

**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ İKAMELİ ÇİMENTO
NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

BETÜL İŞBİLİR

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

**OCAK 2012
DÜZCE**



**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PIRINÇ KABUĞU KÜLÜ İKAMELİ ÇİMENTO
NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Betül İŞBİLİR

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

**OCAK 2012
DÜZCE**

Betül İŞBİLİR tarafından hazırlanan ‘‘PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ İKAMELİ ÇİMENTO NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ’’ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İsmail ERCAN

Tez Danışmanı, Eğitim Programları ve Eğitimi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İsmail ERCAN
Eğitim Programları ve Eğitimi, Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Serkan SUBAŞI
İnşaat Mühendisliği, Düzce Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ
Yapı Eğitimi ABD, Düzce Üniversitesi

Tarih: / / 2012

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış 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.

Betül İŞBİLİR

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam sürecinde bilgi ve tecrübeleriyle beni destekleyen ve yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. İsmail ERCAN' a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve tecrübelerinden her zaman faydalandığım, tez yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Serkan SUBAŞI' na; çalışmalarımı destekleyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Yılmaz KOÇAK'a; deneylerim süresince yardımlarından dolayı yapı eğitimi öğretim üyesi Mehmet EMİROĞLU ve Uzm. Şükrü ÖZKAN'a; katkılarından dolayı tüm Yapı Eğitimi Anabilim Dalı öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın uygulama ve analiz kısımları için yardımcı olan Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Malzemeleri ve Beton Laboratuvarı; Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarı çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca maddi manevi her konuda yanımda olan aileme ve dostlarım Suna NAS, Songul ERTÜRK'e çok teşekkür ederim.

Çalışmamın uygulama kısmını destekleyen Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Komisyon Başkanlığı'na yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ocak 2012

Betül İŞBİLİR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ	ix
ÖZ	x
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. ÇİMENTO.....	3
2.1.1. Çimentonun Tanımı.....	3
2.1.2. Çimentonun Tarihçesi	4
2.1.3. Çimentonun Ana Hammaddeleri.....	5
2.1.3.1. Kalker.....	5
2.1.3.2. Kil	6
2.1.3.3. Marn.....	7
2.1.3.4. Alçı Taşı	7
2.1.4. Çimento Hammadde Kompozisyonu.....	7
2.1.4.1. Silikat Modülü	8
2.1.4.2. Hidrolik Modülü.....	8
2.1.4.3. Alümin Modülü	9
2.1.4.4. Kireç Doygunluk Faktörü	9
2.1.5. Çimento Hidratasyonu	10
2.1.5.1. C ₃ A Ana Bileşeninin Hidratasyonu	11
2.1.5.2. C ₄ AF Ana Bileşeninin Hidratasyonu	11
2.1.5.3. C ₃ S ve C ₂ S Ana Bileşeninin Hidratasyonu	12
2.1.5.4. Hidratasyon Isısı ve Priz	12
2.2. PUZOLANLAR	14
2.2.1. Puzolanların Tarihçesi.....	14
2.2.2. Puzolanların Sınıflandırılması	15

2.2.3. Puzolanların Aktivitesi	17
2.2.4. Puzolanik Reaksiyon Ve Reaksiyon Ürünleri	18
2.3. PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ	19
2.3.1. Pirinç Kabuğu Külünün Elde Edilişi Ve Özellikleri.....	19
2.3.1.1. Elde Edilişi	19
2.3.1.2. Farklı Yanma Sıcaklık Altında Kimyasal Bileşimi Ve Tane Özellikleri	20
2.3.2. Pirinç Kabuğu Külü Hammadde Analizleri.....	23
2.3.2.1. Tane Boyut Analizi.....	23
2.3.2.2. XRD-X Işınları Kırınımı Tekniği.....	24
2.3.2.3. XRF-X Işınları Floresans Spektroskopisi Tekniği	24
2.3.2.4. FT-IR-Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi Tekniği..	25
2.3.2.5. SEM(Taramalı Elektron Mikroskopu) Analizi	26
2.3.2.6. STA(DTA-Fark Taramalı Termal Analiz Ve TG-Termo Gravimetrik Termal Analiz)	27
2.3.2.7. PK Külü Hammadde Analizleri İle İlgili Araştırmalar	28
2.3.3. Pirinç kabuğu Külünün Taze Beton Özelliklerine Etkisi.....	46
2.3.3.1. Su ihtiyacı Ve İşlenebilme.....	46
2.3.3.2. Terleme ve Plastik Rötme (Büzülme).....	46
2.3.3.3. Priz Süreleri.....	47
2.3.4. Pirinç Kabuğu Külünün Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi..	48
2.3.4.1. Pirinç Kabuğu Külü İçeren Betonun Geçirimsizliği Ve Basınç dayanımı.....	48
2.3.4.2. Pirinç Kabuğu Külü İçeren Betonun Çekme Ve Eğilme Dayanımları.....	63
2.3.5. Pirinç Kabuğu Külünün Betonun Dayanıklılığına Etkisi	64
2.3.5.1. Klor Etkisine Karşı Dayanıklılık	65
2.3.5.2. Alkali-Agrega Reaksiyonuna Karşı Dayanıklılık	67
2.3.5.3. Çelik Donatı Korozyonuna Karşı Dayanıklılık	68
2.3.5.4. Sülfat Etkisine Karşı Dayanıklılık.....	70
2.3.5.5. Donma-Çözünme Etkisine Karşı Dayanıklılık.....	71
3. MATERYAL VE YÖNTEM	73
3.1. MATERYAL	73

3.2. YÖNTEM.....	73
3.2.1. Pirinç Kabuğunun Yakma İşlemi ile Kül Haline Getirilmesi ve Öğütülmesi	73
3.2.2. Fiziksel Analizler	73
3.2.2.1. Tane Boyut Analizi.....	73
3.2.2.2. Özgül Yüzey Tayini	74
3.2.2.3. Özgül Ağırlık Tayini.....	74
3.2.2.4. Standart Kıvam Tayini	74
3.2.2.5. Priz Başlama Ve Sona Erme Süresinin Tayini.....	75
3.2.3. Kimyasal Analizler.....	76
3.2.4. Çimento Harç Deneyleri(TSE).....	76
3.2.4.1. Deney Örneklerinin Hazırlanması	76
3.2.4.2. Birim hacim ağırlık Tayini	78
3.2.4.3. Basınç Mukavemeti Tayini	79
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	81
4.1. HAMMADDE ANALİZLERİ	81
4.1.1. Kimyasal Analizler	81
4.1.2. Fiziksel Analizler	81
4.1.2.1. Tane Boyutu Analizi	81
4.1.2.2. Özgül Yüzey Tayini.....	82
4.1.2.3. Özgül Ağırlık Tayini	83
4.2. ÇİMENTO HAMURU ÖRNEKLERİNE UYGULANAN DENEYLER	84
4.2.1. Standart Kıvam, Priz Başlama ve Sona Erme Süresi.....	84
4.3. ÇİMENTO HARÇ NUMUNELERİNE UYGULANAN ANALİZLER	89
4.3.1. Basınç Dayanımı.....	89
4.3.2. Birim hacim ağırlık	111
4.3.3. Porozite.....	130
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	149
KAYNAKLAR	154
ÖZGEÇMİŞ	158

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Puzolanların sınıflandırılması (Massazza'ya göre)	16
Şekil 2.2	: (Bangladesh)PK Külünün mikro yapısı(SEM)	30
Şekil 2.3	: (Bangladesh) PK Külünün X-ray kırınımı(XRD)	30
Şekil 2.4	: (Bangladesh) PK Külünün DTA-TGA eğrileri	31
Şekil 2.5	: (Bangladesh) PK Külünün tane boyutu dağılımı	32
Şekil 2.6	: Mikro yapı (SEM) : a) PK Külünden elde edilen silis(SRH) b) Silis	35
Şekil 2.7	: PK Külünden elde edilen silisin X-ray kırınımı(XRD)	36
Şekil 2.8	: (Hindistan)PK Külünün mikro yapısı(SEM).....	37
Şekil 2.9	: (Hindistan) PK Külünün FT-IR spektroskopisi	38
Şekil 2.10	: İyileştirmeden önce PK Külünün FT-IR spektroskopisi	39
Şekil 2.11	: İyileştirmeden sonra PK Külünün FT-IR spektroskopisi	39
Şekil 2.12	: (US-EG)PK Küllerinin X-RAY kırınım görüntüsü(XRD)	41
Şekil 2.13	: PÇ, (US-EG)PK Küllerinin tane boyu dağılımı	41
Şekil 2.14	: (700°C) PK Külü katkılı çimento hamurunun hidratasyon davranışının şematik gösterimi.....	42
Şekil 2.15	: Farklı yanma sıcaklıkları altında PK Külü için DTA ve TGA spektrumu .	44
Şekil 2.16	: Farklı yanma durumları altında PK Külünün X-ray kırınım deseni(XRD).	44
Şekil 2.17	: (400°C) PK Külünün mikro yapısı(SEM)	45
Şekil 2.18	: (500, 600, 700, 800°C) PK Külünün mikro yapısı (SEM)	45
Şekil 2.19	: (900, 1000, 1100°C) PK Külünün mikro yapısı(SEM)	45
Şekil 2.20	: Zamana bağlı olarak PK Külü içeren çimento hamurunun optik mikro görüntüsü.....	45
Şekil 2.21	: Numunelerinin kül miktarına bağlı olarak Su/Bağlayıcı oranı değişimi....	46
Şekil 2.22	: Farklı oranlarda çimento ile ikame edilmiş PK Külünün Priz başlangıç ve bitiş süreleri	47
Şekil 2.23	: Farklı oranlarda PK Külü ikameli çimento hamurunun terleme oranları....	49
Şekil 2.24	: (% 5) PK Külü içeren çimento hamuru ve harcın akma tablası yayılımı....	50
Şekil 2.25	: (% 5) PK Külü katkılı çimento hamurunun basınç dayanımı.....	50
Şekil 2.26	: Numunelerin basınç dayanımlarının beton yaşına bağlı değişimleri.....	51
Şekil 2.27	: PK Külü ve Uçucu Kül ikameli numunelerin 7günlük basınç dayanımları	52
Şekil 2.28	: PK Külü ve Uçucu Kül ikameli numunelerin 14günlük bas.ñç day.....	53
Şekil 2.29	: PK Külü ve Uçucu Kül ikameli numunelerin 28günlük basınç day.....	53
Şekil 2.30	: PK Külü ve Uçucu Kül ikameli numunelerin 90günlük basınç day.....	54
Şekil 2.31	: Süperakışkanlaştırıcı katkılı ve katkısız numunelerin PK Külü ikame oranına bağlı olarak 1, 3, 7, 28, 90, 180 günlük basınç dayanımları	55
Şekil 2.32	: % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları	56
Şekil 2.33	: C30 sınıfı için PK Külü ikameli numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları	58
Şekil 2.34	: C40 sınıfı için PK Külü ikameli numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları	59
Şekil 2.35	: C50 sınıfı için PK Külü ikameli numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları	59
Şekil 2.36	: 600°C sıcaklıkta elde edilen PK Külü ile ikame edilmiş numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları	61
Şekil 2.37	: 700 °C sıcaklıkta elde edilen PK Külü	

	ile ikame edilmiş numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları.....	62
Şekil 2.38	: 800 °C sıcaklıkta elde edilen PK Külü ile ikame edilmiş numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları	62
Şekil 2.39	: 600-700-800°C sıcaklıkta elde edilen PK Külü ile ikame edilmiş numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları	63
Şekil 2.40	: Referans ve PK Külü ikameli numunelerin eğilmede çekme dayanımlarının beton yaşına bağlı olarak değişimleri	64
Şekil 2.41	: Referans ve (700°C)PK Külü ikameli beton numunelerin 28 günlük klor Permeabilitesi	66
Şekil 2.42	: Referans ve (700°C)PK Külü ikameli beton numunelerin 1 yıllık klor permeabilitesi	67
Şekil 2.43	: Harçların alkali-silis genleşmesi düşüşü	68
Şekil 2.44	: % 5 HCL çözeltisi içinde sürekli batırma ile beton silindirlerinin ağırlık kaybı.....	69
Şekil 2.45	: Harç numunelere ait sülfat genleşmesi.....	71
Şekil 2.46	: REF Betonların dayanıklılık faktörleri	72
Şekil 4.1	: PÇ ve (600, 700, 800°C) PK Külünün tane boyut dağılımları	82
Şekil 4.2	: PÇ ve (600°C) PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı	84
Şekil 4.3	: PÇ ve (700°C) PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı	85
Şekil 4.4	: PÇ ve (800°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı	85
Şekil 4.5	: PÇ ve (600°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz süreleri	86
Şekil 4.6	: PÇ ve (700°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz süreleri	87
Şekil 4.7	: PÇ ve (800°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz süreleri	87
Şekil 4.8	: (600°C-PK Külü)Ortalama basınç dayanımı değerleri.....	94
Şekil 4.9	: (700°C-PK Külü)Ortalama basınç dayanımı değerleri.....	95
Şekil 4.10	: (800°C-PK Külü)Ortalama basınç dayanımı değerleri.....	97
Şekil 4.11	: (600°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak basınç dayanımı değişimi....	107
Şekil 4.12	: (700°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak basınç dayanımı değişimi....	108
Şekil 4.13	: (800°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak basınç dayanımı değişimi ...	109
Şekil 4.14	: Basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki grafiği	110
Şekil 4.15	: (600°C-PK Külü)Ortalama birim hacim ağırlık değerleri	114
Şekil 4.16	: (700°C-PK Külü)Ortalama birim hacim ağırlık değerleri	115
Şekil 4.17	: (800°C-PK Külü)Ortalama birim hacim ağırlık değerleri	117
Şekil 4.18	: (600°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak birim hacim ağırlık değişim	126
Şekil 4.19	: (700°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak birim hacim ağırlık değişim	127
Şekil 4.20	: (800°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak birim hacim ağırlık değişim	128
Şekil 4.21	: Birim hacim ağırlık değerleri arasındaki ilişki grafiği	129
Şekil 4.22	: (600°C-PK Külü) Porozite değerleri	133
Şekil 4.23	: (700°C-PK Külü) Porozite değerleri	134
Şekil 4.24	: (800°C-PK Külü) Porozite değerleri	136
Şekil 4.25	: (600°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak porozite değişimi	144
Şekil 4.26	: (700°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak porozite değişimi	145
Şekil 4.27	: (800°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak porozite değişimi.....	146
Şekil 4.28	: Porozite değerleri arasındaki ilişki grafiği	148

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Pirinç Çeltiği ve Pirinç Kabuğu İçin Dünyada Üretim Oranları(Milyon Metrik Ton)	20
Çizelge 2.2 : PK Külünün yüzey alanı üzerinde yakma durumlarının etkisi	21
Çizelge 2.3 : PK Külünün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	22
Çizelge 2.4 : PK Külünün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	23
Çizelge 2.5 : T = 500 ⁰ C and 1000 ⁰ C. Sıcaklıklarda PK Külü kompozisyonu.....	33
Çizelge 2.6 : XRF sonuçlarının saflık konsantrasyonu düzeyi(%).....	34
Çizelge 2.7 : Çimento ve Ayıklama yöntemi ile elde edilen silis(SRH)'ın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	35
Çizelge 3.1 : Çimento örneklerine ait karışım oranları.....	77
Çizelge 4.1 : Çimento kimyasal özellikleri.....	81
Çizelge 4.2 : PÇ ve (600, 700, 800 ⁰ C) PK Külü özgül yüzey alanı değerleri	83
Çizelge 4.3 : PÇ ve PK Külü Özgül Ağırlık Değerleri.....	83
Çizelge 4.4 : Beton basınç dayanımı, birim hacim ağırlık , porozite verilerine ait çok yönlü varyans analizi sonuçları	90
Çizelge 4.5 : (600 ⁰ C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	91
Çizelge 4.6 : (700 ⁰ C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	92
Çizelge 4.7 : (800 ⁰ C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	93
Çizelge 4.8 : (600 ⁰ C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları	99
Çizelge 4.9 : (700 ⁰ C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları	99
Çizelge 4.10 : (800 ⁰ C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları	100
Çizelge 4.11 : (600 ⁰ C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait duncan testi sonuçları	100
Çizelge 4.12 : (700 ⁰ C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait duncan testi sonuçları	102
Çizelge 4.13 : (800 ⁰ C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait duncan testi sonuçları	104
Çizelge 4.14 : Her bir sıcaklık ve gün faktörünün alt seviyelerinde PK Külü miktarları-basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren regrasyon modelleri	106
Çizelge 4.15 : (600 ⁰ C-PK Külü)Birim hacim ağırlık değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	111
Çizelge 4.16 : (700 ⁰ C-PK Külü)Birim hacim ağırlık değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	112
Çizelge 4.17 : (800 ⁰ C-PK Külü)Birim hacim ağırlık değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	113
Çizelge 4.18 : (600 ⁰ C-PK Külü)Birim hacim ağırlık değerlerine	

ait tek yönlü varyans analizi sonuçları	119
Çizelge 4.19 : (700°C-PK Külü)Birim hacim ağırlık değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları	119
Çizelge 4.20 : (800°C-PK Külü)Birim hacim ağırlık değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları	120
Çizelge 4.21 : (600°C-PK Külü)Birim hacim ağırlık değerlerine ait duncan testi sonuçları	120
Çizelge 4.22 : (700°C-PK Külü) Birim hacim ağırlık değerlerine ait duncan testi sonuçları	122
Çizelge 4.23 : (800°C-PK Külü) Birim hacim ağırlık değerlerine ait duncan testi sonuçları	124
Çizelge 4.24 : (600°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	130
Çizelge 4.25 : (700°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	131
Çizelge 4.26 : (800°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	132
Çizelge 4.27 : (600°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları	138
Çizelge 4.28 : (700°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları	138
Çizelge 4.29 : (800°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları	139
Çizelge 4.30 : (600°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait duncan testi sonuçları	139
Çizelge 4.31 : (700°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait duncan testi sonuçları	141
Çizelge 4.32 : (800°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait duncan testi sonuçları	142

KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklama
A	Alümin, Al_2O_3
AM	Alümin modülü
C	Kireç, CaO
CH	Kalsiyum hidroksit (portlandit)
CS	Kalsiyum silikat
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
C₃S	Trikalsiyum silikat
C₂S	Dikalsiyum silikat
C₃A	Trikalsiyum alüminat
C₄AF	Tetrakalsiyum alüminaferrit
DSC	Fark taramalı kalorimetri
DTA	Fark esaslı termal analiz
F	Demir oksit, Fe_2O_3
FT-IR	Fourier transformlu kızılötesi spektroskopisi
M	Magnezyum oksit, MgO
PÇ	Portland çimentosu
PK Külü	Pirinç Kabuğu Külü
Si	Silis, SiO_2
S	Kükürt trioksit, SO_3
S/Ç	Su/çimento oranı
SEM	Taramalı elektron mikroskop
STA	Simultane termal analiz
TG	Termal gravimetri
XRF	X-Işınları spektrometresi
XRD	X-Işınları difraksiyonu

**PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ İKAMELİ ÇİMENTO
NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**
(Yüksek Lisans Tezi)

Betül İŞBİLİR

**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
Ocak 2012

ÖZ

Dünyada endüstri üretimlerinin yan ürünü olan atıkların uzaklaştırılması ve depolanması zor bir durum olmakla beraber çevre kirliliğinde de büyük bir sorun oluşturduğu bilinmektedir. Bu atıklardan biri de pirinç üretiminden ortaya çıkan pirinç kabuğudur. Dünyada 100 milyon ton pirinç kabuğu atığı meydana gelmekte ve pirinç kabuğunun yakılmasından 20 milyon ton PK Külü elde edilmektedir.

Endüstriyel bir atık olan pirinç kabuğunun inşaat sektöründe kullanımı göz önüne alındığında, inorganik ve organik bileşenlerden oluşan pirinç kabuğu külünün yapısında bulunan yüksek miktardaki silis (% 92-% 93) sayesinde betonun birçok özelliğini iyileştirerek dayanımını arttırmasının yanı sıra pirinç kabuğunun atık olarak kullanımı ile çevresel kirlilik ve enerji kaynaklarının korunmasında yararı arttıracağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada; 600, 700, 800°C sıcaklıklarda yakma işlemi ile pirinç kabuğu külü elde edilmiş ve pirinç kabuğu külünün, çimento numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Pirinç kabuğu külünün, çimento hamurlarının fiziksel özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla; 600, 700, 800°C sıcaklıklarda elde edilen pirinç kabuğu külleri % 0, 5, 10, 15, 20 oranlarında çimento ile ikame edilerek çimento numuneleri hazırlanmış ve her bir grup için standart kıvam priz süresi, hacim genişmesi değerleri tespit edilmiştir. Pirinç kabuğu külünün, çimento harçlarının

mekanik özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla; 600, 700, 800°C sıcaklıklarda elde edilen pirinç kabuğu külleri % 0, 5, 10, 15, 20 oranlarında çimento ile ikame edilerek 50X50X50 mm boyutlarında çimento harç numuneleri hazırlanmış ve her bir grup için, numunelerin 2, 7, 28, 56, 90 günlük basınç dayanımları tespit edilmiştir. Ayrıca pirinç kabuğu küllerinin özgül yüzey, özgül ağırlık değerleri ve tane boyut dağılımları tespit edilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda: yanma sıcaklığı arttıkça pirinç kabuğu külünün özgül yüzey alanının arttığı; farklı yanma sıcaklıklarında elde edilmiş pirinç kabuğu külleri ile % 5, 10, 15, 20 oranlarında hazırlanan tüm çimento hamurlarında, referans çimentoya göre su ihtiyacının arttığı ancak çok yüksek düzeyde olmadığı; en yüksek basınç dayanımı, birim hacim ağırlık değerlerine % 5 oranında (800°C)pirinç kabuğu külü ikameli çimento numunelerinin sahip olduğu; en düşük porozite değerlerine (800°C)pirinç kabuğu külü ikameli çimento numunelerinin sahip olduğu görülmüştür. Tüm bu veriler ışığında pirinç kabuğu külünün yanma sıcaklığı ve ikame miktarının çimento harç numunelerinin basınç dayanımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu :

Anahtar Kelimeler : Pirinç Kabuğu Külü, Sıcaklık, Basınç Dayanımı, Puzolan

Sayfa Adedi : 175

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. İsmail ERCAN

EXAMINING OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE SUBSTITUTION OF CEMENT SAMPLES WITH RICE HUSK ASH

(M.Sc. Thesis)

Betül İŞBİLİR

**DUZCE UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2012

ABSTRACT

Removal and storage of the waste by-product of industrial production in the world is a difficult condition but is known to a big problem in environmental pollution. One of the emerging rice production, rice is the shell of this waste. Occur in over 100 million tons of waste rice husk and rice husk ash is obtained from burning 20 million tons of rice.

The brass shell of an industrial waste in the construction sector, given the use of inorganic and organic components of the high amount of silica present in the composition of the rice husk ash (92% - 93%) due to that increase the strength of the concrete as well as improving many aspects of the use of waste and environmental pollution rice crust and energy resources will increase the benefit of the protection is considered.

In this study, 600, 700, 800°C temperatures derived from the incineration ash and rice husk ash cement samples investigated the effect of physical and mechanical properties.

To investigate the effect of the physical properties of rice husk ash cement pastes, rice husk ash obtained from 600, 700, 800°C temperatures of 0%, 5, 10, 15, 20 percent of cement by the substitution of cement samples prepared with the standard consistency and setting time for each group, the volume expansion values were determined.

To investigate the effect of the mechanical properties of rice husk ash cement mortars, rice husk ash obtained from 600, 700, 800°C temperatures of 0%, 5, 10, 15, 20 percent replacement of cement with cement mortar specimens were prepared 50X50X50 mm sizes and for each group, samples 2, 7, 28, 56, 90-day compressive strengths were determined. In addition, the specific surface of rice husk ash, specific gravity values and the particle size distributions were determined.

As a result of the study: the specific surface area of the rice husk ash increased when combustion temperature increases, the rice husk ash which obtained from different combustion temperatures and cement samples which prepared 5 %, 10 %, 15 %, 20 % percent, according to the reference cement water demand increased, but it isn't a very high level, the high compressive strength, unit weight values by 5% (800°C), cement samples with rice husk ash are substituted, the low porosity values (800°C), cement samples with rice husk ash were substituted. All of these data showed that burning temperature of rice husk ash and the amount of substitution was found to be effective on the compressive strength of cement mortars.

Science Code :

Key Words : Rice Husk Ash, Temperature, Compressive Strength, Pozzolan

Page Number : 175

Adviser :Prof. Dr. İsmail ERCAN

1. GİRİŞ

Pirinç, dünyada 1.6 milyar kişinin besin maddesinin yarısını oluşturmaktadır. Ekilebilen alanların % 11'inde yani yaklaşık olarak 145 milyon hektar alanda pirinç ekimi yapılmaktadır. Pirinç üretimi sonucu, atık malzeme olarak aşırı miktarda pirinç kabuğu ortaya çıkmakta ve üretimin fazla olduğu bölgelerde çevrede büyük alanları kaplayarak çevrenin kirlenmesine neden olmaktadır (Yıldız ve diğ., 2007).

Pirinç kabuğunun çeşitli uygulama alanları vardır. Kırsal bölgelerde kış mevsiminde ısı gereksinimini karşılamak üzere sobalarda yakıt olarak, çelik sanayisinde çelik üretimi sonunda çeliğin soğumasının yavaşlatılmasında, özellikle Mısır, Japonya ve bazı diğer ülkelerde refrakter malzeme ve izolasyon malzeme üretiminde pirinç kabuğundan yararlanır. Ayrıca pirinç kabukları havasız ortamda yakılarak aktif karbon elde edilebilir ve sanayide renk, koku giderici olarak kullanılmaktadır (Yıldız ve diğ., 2007).

PK Külü kerpiç blokların ve tuğlaların yapımında da kullanılmıştır. 1924 yılında, PK Külününbetonda kullanımına dair Almanya'da iki patent alınmıştır. 1950 - 1960 yılları arasında da Pakistan'lı Ahsanullah ve arkadaşları çimento/kül oranı 1:5 - 1:20 arasında değişen karışımlarla portland çimentolu bloklar yapmışlardır. Ancak, PK Küllerinin puzolanik özellik gösterebilmesi ve puzolanik özellikli küllerin çimento ve beton yapımında kullanılmalarına dair araştırmalar, 1970'li yılların sonlarına kadar yapılmamıştır. ABD-Berkeley'deki Kaliforniya Üniversitesinin öğretim üyelerinden Mehta, puzolanik özellikli pirinç kabuğu elde edilebilmesi için kontrollü yakma fırınının tasarlanmasında ve pirinç kabuğu katkı maddesi olarak kullanılabilmesinde öncü isim olmuştur (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

PK Külünün betonda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalarda: PK Külünün puzolanik reaktivitesinin taze beton karışımlarında terleme ve segregasyonda azalma meydana getirerek işlenebilirlikte önemli derecede iyileştirmeye sebep olduğu, ancak eklenen miktarlarının artması ile işlenebilirliğin olumsuz etkilendiği bu durumun da süper

akışkanlaştırıcı kullanımı ile iyileştirildiği; PK Külünün çimento hamuru içerisinde birçok C-S-H jeli oluşturarak ve agrega ara yüzey geçiş bölgesinde olumlu etki yaratarak gözenekli yapıda önemli derecede azalma meydana getirdiği gözlenmiştir. Dolayısıyla PK Külünün yüksek dolgu etkisi ile betonun geçirimsizliğinin azalmasına, beton bünyesindeki çeliğin korozyonunu engelleyerek ve donma-çözünmeye karşı iyi bir direnç sağlayarak beton durabilitesinde olumlu bir etki gösterdiği ve betonun yüksek dayanıma ulaşmasına yardımcı olduğu yapılan araştırmalar ile ortaya konmuştur.

Endüstriyel atıkların betonda kullanılabilirliği ile ilgili araştırmalar yurt dışında mevcut olduğu gibi yurt içinde de mevcuttur ve ülkemizde özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bir diğer endüstriyel atık olan PK Külünün betonda kullanımı ile ilgili ülkemizde çok fazla araştırma görülmemektedir. Ülkemizde de atık olarak açığa çıkan PK Küllerinin çevre ve enerji kaynakları yönünden değerlendirilerek, beton üretiminde kullanımı sağlanmalı, ayrıca insan sağlığı yönünden de bir değerlendirme yapılarak diğer endüstriyel atıkların yerine kullanılabilirliği araştırılmalıdır. Ülke genelinde PK Külünün beton üretiminde kullanımının yaygınlaşabilmesi için PK Külünün farklı yanma sıcaklıkları altında gösterdiği puzolanik reaktivitesi hidrasyon gelişimleri ile incelenmeli, taze betonun priz süreleri ve sertleşmiş betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmalıdır.

Bu araştırmanın amacı, endüstriyel bir atık olan PK Külünün çimento numunelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırarak beton basınç dayanımını arttıracak uygun beton karışımları sunmak, çevre ve enerji kaynaklarının korunmasını sağlamaya yönelik alternatif endüstriyel bir ürün ortaya koymaktır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ÇİMENTO

Çimento ana başlığı altındaki bölüm, çimentonun yapısı, özellikleri, üretimi ve çimento hidratasyonu hakkında bilgileri içermektedir.

2.1.1. Çimentonun Tanımı

Çimento, su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur oluşturan, sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, aynı zamanda betonun en önemli hammaddesi olan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır (TS EN-197-1, 2002).

Çimento sözcüğü, yontulmuş taş anlamındaki Latince “Caementum” sözcüğünden türetilmiştir. Çimento inşaat teknolojisine göre yapı malzemeleri grubuna dahil edilen bir inşaat malzemesidir. Çimentoya özelliklerini kazandıran iki önemli öğeden biri hammadde bileşimi, diğeri ise klinkerin ısısal işlemleridir. Klinker bileşimi, esas olarak hammadde karışımının kompozisyonuna sıkı sıkıya bağlıdır. Ayrıca kullanılan yakıt cinsi ve yakıt içerisinde kül meydana getiren maddeler de klinker bileşimini etkileyen faktörlerdir (Dayı, 2006).

Çimentonun temel ham maddeleri, kireç taşı ve kildir. Çimento üretimi kompleks bir işlem olması ile birlikte büyük tesislere ihtiyaç duyulmaktadır. Silisin, alümin ve demir oksitle birleşme özelliği vardır. Çimento üretiminde amaç, bu maddeleri belirli oranlarda karıştırmak ve yüksek sıcaklıkta (1350-1500°C) pişirmektir. Kireç taşından CaO, kilden SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ meydana gelir. Bu maddeler yine yüksek sıcaklıkta aralarında birleşerek çimentoya 4 bağlayıcılık özelliği kazandıran silikat ve alüminatları meydana getirirler. Çimento üretiminde hammadde olarak, klinkere % 3-6 oranında alçı taşı (CaSO₄.2H₂O) katılır. Klinker ve alçı taşı birlikte öğütülür. Alçı taşının görevi, çimentoda priz süresini ayarlamaktır. Klinkere öğütme sırasında katkı maddesi olarak % 2-3 gibi az bir oranda, kireç taşı da katılmaktadır. Kireç taşı klinkerden daha kolay öğütülebilen bir malzemedir. Böylece klinker daha iri, kireç taşı taneleri daha küçük

olur ve taneler arasındaki boşlukları doldurarak çimentonun mukavemetini ve işlenebilirliğini arttırır, kolay yayılmasını sağlar (Dayı, 2006).

2.1.2. Çimentonun Tarihçesi

Medeniyetin başlangıcından bu yana insanoğlu tasları ve tuğlaları bir arada tutacak malzeme bulmaya çalışmıştır. Eski çağlarda dahi bu tip bir malzemenin yapıda çeşitlilik ve esneklik getireceği açıktı. Kullanılan en eski bağlayıcılardan biri “çamur” dur. Bugün hala çamurla saman veya diğer bitki fiberleri karıştırılarak bağlayıcı kapasiteleri artırılmış yapı blokları ve parçaları dünyanın çeşitli bölgelerinde kullanılmaktadır. Mısırlılar alçıtaşı harcını Cheops Piramitlerinin (~300 BC) yapımında kullanmışlardır (Yeğınobalı, 2001).

Yunanlılar ve Romalılar kil içeren kireç tasının kalsinasyonundan hidrolik kireci üretmişlerdir. Dahası belli volkanik birikintilerin ince olarak öğütölüp kum ve kireçle karıştırıldığında yalnız normal kireç harcından daha dayanımlı değil ayrıca suya dayanıklı olduğunun farkındaydılar. Fakat 18.yüzyıla kadar bağlayıcı maddelerin doğası anlaşılammıştır. Birkaç öncü çabadan sonra, Joseph Aspdin adında bir Leeds müteahhidi PÇ'nin patentini 1824 yılında almıştır. Bundan sonra hidrolik bağlayıcıların kullanımı tüm Avrupa ve Kuzey Amerika'da yayılmış, bu sayede de PÇ'nin üretiminde kullanılan ekipmanlarda gelişmeler olmuştur (Yeğınobalı, 2001).

Döner fırındaki ilk gelişmeler 1877 yılında İngiltere'de başlamış ve Fredrick Ransome patentini 1885'de aldığı ilk döner fırınla birlikte anılmıştır. Ransome'nin fırını o devirdeki çimento dünyasında devrim niteliğinde olsa da işlevsel döner fırın uzun yıllar sonra üretime girmiştir. Ransome'ın keşfinden birkaç sene sonra bazı öncü Amerikan mühendisleri döner fırını çocukluk çağından çıkarmışlardır. Amerika'daki ilk ekonomik döner fırın Hurry ve Seaman Atlas Çimento Fabrikası tarafından 1895 yılında üretime girmiştir (Yeğınobalı, 2001).

PÇ'nin üretiminin artmasıyla çimento ve hammaddelerinin özelliklerinin belirleme ve deney çalışmalarına başlanmıştır. Çok sayıda deneyden sonra temel çimento deneylerine 1900 yılında standart getirilmiş ancak o devirden bu yana bir kaç tanesi revize edilmiş ve tüm dünya da çimento standartlarına yenileri eklenmiştir (Yeğınobalı, 2001).

2.1.3. Çimento'nun Ana Hammaddeleri

Çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeler; aynı zamanda jeolojide sedimenter kayalar olarak bilinen, kalker (kireçtaşı), kil veya marndır. Klinker üretiminin ana bileşenleri olan CaO için kalker; SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ için de kil mineralleri temel kaynaklardır. Analizlerde Fe₂O₃ oranının düşük olduğu durumlarda uygun olan oranda demir cevheri de ilave edilmektedir. Marn gibi bu dört oksidi bünyesinde bulunduran malzemeler de çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır (Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Raporu, 2001).

Bu bileşenlerin istenilen oranlarda tek bir hammaddede bulunması nadirdir. Bu sebeple genellikle yüksek kireç içeren bir bileşen (kalker) ile düşük kireç, buna mukabil daha çok silis, alüminyum ve demir oksit içeren bir bileşenin (kil) uygun karışımının seçilmesi gerekmektedir. Bu iki ana bileşen genellikle kalker ve kil veya kalker ve marndır (Atar, 2006).

Çimento üretiminde kullanılacak olan hammaddelerin uygunluk dereceleri, onların kimyasal bileşimleri ile orantılıdır. Hammadde karışımında CaCO₃ içeriğinin genellikle % 75-79 arasında kalmasına ve bunun mümkün olduğunca sabit tutulmasına çalışılır. Çünkü CaCO₃ içeriğindeki küçük bir değişiklik, klinkerdeki dikalsiyum silikat ile trikalsiyum silikat yüzdelerinin değişmesine ve çimento mukavemetinin önemli derecede sapmasına yol açmaktadır (Atar, 2006).

2.1.3.1. Kalker

Kalker; doğada kalsiyum karbonat olarak bulunmaktadır. Klinkerdeki CaO, ağırlıklı olarak bu bileşenlerden sağlanmaktadır. Kimyasal bileşiminde en az % 90 CaCO₃ (kalsiyum karbonat) bulunan kayalara kalker ya da kireç taşı, doğada saf halde bulunan tipine ise kalsit denilmektedir. Kalkerler doğada kalsit ve aragonit kristallerinden oluşmuş bir kayaç olarak bulunduğu gibi Ca.Mg(CO₃)₂ şeklinde dolomit olarak da bulunur (Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Raporu, 2001; Mumcu, 2005).

Kalkerin mineralojik incelemesinde saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluştuğu görülür. Kalkerin sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı 2,5-2,7 gr/cm³ arasındadır (Dayı, 2006).

2.1.3.2. Kil

Çimento üretiminin ikinci derecede önemli temel hammaddesidir. Kil, mineralojik bileşiminde % 90'a kadar kil mineralleri bulunan kayaç olarak tanımlanmaktadır. Kil terimi, endüstriyel alanda kesin sınırlarla saptanarak tanımlanamamasına rağmen hammadde olarak çeşitli alanlarda çok geniş kullanımı vardır. Kil minerallerinin temel özelliği, kimyasal bileşimlerinde alüminyum oksit (Al_2O_3) bulunması ve sulu alüminyum silikatlardan meydana gelmiş olmasıdır (Koçak, 2008).

Yapılan araştırmalarda killerin genel özellikleri 3 grupta incelenmiştir;

- Islandıkları zaman plastiklik özelliği kazanarak istenilen şekli alabildikleri,
- Sularını kaybettiklerinde rijitleştikleri, ancak tekrar ısladıklarında tekrar plastiklik özelliği kazandıkları,
- Pişirildiklerinde rijit bir bünye yapısı kazandıkları, tekrar ısıtıldıklarında artık plastik özellik kazanamadıkları açıklanmıştır (Ulusoy, 2008).

Bunlarda önemli olanları kaolinit grubu kil mineralleri ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) ve montmorillonit grubu kil mineralleridir ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \cdot nH_2O$) (Koçak, 2008).

Çimento hammaddesi olarak kullanılacak kilin kimyasal ve mineralojik yapısının analizlerinin yapılması gerekir. Killerin kimyasal analizinde Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , SO_3 ve kızdırma kaybı yüzdeleri belirlenir. Mineralojik analizlerde ise, kil minerallerinin dışında bulunan safsızlıkları oluşturan unsurlar ve % miktarları tespit edilir (Yalçın ve Gürü, 2006).

2.1.3.3. *Marn*

Doğada bulunan, % 50-70 oranında kalker ve % 30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayalara marn denilmektedir. Yeryüzünde yaygın olarak bulunduğu için çimento hammaddesi olarak çok kullanılmaktadır. Çimento klinkeri ortalama % 70 kalker ve % 30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğu için ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay öğütülebilmekte, kırma-öğütme işlemleri sırasında enerji tüketimi düşük olmaktadır (Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Raporu, 2001; Yalçın ve Gürü, 2006).

2.1.3.4. *Alçı Taşı*

Kurak iklim bölgelerinde çökelmiş tortul kütleler arasında, kil ve marn yatakları içinde yahut yakınında bulunan bir mineraldir. Sertliği 2.0 – 2.4 Mohr; özgül ağırlığı 2.2 – 2.4 g/cm³, kimyasal formülü CaSO₄.2H₂O dur. Son yıllarda doğal alçı taşı yerine, ek olarak termik santrallerin baca gazından kükürt arıtma tesislerinden açığa çıkan alçı da kullanılmaktadır (Yeğinoğlu, 1999).

2.1.4. **Çimento Hammadde Kompozisyonu**

PÇ üretiminde kullanılan hammaddeler başlıca dört bileşeni içermektedirler. Bunlar CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃'dür. Genellikle iki hammaddenin (kalker ve kil) karıştırılması ve bu karışıma küçük miktarlarda düzeltici malzemenin ilavesiyle çimento üretimine uygun hammadde karışımları elde edilmektedir. Fırına verilmek üzere hazırlanmış olan bu hammadde karışımlarına "Farin" adı verilmektedir. Çimento üretiminde mümkün olduğu kadar az sayıda bileşik ile çalışma tercih edilmektedir. Bu gerek işletmecilik gerek verimlilik açısından önem arz etmektedir. Ancak, doğada çimento hammaddesi için ideal olan kompozisyonda tek başına bir bileşik bulmak mümkün değildir. Bu nedenle, marn-kalker, kalker-kil veya marn-kalker-kil karışımları ile istenilen bileşim sağlanmaktadır (Targan, 2002).

Çimento hammaddesi kompozisyonunun hesaplanmasındaki amaç, döner fırından elde edilen klinkerin istenilen kimyasal ve mineralojik kompozisyonda olmasını sağlamaktır.

Çimento üretimine uygun bir hammadde karışımı hazırlamak için kullanılan kil ve kalkerin karışım oranları, bir takım kimyasal modüllere bağlı olarak belirlenmektedir. Üretilen PÇ'nin fiziksel özellikleri ve özellikle mukavemet değerleri büyük ölçüde fırına beslenen farinin kimyasal bileşimine bağlıdır. Bunun için farini oluşturan bileşenler belirli oranda olmalıdır. Klinker içinde bulunan ana bileşenler arasındaki oranlar; başta kireç doygunluk faktörü (LSF) olmak üzere silikat modülü, hidrolik modül ve alümin modülü ile kontrol edilir (Yalçın ve Gürü, 2006). Bu modüller aşağıdaki formüllerle tanımlanmaktadır.

2.1.4.1. Silikat Modülü

Silikat Modülü (SM), fırın içinde katı fazın sıvı faza oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2.1)$$

Karışım içinde bulunan silis yüzdesinin, alüminyum oksit ve demir oksit toplamına oranı ile de ifade edilen silikat modülü için ideal bir oran vermek çok zordur. Genellikle silikat modülü kullanılan hammadde cinsine göre 1,2-4 arasında değişik değerler alabilir. Genel olmamakla beraber tercih edilen silikat modülü 2-2,5 arasındaki değerlerdir. Silikat modülü, farinin fırın içindeki durumunu ve klinker kalitesini etkilemesi açısından en önemli parametrelerden biridir. Silikat modülü değerinin yüksek olması, döner fırında yanma işlemlerinin yetersiz olmasına, daha fazla yakıt kullanımına, sinterleşmenin güç olmasına ve daha yüksek ısılarda pişirme gereğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da elde edilen çimentonun yavaş priz almasına ve geç dayanım kazanmasına neden olmaktadır (Yalçın ve Gürü ,2006; Targan, 2002).

2.1.4.2. Hidrolik Modülü

Portland çimentosu içinde bulunan bazı karakterli oksit olan kireç yüzdesi ile diğer asit karakterli oksitler, silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit yüzdeleri arasında hidrolik modül (HM) denilen bir bağıntı vardır. Bu bağıntı aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir ;

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2.2)$$

Hidrolik modül genellikle 1,7-2,3 değerleri arasında sınırlandırılmaktadır. Kaliteleri iyi olan çimentolarda çoğunlukla hidrolik modülün 2 civarında olduğu görülmüştür. Hidrolik modülü 1,7'den küçük olan çimentoların, çoğunlukla dayanım değerlerinin yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Hidrolik modülü 2,4 ve daha yüksek olan çimentoların ise hacimsel stabilitelerinin (dengelerinin) oldukça kötü olduğu görülmüştür (Yalçın ve Gürü, 2006).

Hidrolik modül değeri arttıkça klinkerin pişmesi için gerekli sıcaklık değeri, elde edilen çimentonun erken dayanımı ve hidrasyon ısı artmakta, kimyasal etkilere karşı direnci azalmaktadır (Targan, 2002).

2.1.4.3. Alümin Modülü

Alümin modülü (AM) çimento içinde bulunan alüminyum oksit yüzdesinin, demir oksit yüzdesine oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki formülle ifade edilir (Yalçın ve Gürü, 2006).

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (2.3)$$

İyi kalitede bir klinker elde etmek için ve en ekonomik sinterleşmeyi sağlamak için alümin modülü 1,3-1,6 arasında olması istenir. Alümin modülünün düşük olması, çimento bileşiklerinin düşük ısılarda oluşumunu sağlamaktadır. Dolayısıyla fırında daha az yakıt harcanmasına neden olur. Bu modülün yüksek olması durumunda pişme güçleşmekte ve yakıt sarfiyatı fazla olmaktadır. Genellikle demir, çimento bileşiklerinin oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Demir oranının yüksek olması sert ve yoğunluğu fazla bir klinker oluşturmakta ve dolayısıyla öğütmede zorluklara neden olarak üretim maliyetini artırmaktadır (Mumcu, 2005).

2.1.4.4. Kireç Doygunluk Faktörü

PÇ içinde hangi miktarda kalsiyum oksit bulunması gerektiği teorik olarak hesaplanabilmektedir. Eğer çimento içinde bulunan bütün silisyum dioksitin C₃S olarak, bütün demir oksitin eşdeğer miktardaki alüminyum oksitle C₄AF olarak ve artan alüminyum oksitin de C₃A olarak bağlandığı kabul edilirse, klinkerdeki kireç doygunluğu tam olarak gerçekleşmiş olur. Bu kabullere göre çimento içinde bulunan

silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit tarafından bağlanan maksimum kalsiyum oksit miktarı teorik olarak hesaplanabilir (Yalçın ve Gürü, 2006).

Eğer alüminyum modülü <0,64, yani molar olarak $Fe_2O_3 > Al_2O_3$ ise bu durumda bütün Al_2O_3 , klinker içinde C_4AF halinde bulunur. Bu durumda klinker içindeki maksimum kireç ve kireç doygunluk faktörü (LSF) için aşağıdaki bağıntılar verilebilir (Koçak, 2008).

$$LSF = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad (2.4)$$

Çimento üretimi için uygun olan hammadde karışımındaki kireç doygunluk faktörü 0,85-0,90 arasındadır (42). LSF oranının 1'in üstünde olması çimentoda serbest kireç bulunduğunu ifade eder. Bu oran alit (C_3S) ve belit (C_2S) oranından etkilenmektedir. Serbest kirecin sabit değerlerine karşılık artan LSF değeri, belit aleyhine alit miktarının artmasına sebep olmaktadır (Koçak, 2008).

2.1.5. Çimento Hidratasyonu

Çimentoyu oluşturan klinker bileşikleri, kimyasal potansiyel olarak aktif durumdadır aynı zamanda su ile kolaylıkla reaksiyona girerek çözünür. Daha sonra çözeltide hidroliz reaksiyonları meydana gelir. Çimentoların su ile yaptıkları bu kimyasal reaksiyonlara hidratasyon denir (Yalçın ve Gürü, 2006).

Oldukça iri taneciklerden oluşan çimento su içinde yavaş yavaş çözünmekte ve hidrate hale gelerek tane yüzeyini jel halinde kaplamaktadır. Bu yüzden reaksiyona girmemiş klinker bileşiklerinin su ile etkileşimi önlenmiş olmaktadır. Aynı zamanda çözeltiye geçen klinker bileşiklerinin su ile teması önlenmektedir. Doygun hale gelen klinker bileşikleri, çözünme hızını yavaşlatmakta ve hidratasyon hızının zamanla azalmasına neden olmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2006).

Çimento bileşiklerinin tam olarak hidrate olması için uzun bir süre gerekmektedir. Örnek olarak; 28. hidratasyon gününde tanecik yüzeylerinde hidratasyon penetrasyon

derinliği 4 μm , 1 yıl sonunda ise 8 μm kadardır. 50 μm çapında bir klinkerin tam olarak hidrate olması için yaklaşık 5 yıl gerekmektedir (Yalçın ve Gürü, 2006).

Hidratasyon sırasında önce plastik kıvamda imento hamuru oluşmaktadır. Daha sonra oluşan hamur priz başlangıcında plastikliğini kaybetmekte, priz sonu ile de sertleşmekte ve dayanım kazanmaya başlamaktadır (Koçak, 2008).

2.1.5.1. C_3A Ana Bileşenin Hidratasyonu

C_3A , su ile en hızlı reaksiyona giren imento bileşenidir ve çok yüksek ısı açığa çıkar. İlk olarak C_4AH_{14} ve C_2AH_8 gibi ürünler elde edilmektedir. Ancak bu ürünler kararlı bir yapıda olmadığı için $C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6$ (hidrogarnet) denklemi elde edilebilir. Bu esnada ani priz meydana gelmekte ve işlenebilme özelliğinin olmamasına yol açmaktadır. Katılaşan imento hamurunda çatlaklar görülmektedir ve fazla dayanım elde edilememektedir. Bu reaksiyonu yavaşlatmak amacıyla alçı taşı klinker ile birlikte gtlmektedir (Yeğinobalı, 1999; Aruntaş, 1996).

Alılı ortamda C_3A 'nın hidratasyonu ile $C_3A + 3\bar{C}S\bar{H} + 26H \rightarrow C_6\bar{A}\bar{S}_3\bar{H}_{32}$ (etrenjit) reaksiyonu gelişir. Etrenjit kısa iğneler şeklinde kristalleşmekte ve hacim genleşmesi meydana getirmektedir. İleri yaşlarda imento içinde monosülfat bulunur. Etrenjit oluşumu sırasındaki hacim genleşmesi imento hamuru henüz plastikken meydana geldiği için bir sakınca oluşurmamaktadır. Ancak betonun sertleşmesinden sonra sülfatlar ortama girerse monosülfat hidrat tekrar etrenjite dnşirse hacim genleşmesi olmakta ve betonda çatlamalara yol açmaktadır (Yeğinobalı, 1999).

2.1.5.2. C_4AF Ana Bileşenin Hidratasyonu

Gerçekte C_2A ve C_2F katı eriyiğinin ortalama bileşiği olan C_4AF 'nin hidratasyonu, hidratasyon hızı daha az olmakla birlikte C_3A 'nın hidratasyonuna benzer. C_3A 'nın hidratasyonundaki bir kısım alüminanın yerini demiroksit almaktadır. Hidratasyon reaksiyonu sonunda alçı bulunmadığı ya da belli bir değerin altında olması halinde hidrogarnet ($C_4AF + (6+n)H \rightarrow C_3AH_6 + CFH_2$) oluşmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2006; Erdoğan, 2010).

Çimento retiminde alçıtaşı kullanılmadığı veya gereğinden az kullanıldığı takdirde, C_4AF ana bileşenin göstereceği hidratasyon, C_3A ana bileşenin hidratasyonu kadar

şiddetli olmasa bile oldukça hızlıdır ve açığa büyük miktarda ısı çıkaran türdendir. C_3A oranı düşük, C_4AF oranı yüksek olan çimentolarla yapılan betonların sülfat hücumlarına oldukça dayanıklı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun sebebi tam olarak bilinmemekle birlikte, demir iyonu içeren kalsiyum-alümino-monosülfat ürünlerinin, sülfatlı ortamda etrenjit haline dönüşmediği düşünülmektedir (Erdoğan, 2010).

2.1.5.3. C_3S ve C_2S Ana Bileşenin Hidratasyonu

Çimentonun yaklaşık % 75'ini oluşturan kalsiyum silikatların hidratasyonları sonucu lifli düzensiz yapı ile örgü yapı arasında değişen bir dizi hidrat meydana gelmektedir. CaO/SiO_2 oranları ve kristal suyu miktarları değişmekle beraber fiziki yapıları boşluklu bir rijit jel olarak birbirine benzeyen bu hidratlar, C-S-H veya Tobermorit jeli olarak adlandırılır (Yeğinoğlu, 1999). C-S-H jelleri zayıf kristalli koloidal parçacıklardan oluşmaktadır (C-S-H kristalleri tipik olarak $1 \times 0,1 \times 0,01 \mu m$ 'den daha küçüktür). Lif şekilli bu kristallerin dağılımında bir düzen yoktur. Elektron mikroskopla incelendiğinde C-S-H jelleri üzerinde küçük dikenleri olan bir kese görünümündedirler. C-S-H jellerinin yapısının bir parçası olarak koloidal tabakada adsorbe durumunda su yer almaktadır. Katı koloidal tabakalarının arasında çok küçük boyutlu jel boşlukları bulunmaktadır (Erdoğan, 2010).

2.1.5.4. Hidratasyon Isısı ve Priz

Çimentoyu oluşturan minerallerin her birinin su ile verdiği kimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısıların toplamına "hidratasyon ısı" denir. Hidratasyon ısı cal/g veya J/g birimiyle ifade edilir. Bir normal PÇ'nin toplam hidratasyon ısı yaklaşık $120 cal/g$ ($500 J/g$)'dir (Erdoğan, 1995).

Çimento bileşenleri tam bir kimyasal dengeye ulaşmadan katılaştıklarından yüksek enerjiye sahip olup su ile reaksiyonları ekzotermiktir, yani hidratasyon ısı açığa çıkmaktadır. Hidratasyon süresince çimentonun kimyasal bileşimine de bağlı olarak ısı yayılımı, priz süresi ile ilişkilendirilebilir. Çimento bileşenlerinin hidratasyonları birbirinden tamamen bağımsız olmamaktadır. Sülfat iyonları kalsiyum alüminatların hidratasyonunu geciktirirken, kalsiyum silikatların hidratasyonunu hızlandırmaktadır. Diğer oksit ve gayri saflıklar da bu dört ana bileşenin hidratasyonunu etkilemektedir. Buna rağmen ilk birkaç günde hızlıdan yavaş doğru C_3A , C_3S , C_4AF ve C_2S olarak sıralanabilmektedir (Yeğinoğlu, 1999).

Hidratasyon ısısı beton teknolojisinde hem yararlı hem de zararlı olabilmektedir. Soğuk havalarda kimyasal reaksiyonlara yardımcı olarak priz ve dayanım kazanmanın normal sürelerde yer almasına katkıda bulunmaktadır. Sıcak havalarda ise taze betonda kıvam kaybını hızlandırmaktadır. Kütle betonlarında havaya açık dış yüzeylere oranla iç bölgelerde ısının yükselmesi, sıcaklık farklarından dolayı ısıl gerilme ve çatlamalara neden olabilmektedir (Yeğınobalı, 1999).

Çımentonun hidratasyonu ile ilgili aşamalar çımentonun bileşimine ve iç yapısına ilaveten başka faktörlerden de etkilenmektedir. Ortam sıcaklığındaki artış reaksiyonları hızlandırmaktadır. Çımento inceliği doğal olarak hidratasyona yardımcı olmaktadır. Bazı araştırmacılara göre 25 μm 'den iri taneler yıllar sonra bile tamamen hidrate olmamaktadır. Jel teşekkülü için gerekli miktarın üzerindeki yoğurma suyu katılma ve dayanım kazanma sürelerini uzatmaktadır. Bayat çımentolar da genellikle geç priz almaktadırlar.

Çımento hamurunda priz başlangıcı ve sona erişi göreceli kavramlar olup deney metoduna göre değişebilmektedir. Ancak, hemen hemen bütün ülkelerde bu amaçla vicat metodu uygulandığından bir görüş birliği oluşmuştur. Beton teknolojisinde priz süreleri önemlidir. Taze beton priz başlangıcından sonra işlenebilirliğini kaybetmektedir. Diğer taraftan prizin zamanında biterek betonun sertleşip dayanım kazanması beklenmektedir. Bu nedenlerle standartlarda genellikle prizin en erken 45-60 dakikadan sonra başlaması ve en geç 8-10 saat içinde sona ermesi öngörülmektedir. Dolayısı ile klinker bileşimine bağlı olarak katılacak alçı miktarına dikkat edilmesi gerekmektedir (Yeğınobalı, 1999).

Priz sırasında yalancı priz ile karşılaşılabilir. Klinkerin yeterince soğumadan alçı taşı ile öğütülmesi sırasında, alçı taşı kısmen kristal suyunun bir bölümünü kaybederek normal alçıya dönüşebilir. Bilindiği gibi normal alçı 5-10 dakika içinde priz yapmakta ve katılmaktadır. Katılan çımento hamuru karıştırıldığında tekrar plastik kıvama dönüşüyorsa bunun gerçek priz değil, yalancı priz olduğu anlaşılmalı ve bir sakınca teşkil etmemektedir (Yeğınobalı, 1999).

2.2. PUZOLANLAR

Puzolanlar çok yüksek sıcaklıkta ergime durumuna gelmiş silikatlar ve alimino silikatların ani soğumaları sonucu amorf bir yapıya dönüşmesi ve puzolanik aktivite kazanması sonucu oluşmuşlardır. ASTM C618' e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, ancak uygun su içeriğinde ve normal ortam sıcaklığında kireç ile kimyasal reaksiyona girip, bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli ve/veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denilmektedir (Alkaya, 2009).

Puzolanlar, fiziksel, minerolojik ve kimyasal açıdan benzerlik gösterse de kimyasal bileşimleri açısından karşılaştırıldığında puzolanlar silikat (SiO_2) esaslı iken, portlant çimentosu CaO esaslıdır. Bu nedenle puzolanların büyük kısmı kendi başına bağlayıcı özelliğe sahip değildir. Bu nedenlerle ikincil bağlayıcı maddeler olarak anılırlar (Alkaya, 2009).

Puzolanlara örnek olarak, uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, tras, silis dumanı gösterilebilir. Bu puzolanların kullanımı yalnızca ekonomik değil, teknik olarak da büyük yararlar gösterir ve birçok beton özelliğini etkiler. Puzolanik malzemelerin betonda iki önemli etkisi vardır: 1) Puzolanik etki, 2) Filler etkisi (boşlukları doldurma etkisi). Bazı araştırmacılara göre filler etkisi puzolanik etkiden daha önemlidir (Şengül ve diğ., 2007).

2.2.1. Puzolanların Tarihçesi

Volkanik külün, volkanik küllü toprakların veya pişirilmiş kilin söndürülmüş kireçle ve kumla birleştirilerek suya dayanıklı harç yapımında kullanılması işlemi binlerce yıl öncesine dayanmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Bilim adamlarının Konya-Çatalhöyük'teki Neolitik çağa ait evlerin harçları üzerinde yaptıkları araştırmalar, orada kullanılan harçların 8000 yıl eski olduğunu ortaya çıkarmıştır. Sadece kil, kireç, veya alçıdan oluşturulan harçların suya dayanıklı olmadıkları hatırlanacak olursa, oradaki harçların büyük bir olasılıkla volkanik kül içeren topraklarla yapılmış olma gerçeği elde edilmektedir. Zira, Çatalhöyük, Erciyes ve Hasandağı gibi dağların çok uzağında bir yer değildir. Girit'te, Rodos'ta ve birçok yerde

üç dört bin yıl önce yapılmış olan su yapıları ve mozaik işleri de bugün hala dayanıklılığını korumaktadır. Bu yapılarda da puzolan ve söndürülmüş kireçten oluşan bağlayıcılar kullanılmıştır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Ancak, puzolan tanımına giren malzemelere “puzolan” isminin verilmesi ve o tür malzemelerin harç ve beton yapımında yaygın olarak kullanımı, MÖ 300 yılı civarında Romalılar tarafından başlatılmıştır. Puzolanik malzemelerin bağlayıcılık potansiyelinin Romalılar tarafından keşfedilmesi ve bu tür malzemelerin pozzolana (puzolan) olarak anılmaya başlanması, Romalı ünlü mimar Marcus Vitruvius Pollio'nun MÖ 30 - MÖ 20 yılları arasında tamamladığı De Architectura Libri Decem - Mimarlık Üzerine On Kitap isimli eserinin ikinci kitabında bahsedilmektedir. Vitruvius'a göre, Romalılar, pişirilmiş kilin veya öğütülmüş tuğla veya kiremitin de puzolanik özellik gösterdiğinin bilincinde olmuşlardır. Romalılar volkanik küllü, volkanik küllü toprağı, veya pişirilmiş kili, söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirerek, su altında da sertleşebilen bağlayıcı hamur elde etmişlerdir. Bu tür bağlayıcıların içerisine taş parçaları gömerek, bugünkü betona benzer betonlar yapmışlardır. Osmanlılar zamanında yaygın olarak kullanılan “Horasan harcı” da kilden yapılan ve pişirilen tuğla, kiremit, çömlek gibi malzemelerin öğütülmüş durumdayken söndürülmüş kireçle birleştirilmesi sonucunda elde edilmiştir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

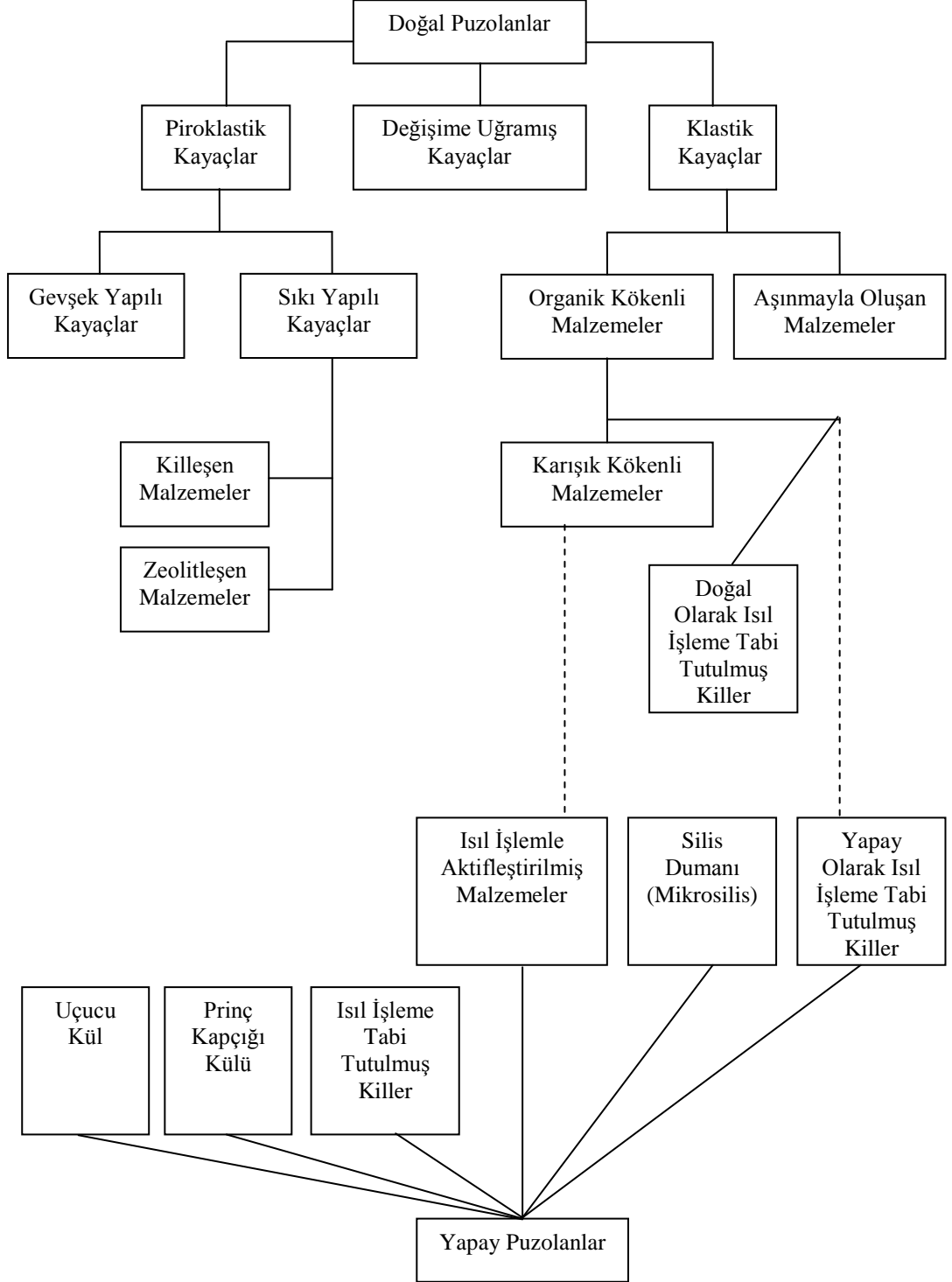
2.2.2. Puzolanların Sınıflandırılması

Günümüzde doğal ve yapay olarak bir çok puzolanik madde çimentoya doğrudan katılarak ya da bir kısmını ikame etmek yolu ile kullanılmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2006).

Doğal puzolanlar; doğadaki volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, zeolit, diatomit ve diatomlu topraklar olarak örneklenebilmektedir (Erdoğan, 2010). Doğal puzolanlar öğütmenin dışında bir işlem gerektirmezler. Yapay puzolanlar; çok az puzolanik özelliğe sahip olan veya hiç olmayan malzemelerin kimyasal ve/veya yapısal modifikasyonlarının bir sonucu oluşur (Özkan, 2010).

Yapay puzolanlar endüstriyel atıklar olup en çok tanınanları; silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufudur. Ayrıca bazı doğal malzemelerin ısıtılmasına tabi tutulması

sonucunda elde edilen puzolanik malzemeler de yapay puzolan olarak sınıflandırılmaktadır. Puzolanlar, birçok uzmana göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bunlar içerisinde popüler olan F. Massazza'nın yapmış olduğu puzolanların kökenini temel alan sınıflandırma şeklidir (Koçak, 2008). Massazza'ya göre sınıflandırma Şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1: Puzolanların sınıflandırılması(Massazza'ya göre) (Koçak, 2008).

Massazza'nın sınıflandırmasına göre doğal puzolanlar, bu sınırlandırmaya göre 3 ana gruba ayrılmaktadır. İlk grup olan piroklastik, eriyik haldeki magmanın şiddetle dışarı atılması sonucunda biçimlenmekte ve sonra hızla soğuması ile içinde gaz kabarcıkları bulunan cam gibi bir malzeme meydana gelmektedir. Bundan dolayı, bu malzemelerin kimyasal kompozisyonu yeryüzüne çıkan magmanın kompozisyonuna bağlıdır (Aruntaş, 2006).

İkinci grubu, değişime uğramış yüksek silisli malzemelerden meydana gelmektedir. Bu puzolanlar, su içinde eriyen oksitlerin ayrılması ile kimyasal değişime uğrayan genellikle açık renkli kayaların, durgun sularda farklı orijinli malzemelerle birlikte çökmesiyle şekillenirler. Bu malzemeler, genellikle puzolanik özeliği azaltan kil ile karışık olarak bulunmaktadırlar (Aruntaş, 2006).

Doğal puzolanların son grubu ise, kil ve diatomit toprağını içine alan klastik orijinlidir. Kilin puzolanik davranışının eksik olması, PÇ ikame malzemesi olarak kullanılmasına olanak vermemekle birlikte uygun sıcaklıklarda yapılan kalsinasyon, kilin puzolanik özelliğini önemli miktarda yükseltmektedir (Aruntaş, 2006).

2.2.3. Puzolanların Aktivitesi

Bir takım maddelerde var olan kalsiyum hidroksitle (Ca(OH)_2) sulu ortamda "reaksiyona girme" ve "sertleşme" kapasitesine puzolanik aktivite denir. Gerçek puzolanik aktiviteden söz edebilmek için bu iki ögenin aynı zamanda oluşması gerekmektedir. Yüksek aktiviteye sahip puzolanların aşağıdaki özelliklere sahip olduğu ampirik olarak belirlenmiştir (Dayı, 2006).

- Yüksek SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve alkali miktarı.
- Yüksek camsı faz miktarı,
- Büyük özgül yüzey.

Bir malzemenin puzolanlığının kanıtlanabilmesi için puzolanik aktivite deneyinde olumlu sonuç vermesi gerekmektedir. Bu deneyler doğal ve yapay puzolanlarda mekanik ve kimyasal deneyler şeklinde gerçekleştirilir. Mekanik deneyler; puzolan-kireç, puzolan-çimento harç örnekleri üzerinde yapılan eğilme ve basınç dayanımı

deneyleridir. Kimyasal deneyler ise puzolanlı çimentonun su ile yaptığı hidrasyon sonunda çözültide oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i saptamaya dayanır. Ayrıca puzolanların reaktivitesi spektrofotometrik ve kalorimetrik yöntemlerle de saptanabilir. Puzolanik maddeleri değerlendirmenin bir başka kriteri ise puzolan içeren çimento hamurlarındaki özgül yüzeyin artış hızını ölçmekle gerçekleştirilir. Değişik kalsiyum hidroksit - emme hızlarına, benzer özgül yüzey artış hızları karşılık gelir (Dayı, 2006).

Genel olarak, puzolanların heterojen bir yapıda olmaları ve hidrasyonun karmaşık yapısı nedeniyle puzolanik aktiviteyi açıklayıcı bir model geliştirilememektedir. Bununla beraber, bu hususta ancak genel eğilimler açıklanabilir. Bunların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir (Erdoğan ve diğ., 1999; Koçak 2008) ;

- Diğer özellikler aynı kalmak üzere puzolanın bağladığı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarının fazla olması, bu puzolanda aktif olan madde miktarının da fazlalığına işarettir.
- Bir puzolanın kısa dönemdeki aktivitesi esas olarak özgül yüzey alanına(Blaine), buna mukabil uzun dönemdeki aktivitesi ise kimyasal ve mineralojik kompozisyonuna bağlıdır.
- Bir puzolanın bağladığı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı, puzolanın aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 miktarı ile ilişkilidir.
- Belirli sınırlar dâhilinde kireç-puzolan karışımlarında, kireç/puzolan oranının artması $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bağlanmasını artırır.
- Zeolitik puzolanlar, camsı puzolanlara göre genel olarak daha aktiftir.
- Farklı puzolanlarda bulunan camsı fazlar, farklı kireç bağlayabilme yeteneğine sahiptir.
- Puzolan-kireç karışımlarında ortamda su miktarının fazla olması, bağlanan kireç miktarını artırır.

2.2.4. Puzolanik Reaksiyon Ve Reaksiyon Ürünleri

Puzolanların ince öğütülmüş halde ve rutubetli ortamda kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyonu, puzolanik reaksiyon olarak adlandırılır. Bir puzolanın CH ile davranışı, camsı bileşik miktarı ve incelik gibi puzolanın bazı özellikleri kadar, sıcaklık ve katkı malzemeleri gibi bazı dış faktörler ile de ilişkilidir (Aruntaş, 1996).

Kireç doğal puzolan tepkimesi sonucunda genel olarak kabul edilen puzolan reaksiyonlarının ürünleri aşağıda verilmektedir (Erdoğan ve diğ., 1999).

- C-S-H formunda kalsiyum silikat hidrat,
- C₄ASH_x formunda kalsiyum alüminat hidrat, (X, 9-13 arasında değişken)
- Hidrate olmuş gehlenit, C₂ASH₈
- Kalsiyum karboalüminat, C₃A.CaCO₃H₁₂
- Etrenjit, C₃A.3CaSO₄.H₃₂
- Kalsiyum alüminatmonosülfat, C₄A.CaSO₄.H₁₂

Bunlarla birlikte, bütün ürünler aynı zamanda bulunmayabilirler. Bulunmaları durumu kirecin kalsiyum hidroksit kullanılabilmesine, hidratasyon reaksiyonlarının derecesine, hidratasyon sırasında çevre koşullarına, puzolanın kimyasal ve mineralojik bileşenlerine bağlı olmaktadır (Erdoğan ve diğ., 1999; Aruntaş, 1996).

2.3. PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ

2.3.1. Pirinç Kabuğu Külünün Elde Edilişi Ve Özellikleri

2.3.1.1. Elde Edilişi

Yıllık pirinç üretimi dünyada başta Çin, Hindistan, Bangladeş ve Tayland olmak üzere, 500 milyon ton civarındadır(Çizelge 2.1.). Pirinç kabuklarının yakılmasıyla ortaya çıkan kül miktarı ise kabuk miktarının ağırlıkça % 20'si kadardır.

Pirinç Üretimi x % 20 = Pirinç Kabuğu

500 milyon ton x % 20 = 100 milyon ton

Pirinç Kabuğu x % 20 = PK Külü

100 milyon ton x % 20 = 20 milyon ton

Çizelge 2.1: Pirinç Çeltiği ve Pirinç Kabuğu İçin Dünyada Üretim Oranları(Milyon Metrik Ton)
(Hwang ve Chandra, 1997)

ÜLKE	PIRİNÇ ÇELTİĞİ	PIRİNÇ KABUĞU
Bangladesh	27	5,4
Brazil	9	1,8
Burma	13	2,6
China	180	36,0
India	110	22,0
Indonesia	45	9,0
Japan	13	2,6
Korea	9	1,8
Philippines	9	1,8
Taiwan	14	2,8
Tailand	20	4,0
US	7	1,4
Vietnam	18	3,6
others	26	5,2
TOPLAM	500	100

2.3.1.2. Farklı Yanma Sıcaklığı Altında Kimyasal Bileşimi ve Tane Özellikleri

Yüksek puzolanik aktiviteli bir kül elde edebilmek için, külün yapısındaki silis kristal olmayan durumda ve yüksek mikro gözenekli bir yapıda tutulmalıdır. Buna bağlı olarak, pirinç kabukları kontrollü olarak belli sıcaklıklarda yakılmalı ve elde edilen külün yapısı incelenmelidir.

Puzolanlar yalnız başlarına bağlayıcı özelliğe sahip olmayan fakat çimento veya kireçle karıştırıldıklarında su ile yaptıkları reaksiyon sonucu bağlayıcılık özelliği kazanan maddelerdir (Balaydın, 2005).

Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzolanlardaki “SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃” miktarının en az % 70 olması ve silika, alümina miktarının yüksek oranda olması istenmektedir. PK Külünün kalitesi külün yakma metodu ve öğütme derecesine bağlıdır. Bu da gözenekli yapının korunmasına ve yapı içerisindeki şekilsiz maddelerin boyutuna bağlıdır (Madandoust ve diğ., 2011).

Kaliteli ve puzolanik aktiviteli PK Külü elde etmek için;

- Uygun yanma ortamı
- Uygun sıcaklık
- Yanma süresi

Ankra (1975) tarafından farklı yanma sıcaklıkları altında ve zamana bağlı olarak PK Külünün yapısı ve yüzey alanını incelemek amacıyla yapılan çalışma sonucunda;

- 1 sn ve 2 saat aralığındaki sürelerde ve 500~600°C sıcaklıklarda pirinç kabuğunun yakılması ile elde edilen külün kristalleşme göstermediği ve 122 ile 76 m²/g arasında yüzey alanı değerlerine sahip olduğu,
- 1 saatin üstündeki sürelerde ve 700~800°C sıcaklıklarda pirinç kabuğunun yakılması ile elde edilen külün kısmen kristal durumda ve 100 ile 6 m²/g yüzey alanı değerlerine sahip olduğu,
- 1 saatin üstündeki sürelerde ve 800°C' nin üstündeki sıcaklıklarda pirinç kabuğunun yakılması ile elde edilen külün ise kristal durumda ve 5 m²/g dan daha küçük yüzey alanı değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiş dolayısıyla reaktif ve mikro gözenekli bir PK Külü elde etmede yanma sıcaklığı ve zamanın etkili olduğu ortaya konmuştur(Çizelge 2.2) (Hwang ve Chandra, 1997).

Çizelge 2.2: PK Külünün yüzey alanı üzerinde yanma durumlarının etkisi
(Hwang ve Chandra, 1997)

Yanma Sıcaklığı	Süre	Külün Özelliği		Ortam
		Yüzey Alanı (m ² /g)	Kristal	
500~600 °C	1 dk	122		
	30 dk	97	kristalleşme yok	orta oksitleyici
	2 dk	76		
700~800 °C	15 dk~1 sa	100	kristalleşme yok	orta oksitleyici
	>1 sa	6-10	kısmen kristal	yüksek oksitleyici
>800 °C	>1 sa	<5	kristal	yüksek oksitleyici

PK Külünün yaklaşık olarak % 95 oranında silis içerdiği, ayrıca yapısında çok küçük yüzdelerde alümina(Al_2O_3), demir oksit(Fe_2O_3), kalsiyum oksit(CaO), magnezyum oksit(MgO) ve alkalilerin de bulunmaktadır (Kamal ve diğ., 2008; Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Givi, Rashis, Aziz ve Salleh (2010) tarafından yapılan bir araştırma sonucuna göre, PK Külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.3.'deki gibi sunulmuştur.

Çizelge 2.3: PK Külünün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Givi ve diğ., 2010)

KİMYASAL ÖZELLİKLER

BİLEŞENLER	PK Külü (Wt %)		
	Mehta(1992)	Zhang ve diğ. (1996)	Bui ve diğ. (2005)
SiO ₂ (%)	87,2	87,3	86,98
Al ₂ O ₃ (%)	0,15	0,15	0,84
Fe ₂ O ₃ (%)	0,16	0,16	0,73
CaO (%)	0,55	0,55	1,40
MgO (%)	0,35	0,35	0,57
SO ₃ (%)	0,24	0,24	0,11
Na ₂ O (%)	1,12	1,12	2,46
K ₂ O (%)	3,68	3,68	-
Kızdırma Kaybı(%)	8,55	8,55	5,14

FİZİKSEL ÖZELLİKLER

Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,06	2,06	2,10
Ortalama Tane Boyutu (µm)	-	-	7,4
İncelik :45µm(%)	99	99	-

Sensale (2010) ve Yıldız ve diğ (2007) tarafından yapılan bir araştırma sonucuna göre, PK Külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.4' de sunulmuştur.

Çizelge 2.4: PK Külünün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri
(Sensale, 2010; Yıldız ve diğ., 2007)

BİLEŞENLER	PK Külü (Wt %)	
	Sensale ⁸ (2010)	Yıldız ve diğ. ¹ (2007)
SiO ₂ (%)	87,20	91,15
Al ₂ O ₃ (%)	0,15	3,84
Fe ₂ O ₃ (%)	0,16	1,87
CaO (%)	0,55	0,81
MgO (%)	0,35	0,59
SO ₃ (%)	0,32	-
Na ₂ O (%)	1,12	0,17
K ₂ O (%)	3,60	0,71
FİZİKSEL ÖZELLİKLER		
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,06	1,97
Özgül Yüzey (cm ² /g)	2880	-

2.3.2. Pirinç Kabuğu Külü Hammadde Analizleri

PK Külünün, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisinin detaylı olarak araştırılabilmesi ve puzolanik reaktivitesinin belirlenebilmesi için PK Külünün farklı yanma sıcaklıkları altında gerek ham halde gerekse çimento ile ikamesiyle hidrasyon gelişimlerinin incelenmesi gerekmektedir.

2.3.2.1. Tane Boyutu Analizi

Tane boyu analizi, cevher hazırlamanın her adımında kullanılan bir yöntemdir. Özellikle serbestleşmenin saptanmasında, kırma, öğütme, sınıflandırma ve susuzlandırma gibi birim işlemlerin tasarımında, performans analizinde veya sürecin kontrol ve anlaşılmasında başvurulan ana araçlardan biridir. Bir cevher için; boyut küçültmeden sınıflandırmaya, flotasyon veya yerçekimi gibi zenginleştirme devrelerinden tikner alt akımına, hatta elde edilen nihai ürünün niteliklerinin belirlenmesine kadar her aşamada tane boyu analizi yapmak zorunludur (Saklara ve diğ., 2000).

Tane boyu analizleri genellikle 38 mikrona kadar olan iri boylarda standart laboratuvar elekleri kullanılarak yapılmaktadır. Tane boyut analizinde esas problem standart laboratuvar elekleri ile inilemeyecek boyutların analizinin, mevcut yöntemlerden hangisi ile yapılacağıdır. Varolan yöntemler kendi içerisinde tekrarlanabilir sonuçlar vermesine rağmen, birbirleri arasında farklılıklar olmaktadır. Ayrıca, farklı yöntemlerin kullandığı fiziksel temelden kaynaklanan avantaj ve dezavantajlar da bulunmaktadır. İnce tane boyu analizinde kullanımı yaygın olan yöntemler (Saklara ve diğ., 2000);

1. Sedimentasyon Yöntemleri
 - a) Dekantasyon
 - b) Andreasen Pipet
 - c) Fotosedimentasyon
 - d) X-Işını Sedimentasyonu
2. Elütrasyon Yöntemleri
3. Mikroskop Yöntemleri
4. Mikroelek
5. Elektriksel Direnç
6. Lazer Işını Saçımını Dir.

2.3.2.2. *XRD-X Işınları Kırınımı Tekniği*

Malzemenin içerdiği fazları belirlemede, nicel faz analizinde, sıcaklık, basınç v.s. fiziksel parametrelere bağlı faz değişimlerinde, tanecik boyutu belirlemede, Tanecik yönelimi belirlemede, kimyasal kompozisyonu belirlemede, örgü sabitlerini bulmada kullanılır (Teknis Teknolojik Sistemler, 2011).

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar (Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı, 2011).

2.3.2.3. *XRF-X Işınları Floresans Spektroskopisi Tekniği*

XRF uyarılan bir numuneden yayımlanan karakteristik X-ışınlarının enerjilerine ya da dalga boylarına göre incelenerek, her türlü materyalin, kimyasal bileşenlerini belirlemek için kullanılan analitik bir yöntemdir. Kullanılan materyalin katı, sıvı, gaz veya başka

bir halde bulunmasının bir öneminin olamaması XRF' nin en önemli avantajlarından biridir. XRF' de kullanılan spektrometre sistemleri iki gruba ayrılır. Bunlar;

- Enerji Dağılımlı Sistem (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence, EDXRF) ,
- Dalgaboyu Dağılımlı sistem (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence, WDXRF) (Kavgacı, 2007).

X-ışınları ölçümleri kristale zarar vermeksizin yapısı hakkında Bütün XRF spektrometreleri temel olarak 3 ana bölümden oluşur;

- Uyarıcı Kaynak
- Numune
- Detektör

Kaynak, numuneyi uyarmak ve karakteristik X- ışınlarnın yayınlanması için kullanılır. Numuneden yayımlanan X- ışınları ise detektör yardımıyla ölçülür.

2.3.2.4. FT-IR-Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi Tekniği

Infrared tekniğinde, moleküllerdeki kimyasal bağların titreme, eğilme, bükülme, sallanma vb. tüm hareketleri için gerekli olan enerji Infrared ışınların elektro manyetik enerjisinden absorplanır. Bu absorpsiyonlar sonucu elde edilen IR spektrumları, molekül içindeki fonksiyonel grupları gösterir. Burada ölçülen absorbanslar pikler ile ifade edilir. Infrared spektrumlar genellikle dalga numarası ile tanımlanır. Burada ölçülen absorbans, konsantrasyona ve numune kalınlığına doğrudan bağlıdır. Kimyasal bağlar C-H, C-C gibi aynı miktarda aynı şekilde enerji adsorplamaz. Pikler yapılarına bağlı olarak kuvvetli, orta ve zayıf, şekillerine bağlı olarak geniş, orta ve dar olarak tanımlanır. IR spektrumları, piklerin bulunduğu yere, yapılarına ve şekillerine göre irdelenerek numunelerde malzeme cinsi tayin edilir. Pik boyu ve pik alanı ölçülerek standartlar ile karşılaştırmak suretiyle miktar tayini de yapılabilir (Sırımoğlu ve diğ.,).

Malzeme içindeki kimyasal olarak bağlı yapıların titreşimsel hareketleri infrared rejimde frekanslara sahiptir. İnfrared deneylerde radyasyon demetinin şiddeti (ışık frekansının birer fonksiyonu olarak) numune etkileşimi öncesi (I_0) ve sonrası (I) ölçülür. Frekansa karşılık I/I_0 diyagramı infrared spektrumu verir (İssi, 2005).

Bir madde monokromatik infrared ışın bandı ile aydınlatıldığında, moleküllerin titreşim hareketleri nedeniyle, infrared ışınlar az veya çok adsorbe edilirler. Deneylede dalga boyu ile adsorpsiyon arasında çizilen grafik maddenin bir karakteristiğidir ve maddenin tanımlanmasında kullanılabilir. İnfrared ışınlarının dalga boyları 1000-300000 nm arasında olmasına rağmen infrared spektroskopisinde, genellikle dalga boylan 2500-25000 nm arasında olan ışınlardan yararlanılır. Bu aralığa yakın infrared ve infrared bölgesi denir. İnfrared spektroskopisinde ışınlar dalga boyları ile değil, daha çok dalga sayılarıyla verilir. Dalga sayısı $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} (\text{cm}^{-1})$ dir. Buna göre yukardaki dalga boyları aralığı $\bar{\nu} = \frac{1}{2500} \cdot 10^{-7} = 4000 \text{ cm}^{-1}$ ve $\bar{\nu} = \frac{1}{25000} \cdot 10^{-7} = 400 \text{ cm}^{-1}$ dir.

Dalga sayılan 400 cm^{-1} den daha küçük ışınların enerjileri rotasyon (dönme) enerjileri seviyesinde olduklarından dolayı havadaki moleküller tarafından bile kolaylıkla adsorbe edilirler (Karakaya 1996; Gündüz, 1990).

Moleküler analizler Fourier transformlu kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) tekniği kullanılarak tanecik yüzeylerindeki molekül gruplarını tanımlamak için kullanılabilir. Bu amaçla yapılan çimento, katkılı çimento ve puzolanlarla ilgili çalışmalarda infrared spektrumu başlıca 4 geniş band bölgesinde değerlendirilebilir. Bunlar Si-Al, S, C ve OH titreşim ve deformasyon bağlarındaki titreşim sayılarından oluşmaktadır. Bu dalga boyundaki titreşim sayıları aralarındaki farklar bölgesel olarak değerlendirilebilir (Puertas ve diğ., 2004).

Bu bölgelerde oluşan dalga sayıları yardımıyla minerallerdeki moleküler bağ karakterizasyonu belirlenebilmektedir.

2.3.2.5. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi

Optik mikroskobun yetersiz kaldığı büyütmelede doğrudan başvuru olan inceleme yöntemidir. Taramalı elektron mikroskobunda numune üzerine gönderilen elektron demeti numune ile etkileşime girerek değişik sinyaller oluşturur. Bu sinyaller (ikincil elektronlar, geri yansıyan elektronlar, x ışınları v.b.) uygun dedektörlerle toplanarak görüntü eldesinin yanında elementel bilgi de sağlanabilmektedir (İssi, 2005).

Taramalı Elektron Mikroskobu Optik Kolon, Numune Hücresi ve Görüntüleme Sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apatürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune 10-4 Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ısımaları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır (Amalia ve diğ., 2011).

Taramalı elektron mikroskobu(Can, 1962);

- Yüzey yapılarını incelemede kullanılır
- İncelenen yapılardaki element analizi yapılabilir.
- İncelenebilecek örnek çeşitleri oldukça geniş spektrumludur.

Biyolojik ve biyomedikal, gıda endüstrisi, botanik, ziraat, zooloji ve oşinografi alanlarında kullanılır.

2.3.2.6. STA (DTA -Fark taramalı termal analiz ve TG-Termo gravimetrik termal analiz)

Thermo-gravimetrik analiz (TGA) belirli miktarda numunenin (20-25 mg) belirli bir hızda ısıtıldığında numune ağırlığında meydana gelen değişikliği ölçerek, ısı ile bozulan fazların miktarlarını tespit edebilmeye olanak tanıyan bir ısı analiz yöntemidir ve sertleşmiş çimento sistemlerindeki Ca(OH)_2 'in ölçülmesinde sıkça başvurulan bir metottur (Turanlı ve diğ, 2005-2007).

TGA, kontrol edilen oranlarda ısıtmalı olarak numunenin kütlesini ölçen bir tekniktir. Numunenin ağırlık değişimi, numunenin bileşimine, sıcaklığa, ısıtma hızına ve fırındaki gazın tipine bağlıdır (hava, oksijen, nitrojen, argon ya da diğer gazlar). Belirli bir sıcaklıktaki kütledeki değişim belirli bir kimyasal bileşiğin durumunu tanımlar. Ağırlık

değişimi büyüklüğü numunedeki bileşimin miktarını gösterir. Numunenin serbest suyu buharlaşır, numunenin kütlesi azalır, sıcaklık da oda sıcaklığından yaklaşık 100°C ye yükseltilir. Hidratasyon ürünlerinde ve özellikle alümine hidratlardaki suya bağlı olarak numune ayrıca bir miktar su kaybedecektir. 100 ile 400°C arasında, hidratasyon ürünlerinde bağlı olan su, ilk olarak C-S-H jelde, alümine hidratlardaki kalan su ile birlikte kaybolur. Yaklaşık 400°C ve 500°C arasında, kalsiyum oksit(katı) ve su buharına ayrılan kalsiyum hidroksit göreceli ağırlık farkını sağlar. Numunede başlangıçta mevcut olan kalsiyum hidroksitin ne kadar olduğunu belirlemek için bu ağırlık kaybı miktarı kullanılabilir. 500°C üzerinde, eklenen suyun küçük bir miktarı hidratasyon ürünlerinden kaybolabilir. Karbonatlı fazlar 800°C civarında karbondioksit kaybeder. Belirlenen kalsiyum hidroksit miktarı ve TGA hidratasyon derecesinin bir göstergesidir ki bir model(örnek) olarak yerini almıştır. Puzolanik reaksiyondan dolayı kalsiyum hidroksitin kaybolmasının izlenmesi ile puzolanların reaktivitesi değerlendirilebilir (Amalia ve diğ., 2011).

STA ile ilgili yapılan daha önceki termal analiz testleri PÇ, mineral katkı ve kimyasal katkı çimento harcında meydana gelen temel reaksiyonların, genel olarak aşağıdaki sıcaklık aralıklarında meydana geldiklerini göstermektedir (Koçak, 2008).

0-100 °C: Gözeneklerdeki kimyasal ve fiziksel suyun dehidratasyonu (endotermik),
100-450 °C: Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum alümina silikat hidrat (CASH, etrenjit), alüminat, alüminasilikat ve diğer hidratların dehidratasyonu (endotermik),
450-580 °C: CH (Ca(OH)₂)'in dehidroksilasyonu (endotermik),
750-825 °C: CaCO₃'in dekarbonasyonu (ekzotermik).

2.3.2.7. Pirinç Kabuğu Külü Hammadde Analizleri ile İlgili Araştırmalar

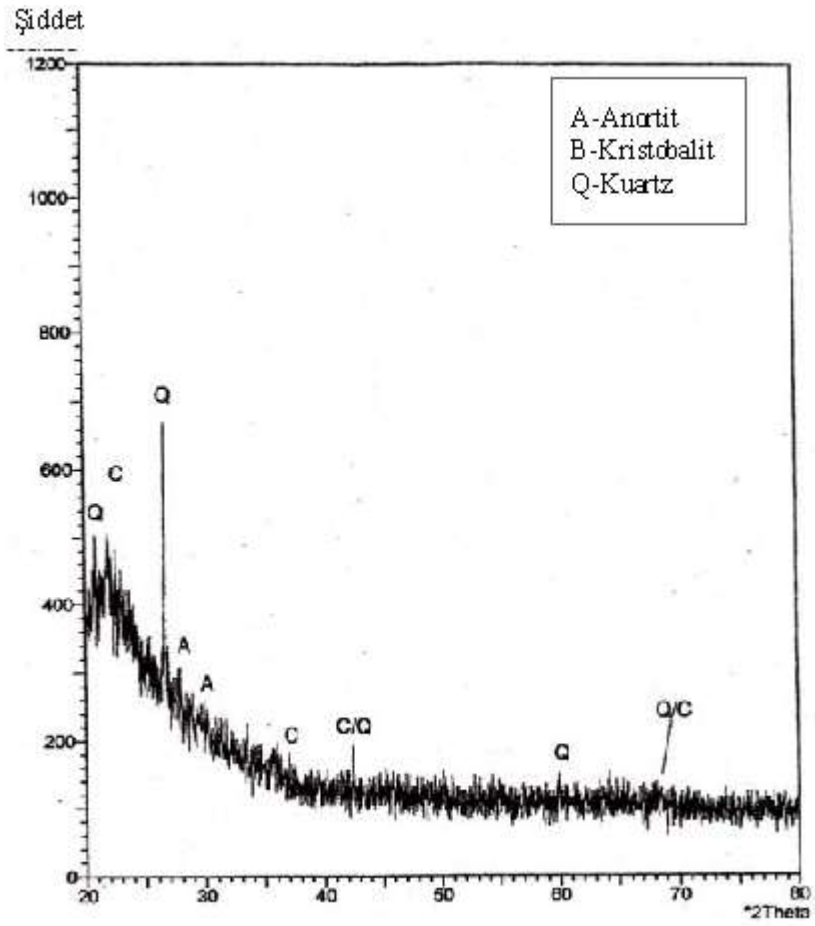
Bu bölümde PK Külünün, XRD-X Işınları Kırınımı; XRF-X Işınları Floresans Spektroskopisi; FT-IR-Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi tekniği, SEM: Taramalı Elektron Mikroskopu; STA analizi: DTA -Fark taramalı termal analiz ve TG-Termo gravimetrik termal analizleri ile incelenmesine ilişkin yapılan araştırmalar sunulmuştur.

Farooque, Zaman, Halim, Islam, Hossain, Mollah ve Mahmood (2009), Munshigonj çeltik alanında toz haline getirilen PK Külünün karakterizasyonunu ve tuğla yalıtımında kullanılabilirliğini ortaya koymak için Bangladesh deki PK Küllerinin hidrasyon gelişmelerini ve kimyasal analizlerini incelemek için yaptıkları çalışma sonucunda;

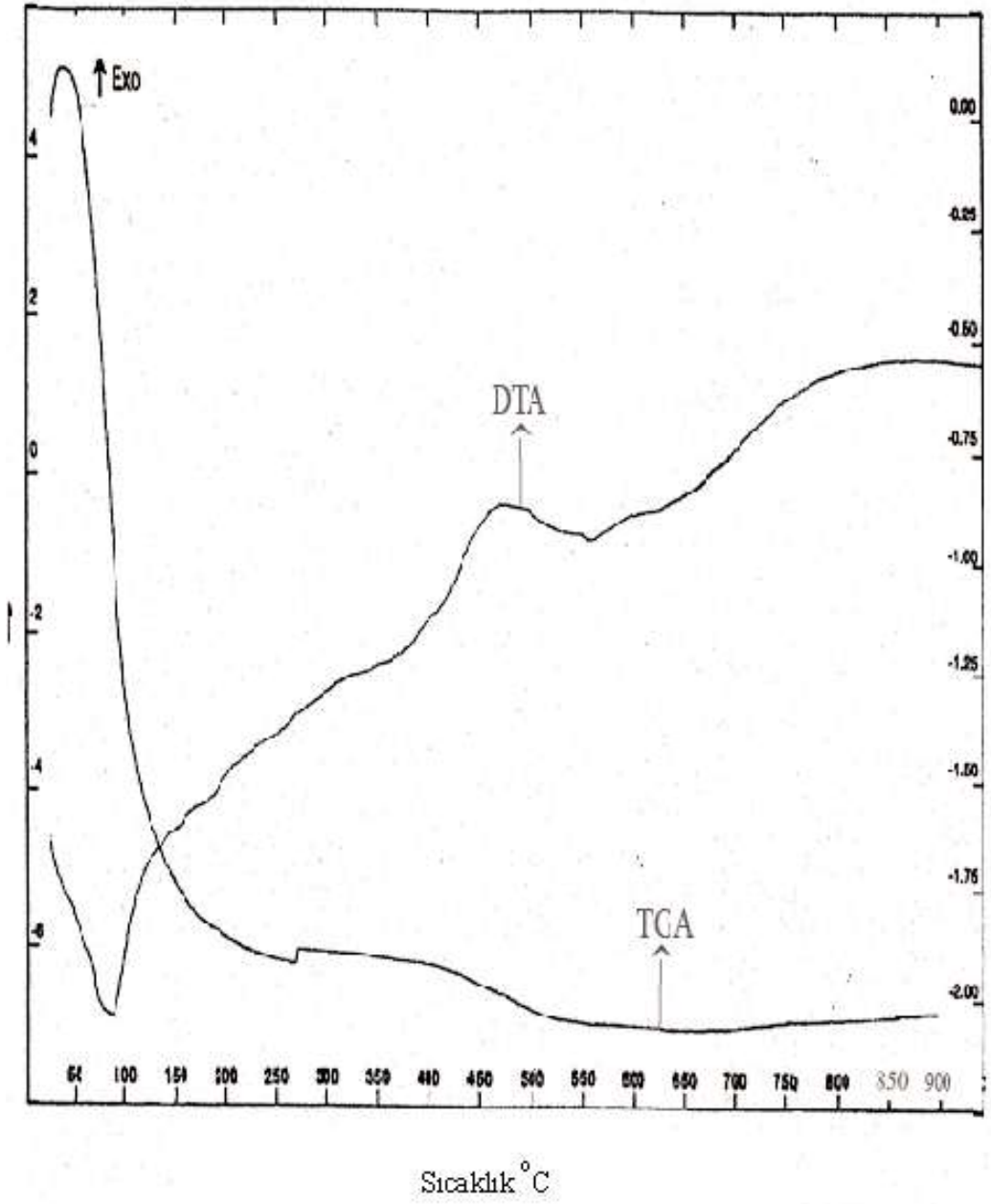
- Kimyasal analiz sonucuna göre PK Külünün küçük inorganik oksitler ile birlikte çok fazla silis içerdiği(SiO_2 (% 91.3), Al_2O_3 (% 0.3), Fe_2O_3 (% 0.12), CaO (% 0.21), MgO (% 0.31), Na_2O (% 1.52), K_2O (% 2.65), TiO_2 (% 0.15), SO_3 (% 0.24) ve % 2.7 kızdırma kaybı),
- PK Külünün morfolojisinin SEM analizi ile incelenmesi sonucu yüksek gözenekli, petekli yapıdan kaynaklanan yüksek alana sahip olduğu dolayısıyla tuğla yalıtımında kullanımına uygun olduğu (Şekil 2.2),
- PK Külünün mineralojisinin XRD analizi ile incelenmesi sonucu kuartz bir yapı ve silisli bir doğaya sahip olduğu,
- PK Külünün XRD modelinde çok fazla miktarda kuartz (22.85° , 26.63° and 42.47° 2 θ pikleri) ve cristobalite(21.91° , 35.99° and 69.50° 2 θ pikleri) içerdiği aynı zamanda anortit faz değerinin bulunduğu(27.91° and 29.42° 2 θ pikleri) (Şekil 2.3),
- STA analizleri sonucuna göre PK Külünün partiküllerinin thermogram ve ağırlık kayıplarının yüzey nem varlığını gösterdiği,
- 423 K civarında ısı alımı ile birlikte TG eğrilerindeki ağırlık kayıplarının başladığı, sıcaklıktaki artış ile yapısal dönüşüm ya da yeni bileşiklerin oluşumu gibi başka hiçbir değişikliğin meydana gelmediği (Şekil 2.4),
- PK Külü taneciklerinin ~% 8, ~% 41, ~% 8 ve ~% 10 'unun sırasıyla 0,1 - 0,05 mm, 0,05-0,01 mm, 0,005-0,001 mm aralığında olduğu (Şekil 2.5),
- ASTM C 593 - 66 T göre PK Külünün standart tane boyutunun, ıslakken elendiği zaman kompozit/puzolan çimento üretimi için 0,045 mm elek üzerinde % 20 oranında buldurulması gerektiği, ancak PK Külü tanelerinin % 59 oranında 0.05 mm' nin altında olduğu ve PK Külünün elenmesi gerektiği gözlenmiştir.



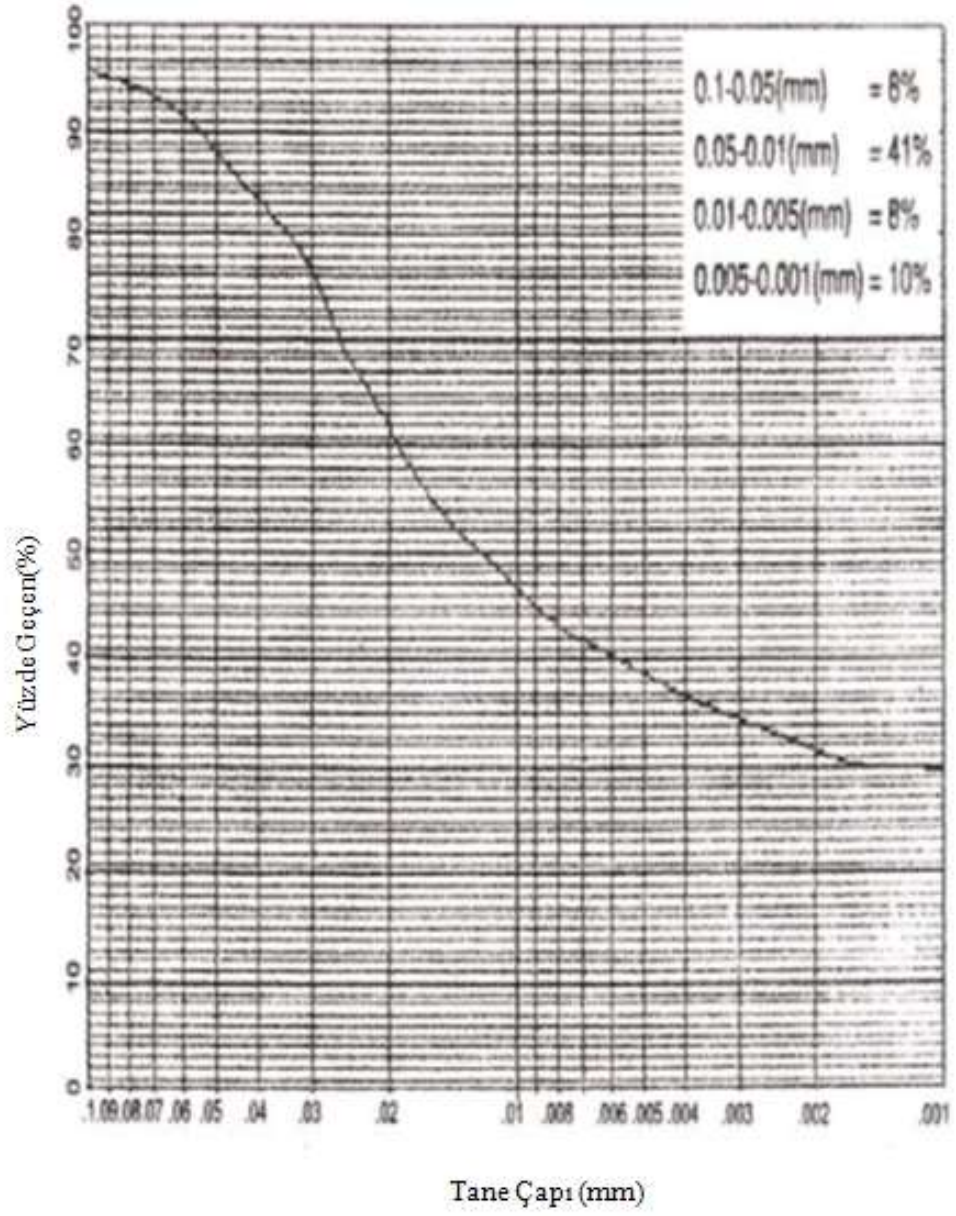
Şekil 2.2: (Bangladesh)PK Külünün mikro yapısı(SEM) (Farooque ve diğ., 2009).



Şekil 2.3: (Bangladesh)PK Külünün X-ray kırınımı(XRD) (Farooque ve diğ., 2009).



Şekil 2.4: (Bangladesh)PK Külünün DTA-TGA eğrileri (Farooque ve diğ., 2009).



Şekil 2.5: (Bangladesh)PK Külünün tane boyutu dağılımı (Farooque ve diğ., 2009).

Omatola ve Onajah (2009) tarafından 500 ve 1000°C sıcaklıklarda pirinç kabuğu elde edilmiş ve her bir sıcaklık için 5'er adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere ait miktarlar Tablo 5'de verilmiştir. PK Küllerinin XRF analizi ile incelenmesi sonucu şu sonuçlar ortaya konmuştur;

- Tespit edilen 3 elementin (Nickel-Ni, Iodine-I, Arsenic-As) bütün örneklerde farklı konsantrasyon gösterdiği (Çizelge 2.5),
- 1.örneğin toplam saflık konsantrasyonunun yüksek, toplam katışıklık konsantrasyonunun ise düşük olduğu ve bu durumun tespit edilen 3 elementin farklı durumlarından kaynaklandığı (Çizelge 2.6).
- 2, 3, 4 ve 5. örneklerin toplam saflık ve katışıklık konsantrasyonunun neredeyse aynı olduğu, Arsenic varlığının 3. 4. 5. örneklerde olmadığı bununla birlikte sadece 2.örnekte olduğu (Çizelge 2.6),
- Bütün örneklerde en yüksek toplam saflık konsantrasyonunun % 98.10 ile 1.örnekte olduğu ve en düşük toplam katışıklık konsantrasyonunun % 1.1 ile yine 1.örnekte olduğu (Çizelge 2.6),
- Bütün örneklerde en yüksek toplam katışıklık konsantrasyonunun % 5.58 ile 4.örnekte olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 2.6).

Çizelge 2.5: T = 500°C and 1000°C. Sıcaklıklarda PK Külü kompozisyonu (Omatola ve Onajah, 2009).

Numune	Pirinç Kabuğu Miktarı (g)	Pirinç Kabuğu Miktarı (g) T=500°C' de	Pirinç Kabuğu Miktarı (g) T=1000°C' de
1	100	20,96	16,26
2	100	26,80	22,65
3	100	23,74	18,85
4	100	21,56	17,95
5	100	22,98	19,47

Çizelge 2.6: XRF sonuçlarının saflık konsantrasyonu düzeyi(%)
(Omatola ve Onajah, 2009).

Element	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5
K	0,5451	1,9044	2,4514	2,0009	2,4860
Ca	0,3070	0,9002	0,8707	0,7869	0,8425
Cr	0,0004	0,0169	0,0230	0,0312	0,0236
Mn	0,0422	0,1731	0,2041	0,2156	0,2545
Fe	0,1603	1,0836	0,7219	1,2093	0,6801
Ni	-	0,0325	0,0368	0,0422	0,0346
Cu	0,0008	0,0139	0,0220	0,0256	0,0207
Zn	0,0063	0,0312	0,0435	0,0237	0,0326
Sr	0,0057	0,0060	0,0031	0,036	0,0047
Br	0,0010	0,0064	0,0075	0,0090	0,0102
I	-	0,2178	0,1735	0,0481	0,0439
As	-	0,0043	-	-	-
Cl	0,0298	1,1751	1,0048	1,1827	1,1348
Toplam Katışıklık	1,0986	5,5654	5,5623	5,5788	5,5682
Toplam Saflık	98,9014	94,4346	94,4377	94,4212	94,4318

Silva, Liborio ve Helene (2008), PK Külünden ayıklama yöntemi ile elde ettikleri silisi(SRH) hidrasyon gelişimlerini XRD ve SEM analizleri ile inceleyerek yapılan çalışmaya ilişkin şu sonuçları ortaya koymuşlardır;

- Fiziksel analiz sonucuna göre elde edilen silisin özgül yüzey alanının portland çimentosundan daha yüksek olduğu ancak özgül ağırlığının portland çimentosundan daha düşük olduğu (Çizelge 2.7),
- Kimyasal analiz sonucuna göre PK Külünden elde edilen silisin portland çimentosundan 4 kat daha yüksek silis içerdiği (Çizelge 2.7),
- SEM analizi sonucu elde edilen silisin oldukça ince ve partikül yapısının silis dumanından daha uzun olduğu (Şekil 2.6),
- Betonun işlenebilirliği açısından elde edilen silisin silis dumanından daha fazla su ihtiyacı gerektirdiği,

- Elde edilen silisin XRD analizi ile minerolojik olarak incelenmesi sonucu puzolanik aktivitesinin amorf silis yapısını oluşturmasından kaynaklandığı gözlenmiştir (Şekil 2.7).

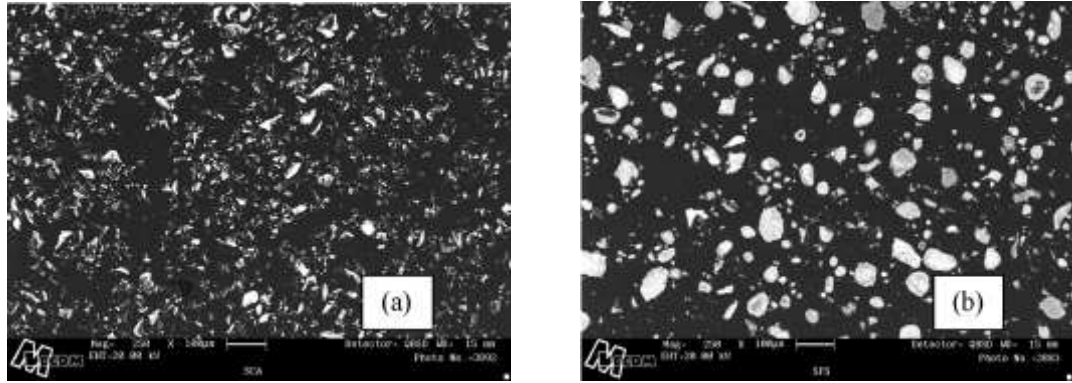
Çizelge 2.7: Çimento ve Ayıklama yöntemi ile elde edilen silis(SRH)'ın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Silva ve diğ., 2008).

KİMYASAL ÖZELLİKLER

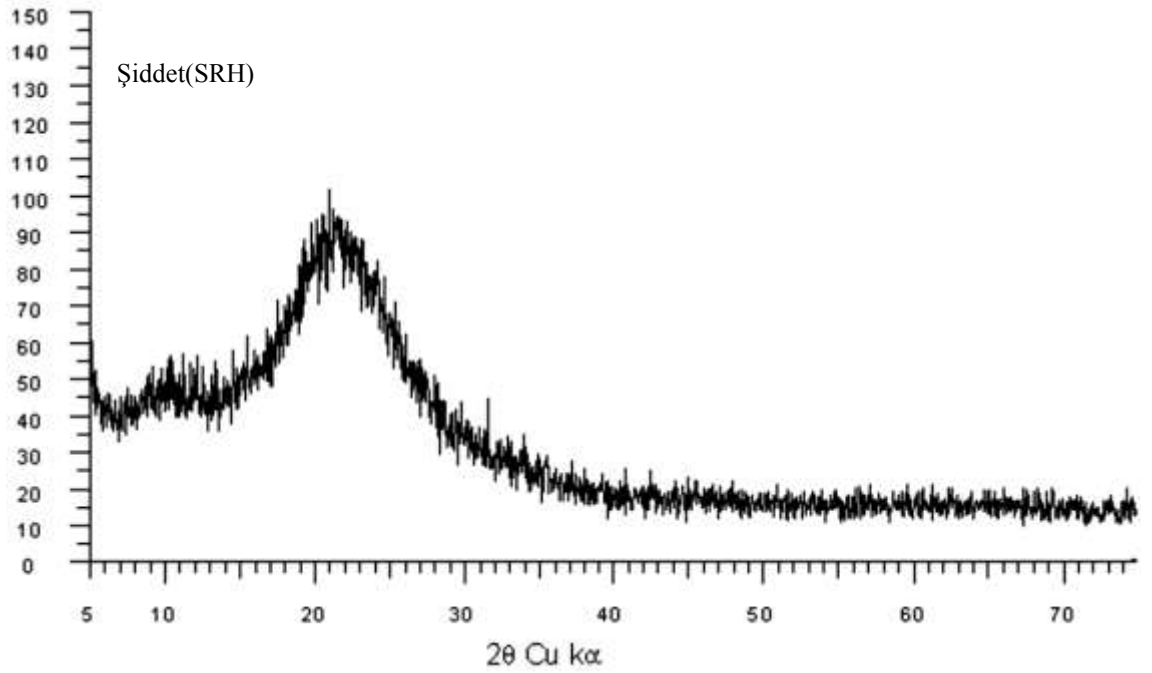
BİLEŞENLER	PÇ	SRH
SiO ₂ (%)	21,16	97,53
Al ₂ O ₃ (%)	4,71	-
Fe ₂ O ₃ (%)	1,89	0,21
CaO (%)	68,80	0,22
MgO (%)	0,48	-
P ₂ O ₅ (%)	0,28	0,26
Na ₂ O (%)	0,29	0,01
K ₂ O (%)	0,28	0,04
Kızdırma Kaybı	2,39	1,72
Çözünmeyen Kalıntı	0,81	-

FİZİKSEL ÖZELLİKLER

Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,10	2,2
Özgül Yüzey (m ² /g.blaine)	0,44	93,6



Şekil 2.6: Mikro yapı (SEM) : a) PK Külünden elde edilen silis(SRH) b) Silis dumanı (Silva ve diğ., 2008).



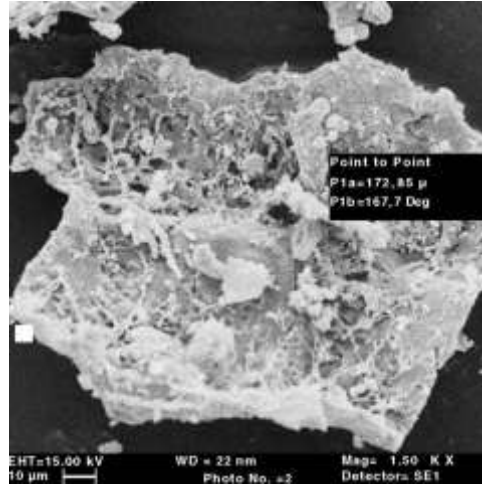
Şekil 2.7: PK Külünden elde edilen silisin X-ray kırınımı(XRD)
(Silva ve diğ., 2008).

Srivastava, Mall ve Mishra (2005), Hindistan’ da bir kağıt fabrikasından temin ettikleri PK Külünün(RHA) karakterizasyonunu belirlemek için PK Külü ile sulu çözeltiler hazırlayarak, Cd(II), Ni(II), Zn(II), 250 ml için 1 g PK Külü) bu çözeltileri SEM ve FT-IR analiz yöntemleri ile değerlendirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda;

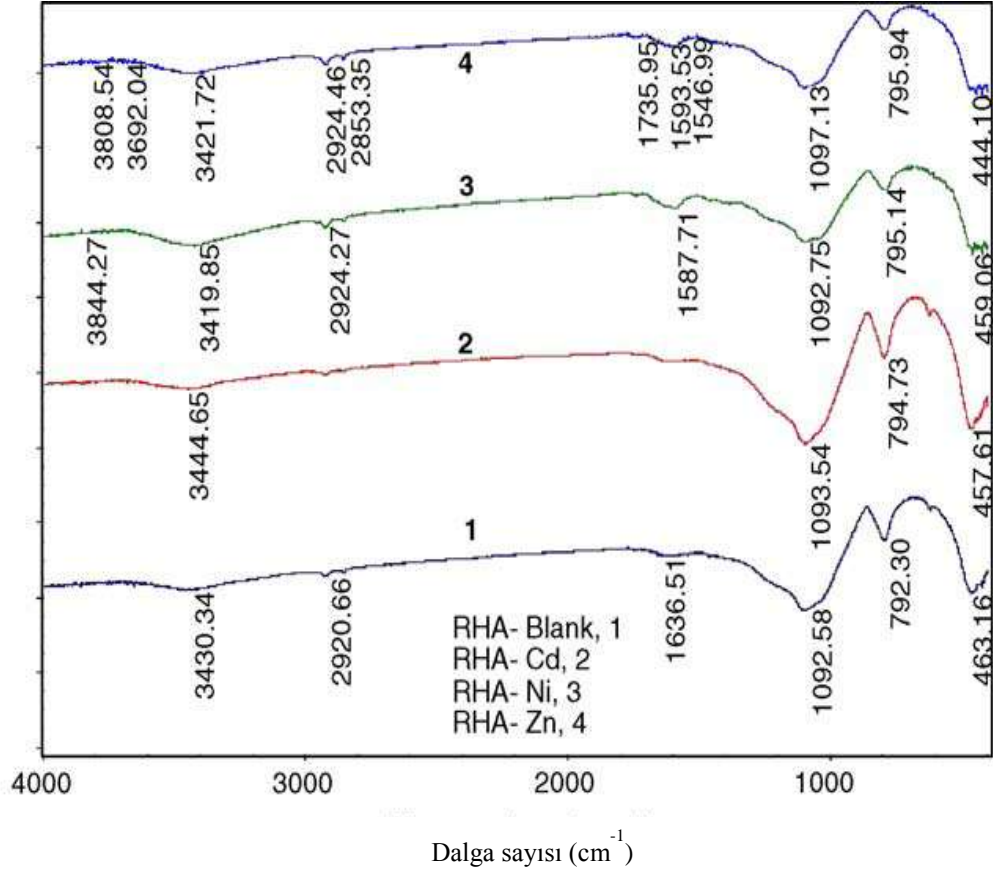
- Tane boyutu analizi sonucu PK Külünün ortalama tane boyutunun 150,47 μm olduğu ve PK Külünün morfolojisinin SEM analizi ile incelenmesi sonucu çok ince tane boyutuna ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu (Şekil 2.8),
- PK Külünün özgül yüzeyinin ve gözenekliliğinin incelenmesi sonucu BET yüzey alanının 36.44 m^2/g , ortalama gözenek çapının ise 42.603A $^\circ$ olduğu ve gözenek alanının % 80'ninin mezogözenekler olduğu,
- FT-IR analizi sonucuna göre yaklaşık 3400 ve 2920 cm^{-1} ile 2800 ve 3700 cm^{-1} arasında, adsorban yüzeyinde OH grupları ve Si-OH grubunun her iki özgür ve hidrojen varlığının bağlı olduğunu işaret eden, geniş bir bandın olduğu ve bu durumun her iki silanol gruplar(Si-OH) ve su yüzeyinde adsorbeden(3430 cm^{-1} de pik) kaynaklandığı, metil radikallere bağlı OH gruplarının uzamasının 2940 ve 2820 cm^{-1} arasında bir değer gösterdiği ve yine benzer şekilde, CH_3 gruplarının 1380 cm^{-1}

de bulunurken, 1470 cm^{-1} civarındaki zirvelerde CH_3 ve CH_2 gruplarının bulunduğu (Şekil 2.9),

- FT-IR analizi sonucuna göre IR gruplarının, aldehit ve ketonlardan uzanan $-\text{CO}$ ve $-\text{C-OH}$ gruplarına karşılıklı olarak yaklaşık 1600 cm^{-1} geniş ve zayıf pikler(zirve) gösterdiği ve $1050\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki geçirgenliğinin laktonlarda CO grubunun titreşimine atfedildiği (Şekil 2.9),
- FT-IR analizi sonucuna göre yaklaşık 793 ve 469 cm^{-1} deki piklerin Si-H varlığının yaklaşık 3430 , 2920 , 1636 , 1092 , 792 ve 468 cm^{-1} den görülen metal iyonları yüklemeye piklerinin yüklemeleri ile belirtildiğinin bununda metal adsorpsiyonda dalga sayısı katılımında fonksiyonel gruplar anlamına geldiği, değişen her ikisinde de daha yüksek ve daha alçak dalga sayıları oluştuğu (Şekil 2.9),
- FT-IR analizi sonucuna göre Cd-yüklü PK Külü için, 2900 ve 1636 cm^{-1} civarında bağların ortadan kalktığı ve değişen bantların yaklaşık 1092 , 792 ve 468 cm^{-1} alt dalga numaralarını gösterdiği, her ne kadar tüm bantların değişimi gözle görünse de Ni ve Zn-yüklü PK Külü spektrumu içinde bantların bu şekilde kaybolmasının gözlenmediği ve bu özelliklerin; $-\text{CO}$,- $-\text{OH}$,- $-\text{Si-OH}$, $-\text{SiH}$ ve $-\text{C-OH}$ grupların, PK Külü Cd (II) Ni (II) ve Zn (II) adsorpsiyonda da etkili olduğunu gösterdiği ortaya konmuştur (Şekil 2.9).



Şekil 2.8: (Hindistan)PK Külünün mikro yapısı(SEM) (Srivastava ve diğ., 2005).



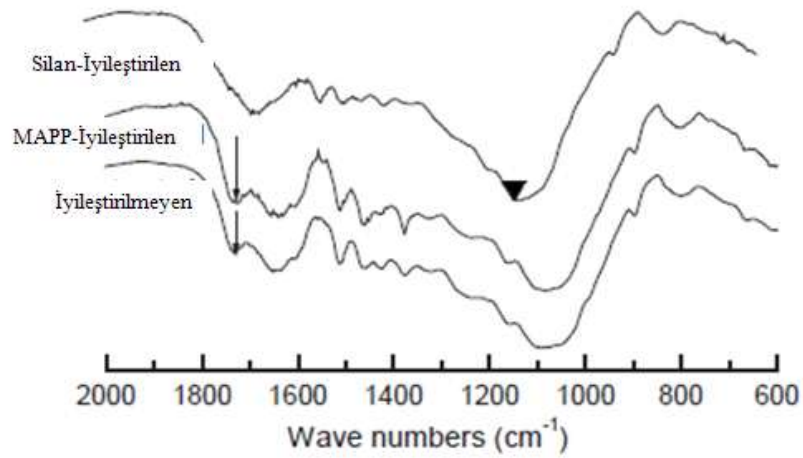
Şekil 2.9: (Hindistan)PK Külünün FT-IR spektroskopisi(Srivastava ve diğ., 2005).

Park, Wi, Lee, Singh, Yoon, Kim (2004) tarafından Kore yerel çeltik hanelerinden birinden temin ettikleri pirinç kabuklarını maleated polipropilen ve silan ile modifiye ederek, pirinç kabuğu yüzeyini FT-IR analizi ile incelemiştir. Çalışmaya ilişkin şu sonuçlar ortaya konmuştur;

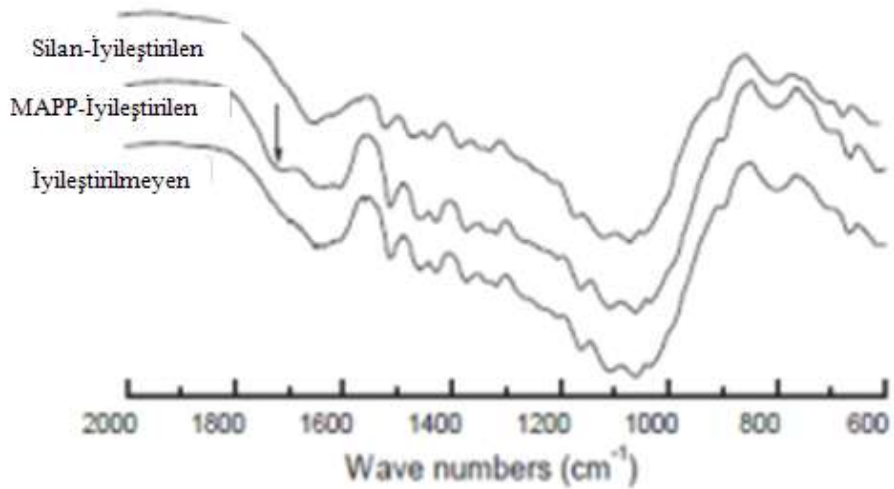
- PK Külünün FT-IR analizi ile incelenmesi sonucu: hücre duvarları bileşenlerinin, hemiselüloz, lignin ya da bu bileşenlerin arasında, ester bağları olarak kuru-zemin pirinç kabuklarının işlenmemiş örneklerinin bulunduğu(1730^{-1} cm de emme bantları mevcut), pirinç kabuğunun MAPP ile tedavi edildiği zaman, bu emme bantının yoğunluğunun arttığı, kabukların Mapp ve APS ile tedavi edildikten sonra ester ve eter bağlarının oluşumunu desteklediği (Şekil 2.10, Şekil 2.11),
- FT-IR analizi sonucuna göre: buhar patlamalı pirinç kabuklarının MAPP ile tedavi edilmesinden sonra 1720 cm⁻¹ emme bantının saptandığı, bu durumun ıslak kimyasal analiz sonuçlarıyla gösterildiği gibi buhar patlamadan sonra bozulmuş hemiselüloz bileşenleri gibi polisakaritlerin varlığı nedeniyle olabileceği ve bu

polisakkaritlerin varlığı nedeniyle bozulmuş hemiselüloz bileşenlerinde olduğu gibi sonucun ıslak kimyasal analiz sonuçlarında gösterildiği gibi buhar patlama sonrası olabileceği ancak ester bağlarının bilgileri ya da polisakkaritlerin yüzeyinin varlığı nedeniyle olup olmadığının açık olmadığı (Şekil 2.11),

- Çalışmada elde edilen sonuçlara göre pirinç kabuğu parçalarının hazırlanması yönteminin, yüzey özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu dolayısıyla pirinç kabuğu parçaları hazırlama yönteminin, yüzey özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur.



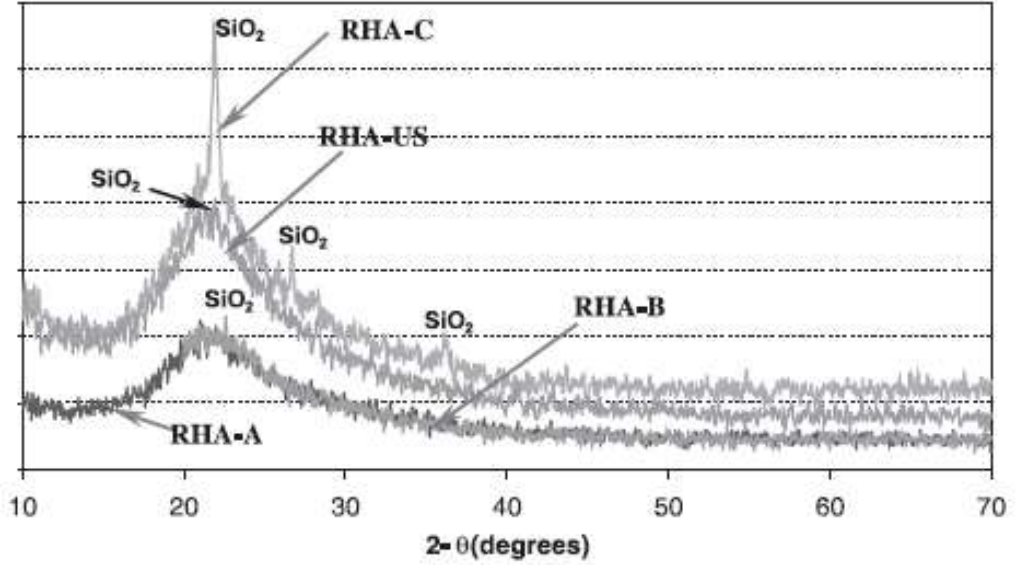
Şekil 2.10: İyileştirmeden önce PK Külünün FT-IR spektroskopisi (Park ve diğ., 2004).



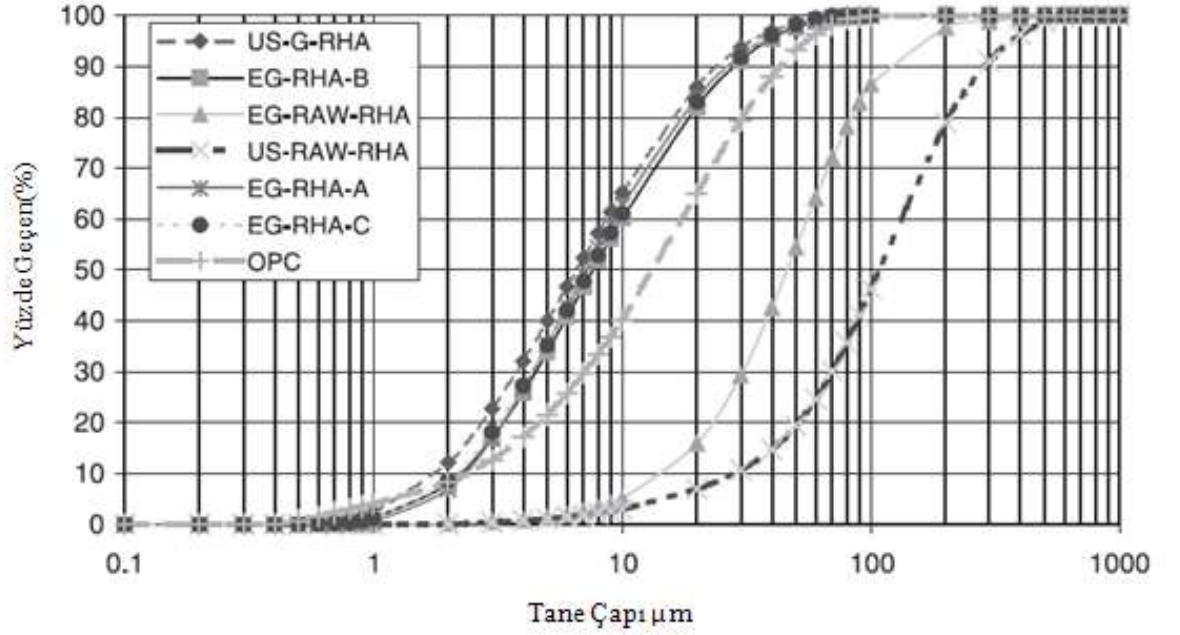
Şekil 2.11: İyileştirmeden sonra PK Külünün FT-IR spektroskopisi (Park ve diğ., 2004).

Nehdi, Duquette ve Damatty (2003) tarafından Mısır'da ve Amerika'da atık olarak ortaya çıkan pirinç kabuklarında 3 farklı yanma sıcaklığında (750°C, 830°C, 750°C+hava;) kül elde edilmiş(US-RHA: Amerika'dan alınan küller, EG-RHA: Mısır'dan Alınan küller, A-B-C: Yakma sıcaklıkları) ve elde edilen küllerin minerolojik yapısı XRD analizi ile ayrıca incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda şu sonuçlar ortaya çıkarılmıştır;

- Kimyasal analiz sonucuna göre en fazla silis içeriğine % 94,6 ile Mısır'dan alınarak 750°C (EG-RHA-A) de yakılan PK Külünün sahip olduğu,
- PK Külünün minerolojisinin XRD analizi ile incelenmesi sonucu 750 ve 830°C(EG-RHA-B) de yakılan küller arasında anlamlı bir fark olmadığı ve sadece kristal silis gibi çok küçük piklerin oluştuğu (Şekil 2.12),
- XRD modeline göre Amerika'dan alınan PK Külünün(RHA-US), Mısır'dan alınan PK Küllerine(EG-RHA-A, EG-RHA-B) göre çok daha belirgin kristal silis pikine sahip olduğu ve en az belirginliğin Mısır'dan alınan PK Külü (EG-RHA-C) pikinde olduğu (Şekil 2.12),
- Mısır'a ait PK Küllerinin(EG-RHA), Amerika'ya ait PK Küllerinden(US-RHA) daha fazla alkali içerdiği (Şekil 2.12),
- Tane boyut analiz sonucuna göre Amerika'dan alınan ve ham olarak kullanılan PK Küllerinin(US-RHA) ortalama tane boyutunun 107 µm, Mısır'dan alınan ve ham olarak kullanılan PK Küllerinin(EG-RHA) ortalama tane boyutunun ise 44 ile 46 µm arasında olduğu (Şekli 2.13),
- Tane boyut analizine göre öğütme sonrası tüm PK Külü örneklerinin tane boyutu dağılımlarının benzer olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.13).



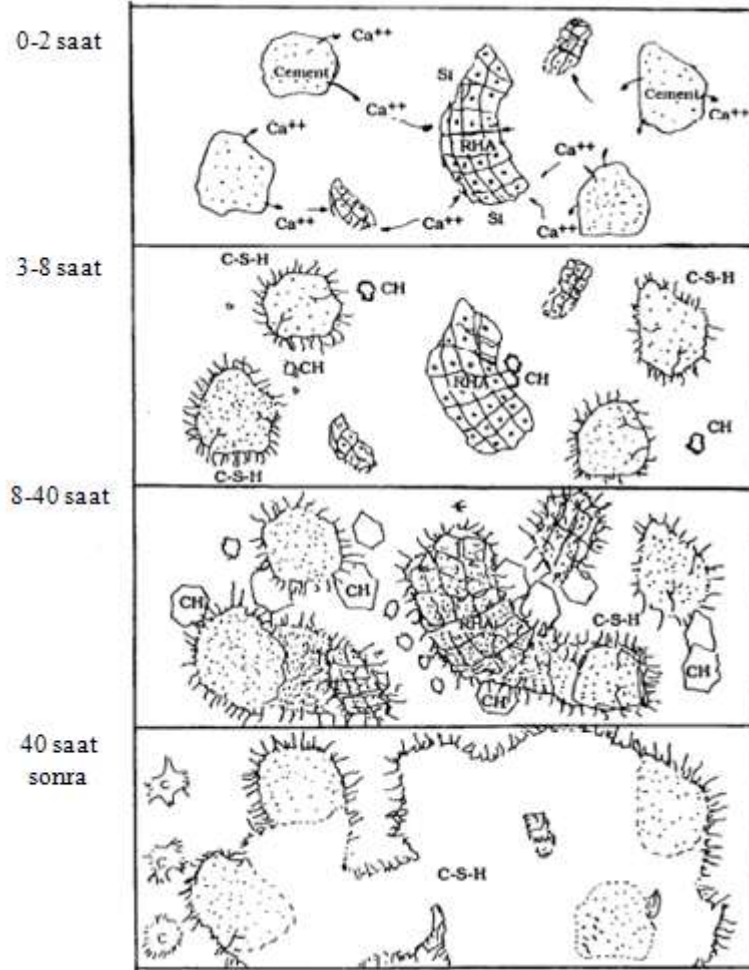
Şekil 2.12: (US-EG)PK Küllerinin X-RAY kırınım görüntüsü(XRD)
(Nehdi ve diğ., 2003).



Şekil 2.13: PÇ, (US-EG)PK Küllerinin tane boyu dağılımı (Nehdi ve diğ., 2003).

Hwang, Peng ve Lin (1995) tarafından 700°C de elde edilmiş PK Külleri % 20 oranında çimento ile ikame edilerek çimento hamuru hazırlanmış ve çimento hamurunun 40 saatlik hidrasyon davranışı incelenmiştir (Şekil 2.14). Çalışma sonucunda;

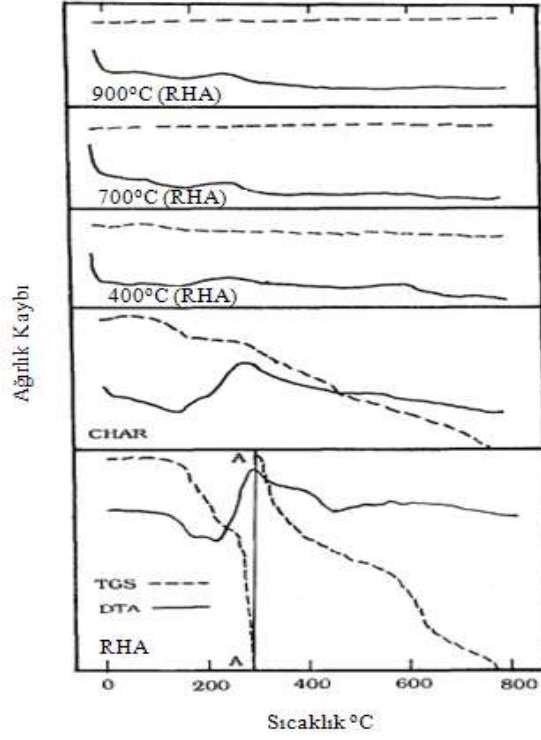
- PK Külü katkısız tipik(sıradan) portland çimentosunun hidratasyon mekanizmasına göre, ultrasonik titreşim hız eğrisinde kalorimetrik eğri içinde yer alan hareketsiz ve yavaşlatma periyotları ile periyotlar arasındakine benzeyen bir geçiş bölgesi bulunduğu,
- PK Külünün gözenekli yapısı ile PK Külü yüzeyindeki CH ların emildiği ve bu durumda emilen suyun anlamlı olarak azaltıldığı,
- 40 saat sonra puzolanik ileri reaksiyonun, C-S-H jel formuna gelen CH ile PK Külündeki Si ve katı yapıları bağladığı dolayısıyla PK Külünün ince gözenekleri doldurarak permeabiliteyi düşürdüğü gözlenmiştir (Hwang ve Chandra 1997) .



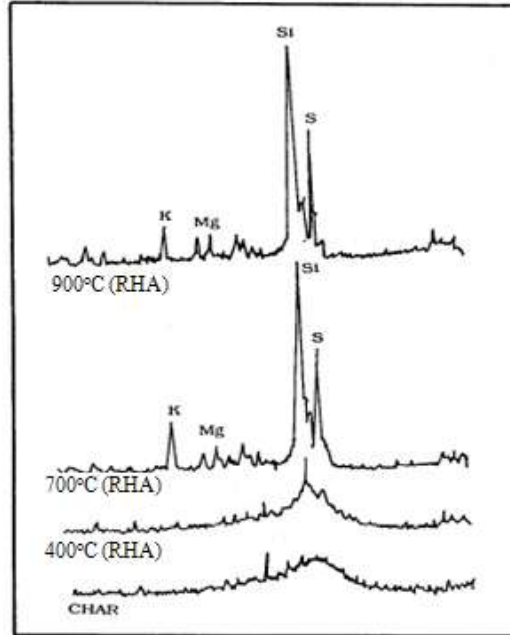
Şekil 2.14: (700°C)PK Külü katkılı çimento hamurunun hidratasyon davranışının şematik gösterimi (Hwang ve Chandra 1997).

Hwang ve Wu (1989) tarafından 400, 600, 700, 900, 1000 °C' de elde edilen PK Küllerinin hidratasyon gelişimlerini incelemek amacıyla farklı yanma sıcaklıklarına sahip PK Külünün ham halde DTA, TGA, XRD, SEM analizleri yapılmıştır. Ayrıca PK Külü % 5, 10, 15, 20 oranlarında çimento ile ikame edilerek ve su-bağlayıcı oranı 0.35, 0.47 olarak ayarlanarak çimento hamuru numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler optik mikro grafikler ve Sem mikro grafikler yardımıyla incelenmiştir. Yapılan bu çalışmalar sonucunda şu sonuçlar ortaya konmuştur;

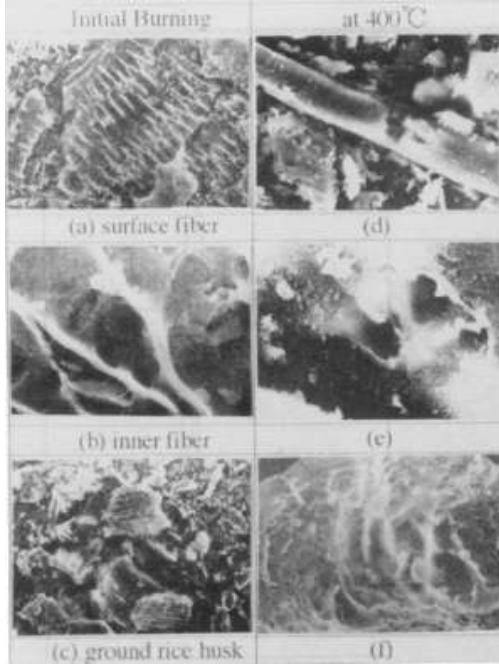
- Yüksek yanma sıcaklığına sahip külün daha fazla Si içeriğine sahip olduğu (Şekil 2.15, Şekil 2.16),
- Külün 600°C deki durumunun 400°C deki durumundan daha dağınık olduğu (Şekil 2.17, Şekil 2.18),
- 700°C deki külün mercan biçiminde gruplaşmaya benzer dönüşümler meydana getirdiği (Şekil 2.18),
- 900 ve 1000°C arasında ise kristalleşme gösterdiği ve yüksek sıcaklıklarda pirinç kabuğunun tamamen parçalandığı gözlenmiş dolayısıyla ısıtma derecesi ve zamana bağlı olarak yüksek puzolanik reaktiviteli bir PK Külü elde edilebileceği (Şekil 2.19),
- Optik mikroskop gözlemlerde 400X i aşan büyütmede düşük su çimento oranından dolayı çimento hamurunun yüksek konsantrasyonunu aşan belirsiz görüntü ürettiği ve sadece CH kristallerinin gelişiminin gözlenebildiği, sulu olmayan çekirdek arasında görünen CH kristallerinin ve C-S-H jelin 5 saat sonra görüldüğü ve kristalin boyutunun 6,5 saatte 4 kez, 5 saat; 7,5 saat sonra 8 kez daha iyi ve 12,5 saat sonra 26 kez daha iyi arttığı (Şekil 2.20),
- Sem mikro grafiklerinde % 5 PK Külü içeren hamurun C-S-H jellerinin 1 gün sonra yoğun sünger matrisi biçiminde olduğu, 3 gün sonra, yoğun liflerin çekirdek içerisindeki matrisler ile bağlandığı, 7 gün sonra, kristal lif demetleri gibi olduğu, 28 gün sonra matris haline gelen daha yoğun ve parçalanmamış CH kristallerinin matrisi doldurduğu, 60 gün sonra, matris bağlarının birlikte ve CH in yapısının belirsiz olduğu (Şekil 2.17,Şekil 2.18, Şekil 2.19, Şekil 2.20),
- % 10 ve % 15 PK Külü ikame oranlarına sahip çimento hamurunun çekirdek yapısının birbiriyle neredeyse aynı olduğu gözlenmiştir (Hwang ve Wu, 1989).



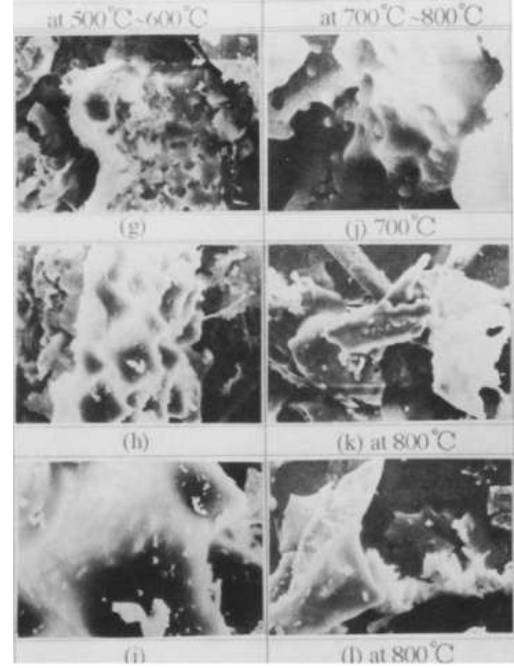
Şekil 2.15: Farklı yanma sıcaklıkları altında PK Külü için DTA ve TGA spektrumu (Hwang ve Wu, 1989).



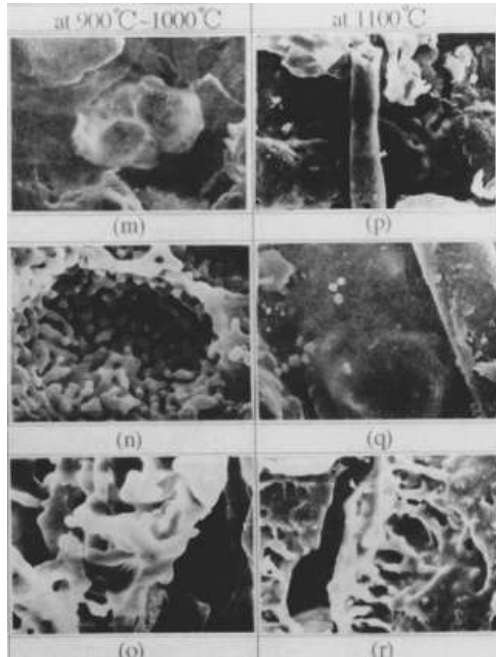
Şekil 2.16: Farklı yanma durumları altında PK Külünün X-ray kırınım deseni(XRD) (Hwang ve Wu, 1989).



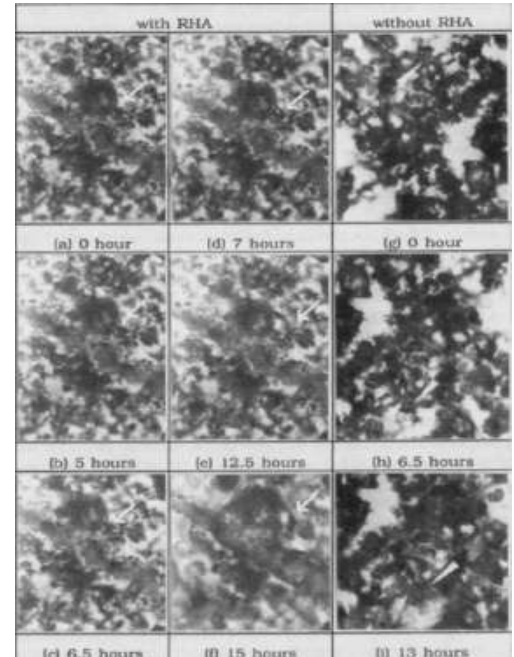
Şekil 2.17: (400°C)PK Külünün mikro yapısı(SEM) (Hwang ve Wu, 1989).



Şekil 2.18: (500, 600, 700, 800°C)PK Külünün mikro yapısı (SEM) (Hwang ve Wu, 1989).



Şekil 2.19: (900, 1000, 1100°C)PK Külünün mikro yapısı(SEM) (Hwang ve Wu, 1989).



Şekil 2.20: Zamana bağlı olarak PK Külü içeren çimento hamurunun optik mikro görüntüsü (Hwang ve Wu, 1989).

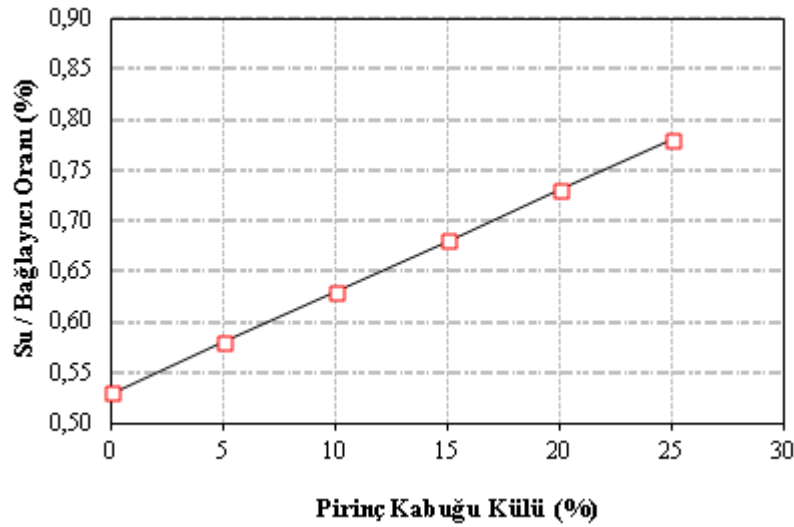
2.3.3. Pirinç Kabuğu Külünün Taze Betonun Özelliklerine Etkisi

2.3.3.1. Su İhtiyacı Ve İşlenebilme

Yapılan çalışmalar sonucu; PK Külü tanelerinin ince yapılarından dolayı iri çimento tanelerinin arasına girerek agrega hamur ara yüzey bölgesini güçlendirdiği ancak PK Külü tanelerinin oluşturdukları büyük yüzey alanı ile su ihtiyacını arttırdığı, buna bağlı olarak da kıvamı olumsuz etkilediği gözlenmiştir (Hwang ve Wu, 1989).

Yıldız, Balaydın ve Ulucan (2007) tarafından 600°C' de elde edilen PK Külünün su ihtiyacını belirlemek amacıyla; % 10-15-20-25-30 oranlarında PK Külü, çimento ile ikame edilerek ve taze beton çökme miktarı sabit tutularak (80 mm), karışımların s/b oranları incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucu ;

- PK Külü ikamesinin artışı ile s/b oranında artış gözlenmiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21: Numunelerinin Kül Miktarına Bağlı olarak Su/Bağlayıcı Oranı değişimi (Yıldız ve diğ., 2007).

2.3.3.2. Terleme Ve Plastik Rötme (Büzülme)

Yapılan araştırmalara göre çimentoya belirlenen miktarlarda puzolan ilavesi yapılması ile çimento harçlarında kuruma büzülmesinin küçük bir miktar arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla betondaki karışım suyunun artışına bağlı olarak büzülme miktarının arttığı gözlenmiştir.

Terlemenin azalması veya hiç meydana gelmemesi özellikle beton yüzeyinden buharlaşmanın fazla olduğu ortamlarda plastik büzülmeden dolayı çatlama riskini arttırır. Çatlakların oluşması priz başlangıcına kadar sürebilir. Bu süre içinde beton yüzeyinin kürüne itina edilmesi veya beton yüzeyinin örtülerek buharlaşmanın önlenmesi yararlı olur (Yeğınobalı, 2005).

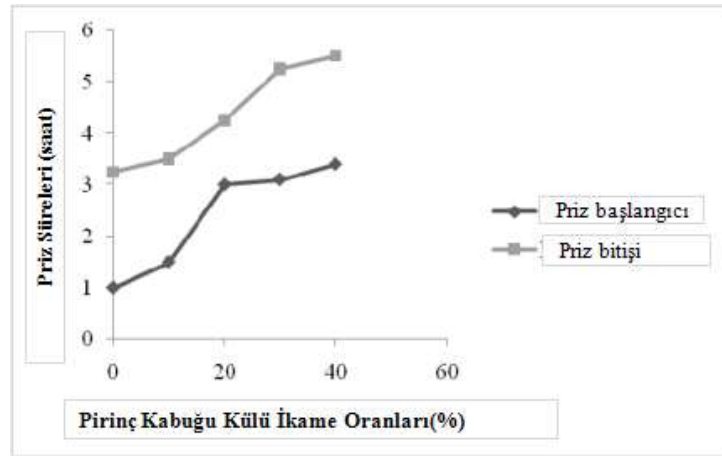
PK Külü özgül yüzey alanından dolayı, beton karışımlarında suyu büyük miktarda emerek çimento hidrasyonunu hızlandırmakta ancak agrega altındaki zayıf bölgeyi iyileştirerek çimento mikro yapısını iyileştirmektedir. Buna bağlı olarak, PK Külünün kullanılan uygun miktarları betonun yüksek dayanıma ulaşmasına yardımcı olmaktadır (Bui ve diğ., 2005).

2.3.3.3. Priz Süreleri

Yapılan araştırmalar sonucunda; PK Külünün gözenekli yapısından dolayı su emme gücünün fazla olduğu, buna bağlı olarak da priz süresini arttırdığı gözlenmiştir (Hwang ve Chandra, 1997).

Dakroury ve Gasser (2008) tarafından 600°C de elde edilen PK Külünün priz sürelerini belirlemek amacıyla; % 10-20-30-40 oranlarında PK Külü, çimento ile ikame edilerek çimento numuneleri hazırlanmıştır. Yapılan çalışma sonucu;

- Çimento pastalarındaki PK Külü ikame oranının artışına bağlı olarak, priz başlangıç ve bitiş sürelerinin de artış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22: Farklı oranlarda çimento ile ikame edilmiş PK Külünün priz başlangıç ve bitiş süreleri (Dakroury ve Gasser, 2008).

2.3.4. Pirinç Kabuğu Külünün Sertleşmiş Betonun Özelliklerine Etkisi

2.3.4.1. Pirinç Kabuğu Külü İçeren Betonun Geçirimsizliği ve Basınç Dayanımı.

Betonun geçirgenliği, yalnızca beton gözenekliliğine bağlı olmayıp, aynı zamanda gözeneklerin boyutlarına, dağılımına ve şekillerine bağlıdır. Betondaki gözenekliliğin fazla olması geçirgenliğin de fazla olduğunu direkt olarak göstermez (Erdoğdu ve diğ., 2003)..

Zararlı çevre etkilerine karşı betonun dayanıklılığı ve dayanımı geçirgen yapısı ile ilgilidir ve çimento hamurundaki en zayıf bölge olan agrega-çimento arasındaki ara yüzey bölgesi geçirgenlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Özellikle genç yaşlardaki betonlarda iri agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki ara yüzey bölgesi hamurun diğer bölgelerinden daha zayıftır. Bunun nedenleri şöyle sıralanabilir(Yeğınobalı, 2005).

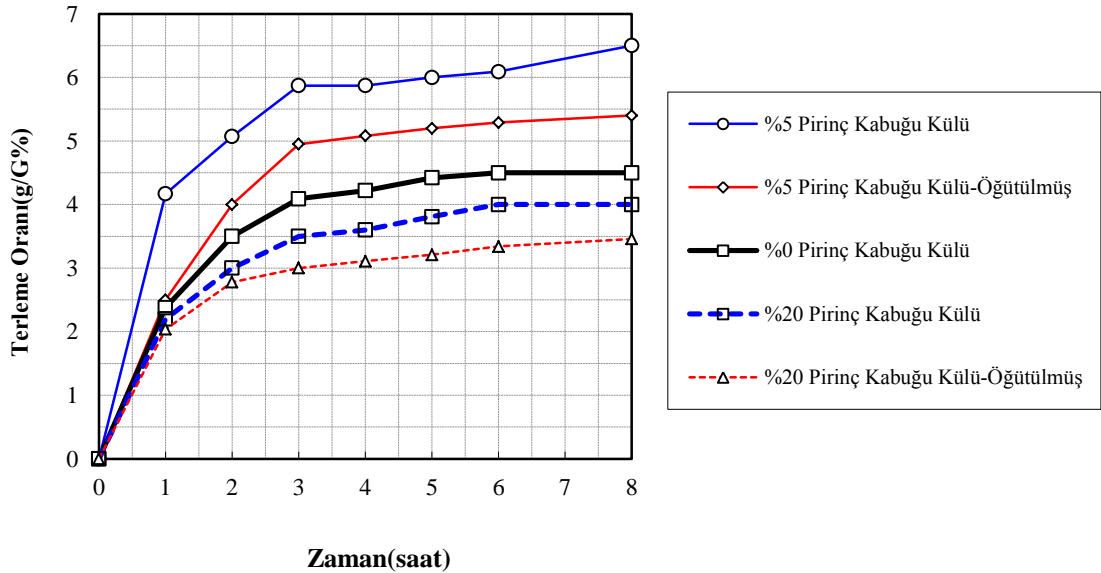
- Taze betonun terlemesi sırasında iri agrega taneleri altında toplanan su ara yüzey bölgesinde s/ç oranısını yükseltir ve boşluk yüzdesi artar.
- Gene aynı nedenle çimento ana bileşenlerinden kalsiyum silikatların (C_2S, C_3S) hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit (CH) kristalleri bu bölgede daha büyüktür ve miktarca daha fazladır. Hidratasyonun başlıca ürünü ve hamurdaki esas bağlayıcı madde olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerine oranla CH ın bağlayıcılık değeri çok daha azdır. Ayrıca kristallerin boyu büyüdükçe toplam yüzey alanı küçülür.
- İri agrega yüzeyi boyunca katı taneler çeper etkisi nedeni ile daha gevşek bir düzen içinde yer alırlar. Burada hamur boşluk oranı daha da artar.

Yapılan araştırmalar, betonun dayanımı ve dayanıklılığı üzerindeki olumlu etkiyi PK Külünün agrega-hamur ara yüzeyi kuvvetlendirmesine bağlamaktadır.

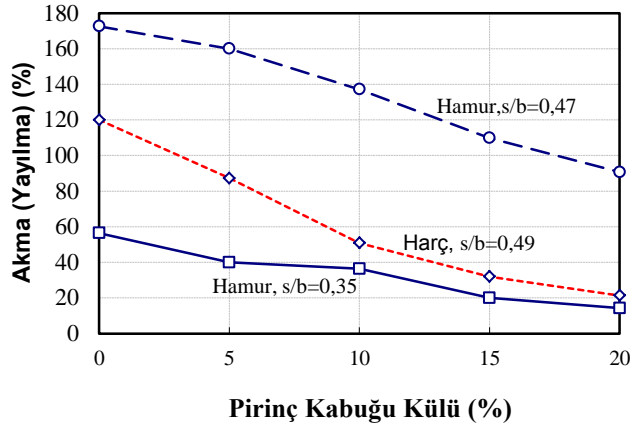
Normal beton basınç dayanımına göre, kontrollü yakma işlemi ile elde edilen PK Külünün diğer puzolanik maddelere benzer olarak betonun erken yaşlarında düşük dayanım; ancak ileri yaşlarda yüksek dayanım gösterdiği tespit edilmiştir (Kamal ve diğ., 2008).

Hwang ve Wu tarafından 700°C’ de elde edilen PK Külünün çimento hamuru üzerindeki işlenebilirlik, terleme ve basınç dayanımı etkisini belirlemek amacıyla yapılan bir çalışmada şu sonuçlar ortaya konmuştur;

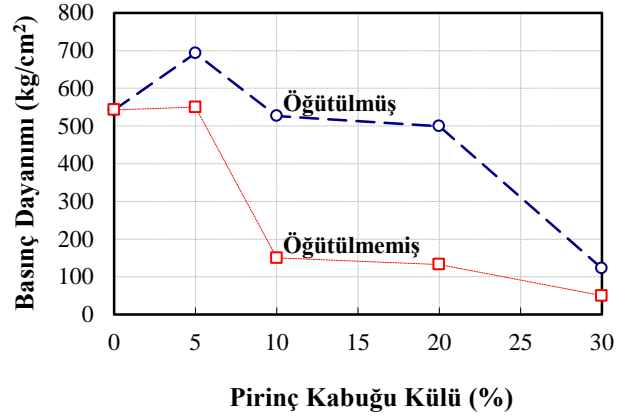
- CH ile PK Külünün bünyesindeki Si ‘ i bağlayan puzolanik reaksiyonun, oluşturduğu C-S-H jel formunun çimento hamurunun ince gözeneklerini doldurarak agrega altındaki zayıf bölgeyi iyileştirdiği dolayısıyla permeabilitenin azaldığı,
- PK Külünün eklenen miktarlarının artışı ve öğütülmüş kül kullanımı ile terlemenin azaldığı ve en az terlemenin % 20 oranında öğütülmüş PK Külü kullanımı ile gerçekleştiği (Şekil 2.23),
- Yüksek su-çimento oranında özellikle kumun eklenmesi ile işlenebilirliğin iyileşmeye yöneldiği ancak süper akışkanlaştırıcı gibi işlenebilirlik için kullanılan katkıların karışıma ilave edilmemesi veya suyu azaltılmış karışımlar kullanılmaması durumunda PK Külünün yüksek su emme gücü etkisiyle kuru karışımların ortaya çıktığı ve dolayısıyla işlenebilirliğin olumsuz yönde etkilendiği (Şekil 2.24),
- PK Külünün kullanılan büyük miktarlarının dayanımı düşürdüğü, en iyi dayanımın % 5 oranında öğütülmüş PK Külü kullanımı ile gerçekleştiği gözlenmiştir (Şekil 2.25).



Şekil 2.23: Farklı oranlarda PK Külü ikameli çimento hamurunun terleme oranları (Hwang ve Wu, 1989).



Şekil 2.24: (% 5) PK Küli içeren çimento hamuru ve harcın akma tablası yayılımı (Hwang ve Wu, 1989).

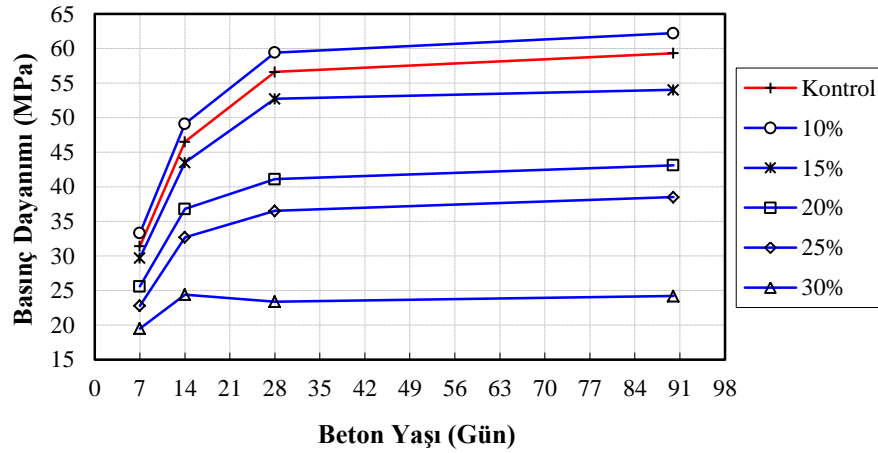


Şekil 2.25: (% 5) PK Küli katkıli çimento hamurunun basınç dayanımı (Hwang ve Wu, 1989).

PK Külünün artan miktarlarının basınç dayanımını düşürdüğü Şekil 2.25’de görülmektedir. Ancak yapılan araştırmalar betonda doğru miktarlarda PK Küli ve kimyasal katkı kullanımı ile PK Külünün yüksek puzolanik reaktivitesi sayesinde betonun ileri yaşlardaki dayanımının arttığı görülmüştür (İşbilir ve diğ., 2010).

Yıldız, Balaydın ve Ulucan tarafından 600 °C’ de elde edilmiş PK Külünün basınç dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla % 10-15-20-25-30 oranlarında PK Küli, çimento ile ikame edilerek beton numuneler hazırlanmış ve numunelerin 7, 14, 28 ve 90. günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucu;

- % 10 PK Külü içeren beton numunelerin basınç dayanımlarının, kontrol betonundan 7, 14, 28 ve 90. günlerde sırasıyla % 5,71, % 5.30, % 4.71, % 4.66 daha büyük olduğu,
- % 10 PK Külü içeren betonun dayanımındaki artışa rağmen, beton içerisindeki kül miktarının artmasıyla betonun basınç dayanımında sistematik bir azalma olduğu gözlenmiştir(Şekil 2.26).

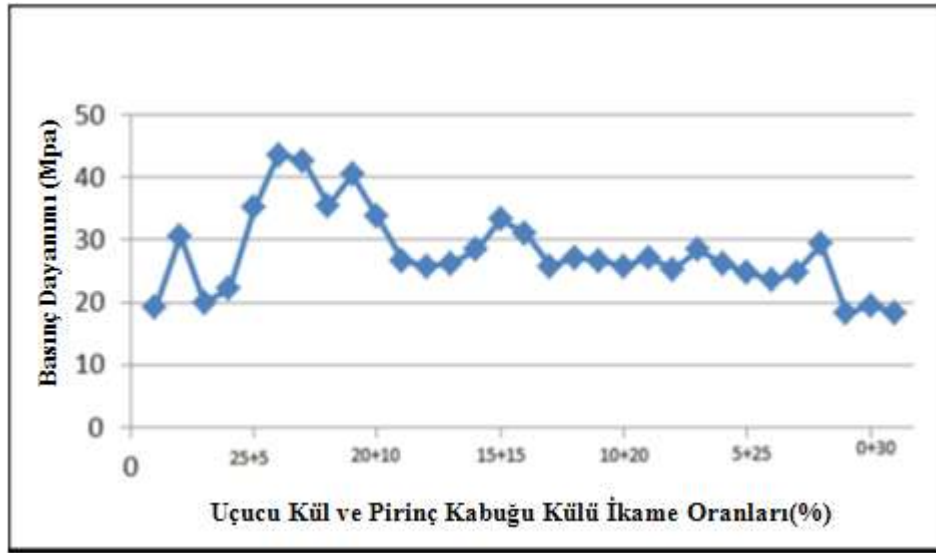


Şekil 2.26: Numunelerin basınç dayanımlarının beton yaşına bağlı değişimleri (Yıldız ve diğ., 2007).

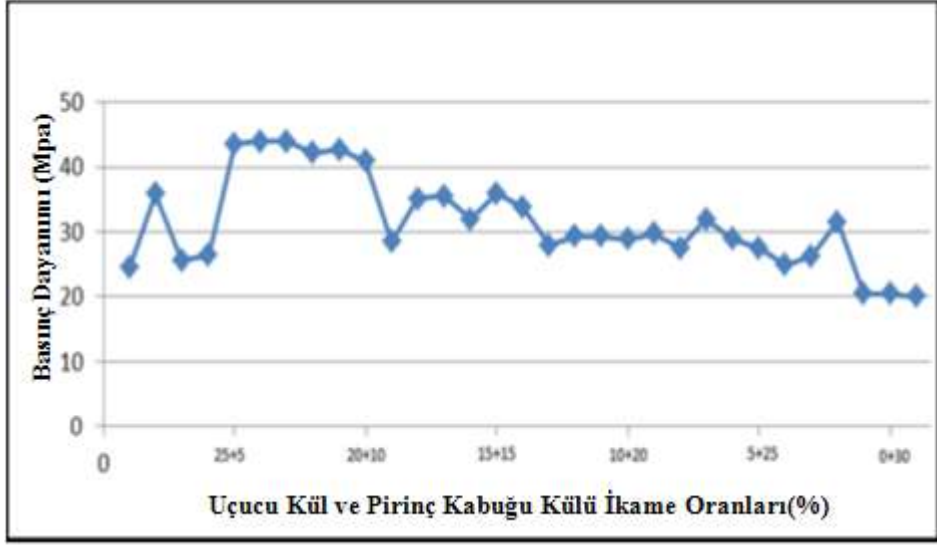
Kene, Domke, Deshmukh ve Deotale (2007) tarafından beton basınç dayanımı üzerinde PK Külü ve uçucu külün etkisini belirlemek amacıyla; % 0 -% 30 aralığındaki oranlarda PK Külü, uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı kullanılarak 150x150x150 mm ebatlarında küp numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada Hindistan Ellora Paper Fabrikasında 600°C de yakılarak elde edilen PK Külü ve Koradi Power Plant Nagpur fabrikasından elde edilen uçucu kül kullanılmış olup, tüm karışımlar Hint Standardı IS 10262-1982 ye göre hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılarak slump çapı 200-240 mm olacak şekilde ayarlanmış ve numunelerin 7, 14, 28, 90 günlük basınç dayanımları Hint Standardı IS 516-1959 a göre tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda;

- % 21 uçucu kül ve % 9 PK Külü ikameli beton numunelerin 7, 28, 56 ve 90 günlük ortalama basınç dayanımının diğer numunelere göre artış gösterdiği,

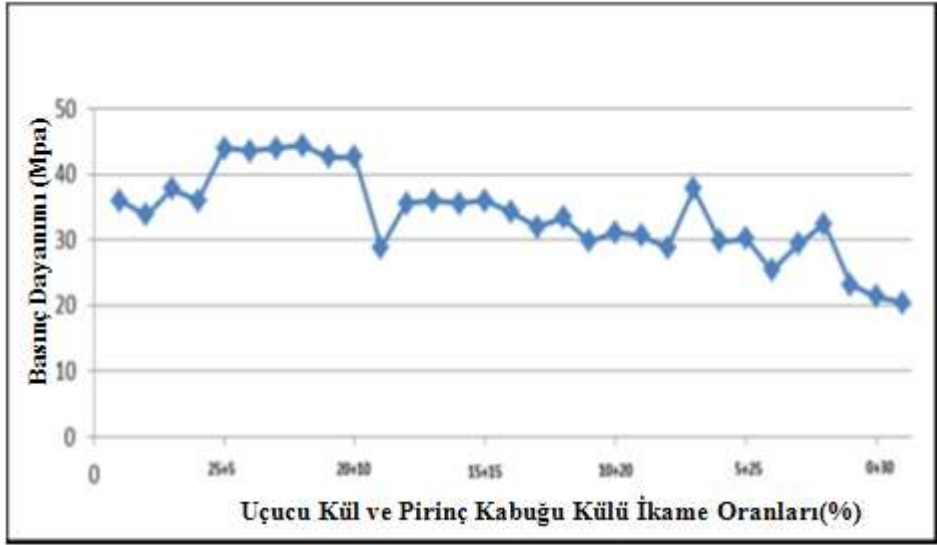
- PK Külünün yüksek gözenekli yapısından dolayı, çimento ile ikame oranlarının artışı ile su/bağlayıcı oranının arttığı; beton işlenebilirliğinin azaldığı;
- Beton karışımlarında belli oranlarda kullanılan PK Külünün azalttığı işlenebilirliğin, uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı kullanımı ile arttığı, buna bağlı olarak da beton basınç dayanımının arttığı,
- PK Külünün içerdiği yüksek orandaki silisten kaynaklı olarak beton basınç dayanımını arttırmasından dolayı, silis dumanından sonra tercih edilebileceği,
- PK Külünün etkisi olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.27, Şekil 2.28, Şekil 2.29, Şekil 2.30).



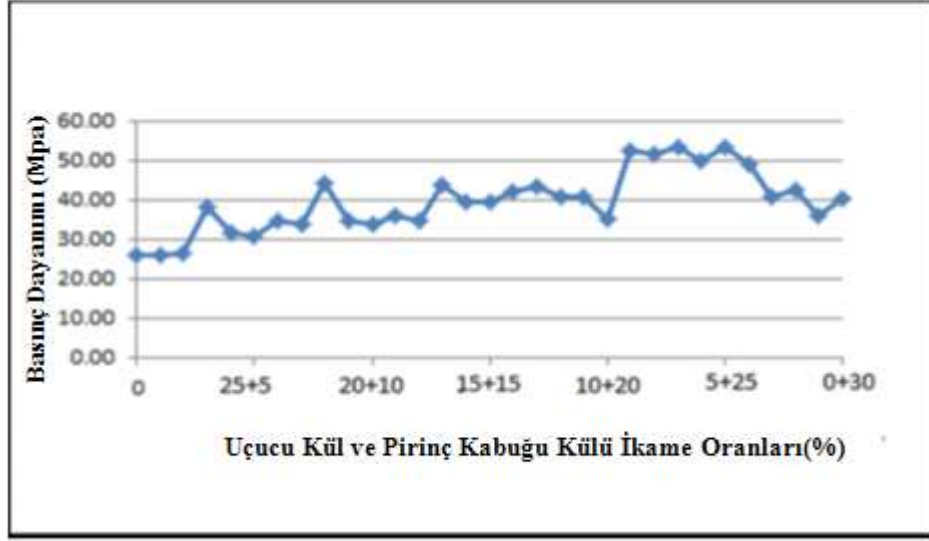
Şekil 2.27: PK Külü ve Uçucu Kül ikameli numunelerin 7 günlük basınç dayanımları (Kene ve diğ., 2007).



Şekil 2.28: PK Külü ve Uçucu Kül ikameli numunelerin 14 günlük basınç dayanımları (Kene ve diğ., 2007).



Şekil 2.29: PK Külü ve Uçucu Kül ikameli numunelerin 28 günlük basınç dayanımları (Kene ve diğ., 2007).

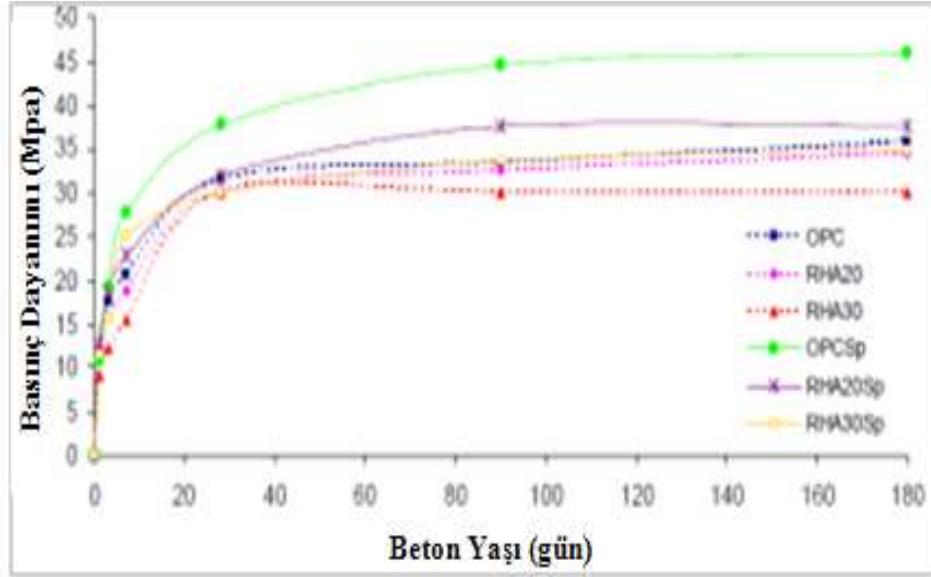


Şekil 2.30: PK Külü ve Uçucu Kül ikameli numunelerin 90 günlük basınç dayanımları (Kene ve diğ., 2007).

Kartini, Mahmud, Hamidah (2006) tarafından beton basınç dayanımını belirlemek amacıyla, % 20, % 30 oranlarında Malezya PK Külü çimento ile ikame edilerek ve süper akışkanlaştırıcı kullanılarak küp numuneler hazırlanmıştır. Referans numunelerin karışımlarında su/bağlayıcı oranı 0,63, 0,68 ve 0,70, slump değeri 40 -50 mm olarak; PK Külü katkılı numunelerin karışımlarında su/bağlayıcı oranı 0,63, slump değeri 100-150 mm olarak İngiliz Standardı Department of Environment(1988) baz alınarak beton C30 sınıfına göre belirlenmiştir. Daha sonra numunelerin 1, 3, 7, 28, 90, 180 günlük basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucuna göre;

- PK Külünün ikame oranlarının artışı ile su/bağlayıcı oranının azaldığı dolayısıyla süper akışkanlaştırıcı kullanımı ile işlenebilirliğin iyileştirildiği,
- Süper akışkanlaştırıcı kullanılmayan PK Külü katkılı numunelerin basınç dayanımlarının referans numunelere oranla daha düşük basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu, PK Külünün artan su ihtiyacından kaynaklandığı,
- Referans numunelere göre; süper akışkanlaştırıcı kullanılan, % 20 ve % 30 pirinç kabuğu ikameli numunelerin basınç dayanımlarının düşük olduğu,
- Referans numunelere göre; süper akışkanlaştırıcı kullanılmayan, % 20 ve % 30 pirinç kabuğu ikameli numunelerin basınç dayanımlarının düşük olduğu,

- Referans numunelere göre % 20 oranında PK Külü kullanılmış numunelerin basınç dayanımlarının, % 30 oranında PK Külü kullanılmış numunelerden daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu ortaya konmuştur (Şekil 2.31).

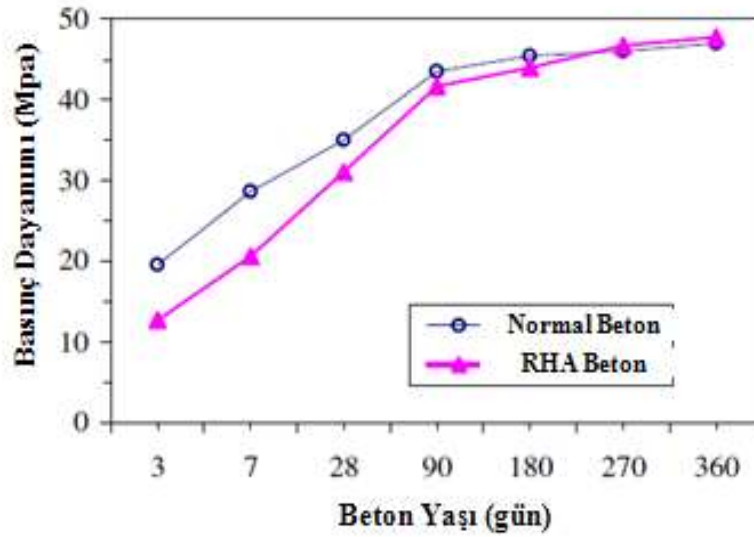


Şekil 2.31: Süperakışkanlaştırıcı katkılı ve katkısız numunelerin PK Külü ikame oranına bağlı olarak 1, 3, 7, 28, 90, 180 günlük basınç dayanımları (Kartini ve diğ., 2006).

Madandoust, Ranjbar, Moghadam, Mousavi (2011) tarafından, % 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında Kuzey İran'dan temin edilen ve 650°C'de yakılarak elde edilen PK Külleri çimento ile ikame edilerek, slump değeri ASTM C143 standardına göre belirlenerek, C30 beton sınıfına göre 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler hazırlanmıştır (RHA Betonu, Referans Betonu). PK Külü ikameli tüm numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri, ayrıca % 20 oranında PK Külü ikame edilmiş numunelerin 3, 7, 28, 90, 180, 270, 360 günlük basınç dayanımı değerleri tespit edilmiş ve referans beton numuneler ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda;

- % 5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının, referans numunelerden sırasıyla % 5.1, 8.47, 9.32, 12.99, 16.10, 24.85 oranlarında daha az olduğu,
- % 20 oranında pirinç kabuğu ikame edilmiş numunelerin 3 günlük basınç dayanımının, referans betonun basınç dayanımının % 65 i kadar olduğu,

- % 20 oranında pirinç kabuğu ikame edilmiş numunelerin 90 günlük basınç dayanımının, referans betonun basınç dayanımının % 96 ı kadar olduğu,
- % 20 oranında pirinç kabuğu ikame edilmiş numunelerin 180 günlük basınç dayanımının, referans betonun basınç dayanımının % 98 i kadar olduğu,
- % 20 oranında pirinç kabuğu ikame edilmiş numunelerin beton basınç dayanımının, puzolanik aktivitesinden dolayı ilerleyen yaşlarda artış gösterdiği,
- % 20 oranında pirinç kabuğu ikame edilmiş numunelerin 270 ve 360 günlük beton basınç dayanımının, referans betona göre % 2 oranında daha fazla olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.32).



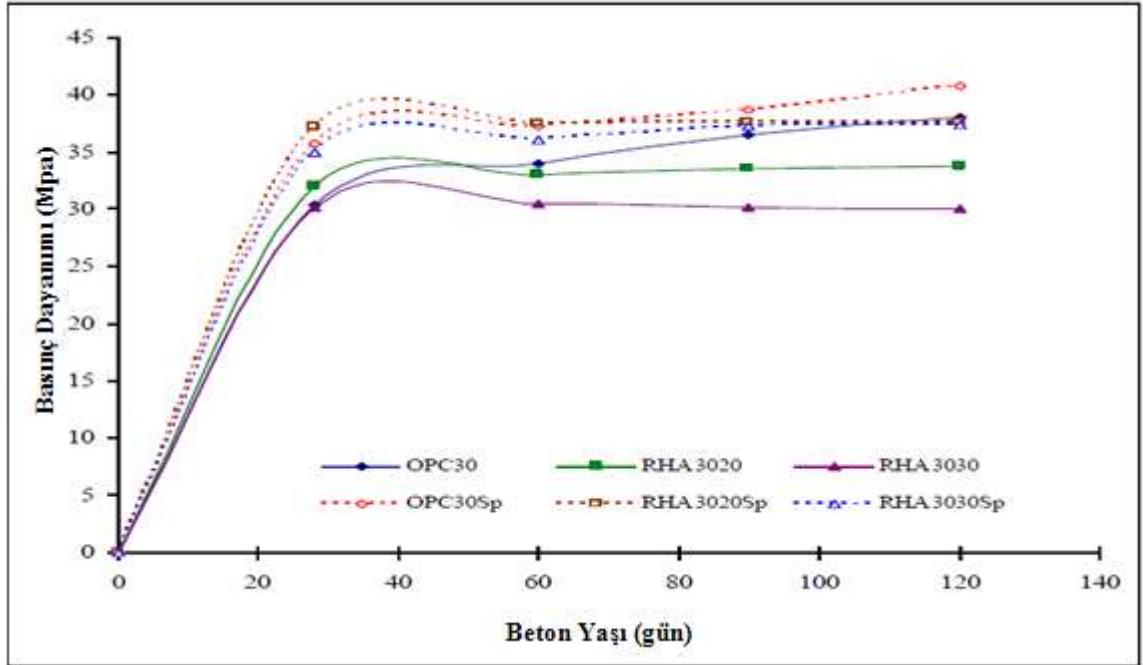
Şekil 2.32: % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları (Madandoust ve diğ., 2011).

Kartini(2011) tarafından, % 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında Malezya Seri Tiram Jaya Mill in Kuala Selangor fabrikasından yakılarak elde edilen PK Külleri çimento ile ikame edilerek ve süper akışkanlaştırıcı kullanılarak 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler hazırlanmıştır. Karışımlarda İngiliz Standardı Department of Environment(1988) baz alınarak C30, C40 ve C50 sınıflarında numuneler üretilmiştir(OPC: Referans numune, RHA3020: C30 sınıfı % 20 PK Külü ikameli numune, RHA3020sp: C30 sınıfı % 20 PK Külü ikameli ve süperakışkanlaştırıcı katkılı numune) C30 sınıfında, % 0, 20, 30 PK Külü ikameli üretilen tüm numunelerin

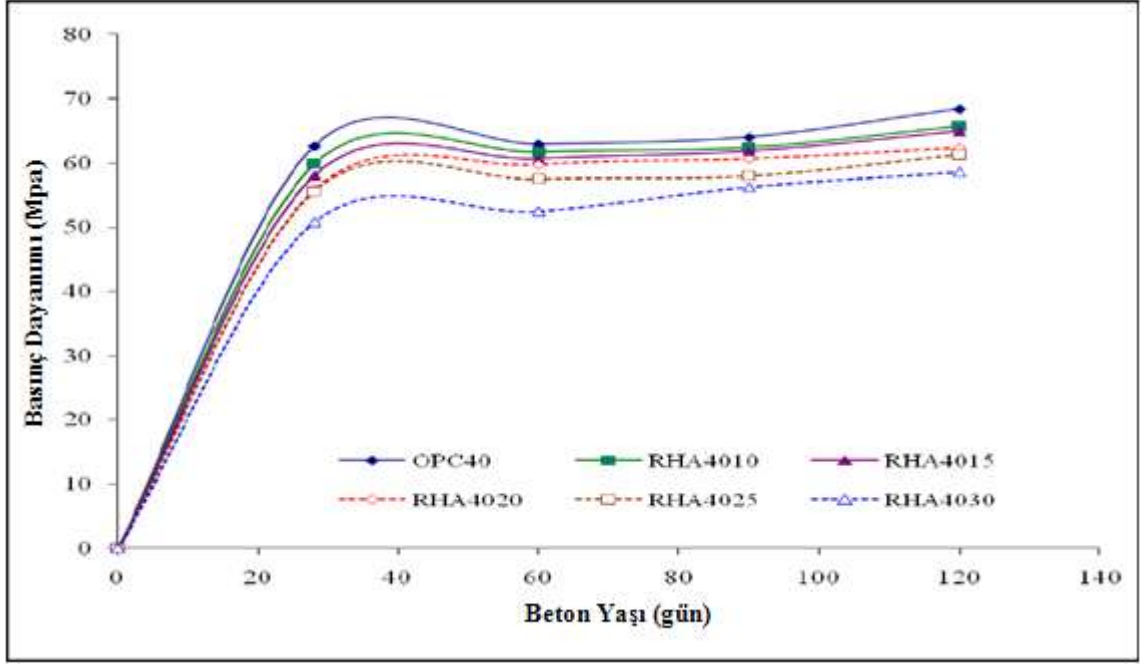
su/bağlayıcı oranı 0.63, katkısız referans numune hariç tüm karışımların slump değeri 100-150 mm olarak belirlenmiştir. Katkısız referans numunenin slump değeri 40-50 mm olarak belirlenmiştir. C40 sınıfında, % 0, 10, 15, 20, 25, 30 PK Külü ikameli üretilen tüm numunelerin su/bağlayıcı oranı 0.43, slump değerleri ise 100-150 mm; C50 sınıfında, % 0, 10, 15, 20, 25, 30 PK Külü ikameli üretilen tüm numunelerin su/bağlayıcı oranı 0.50, slump değerleri ise 100-150 mm olarak belirlenmiştir. Daha sonra numunelerin 28, 60, 90 ve 120 günlük basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucuna göre;

- PK Külü katkılı karışımlarda artan su ihtiyacının işlenebilirliği olumsuz şekilde etkilediği, ancak süper akışkanlaştırıcı kullanımı ile işlenebilirliğin iyileştirildiği,
- 28 günlük basınç dayanımı için PK Külünün ikame oranlarının C30 ve C40 sınıfı için optimum % 30, C50 için se % 20 olduğu (Şekil 2.33, Şekil 2.34, Şekil 35),
- Süper akışkanlaştırıcı kullanılan ve PK Külü içeren tüm numunelerin, süper akışkanlaştırıcı kullanılmayan numunelere göre tüm beton yaşlarında daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu,
- C30 beton sınıfı için % 20, 25, 30 PK Külü içeren numunelerin basınç dayanımlarında azalma olduğu (Şekil 2.33),
- C30 sınıfı için katkısız referans betona göre % 20 oranında PK Külü içeren numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının daha yüksek; 60, 90, 120 günlük basınç dayanımlarının ise daha düşük olduğu (Şekil 2.33),,
- C30 sınıfı için katkısız referans betona göre % 30 oranında PK Külü içeren numunelerin 28, 60, 90, 120 günlük basınç dayanımlarının daha düşük olduğu (Şekil 2.33),
- C30 sınıfı için süperakışkanlaştırıcı katkılı referans betona göre % 20 oranında PK Külü ve süperakışkanlaştırıcı içeren numunelerin 28, 60 günlük basınç dayanımlarının daha yüksek; 90, 120 günlük basınç dayanımlarının ise daha düşük olduğu (Şekil 2.33),
- C30 sınıfı için süperakışkanlaştırıcı katkılı referans betona göre % 30 oranında PK Külü ve süperakışkanlaştırıcı içeren numunelerin 28, 60, 90, 120 günlük basınç dayanımlarının daha düşük olduğu (Şekil 2.33),
- C40 beton sınıfı için % 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında PK Külü ve süperakışkanlaştırıcı içeren numunelerin basınç dayanımlarını sağladığı (Şekil 2.34),

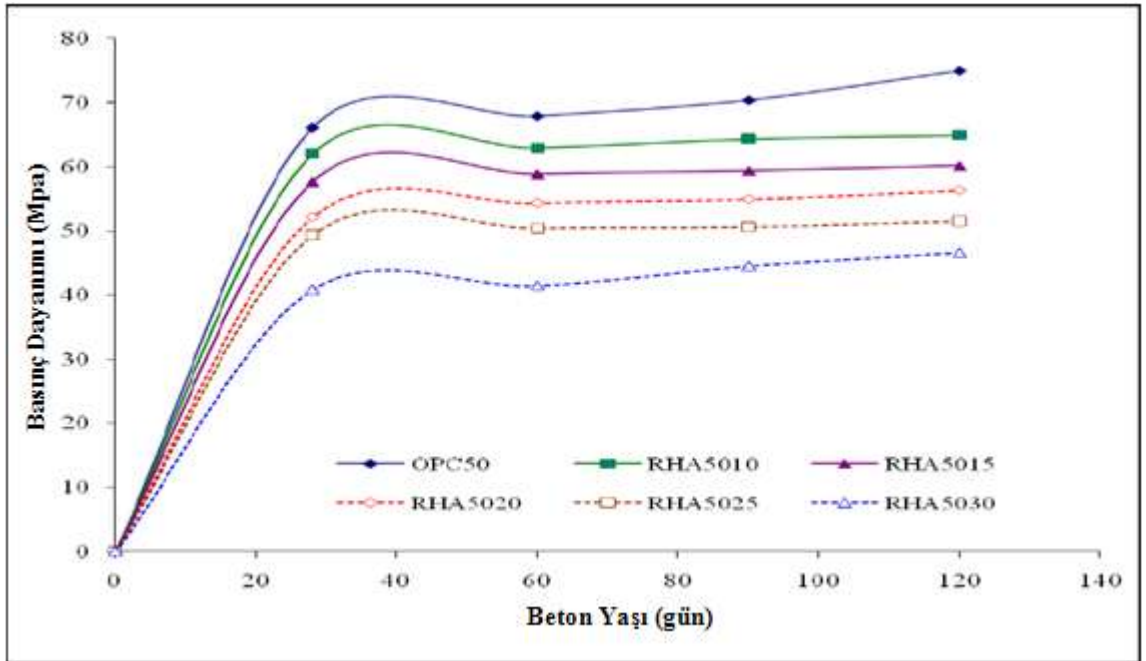
- C40 sınıfı için süperakışkanlaştırıcı katkıli referans betona göre % 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında PK Külü ve süperakışkanlaştırıcı içeren numunelerin 28, 60, 90, 120 günlük basınç dayanımlarının daha düşük olduğu (Şekil 2.34),
- C50 beton sınıfı için % 10, 15, 20 oranlarında PK Külü ve süperakışkanlaştırıcı içeren numunelerin basınç dayanımlarını sağladığı, ancak % 25, 30 oranlarındaki numunelerin sağlayamadığı (Şekil 2.35),
- C50 sınıfı için süperakışkanlaştırıcı katkıli referans betona göre % 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında pirinç kabuğu ve süperakışkanlaştırıcı içeren numunelerin 28, 60, 90, 120 günlük basınç dayanımlarının daha düşük olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.35).



Şekil 2.33: C30 sınıfı için PK Külü ikameli numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları (Kartini, 2011).



Şekil 2.34: C40 sınıfı için PK Külü ikameli numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları (Kartini, 2011).

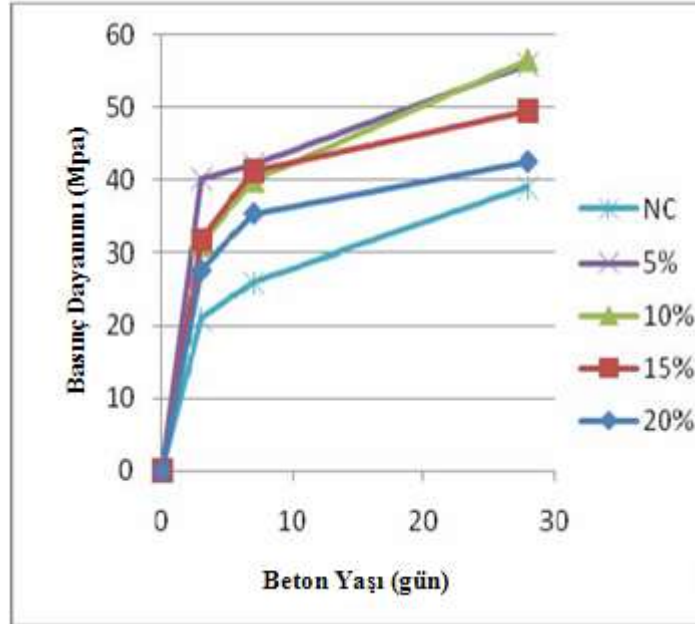


Şekil 2.35: C50 sınıfı için PK Külü ikameli numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları (Kartini, 2011).

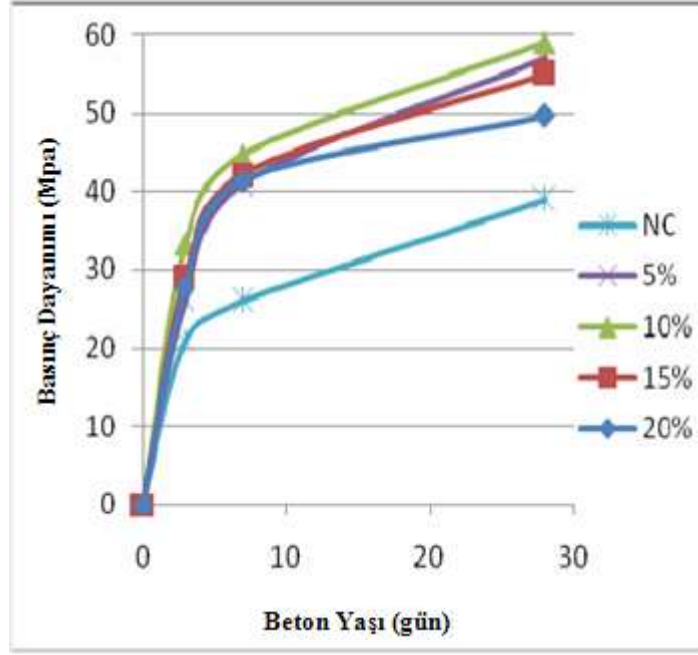
Kamal, Nuruddin, Shafiq (2008) tarafından Malezya’da 600, 700 ve 800°C sıcaklıklarda mikrodalga fırınında yakılarak elde edilen PK Külleri imento ile % 5, 10, 15, 20 oranlarında ikame edilerek ve referans beton numunesi hariç tüm karışımlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılarak 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler hazırlanmıştır. Tüm karışımların slump değerleri BS EN 12350-2:2000 standardına göre belirlenmiş, numunelerin 3, 7, 28 günlük basınc dayanımları incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre;

- % 5 oranında 600°C de elde edilen PK Külü içeren numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınc dayanımlarının diğer numunelere göre en yüksek olduğu(Şekil 2.36),
- % 5, % 10 oranında 600°C de elde edilen PK Külü içeren numunelerin 28 günlük basınc dayanımlarının çok fazla farklılık göstermediği ancak 3 ve 7 günlük basınc dayanımlarına bakıldığında % 5 oranında PK Külü içeren numunenin basınc dayanımı değerinin % 10 pirinç kabuğu içeren numuneden daha fazla olduğu (Şekil 2.36),
- % 20 oranında 600°C de elde edilen PK Külü içeren numunenin 28 günlük basınc dayanımının, referans betona göre % 7,14 oranında fazla olduğu (Şekil 2.36),
- % 15 oranında 600°C de elde edilen PK Külü içeren numunenin 28 günlük basınc dayanımının, referans betona göre % 16 oranında fazla olduğu (Şekil 2.36),
- Tüm oranlarda 700°C de elde edilen PK Külü içeren numunelerin, 3 ve 7 günlük basınc dayanımlarının farklılık gösterdiği, ancak 28 günlük basınc dayanımlarının birbirine yaklaştığı (Şekil 2.37),
- % 10 oranında 700°C de elde edilen PK Külü içeren numunenin 28 günlük basınc dayanımının, % 5 oranında PK Külü içeren numuneye göre % 3,4; % 15 oranında PK Külü içeren numuneye göre % 6,8; % 20 oranında PK Külü içeren numuneye göre % 15,3 oranında fazla olduğu (Şekil 2.37),
- % 5 oranında 800°C de elde edilen PK Külü içeren numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınc dayanımlarının diğer numunelere göre en yüksek olduğu(Şekil 2.38),
- % 5 oranında 800°C de elde edilen PK Külü içeren numunenin 28 günlük basınc dayanımının, referans betona göre % 33,33; % 15 oranında PK Külü içeren numuneye göre % 23,33; % 10 oranında PK Külü içeren numuneye göre % 13,33 oranında fazla olduğu (Şekil 2.38),

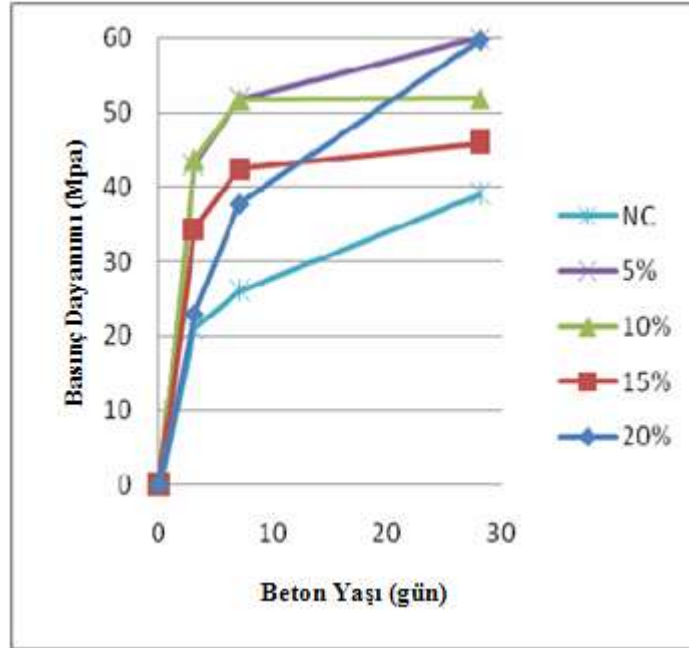
- Tüm sıcaklıklarda elde edilmiş PK Külü içeren numunelerin bütün beton yaşlarında basınç dayanımlarının, referans numunelere göre daha yüksek olduğu,
- 600°C ve 800°C de elde edilen % 5 oranında PK Külü içeren numunelerin ve 700°C de elde edilen % 10 oranında PK Külü içeren numunenin basınç dayanımının, referans betona göre daha yüksek olduğu (Şekil 2.39),
- % 5 oranında 800°C de elde edilen PK Külü içeren numunenin 28 günlük basınç dayanımının, referans betona göre % 36; % 5 oranında 600°C de elde edilen PK Külü içeren numuneye göre % 6,6; % 10 oranında 700°C de elde edilen PK Külü içeren numuneye göre % 3,3 oranında fazla olduğu ortaya konmuştu (Şekil 2.39).



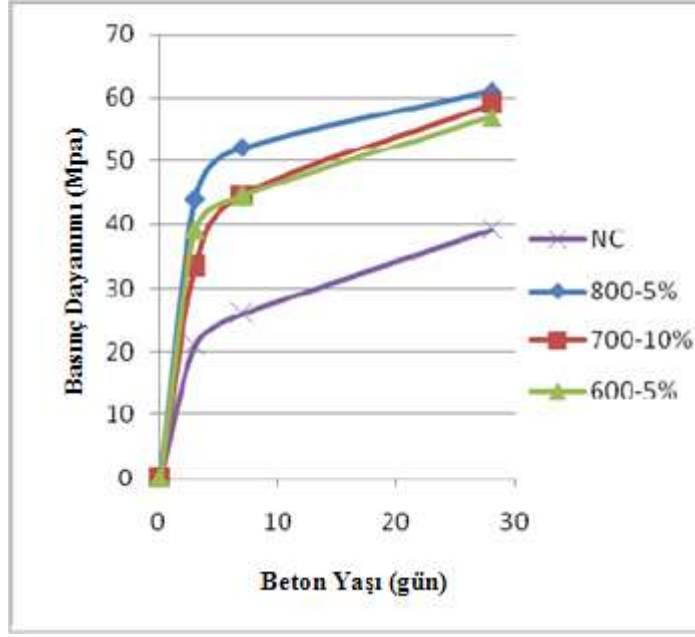
Şekil 2.36: 600°C sıcaklıkta elde edilen PK Külü ile ikame edilmiş numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları (Kamal ve diğ., 2008).



Şekil 2.37: 700°C sıcaklıkta elde edilen PK Külü ile ikame edilmiş numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları (Kamal ve diğ., 2008).



Şekil 2.38: 800°C sıcaklıkta elde edilen PK Külü ile ikame edilmiş numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları (Kamal ve diğ., 2008).



Şekil 2.39: 600-700-800°C sıcaklıkta elde edilen PK Külü ile ikame edilmiş numunelerin beton yaşına bağlı basınç dayanımları (Kamal ve diğ., 2008).

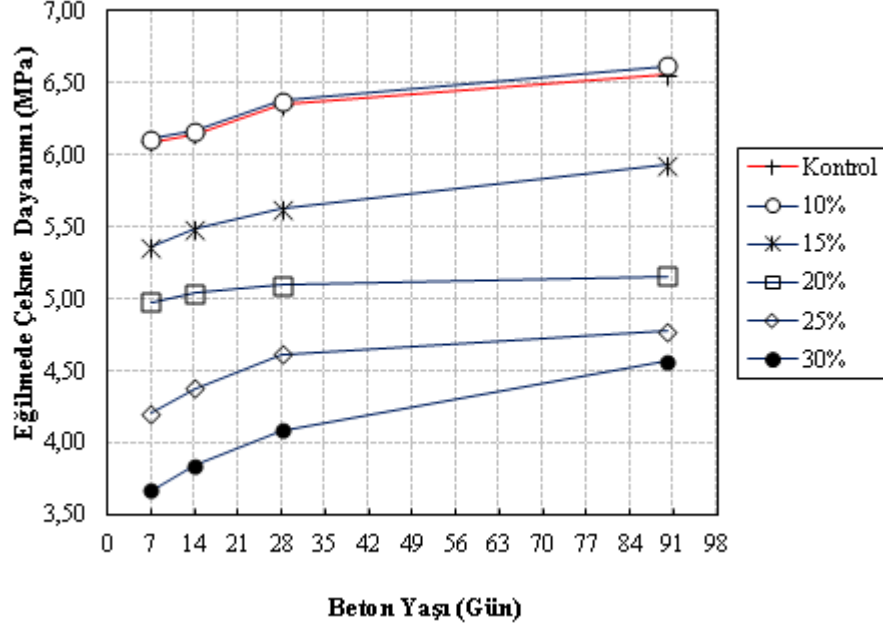
2.3.4.2. Çekme ve Eğilme Dayanımları

Yapıların tasarım hesaplarında genellikle basınç dayanımı kullanılır. Ancak, oldukça gevrek bir malzeme olan betonun, çekme dayanımı çok düşük olduğundan, beton içerisindeki çatlaklar çekmeden dolayı oluşmaktadır. Bu nedenle, betonun çekme dayanımının bilinmesi, çatlakların ve yapı ile ilgili analizlerin yapılabilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır (Yıldız ve diğ., 2007).

Yıldız, Balaydın ve Ulucan (2007) tarafından 600°C’de elde edilmiş PK Külünün eğilmede çekme dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla % 10-15-20-25-30 oranlarında PK Külü, çimento ile ikame edilerek beton numuneler hazırlanmış ve numunelerin 7, 14, 28 ve 90. günlük eğilmede çekme dayanımları incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucu;

- % 10 PK Külü içeren numunelerin ortalama eğilme dayanımlarının, kontrol betonun eğilme dayanımından 7, 14, 28 ve 90. günlerde sırasıyla % 0.33, % 0.33, % 0.47 ve % 0.92 daha büyük olduğu(Şekil 2.40),
- Beton içerisindeki PK Külü miktarı arttıkça eğilme dayanımında azalma meydana geldiği dolayısıyla % 15, % 20, % 25 ve % 30 PK Külü içeren beton numunelerin 28

günlük eğilme dayanımlarının, kontrol betonundan sırasıyla % 11.34, % 19.69, % 27.24 ve % 35.59 daha az olduğu gözlenmiştir(Şekil 2.40).



Şekil 2.40: Referans ve PK Külü ikameli numunelerin eğilmede çekme dayanımlarının beton yaşına bağlı olarak değişimleri (Yıldız ve diğ.,2007).

2.3.5. Pirinç Kabuğu Külünün Betonun Dayanıklılığına Olan Etkileri

Betonun yıllarca dış etkilerden ve betonun bileşenlerinden ileri gelen faktörlerden olumsuz olarak etkilenmeden dayanımını ve niteliklerini kaybetmemesine “durabilite” özelliği denilir. Başlangıçtaki özelliklerini ve tasarlandığı fonksiyonunu çevre ve hizmet koşulları altında koruyarak devam ettirebilmesi betonun dayanıklılığı olarak tanımlanabilir. Beton sözü edilen koşullar altında yıpranarak özelliklerini yitirir, daha fazla kullanılması ise ekonomik olmaz ve faydalı ömrünü tamamlamış olur. Betonun yıpratıcı fiziksel etkenler, beton yüzeyinde kütle kaybına neden olur ve betonda çatlama yol açar(Binici ve diğ., 2009).

Sürdürülebilir bir beton elde etmede önemli bir parametre olan beton durabilitesi çevre şartları altında betonun servis yeteneğini belirli bir zaman boyunca sürdürebilme yeteneği olarak düşünüldüğünde, beton tasarımı sadece beton dayanımına göre değil beton dayanıklılığı da dikkate alınarak yapılmalıdır (İşbilir ve diğ., 2010).

Durabilite kapsamında betonda aranan dayanıklılık şu şekilde sıralanmıştır (Küçük, 2000);

- Donma - çözülmeye karşı dayanıklılık,
- Islanma - kurumaya karşı dayanıklılık,
- Isınma - soğumaya karşı dayanıklılık,
- Aşınmaya karşı dayanıklılık,
- Ateşe karşı dayanıklılık,
- Asit ve tuzlara karşı dayanıklılık
- Alkali-agrega reaksiyonuna karşı dayanıklılık.

PK Külünün, betonun üzerindeki etkilerini betonun dayanıklılığı yönünden değerlendirebilmek için yapılan çalışmalar araştırılmış ve aşağıda sunulmuştur.

2.3.5.1. Klor Etkisine Karşı Dayanıklılık

Klor etkisi; betonu doğrudan etkilemek yerine, betonun içerisindeki donatıların korozyonuna sebep olması nedeniyle betonun maruz kaldığı diğer olumsuz şartlardan farklılık gösterir. Korozyon, donatının etrafında çimento hidrasyonunun başlamasından hemen sonra kendiliğinden oluşan ve korozyonu önleyen pasif katmanın, betona giren klorün etkisi altında parçalanmasıyla başlamaktadır (Farooque ve diğ., 2009).

PK Külü mikro gözenekli yapısı ile suyun büyük miktarını emerek betonun geçirimsizliğini iyileştirir. Betona potansiyel yararlılığı olduğu gibi, çeliğin korozyonunun olduğu yerlerdeki uygulamalar için de yararlılığı büyük ilgi görür ve ortadır (İşbilir ve diğ., 2010).

Mehta(1992) tarafından klor etkisini belirlemek amacıyla; 700°C' de elde edilmiş PK Külü ve sabit miktarlarda süper akışkanlaştırıcı kullanarak beton numuneler üretilmiş ve numunelerin klor geçirgenlikleri ile beton dayanımları test edilmiştir. Çalışma sonucunda;

- PK Külünün miktarlarının arttırılması ile beton geçirimsizliğinin iyileştirildiği (Şekil 2.41, Şekil 2.42), dolayısıyla ileri yaşlardaki beton dayanımının arttığı,
- PK Külü katkılı betonların coulomb değerlerinin kontrol betonlara göre;

28 günlük:

0.30 w/b, % 17 PK Külü % 87

0.31 w/b, % 13 PK Külü % 73.31

0.33 w/b, % 9 PK Külü % 64

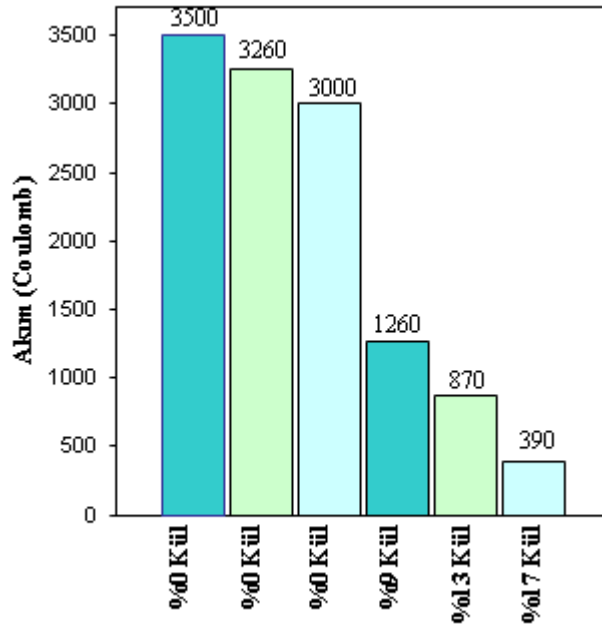
1 yıllık :

0.30 w/b, % 17 PK Külü % 89.44

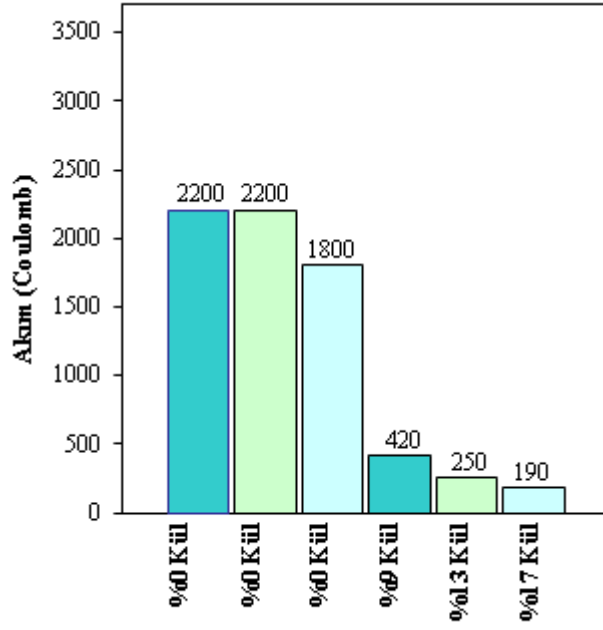
0.31 w/b, % 13 PK Külü % 88.64

0.33 w/b, % 9 PK Külü % 80.91

oranlarında azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 2.41: Referans ve (700°C)PK Külü ikameli beton numunelerin 28 günlük klor Permeabilitesi (Mehta, 1992).



Şekil 2.42: Referans ve (700°C)PK Külü ikemeli beton numunelerin 1 yıllık klor permeabilitesi (Mehta, 1992).

2.3.5.2. Alkali-Agrega Reaksiyonuna Karşı Dayanıklılık

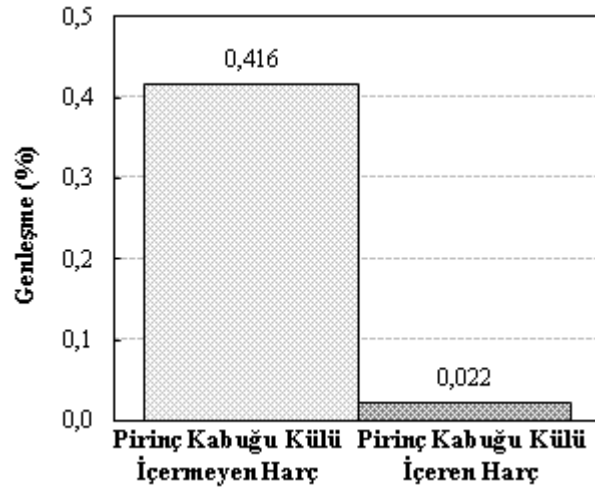
Betonda zamanla genişleme ve çatlamalara yol açan alkali-agrega reaksiyonları genellikle alkali-karbonat ve alkali-silika reaksiyonları olarak iki ana grupta ele alınır (Yeğinoğlu, 2005);

1. Silisin alkali-karbonat reaksiyonlarının kontrol altına alınmasında fazla etkili olmadığı bildirilmektedir.
2. Alkali-silika reaksiyonu, betona bazı puzolanların yeterli miktarda katılması halinde geciktirilebilmekte veya önlenmektedir. Puzolanların ince taneleri içindeki silis, çimento hamuru gözenek sıvısındaki alkalileri (suda çözünen bazlar) hızla bağlayarak yoğunlukları ve sıvının pH değerini azaltır. Bu durumda gözenek sıvısında azalan alkalilerin agregadaki reaktif silis ile reaksiyona girmeleri zorlaşır.

Mehta ve Folliad (1992) tarafından alkali-silis genişmesi üzerinde PK Külünün etkisini belirlemek amacıyla, % 90 oranında yüksek alkali portland çimentosu ve % 10 oranında 700°C'de elde edilmiş PK Külü içeren harç numuneler hazırlanmış ve ASTM

C441 standardına göre alkali silis genleşme yüzdeleri test edilmiştir. Çalışma sonucunda;

- PK Külünün çimentodan alkali karşılansının azalmasına yardımcı olduğu ve daha fazla reaktiviteye neden olan çimentodan alkali tükettiği dolayısıyla PK Külü içeren harcın büyümede % 95 azalma gösterdiği (Şekil 2.43),
- PK Külünün harcı çevreleyen suyu emerek gözenekli yapıyı rafine ettiği ve mikro gözenekli PK Külü ile agrega yüzeyine alkali iyonlarının difüzyonunu engellediği gözlenmiştir.

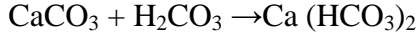


Şekil 2.43: Harçların alkali-silis genleşmesi düşüşü (Mehta, 1992).

2.3.5.3. Çelik Donatı Korozyonuna Karşı Dayanıklılık

Betonarme yapılarda donatının korozyona uğraması yapının erken yaşta yıpranmasına neden olmaktadır. Beton tarafından sağlanan alkalın ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ortamı çeliği korozyondan korur. Ancak, karbondioksit gazı ve klorür iyonları betona nüfuz ettiği zaman normal olarak pasif korozyon durumunda bulunan çelik üzerinde aktif korozyon süreci başlar. Korozyon ürünleri (pas), kendisini oluşturan orjinal çelik hacminin yaklaşık 2-4 katı kadar artar (Arslan ve Subaşı 2003).

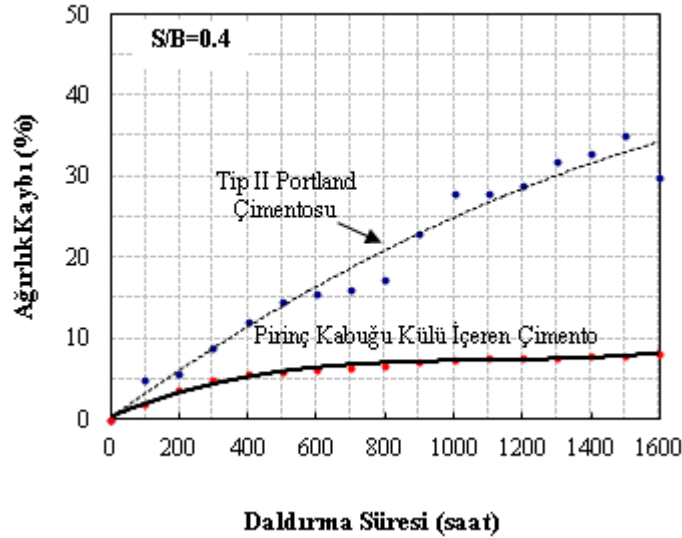
Taze betonda karışım suyu içinde fazla miktarda çözülmüş karbondioksit bulunması durumunda su ile karbonik asiti, CaO ile kalsiyum karbonatı oluşturduğu belirlenmiştir. Ortamda fazla olan karbonik asit kalsiyum karbonatı da kalsiyum bikarbonata dönüştürerek çözüdüremekte ve betonu ayrıştırmaktadır:



Yüzeyde oluşan bu reaksiyon betonun içine yıllarca nüfuz eder. Yüzeydeki sertleşme ve kabuklaşma, betonun bu bölgelerinde ek gerilmeler oluşturur ve çatlamalara, yarılan beton örtününün atılmasına sebep olur (Küçük, 2000).

Andersson(1977) tarafından asidik atağa karşı 700°C' de elde edilmiş PK Külünün etkisini belirlemek amacıyla, w/ç oranı 0,4 olan PK Külü katkılı ve portland çimentolu referans beton silindir numuneleri hazırlanmış daha sonra numuneler % 5 HCL çözeltisi içinde sürekli batırma deneyine tabi tutulmuş ve numunelerin ağırlık kayıpları test edilmiştir. Çalışma sonucu;

- PK Külü etkisiyle kalsiyum silis hidratların (C-S-H) oluşumu ve silis jelden dolayı katkılı numunelerin hidrasyon ürünlerinin asidik atağa karşı daha fazla dirence sahip olduğu,
- Tip II Portland çimentolu numunelerin yüzey yumuşaması ve yüzey dağılımına eğilimli olduğu, PK Külü katkılı numunelerin ise kendi orijinal sert yüzeylerinin koruduğu ve daha az ağırlık kaybı gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 2.44).



Şekil 2.44: % 5 HCL çözeltisi içinde sürekli batırma ile beton silindirlerinin ağırlık kaybı (Hwang ve Chandra, 1997).

Hwang and Wu(1989) tarafından PK Külünün pH değeri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 700°C 'de yanmış PK Külü ile 20, 10, 6.67, 5, 4, 3.33 w/pirinç k.k. oranlarında yapılan çalışmada pH değerlerinin sırasıyla;

- 1 günlük : % 0.71, % 0.20, % 1.20, % 0.20, % 0.69
- 3 günlük : % 2.4, % 0.92, % 0, % 0.71, % 0
- 7 günlük: % 2.09, % 0.51, % 1.63, % 0.51, % 0 oranlarında artışa sebep olduğu görülmüştür.

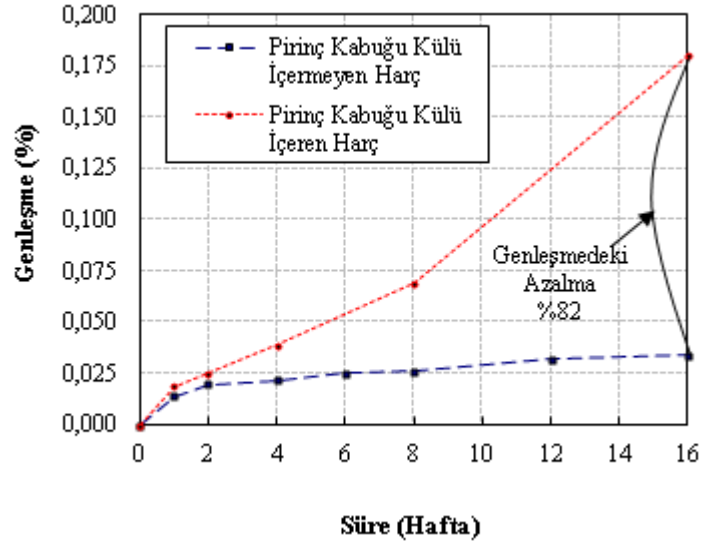
2.3.5.4. Sülfat Etkisine Karşı Dayanıklılık

Sülfat iyonları, çimento içindeki C₃A (tri kalsiyum alüminat) ile reaksiyona girerek etrenjit bileşimini meydana getirir. Bu reaksiyonu önlemek için çimento bileşimindeki tri kalsiyum alüminatın düşük olması (C₃A<% 6) gerekmektedir (Kılınçkale, 2003).

Donatıda kimyasal korozyonun meydana gelmesine neden olan, sülfat asitleri, deniz suyu ve klorürlerin zarar verebilmesi için beton içerisine girmiş olması gerekmektedir. Betonun permeabilitesi bu bakımdan da önemli görülmektedir. İç rutubet yükselmesinden, ısıdan ve ozmoz olayından dolayı aktif maddelerin beton içerisine doğru taşınması kimyasal tesirin gerçekleşmesinde etkin olmaktadır (Subaşı, 2001).

Mehta and Folliaod (1995) tarafından sülfat direncine karşı 700°C' de elde edilen PK Külünün etkisini belirlemek amacıyla % 90 yüksek C₃A portland çimentosu içeren ve w/ç oranı 0,485 olan referans harç numuneleri diğer taraftan da aynı akma değerlerin korunmasına göre su miktarları belirlenerek % 10 PK Külü katkılı harç numuneleri hazırlanmıştır. Gereken 19.6 MPa dayanımın numunelere 24 saatte kazandırılması için numuneler 38°C'de kür edilerek ASTM C1012 standardına göre sülfat çözeltisine daldırılmıştır(su litresi başına 50 g Na₂SO₄). Çalışma sonucunda;

- PK Külü içeren harç numunelerinin genleşmesinin 16 hafta sonunda referans harç numunelerine göre % 82 arttığı, referans harç numunelerindeki genleşmenin de ilerleyen haftalarda devamlı olduğu (Şekil 2.45),
- PK Külünün geçiş bölgesini güçlendirme etkisinden dolayı katkılı harç numunelerinin büyüme miktarlarının neredeyse istikrarlı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.45: Harç numunelere ait sülfat genleşmesi (Mehta ve Folliad , 1995).

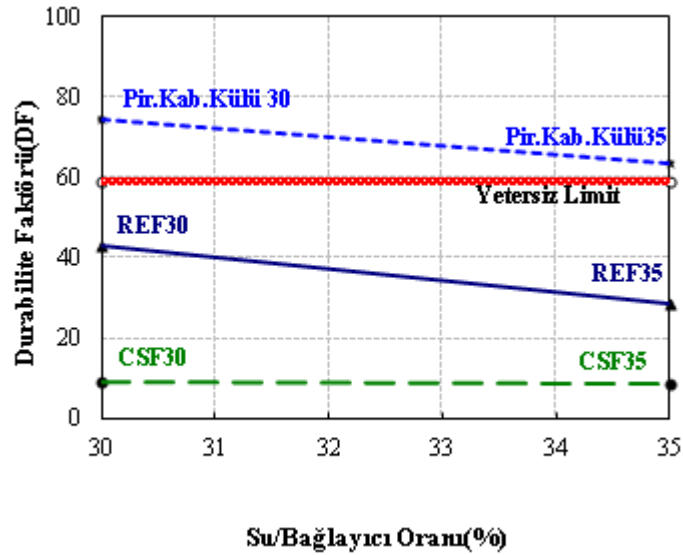
2.3.5.5. Donma-Çözünme Etkisine Karşı Dayanıklılık

Beton, boşluklarına önemli miktarda su alabilen bir malzeme olduğuna göre, donma olayının etkisi altında kalmaya ve bu olay sonucunda hasar görmeye elverişli bir malzemedir. Donma olayı önce büyük boşluklarda gerçekleşir. Suyun donma derecesi boşluk boyutları küçüldükçe artmaktadır. Bu nedenle iri boşluklarda başlayan donma olayı küçük boşluklara doğru gelişir ve bunun sonunda kılcal boşluklardaki su donmaya başlar. Jel boşluk boyutları küçük olduğundan buralarda buz kristalleri oluşamaz. Bu ince boşluklarda suyun donabilmesi için sıcaklık derecesinin -78°C nin altına düşmesi gerekmektedir. Bu böyle olmakla beraber, jel suyu ile buzun etropilerindeki farklılıklardan dolayı, potansiyel enerjisi artan jel suyu kılcal boşluklara yönelerek donma olayının şiddetlenmesine neden olurlar. Betonun dona dayanıklı olabilmesi için kendisini oluşturan çimento hamurunun ve agreganın dona dayanıklı olması gerekir. Yapılan incelemelerde çimento hamurunda, dona dayanımının su/çimento oranına ve beton içine sürüklenmiş kabarcıklarının miktarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür (Subaşı, 2001).

Mehta and Folliad (1995) tarafından donma-çözünmeye karşı 700°C ' de elde edilmiş PK Külünün etkisini belirlemek amacıyla; 0,30 ve 0,35 w/c oranlarında yoğunlaştırılmış silis dumanı(CSF) ve PK Külü içeren ayrıca katkısız referans prizma numuneler (76.2x101.6x406.4 mm; 3x4x16 inç) hazırlanmıştır(REF30: 0,30 s/b oranına sahip

katkısız beton numune, CSF35:0,36 s/b oranına sahip silis dumanı katkılı beton numune). Bütün prizma numunelerinin karışımlarında su miktarını düşürmek amacıyla süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Prizmalar 14 gün kür edilmiş ve ASTM 666 ve yöntem A' ya göre donma çözünme testine tabi tutulmuştur. Yapılan çalışma sonucu;

- PK Külünün beton içerisinde oluşturduğu mikro gözenekli yapı ile iç gerilmeleri rahatlatarak ve mikro çatlakları azaltarak donma-çözünme direncini iyileştirdiği,
- REF30 betonunun dayanıklılık faktörünün 43, REF35 betonun ise 28 olduğu (Şekil 2.46),
- 0,30 ve 0,35 w/c oranlarına sahip CSF betonunun 101 ve 67 seri sonrası 10 değerinden daha da az don direncine sahip olduğu, 0,30 w/c oranına sahip referans betonun 0,35 w/c oranına sahip olan referans betondan daha iyi olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.46: REF Betonların dayanıklılık faktörleri (Mehta ve Folliad , 1995).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MATERYAL

Çalışmada TS EN 197-1 standardına uygun olarak Bolu Çimento fabrikası tarafından üretilen CEM I 42.5 R tip çimento ve Düzce ili Konuralp ilçesin çeltik fabrikasından temin edilen pirinç kabukları kullanılmıştır.

Harç numunelerinin hazırlanmasında TS EN 196-1' e uygun olarak Set Trakya Çimento Sanayi tarafından üretilen standart kum kullanılmıştır.

3.2. YÖNTEM

3.2.1. Pirinç Kabuğunun Yakma İşlemi İle Kül Haline Getirilmesi Ve Öğütülmesi

Karışımlarda puzolanik özellikte kül kullanımını sağlamak için, her bir grup pirinç kabuğu elektrikli kül yakma fırınında, dakikada 10°C artış olacak şekilde kontrollü olarak yakma işlemine tabi tutulmuştur. 600, 700, 800°C sıcaklıklarda sırasıyla 60, 70, 80 dakikada fırın sıcaklığı istenilen sıcaklığa getirilmiş, daha sonra sıcaklık sabit tutularak pirinç kabukları fırın içerisinde 3 saat bekletilmiştir. 3 saatin sonunda fırın kapatılarak fırın sıcaklığı 300°C ye düşene kadar PK Külleri fırın içerisinde bırakılmıştır. İstenilen sıcaklığa gelindiğinde, kül içeriğindeki silisin amorf yapıya sahip olabilmesi dolayısıyla puzolanik özellik kazanabilmesi için küller fırından çıkarılarak 20°C oda sıcaklığında desikatörde soğumaya bırakılmıştır. Elde edilen küllerin bağlayıcılık özelliği kazanabilmesi için küller laboratuvar tipi bilyalı çimento değirmeninde 200 µ'lük elekten geçecek şekilde öğütülmüştür.

3.2.2. Fiziksel Analizler

3.2.2.1. Tane Boyut Analizi

Farklı sıcaklıklarda (600, 700, 800°C) yakılarak elde edilen PK Küllerinin ve Tip I Portland Çimentosunun tane boyut analizleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Malzemeleri ve Beton Laboratuvarı tarafından tespit edilmiştir. PK Küllerinin tane boyut analizleri Lazer Difraksiyon yöntemi ile belirlenmiştir.

Çimentonun tane boyut dağılımları, TS EN 196-6 “Çimento Deney Metotları - Bölüm6: incelik tayini” standardına göre belirlenmiştir.

3.2.2.2. Özgül Yüzey Tayini

Özgül yüzey tayinleri, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Malzemeleri ve Beton Laboratuvarı tarafından tespit edilmiş olup, TS EN 196-6 “Çimento Deney Metotları” standardına göre tespit edilmiştir.

3.2.2.3. Özgül Ağırlık Tayini

Özgül ağırlık tayinleri, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Malzemeleri ve Beton Laboratuvarı tarafından tespit edilmiştir.

3.2.2.3. Standart Kıvam Tayini

Numunelerin standart kıvam tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm3: priz süresi ve genleşme tayini” standardına göre tespit edilmiştir.

Deney TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm3: Priz süresi ve genleşme tayini” standardına göre 500 gram numune için belirlenen ikame oranında PK Külü ve çimento 1 gram doğrulukla tartılarak ve karışım suyu başlangıç olarak toplam numune ağırlığının % 25 i kadar alınarak dereceli mezürle ölçülmüştür.. Vicat aletine sonda takılarak vicat halkası(kalıp) ve taban camı ince yağ ile yağlanmış, sonda cam levha üzerine indirilip vicat aletinin göstergesi sıfıra ayarlanmıştır.. Karıştırma kabına karışım için hazırlanan su katılarak 5-10 saniye içerisinde temsili 500 gramlık numune suyun içerisine boşaltılmıştır. Boşaltma işlemi sonunda kronometre düşük hızda 90 saniye süreye ayarlanarak karıştırma mikseri çalıştırılmış ve 90 saniye sonunda karıştırma mikseri durdurularak 15 saniye dinlendirilmiştir. Uygun bir kazıyıcı ile karıştırma kabının iç çeperlerine yapışan pasta sıyrılarak karışıma eklenerek ve mikser tekrar düşük hızda 90 saniye çalıştırılarak 180 saniyelik karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Hiçbir sıkıştırma veya vibrasyon yapmadan daha önce yağlanmış ve cam levha üzerine yerleştirilmiş vicat halkasına çimento pastası yerleştirilerek kalıbın üstüne taşan çimento pastası fazlalığı düzgün bir şekilde spatül yardımıyla alınmıştır. Vicat kalıbı ve taban plakası sondanın altında merkezlenecek şekilde cihaza yerleştirilerek sonda pasta ile temas edinceye kadar yavaşça indirilmiştir. Sonda serbest bırakılarak kendi ağırlığı ile pastanın merkezine girmesi sağlanarak ve batma işlemi tamamlandığında sondanın alt

yüzü ile taban plakası arasındaki mesafenin okuması yapılmıştır. Her batırma işleminden sonra sonda temizlenerek, kıvam için gerekli olan su miktarının tayini için sondanın cam levhaya olan uzaklığı 6 ± 1 mm oluncaya kadar su arttırılarak ya da azaltılarak deneye devam edilmiştir. Mesafenin 6 ± 1 mm okunduğu durumdaki su miktarı, kıvam için gerekli su miktarı olarak kaydedilmiştir.

3.2.2.4. Priz Başlama Ve Sona Erme Süresinin Tayini

Numunelerin priz başlama ve sona erme sürelerinin tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm3: priz süresi ve genleşme tayini” standardına göre tespit edilmiştir.

Deney TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm3: Priz süresi ve genleşme tayini” 500 gram numune için belirlenen ikame oranında PK Külü ve çimento 1 gram doğrulukla tartılarak ve kıvam deneyinde bulunan karışım suyu miktarı dereceli mezürle ölçülmüştür. Vicat aletine iğne takılarak vicat halkası (kalıp) ve taban camı ince yağ ile yağlanmış, iğne cam levha üzerine indirilerek vicat aletinin göstergesi sıfıra ayarlanmıştır. Karıştırma kabına karışım için hazırlanan su katılarak 5-10 saniye içerisinde temsili 500 gramlık numune suyun içerisine boşaltılmıştır. Boşaltma işlemi sonunda kronometre düşük hızda 90 saniye süreye ayarlanarak karıştırma mikseri çalıştırılıp, 90 saniye sonunda karıştırma mikseri durdurularak 15 saniye dinlendirilmiştir. Uygun bir kazıyıcı ile karıştırma kabının iç çeperlerine yapışan pasta sıyrılarak karışıma eklenerek ve mikser tekrar düşük hızda 90 saniye çalıştırılarak 180 saniyelik karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Hiçbir sıkıştırma veya vibrasyon yapmadan daha önce yağlanmış ve cam levha üzerine yerleştirilmiş vicat halkasına çimento pastası yerleştirilerek kalıbın üstüne taşan çimento pastası fazlalığı düzgün bir şekilde spatül yardımıyla alınmıştır. Vicat kalıbı ve taban plakası cihaza yerleştirilerek pasta ile temas edinceye kadar yavaşça indirilmiştir. İğne serbest bırakılarak kendi ağırlığı ile pastanın içerisine girmesi sağlanmış ve batma işlemi tamamlandığında iğnenin alt yüzü ile taban plakası arasındaki mesafenin okuması yapılmıştır. Her batırma işleminden sonra iğne temizlenmiştir. Aynı numuneye batırılma işlemleri, iğnenin pastaya batırıldığı noktalar arasındaki ve kalıp kenarından olan mesafe en az 10 mm olacak şekilde ayarlanarak 10 dakika aralıklarla tekrarlanmıştır. Deneye başlandığı andan itibaren iğne ile taban plakası arasında okunan mesafe 4 ± 1 mm oluncaya kadar geçen süre en yakın 5 dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedilmiştir.

Priz başlama süresi tespit edilen numune ile dolu vicat halkası ters çevrilerek taban plakası ile temas eden yüzey üste getirilerek ve priz sona erme süresi tayini yapılmıştır. Küçük batmaların doğru şekilde gözlemlenebilmesi için vicat iğnesi bağlantı halkası ile tutturulmuştur. Priz başlama süresinin tayinindeki işlemler uygulanarak batırma işlemi 15 veya 30 dakika aralıklarla tekrarlanmıştır. Deneye başlandığı andan itibaren iğnenin ilk 0,05 milimetre kadar pastaya battığı ana kadar geçen süre en yakın 15 dakikaya yuvarlatılarak priz sona erme süresi olarak kaydedilmiştir.

3.2.3. Kimyasal Analizler

Çimento ve farklı yanma sıcaklıklarında elde edilen pirinç kabuklarının kimyasal analizleri, Bursa Çimento Fabrikası Laboratuvarı tarafından, TS EN 196-2'e göre tespit edilmiştir.

3.2.4. Çimento Harç Deneyleri

3.2.4.1. Deney Örneklerinin Hazırlanması

Her bir grup karışıma ait pirinç kabuğu külü katkılı çimento harçları için gerekli olan su miktarının (işlenebilirliğin) belirlenmesi(ASTM C230, C109, 1437 ye uygun olarak): Her bir grup numune için toplam 450 gr bağlayıcıya göre PK Külünün % 0, 5, 10, 15, 20 oranlarında çimento ile ikame miktarları tayin edilmiştir. Her bir grup için toplam 450 g bağlayıcı ve 1350 gram referans kum kullanılarak ASTM C230, C109, 1437 standartlarına göre su miktarı tayinleri yapılmıştır.

Akma tablası ve kesik koni şeklindeki kalıp yağlanarak cihaz kullanıma hazır duruma getirilmiştir. İlk karışımda başlangıç olarak 200 ml su ölçülerek karıştırma kabı içerisine konularak ve belirlenen miktarda PK Külü ile çimento bağlayıcıları eklenmiştir. Bu işlemin hemen ardından mikser düşük hızda çalıştırılarak ve 30 saniye sonunda 1350 gram referans kumu 30 saniye içerisinde karışıma sürekli olarak ilave edilmiştir. Ardından mikser yüksek hızda ayarlanarak karışıma 30 saniye daha devam edilerek ve toplam 1 dakika 30 saniyelik süre sonunda mikser durdurulmuştur. 15 saniye içerisinde kabın çeperlerine ve tabanına yapışan harçlar lastik bir sıyrıcı yardımıyla kabın ortasına toplanmıştır. Daha sonra karıştırma işlemine yüksek hızda 60 saniye daha devam edilerek ve bu süre sonunda mikser durdurulmuştur. Kabın içerisindeki harcın bir kısmı, tabla üzerinde merkezlenen kesik koni şeklindeki kalıp içerisine her bir tabakada 15 kez

şişleme yapılarak üç tabaka halinde yerleştirilmiştir. Cihazının kolu çevrilerek tabla kaldırıldıktan sonra tabla 15 kez düşürülmüştür. Bu işlem sonunda bir kumpas yardımıyla yayılan harcın çapı dört farklı noktadan ölçülerek kaydedilmiştir. Daha sonra tabla üzerindeki harç ve kesik koni şeklindeki kalıp temizlenerek yağlanamış ve aynı işlemler tekrar edilerek ölçüm iki kez daha yapılmıştır. Bütün işlemler sonunda okunan 12 ölçümün ortalaması alınarak akma çapı değeri belirlenmiştir. Sadece su miktarını değiştirmek koşulu ile istenilen akma çapı değerine ulaşana kadar bütün karışım işlemleri tekrar edilmiştir.

Numunelerin hazırlanmasında kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Çimento örneklerine ait karışım oranları

PK Külü yanma sıcaklığı	PK Külü İkame Miktarı	Çimento Miktarı (gr)	PK Külü Miktarı (gr)	Su Miktarı (ml)	W/C
600°C	% 0	450	0	225	0,50
	% 5	427,5	22,5	245	0,54
	% 10	405	45	257	0,57
	% 15	382,5	67,5	265	0,59
	% 20	360	90	275	0,61
700°C	% 5	427,5	22,5	247	0,55
	% 10	405	45	259	0,58
	% 15	382,5	67,5	267	0,59
	% 20	360	90	277	0,62
800°C	% 5	427,5	22,5	235	0,52
	% 10	405	45	245	0,54
	% 15	382,5	67,5	253	0,56
	% 20	360	90	254	0,56

Pirinç kabuğu külü katkılı çimento numunelerinin (50x50x50 mm boyutlarında) hazırlanması (ASTM C230, C109, 1437 ve TS EN 196-1 e uygun olarak):

% 0, 5, 10, 15, 20 PK Külü ikame oranlarına sahip her bir grup numune için akma tablası deneyinde belirlenen malzeme miktarları kullanılarak ve TS EN 196-1 e uygun olarak 50x50x50 mm boyutlarında küp numuneler hazırlanmıştır.

Çimento kalıpları temizlenerek yağlanmış ve mikser çalışmaya hazır duruma getirilmiştir. Akma tablası deneyinde miktarları belirlenen su karıştırma kabı içerisine konularak üzerine PK Külü ile çimento ilave edilmiştir. Bu işlemin hemen ardından mikser düşük hızda çalıştırılarak ve 30 saniye sonunda 1350 gram referans kumu 30 saniye içerisinde karışıma sürekli olarak ilave edilmiştir. Ardından mikser yüksek hızda ayarlanarak karışıma 30 saniye daha devam edilerek ve toplam 1 dakika 30 saniyelik süre sonunda mikser durdurulmuştur. 15 saniye içerisinde kabın çeperlerine ve tabanına yapışan harçlar lastik bir sıyrıcı yardımıyla kabın ortasına toplanmıştır. Daha sonra karıştırma işlemine yüksek hızda 60 saniye daha devam edilmiş ve bu süre sonunda mikser durdurulmuştur. Kabın içerisindeki harç kalıbın her bir bölümüne iki tabaka halinde doldurulmuştur. Birinci tabakanın doldurulmasından hemen sonra sıkıştırma test aparatı(50x50x50 mm çimento numuneleri için) kullanılarak sıkıştırma işlemi yapılmış ve kalıp sarsma tablası cihazına sabitlenerek 60 sarsma işlemi yapılmıştır. Sarsma işlemi sonunda ikinci tabaka için kalan harç kalıba yerleştirilerek birinci tabakadaki gibi uygulanan işlemler tekrarlanmıştır. Kalıp, sarsma tablasından dikkatlice alınarak harç fazlalığı dik tutulan bir masterla her yöne bir kere olacak şekilde enine testere hareketi ile sıyrılmıştır. Kalıpların üstü 210x185 mm boyutlarındaki cam ile örtülerek çimento kür kabinine alınmış ve 24 saat bekletilmiştir. 24 saatin sonunda numuneler kür kabininden alınarak dikkatli bir şekilde kalıptan çıkarılmıştır. Numuneler aralarında boşluk olacak şekilde yatay olarak kür havuzuna yerleştirilmiş ve her bir grubun 2, 7, 28, 56, 90 günlük bekleme süresine göre havuzda bırakılmıştır.

3.2.4.2. Birim hacim ağırlık Tayini

Pirinç kabuğu külü katkılı çimento numunelerinin(50x50x50 mm boyutlarında) birim hacim ağırlıklarının tayini:

% 0, 5, 10, 15, 20 PK Külü ikame oranlarına sahip 2, 7, 28, 56, 90 günlük ve 50x50x50 mm boyutlarındaki her bir grup küp numunelerin birim hacim ağırlıkları tayin edilmiştir.

Kür havuzundan çıkarılan küp numunenin bir bez ile yüzeyi silinmiş ve doymun kuru yüzey ağırlığı terazide 1 gram hassasiyetle tespit edilerek kaydedilmiştir(M₁). Daha sonra su sızdırmaz tanka asılı olan sepet su içerisine daldırılarak terazinin kalibrasyonu yapılmıştır. Su içerisindeki ağırlığı tespit edilmiş küp numune sepet içerisine yerleştirilerek tamamen suya daldırılmış ve kütlesi sabit hale gelinceye kadar

bekletilmiştir. Terazideki kütle değeri sabit hale geldiğinde küp numunenin sudaki ağırlığı kaydedilmiştir (M_2). Küp numune sepetten alınarak yüzeyi bir bez ile kurutulmuş ve 24 saat beklemek üzere etüv ($110\pm 5^\circ\text{C}$) e yerleştirilmiştir. 24 saatin sonunda küp numune etüvden alınarak etüv kurusu ağırlığı terazide 1 gram hassasiyetle kaydedilmiştir(M_2). Kaydedilen bütün değerler ile gerekli hesaplamalar yapılarak küp numunelerin birim hacim ağırlıkları tayin edilmiştir.

3.2.4.3. Basınç Mukavemeti Tayini

PK Külü katkılı çimento numunelerinin basınç ve eğilme dayanımı tayininde:

% 0, 5, 10, 15, 20 PK Külü ikame oranlarına sahip 2, 7, 28, 56, 90 günlük ve 50x50x50 mm boyutlarındaki her bir grup küp numunenin basınç dayanımları ASTM C109'a uygun olarak tayin edilmiştir.

Küp numuneler, cihazın plakaları arasına $\pm 0,5$ mm' den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek yerleştirilmiştir. Yük (2400 ± 200) N/s hızda olmak üzere düzgün şekilde, küp kırılana kadar artırılmış ve kırılmadaki en büyük yük (F_c) kaydedilmiştir.

Basınç dayanımı R_c , aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$R_c = \frac{F_c}{2500} \quad (3.1)$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı (N/mm^2),

F_c : Kırılmadaki en büyük yük (N),

2500: Küp numunelerin ($50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$) alanı (mm^2) dır.

TSE-EN 196-1 standardına göre 40x40x160 mm'lik prizma numuneler ile yapılan analizlerde; prizma numune deney cihazına yan yüzeylerden biri üzerine ve uzunluk eksenini mesnet silindirlerinin eksenine dik olacak şekilde mesnet silindirleri üzerine yerleştirilir. Yük, yükleyici silindir vasıtası ile prizmanın karşı yan yüzünden dik olarak uygulanmış ve düzgün olarak (50 ± 10) N/s hızında olacak şekilde prizma numune kırılıncaya kadar artırılır. Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (F_f) kaydedilir. İki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar basınç dayanımı deneyine kadar ıslak bir bezle sarılarak muhafaza edilir.

Prizma numuneler için eğilme dayanımı R_f , N/mm² olarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$R_f = \frac{1,5xF_f \cdot xl}{b^3} \quad (3.2)$$

Burada;

R_f : Eğilme dayanımı, (Newton/mm²)

b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm),

F_f : Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (Newton),

l : Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm) dır.

Prizma numuneler için basınç dayanımı R_c , aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.3)$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı (N/mm²),

F_c : Kırılmadaki en büyük yük (N),

1600: Küp numunelerin (40 mm × 40 mm) alanı (mm²) dır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bulgular ve tartışma bölümü hammaddelere uygulanan analizler, çimento hamuru örneklerine uygulanan deneyler ve mukavemet deneyleri olmak üzere başlıca üç bölümden oluşmaktadır.

4.1. HAMMADDE ANALİZLERİ

4.1.1. Kimyasal Analizler

Çalışmada kullanılan CEM I 42,5 R çimentosu ve farklı yanma sıcaklıkları altında elde edilen PK Küllerinin tespit edilen kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

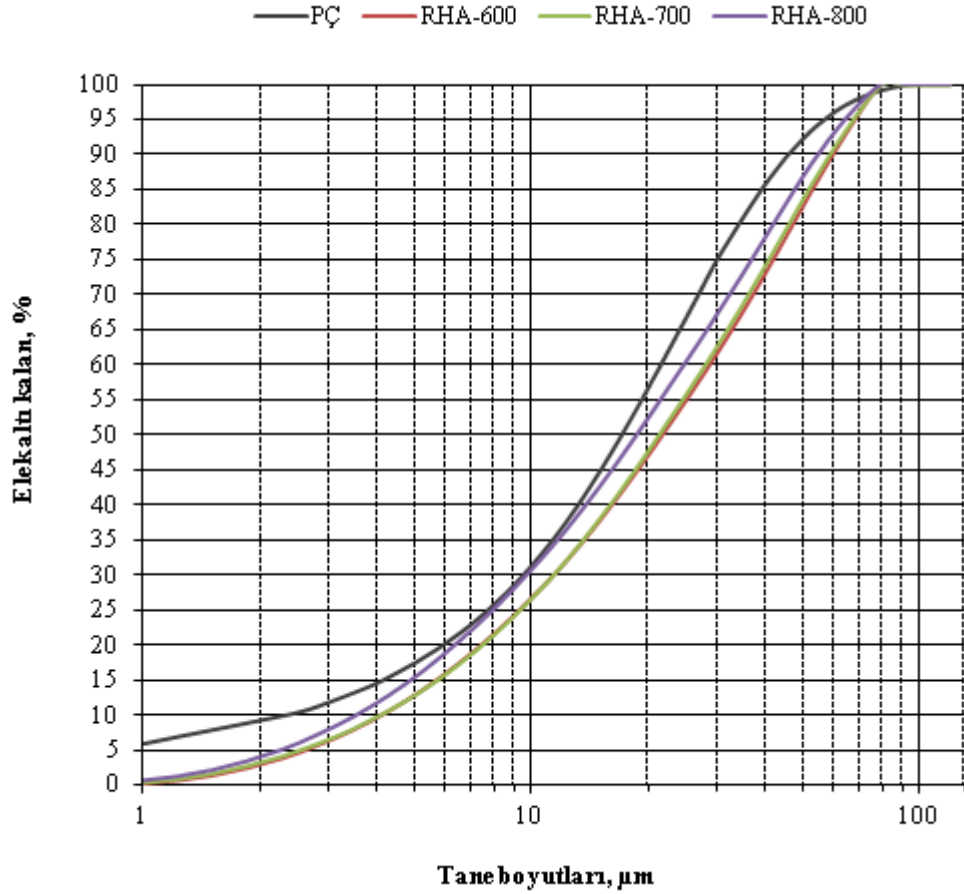
Çizelge 4.1: Çimento kimyasal özellikleri

KİMYASAL KOMPOZİSYON	PÇ	PK Külü		
		600°C	700°C	800°C
SiO ₂ (%)	20,32	91,67	90,89	92,99
Al ₂ O ₃ (%)	5,59	0,29	0,93	0,58
Fe ₂ O ₃ (%)	3,09	0,16	0,47	0,63
CaO (%)	62,50	1,23	1,25	1,02
MgO (%)	1,74	0,20	0,81	0,79
SO ₃ (%)	3,29	0,20	0,17	0,18
Na ₂ O (%)	0,34	-	-	-
K ₂ O (%)	0,91	1,53	2,34	2,29
Kızdırma Kaybı(%)	1,18	4,72	3,14	1,52
Çözünmeyen Kalıntı	0,31	-	-	-

4.1.2. Fiziksel Analizler

4.1.2.1. Tane Boyutu Analizi

Çalışmada kullanılan Tip I 42,5 R Portland çimentosu ve farklı yanma sıcaklıkları (600, 700, 800°C) altında elde edilen PK Küllerinin tespit edilen tane boyut analizi sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: PÇ ve (600, 700, 800°C) PK Külünün tane boyut dağılımları

PÇ ve 600, 700, 800°C de elde edilen PK Küllerinin % 90 elek altı oranlarına göre sırasıyla 46.07, 60.59, 59.39, 55.42 µm; % 50 elek altı oranlarına göre sırasıyla 17.15, 21.89, 21.45, 18.84 µm tane boyutlarına sahip olduğu belirlenmiştir. En küçük tane boyutuna portland çimentosunun, daha sonra da 800°C’ de elde edilmiş PK Külünün sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.1).

Özgül yüzey alanı değerlerinde ise en yüksek değer portland çimentosunda olduğu, farklı yakma sıcaklıklarında elde edilen PK Küllerinde ise en yüksek değer 800°C’ de elde edilmiş PK Külünde olduğu görülmektedir (Çizelge 4.2).

4.1.2.2. Özgül Yüzey Tayini

Çalışmada kullanılan CEM I 42,5 R çimentosu ve farklı yanma sıcaklıkları (600, 700, 800°C) altında elde edilen PK Küllerinin tespit edilen özgül yüzey alanı sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2: PÇ ve (600, 700, 800°C) PK Külü özgül yüzey alanı değerleri

Hammaddeler	Özgül Yüzey (cm ² /g)
PÇ	3885
PK Külü(600°C)	2255
PK Külü(700°C)	2312
PK Külü(800°C)	2572

Özgül yüzey alanı sonuçlarına göre; yakma sıcaklığına bağlı olarak, sıcaklık arttıkça PK Külünün özgül yüzey alanının arttığı, dolayısıyla farklı yakma sıcaklıklarında elde edilen PK Küllerinden 800°C dekinin gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir(Çizelge 4.2).

4.1.2.3. Özgül Ağırlık Tayini

Çalışmada kullanılan CEM I 42,5 R çimentosu ve farklı yanma sıcaklıkları (600, 700, 800°C) altında elde edilen PK Küllerinin tespit edilen özgül ağırlık değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3: PÇ ve PK Külü Özgül Ağırlık Değerleri

Hammaddeler	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
PÇ	3,10
PK Külü	2,67

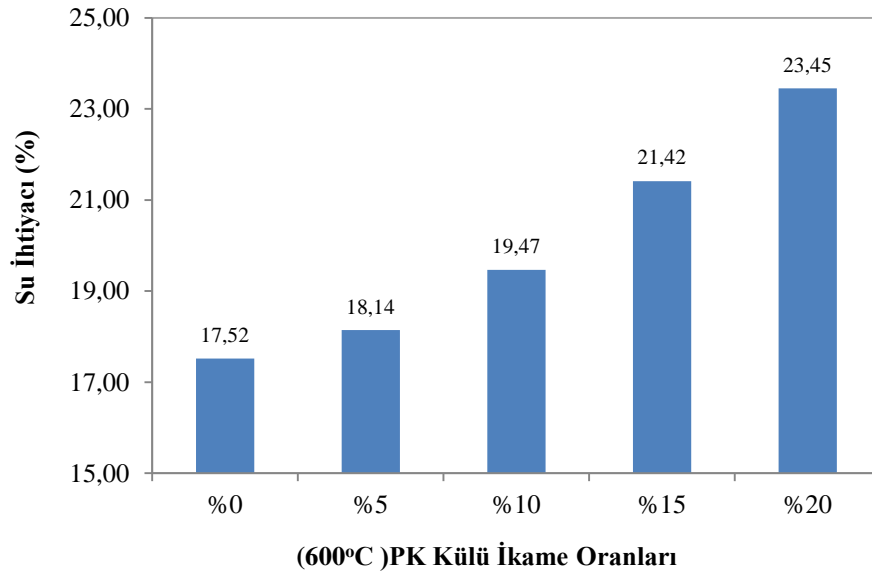
Çizelge 4.3' e bakıldığında portland çimentosuna göre; PK Külünün daha düşük özgül ağırlık değerine sahip olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, gözenekli bir yapıya sahip olan PK Külünün, çimento ile ikamesi ile elde edilen çimentoların özgül ağırlık değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir.

4.2. ÇİMENTO HAMURU ÖRNEKLERİNE UYGULANAN DENEYLER

Referans ve % 5, 10, 15, 20 oranlarında PK Külü ile ikame edilerek hazırlanan çimento hamuru numunelerinin su ihtiyacı, priz süresi deney sonuçları ile ilgili veriler ve şekiller aşağıda verilmiştir.

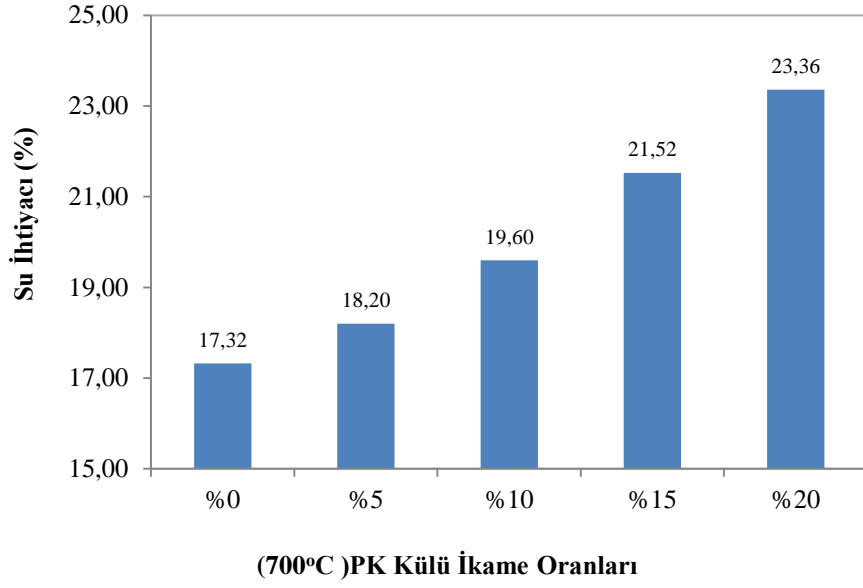
4.2.1. Standart Kıvam, Priz Başlama ve Sona Erme Süreleri Deneyleri

TS EN 196-3'e göre belirlenen su ihtiyacı ve priz süresi deneylerine ait bulgular sırasıyla Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7' de verilmiştir.



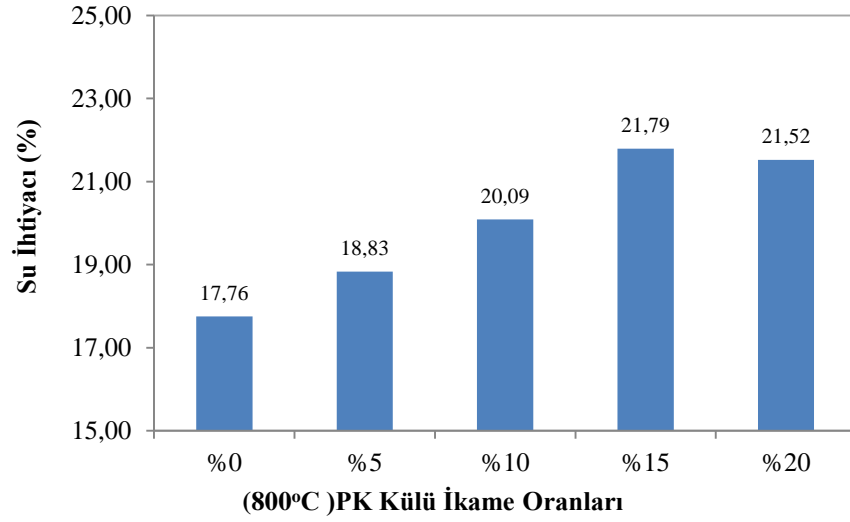
Şekil 4.2: PÇ ve (600°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı

% 5, 10, 15, 20 oranlarında (600°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı, referans çimentoya göre sırasıyla % 4, 11, 22, 34 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.3: PÇ ve (700°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı

% 5, 10, 15, 20 oranlarında (700°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı, referans çimentoya göre sırasıyla % 5, 13, 24, 35 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.3).

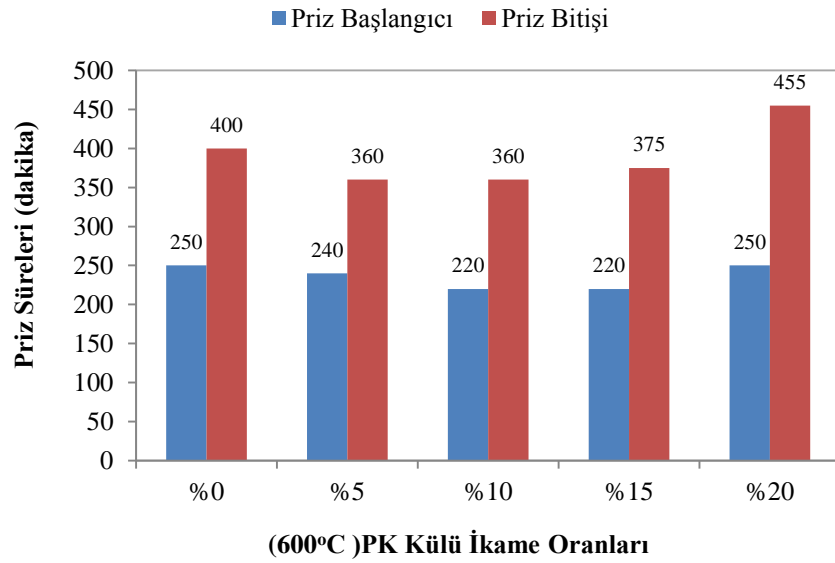


Şekil 4.4: PÇ ve (800°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı

% 5, 10, 15, 20 oranlarında (800°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı, referans çimentoya göre sırasıyla % 6, 13, 23, 21 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.4).

600, 700 ve 800°C de elde edilmiş PK Külleri ile % 5, 10, 15, 20 oranlarında hazırlanan tüm çimento numunelerinde, referans çimentoya göre su ihtiyacının arttığı ancak çok yüksek düzeyde olmadığı gözlenmiştir. Bu durumun da PK Külünün yüksek gözenekli yapısı ve özgül yüzey alanından kaynaklandığı düşünülmektedir.

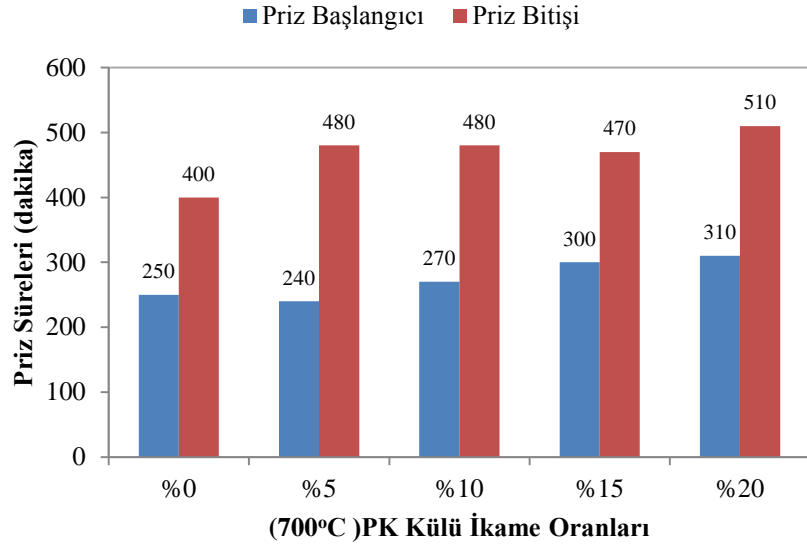
Çimentoya eklenen PK Külü oranı arttıkça işlenebilirlik, buna bağlı olarak da özdeş kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarının artışının olduğu görülmektedir (Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4).



Şekil 4.5: PÇ ve (600°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz süreleri

% 5, 10, 15 oranlarında (600°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz başlangıç süreleri, referans çimentoya göre sırasıyla % 4, 12, 12 oranlarında azalma göstermiş; % 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz başlangıç süresi, referans çimentoya göre değişim göstermemiştir (Şekil 4.5).

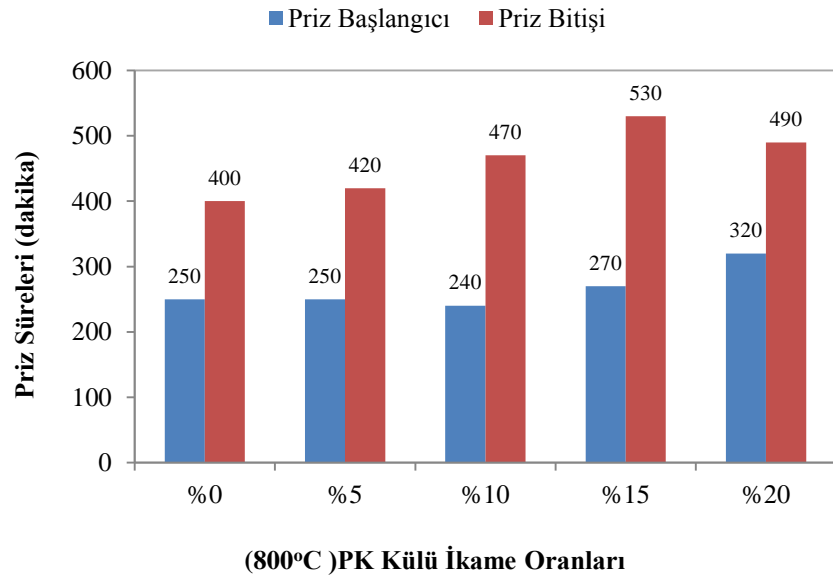
% 5, 10, 15 oranlarında (600°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz bitiş süreleri, referans çimentoya göre sırasıyla % 10, 10, 6 oranlarında azalma; % 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz bitiş süresi, referans çimentoya göre % 14 oranında artış göstermiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.6: PÇ ve (700°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz süreleri

% 5 oranında (700°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz başlangıç süresi, referans çimentoya göre % 4 oranında azalma; % 10, 15, 20 oranlarında (700°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz başlangıç süreleri, referans çimentoya göre sırasıyla % 8, 20, 24 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.6).

% 5, 10, 15, 20 oranlarında (700°C) PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz bitiş süreleri, referans çimentoya göre sırasıyla % 20, 20, 18, 28 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.7: PÇ ve (800°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz süreleri

% 5 oranında (800°C)PK Külü ikameli çimento numunesinin priz başlangıç süresi, değişim göstermemiş; % 10 oranında (800°C)PK Külü ikameli çimento numunesinin priz başlangıç süresi, % 4 oranında azalma göstermiş; % 15, 20 oranlarında (800°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz başlangıç süreleri, referans çimentoya göre sırasıyla % 8, 28 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.7).

% 5, 10, 15, 20 oranlarında (800°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin priz bitiş süreleri, referans çimentoya göre sırasıyla % 5, 18, 33, 23 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.7).

600°C de elde edilmiş PK Külleri ile % 5, 10, 15 oranlarında hazırlanan çimento numunelerinde, referans çimentoya göre priz süresinin azalma; % 20 oranında hazırlanan çimento numunesinde, referans çimentoya göre priz süresinin artış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.5).

700°C de elde edilmiş PK Külleri ile % 5 oranında hazırlanan çimento numunesinde, referans çimentoya göre priz süresinin azalma; % 10, 15, 20 oranlarında hazırlanan çimento numunelerinde, referans çimentoya göre priz süresinin artış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.6).

800°C de elde edilmiş PK Külleri ile % 5 oranında hazırlanan çimento numunesinde, referans çimentoya göre priz süresinin değişiklik göstermediği; % 10 oranında hazırlanan çimento numunesinde, referans çimentoya göre priz süresinin azalma; % 15, 20 oranlarında hazırlanan çimento numunelerinde, referans çimentoya göre priz süresinin artış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.7).

Genel olarak tüm çimento numunelerinde priz süreleri değerlendirildiğinde: priz başlama süresinin en az 250 dakika, en fazla 320 dakika; priz bitiş süresinin en az 400 dakika, en fazla 510 dakika olduğu görülmektedir (Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7).

4.3. ÇİMENTO HARÇ NUMUNELERİNE UYGULANAN ANALİZLER

4.3.1. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, porozite üzerinde yakma sıcaklığı, gün, PK Külü ikame oranı faktörleri göz önünde bulundurularak, çok yönlü varyans analizi gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çok yönlü varyans analizi sonucunda: gün, PK Külü ikame oranı ve sıcaklık faktörlerinin basınç dayanımı, birim hacim ağırlık ve porozite değerleri üzerinde ayrı ayrı etkisinin olduğu; gün, PK Külü ikame oranı ve sıcaklık faktörlerinin kendi aralarındaki tüm interaksiyonlarının da değerler üzerinde önemli etkiye sahip olduğu; tüm etkilerin de istatistiksel olarak önemli ($P<0,05$) olduğu görülmüştür (Çizelge 4.4).

Farklı yakma sıcaklıklarında (600, 700 ve 800°C) elde edilen PK Külü ile farklı ikame oranlarında (% 0, 5, 10, 15, 20) hazırlanan ve 2, 7, 28, 56, 90. günlerde basınç dayanımı testine tabi tutulan numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.4, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6' de verilmiştir.

Farklı yakma sıcaklıklarında (600, 700 ve 800°C) elde edilen PK Külünün ikame oranları ile elde edilen 2, 7, 28, 56, 90 günlük ortalama basınç dayanımı değerlerine ait grafik Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10' da görülmektedir.

Çizelge 4.4: Beton basınç dayanımı, birim hacim ağırlık , porozite verilerine ait çok yönlü varyans analizi sonuçları

Varyansın Kaynağı	Bağımlı Değişken	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi (p)
Doğrulanmış Model	Basınç Dayanımı (MPa)	74	14591,345 ^a	197,180	76,881	0,000
	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	74	0,315 ^b	0,004	61,805	0,000
	Porozite (%)	74	619,249 ^c	8,368	48,293	0,000
Intercept	Basınç Dayanımı (MPa)	1	568945,358	568945,358	221833,542	0,000
	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	1	915,668	915,668	1,329e-7	0,000
	Porozite (%)	1	71593,348	71593,348	413168,854	0,000
gün	Basınç Dayanımı (MPa)	4	4925,600	1231,400	480,127	0,000
	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	4	0,036	0,009	130,710	0,000
	Porozite (%)	4	262,374	65,593	378,543	0,000
pk külü	Basınç Dayanımı (MPa)	4	7437,832	1859,458	725,008	0,000
	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	4	0,221	0,055	801,790	0,000
	Porozite (%)	4	195,862	48,965	282,582	0,000
sıcaklık	Basınç Dayanımı (MPa)	2	1078,213	539,106	210,199	0,000
	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	2	0,022	0,011	162,368	0,000
	Porozite (%)	2	39,607	19,804	114,288	0,000
gün * pk külü	Basınç Dayanımı (MPa)	16	314,390	19,649	7,661	0,000
	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	16	0,010	0,001	9,133	0,000
	Porozite (%)	16	37,854	2,366	13,654	0,000
gün * sıcaklık	Basınç Dayanımı (MPa)	8	249,337	31,167	12,152	0,000
	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	8	0,008	0,001	14,876	0,000
	Porozite (%)	8	43,612	5,451	31,461	0,000
Pk külü * sıcaklık	Basınç Dayanımı (MPa)	8	351,514	43,939	17,132	0,000
	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	8	0,008	0,001	14,295	0,000
	Porozite (%)	8	21,657	2,707	15,623	0,000
gün*pk külü*sıcaklık	Basınç Dayanımı (MPa)	32	234,460	7,327	2,857	0,000
	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	32	0,010	0,000	4,354	0,000
	Porozite (%)	32	18,283	0,571	3,297	0,000
Hata	Basınç Dayanımı (MPa)	150	384,711	2,565	-	-
	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	150	0,010	6,889e-5	-	-
	Porozite (%)	150	25,992	0,173	-	-

Çizelge 4.5: (600°C-PK Külü) Beton basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

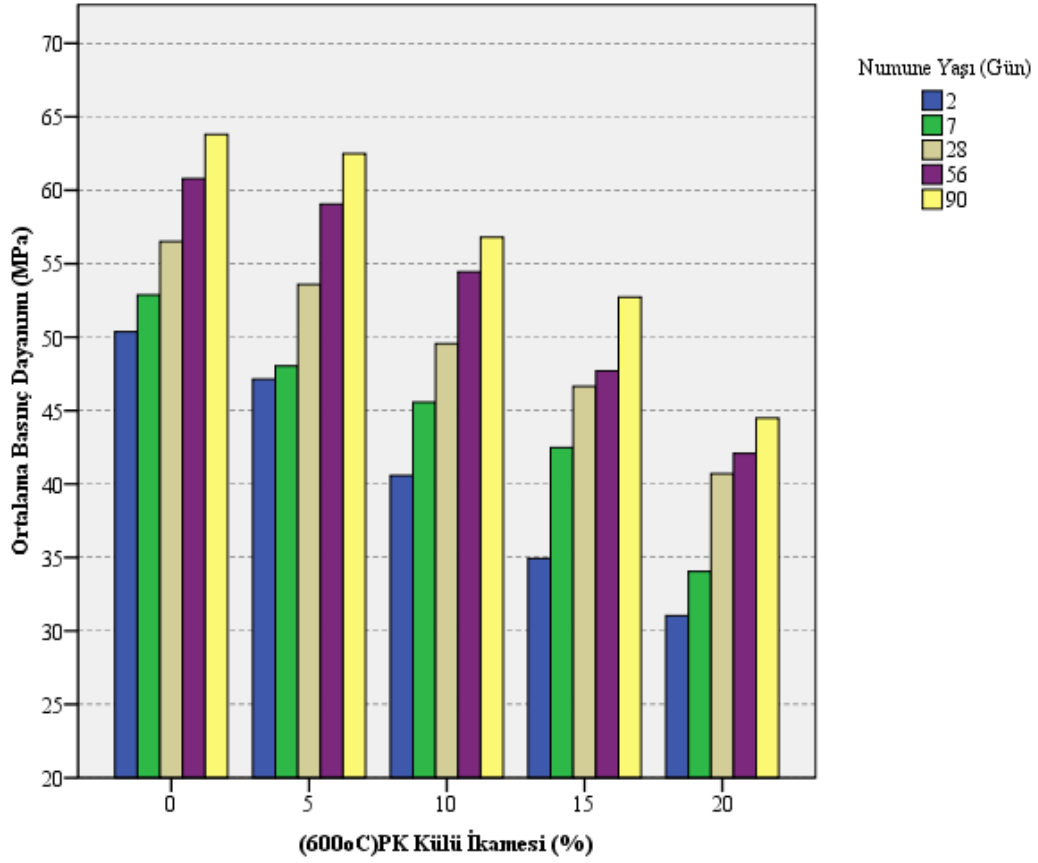
Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)	N	Ortalama		%95 Güven				
				Basınç Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Aralığında Ortalama		Minimum	Maksimum
600	2	0	3	50,360	0,905	0,523	48,109	52,610	49,400	51,200
		5	3	47,133	1,012	0,584	44,616	49,649	46,360	48,280
		10	3	40,573	0,543	0,313	39,224	41,922	40,000	41,080
		15	3	34,933	0,522	0,301	33,636	36,230	34,440	35,480
		20	3	31,040	0,832	0,480	28,972	33,107	30,080	31,560
	7	0	3	52,873	3,031	1,750	45,342	60,404	50,860	56,360
		5	3	48,040	3,468	2,002	39,423	56,656	44,720	51,640
		10	3	45,573	0,809	0,467	43,562	47,583	44,640	46,080
		15	3	42,480	1,913	1,104	37,726	47,233	40,880	44,600
		20	3	34,053	1,243	0,717	30,964	37,142	33,200	35,480
	28	0	3	56,506	3,766	2,174	47,150	65,863	52,400	59,800
		5	3	53,586	1,429	0,825	50,036	57,136	51,960	54,640
		10	3	49,560	2,177	1,257	44,150	54,969	47,560	51,880
		15	3	46,653	1,700	0,981	42,430	50,876	44,960	48,360
		20	3	40,706	0,300	0,173	39,960	41,452	40,360	40,880
	56	0	3	60,783	1,849	1,067	56,190	65,376	59,210	62,820
		5	3	59,053	0,612	0,353	57,532	60,574	58,360	59,520
		10	3	54,440	1,414	0,816	50,925	57,954	53,240	56,000
		15	3	47,706	0,506	0,292	46,448	48,964	47,160	48,160
		20	3	42,080	0,174	0,100	41,646	42,513	41,880	42,200
90	0	3	63,800	0,987	0,570	61,346	66,253	63,200	64,940	
	5	3	62,493	2,016	1,163	57,485	67,501	60,640	64,640	
	10	3	56,800	3,061	1,767	49,194	64,405	53,320	59,080	
	15	3	52,720	1,886	1,089	48,033	57,406	51,120	54,800	
	20	3	44,493	1,429	0,825	40,943	48,043	43,440	46,120	

Çizelge 4.6: (700°C-PK Külü) Beton basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)	N	Ortalama			%95 Güven			
				Basınç Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Aralığında Ortalama		Minimum	Maksimum
700	2	0	3	50,360	0,905	0,523	48,109	52,610	49,400	51,200
		5	3	46,880	0,683	0,394	45,182	48,577	46,240	47,600
		10	3	42,506	1,220	0,704	39,475	45,537	41,280	43,720
		15	3	34,520	1,113	0,642	31,753	37,286	33,320	35,520
		20	3	28,973	0,794	0,458	27,000	30,946	28,400	29,880
	7	0	3	52,873	3,031	1,750	45,342	60,404	50,860	56,360
		5	3	49,306	1,117	0,645	46,530	52,082	48,320	50,520
		10	3	46,186	0,220	0,127	45,639	46,733	46,040	46,440
		15	3	46,973	1,140	0,658	44,141	49,805	45,840	48,120
		20	3	35,173	0,737	0,426	33,340	37,006	34,360	35,800
	28	0	3	56,506	3,766	2,174	47,150	65,863	52,400	59,800
		5	3	50,520	0,682	0,393	48,824	52,215	49,760	51,080
		10	3	46,720	0,985	0,568	44,271	49,168	45,680	47,640
		15	3	48,186	2,206	1,273	42,705	53,667	45,640	49,520
		20	3	42,400	0,771	0,445	40,483	44,316	41,840	43,280
	56	0	3	60,783	1,849	1,067	56,190	65,376	59,210	62,820
		5	3	53,986	1,656	0,956	49,872	58,100	52,480	55,760
		10	3	53,186	1,180	0,681	50,255	56,118	52,000	54,360
		15	3	48,946	0,578	0,334	47,509	50,384	48,280	49,320
		20	3	42,880	2,010	1,1609	37,884	47,875	40,560	44,120
90	0	3	63,800	0,987	0,570	61,346	66,253	63,200	64,940	
	5	3	63,773	0,362	0,209	62,871	64,674	63,440	64,160	
	10	3	58,733	0,924	0,533	56,436	61,030	58,160	59,800	
	15	3	50,440	1,519	0,877	46,665	54,214	48,720	51,600	
	20	3	43,826	1,746	1,008	39,488	48,165	42,000	45,480	

Çizelge 4.7: (800°C-PK Külü) Beton basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)	N	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven Aralığında Ortalama			
							Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maksimum
800	2	0	3	50,360	0,905	0,523	48,109	52,610	49,400	51,200
		5	3	56,586	0,825	0,476	54,534	58,638	55,640	57,160
		10	3	48,693	0,161	0,093	48,291	49,094	48,600	48,880
		15	3	45,026	0,522	0,301	43,729	46,323	44,480	45,520
		20	3	43,560	1,048	0,605	40,955	46,164	42,400	44,440
	7	0	3	52,873	3,031	1,750	45,342	60,404	50,860	56,360
		5	3	57,000	0,355	0,205	56,116	57,883	56,720	57,400
		10	3	51,186	0,440	0,254	50,092	52,281	50,680	51,480
		15	3	49,906	0,625	0,360	48,353	51,459	49,240	50,480
		20	3	46,146	1,016	0,586	43,622	48,670	45,560	47,320
	28	0	3	56,506	3,766	2,174	47,150	65,863	52,400	59,800
		5	3	58,706	1,055	0,609	56,084	61,328	58,000	59,920
		10	3	52,733	1,298	0,749	49,506	55,959	51,240	53,600
		15	3	48,426	1,255	0,724	45,307	51,545	47,440	49,840
		20	3	46,253	0,601	0,347	44,758	47,748	45,560	46,640
	56	0	3	60,783	1,849	1,067	56,190	65,376	59,210	62,820
		5	3	59,613	0,742	0,428	57,769	61,457	58,840	60,320
		10	3	58,053	1,323	0,763	54,766	61,340	56,560	59,080
		15	3	52,106	0,310	0,179	51,334	52,878	51,760	52,360
		20	3	46,826	2,697	1,557	40,124	53,528	44,960	49,920
90	0	3	63,800	0,987	0,570	61,346	66,253	63,200	64,940	
	5	3	65,773	1,160	0,670	62,889	68,657	64,640	66,960	
	10	3	59,346	0,640	0,369	57,755	60,937	58,720	60,000	
	15	3	55,306	0,561	0,324	53,910	56,702	54,720	55,840	
	20	3	48,960	2,426	1,401	42,931	54,988	46,200	50,760	

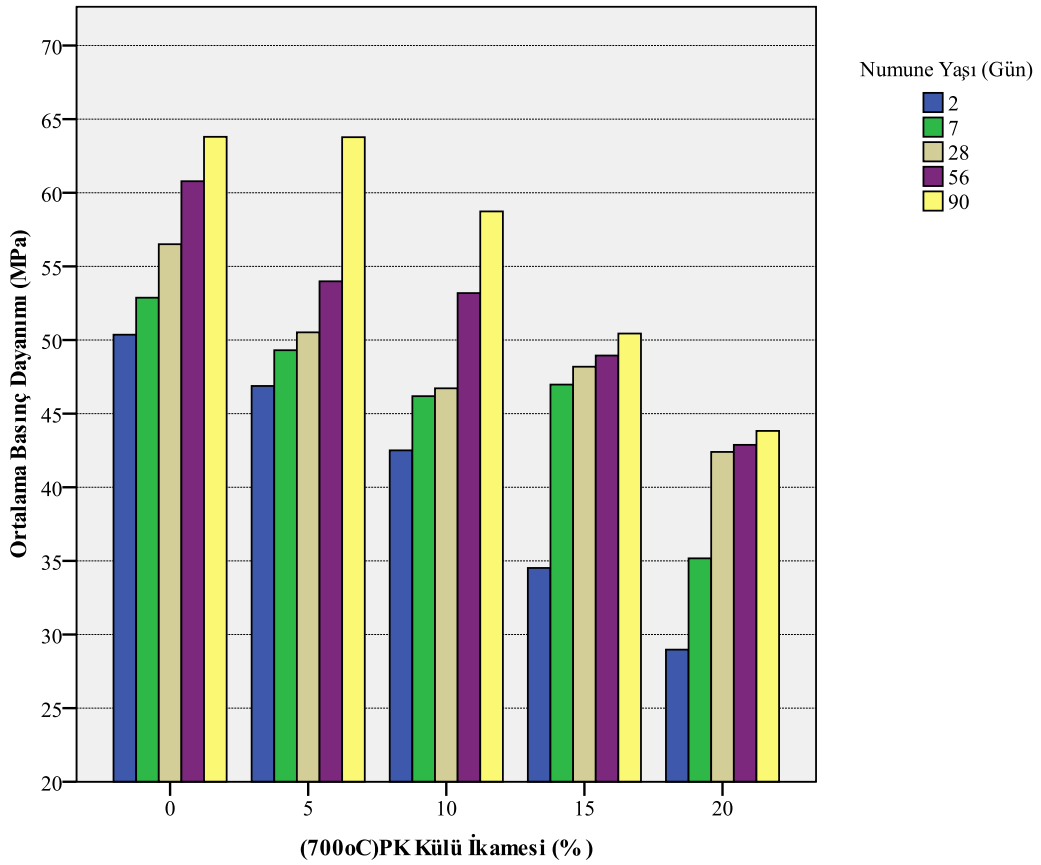


Şekil 4.8: (600°C-PK Külü)Ortalama basınç dayanımı değerleri

600°C yakma sıcaklığında elde edilen PK Külünün farklı ikame oranları ile hazırlanan numunelerin 2, 7, 28, 56, 90 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri incelendiğinde;

- (600°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin düştüğü,
- Referans numune hariç, tüm katkı oranlarında en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 5 ikame oranındaki (600°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 2 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 6.41, 19.43, 30.63, 38.36 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 9.14, 13.81, 19.66, 35.59 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 65.17, 12.29, 17.44, 27.96 oranlarında azaldığı,

- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 56 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 2.85, 10.44, 21.51, 30.77 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 2.05, 10.97, 17.37, 30.26 oranlarında azaldığı, görülmektedir (Şekil 4.8).

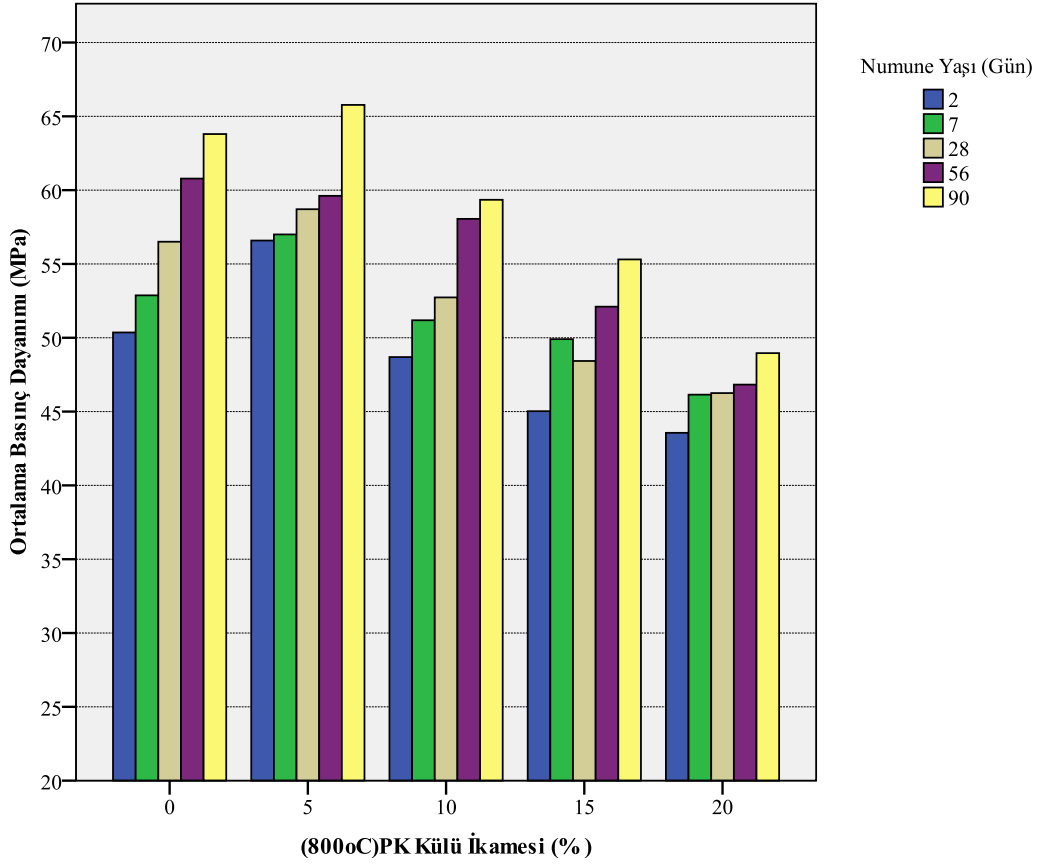


Şekil 4.9: (700°C-PK Külü)Ortalama basınç dayanımı değerleri

700°C yakma sıcaklığında elde edilen PK Külünün farklı ikame oranları ile hazırlanan numunelerin 2, 7, 28, 56, 90 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri incelendiğinde;

- (700°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin düştüğü,
- Referans numune hariç, tüm katkı oranlarında 2 günlük en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 5 ikame oranındaki (700°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,

- Referans numune hariç, tüm katkı oranlarında 7 ve 28 günlük en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 15 ikame oranındaki (700°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,
- Referans numune hariç, tüm katkı oranlarında 56 ve 90 günlük en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 5 ikame oranındaki (700°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 2 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 6.91, 15.59, 31.45, 42.47 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 6.75, 12.65, 11.16, 33.48 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 10.59, 17.32, 14.72, 24.96 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 56 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 11.18, 12.50, 19.47, 29.45 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 0.04, 7.94, 20.94, 31.31 oranlarında azaldığı, görülmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.10: (800°C-PK Külü)Ortalama basınç dayanımı değerleri

800°C yakma sıcaklığında elde edilen PK Külünün farklı ikame oranları ile hazırlanan numunelerin 2, 7, 28, 56, 90 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri incelendiğinde;

- (800°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin düştüğü,
- Referans numune hariç, tüm katkı oranlarında 2, 7, 28, 56, 90 günlük en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 5 ikame oranındaki (800°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,
- % 5 ikame oranındaki (800°C)PK Külü katkılı numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerinin referans numuneden daha yüksek olduğu,
- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 2 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 3.31, 10.59, 13.50 oranlarında azaldığı, % 5 oranında ise % 12.36 oranında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 3.19, 5.61, 12.72 oranlarında azaldığı, % 5 oranında ise % 7.80 oranında arttığı,

- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 6.68, 14.30, 18.15 oranlarında azaldığı, % 5 oranında ise % 3.89 oranında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 56 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.92, 4.49, 14.27, 22.96 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 6.98, 13.31, 23.26 oranlarında azaldığı, % 5 oranında ise % 3.09 oranında arttığı görülmektedir (Şekil 4.10).

Farklı yakma sıcaklıklarında (600, 700 ve 800°C) ve farklı gün seviyelerinin (2, 7, 28, 56, 90) her birinde PK Külü ikame miktarlarına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişim tek yönlü varyans analizi tekniği ile test edilmiştir. Basınç dayanımı değerlerine ait varyans analizi sonuçları Çizelge 4.8, Çizelge 4.9, Çizelge 4.10' de verilmiştir.

Gerçekleştirilen tek yönlü varyans analizi sonucunda, gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli bir fark olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak da çimento numunelerinin bütün günlerde basınç dayanımı değerlerinin, PK Külü yakma sıcaklığı ve ikame oranına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Gruplar arasındaki farklılığın hangi gruplardan kaynaklandığını tespit edebilmek için basınç dayanımı değerleri üzerinde Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Elde edilen Duncan testi sonuçları Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Çizelge 4.13' de verilmiştir.

Çizelge 4.8: (600°C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi (p)
600	2	Gruplar arası	783,693	4	195,923	315,273	0,000
		Gruplar içi	6,214	10	0,621	-	-
		Toplam	789,908	14			
	7	Gruplar arası	590,867	4	147,717	27,270	0,000
		Gruplar içi	54,169	10	5,417	-	-
		Toplam	645,035	14	-	-	-
	28	Gruplar arası	453,530	4	113,383	23,670	0,000
		Gruplar içi	47,902	10	4,790	-	-
		Toplam	501,432	14	-	-	-
	56	Gruplar arası	739,161	4	184,790	151,903	0,000
		Gruplar içi	12,165	10	1,217	-	-
		Toplam	751,326	14	-	-	-
	90	Gruplar arası	740,359	4	185,090	46,238	0,000
		Gruplar içi	40,030	10	4,003	-	-
		Toplam	780,389	14	-	-	-

Çizelge 4.9: (700°C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi (p)
700	2	Gruplar arası	931,397	4	232,849	250,512	0,000
		Gruplar içi	9,295	10	0,929	-	-
		Toplam	940,692	14			
	7	Gruplar arası	528,969	4	132,242	53,618	0,000
		Gruplar içi	24,664	10	2,466	-	-
		Toplam	553,633	14	-	-	-
	28	Gruplar arası	323,974	4	80,994	19,206	0,000
		Gruplar içi	42,172	10	4,217	-	-
		Toplam	366,146	14	-	-	-
	56	Gruplar arası	524,969	4	131,242	54,993	0,000
		Gruplar içi	23,865	10	2,387	-	-
		Toplam	548,835	14	-	-	-
	90	Gruplar arası	923,321	4	230,830	157,645	0,000
		Gruplar içi	14,642	10	1,464	-	-
		Toplam	937,964	14	-	-	-

Çizelge 4.10: (800°C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi (p)
800	2	Gruplar arası	314,288	4	78,572	135,431	0,000
		Gruplar içi	5,802	10	0,580	-	-
		Toplam	320,089	14	-	-	-
	7	Gruplar arası	190,204	4	47,551	21,743	0,000
		Gruplar içi	21,869	10	2,187	-	-
		Toplam	212,073	14	-	-	-
	28	Gruplar arası	330,721	4	82,680	21,843	0,000
		Gruplar içi	37,852	10	3,785	-	-
		Toplam	368,572	14	-	-	-
	56	Gruplar arası	414,274	4	103,568	39,541	0,000
		Gruplar içi	26,193	10	2,619	-	-
		Toplam	440,467	14	-	-	-
	90	Gruplar arası	548,469	4	137,117	76,698	0,000
		Gruplar içi	17,878	10	1,788	-	-
		Toplam	566,346	14	-	-	-

Çizelge 4.11: (600°C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait duncan testi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)		Farklı Olan Gruplar					
		N	N	1	2	3	4	5	
600	2	20	3	31,040					
		15	3		34,933				
		10	3			40,573			
		5	3				47,133		
		0	3					50,360	
	7	20	3	34,053					
		15	3		42,480				
		10	3		45,573	45,573			
		5	3			48,040			
		0	3				52,873		
	28	20	3	40,706					
		15	3		46,653				
		10	3		49,560				
		5	3			53,586			
		0	3				56,506		
	56	20	3	42,080					
		15	3		47,706				
		10	3			54,440			
		5	3				59,053		
		0	3					60,783	
90	20	3	44,493						
	15	3		52,720					
	10	3			56,800				
	5	3				62,493			
	0	3					63,800		

(600°C-PK Külü) Beton basınç dayanımı değerlerine ait duncan testi sonuçlarına göre:

- 2 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 31,04 ile en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 50,36 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 10 ile % 15 ve % 5 ile % 10 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 34,05 ile en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 52,87 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 10 ile % 15 ve % 0 ile % 5 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 40,71 ile en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 56,51 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- 56 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 0 ile % 5 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 42,10 ile en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 60,78 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 0 ile % 5 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 44,49 ile en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 63,80 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- Tüm günlerde en yüksek basınç dayanımı değerine referans numunenin sahip olduğu, daha sonra % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, en düşük basınç dayanımı değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.11).

Çizelge 4.12: (700°C-PK Külü) Beton basınç dayanımı değerlerine ait duncan testi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)		Farklı Olan Gruplar					
		N	1	2	3	4	5		
700	2	20	3	28,973					
		15	3		34,520				
		10	3			42,506			
		5	3				46,880		
		0	3					50,360	
	7	20	3	35,173					
		15	3		46,973	46,973			
		10	3		46,186				
		5	3			49,306			
		0	3					52,873	
	28	20	3	42,400					
		15	3		48,186				
		10	3		46,720				
		5	3		50,520				
		0	3				56,506		
	56	20	3	42,880					
		15	3		48,946				
		10	3			53,186			
		5	3			53,986			
		0	3					60,783	
	90	20	3	43,826					
		15	3		50,440				
		10	3			58,733			
		5	3				63,773		
0		3					63,800		

(700°C-PK Külü) Beton basınç dayanımı değerlerine ait duncan testi sonuçlarına göre:

- 2 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 28,97 ile en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 50,36 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 10 ile % 15 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 35,17 ile en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 52,87 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 5, 10 ile % 15 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 42,40 ile

en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 56,51 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,

- 56 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 5 ile % 10 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 42,88 ile en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 60,78 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 0 ile % 5 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 43,83 ile en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 63,80 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- Tüm günlerde en yüksek basınç dayanımı değerine referans numunenin sahip olduğu, daha sonra % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, en düşük basınç dayanımı değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.12).

Çizelge 4.13: (800°C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait duncan testi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı		Farklı Olan Gruplar					
		(%)	N	1	2	3	4	5	
800	2	20	3	43,560					
		15	3		45,026				
		10	3			48,693			
		5	3					56,586	
		0	3					50,360	
	7	20	3	46,146					
		15	3		49,906				
		10	3		51,186	51,186			
		5	3					57,000	
		0	3		52,873				
	28	20	3	46,253					
		15	3	48,426					
		10	3		52,733				
		5	3				58,706		
		0	3				56,506		
	56	20	3	46,826					
		15	3		52,106				
		10	3				58,053		
		5	3				59,613		
		0	3				60,783		
	90	20	3	48,960					
		15	3		55,306				
		10	3				59,346		
		5	3					65,773	
0		3					63,800		

(800°C-PK Külü)Beton basınç dayanımı değerlerine ait duncan testi sonuçlarına göre:

- 2 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 43,56 ile en düşük basınç dayanımına, % 5 PK Külü ikameli numunelerin 56,58 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 0, 10 ile % 15 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 46,14667 ile en düşük basınç dayanımına, % 5 PK Külü ikameli numunelerin 57,00 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 20 ile % 15 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 46,25 ile

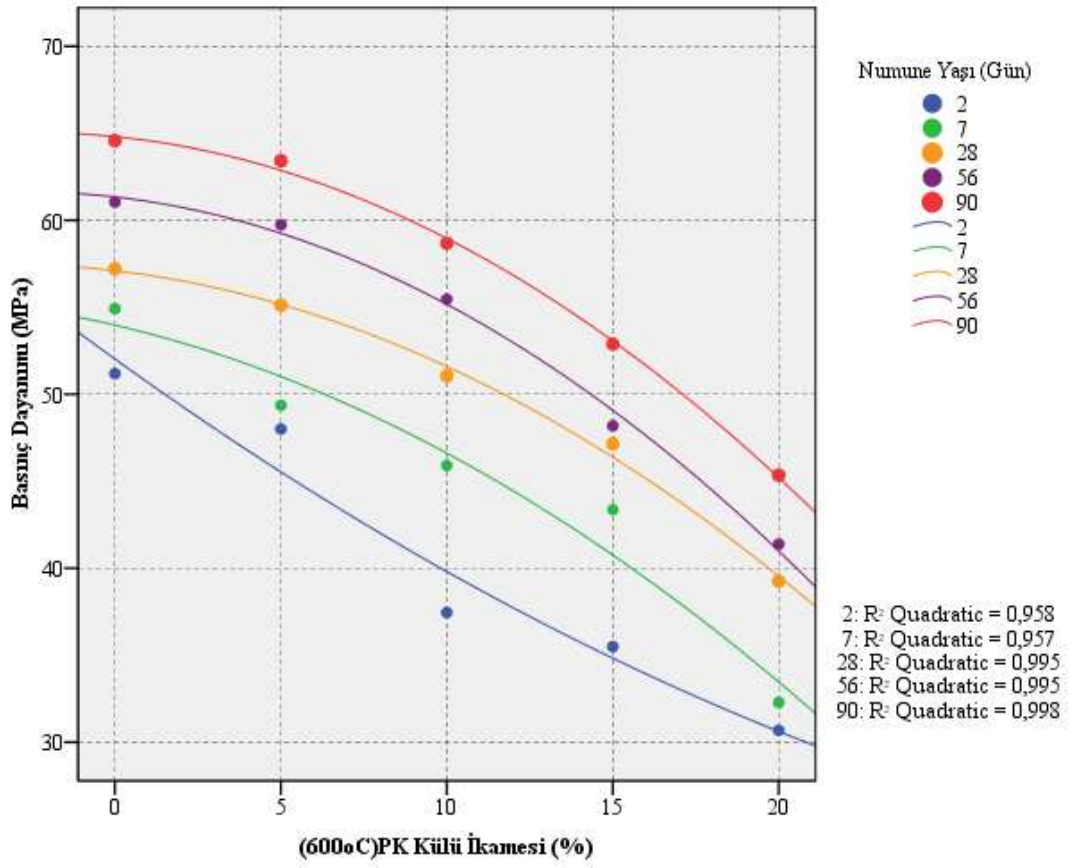
en düşük basınç dayanımına, % 5 PK Külü ikameli numunelerin 58,71 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,

- 56 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 0, 5 ile % 10 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 46,83 ile en düşük basınç dayanımına, referans numunelerin 60,78 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 20 ile % 15 PK Külü ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 48,96 ile en düşük basınç dayanımına, % 5 PK Külü ikameli numunelerin 65,77 ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- En yüksek basınç dayanımı değerine 2, 7, 28, 90 günlük % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, daha sonra referans numunelerin sahip olduğu, en düşük basınç dayanımı değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.13).

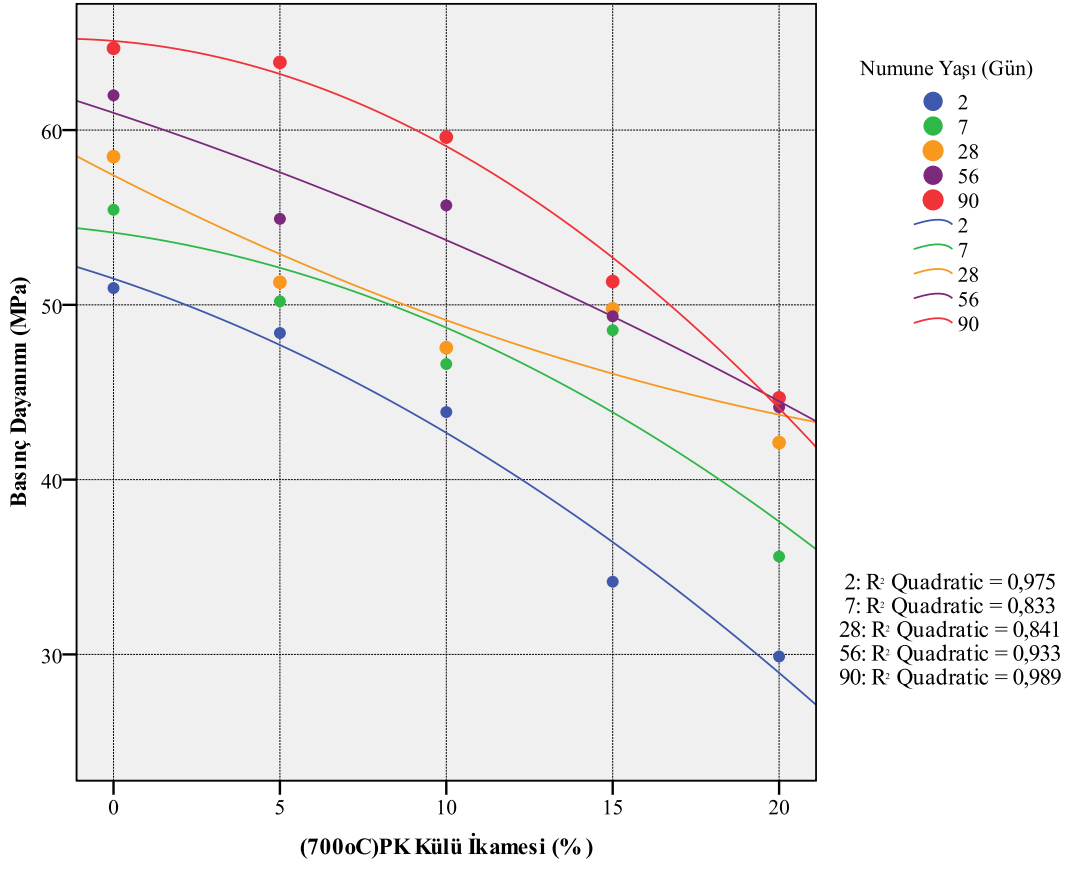
Her bir sıcaklık ve gün faktörünün alt seviyelerinde PK Külü miktarları ile basınç dayanımı değerleri arasında regrasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen regrasyon analizinde veriler arasında ikinci dereceden $y=a+bX+cX^2$ model denklemi ile ifade edilen 2.dereceden bir ilişki olduğu görülmüştür. Regrasyon analizi sonucunda elde edilen model denklemler Çizelge 4.14.' de, regrasyon eğrilerini gösteren grafik ise Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13' de verilmiştir.

Çizelge 4.14: Her bir sıcaklık ve gün faktörünün alt seviyelerinde PK Külü miktarları-basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren regrasyon modelleri

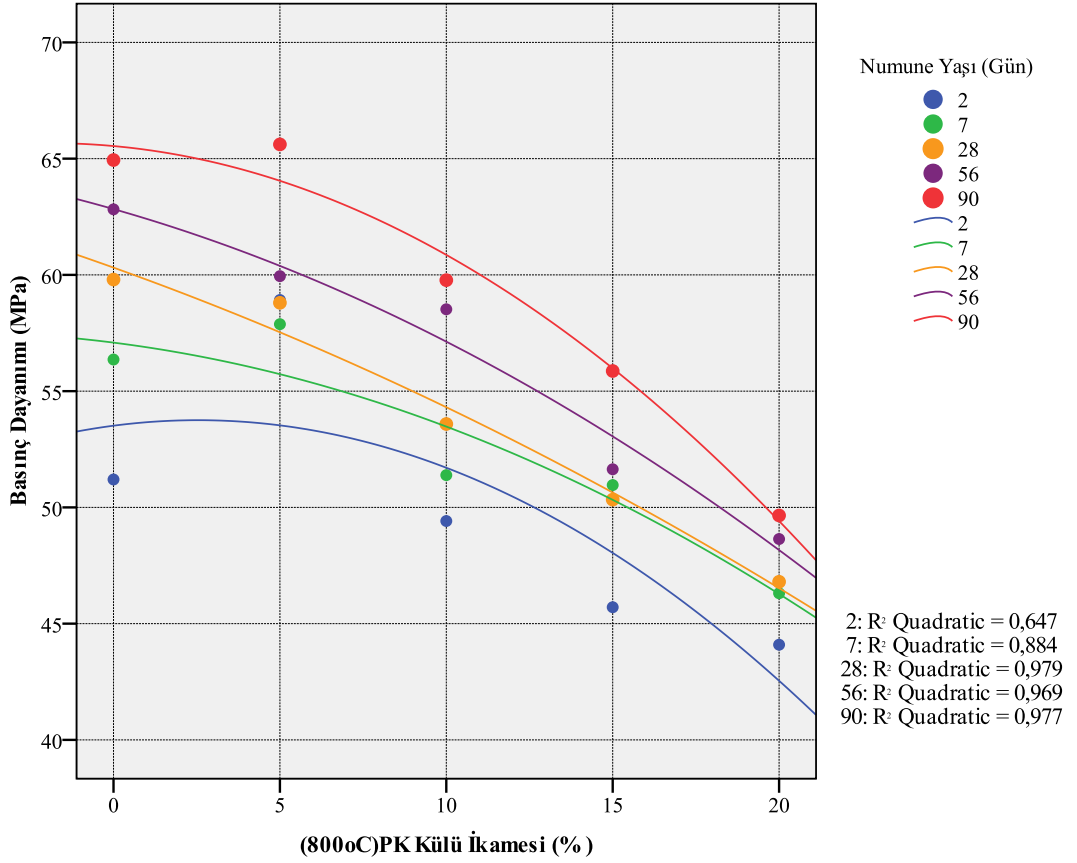
Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	R Square	Regrasyon Denklemi	Sig.
600	2	0,958	$Y=52,029-1,375X+0,015X^2$	0,042
	7	0,957	$Y=53,974-0,447X+0,029X^2$	0,043
	28	0,995	$Y=57,102-0,224X+0,033X^2$	0,005
	56	0,995	$Y=61,343-0,218X+0,040X^2$	0,005
	90	0,998	$Y=64,812-0,191X+0,039X^2$	0,002
700	2	0,975	$Y=51,499-0,636X+0,025X^2$	0,025
	7	0,833	$Y=54,133-0,261X+0,028X^2$	0,167
	28	0,841	$Y=57,411-0,973X+0,014X^2$	0,159
	56	0,933	$Y=60,986-0,632X+0,010X^2$	0,067
	90	0,989	$Y=65,100-0,154X+0,045X^2$	0,011
800	2	0,647	$Y=53,514-0,187X+0,037X^2$	0,353
	7	0,884	$Y=57,087-0,182X+0,018X^2$	0,116
	28	0,979	$Y=60,314-0,512X+0,025X^2$	0,021
	56	0,969	$Y=62,831-0,407X+0,016X^2$	0,031
	90	0,977	$Y=65,542-0,130X+0,034X^2$	0,023



Şekil 4.11: (600°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak basınç dayanımı değişimi



Şekil 4.12: (700°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak basınç dayanımı değişimi



Şekil 4.13: (800°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak basınç dayanımı değişimi

Deneysel tasarımda değişken olarak numune yaşı, PK Külü ikame miktarı ve yakma sıcaklığı parametrelerine bağlı olarak basınç dayanımı değerlerindeki değişimi modellemek amacıyla çoklu lineer regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda basınç dayanımı ile numune yaşı, PK Külü ikame miktarı ve yakma sıcaklığı arasındaki ilişki $B = a + bX + cY + dZ$ model denklem ile açıklanmaktadır.

Bu model denklemde;

B: Basınç dayanımı (MPa)

X: Numune yaşı (gün)

Y: PK Külü ikame miktarı (%)

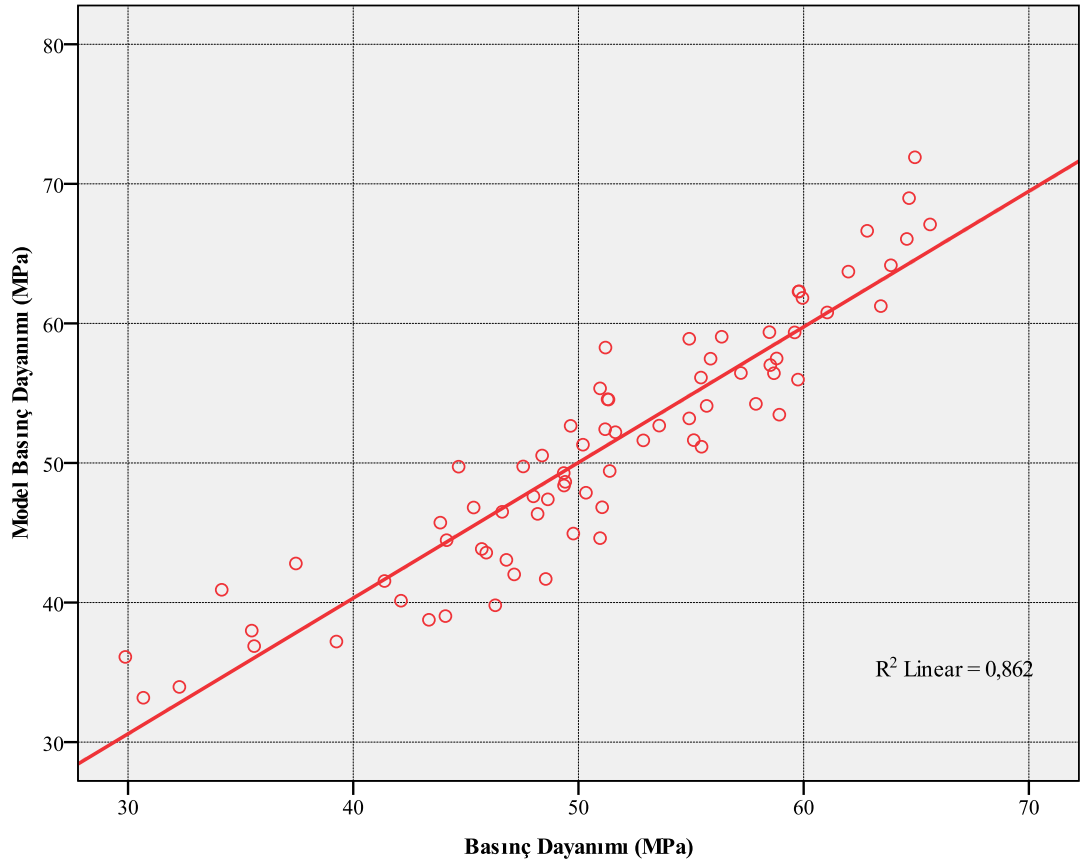
Z: Yakma sıcaklığı (°C) 'nı ifade eder.

Çoklu lineer regrasyon sonucunda;

Regrasyon katsayısı(R^2)=0,862 olan $B=36,419 + 0,137X - 0,854Y + 0,026Z$ denklemi bulunmuştur.

Çoklu lineer regrasyon model denklemi ile hesaplanan ve deney sonucunda elde edilen basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki grafiği Şekil 4.14 'de verilmiştir.

Ayrıca % 86,20 doğruluk oranı ile gerçek basınç dayanımı değerlerinin tahmin edildiği; PK Külü ikame miktarı, yakma sıcaklığı ve numune yaşı parametrelerine bağlı olarak elde edilen model denklemi ile basınç dayanımı değerlerinin % 13,80 hata oranı ile tahmin edilebildiği görülmüştür.



Şekil 4.14: Basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki grafiği

4.3.2. Birim Hacim Ağırlık

Farklı yakma sıcaklıklarında (600, 700 ve 800°C) elde edilen PK Külü ile farklı ikame oranlarında (% 0, 5, 10, 15, 20) hazırlanan ve 2, 7, 28, 56, 90. günlerde basınç dayanımı testine tabi tutulan numunelerin tespit edilen birim hacim ağırlık değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.15, Çizelge 4.16, Çizelge 4.17' de verilmiştir.

Farklı yakma sıcaklıklarında (600, 700 ve 800°C) elde edilen PK Külünün ikame oranları ile elde edilen 2, 7, 28, 56, 90 günlük ortalama birim hacim ağırlık değerlerine ait grafik Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17' de görülmektedir.

Çizelge 4.15: (600°C-PK Külü) Birim hacim ağırlık değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

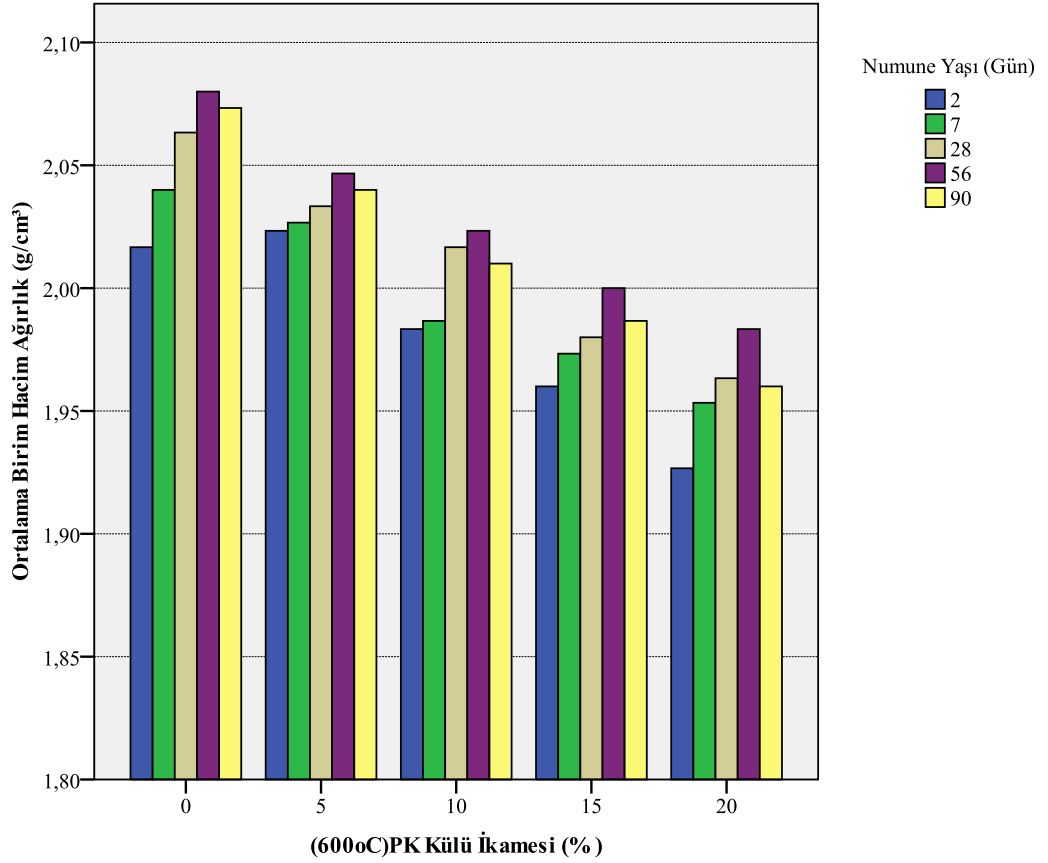
Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)	N	Ortalama Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven Aralığında Ortalama		Minimum	Maksimum
							Alt Sınır	Üst Sınır		
600	2	0	3	2,016	0,005	0,003	2,002	2,031	2,010	2,020
		5	3	2,023	0,005	0,003	2,008	2,037	2,020	2,030
		10	3	1,983	0,005	0,003	1,968	1,997	1,980	1,990
		15	3	1,960	0,000	0,000	1,960	1,960	1,960	1,960
		20	3	1,926	0,005	0,003	1,912	1,941	1,920	1,930
	7	0	3	2,040	0,020	0,011	1,990	2,089	2,020	2,060
		5	3	2,026	0,005	0,003	2,012	2,041	2,020	2,030
		10	3	1,986	0,005	0,003	1,972	2,001	1,980	1,990
		15	3	1,973	0,005	0,003	1,958	1,987	1,970	1,980
		20	3	1,953	0,005	0,003	1,938	1,967	1,950	1,960
	28	0	3	2,063	0,015	0,008	2,0259	2,101	2,050	2,080
		5	3	2,033	0,005	0,003	2,018	2,047	2,030	2,040
		10	3	2,016	0,015	0,008	1,978	2,054	2,000	2,030
		15	3	1,980	0,000	0,000	1,980	1,980	1,980	1,980
		20	3	1,963	0,005	0,003	1,948	1,977	1,960	1,970
	56	0	3	2,080	0,010	0,005	2,055	2,104	2,070	2,090
		5	3	2,046	0,005	0,003	2,032	2,061	2,040	2,050
		10	3	2,023	0,005	0,003	2,008	2,037	2,020	2,030
		15	3	2,000	0,000	0,000	2,000	2,000	2,000	2,000
		20	3	1,983	0,005	0,003	1,968	1,997	1,980	1,990
90	0	3	2,073	0,005	0,003	2,058	2,087	2,070	2,080	
	5	3	2,040	0,010	0,005	2,015	2,064	2,030	2,050	
	10	3	2,010	0,010	0,005	1,985	2,034	2,000	2,020	
	15	3	1,986	0,005	0,003	1,972	2,001	1,980	1,990	
	20	3	1,960	0,000	0,000	1,960	1,960	1,960	1,960	

Çizelge 4.16: (700°C-PK Külü)Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)	N	Ortalama Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven Aralığında Ortalama		Minimum	Maksimum
							Alt Sınır	Üst Sınır		
700	2	0	3	2,073	0,011	0,006	2,044	2,102	2,060	2,080
		5	3	2,026	0,005	0,003	2,012	2,041	2,020	2,030
		10	3	1,990	0,000	0,000	1,990	1,990	1,990	1,990
		15	3	1,953	0,005	0,003	1,938	1,967	1,950	1,960
		20	3	1,923	0,005	0,003	1,908	1,937	1,920	1,930
	7	0	3	2,040	0,020	0,011	1,990	2,089	2,020	2,060
		5	3	2,023	0,005	0,003	2,008	2,037	2,020	2,030
		10	3	2,006	0,005	0,003	1,992	2,021	2,000	2,010
		15	3	1,9967	0,015	0,008	1,958	2,034	1,980	2,010
		20	3	1,950	0,010	0,005	1,925	1,974	1,940	1,960
	28	0	3	2,063	0,015	0,008	2,025	2,101	2,050	2,080
		5	3	2,066	0,005	0,003	2,052	2,0811	2,060	2,070
		10	3	2,043	0,005	0,003	2,028	2,057	2,040	2,050
		15	3	2,026	0,005	0,003	2,012	2,041	2,020	2,030
		20	3	2,000	0,010	0,005	1,975	2,024	1,990	2,010
	56	0	3	2,080	0,010	0,005	2,055	2,104	2,070	2,090
		5	3	2,040	0,010	0,005	2,015	2,064	2,030	2,050
		10	3	2,040	0,000	0,000	2,040	2,040	2,040	2,040
		15	3	2,013	0,005	0,003	1,998	2,027	2,010	2,020
		20	3	1,980	0,000	0,000	1,980	1,980	1,980	1,980
90	0	3	2,073	0,005	0,003	2,058	2,087	2,070	2,080	
	5	3	2,026	0,005	0,003	2,012	2,041	2,020	2,030	
	10	3	2,010	0,010	0,005	1,985	2,034	2,000	2,020	
	15	3	1,986	0,005	0,003	1,972	2,001	1,980	1,990	
	20	3	1,960	0,000	0,000	1,960	1,960	1,960	1,960	

Çizelge 4.17: (800°C-PK Külü)Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)	N	Ortalama Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven Aralığında Ortalama		Minimum	Maksimum
							Alt Sınır	Üst Sınır		
800	2	0	3	2,073	0,011	0,006	2,044	2,102	2,060	2,080
		5	3	2,033	0,011	0,006	2,004	2,062	2,020	2,040
		10	3	2,030	0,000	0,000	2,030	2,030	2,030	2,030
		15	3	1,996	0,005	0,003	1,982	2,011	1,990	2,000
		20	3	1,976	0,005	0,003	1,962	1,991	1,970	1,980
	7	0	3	2,040	0,020	0,011	1,990	2,089	2,020	2,060
		5	3	2,053	0,005	0,003	2,038	2,067	2,050	2,060
		10	3	2,020	0,000	0,000	2,020	2,020	2,020	2,020
		15	3	2,006	0,005	0,003	1,992	2,021	2,000	2,010
		20	3	2,003	0,005	0,003	1,988	2,017	2,000	2,010
	28	0	3	2,063	0,015	0,008	2,025	2,101	2,050	2,080
		5	3	2,053	0,005	0,003	2,038	2,067	2,050	2,060
		10	3	2,033	0,005	0,003	2,018	2,047	2,030	2,040
		15	3	2,023	0,005	0,003	2,008	2,037	2,020	2,030
		20	3	2,023	0,005	0,003	2,008	2,037	2,020	2,030
	56	0	3	2,080	0,010	0,005	2,055	2,104	2,070	2,090
		5	3	2,053	0,005	0,003	2,038	2,067	2,050	2,060
		10	3	2,030	0,010	0,005	2,005	2,054	2,020	2,040
		15	3	2,016	0,005	0,003	2,002	2,031	2,010	2,020
		20	3	2,013	0,005	0,003	1,998	2,027	2,010	2,020
90	0	3	2,073	0,005	0,003	2,058	2,087	2,070	2,080	
	5	3	2,040	0,000	0,000	2,040	2,040	2,040	2,040	
	10	3	2,026	0,005	0,003	2,012	2,041	2,020	2,030	
	15	3	2,010	0,000	0,000	2,010	2,010	2,010	2,010	
	20	3	1,983	0,005	0,003	1,968	1,997	1,980	1,990	

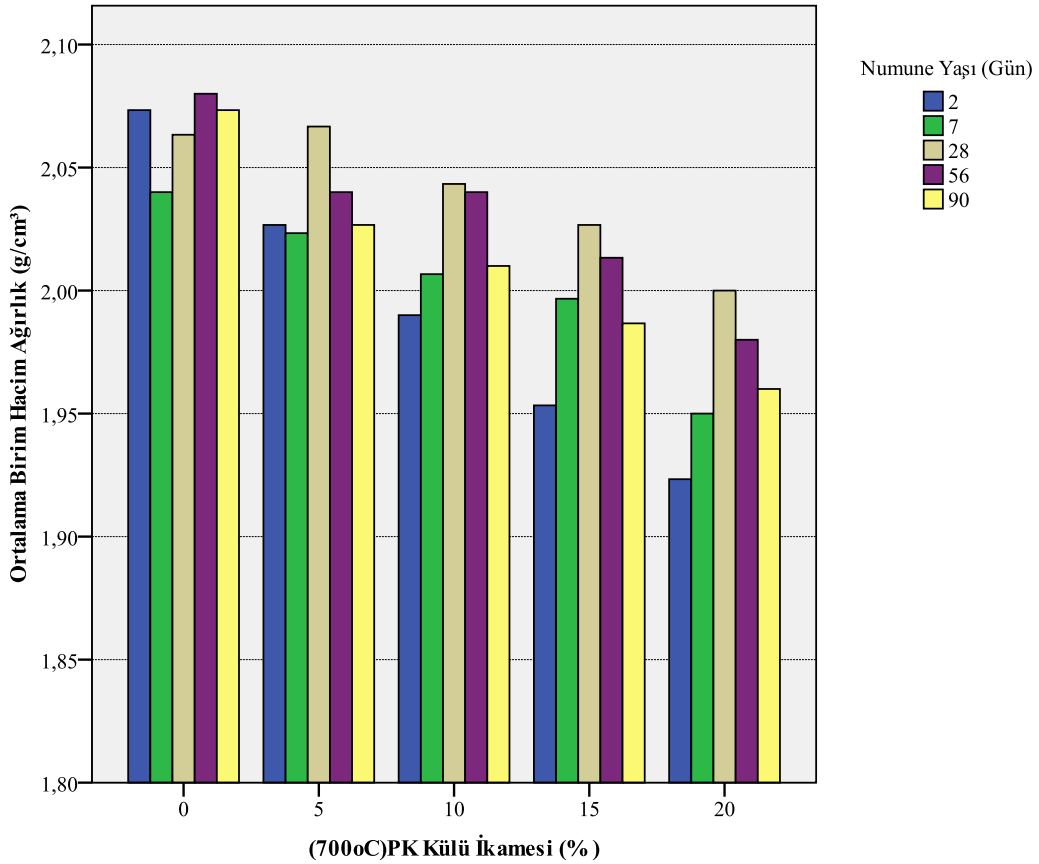


Şekil 4.15: (600°C-PK Külü)Ortalama birim hacim ağırlık değerleri

600°C yakma sıcaklığında elde edilen PK Külünün farklı ikame oranları ile hazırlanan numunelerin 2, 7, 28, 56, 90 günlük ortalama birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde;

- (600°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinin düştüğü,
- Referans numune hariç, tüm katkı oranlarında en yüksek birim hacim ağırlık değerlerine % 5 ikame oranındaki (600°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu, en düşük birim hacim ağırlık değerlerine ise % 20 ikame oranındaki (600°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,
- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 2 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.65, 2.81, 4.46 oranlarında azaldığı, % 5 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin ise % 0.33 arttığı,

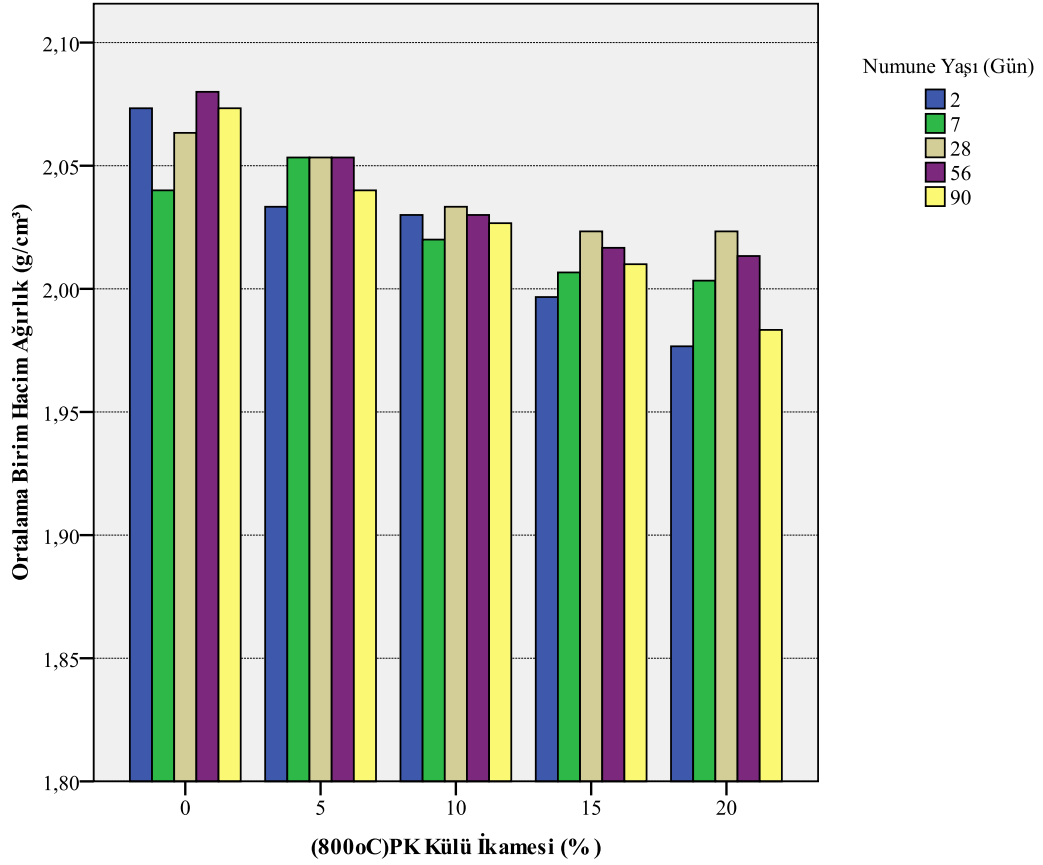
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 7 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 0.65, 2.61, 3.27, 4.25 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.45, 2.26, 4.04, 4.85 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 56 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.60, 2.72, 3.85, 4.65 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 90 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.61, 3.05, 4.18, 5.47 oranlarında azaldığı görülmektedir (Şekil 4.15).



Şekil 4.16: (700°C-PK Külü)Ortalama birim hacim ağırlık değerleri

700°C yakma sıcaklığında elde edilen PK Külünün farklı ikame oranları ile hazırlanan numunelerin 2, 7, 28, 56, 90 günlük ortalama birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde;

- (700°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinin düştüğü,
- Referans numune hariç, tüm katkı oranlarında en yüksek birim hacim ağırlık değerlerine % 5 ikame oranındaki (700°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu, en düşük birim hacim ağırlık değerlerine ise % 20 ikame oranındaki (700°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 2 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 2.25, 4.02, 5.79, 7.23 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 7 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 0.82, 1.63, 2.12, 4.41 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 0.97, 1.78, 3.07 oranlarında azaldığı, % 5 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin ise % 0.16 oranında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 56 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.92, 1.92, 3.21, 4.81 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 90 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 2.25, 3.05, 4.18, 5.47 oranlarında azaldığı görülmektedir (Şekil 4.16).



Şekil 4.17: (800°C-PK Külü)Ortalama birim hacim ağırlık değerleri

800°C yakma sıcaklığında elde edilen PK Külünün farklı ikame oranları ile hazırlanan numunelerin 2, 7, 28, 56, 90 günlük ortalama birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde;

- (800°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinin düştüğü,
- Referans numune hariç, tüm katkı oranlarında en yüksek birim hacim ağırlık değerlerine % 5 ikame oranındaki (800°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu, en düşük birim hacim ağırlık değerlerine ise % 20 ikame oranındaki (800°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 2 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.93, 2.09, 3.70, 4.66 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 7 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre

sırasıyla % 0.98, 1.63, 1.80 oranlarında azaldığı, % 5 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin ise % 0.65 oranında arttığı,

- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 0.48, 1.45, 1.94, 1.94 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 56 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.28, 2.40, 3.04, 3.21 oranlarında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 90 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.61, 2.25, 3.05, 4.34 oranlarında azaldığı görülmektedir (Şekil 4.17).

Farklı yakma sıcaklıklarında (600, 700 ve 800°C) ve farklı gün seviyelerinin (2, 7, 28, 56, 90) her birinde PK Külü ikame miktarlarına bağlı olarak birim hacim ağırlık değerlerinde meydana gelen değişim tek yönlü varyans analizi tekniği ile test edilmiştir. Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait varyans analizi sonuçları Çizelge 4.18, Çizelge 4.19, Çizelge 4.20' de verilmiştir.

Gerçekleştirilen tek yönlü varyans analizi sonucunda, gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli bir fark olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak da çimento numunelerinin birim hacim ağırlık değerlerinin, PK Külü yakma sıcaklığı ve ikame oranına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Gruplar arasındaki farklılığın hangi gruplardan kaynaklandığını tespit edebilmek için birim hacim ağırlık değerleri üzerinde Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Elde edilen Duncan testi sonuçları Çizelge 4.21, Çizelge 4.22, Çizelge 4.23' de verilmiştir.

Çizelge 4.18: (600°C-PK Külü)Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi (p)
600	2	Gruplar arası	0,019	4	0,005	181,625	0,000
		Gruplar içi	0,000	10	0,000	-	-
		Toplam	0,020	14	-	-	-
	7	Gruplar arası	0,016	4	0,004	37,250	0,000
		Gruplar içi	0,001	10	0,000	-	-
		Toplam	0,017	14	-	-	-
	28	Gruplar arası	0,020	4	0,005	45,719	0,000
		Gruplar içi	0,001	10	0,000	-	-
		Toplam	0,021	14	-	-	-
	56	Gruplar arası	0,018	4	0,004	109,583	0,000
		Gruplar içi	0,000	10	0,000	-	-
		Toplam	0,018	14	-	-	-
	90	Gruplar arası	0,024	4	0,006	110,750	0,000
		Gruplar içi	0,001	10	0,000	-	-
		Toplam	0,024	14	-	-	-

Çizelge 4.19: (700°C-PK Külü)Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi (p)
700	2	Gruplar arası	0,042	4	0,011	225,357	0,000
		Gruplar içi	0,000	10	0,000	-	-
		Toplam	0,043	14	-	-	-
	7	Gruplar arası	0,014	4	0,003	21,771	0,000
		Gruplar içi	0,002	10	0,000	-	-
		Toplam	0,016	14	-	-	-
	28	Gruplar arası	0,009	4	0,002	26,346	0,000
		Gruplar içi	0,001	10	0,000	-	-
		Toplam	0,010	14	-	-	-
	56	Gruplar arası	0,016	4	0,004	88,000	0,000
		Gruplar içi	0,000	10	0,000	-	-
		Toplam	0,017	14	-	-	-
	90	Gruplar arası	0,022	4	0,005	137,333	0,000
		Gruplar içi	0,000	10	0,000	-	-
		Toplam	0,022	14	-	-	-

Çizelge 4.20: (800°C-PK Külü)Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi (p)
800	2	Gruplar arası	0,017	4	0,004	62,150	0,000
		Gruplar içi	0,001	10	0,000	-	-
		Toplam	0,017	14	-	-	-
	7	Gruplar arası	0,006	4	0,001	13,933	0,000
		Gruplar içi	0,001	10	0,000	-	-
		Toplam	0,007	14	-	-	-
	28	Gruplar arası	0,004	4	0,001	13,500	0,000
		Gruplar içi	0,001	10	0,000	-	-
		Toplam	0,005	14	-	-	-
	56	Gruplar arası	0,009	4	0,002	39,056	0,000
		Gruplar içi	0,001	10	0,000	-	-
		Toplam	0,010	14	-	-	-
	90	Gruplar arası	0,014	4	0,003	169,167	0,000
		Gruplar içi	0,000	10	0,000	-	-
		Toplam	0,014	14	-	-	-

Çizelge 4.21: (600°C-PK Külü)Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait duncan testi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü		Farklı Olan Gruplar				
		İkame Oranı (%)	N	1	2	3	4	5
600	2	20	3	1,926				
		15	3		1,960			
		10	3			1,983		
		5	3				2,023	
		0	3					2,016
	7	20	3	1,953				
		15	3		1,973			
		10	3		1,986			
		5	3			2,026		
		0	3				2,040	
	28	20	3	1,963				
		15	3	1,980				
		10	3		2,016			
		5	3		2,033			
		0	3				2,063	
	56	20	3	1,983				
		15	3		2,000			
		10	3			2,023		
		5	3				2,046	
		0	3					2,080
90	20	3	1,960					
	15	3		1,986				
	10	3			2,010			
	5	3				2,040		
	0	3					2,073	

(600°C-PK Külü) Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait duncan testi sonuçlarına göre:

- 2 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 0 ile % 5 PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,92 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,02 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- 7 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 0 ile % 5 ve % 10 ile % 15 PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,96 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,04 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- 28 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 10 ile % 5 ve % 20 ile % 15 PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,96 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,06 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- 56 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak tüm ikame oranlarında PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,98 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,08 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- 90 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak tüm ikame oranlarında PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,96 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,07 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- Tüm günlerde en yüksek birim hacim ağırlık değerine referans numunenin sahip olduğu, daha sonra % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, en düşük basınç dayanımı değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.21).

Çizelge 4.22: (700°C-PK Külü) Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait duncan testi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı		Farklı Olan Gruplar					
		(%)	N	1	2	3	4	5	
700	2	20	3	1,923					
		15	3		1,953				
		10	3			1,990			
		5	3				2,026		
		0	3						2,073
	7	20	3	1,950					
		15	3		1,996				
		10	3		2,006	2,006			
		5	3			2,023	2,023		
		0	3					2,040	
	28	20	3	2,000					
		15	3		2,026				
		10	3		2,043				
		5	3			2,066			
		0	3			2,063			
	56	20	3	1,980					
		15	3		2,0133				
		10	3			2,040			
		5	3			2,040			
		0	3					2,080	
	90	20	3	1,960					
		15	3		1,986				
		10	3			2,010			
		5	3				2,026		
0		3						2,073	

(700°C-PK Külü) Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait duncan testi sonuçlarına göre:

- 2 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; tüm PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,92 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,07 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- 7 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 0 ile % 5, % 5 ile % 10 ve % 10 ile % 15 PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,95 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,04 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- 28 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 10 ile % 15 ve % 0 ile % 5 PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli

numunelerin 2,00 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,06 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,

- 56 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 5 ile % 10 PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,98 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,08 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- 90 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak tüm ikame oranlarında PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,96 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,07 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- Tüm günlerde en yüksek birim hacim ağırlık değerine referans numunenin sahip olduğu, daha sonra % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, en düşük basınç dayanımı değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.22).

Çizelge 4.23: (800°C-PK Külü) Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait duncan testi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü		Farklı Olan Gruplar				
		İkame Oranı (%)	N	1	2	3	4	5
800	2	20	3	1,976				
		15	3		1,996			
		10	3			2,030		
		5	3			2,033		
		0	3				2,073	
	7	20	3	2,003				
		15	3	2,006				
		10	3	2,020				
		5	3		2,053			
		0	3		2,040			
	28	20	3	2,023				
		15	3		2,023			
		10	3	2,033				
		5	3		2,053			
		0	3		2,063			
	56	20	3	2,013				
		15	3	2,016	2,016			
		10	3		2,030			
		5	3			2,053		
		0	3				2,080	
	90	20	3	1,983				
		15	3		2,010			
		10	3			2,026		
		5	3				2,040	
0		3					2,073	

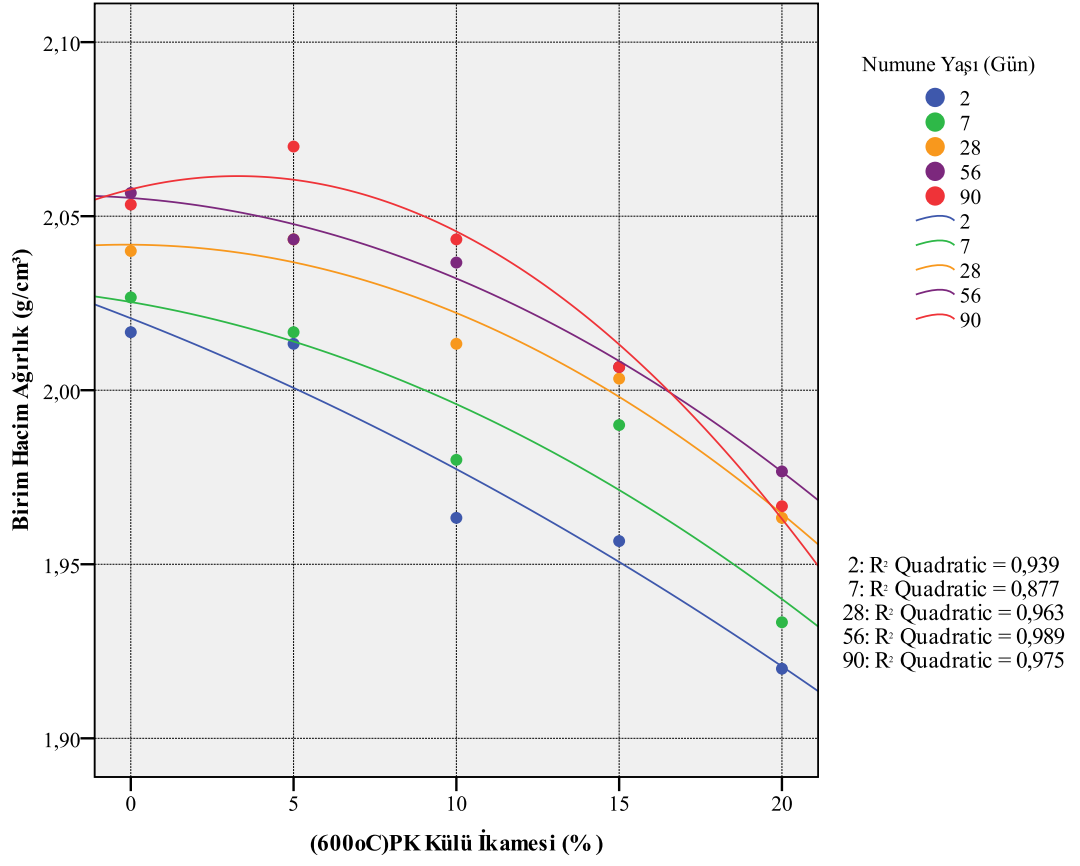
(800°C-PK Külü) Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait duncan testi sonuçlarına göre:

- 2 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 10 ile % 5 PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,97 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,07 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- 7 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 10 ile % 15,% 20 ve % 0 ile % 5 PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 2,00 ile en düşük birim hacim ağırlığına, % 5 PK Külü ikameli numunelerin 2,05 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- 28 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 0 ile % 5 PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin

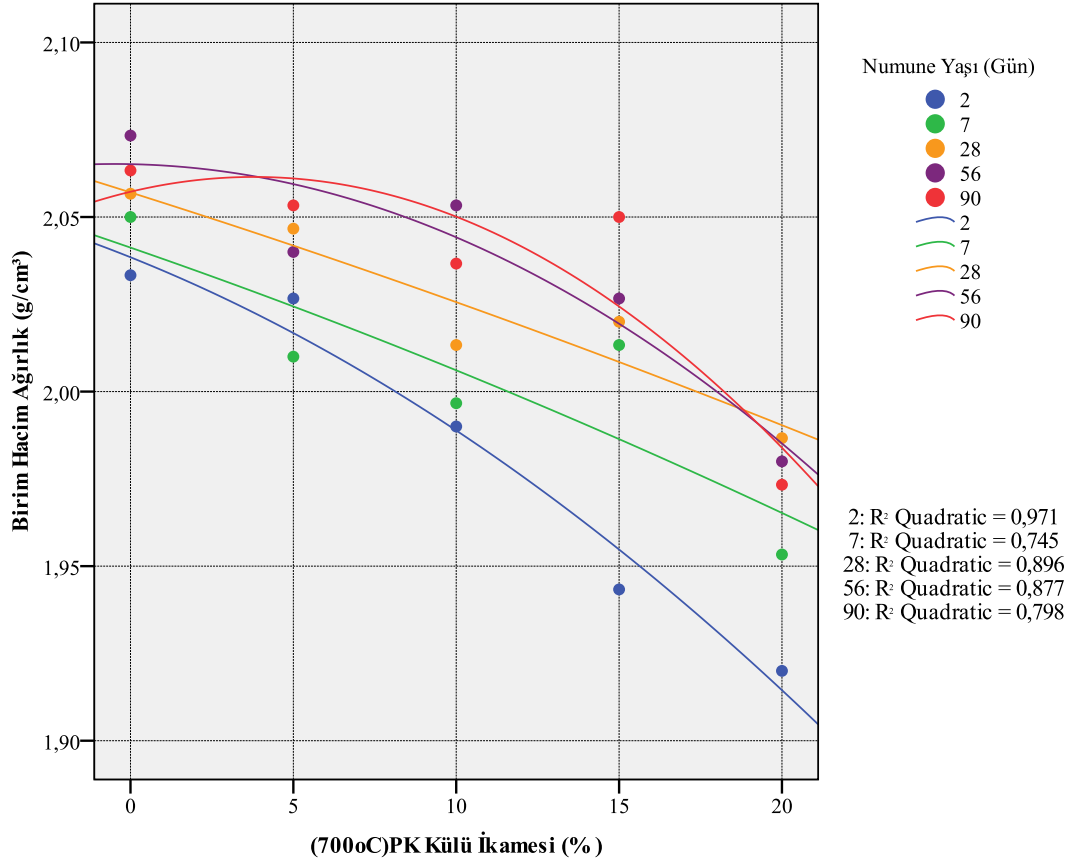
2,02 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,06 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,

- 56 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak; % 10 ile % 15 ve % 15 ile % 20 PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 2,01 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,08 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- 90 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak tüm ikame oranlarında PK Külü ikameli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 1,98 ile en düşük birim hacim ağırlığına, referans numunelerin 2,07 ile en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olduğu,
- Tüm günlerde en yüksek birim hacim ağırlık değerine referans numunenin sahip olduğu, daha sonra % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, en düşük basınç dayanımı değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.23).

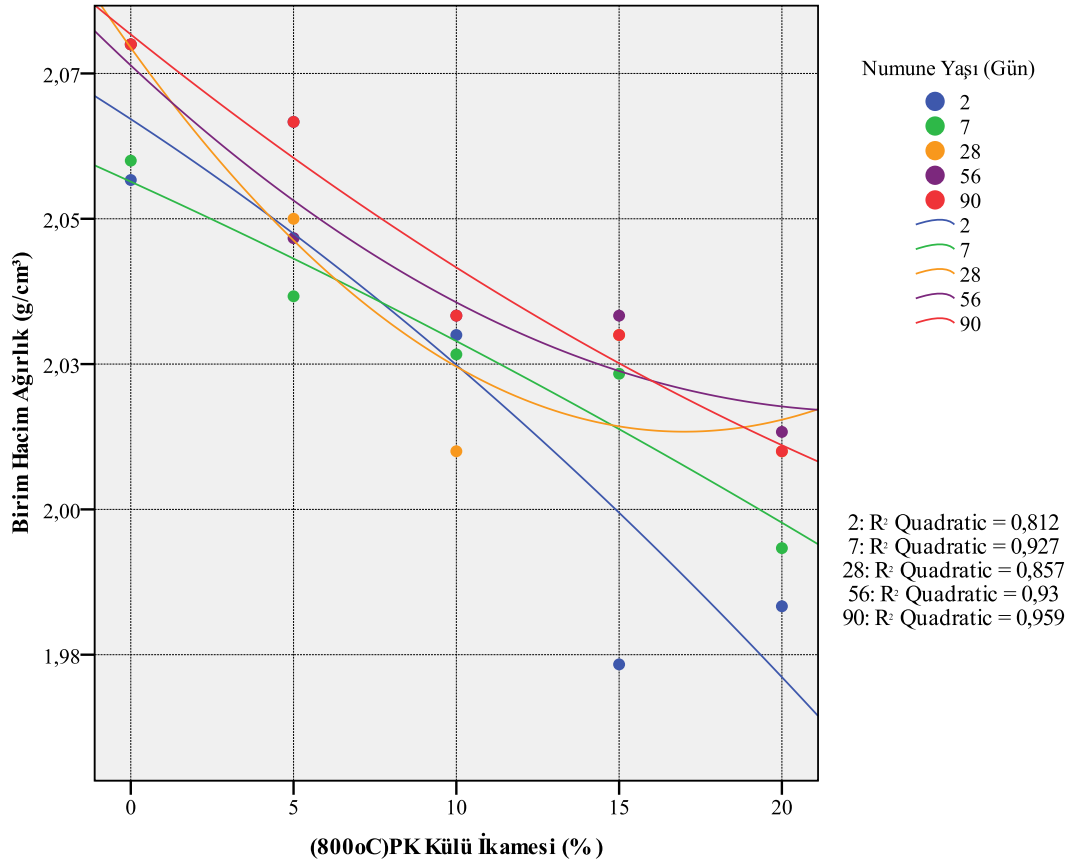
Regrasyon analizi sonucunda elde edilen model denklemlere ek olarak birim hacim ağırlık regrasyon eğrilerini gösteren grafikler Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20' de verilmiştir.



Şekil 4.18: (600°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak birim hacim ağırlık değişimi



Şekil 4.19: (700°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak birim hacim ağırlık değişimi



Şekil 4.20: (800°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak birim hacim ağırlık değişimi

Deneysel tasarımda değişken olarak numune yaşı, PK Külü ikame miktarı ve yakma sıcaklığı parametrelerine bağlı olarak birim hacim ağırlık değerlerindeki değişimi modellemek amacıyla çoklu lineer regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda birim hacim ağırlık ile numune yaşı, PK Külü ikame miktarı ve yakma sıcaklığı arasındaki ilişki $BA = a + bX + cY + dZ$ model denklem ile açıklanmaktadır.

Bu model denklemde;

BA: Birim Hacim Ağırlık (g/cm³)

X: Numune yaşı (gün)

Y: PK Külü ikame miktarı (%)

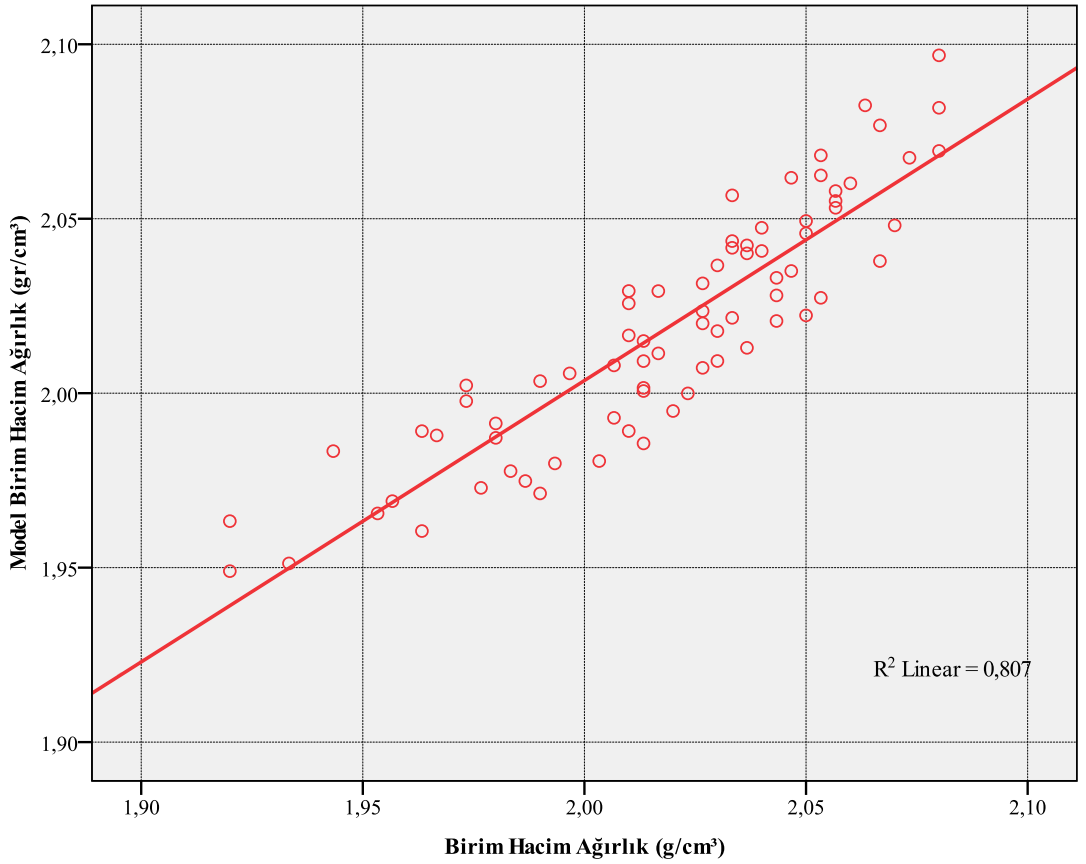
Z: Yakma sıcaklığı (°C) 'nı ifade eder.

Çoklu lineer regrasyon sonucunda;

Regrasyon katsayısı(R^2)=0,807 olan $BA=1,942 + 0X - 0,004Y + 0Z$ denklemi bulunmuştur.

Çoklu lineer regrasyon model denklemi ile hesaplanan ve deney sonucunda elde edilen birim hacim ağırlık değerleri arasındaki ilişki grafiği Şekil 4.21 'de verilmiştir.

Ayrıca % 80,70 doğruluk oranı ile gerçek birim hacim ağırlık değerlerinin tahmin edildiği; PK Külü ikame miktarı, yakma sıcaklığı ve numune yaşı parametrelerine bağlı olarak elde edilen model denklemi ile birim hacim ağırlık değerlerinin % 19,30 hata oranı ile tahmin edilebildiği görülmüştür.



Şekil 4.21: Birim hacim ağırlık değerleri arasındaki ilişki grafiği

4.3.3. Porozite

Farklı yakma sıcaklıklarında (600, 700 ve 800°C) elde edilen PK Külü ile farklı ikame oranlarında (% 0, 5, 10, 15, 20) hazırlanan numunelerin 2, 7, 28, 56, 90. günlerdeki porozite değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.24, Çizelge 4.25, Çizelge 4.26' de verilmiştir.

Farklı yakma sıcaklıklarında (600, 700 ve 800°C) elde edilen PK Külünün ikame oranları ile elde edilen numunelerin 2, 7, 28, 56, 90. günlerdeki ortalama porozite değerlerine ait grafik Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24' de görülmektedir.

Çizelge 4.24: (600°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

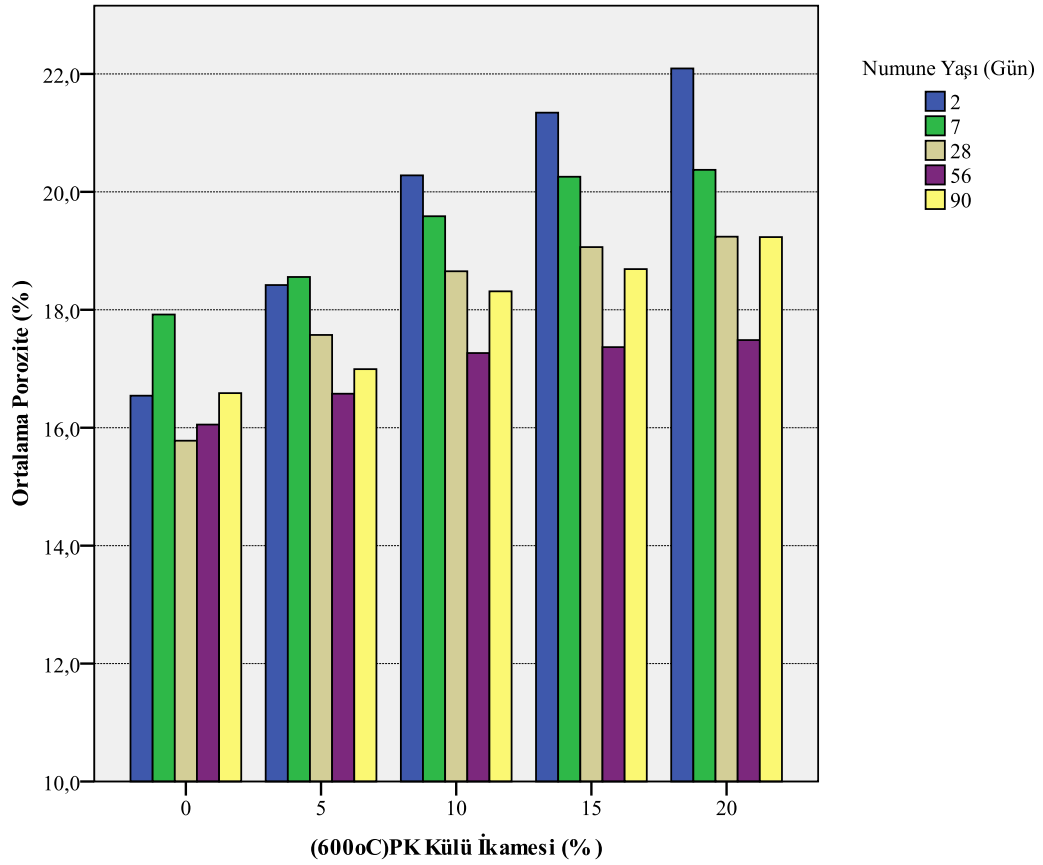
Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)	N	Ortalama Porozite (%)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven Aralığında Ortalama		Minimum	Maksimum
							Alt Sınır	Üst Sınır		
600	2	0	3	16,543	0,155	0,089	16,158	16,928	16,390	16,700
		5	3	18,420	0,079	0,045	18,222	18,617	18,330	18,480
		10	3	20,280	0,250	0,144	19,658	20,901	20,030	20,530
		15	3	21,343	0,207	0,120	20,826	21,859	21,190	21,580
		20	3	22,093	0,080	0,046	21,892	22,294	22,020	22,180
	7	0	3	17,920	0,895	0,516	15,696	20,143	16,890	18,510
		5	3	18,556	1,436	0,829	14,987	22,126	17,010	19,850
		10	3	19,586	0,618	0,357	18,050	21,123	18,900	20,100
		15	3	20,256	0,055	0,031	20,119	20,393	20,200	20,310
		20	3	20,373	0,055	0,031	20,236	20,510	20,310	20,410
	28	0	3	15,780	1,096	0,633	13,055	18,504	14,810	16,970
		5	3	17,573	0,614	0,354	16,047	19,099	16,880	18,050
		10	3	18,653	0,228	0,131	18,086	19,219	18,450	18,900
		15	3	19,063	0,170	0,098	18,640	19,485	18,890	19,230
		20	3	19,240	0,0173	0,010	19,196	19,283	19,230	19,260
	56	0	3	16,053	0,605	0,349	14,550	17,556	15,660	16,750
		5	3	16,576	0,369	0,213	15,659	17,493	16,180	16,910
		10	3	17,266	0,077	0,044	17,073	17,459	17,180	17,330
		15	3	17,366	0,032	0,018	17,286	17,446	17,330	17,390
		20	3	17,486	0,028	0,016	17,414	17,558	17,470	17,520
90	0	3	16,586	0,578	0,333	15,150	18,022	16,190	17,250	
	5	3	16,993	0,690	0,398	15,277	18,708	16,200	17,460	
	10	3	18,313	0,240	0,138	17,716	18,909	18,160	18,590	
	15	3	18,690	0,324	0,187	17,884	19,495	18,340	18,980	
	20	3	19,233	0,171	0,099	18,807	19,659	19,050	19,390	

Çizelge 4.25: (700°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)	N	Ortalama Porozite (%)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven Aralığında Ortalama		Minimum	Maksimum
							Alt Sınır	Üst Sınır		
700	2	0	3	16,543	0,155	0,089	16,158	16,928	16,390	16,700
		5	3	18,516	0,005	0,003	18,502	18,531	18,510	18,520
		10	3	19,393	0,092	0,053	19,162	19,624	19,290	19,470
		15	3	21,223	0,085	0,049	21,012	21,434	21,140	21,310
		20	3	22,310	0,078	0,045	22,115	22,504	22,260	22,400
	7	0	3	16,780	0,300	0,173	16,033	17,526	16,440	17,010
		5	3	17,810	0,490	0,282	16,592	19,027	17,420	18,360
		10	3	19,210	0,246	0,142	18,597	19,822	18,950	19,440
		15	3	19,040	0,517	0,298	17,754	20,325	18,600	19,610
		20	3	20,413	0,846	0,488	18,309	22,516	19,680	21,340
	28	0	3	14,816	0,050	0,029	14,691	14,941	14,770	14,870
		5	3	15,006	0,040	0,023	14,906	15,107	14,970	15,050
		10	3	15,560	0,110	0,063	15,286	15,833	15,450	15,670
		15	3	15,446	0,341	0,197	14,599	16,294	15,230	15,840
		20	3	15,963	0,104	0,060	15,704	16,221	15,880	16,080
	56	0	3	15,850	0,255	0,147	15,216	16,483	15,660	16,140
		5	3	16,480	0,310	0,179	15,708	17,251	16,180	16,800
		10	3	16,650	0,305	0,176	15,892	17,407	16,310	16,900
		15	3	17,193	0,040	0,023	17,092	17,293	17,150	17,230
		20	3	17,680	0,336	0,194	16,844	18,515	17,420	18,060
90	0	3	17,336	0,998	0,576	14,857	19,816	16,190	18,010	
	5	3	16,720	0,798	0,461	14,735	18,704	16,200	17,640	
	10	3	18,186	0,176	0,101	17,749	18,624	18,080	18,390	
	15	3	18,606	0,240	0,138	18,010	19,203	18,400	18,870	
	20	3	19,473	0,381	0,220	18,525	20,420	19,050	19,790	

Çizelge 4.26: (800°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)	N	Ortalama Porozite (%)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven Aralığında Ortalama		Minimum	Maksimum
							Alt Sınır	Üst Sınır		
800	2	0	3	18,030	0,135	0,078	17,693	18,366	17,900	18,170
		5	3	16,543	0,155	0,089	16,158	16,928	16,390	16,700
		10	3	18,226	0,015	0,008	18,188	18,264	18,210	18,240
		15	3	19,680	0,190	0,110	19,206	20,153	19,480	19,860
		20	3	20,086	0,185	0,106	19,627	20,546	19,970	20,300
	7	0	3	18,423	0,376	0,217	17,488	19,358	18,030	18,780
		5	3	17,266	0,551	0,318	15,896	18,637	16,890	17,900
		10	3	18,433	0,405	0,233	17,427	19,439	18,070	18,870
		15	3	18,940	0,060	0,034	18,790	19,089	18,880	19,000
		20	3	19,073	0,051	0,029	18,945	19,200	19,030	19,130
	28	0	3	15,796	0,685	0,395	14,094	17,499	15,100	16,470
		5	3	15,303	0,427	0,246	14,241	16,364	14,810	15,560
		10	3	16,150	0,345	0,199	15,290	17,009	15,880	16,540
		15	3	16,760	0,079	0,045	16,562	16,957	16,670	16,820
		20	3	17,090	0,226	0,130	16,528	17,651	16,840	17,280
	56	0	3	15,936	0,261	0,151	15,286	16,586	15,660	16,180
		5	3	16,140	0,455	0,262	15,009	17,270	15,750	16,640
		10	3	16,630	0,381	0,220	15,683	17,576	16,190	16,860
		15	3	16,916	0,073	0,042	16,733	17,099	16,860	17,000
		20	3	17,336	0,170	0,098	16,913	17,759	17,160	17,500
90	0	3	16,813	0,446	0,257	15,703	17,922	16,320	17,190	
	5	3	16,390	0,337	0,195	15,550	17,229	16,190	16,780	
	10	3	17,360	0,101	0,058	17,107	17,612	17,250	17,450	
	15	3	17,733	0,174	0,100	17,299	18,167	17,540	17,880	
	20	3	18,326	0,502	0,289	17,079	19,573	17,880	18,870	

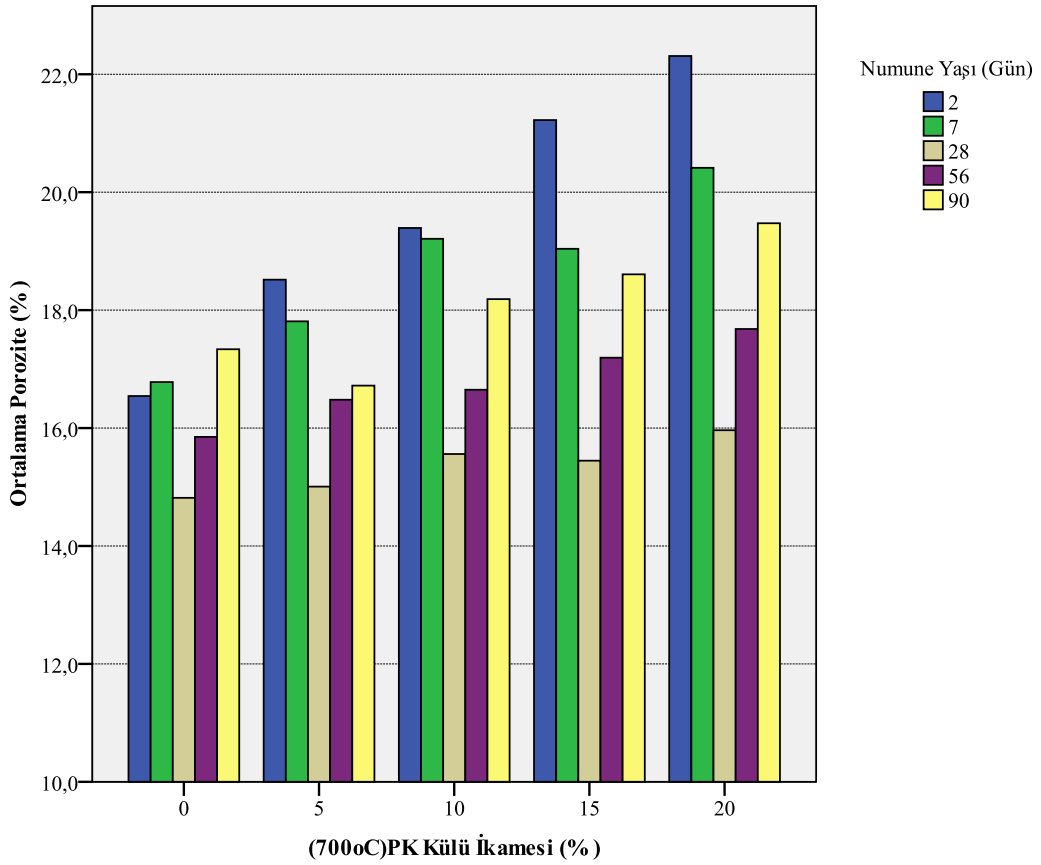


Şekil 4.22: (600°C-PK Külü) Porozite değerleri

600°C yakma sıcaklığında elde edilen PK Külünün farklı ikame oranları ile hazırlanan numunelerin 2, 7, 28, 56, 90. günlerdeki porozite değerleri incelendiğinde;

- (600°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça porozite değerlerinin arttığı,
- Referans numune hariç, tüm katkı oranlarında en yüksek porozite değerlerine % 20 ikame oranındaki (600°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 2 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 11.34, 22.59, 29.01, 33.55 oranlarında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 7 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 3.55, 9.30, 13.04, 13.69 oranlarında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 11.36, 18.21, 20.81, 21.93 oranlarında arttığı,

- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 56 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 3.26, 7.56, 8.18, 8.93 oranlarında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (600°C)PK Külü ikameli numunelerin 90 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 2.45, 10.41, 12.68, 15.96 oranlarında arttığı görülmektedir (Şekil 4.22).

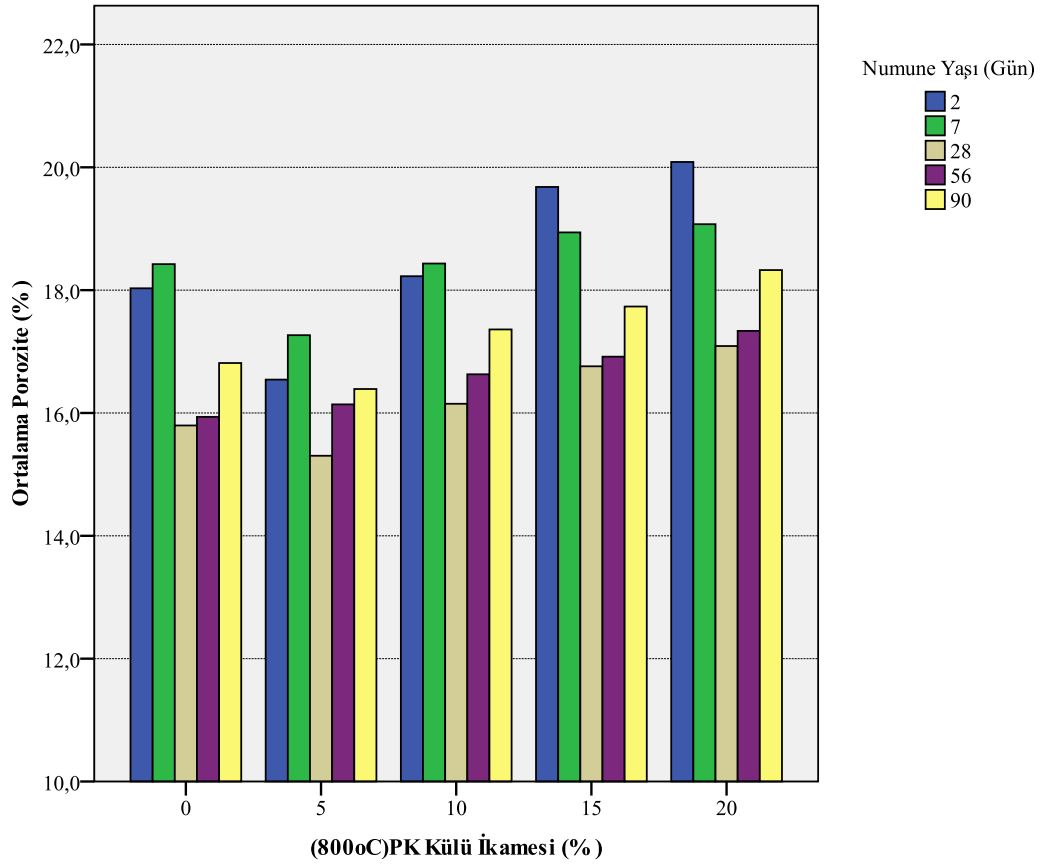


Şekil 4.23: (700°C-PK Külü) Porozite değerleri

700°C yakma sıcaklığında elde edilen PK Külünün farklı ikame oranları ile hazırlanan numunelerin 2, 7, 28, 56, 90. günlerdeki porozite değerleri incelendiğinde;

- (700°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça porozite değerlerinin arttığı,
- Referans numune hariç, tüm katkı oranlarında en yüksek porozite değerlerine % 20 ikame oranındaki (700°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,

- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 2 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 611.93, 17.23, 28.29, 34.86 oranlarında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 7 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 96.14, 14.48, 13.47, 21.65 oranlarında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.28, 5.02, 4.25, 7.74 oranlarında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 56 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 3.97, 5.05, 8.48, 11.55 oranlarında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerin 90 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 4.90, 7.33, 12.32 oranlarında arttığı, % 5 oranında (700°C)PK Külü ikameli numunelerinde ise % 3.56 oranında azaldığı görülmektedir (Şekil 4.23).



Şekil 4.24: (800°C-PK Külü) Porozite değerleri

800°C yakma sıcaklığında elde edilen PK Külünün farklı ikame oranları ile hazırlanan numunelerin 2, 7, 28, 56, 90. günlerdeki porozite değerleri incelendiğinde;

- (800°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça porozite değerlerinin arttığı,
- Referans numune(28, 56, 90.günlerde) hariç, tüm katkı oranlarında en yüksek porozite değerlerine % 20 ikame oranındaki (800°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu,
- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 2 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.09, 9.15, 11.41 oranlarında arttığı, % 5 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerinde ise % 8.25 oranında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 7 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 0.05, 2.80, 3.53 oranlarında arttığı, % 5 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerinde ise % 6.28 oranında azaldığı,

- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 2.24, 6.10, 8.19 oranlarında arttığı, % 5 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerinde ise % 3.12 oranında azaldığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 56 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 1.28, 4.35, 6.15, 8.78 oranlarında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 5, 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 90 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 2.05, 10.97, 17.37, 30.26 oranlarında arttığı,
- Referans numuneye göre, % 10, 15, 20 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerin 28 günlük porozite değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla % 3.25, 5.47, 9.00 oranlarında arttığı, % 5 oranında (800°C)PK Külü ikameli numunelerinde ise % 2.52 oranında azaldığı görülmektedir (Şekil 4.24).

Farklı yakma sıcaklıklarında (600, 700 ve 800°C) ve farklı gün seviyelerinin (2, 7, 28, 56, 90) her birinde PK Külü ikame miktarlarına bağlı olarak porozite değerlerinde meydana gelen değişim tek yönlü varyans analizi tekniği ile test edilmiştir. Birim hacim ağırlıkdeğerlerine ait varyans analizi sonuçları Çizelge 4.27, Çizelge 4.28, Çizelge 4.29' de verilmiştir.

Gerçekleştirilen tek yönlü varyans analizi sonucunda, gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli bir fark olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak da çimento numunelerinin porozite değerlerinin, PK Külü yakma sıcaklığı ve ikame oranına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Gruplar arasındaki farklılığın hangi gruplardan kaynaklandığını tespit edebilmek için porozite değerleri üzerinde Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Elde edilen Duncan testi sonuçları Çizelge 4.30, Çizelge 4.31, Çizelge 4.32' de verilmiştir.

Çizelge 4.27: (600°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi (p)
600	2	Gruplar arası	61,084	4	15,271	535,452	0,000
		Gruplar içi	0,285	10	0,029	-	-
		Toplam	61,370	14	-	-	-
	7	Gruplar arası	13,797	4	3,449	5,299	0,015
		Gruplar içi	6,509	10	0,651	-	-
		Toplam	20,306	14	-	-	-
	28	Gruplar arası	24,559	4	6,140	18,478	0,000
		Gruplar içi	3,323	10	0,332	-	-
		Toplam	27,882	14	-	-	-
	56	Gruplar arası	4,516	4	1,129	11,065	0,001
		Gruplar içi	1,020	10	0,102	-	-
		Toplam	5,536	14	-	-	-
	90	Gruplar arası	15,299	4	3,825	19,060	0,000
		Gruplar içi	2,007	10	0,201	-	-
		Toplam	17,305	14	-	-	-

Çizelge 4.28: (700°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi (p)
700	2	Gruplar arası	61,616	4	15,404	1673,147	0,000
		Gruplar içi	0,092	10	0,009	-	-
		Toplam	61,708	14	-	-	-
	7	Gruplar arası	23,333	4	5,833	21,200	0,000
		Gruplar içi	2,751	10	0,275	-	-
		Toplam	26,084	14	-	-	-
	28	Gruplar arası	2,495	4	0,624	21,726	0,000
		Gruplar içi	0,287	10	0,029	-	-
		Toplam	2,782	14	-	-	-
	56	Gruplar arası	5,857	4	1,464	19,816	0,000
		Gruplar içi	0,739	10	0,074	-	-
		Toplam	6,595	14	-	-	-
	90	Gruplar arası	13,893	4	3,473	9,294	0,002
		Gruplar içi	3,737	10	0,374	-	-
		Toplam	17,631	14	-	-	-

Çizelge 4.29: (800°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait tek yönlü varyans analizi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık düzeyi (p)
800	2	Gruplar arası	24,100	4	6,025	266,117	0,000
		Gruplar içi	0,226	10	0,023	-	-
		Toplam	24,326	14	-	-	-
	7	Gruplar arası	6,082	4	1,521	12,335	0,001
		Gruplar içi	1,233	10	0,123	-	-
		Toplam	7,315	14	-	-	-
	28	Gruplar arası	6,219	4	1,555	9,373	0,002
		Gruplar içi	1,659	10	0,166	-	-
		Toplam	7,877	14	-	-	-
	56	Gruplar arası	3,885	4	0,971	10,667	0,001
		Gruplar içi	0,911	10	0,091	-	-
		Toplam	4,796	14	-	-	-
	90	Gruplar arası		4	1,730	14,269	0,000
		Gruplar içi	1,213	10	0,121	-	-
		Toplam	8,135	14	-	-	-

Çizelge 4.30: (600°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait duncan testi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü		Farklı Olan Gruplar				
		İkame Oranı (%)	N	1	2	3	4	5
600	2	0	3	16,543				
		5	3		18,420			
		10	3			20,280		
		15	3				21,343	
		20	3					22,093
	7	0	3	17,920				
		5	3	18,556	18,556			
		10	3		19,586	19,586		
		15	3			20,256		
		20	3				20,373	
	28	0	3	15,780				
		5	3		17,573			
		10	3			18,653		
		15	3			19,063		
		20	3				19,240	
	56	0	3	16,053				
		5	3	16,576				
		10	3		17,266			
		15	3		17,366			
		20	3		17,486			
90	0	3	16,586					
	5	3	16,993					
	10	3		18,313				
	15	3		18,690	18,690			
	20	3				19,233		

(600°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait duncan testi sonuçlarına göre:

- 2 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 22,09 ile en yüksek porozite değerine, referans numunelerin 16,54 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 7 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 0 ile % 5, % 5 ile % 10, % 10,15 ile % 20 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 20,37 ile en yüksek porozite değerine, % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin 17,92 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 28 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 10, % 15 ile % 20 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 19,24 ile en yüksek porozite değerine, referans numunenin 15,78 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 56 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 0 ile % 5 ve % 10, 15 ile % 10 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 17,48 ile en yüksek porozite değerine, referans numunenin 16,05 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 90 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 0 ile % 5, % 10 ile % 15 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 19,23 ile en yüksek porozite değerine, referans numunenin 16,58 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- Tüm günlerde düşük porozite değerine referans numunenin sahip olduğu, daha sonra % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, en yüksek porozite değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.30).

Çizelge 4.31: (700°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait duncan testi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)		Farklı Olan Gruplar				
		N		1	2	3	4	5
700	2	0	3	16,543				
		5	3		18,516			
		10	3			19,393		
		15	3				21,223	
		20	3					22,310
	7	0	3	16,780				
		5	3		17,810			
		10	3			19,040		
		15	3			19,210		
		20	3				20,413	
	28	0	3	14,816				
		5	3	15,006				
		10	3		15,560			
		15	3		15,446			
		20	3			15,963		
	56	0	3	15,850				
		5	3		16,480			
		10	3		16,650			
		15	3			17,193		
		20	3			17,680		
90	0	3	17,336	17,336				
	5	3	16,720					
	10	3		18,186	18,186			
	15	3			18,606	18,606		
	20	3				19,473		

(700°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait duncan testi sonuçlarına göre:

- 2 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 22,31 ile en yüksek porozite değerine, referans numunelerin 16,54 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 7 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 10 ile % 15 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 20,41 ile en yüksek porozite değerine, referans numunelerin 16,78 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 28 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 0 ile % 5 ve % 10 ile % 15 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 15,96 ile en yüksek porozite değerine, referans numunenin 14,81 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,

- 56 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 10 ile % 5 ve % 15 ile % 20 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 17,68 ile en yüksek porozite değerine, referans numunenin 15,85 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 90 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 0 ile % 5, % 0 ile % 10, % 10 ile % 15 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 19,47 ile en yüksek porozite değerine, % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin 16,72 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- Tüm günlerde düşük porozite değerine referans numunenin sahip olduğu, daha sonra % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, en yüksek porozite değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.31).

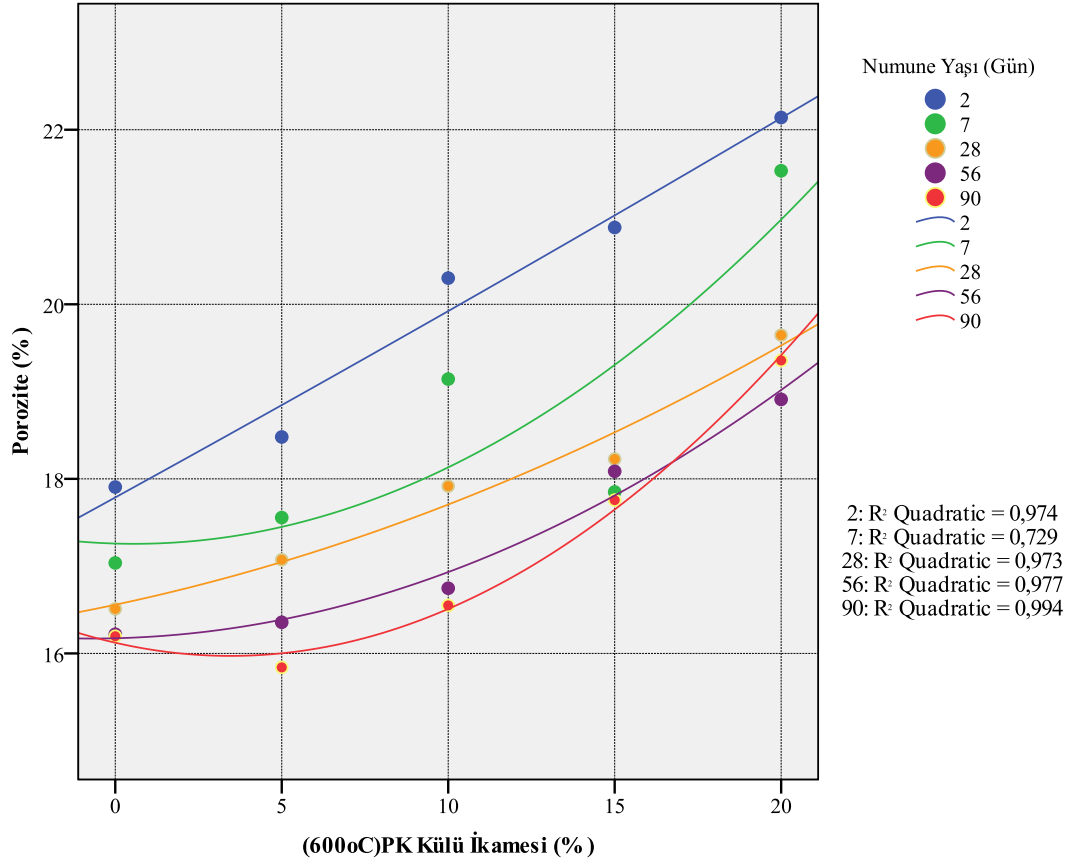
Çizelge 4.32: (800°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait duncan testi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Zaman (Gün)	PK Külü İkame Oranı (%)		Farklı Olan Gruplar					
		N	1	2	3	4	5		
800	2	0	3		18,030				
		5	3	16,543					
		10	3		18,226				
		15	3			19,680			
		20	3				20,086		
	7	0	3		18,423				
		5	3	17,266					
		10	3		18,433				
		15	3		18,940				
		20	3		19,073				
	28	0	3	15,796					
		5	3	15,303	15,796				
		10	3		16,150	16,150			
		15	3			16,760	16,760		
		20	3				17,090		
	56	0	3	15,936					
		5	3	16,140	16,140				
		10	3		16,630	16,630			
		15	3			16,916	16,916		
		20	3				17,336		
90	0	3	16,813	16,813					
	5	3	16,390						
	10	3		17,360	17,360				
	15	3			17,733	17,733			
	20	3					18,326		

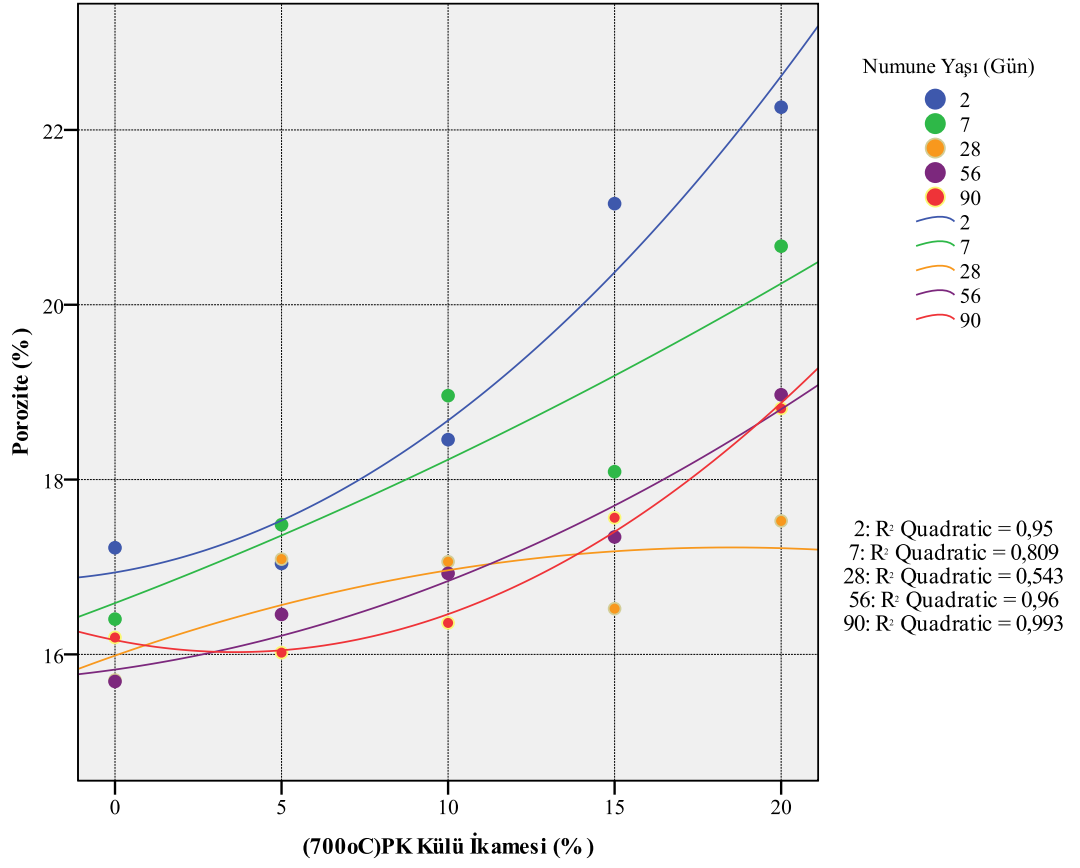
(800°C-PK Külü)Porozite değerlerine ait duncan testi sonuçlarına göre:

- 2 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 0 ile % 10 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 20,08 ile en yüksek porozite değerine, % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin 16,54 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 7 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 0, % 10, % 15, % 20 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 19,07 ile en yüksek porozite değerine, % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin 17,26 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 28 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 0 ile % 5, % 5 ile % 10, % 10 ile % 15, % 15 ile % 20 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 17,09 ile en yüksek porozite değerine, % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin 15,30 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 56 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 0 ile % 5, % 5 ile % 10, % 10 ile % 15, % 15 ile % 20 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 17,33 ile en yüksek porozite değerine, referans numunenin 15,93 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- 90 günlük porozite değerlerinin ikame oranlarına bağlı olarak % 0 ile % 5, % 10 ile % 15, % 0 ile % 10 arasında istatistiksel anlamda farkın olmadığı, % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin 18,32 ile en yüksek porozite değerine, % 5oranında PK Külü ikameli numunelerin 16,39 ile en düşük porozite değerlerine sahip olduğu,
- Tüm günlerde düşük porozite değerine referans numunenin sahip olduğu, daha sonra % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, en yüksek porozite değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.32).

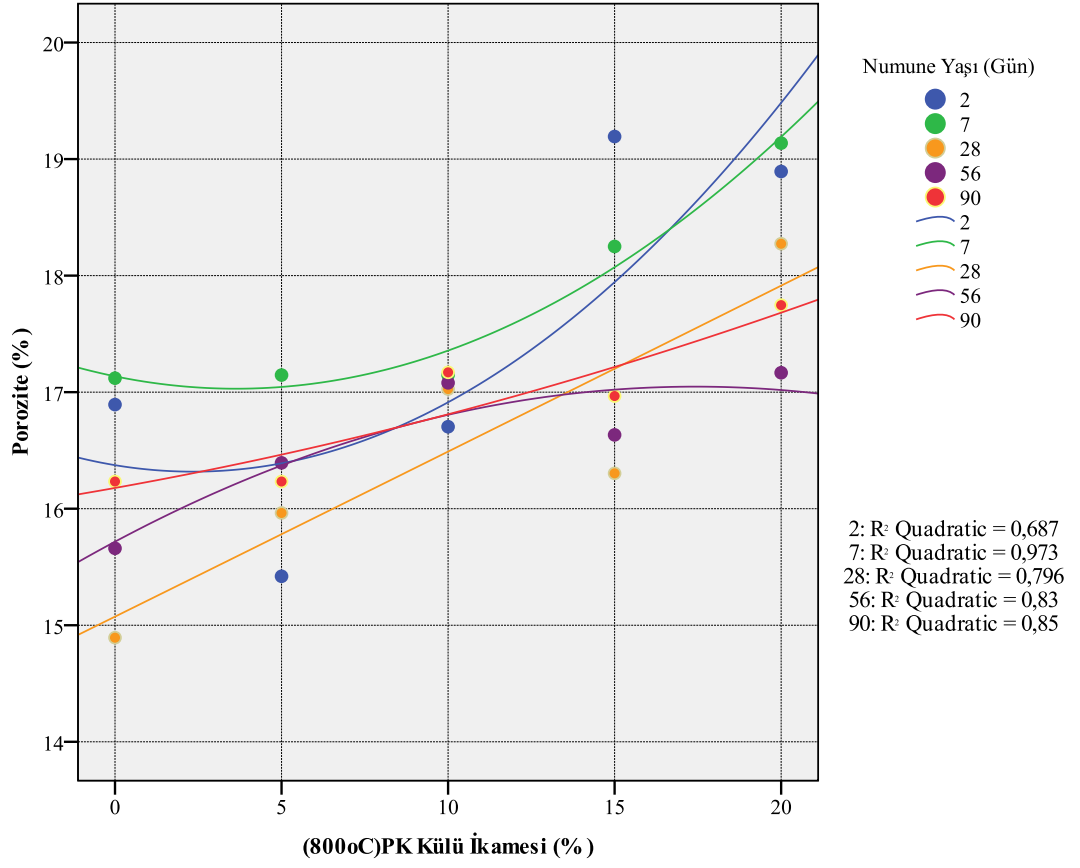
Regrasyon analizi sonucunda elde edilen model denklemlere ek olarak birim hacim ağırlık regrasyon eğrilerini gösteren grafikler Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27' de verilmiştir.



Şekil 4.25: (600°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak porozite değişimi



Şekil 4.26: (700°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak porozite değişimi



Şekil 4.27: (800°C)PK Külü ikame oranına bağlı olarak porozite değişimi

Deneysel tasarımda değişken olarak numune yaşı, PK Külü ikame miktarı ve yakma sıcaklığı parametrelerine bağlı olarak porozite değerlerindeki değişimi modellemek amacıyla çoklu lineer regrasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen regrasyon analizi sonucunda porozite ile numune yaşı, PK Külü ikame miktarı ve yakma sıcaklığı arasındaki ilişki $P = a + bX + cY + dZ$ model denklem ile açıklanmaktadır.

Bu model denklemde;

P: Porozite (%)

X: Numune yaşı (gün)

Y: PK Külü ikame miktarı (%)

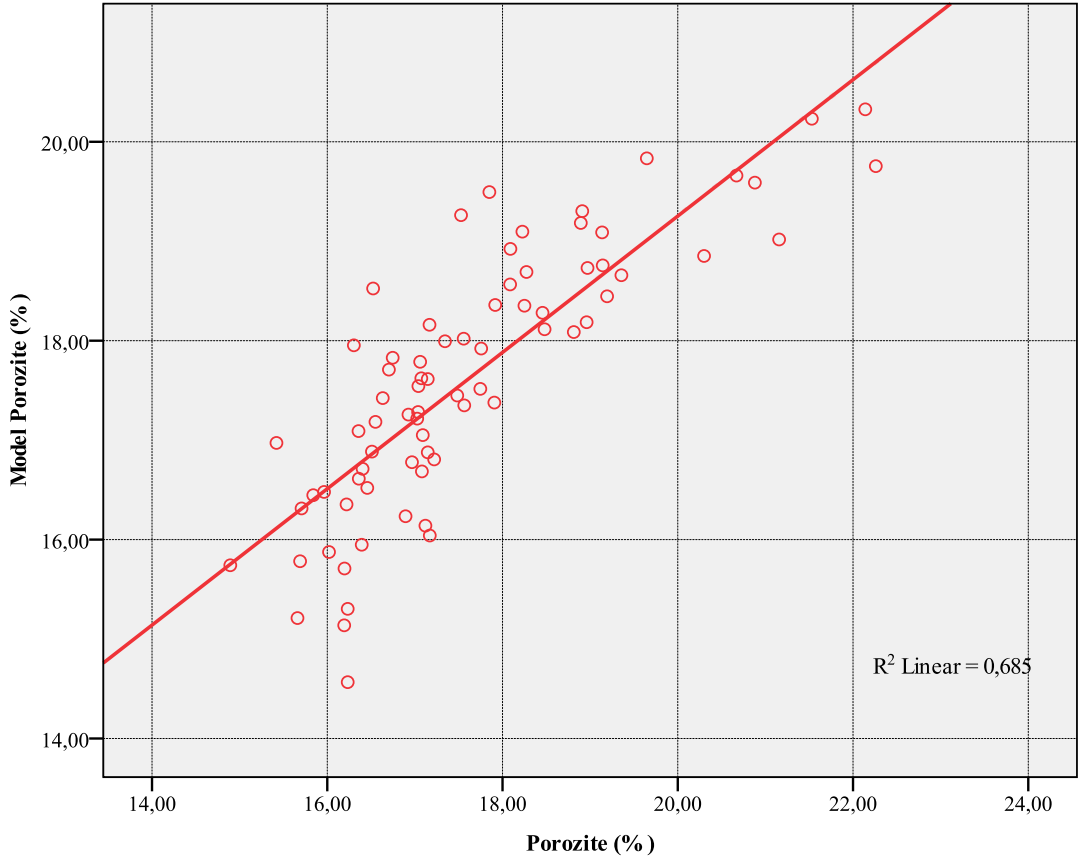
Z: Yakma sıcaklığı (°C) 'nı ifade eder.

Çoklu lineer regrasyon sonucunda;

Regrasyon katsayısı(R^2)=0,685 olan $P=20,844 - 0,19X + 0,147Y - 0,006Z$ denklemi bulunmuştur.

Çoklu lineer regrasyon model denklemi ile hesaplanan ve deney sonucunda elde edilen porozite değerleri arasındaki ilişki grafiği Şekil 4.28 'de verilmiştir.

Ayrıca % 68,50 doğruluk oranı ile gerçek porozite değerlerinin tahmin edildiği; PK Külü ikame miktarı, yakma sıcaklığı ve numune yaşı parametrelerine bağlı olarak elde edilen model denklemi ile porozite değerlerinin % 31,50 hata oranı ile tahmin edilebildiği görülmüştür.



Şekil 4.28: Porozite değerleri arasındaki ilişki grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneyler ve analizler sonucunda:

- Kimyasal analiz sonucunda, en yüksek silis içeriğine 800°C’ de elde edilmiş PK Külünün sahip olduğu gözlenmiş dolayısıyla silis içeriğini artması ile çimento numunelerinin basınç dayanımı değerlerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir.
- PÇ ve 600, 700, 800°C de elde edilen PK Küllerinin % 90 elek altı oranlarına göre sırasıyla 46.07, 60.59, 59.39, 55.42 µm; % 50 elek altı oranlarına göre sırasıyla 17.15, 21.89, 21.45, 18.84 µm tane boyutlarına sahip olduğu, en küçük tane boyutuna portland çimentosunun, daha sonra da 800°C’ de elde edilmiş PK Külünün sahip olduğu belirlenmiştir.
- Özgül yüzey alanı değerlerinde ise en yüksek değerin portland çimentosunda olduğu, farklı yakma sıcaklıklarında elde edilen PK Küllerinde ise en yüksek değerin 800°C’ de elde edilmiş PK Külünde olduğu belirlenmiştir.
- Özgül yüzey alanı sonuçlarına göre; yakma sıcaklığına bağlı olarak, sıcaklık arttıkça PK Külünün özgül yüzey alanının arttığı, dolayısıyla farklı yakma sıcaklıklarında elde edilen PK Küllerinden 800°C dekinin daha gözenekli bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Farklı yanma sıcaklıklarında elde edilmiş PK külleri arasında en küçük tane boyutuna ve en yüksek özgül yüzey alanına sahip 800°C’de elde edilmiş PK Külünün, su ihtiyacını arttırdığı buna bağlı olarak da işlenebilirliği azalttığı, ancak yüksek gözenekli yapısı ve içerdiği silis sayesinde beton basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir.
- Portland çimentosuna göre; PK Külünün daha düşük özgül ağırlık değerine sahip olduğu, dolayısıyla PK Külünün çimento ile ikamesi sonucu çimento numunelerinin özgül ağırlık değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir.
- % 5, 10, 15, 20 oranlarında (600°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı, referans çimentoya göre sırasıyla % 4, 11, 22, 34 oranlarında artış gösterdiği; % 5, 10, 15, 20 oranlarında (700°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı, referans çimentoya göre sırasıyla % 5, 13, 24, 35 oranlarında artış gösterdiği; % 5, 10, 15, 20 oranlarında (800°C)PK Külü ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı, referans çimentoya göre sırasıyla % 6, 13, 23, 21

oranlarında artış gösterdiği tespit edilmiş buna bağlı olarak da 600, 700 ve 800°C de elde edilmiş PK Külleri ile % 5, 10, 15, 20 oranlarında hazırlanan tüm çimento numunelerinde, referans çimentoya göre su ihtiyacının arttığı ancak çok yüksek düzeyde olmadığı gözlenmiştir.

- Çimentoya eklenen PK Küllü oranı arttıkça işlenebilirliğin azaldığı, buna bağlı olarak da özdeş kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarının artışının olduğu tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak da süper akışkanlaştırıcı kullanımı ile işlenebilirliğin iyileştirilebileceği düşünülmektedir.
- 600°C de elde edilmiş PK Külleri ile % 5, 10, 15 oranlarında hazırlanan çimento numunelerinde, referans çimentoya göre priz süresinin azalma; % 20 oranında hazırlanan çimento numunesinde, referans çimentoya göre priz süresinin artış gösterdiği; 700°C de elde edilmiş PK Külleri ile % 5 oranında hazırlanan çimento numunesinde, referans çimentoya göre priz süresinin azalma; % 10, 15, 20 oranlarında hazırlanan çimento numunelerinde, referans çimentoya göre priz süresinin artış gösterdiği; 800°C de elde edilmiş PK Külleri ile % 5 oranında hazırlanan çimento numunesinde, referans çimentoya göre priz süresinin değişiklik göstermediği; % 10 oranında hazırlanan çimento numunesinde, referans çimentoya göre priz süresinin azalma; % 15, 20 oranlarında hazırlanan çimento numunelerinde, referans çimentoya göre priz süresinin artış gösterdiği gözlenmiştir.
- Genel olarak tüm çimento numunelerinde su ihtiyacına bağlı olarak priz süreleri değerlendirildiğinde: priz başlama süresinin en az 250 dakika, en fazla 320 dakika; priz bitiş süresinin en az 400 dakika, en fazla 510 dakika olduğu tespit edilmiştir.
- (600°C)PK Küllü ikame miktarı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin düştüğü, referans numune hariç, tüm katkı oranlarında en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 5 ikame oranındaki (600°C)PK Küllü katkılı numunelerin sahip olduğu; (700°C)PK Küllü ikame miktarı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin düştüğü, referans numune hariç, tüm katkı oranlarında 2 günlük en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 5 ikame oranındaki (700°C)PK Küllü katkılı numunelerin sahip olduğu; referans numune hariç, tüm katkı oranlarında 7 ve 28 günlük en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 15 ikame oranındaki (700°C)PK Küllü katkılı numunelerin sahip olduğu; referans numune hariç, tüm katkı oranlarında 56 ve 90 günlük en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 5 ikame oranındaki (700°C)PK Küllü katkılı numunelerin sahip olduğu; (800°C)PK Küllü ikame miktarı arttıkça

basınç dayanımı değerlerinin düştüğü, referans numune hariç, tüm katkı oranlarında 2, 7, 28, 56, 90 günlük en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 5 ikame oranındaki (800°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu; % 5 ikame oranındaki (800°C)PK Külü katkılı numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerinin referans numuneden daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

- Gerçekleştirilen tek yönlü varyans analizi sonucuna göre gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli bir fark olduğu, buna bağlı olarak da çimento numunelerinin bütün günlerdeki basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, porozite değerlerinin, PK Külü yakma sıcaklığı ve ikame oranına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.
- (600°C)PK Külü ile elde edilmiş çimento numunelerinde tüm günlerde en yüksek basınç dayanımı değerine referans numunenin sahip olduğu, daha sonra % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, en düşük basınç dayanımı değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu; (700°C)PK Külü ile elde edilmiş çimento numunelerinde tüm günlerde en yüksek basınç dayanımı değerine referans numunenin sahip olduğu, daha sonra % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, en düşük basınç dayanımı değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu; (800°C)PK Külü ile elde edilmiş çimento numunelerinde en yüksek basınç dayanımı değerine 2, 7, 28, 90 günlük % 5 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu, daha sonra referans numunelerin sahip olduğu, en düşük basınç dayanımı değerine % 20 oranında PK Külü ikameli numunelerin sahip olduğu gözlenmiştir.
- (600-700-800°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinin düştüğü, referans numune hariç, tüm katkı oranlarında en yüksek birim hacim ağırlık değerlerine % 5 ikame oranındaki (600-700-800°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu, en düşük birim hacim ağırlık değerlerine ise % 20 ikame oranındaki (600-700-800°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu tespit edilmiştir.
- (600-700-800°C)PK Külü ikame miktarı arttıkça porozite değerlerinin arttığı, referans numune hariç, tüm katkı oranlarında en yüksek porozite değerlerine % 20 ikame oranındaki (600-700-800°C)PK Külü katkılı numunelerin sahip olduğu gözlenmiştir.
- (600-700-800°C) yanma sıcaklıklarında elde edilmiş PK Külü ikameli çimento numunelerinde, ilk numune yaşlarında basınç dayanımı değerlerinin düşük olduğu ancak pirinç kabuğu külünün puzolanik aktivitesine bağlı olarak 56 ve 90 günlük

basınç dayanımı değerlerinde artışa sebep olduğu saptanmış, pirinç kabuğu külünün yüksek dolgu etkisi ve içerdiği silis ile beton geçirimsizliğini azaltarak beton dayanıklılığı üzerinde de olumlu etkisinin olduğu görülmüştür.

- Pirinç kabuğu külünün, çimento numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin daha detaylı araştırılabilmesi için pirinç kabuğu külü ikameli çimento pastalarının hidrasyon gelişimlerinin incelenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ALKAYA, D., 2009, Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (1), 61-72.
- AMALIA, D., KUSHERMINA, P., HARDIAN, R., 2011, *SEM (Scanning Electron Microscopy) and TEM (Transmission Electron Microscopy)*, <http://www.4shared.com/office/sto8LYEO/SEM> [Ziyaret Tarihi: 16 Aralık 2011].
- ARSLAN, M., SUBAŞI, S., 2003, Kalıp Teknolojilerindeki Gelişmelerin Betonarme Elemanların Dayanıklılığına Etkileri, *3.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Ankara, 355-370.
- ARUNTAŞ, H.Y., 1996, *Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 12-17, 19.
- ATAR, N., 2006, *Suda çözünen polimerlerin çimento ve beton özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2-3.
- BALAYDIN, İ., 2005, *Pirinç Kabuğu ve Külünün Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- BİNİCİ, H., KAPLAN, H., YAŞARER, F., 2009, Pomza Katkılı Boyalarla Kaplanan Betonların Durabilitesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Türkiye, 13 (1), 40-47.
- BUI, D. D., HU, J., STROEVEN, P., 2005, Partide size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded portland cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, 27, 357-366.
- C109/C109M-02, 2002, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, American Society For Testing And Materials.
- DAKROURY, A.E., GASSER, M.S., 2008, Rice husk ash (RHA) as cement admixture for immobilization of liquid radioactive waste at different temperatures, *Journal of Nuclear Materials*, 381(3), 271-277.
- DAYI, M., 2006, *Doğal ve yapay puzolanların kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- ERDOĞAN, T., 1995, Türkiye’de üretilen çimentolar, özellikleri ve kullanımları, TMMB, *İnşaat Mühendisleri Odası Çimento Sempozyumu*, 16-27, Kasım, Ankara.
- ERDOĞAN, T.Y., 2010, *Beton*, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ., Ankara.
- ERDOĞAN, T.S., ERDOĞAN T.Y., 2007, Kimyasal Katkı Maddeleri ve Tarihi Geçmişleri, *II. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 23-34.
- ERDOĞAN, S., ERDOĞAN, T., 2007, Puzolanik Mineral Katkılar Ve Tarihi Geçmişleri, *2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Türkiye, 264-329.
- ERDOĞDU, K., TOKYAY, M., TÜRKER P., 1999, Traslar ve traslı çimentolar, *TÇMB/AR-GE/Y99.2*, Ankara.
- ERDOĞDU, K., TOKYAY, M., TÜRKER, P., 2003, Traslar ve Traslı Çimentolar, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara.
- FAROOQUE, K., ZAMAN, M., HALİM, E., ISLAM,S., HOSSAİN, M., MOLLAH, Y., MAHMOOD,A., 2009, Characterization and Utilization of Rice Husk Ash (RHA) from Rice Mill of Bangladesh, *Bangladesh Journal of Scientific And Industrial Research*, 44 (2), 157-162.
- GIVİ A. N. , RASHİD S. A. , AZİZ F. N. A. , SALLEH M. A. M. , 2010, Contribution of Rice Husk Ash to the Properties of Mortar and Concrete:A Review, *Journal of American Science*; 6 (3).
- GÜNDÜZ, T., 1990, *İnstrümental analiz*, Bilge Yayıncılık, Ankara, 122,123.
- HWANG, C. L., WU, D. S., 1989, Properties of Cement Paste Containing Rice Husk Ash, *American Concrete Institute* , 114, 733-762.
- HWANG, C. L., CHANDRA, S., 1997, Waste Materials Used in Concrete Manufacturing, , *Noyes Publications*, U.S.A., New Jersey, 184-234.
- İSSİ, A., 2005, *Tarihi Buluntuların Karakterizasyon Teknikleri, Ders Notları*, Anadolu Üniversitesi.
- İŞBİLİR, B., SUBAŞI, S., ERCAN, İ. , 2010, Effect Of Rice Husk Ash On Concrete Durability, *International Sustainable Buildings Symposium (ISBS)*, Ankara, 76-81.
- KAMAL , N.L.M., NURUDDİN M.F., SHAFİQ N., 2008, *The Influence Of Burning Temperatures and Percentage Inclusion of Microwave Incinerated Rice Husk Ash (MIRHA) On Normal Strength Concrete*, International Conference on Construction and Building Technologies, 531-538.
- KARTİNİ, K., MAHMUD, H.B, HAMİDAH, M.S., 2006, Strength Properties of Grade 30 Rice Husk Ash Concrete, *31st conference on our world in concrete & structures*, Singapore.

- KARTİNİ, K., 2011, Rice Husk Ash – Pozzolanic Material For Sustainability, *International Journal of Applied Science and Technology*, 1(6).
- KARAKAYA, M. Ç., 2006, *Kil minerallerinin özellikleri ve tanımlama yöntemleri*, Bizim Büro Basımevi, Ankara, 541, 595.
- KAVGACI M., 2007, Kimyasal Banyo Yöntemi İle Üretilen XSe (X=Zn,Cu,Mn) İnce Filmlerinde XRF Ölçümleri, Kahramanmaraş 22-16.
- KENE S. D., DOMKE, P. V., DESHMUKH, S. D., DEOTALE, R.S., 2007, Assessment Of Concrete Strength Using Flyash And Rice Husk Ash, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 1(3), 524-534.
- KILINÇKALE, F., 2003, Betonda Dayanıklılık, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Türkiye, 427, 32-33.
- KOÇAK, Y., 2008, *Çimento-Puzolan Etkileşiminde Moleküler ve Elektrokinetik Davranışların Araştırılması*, Doktora Tezi ,Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, , Ankara.
- KÜÇÜK, B., 2000, Betonun Dayanım Ve Durabilitesini Sağlayan Parametreler, *Pamukkale Üniv. Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Türkiye, 6(1), 79-85.
- MADANDOUST R., RANJBAR M. M., MOGHADAM H. A., MOUSAVİ S. Y., 2011, Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete, , *Elsevier Journal*, 144-152.
- MEHTA, P. K., 1992, Rice Husk Ash-A Unique Supplementary Cementing Material, *Advances in Concrete Technology*, Canada
- SENSALE G. R., 2010, Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials, *Cement & Concrete Composites*, 32,718–725.
- MEHTA, P. K., FOLLIAOD, K. J., 1995, Rice Husk Ash-a Unique Supplementary Cementing Material: Durability Aspect, *American Concrete Institute* , 154, 531-542.
- MUMCU, U., 2005, Çimento üretimindeki istikrarlı hammadde bileşiminin sağlanması, kalite ve verimliliğin artırılması, *Çimento ve Beton Dünyası*, 45-49.
- NEHDİ, M., DUQUETTE, J., DAMATTY, A., 2003, Performance of Rice Husk Ash Produced Using A New Technology As A Mineral Admixture in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 1203–1210.
- OMATOLA, K., ONOJAH, A., 2009, Elemental Analysis of Rice Husk Ash Using X - Ray Fluorescence Technique, *International Journal of Physical Sciences*, 4 (4), 189-193.
- PARK, B., Wİ, S., LEE, K., SİNGH, A., YOON, T., KİM, Y., 2004, X-Ray Photoelectron Spectroscopy of Rice Husk Surface Modified With Maleated Polypropylene and Silane, *Biomass and Bioenergy*, 27, 353-363..

- PUERTAS, F., FERNANDEZ-JIMENEZ, A., BLANCO-VARELA, M.T., 2004, Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate, *Cement And Concrete Research*, 34 (1), 139-148.
- SUBAŞI, S., 2001, *Kalıp Yüzey Faklılıklarının Betonun Bazı Fiziksel Özelliklerine Etkileri*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- SİLVA, F., LİBORİO, J., HELENE, P., 2008, Improvement of Physical and Chemical Properties of Concrete With Brazilian Silica Rice Husk (SRH) , *Revista Ingenleria de Construcción*, 23 (1), 18-25.
- SRİVASTAVA, V., MALL, I., MİSHRA, I., 2006, Characterization of Mesoporous Rice Husk Ash and Adsorption Kinetics of Metal Ions From Aqueous Solution onto RHA, *Journal of Hazardous Materials*, 257–267.
- SEKİZİNCİ BEŞ YILLIK KALKINMA PLANI, 2001, *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri IV (Çimento Hammaddeleri) Çalışma Grubu Raporu*, Ankara
- SAKLARA, S., BAYRAKTARA, İ., ÖNER, M., 2000, İnce Tane Boyu Analizinde Kullanılan Yöntemler, *Madencilik Dergisi*, Türkiye, 39 (2) , 29-47 .
- ŞENGÜL, Ö., TAŞDEMİR, M.A., GJORV, E., 2007, Puzolanik malzemelerin betonun mekanik özellikleri ve klor iyonu yayılımına etkisi, *İTÜ Mühendislik Dergisi*, 6, 53-64.
- TARGAN, Ş., 2002, *Kula çürufu, bentonit, kül ve kolomanit atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 12-14.
- TS EN 196-1, 2002, *Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-3, 2002, *Çimento Deney Metotları – Bölüm3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN-197-1, 2002, *Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 3, 5, 8-10.
- TURANLI, L., YÜCEL, H., GÖNCÜOĞLU, C., ÇULFAZ, A., UZAL, B., 2005-2007, *Doğal Zeolitlerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- ULUSOY, A., 2008, *Uçucu kül-tekstil fabrikası atık külü ve bazaltik pomzanın tuğla üretiminde katkı olarak kullanılması*, Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
- YALÇIN, H., GÜRÜ M.,2006, *Çimento ve Beton*, Ankara, Palme Yayıncılık, , 17-22.
- YEĞİNOBALI, A., 2005, Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara.

YEĞİNOBALI, A., 2001, 21. Yüzyılın çimentoları, *Çimento ve Beton Dünyası*, 30, 36-39.

YEĞİNOBALI, A., 1999, Portland çimentosu (Bazı temel bilgiler), *TÇMB*, Ankara.

YILDIZ, S., BALAYDIN, İ., ULUCAN, Ç., 2007, Pirinç Kabuğu Külünün Beton Dayanımına Etkisi, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Türkiye, 19 (1), 85-91.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : İŞBİLİR, Betül
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 21.05.1981, İzmir
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (506) 682 80 35
e-mail : betulisbilir@duzce.edu.tr

Eğitim

Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet tarihi

Lisans	Abant İzzet Baysal Üniversitesi/ Yapı Öğretmenliği	2007
Lise	Cumhuriyet Anadolu Meslek Lisesi (Bilgisayar Yazılımı)	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Düzce Teknopark A.Ş.	Girişimci Kabul ve İşletme Koordinatörü
2011	Perihan Tulan İlköğretim Okulu	Fen ve Teknoloji Öğretmeni
2008	Güldal İnşaat Ltd. Şti.	İnşaat Teknikeri
2008	MTR Mimarlık Taahhüt Dış Tic. Ltd. Şti.	İnşaat Teknikeri
1999-2002	Taşkın Ticaret Ltd. Şti.	Yönetici Asistanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. **İşbilir, B.**, Subaşı, S., Ercan, İ. , "Effect Of Rice Husk Ash On Concrete Durability", International Sustainable Buildings Symposium (ISBS), 76-81, 26-28 May 2010, Ankara, Turkey.
2. Subaşı, S., **İşbilir, B.**, Ercan, İ. , "Effect Of High Temperature On Mechanical Properties Of The Substitution Of Cement Samples With Fly Ash", International Sustainable Buildings Symposium (ISBS), 149-154, 26-28 May 2010, Ankara, Turkey.

Hobiler

Bilgisayar ve Bilişim Teknolojileri, Teknoloji Haberleri, Sağlıklı Yaşam, Kişisel Gelişim

