



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HAFİF HARÇLARIN
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

GÜNAY AYAYDIN

Eylül 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HAFİF HARÇLARIN
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

GÜNAY AYAYDIN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Eylül 2019

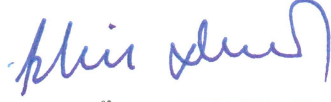
Günay AYAYDIN tarafından Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR danışmanlığında hazırlanan “Alkali İle Aktive Edilmiş Hafif Harçların Özelliklerinin Araştırılması” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Başkan: Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye: Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye: Doç. Dr. İbrahim Özgür DENEME, Aksaray Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.


Günay AYAYDIN

ÖZET

ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HAFİF HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

AYAYDIN, Günay

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Eylül 2019, 123 sayfa

Bu çalışmada, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu hafif harçların farklı kür koşullarına maruz kaldıktan sonraki özellikleri araştırılmıştır. Kontrol harcına ek olarak, 7 farklı molarite de, alkali aktivatör (Na(OH)) ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu hafif harçlar üretilmiştir. Tüm karışımlarda, bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 ve su-bağlayıcı oranı 0.5 olarak alınmıştır. Asidik pomza agregası ile üretilen hafif taze harç özelliklerinden yayılma ve taze birim ağırlık deneysel olarak belirlenmiştir. Daha sonra kalıplara yerleştirilen taze harç numuneleri bir gün sonra kalıptan çıkartılmıştır. Kalıplardan çıkarılan numunelerin bir grubu poşet içerisinde deney gününe kadar laboratuvar ortamında kür edilmiştir. $105 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 12, 24 ve 48 saat süre bekletildikten sonra, poşet içerisine yerleştirilen diğer üç grup ise laboratuvar da poşet içerisinde deney gününe kadar kür edilmiştir. Bu numuneler üzerinde 7, 28, 56 ve 91 gün sonra sertleşmiş hafif harç özelliklerinden sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Dahası, 150 , 250 ve $500 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklara maruz kalan numunelerin sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca seçilen bazı numunelerin SEM, EDS alan ve XRD analizleri yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları, alkali ile aktive edilmiş hafif harç üretilebileceğini bunun yanında uygulanan sıcak kür koşullarının ve yüksek sıcaklıkların harçların özellikleri üzerinde olumsuz etkisinin olduğunu göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: alkali aktivatör, yüksek fırın cürufu, hafif harç, sodyum hidroksit

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED LIGHTWEIGHT MORTARS

AYAYDIN, Günay

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

September 2019, 123 pages

In this study, properties of alkaline activated blast furnace slag lightweight mortars after exposure to different curing conditions were investigated. In addition to the control concrete, lightweight mortars with blast furnace slag activated with alkaline activator (Na(OH)) in 7 molarities were produced. In all mixtures, the amount of binder was taken as 500 kg/m^3 , and the water-binder ratio was taken as 0.5 Flow and fresh unit weight values from the light fresh mortar properties produced with acidic pumice aggregate were determined. Then, fresh mortar specimens placed in the molds were removed from the molds one day later. A group of specimens removed from the molds was cured into the pochette in the laboratory until the day of the experiment. After the other three group specimens placed into the pochette were cured in the oven at $105 \text{ }^\circ\text{C}$ temperature for 12, 24 and 48 hours, they were cured in the laboratory into the pochette until the day of the experiment. Hardened unit weight, ultrasound pulse velocity, flexural strength and compressive strength values from hardened lightweight mortar properties on these specimens after 7, 28, 56 and 91 days were performed experimentally. Furthermore, hardened unit weight, ultrasound pulse velocity, flexural strength and compressive strength values of the specimens exposed to 150, 250 and $500 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatures were determined. In addition, SEM, EDS area and XRD analyzes of some selected samples were performed. The results of the experimental study showed that alkali activated lightweight mortar can be produced, and the applied hot curing conditions and high temperatures have a negative effect on the properties of mortars.

Keywords: Alkaline activator, Blast furnace slag, Lightweight mortar, Sodium hydroxide.

ÖN SÖZ

Bu Yüksek Lisans Tezi çalışmasında, çimentoya alternatif bir bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu alkaliler ile aktive edilerek hafif harç numuneler üretilmiştir. Öncelikle alkali ile aktive edilmiş taze hafif harçların taze birim ağırlık ve yayılma değerleri belirlenmiştir. Daha sonra farklı kür koşullarına ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan sertleşmiş hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu kullanarak üretilen hafif harçlar ve bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanılarak üretilen kontrol hafif harçlarının özellikleri birbirleriyle kıyaslanmıştır. Seçilen bazı numuneler üzerinde SEM, EDS alan ve XRD analizleri yapılmış ve yüksek sıcaklık etkisi altındaki değişimleri incelenmiştir.

Lisans ve Yüksek Lisans Eğitimim boyunca soru ve sorunlarımda büyük bir anlayış ve sabırla bana yardımcı olan, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde görev yapan kıymetli hocalarıma, tez çalışmam boyunca tecrübelerine başvurduğum Dr. Serhat ÇELİKTEN'e, Prof. Dr. Metin Hakan SEVERCAN'a, Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU'na, Doç. Dr. İbrahim Özgür DENEME'ye ve çalışmalarım sırasında bana her türlü yardımda bulunan, çalışmalarımı izleyen ve yönlendiren, her türlü desteğini ve ilgisini esirmeyen, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR'e teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmalarımnda beni yalnız bırakmayan İnşaat Mühendisi Uğurcan AKÇA'ya, başta İnşaat Mühendisi Asım BAYAR olmak üzere Bersa Yapı Denetim deki tüm mesai arkadaşlarıma, yardımlarından dolayı Elektrik Elektronik Mühendisi Eray AYDIN'a, yüksek fırın cürufu temininde yardımcı olan Adana Çimento Fabrikasının kıymetli yetkililerine, tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu tez çalışmasında da maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her koşulda yanımda olduklarını hissettiğim aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiv
SİMGE VE KISALTMALAR	xv
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II HAFİF BETONLAR	3
2.1 Hafif Betonun Tanımı	3
2.2 Hafif Betonların Tarihçesi	3
2.3 Hafif Betonların Sınıflandırılması	5
2.4 Hafif Beton Yapımında Kullanılan Agregalar	7
2.4.1 Hafif agregaların özellikleri	8
2.5 Hafif Betonun Özellikleri	9
2.5.1 Hafif betonun üstünlükleri	9
2.5.2 Hafif betonun sakıncaları	9
2.5.3 Hafif betonun taze özellikleri	10
2.5.4 Hafif betonun sertleşmiş özellikleri	11
2.5.5 Hafif betonun dayanıklılığı	13
BÖLÜM III YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	15
3.1 Yüksek Fırın Cürufunun Üretimi	15
3.2 Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri	16
3.3 Yüksek Fırın Cürufunun Hidratasyonu	17
3.4 Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özellikleri Üzerine Etkisi	18
3.4.1 Yüksek fırın cürufunun taze beton özellikleri üzerine etkisi	18
3.4.2 Yüksek fırın cürufunun sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkisi	18
3.4.3 Yüksek fırın cürufunun betonun dayanıklılık özelliklerine etkisi	19
3.5 Yüksek Fırın Cürufunun Kullanım Alanları	21

3.5.1 Yol malzemesi ve asfalt betonu agregası olarak kullanımı	21
3.5.2 Hafif beton agregası olarak kullanımı	22
3.5.3 Çimento üretiminde kullanımı	22
3.5.4 Beton yapımında mineral katkı olarak kullanımı	22
BÖLÜM IV ALKALİLERLE AKTİVASYON	24
4.1 Tarihsel Gelişimi.....	24
4.2 Tipleri ve Kullanım Alanları.....	25
4.3 Alkali Aktivatörler	26
4.4 Sodyum Hidroksit	27
BÖLÜM V KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	29
5.1 Hafif Betonlar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	29
5.2 Yüksek Fırın Cürufu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	30
5.3 Alkali Aktivatörler ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	33
BÖLÜM VI DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
6.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	37
6.1.1 Pomza.....	37
6.1.2 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu	39
6.1.3 Na(OH) (sodyum hidroksit).....	40
6.1.4 Çimento.....	41
6.1.5 Karışım suyu	41
6.2 Harç Karışım Oranları	42
6.3 Harç Numunelerin Üretimi ve Üzerinde Uygulanacak Deneyler	43
6.3.1 Taze harç deneyleri	44
6.3.1.1 Taze birim ağırlık.....	44
6.3.1.2 Yayılma deneyi	44
6.3.2 Sertleşmiş harç deneyleri	45
6.3.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık.....	45
6.3.2.2 Ultrases geçiş hızı	46
6.3.2.3 Eğilme dayanımı	47
6.3.2.4 Basınç dayanımı.....	48
6.4 Yüksek Sıcaklık Etkisine Dayanıklılık Deneyi	49
6.5 SEM, EDS ve XRD Analizi.....	49
BÖLÜM VII DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	51
7.1 Taze Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	51

7.1.1 Taze birim ağırlık.....	51
7.1.2 Yayılma Deneyi	52
7.2 Sertleşmiş Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	52
7.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık.....	52
7.2.2 Ultrases geçiş hızı	57
7.2.3 Eğilme dayanımı	64
7.2.4 Basınç dayanımı.....	71
7.3 Yüksek Sıcaklık Etkisine Dayanıklılık Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	77
7.3.1 Yangın etkisi altında sertleşmiş birim ağırlık	77
7.3.2 Yangın etkisi altında ultrases geçiş hızı.....	83
7.3.3 Yangın etkisi altında eğilme dayanımı	89
7.3.4 Yangın etkisi altında basınç dayanımı	95
7.4 Sertleşmiş Harç Özellikleri Arasındaki İlişkiler	102
7.4.1 Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki	102
7.4.2 Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki.....	102
7.4.3 Yüksek sıcaklıkta eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	103
7.4.4 Yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki...	104
7.5 SEM, EDS ve XRD Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	105
BÖLÜM VIII SONUÇLAR.....	111
KAYNAKLAR	114
ÖZ GEÇMİŞ	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Hafif betonların sınıflandırılması (Rilem, 1978)	7
Çizelge 2.2. Hafif beton sınıfları (Taşdemir, 2003).....	7
Çizelge 2.3. Agrega türüne göre elde edilen hafif betonların özellikleri.....	8
Çizelge 2.4. Hafif agregaların bazı özellikleri (Clarke, 1993).....	8
Çizelge 3.1. Yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonları (Onat, 1998)	16
Çizelge 4.1. Alkali aktivatörlerin kullanım alanları	25
Çizelge 6.1. Pomzanın kimyasal kompozisyonu (%)	37
Çizelge 6.2. Pomzanın elek analizi (%).....	38
Çizelge 6.3. Yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri.....	39
Çizelge 6.4. Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu %	39
Çizelge 6.5. Yüksek fırın cürufunun basınç dayanım değerleri	39
Çizelge 6.6. Sodyum hidroksitin kimyasal kompozisyonu.....	40
Çizelge 6.7. Çimentonun kimyasal kompozisyonu (%)	41
Çizelge 6.8. Çimentonun fiziksel özellikleri	41
Çizelge 6.9. Harç karışımları malzeme miktarları (3 adet prizmatik numune için)	42
Çizelge 7.1. Harç karışımlarında yayılma ve taze birim ağırlık değerleri	51
Çizelge 7.2. Harç karışımlarının sertleşmiş birim ağırlık değerleri.....	53
Çizelge 7.3. Harç karışımlarının ultrases geçiş hızı değerleri	58
Çizelge 7.4. U_{pv} ile beton kalitesinin değerlendirilmesi	64
Çizelge 7.5. Harç karışımlarının eğilme dayanımı değerleri	65
Çizelge 7.6. Harç karışımlarının basınç dayanımı değerleri.....	72
Çizelge 7.7. Harçların yangın etkisi altında sertleşmiş birim ağırlık değerleri	78
Çizelge 7.8. Harçların yangın etkisi altında ultrases geçiş hızı değerleri	84
Çizelge 7.9. Harçların yangın etkisi altında eğilme dayanımı değerleri.....	90
Çizelge 7.10. Harçların yangın etkisi altında basınç dayanımı değerleri	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 6.1. Pomzanın granülometri eğrisi.....	38
Şekil 7.1. Havada-poşette kür uygulanan numunelerin birim ağırlık değerleri.....	54
Şekil 7.2.12 saat etüvde kür uygulanan numunelerin birim ağırlık değerleri.....	55
Şekil 7.3. 24 saat etüvde kür uygulanan numunelerin birim ağırlık değerleri.....	56
Şekil 7.4. 48 saat etüvde kür uygulanan numunelerin birim ağırlık değerleri.....	57
Şekil 7.5. Havada poşette kür uygulamasında U_{pv} değerleri	59
Şekil 7.6. 12 saat 105 °C etüvde kür uygulamasında U_{pv} değerleri	60
Şekil 7.7. 24 saat 105 °C etüvde kür uygulamasında U_{pv} değerleri	61
Şekil 7.8. 48 saat 105 °C etüvde kür uygulamasında U_{pv} değerleri	62
Şekil 7.9. 7 günlük U_{pv} değerleri	62
Şekil 7.10. 28 günlük U_{pv} değerleri	63
Şekil 7.11. 56 günlük U_{pv} değerleri	63
Şekil 7.12. 91 günlük U_{pv} değerleri	63
Şekil 7.13. Havada-poşette kür koşulu için f_{fs} değerleri.....	66
Şekil 7.14. 12 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_{fs} değerleri	67
Şekil 7.15. 24 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_{fs} değerleri	68
Şekil 7.16. 48 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_{fs} değerleri	69
Şekil 7.17. 7 Günlük f_{fs} değerleri.....	69
Şekil 7.18. 28 Günlük f_{fs} değerleri.....	70
Şekil 7.19. 56 Günlük f_{fs} değerleri.....	70
Şekil 7.20. 91 Günlük f_{fs} değerleri.....	70
Şekil 7.21. Havada-poşette kür koşulu için f_c değerleri.....	71
Şekil 7.22. 12 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_c değerleri.....	73
Şekil 7.23. 24 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_c değerleri.....	74
Şekil 7.24. 48 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_c değerleri.....	75
Şekil 7.25. 7 Günlük f_c değerleri	76
Şekil 7.26. 28 Günlük f_c değerleri	76
Şekil 7.27. 56 Günlük f_c değerleri	76
Şekil 7.28. 91 Günlük f_c değerleri	77

Şekil 7.29. Havada poşette kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında birim ağırlık değerleri	79
Şekil 7.30. 12 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında birim ağırlık değerleri	80
Şekil 7.31. 24 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında birim ağırlık değerleri	81
Şekil 7.32. 48 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında birim ağırlık değerleri	82
Şekil 7.33. 150 °C de numunelerin birim ağırlık değerleri	82
Şekil 7.34. 250 °C de numunelerin birim ağırlık değerleri	83
Şekil 7.35. 500 °C de numunelerin birim ağırlık değerleri	83
Şekil 7.36. Havada poşette kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında U_{pv} değerleri	85
Şekil 7.37. 12 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında U_{pv} değerleri	86
Şekil 7.38. 24 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında U_{pv} değerleri	87
Şekil 7.39. 48 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında U_{pv} değerleri	88
Şekil 7.40. 150 °C de numunelerin U_{pv} değerleri	88
Şekil 7.41. 50 °C de numunelerin U_{pv} değerleri	89
Şekil 7.42. 500 °C de numunelerin U_{pv} değerleri	89
Şekil 7.43. Havada poşette kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_{fs} değerleri	91
Şekil 7.44. 12 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_{fs} değerleri	92
Şekil 7.45. 24 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_{fs} değerleri	93
Şekil 7.46. 48 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_{fs} değerleri	94
Şekil 7.47. 150 °C de numunelerin f_{fs} değerleri	94
Şekil 7.48. 250 °C de numunelerin f_{fs} değerleri	95
Şekil 7.49. 500 °C de numunelerin f_{fs} değerleri	95

Şekil 7.50. Havada poşette kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f _c değerleri.....	97
Şekil 7.51. 12 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f _c değerleri.....	98
Şekil 7.52. 24 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f _c değerleri.....	99
Şekil 7.53. 48 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f _c değerleri.....	100
Şekil 7.54. 150 °C de numunelerin f _c değerleri.....	101
Şekil 7.55. 250 °C de numunelerin f _c değerleri.....	101
Şekil 7.56. 500 °C de numunelerin f _c değerleri.....	101
Şekil 7.57. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ilişkisi	102
Şekil 7.58. Basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	103
Şekil 7.59. Yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ilişkisi	104
Şekil 7.60. Yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	105
Şekil 7.61. Harçların SEM analizleri	106
Şekil 7.62. Harçların yakınlaştırılmış SEM analizleri	107
Şekil 7.63. Harçların EDS analizleri (agrega)	108
Şekil 7.64. Harçların EDS analizleri (matris).....	109
Şekil 7.65. Harçların XRD analizleri.....	110

FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 6.1. Pomzanın görünümü	38
Fotoğraf 6.2. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun görünümü.....	40
Fotoğraf 6.3. Na(OH)'in görünümü.....	40
Fotoğraf 6.4. Harç numunelerinin hazırlanışı.....	43
Fotoğraf 6.5. Yayılma deneyi	45
Fotoğraf 6.6. Sertleşmiş birim ağırlık deneyi	45
Fotoğraf 6.7. Ultrases geçiş hızı deneyi.....	46
Fotoğraf 6.8. Eğilme dayanımı deneyi.....	47
Fotoğraf 6.9. Basınç dayanımı deneyi	48
Fotoğraf 6.10. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisine maruz kalması.....	49

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
%	Yüzde
<	Küçüktür
>	Büyüktür
≥	Büyük eşit
≤	Küçük eşit
±	Artı eksi
÷	Bölme
×	Çarpma
+	Toplam
-	Eksi
°C	Santigrat derece
Al ₂ O ₃	Aliminyum oksit
CaO	Kalsiyum oksit
Ca(OH) ₂	Kalsiyum hidroksit
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
Cl	Klor
CO ₂	Karbondioksit
C ₃ A	Kalsiyum alüminat
f _c	Basınç dayanımı
f _{fs}	Eğilme dayanımı
Fe	Demir
Fe ₂ O ₃	Demir oksit
H ₂ O	Su
K	Potasyum
KOH	Potasyum hidroksit
K ₂ O	Potasyum oksit
Li	Lityum
MgO	Magnezyum oksit

MnO ₂	Mangan oksit
μs	Mikro saniye
Na	Sodyum
NaCl	Sodyum klorür
Na ₂ O	Sodyum oksit
Na(OH)	Sodyum hidroksit
Na ₂ SO ₃	Sodyum silikat
S	Kükürt
SiO ₂	Silisyum dioksit
SO ₃	Kükürt trioksit
TiO ₂	Titanyum dioksit
U _{pv}	Ultrases geçiş hızı

Kısaltmalar

Açıklama

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACI	Amerika Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Standardı
cm	Santimetre
cm ³	Santimetreküp
DIN	Alman Ulusal Standartları
dm ³	Desimetreküp
EDS	Enerji Dispersiv Spektrum
g	Gram
kcal	Kilo Kalori
Kg	Kilogram
Km	Kilometre
Kgf	Kilogram Kuvvet
kN	Kilo Newton
lt	Litre
m	Metre
M	Molar
ml	Mililitre
mm	Milimetre

M.Ö.	Milattan Önce
MPa	Mega Paskal
Ms	Alkali Aktivatörlerin SiO ₂ /Na ₂ O Oranı (Aktivatör Modülü)
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
N	Newton
sn	Saniye
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SSCB	Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği
TDY	Türk Deprem Yönetmeliği
TS	Türk Standartları
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü
vd.	Ve Diğerleri
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
XRD	X Işını Kırınımı

BÖLÜM I

GİRİŞ

Kararlı bir kristal yapıya sahip olmayan ve su ile tek başına bağlayıcılık özelliği kazanamayan yüksek fırın cürufu (YFC) gibi malzemeler ancak bir aktivatör vasıtasıyla aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülebilmektedir. Bu yöntem ile üretilen bağlayıcıların kullanımı, yüksek mekanik performans, düşük enerji giderleri, düşük kirlenici gaz salınımları ve çevrenin daha az tahribi (doğal kaynaklar yerine atıkların kullanımı ile) gibi avantajlar sunmaktadır (Aydın, 2010).

Bu çalışmada; çimento tüketim miktarını azaltarak çevre kirliliğinin azalmasına katkı sağlamak için öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu alkalilerle aktive etmek ve bununla birlikte yapıların ölü yükünü azaltmak için belirli boyutlarda kırılmış pomza agregası kullanılarak hafif harç üretmek hedeflenmiştir.

Demir çelik üretiminde gelişmiş olan ülkemiz ne yazık ki yüksek fırın cürufunun beton teknolojisinde kullanılmasında oldukça gerilerdedir. YFC'nin beton üretiminde daha çok kullanılmasının neticesinde endüstriyel atık bir madde değerlendirildiği için ülkemiz ekonomisine ve çevre kirliliğinin önlenmesine önemli katkılar sağlayacaktır (Topçu ve Canbaz, 2005).

YFC, su ile birleştirildiğinde az da olsa belirli bir miktar bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır. Ancak, cürufların tek başlarına suyla olan tepkimeleri, çimentoların hidrasyon hızıyla mukayese edildiğinde oldukça yavaş ilerlediğinden, cürufun bu tarz tek başına su ile kullanımı pratikte çok fazla yaygın değildir. Bunun neticesinde bilim adamları yavaş ilerleyen bu hidrasyonu hızlandırabilmek adına bir takım çalışmalara yönelmişlerdir. Bu çalışmalar neticesinde, cürufların alkaliler ile aktivasyonu sonucunda, inşaat uygulamalarında kullanılacak kalite de bir bağlayıcı üretilebileceği görülmüştür. Karışım içerisinde çimento kullanmaksızın, alkali aktivatör ve tek başına cüruf kullanımıyla elde edilen alkali ile aktive edilmiş cüruflar, bağlayıcılık özellikleri ile geleneksel Portland çimentosuna güçlü bir alternatif olarak görülmektedir (Wang, 2000).

Hafif agrega kullanılarak üretilen hafif betonlar, azalmış ölü yük, depreme karşı dayanıklılık, ekonomiklik, ısı ve ses yalıtımı ve yangına karşı dayanıklılık gibi üstünlüklere sahip betonlardır (Düzgün, 2001). Hafif beton üretiminde kullanılan doğal hafif agregalar içerisinde en yaygın olarak kullanılanı pomzadır. Pomza, volkanik faaliyetler esnasında çok yüksek sıcaklık ve basınç etkisi altında eriyik halde bulunan magmanın, yeraltından atmosfer katmanlarına doğru püskürmesi anında ani olarak ısı kaybetmesi ve içerisinde muhteva ettiği çeşitli gazların dışarı çıkması sonucunda kristalleşmeye fırsat bulamadığı için çok gözenekli bir yapıya kavuşan piroklastik bir kayaç türüdür. Pomzanın, düşük yoğunluğu, yüksek ısı ve ses izolasyonu, iklimlendirme özelliği, pürüzlü yüzeyinin kolay sıvanabilirliği, deprem yükü etkisi altındaki elastikiyeti ve diğer agregalara göre daha ekonomik olması gibi avantajlarından dolayı inşaat ve yapı endüstrisi sektörlerinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Davraz, 2001).

Sonuç olarak, beton üretiminde çimentoya alternatif bir bağlayıcı malzeme kullanımı ile çeşitli atıkların en verimli şekilde ekonomiye tekrar kazandırılması ve bu betonlar üretilirken hafif agregalar ile depreme, yangına ve olumsuz çevre koşullarına karşı daha dayanıklı olmalarının sağlanması oldukça önemlidir. Bu amaçla alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu hafif harçların farklı kür koşullarına maruz kaldıktan sonraki özellikleri bu tez çalışmasında araştırılmıştır. Kontrol harcına ek olarak, 7 farklı molarite de (8M, 10M, 12M, 14M, 16M, 18M ve 20M) alkali aktivatör (80, 100, 120, 140, 160, 180 ve 200 gr olarak farklı oranlarda kullanılan Na(OH)) ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu hafif harçlar üretilmiştir. Asidik pomza agregası ile üretilen hafif taze harç özelliklerinden yayılma ve taze birim ağırlık değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Kalıplardan çıkarılan numunelerin bir grubu poşet içerisinde deney gününe kadar laboratuvar ortamında kür edilmiştir. 105 °C sıcaklıktaki etüvde 12, 24 ve 48 saat süre bekletildikten sonra, poşet içerisine yerleştirilen diğer üç grub ise laboratuvarda poşet içerisinde deney gününe kadar kür edilmiştir. Bu numuneler üzerinde 7, 28, 56 ve 91 gün sonra sertleşmiş hafif harç özelliklerinden sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş hızı (U_{pv}), eğilme dayanımı (f_{fs}) ve basınç dayanımı (f_c) değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Dahası, 150, 250 ve 500 °C sıcaklıklara maruz kalan numunelerin sertleşmiş birim ağırlık, U_{pv} , f_{fs} ve f_c değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca seçilen bazı numunelerin SEM, EDS alan ve XRD analizleri yapılmıştır.

BÖLÜM II

HAFİF BETONLAR

2.1 Hafif Betonun Tanımı

Kuru birim hacim ağırlığı 300 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 , küp numune basınç dayanımları 1 MPa ile 60 MPa ve ısı geçirimsizliği 0.25 W/mK ile 1.00 W/mK arasında olacak şekilde üretilen betonlar hafif beton olarak tanımlanabilir (Newman, 2003). Normal betonun birim ağırlığının, kullanılan agrega niteliklerinin değiştirilmesine bağlı olarak azaltılması ile üretilen beton çeşidi, hafif beton olarak adlandırılabilir (Orcaş, 2010).

TS 2511'e göre hava kuru haldeki birim hacim ağırlığı 1900 kg/m^3 den daha düşük değerler alan ve 28 günlük basınç dayanımı en az 16 MPa olan, hafif agrega kullanılarak üretilen betonlar taşıyıcı hafif beton olarak nitelendirilmektedir. ACI Committee 213R-03 (2003)'e göre ise taşıyıcı hafif betonlar, karakteristik basınç dayanımı 17 MPa 'dan büyük olan ve havada kurumuş haldeki yoğunluğu 1120 kg/m^3 'ten fazla, 1960 kg/m^3 'ten az olan betonlar olarak tanımlanmaktadır. TS EN 206-1'de fırın kuru haldeki birim hacim ağırlığı 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında olan betonlar, hafif beton olarak tarif edilmektedir (Dikici, 2010).

2.2 Hafif Betonların Tarihçesi

Günümüzde modern yapı uygulamalarında, daha hafif ve ekonomik yapılar oluşturmak amacıyla yapıyı oluşturan elemanlarının bir kısmı veya tamamı, hafif betonlardan imal edilmektedir. Özellikle ısı ve ses yalıtım özellikleri ile ön plana çıkan hafif betonlar, çeşitli dayanım özelliklerine ve birim hacim ağırlıklarına göre sınıflandırılmakta ve taşıyıcılık özellikleri vesilesiyle de kullanım alanı bulmaktadır. Hafif agregalı harçların kullanımı Dünya'da M.Ö. 3000 yıl öncesine Avrupa'da ise 2000 yıl öncesinde Romalıların tapınak ve heykellerini hafif harçlar kullanarak inşa etmelerine dayanmaktadır. Hafif agregalı harçlar; III. Yüzyılda Mezopotamya'daki Babil Saraylarında, IV. Yüzyılda Sümerler tarafından inşa edilen şu anki Ayasofya Müzesinde ve VI. Yüzyılda yapılan Meksika Piramitlerinin inşasında kullanılmıştır (Aitcin, 1998).

İlk zamanlarda hafif beton yapımında pomza, tuf, perlit ve benzeri volkanik kökenli kayalar hem iri hem ince agrega olarak kullanılmıştır. Hafif beton yapımında ince agrega olarak kullanılan hafif agregaların büyük bir çoğunluğu az da olsa bağlayıcılık özelliğine sahiptir (Chandra ve Bertsson, 2003).

20. Yüzyılın başlarında İngiltere’de başta “British Museum” binası olmak üzere birçok yapı hafif beton kullanılarak inşa edilmiştir. Patentli olarak ilk hafif agrega üretim yöntemini J. Hayde tarafından 1918 yılında geliştirmiştir. Üretilen bu agregaların birçoğunun her türlü betonarme yapılarda kullanılabilir özelliklere sahip olduğu ve hafif beton kullanım alanlarının Birinci Dünya Savaşı sonrasında gemi yapımında da kullanılacak kadar arttığı bilinmektedir (Short ve Kinniburg, 1978; Chandra ve Bertsson, 2003).

İlk zamanlarda, yalıtım amaçlı olarak kullanılan hafif harçların, birim ağırlıkları 300 kg/m³ ile 800 kg/m³ arasında değişmiştir. Daha sonraki çalışmalar bazı hafif betonların taşıyıcı beton olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Fakat bunun yanında taşıyıcı hafif betonların birim hacim ağırlıkları ve ısı iletim katsayıları, yalıtım amaçlı olarak kullanılan hafif betonlara göre oldukça fazladır (Neville, 1988). Bu değerlerin, normal ağırlıklı betonların değerleri ile mukayese edildiğinde %25–%30 oranında daha düşük seviyede olduğu gözlenmiştir. II. Dünya Savaşı sırasında agrega olarak, tortulu şist agregası kullanılarak betonarme yapılarda kullanılan ilk hafif beton elde edilmiştir. Bu betonun basınç dayanımı 34.47 MPa ve birim ağırlığı 1760 kg/m³’dür (Short ve Kinniburg, 1978).

Dünya genelinde hafif beton kullanılarak yapılmış çok sayıda betonarme yapı mevcuttur. Bu yapılardan en öne çıkan örnekler; 1920’li yıllarda, ABD’nin Missouri eyaletinde yapılan “Park Plaza Hotel” hafif betondan yapılan betonarme binalara ilk örnektir. 1950’den sonra çok katlı binalarda ve diğer büyük yapılarda hafif beton kullanılmıştır. 1961–1962 yıllarında Amerika Birleşik Devletleri’nin Illinois eyaletinde inşa edilen ve dış çapları 39 m olan üç kuleden oluşan “Marina City Towers” binası bu yapıların en önemli örneklerindedir. Bu binanın yapımında, agrega olarak geliştirilmiş kil ve doğal kumdan üretilen hafif beton kullanılmıştır. Bu betonun birim ağırlığı yaklaşık 1680 kg/m³ ve 28 günlük silindir basınç dayanımı ise yaklaşık 25 MPa’dır (Gül ve Geçten, 1994).

Avustralya'nın Sidney kentinde 1967 yılında inşası tamamlanan 184 m yüksekliğe ve 42.5 m dış çapa sahip 50 katlı "Australia Square" binasının yapımında kullanılan hafif betonun, birim ağırlığı 1792 kg/m^3 ve 28 günlük basınç dayanımı 34.3 MPa dır. ABD'nin Chicago kentinde 1968 yılında yapımı tamamlanan 71 katlı "Lake Point Tower" binasının döşeme plaklarında birim ağırlığı, 1730 kg/m^3 ve 7 günlük basınç dayanımı 20–22 MPa olan hafif beton kullanılmıştır (Gül ve Geçten, 1994).

Texas'daki "One Shell Tower Plaza" 212 metre yüksekliği ile dünyada hafif beton kullanılarak inşa edilmiş en yüksek yapıdır. 1969'da tamamlanan bu yapının, merkezindeki iç ve dış duvarları, yakın açıklıklı kolonlarla tasarlanmış ve yapımında kullanılan beton, genişletilmiş kil ve doğal kumdan oluşturulmuştur. Binanın tüm taşıyıcı elemanlarında, birim ağırlığı 1840 kg/m^3 ve basınç dayanımı 42 MPa olan hafif beton kullanılmıştır. Toplamda 52 katlı olan One Shell Tower'ın ölü ağırlığı, aynı yatay ölçülerdeki normal betondan yapılmış 35 katlı bir binanın ölü ağırlığına eşittir (Gül ve Geçten, 1994).

Avrupa ülkeleri, ABD ile hafif beton kullanılarak imal edilen uzun binalardaki yarışına 1972'ler de Almanya'nın Münih kentinde, yüksekliği 100 m olan, doğal kum ve genişmiş kil agregasından üretilen yoğunluğu 1660 kg/m^3 ve 28 günlük basınç dayanımı 41 MPa olan hafif beton kullanılarak inşa edilen BMW idari binasının yapımıyla başlamıştır (Gül ve Geçten, 1994).

1970'li yıllara gelindiğinde hafif betonların köprülerde kullanımında gelişmeler görülmüştür. Bunlara en güzel örnek, Hollanda'nın Nijmegen kentindeki, Mass ve Waal nehirlerini birleştiren kanal üzerinde inşa edilen "Dukenburgse Köprüsü" dür. 188.8 m uzunluğa, 28.7 m genişliğe ve sırasıyla 37.4 m, 112.2 m ve 37.4 m olan üç açıklığa sahip olan bu köprünün de inşasında genişletilmiş kil agregasından ve tabii kumdan üretilen birim ağırlığı 1750 kg/m^3 ve 28 gün sonundaki nihai basınç dayanımı 38.5 MPa değerini sağlayan hafif agregalı beton kullanılmıştır (Gül ve Geçten, 1994).

2.3 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif betonların yoğunlukları, basınç dayanımları, ısı ve ses yalıtımı gibi mekanik özellikleri, bu betonların üretiminde kullanılan agrega çeşidine, üretim prensiplerine ve

karışımlarda kullanılan malzeme oranlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Uygulama yerlerine ve uygulama amacına göre farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olan hafif betonların kullanımı ile dolu veya boşluklu beton bloklar, prefabrik taşıyıcı elemanlar, yerinde dökülerek imal edilen taşıyıcı hafif betonlar ve taşıyıcı olmayan yalıtım elemanları üretilmektedir. Ayrıca öngermeli sistemlerde de hafif betonlar kullanılabilir (Bilgiç, 2009). Hafif betonlar sınıflandırılırken; birim hacim ağırlık (yoğunluk), basınç dayanımı, kullanım amacı ve üretim metotları gibi kıstaslar ele alınır (Orcaç, 2010).

Birim ağırlık ve basınç dayanımı kıstaslarına göre yapılan sınıflandırmada; Amerikan Standardı (ASTM 330) da betonun 28 günlük silindir basınç dayanımının minimum 17 MPa olması, birim ağırlığın ise en fazla 1840 kg/m³ olmasının öngörüldüğü belirtilmiştir. Havada kurumuş haldeki birim ağırlığını en fazla 1900 kg/m³ olması istenir (Altun, 2005). Türk Standartlarına göre betonların birim ağırlıklarına göre sınıflandırılması aşağıdaki gibidir (TS2511, 1977):

- Hafif Betonlar: Birim Ağırlık < 1900 kg/m³
- Yarı Hafif Betonlar: 1900 kg/m³ ≤ Birim ağırlık < 2100 kg/m³
- Normal Betonlar: 2100 kg/m³ ≤ Birim ağırlık < 2400 kg/m³

Bunun yanında Alman Standardı (DIN 1045) betonları birim ağırlıklarına göre, hafif, normal ve ağır olarak aşağıdaki gibi sınıflandırır (Çetmeli, 1974):

- Hafif Betonlar: Birim Ağırlık < 2000 kg/m³
- Normal Betonlar: 2000 kg/m³ ≤ Birim ağırlık < 2800 kg/m³
- Ağır Betonlar: Birim ağırlık ≥ 2800 kg/m³

Bunun yanında çeşitli kaynaklarda hafif betonlar kendi içlerinde farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Amerikan Beton Enstitüsü tarafından yayınlanan, yapısal hafif agregalı beton kılavuzu ACI Committee 213R-03 (2003)'de betonların birim ağırlıklarına ve kullanım alanlarına göre yapılan sınıflandırmasın da ise hafif betonlar üç başlıkta ele alınmıştır. Bunlardan ilki, birim hacim ağırlığı 1350 kg/m³ ile 1900 kg/m³ arasında değişen taşıyıcı hafif betonlardır ve en az 17 MPa basınç dayanımına sahiptir. İkincisi, birim ağırlığı 300 kg/m³ ile 800 kg/m³ arasında olan düşük birim ağırlıklı hafif betonlardır. Bu betonlar genellikle ısı ve ses yalıtımı başta olmak üzere

peyzaj uygulamaları gibi yapısal anlamda taşıyıcı olmayan diğer işlevsel amaçlar için tercih edilmektedir. Üçüncü ve son gruptaki hafif betonlar ise birim hacim ağırlığı yönünden diğer iki kategorideki hafif betonun arasında kalan 28 günlük silindirik basınç dayanımları 7 MPa dan büyük, 17 MPa dan küçük olan orta dayanımlı betonlardır. Bu kategorideki hafif betonların, ısı ve ses yalıtım özellikleri de birinci ve ikinci kategorideki hafif betonlar arasında değerler almaktadır (Neville, 1996).

Kullanım amaçlarına göre de hafif betonların sınıflandırılması, Rilem (1978) tarafından Çizelge 2.1'deki gibi yapılmıştır.

Çizelge 2.1. Hafif betonların sınıflandırılması (Rilem, 1978)

Sınıflandırma	1	2	3
Hafif beton türü	Taşıyıcı	Taşıyıcı ve Yalıtım	Yalıtım
Basınç dayanımı (MPa)	> 15.0	> 3.5	> 0.5
Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)	-	< 0.75	< 0.30
Yoğunluk (kg/m ³)	1600-2000	< 1600	< 1450

Hafif betonların birim ağırlık ve basınç dayanımına göre sınıflandırılması ise aşağıdaki Çizelge 2.2'deki gibidir (Taşdemir, 2003):

Çizelge 2.2. Hafif beton sınıfları (Taşdemir, 2003)

Hafif beton sınıfı	Birim ağırlık (kg/m ³)	Basınç dayanımı (MPa)
S1	800	1-7
S2	800-1200	7-10
S3	1000-1400	10-14
S4	1300-1800	14-25
S5	1500-1800	25-40
S6	1800-2000	40-70

2.4 Hafif Beton Yapımında Kullanılan Agregalar

Hafif betonların üretiminde doğal veya yapay agregalar kullanılabilir. Genelde volkanizma faaliyetleri sonucu meydana gelmiş olan doğal hafif agregalar geniş maden yataklarına sahip gözenekli endüstriyel hammaddelerdir. Bunlara pomza, diyatomit, perlit, vermikülit, puzolanlar, tuf ve volkanik cürufur gibi doğal hafif agrega türleri örnek olarak sıralanabilir. Yapısındaki agrega cinsine göre üretilen hafif betonların

mekanik özellikleri Çizelge 2.3’de verilmiştir. Ülkemiz de, suni agregaların üretiminiyle ilgili bir endüstri kolu henüz gelişmemiştir (Gönen, 2009).

Çizelge 2.3. Agregata türüne göre elde edilen hafif betonların özellikleri

Agregata Cinsi	Ortalama Yoğunluk (kg/m ³)	Betonun kuru birim ağırlığı (kg/m ³)	Basınç dayanımı MPa	Isı geçirgenliği %5 nem (Kcal/°C)
Genleşmiş Perlit	80-240	400-1120	0.5-7	0.16-0.39
Pomza (Asidik)	500-800	640-1140	2-14	0.21-0.60
Genleşmiş Kil	320-1040	720-1760	2-62	0.24-0.91
Genleşmiş Vermükülit	65-200	400-800	0.7-3.5	0.16-0.26
Ytong, Gazbeton	300-1000	300-1000	1.5-7	0.10-0.22
Kum, Çakıl	1300-1760	2240-2480	14-70	1.40-1.80

2.4.1 Hafif agregaların özellikleri

Hafif agregalardaki gözenekli yapı, içeriğinde bulunan belli başlı hammaddelerin belirli sıcaklıklarda erimesi ile oluşur ve bu gözenekli yapı sayesinde düşük dane yoğunluğuna sahip olurlar. Eriyen hammaddelerin açığa çıkardığı gazlar kütle içinde genişleyerek üniform dağılmış boşlukları oluşturur. Beton karışımının işlenebilirliğini, iri/ince agregata oranını, bağlayıcı ve su ihtiyacını ve bunlara bağlı olarak fiziksel ve mekanik karakteristiklerini doğrudan etkileyen faktörlerden birisi de bu üniform boşluklar ile değişkenlik gösteren dane şekli ve yüzey dokusudur (Lamond ve Pielert, 2006).

Hafif agregalar muhteva ettiği boşluklar sayesinde düşük birim ağırlığa ve yüksek su emme kapasitesine sahiptirler. Taşıyıcı hafif beton tasarımında tercih edilen bazı hafif agregaların su emme oranları Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Hafif agregaların bazı özellikleri (Clarke, 1993)

Tip	Şekil	Su emme oranı (%)	Etüv kurusu yoğunluk (kg/m ³)
Genleştirilmiş kil	Yuvarlak	12-14	350-500
Genleştirilmiş şist	Yuvarlak	12-14	500-800
Pomza	Düzensiz	30-40	500-880
Uçucu kül	Yuvarlak	9-15	800-850

Hafif agregaların su emme oranı boşlukların büyüklüğüne, fiziksel yapısına, agreganın içerisindeki dağılımına ve sürekliliğine bağlı olarak değişmektedir. Agreganın yüzeyine çok yakın, dış ortama açık ve sürekli boşluklar, karışım esnasında ve sonrasındaki ilk birkaç saatte su ile dolarken, daha iç kısımlarda bulunan süreksiz boşluklar, agreganın yıllarca su içerisinde bırakılsa dahi boş kalır. Agreganın tarafından emilen su, çimento ile hemen hidratasyona girmez. Uzun süreli devam eden kür, çimentonun hidratasyonu ve beraberinde agreganın/matris ara yüzeyinin gelişmesinde oldukça yararlıdır (Lamond ve Pielert, 2006).

2.5 Hafif Betonun Özellikleri

2.5.1 Hafif betonun üstünlükleri

Geleneksel betona göre hafif betonun belli başlı avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Yapıların ölü yükünü ciddi bir şekilde azaltıp daha küçük kesitli taşıyıcı eleman tasarımına olanak sunarak malzeme tasarrufu ve kullanılabilir alan artışı sağlar.
- Boşluklu agreganın yapılarından dolayı ısı iletkenlik katsayıları düşüktür ve yine bu sebepten dolayı sesleri daha iyi yalıtırlar.
- Yoğunluğunun düşük olması sebebiyle aynı hacimdeki geleneksel betona göre kalıba uyguladığı basınç daha düşüktür ve bu sayede kalıp ve kalıp payandası gibi malzemeler de ekonomiklik sağlar.
- Yapı ölü ağırlığının azalmasına paralel olarak yapının zemine uyguladığı düşey kuvvetlerde azalmalar olur ve buna bağlı olarak da yapıya etkiyen dış kuvvetler azalır. Böylece yapı depremden daha az etkilenir.
- Eğilme etkisindeki elemanlarda donatı ekonomisi sağlar (Taşdemir, 1982).

2.5.2 Hafif betonun sakıncaları

Geleneksel betona göre hafif betonun belli başlı sakıncaları şu şekilde sıralanabilir;

- İmalatı, nakliyesi ve işlenebilirliği normal betonlara göre çok daha zahmetlidir.
- Aynı basınç dayanımına sahip geleneksel betonlara göre üretimleri daha yüksek dozajda çimento kullanımı gerektirir, yüksek dozajlı çimento kullanılması durumunda hidratasyon ısıları da normal betonlara kıyasla daha yüksektir.

- Kullanılan agregaların basınç dayanımları çimento hamurunun basınç dayanımına kıyasla genellikle daha düşüktür ve bu nedenle hafif betonun basınç dayanımı agregaların basınç dayanımı kapasitesiyle sınırlıdır.
- Elastisite modüllerinin düşük olmasından dolayı taşıyıcı hafif beton kullanılarak imal edilen kirişlerde, sehimler ve burulmalar daha çok gözlenir ve daha düşük kesme ve kayma dayanımı sahiptir (Neville, 1995).

2.5.3 Hafif betonun taze özellikleri

Normal betonda olduğu gibi hafif betonun da taze halde iken kütlesi homojen olmalı, kalıba kolay yerleştirilmeli, nakliye ve yerleştirme esnasında ayrışmamalıdır. Kütlesi homojen olan hafif betonun kıvamı, işlenebilirliği sağlayacak en düşük değerde olmalıdır. Hafif agregalı betonun aynı işlenebilirlikteki normal betona göre daha düşük çökme değeri vereceği dikkate alınarak çökme değerinin 10 cm'yi geçmemesi önerilmektedir (TS 2511; Kabay, 2009)

Hafif betonlarda karışım oranları hesaplanırken kullanılacak olan agreganın su emme kapasitesi, birim hacim ağırlığı ve agregabağlayıcı oranı dikkate alınmalıdır. Zaman içerisinde doğal ya da suni olsun tüm hafif agregalar belli miktarda su emerler bu yüzden hafif agregaların su emme oranı taze beton özelliklerini etkileyen en önemli faktördür. Kuru veya kısmen suya doygun durumdaki hafif agregaların kullanıldığı karışımlar da su emme olayı oldukça önemlidir. Hafif agregaların su emme kapasiteleri taze betonun işlenebilirliğini, pompalanabilirliğini, birim hacim ağırlığını, ısı özelliklerini, yangına ve donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılığını doğrudan veya dolaylı olarak etkilemektedir. Bir agregatanesinin su emme kapasitesi ve hızı, hacmindeki boşluk oranına, boşlukların sürekli veya süreksiz dağılımına ve boşlukların yapısına bağlıdır. Normal agregalara oranla hafif agregalardaki boşluk oranı daha fazla olduğundan su emme oranı ve su emme hızı da daha yüksektir. Tutulan bu rezerv sudan dolayı hafif betonlar normal betona oranla olumsuz kür şartlarına karşı daha dayanıklıdır. Agregaların su emme oranları genellikle 30. dakikada ve 24. saatteki su emme kapasitesinin, etüv kurusu haldeki birim ağırlığına oranlanması ile belirlenir. Hafif agregaların su emme oranı ilk yarım saatte %3 ile %12 arasında iken bu oran 1.günün sonunda %5 ile %15 arasında değerler almaktadır. Bu değerlerin birbirine yakın aralıklarda olması sebebiyle beton karışım hesabı yapılırken hafif agregalar

tarafından emilecek olan su miktarının yaklaşık olarak hesaplanmasında 30 dakikalık su emme oranı dikkate alınmaktadır (Clarke, 1993).

Birim ağırlığı düşük, boşluklu yapısından dolayı kolayca su emebilen hafif agregalar, karışım ve yerleştirme sırasında kolayca yüzeye çıkarak işlenebilirliği olumsuz yönde etkileyebilirler. Bu gibi durumlarda, hafif betona ilave edilecek lifler betonda bir ağ yapısı oluşturarak segregasyonu etkin bir şekilde engelleyebilir (Chen ve Liu, 2005).

Hafif betonda, belirli bir beton dayanım sınıfı için hazırlanacak karışımların çimento içeriği, normal betona oranla genelde daha fazladır ve ulaşılabilecek en büyük dayanım kullanılacak agreganın cinsine bağlıdır. Hafif betonunun kalıba yerleştirilmesi ve kür işlemleri normal betondan farklı değildir ve agrega tanelerinde tutulan rezerv sudan dolayı hafif betonlar normal betona oranla olumsuz kür şartlarına karşı daha dayanıklıdır (Clarke, 1993; Neville, 2000).

2.5.4 Hafif betonun sertleşmiş özellikleri

Hafif beton üretiminde kullanılan agregaların cinsine, tane boyutuna, boşluk oranına, basınç dayanımına ve agrega birim ağırlığına göre, hafif betonların kuru birim hacim ağırlıkları, karakteristik basınç dayanımları, ısı ve ses yalıtımları gibi temel özellikleri değişkenlik gösterir (Kabay, 2009).

Hafif agregalı betonlarda sertleşmiş betonun yoğunluğu, karışımda kullanılan agrega ve diğer bileşenlerin miktarını, boşluk oranını, su ihtiyacını ve hafif agrega özgül ağırlığına ve nem içeriğine göre değişkenlik gösterir. Bunun nedeni ise nem kaybıdır. Nem kaybı, kür koşullarının, ortam şartlarının ve betonun yüzey alanı/hacim oranının bir fonksiyonudur. Hafif beton üretiminde ince hafif agrega yerine kısmen veya tamamen standart kum kullanılması sertleşmiş betonlarda birim ağırlığı arttıracaktır. Yüksek basınç dayanımlarına sahip taşıyıcı hafif beton elde etmek için genelde karışımda ki çimento oranını artırmak gerekir ve bunun sonucunda betonun birim ağırlığı da artmaktadır (Lamond ve Pielert, 2006).

Normal betonda olduğu gibi hafif betonda da basınç dayanımını etkileyen başlıca faktörler; temelde agrega tanelerinin dayanımı bunun yanında agreganın rijitliği ve nem

içeriği, bağlayıcı malzeme miktarı, mineral ve kimyasal katkıları, betonun yaşı, kür ve ortam koşullarıdır (Kabay, 2009).

Betonun maksimum dayanımı, kullanılan agreganın cinsine ve dayanımına bağlıdır. Düşük dayanımlı agregalar, daha fazla çimento kullanılarak daha kuvvetli bir çimento hamuru fazının kullanılmasını gerektirir (Lamond ve Pielert, 2006). Agregaların daha fazla nem içeriğine sahip olması, karışımdaki çimento miktarının artması, mineral katkıların ve liflerin kullanılması da sertleşmiş betonun basınç dayanımını artırmaktadır.

Betonlarda genellikle basınç dayanımının bir türeği olarak karşımıza çıkan çekme dayanımı ise iri agrega ile çimento hamuru fazının çekme dayanımına ve bu fazlar arasındaki aderansa bağlıdır. Taşıyıcı hafif betonun çekme dayanımı, aynı basınç dayanım sınıfında ki normal betona göre %25 oranında azalmalar göstermektedir. Hafif betonlar da çekme dayanımını artırmak için karışımdaki hafif ince agrega yerine normal ince agrega kullanılabilir (Lamond ve Pielert, 2006).

Normal betonlar da olduğu gibi hafif betonlarında basınç dayanımında kür koşulları oldukça etkilidir. Hafif betonlar, agregalarca emilen sudan dolayı, zayıf kür koşulları ve olumsuz ortam şartlarına karşı normal betonlara göre daha dayanıklıdır (Clarke, 1993).

Hafif agrega taneleri ile çimento matrisi arasındaki aderansa bağlı olarak hafif betonlarda gerilme şekil değiştirme ilişkisi normal betonlara göre daha lineer ve gevreklerdir. Normal betona kıyasla hafif betonlarda daha yüksek deformasyonlar oluşmasının bir diğer sebebi ise hafif agregaların rijitliğinin daha az oluşuna ve karışımda daha fazla çimento kullanılmasına bağlıdır. Hafif betonu oluşturan iri hafif agregaların ve harcın rijitliğinin ve elastisite modülünün düşük olması sebebiyle hafif betonlar normal betonlara göre daha düşük elastisite modülüne sahip olurlar ve buna bağlı olarak hafif beton kullanılarak üretilen yapı elemanları belirli bir yük altında daha fazla deformasyon yaparlar (Clarke, 1993).

Hafif agregalı betonlarda, elastisite modülünün daha düşük değerlerde olması nedeni ile sünme değerleri de düşüktür. Yani normal betonlara göre sabit yükler etkisi altında malzemede zamanla yavaş ilerleyen deformasyonlar ve zamana bağlı olarak betonun içindeki suyu kaybetmesiyle oluşan kuruma rötresi hafif agregalı betonlarda daha

yüksektir. Sünme, kullanılan agreganın cinsine, granülometrik dağılımına, nemliliğine, bağlayıcı tipine, uygulanan gerilme değerine, yapı elemanın boyutlarına ve kür koşullarına bağlı olarak değişir (ACI Committee 213R-03, 2003; Clarke, 1993).

2.5.5 Hafif betonun dayanıklılığı

Yapı malzemesinin kimyasal, mekanik ve fiziksel çevresel etkilere karşı direncine dayanıklılık denir. Bu çevresel faktörlere örnek olarak zararlı yeraltı suyu, kirli hava, reaktif sıvıların etkisi, donma, rötre ve ısıl gerilmeler, aşınmalar ve darbeler verilebilir (Short, 1963). Hafif agregalı betonların çevresel faktörlere karşı koyma direnci yani dayanıklılığı betonun boşluklu yapısı ile doğrudan ilişkilidir (Lo vd., 2008).

Hafif agrega ve çimento hamurunun rijitliğinin yakın değerlerde oluşu, gerilmenin üniform dağılımına neden olmakta ve dolayısıyla hafif betonun dayanımının tahmin edilenden daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Bunun yanında bu iki faz arasındaki aderansın ve buna bağlı olarak ara yüzeydeki dayanımın oldukça yüksek olması hafif agregalı betonun durabilitesini arttırmaktadır (Bremner, 1998).

Hafif agregaların kolay su emmeleri nedeni ile hafif betonlar donma-çözünme etkisine karşı daha dayanıksızdır. Donma ve çözülme olayının birbirini tekrarlı takip etmesiyle donma-çözünme etkisi kümülatif olarak artmaktadır. Suyun donması sonucunda hacminde yaklaşık %9'luk bir artış meydana gelmekte, bu artış ile boşluklarda bulunan fazla su basınç oluşturmaktadır (Neville, 2000). Bu durumda çatlamalara ve parçalanmalara yol açmaktadır.

Malzemeler, yanıcı (tutuşabilir) olanlar ve yanıcı olmayanlar olarak iki sınıfta ele alınabilir. Beton gibi inorganik yapı malzemeleri yanıcı özellikte değildirler. Bir yapıda yangının etkisi, ulaşılan maksimum sıcaklık değerine, yapının yangına maruz kalma süresine ve yapı elemanlarının ısıl özelliklerine bağlıdır (Short, 1963). Hafif agregalı betonlarda agregaların yüksek sıcaklıklarda stabilitelerini koruması ve ısıl genişlemesinin daha düşük olması nedeniyle betonda dayanım kaybı daha az gözlenir ve betonun hasar görme riski azalır (Clarke, 1993).

Betonda aşınma direnci, betonun dayanımına, agreganın sertliğine, çimento hamuru ve agregaların tokluk karakteristiklerine ve bu iki faz arasındaki aderansa bağlıdır. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılabilen agregaların geneli camsı, seramik bir yapıdadır ve Mohs sertlik cetvelinde kuvarsa denktir. Bu özellikleri sayesinde taşıyıcı hafif beton kullanılarak inşa edilen köprüler 100 milyondan fazla araç trafiğine maruz kaldıklarında bile aşınma performansları normal betona eşdeğerdir (Lamond ve Pielert, 2006). Hafif betonda aşınma dayanımını arttırmak için hafif ince agregayı sert ince agrega ile değiştirerek matrisin kalitesini arttırmak gereklidir (Clarke, 1993).

Hafif agregalı betonlarda çimento dozajının yüksek oluşundan dolayı betonun asit etkilerine karşı direnci daha yüksektir ve bunun neticesinde hafif betonun iyi yerleştirilmesi koşulu ile donatı korozyon riskini azaltıcı bir önlem alınmış olur (Clarke, 1993).

BÖLÜM III

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU

3.1 Yüksek Fırın Cürufunun Üretimi

Demir cevheri, tabiatta sadece temel bileşenini oluşturan demir oksit halinde bulunmaz. Demir cevherinin içerisinde az bir miktar silis, alümin, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddelerde bulunmaktadır. Bu yabancı maddelerin uzaklaştırılması, demir oksidin ayrıştırılması ve içerisindeki oksijenin çıkarılmasıyla demir cevherinin içerisinden demir elde edilir. Bu ayrıştırma ve uzaklaştırma işlemlerini gerçekleştirebilmek için demir cevheri, yakıt olarak kok kömürü kullanılan yüksek sıcaklık değerlerine çıkabilen yüksek fırınlarda ısıtılıp eritilmektedir. Bu işlem sırasında bir miktar kalker taşı da yabancı maddelerin arındırılması işlemini hızlandırmak için demir cevheri ile birlikte kullanılmaktadır (Erdoğan, 1995).

Eritme işlemi esnasında fırındaki yüksek sıcaklığın etkisiyle cevherin içerisindeki demir oksitten ayrıştırılması istenilen oksijen kok kömürünün içerisindeki karbon ile birlikte reaksiyona girerek karbondioksit ve karbonmonoksit gibi gazları oluşturur. Bu gazlar fırını terk ederken geriye fırının alt ucunda toplanan eriyik halde ki demir cevheri ile beraber, yine eriyik haldeki kireç, kok kömürü külü, silis, alümin ve diğer yabancı maddelerden meydana gelen ve “cüruf” olarak adlandırılan yan ürün topluluğunu bırakmaktadır. Yoğunluğu daha fazla olduğundan eriyik durumda ki demir alt bölümde cüruf ise üstte kalmakta ve fırından ayrı ayrı dışarı alınmaktadır. Yüksek fırından eriyik halde bir, artık ürün olarak çıkartılan cüruf 1500 °C gibi çok yüksek bir sıcaklığa sahip olduğundan, cürufun soğutulmadan herhangi bir amaçla kullanımı mümkün olmamaktadır (Erdoğan, 1995).

Uygulanan soğutma şekli ve hızından kaynaklı olarak cüruflar, farklı isimlerle adlandırılmakta ve değişik karakteristik özelliklere sahip olmaktadır. Atmosferik koşullarda kendi halinde soğumaya bırakılan cüruflar, “havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu”, su, basınçlı hava ve buhar etkisine maruz bırakılarak soğutulmuş cüruflar, “genleştirilmiş yüksek fırın cürufu” veya “köpürtülmüş yüksek fırın cürufu” olarak adlandırılır. Kullanımı daha yaygın olan granüle yüksek fırın cürufu bol miktarda su ile

çok hızlı bir şekilde soğutulma işlemlerine tabii tutulmaktadır. Soğutulan cüruflar kum taneleri gibi (en büyük boyutu yaklaşık 4 mm) parçacıklardan oluştuklarından amorf (camsı) yapıda ki, “granüle yüksek fırın cürufu” olarak anılmaktadır (Erdoğan, 1995).

Atmosferik koşullarda kendi halinde soğumaya bırakılan havada soğutulmuş yüksek fırın cürufları ve genleştirilmiş veya köpürtülmüş yüksek fırın cürufu olarak adlandırılan, su, basınçlı hava ve buhar etkisine maruz bırakılarak soğutulmuş cüruflar soğutma işleminin çok yavaş gerçekleşmesinden dolayı kristal bir yapı kazanırlar ve hidrolik bağlayıcılık özelliği göstermezler. Öğütülerek daha küçük boyutlarda indirildiklerinde, yol yapımında dolgu malzemesi veya beton agregası olarak değerlendirilebilirler (Sevinç, 2011).

3.2 Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri

Yüksek fırın cüruflarının kimyasal bileşenleri arasında başta kireç, silika, alümin ve fosfor bulunurken bunun yanında az miktarlarda da demir, magnezyum ve kükürt içeriğine sahiptir. Portland çimentosu ile birlikte muhtelif ülkelerde üretilen bazı cürufların kimyasal analizlerinin karşılaştırması Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonları (Onat, 1998)

	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye	Portland Çimentosu
CaO	29-50	30-40	38-44	34-41	60-67
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	34-36	17-25
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5	0.5-6
MgO	0-19	8-21	1-3	3.5-7	0.1-4
MnO	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1-2.5	-
S	0-2.0	1-1.6	0.6-0.8	1-2	-
SO ₃	-	-	-	-	1-3

Granüle yüksek fırın cüruflarının puzolanik özelliklerinin belirlenmesinde kimyasal içerik önemli bir parametredir. CaO/SiO₂ oranının belirli bir değere kadar artmasıyla

granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliği artış göstermektedir. Ancak bu artış sınır değeri aştığında, yani karbonmonoksit oranının çok fazla olması durumunda granülasyon zorlaşacağından yüksek fırın cürufunun hidrolik bağlayıcılık özelliğinde azalma meydana gelmektedir. CaO/SiO₂ dengesi sabit tutulduğunda, Al₂O₃ miktarının artması ise yüksek fırın cürufunun aktivitesini arttırırken demir ve mangan miktarının artışı dayanımı olumsuz yönde etkiler (Tokyay, 2003).

3.3 Yüksek Fırın Cürufunun Hidratasyonu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun, hidrolik bağlayıcı olarak pratikte kullanımının yaygın olmayışının temel sebebi, su ile reaksiyona girdiğinde çok az miktarda bağlayıcı özellik göstermesi ve hidratasyonunun Portland çimentosunun hidratasyonuna göre çok yavaş ilerlemesidir. Cüruf yavaş gelişen hidratasyon esnasında su içerisinde az miktarda eriyik hale geçer ve C-S-H, hidrate alüminatlar, hidrate silika alüminatların çökmesi meydana gelir. Hidratasyonun başlamasıyla beraber ilk önce silikat iyonları eriyik hale geçer ve sonrasında gerçekleşen ilk C-S-H çökmesiyle, kireç yoğunlaşması artar ve hidrate alüminat kristallerinin oluşum anına kadar, alümina konsantrasyonunda artış gözlenir. Yüksek fırın cürufu hamurundaki hidrate fazın belirlenmesine yönelik olarak yapılan bir araştırmada CaO-SiO₂-Al₂O₃-H₂O dördümlü sisteminde C-S-H, C₂ASH ve C₄AH₁₃₋₁₉ bileşenlerinin oluştuğu belirlenmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 2003).

Granüle haldeki yüksek fırın cürufunun tek başına suyla tepkimesi sonucu düşük miktarlarda bağlayıcı özellik göstermesi ve suyla hidratasyonunun normal Portland çimentosuna göre oldukça yavaş ilerlemesi neticesinde araştırmacılar, bu hidratasyon hızını artırabilmek adına çeşitli araştırmalara yönelmiştir (Tokyay, 2003). Yapılan çalışmalar sonucunda yüksek fırın cürufunun Portland çimentosuyla bir miktar karıştırılarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Bunun yanında, aktivatörler sayesinde de Portland çimentosundan gelen kalsiyum hidroksite ihtiyaç duyulmaksızın cürufun hidratasyona girebileceğini ve puzolanik aktivitesinin artacağı görülmüştür (Erdoğan, 1997).

3.4 Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özellikleri Üzerine etkisi

3.4.1 Yüksek fırın cürufunun taze beton özellikleri üzerine etkisi

Aynı çökme değerinde ki tasarımlarda yüksek fırın cürufu betonlar, Portland çimentosu ile yapılmış betonla mukayese edildiğinde daha düşük su ihtiyacı gösterirler. Bu azalmanın temel nedeni cüruf parçacıklarının yüzeyinin daha pürüzsüz olması ve yavaş gerçekleşen hidrasyon olayıdır (Newman ve Choo, 2003). Portland çimentosunun içerisindeki klinkere nazaran cürufun daha pürüzsüz bir yüzeye ve daha düşük özgül ağırlığa sahip olması cüruf katkılı betonların hacimce daha fazla çimento hamuru içermesine neden olur ve bu da işlenebilirliği olumlu yönde etkiler (Bilim, 2006).

Su/bağlayıcı oranı sabit tutulduğunda %40 oranından daha fazla cüruf kullanılarak üretilen betonların dayanımları istisnasız olarak artış göstermekte ancak 28 günlük basınç dayanımı esas alınarak kıyaslanma yapıldığında bu artış belirgin olmamaktadır. Bunun yanı sıra yapılan deneysel çalışmalar neticesinde yüksek fırın cürufu ihtiva eden betonların terleme miktar ve hızlarının daha yüksek olduğu görülmüştür (Bilim, 2006).

Hazır betonlarda sıcaklık faktörü kesitlerin büyüklüğüne, karışımdaki cüruf gibi katkıların ve bağlayıcıların oranına, bu bağlayıcıların kimyasal ve fiziksel karakteristiklerine bağlıdır. Beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılması sayesinde betonun hidrasyon ısı ve betonun çıkabileceği en yüksek sıcaklık değeri azalır ve cürufun yavaş hidrasyonları sayesinde maksimum sıcaklığa ulaşma süresi uzar. Yüksek fırın cürufunun, su ile reaksiyonu normal Portland çimentosuan göre daha yavaş gerçekleşmesinden dolayı, beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanımı, taze betonun priz hızında bir azalışa neden olmaktadır. Yüksek beton sıcaklığını düşürebilme ve priz geciktirici özellikleri sayesinde cürufu betonlar büyük hacimli kütle beton dökümlerinde faydalı olmaktadır (Bilim, 2006).

3.4.2 Yüksek fırın cürufunun sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkisi

Su/bağlayıcı oranı ile çimento miktarı sabit tutulduğunda yüksek fırın cürufu katkısı içeren betonlar, normal betonlara göre daha yavaş hidrate olduklarından erken yaşlarda daha düşük mukavemet gelişimine neden olurken, ilerleyen zamanlarda ise yoğun

hidrate olmuş mikro yapılarından dolayı nispeten daha yüksek basınç dayanım değerlerine sahip olmaktadır. Betonların mukavemet gelişimini artıran bir diğer koşul ise sıcaklıktır. Sıcaklık artışı ile beraber yüksek fırın cürufu betonlar normal Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre daha yüksek dayanım değerine sahip olurlar (Bilim, 2006).

Nem kaybının yaşanmayacağı ideal kür koşullarında, beton karışımının içerisindeki yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça, betonun sünmesi azalmaktadır. Portland çimentosu ile yüksek fırın cürufu arasında gerçekleşen %70 gibi çok yüksek oranlarda yer değişimleri ile betonun sünmesinde yarı yarıya bir azalma gerçekleştiği gözlenmiştir (Newman ve Choo, 2003). Olumsuz kür koşullarında son dönemdeki basınç dayanımı düşük olduğundan cürufu betonların sünme davranışında, Portland çimentosu içeren betonlara göre büyük farklılıklar gözlenmez (Bilim, 2006).

Yüksek fırın cürufu katkısı içeren betonlar ile ilgili yapılmış çalışmalarda deney şartları ve kullanılan malzeme farklılıklarından dolayı önemli olmayan ölçülerde rötre farklılıkları görülmüştür. Buradan hareketle genel olarak ifade edecek olursak betonda cüruf katkısı rötreyi değişik etkilememektedir (Newman ve Choo, 2003; Tokyay, 2003).

Cürufu betonlar sabit basınç dayanımı için Portland çimentolu betonlara kıyasla daha yüksek elastisite modülüne ve daha yüksek çekme dayanımına sahiptir (Newman ve Choo, 2003).

3.4.3 Yüksek fırın cürufunun dayanıklılık özellikleri üzerine etkisi

Yapı malzemesinin dayanıklılığı yani durabilitesi, ekonomik ömrü ya da bir başka deyişle hizmet süresi boyunca kullanıldığı ortam koşullarının tüm yıpratıcı özelliklerine karşı direnme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Mekanik, fiziksel ve kimyasal olan bu çevresel faktörler arasında, kirli hava koşulları, sülfatlı veya asitli sular gibi zararlı reaktif sıvı ve gazların difüzyonu, donma-çözünme ve darbeler sıralanabilir. Yapılan uzun soluklu deneysel çalışmalar neticesinde daha iyi kür koşullarına maruz kalan cürufu betonların reaktif sıvılara karşı durabilite performanslarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Tokyay, 2003; Newman ve Choo, 2003).

Betonun permabilitesi yani geçirgenliği, beton içerisindeki boşluklar ile imento hamuru ile agrega ara yüzeyindeki mikro çatlakların bir fonksiyonudur. Betonda cüruf içeriğinin artmasıyla gözenekli yapıda (porozitede) değişim gözlenmezken toplamda küçük boşlukların miktarı artmakta ve boşluk dağılımı daha az olmaktadır. İdeal kr koşullarında ve yüksek sıcaklıklarda yüksek fırın cürufu katkısı betonun permabilitesini olumlu etkilemektedir. Bu farklılığın temel sebebi, yüksek fırın cürufu katkılı betonlarda hidrasyon olayını daha uzun zamanlar devam etmesidir. Crulu betonların permabilitesindeki doğal azalma ve yüksek fırın crularının kimyasal kompozisyonunda hiç C_3A olmaması sayesinde cüruf katkısı içeren betonların sülfat saldırılarına karşı dirençlerinin daha iyi olduğu kabul edilir (Bilim, 2006).

Aynı basınç dayanım sınıfında üretilen cüruf katkılı betonlar ile Portland imentosu kullanılarak üretilen betonlar arasında donma-çözülme olayına karşı dirençlerinde belirgin bir farklılık yoktur. Ancak cüruf katkısının %60'ı geçmesi durumunda hava katkısız betonlar daha düşük donma-çözülme direnci göstermektedir. Beton retiminde yüksek fırın cürufu ikamesi ideal kr koşulları altında aşınma dayanıklılığında düşük bir miktar üstünlük sağlamakta ancak cüruf içeren betonlar olumsuz kr koşullarından daha fazla etkilendiği için crulu betonların yetersiz kr koşullarında aşınma dayanıklılığı ciddi derecede azalmaktadır (Bilim, 2006).

Yüksek fırın cürufu katkılı betonların normal Portland imentolu betonlara göre düşük permabiliteye sahip olması ve hidrasyonları sırasında ortaya çıkan ürünlerin klor iyonlarıyla kimyasal tepkimeye girebilme kabiliyeti dolayısıyla, cüruf katkılı betonların klor geçirgenliğine karşı performansı daha yüksektir. Betonarmede klor geçirgenliğinin az olmasının istenmesinin temel sebebi donatı çeliğinin korozyonunun önlenmesidir. Bu yüzden betonda yüksek fırın cürufu katkısı korozyon riskini azaltma potansiyeline sahiptir. Hidrolik bağlayıcıların bünyesinde bulunan C_3A ve hidrasyon sırasında açığa çıkan C-S-H jelleri klor iyonlarıyla tepkimeye girerek kloru bağlamaktadır ve klor geirimsizliğinde önemli olanda klor bağlama kapasitesidir. Yüksek fırın cürufu bünyesinde Portland çimentosuna göre daha az C_3A barındırır da C-S-H jellerinin klor bağlama kapasiteleri daha yüksektir ve dolayısıyla crulu betonların klor geçirimsizliği daha dşktir (Onat, 1998).

Betonda karbonatlaşma olayı karbondioksitin betonun içine girmesiyle meydana gelir ve karbonatlaşmanın meydana gelme hızı; zamana, permabiliteye, ortamdaki CO₂ ve nem miktarı gibi parametrelere bağlıdır. Normal temiz hava koşullarında %0.03 karbondioksit bulunurken, büyük şehirlerde bu oran %0.3 mertebesine kadar çıkmaktadır. Havada serbest halde bulunan karbondioksit, hidratasyon sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek kalsiyum karbonat (CaCO₃) ve bir miktar su açığa çıkmaktadır. İlerleyen zamanlarda oluşan CaCO₃ tabakası beton yüzeyini sarar ve karbondioksitin betonun içerisine girmesi zorlaşır ve buna bağlı olarak karbonatlaşma hızı yavaşlar. Betonarme çeliğinin reaktif sülardan korunabilmesi doğrudan pas payı bölgesinde ki karbonatlaşmaya bağlıdır. İdeal kür koşullarının yani bakım devresinin uzatılmasıyla yüksek fırın cürufu katkılı betonların karbonatlaşma direnci daha yüksek değerlere ulaşmaktadır (Bilim, 2006).

Alkali-agrega reaksiyonlarının en çok görülen türevi olan alkali-silika reaksiyonları agregalarda bulunan silis içeren mineraller ile çimentodaki alkaliler arasında gerçekleşir. Alkali-silika reaksiyonları sonucunda su emici kalsiyum silikat jelleri ve betonda zararlı hacimsel genleşmeler meydana gelir. Yapılan çalışmalar neticesinde beton içerisinde ki bu zararlı hacimlerin yüksek fırın cürufu katkısı ile azaltıldığı görülmüştür (Newman ve Choo, 2003). Alkali içerme seviyesi Portland çimentosundan daha yüksek olmasına rağmen yüksek fırın cürufu içerisindeki alkalilerin çözünebilirliği daha düşüktür. Bu sebeple aynı aktiviteye sahip agrega kullanılan betonlarda yüksek fırın cürufu katkısı alkali silika reaksiyonlarını azaltır (Bilim, 2006).

3.5 Yüksek Fırın Cürufunun Kullanım Alanları

3.5.1 Yol malzemesi ve asfalt betonu agregası olarak kullanımı

Atmosferik koşullarda kendi halinde soğumaya bırakılan havada soğutulmuş yüksek fırın cürufları ve genişletilmiş veya köpürtülmüş yüksek fırın cürufu olarak adlandırılan, su, basınçlı hava ve buhar etkisine maruz bırakılarak soğutulmuş cüruflar soğutma işleminin çok yavaş gerçekleşmesinden dolayı kristal bir yapı kazanırlar ve hidrolik bağlayıcılık özelliği göstermezler. Öğütülerek daha küçük çaplara indirildiklerinde, yol yapımında dolgu malzemesi veya beton agregası olarak değerlendirilebilirler (Sevinç, 2011).

3.5.2 Hafif beton agregası olarak kullanımı

Kontrollü miktarda su, basınçlı hava veya buhar etkisine maruz kalarak soğutulan cüruflar, içerisinde hapsolan buhar nedeniyle, genişerek boşluklu bir yapıya kavuşurlar ve hidrolik bağlayıcılık özellik göstermezler. Genleştirilmiş veya köpürtülmüş yüksek fırın cürufu olarak adlandırılan bu cüruflar, düşük özgül ağırlıkları sayesinde öğütülme işleminin ardından hafif beton yapımında ince hafif agregası olarak kullanılırlar. Cüruf agregalı betonlar, ısı yalıtımı, işlenebilirlik, ateşe karşı direnç ve donma-çözülme karakteristiklerinin yüksek olmasının yanı sıra ekonomik olarak da avantaj sağlamaktadır (Çevik, 1993; Güner, 1993).

3.5.3 Çimento üretiminde kullanımı

Cürüflü Portland çimentosu üretilirken iki farklı metot kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun Portland çimentosuna katılmasıyla üretimdir. Ancak genel olarak kullanılan bu metot granüle yüksek fırın cürufunun Portland çimentosunun üretim aşamasında küçük bir miktar alçı taşı ile birlikte öğütülmeden çimento klinkerine katılması ve bu üç malzemenin birlikte öğütülmesi şeklindedir. Bu metodla üretim yapılırken granüle yüksek fırın cürufunun belli özellikleri taşıması gerekmektedir. Ancak standartlarımızda, cürüflü çimento üretiminde kullanılacak olan yüksek fırın cürufunun sahip olması gereken niteliklere yer verilmemiştir. Bundan dolayı ilk zamanlarda cürüflü çimento üretimi için kullanılacak cürufun kimyasal kompozisyonunun uygunluğu, $CaO+MgO+Al_2O_3/SiO_2 \geq 1$ koşulu olarak kabul edilmiştir. Son yıllarda ise, ASTM C 595 (1993)'e göre numunelerin 28. gündeki cüruf-aktivite indeksinin %75 den fazla olması istenmektedir (Erdoğan, 1995).

3.5.4 Beton yapımında mineral katkı olarak kullanımı

Yüksek fırın cürufunun beton yapımında mineral katkı olarak kullanımı, karışımda bulunan Portland çimentosunun yüzde belirli miktar azaltılarak bunun yerine öğütülmüş granüle biçimdeki yüksek fırın cürufu ikamesi ile gerçekleşir. Öğütülmemiş haldeki granüle yüksek fırın cürufu, Portland çimentosu klinkerine nazaran daha sert bir malzemedir. Birlikte öğütme işlemine tabii olduklarında klinker cürufa göre daha ince taneli olmakta ve dolayısıyla kaba taneli olan cürufun istenilen ideal inceliğe

getirilememesinden kaynaklı olarak bağlayıcılık özelliği azalmaktadır. Su ile olan hidratasyonları daha yavaş gerçekleşen yüksek fırın cürufları nemli ortamda çimentoya göre daha uzun süre depolanabilirler. Cürüflu çimento depolanma esnasında nem aldığı takdirde veya depoda uzun süre tutulduğunda, prehidratasyon ve karbonatlaşma göstermekte ve bağlayıcılık özelliği azalmaktadır. Ancak cürufların tek başlarına depolanmasında bu tür sorunlar yaşanmamaktadır (Erdoğan, 2003).



BÖLÜM VI

ALKALİLERLE AKTİVASYON

Çevrenin korunması ve üretim esnasında doğanın tahribatının en aza indirilmesine yönelik sürdürülebilir çalışmalar ve atıkların geri kazanımı günümüzde bütün endüstriyel çalışmalar için kaçınılmaz bir hale gelmiştir. Her yıl atmosfere yayılan CO₂'in ortalama %6 sına neden olan çimento endüstrisi doğadaki en fazla CO₂ yayınıma sebep olan kaynaklar arasındadır. Küresel ısınmanın temel faktörü olan atmosferdeki aşırı sıcaklık artışlarının temelinde başta CO₂ olmak üzere insan kaynaklı sera gazı yayınımları bulunmaktadır. Küresel ısınmayı engellemek veya azaltmak için ilk önce doğaya fazla CO₂ salınımını azaltacak tedbirler alınması gerekmektedir. Bu azalma işlemi üretim veya geri kazanım esnasında fazla CO₂ emisyonu açığa çıkarmayan, geleneksel çimentoya alternatif bağlayıcıların kullanılması ile gerçekleştirilebilir (McNulty, 2009).

Portland çimentosu üretimi esnasında yüksek miktarda yakıt tüketilmesinin ve CO₂ emisyonunun temel sebebi, sentezlenmesi istenilen yüksek CaO içeriğidir. Ayrıca Portland çimentosu üretimi için kullanılan hammaddeler nedeniyle de doğal yapı tahrip edilmektedir. Mevcut doğal yapıyı korumak ve zarar vermemek açısından geleneksel çimentoya alternatif bağlayıcılar üzerinde çalışmak oldukça önemlidir. Silikat içeriğine sahip olan ancak tek başlarına su ile bağlayıcılık özellik göstermeyen malzemelerin aktivasyonu ile alternatif bağlayıcı üretimi, sağladığı yararlar dolayısıyla son yıllarda oldukça dikkat çekmektedir. Üretimleri esnasında sağladıkları enerji tasarrufları, ekonomik oluşları ve çevresel duyarlılıklarının yanı sıra geleneksel Portland çimentosuna kıyasla bu bağlayıcılar, dış ortam etkilerine dayanıklılık bakımından genellikle daha üstündür (Pacheco vd., 2008a, 2008b; Roy, 1999; Teoreanu vd., 2005).

4.1 Tarihsel Gelişimi

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun alkalilerle aktive edilmesi ile ilgili çalışmalar ilk olarak Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği (SSCB)'de başlamıştır. Bunun yanında İskandinav yarım adası ve Doğu Avrupa ülkelerinde uzun yıllar devam

etmiştir. Bu bölgedeki son örnekleri ise İskandinav ülkelerinde “Pyrament” ticari unvanıyla piyasaya çıkan alkallerle aktive edilmiş katkılı çimentolardır (Roy, 1999).

Joseph Davidovits’in kaolin, kireçtaşı ve dolomit ile ilgili yaptığı çalışmalardan sonra konuyla ilgili araştırmalar da önemli bir artış görülmüştür. Davidovits (1988), patentini aldığı çalışmaların da; kaolin, kireçtaşı ve dolomitin ısı işlem görmüş hallerini, karışımlarda alüminosilikat bileşen olarak kullanarak “geopolimer” adını verdiği alkalin bağlayıcılar üretmiş “Pyrament” ve diğer ticari isimlerle piyasada satışa sunulmuştur. Bu kategoride Finlandiya’da Forss “F-cement” ve Ukrayna’da Krivenkov “Geocements” bağlayıcıları üretilmiştir (Pacheco vd, 2008b; Roy, 1999).

4.2 Tipleri ve Kullanım Alanları

Alkali aktivatör kullanılan bağlayıcılar geocements, cüruf alkalin bağlayıcılar, uçucu kül alkalin, alkalin-portland çimentoları, alkalin alüminat çimentoları olarak 5 kategoride incelenebilir. Özellikle 1970’li yıllardan bu yana yaygın bir şekilde kullanılan alkali aktivatörler çeşitli kullanım alanları bakımından Çizelge 4.1’deki gibi özetlemiştir (Krivenko, 1997).

Çizelge 4.1. Alkali aktivatörlerin kullanım alanları

	Yapısal Kullanım Alanları	Yapısal Olmayan
Yollar	Yerinde dökme ve prefabrik ağır aşınma etkisindeki döşemeler	Atık stabilizasyonu
Tarım Endüstrisi	Yerinde dökme ve prefabrik beton depolar	
Endüstriyel	Aside dayanıklı yapı garajları, döşemeler, temeller	Makine gövdeleri
Konut	Prefabrik ve yerinde bina inşaatları, döşemeler, temeller	
Madencilik	Petrol kuyusu groutları, su yalıtımı ve su penetrasyonunu önleme	
Hidrolik	Sulama sistemleri, dalgakıranlar	Kaplamalar

Nükleer atıkların stabilizasyonu ve zehirli metallerin yönetimi de dâhil olmak üzere atık yönetimi alkali aktivatörlerin en yeni kullanım sahasıdır. Atıkların yok edilmesinde alkali alüminosilikat reaksiyonlarının önemli bir görevi vardır. Bariyer olarak veya kapsülleşmede kullanıldığında matrisin geçirimsizliğini azalttığı gibi fazların yapısında

oluşan belli zararlı iyonları sabitleştirir. Bentonit, kaolinit, halloysit ve dickite gibi killere reaksiyona giren zararlı radyoaktif atıklar, dayanıklı monolitik katı bir tabaka oluşturabilir. Radyoaktif veya zararlı bir atığın katılaştırılmasında genellikle, atığın kendisi oldukça alkalidir ve tepkime de aktivatör olarak iş görür. Alkali olarak reaksiyonda aktivatör işlevi görececek bir atık madde bulunmadığı durumda, sodyum veya potasyum tuzları alkali metallerin hidroksitlerini oluşturmak için alkaline toprak hidroksitlerle karıştırılabilirler (Roy, 1999).

4.3 Alkali Aktivatörler

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyonu, Portland çimentosu kullanılmadan alternatif bir bağlayıcı üretimine yönelik yapılan çalışmalar içerisinde en ilgi çekenidir. Bir malzemenin alkalilerle aktive edilebilmesi için teorik olarak içerisinde silika ve alümina içermesi yeterlidir. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda kaolinitik killere, metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve bu malzemelerin karışımları alkalilerle aktive edilerek bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Alkalilerle aktive edilen bağlayıcıların mekanik dayanım özellikleri alüminosilikat malzemelerin yapısına bağlıdır. Doğal malzemeler daha düşük dayanımlı ürünler oluştururken daha yüksek mekanik dayanımlar uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi kalsine malzemelerin kullanılması ile elde edilebilmektedir. Alkali aktivasyon reaktivitesi de puzolanik aktivite de olduğu gibi amorf alüminyum ve silis içeriğine bağlıdır (Pacheco vd., 2008b).

Geleneksel Portland çimentosu ve betonlarına göre alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların kullanılması, erken ve daha yüksek mekanik dayanım, daha düşük hidratasyon ısı ve zararlı kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi bazı önemli üstünlüklere sahiptir. Bunun yanında, alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların kullanılmasının ani priz, mikro çatlak oluşumu ile yüksek büzülme ve çiçeklenme gibi bazı sakıncaları da vardır (Aydın, 2010). Ani priz istenmediği durumlar için yapılan çalışmalarda fosforik veya malik asit kullanılmasının ani prizi engellediği görülmüştür (Gong ve Yang, 2000; Brough, 2000).

Günümüzde yapılan çalışmalarda alkali aktivatör olarak en yaygın kullanılan kimyasallar, sodyum ile cam suyu ($n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$) veya potasyum ile cam suyu

($n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$) karışımı ve sodyum veya potasyum hidroksit ($\text{Na}(\text{OH})$, KOH)'tir. Bağlayıcı aktivasyonunda en çok kullanılan aktivatörler, suda çözünebilen silika ve hidroksit ile üretilen aktivatörlerdir (Pacheco vd., 2008b).

En etkili aktivatörler, içeriğinde silis bulunmayan zayıf asit tuzları (R_2CO_3 , R_2S , RF), alkali hidroksit (ROH) ve $\text{R}_2\text{O} \cdot (n)\text{SiO}_2$ tip silisli tuzlardır. Bu formülasyonlarda R ifadesi, Na, K veya Li gibi alkali metal iyonlarını ifade etmektedir. En uygun Na_2O oranı karışımdaki cürufun kütlece %3'ü ile %5.55'i arasında olması durumudur. İçeriğindeki Silis modülü aralığı 1-1.5 olan bir alkali aktivatör kullanılarak daha yüksek mekanik dayanımlara sahip ürünler üretilebilir. Bunun yanında, toz haldeki sodyum silikat (cam suyu) kullanımında ise ürünün mekanik dayanımlarında daha düşük performanslar görülmüştür (Wang vd., 1994). En iyi aktivatör birlikte kullanılan sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit ($\text{Na}(\text{OH})$) çözeltileridir. Sodyum hidroksit ($\text{Na}(\text{OH})$) konsantrasyonunun artırılması ve daha yüksek kür sıcaklıkları ile doğru orantılı olarak daha yüksek dayanımlar elde edilebilmektedir (Hardjito vd., 2004).

4.4 Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit ($\text{Na}(\text{OH})$) doğada tabii olarak bulunmayan ancak bunun yanında üretilmesi diğer aktivatörlere nazaran daha basit olan bir kimyasaldır. En yaygın üretilme metodu NaCl (sodyum klorür) bileşeninin elektrolizidir. Bu yöntemde $\text{Na}(\text{OH})$ %50'lik çözelti şeklinde üretilir. Tepkime esnasında klor gazı açığa çıkmaktadır, çözelti içerisindeki su buharlaştığında ise geriye katı fazdaki $\text{Na}(\text{OH})$ kalmaktadır. Dünya üzerinde kimya ve birçok endüstride kullanılan temel bir bileşik olan $\text{Na}(\text{OH})$ ' in üretiminin büyük kısmı Kuzey Amerika, Asya ve Avrupa ülkelerinde yoğunlaşmaktadır (Görür, 2015).

Sodyum hidroksit ($\text{Na}(\text{OH})$), dış ortamdan nem çekici, beyaza yakın renkte bir maddedir. Sıcak suda rahatlıkla çözünerek, yumuşak kaygan ve dokunulduğunda dokuya sabun hissi veren ancak kaşındırıcı etkisi olan bir çözelti haline gelir. Kuvvetli bir baz olup su ile reaksiyonu neticesinde 5 dakika gibi bir süre sonunda tepkime sıcaklığı $50\text{ }^\circ\text{C}$ ye ulaşır ve bu sıcaklığını 15 dakika kadar korur. Kostik soda veya sud kostik olarak ta anılan Sodyum hidroksit, laboratuvarında CO_2 gibi asidik gazları yakalamak için kullanılır. Sodyum hidroksit, endüstriyel olarak birçok kimyasal madde

yapımında, suni ipek, sabun, kâğıt, boya, deterjan endüstrisinde ve petrol rafinelerinde kullanılır (Erkmen, 2013).

Katı formda olan sodyum hidroksit beyaza yakın renktedir ve suda çok iyi çözünür. Normal şartlar altında 111 gr/100 ml çözelti olarak elde edilebilir. Bunun yanında etanol ve metanol çözeltileri de mümkündür. Suda çözdürülmemiş katı formda ki sodyum hidroksitin 20 °C'de yoğunluğu 2.13 gr/cm³'tür. Erime sıcaklığı 318 °C ve kaynama sıcaklığı 1388 °C'dir. Molar kütlesi ise 39.9971 gr/mol'dür. Doymuş çözeltilerinde altı farklı hidrat formu vardır. Bunlar; NaOH.H₂O, NaOH.2H₂O, NaOH.3.5H₂O, NaOH.4H₂O, NaOH.5H₂O ve NaOH.7H₂O. Çözeltide ki su azaldıkça Na(OH) yoğunluğu artmaktadır. Sodyum hidroksitin suda çözünmesi esnasında yüksek miktarda ısı açığa çıkar. Sıcaklığın ve açığa çıkan ısının artmasıyla Na(OH) konsantrasyonu artırırken çözeltinin viskozitesini azaltmaktadır (Elibol, 2012).

Kostik olarak da adlandırılan sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ile yakın özellikler gösterir ancak potasyum hidroksite göre yakıcılık özelliği daha az olan güçlü bir bazdır. Akkor derecede uçucu olan, suda çözünürken ısı açığa çıkaran ve ortamdaki neme uzun süre maruz kaldığında bozulan sodyum hidroksitin en büyük avantajı, ucuz olması, kolay ve istenilen miktarlarda temin edilebilmesidir (Canbaz, 2007).

BÖLÜM V

KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

5.1 Hafif Betonlar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Şimşek (1987), Konya-Karaman Madenşehir bölgesinden temin ettiği pomza agregası ile taşıyıcı hafif beton üretmiş ve bu çalışmada maliyeti düşürerek basınç mukavemetini artırmak amacıyla, katkı maddesi olarak Soma B termik santrali uçucu külü kullanılmıştır. Uçucu kül karışımlarda çimento veya ince agrega yerine kullanılmış ve elde edilen en uygun karışım 175 kN/m^2 basınç dayanımına ve 16.80 kN/m^3 birim ağırlığa sahip olan %35 ince agrega / uçucu kül karışımı olmuştur.

Öz (2007), asidik pomza, dere kumu ve uçucu kül kullanarak ürettiği hafif beton karışımlarının birim hacim ağırlığını, karakteristik dayanımını ve yalıtım özelliklerini araştırmıştır. Yoğunluğu 1700 kg/m^3 , tek eksenli basınç dayanımı 310 kgf/cm^2 , ısı iletkenliği $0.48 \text{ kcal/m}^2\text{H}^\circ\text{C}$ ve ses yalıtımı 20.17 dB ile en iyi mekanik özelliklere sahip bir hafif beton elde edilmiştir. Bu hafif beton karışımında agrega olarak %60 asidik pomza, %40 dere kumu, 400 kg çimento, 200 kg uçucu kül, 96 kg su ve çimentonun %1.5'i kadar kimyasal katkı kullanılmıştır.

Kaldı (2011), karakteristik basınç dayanımı, C25/30 olan normal beton ve taşıyıcı hafif beton ile yüksek katlı bir bina yapılması durumunda hangisinin ekonomik olacağını ortaya koymak için İde CAD statik hesap programı ile ayrı ayrı çözümler yapmış ve betonarme elemanların kesitlerini belirlemiştir. Üretilen taşıyıcı hafif betonların yoğunluklarının 1680 ile 1787 kg/m^3 aralığında olduğu belirlenmiştir. Hafif betonların dayanımlarının agrega dayanımları ile sınırlı olduğu ve bu yüzden C30/37 serisi taşıyıcı hafif betonların üretilmesinin ekonomik olmadığı tespit edilmiştir. Taşıyıcı hafif beton serilerinde yoğunluğun ve kür süresinin mekanik özellikleri doğrudan etkilediği belirtilmiştir. Normal betonla imal edilen 10 katlı bir yapının ağırlığının aynı basınç dayanım sınıfındaki hafif beton kullanarak inşa edildiğinde %14.4 azaldığı ve deprem yüklerinde de %34' lük bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Taşıyıcı hafif betonla üretilen yapıların kiriş ve döşeme kesitlerinde yönetmeliğin getirdiği kısıtlamalardan dolayı kayda değer küçülmeler olmazken yapının radye temel

kalınlığının %45 azaldığı, kolon kesitlerinin ise %24 oranında küçülmeler meydana geldiği ve taşıyıcı hafif betonun kullanıldığı yapıda toplam donatı metrajının %19.23 azaldığı belirtilmiştir. Normal betonun kullanıldığı yapıya göre hafif betonun çimento dozajında 1 m³ de 170 kg gibi bir artış gözlense dahi genel durumda hafif beton kullanılan yapının maliyetinin %11.90 oranında azaldığı belirtilmiştir.

Arslan (2007), taşıyıcı hafif beton ve geleneksek betonun donatı aderansını standart Belçika mafsallı kiriş deneyi ile incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda taşıyıcı hafif beton-donatı aderansının normal betona göre daha düşük değerlerde olması dolayısıyla, hafif beton kullanılarak inşa edilecek yapıların tasarımında yürürlükteki deprem yönetmeliğinin (TS 500, TS 2000 ve TDY 2007) yetersiz kaldığını belirtmiştir.

Yıldırım (2007), pomza hafif agregası ile 350 ve 450 dozlu olarak iki farklı dozda hafif beton üretmiştir. Üretilen bu hafif betonların farklı agresif ortamlarda ki dayanım özelliklerini incelemek amacıyla normal su, tuzlu su ve asidik ortamda kür uygulamıştır. Deney numunelerine basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri uygulanmıştır. Tuzlu suda kür edilen numunelerin basınç ve çekme dayanımlarının normal suda kür edilen numunelere göre %12, asidik ortamda kür edilen numunelerin ise %17 oranında dayanım kaybı yaşadığı tespit edilmiştir. 350 çimento dozlu numunelerin normal su, tuzlu su ve asidik ortamdaki karakteristik basınç dayanımlarının sırası ile 205 kg/cm³, 182 kg/cm³ ve 179 kg/cm³, 450 çimento dozlu numunelerin normal su, tuzlu su ve asidik ortamdaki karakteristik basınç dayanımlarının sırası ile 225 kg/cm³, 191 kg/cm³ ve 196 kg/cm³ olduğu tespit edilmiştir.

Akkaş (2012), hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemek amacıyla pomza agregası kullanarak 15x25x230 cm ebatlarında betonarme kirişler üretmiş ve çalışma sonucunda ürettiği hafif betonların taşıyıcı elemanlarda kullanabileceğini belirtmiştir. Üretilen taşıyıcı hafif betonların basınç dayanım değerlerinin 18 MPa ile 25 MPa arasında değiştiğini eğilme dayanımının ise 2.9 MPa ve 3.98 MPa arasında değerler aldığını belirtmiştir.

5.2 Yüksek Fırın Cürufu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Çelik (2005), Portland çimentosuna sahip olmadığı performans özelliklerini kazandırabilmek ve ikincil endüstri ürünlerinin faydalı bir şekilde geri kazanılması

adına yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkısı (%9, %14, %19) ile katkılı çimento üretmiştir. Bu katkı türlerinin farklı çevresel koşullarda çimentonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Yüksek fırın cürufu katkılı çimentolarda katkı oranı artıkça 7 günün sonundaki dayanım değeri azalırken 28 gün sonundaki dayanım değerinde artış gözlenmiştir. Bunun nedeni puzolanların dayanımı artıran etkilerinin görülebilmesi için gereken Ca(OH)_2 in ilk 7 günlük süreçte yeteri kadar oluşmaması gösterilmiştir.

Luga (2015), uçucu kül ve yüksek fırın cürufunu sodyum hidroksitle aktive ederek harç numuneleri üretmiş ve ortaya çıkan harçların özelliklerini araştırmıştır. Yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığının Portland çimentosundan daha az olmasından dolayı yüksek fırın cürufu kullanılan harçların sertleşmiş birim ağırlıklarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 3 günlük ısl küre işleme tabi tutulan yüksek fırın cürufu harçların eğilme dayanımları Portland çimentolu harçlara göre daha düşük değerler alırken basınç dayanımların da %20 oranında artış gözlenmiştir. Yüksek fırın cürufu ile üretilen harçların kapiler su emme oranının Portland çimentosu ve uçucu kül ile üretilen harçların kapiler su emme kapasitesinden daha düşük, aşınma kaybı deneylerinde de üretilen jeopolimer harçların daha iyi performans sergiledikleri tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık deneylerine maruz kalan numunelerde en çok ağırlık kaybı yüksek fırın cürufu içeren harçlarda, en çok basınç dayanımı kaybı ise Portland çimentolu harçlarda gözlemlenmiştir. 900 °C sıcaklık etkisi altında jeopolimer harçların basınç dayanım kaybı %40-%70 iken, Portland çimentolu harçlarda bu değer %85-%90 aralığındadır. 300 °C sıcaklık etkisi altında yüksek fırın cürufu içeren numunelerin eğilme dayanımında artış olduğu ancak sıcaklığın artmasıyla eğilme dayanımının hızlı bir şekilde azaldığı görülmüştür. Jeopolimer harçlar ile Portland çimentolu harçların rötre karakteristikleri karşılaştırıldığında jeopolimer harçların kalıptan çıkarıldıktan 7 gün sonraki boy değişim oranları %0.45-%0.5 aralığında değerler alırken, Portland çimentolu harçlarda bu değişim %0.6-%0.65 aralığındadır.

Kocabıyık (2010), çimentoya ikame olarak %30 ve %60 oranlarında yüksek fırın cürufu kullanarak sabit su/bağlayıcı oranı ile beton numuneleri üretmiş ve yüksek fırın cürufunun beton özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Beton karışımlarında yüksek fırın cürufu gibi ikincil bağlayıcılık özelliğe sahip ürünlerin kullanılması durumunda puzolanik reaksiyon için gerekli olan serbest kirecin erken yaşlarda yeterli miktarda

açığa çıkmamasından dolayı basınç ve yarmada çekme dayanımlarında düşüşler meydana geldiği tespit edilmiştir. Karışımlardaki cüruf içeriğinin artmasına paralel olarak eğilme dayanımı artış göstermiş ve betonun erken yaştaki çatlama riski azalmıştır.

Öner ve Yıldırım (2005), sabit su/bağlayıcı oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren ve içermeyen beton numunelerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma çözülme etkisine dayanıklılıklarını incelemiştir. Yüksek fırın cürufu içeren betonların erken yaşlardaki donma-çözülme etkisine dayanıklılığının yüksek fırın cürufu içermeyen beton numunelerine göre daha düşük değerler aldığını gözlemiştir. Yüksek fırın cürufu içeren betonların puzolanik reaksiyonlarının yavaş gerçekleşmesinden kaynaklı olarak 7 günlük basınç dayanımlarının yüksek fırın cürufu içermeyen betonlara göre daha düşük değerler aldığını, ancak 28 günlük basınç dayanımlarının daha yüksek değerler aldığını belirtmişlerdir.

Boğa (2010), yüksek fırın cürufu ve korozyon inhibitörü kullanımının beton özellikleri ve betonun içerisindeki donatının korozyonuna olan etkisini araştırmıştır. Beton karışımlarında 10 ve 20 lt/m³ korozyon inhibitörü ve çimento yerine ağırlıkça %25 ve %50 oranlarında yüksek fırın cürufu kullanmıştır. Yüksek fırın cürufu kullanılan serilerde yüksek fırın cürufu kullanımının artması ile birlikte ultrases geçiş hızında azalmalar yani beton içerisindeki boşluk oranında artışlar meydana geldiğini belirtmiştir. Su kürü uygulanan yüksek fırın cürufu serilerin 90 günlük basınç dayanımları kontrol numuneleri ile yaklaşık olarak aynı değerde olduğunu belirtmiştir. Yüksek fırın cürufu ikameli serilerin tümünde yarmada-çekme dayanımı kontrol numunelerine göre daha düşük değerler aldığını belirtmiştir. Üretilen numunelerde yüksek fırın cürufu oranı arttıkça yüzey sertliklerinin azaldığını ve klor geçirimsizliğinin arttığını belirtmiştir. Korozyon inhibitörü kullanılarak üretilen betonlara yüksek fırın cürufu ilave edilmesi durumunda yarı hücre potansiyeli değerlerinin daha negatif değerler aldığını ve korozyon olasılığının yükseldiğini tespit etmiştir.

Aydın (2010), çimentoya alternatif bir bağlayıcı üretmek adına yüksek fırın cürufunu sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive etmiştir. Elde edilen numune performanslarını geliştirmek adına yüksek fırın cürufu yerine karışımlarda belli oranlarda uçucu kül, silis dumanı, metakaolin gibi katkıları kullanmış ve en uygun

aktivatör çözeltilisini (M_s oranı SiO_2/Na_2O) araştırmıştır. %6 ve %8 Na_2O oranlarında ve 0.4-0.8 aralığındaki M_s değerlerinde üretilen numunelerin işlenebilirlik ve priz süreleri bakımından şantiye koşulları için uygun olmadığını belirtmiştir. %2 Na_2O içeren tüm M_s serilerinde ve %4 Na_2O içeren 1.4-1.6 arası M_s değerlerinde ve hiç SiO_2 kullanılmadığı $M_s=0$ serilerinde karışımların mekanik özelliklerinin oldukça düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. $M_s=0$ serileri haricindeki tüm karışımlarda kuruma büzülmesi değerleri Portland çimentolu harçlardan daha yüksek değerler almıştır.

Sevinç (2011), çimento ve ince agrega yerine, barit, kolemanit, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza içeren beton ve harçların özelliklerinin araştırmıştır. Basınç dayanım deneylerinde ve sülfata dayanıklılık deneylerinde en iyi performansı çimento ve ince agrega yerine ağırlıkça %10 yüksek fırın cürufu kullanılan numunelerde gözlemiştir.

Bilim (2006), İskenderun Demir Çelik fabrikasından temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun harç ve betonların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine olan etkisini araştırmıştır. Çalışmada üç farklı Na dozajında sodyum silikat, $Na(OH)$ ve Na_2CO_3 ile aktive edilen cürufu harçların performansları sadece normal Portland çimentosu kullanılarak üretilen harçlar ile kıyaslanmıştır. Düşük su/bağlayıcı oranlarında üretilen betonlarda çimento yerine %40 ve %60 yüksek fırın cürufu kullanılması halinde basınç, eğilme ve aşınma dayanımlarının arttığı, boşluk oranı ve kapiler su emme oranında ise kontrol betonuna göre düşüş olduğu belirtilmiştir. Alkali ile aktive edilerek kullanılan yüksek fırın cürufu betonlarda en yüksek mekanik dayanımı sodyum silikat ile aktive edilen numuneler göstermiştir. Portland çimentolarına göre yüksek fırın cürufu betonların kullanımının yüksek kuruma rötresine sahip olduğu belirtilmiştir. Kuru kür koşullarına karşı Portland çimentolu betonların yüksek fırın cürufu betonlara göre daha dayanıklı olduğu belirtilmiştir.

5.3 Alkali Aktivatörler ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Elibol (2012), belirli su/bağlayıcı oranı altında yüksek fırın cürufunu alkalilerle aktive ederek üretilen karışımların basınç dayanımlarını incelemiştir. Karışımlarda bağlayıcı olarak %25 Portland çimentosu ile birlikte %75 yüksek fırın cürufu ve %100 yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Deneysel çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum karbonat

(Na_2CO_3), sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit ($\text{Na}(\text{OH})$) kullanmıştır. Sadece Portland çimentosu kullanılan kontrol numunelerine en yakın eğilme ve basınç dayanımı değerlerini %100 yüksek fırıncı cürufunun $\text{Na}(\text{OH})$ ile aktive edildiği harç numunelerinde gözlemiştir. %2.5, %5, %7.5 ve %10 Na/YFC kriterine göre üretilen 4 farklı serideki $\text{Na}(\text{OH})$ yüksek fırın cürufu aktivasyonları incelendiğinde ise en yüksek basınç ve eğilme dayanımının %5 Na/YFC kullanımında gözlemiştir. Yapılan deneysel çalışmada yüksek fırın cürufu kullanılan harçların erken yaşlardaki dayanımlarının düşük olduğunu gözlemiş ve bu değerleri yükseltebilmek için ilk 3 ve 7 gün olmak üzere sıcak kür uygulaması yapmıştır. 40, 60 ve 80 °C' lik sıcak kür havuzlarında bekletilen numuneler 20 °C sıcaklıktaki kür havuzundaki numunelerle karşılaştırdığında sıcaklık ve kür süresi arttıkça numunelerdeki basınç dayanımlarının da arttığını belirtmiştir.

Toprak (2011), termik santral taban külünü alkali ile aktive etmiş ve üretilen geopolimer harç numunelerinin özelliklerini incelemiştir. Taban külüne göre ağırlıkça %12 Na_2O ve %8 SiO_2 içeren alkali çözeltilerle aktive edilen harçların 20 °C kür sıcaklığında 28 günde ki basınç dayanımlarının 25-30 MPa değeri arasında olduğunu belirtmiştir.

Arsoy (2018), elektrik ark fırınının yan ürünü olarak ortaya çıkan cürufu, alkalilerle aktive ederek beton özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Karışımlarda çimento dozajı 400 kg/m^3 ve su/bağlayıcı oranı 0.4 olarak sabit tutulmuştur. Elektrik ark fırını cürufu çimento yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde %4, %6, ve %8 sodyum konsantrasyonları arasında en yüksek dayanım değerleri %4 sodyum konsantrasyonunda ve %20 cüruf ikamesinde elde edilmiştir.

Yakupoğlu (2010), sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum metasilikat ve sodyum silikat ile yüksek fırın cürufunu aktive ederek harç numuneleri üretmiştir. Bu karışımlarda CEN referans kumu ve hazır içme suyu kullanmıştır. Karışımlarda kum/bağlayıcı oranını 3, su/bağlayıcı oranını 0.50 olarak belirlemiştir. Üretilen bütün harç numunelerinin 28 gün suda kür edildikten sonra birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, basınç ve eğilme dayanımları, yangın ve aşınma dirençleri belirlenmiştir. Aşınma direnci en yüksek olarak sodyum silikat ve sodyum metasilikat ile aktive edilen cürufu harçlarda gözlerken yangına karşı dirençte en iyi performansı sodyum hidroksitle aktive

edilen cürüflü harçlar gözlemiştir. Sodyum silikat ve sodyum metasilikat aktivatörlerinin işlenebilirliği olumlu yönde etkilediğini, sodyum karbonat ile aktive edilen cürüflü harçların işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilediğini belirtmiştir. Aktivatörlerin kullanıldığı tüm harç karışımlarında su emme ve boşluk oranının Portland çimentolu kontrol harcına göre daha yüksek olduğunu en yüksek su emme ve boşluk oranının sodyum karbonat ile aktive edilen cürüflü harçlarda olduğunu belirtmiştir. Sodyum silikat ve sodyum metasilikat aktivatörlerinin yer aldığı karışımların eğilme dayanımlarının kontrol betonuna yakın değerler aldığını sodyum hidroksitin kullanıldığı karışımlarda ise daha düşük değerler aldığını, sodyum karbonatın kullanıldığı karışımların eğilme dayanımı değerlerinin kontrol numunesine göre daha yüksek değerler aldığını belirtmiştir.

Görür (2015), termik santrallerin yan ürünü olarak açığa çıkan uçucu külü kuvvetli bir baz olan Na(OH) ile aktive ederek ürettiği harçların özelliklerini araştırmıştır. Karışımlarda farklı derişim oranlarında aktivatör kullanmış ve harç karışımlarını farklı kür koşullarına tabi tutmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek basınç ve eğilme dayanımı değerlerini %14 derişimle hazırlanan ve 115 °C de 24 saat kür edilen numunelerde gözlemiştir. Yüksek sıcaklığın kür süresini azalttığını ve dayanım değerlerini arttırdığını belirtmiştir.

Özodabaş (2011), yüksek fırın cürufunu alkalilerle aktive ederek harç numuneleri üretmiştir. Karışımlarda çimento olarak CEM I 42.5 R çimento, agrega olarak standart rilem kumu ve aktivatör olarak Na₂SiO₃ ve Na(OH) kullanmış farklı silikat modüllerinde (M_s:Na₂O/SiO₃) karışımlar hazırlamıştır. 28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde referans numunesine kıyasla %126'lık bir artışla ile en büyük artışı %8 Na₂O içerikli seriden çimento yerine %80 yüksek fırın cürufu ikameli M_s=0.75 olan numunede gözlemiştir. En yüksek basınç dayanımı gösteren %8 Na₂O serisinin performansının iyileştirilmesi adına harçlara %5 ve %10 oranlarında pomza ve uçucu kül eklemiş ve dayanım değerlerini incelenmiştir. Pomza ve uçucu kül ikameli numunelerin 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde %100 Portland çimentolu referans numunesine göre basınç dayanımlarının; %75 YFC + %5 P, M_s =0.75 olan numunede %134 oranında, %70 YFC + %10 P, M_s=0.75 olan numunede %135 oranında,%75 YFC + %5 UK, M_s=0.75 olan numunede %100 oranında,%70 YFC + %10 UK, M_s=0.75 olan numunede %121 oranında artış gözlemiştir.

Canbaz (2007), Türkiye’de bulunan üç farklı demir çelik fabrikasının atıkları olan yüksek fırın cürufunu çimento yerine ağırlıkça % 25, %50, %75, %85, %90, %95 ve %100 oranlarında sodyum karbonat, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive etmek için kullanmıştır. Harç numunelerindeki yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça harçların birim ağırlıkları, ultrases geçiş hızlarının, dinamik elastisite modüllerinin ve eğilme ve basınç dayanımlarının düştüğünü gözlemiştir. Demir çelik fabrikalarından temin edilen cüruflar birbirleri ile kıyaslandığında en yüksek özgül yüzey alanının İskenderun demir çelik fabrikasının yüksek fırın cürufunda gözlenirken, en yüksek SiO₂ değerinin ise Kardemir fabrikasının yüksek fırın cürufunda gözlemiştir.

Açıkgöz (2015), sodyum hidroksit (Na(OH)) ve sodyum hidroksit-sodyum silikat (Na₂SiO₃) karışımı ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu betonların hidrasyon sıcaklıklarını ve basınç dayanımlarını incelemiştir. Hidrasyon sıcaklığı ve basınç dayanımı deneylerini CEM I ve CEM II çimentolar kullanılarak üretilen 6 şahit karışımında ve yüksek fırın cürufu kullanılan 18 karışım serisi üzerinde yapmıştır. Karışımlarda sodyum içeriği (Na⁺) %4, %6 ve %8 olarak değişirken bağlayıcı oranları 300, 350 ve 400 kg/m³ olarak belirlenmiş ve su/bağlayıcı oranı 0.5 de sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmaların sonucunda Na dozajının ve bağlayıcı miktarının artmasına paralel olarak basınç dayanımlarının ve hidrasyon sıcaklıklarının arttığı gözlenmiştir. Na(OH) ile Na₂SiO₃’in aktivatör olarak birlikte kullanılması basınç dayanımını olumlu yönde etkilerken alkali aktivatörlerin kullanıldığı tüm karışımlarda hidrasyon sıcaklıklarının düştüğü gözlenmiştir.

Kantarcı (2013), ferrokrom cürufunun öğütülmüş granüle haldeki ürününü alkalilerle (Na₂SiO₃ ve Na(OH)) aktive ederek bağlayıcı elde etmeye çalışmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda Elazığ ferrokrom cürufunun aktivasyonu ile üretilen betonların basınç dayanımlarının ortalama 35 MPa olduğunu, aynı karışım oranlarındaki Portland çimentolu betonun maksimum basınç dayanımının 31.8 MPa olduğunu belirtmiştir. Kontrol betonları ve cürufu betonların yangın etkisi altındaki davranışlarını incelediğinde 100 ve 300 °C sıcaklıklarda cürufu betonların basınç dayanımlarının daha yüksek değerler aldığını belirtmiştir.

BÖLÜM VI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ile ilgili bilgiler ile bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki başlıklar altında detaylı bir şekilde verilmiştir. Deneysel çalışma Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümü, Yapı Malzemesi Laboratuvarında ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kontrol harçlarından hariç suda çözünen Na(OH)'in mol miktarına bağlı olarak 7 farklı karışımda ve kür koşullarına bağlı olarak 4 farklı seride harç numuneleri üretilmiştir. Harç numuneleri havada (poşette), 105 °C de 12 saat, 105 °C de 24 saat ve 105 °C de 48 saat olmak üzere 4 farklı kür koşulunda bekletilmiştir. 80, 100, 120, 140, 160, 180 ve 200 gr olarak farklı oranlarda kullanılan Na(OH), 60 °C ısıtılmış suda çözdürülmüştür. Tüm karışımlarda sabit olarak 500 gr bağlayıcı kullanılmıştır.

6.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzeme Özellikleri

6.1.1 Pomza

Bu tez çalışması kapsamında hafif ince agrega olarak kullanılan asidik pomza agregası Nevşehir Mikromin Maden San. Ve Tic. A.Ş.'den 8-16 mm elek aralığında temin edilmiş olup Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan kırıcıdan geçirilerek boyutu küçültülmüştür. Kırıcıdan geçirilen pomza agregaları 2 mm'lik elekte elenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan pomzanın özgül ağırlığı 2.41'dir. Pomzanın kimyasal kompozisyonu Çizelge 6.1'de, TS EN 196-1 (2009) standardında belirtilen Referans Kumu'nun tane büyüklüğü dağılımına göre elde edilen elek analizi Çizelge 6.2'de, granülometri eğrisi Şekil 6.1'de ve görünümü Fotoğraf 6.1'de verilmiştir.

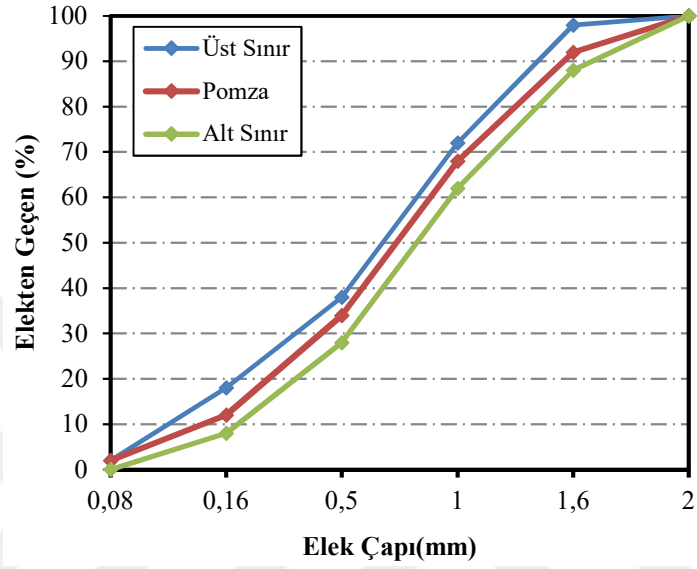
Çizelge 6.1. Pomzanın kimyasal kompozisyonu (%)

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	KK
Pomza	63.37	15.50	5.04	3.39	2.80	1.50	0.82	0.17	6.79

KK: Kızdırma Kaybı

Çizelge 6.2. Pomzanın elek analizi (%)

Elek Çapı (mm)	0,08	0,16	0,5	1	1,6	2
Elekten Geçen (%)	6	17	38	62	92	100
Sınırlar (%)	99±1	87±5	67±5	33±5	7±5	0



Şekil 6.1. Pomzanın granülometri eğrisi



Fotoğraf 6.1. Pomzanın görünümü

6.1.2 Ögütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan yüksek fırın cürufu, İskenderun Demir Çelik Fabrikasının bir atığıdır. Adana Çimento Fabrikasında belli bir incelik değerine kadar öğütülmüş ve bağlayıcı malzeme olarak deneysel çalışmada kullanmak için bu fabrikadan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu olarak temin edilmiştir. Kullanılan yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri Çizelge 6.3’de kimyasal kompozisyonu Çizelge 6.4’de, karakteristik basınç dayanımı Çizelge 6.5’de ve görünümü Fotoğraf 6.2’de verilmiştir. ASTM C 989 (1993) standardına göre, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun 28 günlük aktivite indeksi %85’tir.

Çizelge 6.3. Yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellik	Özgül Ağırlık	Özgül Yüzey (cm ² /gr)	0.090 mm elekte kalan (%)	0.045 mm elekte kalan (%)
YFC	2.87	5220	0.1	1.2
TS EN 15167-1		> 2750		

YFC: Yüksek fırın cürufu

Çizelge 6.4. Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu (%)

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	S ⁻²	Cl ⁻	R	(CaO+MgO)/SiO ₂	KK
YFC	39.39	11.52	1.24	36.64	6.78	0.61	0.54	0.0052	0.1	1.10	2.29
TS EN 15167-1					≤%18	≤%2.5	≤%2	≤%0.10	≤%1	≥ 1	≤%3

YFC: Yüksek fırın cürufu, KK: Kızdırma Kaybı, R: Rutubet

Çizelge 6.5. Yüksek fırın cürufunun basınç dayanım değerleri (MPa)

Basınç Dayanımı	7 Günlük	28 Günlük
YFC	55.60	80.60
TS EN 196-1	> 45	> 70



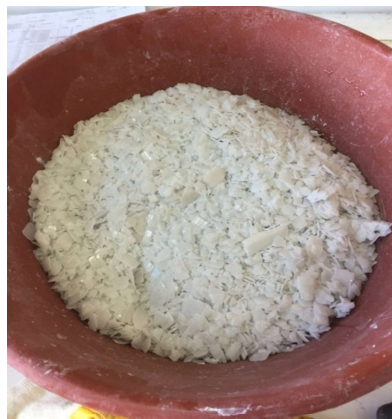
Fotoğraf 6.2. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun görünümü

6.1.3 Na(OH) (sodyum hidroksit)

Bu tez çalışması kapsamında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu aktive ederek Portland çimentosuna alternatif bir bağlayıcı elde etmek için alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit (Na(OH)), Kocaeli Koruma Klor Alkali San. ve Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir. Kullanılan Na(OH) beyaz renkte ve flake (pul) şeklindedir. 20 °C'de yoğunluğu 2.13 gr/cm³, molekül ağırlığı 40.01 gr/mol-gr, kaynama noktası 1390 °C, erime noktası 318 °C ve suda 20 °C'de çözünürlüğü 1090 gr/lt'dir. Na(OH)'in kimyasal kompozisyonu Çizelge 6.6'da ve görünümü Fotoğraf 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.6. Sodyum hidroksitin kimyasal kompozisyonu

Oksit	Na(OH)	NaCl	Na ₂ CO ₃	Fe	Ar	Hg
Na(OH)	> %98	< %0.1	< %0.4	<15 mg/kg	0.1 mg/kg	0.0 mg/kg
Oksit	Ni	Cr	Pb	Sb	Se	Cd
Na(OH)	0.1mg/kg	0.5 mg/kg	0.1 mg/kg	0.1 mg/kg	0.1 mg/kg	0.1 mg/kg



Fotoğraf 6.3. Na(OH)'in görünümü

6.1.4 Çimento

Deneysel çalışmalarda kullanılan çimento, TS EN 197-1 (2002) standardına uygun, erken dayanımı yüksek CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosudur. Çimento Kayseri Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiştir. Beton karışımlarda kullanılan Portland çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri ile ilgili bilgiler sırasıyla Çizelge 6.7 ve 6.8’de verilmiştir. Harç karışımlarda kullanılan çimentonun tamamı 73 µm elekten geçmiştir.

Çizelge 6.7. Çimentonun kimyasal kompozisyonu (%)

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK
Çimento	21.2	5.9	2.1	62.1	2.3	3.4	0.8	0.4	1.8

KK: Kızdırma Kaybı

Çizelge 6.8. Çimentonun fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikleri		Sonuçlar
Priz Süresi	İlk (Dakika)	130
	Son (Dakika)	215
İncelik	Özgül Yüzey (cm ² /gr)	3310
Özgül Ağırlık		3.08

6.1.5 Karışım suyu

Beton üretiminde kullanılan su üç farklı görev üstlenmektedir. Suyun birinci görevi çimento ile birleşerek hidrasyonun başlamasını sağlamaktır. İkinci görevi, beton üretiminde agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak taze betonun istenilen kıvam ve işlenebilirliğini sağlamaktır. Üçüncü görevi ise, üretilmiş ve yerine yerleştirilmiş olan betonun yüzeyinin ıslak tutularak, beton içerisindeki suyun buharlaşmasını önleyerek, betonun içerisinde kimyasal reaksiyonların gelişebilmesi için yeterli suyun bulunmasını sağlamaktır. Beton karışımlarında kullanılacak en ideal suyun içilebilir kalitede olması gerekmektedir. Bu yüzden deneysel çalışmalarda kullanılan su, Niğde Belediyesine ait şehir şebekesinden sağlanan içme suyudur.

6.2 Harç Karışım Oranları

Harç üretiminde kullanılan malzemelerin karışım miktarları TS EN 196-1 (2009) standardına göre belirlenmiştir. Harç karışımında kullanılan pomzanın miktarı, TS EN 196-1 (2009) standardında belirtilen Referans Kumu'nun miktarına göre hacimce belirlendikten sonra ağırlığı belirlenmiştir. Harç karışımlarında tüm malzemeler ağırlıkça kullanılmıştır. Karışım hesaplarında su/bağlayıcı oranı 0.50 olarak alınmıştır. Yapılan deneysel çalışmada çimento (C), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC), su (S), sodyum hidroksit (Na(OH)) ve 0-2 mm dane boyutlarında pomza agregası (P) kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda sadece çimento ile üretilen kontrol harçlarından hariç suda çözünen Na(OH)'in mol miktarına bağlı olarak 7 farklı karışımda harç numuneleri üretilmiştir. Bu 7 farklı karışımı; 80, 100, 120, 140, 160, 180 ve 200 gr olarak farklı oranlarda kullanılan Na(OH) miktarları oluşturmaktadır. Tüm bu karışımlarda sabit olarak 500 gr YFC ve 250 gr su kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışma kapsamında üretilen harç numuneleri için hazırlanan karışım oranları Çizelge 6.9'da verilmiştir. Bu çizelgede sadece çimento ile üretilen kontrol karışımı K ile diğer karışımlar ise molariteye göre (1 lt sudaki Na(OH) mol miktarı) 8M, 10M, 12M, 14M, 16M, 18M ve 20M olarak kodlanmıştır. Dahası havada (poşette) kür edilen gruba HP, 105 °C de etüvde 12 saat kür edilen gruba 12SE, 105 °C de etüvde 24 saat kür edilen gruba 24SE ve 105 °C de etüvde 48 saat kür edilen gruba 48SE kodları verilmiştir.

Çizelge 6.9. Harç karışımları için malzeme miktarları (3 adet prizmatik numune için)

Karışım Kodu	YFC (gr)	Çimento (gr)	Pomza (gr)	Na(OH) (gr)	Su (gr)
K	0	500	600	0	250
8M	500	0	600	80	250
10M	500	0	600	100	250
12M	500	0	600	120	250
14M	500	0	600	140	250
16M	500	0	600	160	250
18M	500	0	600	180	250
20M	500	0	600	200	250

6.3 Harç Numunelerinin Üretimi ve Üzerinde Uygulanacak Deneyler

Harç karışımları hazırlanırken ilk önce alkali aktivatör (Na(OH)), 60 °C ısıtılmış karışım suyunun belli bir kısmında çözdürülmüştür. Mobil hazneli ve yukardan karıştırıcılı harç mikserine sırasıyla pomza, çimento veya yüksek fırın cürufu, su ve aktivatör eklenmiştir. Pomza ve bağlayıcılar miksera yerleştirildikten sonra, TS EN 196-1 (2016) standardına göre mikser yavaş konumda 30 sn çalıştırılmıştır. Sonra mikser yavaş hızla çalışırken suda eritilen aktivatör ve geriye kalan karışım suyu yavaş yavaş eklenmiştir. Daha sonra mikser hızlı konumda 60 sn daha çalıştırılarak karıştırma işlemi sonlandırılmıştır. Karıştırma işlemlerinden sonra her bir karışımın yayılma ve taze birim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Karıştırılan harç numuneleri 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik kalıplar yağlandıktan sonra, bu kalıplara 3 aşamada titreşim sehpası ile sıkıştırma uygulanarak yerleştirilmiştir. Harç numunelerinin hazırlanışı ve kalıplara yerleştirilmesi Fotoğraf 6.4’de görülmektedir.



Fotoğraf 6.4. Harç numunelerinin hazırlanışı

Kalıplara yerleştirilen numuneler poşetlere konulduktan sonra bir gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkartılmıştır. Kalıplardan çıkartılan numuneler 4 farklı kür işlemi için 4 farklı gruba ayrılmıştır. Birinci grup numuneler poşet içerisine yerleştirildikten sonra laboratuvar ortamında, deney gününe kadar havada (poşette) kür edilmiştir. Diğer üç grup numuneler ise poşet içerisine yerleştirilerek 105 °C sıcaklıktaki etüvde 12 saat, 24 saat ve 48 saat bekletildikten sonra laboratuvar ortamında deney gününe kadar poşet içerisinde kür edilmişlerdir. 4 farklı

kür uygulanan numunelerin ilk önce sertleşmiş birim ağırlık ve ultrases geçiş hızı değerleri belirlenmiştir. Daha sonra eğilme dayanımı değerleri üç nokta eğilme deneyi uygulanarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı değerleri eğilme testinde ikiye bölünmüş numunelerin alt ve üst yüzeyine 40x40 mm çelik plakalar yerleştirilerek belirlenmiştir. Dayanım deneyleri TS EN 1015-11 (2007) standardına uygun olarak yapılmıştır.

6.3.1 Taze harç deneyleri

6.3.1.1 Taze birim ağırlık

Bir malzemenin birim ağırlığı, boşluklar dâhil tüm ağırlığının, kapladığı hacme oranı olarak tanımlanır. Taze harçların birim ağırlıkları hacmi belli olan bir kap içerisine sıkıştırıldıktan sonra ölçülen ağırlığın kabın hacmine bölünmesi ile bulunur. Taze betonların birim ağırlığı belirlenirken TS EN 12350-6 (2010) ve ASTM C138 (1994) standartları kullanılır. Birim olarak genellikle kg/m^3 veya t/m^3 ifadeleri kullanılan birim ağırlık, Denklem 6.1 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta = P / V_h \quad (6.1)$$

Denklem 6.1’de, Δ ; taze betonun birim ağırlığını (kg/m^3), P; taze betonun ağırlığını (kg) ve V_h ; taze betonun (kalıbın) hacmini (m^3) ifade etmektedir. Üretilen taze harç numunelerinin birim ağırlıklarının belirlenmesi için 40x40x160 mm boyutlarındaki numune kalıplarına karışımlar 3 aşamada titreşim sehpasında sıkıştırılarak yerleştirilmiş ve üzerleri düzeltildikten sonra tartma işlemi yapılmıştır. Daha önceden boş ağırlıkları tespit edilen demir harç kalıplarının ağırları toplam ağırlıktan düşülmüş ve elde edilen betonun net ağırlığı, 40x40x160 mm prizmatik numunenin hacmine bölünmesi ile taze harçların birim ağırlıkları tespit edilmiştir.

6.3.1.2 Yayılma deneyi

Harçların taze haldeki işlenebilirlik ve kıvamı hakkında bilgi veren yayılma değerlerinin belirlenebilmesi için yayılma tablası üzerinde yayılma değerleri TS EN 1015-3 (2000) standardına uygun olarak ölçülmüştür. Yayılma tablası üzerindeki koniye yerleştirilen harç karışımları 10 defa şişlendikten sonra üzeri düzeltilmiştir. Daha sonra yavaş bir

şekilde koni çıkarılmış ve harcın yayılması için tablada 15 vuruş gerçekleştirilmiştir. Bu vuruş sonrası harçların yayılma çapları, 4 farklı yönden ölçülmüş ve ortalaması alınarak karışımların yayılma değerleri belirlenmiştir. Yayılma deneyi için karışımların koniye yerleştirilmesi Fotoğraf 6.5’de görülmektedir.

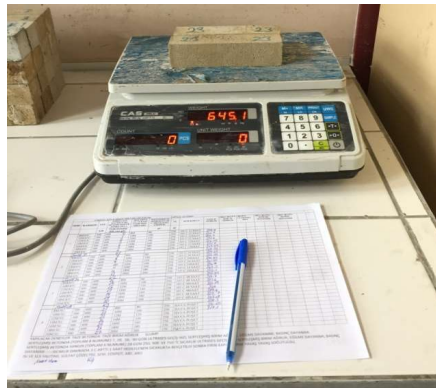


Fotoğraf 6.5. Yayılma deneyi

6.3.2 Sertleşmiş harç deneyleri

6.3.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık

Üretilmiş olan tüm harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri için tahribatlı deneylerden önce üç adet numunenin ağırlıkları tartılarak ortalaması alınmıştır. Alınan ortalama değer 40x40x160 mm ölçülerindeki numune hacmine bölünerek sertleşmiş birim hacim ağırlık değerleri tespit edilmiştir. Sertleşmiş birim ağırlık deneyi için tartılan numune örnekleri Fotoğraf 6.6’da görülmektedir.



Fotoğraf 6.6. Sertleşmiş birim ağırlık deneyi

6.3.2.2 Ultrases geçiş hızı

Ultrases geçiş hızı (U_{pv}) deneyi üretilen harç veya beton numunesinin içerisindeki boşluk oranını tespit etmek amacı ile yapılan bir deneydir. Beton yapısındaki boşluklarda dağılarak daha yavaş ilerleyen ses üstü dalgaların aldığı yol ve dolayısıyla geçiş süresi uzamaktadır. Beton içerisinde hızlı yol alan ses dalgaları betonun boşluk oranının az olduğu ve dolayısıyla betonun daha yüksek dayanımlı olduğunu gösterir. Bu tez kapsamında üretilen harç numunelerinin ultrases geçiş hızları dijital ultrases geçiş hızı ölüm aleti ile Fotoğraf 6.7’de görüldüğü gibi belirlenmiştir. İlk önce numunelerin ölüm yapılacak yüzeyleri temizlenerek doğru bir ölüm yapılmaya hazır hale getirilmiştir. Daha sonra test cihazının başlıkları (alıcı ve verici probları) jel ile jellendikten sonra temizlenen yüzeylere bastırılarak, numunelerden ses dalgasının kat ettiği mesafe boyunca geçen süre lmlmştr. Her bir numunede en az iki okuma yapılmıştır. Aynı karışıma ait olan üç numuneden okunan değerlerin ortalaması alınarak ultrases geçiş süresi tespit edilmiştir. U_{pv} değerleri bu süre ve alıcı-verici uçların arasındaki mesafe göz önünde bulundurularak Denklem 6.2 ile hesaplanmaktadır. TS EN 12504-4 (2012) ve ASTM C 597 (1994) standartlarına göre ultrases geçiş süresi ölümleri 40x40x160 mm numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

$$U_{pv} = \frac{S}{t} \times 10 \quad (6.2)$$

Bu denklemde U_{pv} ; ultrases geçiş hızını (km/sn), S; alıcı verici problar arasındaki mesafeyi (cm) ve t; ses dalgasının kat ettiği mesafe boyunca geçen süreyi (μ s-mikrosaniye) göstermektedir.



Fotoğraf 6.7. Ultrases geçiş hızı deneyi

6.3.2.3 Eğilme dayanımı

Deneysel çalışmalarda eğilme dayanımı (f_{fs}) değeri TS EN 196-1 (2016) standardına uygun olarak 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numunelerden üç noktadan yükleme deneyi ile elde edilmiştir. Numunelere uygulanan üç nokta eğilme deneyi Fotoğraf 6.8’da görülmektedir. Ultrases geçiş hızı deneylerinden sonra her karışımdan üçer adet numunenin eğilme deneyine tabii tutulmasının sonucu f_{fs} değerleri belirlenmiştir. Numunelerin f_{fs} değerlerinin hesabı, Denklem 6.3’e göre yapılmaktadır.

$$f_{fs} = \frac{3NL}{2bd^2} \quad (6.3)$$

Bu formülde f_{fs} : eğilme dayanımını (MPa), N; kırılmaya neden olan yükü (N), L; numunenin uzunluğunu (mm), b; numunenin enini (mm) ve d; numunenin yüksekliğini (mm) temsil etmektedir. Malzemenin eğilme dayanımı değerleri test edilirken kiriş numunelerin tarafsız ekseninin alt bölgesinde çekme gerilmeleri, üst bölgesinde ise basınç gerilmeleri oluşmaktadır. Betonlarda çekme gerilmelerinin basınç değerlerine göre çok düşük değerler almasının sonucu olarak tarafsız eksenin alt bölgesinde meydana gelen çekme gerilmeleri kirişlerde kırılma olayını meydana getirmektedir. Betonlarda eğilme dayanımı değerleri aynı zamanda çekme gerilmesi değerlerini de göstermektedir.



Fotoğraf 6.8. Eğilme dayanımı deneyi

6.3.2.4 Basınç dayanımı

Basınç dayanımı (f_c) değerleri, eğilme dayanımı deneyinde kırılan prizmatik numunelerin her iki yarısından elde edilen parçaların iki yanına 40x40 mm'lik plakalar yerleştirilerek belirlenmiştir. Bu şekilde oluşturulan 40x40x40 mm küp numuneler TS EN 196-1 (2016) standardında belirtilen kurallar dikkate alınarak 250 kN yük kapasitesine sahip harç presi kullanılarak kırılmıştır. Basınç dayanımı deneyinin yapılırken görünümü Fotoğraf 6.9'da verilmiştir. Kırılma yüküne göre f_c değerleri aşağıda verilen Denklem 6.4'e göre hesaplanmaktadır.



Fotoğraf 6.9. Basınç dayanımı deneyi

$$f_c = \frac{P}{A_c} \quad (6.4)$$

f_c : Basınç dayanımı

P : Preste kırılma anında okunan max. yük

A_c : Numunenin basınç yükü uygulanan kesit alanı

6.4 Yüksek Sıcaklık Etkisine Dayanıklılık Deneyi

Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık deneyi hem tüm harç karışımlarında hem de 4 farklı kür uygulanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. 4 farklı kür uygulanan tüm numuneler 28 gün boyunca kür edildikten sonra, bünyesinde bulunan suyun yüksek sıcaklık etkisi sonucu buhar basıncı yapıp yüksek sıcaklık fırınına ve numunelere zarar vermesini engellemek için 105 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat süreyle bekletilmiştir. Daha sonra etüvden çıkartılan numuneler TS EN 1363-1 (2013) standardına uygun 6 °C/dk ısınma ısısına sahip Fotoğraf 6.10'daki yüksek sıcaklık fırınında 150 °C, 250 °C ve 500 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklığa 2 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Daha sonra yüksek sıcaklık fırınının enerjisi kesilerek numunelerin fırının içerisinde yavaş yavaş soğumaları sağlanmıştır. Numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması işi Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. 150 °C, 250 °C ve 500 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerin sertleşmiş birim ağırlık, U_{pv} , f_{fs} ve f_c değerleri belirlenmiştir. Dahası, 250 °C ve 500 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan ve aşağıdaki bölümde belirtilen numuneler üzerinde mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir.



Fotoğraf 6.10. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisine maruz kalması

6.5 SEM, EDS ve XRD Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektrometresi (EDS) ve X ışını kırınımı (XRD) analizleri için tüm karışımlardan havada poşette kür edilen gruptan K/HP, 8M/HP, 14M/HP ve 20M/HP kodlu harçlar seçilmiştir. Bu harçlardan

laboratuvar ortamında poşette yaklaşık 25 °C de bekletilmiş olanlar ile 250 °C ve 500 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan harçlar SEM, EDS ve XRD analizleri için kullanılmıştır. SEM ve EDS alan analizleri için yukarıda belirtilen harçlardan küçük parçalar kırıldıktan sonra problara yapıştırılmıştır. Daha sonra yeterli iletkenliğin ve net görüntünün alınabilmesi için parçalar altınla kaplanmıştır. Kaplanan parçalar üzerinde SEM görüntüleri ve EDS alan analizleri sırasıyla Zeiss EVO 40XVP ve Element EDAX-Ametek marka cihazlardan elde edilmiştir. Daha sonra SEM görüntüleri üzerinde işaretlenen alanlarda da EDS alan analizi gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri, seçilen harçlardan kırılan numunelerin öğütülmesiyle elde edilen toz örnekler üzerinde Philips Panalytical EMPYREAN marka cihazla yapılmıştır.



BÖLÜM VII

DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1 Taze Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

7.1.1 Taze birim ağırlık

Sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu hafif harçların taze birim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Tüm karışımlardan elde edilen taze birim ağırlık değerleri Çizelge 7.1’de ve karşılaştırmalı grafikleri ise Şekil 7.1, 7.2, 7.3 ve 7.4’te verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi taze hafif kontrol harcının birim ağırlık değeri alkali aktivatör ile bağlanmış yüksek fırın cürufllu hafif harçların birim ağırlık değerlerinden daha küçüktür. Yüksek fırın cürufunun bağlanmasında kullanılan alkali aktivatör (Na(OH)) taze birim ağırlık değerlerini arttırmıştır. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) taze birim ağırlık değerlerinin arttığı görülmüştür. Hafif kontrol harcı numunesinde taze birim ağırlık değeri 1692 kg/m^3 iken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinde 1715 kg/m^3 ile 1765 kg/m^3 arasında değişmektedir. En düşük taze birim ağırlık değeri hafif kontrol harcında görülürken, en yüksek taze birim ağırlık değeri ise en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan yüksek fırın cürufllu hafif harç numunesinde görülmüştür.

Çizelge 7.1. Harç karışımlarında yayılma ve taze birim ağırlık değerleri

Karışım Kodu	Taze Birim Ağırlık (kg/ m^3)	Yayılma (cm)
K	1692	19.00
8M	1715	17.50
10M	1728	16.00
12M	1738	15.50
14M	1746	14.00
16M	1753	13.50
18M	1759	13.00
20M	1765	12.50

7.1.2 Yayılma deneyi

Sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu hafif harçların yayılma değerleri Çizelge 7.1’de verilmiştir. Yayılma değerleri bu çizelgeden de görüldüğü gibi 19.00 cm ile 12.50 cm arasında değişmektedir. Yüksek fırın cürufunun bağlanmasında kullanılan alkali aktivatör (Na(OH)) yayılma değerlerini azaltmıştır. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) yayılma değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi Na(OH) miktarının artmasıyla yüksek fırın cürufu daha hızlı aktive olmuş ve daha erken bağlayıcılık özelliği göstermiştir.

7.2 Sertleşmiş Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

7.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık

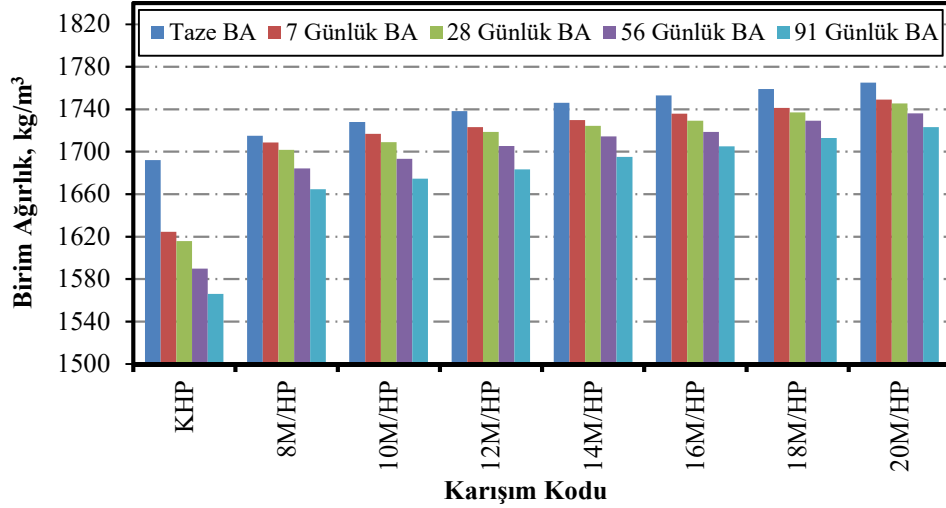
Sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu hafif harçların TS EN 12350-6 (2010) ve ASTM C 138 (1994) standartlarına göre, 4 farklı kür koşulu için de 7, 28, 56 ve 91 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Tüm hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri Çizelge 7.2 ve Şekil 7.1, 7.2, 7.3 ve 7.4’te verilmiştir. Bu çizelge ve şekillerden de görüldüğü gibi kür günleri arttıkça hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni zamanla hafif harç numuneleri içersin de bulunana serbest suyun buharlaşmasıdır.

Laboratuvar ortamında, havada (poşette) kür uygulamasına maruz kalan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri Çizelge 7.2 ve Şekil 7.1’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinden daha düşüktür. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin arttığı görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 1625 kg/m^3 ile 1566 kg/m^3 arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık

olarak 1749 kg/m³ ile 1665 kg/m³ arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça buna bağlı olarak birim ağırlığın da arttığı görülmüştür. Bu grupta en düşük sertleşmiş birim ağırlık değeri hafif kontrol harç numunelerinde görülürken, en yüksek sertleşmiş birim ağırlık değeri ise en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan yüksek fırın cüruflu hafif harç numunelerinde görülmüştür.

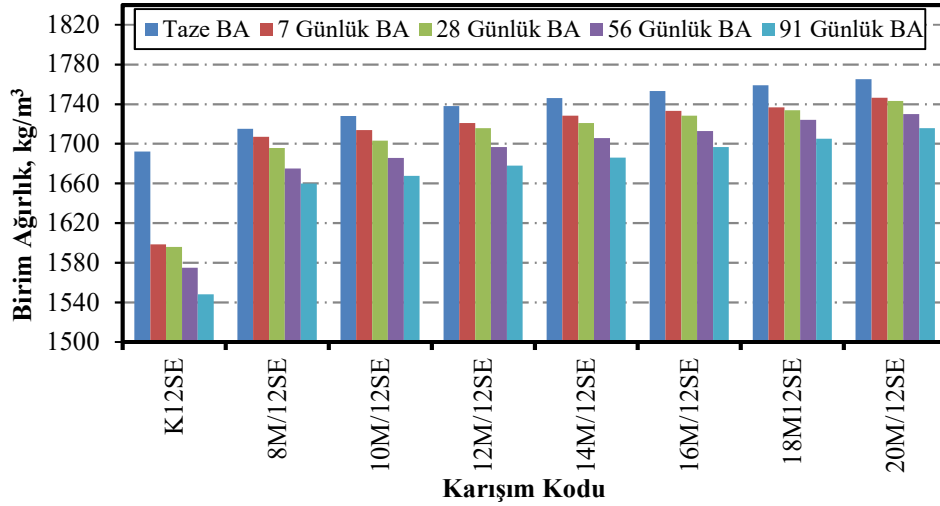
Çizelge 7.2. Harç karışımlarının sertleşmiş birim ağırlık değerleri

	Sertleşmiş Birim Ağırlık Değerleri (kg/m ³)			
	7 Günlük	28 Günlük	56 Günlük	91 Günlük
K/HP	1624.49	1615.86	1589.80	1565.90
8M/HP	1708.44	1701.68	1684.18	1664.49
10M/HP	1716.64	1708.79	1693.20	1674.45
12M/HP	1723.05	1718.47	1705.35	1683.32
14M/HP	1729.53	1724.29	1714.22	1695.04
16M/HP	1735.78	1729.18	1718.63	1705.04
18M/HP	1741.13	1736.94	1729.06	1712.77
20M/HP	1748.91	1745.48	1735.95	1723.01
K/12SE	1598.38	1595.70	1574.88	1548.16
8M/12SE	1706.99	1695.77	1675.04	1659.73
10M/12SE	1713.67	1703.17	1685.59	1667.50
12M/12SE	1720.91	1715.66	1696.76	1677.73
14M/12SE	1728.18	1720.66	1705.78	1686.02
16M/12SE	1732.99	1728.11	1712.81	1696.56
18M/12SE	1736.80	1733.67	1724.14	1705.13
20M/12SE	1746.23	1742.97	1729.88	1715.52
K/24SE	1588.28	1574.88	1547.23	1539.80
8M/24SE	1690.86	1673.24	1667.34	1655.82
10M/24SE	1697.93	1686.72	1674.06	1660.48
12M/24SE	1710.94	1700.16	1689.49	1670.04
14M/24SE	1725.90	1716.67	1701.17	1681.80
16M/24SE	1730.52	1725.45	1711.21	1693.22
18M/24SE	1734.13	1730.73	1720.16	1700.78
20M/24SE	1744.55	1741.38	1727.09	1710.08
K/48SE	1584.38	1567.82	1532.11	1523.09
8M/48SE	1672.66	1654.53	1649.73	1635.27
10M/48SE	1689.02	1676.09	1658.24	1643.48
12M/48SE	1701.76	1693.14	1672.30	1656.76
14M/48SE	1713.79	1707.73	1686.91	1670.59
16M/48SE	1722.30	1716.21	1698.48	1680.12
18M/48SE	1729.14	1723.13	1706.09	1689.84
20M/48SE	1734.57	1730.92	1712.93	1692.38



Şekil 7.1. Havada-poşette kür uygulanan numunelerin birim ağırlık değerleri

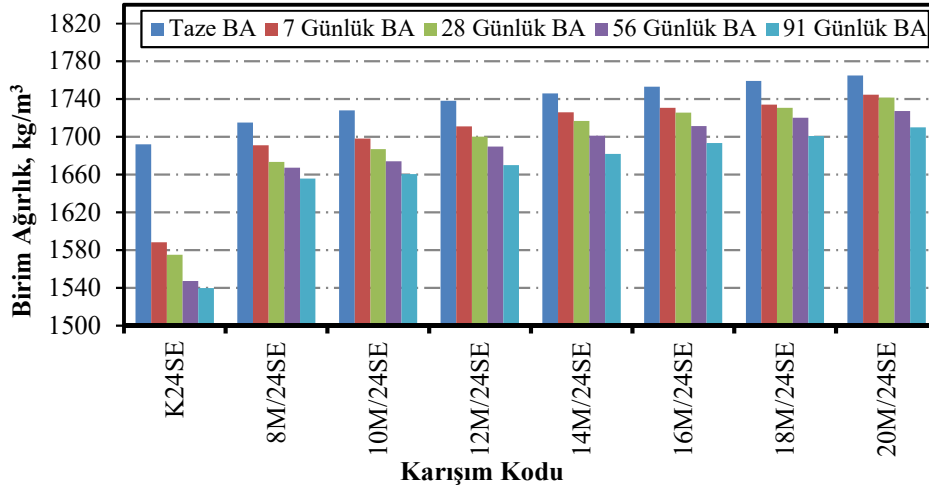
12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait sertleşmiş birim ağırlık değerleri Çizelge 7.2 ve Şekil 7.2’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinden daha düşüktür. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin arttığı görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 1600 kg/m³ ile 1550 kg/m³ arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 1746 kg/m³ ile 1660 kg/m³ arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça buna bağlı olarak birim ağırlığın da arttığı görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 12 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette kür uygulanan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerlerinden daha düşüktür. Bunun nedeni 12 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı terk etmesidir. Bu grupta en düşük sertleşmiş birim ağırlık değeri hafif kontrol harç numunelerinde görülürken, en yüksek sertleşmiş birim ağırlık değeri ise en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinde görülmüştür.



Şekil 7.2. 12 saat etüvde kür uygulanan numunelerin birim ağırlık değerleri

24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait sertleşmiş birim ağırlık değerleri Çizelge 7.2 ve Şekil 7.3’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürüflü hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinden daha düşüktür. Dahası yüksek fırın cürüflü hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin arttığı görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 1590 kg/m³ ile 1540 kg/m³ arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 1745 kg/m³ ile 1655 kg/m³ arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça buna bağlı olarak birim ağırlığın da arttığı görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette ve 12 saat etüvde kür uygulanan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerlerinden daha düşüktür. 105 °C derecedeki etüvde 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin, bu numunelerin sıcaklık etkisine daha uzun süre maruz kalmasından dolayı, 105 °C derecedeki etüvde 12 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni 24 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı daha fazla terk etmesidir. Bu grupta en düşük sertleşmiş birim ağırlık değeri yine kontrol hafif harç

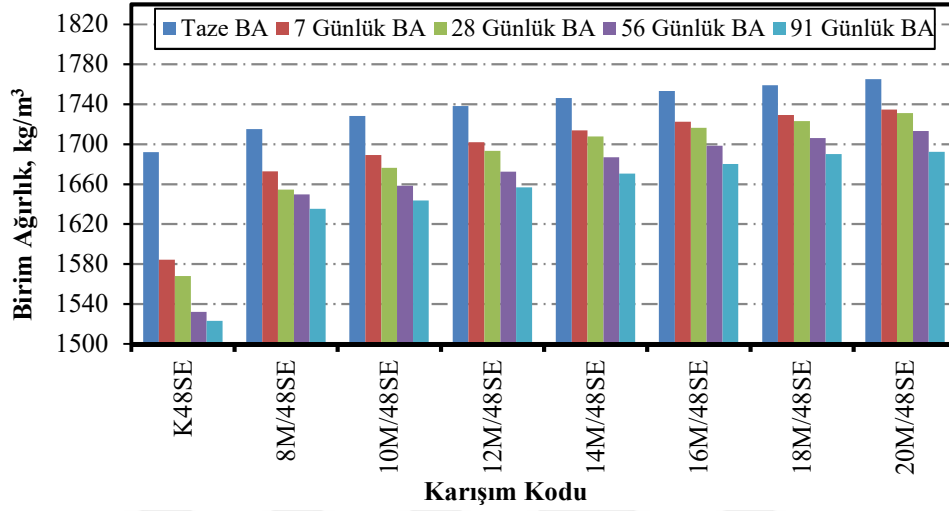
numunelerinde görülürken, en yüksek sertleşmiş birim ağırlık değeri ise en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinde görülmüştür.



Şekil 7.3. 24 saat etüde kür uygulanan numunelerin birim ağırlık değerleri

48 saat süresince 105 °C derecedeki etüde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait sertleşmiş birim ağırlık değerleri Çizelge 7.2 ve Şekil 7.4'te verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürüflü hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinden daha düşüktür. Dahası yüksek fırın cürüflü hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin arttığı görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 1584 kg/m³ ile 1523 kg/m³ arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 1734 kg/m³ ile 1635 kg/m³ arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça buna bağlı olarak birim ağırlığın da arttığı görülmüştür. 105 °C derecedeki etüde, 48 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette, 12 ve 24 saat etüde kür uygulanan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerlerinden daha düşüktür. 105 °C derecedeki etüde 48 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin, bu numunelerin sıcaklık etkisine daha uzun süre maruz kalmasından dolayı, 105 °C derecedeki etüde 12 ve 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerlerinden daha düşük

olduğu görülmüştür. Bunun nedeni 48 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı daha fazla terk etmesidir. Bu grupta en düşük sertleşmiş birim ağırlık değeri yine kontrol hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek sertleşmiş birim ağırlık değeri ise en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinde görülmüştür.



Şekil 7.4. 48 saat etüvde kür uygulanan numunelerin birim ağırlık değerleri

7.2.2 Ultrases geçiş hızı

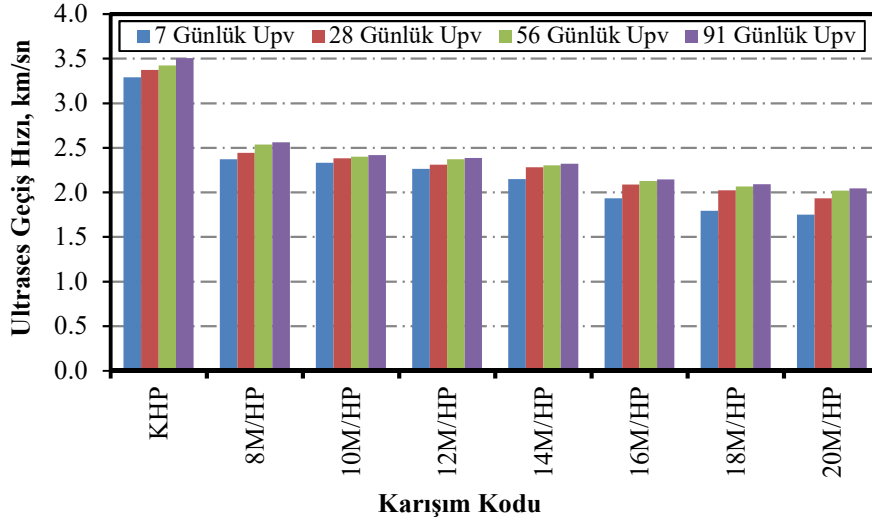
Sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu hafif harçların 4 farklı kür koşulu için de 7, 28, 56 ve 91 günlük ultrases geçiş hızı (U_{pv}) değerleri ASTM C 597 (2009) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Tüm hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri Çizelge 7.3 ve Şekil 7.5, 7.6, 7.7 ve 7.8'de verilmiştir. Bu çizelge ve şekillerden de görüldüğü gibi kür günleri arttıkça hafif harçların U_{pv} değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu artışın nedeni zamanla hafif harç numunelerinde, hidrasyon olayının devam etmesi ve bu hidrasyon ürünleri ile harç numuneleri içerisinde bulunan boşlukların dolmasıdır.

Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri Çizelge 7.3 ve Şekil 7.5'te verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harçların U_{pv} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların U_{pv} değerlerinden daha yüksektir. Dahası

yüksek fırın cürüflü hafif harçların bağlanması için kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların U_{pv} değerlerinin düştüğü görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri yaklaşık olarak 3.29 km/sn ile 3.50 km/sn arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri yaklaşık olarak 1.75 km/sn ile 2.56 km/sn arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça, U_{pv} değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu grupta en düşük U_{pv} değeri en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/HP kodlu yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek U_{pv} değeri ise hafif kontrol harç numunelerinde görülmüştür.

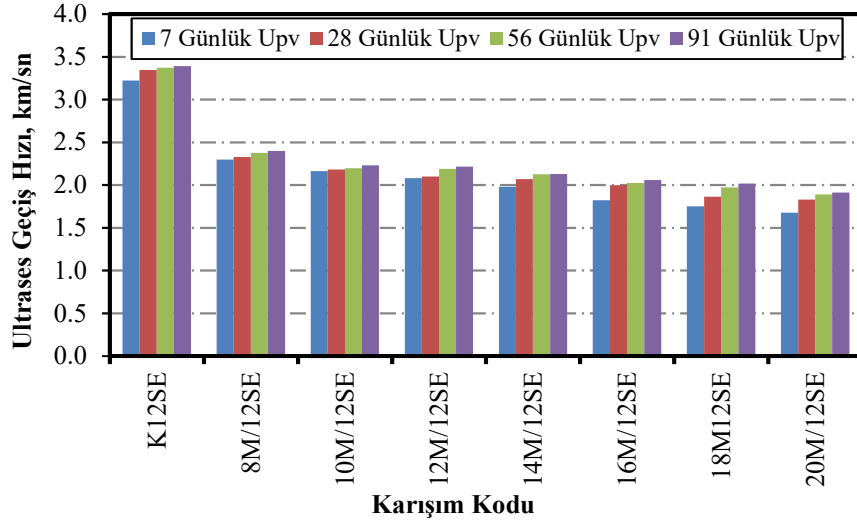
Çizelge 7.3. Harç karışımlarının ultrases geçiş hızı değerleri

	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)			
	7 Günlük	28 Günlük	56 Günlük	91 Günlük
K/HP	3.29	3.37	3.42	3.50
8M/HP	2.37	2.44	2.53	2.56
10M/HP	2.33	2.38	2.40	2.42
12M/HP	2.26	2.31	2.37	2.39
14M/HP	2.15	2.28	2.30	2.32
16M/HP	1.93	2.09	2.13	2.14
18M/HP	1.79	2.02	2.07	2.09
20M/HP	1.75	1.93	2.02	2.04
K/12SE	3.22	3.35	3.37	3.39
8M/12SE	2.30	2.33	2.37	2.40
10M/12SE	2.16	2.18	2.19	2.23
12M/12SE	2.08	2.10	2.19	2.21
14M/12SE	1.98	2.07	2.13	2.13
16M/12SE	1.82	2.00	2.03	2.06
18M/12SE	1.75	1.86	1.97	2.02
20M/12SE	1.68	1.83	1.89	1.91
K/24SE	3.20	3.28	3.30	3.35
8M/24SE	2.08	2.10	2.16	2.18
10M/24SE	1.96	1.99	2.09	2.12
12M/24SE	1.86	1.92	1.98	2.01
14M/24SE	1.70	1.77	1.82	1.94
16M/24SE	1.57	1.66	1.71	1.84
18M/24SE	1.51	1.70	1.74	1.79
20M/24SE	1.48	1.65	1.72	1.75
K/48SE	3.17	3.23	3.24	3.26
8M/48SE	1.98	2.03	2.09	2.11
10M/48SE	1.94	1.97	2.03	2.05
12M/48SE	1.78	1.85	1.89	1.92
14M/48SE	1.64	1.67	1.73	1.75
16M/48SE	1.53	1.58	1.64	1.72
18M/48SE	1.48	1.57	1.59	1.61
20M/48SE	1.46	1.53	1.56	1.59



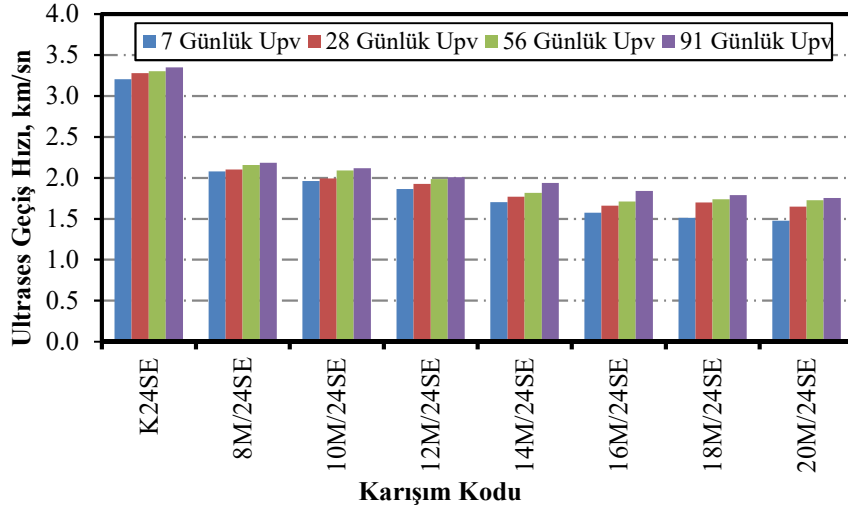
Şekil 7.5. Havada poşette kür uygulamasında U_{pv} değerleri

12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait U_{pv} değerleri Çizelge 7.3 ve Şekil 7.6’da verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harçların U_{pv} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürüflü hafif harçların U_{pv} değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürüflü hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların U_{pv} değerlerinin düştüğü görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri yaklaşık olarak 3.22 km/sn ile 3.39 km/sn arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri yaklaşık olarak 1.68 km/sn ile 2.40 km/sn arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça, buna bağlı olarak U_{pv} değerlerinin düştüğü görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 12 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerlerinden daha düşüktür. Bunun nedeni 12 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı terk etmesidir. Bu terk etme sonucun da ortamda boşluklu bir yapı oluşmaktadır. Bu grupta en düşük U_{pv} değeri en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/12 SE kodlu yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek U_{pv} değeri ise kontrol hafif harç numunelerinde görülmüştür.



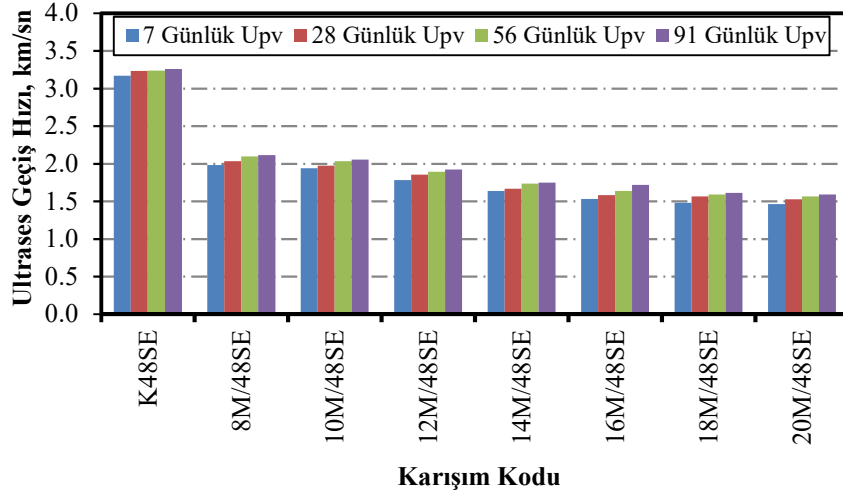
Şekil 7.6. 12 saat 105 °C etüvde kür uygulamasında U_{pv} değerleri

24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait U_{pv} değerleri Çizelge 7.3 ve Şekil 7.7’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların U_{pv} değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların U_{pv} değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri yaklaşık olarak 3.20 km/sn ile 3.35 km/sn arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri yaklaşık olarak 1.48 km/sn ile 2.18 km/sn arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça buna bağlı olarak U_{pv} değerlerinin azaldığı görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette ve 12 saat etüvde kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerlerinden daha düşüktür. 105 °C derecedeki etüvde 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerlerinin, bu numunelerin sıcaklık etkisine daha uzun süre maruz kalmasından dolayı, 105 °C derecedeki etüvde 12 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni 24 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı daha fazla terk etmesidir. Bunun sonucun da boşluklu bir yapının oluşmasıdır. Bu grupta en düşük U_{pv} değeri yine en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/24 SE kodlu yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek U_{pv} değeri ise kontrol hafif harç numunelerinde görülmüştür.



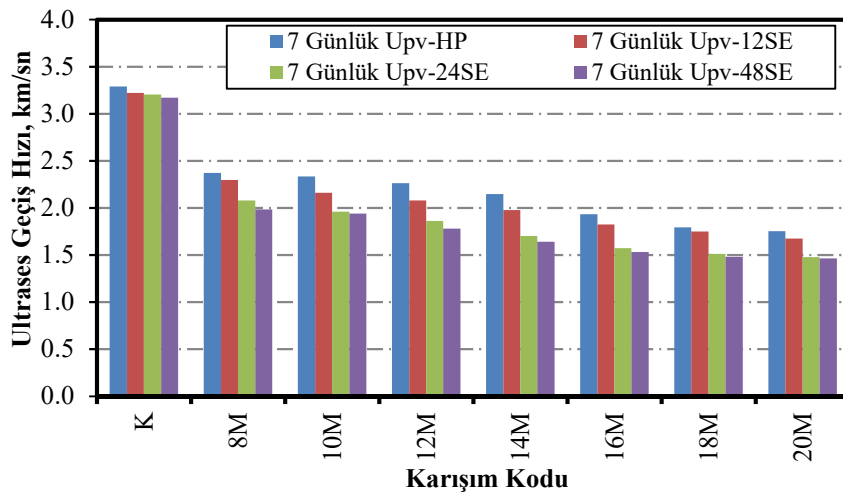
Şekil 7.7. 24 saat 105 °C etüvde kür uygulamasında U_{pv} değerleri

48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait U_{pv} değerleri Çizelge 7.3 ve Şekil 7.8’te verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen kontrol hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürüflü hafif harçların U_{pv} değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürüflü hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların U_{pv} değerlerinin düştüğü görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri yaklaşık olarak 3.17 km/sn ile 3.26 km/sn arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri yaklaşık olarak 1.46 km/sn ile 2.11 km/sn arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça buna bağlı olarak U_{pv} değerlerinin azaldığı görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 48 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette, 12 ve 24 saat etüvde kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerlerinden daha düşüktür. 105 °C derecedeki etüvde 48 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerlerinin, bu numunelerin sıcaklık etkisine daha uzun süre maruz kalmasından dolayı, 105 °C derecedeki etüvde 12 ve 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin U_{pv} değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni 48 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı daha fazla terk etmesidir. Bu grupta en düşük U_{pv} değeri yine en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/48 SE kodlu yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek U_{pv} değeri ise kontrol hafif harç numunelerinde görülmüştür.

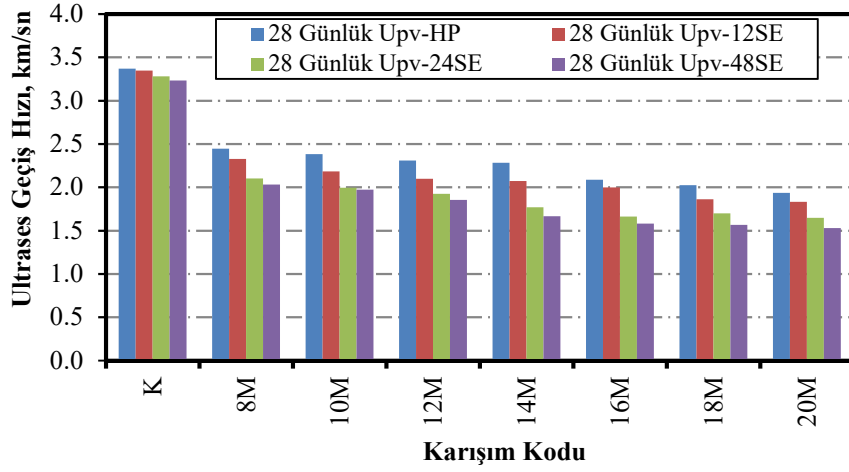


Şekil 7.8. 48 saat 105 °C etüvde kür uygulamasında U_{pv} değerleri

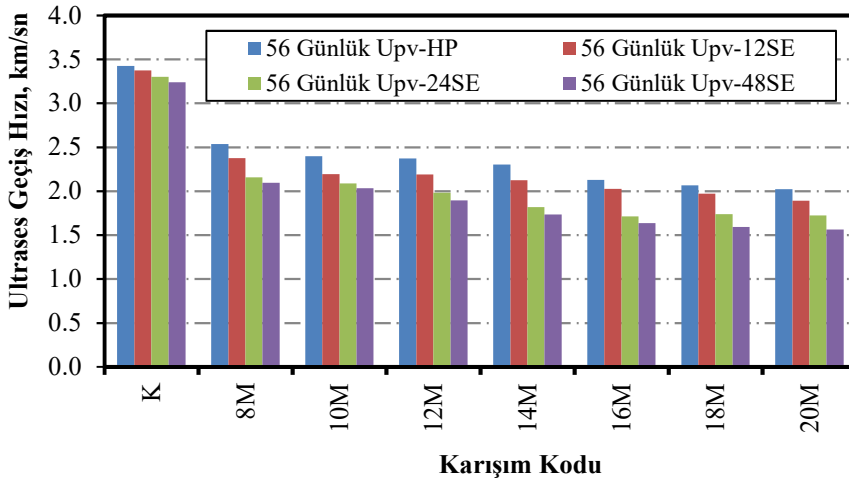
Tüm farklı kür koşullarına göre hafif harç numunelerinin 7, 28, 56 ve 91 günlük U_{pv} değerleri Şekil 7.9, 7.10, 7.11 ve 7.12’de verilmiştir. Tüm farklı kür koşullarında, kontrol hafif harç numunesinin U_{pv} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin U_{pv} değerlerinden daha yüksektir. Tüm hafif harç numunelerinin 105 °C’lik etüvde kalma süresi ve alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça U_{pv} değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kür koşullarına göre U_{pv} değerlerindeki azalmanın nedeni, numunelerin içerisindeki suyun kaybolması ve daha gözenekli bir yapı oluşmasıdır.



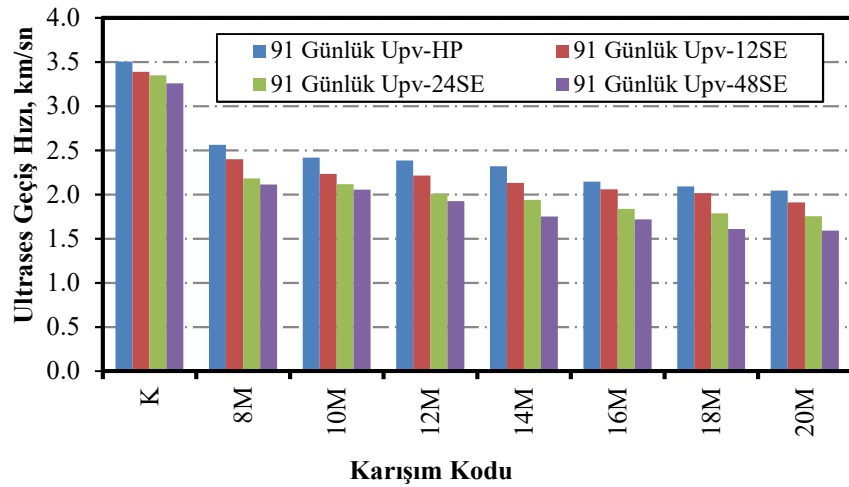
Şekil 7.9. 7 günlük U_{pv} değerleri



Şekil 7.10. 28 günlük U_{pv} değerleri



Şekil 7.11. 56 günlük U_{pv} değerleri



Şekil 7.12. 91 günlük U_{pv} değerleri

Pratikte normal harç ve betonlar, U_{pv} değerlerine göre Çizelge 7.4'deki gibi değerlendirilir. Çizelge 7.4'e göre, bu çalışmada üretilen ve farklı kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri "şüpheli", alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin bir kısmı "zayıf" ve bir kısmı "çok zayıf" arasında değişen kaliteye sahip olduğu söylenebilir. Ancak bu çizelgede verilen değerlendirme hafif harç ve betonlar için değil, normal harç ve betonlar için yapılan bir değerlendirmedir.

Çizelge 7.4. U_{pv} ile beton kalitesinin değerlendirilmesi (Erdoğan, 2003)

U_{pv} (km / sn)	Beton Kalitesi
>4.5	Mükemmel
4.5-3.5	İyi
3.5-3.0	Şüpheli
3.0-2.0	Zayıf
<2.0	Çok Zayıf

7.2.3 Eğilme dayanımı

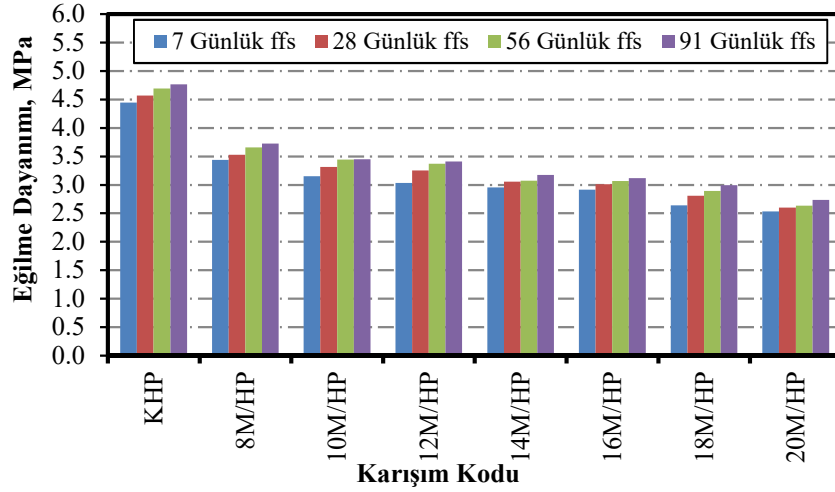
Sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu hafif harçların 4 farklı kür koşulu için de 7, 28, 56 ve 91 günlük eğilme dayanımı (f_{fs}) değerleri TS EN 196-1 (2016) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Tüm hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri Çizelge 7.5 ve Şekil 7.13, 7.14, 7.15 ve 7.16'da verilmiştir. Bu çizelge ve şekillerden de görüldüğü gibi kür günleri arttıkça hafif harçların f_{fs} değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu artışın nedeni zamanla hafif harç numunelerinde, hidrasyon olayının devam etmesi ve bu hidrasyon ürünleri ile harç numuneleri içerisinde bulunan boşlukların dolmasıdır.

Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri Çizelge 7.5 ve Şekil 7.13'te verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harçların f_{fs} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların f_{fs} değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların f_{fs} değerlerinin düştüğü görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri yaklaşık olarak 4.45 MPa ile 4.77 MPa arasında

değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri yaklaşık olarak 2.53 MPa ile 3.73 MPa arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça, f_{fs} değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu grupta en düşük f_{fs} değeri en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/HP kodlu yüksek fırın cürufu hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek f_{fs} değeri ise hafif kontrol harç numunelerinde görülmüştür.

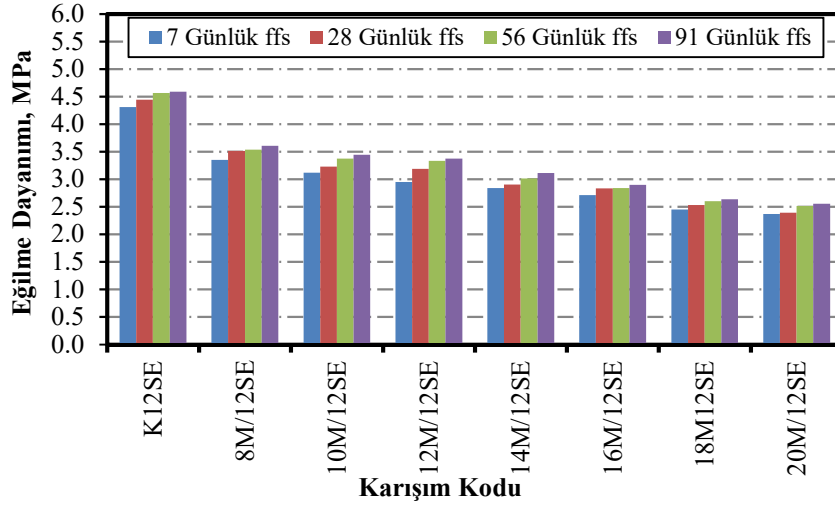
Çizelge 7.5. Harç karışımlarının eğilme dayanımı değerleri

	Eğilme Dayanımı (MPa)			
	7 Günlük	28 Günlük	56 Günlük	91 Günlük
K/HP	4.45	4.57	4.69	4.77
8M/HP	3.44	3.53	3.66	3.73
10M/HP	3.15	3.31	3.44	3.45
12M/HP	3.03	3.25	3.37	3.41
14M/HP	2.96	3.06	3.07	3.17
16M/HP	2.92	3.01	3.07	3.12
18M/HP	2.64	2.81	2.89	2.99
20M/HP	2.53	2.60	2.63	2.74
K/12SE	4.31	4.44	4.57	4.59
8M/12SE	3.35	3.51	3.54	3.61
10M/12SE	3.12	3.23	3.38	3.44
12M/12SE	2.95	3.19	3.34	3.38
14M/12SE	2.84	2.90	3.02	3.11
16M/12SE	2.71	2.83	2.84	2.90
18M/12SE	2.45	2.53	2.60	2.64
20M/12SE	2.37	2.39	2.52	2.56
K/24SE	4.30	4.38	4.48	4.54
8M/24SE	3.29	3.34	3.44	3.55
10M/24SE	3.08	3.14	3.28	3.35
12M/24SE	2.90	3.03	3.16	3.24
14M/24SE	2.76	2.79	3.05	3.06
16M/24SE	2.48	2.68	2.80	2.83
18M/24SE	2.32	2.43	2.50	2.57
20M/24SE	2.22	2.32	2.42	2.49
K/48SE	4.28	4.36	4.43	4.44
8M/48SE	3.12	3.30	3.39	3.40
10M/48SE	2.95	3.06	3.11	3.16
12M/48SE	2.89	2.97	3.07	3.11
14M/48SE	2.66	2.71	2.82	2.84
16M/48SE	2.38	2.44	2.47	2.51
18M/48SE	2.11	2.37	2.39	2.42
20M/48SE	2.13	2.20	2.24	2.32



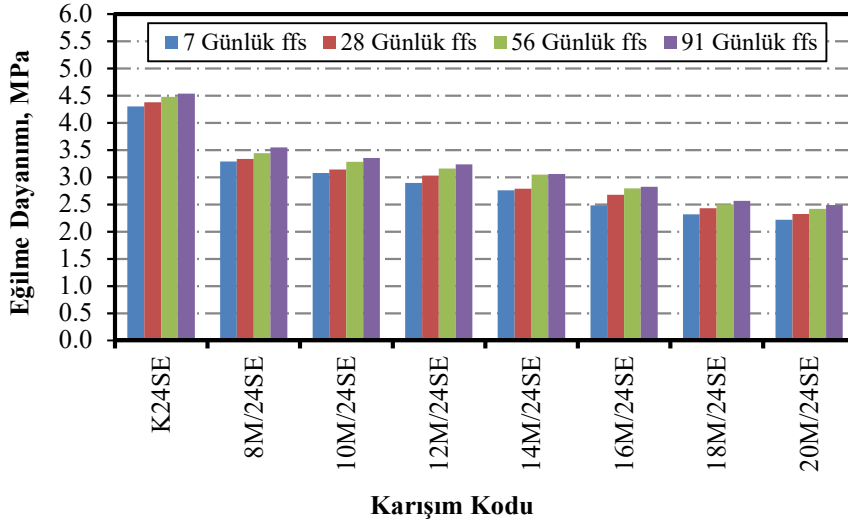
Şekil 7.13. Havada-poşette kür koşulu için f_{fs} değerleri

12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait f_{fs} değerleri Çizelge 7.5 ve Şekil 7.14’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harçların f_{fs} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların f_{fs} değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların f_{fs} değerlerinin düştüğü görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri yaklaşık olarak 4.31 MPa ile 4.59 MPa arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri yaklaşık olarak 2.37 MPa ile 3.61 MPa arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça, buna bağlı olarak f_{fs} değerlerinin düştüğü görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 12 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerlerinden daha düşüktür. Bunun nedeni 12 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı terk etmesidir. Bu terk etme sonucunda ortamda boşluklu bir yapı oluşmaktadır. Bu grupta en düşük f_{fs} değeri en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/12 SE kodlu yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek f_{fs} değeri ise kontrol hafif harç numunelerinde görülmüştür.



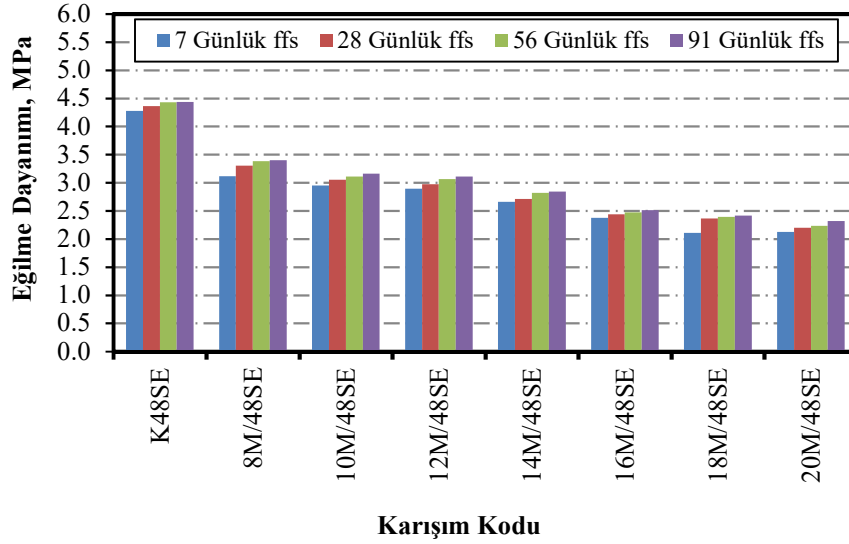
Şekil 7.14. 12 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_{fs} değerleri

24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait f_{fs} değerleri Çizelge 7.5 ve Şekil 7.15’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufu hafif harçların f_{fs} değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürufu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların f_{fs} değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri yaklaşık olarak 4.30 MPa ile 4.54 MPa arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri yaklaşık olarak 2.22 MPa ile 3.55 MPa arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça buna bağlı olarak f_{fs} değerlerinin azaldığı görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette ve 12 saat etüvde kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerlerinden daha düşüktür. 105 °C derecedeki etüvde 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerlerinin, bu numunelerin sıcaklık etkisine daha uzun süre maruz kalmasından dolayı, 105 °C derecedeki etüvde 12 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni 24 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı daha fazla terk etmesidir. Bunun sonucu da boşluklu bir yapının oluşmasıdır. Bu grupta en düşük f_{fs} değeri yine en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/24 SE kodlu yüksek fırın cürufu hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek f_{fs} değeri ise kontrol hafif harç numunelerinde görülmüştür.



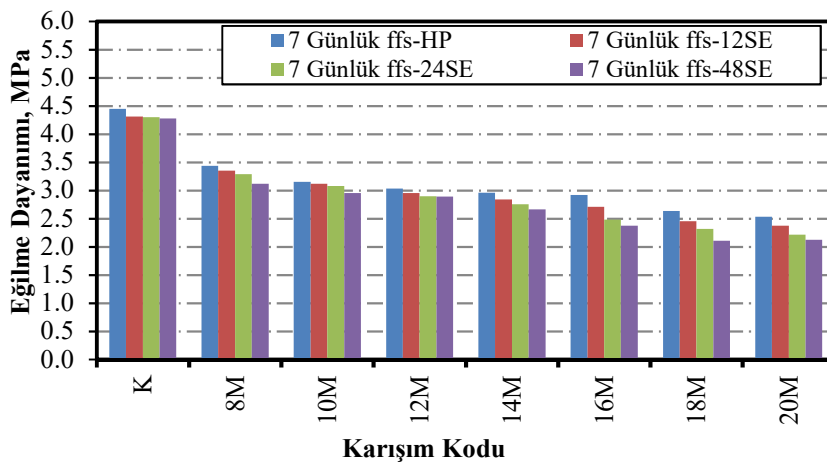
Şekil 7.15. 24 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_{fs} değerleri

48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait f_{fs} değerleri Çizelge 7.5 ve Şekil 7.16’te verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen kontrol hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların f_{fs} değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların f_{fs} değerlerinin düştüğü görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri yaklaşık olarak 4.28 MPa ile 4.44 MPa arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri yaklaşık olarak 2.11 MPa ile 3.40 MPa arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça buna bağlı olarak f_{fs} değerlerinin azaldığı görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 48 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette, 12 ve 24 saat etüvde kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerlerinden daha düşüktür. 105 °C derecedeki etüvde 48 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerlerinin, bu numunelerin sıcaklık etkisine daha uzun süre maruz kalmasından dolayı, 105 °C derecedeki etüvde 12 ve 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_{fs} değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni 48 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı daha fazla terk etmesidir. Bu grupta en düşük f_{fs} değeri yine en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/48 SE kodlu yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek f_{fs} değeri ise kontrol hafif harç numunelerinde görülmüştür.

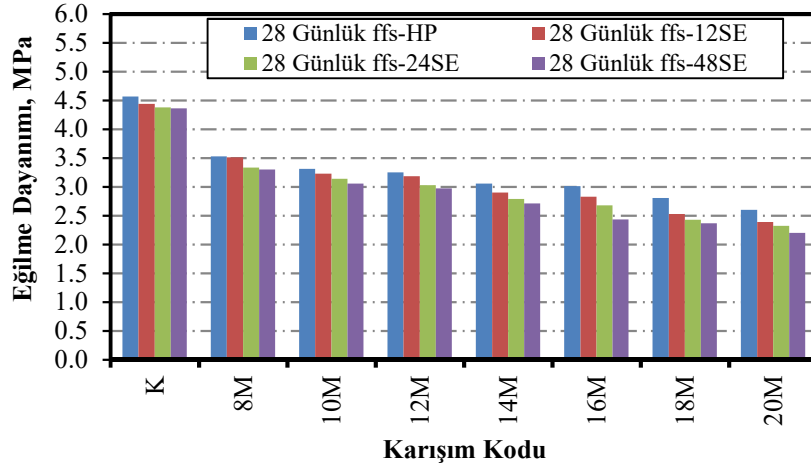


Şekil 7.16. 48 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_{fs} değerleri

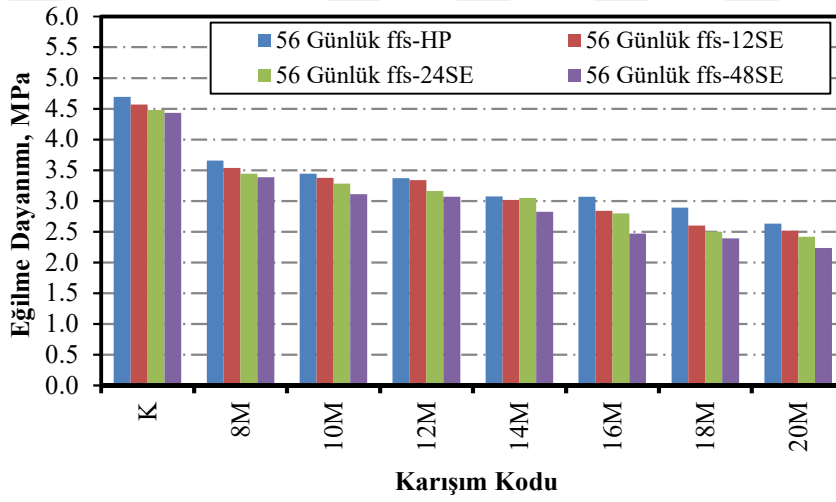
Tüm farklı kür koşullarına göre hafif harç numunelerinin 7, 28, 56 ve 91 günlük f_{fs} değerleri Şekil 7.17, 7.18, 7.19 ve 7.20’de verilmiştir. Tüm farklı kür koşullarında, kontrol hafif harç numunesinin f_{fs} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan ögütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_{fs} değerlerinden daha yüksektir. Tüm hafif harç numunelerinin 105 °C’lik etüvde kalma süresi ve alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça f_{fs} değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kür koşullarına göre f_{fs} değerlerindeki azalmanın nedeni, numunelerin içerisindeki suyun kaybolması ve daha gözenekli bir yapı oluşmasıdır.



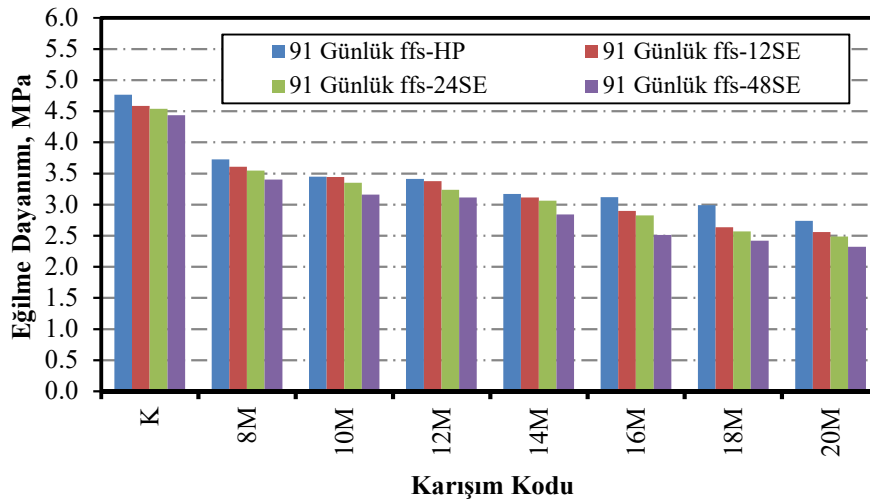
Şekil 7.17. 7 Günlük f_{fs} değerleri



Şekil 7.18. 28 Günlük f_{cs} değerleri



Şekil 7.19. 56 Günlük f_{cs} değerleri

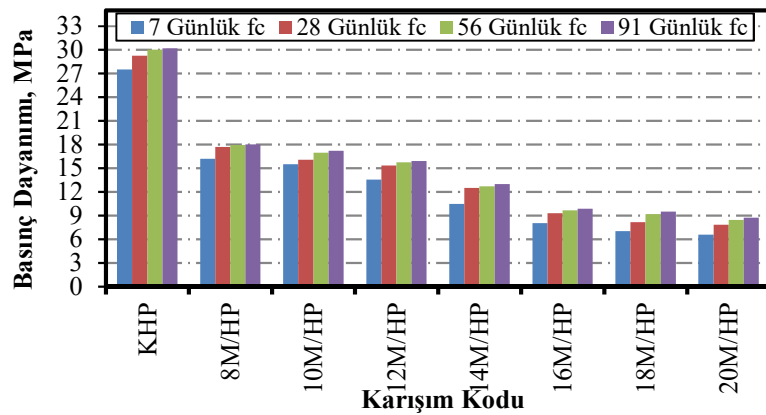


Şekil 7.20. 91 Günlük f_{cs} değerleri

7.2.4 Basınç dayanımı

Sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu hafif harçların 4 farklı kür koşulu için de 7, 28, 56 ve 91 günlük basınç dayanımı (f_c) değerleri TS EN 196-1 (2016) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Tüm hafif harç numunelerinin f_c değerleri Çizelge 7.6 ve Şekil 7.21, 7.22, 7.23 ve 7.24’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekillerden de görüldüğü gibi kür günleri arttıkça hafif harçların f_c değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu artışın nedeni zamanla hafif harç numunelerinde, hidrasyon olayının devam etmesi ve bu hidrasyon ürünleri ile harç numuneleri içerisinde bulunan boşlukların dolmasıdır.

Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerleri Çizelge 7.6 ve Şekil 7.21’te verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harçların f_c değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların f_c değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların f_c değerlerinin düştüğü görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin f_c değerleri yaklaşık olarak 27.51 MPa ile 30.17 MPa arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_c değerleri yaklaşık olarak 6.56 MPa ile 18.01 MPa arasında değişmiştir. Bu grupta en düşük f_c değeri en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/HP kodlu yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek f_c değeri ise hafif kontrol harç numunelerinde görülmüştür.



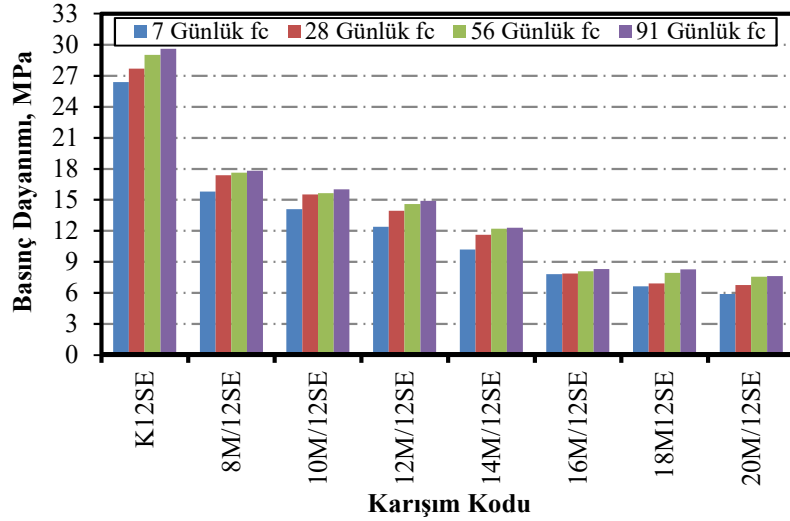
Şekil 7.21. Havada-poşette kür koşulu için f_c değerleri

Çizelge 7.6. Harç karışımlarının basınç dayanımı değerleri

	Basınç Dayanımı (MPa)			
	7 Günlük	28 Günlük	56 Günlük	91 Günlük
K/HP	27.51	29.24	30.02	30.17
8M/HP	16.20	17.67	17.92	18.01
10M/HP	15.49	16.08	16.97	17.21
12M/HP	13.53	15.34	15.74	15.92
14M/HP	10.45	12.48	12.68	12.98
16M/HP	8.04	9.27	9.64	9.85
18M/HP	7.01	8.15	9.17	9.51
20M/HP	6.56	7.84	8.45	8.74
K/12SE	26.37	27.68	29.01	29.59
8M/12SE	15.79	17.37	17.60	17.81
10M/12SE	14.08	15.52	15.63	16.01
12M/12SE	12.38	13.92	14.59	14.88
14M/12SE	10.19	11.63	12.20	12.30
16M/12SE	7.82	7.88	8.08	8.30
18M/12SE	6.63	6.91	7.93	8.28
20M/12SE	5.90	6.75	7.56	7.62
K/24SE	25.57	27.08	28.65	28.98
8M/24SE	14.57	16.10	16.39	16.59
10M/24SE	13.75	15.10	15.44	15.47
12M/24SE	11.96	13.19	13.97	14.13
14M/24SE	10.05	11.08	11.77	11.91
16M/24SE	7.38	7.63	7.97	8.20
18M/24SE	6.10	6.76	7.25	7.47
20M/24SE	5.76	5.91	6.31	6.43
K/48SE	25.05	26.31	26.85	27.42
8M/48SE	14.25	15.79	15.86	16.29
10M/48SE	13.47	14.61	15.17	15.24
12M/48SE	11.69	12.85	13.31	13.68
14M/48SE	9.73	10.45	10.74	11.11
16M/48SE	6.78	6.92	7.23	7.47
18M/48SE	5.65	5.95	6.76	6.87
20M/48SE	5.58	5.86	6.23	6.36

12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait f_c değerleri Çizelge 7.6 ve Şekil 7.22’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harçların f_c değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların f_c değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların f_c değerlerinin düştüğü görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin f_c değerleri yaklaşık olarak 26.37 MPa ile 29.59 MPa arasında

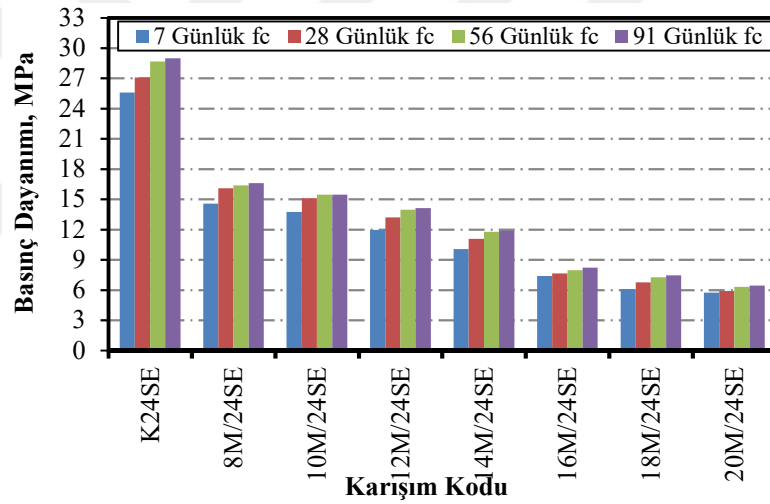
değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_c değerleri yaklaşık olarak 5.9 MPa ile 17.81 MPa arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça, buna bağlı olarak f_c değerlerinin düştüğü görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 12 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerlerinden daha düşüktür. Bunun nedeni 12 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı terk etmesidir. Bu terk etme sonucunun da ortamda boşluklu bir yapı oluşmaktadır. Bu grupta en düşük f_c değeri en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/12 SE kodlu yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek f_c değeri ise kontrol hafif harç numunelerinde görülmüştür.



Şekil 7.22. 12 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_c değerleri

24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait f_c değerleri Çizelge 7.6 ve Şekil 7.23’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen hafif harç numunelerinin f_c değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların f_c değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların f_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin f_c değerleri yaklaşık olarak 25,57 MPa ile 28,98 MPa arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_c değerleri yaklaşık olarak 5.76 MPa ile 16.59 MPa arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça buna bağlı olarak f_c

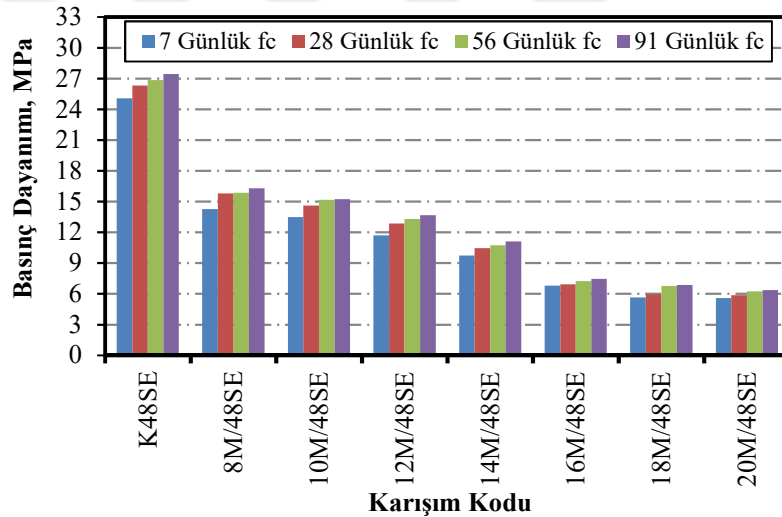
değerlerinin azaldığı görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette ve 12 saat etüvde kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerlerinden daha düşüktür. 105 °C derecedeki etüvde 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerlerinin, bu numunelerin sıcaklık etkisine daha uzun süre maruz kalmasından dolayı, 105 °C derecedeki etüvde 12 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni 24 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı daha fazla terk etmesidir. Bunun sonucu da boşluklu bir yapının oluşmasıdır. Bu grupta en düşük f_c değeri yine en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/24 SE kodlu yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek f_c değeri ise kontrol hafif harç numunelerinde görülmüştür.



Şekil 7.23. 24 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_c değerleri

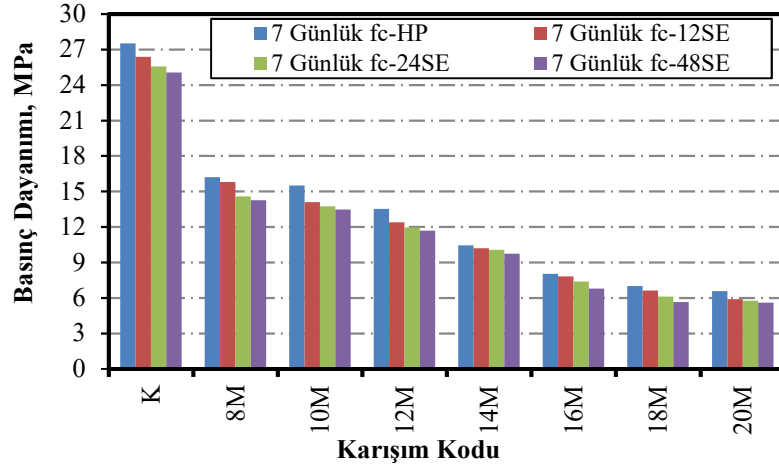
48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan hafif harç numunelerine ait f_c değerleri Çizelge 7.6 ve Şekil 7.24'te verilmiştir. Bu çizelge ve şekilde de görüldüğü gibi sadece çimento ile üretilen kontrol hafif harç numunelerinin f_c değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harçların f_c değerlerinden daha yüksektir. Dahası yüksek fırın cürufllu hafif harçların bağlanmasında kullanılan aktivatör miktarı arttıkça (Na(OH) miktarı arttıkça) hafif harçların f_c değerlerinin düştüğü görülmüştür. Kontrol hafif harç numunelerinin f_c değerleri yaklaşık olarak 25.05 MPa ile 27.42 MPa arasında değişirken, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_c değerleri yaklaşık olarak 5.58 MPa ile 16.29 MPa

arasında değişmiştir. Alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça buna bağlı olarak f_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. 105 °C derecedeki etüvde, 48 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerleri, laboratuvar ortamında havada poşette, 12 ve 24 saat etüvde kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerlerinden daha düşüktür. 105 °C derecedeki etüvde 48 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerlerinin, bu numunelerin sıcaklık etkisine daha uzun süre maruz kalmasından dolayı, 105 °C derecedeki etüvde 12 ve 24 saat kür uygulanan hafif harç numunelerinin f_c değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni 48 saat süresince etüvde kür edilen hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan suyun sıcaklık etkisi ile ortamı daha fazla terk etmesidir. Bu grupta en düşük f_c değeri yine en yüksek Na(OH) içeriğine sahip olan 20M/48 SE kodlu yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinde görülürken, en yüksek f_c değeri ise kontrol hafif harç numunelerinde görülmüştür.

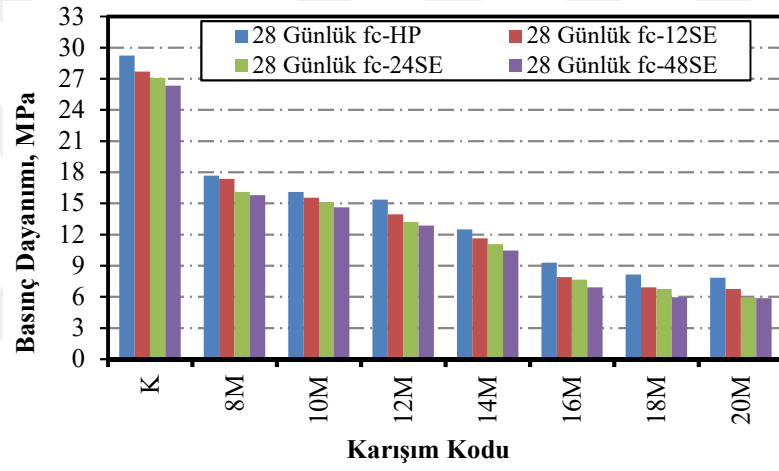


Şekil 7.24. 48 saat 105 °C etüv kür koşulu için f_c değerleri

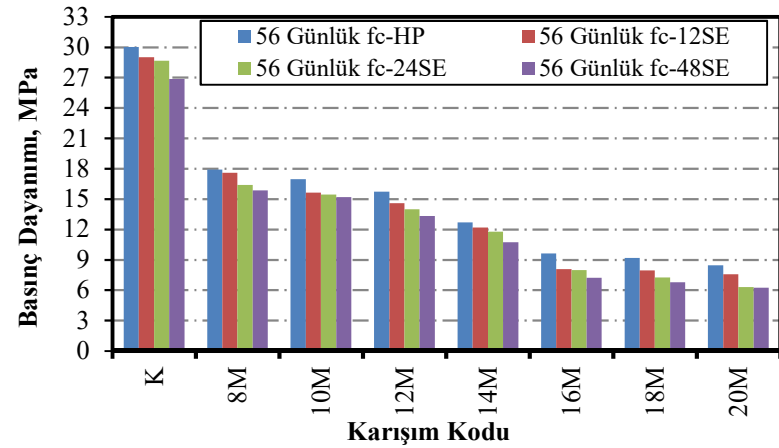
Tüm farklı kür koşullarına göre hafif harç numunelerinin 7, 28, 56 ve 91 günlük f_c değerleri Şekil 7.25, 7.26, 7.27 ve 7.28'de verilmiştir. Tüm farklı kür koşullarında, kontrol hafif harç numunesinin f_c değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin f_c değerlerinden daha yüksektir. Tüm hafif harç numunelerinin 105 °C'lik etüvde kalma süresi ve alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça f_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kür koşullarına göre f_c değerlerindeki azalmanın nedeni, numunelerin içerisindeki suyun kaybolması ve bunun sonucunda daha gözenekli bir yapı oluşmasıdır.



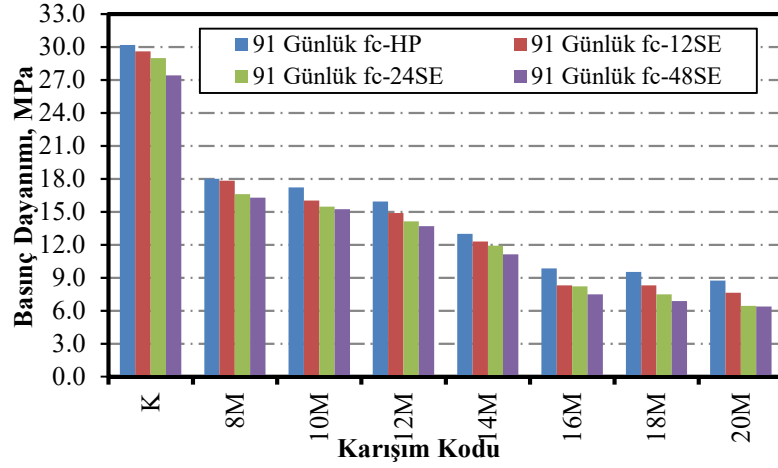
Şekil 7.25. 7 Günlük f_c değerleri



Şekil 7.26. 28 Günlük f_c değerleri



Şekil 7.27. 56 Günlük f_c değerleri



Şekil 7.28. 91 Günlük f_c Değerleri

7.3 Yüksek Sıcaklık Etkisine Dayanıklılık Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

7.3.1 Yangın etkisi altında sertleşmiş birim ağırlık

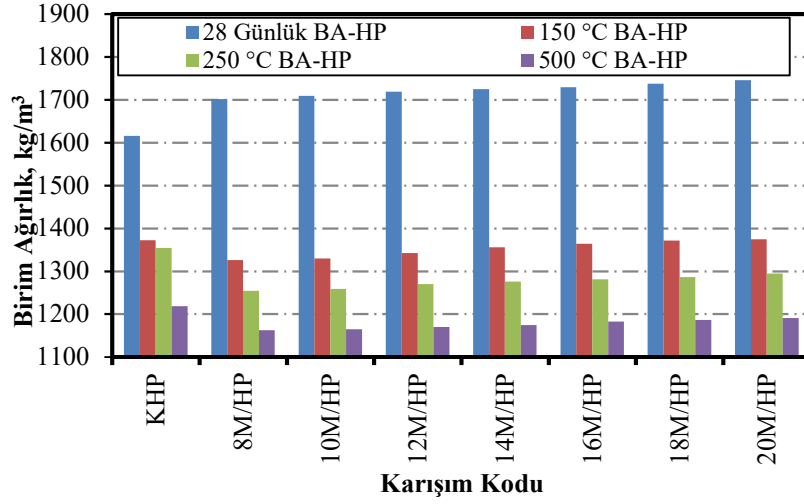
Sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu hafif harçların TS EN 12350-6 (2010) ve ASTM C 138 (1994) standartlarına göre, 4 farklı kür koşulu için de 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisi altındaki 28 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Bu yüksek sıcaklıklara maruz kalan tüm hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri Çizelge 7.7 ve Şekil 7.29, 7.30, 7.31 ve 7.32’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekillerden de görüldüğü gibi numunelerin maruz kaldığı yüksek sıcaklık arttıkça hafif harçların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni yüksek sıcaklık etkisinden dolayı hafif harç numuneleri içerisinde bulunan serbest suyun buharlaşması ve numunelerin daha gözenekli hale gelmesidir.

Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük sertleşmiş birim ağırlık değeri 1616 kg/m³ iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değeri sırasıyla 1372 kg/m³, 1354 kg/m³ ve 1218 kg/m³ olmuştur. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin 28 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri 1702 kg/m³ ile 1746 kg/m³ arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C

sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri sırasıyla 1326 kg/m³ ile 1375 kg/m³, 1254 kg/m³ ile 1295 kg/m³ ve 1163 kg/m³ ile 1191 kg/m³ arasında değişmiştir. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %15, %16 ve %25 azalmıştır. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %22, %26 ve %32 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir.

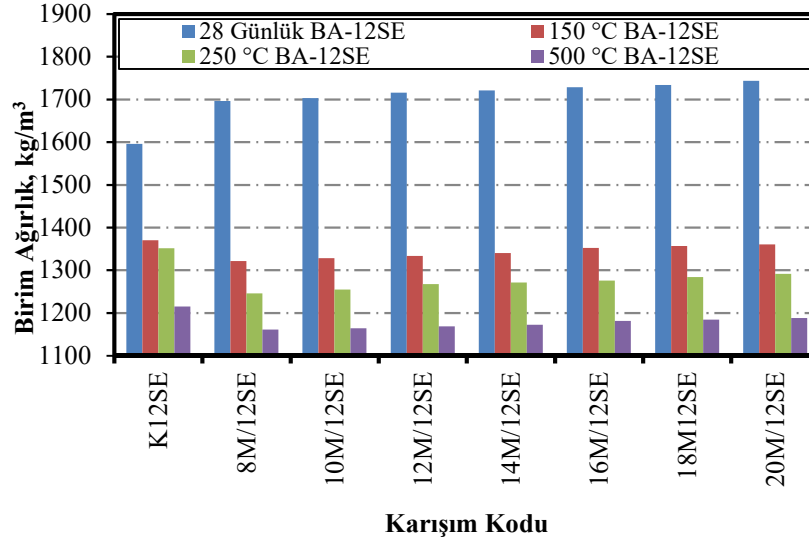
Çizelge 7.7. Harç karışımlarının yangın etkisi altında sertleşmiş birim ağırlık değerleri

Sertleşmiş Birim Ağırlık Değerleri (kg/ m ³)							
Kür Koşulu	Sıcaklık Değerleri			Kür Koşulu	Sıcaklık Değerleri		
	150 °C	250 °C	500 °C		150 °C	250 °C	500 °C
K/HP	1371.88	1353.98	1218.43	K/24SE	1362.97	1348.32	1212.27
8M/HP	1325.98	1254.10	1162.52	8M/24SE	1313.28	1236.76	1156.45
10M/HP	1329.14	1258.67	1164.86	10M/24SE	1322.50	1249.02	1160.20
12M/HP	1342.50	1269.96	1169.79	12M/24SE	1331.76	1259.73	1166.38
14M/HP	1355.47	1275.43	1174.28	14M/24SE	1339.45	1264.96	1170.59
16M/HP	1363.71	1280.70	1182.58	16M/24SE	1347.03	1270.20	1178.38
18M/HP	1371.68	1286.05	1186.16	18M/24SE	1352.93	1276.72	1182.44
20M/HP	1374.61	1294.35	1190.80	20M/24SE	1356.13	1285.20	1185.11
K/12SE	1369.77	1351.52	1214.73	K/48SE	1357.23	1341.48	1209.00
8M/12SE	1321.19	1245.86	1161.17	8M/48SE	1309.73	1221.02	1151.93
10M/12SE	1327.95	1254.30	1164.16	10M/48SE	1319.06	1244.06	1156.06
12M/12SE	1333.20	1267.50	1168.15	12M/48SE	1325.16	1250.59	1164.41
14M/12SE	1340.23	1271.31	1172.38	14M/48SE	1333.87	1258.13	1168.32
16M/12SE	1352.03	1275.82	1181.15	16M/48SE	1338.42	1263.72	1172.23
18M/12SE	1356.29	1283.83	1184.44	18M/48SE	1342.50	1267.89	1179.80
20M/12SE	1360.08	1290.98	1187.88	20M/48SE	1349.77	1281.76	1183.48



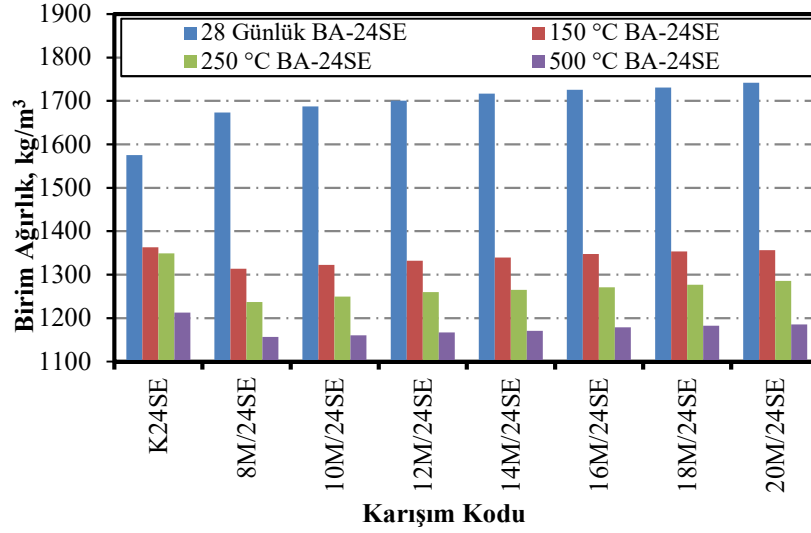
Şekil 7.29. Havada poşette kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında birim ağırlık değerleri

12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük sertleşmiş birim ağırlık değeri 1596 kg/m³ iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değeri sırasıyla 1370 kg/m³, 1351 kg/m³ ve 1215 kg/m³ olmuştur. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin 28 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri 1696 kg/m³ ile 1743 kg/m³ arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri sırasıyla 1321 kg/m³ ile 1360 kg/m³, 1246 kg/m³ ile 1291 kg/m³ ve 1161 kg/m³ ile 1188 kg/m³ arasında değişmiştir. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %14, %15 ve %24 azalmıştır. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %22, %26 ve %32 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numuneleri yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir.



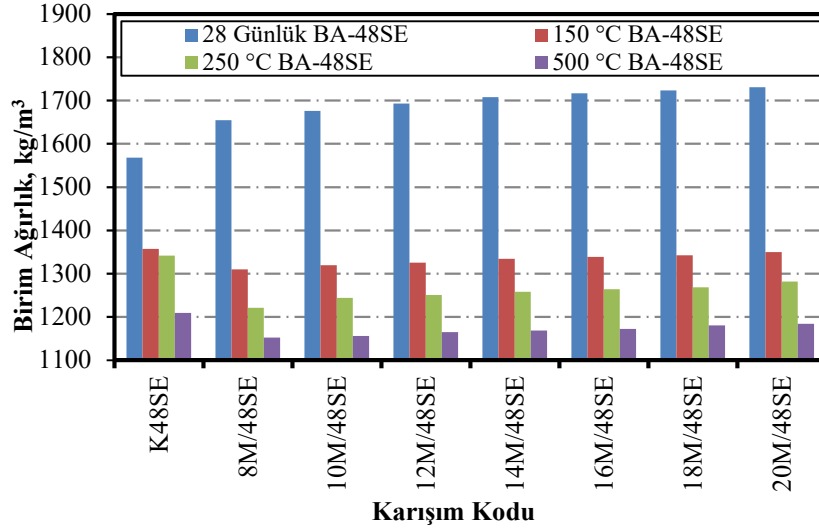
Şekil 7.30. 12 saat etüde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında birim ağırlık değerleri

24 saat süresince 105 °C derecedeki etüde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük sertleşmiş birim ağırlık değeri 1575 kg/m³ iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değeri sırasıyla 1363 kg/m³, 1348 kg/m³ ve 1212 kg/m³ olmuştur. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin 28 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri 1673 kg/m³ ile 1741 kg/m³ arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri sırasıyla 1313 kg/m³ ile 1356 kg/m³, 1237 kg/m³ ile 1285 kg/m³ ve 1156 kg/m³ ile 1185 kg/m³ arasında değişmiştir. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %13, %14 ve %23 azalmıştır. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %22, %26 ve %32 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir.



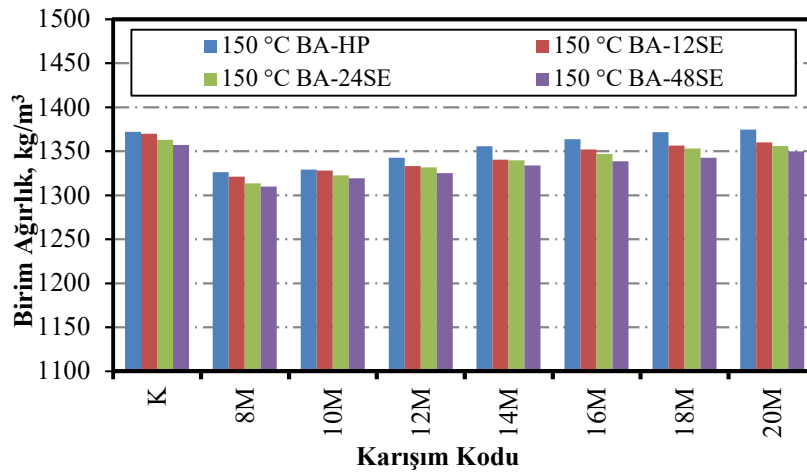
Şekil 7.31. 24 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında birim ağırlık değerleri

48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük sertleşmiş birim ağırlık değeri 1568 kg/m³ iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değeri sırasıyla 1357 kg/m³, 1342 kg/m³ ve 1209 kg/m³ olmuştur. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin 28 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri 1654 kg/m³ ile 1731 kg/m³ arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri sırasıyla 1310 kg/m³ ile 1350 kg/m³, 1221 kg/m³ ile 1282 kg/m³ ve 1152 kg/m³ ile 1183 kg/m³ arasında değişmiştir. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %13, %14 ve %23 azalmıştır. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %22, %26 ve %31 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir.

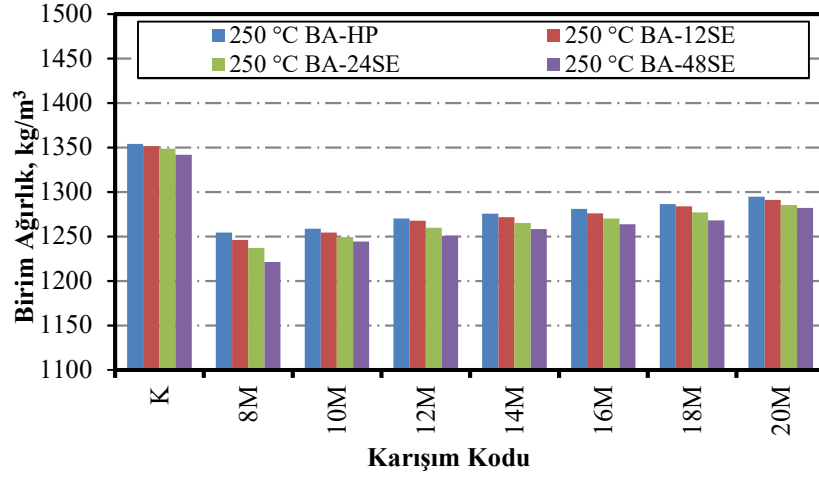


Şekil 7.32. 48 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında birim ağırlık değerleri

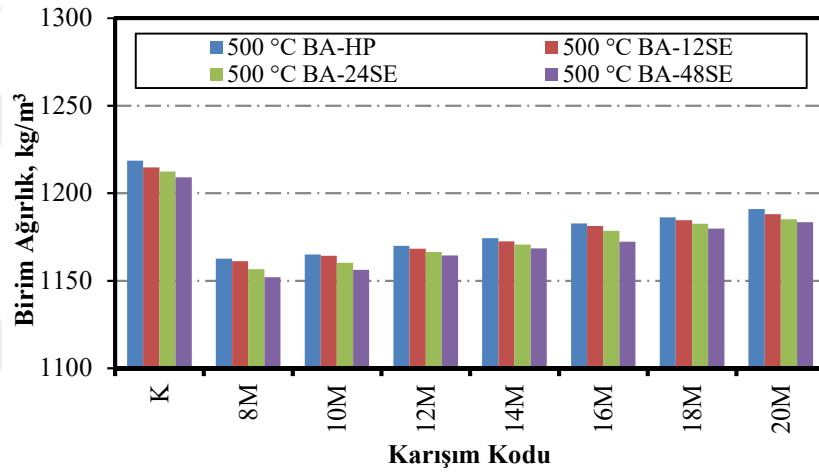
Tüm farklı kür koşullarına göre hafif harç numunelerinin 28 günlük 150 °C 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisi altındaki sertleşmiş birim ağırlık değerleri Şekil 7.33, 7.34 ve 7.35 de verilmiştir. Tüm farklı kür koşullarında, kontrol hafif harç numunesinin birim ağırlık değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin birim ağırlık değerlerinden daha yüksektir. Tüm hafif harç numunelerinin 105 °C'lik etüvde kalma süresi arttıkça birim ağırlık değerlerinin azaldığı ve alkali aktivatör kullanılan numunelerde Na(OH) miktarı arttıkça birim ağırlık değerlerinin arttığı görülmüştür. Kür koşullarına göre birim ağırlık değerlerindeki azalmanın nedeni, numunelerin içerisindeki suyun kaybolması ve bunun sonucunda daha gözenekli bir yapı oluşmasıdır.



Şekil 7.33. 150 °C de numunelerin birim ağırlık değerleri



Şekil 7.34. 250 °C de numunelerin birim ağırlık değerleri



Şekil 7.35. 500 °C de numunelerin birim ağırlık değerleri

7.3.2 Yangın etkisi altında ultrases geçiş hızı

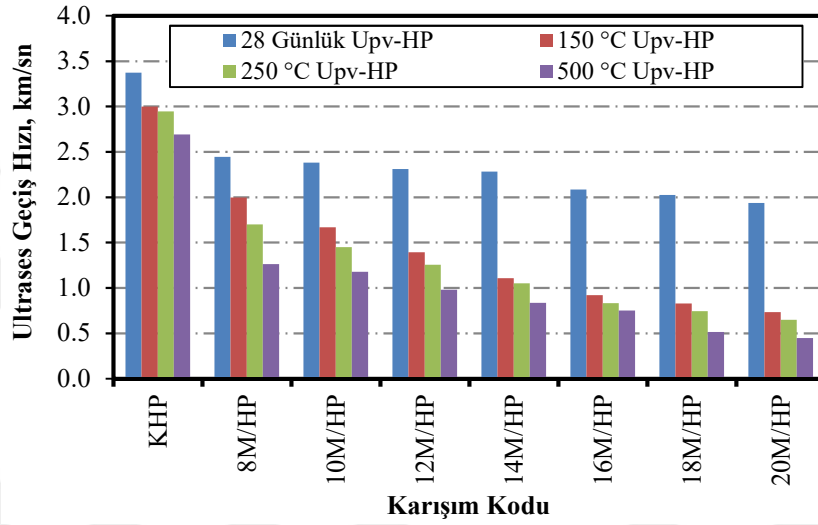
Sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu hafif harçların ASTM C 597 (2009) standardına göre, 4 farklı kür koşulu için de 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisi altındaki 28 günlük U_{pv} değerleri belirlenmiştir. Bu yüksek sıcaklıklara maruz kalan tüm hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri Çizelge 7.8 ve Şekil 7.36, 7.37, 7.38 ve 7.39'da verilmiştir. Bu çizelge ve şekillerden de görüldüğü gibi numunelerin maruz kaldığı yüksek sıcaklık arttıkça hafif harçların U_{pv} değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni yüksek sıcaklık etkisinden dolayı hafif harç numuneleri içerisinde de bulunana serbest suyun buharlaşması ve numunelerin daha gözenekli hale gelmesidir.

Çizelge 7.8. Harç karışımlarının yangın etkisi altında ultrases geçiş hızı değerleri

Ultrases Geçiş Hızı (km / sn)							
Kür Koşulu	Sıcaklık Değerleri			Kür Koşulu	Sıcaklık Değerleri		
	150 °C	250 °C	500 °C		150 °C	250 °C	500 °C
K/HP	3.00	2.95	2.69	K/24SE	2.83	2.63	2.50
8M/HP	2.00	1.70	1.26	8M/24SE	1.79	1.58	1.11
10M/HP	1.67	1.45	1.18	10M/24SE	1.57	1.26	1.00
12M/HP	1.39	1.25	0.98	12M/24SE	1.29	0.92	0.86
14M/HP	1.11	1.05	0.84	14M/24SE	0.94	0.77	0.61
16M/HP	0.92	0.83	0.75	16M/24SE	0.79	0.65	0.59
18M/HP	0.83	0.74	0.51	18M/24SE	0.67	0.56	0.43
20M/HP	0.73	0.65	0.45	20M/24SE	0.56	0.45	0.35
K/12SE	2.98	2.84	2.66	K/48SE	2.65	2.58	2.33
8M/12SE	1.98	1.72	1.17	8M/48SE	1.75	1.52	1.06
10M/12SE	1.66	1.48	1.12	10M/48SE	1.47	1.27	0.90
12M/12SE	1.34	1.11	0.96	12M/48SE	1.19	0.85	0.75
14M/12SE	1.07	0.93	0.75	14M/48SE	0.92	0.74	0.59
16M/12SE	0.83	0.75	0.60	16M/48SE	0.76	0.62	0.48
18M/12SE	0.76	0.64	0.50	18M/48SE	0.63	0.51	0.39
20M/12SE	0.68	0.55	0.43	20M/48SE	0.46	0.35	0.28

Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük U_{pv} değeri 3.37 km/sn iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin U_{pv} değeri sırasıyla 3 km/sn, 2.95 km/sn ve 2.69 km/sn olmuştur. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin 28 günlük U_{pv} değerleri 2.44 km/sn ile 1.93 km/sn arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri sırasıyla 2 km/sn ile 0.73 km/sn, 1.70 km/sn ile 0.65 km/sn ve 1.26 km/sn ile 0.45 km/sn arasında değişmiştir. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, U_{pv} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %11, %13 ve %20 azalmıştır. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü

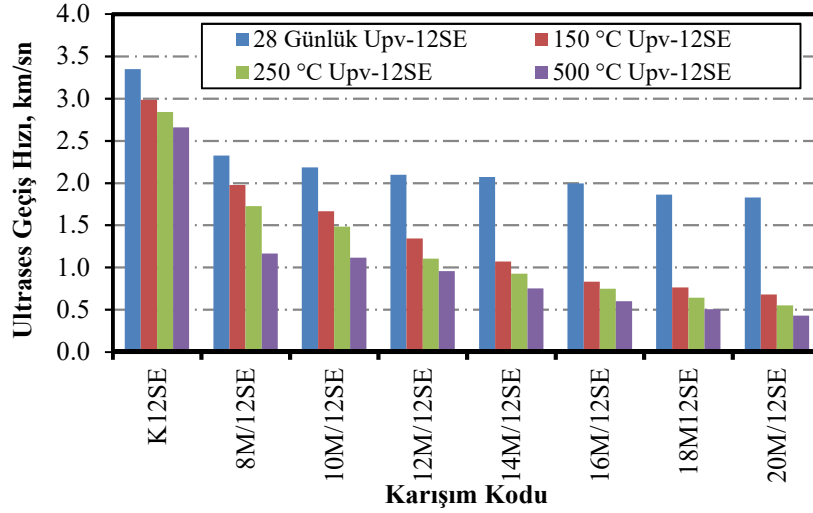
hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, U_{pv} değerleri 8M/ HP numunesinde yaklaşık olarak sırasıyla %18, %31 ve %48, 10M/ HP numunesinde yaklaşık olarak sırasıyla %30, %39 ve %51, 12M/ HP numunesinde yaklaşık olarak sırasıyla %40, %46 ve %58, diğer numunelerde ise ortalama olarak sırasıyla %57, %61 ve %70 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir.



Şekil 7.36. Havada poşette kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında U_{pv} değerleri

12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük U_{pv} değeri 3.35 km/sn iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin U_{pv} değeri sırasıyla 2.98 km/sn, 2.84 km/sn ve 2.66 km/sn olmuştur. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin 28 günlük U_{pv} değerleri 2.33 km/sn ile 1.83 km/sn arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri sırasıyla 1.98 km/sn ile 0.68 km/sn, 1.72 km/sn ile 0.55 km/sn ve 1.17 km/sn ile 0.43 km/sn arasında değişmiştir. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, U_{pv} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %11, %15 ve %21 azalmıştır. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, U_{pv} değerleri 8M/ 12SE numunesinde

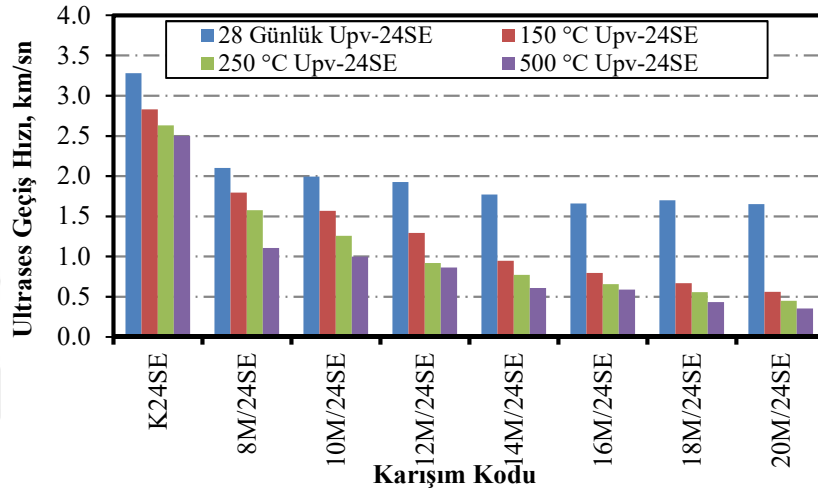
yaklaşık olarak sırasıyla %15, %26 ve %50, 10M/ 12SE numunesinde yaklaşık olarak sırasıyla %24, %32 ve %49, 12M/ 12SE numunesinde yaklaşık olarak sırasıyla %36, %47 ve %54, diğer numunelerde ise ortalama olarak sırasıyla %57, %63 ve %71 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir.



Şekil 7.37. 12 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında U_{pv} değerleri

24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük U_{pv} değeri 3.28 km/sn iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin U_{pv} değeri sırasıyla 2.83 km/sn, 2.63 km/sn ve 2.50 km/sn olmuştur. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin 28 günlük U_{pv} değerleri 2.10 km/sn ile 1.65 km/sn arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri sırasıyla 1.79 km/sn ile 0.56 km/sn, 1.58 km/sn ile 0.45 km/sn ve 1.11 km/sn ile 0.35 km/sn arasında değişmiştir. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, U_{pv} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %14, %20 ve %24 azalmıştır. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, U_{pv} değerleri 8M/ 24SE numunesinde yaklaşık olarak sırasıyla %15, %25 ve %47, 10M/ 24SE numunesinde yaklaşık olarak

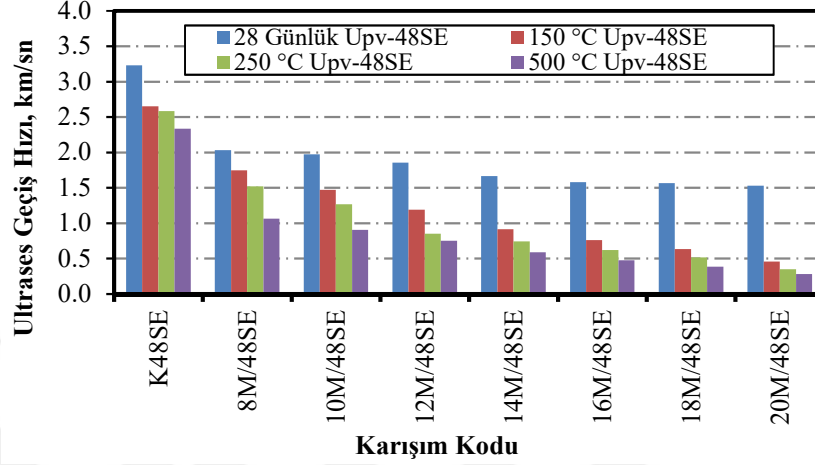
sırasıyla %21, %37 ve %50, 12M/ 24SE numunesinde yaklaşık olarak sırasıyla %33, %52 ve %55, diğer numunelerde ise ortalama olarak sırasıyla %56, %64 ve %71 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir.



Şekil 7.38. 24 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında U_{pv} değerleri

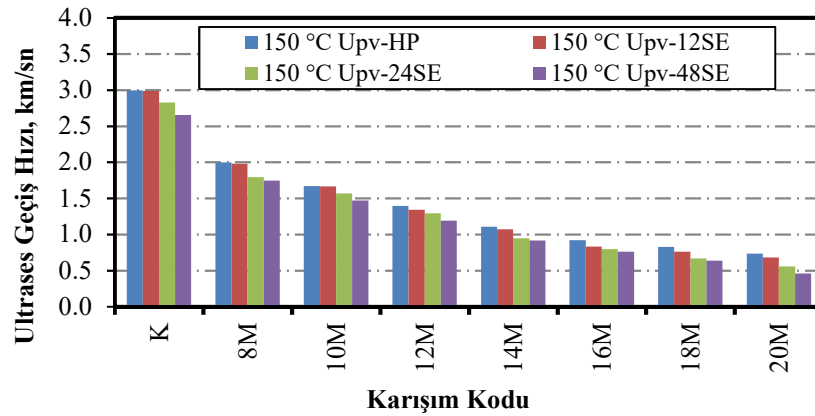
48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük U_{pv} değeri 3.23 km/sn iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin U_{pv} değeri sırasıyla 2.65 km/sn, 2.58 km/sn ve 2.33 km/sn olmuştur. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin 28 günlük U_{pv} değerleri 2.03 km/sn ile 1.53 km/sn arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin U_{pv} değerleri sırasıyla 1.75 km/sn ile 0.46 km/sn, 1.52 km/sn ile 0.35 km/sn ve 1.06 km/sn ile 0.28 km/sn arasında değişmiştir. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, U_{pv} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %18, %20 ve %28 azalmıştır. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, U_{pv} değerleri 8M/ 48SE numunesinde yaklaşık olarak sırasıyla %14, %25 ve %48, 10M/ 48SE numunesinde yaklaşık olarak sırasıyla %26, %36 ve %54, 12M/ 48SE numunesinde yaklaşık olarak sırasıyla %36,

%54 ve %59, diğer numunelerde ise ortalama olarak sırasıyla %57, %65 ve %73 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir.

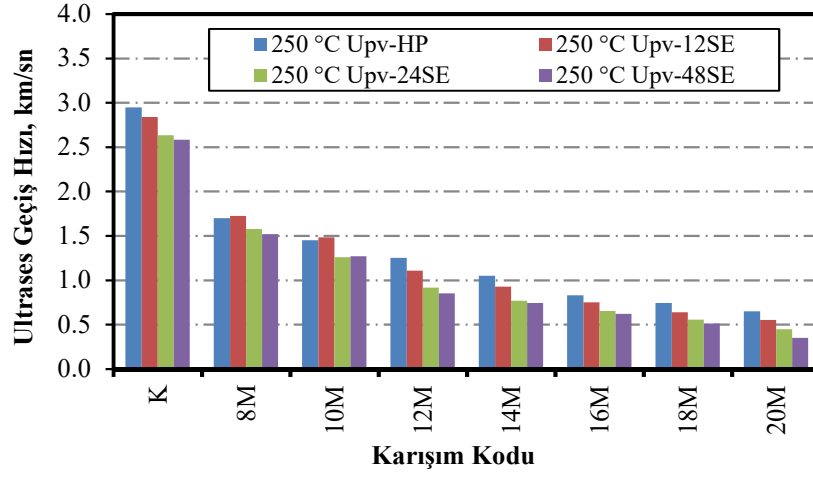


Şekil 7.39. 48 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında U_{pv} değerleri

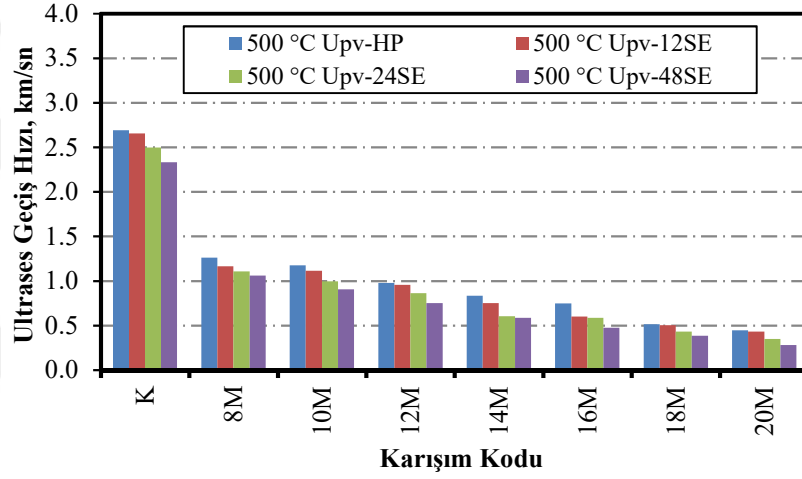
Tüm farklı kür koşullarına göre hafif harç numunelerinin 28 günlük 150 °C 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisi altındaki U_{pv} değerleri Şekil 7.40, 7.41 ve 7.42 de verilmiştir. Tüm farklı kür koşullarında, kontrol hafif harç numunesinin U_{pv} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin U_{pv} değerlerinden daha yüksektir. Tüm hafif harç numunelerinin 105 °C'lik etüvde kalma süresi ve Na(OH) miktarı arttıkça U_{pv} değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kür koşullarına göre ultrases geçiş hızı değerlerindeki azalmanın nedeni, numunelerin içerisindeki suyun kaybolması ve bunun sonucunda daha gözenekli bir yapı oluşmasıdır.



Şekil 7.40. 150 °C de numunelerin U_{pv} değerleri



Şekil 7.41. 250 °C de numunelerin U_{pv} değerleri



Şekil 7.42. 500 °C de numunelerin U_{pv} değerleri

7.3.3 Yangın etkisi altında eğilme dayanımı

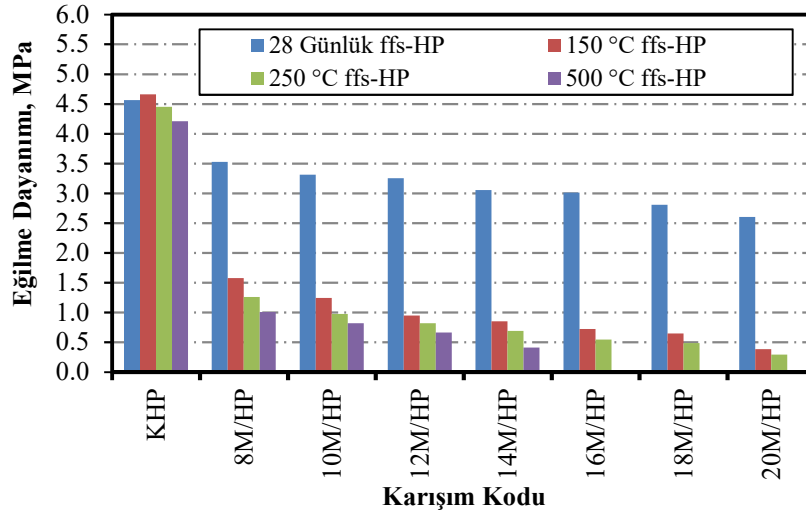
Sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu hafif harçların TS EN 196-1 (2016) standardına göre, 4 farklı kür koşulu için de 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisi altındaki 28 günlük f_{fs} değerleri belirlenmiştir. Bu yüksek sıcaklıklara maruz kalan tüm hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri Çizelge 7.9 ve Şekil 7.43, 7.44, 7.45 ve 7.46'da verilmiştir. Bu çizelge ve şekillerden de görüldüğü gibi numunelerin maruz kaldığı yüksek sıcaklık arttıkça hafif harçların f_{fs} değerlerinin, 150 °C de K/ HP numunesi hariç düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni yüksek sıcaklık etkisinden dolayı hafif harç numuneleri içerisinde bulunan serbest suyun buharlaşması ve numunelerin daha gözenekli hale gelmesidir.

Çizelge 7.9. Harç karışımlarının yangın etkisi altında eğilme dayanım değerleri

Eğilme Dayanımı (MPa)							
Kür Koşulu	Sıcaklık Değerleri			Kür Koşulu	Sıcaklık Değerleri		
	150 °C	250 °C	500 °C		150 °C	250 °C	500 °C
K/HP	4.66	4.45	4.21	K/24SE	3.84	3.29	3.05
8M/HP	1.58	1.26	1.01	8M/24SE	1.28	0.91	0.72
10M/HP	1.25	0.98	0.82	10M/24SE	0.96	0.79	0.66
12M/HP	0.95	0.82	0.67	12M/24SE	0.78	0.71	0.56
14M/HP	0.85	0.69	0.41	14M/24SE	0.70	0.51	0.00
16M/HP	0.72	0.55	0.00	16M/24SE	0.56	0.47	0.00
18M/HP	0.65	0.49	0.00	18M/24SE	0.49	0.31	0.00
20M/HP	0.39	0.30	0.00	20M/24SE	0.24	0.16	0.00
K/12SE	3.92	3.48	3.43	K/48SE	3.68	2.84	2.55
8M/12SE	1.44	1.14	0.91	8M/48SE	1.19	0.82	0.69
10M/12SE	1.19	0.89	0.77	10M/48SE	0.89	0.70	0.47
12M/12SE	0.91	0.72	0.60	12M/48SE	0.71	0.62	0.37
14M/12SE	0.81	0.60	0.32	14M/48SE	0.67	0.43	0.00
16M/12SE	0.59	0.47	0.00	16M/48SE	0.43	0.36	0.00
18M/12SE	0.60	0.37	0.00	18M/48SE	0.32	0.24	0.00
20M/12SE	0.30	0.23	0.00	20M/48SE	0.19	0.13	0.00

Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük f_{fs} değeri 4.57 MPa iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin f_{fs} değeri sırasıyla 4.66 MPa, 4.45 MPa ve 4.21 MPa olmuştur. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin 28 günlük f_{fs} değerleri 3.53 MPa ile 2.60 MPa arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri sırasıyla 1.58 MPa ile 0.39 MPa, 1.26 MPa ile 0.30 MPa ve 1.01 MPa ile 0.00 MPa arasında değişmiştir. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra f_{fs} %2 oranında artmış, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_{fs} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %3 ve %8 azalmıştır. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan tüm alkali ile aktive edilmiş

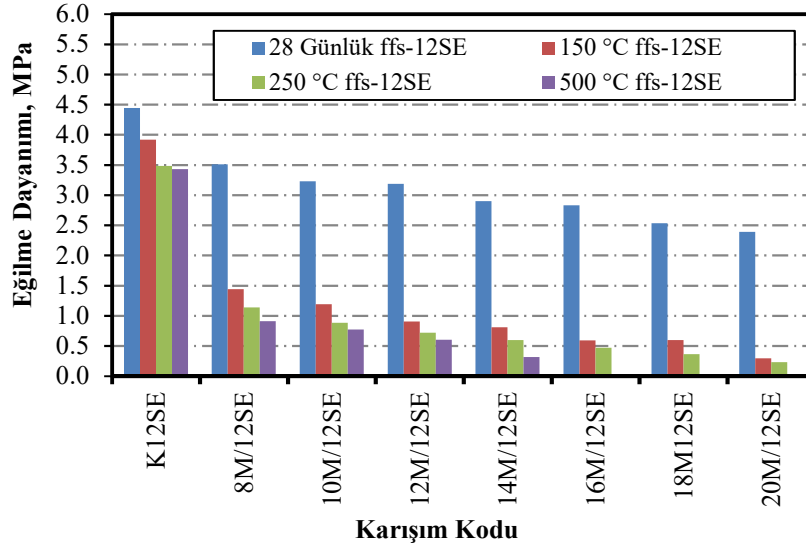
yüksek fırın cürüflü hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_{fs} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %71, %77 ve %78 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numuneleri yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir. 16M/HP, 18M/HP ve 20M/HP numunelerinde 500 °C sıcaklık etkisi sonucu eğilme dayanımı değerleri okunamamıştır.



Şekil 7.43. Havada poşette kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_{fs} değerleri

12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük f_{fs} değeri 4.44 MPa iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin f_{fs} değeri sırasıyla 3.92 MPa, 3.48 MPa ve 3.43 MPa olmuştur. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin 28 günlük f_{fs} değerleri 3.51 MPa ile 2.39 MPa arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri sırasıyla 1.44 MPa ile 0.30 MPa, 1.14 MPa ile 0.23 MPa ve 0.91 MPa ile 0.00 MPa arasında değişmiştir. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_{fs} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %12, %22 ve %33 azalmıştır. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_{fs} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %73, %79 ve

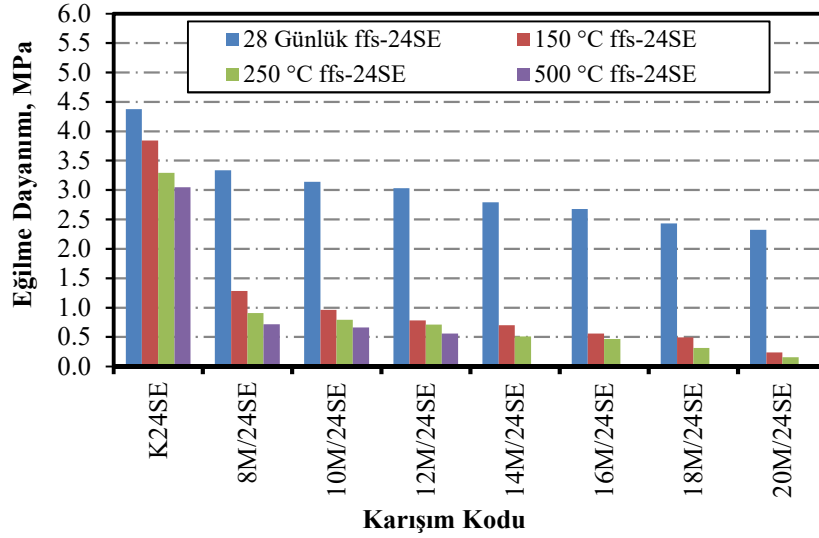
%89 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir. 16M/12SE, 18M/12SE ve 20M/12SE numunelerinde 500 °C sıcaklık etkisi sonucu eğilme dayanımı değerleri okunamamıştır.



Şekil 7.44. 12 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_{fs} değerleri

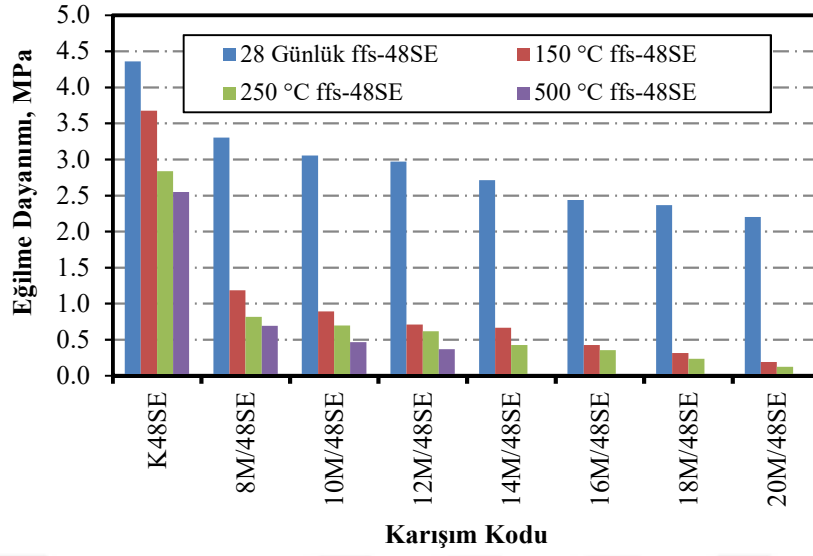
24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük f_{fs} değeri 4.38 MPa iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin f_{fs} değeri sırasıyla 3.84 MPa, 3.29 MPa ve 3.05 MPa olmuştur. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin 28 günlük f_{fs} değerleri 3.34 MPa ile 2.32 MPa arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri sırasıyla 1.28 MPa ile 0.24 MPa, 0.91 MPa ile 0.16 MPa ve 0.72 MPa ile 0.00 MPa arasında değişmiştir. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_{fs} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %12, %22 ve %33 azalmıştır. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_{fs} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %73, %79 ve %89 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numuneleri yüksek sıcaklıklardan

daha fazla olumsuz etkilenmiştir. 14M/24SE, 16M/24SE, 18M/24SE ve 20M/24SE numunelerinde 500 °C sıcaklık etkisi sonucu eğilme dayanımı değerleri okunamamıştır.



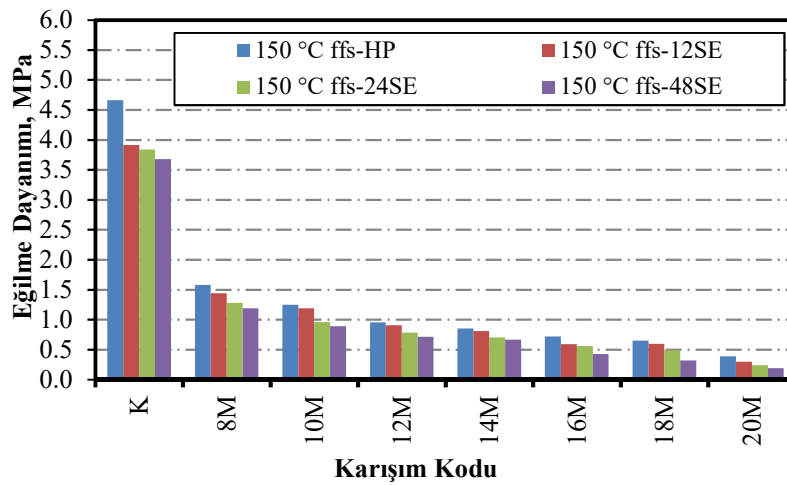
Şekil 7.45. 24 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_{fs} değerleri

48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük f_{fs} değeri 4.36 MPa iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin f_{fs} değeri sırasıyla 3.68 MPa, 2.84 MPa ve 2.55 MPa olmuştur. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin 28 günlük f_{fs} değerleri 3.30 MPa ile 2.20 MPa arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_{fs} değerleri sırasıyla 1.19 MPa ile 0.19 MPa, 0.82 MPa ile 0.13 MPa ve 0.69 MPa ile 0.00 MPa arasında değişmiştir. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_{fs} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %16, %35 ve %42 azalmıştır. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_{fs} değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %78, %84 ve %93 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numuneleri yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenmiştir. 14M/48SE, 16M/48SE, 18M/48SE ve 20M/48SE numunelerinde 500 °C sıcaklık etkisi sonucu eğilme dayanımı değerleri okunamamıştır.

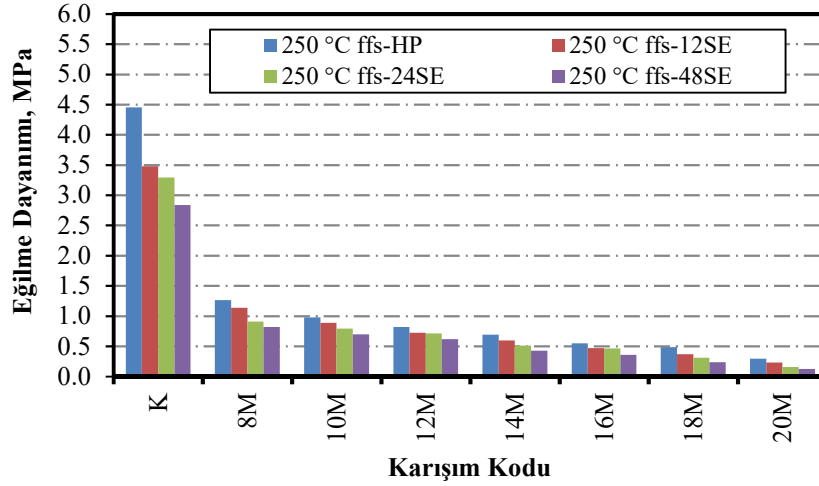


Şekil 7.46. 48 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_{fs} değerleri

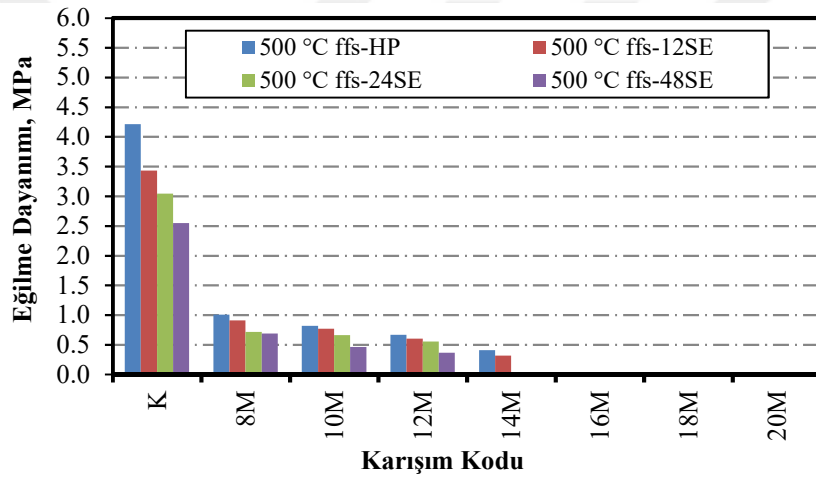
Tüm farklı kür koşullarına göre hafif harç numunelerinin 28 günlük 150 °C 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisi altındaki f_{fs} değerleri Şekil 7.47, 7.48 ve 7.49 da verilmiştir. Tüm farklı kür koşullarında, kontrol hafif harç numunesinin f_{fs} değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_{fs} değerlerinden daha yüksektir. Tüm hafif harç numunelerinin 105 °C'lik etüvde kalma süresi ve Na(OH) miktarı arttıkça f_{fs} değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kür koşullarına göre eğilme dayanımı değerlerindeki azalmanın nedeni, numunelerin içerisindeki suyun kaybolması ve bunun sonucunda daha gözenekli bir yapı oluşmasıdır.



Şekil 7.47. 150 °C de numunelerin f_{fs} değerleri



Şekil 7.48. 250 °C de numunelerin f_{fs} değerleri



Şekil 7.49. 500 °C de numunelerin f_{fs} değerleri

7.3.4 Yangın etkisi altında basınç dayanımı

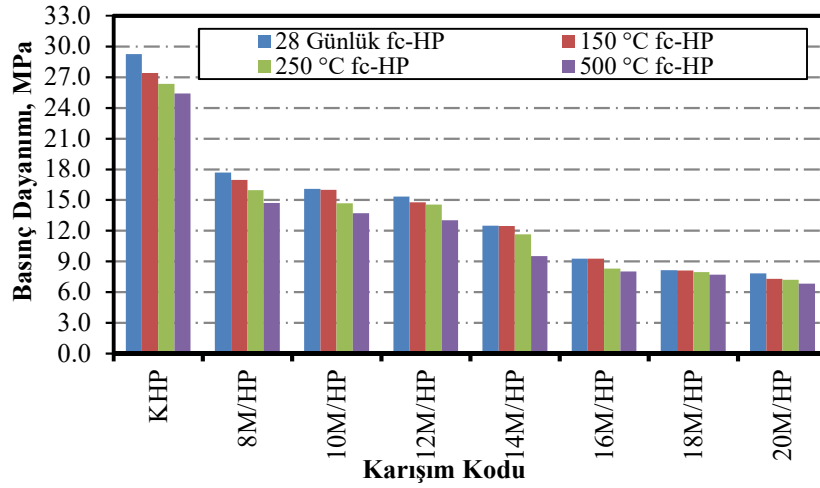
Sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu hafif harçların TS EN 196-1 (2016) standardına göre, 4 farklı kür koşulu için de 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisi altındaki 28 günlük f_c değerleri belirlenmiştir. Bu yüksek sıcaklıklara maruz kalan tüm hafif harç numunelerinin f_c değerleri Çizelge 7.10 ve Şekil 7.50, 7.51, 7.52 ve 7.53’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekillerden de görüldüğü gibi numunelerin maruz kaldığı yüksek sıcaklık arttıkça hafif harçların f_c değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni yüksek sıcaklık etkisinden dolayı hafif harç numuneleri içerisinde bulunan serbest suyun buharlaşması ve numunelerin daha gözenekli hale gelmesidir.

Çizelge 7.10. Harç karışımlarının yangın etkisi altında basınç dayanım değerleri

Basınç Dayanımı (MPa)							
Kür Koşulu	Sıcaklık Değerleri			Kür Koşulu	Sıcaklık Değerleri		
	150 °C	250 °C	500 °C		150 °C	250 °C	500 °C
K/HP	27.39	26.35	25.39	K/24SE	26.02	25.55	23.86
8M/HP	16.96	15.96	14.70	8M/24SE	15.64	15.34	14.40
10M/HP	15.99	14.68	13.70	10M/24SE	14.94	14.09	13.46
12M/HP	14.77	14.55	13.02	12M/24SE	13.57	13.03	12.42
14M/HP	12.44	11.65	9.52	14M/24SE	10.35	9.64	8.66
16M/HP	9.26	8.29	8.02	16M/24SE	7.42	7.11	6.79
18M/HP	8.12	7.96	7.71	18M/24SE	6.67	6.50	5.81
20M/HP	7.30	7.19	6.83	20M/24SE	5.73	5.50	4.78
K/12SE	26.64	25.74	24.66	K/48SE	25.24	24.59	20.86
8M/12SE	16.58	15.49	14.50	8M/48SE	15.46	15.02	13.85
10M/12SE	15.24	14.68	13.41	10M/48SE	14.75	13.93	12.18
12M/12SE	14.45	14.26	12.61	12M/48SE	13.24	12.59	11.45
14M/12SE	11.50	11.00	8.97	14M/48SE	10.24	9.46	8.18
16M/12SE	7.84	7.43	6.98	16M/48SE	6.58	6.07	5.13
18M/12SE	6.86	6.66	6.25	18M/48SE	5.72	5.61	4.57
20M/12SE	6.80	6.52	5.74	20M/48SE	5.63	5.43	4.25

Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük f_c değeri 29.24 MPa iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin f_c değeri sırasıyla 27.39 MPa, 26.35 MPa ve 25.39 MPa olmuştur. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin 28 günlük f_c değerleri 17.67 MPa ile 7.84 MPa arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin f_c değerleri sırasıyla 16.96 MPa ile 7.30 MPa, 15.96 MPa ile 7.19 MPa ve 14.70 MPa ile 6.83 MPa arasında değişmiştir. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_c değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %6, %10 ve %13 azalmıştır. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç

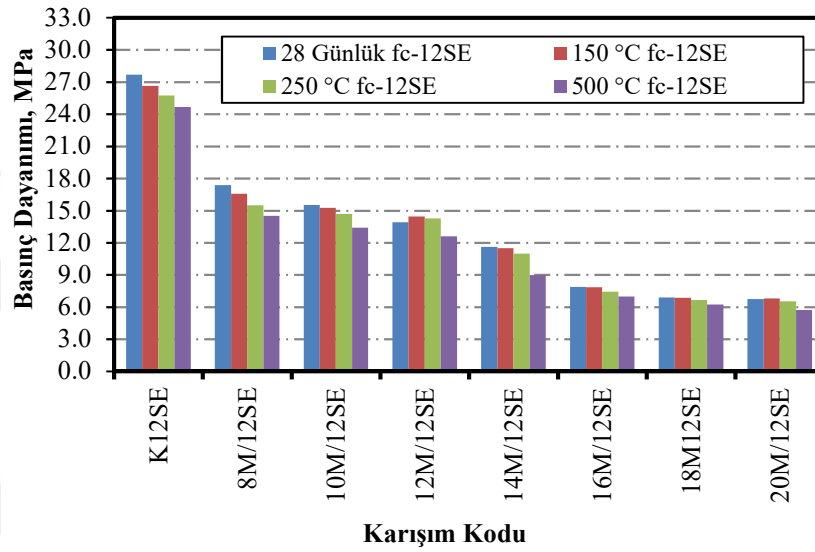
numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_c değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %2, %7 ve %15 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin yüksek sıcaklıklardan daha az olumsuz etkilenmiştir. Laboratuvar ortamında, havada poşette kür uygulamasına maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan alkali aktivatör (Na(OH)) miktarı arttıkça numunelerin f_c değerleri daha az düşüş göstermiştir.



Şekil 7.50. Havada poşette kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_c değerleri

12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük f_c değeri 27.68 MPa iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin f_c değeri sırasıyla 26.64 MPa, 25.74 MPa ve 24.66 MPa olmuştur. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin 28 günlük f_c değerleri 17.37 MPa ile 6.75 MPa arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_c değerleri sırasıyla 16.58 MPa ile 6.80 MPa, 15.49 MPa ile 6.52 MPa ve 14.50 MPa ile 5.74 MPa arasında değişmiştir. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_c değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %4, %7 ve %11 azalmıştır. 12 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_c değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %1, %5 ve %14

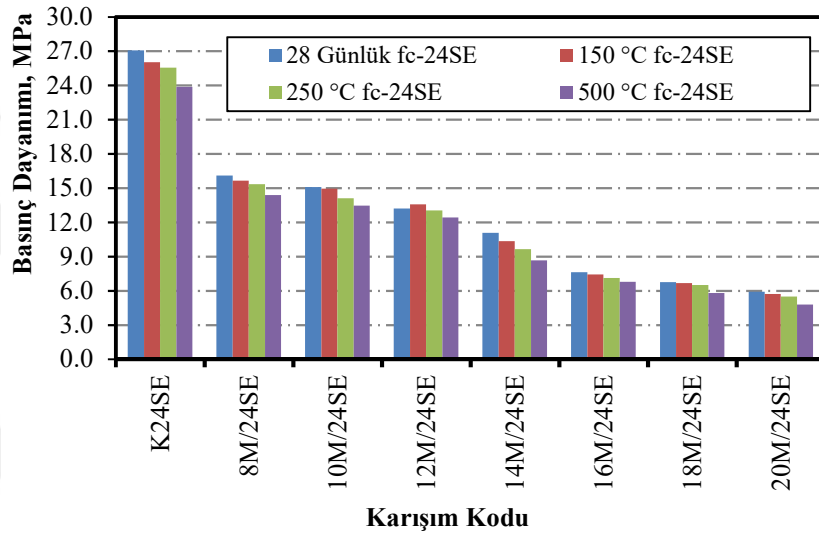
azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C yüksek sıcaklıklardan daha az, 500 °C yüksek sıcaklıktan daha fazla olumsuz etkilenmiştir. Laboratuvar ortamında, 12 saat süresince 105 °C etüvde kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan alkali aktivatör (Na(OH)) miktarı arttıkça numunelerin f_c değerleri daha az düşüş göstermiştir.



Şekil 7.51. 12 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_c değerleri

24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük f_c değeri 27.08 MPa iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin f_c değeri sırasıyla 26.02 MPa, 25.55 MPa ve 23.86 MPa olmuştur. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin 28 günlük f_c değerleri 16.10 MPa ile 5.91 MPa arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin f_c değerleri sırasıyla 15.64 MPa ile 5.73 MPa, 15.34 MPa ile 5.50 MPa ve 14.40 MPa ile 4.78 MPa arasında değişmiştir. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_c değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %4, %6 ve %12 azalmıştır. 24 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C

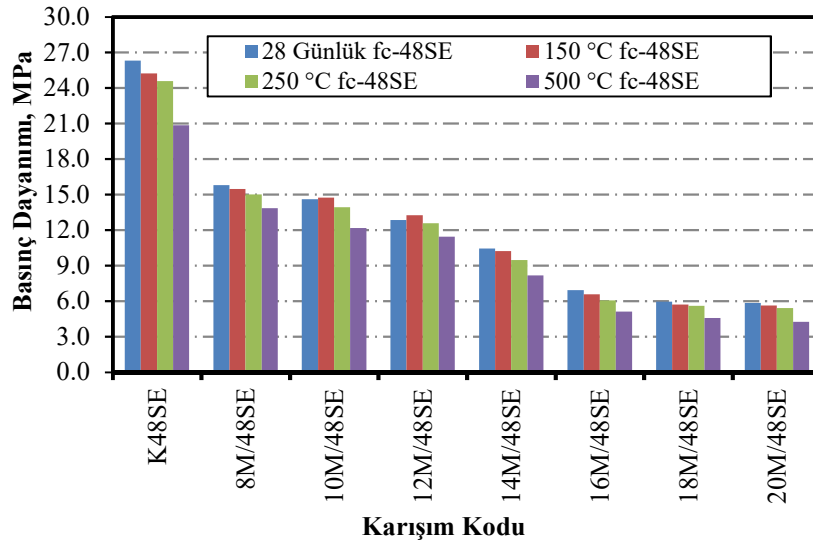
sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_c değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %2, %6 ve %13 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflu hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C yüksek sıcaklıklardan daha az 500 °C yüksek sıcaklıktan daha fazla olumsuz etkilenmiştir. Laboratuvar ortamında, 24 saat süresince 105 °C etüvde kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflu hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan alkali aktivatör (Na(OH)) miktarı arttıkça numunelerin f_c değerleri daha az düşüş göstermiştir.



Şekil 7.52. 24 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_c değerleri

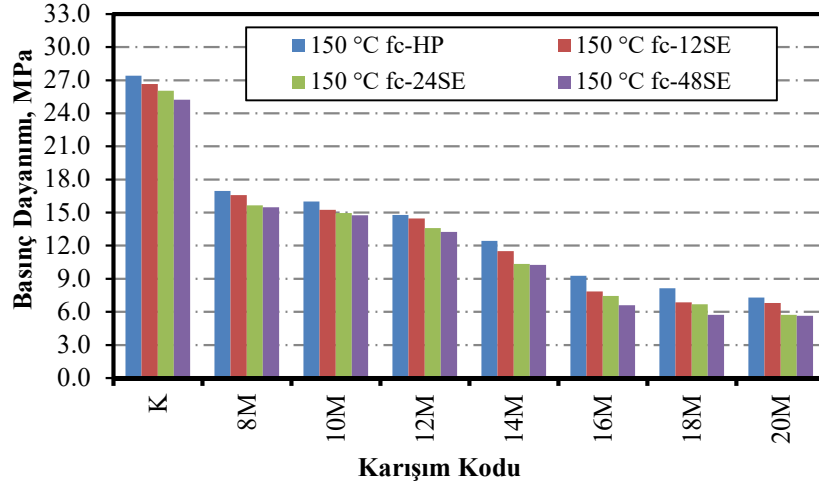
48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numunelerinin 28 günlük f_c değeri 26.31 MPa iken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol hafif harç numunelerinin f_c değeri sırasıyla 25.24 MPa, 24.59 MPa ve 20.86 MPa olmuştur. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflu hafif harç numunelerinin 28 günlük f_c değerleri 15.79 MPa ile 5.86 MPa arasında değişirken, 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflu hafif harç numunelerinin f_c değerleri sırasıyla 15.46 MPa ile 5.63 MPa, 15.02 MPa ile 5.43 MPa ve 13.85 MPa ile 4.25 MPa arasında değişmiştir. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan kontrol hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_c değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %4, %7 ve %21 azalmıştır. 48 saat süresince 105 °C derecedeki etüvde, kür uygulanan tüm alkali ile

aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numuneleri 150 °C, 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, f_c değerleri yaklaşık olarak sırasıyla %2, %7 ve %20 azalmıştır. Bu düşüşlerden de görüldüğü gibi kontrol hafif harç numunelerine göre, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numuneleri yüksek sıcaklıktan daha az olumsuz etkilenmiştir. Laboratuvar ortamında, 48 saat süresince 105 °C etüvde kür uygulanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan alkali aktivatör (Na(OH)) miktarı arttıkça numunelerin f_c değerleri daha az düşüş göstermiştir.

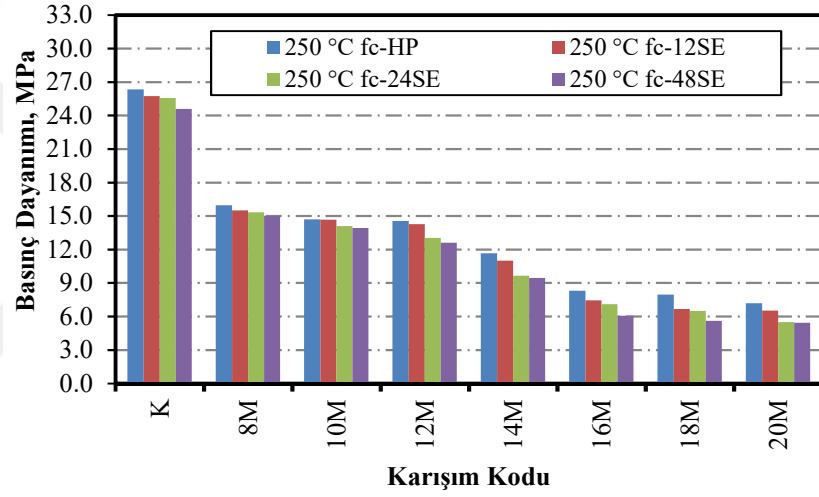


Şekil 7.53. 48 saat etüvde kür uygulanan numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında f_c değerleri

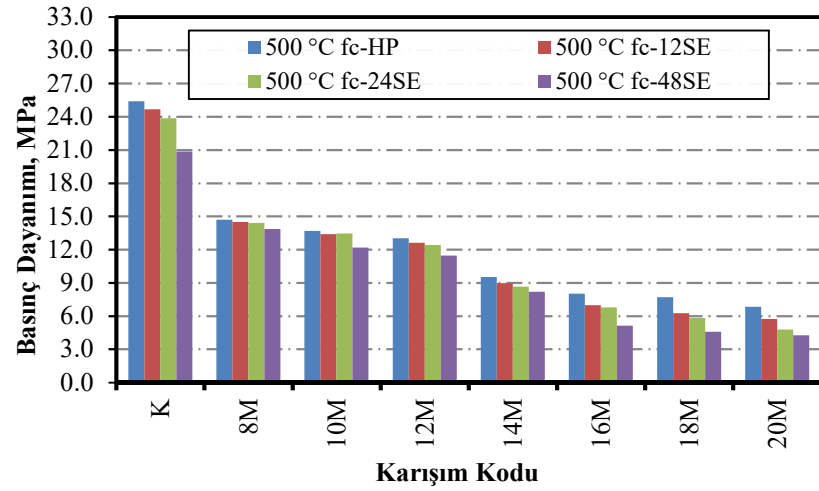
Tüm farklı kür koşullarına göre hafif harç numunelerinin 28 günlük 150 °C 250 °C ve 500 °C sıcaklık etkisi altındaki f_c değerleri Şekil 7.54, 7.55 ve 7.56 da verilmiştir. Tüm farklı kür koşullarında, kontrol hafif harç numunesinin f_c değerleri, alkali aktivatör ile bağlanan öğütülmüş yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin f_c değerlerinden daha yüksektir. Tüm hafif harç numunelerinin 105 °C'lik etüvde kalma süresi ve Na(OH) miktarı arttıkça f_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kür koşullarına göre basınç dayanımı değerlerinin azalmanın nedeni, numunelerin içerisindeki suyun kaybolması ve bunun sonucunda daha gözenekli bir yapı oluşmasıdır.



Şekil 7.54. 150 °C de numunelerin f_c değerleri



Şekil 7.55. 250 °C de numunelerin f_c değerleri

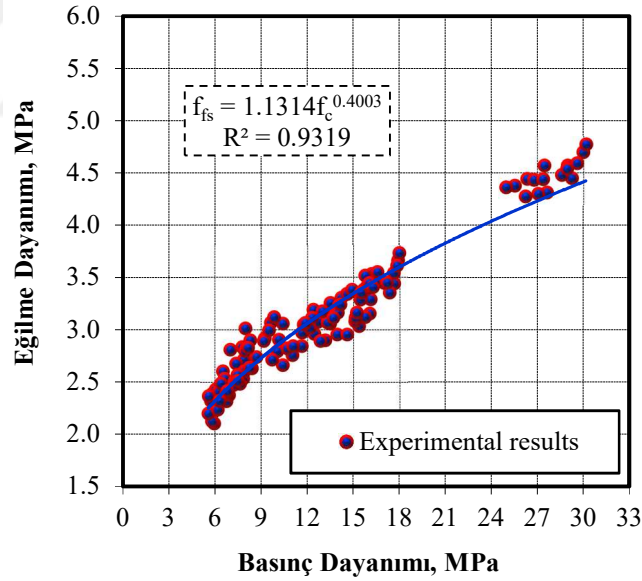


Şekil 7.56. 500 °C de numunelerin f_c değerleri

7.4 Sertleşmiş Harç Özellikleri Arasındaki İlişkiler

7.4.1 Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

Deneysel çalışmalardan elde edilen farklı kür koşullarındaki ve farklı Na(OH) molaritesindeki harç numunelerinin Çizelge 7.5 de verilen eğilme dayanımı ve Çizelge 7.6 da verilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, harç numunelerinin 105 °C etüvde küre maruz kaldığı süre ve içerisinde bulunan Na(OH).miktarı arttıkça eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin azaldığı görülmüştür. 28 günlük 4x4x4 cm küp numunelerin f_c değerleri ve 4x4x16 cm numunelerin f_{fs} değerleri Şekil 7.57 de olduğu gibi ilişkilendirilmiştir. Şekil 7.57 de görüldüğü gibi harç numunelerinin f_c ve f_{fs} değerleri arasında yüksek bir ilişki ve korelasyon vardır. Bu f_c değerleri ile f_{fs} değerleri arasında yüksek korelasyonu şekil üzerindeki R^2 değeri açıkça doğrulamaktadır. R^2 değerinin 1 e yakın olması f_c ve f_{fs} değerleri arasında çok iyi bir ilişkinin olduğunu göstermektedir.

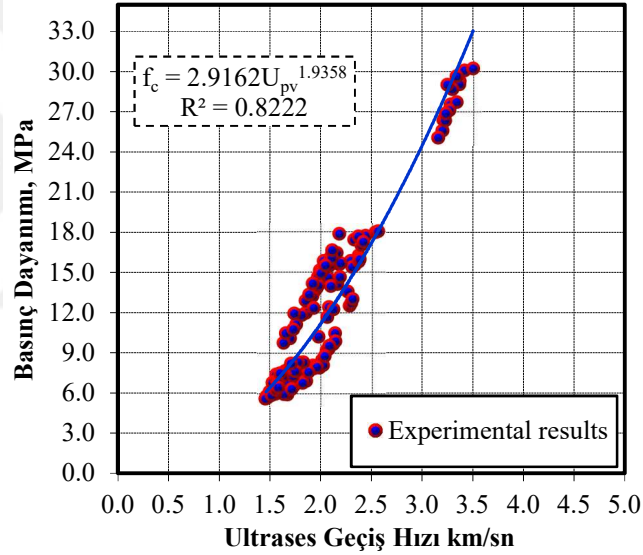


Şekil 7.57. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ilişkisi

7.4.2 Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

Deneysel çalışmalardan elde edilen farklı kür koşullarındaki ve farklı Na(OH) molaritesindeki harç numunelerinin 28 günlük 4x4x4 cm küp numunelerinin Çizelge 7.6'daki f_c değerleri ve 4x4x16 cm prizmatik numunelerinin Çizelge 7.3'deki U_{pv}

değerleri incelendiğinde harç numunelerinin 105 °C etüvde küre maruz kaldığı süre ve içerisinde bulunan Na(OH).miktarı arttıkça U_{pv} ve f_c değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Hafif harç numunelerine ait U_{pv} ve f_c değerleri Şekil 7.58. de olduğu gibi ilişkilendirilmiştir. Harç numunelerinin içinde bulunan boşluk oranı arttıkça numunelerin U_{pv} değerleri azalmış ve gözenekli yapıya sahip betonların basınç dayanım değerleri daha düşük çıkmıştır. Şekil 7.58. de görüldüğü gibi harç numunelerinin f_c ve U_{pv} değerleri arasında yüksek bir ilişki ve korelasyon vardır. Deneylerden elde edilen f_c değerleri ile U_{pv} değerleri arasındaki bu yüksek ilişkileri şekiller üzerinde verilen eğilim çizgileri ve R^2 değerleri açıkça göstermektedir. R^2 değerinin 1 e yakın olması değerler arasında iyi bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. U_{pv} ve f_c değerleri arasındaki korelasyon f_c ve f_{fs} değerleri arasındaki korelasyona göre daha zayıftır.

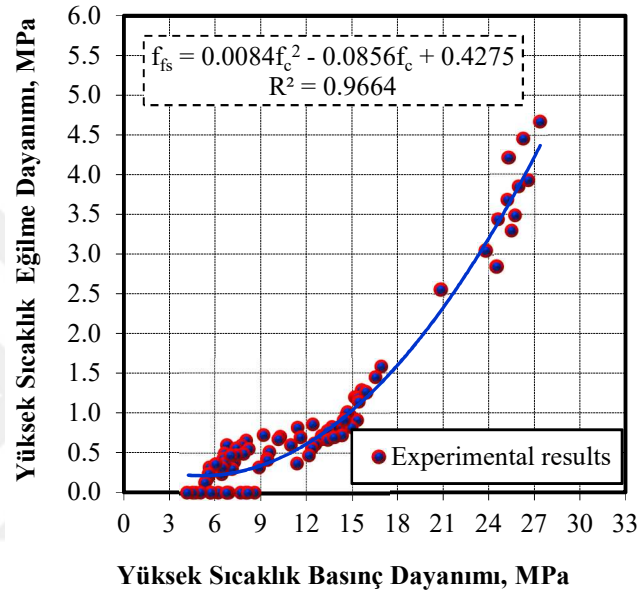


Şekil 7.58. Basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi

7.4.3 Yüksek sıcaklıkta eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

Deneysel çalışmalardan elde edilen farklı kür koşullarındaki ve farklı Na(OH) molaritesindeki harç numunelerinin Çizelge 7.9 da verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki eğilme dayanımı ve Çizelge 7.10 da verilen yüksek sıcaklık etkisi altındaki basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, harç numunelerinin 105 °C etüvde küre maruz kaldığı süre, içerisinde bulunan Na(OH).miktarı arttıkça ve maruz kaldıkları yüksek sıcaklık değerinin artışına bağlı olarak eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin azaldığı görülmüştür. 28 günlük 4x4x4 cm küp numunelerin f_c değerleri ve 4x4x16 cm

numunelerin f_{fs} değerleri Şekil 7.59 da olduğu gibi ilişkilendirilmiştir. Şekil 7.59 da görüldüğü gibi harç numunelerinin f_c ve f_{fs} değerleri arasında yüksek bir ilişki ve korelasyon vardır. Bu f_c değerleri ile f_{fs} değerleri arasında yüksek korelasyonu şekil üzerindeki R^2 değeri açıkça doğrulamaktadır. R^2 değerinin 1 e yakın olması f_c ve f_{fs} değerleri arasında çok iyi bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Dayanım değerleri arasındaki en kuvvetli ilişki yüksek sıcaklık etkisi altındaki eğilme ve basınç dayanımı değerleri arasında olduğu görülmüştür.

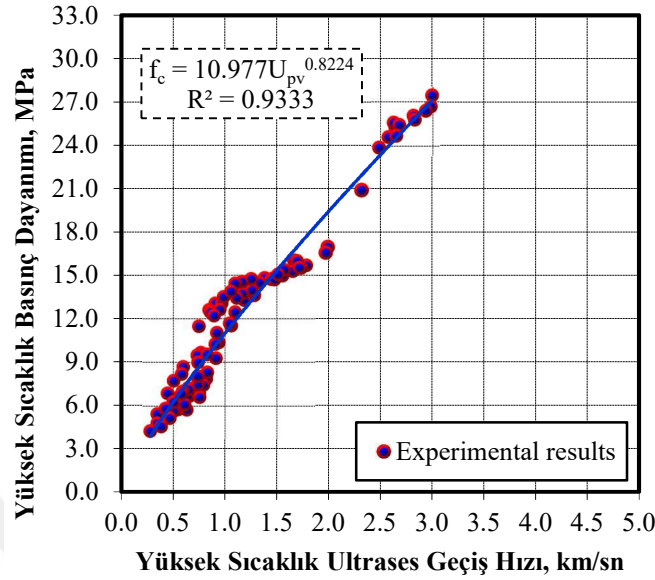


Şekil 7.59. Yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ilişkisi

7.4.4 Yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

Deneysel çalışmalardan elde edilen farklı kür koşullarındaki ve farklı Na(OH) molaritesindeki harç numunelerinin 56 günlük 4x4x4 cm küp numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki f_c değerleri ve numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki U_{pv} değerleri Şekil 7.60. de olduğu gibi ilişkilendirilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi altında içerisinde bulunan serbest suyu kaybeden numuneler daha gözenekli bir yapıya dönüşmüş ve gözenekli yapı içerisindeki boşluklarda dağılan ses dalgaları dolayısıyla U_{pv} değerleri ve numunelerin basınç dayanım değerleri azalmıştır. Şekil 7.60. de görüldüğü gibi harç numunelerinin f_c ve U_{pv} değerleri arasında yüksek bir ilişki ve korelasyonu vardır. Deneylelerden elde edilen f_c değerleri ile U_{pv} değerleri arasındaki bu yüksek ilişkileri şekiller üzerinde verilen eğilim çizgileri ve R^2 değerleri açıkça

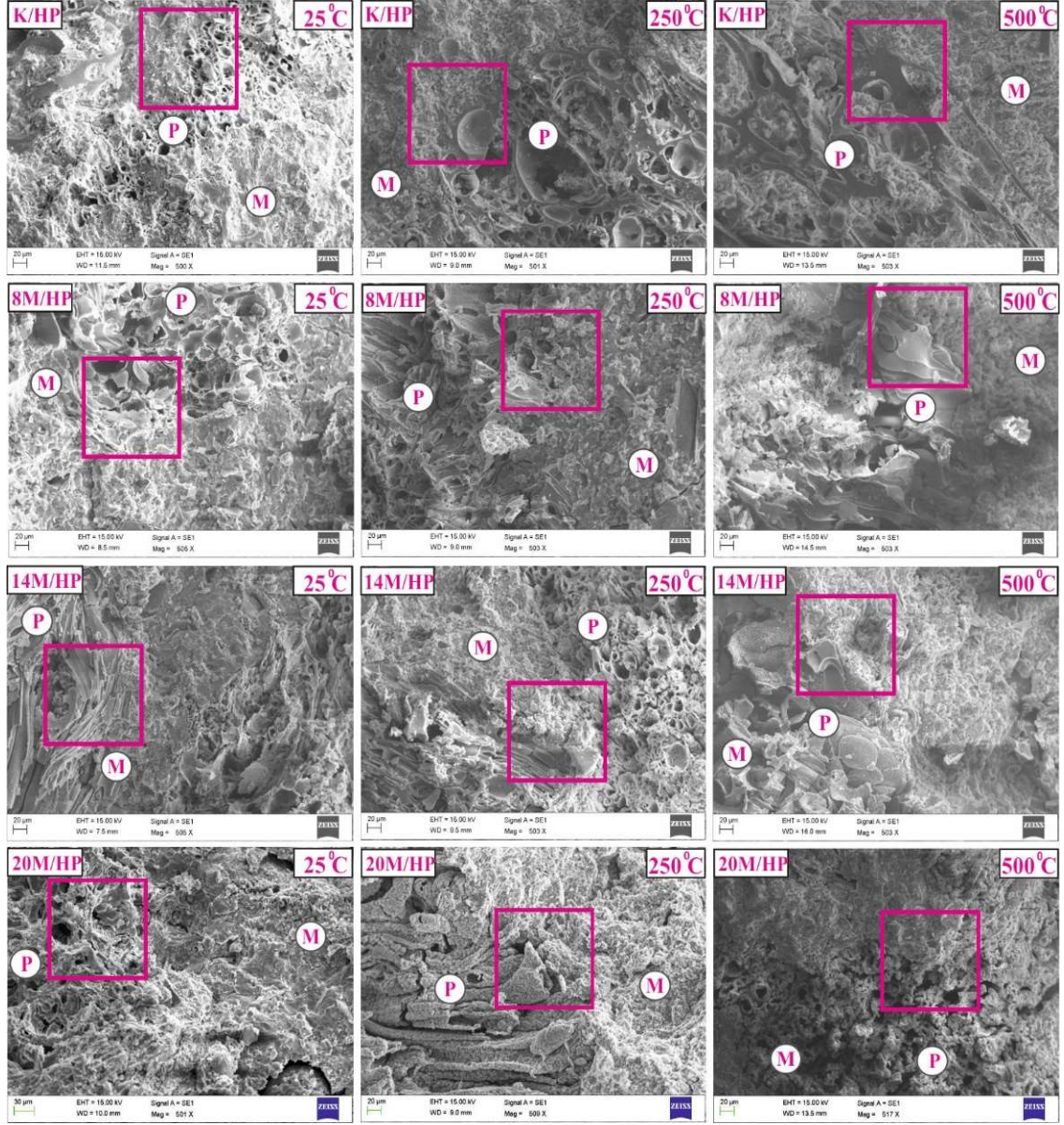
göstermektedir. Yüksek sıcaklık etkisi altındaki U_{pv} ve f_c değerleri arasındaki korelasyon, normal U_{pv} ve f_c değerleri arasındaki korelasyondan daha kuvvetlidir.



Şekil 7.60. Yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi

7.5 SEM, EDS ve XRD Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Laboratuvar ortamında havada poşette kür koşuluna maruz bırakılan numunelerden K/HP (kontrol harcı), 8M/HP, 14M/HP ve 20M/HP kodlu hafif harç numunelerinin SEM analizi sonuçları Şekil 7.61 ve 7.62’de sunulmuştur. Şekil 7.62’de, Şekil 7.61’deki SEM analizleri üzerinde işaretlenen kare alanlar üzerine yaklaşılarak harç karışımlarında hafif agrega olarak kullanılan pomza ile harçların matrisleri arasındaki ara yüzey bölgesinde meydana gelen değişimler irdelenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisiyle kontrol hafif harçlarının ve alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu hafif harçların matrislerinde ve agrega olarak kullanılan pomzalar da gözenek sayısında artma, bozulmalar ve mikro çatlak oluşumları meydana gelmiştir. Bu gözenek sayısında artmanın, bozulmaların ve mikro çatlak oluşumlarının özellikle 500°C sıcaklığa maruz kalan numuneler de daha belirgin olduğu görülmüştür. Behfarnia ve Shahbaz, 2018 tarafından yapılan çalışmada, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cüruf esaslı bağlayıcılarda çok sayıda mikro çatlak gözlenmesinin bu bağlayıcılar için tipik bir özellik olduğu rapor edilmiştir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık etkisiyle kontrol hafif harç numunesi ve alkali ile aktive edilmiş hafif harç numunelerinde kullanılan pomza ile matris arasındaki aderansın net olmamakla birlikte zayıfladığı görülmektedir.

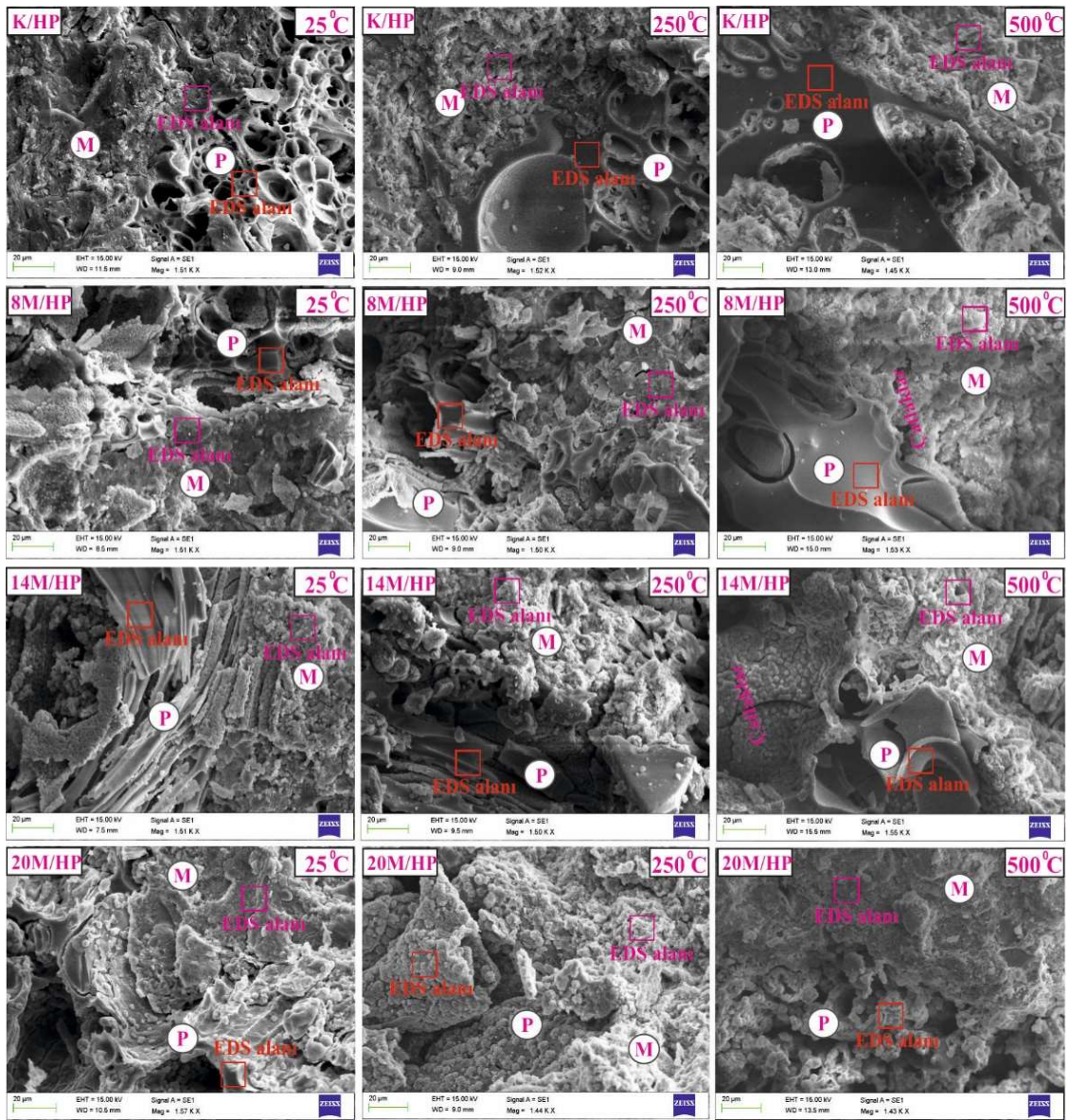


M: matris, P:pomza.

Şekil 7.61. Harçların SEM analizleri

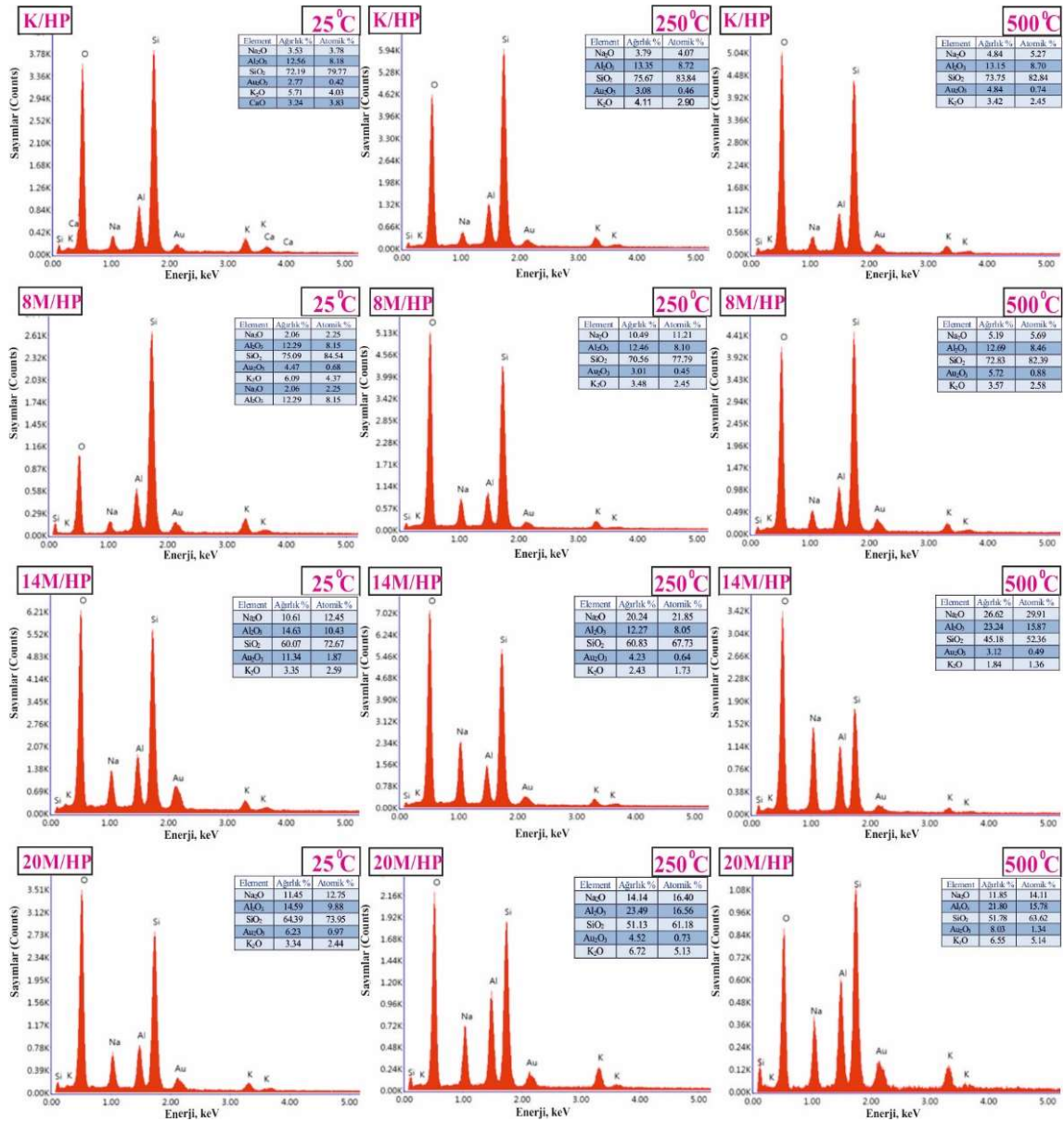
Şekil 7.62’de gösterilen pomza ve matris noktaları üzerinde, laboratuvar ortamında havada poşette kür edilen 25, 250 ve 500 °C sıcaklıklara maruz bırakılan kontrol hafif harç numunesi (K/HP) ile alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflu 8M/HP, 14M/HP ve 20M/HP kodlu harç numunelerinde yaklaşık olarak 4 cm² alanda EDS analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar pomza için Şekil 7.63 ve matris için Şekil 7.64’de sunulmuştur. Hafif harç karışımlarında kullanılan pomza agregasında ana elementler olarak Ca, Na, Al, Si, K, Au ve O elementleri görülmüştür. Burada bulunan Au, SEM analizleri için numunelerin Au kaplanmasından ortaya çıkmaktadır. Kontrol hafif harç numunesi ile alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflu harç numunelerinde ana

elementler olarak Ca, Na, Al, Si, K, Au, Mg ve O elementleri görülmüştür. Sadece kontrol hafif harç numunesinde Fe elementi de görülmüştür. Pomza agregasında olduğu gibi burada bulunan Au, SEM analizleri için numunelerin Au kaplanmasından ortaya çıkmaktadır. 500 °C de, C-S-H jelinin ve özellikle Ca(OH)₂'in bileşenlerine ayrışması nedeniyle harç numunelerdeki Ca elementinin Si elementine oranı artmıştır. Alkali ile aktive edilmiş harçların matrislerindeki Na içeriği yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte artmıştır. Yüksek sıcaklık nedeniyle alkali ile aktive edilmiş harçlardaki Na içeriğinin artması, bu harçlarda sıcaklığın artması ile N-A-S-H jeli oluşumunun devam ettiğini göstermektedir.



M: matris, P:pomza.

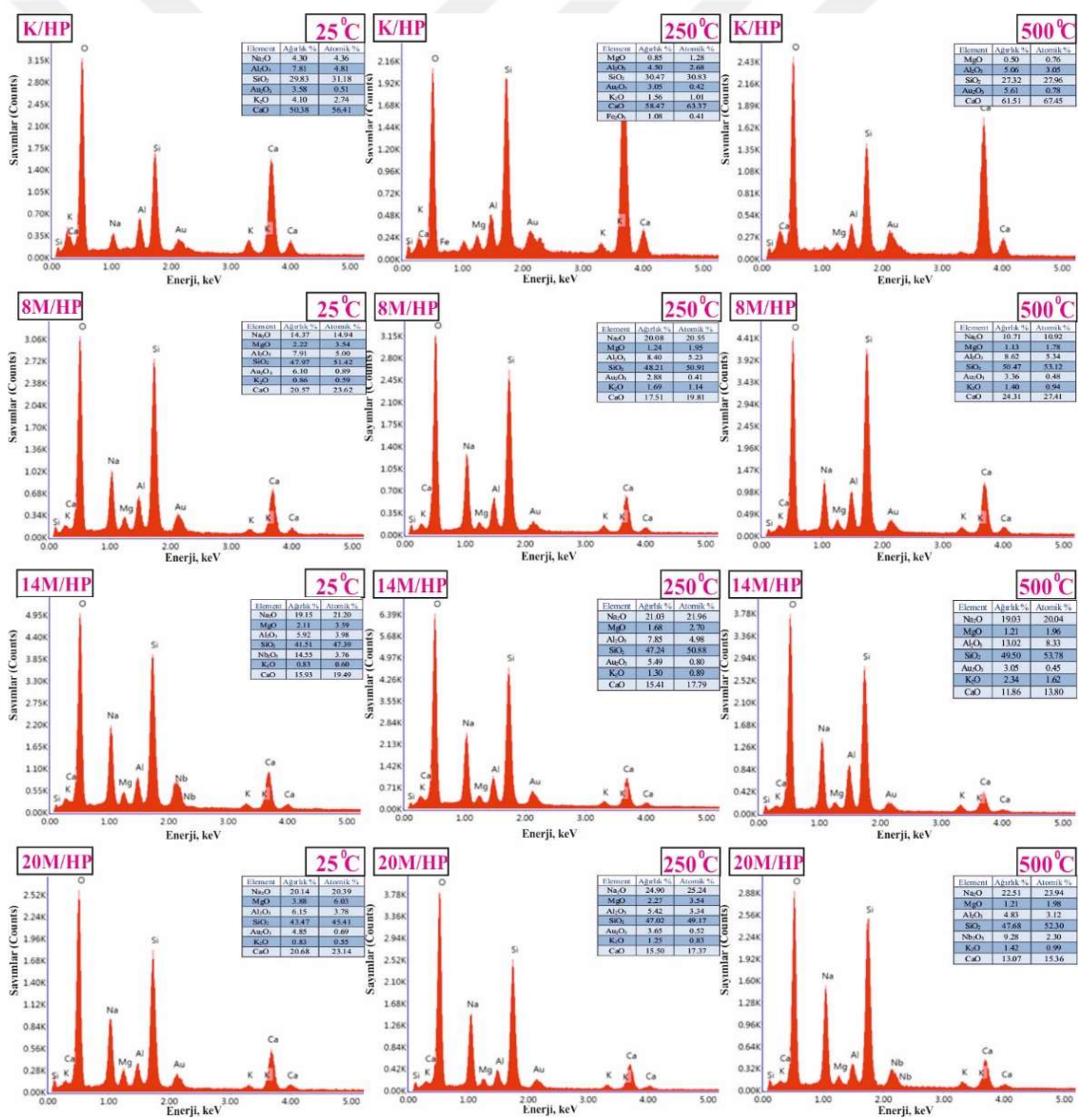
Şekil 7.62. Harçların yakınlaştırılmış SEM analizleri



Şekil 7.63. Harçların EDS analizleri (pomza)

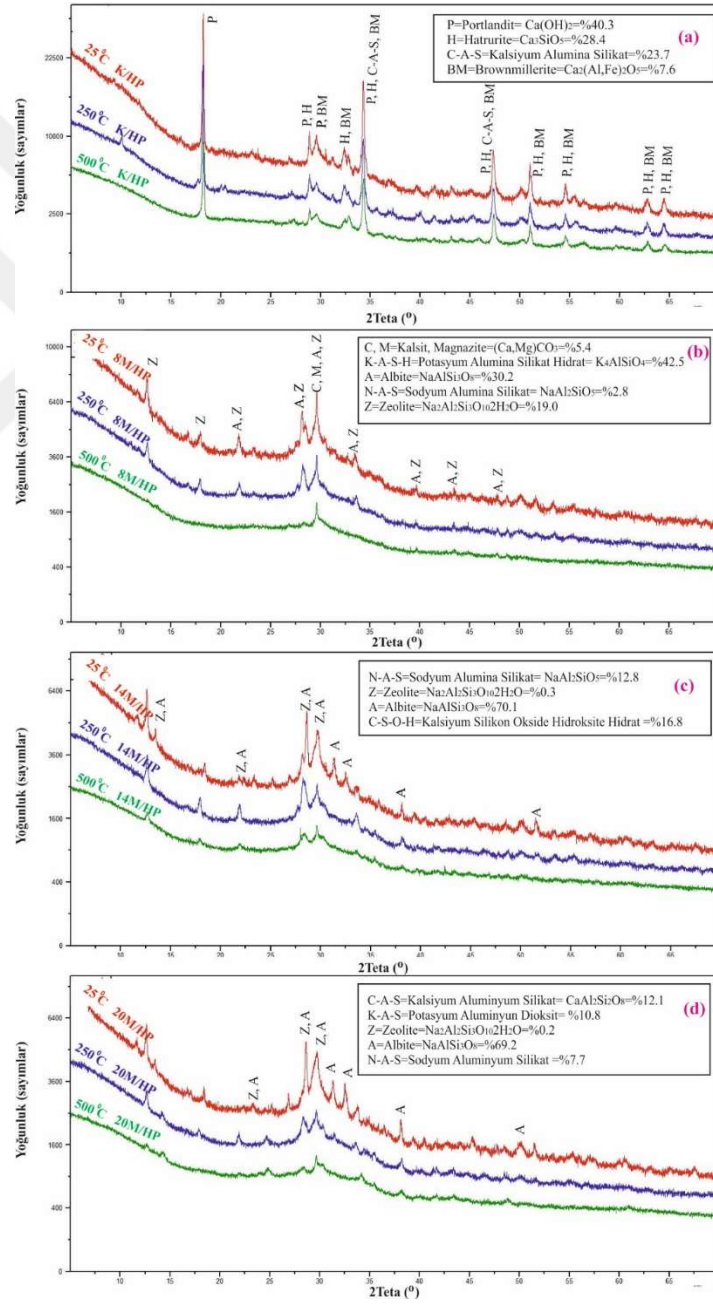
Laboratuvar ortamında havada poşette kür koşuluna maruz bırakılan numunelerden K/HP (kontrol harcı), 8M/HP, 14M/HP ve 20M/HP kodlu hafif harç numunelerinden alınan toz halindeki örnekler üzerinde gerçekleştirilen XRD analizlerinin sonuçları Şekil 7.65’de sunulmuştur. Kontrol hafif harç numunesinin XRD analizlerinde, portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), hatrurite, kalsiyum alümina silikate ve brownmillerit bileşenleri gözlenmiştir. Kontrol hafif harç numunesinde gözlenen $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C-A-S (Kalsiyum Alumina Silikat), hatrurite (Ca_3SiO_5) ve brownmillerite ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$) için 2θ 18°, 30°, 32°, 35°, 47°, 52°, 55°, 63°, ve 64° de görülen XRD piklerinin yoğunlukları 250°C

ve 500°C de kademeli olarak azalmıştır. Alkali ile aktive edilen yüksek fırın cürufllu 8M/HP, 14M/HP ve 20M/HP kodlu hafif harç numunesinin XRD analizlerinde, sodyum alümina silikat, zeolit, albit, kalsiyum silikon oksit ve potasyum alümina dioksit bileşenleri gözlenmiştir. XRD analizlerinde 2θ 13° ve 30° de görülen XRD pikleri, alkali ile aktive edilmiş harçların amorf fazlar içerdiğini göstermektedir (Fang vd., 2018; Lee vd., 2014). 2θ 22°, 28°, 30°, 33°, 39°, 41°, 43°, 46°, 51°, 55°, 61°, 65° ve 68° deki albit ve zeolit için görülen XRD pikleri alkali ile aktive edilmiş hafif harçlarda sodyum alümina silikat (N-A-S) ve potasyum alümina silikat hidrat (K-A-S-H) tipi jel oluştuğunu göstermektedir. Bu jel oluşumlarının hafif harçlardaki etkileri harçlarda kullanılan aktivatör içeriğine göre değişiklik göstermektedir.



Şekil 7.64. Harçların EDS analizleri (matris)

Yüksek sıcaklık etkisi ile alkali ile aktive edilmiş hafif harçlarda görülen XRD pikleri azalmıştır. Bununla birlikte, 8M/HP, 14M/HP ve 20M/HP kodlu hafif harç numunelerinin XRD piklerinin yoğunluklarında 250 °C ve 500 °C de görülen kayıplar kontrol hafif harç numunesine göre daha fazla olmuştur. XRD piklerinde görülen azalma, özellikle 8M/HP, 14M/HP ve 20M/HP kodlu harçlarda yüksek sıcaklık etkisiyle görülen f_c değerlerindeki azalma ile örtüşmektedir. Bu durum bu harçlardaki C-A-S-H jelinin yüksek sıcaklıkla bozulması ve aynı zamanda bu harçlardaki YFC içeriğine bağlı olarak K-A-S-H ve N-A-S jelinin oluşmasıyla açıklanabilir (Park vd., 2016).



Şekil 7.65. Harçların XRD analizleri

BÖLÜM VIII

SONUÇLAR

Bu çalışmada, agrega olarak pomza kullanımının sadece çimento ile üretilen hafif kontrol harcı ile birlikte 7 farklı molarite içeriğinde Na(OH) ile bağlanan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu hafif harçların, taze hafif harç özelliklerinden yayılma ve birim ağırlık, havada poşette, 105 °C sıcaklıktaki etüvde 12, 24 ve 48 saat kür edildikten sonra laboratuvar ortamında havada poşette kür edilen sonra sertleşmiş hafif harç özelliklerinden sertleşmiş birim ağırlık, U_{pv} , f_c ve f_{fs} değerleri farklı kür günlerinde araştırılmıştır. Dahası, 150, 250 ve 500 °C sıcaklıklara maruz kalan numunelerin sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca seçilen bazı numunelerin SEM, EDS nokta ve XRD analizleri yapılmıştır.

- Alkali aktivatör (Na(OH)) ile aktive edilen yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin taze birim ağırlıklarının çimento kullanılan kontrol hafif harç numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dahası, yüksek fırın cürufllu numunelerde alkali aktivatör olarak kullanılan Na(OH) miktarı arttıkça, yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin taze birim ağırlık değeri de kademeli olarak artmıştır.
- Alkali aktivatör (Na(OH)) ile aktive edilen yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinde Na(OH) miktarı arttıkça yayılma değerlerinde kademeli olarak düşüşler meydana gelmiş ve priz süresi kısalmıştır. Bunun sebebi Na(OH) miktarının artmasıyla yüksek fırın cürufllu daha hızlı aktive olmuş ve daha erken bağlayıcılık özelliği göstermiştir.
- Alkali aktivatör (Na(OH)) ile aktive edilen yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlıklarının çimento kullanılan kontrol hafif harç numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dahası, yüksek fırın cürufllu numunelerde alkali aktivatör olarak kullanılan Na(OH) miktarı arttıkça, yüksek fırın cürufllu hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri

de kademeli olarak artmıştır. Zamanla hafif harç numunelerinin içerisinde bulunan serbest su buharlaştığından, uygulan kür günleri arttıkça ise kontrol hafif harç numuneleri ve alkali ile aktive edilen yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık değerleri kademeli olarak azalmıştır. Laboratuvar ortamında havada poşette kür uygulanan numunelerin sertleşmiş birim ağırlık değerleri, 105 °C sıcaklıktaki etüvde 12, 24 ve 48 saat kür uygulandıktan sonra laboratuvar ortamında havada poşette kür uygulanan numunelere göre daha yüksek elde edilmiştir. Dahası, 105 °C sıcaklıktaki etüvde uygulanan kür süresinin artması sertleşmiş birim ağırlık değerlerini kademeli olarak azaltmıştır.

- Alkali aktivatör (Na(OH)) ile aktive edilen yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin U_{pv} , f_c ve f_{fs} değerlerinin çimento kullanılan kontrol hafif harç numunelere göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Dahası, yüksek fırın cürüflü numunelerde alkali aktivatör olarak kullanılan Na(OH) miktarı arttıkça, yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin U_{pv} , f_c ve f_{fs} değerleri de kademeli olarak azalmıştır. Uygulan kür günleri arttıkça ise kontrol hafif harç numuneleri ve alkali ile aktive edilen yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin U_{pv} , f_c ve f_{fs} değerleri kademeli olarak artmıştır. Laboratuvar ortamında havada poşette kür uygulanan numunelerin U_{pv} , f_c ve f_{fs} değerleri, 105 °C sıcaklıktaki etüvde 12, 24 ve 48 saat kür uygulandıktan sonra laboratuvar ortamında havada poşette kür uygulanan numunelere göre daha yüksek elde edilmiştir. Dahası, 105 °C sıcaklıktaki etüvde uygulanan kür süresinin artması U_{pv} , f_c ve f_{fs} değerlerini kademeli olarak azaltmıştır. Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinden en yüksek eğilme ve basınç dayanımı değeri havada poşette kür uygulanan 8 M Na(OH) ile aktive edilen 91 günlük numunelerde ölçülürken, en düşük U_{pv} , f_c ve f_{fs} değerleri ise etüvde 105 °C de 48 saat kür uygulanan ve 20 M Na(OH) ile aktive edilen numunelerde ölçülmüştür.
- Yüksek sıcaklık etkisinde, kontrol hafif harç numunelerinin ve alkali aktivatör (Na(OH)) ile aktive edilen yüksek fırın cürüflü hafif harç numunelerinin maruz kaldıkları sıcaklık arttıkça, sertleşmiş birim ağırlık, U_{pv} , f_c ve f_{fs} değerleri azalmıştır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerin f_{fs} değerlerinde, f_c değerlerine göre daha büyük düşüşler meydana gelmiştir. Dahası 16, 18 ve 20 M

Na(OH) ile aktive edilen yüksek fırın cürufu hafif harç numunelerinde 500 °C sıcaklık etkisi altında f_{fs} değerleri ölçülememiştir.

- Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmayan ve kalan kontrol hafif harç numunelerinin ve alkali aktivatör (Na(OH)) ile aktive edilen yüksek fırın cürufu hafif harç numunelerinin f_{fs} ile f_c değerleri ve f_c ile U_{pv} değerleri arasında yüksek bir ilişki ve korelasyon gözlenmiştir. Bu ilişki ve yüksek korelasyonu şekil üzerindeki R^2 değeri açıkça doğrulamaktadır.
- Laboratuvar ortamında havada poşette kür koşuluna maruz bırakılan numunelerden K/HP (kontrol harcı), 8M/HP, 14M/HP ve 20M/HP kodlu hafif harç numunelerinden alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen SEM analizlerinde, numunelerin maruz bırakıldığı yüksek sıcaklık etkisinin armasıyla gözenek sayısında artma, bozulmalar ve mikro çatlak oluşumları gözlenmiştir.
- Laboratuvar ortamında havada poşette kür koşuluna maruz bırakılan numunelerden K/HP (kontrol harcı), 8M/HP, 14M/HP ve 20M/HP kodlu hafif harç numunelerinden alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen XRD analizleri piklerinin yoğunluklarının maruz bırakılan yüksek sıcaklık etkisinin artmasıyla azaldığı gözlenmiştir.

Sonuç olarak harç numunelerinde çimento yerine yüksek fırın cürufu kullanılması dayanım değerlerini bir miktar azaltırken bu metotla hafif taşıyıcı harç üretilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Alkalilerle aktive edilen yüksek fırın cürufu hafif harçlar için en uygun kür yönteminin havada poşette kür olduğu görülmüştür. Çimentoya alternatif bir bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufunun kullanılacağı durumlarda en uygun alkali aktivatör miktarının 250 gr suda 80 gr alkali aktivatör (Na(OH)) çözdürülmesidir.

KAYNAKLAR

ACI Committee 213R-03, Guide for structural lightweight aggregate concrete, *American Concrete Institute*, USA, 2003.

Açıkgöz, A., Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü betonların hidrasyon sıcaklığının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s.43-57, 2015.

Aitcin, P.C., High-Performance concrete. *E and FN SPON*, London and New York, 1998.

Akkaş, A., Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun taşıyıcılık özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, s.72-73, 2011.

Altun, C.M., Hafif beton, harç ve çimento hamurunda kırılma parametrelerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s.4-21, 2005.

Arslan, M.E., Eğilmede taşıyıcı hafif beton donatı aderansının geleneksel beton donatı aderansıyla karşılaştırmalı olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, s.79-83, 2007.

Arsoy, A., Elektrik ark ocağı cürufunun alkalilerle aktivasyonu ile üretilen betonların özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, s.71-74, 2018.

ASTM C 138, Standard test method for unit weight, yield and air content of concrete, *American Society Fortesting Materials*, USA, 1994.

ASTM C 330, Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete, *American Society For Testing Materials*, USA, 2014.

ASTM C 595, Standard specification for blended hydraulic cements, *American Society For Testing Materials*, USA, 2019.

ASTM C 597, Standart test method for pulse velocity through concrete, *American Society For Testing Materials*, USA, 2009.

Aydın, S., Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, s.1-2, 2010.

Behfarnia, K. and Shahbaz, M., “The effect of elevated temperature on the residual tensile strength and physical properties of the alkali-activated slag concrete”, *Journal of Building Engineering*, s.442-454, 2018.

Bilgiç, M., Yüksek performanslı prefabrike hafif betonların özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 2009.

Bilim, C., Yüksek fırın cürufu katkısının çimento tabanlı malzemelerde kullanılabilirliği, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s.14-20, 2006.

Boğa, A.R., Yüksek fırın cürufu ve korozyon inhibitörü kullanımının beton içerisindeki donatı korozyonuna ve beton özelliklerine etkisi, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, s.155-161, 2010.

Bremner, T.W., “Lightweight concrete an environmentally-friendly material”, *International Symposium on Sustainable Development, Cement and Concrete Industry*, Ottawa, Canada, s.21-23, 1998.

Brough, A.R. Holloway, M., J. Sykes and Atkinson,A., “Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars: Part II. The retarding effect of additions of sodium chloride or malic acid”, *Cement and Concrete Research*, s.1375-1379, 2000.

Canbaz, M., Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların özellikleri, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, s.22, 2007.

Chandra, S. and Berntsson, L., Lightweight Aggregate Concrete, *Noyes Publications*, USA, 2003.

Chen, B. and Liu, J., “Contribution of hybrid fibers on the properties of the highstrength lightweight concrete having good workability”, *Cement and Concrete Research*, 35(5), 913-917, 2005.

Clarke, J.L., Structural Lightweight Aggregate Concrete, *Chapman&Hall*, Great Britain, 1993.

Çelik, K., Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve traşlı çimentolarla üretilen aynı mukavemet sınıfındaki harçların dayanım ve dayanıklılığının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s.1-62, 2005.

Çetmeli, E., Yeni Alman Betonarme Şartnamesi: DIN 1045 Betonarme Hesap Esasları, Kesitlerin Boyutlandırılması Ve Donatının Yerleştirilmesi, *Uluğ Kitabevi*, İstanbul, 1974.

Çevik, M., Yüksek fırın cürufu ve uçucu külden taşıyıcı hafif agrega üretimi, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, s. 235–242, 1993.

Davidovits J., “Geopolymer chemistry and properties”, *Proceedings of 1988 geopolymere conference*, s. 25–48, 1988.

Davraz, M., Pomzanın endüstriyel kullanım alanları, Doktora Semineri, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 2001.

DIN 1045, Concrete, reinforced and prestressed concrete structures, *German Institute for Standardisation*, Germany, 2008.

Dikici, T., Taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, s.4-20, 2010.

Düzgün, O.A., Çelik liflerin hafif betonların dayanımları üzerindeki etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, s.104-105, 2001.

Elibol, C., Alkalilerle aktive edilen çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s.26-27, 2012.

Erdoğan, T. Y., Admixtures for Concrete. Middle East Technical University, *The Middle East Technical University Press*, ISBN 975-429-113- 6, Ankara, s.1-188, 1997.

Erdoğan, T.Y., Beton, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını*, s.513-604, Ankara, 2003.

Erdoğan, T.Y., Betonun oluşturan malzemeler – çimentolar, *Türkiye Hazır Beton Birliği*, İstanbul, 1995.

Erkmen J., Boraksın bipolar membranlı bir hücrede elektrodiyalizi ile borik asit ve sodyum hidroksit üretimi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, s.1-126, 2013.

Fang, G., Bahrami, H., and Zhang, M., “Mechanisms of autogenous shrinkage of alkali-activated fly ash-slag pastes cured at ambient temperature within 24 h”, *Construction and Building Materials*, 171, 377-387, 2018.

Gong, C. and Yang N., “Effect of phosphate on the hydration of alkaliactivated red mud–slag cementitious material”, *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1013-1016, 2000.

Gönen, T., Kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif betonun mekaniksel ve durabilite özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, s.5, 2009.

Görür, E.B., Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer betonun dayanım ve durabilite özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, s.43-44, 2015.

Gül, R. ve Geçten, O., Hafif agregalı betonun kullanılabilirliği, *DSİ Teknik Bülteni*, Ankara, s.31-36-81, 1994.

Güner, A., Günümüzde yüksek fırın çürufunun inşaat sektöründe kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, Ankara, s. 215–222, 1993.

Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J. and Rangan, B. V., “On the development of fly ash-based geopolymer concrete”, *ACI Materials Journal*, 101 (6), 467–472, 2004.

Kabay, N., Hafif agregalı betonun boşluk yapısının mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s.9, 2009.

Kaldı, C., Taşıyıcı hafif beton tasarımı ve çok katlı binalarda kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, s.171-174, 2011.

Kantarıcı, F., Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi*, Malatya, s.110-111, 2013.

Kocabıyık, L., Yüksek fırın cürufu mineral katkısının betondaki etkinlik katsayısının belirlenmesi ve betonun kırılma parametrelerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s.73-74, 2010.

Krivenko, P., “Alkaline cements: terminology classification, aspects of durability”, in: H. Justnes (Ed.), *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Amarkai and Congrex Göteborg, Gothenburg, Sweden, p.6, 1997.

Lamond, J., F. and Pielert, J., Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials”, *ASTM Publication*, 2006.

Lee, N.K., Jang, J.G., and Lee, H.K., “Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages”, *Cement and Concrete Composites* 53, 239-248, 2014.

Lo, T.Y., Cui, H.Z., Tang, W.C. and Leung, W.M., “The effect of aggregate absorption on pore area”, *Interfacial Zone of Lightweight Concrete*, 22, 623-628, 2008.

Luga, E., Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu jeopolimer harçların özellikleri, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi*, Kayseri, s.164-175, 2015.

McNulty, E., Geopolymers: an environmental alternative to carbon dioxide producing ordinary portland cement, *Senior Comprehensive Paper*, The Catholic University of America, Department of Chemistry, s.1-22, 2009.

Neville, A. M., Properties of Concrete, *John Wiley & Sons Inc*, New York, 1996.

Neville, A.M., Properties of Concrete, *Jhon Wiley and Sons.inc.*, Third Edition, New York, s.779, 1988.

Neville, A.M., Properties of Concrete, *Longman Scientific and Technical*, Third Edition New York, 2000.

Neville, A.M., Properties of Concrete, *Third Edition*, Singapore, 605-647, 1995.

Newman, J. and Choo, B.S., Advanced Concrete Technology, Constituent Materials, *Butterworth-Heinemann*, Oxford, 2003.

Newman, J., Properties of Lightweight Concrete, *Advanced Concretes Technology Processes*, London, 2003.

Onat, O.B., Türkiye' de üretilen yüksek fırın cüruflarının çimento özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1998.

Orcay, E.A., Hafif betonların mekanik özellikleri ve ısı iletkenlik katsayıları, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s.11, 2010.

Öner, A. ve Yıldırım, T., “Öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren ve içermeyen betonlarda kırmataş kumu içeriğinin beton özelliklerine etkisi”, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, s.800-811, Mart 2005.

Öz, E., Nevşehir dolaylarında yüzeyleyen asidik pomzanın hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s.59, 2007.

Özodabaş, A., Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların performansının geliştirilmesi, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, s.183-185, 2014.

Öztok, İ., High strength lightweight natural aggregate concrete, Master Thesis, *The Middle East Technical University, Department of Civil Engineering*, Ankara, 1997.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S., Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Construction and Building Materials*, 22 (7), 1305–1314, 2008a.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S., Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture, *Construction and Building Materials*, 22 (7), 1315–1322, 2008b.

Rilem., Functional classification of lightweight concrete, *Recommendation LC2*, 2nd edition, 1978.

Roy, D.M., “Alkali-activated cements: opportunities and challenges”, *Cement and Concrete Research*, 29 (2), 249–254, 1999.

Sevinç, A.H., Barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların ve betonların mühendislik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi*, Kahramanmaraş, s.57-58, 2011.

Short, A. and Kinniburgh, W., Lightweight concrete. *Third Edition, Printed in Great Britain by Gallord (printers) Ltd. Great Yormauth-* 4, s. 1-54, England, 1978.

Short, A. and Kinniburgh, W., Lightweight Concrete, *John Wiley & Sons*, Inc., New York, 1963.

Şimşek, O., Madenşehir (Konya-Karaman) doğusundaki ponzataşının hafif beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, s.34-36, 1987.

Taşdemir, C., Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 427, 57-61, Ankara, 2003.

Taşdemir, M.A., Taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışları, Doktora tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1982.

Teoreanu, I., Volceanov, A. and Stoleriu, S, “Non portland cements and derived materials”, *Cement and Concrete Composites*, 27 (6), 650–660, 2005.

Tokay, M. ve Erdoğan, K., Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar, *TÇMB Ar-Ge / Y 97-2*, Ekim 2003.

Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., Yüksek fırın cürufunun beton üretiminde değerlendirilmesi, *Akdeniz İnşaat Haber* 3, s.38-41, 2005.

Toprak, M.U., Termik santral taban küllerinden alkali aktivasyon ile geopolimer üretilmesi, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, s.80-81, 2011.

TS 2511, Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1977.

TS 802, Beton karışım tasarımı hesap esasları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.

TS EN 1015-11, Kâgir harcı- Deney metotları- bölüm 11: sertleşmiş harcın eğilme ve basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2007.

TS EN 1015-3, Kâgir harcı- Deney metotları- bölüm 3: taze harç kıvamının tayini (yayıma tablası ile), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2000.

TS EN 12350 – 6, Beton – taze beton deneyleri –bölüm 6: yoğunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

TS EN 12504-4, Beton deneyleri - bölüm 4: ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012.

TS EN 196 -1, Çimento deney metotları - bölüm 1: dayanım tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.

TS EN 197-1, Çimento - bölüm 1: genel çimentolar - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

TS EN 206-1, Beton- bölüm 1: özellik, performans, imalat ve uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

Wang, S. D., Scrivener, K. L. and Pratt, P. L., “Factors affecting the strength of alkali-activated slag”, *Cement Concrete Research*, 24, 1033–43, 1994.

Wang, S.D., “The role of sodium during the hydration of alkali-aktivated slag”, *Advanced in Cement Research*, 12, 65-69, 2000.

Yakupoğlu, A., Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu harçların özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, s.53-54, 2010.

Yıldırım, A.N., Pomza ve uçucu kül kullanılarak imal edilen hafif betonların agresif su ortamlarında mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, s.97-99, 2007.



ÖZ GEÇMİŞ

Günay AYAYDIN 01.06.1993 yılında Kayseri’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kayseri’de tamamladı. Sema Yazar Anadolu Lisesinden 17.06.2011 tarihinde, Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 16.10.2015 tarihinde mezun oldu. 2015 ve 2017 yılları arasında Bersa Yapı Denetim firmasında çalıştı. 2016 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde Yüksek Lisans eğitimine başladı. Temmuz 2017 tarihinden itibaren Kayseri Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi (KASKİ) de Kontrol Mühendisi olarak çalışmaktadır.



