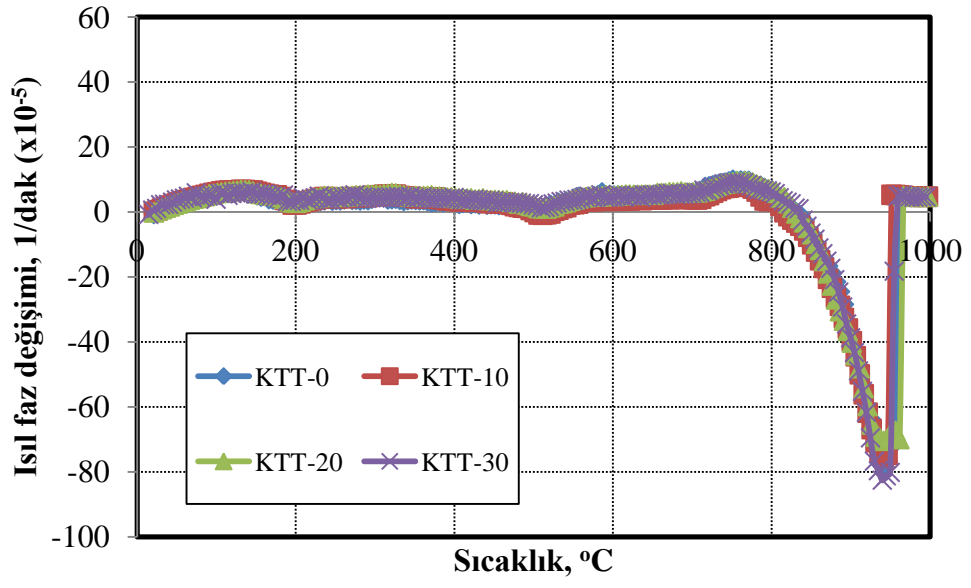
Şekil 16. SD ' li harçların sıcaklığa bağılı ısıf faz değışimleri



Şekil 17. YFC ' li harçların sıcaklığa bağılı ısı faz değışimleri



Şekil 18. TT ' li harçların sıcaklığa bağılı ısı faz değışimleri



Şekil 19. KTT ' li harçların sıcaklığa bağlı ısıl faz değışimleri

## 5. SONUÇLAR

Kendiliğinden yerleşen betonlarda değişik tipte mineral katkıları kullanılabilir. Farklı tipte mineral katkıları içeren kendiliğinden yerleşen betonun harç fazı üzerinde işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- KYH'lerde kullanılan ve genel itibarıyla küresel şekle sahip olan mineral katkıları kimyasal katkıları birlikte kullanılmaları durumunda harçta yayılma özelliklerini ve buna bağlı olarak işlenebilirliklerini arttırmışlardır. Hem yüksek yayılma özelliğine sahip hem de düşük viskoziteli KYH üretimi için kırma kumu kullanılması durumunda %1.5 oranında (bağlayıcının) kimyasal katkıları (süperakışkanlaştırıcı) kullanılması gerektiği görülmüştür. Böylece KYB'lerin özellikle pompa ile dökülürken boru tıkanma problemleri daha az indirilmiş olacaktır.
- Mineral katkı içeriği artmasıyla birlikte genel olarak zamana bağlı dayanım değerleri de artmıştır. Puzolanik olmayan veya puzolanik olup yüksek miktarda kullanılan katkıları da harç içerisinde filler görevi yaparak mikro boşlukların doldurulmasını sağlamışlardır.
- Kırma kumla üretilen harçların sıcaklık etkisiyle birim ağırlıkları azalmış, buna bağlı olarak görünen poroziteleri ve ağırlıkça su emme değerleri artmıştır.
- Mineral katkı kullanımı kırma kumlu harçlarda genleşmeleri genel olarak azaltmıştır. Kırma kumlu harçların ısı genleşme katsayıları 900 °C'den sonra hızlı bir şekilde azalarak büzülme haline geçmiştir. Bu durum da 900 °C üzerindeki sıcaklıklarda harçların tamamen deforme olarak eğilme ve basınç dayanımlarının sıfır olmasına ve bu nedenle taşıma gücünü yitirmesine neden olmuştur.

- Normal koşullarda (20°C) mineral katkı kullanımı, basınç ve eğilme dayanımı değerlerini genel olarak düşürdüğü görölmüştür fakat ileriki sıcaklıklarda bu değerlerin arttığı görölmüştür.
- Basınç dayanımlarında özellikle %20 ve %30 katkı oranlarında yüksek fırın curufu ve tuğla tozu minerallerinin diğer minerallere göre dayanımı arttırdığı görölmüştür. Eğilme dayanımlarında da ortalama aynı sonuçların çıktığı görölmüştür.
- Kırma kum gibi CaO esaslı agrega ile üretilen harçlarda 600 °C civarında faz değişimi olmadığından dolayı agrega tanelerinde normale göre daha az çatlamalar veya deformasyonlar görölmüştür. Isıl faz değişimi 900 °C'de en fazla değerlerdedir. Dolayısıyla numunelerde en fazla deformeler bu sıcaklık değerlerinde olmuştur. Bu deformeler serilerin sıcaklığa bağlı basınç ve eğilme dayanımlarındaki değişimlerden açıkça görölmüştür.
- Tüm deneyler dikkate alındığında %30 oranlı yüksek fırın curufu mineral katkısının en iyi sonuçları verdiği görölmüştür. Yüksek sıcaklığa maruz yerlerde kendiliğinden yerleşen beton veya harç kullanılması durumunda yüksek fırın curufu mineral katkısının kullanılması önerilmektedir.

Sonuç olarak özellikle yüksek sıcaklığa maruz kalacak yapıların betonlarında kireçtaşı esaslı agregaların tercih edilmesi sonucunda beton yapıların 800 °C'ye kadar deforme olması büyük ölçüde önlenmiş olacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- Akman, S., 2000. Yapı Hasarları Ve Onarım İlkeleri, İnşaat Müh. Odası İstanbul Şubesi, Aralık, İstanbul, 177 Sayfa.
- Aydın S., Baradan B., 2003, Yüksek sıcaklığa dayanıklı bağlayıcı geliştirilmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, sayfa 451-460, İstanbul.
- Bingöl, A. F., Gül, R., Donatı-Beton Aderansı, Yüksek Sıcaklıkların Beton Dayanımına ve Aderansa Etkileri Konusunda Bir Derleme, *Tübvav Bilim Dergisi*, Yıl: 2009, **Cilt:2**, Sayı:2
- Efnarc, 2002, Specification and guidelines for self-compacting concrete, Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK, February, ss.1-40.
- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton. METU Press, 741 s, Ankara.
- Erdoğan, T. Y., 2004, Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y., 2006, Sorular ve Yanıtlarıyla Beton, Türkiye Hazır Beton Birliği.
- Felekoğlu B., Türkel S., Baradan B., 2004. Kendiliğinden yerleşen beton: bölüm 1 genel tanıtım, kullanım alanları, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, *Haber Bülteni*, 05 Haziran, Yıl: 19 **Sayı: 117**, ss. 20-24.
- Hammer, T. A., Compressive Strength And Emodulus Of Elevated Temperatures, Report 6.1, High Strength Phase 3.Sıntef-Repport Nr Stf70 A 95023, Trondheim, 16 Pp, 1995.
- Khoury, G. A., Performance of Heated Concrete - Mechanical Properties, Contract NUC/56/3604A with Nuclear Installations Inspectorate, Imperial College, London, United Kingdom, August, (1996).

- Kızılkant, A.B., Yüzer, N., Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Harcın Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisi, *İMO Teknik Dergi*, Yazı 289, 4381-4392, (2008).
- Kocataşkın F., 2000, Yapı Malzemesi Bilimi. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Leemann, A., Münch B., Gasser P., Holzer L., 2006. Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete, *Cement and Concrete Research* **36**, 1425-1433.
- Özkul M.H., 2005. Kendiliğinden yerleşen betonların genel özellikleri, Yapılarda Kimyasal Katkılar (Beton ve Harçlar) Sempozyumu, 24-25 Mart, Ankara, ss. 119-136.
- Phan, L.T. And Carino, N.J., Review Of Mechanical Properties Of Hsc At Elevated Temperatures. *Journal Of Materials İn Civil Engineering*, **Vol.10**, P: 58-64, 1998.
- 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**, 1291-1300, (2001).
- Ramachandran, V. S., *Concrete Admixtures Handbook*, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey, U.S.A., 1995.
- Riley, M. A., Possible New Method For The Assessment Of Fire Damaged Concrete *Magazine Of Concrete Research*, **Cilt 43**, No 155, 87-92, 1991.
- Roussel, N., Stefani, C., Leroy, R., 2005. From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests, *Cement and Concrete Research* **35**, 817-822.
- 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.



- Schwartzentruber, L. D., Roy, R.L., J. Cordin, Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC), *Cement and Concrete Research* **36**, 1203-1213, (2006).
- Sellevoid EJ, Bjøntegaard O., Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: mechanisms of moisture interaction. *Materials and Structures* **39**, 809–815, (2006).
- Shui Z, Zhang R, Chen W, Xuan D, Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste, *Construction and Building Materials* **24**, 1761–1767, (2010).
- Topçu, İ.B., 2006, *Beton teknolojisi*, Uğur Ofset A.Ş., 570s.
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T., Influence of mineral additive type on slump-flow and yield stress of self- consolidating mortar, *Scientific Research and Essays* **Vol. 5** (12), pp. 1492-1500, (2010).
- Türker, P., Erdoğan, B., Yeğınobalı, A., 2003. Kalker Katkılı Portland Çimentoların Yangın Direnci, İMO, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim, İstanbul, Ss. 441-447.
- TS EN 197-1/A3, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- Uygunoğlu, T., 2008, *Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., Doktora Tezi.
- Ün, H., *Yapı Malzemesi 3, Yapay Puzolanlar*, Pamukkale Üniversitesi, 2007 – Bahar
- Ünal O., Topçu İ.B., Uygunoğlu T., 2006. Kendiliğinden yerleşen betonda mermer tozu kullanılması, Mersem'2006, Türkiye V. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu, 2-3 Mart, Afyonkarahisar, ss. 413-420.
- Yüzer, N., Aköz, F., Kızılkanaat, A.B., Yüksek Dayanımlı Betonun Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklık Etkisi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası XVII.Teknik Kongresi, 15-17 Nisan, İstanbul (2004).

Yüzer, N., Aköz, F., Öztürk, L.D., Kızıllkanat, A.B., Yüksek sıcaklık etkisinde kalan çimento harcında hasar oranının renk ölçümü ile araştırılması, İMO, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim, İstanbul, (2003) ss. 461-470.

Zoldners, N.G. And Wilson, H.S., Effect Of Sustained And Cyclic Temperature Exposures On Lightweight Concrete, Behavior Of Concrete Under Temperature Extremes. Acı Publication, (39) 9, P: 149-178, 1973.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı :** Harun Karagöz

**Doğum Yeri Ve Tarihi :** İzmir 07.01.1988

**Yabancı Dili :** İngilizce

**İletişim (Telefon/E-Posta) :** 05382418350 / hrn.krgz.19@gmail.com

### **Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)**

**Lise :** Havva Özişbakan Lisesi 2003-2005

**Lisans :** Afyon Kocatepe Üniversitesi Yapı Eğitimi Bölümü 2006-2010

**Yüksek Lisans :** Afyon Kocatepe Üniversitesi Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı 2010-

### **Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :**

### **Yayımları (SCI ve diğer) :**

Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Curufunun Yüksek Sıcaklık Altındaki Beton Harcına Etkisi,  
I. Ulusal Geri Kazanım Kongre Ve Sergisi, 2-4 Mayıs 2012, Uşak, 307-315, 2012

## EKLER

### Ek-1 Birim Hacim Ağırlık Değerleri (kg/dm<sup>3</sup>)

Mineral katkı	İçerik, %	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
Şahit	0	2,02	2,00	1,99	1,95	1,83	0,00
UK	10	1,98	1,91	1,95	1,90	1,87	0,00
	20	1,92	1,89	1,86	1,85	1,80	0,00
	30	1,87	1,80	1,81	1,80	1,78	1,71
SD	10	2,07	1,94	1,75	0,00	1,95	0,00
	20	2,01	1,90	1,88	0,00	0,00	0,00
	30	1,93	1,87	1,84	0,00	0,00	0,00
YFC	10	2,06	2,01	2,00	1,96	1,92	2,01
	20	2,13	2,05	2,04	1,95	1,95	1,83
	30	2,08	2,05	2,02	2,00	2,00	1,88
KTT	10	1,92	1,92	1,94	1,93	1,91	0,00
	20	1,85	1,90	1,92	1,88	1,86	1,70
	30	1,71	1,90	1,92	1,91	1,89	1,83
TT	10	1,92	1,99	1,96	1,91	1,89	1,79
	20	1,96	1,97	1,96	1,92	1,90	1,82
	30	1,89	1,88	1,89	1,88	1,92	1,82

**Ek-2 Görünen Porozite Değerleri (%)**

Mineral katkı	İçerik, %	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
Şahit	0	17,20	15,95	19,22	23,85	33,53	0,00
UK	10	16,74	14,52	18,04	23,58	22,63	0,00
	20	15,78	13,22	19,44	23,17	24,24	0,00
	30	17,91	15,78	21,07	24,71	23,55	29,71
SD	10	6,40	10,29	25,02	0,00	13,29	0,00
	20	3,22	6,28	19,10	0,00	0,00	0,00
	30	3,66	4,14	10,44	0,00	0,00	0,00
YFC	10	5,75	12,77	17,12	21,91	21,98	16,68
	20	6,11	11,03	16,58	21,05	21,25	23,40
	30	4,28	7,16	17,45	19,13	18,06	25,82
KTT	10	12,52	17,09	19,18	23,41	22,29	0,00
	20	15,06	16,98	18,46	22,14	22,09	36,75
	30	26,73	17,51	19,10	20,32	21,29	27,02
TT	10	10,14	14,76	18,49	22,62	22,62	33,44
	20	4,77	10,18	18,17	20,65	20,94	27,55
	30	9,59	13,01	22,58	21,18	18,77	27,06

**Ek-3 Su Emme Değerleri (%)**

Mineral katkı	İçerik, %	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
Şahit	0	8,51	7,98	9,64	12,23	18,37	0,00
UK	10	8,47	7,61	9,26	12,39	12,08	0,00
	20	8,23	7,01	10,44	12,52	13,48	0,00
	30	9,56	8,77	11,66	13,74	13,25	17,37
SD	10	3,09	5,29	14,26	0,00	6,83	0,00
	20	1,60	3,31	10,18	0,00	0,00	0,00
	30	1,90	2,21	5,69	0,00	0,00	0,00
YFC	10	2,80	6,36	8,55	11,20	11,46	8,31
	20	2,87	5,39	8,14	10,82	10,90	12,80
	30	2,06	3,48	8,65	9,55	9,05	13,71
KTT	10	6,53	8,92	9,91	12,14	11,69	0,00
	20	8,15	8,94	9,59	11,76	11,87	21,58
	30	15,62	9,21	9,95	10,63	11,28	14,77
TT	10	5,28	7,41	9,44	11,83	11,96	18,71
	20	2,44	5,17	9,27	10,77	11,00	15,13
	30	5,07	6,91	11,97	11,26	9,76	14,84

**Ek-4 Basınç Dayanımı Değerleri (MPa)**

Mineral katkı	İçerik, %	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
Şahit	0	40,42	37,83	24,82	22,12	14,20	10,21
UK	10	35,19	38,17	21,53	22,71	19,46	0,00
	20	33,09	39,28	28,42	26,48	20,78	11,03
	30	30,36	40,96	23,37	25,50	22,15	13,98
SD	10	28,55	35,07	30,18	0,00	14,61	7,56
	20	29,54	33,56	26,29	0,00	0,00	0,00
	30	22,48	26,66	42,56	0,00	0,00	0,00
YFC	10	37,69	28,25	34,25	29,89	26,95	9,66
	20	38,65	32,74	33,27	30,55	27,89	9,99
	30	29,82	36,49	36,89	31,29	30,86	19,18
KTT	10	32,24	38,17	31,72	20,82	10,61	8,68
	20	25,11	28,92	27,05	22,88	17,41	5,26
	30	19,05	26,25	19,14	18,38	19,50	9,43
TT	10	33,04	30,33	35,86	21,22	20,77	6,27
	20	39,38	31,31	29,77	30,30	25,84	11,86
	30	28,07	39,60	31,69	25,96	32,89	19,76

**Ek -5 Eğilme Dayanımı Değerleri (MPa)**

Mineral katkı	İçerik, %	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
Şahit	0	11,80	9,78	6,96	4,91	2,24	0,36
UK	10	13,66	9,78	8,47	6,16	3,46	0,00
	20	13,19	10,05	8,49	7,55	4,82	0,00
	30	13,12	10,00	8,48	5,40	4,42	3,09
SD	10	10,96	8,62	8,37	0,00	2,55	0,00
	20	10,84	7,33	8,25	0,00	0,00	0,00
	30	8,99	8,79	10,68	0,00	0,00	0,00
YFC	10	9,13	10,67	9,19	5,88	3,66	3,04
	20	10,17	9,84	11,19	7,36	5,90	0,00
	30	7,57	10,38	12,47	7,08	7,98	4,58
KTT	10	6,41	9,56	6,62	5,50	3,07	0,95
	20	8,65	8,00	6,24	5,46	3,77	0,00
	30	8,37	7,85	6,78	5,19	4,30	2,90
TT	10	8,37	9,02	7,79	5,78	3,96	0,00
	20	6,37	9,58	9,70	7,39	5,08	0,00
	30	7,10	9,81	10,68	7,55	6,56	4,59