

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU MİNERAL KATKISININ BETONDAKİ
ETKİNLİK KATSAYININ BELİRLENMESİ VE BETONUN
KIRILMA PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Lütfiye KOCABIYIK**

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Yapı Mühendisliği

EYLÜL 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU MİNERAL KATKISININ BETONDAKİ
ETKİNLİK KATSAYININ BELİRLENMESİ VE BETONUN
KIRILMA PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Lütfiye KOCABIYIK
(501081046)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Eylül 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Eylül 2010

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yılmaz AKKAYA (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Fevziye AKÖZ (YTÜ)
Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (İTÜ)**

EYLÜL 2010

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında bana değerli bilgi ve yardımlarıyla destek olan sayın hocam Doç. Dr. Yılmaz Akkaya'ya, gerek deney aşamasındaki yardımları ve gerekse fikirleri ile tezde büyük emeği olan Araş. Gör. Cengiz Şengül'e, tezimi oluştururken maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen Boğaziçi Beton San. ve Tic. A.Ş.'ye, deneysel çalışmalarım sırasındaki yardım ve desteklerinden ötürü Boğaziçi Beton San. ve Tic. A.Ş. çalışanlarına ve ayrıca gösterdikleri her türlü destek ve üstün sabırlarından dolayı aileme teşekkür ederim.

Eylül 2010

Lütfiye KOCABIYIK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÇİZELGE İSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	x
SUMMARY	xii
1.GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1 Puzolanlar.....	4
2.1.1 Puzolanik aktivite.....	5
2.2 Doğal Puzolanlar.....	7
2.3 Yapay Puzolanlar	7
2.3.1 Uçucu kül	8
2.3.2 Silis dumanı.....	9
2.3.3 Pirinç kabuğu külü	10
2.3.4 Yüksek fırın cürufu	11
2.3.5 Granüle yüksek fırın cürufu	11
2.3.5.1 Yüksek fırın cürufunun beton içerisinde kullanılması	13
2.3.5.2 Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu	15
2.3.5.3 Yüksek fırın cürufunun aktivitesi.....	17
2.3.5.4 Yüksek fırın cürufunun hidrasyonu.....	18
2.3.5.5 Yüksek fırın cürufunun dayanıklılık özellikleri.....	18
2.3.5.6 Yüksek fırın cürufunun taze beton özelliklerine etkisi	21
2.3.5.7 Yüksek fırın cürufunun sertleşmiş beton özelliklerine etkisi.....	22
2.3.6 Etkinlik faktörü ve örnek çalışmalar	23
2.4 Beton Özellikleri	33
2.4.1 Taze beton özellikleri.....	33
2.4.1.1 İşlenebilirlik ve kıvam.....	33
2.4.1.2 Katkı kullanımının taze beton özelliklerine etkisi	36
2.5 Beton Dayanımı	39
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	40
3.1 Karışımlarda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	40
3.1.1 Çimento	40
3.1.2 Yüksek fırın cürufu	41
3.1.3 Agregalar	41
3.1.4 Akışkanlaştırıcı katkı	43
3.2 Beton Karışımları	44
3.3 Üretimde İzlenen Sıra	45
3.4 Numune Şekil ve Boyutları	45
3.5 Numune Kodlarının Belirlenmesi:	45
4. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	47
4.1 Taze Beton Deney Sonuçları.....	47
4.1.1 Birim ağırlık deneyi	47

4.1.2 Çökme deneyi.....	47
4.1.3 Hava içeriği deneyi	47
4.2 Sertleşmiş Beton Deneylerinin Hesaplanması	48
4.2.1. Kırılma enerjisi deneyinden elde edilen sonuçlar	48
4.2.1.1 Kırılma enerjisinin hesaplanması.....	49
4.2.1.2 Eğilme deneylerinden net eğilme dayanımlarının hesaplanması	50
4.2.2 Silindir basınç deneyi hesaplaması	50
4.2.3 Yarma-çekme deneyi hesaplaması.....	50
4.3 Sertleşmiş Beton Deneylerinin Sonuç ve Değerlendirmeleri.....	51
4.3.1 Silindir basınç deneyi sonuç ve değerlendirmeleri	51
4.3.1.1 CEM I 42,5N tipi çimento ile yapılan üretimlerin silindir basınç deneyi sonuç ve değerlendirmeleri.....	51
4.3.1.2 CEM I 42,5R tipi çimento ile yapılan üretimlerin silindir basınç deneyi sonuç ve değerlendirmeleri.....	54
4.3.2 Yarma çekme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri.....	56
4.3.2.1 CEM I 42,5N tipi çimento ile yapılan üretimlerin yarma çekme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri.....	56
4.3.2.2 CEM I 42,5R tipi çimento ile yapılan üretimlerin yarma çekme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri.....	60
4.3.3 Eğilme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri.....	61
4.3.3.1 CEM I 42,5N tipi çimento ile yapılan üretimlerin eğilme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri.....	61
4.3.3.2 CEM I 42,5R tipi çimento ile yapılan üretimlerin eğilme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri.....	64
4.3.4 Kırılma enerjisi deney sonuç ve değerlendirmeleri.....	66
4.3.4.1 CEM I 42,5N tipi çimento ile yapılan üretimlerin kırılma enerjisi deney sonuç ve değerlendirmeleri.....	66
4.3.4.2 CEM I 42,5R tipi çimento ile yapılan üretimlerin kırılma enerjisi deney sonuç ve değerlendirmeleri.....	70
4.3.5 Yük-Sehim ilişkisi ile elastisite modülü yaklaşımı ve çatlak riskinin belirlenmesi.....	72
5. GENEL SONUÇLAR	73
KAYNAKLAR.....	75
EKLER.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	82

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Puzolanik aktivite deney sonuçları.....	08
Çizelge 2.2: Yüksek fırın cürufalarının kompozisyonları.....	16
Çizelge 2.3: ASTM standartlarına göre katkı maddesi olarak kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri.....	16
Çizelge 2.4: ASTM standartlarına göre katkı maddesi olarak kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri	16
Çizelge 2.5: Betonların hesap değerleri.....	26
Çizelge 2.6: Değişik kıvamlardaki betonun çökme değerleri.....	35
Çizelge 2.7: TS EN 206 standardına göre beton kıvam sınıfları.....	35
Çizelge 3.1: Portland çimentosunun fiziksel özellikleri.....	40
Çizelge 3.2: Portland çimentosunun basınç dayanımı	41
Çizelge 3.3: Portland çimentonun kimyasal özellikleri.....	41
Çizelge 3.4: Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri.....	41
Çizelge 3.5: Agregaların fiziksel özellikleri	42
Çizelge 3.6: Agregaların elek analizi sonuçları.....	42
Çizelge 3.7: 1 m ³ için teorik beton bileşimleri ve özellikleri.....	43
Çizelge 3.8: Kullanılan yeni nesil süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri.....	44
Çizelge 4.1: Taze beton deney sonuçları.....	48
Çizelge 4.2: Silindir basınç deneyi sonuçları.....	51
Çizelge 4.3: Silindir basınç deneyi sonuçları.....	54
Çizelge 4.4: Yarma-Çekme deneyi sonuçları.....	56
Çizelge 4.5: Yarma-Çekme deneyi sonuçları.....	60
Çizelge 4.6: Eğilme deneyi sonuçları.....	61
Çizelge 4.7: Eğilme deneyi sonuçları.....	64
Çizelge 4.8: Özgül kırılma enerjileri (Joule/m ²).....	66
Çizelge 4.9: Özgül kırılma enerjileri (Joule/m ²).....	70
Çizelge 4.10: Eğim/Eğilme dayanımı Değerleri.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Granülasyon yöntemi.....	12
Şekil 2.2: Paletleme yöntemi.....	12
Şekil 2.3: Cürufli çimento üretiminin basit şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.4: 28 günlük basınç dayanımı dağılımı - w/ (c+keg) grafiği	27
Şekil 2.5: 28 günlük basınç dayanımı dağılımı - w/ (c+kg) grafiği	28
Şekil 2.6: Hesaplanmış etkinlik değerlerinin geçerlilik değerleri	29
Şekil 2.7: k etkinlik faktörünün belirlenme şekli.....	30
Şekil 2.8: Basınç dayanımı.....	31
Şekil 2.9: Taze betonda çökme miktarının ölçülmesi.....	34
Şekil 2.10: Süper akışkanlaştırıcı katkıların etki mekanizması.....	38
Şekil 3.1: Beton karışımının granülometrisi ve referans eğrileri.....	44
Şekil 3.2: Numune şekil ve boyutları.....	45
Şekil 4.1: RILEM deneyi yükleme düzeneği.....	48
Şekil 4.2: Yük-Sehim eğrisinin şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.3: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	51
Şekil 4.4: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile hesaplanması.....	52
Şekil 4.5: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	52
Şekil 4.6: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları için korelasyon metodu ile k etkinlik katsayısının hesaplanması.....	53
Şekil 4.7: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	53
Şekil 4.8: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı.....	54
Şekil 4.9: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı.....	55
Şekil 4.10: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı.....	55
Şekil 4.11: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük yarma-çekme dayanımları.....	56
Şekil 4.12: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük yarma-çekme dayanımları için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile hesaplanması.....	57
Şekil 4.13: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük yarma-çekme dayanımları.....	57

Şekil 4.14: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük yarma-çekme dayanımları için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile hesaplanması.....	58
Şekil 4.15: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük yarma-çekme dayanımları.....	58
Şekil 4.16: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük yarma-çekme dayanımları.....	59
Şekil 4.17: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük yarma-çekme dayanımları için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile hesaplanması.....	59
Şekil 4.18: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 7 günlük yarma-çekme dayanımı.....	60
Şekil 4.19: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 28 günlük yarma-çekme dayanımı.....	60
Şekil 4.20: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları.....	62
Şekil 4.21: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları.....	62
Şekil 4.22: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları.....	63
Şekil 4.23: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile hesaplanması.....	63
Şekil 4.24: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları.....	64
Şekil 4.25: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımı.....	65
Şekil 4.26: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı.....	65
Şekil 4.27: %30 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük kırılma enerjileri.....	66
Şekil 4.28: %30 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük kırılma enerjileri için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile bulunması.....	67
Şekil 4.29: %60 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük kırılma enerjileri.....	67
Şekil 4.30: %60 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük kırılma enerjileri için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile belirlenmesi.....	68
Şekil 4.31: %30 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük kırılma enerjileri.....	69
Şekil 4.32: %60 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük kırılma enerjileri.....	69
Şekil 4.33: %60 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük kırılma enerjileri için korelasyon metodu ile k etkinlik katsayısının belirlenmesi.....	70
Şekil 4.34: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 7 günlük kırılma enerjileri.....	71
Şekil 4.35: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 28 günlük kırılma enerjileri.....	71

Şekil A.1: N ve R tipi çimentolar ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımları.....	77
Şekil A.2: N ve R tipi çimentolar ile 7 ve 28 günlük yarma çekme dayanımları.....	77
Şekil A.3: N ve R tipi çimentolar ile 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları.....	77
Şekil A.4: N ve R tipi çimentolar ile 7 ve 28 günlük kırılma enerjileri çizelgesi.....	78
Şekil A.5: N Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %30 çimento azaltılmış %30,60,90 cüruf eklenmiş numunelerin 7 günlük yük-sehim ilişkileri.....	78
Şekil A.6: N Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %60 çimento azaltılmış %30,60,90 cüruf eklenmiş numunelerin 7 günlük yük-sehim ilişkileri.....	79
Şekil A.7: N Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %30 çimento azaltılmış %30,60,90 cüruf eklenmiş numunelerin 28 günlük yük-sehim ilişkileri.....	79
Şekil A.8: N Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %60 çimento azaltılmış %30,60,90 cüruf eklenmiş numunelerin 28 günlük yük-sehim ilişkileri	80
Şekil A.9: R Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %30 ve %60 çimento azaltılmış eşit miktarda cüruf ikame edilmiş numunelerin 7 günlük yük-sehim ilişkileri.....	80
Şekil A.10: R Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %30 ve %60 çimento azaltılmış eşit miktarda cüruf ikame edilmiş numunelerin 28 günlük yük-sehim ilişkileri.....	81

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU MİNERAL KATKISININ BETONDAKİ ETKİNLİK KATSAYISININ BELİRLENMESİ VE BETONUN KIRILMA PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde çeşitli ürünlerin elde edilmesi esnasında üretim amacının dışında yan ürün olarak üretilen birçok atık malzeme arasından gerek miktar olarak gerekse inşaat sektöründeki kullanım olanakları açısından önemli bir yeri yüksek fırın cürupları almaktadır. Çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisi olan yüksek fırın cürufunun, beton bileşimindeki en pahalı bileşen olan çimentonun yerine maksimum ikame edilebilme yeteneğinin belirlenmesi ekonomiklik açısından da faydalı olacaktır.

Bu tez çalışmasında yüksek fırın cürufunun etkinlik katsayısının belirlenmesi ve betonun kırılma parametrelerine etkisinin incelenmesi amacı ile 300 dozlu sabit 0,65 su/çimento oranlı şahit bir beton üretilmiştir. Yüksek fırın cürufunun etkisinin ve kırılma davranışının belirlenmesi amacı ile toplam çimento miktarının %30'u ve %60'ı azaltılarak, her bir üretim için karışımlarda azalan çimento miktarına karşılık %30, %60, %90 oranlarında cüruf eklenerek iki farklı tip çimento (CEM I 42,5 N ve CEM I 42,5 R) ile toplam 10 adet beton karışımı üretilmiştir. Betonların taze haldeki karakteristiklerini belirlemek üzere çökme, birim ağırlık, hava içeriği deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş beton özelliklerini belirlemek için silindir numuneler üzerinde basınç dayanımı, prizma numuneler üzerinde eğilme dayanımı, disk numuneler üzerinde ise yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Yüksek fırın cürufunun etkinlik katsayısının belirlenmesi aşamasında literatürde belirtilen formüllerden biri esas alınarak (Bolomey, Ferret,...vb) hesaplama yapılmamış, bunun yerine basınç dayanımı yanında eğilme ve çekme dayanımı deneyleri ile kırılma enerjileri açısından da hiçbir formül kullanılmadan direkt olarak şahit betonun performans kriterleri ile karşılaştırılmıştır. Beton bileşimlerinde uçucu kül ve puzolan kullanımı için etkinlik katsayısının belirlendiği literatür incelendiğinde su/çimento oranının sabit olduğu görünmekte ve çeşitli basınç dayanımı formülleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada sabit su/çimento yerine toplam su içeriği sabit tutularak bu parametrenin değişmesi engellenmiştir. Bu sayede şahit numune olarak esas alınan 300 dozajlı 0,65 su/çimento oranına sahip betonlarda cürufun etkinlik katsayısı farklı performans dayanımlarına göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Basınç dayanımları ve elastisite modülü değerleri için 3'er silindir numune, yarmada çekme için 4'er silindir numune, eğilme dayanımı ve kırılma enerjileri için 3'er adet prizma numune alınmıştır. Çimento ve cüruf haricindeki tüm katı bileşenler kuru olarak 1 dakika süre ile karıştırılmış daha sonra çimento, cüruf ve suyun tamamı eklenerek karıştırma işlemine 2 dakika daha devam edilmiş, son olarak kimyasal katkı ilave edilerek karıştırma işlemine 5 dakika daha devam edilerek betonlar üretilmiştir. Kimyasal katkı içeriği, başlangıç hesap değerinin

haricinde çökme değeri 18 ± 2 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Eşit su içeriğine sahip ve erylit kıvamda alınan beton numuneleri yeterli süre kürlenmiştir. Ardından basınç, eğilme, yarma çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçları değerdendirildiğinde yüksek fırın cürufunun imento ile erylit ikame edildiği numunlerde basınç, eğilme ve yarma çekme deneylerinden cürufun etkinliğinin 1 olduğu görölmüştür. Ayrıca yüksek fırın cürufunun betonların enerji yutma kapasitelerini arttırdığı ve erken yaş atlak riskini düşüdüğu gözlemlenmiştir.

DETERMINATION OF THE ACTIVITY COEFFICIENT OF BLAST FURNACE SLAG ADDITION AND EFFECTS ON THE FRACTURE PARAMETERS OF THE CONCRETE

SUMMARY

Today, a variety of products for purposes other than obtaining as a byproduct during the production of many waste materials produced as well as the amount required from the construction sector in terms of the possibility of the use of blast furnace slag is an important part. It would be very useful in terms of economy to determine the maximum substitution of blast furnace slag, which can be obtained from various metallurgical plants as a member of waste materials group, instead of the most expensive component in the composition of concrete, cement.

In this study, to find out coefficient and the efficiency of blast furnace slag concrete fracture parameters in order to examine the effect of with 300 doses of 0,65 water/cement ratio of concrete produced a reference concrete. With the aim of finding the fracture influence of blast furnace slag, reducing the amount of total cement volume of %30 and %60, regardless of reducing the cement for each production in proportion of %30, %60, %90 of slag adding, ten different concrete mixtures were produced with different types of two cement (CEM I 42,5 N and CEM I 42,5 R). Owing to the fact that several experiments such as: slump, unit weight, air content tests carried out to found out the characteristic of the fresh concrete. To determine the characteristics of hardened concrete, compressive strength test on the cylinder specimens, flexural strength test on the prism specimens, tensile strength test on the disc specimens, were performed.

During the process of determination the activity coefficient for slag, calculation been done without using the formulas based which mentioned at literature, instead of this beside having a comprassive strength, flexual and tensile strength experiments also without having and using any formula regarding fracture energy directly mentioned concrete's performance criterion been compared. There are various formulas been used regards to comprassive strength and after been studying the designated activity coefficient literature on concrete mixtures for usage fly ashes and pozzuolana, it is very clear to observe water/cement proportion has been standing at constant lines. In this study, a fixed water/cement instead ot the total water content was kept constant, prevents the change of these parameters. In this way, based on reference samples with a dosage of 300, 0,65 water/cement ratio of concrete has different performance in the activity coefficient of slag resistance was determined by individual. Three cylinders for compressive strength and modulus of elasticity, four cylinders for splitting tensile strength, three prisms for flexural strength and fracture energy, were taken. With the exception of cement and slag, all dry solid components mixed for one minute and then cement, slag and water all of the addition of the mixing process of two minutes was continued and finally chemical additive is added and the mixing

process five more minutes to continue the concrete produced. Content of chemical additives, except the initial account value of the slump value is set to be 18 ± 2 cm. Concrete samples which were taken with the equal water content and equal consistency, were cured sufficient time. Then compressive, flexural, tensile strength tests were made. The results of these experiments showed that, the efficiency of blast furnace slag is 1 in some samples which are equally substituted with cement. Additionally, it is seemed that blast furnace slag helped to decrease early time cracking risk and increase the capacity of energy absorbing.

1.GİRİŞ

Beton içinde en yüksek maliyete sahip bileşen çimentodur. Bir ton çimento üretimi sırasında yaklaşık olarak bir ton CO₂ gazı açığa çıkar. Çimento üretiminin çevreye bu oranda zararlı olmasının yanı sıra, üretim sırasında fazla miktarda enerji tüketmesi de diğer bir sakıncasıdır. Çeşitli mineral katkıların çimento ile yer değiştirilerek beton üretiminde kullanılması hem daha ekonomik hem de çevreye daha az zarar veren sonuçlar doğurur [16].

Beton üretiminde kullanılan mineral katkılar elde ediliş yöntemlerine göre; doğal mineral katkılar, yan ürün olarak elde edilmiş mineral katkılar, ısıtılmış mineral katkılar olmak üzere üç ayrı grupta sınıflandırılırlar. Bazı mineral katkı maddeleri elde edildiklerinde ince taneli yapıya sahiptir, doğrudan beton içerisinde kullanılabilirler, bunlara örnek olarak uçucu küller gösterilebilir. Bazılarının ise beton karışımında kullanılmadan önce öğütülerek inceltilmesi gerekmektedir, bunlara örnek olarak ise yüksek fırın cürufları gösterilebilir.

Cüruflar çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterebilir. Örneğin, yüksek fırın cüruflarının kendi başına bağlayıcı özelliği olmasına karşın nikel ve bakır cüruflarının yalnızca puzolanik özellikleri vardır.

Cürufların çimento ve beton sektöründe çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. Konvansiyonel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar kristal yapıya sahip kütleler olarak ortaya çıkar. Bu tür cüruflar ya hiç kullanılmaz, atılırlar yada yol malzemesi veya beton agregası olarak kullanılırlar. Buna karşılık modern teknoloji ile çelik üretimi yapılan tesislerde camsı yapıya ve bir miktar hidrolik özelliklere sahip olan cüruflar elde edilir. Bunları çimentolu sistemlerde kullanmak mümkün olmaktadır. Tüm cüruflar arasında en önemlisi ve en yaygın kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır [17].

Bu çalışmada yüksek fırın cürufunun betondaki etkinliğinin ve betonun kırılma parametrelerine etkisinin tespiti için 300 dozlu, 0,65 su/çimento oranına sahip

referans betonu üretilmiştir. Bunun yanında toplam çimento miktarının %30'u ve %60'ı azaltılarak, her bir üretim için karışımlarda azalan çimento miktarına karşılık %30, %60, %90 oranlarında cüruf eklenerek eşit işlenebilirlikte 10 farklı beton karışımı üretilmiştir. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımı testleri yapılarak cürufun betondaki etkinlik katsayısı ve kırılma parametrelerine etkisi incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Beton, ekonomikliği, şekil verilebilme kolaylığı, dayanıklı olması, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dirençli olmasından dolayı ilk olarak kagir yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlandığı 1842’lerden bu yana yapı sektöründeki önemini kaybetmeden günümüze ulaşmıştır. Geleneksel beton, içerdiği ince ve iri agrega, çimento ve sudan oluşan kompozit bir malzemedir. Bu kompozitte agregalar dağınık fazı oluşturmakla beraber su ve çimento ise sürekli bir faz oluşturur. Günümüzde ihtiyaca göre betona değişik özellikler kazandırabilmek için kimyasal ve mineral katkı maddeleri de katılabilmektedir. Bu katkılar sayesinde betonun gerek taze haldeki ve gerekse sertleşmiş haldeki özellikleri geliştirilebilmektedir.

Mineral katkı olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi çevre kirliliği yapan endüstriyel yan ürünlerin çimento ile yer değiştirilerek beton içerisinde kullanılmaları sayesinde daha ekonomik beton elde etmek son yıllarda mümkün olabilmektedir.

Beton yapımında kullanılan bu mineral katkıların hemen hemen hepsi puzolanik özelliklidir.

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya bağlayıcılık değeri çok az olan, fakat ince taneli durumdayken sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özelliği kazanan silikalı ve alüminalı malzemelerdir. Volkanik kül, volkanik tuf, diatomlu toprak ve pişirilmiş kil, “doğal puzolanlar” dır. Uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı, ve pirinç kabuğu külü, “yapay puzolanlar” sınıfına aittir.

Doğal puzolanlar, binlerce yıldan bu yana, söndürülmüş kireçle birleştirilerek, su altında da sertleşebilen ve suya dayanıklı harç ve bir tür beton yapımında kullanılmıştır. Portland çimentosunun icadından sonra da, hem doğal puzolanlar hemde yapay puzolanlar, portland çimentolu beton yapımında mineral katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

Gerek betonun birçok teknik özelliğini olumlu yönde değiştirmeleri, gerekse portland çimentosundan daha ekonomik olmaları ve beton karışımının içerisinde çimento ağırlığının %50’sine varan miktarlarda kullanılmaları nedeniyle, puzolanik katkı maddelerinin beton endüstrisinde çok önemli yeri bulunmaktadır.

2.1 Puzolanlar

ASTM C 618'e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denir. Puzolanlar esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri ihtiva eder. Reaktif SiO_2 miktarı kütlece %25'den az olmamalıdır. İnsanların su içinde priz yapabilen, su etkisiyle erimeyen bağlayıcı üretme çabaları çok eski çağlara kadar uzanır. Sorunun kesin çözümü çimentonun icadı ile mümkün olabilmıştır. Bununla beraber aktif, camlaşmış silis (SiO_2) içeren toprakların kireçle karıştırılmaları durumunda bu özelliğin kısmen sağlandığı gözlenmiştir.

Eski Mısır'da tuğlanın (pişmiş kil) öğütülerek kirece katılması düşünülmüştür. Bu yöntemle elde edilen harca "horasan harcı" denilmektedir. Osmanlılar bu harcı geniş ölçüde ve bilinçli olarak kullanmışlardır. Avrupa'da ise Romalılar Napoli civarındaki Puzzuoli kasabasının toprağından yararlanmışlardır. Puzolan sözcüğü bu kullanımdan kaynaklanmaktadır. Almanlar puzolana "tras" demektedirler, ülkemizde de bu deyim yaygındır ve standartlarımıza geçmiştir.

Puzolanlar, doğal olarak meydana gelen malzemeleri (başlıca volkanik orijinli malzemeler) ve yapay malzemeler olan kül, YFC vb. malzemeleri kapsamaktadır.

Puzolan terimi, genel bir ifade olmakla beraber puzolanlar, bulundukları ülkelere göre özel adlar almıştır. Mesela, Almanya'da, "Tras" adı ile anılmış, Yunanistan'da ise "Santorin toprağı" olarak anılmıştır. Ülkemizde bu tip volkanik tüf karakterli puzolanlara tras denilmektedir. Fakat son yıllarda traslı ve katkılı çimentolara verilen önemin artmasıyla Puzolan ismi de gerçek anlamına kavuşmuştur. Ülkemizde iç Anadolu, İç Ege, Marmara, Karadeniz, Akdeniz Bölgelerinde bol miktarda tras kaynakları bulunmaktadır. Türkiye jeoloji haritasında 155000 km² alanı kaplayan volkanik kayaç oluşumlarının varlığı görülmektedir ki bu alan, Türkiye yüz ölçümünün hemen hemen 1/5'i kadardır. Bu değerlere göre ülkemiz, tras hammaddesi bakımından oldukça zengindir. Diğer taraftan, 1985 -1990 yılları arasında üretilen çimentoların %14,6'lık kısmı traslı çimento iken, bu oran 1992 - 1994 yılları için %36,31'e çıkmıştır [21].

19. yüzyılın sonlarında Portland Çimentosunun (PÇ) keşfedilmesiyle puzolanik çimentonun pratik kullanımında azalma görülmüştür. Ülkemizde, 1950 yılından sonra PÇ ile puzolanik madde kombinasyonlarının kullanılması ile beton ve harçların bağlayıcılık özelliklerinde etkili yararlar görülmüş ve puzolanlar, çimento malzemesi olarak kabul edilmiştir.

Puzolanların kompozisyonu büyük ölçüde silis ve alüminiden oluşmaktadır. İnce daneli durumdaki puzolanlar, söndürülmüş kireç ve suyla birleştirildiğinde, bu malzemeler arasında birtakım kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır. Kalsiyum hidroksit, silis ve su arasındaki reaksiyonlar, aynen portland çimentosunun hidratasyonunda olduğu gibi hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyum - silika - hidrat (C - S - H) jellerinin oluşmasına yol açmaktadır. Nemli ortamda, ince öğütülmüş puzolanın silikası ile kalsiyum hidroksit arasında oluşan kimyasal reaksiyon basitçe aşağıdaki gibi gösterilebilir [17].

$CH + S + H \rightleftharpoons C - S - H$ (kalsiyum - silika - hidrat) Bu reaksiyon çok yavaş bir reaksiyondur. Burada, $C=CaO$, $H=H_2O$, $S=SiO_2$ 'tir.

2.1.1 Puzolanik aktivite

Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği "puzolanik aktivite" olarak tanımlanmaktadır.

Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda "silis + alümin + demir oksit" içermesi gerekmektedir. Puzolanik aktivite "dayanım aktivite indeksi" olarak adlandırılan bir değerin hesaplanmasıyla ifade edilmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [14].

Dayanım aktivite indeksi = $(A/B) \times 100$

Burada;

A= Puzolanlı harç numunelerin ortalama basınç dayanımı,

B= Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır.

Puzolanlı harç numuneler ile kontrol harç numunelerini oluşturan malzemelerin miktarları ve deneylerin yapılma şekilleri ASTM C 311 (1994) ve TS EN 450 - 1 (2005) standartlarında belirtilmektedir.

Dayanım aktivite indeksinin belirli bir değerden daha az olmaması gerekmektedir. ASTM C 618 (1994)'e göre bu değer en az 75 olmalıdır. TS 25 (1975)'te bu değer en az 70 olması gerektiği belirtilmektedir.

Massazza, F.'ye göre puzolanik aktivite; birtakım maddelerde var olan kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sulu ortamda "reaksiyona girme" ve "sertleşme" kapasitesidir. Gerçek puzolanik aktiviteden söz edebilmek için bu iki ögenin aynı zamanda oluşması gerekmektedir.

Yüksek aktiviteye sahip puzolanların aşağıdaki özelliklere sahip olduğu ampirik olarak belirlenmiştir:

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 şeklindedir. Mekanik deneyler; puzolan - çimento harçları üzerinde yapılan eğilme ve basınç dayanımı deneyleridir. Kimyasal deneyler ise puzolanlı çimentonun su ile yaptığı hidratasyon sonunda çözeltide oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i saptamaya dayanır. Ayrıca puzolanların reaktivitesi spektrofotometrik ve kalorimetrik yöntemlerle de saptanabilir.

Puzolanik maddeleri değerlendirmenin bir başka kriteri, puzolan içeren çimento pastalarındaki özgül yüzeyin artış hızını ölçmekle gerçekleştirilir. Değişik kalsiyum hidroksit - emme hızlarına, benzer özgül yüzey artış hızları karşılık gelir [14].

İyi bir puzolan genel olarak açık renklidir. Konsolide ve homojen bir yapıya sahip ve orta yoğunlukta ($2.00 - 2.30 \text{ g/cm}^3$) dır. TS 25'de puzolan - kireç reaksiyonu sonunda;

Eğilme dayanımı 10 kg/cm^2 ,

Basınç dayanımı 40 kg/cm^2 'den az olmamalıdır.

Kimyasal bileşimi:

Yüksek $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ miktarı		%80 civarında
Yüksek $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ miktarı		%5 civarında
Yüksek çözünmeyen kalıntı		%80 civarında
Kızdırma kaybı	maks.	%8 civarında
Düşük miktarda $\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$		%8'i geçmemeli
Fe_2O_3	maks.	%6

Mineralojik bileşimi;

Camsı faz miktarı yüksek (%8 ve daha fazla) alkali feldspat (ortoklas, sanidin, albit, oligoklas) miktarı yüksek, kil mineralleri (montmorillonit, kaolinit, halosit) düşük miktarda olmalıdır [14].

2.2 Doğal Puzolanlar

Yeryüzünde doğal olarak yer alan ve puzolanik özelliğe sahip olan malzemelerdir. Volkanik kül, tuf, ve diatom olarak adlandırılan mikroskopik büyüklükteki silisli alglerin kalıntılarını içeren diatomlu toprak, doğal puzolan sınıfına girmektedir. Bu malzemelerin dışında, 540°C – 900°C kadar pişirilme işlemine tabi tutulmuş olan bazı killer de doğal puzolanlar arasında yer almaktadır.

Volkanik külün, volkanik küllü toprakların veya pişirilmiş kilin söndürülmüş kireçle ve kumla birleştirilerek suya dayanıklı harç yapımında kullanılması işlemi binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. İnce taneli doğal puzolanik malzemenin beton yapımında katkı maddesi olarak kullanımı ise 1900'lü yıllarda başlamıştır.

2.3 Yapay Puzolanlar

Endüstriyel bir üretim esnasında yan ürün olarak ortaya çıkan ve puzolanik özellik gösteren malzemelerdir. Uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı en çok kullanılan yapay puzolanlardır. Pirinç kabuğu külü de, özellikle Hindistan, Çin, Pakistan gibi bazı Asya ülkelerinde yaygın kullanımı olan bir başka yapay puzolandır [21].

2.3.1 Uçucu kül

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi için yakıt olarak kullanılan pulvarize kömürün yakılması sonucunda yan ürün olarak elde edilmektedir. Kalsiyum oksit, demir oksit, magnezyum oksit, karbon gibi maddelerin dışında çok yüksek miktarda silika ve alümina içeren ve amorf yapıya sahip olan bu kül parçacıklarının boyutları $1\mu\text{m} - 150\mu\text{m}$ arasında değişmektedir. Renkleri koyu gri ile açık gri arasındadır.

Yeterli puzolonik aktiviteyi gösteren uçucu küller her türlü beton yapımında başarıyla kullanılabilir. Uçucu küllerle yapılan betonların hidrasyon ısısı düşük olduğu için, bu tür malzeme özellikle kütle beton yapımında önem taşımaktadır. Genel olarak beton katkı malzemesi olarak kullanılacak olan uçucu külün miktarı, çimento ağırlığının %15 ila %50 si arasında değişmektedir. Uçucu küllerin beton içerisinde etkileri, mikrofiller etkisi ve puzolanik etki olmak üzere ikiye ayrılabilir. Puzolanik etki, mikrofiller etkisinin yanısıra oldukça azdır ve uçucu külün inceliğine göre puzolanik aktivite değişiklik gösterir. Uçucu kül inceliği puzolanik aktiviteyi önemli ölçüde etkiler. Yapılan bir çalışma blaine yüzeyi ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi Çizelge 2.1’de göstermiştir [13]. Blaine özgül yüzeyinin $222\text{ m}^2/\text{kg}$ ’den $604\text{ m}^2/\text{kg}$ ’e çıkarmak 7 günlük basınç dayanımını %79,7 arttırmıştır.

Çizelge 2.1: Puzolanik aktivite deney sonuçları [20]

UÇUCU KÜL	Öğütme Öncesi Blaine $222\text{ m}^2/\text{kg}$	Öğütme Sonrası Blaine $604\text{ m}^2/\text{kg}$
7 günlük basınç dayanımı, (MPa)	7,9	14,2
ASTM C618-85 standardı F türü için min. basınç dayanımı, (MPa)	5,5	5,5

Mineral katkı olarak uçucu külün kullanıldığı betonlarda, beton karışım suyu ihtiyacında azalma ve işlenebilirlikte artma gibi özellikler sağlanırken priz süresinin uzaması gibi çoğu zaman istenmeyen bir etki de gözlenir. Bunun sebebi kullanılan portland çimentosu miktarının azalması ve yerine bir miktar uçucu kül

kullanılmasıdır. Uçucu kül katkılı betonlarda portland çimentosu miktarı azaldığı için hidratasyon ısısında da düşüş gözlenmektedir.

Mineral katkılı betonlarda, yapıdaki katı madde yüzeyi arttığı için terleme önemli ölçüde azalmaktadır. Ayrıca taze betondaki su kaybı azaldığından, hidratasyon için ortamda daha fazla su bulunmaktadır.

Katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılan betonların ilk zamanlardaki dayanımları, normal (katkısız) betonlara kıyasla bir miktar daha düşüktür fakat zaman geçtikçe katkılı betonun dayanımı artmakta ve katkısız betonun dayanımını geçmektedir. Eğer mineral katkısının inceliği arttırılırsa ilk zamandaki dayanımda bir miktar artış gözlenebilir. Bunun iki sebebi vardır. Birincisi, katkının filler etkisinin artması, ikincisi ise katkının puzolanik reaktivitesinin artmasıdır. Ayrıca mineral katkı kullanarak elde edilen betonlar daha dolu olduğundan su geçirimsizliği daha düşüktür.

Uçucu küllü betonlarda portland çimentosu miktarının az olmasından dolayı alkali agrega reaksiyonu da daha az görünmektedir.

2.3.2 Silis dumanı

Silikon metali veya silikon metalli alaşımlar, yüksek saflıktaki kuvarsın yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta indirgenmesiyle elde edilmektedir. Bu işlem esnasında çok büyük kısmı SiO'dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO'nun fırının nispetten soğuk bölgesinde havayla temas ederek çok çabuk yoğunlaşmasıyla, gazın içerisindeki SiO, amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşmektedir. Böylece, tanecikleri 0,1 µm - 0,2 µm olan atık malzeme elde edilmiş olmaktadır. %85 - %98 kadar silika içeren ve amorf yapıya sahip olan bu atık malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” denilmektedir. Bu malzeme, “mikrosilika”, “silika tozu”, veya “silika fume” gibi isimlerle de anılmaktadır.

Çok büyük miktarda silika içeren, amorf yapıya sahip olan, ve çimento tanelerinin inceliğinin yaklaşık %1'i kadar ince taneli olan silis dumanı, aktivitesi çok yüksek olan mükemmel bir puzolandır. Bu malzeme çimento üretiminde de kullanılmakla beraber, daha çok, beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Beton yapımı için kullanılacak çimento miktarı yaklaşık %10 kadar azaltılmakta ve yerine silis dumanı eklenmektedir. Silis dumanının tane boyutları çok küçük olduğundan beton içerisindeki yüzey alanını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu büyük yüzey alanı serbest suyun büyük bir bölümünü bağlamakta, ayrıca beton içindeki boşlukların silis

dumanı tanecikleri ile dolu olmasından dolayı serbest suyun yüzeye ulaşması için izleyeceği yolu uzatmaktadır. Bu iki faktörden dolayı betonun terleme miktarı azalmaktadır. Bu tip katkılı betonlarda yüzeysel buharlaşmayı karşılayacak su, yüzeye geç çıktığından plastik rötreten dolayı oluşacak çatlaklar artmaktadır. Özellikle beton prize başlayıncaya kadar geçen zamanda betonun kürüne çok dikkat etmek gerekir. Silis dumanı tanelerinin beton içerisindeki boşlukları doldurması ve puzolanik aktiviteleri yüksek olması sebebiyle yüksek dayanımlı beton elde edilmesinde kullanılırlar. Ayrıca silis dumanı katkılı betonlarda agrega-hamur arayüzlerinin kuvvetli olması beton dayanımını arttıran bir etkidir. Silis dumanı, uçucu kül veya yüksek fırın cürufu ile birlikte kullanılabilir. Bu sayede silis dumanı diğer mineral katkıların neden olduğu erken yaşlardaki düşük dayanımı yükseltmektedir [22].

2.3.3 Pirinç kabuğu külü

Pirinç, çeltik bitkisinden elde edilen kapçıklı tane ürünün çeltik fabrikalarında işlenerek, pirinç tanelerinin, üzerindeki kabuklardan ve çeltik saplarından ayrılması sonucunda elde edilmektedir. Pirinç tanelerinin üzerinde iki kabuk yer almaktadır. Kepek denen sarımsı renkte ince zar gibi olan birinci kabuk pirinç tanelerinin etrafını sarmaktadır. Besleyici özellikteki bu kabuk bazen pirinç tanelerinin üzerinde bırakılsa da, genellikle hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Kapçık veya kavuz denen ikinci kabuk, pirinç tanelerinin en dışındaki kabuktur. Çeşitli organik ve inorganik bileşenlerden oluşan bu kabuk, yüksek miktarda (%92-93) silika içermektedir. Bir ton pirinç üretiminde yaklaşık olarak 200 kg (%20) kadar pirinç kabuğu ortaya çıkmaktadır. Başta Çin, Hindistan, Bangladeş ve Tayland olmak üzere, dünyadaki yıllık pirinç üretimi 500 milyon ton civarında, pirinç üretimi esnasında elde edilen yıllık pirinç kabuğu miktarı da 100 milyon ton kadardır [21].

Pirinç kabukları birçok ülkede yakıt olarak kullanılmaktadır. Pirinç kabuklarının yakılmasıyla ortaya çıkan kül miktarı, kabuk miktarının ağırlıkça %20'si kadardır. Bir başka deyişle, yılda 500 milyon ton pirinç üretiminde elde edilen 100 milyon ton pirinç kabuğunun yakılması sonucunda, 20 milyon ton civarında kül ortaya çıkmaktadır.

Pirinç kabuğu külünün içerisinde yer alan ağırlıkça %92-93 kadar silikanın yanı sıra çok küçük yüzdelerde alümina, demir oksit, kalsiyum oksit, magnezyum oksit ve

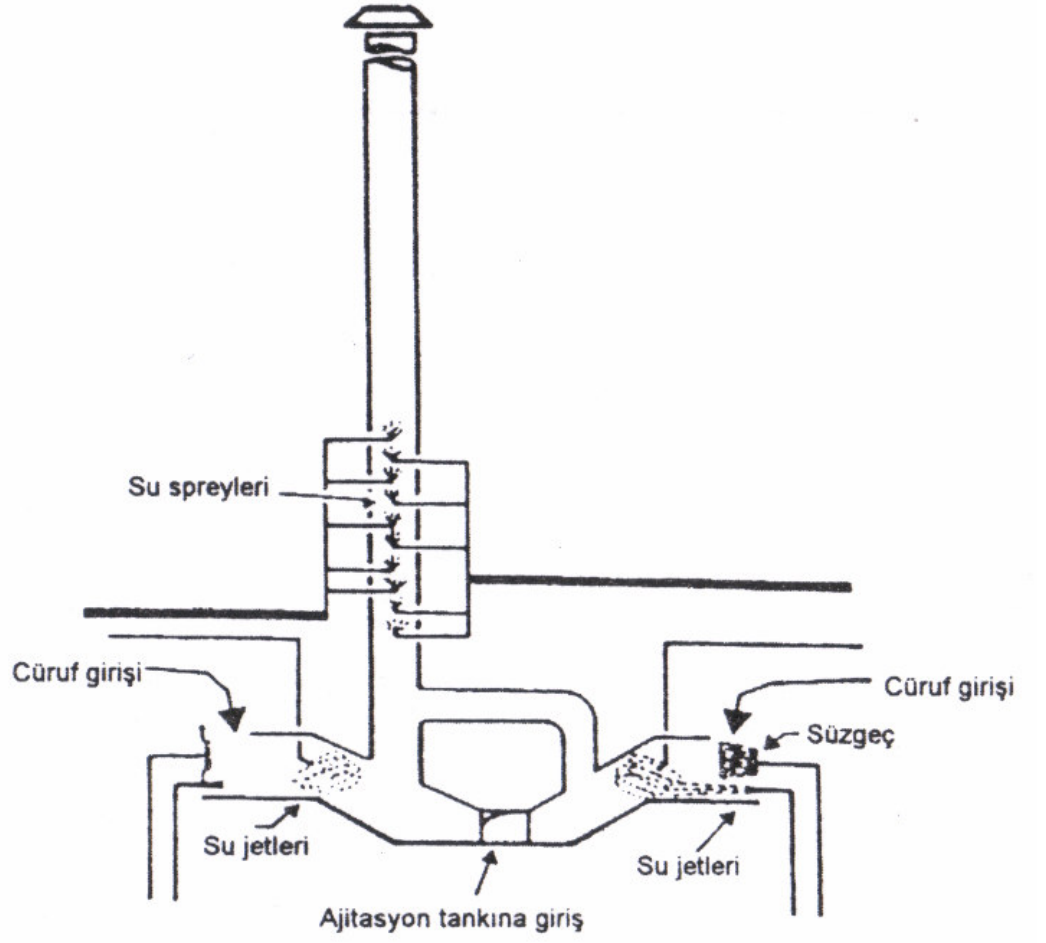
alkaliler de bulunmaktadır. Yakılma işlemi 400°C – 600°C arasındaki sıcaklıklarda kontrollü olarak yapıldığında ve külün soğutulma işlemi hızlı olduğunda, küldeki silika amorf yapıya sahip olmaktadır. Çok yüksek miktarda amorf silika içeren kül, puzolanik özellikli bir malzemedir [21].

2.3.4 Yüksek fırın cürufu

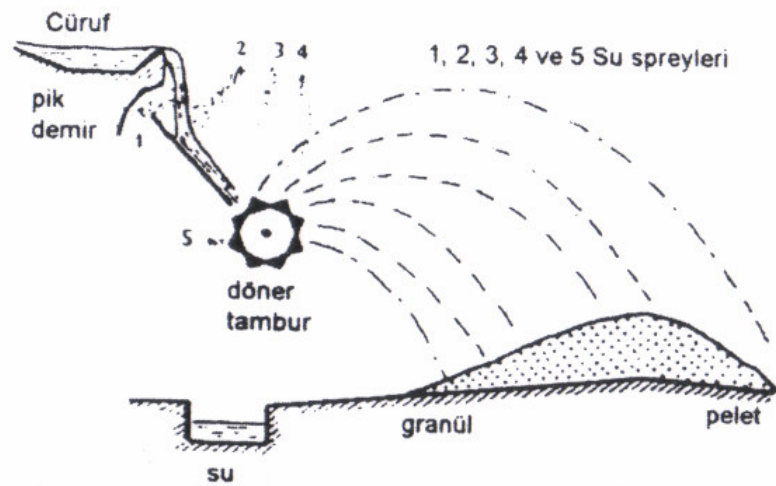
Demir cevheri, doğada demir oksit olarak bulunmaktadır. İçerisinde bir miktar silika, alümina, kükürt gibi yabancı maddeler de yer almaktadır. Demir elde edebilmek için, demir oksitteki oksijenin dışarı çıkartılması ve ayrıca, cevherin içerisindeki yabancı maddelerden arındırılması gerekmektedir. Bu amaçla, yüksek fırın olarak adlandırılan bir fırının içerisine kademeler halinde kok kömürü, kalktaşı ve cevher yerleştirilmekte, kok kömürünün yakılmasıyla da yaklaşık 1600°C sıcaklık uygulanmaktadır. Kok kömürünün karbonu ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbon monoksit ve ya karbon dioksit gazları halinde ortamı terk ettikten sonra, geride, eriyik durumda demir ve yine eriyik durumda yabancı maddeler topluluğu (cüruf) bırakmaktadır. Yan ürün olarak elde edilen cürufun içerisinde büyük miktarlarda silika, alümina ve kalsiyum oksit yer almaktadır. Paletleme yöntemi sonucunda birkaç değişik boyda malzeme üretilir. Büyük boyutlu (4-15 mm) olanlar çok gözenekli ve kısmen kristal bir yapıya sahiptir. Daha çok hafif beton agregası olarak kullanılabilirler. 4 mm'den küçük boyutlu olanlar ise camsı bir yapıya sahiptirler ve çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılırlar. Bu tür cüruflara Hafif cüruf denir [17].

2.3.5 Granüle yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufundan eriyik olarak çıkarılan cüruf, havada yavaş soğuma işlemine tabi tutulduğu takdirde, kristal yapılı olmaktadır. Ancak suya dökülerek veya başka bir işlemle çok hızlı soğumaya tabi tutulacak olursa, iri kum taneleri büyüklüğünde granüle duruma gelmekte ve amorf yapıya sahip olmaktadır.



Şekil 2.1 : Granülasyon yöntemi



Şekil 2.2 : Paletleme yöntemi

Granüle yüksek fırın cürufu amorf yapıda olduğundan ve yeterli miktarda silika ve alümina içerdiğinden, öğütülerek ince taneli duruma getirildiği takdirde puzolanik

özellik gösterebilmektedir. Granüle yüksek fırın cürufunun beton katkı maddesi olarak kullanılmasının, cürufllu çimento üretiminde kullanılmasına kıyasla pek çok avantajı bulunmaktadır.

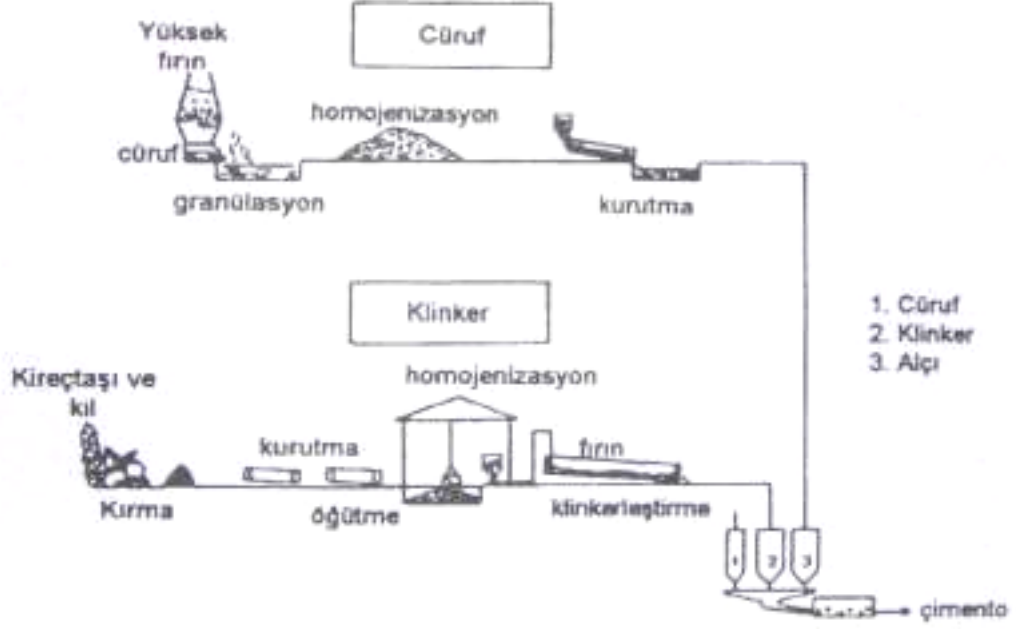
- Granüle yüksek fırın cürufu, portland çimentosu klinkerinden daha sert bir malzemedir. Cürufllu çimento üretebilmek için bu iki malzeme birlikte öğürüldüğünde, çimentonun içerisinde yer alan cüruf tanecikleri klinker kadar ince olamamaktadır. Oysa cüruf ne kadar ince taneli olur ise, puzolanik özelliği o kadar artmaktadır. Ayrı öğütölerek istenilen inceliğe getirilen cürufun beton katkı maddesi olarak kullanılmasından daha büyük verim sağlanmaktadır.
- Normal olarak her tür çimento, depoda kaldığı süre içerisinde havadan bir miktar nem alarak prehidratasyon (önhidratasyon) göstermektedir. Böyle bir durum, çimentonun bağlayıcılık gücünü azaltmaktadır. Öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu, çimento gibi prehidratasyon göstermediği için daha iyi depolanma özelliğine sahiptir.
- Öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton katkı maddesi olarak kullanılması, beton karışımlarına esneklik getirmektedir, yani, cürufllu çimentonun içerisinde çimento üreticisi tarafından katılmış belirli miktarda cüruf bulunurken, öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufunun mineral katkı maddesi olarak kullanılmasıyla, optimum incelikteki ve miktardaki cüruflla istenilen özellikteki beton elde edilebilmektedir.
- Katkı maddesi olarak kullanılan çok ince taneli cüruf, betonun işlenebilmesini artırmaktadır [17].

2.3.5.1 Yüksek fırın cürufunun beton içerisinde kullanılması

ÖGYFC uygulamada 3 farklı şekilde kullanılmaktadır:

- 1 - Kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirilerek, hidrolik bağlayıcı madde olarak doğrudan kullanılabilmekte,
- 2- Portland çimentosu klinkeri ve küçük miktarda alçıtaşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütölerek, "cürufllu çimento" üretiminde kullanılabilmekte,
- 3- Beton katkı maddesi olarak kullanılabilmektedir.

ÖGYFC'nin, portland çimentosu klinkeri ve alçıtaşı ile birleştirilerek birlikte veya ayrı ayrı öğütülmesi sonucunda meydana gelen cürufli çimentoların üretim şeması Şekil 2.3' de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Cürufli çimento üretiminin basit şematik gösterimi

Cürufli çimento üretiminde kullanılan cüruf miktarları ülkelere göre farklılıklar gösterebilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ASTM C 595'de belirtilen Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimentolarında cüruf oranı % 25-65, Almanya'da DIN 1164'de Eisenportland Çimentosunda en fazla %40, Hochofen Çimentosu'nda ise % 41-85'dir. Fransa'da ise farklı 4 tür cürufli çimento mevcut olup, % 25-35, %45-55, % 65-75 ve % 80'in üzerinde cüruf katılabilmektedir. Ülkemizde ise TS EN 197-1'de belirtilen CEM II/A-S tipi çimentoda % 6-20, CEM II/B-S tipi çimentoda %21-35, CEM III/A tipi çimentoda % 36-65, CEM III/B tipi çimentoda % 66-80, CEM III/C tipi çimentoda % 81-95, CEM V/A tipi çimentoda % 18-30 ve CEM V/B tipi çimentoda % 31-50 oranlarında yüksek fırın cürufu kullanılmaktadır.

ÖGYFC'nin ayrı bir şekilde öğütülerek beton katkı maddesi olarak kullanılmasının bazı avantajları bulunmaktadır. Bunları şu şekilde özetleyebiliriz.

- Ayrı öğütme, tanelerin istenilen inceliğe gelebilmesinde büyük randıman sağlanmaktadır. Bunun sebebi ÖGYFC'nin portland çimentosuna göre daha sert

olmasıdır. Birlikte öğütüldüğünde klinker daha ince daneli, çimento ise daha kalın daneli olmaktadır.

-Cürufu çimento depolanma esnasında nem aldığı takdirde veya uzun süre tutulduğu zaman prehidratasyon ve karbonatlaşma göstermekte, bağlayıcılık özelliği azalmaktadır. Cürufun depolanmasında bu tip sorunlar yoktur [16].

-ÖGYFC'nin beton katkı maddesi olarak kullanılması, betonun işlenebilmesini ve dayanımını arttırmakta, büzülmesini azaltmaktadır.

ÖGYFC, değişik koşullarda kullanılacak beton karışımlarının hazırlanmasında esneklik getirmektedir.

2.3.5.2 Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu

Cürufların kimyasal kompozisyonlarıyla hidrolik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmış olmakla birlikte, kesin ve basit kurallar bulunmuş değildir. Granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik özelliği, belirli bir sınır değere kadar, CaO/SiO_2 oranının artmasıyla artar. Ancak bu sınır aşıldığında diğer bir deyişle, CaO miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyon güçleştiğinden hidrolik özellikte azalma görülür. Sabit bir CaO/SiO_2 oranı için Al_2O_3 miktarının artması cürufun aktivitesini artırır. Cüruf içindeki demir ve mangan oksitler dayanım özelliklerini olumsuz etkiler. %10'a kadar MgO bulunmasının dayanıma kötü bir etkisi bulunmaz [17].

Cürufların kimyasal bileşimi demir cevherinin bileşimine bağlı olarak değişir; genel olarak Normal portland çimentosuna oranla daha az CaO ve daha fazla SiO_2 ve Al_2O_3 içerir. Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşiminden itibaren hesaplanan kalite indeksleri aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

Bu indeksler cüruf kalitesinin tahmin edilmesi amacıyla kullanılır. Cüruf kalitesinin ve kullanılabilirliğinin veya uygunluğunun en güvenilir ölçüsü birlikte kullanılacağı aktif bağlayıcı veya uyarıcı madde ile yapılmış deney sonuçlarıdır [9, 19].

Farklı ülkeler için Yüksek Fırın Cürufu kompozisyonları Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Yüksek fırın cürufalarının kompozisyonları (%) [16]

	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye
CaO	29-50	30-40	39-44	34-41
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	34-36
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19
Fe ₂ O ₃	0,1-1,5	-	0-0,7	0,3-2,5
MgO	0-19	8-21	1-3	3,5-7
MnO	0,2-1,5	-	0,3-1,5	1-2,5
S	0-2	1-1,6	0,6-0,8	1-2

ASTM C 989 standardı beton kullanılabilecek öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu sınıf 80, sınıf 100 ve sınıf 120 olarak 3 gruba ayırmaktadır. Aşağıdaki çizelgelerde ASTM standartlarına göre granüle yüksek fırın cürufunun taşınması gereken kimyasal ve fiziksel özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 2.3 : ASTM standartlarına göre katkı maddesi olarak kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri [16]

Kükürt (S) maks. %	2,5
SO ₃ olarak belirtilen sülfat iyonu maks. %	4,5

Çizelge 2.4 : ASTM standartlarına göre katkı maddesi olarak kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri [16]
(Cüruf aktivite indeksi olarak belirtilen değerler 5 numunenin ortalamasıdır)

İncelik (45 µ göz açıklıklı elek üzerinde kalan miktar) maks. %	20
Cüruf Aktivite indeksi min. %	
7 Günlük	
Sınıf 80	-
Sınıf 100	78
Sınıf 120	95
28 Günlük	
Sınıf 80	75
Sınıf 100	95
Sınıf 120	110

2.3.5.3 Yüksek fırın cürufunun aktivitesi

İnce öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu su ile karıştırıldığında genel olarak bağlayıcı özellik göstermez. Ancak aktivatör (uyarıcı) adı verilen katkıları kullanıldığında gizli bağlayıcı özelliği ortaya çıkar. Cürufların aktifleştirilmesinde kullanılan başlıca yöntemler şunlardır:

- Sülfatla aktifleştirme (alçı katılarak yapılmaktadır.)
- Sodyum hidroksit (NaOH) ile aktifleştirme
- Kireçle aktifleştirme

Na(OH) çözeltisi ile yapılan aktivite deneylerinde oldukça kısa sürede sonuç alınabilmektedir [18].

Genel olarak kabul edilen bir anlayışa göre düşük hidrolik modül değerleri düşük hidrolik reaktiviteyi göstermektedir. Ancak, her zaman, hidrolik modüllerin yüksek olması dayanımlarında yüksek olmasını sağlamamaktadır.

Granüle yüksek fırın cüruflarının hidrolik modülleri konusunda çok sayıda araştırma yapılmış ve yapılmaktadır. Bu çalışmalarda daha karmaşık başka modüllerde önerilmiştir. Bu önerilerde, toplam kimyasal analiz sonuçlarının ve kristal faz miktarının cürufun hidrolik özelliklerinin tesbiti açısından birlikte değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, optimal reaktivite için cürufun tamamıyla camı yapıya sahip olması zorunluluğunun bulunmadığı saptanmıştır [17].

E.Douglas, A.Bilodeaw, ve V.M. Malhotna 'nın yaptığı çalışma, Sodyum Silikatla aktivite edilmiş yüksek fırın cürufu betonların karışım oranlarını formülize etmek ve bu betonların dayanım ve diğer özelliklerini belirlemek için yapılmıştır. Altı adet karışım silikat modülü $M_s = 1,47$ olan eriyikle, bir adet karışım $M_s = 1,22$ olan silikat modülüyle yapılmıştır. Basınç dayanımları, elastisite modülleri, rötreleri ve klor-penetrasyon değerleri hesaplanmıştır. Boy ve kütle değişimleri, ses frekansları, titreşim hızlarında yapılan ölçümler, betonların tekrarlı donma ve çözünme olayına dayanıklılıklarını değerlendirmek için yapılmıştır. Sülfat dayanıklılığı da aynı yöntemle ölçülmüştür [6].

Çalışmaya göre hava içeriği, karışımdaki hava sürüklenme hacmi, çökme, erken yaştaki basınç dayanımı, Sodyum-Silikat oranından etkilenmiştir. Cürufu betonların 7 ve diğer miktarlarda gün beklemiş basınç ve eğilme mukavemetleri aynı

su/çimento oranında ve işlenebilmeli portland çimentolu kontrol betonuna göre aynı veya daha yüksek çıkmıştır. Düşük Sodyum-Silikat ve cüruf oranları tekrarlı donma-çözünme olayına dayanıklılığı olumsuz etkilemiştir ama Klor İyon penetrasyonuna dayanıklılığı arttırmıştır [6].

D.G. Mantel'in yapmış olduğu araştırmada yüksek fırın cürufunun hidrolik aktivitesini belirlemek için literatürdeki çok sayıda ve çeşitli düzenlenmiş kimyasal formüllerin doğruluğu incelendi. Sekiz adet Güney Afrika Klinkeri sabit laboratuvar koşulları altında öğütülerek sıradan portland çimentosu cürufuna (OPCS) dönüştürüldü. Aynı değirmende iki adet Güney Afrika, bir adet İngiliz, bir adet Amerikan ve bir adet Hollanda cürufu aynı sabit yüzey alanında öğütüldü. Öğütülmüş cüruflar ve OPCS eşit oranlarda karıştırıldı. Daha sonra bu karışımların dayanım değerleri OPCS'nin dayanım değerleriyle karşılaştırıldı. buradanda literatürde öngörülen formüllerin cürufun hidrolik aktivitesini layığıyla belirlemediği görülmüştür. OPCS-yüksek fırın cürufu karışımlarının dayanım değerleri cürufun inceliğine ve çimentonun hidrolik özelliklerine bağlıdır [4].

2.3.5.4 Yüksek fırın cürufunun hidratasyonu

Yüksek fırın cüruflarının kendi başlarına suyla reaksiyonu, Portland çimentolarının hidratasyonu ile karşılaştırıldığında oldukça yavaş gelişir. Cürufun hidratasyonu cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate aluminatlar ve hidrate siliko aluminatların çökmesi olarak tanımlanabilir. Cüruf hidratasyonunun başlangıç aşamasında silikat iyonları eriyiğe geçer, daha sonra, ilk C-S-H çökmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve son olarak da alumina konsantrasyonunda, hidrate aluminat kristallerinin oluşumuna kadar artış görülür. Yüksek fırın cürufu hamurlarındaki hidrate fazların belirlenmesine yönelik bir araştırmada $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ dörtlü sisteminde C-S-H, C_2ASH ve C_4AH 13-19 bileşenlerinin oluşturduğu saptanmıştır [17].

2.3.5.5 Yüksek fırın cürufunun dayanıklılık özellikleri

Sülfatlı sular, deniz suları, klorlu sular, karbonatlı sular, termal sular, buz çözücü maddeler vb ile yapılan uzun süreli deneyler sonucunda cürufu çimentoların zararlı kimyasal etkiler altında performanslarının yüksek olduğu belirlenmiştir.

- Sulfat etkisine dayanıklılık

Regourd tarafından yapılmış olan bir çalışmada sentetik olarak hazırlanmış , %50 C3S + %15 C3A + %5 alçı + %30 kuartz içeren numuneler %5 MgSO₄ eriyiğine batırılmıştır. İlk günden başlayarak numunelerde genleşme gözlenmiş ve 7. günde tüm numuneler dağılmıştır. Daha sonra, bu numuneler X ışınları difraksiyonu ve tarayıcı elektron mikroskop kullanılarak incelendiğinde, Mg(OH)₂, CaSO₄ .2H₂O , etringit ve C-M-S-H oluştuğu saptanmıştır. Aynı araştırmada, ikinci seri numuneler kuartz yerine Granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak hazırlanmış ve aynı koşullara tabi tutulmuştur. Sonuçta, GYFC içeren numunelerde hiç bir bozulma görülmemiştir. Benzer sonuçlar %60 cüruf içeren çimentolarla yapılan beton numuneleri üzerinde de elde edilmiştir. Aynı araştırmadan çıkan bir başka sonuç ise kullanılan cürufun inceliğinin artmasıyla, betonun porozitesini azalttığından dolayı, kimyasal etkilere karşı direncin yükselmesidir.

MgSO₄, CaSO₄ ve Na₂SO₄ eriyiklerinin kullanıldığı benzeri bir başka araştırmada da 130 değişik çimento kullanılmış ve yüksek fırın cüruflarının, miktarlarıyla orantılı olarak, sulfat direncini arttırdığı saptanmıştır [17].

P.S. Mangat ve J.M Khatib'in yaptığı araştırma, değişik dozajlarda yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu içeren betonların sulfat dayanımını inceler. Toplam bağlayıcı içeriği 350 ve 450 kg/m³, ve su/çimento oranı 0,45'tir. Numunelerin birim hacimdeki poroziteleri ve gözenek yapısı civa sızma porozimetresi ve karbonatlaşma miktarı hesaplanarak ölçülmüştür.

Örnekler, öncelikle 14 gün boyunca 20 ila 45°C arasında değişen sıcaklıklarda, nem oranı (yaklaşık olarak % 25,55) kür edilmiştir. Daha sonra kürlenene bu örnekler sulfat eriyiğine batırılmıştır. Sonuçlara göre %22 ila %32 arasında değişen uçucu kül katkısıyla üretilmiş betonlar en fazla sulfat dayanıklılığını göstermiştir. Bu arada sulfat direnci kuru hava kürü yapılmış numunelerde, ıslak nemli hava kürü yapılmış numunelerle karşılaştırıldığında kuru havada kür yapılmış numunelerin sulfat dayanıklılığı daha iyi çıktığı görülmüştür. %5 ila %15 arasında silis dumanı içeren numunelerdeki sulfat direncinde de çok büyük gelişmeler olduğu görülmüş, bununla beraber istenmeyen gözenek hacmi ve çapı 0,1 µm'den büyük gözeneklerin miktarı silis dumanının kullanılmasıyla artmıştır. %80 yüksek fırın cürufu katkılı betonda da sulfat dayanımının arttığı gözlenmiştir. Ama %40 yüksek fırın cürufu katkılı betonda da bunun ters etkisi gözlemlenmiştir. %40 yüksek fırın cürufu katkılı 45°C'de %25 nem oranında ıslak hava kürü yapılmış betonda daha az gözenek yüzdesi ve daha

ince gözenek yapısı gözlemlenmiş olup kontrol betonuyla karşılaştırıldığında daha az sülfat direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir [10].

- Klor etkisine dayanıklılık

Cürufllu çimentoların klor etkisi konusunda değişik yöntemler uygulanmıştır. Bunlardan bir tanesi özetlenmiştir:

Hızlandırılmış Klor Permeabilite deneyi uygulanarak yapılan bir araştırmada değişik inceliklerde ve değişik cüruf miktarları içeren çimentolar kullanılarak 102 mm çap ve 51 mm boyda silindir harç numuneleri hazırlanmış ve 14 günlük standard bakımdan sonra numunelerin bir yüzü sodyum klorür diğer yüzü Sodyum Hidroksit eriyiklerine batırılarak 60 V sabit potansiyel farkı uygulanmış ve bir yüzden öbürüne geçen elektiriksel akım ölçülerek klor permeabilitesiyle ilişkilendirilmiştir. Bu araştırmada kullanılan kontrol çimentosu (portland çimentosu) 0,865 m²/g (BET) kaba cürufllu çimentolar 0,866 m²/g (BET) , orta cürufllu çimentolar 1,083 cm²/g (BET) ve ince cürufllu çimentolar 1,337 cm²/g (BET) inceliktedir. İnce cürufllu çimentolarda ağırlıkça %70 ve %85, orta cürufllu çimentoda %50 ve kaba cürufllu çimentolarda %50 , %70 ve %85 cüruf kullanılmıştır. Benzer bir araştırmada %8 silis dumanı, %25 uçucu kül, % 50 GYFC içeren numuneler üzerinde yapılmış ve cürufun diğer mineral katkılara göre daha etkin olduğu saptanmıştır [17].

- Deniz suyu etkisine dayanıklılık

Cürufllu çimentoların deniz suyu etkisine maruz betonlardaki yüksek performansı yıllardır bilinmektedir. Deniz suyuna tamamıyla batırılmış 40*40*160 mm harç numunelerle yapılan deneylerde kullanılan cüruf miktarının etkisi araştırılmış ve çimento içindeki GYFC miktarının artmasıyla genleşmenin azaldığı saptanmıştır.

- Karbonatlaşmaya dayanıklılık

Betonda karbonatlaşma açısından, beton yeterince yoğun ve ortamda yeterli rutubet var olduğu sürece, portland çimentosuyla cürufllu çimento arasında bir fark yoktur. Longuet tarafından yapılan bir araştırmada %80'in üstünde cüruf içeren çimentoların, karbonatlaşmanın neden olduğu depasivasyon sonucunda betonarme donatıların paslanmasını portland çimentoları kadar etkin bir şekilde önlediği saptanmıştır. Öte yandan, bir başka araştırmada daha kısa sürelerle bakımı yapılan (1,3 ve 7 gün) harç numunelerde yukarıda belirtilenin tam tersi sonuçlar alınmıştır. Sözü edilen bu araştırmada, karbonatlaşma direncinin arttırılabilmesi için bakım süresinin uzatılması gerektiği belirtilmiştir.

- Alkali agrega reaksiyonu

Amorf yapıdaki silisli agregaların çimentonun içerdiği alkali oksitlerle yaptığı reaksiyon sonucunda oluşan ve alkali-silika jeli adı verilen ürünün rutubet alarak aşırı genleşme göstermesi betonda çatlamlar ve bozulmalara neden olur. Cürufllu çimentolar kullanılarak yapılan çok sayıda araştırma cüruf miktarının artmasıyla alkali-agrega reaksiyonunun neden olduğu genleşmelerin azaldığını göstermiştir [17].

Young-Jin Kwan tarafından yapılan bir araştırmada yüksek basınç dayanımlı betonlarda alkali-agrega reaksiyonu ve yüksek fırın cürufunun etkinliği incelenmiştir. Bu çalışmaların neticesinde şu sonuçlar çıkarılabilir:

Yüksek dayanımlı betonda, yüksek alkali içeriğinden dolayı alkali-agrega reaksiyonu olma olasılığı sıradan betona göre daha yüksektir. Yüksek genleşmeyi önleyebilmek için reaktif olmayan agrega kullanılabilir. Çimento dozajına göre %30 yüksek fırın cürufu ilave etmek ve düşük alkali oranlı çimento kullanmak, yüksek dayanımlı betonlarda yüksek genleşmeyi önleyebilir [23].

- Donma-çözülme direnci

Yüksek fırın cürufllu çimentoların betonların donma-çözülme direncine etkileri, dayanım ve betonun hava miktarı sabit tutulduğu sürece, portland çimentolarınıninkinden farklı değildir. Ancak, cüruf miktarı çok yüksek olduğu takdirde, az bir miktar düşüş görülebilir.

Öte yandan, yüksek fırın cürufu kullanımının beton içindeki gözenek boyutlarında, gerek fiziksel gerekse hidratasyon sonucunda, azalmaya neden olması betonun donma çözülme direncini yükselttiği görüşünde öne sürülmektedir. Yapılan tüm araştırmalarda hemfikir olunan sonuç cürufllu çimentoların, betonda sabit bir hava miktarı sağlamak için, portland çimentolarına göre daha fazla hava sürükleyici katkıya ihtiyaç gösterdikleri hususudur [17].

2.3.5.6 Yüksek fırın cürufunun taze beton özelliklerine etkisi

Aşağıda cürufllu çimentolar kullanılarak üretilmiş betonların taze haldeki özellikleri genel hatlarıyla özetlenmiştir.

- İşlenebilme

Yüksek fırın cürufunun, klinkere göre, daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının daha düşük olması, dolayısıyla hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesi cürufllu çimentoların betonun işlenebilirliğini olumlu yönde

etkileyeceğinin göstergeleridir. Ancak, bu iyileşme çökme deneyi sonuçlarında tam olarak gözlenmez [17].

- Priz süresi ile zaman içinde işlenebilme kaybı

Cürufllu çimentoların priz sürelerinin portland çimentolarına göre daha uzun olduğu ve dolayısıyla zamanla işlenebilme kaybının daha az olduğu yönündeki genel kanıya karşın düşük sıcaklıklarda priz sürelerinin çok uzadığı, normal sıcaklıklarda ise portland çimentolarıyla bir fark olmadığı saptanmıştır. Aynı şekilde, çökme kaybı konusunda cürufllu çimentolarla portland çimentosu arasında önemli fark bulunmamaktadır [17].

- Terleme

Yapılan deneysel çalışmalarda cürufllu çimento kullanılarak üretilmiş betonların hem terleme hızlarının hem de terleme miktarlarının daha fazla olduğu saptanmıştır [17].

- Hidratasyon Isısı

Cürufllu çimento kullanımı hidratasyon ısını azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır.

2.3.5.7 Yüksek fırın cürufunun sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

Aşağıda cürufllu çimentolar kullanılarak üretilmiş betonların sertleşmiş haldeki özellikleri genel hatlarıyla özetlenmiştir.

- Dayanımlar

Eşit çimento miktarı ve eşit su-çimento oranları söz konusu olduğunda cürufllu çimentolar normal portland çimentolarına göre, erken yaşlarda nisbeten düşük, geç yaşlarda ise yüksek beton dayanım değerlerine neden olurlar. Buradan anlaşılabileceği gibi, eşdeğer 28 günlük beton dayanımları söz konusu olduğunda beton karışımlarında cürufllu çimento miktarı normal portland çimentosu miktarına göre biraz daha fazla olmalıdır. Bu durumda, geç yaşlardaki dayanımlar cürufllu çimento ile yapılmış betonlarda çok daha yüksek olmaktadır [17].

- Elastisite Modülü

Dayanımlar için belirtilmiş olan durum Elastisite Modülü için de geçerlidir. Eşit 28 günlük dayanımlar için, cürufllu çimento kullanılarak yapılmış olan betonların Elastisite Modülleri az bir miktar daha yüksek olmaktadır [17].

- Rötire

Cüruflu çimentolarla üretilmiş betonların rötireleri konusunda yapılan araştırmaların sonuçları birbirlerinden, deney koşulları ve kullanılan malzemelerin değişik olması nedeniyle, farklılıklar göstermekle birlikte bu farklar çok önemli ölçüde değildir. Genel olarak ifade etmek gerekirse, cüruflu çimento kullanımının rötreyi portland çimentosu kullanıldığı durumlardan daha değişik etkilemediği söylenebilir [17].

- Sünme

Betonun sünme davranışıyla ilgili en önemli parametre uygulanan gerilme-dayanım oranıdır. Bu oran sabit olduğu sürece, çimentoların sünme davranışları arasında önemli bir farklılık söz konusu değildir [17].

- Isıl genleşme ve ısı iletkenlik

Betonun bu özellikleri büyük ölçüde kullanılan agrega tipi ve özelliklerine bağlı olduğundan çimento tipinin önemli bir etkisi söz konusu değildir [17].

2.3.6 k Etkinlik faktörü ve örnek çalışmalar

İlk defa Smith tarafından kullanılan k etkinlik faktörü ile ilgili bugüne kadar birçok çalışma yapılmış, değişik yöntemler denenmiş fakat bu konuda tam bir fikir birliğine varılamamıştır.

V.G.Papadakis ve S.Tsimas'ın yapmış oldukları çalışmaya göre Silisyum ve Alüminyumlu malzeme olarak birçok katı sanayi ürünü (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cüruflu) ve bazı doğal puzolanik malzemeler (Volkanik Tüfler, Opalin Silika gibi) çimento katkı malzemeleri (SCM) olarak bağlayıcı ve puzolanik özelliklerine göre çeşitlendirilebilir. Bu malzemeler çok geniş bir fiziksel ve kimyasal çeşitlilikte olup, betonda kullanımları için genel bir dizayn düzenlenmiştir. Bu çalışmada etkinlik katsayısının konsepti, portland çimentosuyla karşılaştırılınca çimento katkı malzemelerinin performansının göreceli olarak ölçüsüdür. Çeşitli kompozisyonlardaki suni malzemeler ve bazı doğal puzolanlar üzerine çalışıldı. Basınç dayanımı ve hızlandırılmış klor penetrasyon testleri uygulandı. Bu testlerin neticesinde bu malzemeler için etkinlik katsayıları hesaplandı.

Yapılan çalışmaların neticesinde çimento katkı malzemeleri agrega yerine konulunca basınç dayanımları kontrol betonundan yüksek çıktı. Çimento katkı malzemeleri çimento yerine kısmi yerleştirilince de başlangıçta (erken zamanda) basınç dayanımı daha düşük çıktı ama zaman ilerledikçe karışımındaki daha yüksek aktif silika

içeriğiyle çimentoyla beraber kontrol betonunun basınç dayanımını aştı. Öğütülmüş uçucu külün etkinlik katsayısı yaklaşık 1 gibi çıktı. Diğer doğal çimento katkı malzemelerinin ise daha düşük etkinlik katsayıları çıktı.($k=0,2-0,3$) [20].

Çimento katkı maddelerinin faydası, beton kompozitlerdeki birçok ilerleme ve tamamen ekonomi nedeniyle iyi kabul edilmiştir. K.Ganesh Babu ve V. Sree Rama Kumar'ın yapmış olduğu çalışmayı içeren makale çeşitli dozajlarda yüksek fırın cürufunun beton içerisinde kullanılarak 28 günlük etkinliklerini belirlemek için yazılmıştır. Toplam dayanım etkinliği genel etkinlik faktörünün bir kombinasyonudur. Bu da yaşa ve daha önce de söylendiği gibi silis dumanı ve uçucu kül gibi diğer katkı maddelerinde de geçerli olan katkı oranına dayanan yüzde oranı etkinlik faktörüdür. Bu değerlendirme, GYFC betonlarını her hangi bir verilmiş katkı yüzdesinde istenen dayanımda dizayn etmeyi mümkün kılar [8].

Yüksek fırın cürufu çimentolar, uzun bir periyottan beri kullanımdadır. Bunun nedenleri tamamen üretim aşamasındaki ekonomi ve bunun da ötesinde geliştirilmiş performans özellikleridir. Aynı zamanda puzolanların çimentoya ve daha çok betona katkısı pratikte iyi kabul edilmiştir. GYFC, çimentoda veya beton karışımlarda çimento katkısı olarak kullanılabilecek puzolanik malzemelerden birisidir. Şu ana kadar olan çalışmalar, bu tür çimento katkı maddelerinin, betonun mukavemet, işlenebilirlik, geçirimsizlik, dayanıklılık ve korozyona dayanıklılık gibi performans özelliklerinin birçoğunu geliştirmiştir. GYFC 'nin çimento karışımlarındaki etkinliğini tayin etmek için kimyasal birleşim, hidrolik reaksiyon ve incelik gibi bazı parametreler daha önceden dikkatle belirlenmiştir. Burdan da görüldü ki bunların arasında reaktif cam içeriği ve yalnız başına GYFC'nin inceliği çimentodaki puzolanik etkinliği ya da beton karışımlardaki reaksiyonu önemli derecede etkiler. Bazı eski araştırmacılar yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimini düşünerek bu yüksek fırın cürufunun reaksiyonunu cüruf aktivite indeksi ya da hidrolik indeks olarak tanımlamaya çalıştı.

ASTM C989, cüruf aktivite indeksini belirli bir yaştaki cürufu çimento harç küplerinin ortalama basınç dayanımını referans çimento harç küplerinin ortalama basınç dayanımına yüzde oranı olarak tanımlar. Bu cüruf 80,100 ve 120 derece olarak basınç dayanımına bağlı olarak 3 derecede gruplandırılmıştır. Hooton ve Emery'nin gözlemlerine göre GYFC'nin özellikleri (cam içeriği, kimyasal bileşimi,

minerolojik bileşimi, öğütme inceliği ve aktivasyon tipi) reaktiviteyi etkiler. Her nasılsa Mantel, literatürdeki GYFC için olan hidrolik formülün cürufun dayanım performansını yeterince tahmin etmediği sonucunu ortaya koydu. O çimentonun veya cürufun kimyasal bileşimiyle aynı çimento ve cürufun karışımının hidrolik aktivitesi arasında bir bağlantı olmadığını idda etti. O aynı zamanda ASTM'ye göre test edilmiş cüruf aktivitesinin cürufun ve kullanılan çimentonun parça boyutu dağılımına (incelik) bağlı olduğunu ve bunun 28 günde %62'den %115'e kadar sınıflandığını gösterdi. O yüksek alkali içeren çimentonun, cürufun hidrolik özelliğini etkilemediğini gözlemledi. Buna karşın Hoogen ve Rose yüksek alkali çimento karışımlarının, düşük alkali çimento karışımlarına göre daha büyük cüruf aktivite indeksi değeri verdiğini söylediler. Şu da söylenmelidir ki, yukardaki cüruf aktivite indeksiyle ilgili bütün testler sadece harç küplerine uygulandı. Aynı zamanda harcın davranışı betondakine göre değişiktir ve aynı zamanda GYFC'nin harcın içinde reaksiyonunu direkt olarak betonun içindeki performansı ile bağdaştırılmamalıdır. Cürufun reaksiyonuna bağlı beton karışım oranı birçok araştırmacı tarafından araştırılmadı. Yukardaki tartışma GYFC'nin betondaki reaksiyonuna bağlı karışım oranlama ihtimalinin araştırılması gerektiğini gösterir [8].

Bu makale, su-çimento oranına bağlı dayanım çeşitliliğine göre bir etkinlik faktörü kurmak için 28 günlük GYFC'li betonlarla normal betonları karşılaştırarak GYFC'nin beton içinde değişik dozajlardaki etkinliğini tayin eder. Prensipde bu su-çimento oranının ($w/(c+g)$) kontrol betonunun su- çimento oranına (w/co) herhangi bir dayanımdaki GYFC'nin etkinlik katsayısını ekleyerek yaklaştıran A_w faktörü kullanılarak yapıldı. Her nasılsa etkinlik katsayısıyla (genel etkinlik faktörü) su/çimento oranını dayanım ilişkilerine getirmek amacıyla yapılan ilk denemelerde bütün katkı yüzdelerinde iyi korelasyon sağlanmadı. Bu aşamada farklılık yüzde etkinlik faktörü (k_p) ile doğrulandı. Toplam etkinlik faktörü k , genel etkinlik faktörü k_e ve yüzde etkinlik faktörü k_p 'nin toplamıdır. Bu methodda dayanım ilişkileri açısından normal betonun su-çimento oranı GYFC betonları için geçerli olacaktır.

$$(w/co) = [w/(c+kg)] = [w/(c+k_e g + k_p g)] \quad (2.1)$$

$$k = k_e + k_p \quad (2.2)$$

Etkinlik faktörünün bu eşitliği için, daha önceden yapılan araştırmaların sonuçlarından elde edilen data (bilgi) Çizelge 2.5'de özetlenmiştir. Şuna değinilmelidir ki bu çizelgelerdeki araştırmaların sonuçları, şimdiki üretilen çimento ve cüruflar içinde geçerlilik sağlar. Şu kesindir ki bunlar, GYFC'nin beton içerisindeki davranışını etkileyen başlıca parametreleri içeren oldukça geçerli bir grup oluşturur. Değerlendirme sırasında, görülmüştür ki karışımlardan bazıları, hava boşluğu, değişik kütleme şartları, çok ince cüruf gibi sebeplerden ki bu sebepler değerlendirmeye katılmamıştır, normal betonların formunu tutmamıştır [8].

Çizelge 2.5 : Betonların hesap değerleri

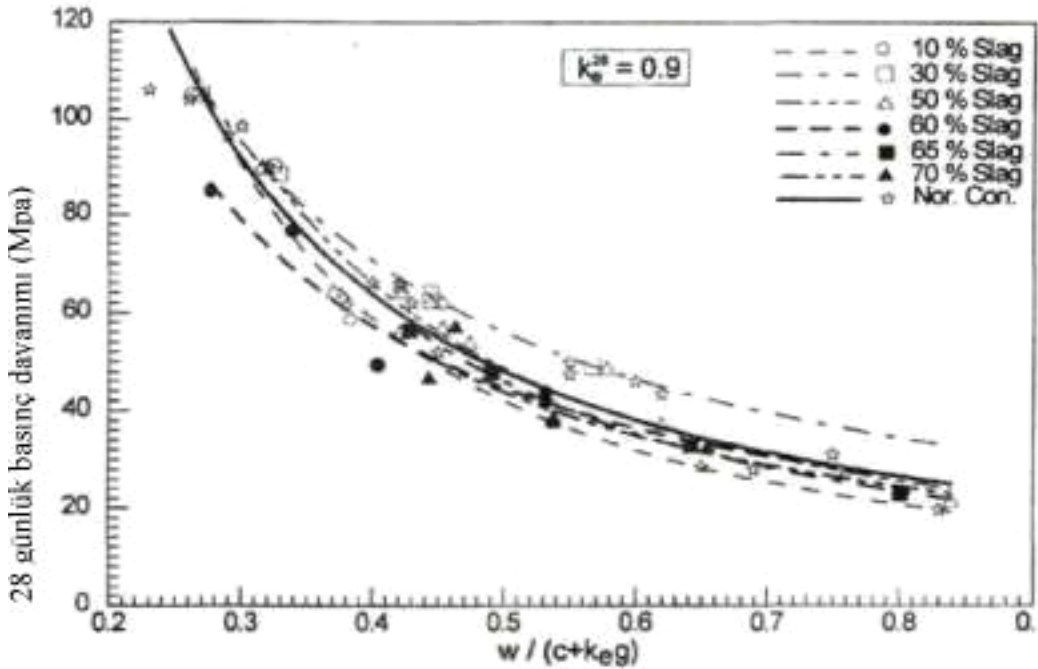
Cüruf Kodu	Katkı Yüzdesi	w/(c+g) değer aralığı	Çökme miktarı (mm)	28 günlük basınç dayanımı	28 günlük ortalama etkinlik değerleri
1	0	0.23-0.83	40-170	19.7-106	-
2	10	0.26-0.38	150	58.5-105	1.29
3	30	0.26-0.55	100-150	49.1-105	1.02
4	50	0.30-0.80	35-90	21.2-89.3	0.84
5	60	0.26-0.50	150	43.5-80	0.78
6	65	0.46-0.75	100	23.0-57.5	0.75
7	70	0.41-0.61	45-65	32.5-62.5	0.73
8	80	0.5	-	29.5-32.5	0.70

Sonunda 175 karışım dışında sadece normal kütleme koşullarında üretilmiş ASTM tip1 standardında Portland çimentosu içeren ($283-391 \text{ m}^2/\text{kg}$ inceliğinde) üretilmiş 70 beton değerlendirmeye alınmıştır. Bu betonlar içindeki Granüle yüksek fırın cürufu ASTM C 989' a göre nitelendirilmiş betondaki mineral katkısını minimum özelliklerde garanti eder. ($350-465 \text{ m}^2/\text{kg}$ arası incelik , %31,1 ile %38,59 arasında SiO_2 ve %32,8 ile %43,9 arasında CaO) Katkı yüzdeleri % 10'dan 80'e kadar değişir. İnce agrega olarak doğal nehir kumu kullanılmıştır. Ve kaba agrega olarakta maksimum ölçüler 10 ila 20 mm arasında değişmektedir. Kesin olan bi durum vardır o da %80 gibi katkı oranlarında çok incelik oranları sebebiyle bu betonlarda işlenebilirliği düzeltmek için süper plastikleştiriciler kullanılır. Bu durum yüzünden değerlendirmede bu betonlarda maksimum %2 oranında süperplastikleştirici değerlendirmeye alınır.

Aynı zamanda farklı araştırmacılar, farklı boy ve şekillerde numuneler kullandılar ve onlar 15 cm'lik küpler içinde kabul edilir sonuçlar bulmuşlardır. Bir çok durumda

değişim silindir dayanımından küp dayanımına dönüşümdü ve 55-70 MPa dayanımındaki betonlar için 0,9 katsayısı kullanılarak bu değişim düzeltildi. Su-Çimento oranının farklı cüruf katkı yüzdeleriyle yapılmış betonların 28 günlük basınç mukavemetine oranını gösteren grafik Şekil 2.4 ' de gösterilmiştir [8].

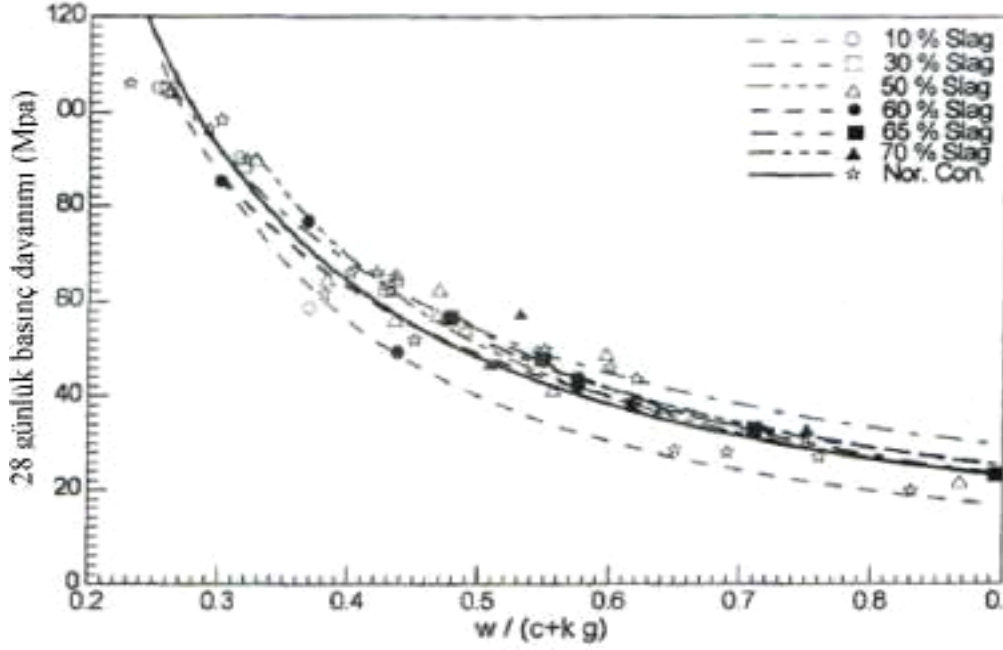
Grafiktende görüldüğü üzere %30 oranına kadar granüle yüksek fırın cürufu içeren betonların 28 günlük basınç dayanımları eğrileri normal betonun basınç dayanımı eğrisinden daha yukarıdadır, diğer bütün yüzdelerde normal betonunkinden daha aşağıdadır. Ayrıca değişik yüzdelerde kullanılan cüruftan kaynaklanan dayanım değişim miktarının uçucu kütle karşılaştırıldığında daha az olduğu gözlenmiştir. Bütün katkı yüzdelerindeki dayanım değerlerini normal betonun dayanım değerlerine yaklaştırmak için “Genel Etkinlik Faktörü (ke)” dediğimiz bir etkinlik faktörü formüle yerleştirir, su-çimento oranı $[w/(c+g)]$ ke faktörü eklenerek $[w/(c+keg)]$ olarak değiştirilir. Bir çok denemeden sonra ke değerlerinin 0,85 ile 1 arasında değiştiği görülmüş ve bu betonların 28 günlük dayanımları için en uygun ke değerinin 0,9 olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 2.4 : 28 günlük basınç dayanımı dağılımı - $w / (c+keg)$ grafiği

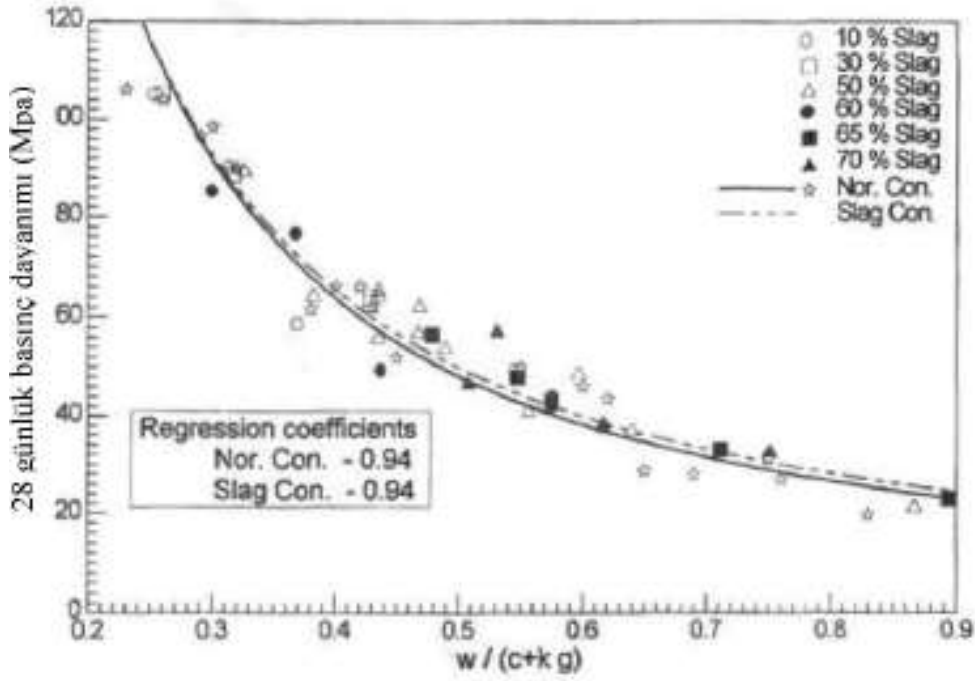
Daha önce de söylenildiği gibi bütün katkı yüzdelerinde bu " ke " katsayısının tek başına $[w / (c+keg)]$ dayanım değerlerini normal betonun su-çimento oranına $[w/co]$ ve dayanım değerlerine yaklaştırmadığı gözlenmiştir. Bu aşamada yüksek fırın

cüruflu betonun dayanım değeri normal betonun dayanım değeriine yaklaştıracak etkinliktteki Yüzde Katkı etkisi, aradaki farkı kapatacak olan " Yüzde etkinlik faktörü (kp)" değeriinin hesaba katılmasıyla formül tamamlanır. Bu değeriin %10 ila %80 katkı yüzdeleri arasında 1,29 ve 0,70 arasında değışen değeriiler aldığı gözlenmiştir. [8]



Şekil 2.5 : 28 günlük basınç dayanımı dağılımı - $w / (c+kg)$ grafiği

Şekil 2.5'de 28 günlük $[w/(c+keg+kpg)]$ değeriilerine göre tipik dayanım değışimleri gösterilmiştir. Burdada ke ve kp gibi iki etkinlik katsayısını formülde uygulanmasıyla farklı katkı yüzdelerindeki yüksek fırın cüruflu betonların dayanımının normal betonun dayanımına yaklaştığı görölür [8].



Şekil 2.6 : Hesaplanmış etkinlik değerlerinin geçerlilik değerleri

Şekil 2.6'da en yakın dayanım değerlerine sahip cürufllu betonun normal betonla beraber karşılaştırılmış hali gösterilmektedir. 28 gün için yüksek fırın cürufllu betonların regresyon katsayısı 0,94 olarak bulundu. Bu formüldeki k etkinlik katsayısı % 50 katkı yüzdesi için % 8,6 ve % 65 katkı yüzdesi için % 19,5 artış ihtiyacı duyacaktır. Bu artışlarla 28 günlük normal betonla bu oranlarda cürufllu betonların dayanım eşitliği sağlanacaktır [8].

1996 yılında The European Standart Organization (CEN) k etkinlik faktörünün saptanması için bir çalışma grubu kurulmasını kararlaştırdı. 2000 yılında da CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubu (WG 12) yayınladığı raporunda k etkinlik katsayısının belirlenmesi için çeşitli metodlar önermiştir. Bu raporda k etkinlik faktörünün hesabındaki temel nokta, kontrol betonu ve uçucu kül eklenen betonların basınç dayanımının su/çimento oranıyla ilişkisidir. Yani önerilen metodda, uçucu kül çimento miktarından çıkarılmamakta, belirli oranlarda eklenip basınç dayanımı-su/bağlayıcı oranı grafiği yerine, basınç dayanımı-su/çimento oranı grafiği çizilmekte ve daha sonra aynı basınç dayanımındaki uçucu küllü beton diyagramlarının normal beton diyagramlarına çakışması sağlanarak k etkinlik faktörü bulunmaktadır. Bununla ilgili grafik Şekil 2.7' de gösterilmiştir. Biz bu çalışmada bu metodu yüksek fırın cürufu için uygulcaz. Bu metodu diğer metotlardan ayıran en önemli nokta

çimento miktarının sabit olması ve onun üzerine belirli oranlarda yüksek fırın cürufu eklenmesidir. Bununla ilgili formülasyon şu şekildedir;

$$\frac{W}{C} = \frac{W'}{C + kf} = \frac{W'}{C(1 + \frac{kf}{C})} \quad \text{Buradan;} \quad (2.3)$$

$$W_0 = W_\varphi / (1 + k\varphi) \quad \text{denklemleri ile elde edilir.} \quad (2.4)$$

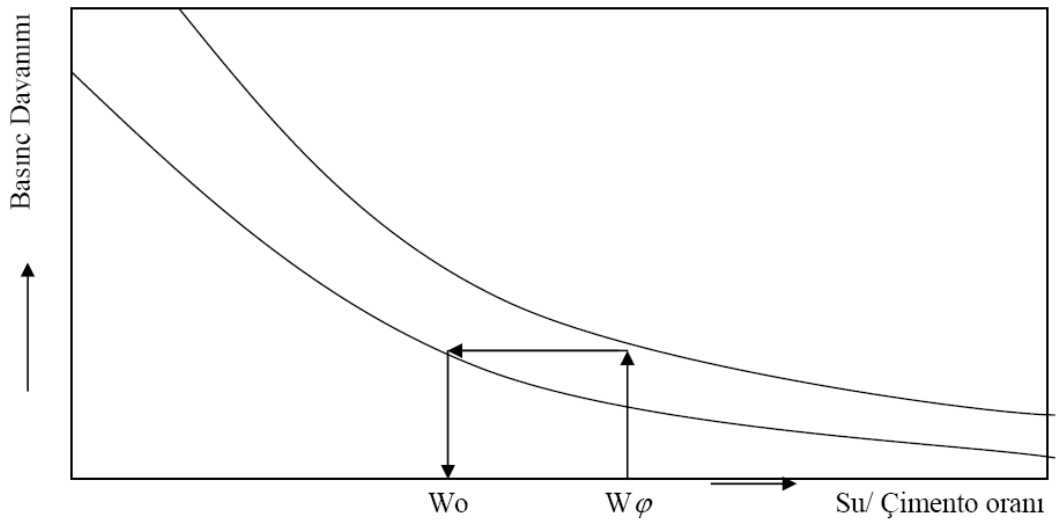
k = Etkinlik Faktörü

φ = Yüksek Fırın Cürufu/çimento oranı

W_0 = Kontrol Betonunun su/çimento oranı

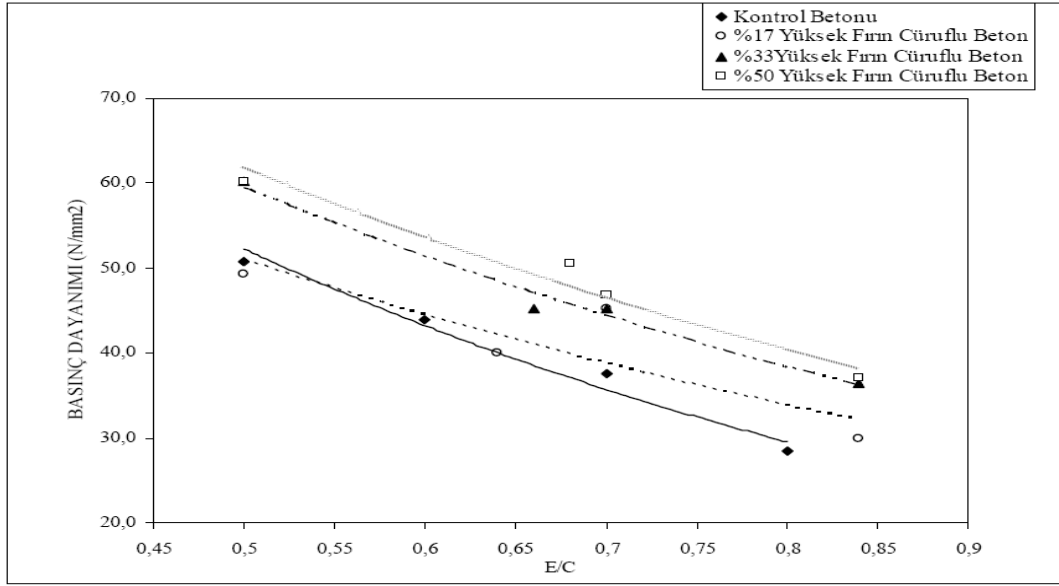
W_φ = Yüksek Fırın Cürufu betonunun su/çimento oranı

$$k = [(W_\varphi / W_0) - 1] \times (1/\varphi) \quad (2.5)$$



Şekil 2.7 : k etkinlik faktörünün belirlenme şekli

CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubu k etkinlik faktörünü etkileyen birçok faktör olduğunu belirtmiştir. Bunlar, eklenen yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüksek fırın cürufunun eklenme miktarı, çimento tipi, su/çimento oranı, kür koşulları, yüksek fırın cürufu/çimento oranı, sıcaklık gibi faktörlerdir. Şekil 2.5'de 28 günlük yüksek fırın cürufu numunelerin çalışma grubunun önerdiği metoda göre bulmuş olduğumuz k etkinlik değerleri-su/çimento oranı grafiği verilmiştir [3].



Şekil 2.8 : Basınç dayanımı

CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubu k etkinlik faktörünü bulmak için üç çeşit grafiksel metot önermiştir. Bu üç metodunda temeli daha önce belirtildiği gibi aynıdır. Bu metotların hepsinde su/çimento oranı dayanım arasındaki ilişkiden k etkinlik faktörü hesaplanmaktadır.

1) Lineer İlişki Metodu: Bu metot sınırlı bir arada basınç dayanımı-su/çimento oranı arasında lineer bir ilişki kurularak uygulanmaktadır. Bu metodu uygulayabilmek için en az iki kontrol betonu karışımı ve eklenen yüksek fırın cürüflu beton karışımı olması gerekmektedir.

$$\beta_{D0} = a_0 - b_0 W_0 \quad (2.6)$$

$$\beta_{DF} = a_f - b_f W_\varphi \quad (2.7)$$

W_0 : Kontrol betonunun su/çimento oranı

W_φ : Yüksek Fırın Cürüflu betonun su/çimento oranı

β_{D0} : Kontrol betonunun basınç dayanımı

β_{DF} : Yüksek fırın cürüflu betonun basınç dayanımı

a_0, b_0, a_f, b_f : Basınç dayanımı su/çimento oranı arasındaki lineer parametrelerdir.

Burada $\beta_{DF} = \beta_{D0}$ eşitliğini uygulayarak ve 2.5 denklemini kullanarak k değeri çekilirse aşağıdaki denklem elde edilir;

$$k=[W_0 b_0/ a_0-(a_f-b_f W \varphi)-1]*1/\varphi \quad (2.8)$$

2) Karşıt ilişki metodu: Bu metot sınırlı bir arada basınç dayanımı-1/su/çimento oranı arasındaki lineer ilişki kullanılarak uygulanmaktadır. Buradaki ilişki şu formüllerle açıklanabilir;

$$fc_1=A+B/W_0 \quad (2.9)$$

$$fc_2 = P+Z/W \varphi \quad (2.10)$$

3) Eşit işlenebilme metodu: Bu metodun temel noktası kontrol betonlarının ve yüksek fırın cürufu eklenen betonların eşit çökmeye sahip olmasıdır. Bu eşit çökme yüksek fırın cürufu eklenen betonlara su ekleyerek veya akışkanlaştırıcı kullanılarak sağlanır. Daha sonra kontrol betonlarının ve yüksek fırın cürufu betonların daha önceki metotlardaki gibi dayanım-su/çimento oranı grafikleri çizilerek 2.5 denkleminde k etkinlik faktörü bulunur.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar sonucunda yüksek fırın cürufunun etkinlik faktörünün hesabında belli bir fikir birliğine varılamamıştır. Bunun nedeninde k etkinlik değerinin birçok faktöre bağlı olması ve ke etkinlik faktörünün bulunması için çok farklı yöntemlerin olmasıdır. Bu tez çalışmasında k etkinlik faktörünü bulmak için CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubunun önerdiği grafiksel metodlardan eşit işlenebilme metodu kullanılmıştır. Karşılaştırılacak olan kontrol betonu ve yüksek fırın cürufu betonlar eşit çökme değerleri verilecek şekilde üretilmiştir. Çalışmada Karçimsadan yüksek fırın cürufu ve CEM I 42.5 çimento kullanılmıştır. Çimento dozajı 270 kg/m³ seçilerek düşük CEM I 42.5 çimentolu düşük dozajlı betonlardaki yüksek fırın cürufunun etkinliği bulunmuştur. Bunun yanında yüksek dozajda yüksek fırın cürufu kullanımının poroziteye olan etkisini incelemek için su emme deneyleride yapılmıştır [3].

2.4 Beton Özellikleri

Beton teknolojisindeki gelişmelerle, betonlarda çeşitli kimyasal ve mineral katkıların kullanılmasıyla beraber betonun taze betonun özellikleri oldukça geliştirilebilmiştir. Taze betonun sahip olduğu nitelikleri ölçmek için standartlaşmış birkaç deney yöntemi olmasına karşın genelde uygulamalar ülkeden ülkeye değişmektedir. Ayrıca kullanılacak olan deney yöntemini seçmek ve bu deney yönteminden elde edilecek sonuçları yorumlamak araştırmacının kendi tecrübesine bağlıdır.

2.4.1 Taze beton özellikleri

2.4.1.1 İşlenebilirlik ve kıvam

İşlenebilirlik ve kıvam harç, taze beton ve çimento hamuru söz konusu olduğunda en çok kullanılan iki terimdir. İşlenebilirlik her türlü taze beton ve harç karışımlarının değerlendirilmesinde kullanılırken, kıvam terimi ise agrega bulundurmayan, çimento ve sudan imal edilmiş hamurun özelliklerini belirtmekte kullanılmaktadır. Çimento hamurunun sahip olduğu bazı özellikler doğrudan taze harç veya beton özellikleri ile ilişkilendirilememesinden dolayı uygulamada bu iki kavram farklı olarak kullanılmaktadır [2].

Kıvam kavramı homojenlik, üniformaluluk, akıcılık gibi kavramları kapsamakla beraber bilimsel ve reolojik verilerle tanımlanabilmektedir. İşlenebilirlik ise betonda viskozite, akma gerilmesi, içsel sürtünme, pompalanabilirlik, kararlılık, kohezyon, ayrışma, terleme, yerleşebilirlik, perdahlanabilirlik kavramlarını karşılamakta olup bu bahsedilen özelliklerin ancak bazıları reolojik yöntemlerle ölçülebilen bilimsel veriler verir. Diğerleri ise ancak ampirik deneylerle değerlendirilebilir.

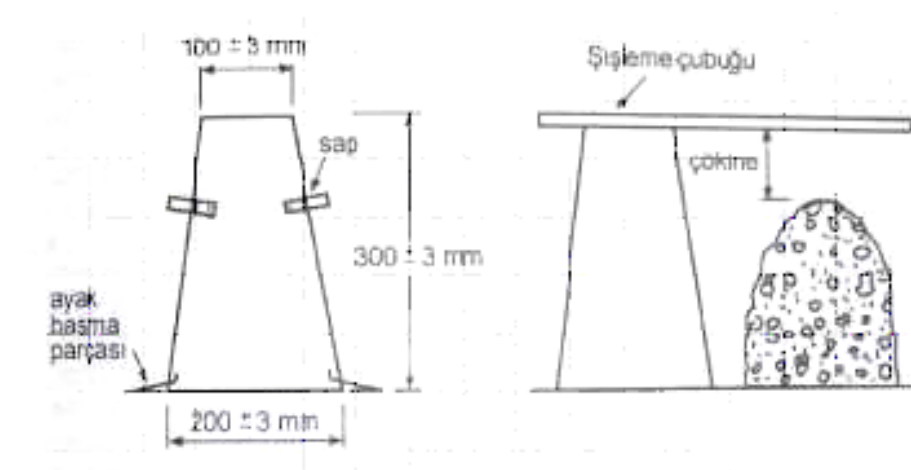
İşlenebilirlik, viskozite, pompalanabilirlik, akışkanlık, koheziflik, sıkıştırılabilirlik gibi özellikleri içeren kolektif bir kavramdır. Taze beton işlenebilirliğine etki eden başlıca faktörler aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Karışımın su muhtevası
- Agrega özellikleri (dane şekli, çapı, dokusu)
- Çimento özellikleri
- Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı kullanılması
- Süper akışkanlaştırıcı, priz geciktirici veya hava sürükleyici katkı kullanımı
- Granülometrik özellikler

Taze betonun işlenebilirliğini etkileyen bu faktörler birbirinden bağımsız olmayıp birbirleriyle etkileşim halindedir.

İşlenebilirlik kavramını ölçebilmek için pek çok yöntem kullanılmasına karşın bunların hiçbirisi taze betonun bu özelliğinin tam olarak anlaşılabilmesi için yeterli değildir. Taze beton deneyleri, işlenebilirliğin ancak belli bir kısmını ifade edebilmektedir. Slump çökme deneyi, yayılma deneyi, sıkışma faktörü deneyi, küre penetrasyon deneyi, Ve-be testi uygulanan birkaç bir kaç örnektir [15]. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan deney aşağıda açıklanmıştır.

Çökme Deneyi (Slump Deneyi): İşlenebilirlik deneyleri arasında en çok kullanılan deney çökme deneyi (slump deneyi) 'dir. TS EN 12350-2 ve ASTM C 143 standartlarında belirtilen çökme deneyleri birbirleri ile aynıdır. Her iki standarda da 20 cm taban çapı, 10 cm üst çapı olan, 30 cm uzunluğunda metalden yapılmış kesik koni ve boyu 60 cm, çapı 1,6 cm olan ucu yuvarlatılmış bir çelik çubuk kullanılır. Beton huni içerisine 3 tabaka halinde koyulur. Her tabak şişleme çubuğu ile ayrı ayrı 25'er kez şişlenmelidir. En üst tabaka şişlendikten sonra, kalıbın üst kısmı mala ile düzeltilir. Bu işlemlerden sonra huni saplarından tutularak yavaşça yukarı çekilir. Kalıptan kurtulan beton belirli bir çökme gösterdikten sonra, ilk konumuna göre çökme miktarı (slump) ölçülür. Şekil 2.9' da çökme hunisi ve çökme yöntemi ile betonun kıvamının ölçülmesi gösterilmektedir.



Şekil 2.9 : Taze betonda çökme miktarının ölçülmesi

Çökme deneyi kıvamı az olan betonlar için uygun bir deney değildir. Çökme miktarı 2,5 cm'den az olan betonlar için, sıkıştırılması işleminde pratikte vibratör kullanıldığından, bu tip betonların kıvamının veya işlenebilirliğinin bulunabilmesi için Vebe Deneyi gibi başka bir deney kullanılması gerekmektedir.

Genel olarak aynı çökme değerine sahip betonların, benzer ölçüde işlenebilirlik göstereceği kabul edilmektedir. TS 802 nolu Türk Standardı gibi kanşım hesap esaslarını anlatan birçok standart, betonun ne miktarda kıvama sahip olması gerektiğine dair çökme değerleri tavsiye etmektedir. Bu değerler Çizelge 2.6 ve 2.7' de verilmiştir.

Çizelge 2.6 : Değişik kıvamlardaki betonun çökme değerleri

BETON KIVAMI	ÇÖKME DEGERİ, cm
Aşın Kuru	
Çok Kuru	
Kuru	0-2,5
Kuru-Plastik	2,5-5,0
Plastik	7,5-10,0
Akıcı	15,0-17,5

Çizelge 2.7 : TS EN 206 standardına göre beton kıvam sınıfları

KIVAM SINIFI	ÇÖKME DEGERİ, cm
S1	0-5
S2	5-10
S3	10-16
S4	16-22
S5	22<

İşlenebilirlik kullanılan deneye bağlı olarak deneyi yapanın sahip olduğu tecrübe çerçevesinde değerlendirilmektedir. Dolayısıyla işlenebilirlik hakkındaki değerlendirmeler, hem deney sonuçlarına hem de öznel yargıya dayanmaktadır. İşlenebilirlik genellikle iyi, kötü, orta taze karışımın görüntüsü ise kuru, koyu, katı, plastik, yumuşak, nemli, ıslak olarak ifade edilmektedir.

2.4.1.2 Katkı kullanımının taze beton özelliklerine etkisi

Katkılar betonun diğer bileşenlerine göre daha az kullanılan kimyasallardır. Genel olarak karışımda kullanılan çimento miktarına göre belirlenirler. Betona kazandırılmak istenen özelliklere göre çeşitli katkıları kullanılabilir. Bunlar, hava sürükleyen, korozyon direncini artıran, priz geciktiren veya akışkanlaştırıcı katkıları olabilir. Katkıları, genelde betonun üç temel özelliği olan dayanım, işlenebilirlik ve durabilite yönlerini güçlendirmek için kullanılır.

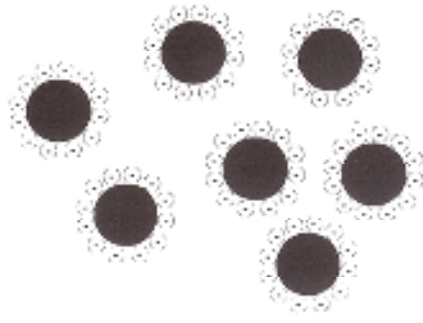
Beton üretiminde akışkanlaştırıcıların kullanılmasıyla su/çimento oranı düşük, zor kalıplara kolaylıkla yerleşebilen yüksek işlenebilirlikli, yüksek ayrışma dirençli, yüksek dayanım ve durabilite özelliklerine sahip yüksek performanslı betonlar üretilmeye başlanmıştır. Akışkanlaştırıcıları, etkinlik derecelerine göre normal akışkanlaştırıcıları, orta derecede akışkanlaştırıcıları ve süper akışkanlaştırıcıları olarak 3 grupta toplanabilirler. Ayrıca beton üretiminde süper akışkanlaştırıcıları genel olarak çok düşük su/çimento oranına sahip betonlar üretmek, düşük çimento dozajlı betonlar üretmek ve yüksek akışkanlığa sahip betonlar üretmek amacıyla 3 farklı şekilde kullanılabilir. Kimyasal bileşimleri göz önüne alındığında ise süper akışkanlaştırıcıları 3 farklı grupta toplamak mümkün olmaktadır;

- a) Sülfonatlı sentetik polimerler,
- b) Karboksilatlı sentetik polimerler,
- c) Modifiye linyo sülfonatlar [5, 12].

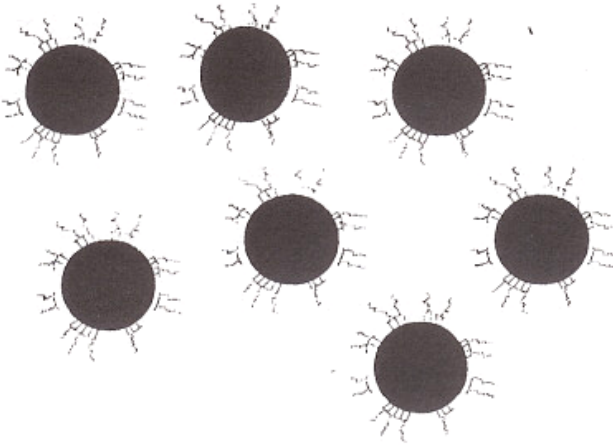
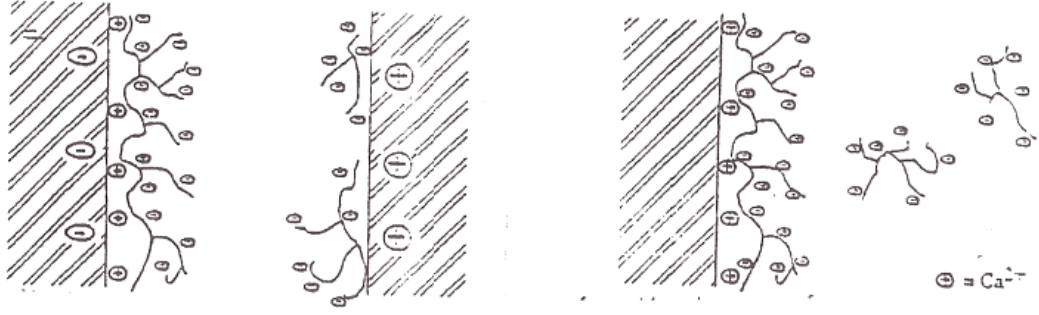
Süper akışkanlaştırıcı betonlar yoğun donatılı, dar ve karmaşık şekilli kalıplara sahip bölgelere vibrasyona gerek duymadan rahatlıkla yerleşebilmektedir. Süper akışkanlaştırıcı betonlar taze betonun pompalanabilmesi işlemini de oldukça kolaylaştırmaktadırlar. Bu tip katkıların, işlenebilirliği nasıl arttırdığı hususunda birkaç teori bulunmaktadır. Bilindiği gibi çimento taneleri su ile temas ettikten sonra çözünmeye başlayarak ortama Ca^{++} iyonları vermektedir. Tane yüzeyinde Ca^{++} iyonlarının konsantrasyonlarının artması ile polimer esaslı akışkanlaştırıcıların polimer moleküllerinin tane yüzeylerine yapışması gerçekleşmektedir. Böylece tane yüzeylerinin elektrostatik yükleri değişmekte ve (-) yükle yüklenen çimento taneleri birbirlerini itmektedir. Betonun iç sürtünmesini azaltan bu unsur işlenebilirlik özelliğini arttırmaktadır. Priz geciktirici özelliğe sahip olan akışkanlaştırıcıları, bu

özelliklerine ek olarak başlangıçtaki hidratasyon reaksiyonları için gerekli su gereksinimini azaltması ile akışkanlığı arttırmaktadır. Yeni kuşak süper akışkanlaştırıcılarda dispersiyon etkisinin yanında sterik etki de akışkanlığı arttırmaktadır. Uzun dallar içeren polimer zincirleri sayesinde çimento tanecikleri çevresinde birbirini iten fiziksel bir etki oluşur. Sterik etki adı verilen bu etki sayesinde çimento taneleri dağılarak kararlı hale gelmektedir [12].

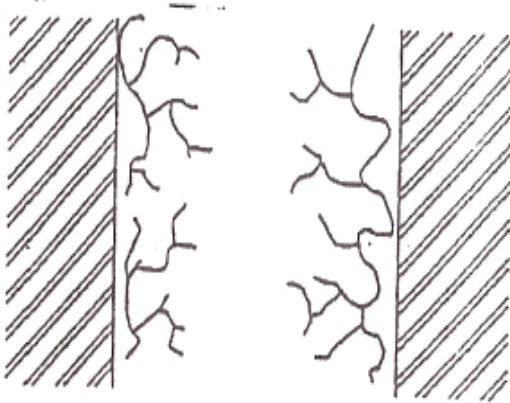
Süper akışkanlaştırıcıların etki mekanizmaları üzerinde yapılan çalışmalar, akışkanlaştırıcı moleküllerinin çimentodaki C3S, C2S tanecikleri tarafından adsorbe edilerek etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Fakat çimento da çimento inceliğinin fazla olması, C3A ve C4AF taneciklerinin akışkanlaştırıcı moleküllerini hızlı bir biçimde adsorbe etmesi gibi sebeplerden dolayı betonun işlenebilirliği sürekliliğini koruyamamakta ve işlenebilirlikte düşme olmaktadır [5].



Elektrostatik etki



Sterik etki



Şekil 2.10 : Süper akışkanlaştırıcı katkıların etki mekanizması [5].

2.5 Beton Dayanımı

Beton kullanıldığı duruma göre, farklı yönlerde ve büyüklüklerde kuvvetlerin (yüklerin) etkisi altında kalmaktadır. Beton elemanlar, bu yükler etkisinde, çok küçük miktarlarda şekil değiştirerek, yüklerin etkilerine karşı koyacak şekilde tasarlanırlar. *Beton dayanımı*, betonun üzerine gelen yüklerin etkisi ile meydana gelecek şekil değiştirme ve kırılmalara karşı direnç gösterme kabiliyetidir. Beton dayanımının yüksek olması, çimento hamurunun dayanımına, agrega dayanımına ve çimento hamuru ile agrega arasında meydana gelen aderansa bağlıdır. Agregaların yeterli dayanımda oldukları kabul edilirse, çimento hamurunun dayanımı ve agregalarla yaptığı aderansın önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Beton dayanımını olumsuz yönde etkileyen en önemli faktör, beton içerisinde bulunan boşluklardır. Çünkü boşlukların çevresinde, betonun kırılmasına yol açabilecek gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Beton dayanımı etkileyen faktörleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- 1- Su / Bağlayıcı Oranı (su/bağlayıcı oranı yükseldikçe, beton içerisinde daha fazla boşluk oluşmakta ve beton dayanımı daha düşük olmaktadır.)
- 2- Karma suyu kalitesi
- 3- Çimento Özellikleri (çimentonun kimyasal özellikleri ve inceliği çimentonun hidrasyon hızını ve dayanımını etkilemektedir.)
- 4- Agrega Özellikleri (agreganın tane boyut dağılımı, en büyük tane boyutu, tane şekli, tanelerin yüzey dokusu, dayanımı ve agregada bulunabilecek zararlı maddelerin varlığı)
- 5- Betona uygulanan kanştırma, taşınma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri
- 6- Kür koşulları ve betonun yaşı [16].

Beton üzerine etkiyen yükler basınç, çekme, kayma ve eğilme gibi gerilmeler yaratabilmektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında, hacimce sabit 0,65 su/çimento oranlı biri şahit beton olmak üzere 10 adet farklı beton karışımı üretilmiştir. Bu karışımlarda çimento ile 0-45 μ dane boyutuna sahip yüksek fırın cürufu ikameli olarak kullanılmış, karışımlarda toplam çimento miktarının (hedef 300 dozaj) %30'u ve %60'ı azaltılarak, her bir üretim için karışımlarda azalan çimento miktarına karşılık %30, %60, %90 oranlarında cüruf eklenmek suretiyle karışımlar yapılmıştır. Karışım hacmi 32 dm³ olarak hesaplanmıştır. Üretimlerde akışkanlığı sağlamak için yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Katkının miktarı, 18 $\pm$ 2 cm çökme değeri hedeflenerek bütün karışımlar için ayrı olacak şekilde eklenmiştir. Toplamda 10 karışımın taze ve sertleşmiş beton özellikleri incelenmiştir.

3.1 Karışımlarda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1 Çimento

Karışımlarda, CEM I 42,5 N ve CEM I 42,5 R tiplerinde iki farklı çimento kullanılmıştır. Çimentonun basınç dayanımı ve fiziksel özellikleri ile kimyasal özellikleri sırasıyla Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3' te verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Portland çimentosunun fiziksel özellikleri

	CEM I 42,5N	CEM I 42,5R
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,17	3,15
Priz Süresi (dak)	180	160
Hacim Sabitliği (mm)	2	2
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	4100	3890

Çizelge 3.2 : Portland çimentosunun basınç dayanımı

	CEM I 42,5N	CEM I 42,5R
Gün	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	
2	27,0	29,4
28	54,0	58,2

Çizelge 3.3 : Portland çimentonun kimyasal özellikleri

	Analiz Sonuçları (%)	Standartlar (%)
MgO	1,60	maks.% 5,0
Cl	0,10	maks.%0,1
SO ₃	3,00	maks.% 4
Çözünmeyen Kalıntı	0,70	maks.%1,5
Kızdırma Kaybı	1,90	maks.% 5
Serbest Kireç	1,00	

3.1.2 Yüksek fırın cürufu

Deneylerde çimentoya ek olarak puzolanik etkisi bulunan yüksek fırın cürufu da kullanılmıştır. Helyum piknometresi ile yapılan ölçümde yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı 2,80 gr/cm³ bulunmuştur. Özgül yüzey değeri ise, 5500 cm²/g'dır.

Çizelge 3.4: Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri

İçerdiği Madde	Yüzdesi (%)
SiO ₂	33,40
Na ₂ O	0,34
Al ₂ O ₃	15,04
K ₂ O	0,64
Fe ₂ O ₃	2,93
SO ₃	0,18
MgO	8,28

3.1.3 Agregalar

Üretimlerde iri agregalar olarak Şile Koç Madencilik'ten tedarik edilen kalker kırmataş 1, kırmataş 2 ve kalker kırma taş tozu kullanılmıştır. İnce agregalar ise Şile Ergören doğal kumu kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri Çizelge (3.5)'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega Türü	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)
İnce Kum	2,58	1,30
Kırmataş Tozu	2,70	0,80
Kırmataş 1	2,72	0,40
Kırmataş 2	2,72	0,40

Çizelge 3.6 : Agregaların elek analizi sonuçları

Elek Göz Boyutu (mm)	Elekten Geçen %				
	İnce Kum	Kırma Taş Tozu	Kırmataş 1	Kırmataş 2	Karışım
31,5	100	100	100	100	100
22	100	100	100	100	100
16	100	100	100	66	94
8	100	100	63	2	72
4	100	85	5	1	50
2	96	55	2	1	40
1	79	30	2	1	28
0,5	52	16	1	1	18
0,25	23	6	1	1	8
0,125	4	3	1	1	2
0,063	2,1	2,5	0,7	0,8	1,6

Çizelge 3.7: 1 m³ için teorik beton bileşimleri ve özellikleri

Bileşen (kg)	N-0-0 (şahit)	N-30-30	N-30-60	N-30-90	N-60-30	N-60-60	N-60-90	R-0-0 (şahit)	R-30-30	R-60-60
Çimento	300	210	210	210	120	120	120	300	210	120
Yük.Fırın Cürufu	-	90	180	270	90	180	270	-	90	180
Doğal Kum	426	424	403	383	441	421	401	425	423	421
K.T. Tozu	536	533	508	483	556	531	505	536	533	530
K.T.1	557	554	528	502	577	551	525	556	554	551
K.T.2	316	314	299	284	327	312	297	315	314	312
Su	194	195	194	194	195	195	195	194	195	195
Katkı	0,91	0,86	1,14	1,28	0,86	0,69	0,46	1,70	0,86	0,69

3.1.4 Akışkanlaştırıcı katkı

Üretimlerde su ihtiyacını yüksek oranda azaltabilen polikarboksil esaslı yeni nesil bir süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan katkı TS EN 934-2 'ye göre yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı ve sertleşmeyi hızlandırıcı katkı sınıflarına uygundur. Grace firması tarafından üretilen katkının adı Adva 616M olup klor içermemektedir.

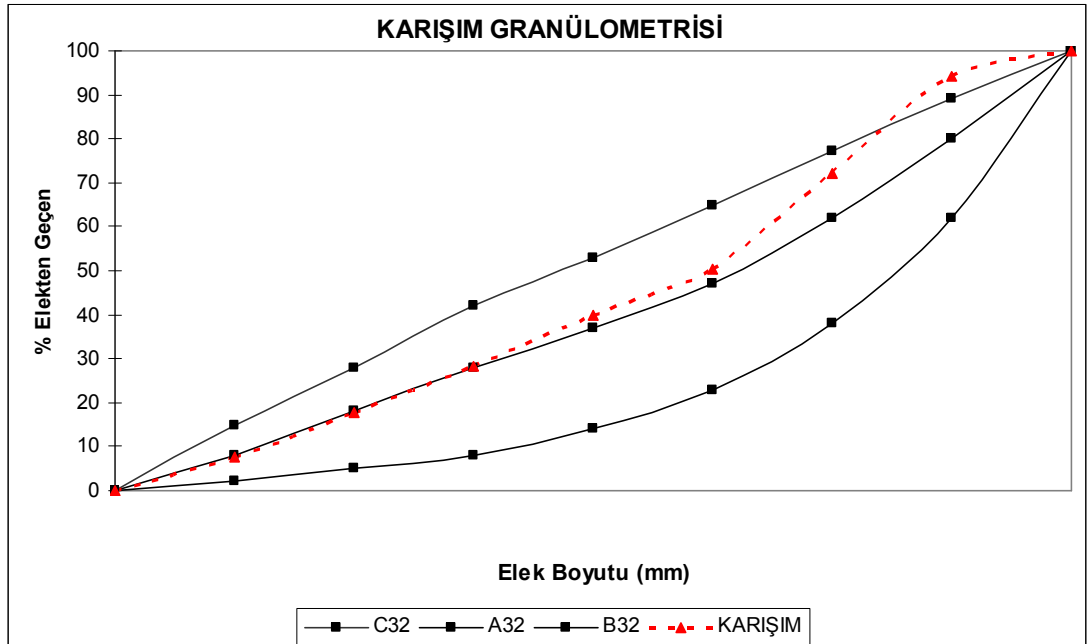
Kullanılan katkı karışıma katıldığında, çimento taneleri üzerinde adsorbe olarak çimento tanelerinin üstünü kaplar. Katkının polimer yapısındaki sülfonat grupları çimento taneleri üzerinde negatif yükün artmasına sebep olurlar bu da çimento tanelerinin dağılmasına sebep olur. Ayrıca çimentoyu saran katkının sahip olduğu polimer zincirleri sayesinde çimento taneleri arasında fiziksel bir itmede oluşur. Bu iki etki sayesinde çimento taneleri çok iyi bir dağılma gösterir ve belirli bir beton işlenebilirliği için gerekli olan su miktarı azalır. Bu sayede su içeriği düşük akışkan bir beton elde etmek mümkün hale gelir. Çizelge (3.8)'de kullanılan süper akışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Kullanılan yeni nesil süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³) (20°C)	1.1
Klor % (EN 480-10)	<0.1
Renk	Amber
Homojenite	Homojen
Kimyasal İçeriği	Polikarboksilik Eter Zincirleri

3.2 Beton Karışımları

Yapılan bu tez çalışmasında 1 referans betonu olmak üzere 10 farklı beton karışımı üretilmiştir. İlk olarak hacimsel 0,65 su/çimento oranlı şahit bir beton üretilmiştir. Yüksek fırın cürufunun etkinliğinin ve kırılma parametrelerine etkisinin belirlenmesi amacı ile toplam çimento miktarının %30'u ve %60'ı azaltılarak, her bir üretim için karışımlarda azalan çimento miktarına karşılık %30, %60, %90 oranlarında cüruf eklenerek 10 farklı beton karışımı üretilmiştir. CEM I 42,5 N ve R tipi iki farklı çimentonun kullanıldığı üretimlerde su/çimento oranı sabit tutulmuştur. Eşit işlenebilirlik kimyasal akışkanlaştırıcı ile sağlanmıştır. Karışım granülometrisi TS 706' da belirtilen B32 ve C32 referans eğrileri arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Buna göre karışım oranları için ince sarı kumu %24, kırmataş tozu %29 ve kırmataş1 %30, kırmataş2 %17 oranlarında kullanılmıştır. Karışımın granülometri eğrisi Şekil 3.1' de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Beton karışımının granülometrisi ve referans eğrileri

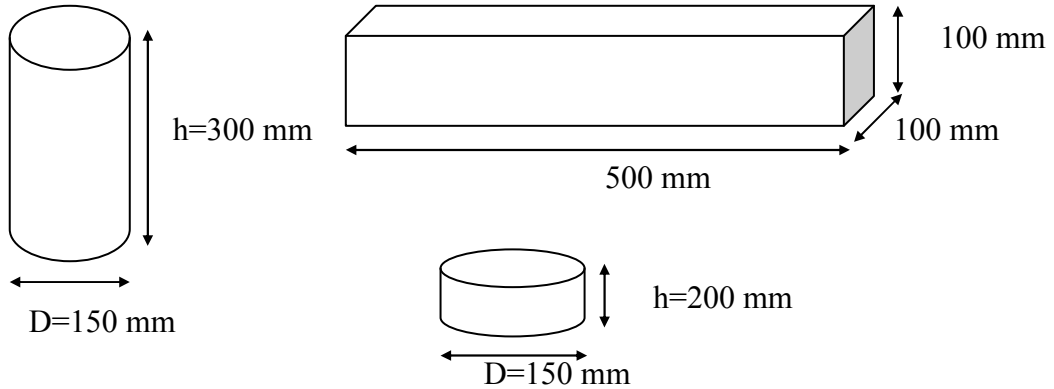
3.3 Üretimde İzlenen Sıra

- Çimento ve yüksek fırın cürufu hariç, agregalardan oluşan kuru karışımın 60 saniye süre ile karıştırılması,
- Karma suyunun tamamının katılması ve 120 saniye daha karıştırılması,
- Çimento ve cürufun eklenmesi, ardından 120 saniye karıştırmaya devam edilmesi,
- Akışkanlaştırıcı katkının eklenmesi,
- 5 dakika süre ile karıştırmaya devam edilerek karışımın sonlandırılması,
- Çökme, hava içeriği, birim ağırlık deneylerinin yapılması,
- Betonun kalıplara alınması.

Numuneler üretimden 1 gün sonra kalıptan çıkartılarak havuzlara alındılar.

3.4 Numune Şekil ve Boyutları

Her partide toplam 3 kiriş, 3 silindir ve 4 disk olmak üzere toplam 10 adet numune üretildi.



Şekil 3.2: Numune şekil ve boyutları

3.5 Numune Kodlarının Belirlenmesi:

Tez çalışmasında, üretilen numuneleri birbirinden ayırmak, özelliklerini belirtmek ve deney sonuçlarını yorumlamayı kolaylaştırmak açısından numunelere bir takım kodlar verilmiştir. Bu kodlardan ilki çimento tipini, ikinci bölüm azaltılan çimento miktarını, üçüncü bölüm ise eklenen cüruf yüzdesini belirtmektedir.

Örneğin; N-30-60 kodlamasında N, üretimde CEM I 42,5 N çimento tipi kullanıldığını, %30 çimento azaltıldığını, %60 cüruf eklendiğini göstermektedir. Azaltılan veya eklenen çimento ve cüruf miktarları 300 dozajlı hedef üzerinden hesaplanmıştır. CEM I 42,5 R tipi çimento ile yapılan 3 üretim için de kod başlangıcı R kullanılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ

4.1 Taze Beton Deney Sonuçları

4.1.1 Birim ağırlık deneyi

Betonlar üretilirken, kalıplara konulmadan önce silindir bir kaba konularak tartıldı. Daha sonra silindirin hacmi bulundu. Ağırlığı ve hacimleri bilinen betonların birim ağırlıkları hesaplanıp gerçek bileşimleri hesaplandı. Çizelge (3.7) 'de üretilen betonların gerçek bileşimleri verilmektedir.

4.1.2 Çökme deneyi

Beton kıvamının belirlenmesinde TS EN 12350-2 standardına uygun bir şekilde çökme deneyi yapılmıştır. Beton karma işlemi bittikten sonra, önceden belirlenmiş kıvam sınırlarının sağlanıp sağlanmadığının saptanabilmesi ve bu sebeple kullanılacak kimyasal katkı miktarının belirlenmesinde çökme deneyi önemli bir rol oynamaktadır. Üretimlerde beton karışımlarının çökme değerlerinin 18 ± 2 cm arasında kalabilmesini sağlamak amacı ile Grace firmasının Adva 616M isimli yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı katkısı kullanılmıştır.

4.1.3 Hava içeriği deneyi

Bilinen basınç ve hacimdeki hava, sızdırmaz kap içinde bulunan, hava muhtevası bilinmeyen taze beton üzerine aktarılır. Basınç ölçer göstergesi, son basınçta, hava yüzdesini gösterecek şekilde kalibre edilmiştir. Taze betonda hava içeriği deneyi TS EN 12350-7 standardına uygun bir şekilde yapılmıştır.

Taze beton özelliklerini gösteren birim ağırlık, çökme ve hava içeriği deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Taze beton deney sonuçları

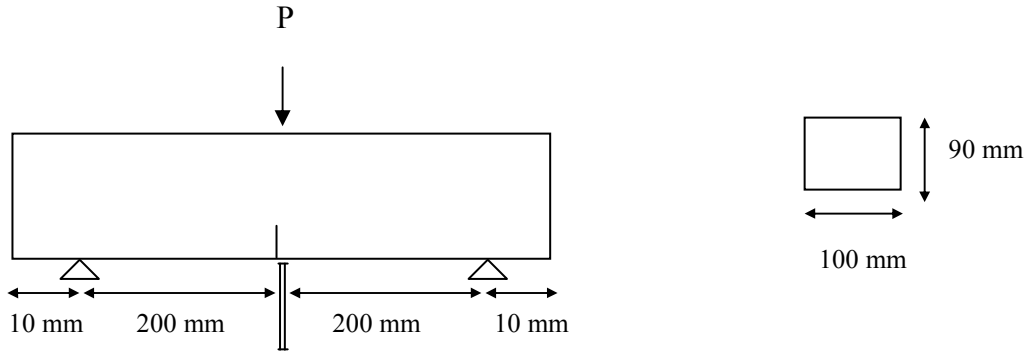
Deney/ Num.Kod	N-0-0 (şahit)	N-30- 30	N-30- 60	N-30- 90	N-60- 30	N-60- 60	N-60- 90	R-0-0 (şahit)	R-30- 30	R-60- 60
Birim Ağırlık (kg/m ³)	2363	2346	2348	2352	2357	2370	2361	2358	2358	2344
Çökme (cm)	18	19	18	19	17	18	17	19	19	20
Hava İçeriği (%)	1,1	0,8	0,9	1,0	1,2	1,2	1,5	1,0	0,8	0,8

4.2 Sertleşmiş Beton Deneylerinin Hesaplanması

Yapılan tez çalışmasında taze beton özellikleri incelenen üretimler, daha sonra çeşitli sertleşmiş beton niteliklerinin araştırılması amacıyla kalıplara konulmuştur. Bir gün kalıpta bekletilen numuneler, sertleşmiş beton deneylerinin yapılacağı güne kadar kirece doymun havuzlarda bekletilmiştir.

4.2.1. Kırılma enerjisi deneyinden elde edilen sonuçlar

Üretilen betonların kırılma enerjileri INSTRON 5500R marka deplasman kontrollü yükleme makinesi kullanılarak yapılmıştır. Kırılma enerjisi deneyleri kiriş numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda elde edilen yük-sehim grafikleri incelenerek, çelik lif eklenmesinin, çimento içeriğinin ve su/çimento oranının değişiminin eğilme dayanımı, kırılma enerjisi, süneklik gibi mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Eğilme deneyleri, malzemenin ortasında tekil yük uygulanmasıyla oluşturulan 3 noktalı deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Şekil (4.1)'de deney düzeneği ve kullanılan kirişlerin boyutları gösterilmiştir.

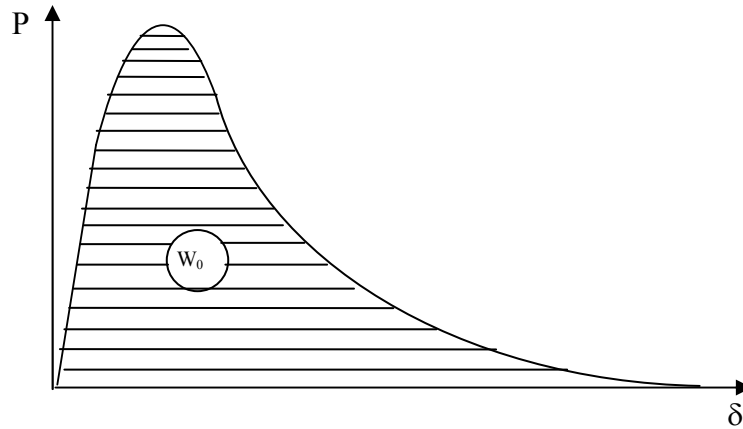


Şekil 4.1 : RILEM deneyi yükleme düzeneği

RILEM kırılma enerjisi deneyine başlamadan önce kirişlerin orta noktalarına 1 cm derinliğinde çentik açılmış ve yan yüzeylerine kirişlere açılmış olan çentiğe yakın olmak üzere bir korniyer yerleştirilmiştir. Bu korniyere deneyler sırasında sehim ölçmek amacı ile LVDT yerleştirilmiştir. Deney esnasında kirişe uygulanan yük ve yüke karşı gelen deplasmanlar kaydedilerek bilgisayar ortamında yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Kirişlere ait yük-deplasman grafikleri eklerde verilmiştir.

4.2.1.1 Kırılma enerjisinin hesaplanması

RILEM kırılma enerjisi deneyinde, numuneye ait yük ve deplasman değerleri kaydedilir. Daha sonra bu verilerden yük-sehim grafikleri elde edilir. Bu grafiklerin altında kalan alan, kiriş kırılırken yapılan işi, dolayısıyla harcanan enerjiyi vermektedir. Malzemenin sünekliği arttıkça yaptığı sehim ve yuttuğu enerji artmaktadır. Bu tez çerçevesinde değişik cüruf ve çimento miktarlarına sahip lifsiz ve lifli betonların kırılma enerjileri incelenmiştir. Şekil (4.2) 'de örnek bir yük-sehim eğrisi görülmekte ve ayrıca kırılma enerjisi deney sonuçlarının nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : Yük-Sehim eğrisinin şematik gösterimi

W_0 = Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan (N/m)

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

g = Yer çekimi ivmesi (9.81 m/sn^2)

δ_0 = Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)

A_t = Etkin kesit alanı (m^2)

$$G_F = (W_o + mg\delta_o) / A_t \quad (4.1)$$

4.2.1.2 Eğilme deneylerinden net eğilme dayanımlarının hesaplanması

Kirişlerin yükleme altında gösterdikleri eğilme dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

D= Numune kesitinin yüksekliği (mm)

B = Numune kesitinin genişliği (mm)

L = Mesnetler arası uzaklık (mm)

P = Kırılma yükü (N)

F_{net} = Net eğilme dayanımı (MPa)

$$F_{net} = (3PL) / 2BD^2 \quad (4.2)$$

4.2.2 Silindir basınç deneyi hesaplaması

Silindir basınç deneyleri, 15 cm çapında, 30 cm yüksekliğinde numuneler kullanılarak yapılmıştır. Deneyler, ELE marka 3000 kN kapasiteli yükleme makinesiyle gerçekleştirilmiştir. Silindir basınç deneyinde araştırılan ve elde edilen veriler Çizelge 4.2’de verilmektedir.

4.2.3 Yarma-çekme deneyi hesaplaması

Yarma-çekme deneyleri 150 mm çapında, 60 mm yüksekliğinde disk numuneler kullanılarak yapılmıştır. Numunelere yükleme makinesinde, çıtalar yardımıyla çapları doğrultusunda çizgisel yük uygulanmıştır. Bu yük değerleri kullanılarak aşağıdaki bağıntıyla numunelerin yarma-çekme dayanımları bulunmuştur. Bu bağıntıda, σ ; Yarma-çekme dayanımı (MPa), P; Yük (N), D; Çap (mm), L;Yükseklik (mm) dir.

$$\sigma = 2P / (\pi * D * L) \quad (4.3)$$

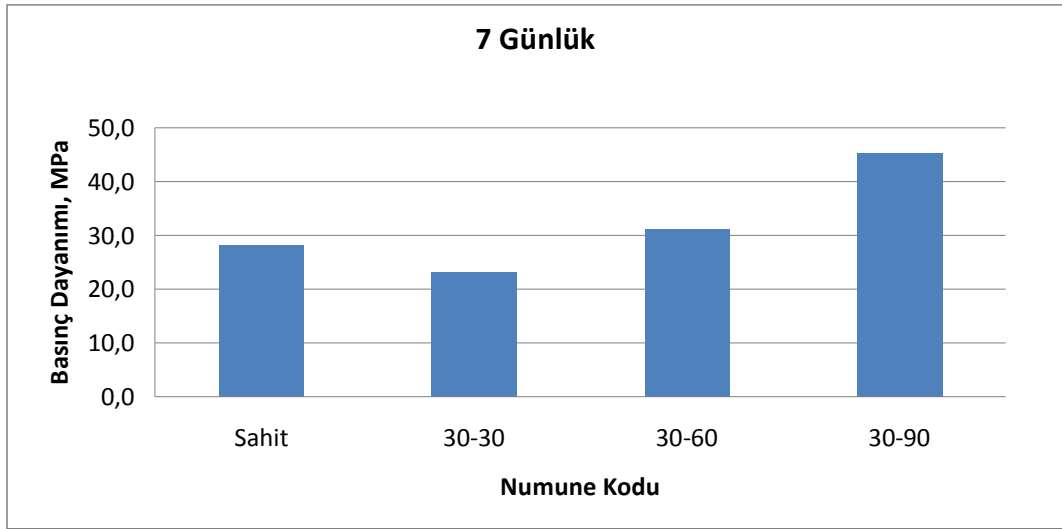
4.3 Sertleşmiş Beton Deneylerinin Sonuç ve Değerlendirmeleri

4.3.1 Silindir basınç deneyi sonuç ve değerlendirme

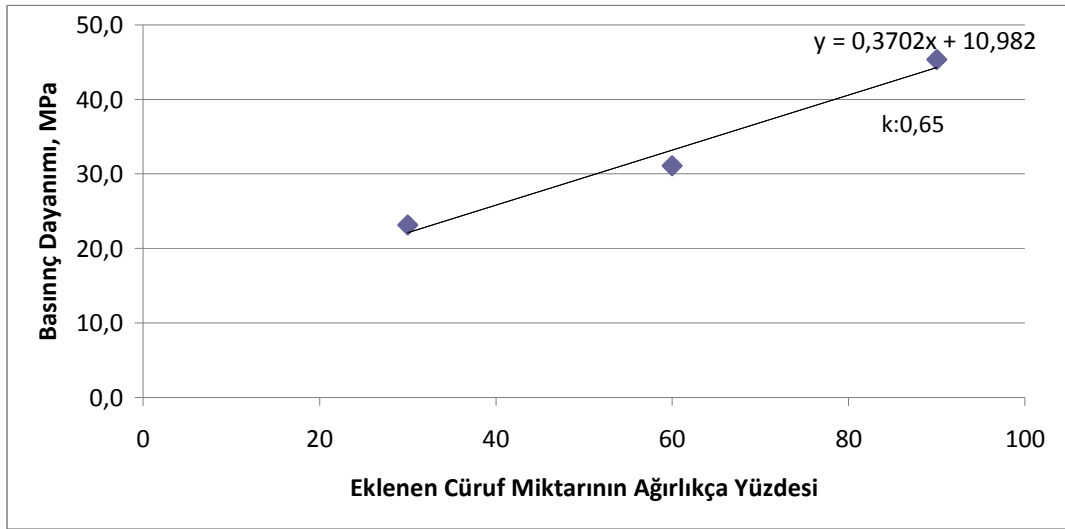
4.3.1.1 CEM I 42,5 N tipi çimento ile yapılan üretimlerin silindir basınç deneyi sonuç ve değerlendirme

Çizelge 4.2: Silindir basınç deneyi sonuçları

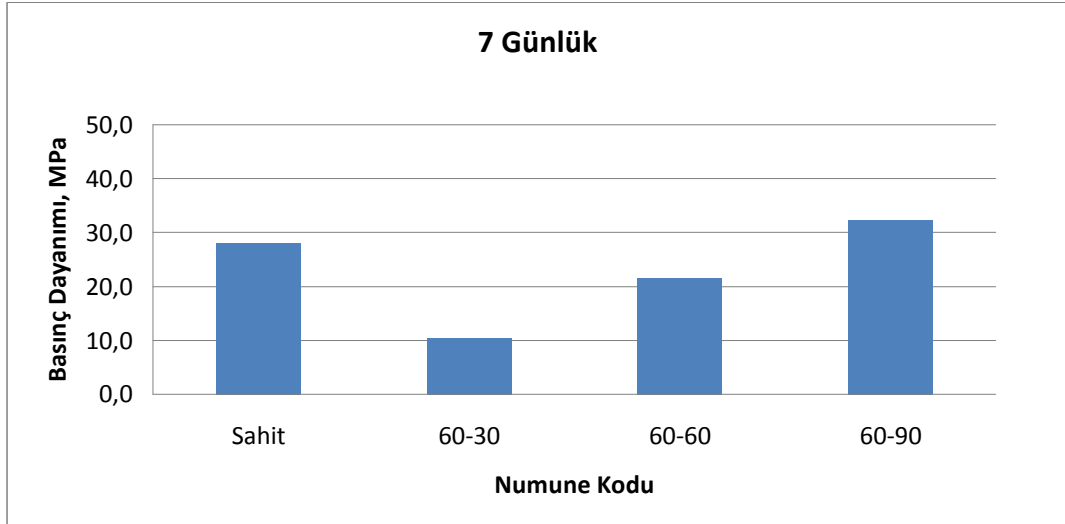
Basınç Dayanımı (MPa)			
Numune Kodu	7 Günlük	28 Günlük	Oran(%)
N-0-0 (şahit)	28,1	36,2	77
N-30-30	23,1	36,9	62
N-30-60	31,1	51,9	59
N-30-90	45,4	65,8	68
N-60-30	10,6	21,3	49
N-60-60	21,7	37,4	58
N-60-90	32,4	50,4	64



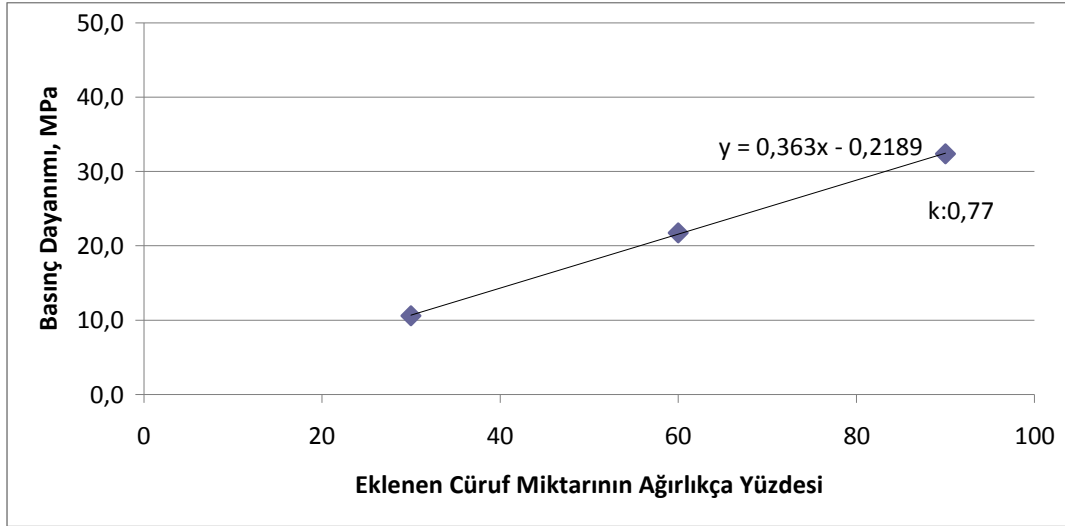
Şekil 4.3: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları



Şekil 4.4: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile hesaplanması



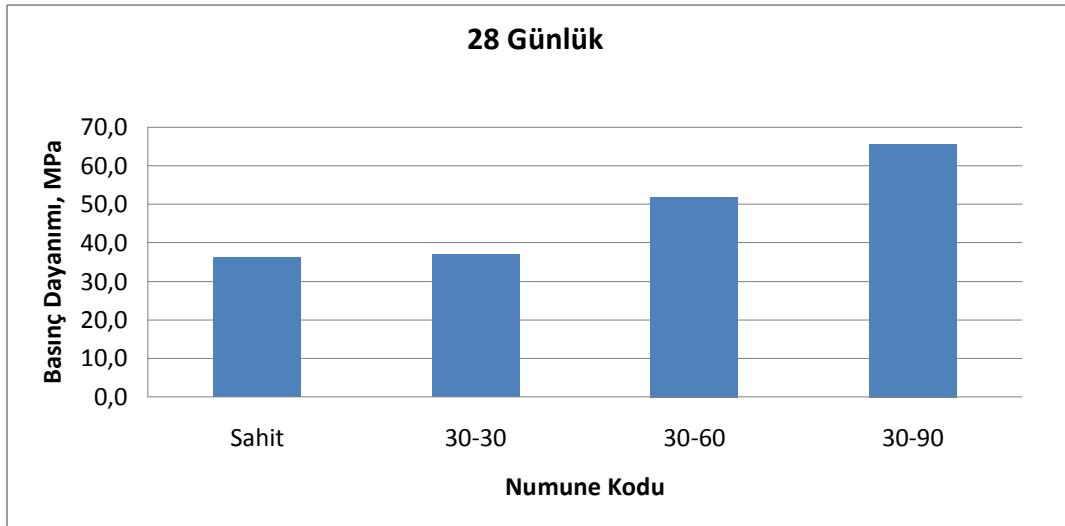
Şekil 4.5: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları



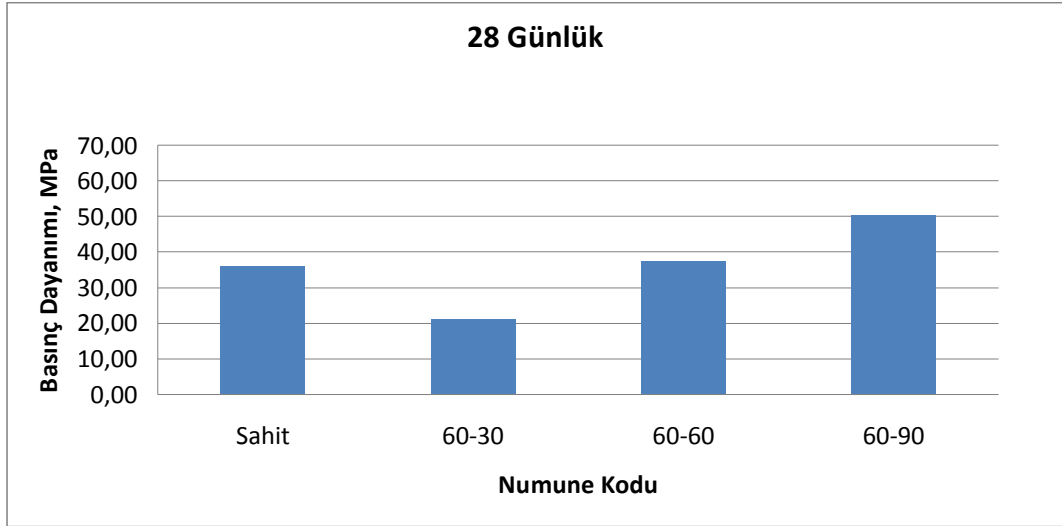
Şekil 4.6: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları için korelasyon metodu ile k etkinlik katsayısının hesaplanması

Sonuçların Değerlendirilmesi

Grafiklerden görüldüğü üzere bağlayıcı madde miktarı sabitken yani cüruf ve çimentonun ağırlıkça ikame oranı 1 iken, 7 günlük numunelerin basınç dayanımları şahit numuneye göre daha düşüktür. Etkinlik katsayısının 1'den küçük olduğu görülmüş ve şahit numuneyle aynı dayanımı elde etmek için ağırlıkça çıkarılan çimentonun yerine daha fazla cüruf eklenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.7: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları



Şekil 4.8: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı

Sonuçların Değerlendirilmesi

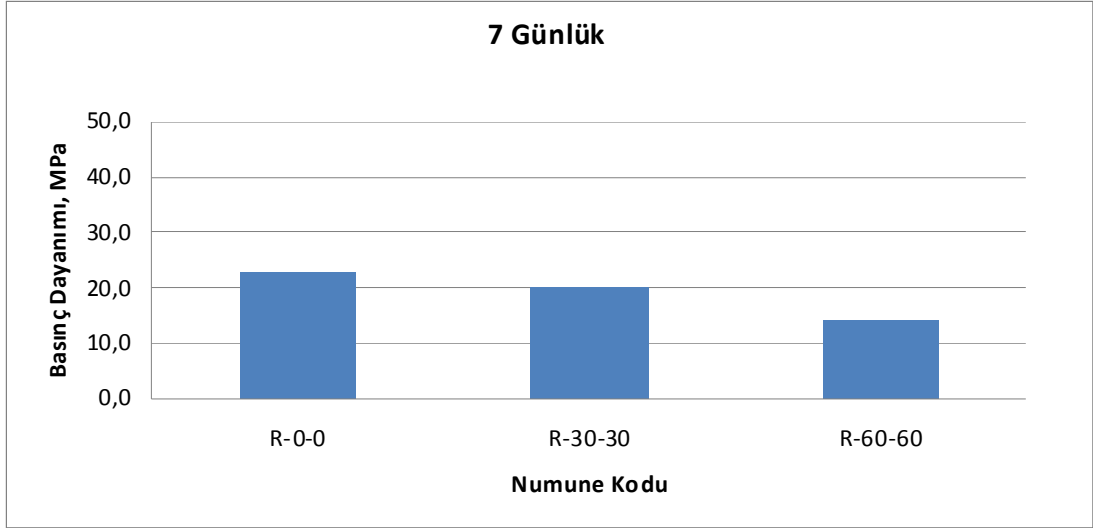
Çimentonun %30-%60 azaltıldığı ve %30-%60 ve %90 cüruf eklendiği numunelerin 28 günlük basınç dayanımları esas alınarak çizilen grafiklerden etkinlik katsayısı hesaplanmıştır. Etkinlik katsayısı 1'e çok yakın bir değer olup şöyle açıklanabilir. Ağırlıkça eşit çimento ve cüruf yer değiştirilirse yaklaşık olarak aynı basınç dayanımına sahip beton üretilir.

7 ve 28 günlük basınç dayanımları karşılaştırıldığında (ekler) ise şöyle bir sonuca varılmaktadır; çimentonun belirli oranlarda yer değiştirilmesi sonucunda beton basınç dayanımının, doğal puzolan ikamesiyle erken yaşlarda düştüğü fakat iyi kür edildiğinde dayanımı artırabileceği gözlemlenmiştir. Yüksek fırın cürufu ikamesinin betonda erken yaşlarda nispeten düşük, geç yaşlarda ise daha yüksek beton dayanımına sebep olduğu gözlemlenmiştir.

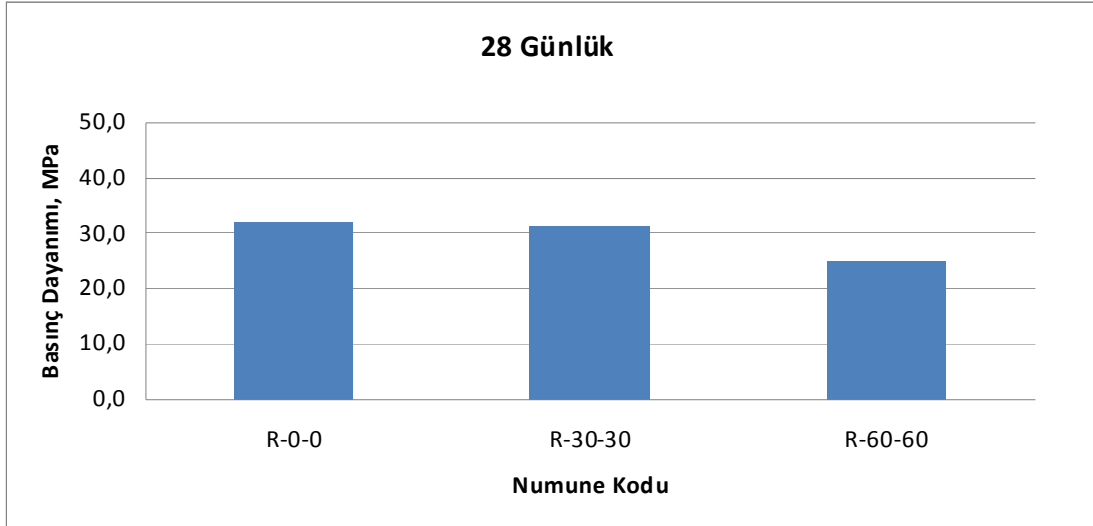
4.3.1.2 CEM I 42,5 R tipi çimento ile yapılan üretimlerin silindir basınç deneyi sonuç ve değerlendirmeleri

Çizelge 4.3: Silindir basınç deneyi sonuçları

Basınç Dayanımı (MPa)			
Numune Kodu	7 Günlük	28 Günlük	Oran(%)
R-0-0 (şahit)	22,9	31,2	0,72
R-30-30	20,0	31,2	0,64
R-60-60	14,2	24,8	0,57



Şekil 4.9: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı



Şekil 4.10: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı

Sonuçların Değerlendirilmesi

7 günlük basınç dayanımlarından görüleceği üzere erken dayanımda yüksek fırın cürufu eklenmiş numuneler şahit kadar dayanıma erişememiş, 28 günde ise %30 çimento azaltılan ve %30 cüruf eklenmiş numune eşit dayanımına erişebilmiş %60 çimento azaltıp %60 cüruf eklendiğinde ise 28 gün eşit dayanıma erişebilmek için yeterli olmamıştır. Etkinlik katsayısı 1 den fazladır.

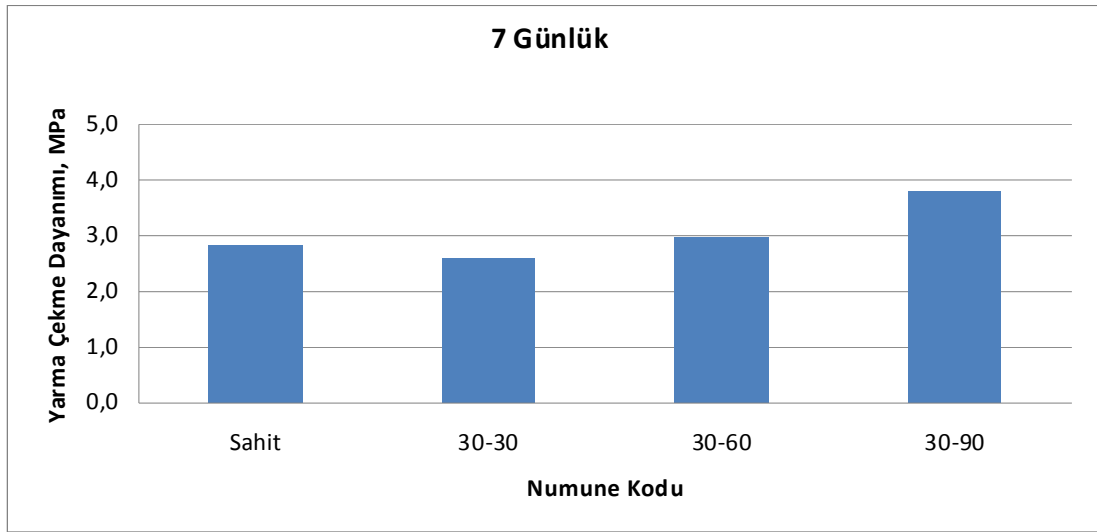
4.3.2 Yarma çekme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri

4.3.2.1 CEM I 42,5 N tipi çimento ile yapılan üretimlerin yarma çekme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri

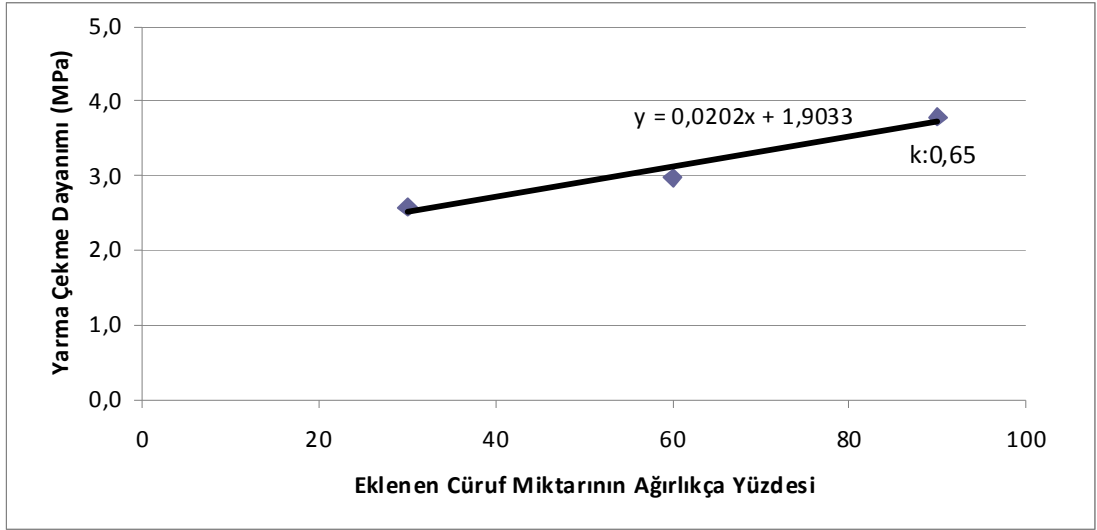
Yarma-çekme deneyi sonuçları Çizelge (4.4)' de belirtilmiştir.

Çizelge 4.4: Yarma-Çekme deneyi sonuçları

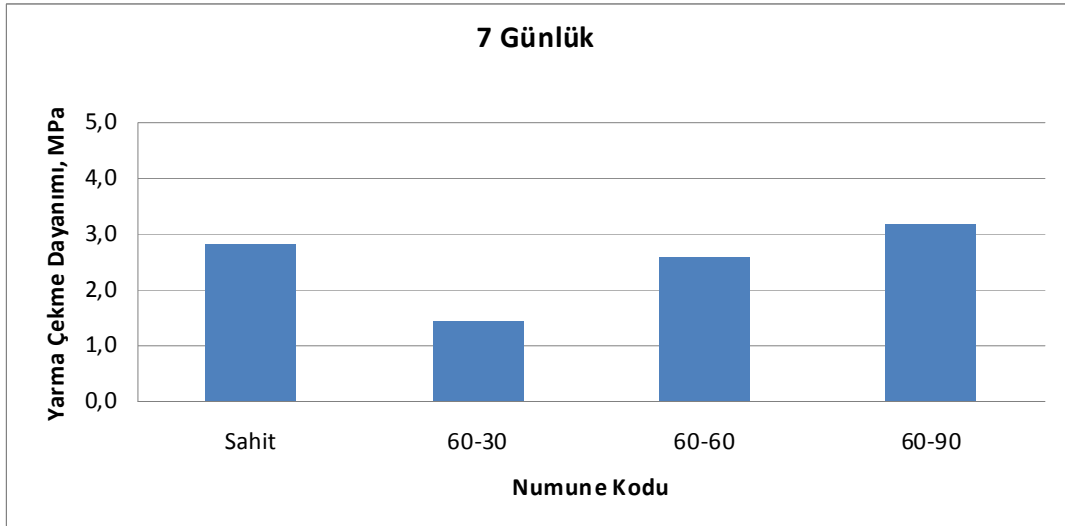
Yarma-Çekme Dayanımı (Mpa)			
Numune Kodu	7 Günlük	28 Günlük	Oran
N-0-0 (şahit)	2,83	3,44	82
N-30-30	2,58	3,37	76
N-30-60	2,97	4,53	65
N-30-90	3,79	4,31	87
N-60-30	1,45	2,38	60
N-60-60	2,57	3,39	75
N-60-90	3,17	4,03	78



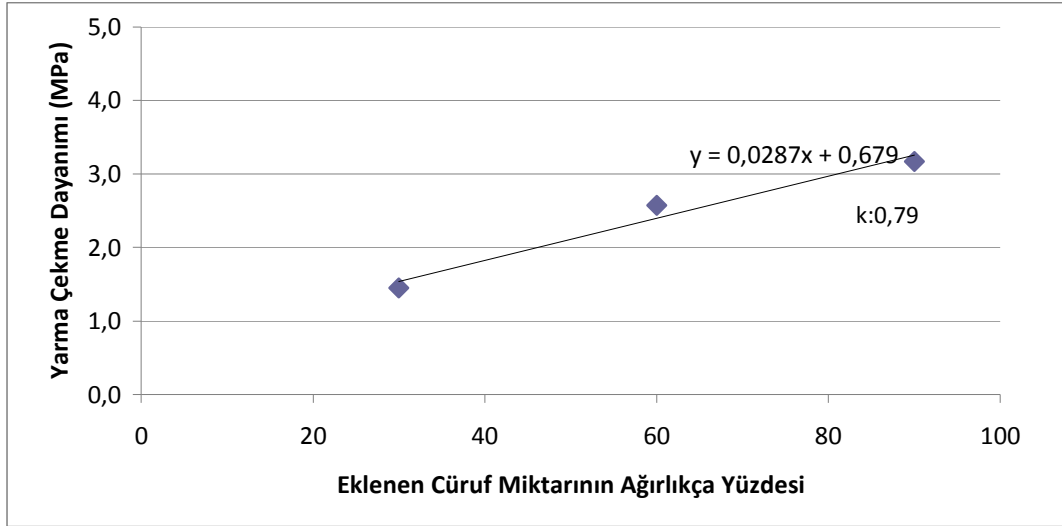
Şekil 4.11: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük yarma-çekme dayanımları



Şekil 4.12: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük yarma-çekme dayanımları için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile hesaplanması

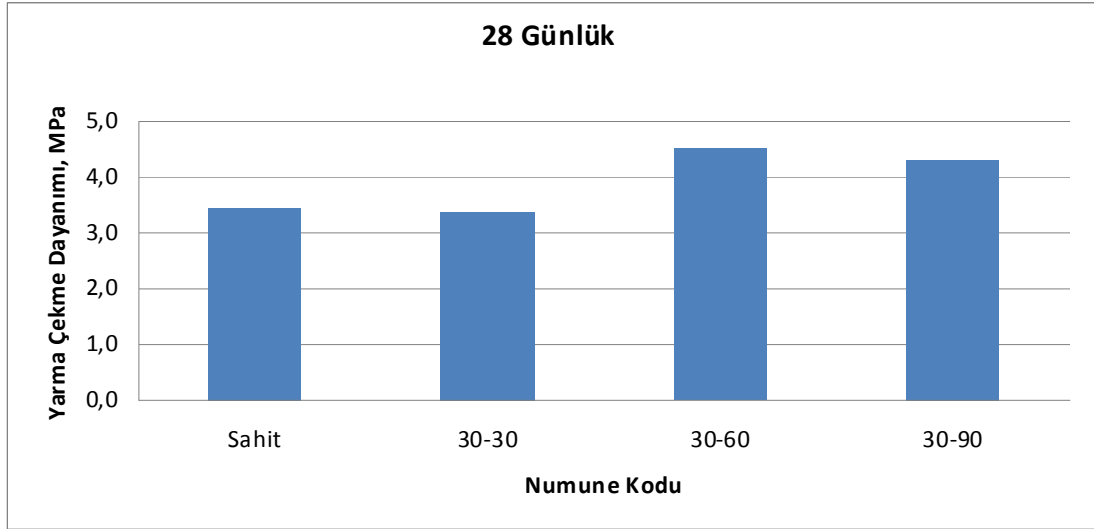


Şekil 4.13: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük yarma-çekme dayanımları

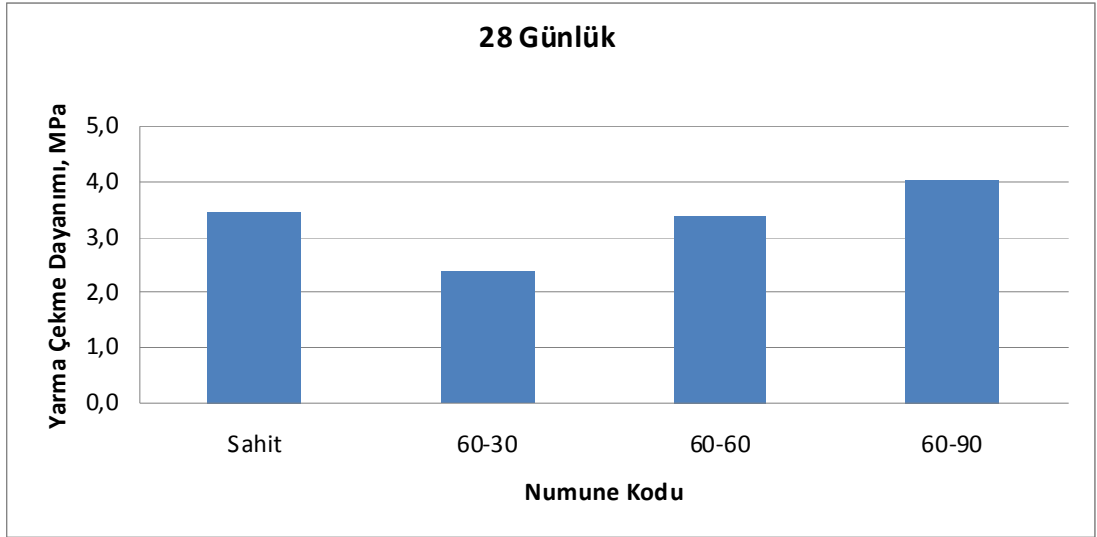


Şekil 4.14: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük yarma-çekme dayanımları için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile hesaplanması

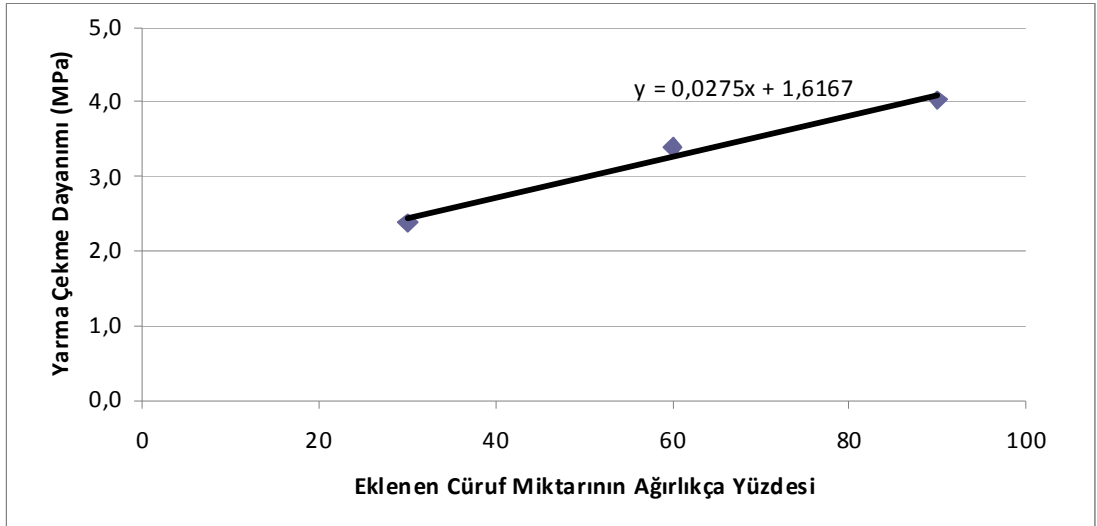
Bu grafiklerden anlaşıldığı üzere, bağlayıcı madde miktarı sabitken, yarma-çekme dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Buradan hareketle etkinlik katsayısının $k=1$ 'den küçük çıktığı görülmüştür. Bağlayıcı miktarının artırıldığı durumlarda beton numunelerinin yarma-çekme dayanımlarının artış gösterdiği gözlenmiştir.



Şekil 4.15: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük yarma-çekme dayanımları



Şekil 4.16: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük yarma-çekme dayanımları



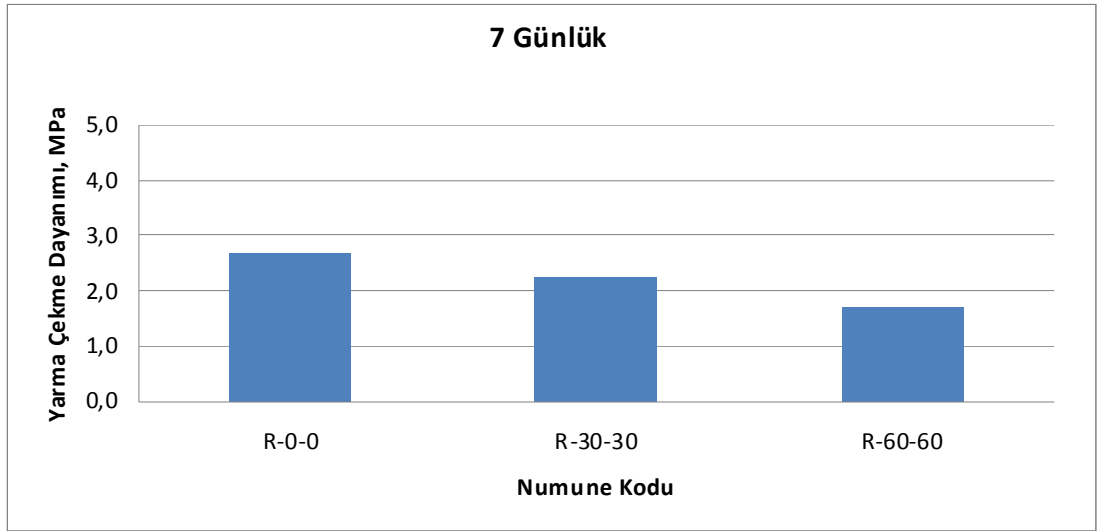
Şekil 4.17: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük yarma-çekme dayanımları için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile hesaplanması

Beton numunelerinin 28 günlük dayanımlarında sabit bağlayıcı miktarında dayanımın çok yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir. Ancak, N-30-90 numunelerinin deney sonuçlarında diğer numunelerle tutarsızlık gözlenmiş olup, numunelerin üretiminde puzolanik faaliyet ya da başka parametrelerden dolayı bu farklılığın oluştuğu düşünülmektedir.

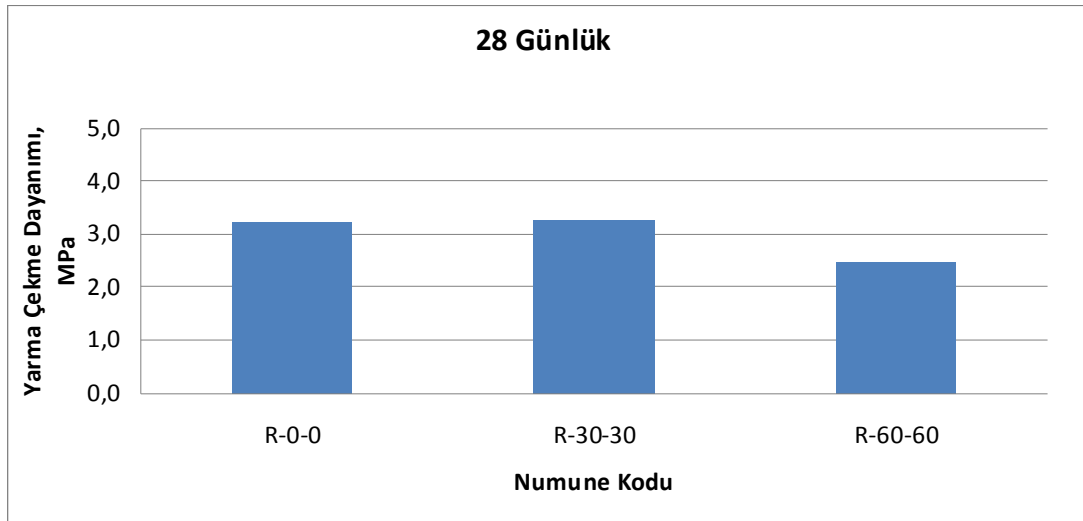
4.3.2.2 CEM I 42,5 R tipi çimento ile yapılan üretimlerin yarma çekme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri

Çizelge 4.5: Yarma-Çekme deneyi sonuçları

Yarma Çekme Dayanımı (MPa)			
Numune Kodu	7 Günlük	28 Günlük	Oran(%)
R-0-0 (şahit)	2,66	3,22	0,83
R-30-30	2,25	3,26	0,69
R-60-60	1,69	2,47	0,68



Şekil 4.18: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 7 günlük yarma-çekme dayanımı



Şekil 4.19: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 28 günlük yarma-çekme dayanımı

Sonuçların Değerlendirilmesi

CEM I 42,5 R tipi çimento kullanıldığında 7 günlük yarma çekme dayanımları cüruf miktarı arttıkça azalmaktadır. 28 günde ise %30 çimento azaltılıp cüruf eklendiğinde cürufun yarma çekme dayanımındaki aktivitesinin yaklaşık 1 olduğu görülmekte fakat %60 çimento azaltılıp cüruf eklendiğinde dayanımın şahit betona göre düşük, aktivitenin 1'den büyük olduğu görülmektedir.

4.3.3 Eğilme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri

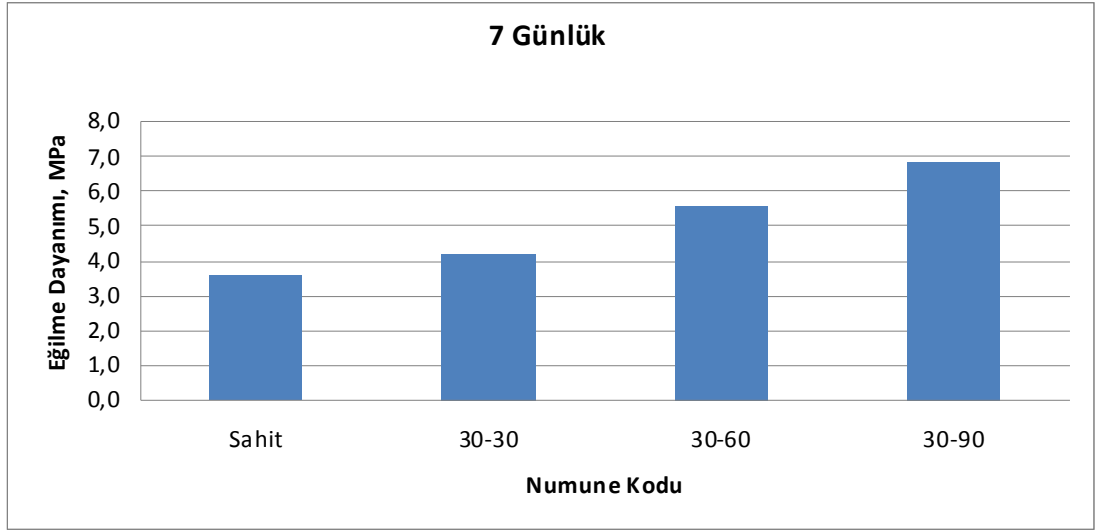
4.3.3.1 CEM I 42,5 N tipi çimento ile yapılan üretimlerin eğilme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri

Eğilme deneylerinden elde edilen, eğilme dayanımı değerleri Çizelge 4.6 'da gösterilmiştir.

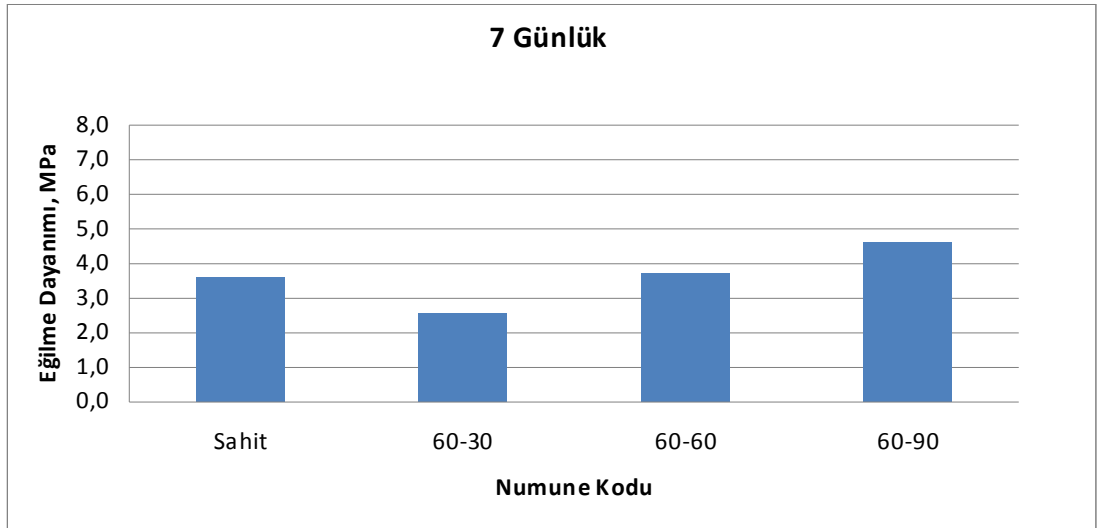
Çizelge 4.6 : Eğilme deneyi sonuçları

Eğilme Dayanımları (MPa)			
Numune Kodu	7 Günlük	28 günlük	Oran
N-0-0 (şahit)	3,61	4,35	83
N-30-30	4,20	5,36	78
N-30-60	5,56	6,20	90
N-30-90	6,83	7,51	91
N-60-30	2,57	4,17	62
N-60-60	3,72	5,36	69
N-60-90	4,60	5,27	87

Çizelge 4.6' da belirtilen 7günlük ve 28 günlük eğilme dayanımlarının oranı sunularak numunelerin mukavemet kazanım hızları karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.6' daki verilere dayanarak, eşit bağlayıcı madde miktarına sahip olan beton numunelerinden cüruf içerenlerin, şahit betonla karşılaştırıldıklarında mukavemet gelişimlerinin daha yavaş olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durumun sebebi puzolanik reaksiyonun gerçekleşme hızının çimentonun hidrasyon hızından daha yavaş olmasıdır.

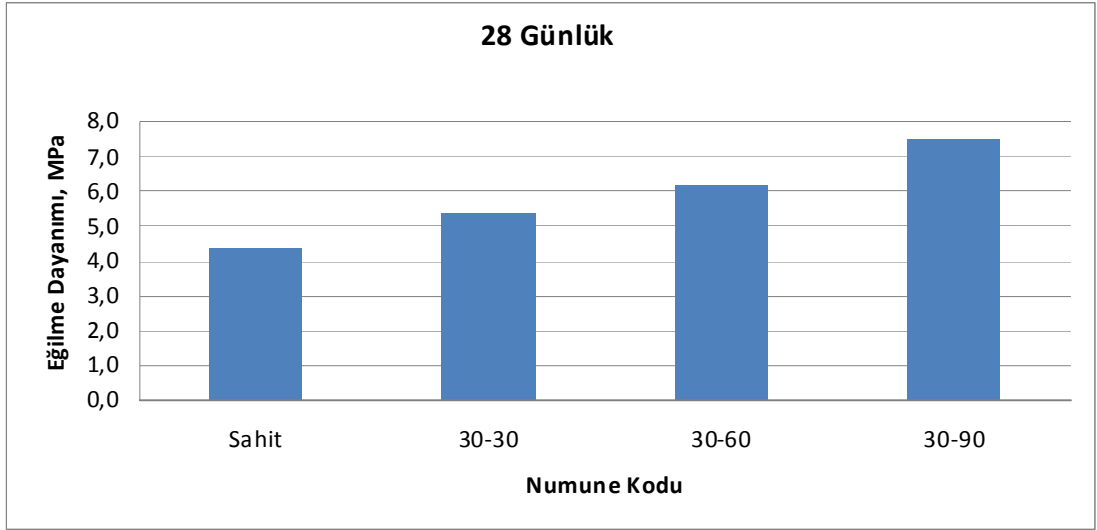


Şekil 4.20: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları

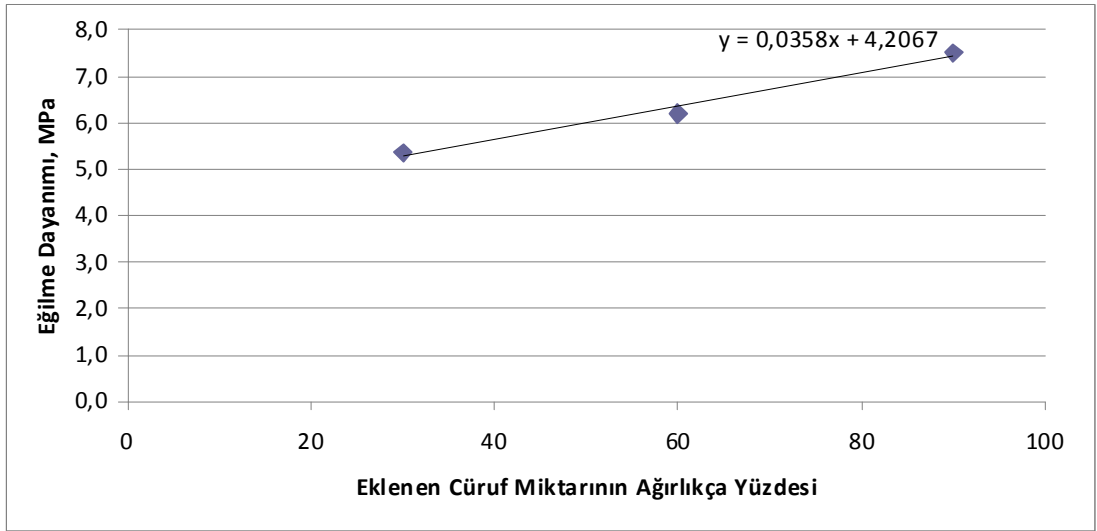


Şekil 4.21: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları

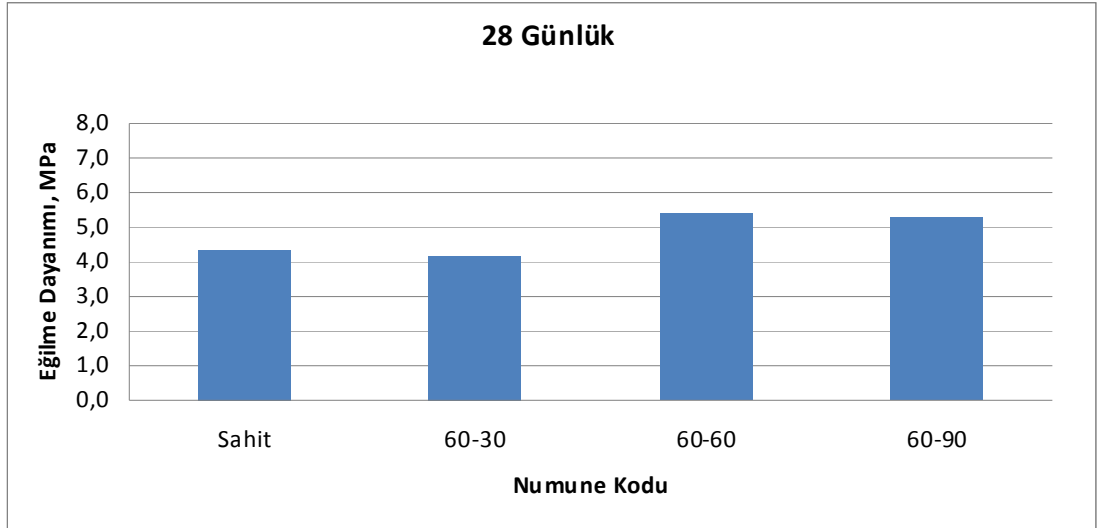
7 günlük numunelerde sabit bağlayıcı miktarına sahip numunelerde cüruf içeren numunelerin eğilme dayanımlarının sadece çimento kullanılan numunelerden daha yüksek, k, etkinlik katsayısının da 1'den büyük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.22: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları



Şekil 4.23: %30 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile hesaplanması.



Şekil 4.24: %60 çimento azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları

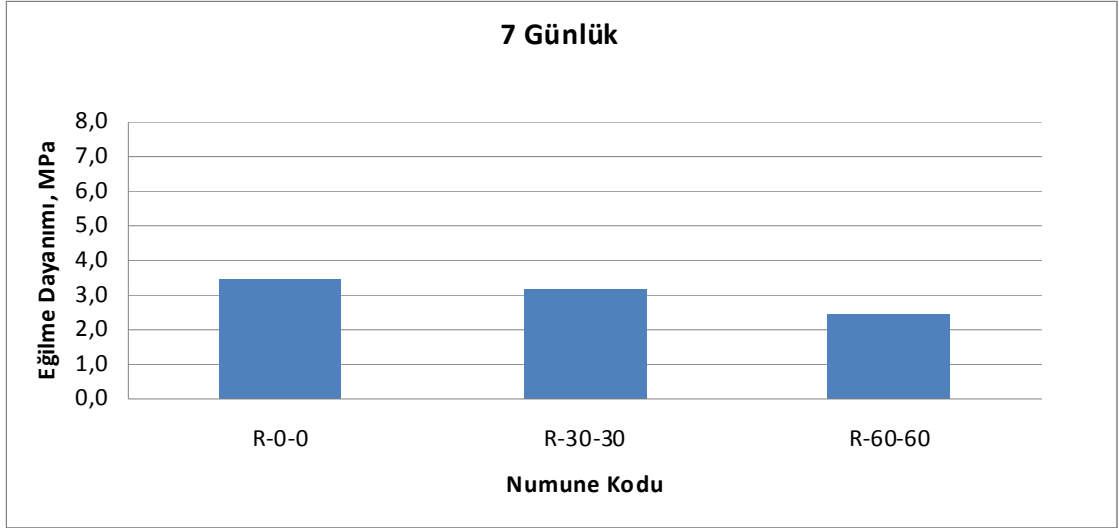
%30 çimento azaltılmış numunelerde toplam bağlayıcı sabitken 28 günlük eğilme dayanımları karşılaştırıldığında, eğilme dayanımları artmaktadır. Korelasyon metodu ile yapılan hesaplarda %30 çimento azaltılmasına karşılık %4 cüruf eklenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu miktarın öngörülen sınırlar içerisinde olmadığı, dolayısıyla bu yaklaşımın eğilme deneyi hesabında kullanılamayacağı ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşımla sadece etkinlik katsayısının 1'den büyük olduğunu söyleyebiliriz. %60 çimento azaltılmış numunelerde 28 günlük eğilme dayanımları değerlendirildiğinde özellikle N-60-90 numunesinde problem olduğu, yeniden üretilmesinin yararlı olacağı sonucuna varılmıştır.

4.3.3.2 CEM I 42,5 R tipi çimento ile yapılan üretimlerin eğilme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri

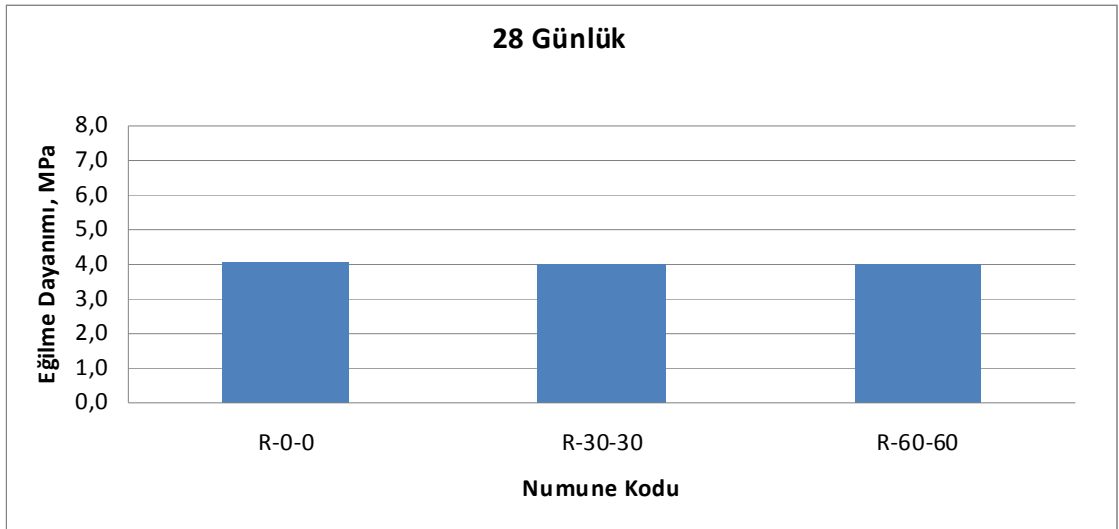
Eğilme deneylerinden elde edilen, eğilme dayanımı değerleri Çizelge 4.7 'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : Eğilme Deneyi Sonuçları

Eğilme Dayanımları (MPa)			
Numune Kodu	7 Günlük	28 günlük	Oran
R-0-0 (şahit)	3,43	4,07	84
R-30-30	3,17	4,00	79
R-60-60	2,42	3,98	61



Şekil 4.25: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımı



Şekil 4.26: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı

Sonuçların Değerlendirilmesi

Eğilme dayanımlarında 7 gün ve 28 gün sonuçlarına göre cüruf etkinliğinin çimento ile aynı olduğu görülmüştür.

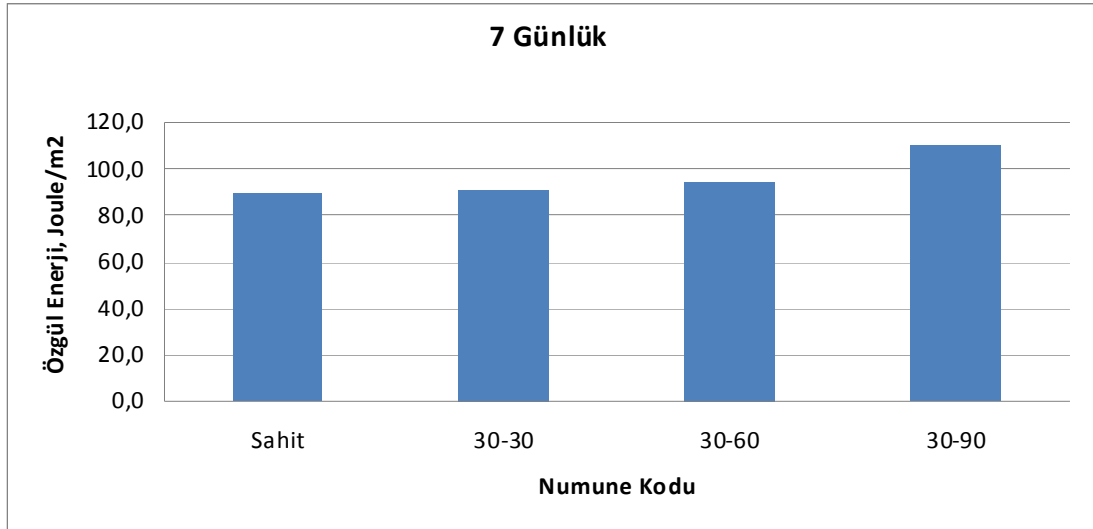
4.3.4 Kırılma enerjisi deney sonuç ve değerlendirmeleri

4.3.4.1 CEM I 42,5 N tipi çimento ile yapılan üretimlerin kırılma enerjisi deney sonuç ve değerlendirmeleri

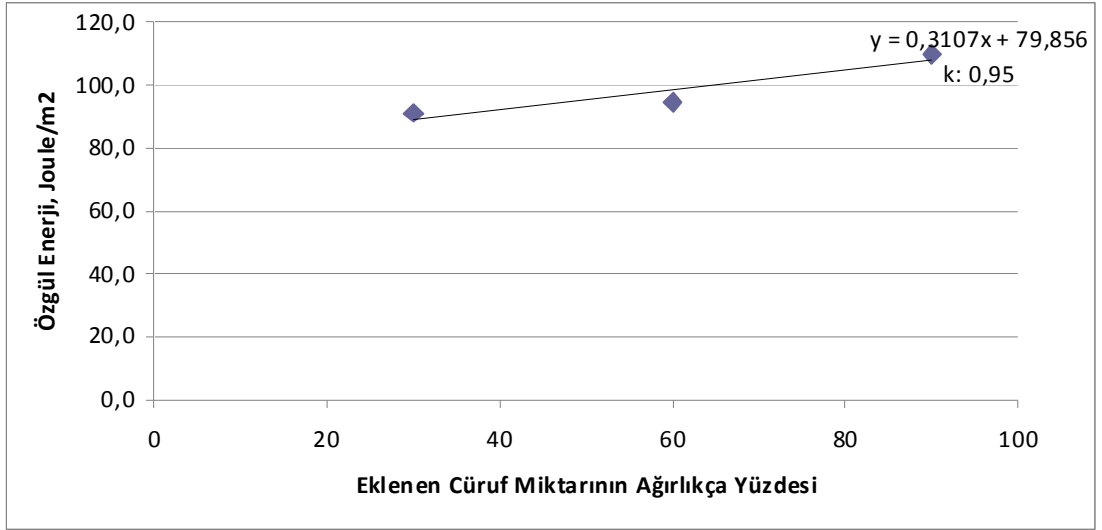
Eğilme deneylerinden elde edilen, Özgül Kırılma Enerjileri Çizelge (4.8)'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 : Özgül kırılma enerjileri (Joule/m²)

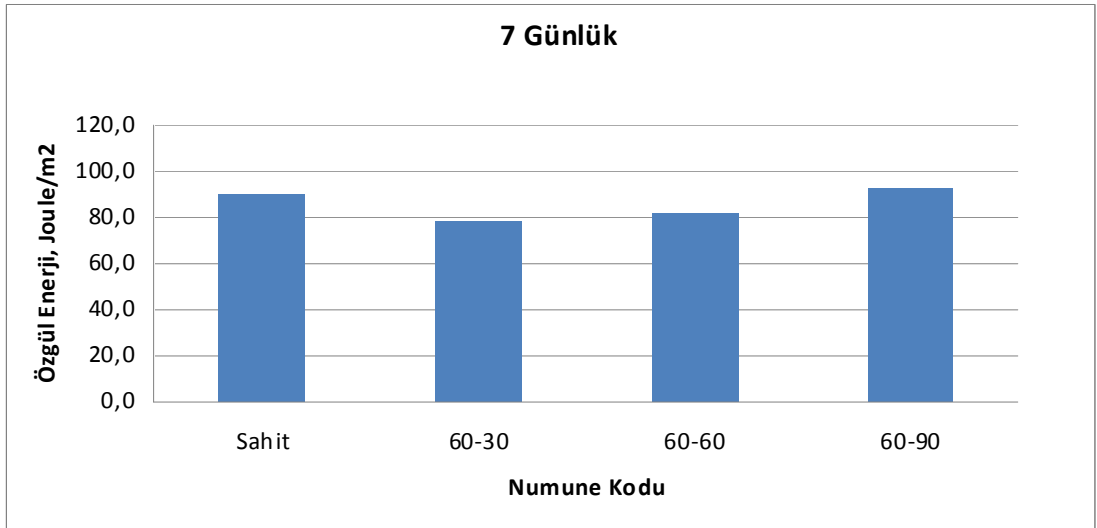
Numune Kodu	7 Günlük	28 Günlük
N-0-0 (şahit)	89,66	75,62
N-30-30	91,13	85,60
N-30-60	94,59	86,64
N-30-90	109,77	91,57
N-60-30	78,56	79,29
N-60-60	81,44	81,22
N-60-90	92,70	90,50



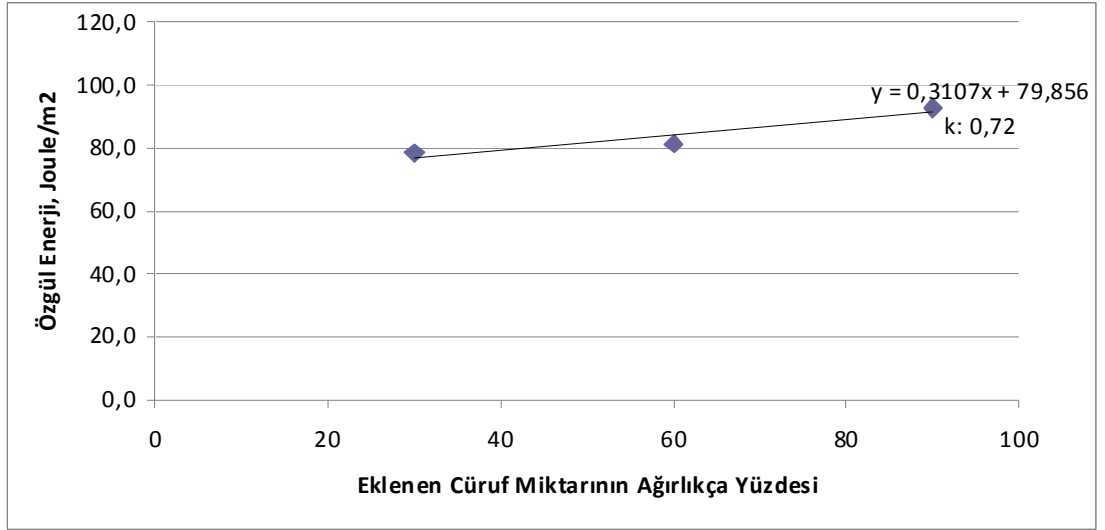
Şekil 4.27: %30 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük kırılma enerjileri



Şekil 4.28: %30 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük kırılma enerjileri için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile bulunması



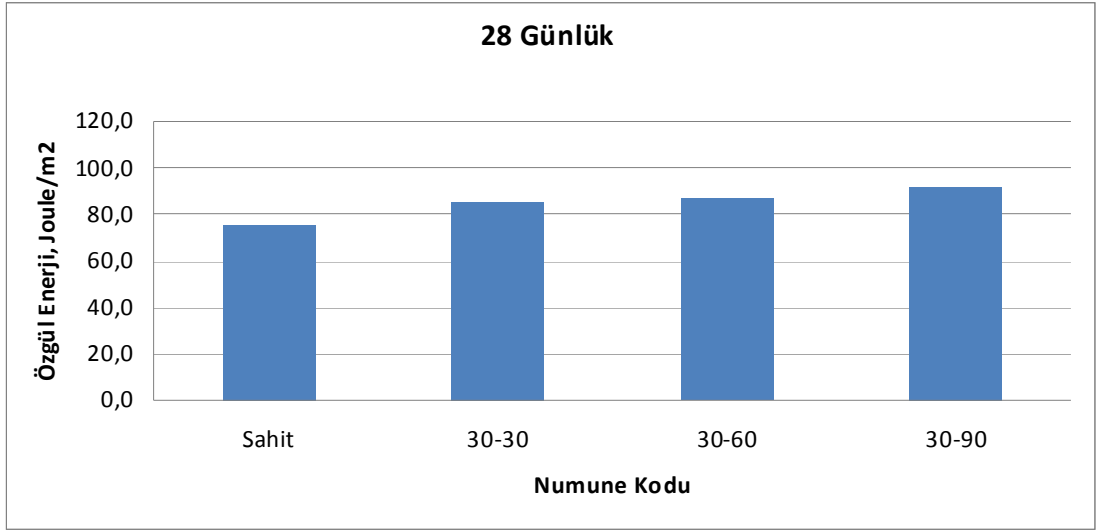
Şekil 4.29: %60 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük kırılma enerjileri



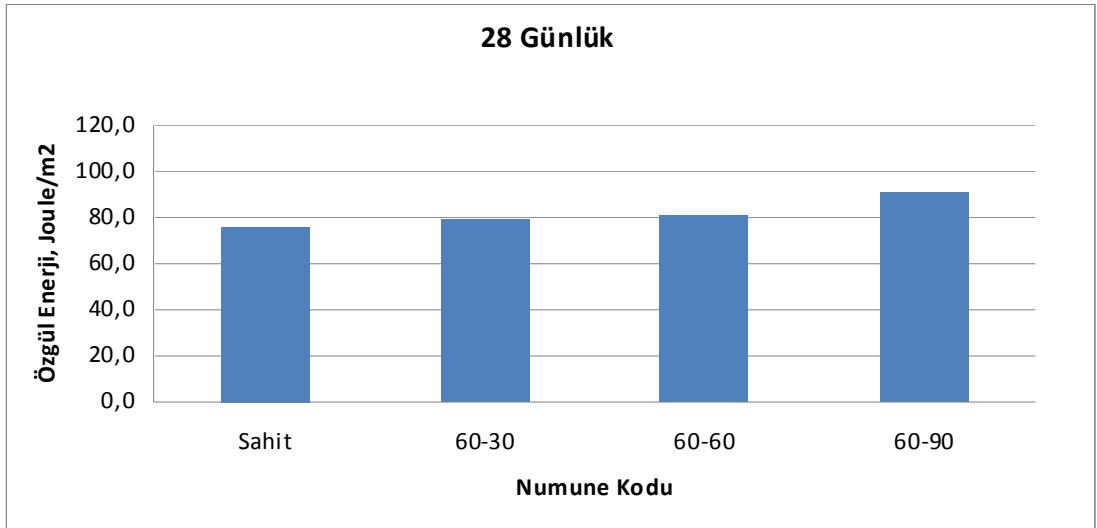
Şekil 4.30: %60 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 7 günlük kırılma enerjileri için k etkinlik katsayısının korelasyon metodu ile belirlenmesi

Sonuçların Değerlendirilmesi

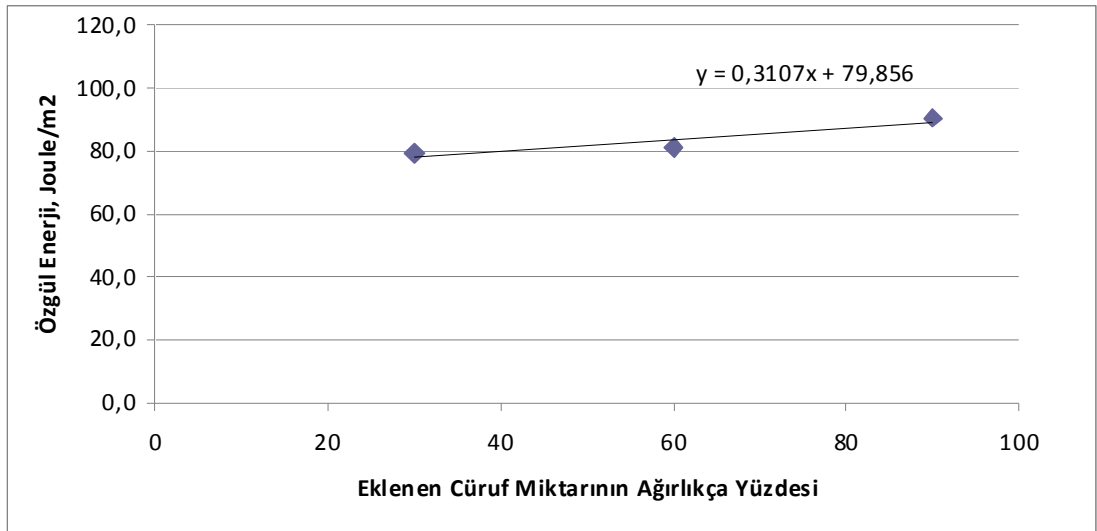
Çimentonun %30 azaltıldığı ve 3 farklı oranda curuf eklendiği üretimlerin 7 günlük kırılma enerjileri incelendiğinde, toplam bağlayıcı içeriğinin ve toplam su içeriğinin sabit tutulması sonucunda özgül kırılma enerjilerinin 90 Joule/m² olduğu görülmüştür. Bu sonuç toplam bağlayıcı içeriği sabitken, curuf içeren betonun 7 günlük enerji yutma yeteneğinin şahit betonla aynı olduğunu başka bir ifade ile etkinlik değerinin 1 olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda curuf içeriğinin artışı ile enerji yutma yeteneğinin de arttığı görülmektedir. Benzer eğilim %60 çimento azaltılan üretimlerde de görülmektedir. Cüruf artışı ile enerji yutma yeteneği artmakta fakat etkinlik katsayısı 1 değerine ulaşamamaktadır. Eğilme deney sonuçları ile uyumlu olmayan kırılma enerjisi değişimleri için mevcut sonuçlar kullanılarak kesin bir sonuca ulaşmak söz konusu olamamaktadır.



Şekil 4.31: %30 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük kırılma enerjileri



Şekil 4.32: %60 çimentosu azaltılmış beton numunelerinin 28 günlük kırılma enerjileri



Şekil 4.33: %60 çimentosu azaltılmış beton numularının 28 günlük kırılma enerjileri için korelasyon metodu ile k etkinlik katsayısının belirlenmesi

Sonuçların Değerlendirilmesi

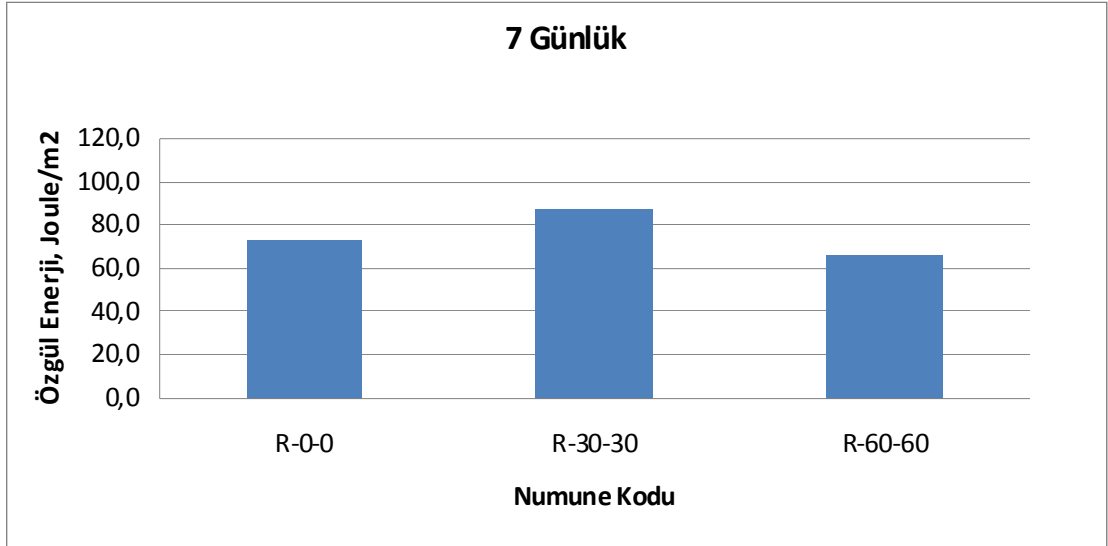
Grafiklerden görüldüğü üzere kırılma enerjileri lineer olarak artmaktadır. Etkinlik katsayılarının hesabında 1'den küçük olduğunu görüyoruz. Şahit numuneyle aynı kırılma enerjisine sahip beton elde etmek için çıkarılan çimento yerine ağırlıkça daha az cüruf eklememiz yeterli olacaktır. Grafiklerden görüldüğü üzere %30-%60 ve %60-%90'luk numunelerin kırılma enerjileri yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Burdan çıkarılacak sonuç şudur ki; bağlayıcı madde miktarı ağırlıkça aynı oranda artırıldığında yaklaşık olarak eşit kırılma enerjisine sahip betonlar elde edilir.

4.3.4.2 CEM I 42,5R tipi çimento ile yapılan üretimlerin kırılma enerjisi deney sonuç ve değerlendirmeleri

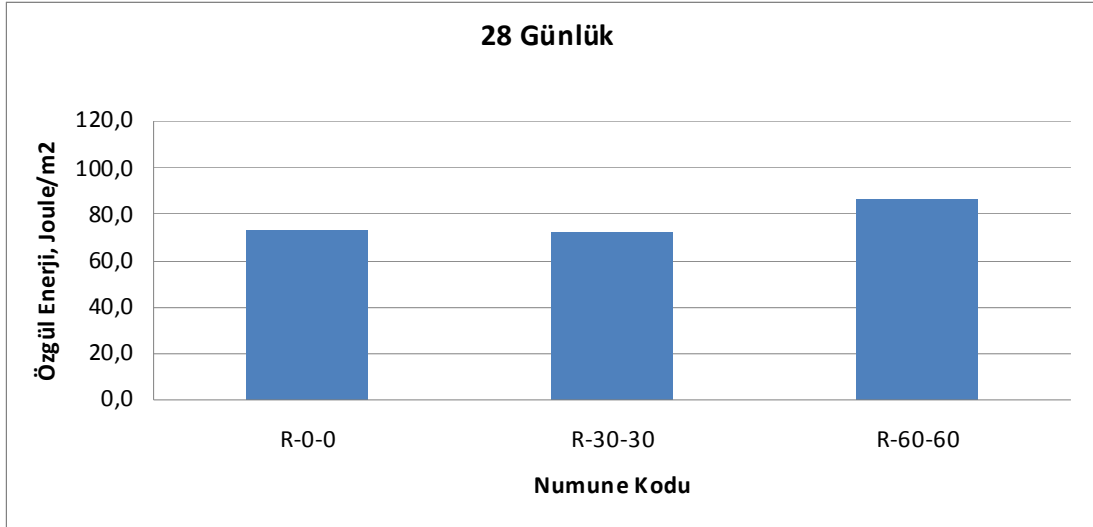
Eğilme deneylerinden elde edilen, Özgül Kırılma Enerjileri Çizelge (4.9)'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 : Özgül kırılma enerjileri (Joule/m²)

Numune Kodu	7 Günlük	28 Günlük
R-0-0 (şahit)	72,66	72,60
R-30-30	87,62	72,27
R-60-60	65,69	86,36



Şekil 4.34: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 7 günlük kırılma enerjileri



Şekil 4.35: %30 ve %60 çimento azaltılmış ve eşit miktarda cüruf eklenmiş beton numunelerinin 28 günlük kırılma enerjileri

Sonuçların Değerlendirilmesi

CEM I 42,5 R tipi çimento ile yapılan deneylerde kırılma enerjilerinin 7 günlük sonuçlarına göre sahite göre yakın değerler elde edilmiştir. 28 günde ise %30 çimento azaltılmış %30 cüruf eklenmiş betonlar için aktivite 1'e çok yakınken %60 çimento azaltılmış %60 cüruf eklenmiş betonlar için ise 1'den büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca cüruf miktarının artması kırılma enerjilerini de arttırmıştır.

4.3.5 Yük-Sehim ilişkisi ile elastisite modülü yaklaşımı ve çatlak riskinin belirlenmesi

Yüksek fırın cürufu kullanılan beton dizaynları için erken yaş (7 günlük dayanım sonuçları) atlak riskinin belirlenmesi için yük-sehim grafikleri çıkarılmıştır (ekler). Bu grafiklerden elde edilen eğim miktarı eğilme dayanımı ile orantılanarak yaklaşık elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Bu değerler izelge 4.10’ da verilmektedir.

Çizelge 4.10: Eğim/Eğilme dayanımı değerleri

Numune Kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğim	Eğim/Eğilme Dayanımı
N-0-0 (şahit)	3,6	53872	14923,0
N-30-30	4,2	58613	13955,5
N-30-60	5,6	71339	12830,8
N-30-90	6,8	68495	10028,6
N-60-30	2,6	47759	18583,3
N-60-60	3,7	62291	16744,9
N-60-90	4,6	59216	12873,0
R-0-0 (şahit)	3,4	55716	16243,7
R-30-30	3,2	51662	16297,2
R-60-60	2,4	40818	16866,9

Betonların erken yaşta çatlama riski betonların maruz kaldığı rötre ve ısıł şekil değiştirmelerden kaynaklanan çekme gerilmelerinin betonun çekme dayanımına oranı ile belirlenebilir. Betonların maruz kaldıkları çekme gerilmeleri elastisite modülleri ile yakından ilgilidir. Betonlar sahip oldukları elastisite modülleri oranınca maruz kaldıkları rötre ve ısıł genleşme şekil değiştirmelerini çekme gerilmelerine dönüştürür. Betonların elastisite modülü gerilme şekil değiştirme eğrisinin lineer olan başlangıç kısmından bulunabilir. Bu çalışmada yk-sehim grafiklerinin (ekler) başlangıç eğimlerinin betonların elastisite modülü ile orantılı olduğu düşünülmüştür. Betonun eğilme dayanımı ise çekme dayanımı ile doğru orantılıdır. Böylece eğilme grafiğinden hesaplanan eğimin betonun eğilme dayanımına oranı betonların erken yaşta çatlama riskleri hakkında fikir vermektedir. Çizelge 4.10’ da görülen sonuçlarda % 30 ve % 60 imento azaltılmış beton numunlerinde özellikle N tipi imento kullanılan betonlarda crufsuz şahit betona göre eėim/eğilme değerlerinin küçüldüğü dolayısı ile beton erken yaştaki çatlak riskinin azaldığı görülmüştür.

5. GENEL SONUÇLAR

1. Basınç dayanımı deney sonuçları (28 günlük) incelendiğinde 300 kg/m³ çimento dozajına sahip üretimlerin basınç dayanımlarının, çimentonun cüruf ile %30 ve %60 oranında ikame ettiği betonların basınç dayanımlarına eşit olduğu ve cürufun etkinliğinin 1 olduğu görülmektedir.

3. Basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde (7 günlük) cürufun etkinliğinin, ağırlıkça %30 ve %60 oranında çimento azaltılan üretimlerde 1'den küçük olduğu görülmektedir. İkincil bağlayıcı özelliğe sahip olan bileşenlerin betonda kullanılması söz konusu olduğunda, puzolanik reaksiyon için gerekli olan serbest kirecin erken yaşta yeteri kadar açığa çıkmamasından dolayı etkinliğin azaldığı görülmektedir.

4. Yarma-çekme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde (28 günlük) cürufun etkinliğinin, ağırlıkça %30 ve %60 oranında çimento azaltılan ve eşit miktarda cüruf eklenen üretimlerde 1 olduğu görülmektedir.

5. Yarma-çekme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde (7 günlük) cürufun etkinliğinin, ağırlıkça %30 ve %60 oranında çimento azaltılan üretimlerde 1'den küçük olduğu görülmektedir. Basınç dayanımlarının değişiminde de olduğu gibi puzolanik reaksiyon için gerekli olan yeterli miktarda serbest kirecin oluşmadığı düşünülmektedir.

6. Eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde (28 günlük) cürufun etkinliğinin, ağırlıkça %30 ve %60 oranında çimento azaltılan üretimlerde 1'den büyük olduğu görülmektedir. N-60-90 kodlu numunelerin eğilme dayanımları diğer deney sonuçlarından elde edilen hiçbir eğilime paralellik göstermemektedir. Bu üretimlerin tekrarlanması gerektiği kanısına varılmıştır.

7. Eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde (7 günlük) çimento içeriğinin %60 azaltıldığı numunelerde açığa çıkan serbest kireç miktarının yeterli olmaması ve puzolanik reaksiyonların tamamlanamamasından dolayı etkinliğin 1'den küçük olduğu görülmektedir.

8. Eğilme dayanımlarındaki genel eğilim cüruf içeriği arttıkça eğilme dayanımının da arttığını göstermektedir.

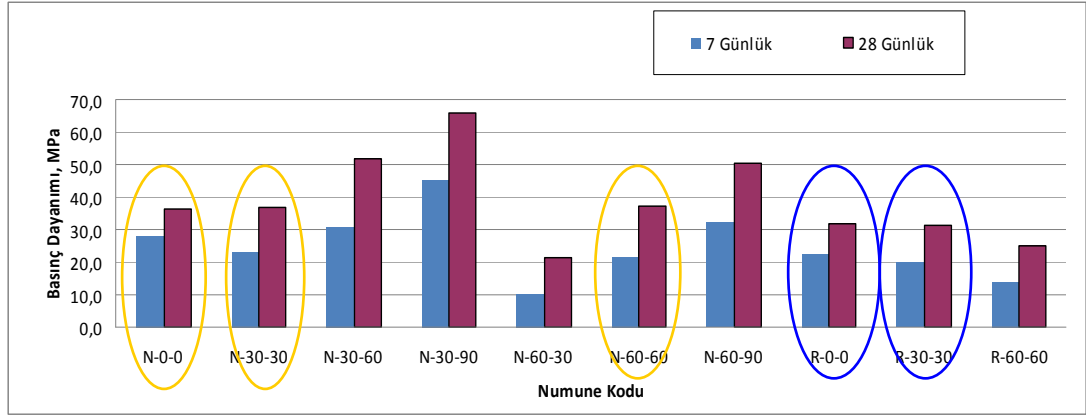
9. Özgöl kırılma enerjilerinin değışimi incelendiğinde cüruf içeriğinin kırılma enerjisini ve sünekliğı arttırdığı görölmektedir.
10. CEM I 42,5 N çimentosu ile üretilen betonlara ait deneylerde 28 günlük basınç ve yarma deneyleri cürufun aktivitesinin 1 olduğunu göstermiş, eğilme deneylerinde 1 den büyük olduğu gözlemlenmiştir. CEM I 42,5 R çimentosu ile üretilen betonlara ait deneylerde 28 günlük basınç, yarma, eğilme deneyleri ve kırılma enerjileri %30 çimento azaltılıp cüruf eklenen betonlarda eşit sonuçlar vermiş aktivitenin 1 olduğu görölmüş, %60 çimento azaltıp cüruf eklenen betonlarda ise değışiklik göstermiştir.
11. Karışımlardaki cüruf miktarı arttıkça betonun erken yaştaki çatlama riski azalmaktadır.
12. Karışımlarda kullanılan cürufun çimentonun davranışına yakın bir performans sergilediğı görölmektedir. 5500 cm²/g blaine değerine sahip olan söz konusu cürufun inceliğinin çimentodan daha fazla olması ve reaktif karakterinden dolayı bir çok performans kriteri göz önüne alındığında etkinlik katsayısının 1 olduğu görölmektedir. Cürufun ince öğütölmesinin yanısıra ani soğutulması sayesinde amorf yapı oluşmakta ve bu yapı cürufun reaktif karakterini arttırmaktadır. Bu nedenle erken yaşlarda dahi cürufun etkinliğinin yüksek olduğu yapılan deneyler sonucu görölmektedir.
13. Karışımlarda kullanılan cürufun ince öğütölmesi, proses olarak ani soğutma yapılması ile daha reaktif hale gelmesi bu cürufun betonun mekanik özelliklerini de iyileştirmesi sebebiyle benzer bir yüksek fırın cürufunun betonda kullanımı tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

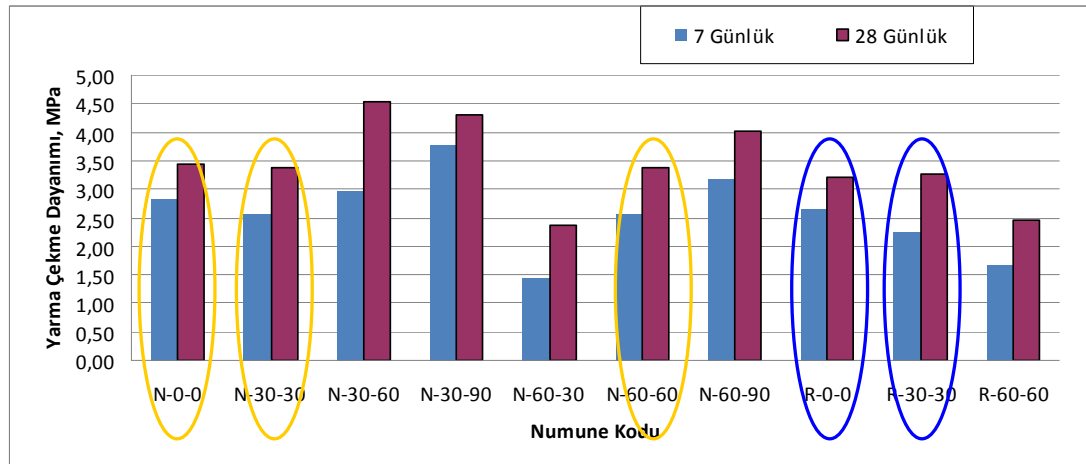
- [1] **Akkaya, Y., Bayramov, F. and Taşdemir, M. A.,** 2003. Betonun kırılma mekaniği, Türkiye mühendislik haberleri, 426, s. 70 – 77.
- [2] **Bartos, P.,** 1992, Fresh concrete and tests, Elsevier, Amsterdam.
- [3] **Cen Tc 104 SC1,** 31 January 2000. K-value determination for type II additions, Arnherm, Holland.
- [4] **D.G. Mantel,** September-October 1994. Investigation into the hydraulic activity of five granulated blast furnace slags with eight different portland cements ACI materials journal, V.91, No.5.
- [5] **Doğan, Ü., A.,** 2000. Yeni kuşak süper akışkanlaştırıcıların harç ve beton özelliklerine etkisi, Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [6] **E. Douglas, A. Bilodeau, and V.M. Malhotra,** September-October 1992. Properties and durability of alkali-activated slag concrete ACI materials journal, V.89, No.5.
- [7] **Erdoğan, T.Y.,** Mayıs 2003. Beton, O.D.T.Ü. İnşaat mühendisliği bölümü matbaası, Ankara.
- [8] **K. Ganesh Babu and V. Sree Rama Kumar,** 28 September 2000. Efficiency of GGBS in concrete cement and concrete research.
- [9] **Lea, F.M.,** 1970. The chemistry of cement and concrete edward arnold (Publishers) Ltd., Glasgow.
- [10] **P.S Mangat and J.M. Khatib,** September-October 1995. Influence of fly ash, silica fume and slag on sulfate resistance of concrete ACI materials journal, V.92, No.5.
- [11] **Rilem Draft Recommendation TC 50 - FMC,** 1996. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three - point bend tests on notched beams.
- [12] **Şengül, C.,** 2005. Kendiliğinden yerleşen çelik lif donatılı betonların mekanik davranışına su/ince malzeme oranı ile lif dayanımının etkisi, *Yüksek lisans tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] **Şengül, Ö., Taşdemir, M.A. ve Sönmez, R.,** 1-3 Ekim 2003. Yüksek oranda uçucu kül içeren normal ve yüksek dayanımlı betonların klor geçirimsizliği, V. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, s. 75 – 86.

- [14] **Taşdemir, M.A.**, 2003. Fracture mechanics lecturer notes, İstanbul.
- [15] **Tattershal, G. H.**, 1991. Workability and quality control of concrete, E&F, N. Spon Ed., London.
- [16] **Tokyay, M., Şahmaran, M., Yaman, İ., Ö.**, 2004. Yeni nesil yüksek akışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile yüksek hacimde uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen beton, *Beton 2004 Kongresi*, THBB, İstanbul, 10-12 Haziran, s. 213-225.
- [17] **Tokyay, M., Erdoğan, K.**, 1997. “Cüruflar ve cürufllu çimentolar”, TÇMB/AR-GE/Y97.2, Ankara.
- [18] **Türkiye Çimento Mühtasilleri Birliği, Çimento Bülteni**, 1982. Cürufllu çimentoların mikroyapısı. Cilt 19. Sayı 178. Sayfa 20-30.
- [19] **Venuat, M. Et Papadakis M.**, 1961. Controle et essais des ciments, Mortiers, Betons. editions eyrolles, Paris.
- [20] **V.G. Papadakis, S. Tsimas**, 28 June 2001. Supplementary cementing materials in concrete part 1: efficiency and design cement and concrete research.
- [21] **Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu**, 2007. İnşaat mühendisleri odası şube yayınları, Ankara.
- [22] **Yeğinoğlu, A.**, 2002. Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı, TÇMB/AR-GE/Y01.01, Ankara.
- [23] **Young-Jin Kwon**, 3 March 2004. A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect cement and concrete research.

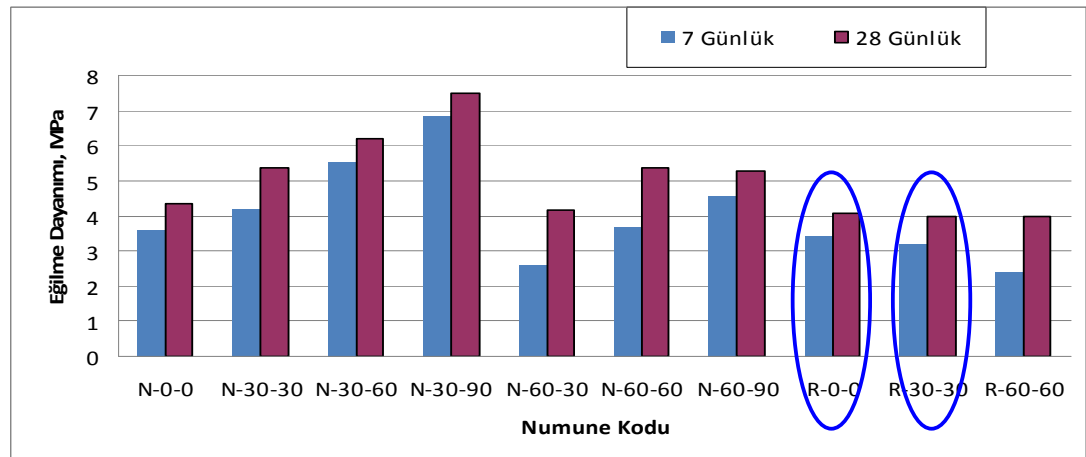
EKLER



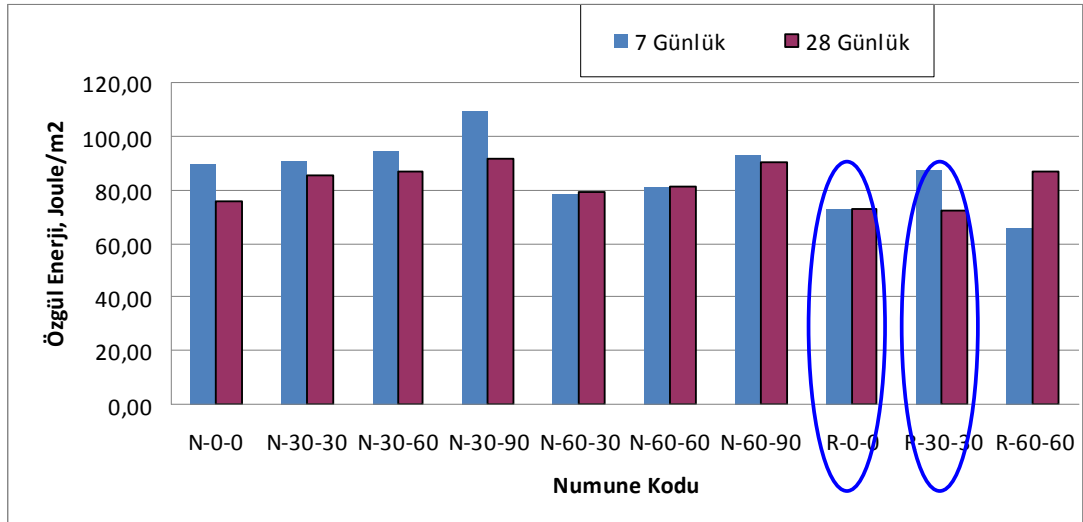
Şekil A.1: N ve R tipi çimentolar ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımları



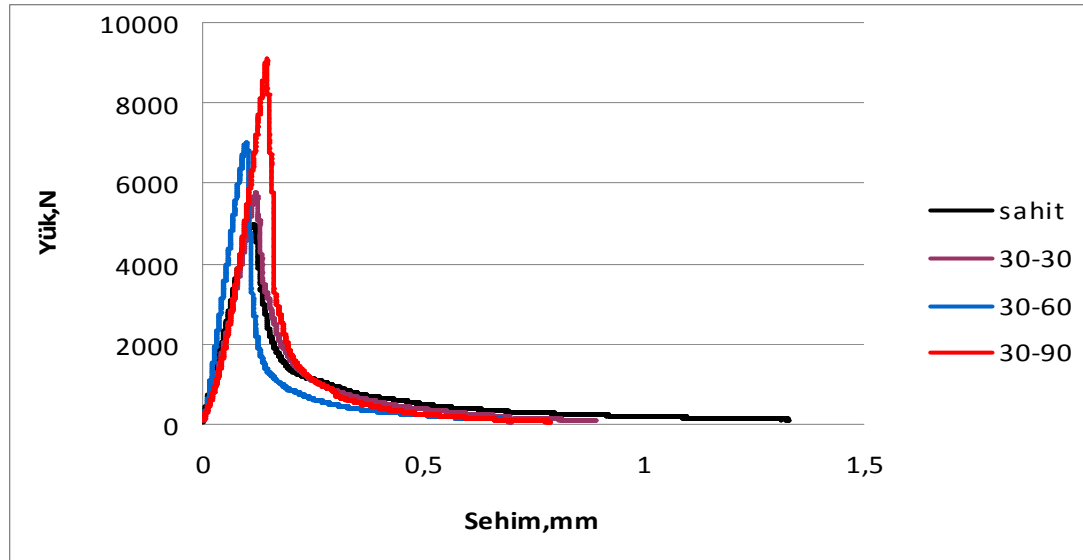
Şekil A.2: N ve R tipi çimentolar ile 7 ve 28 günlük yarma çekme dayanımları



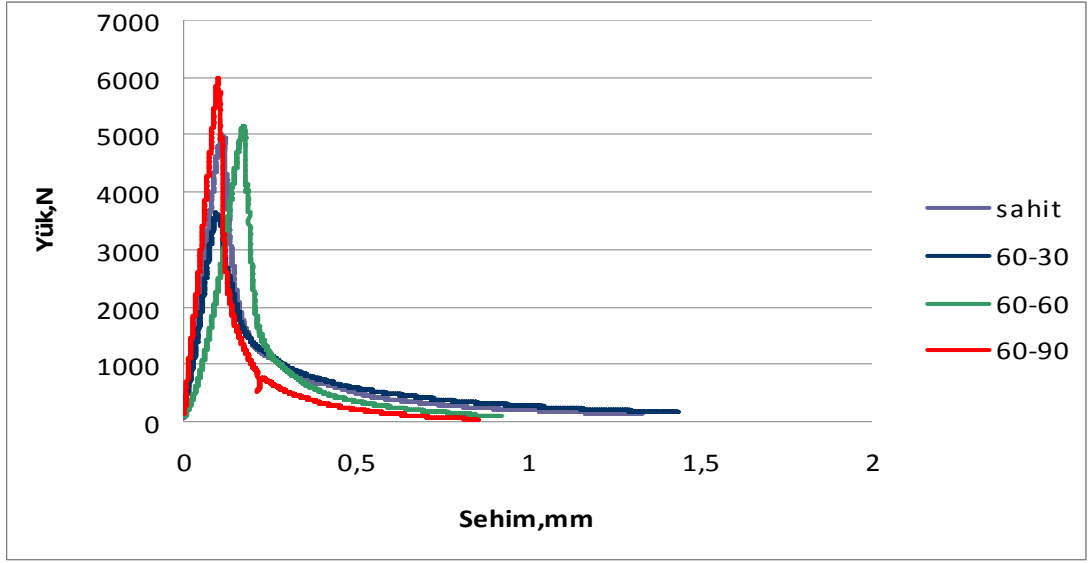
Şekil A.3: N ve R tipi çimentolar ile 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları



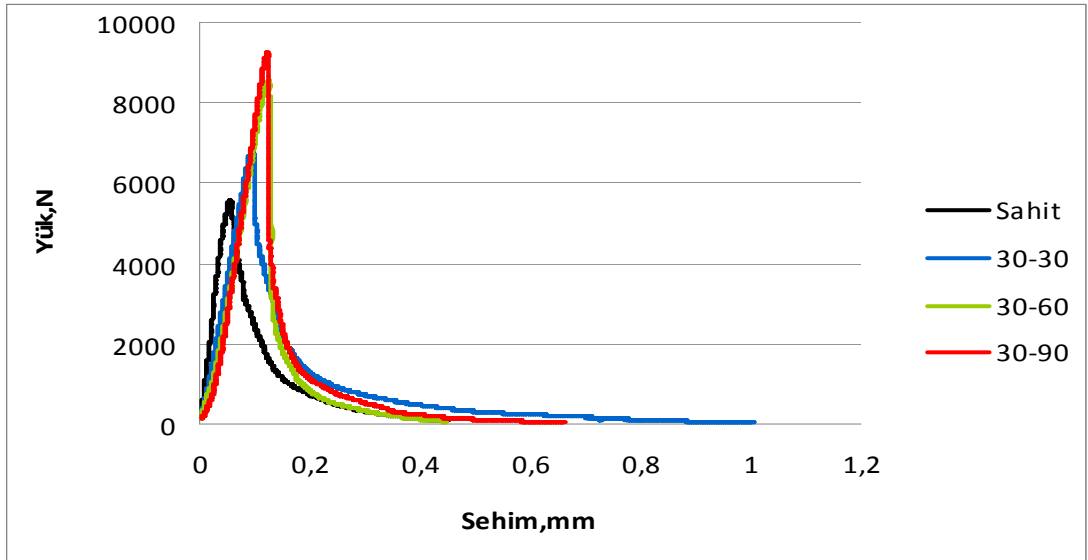
Şekil A.4: N ve R tipi çimentolar ile 7 ve 28 günlük kırılma enerjileri çizelgesi



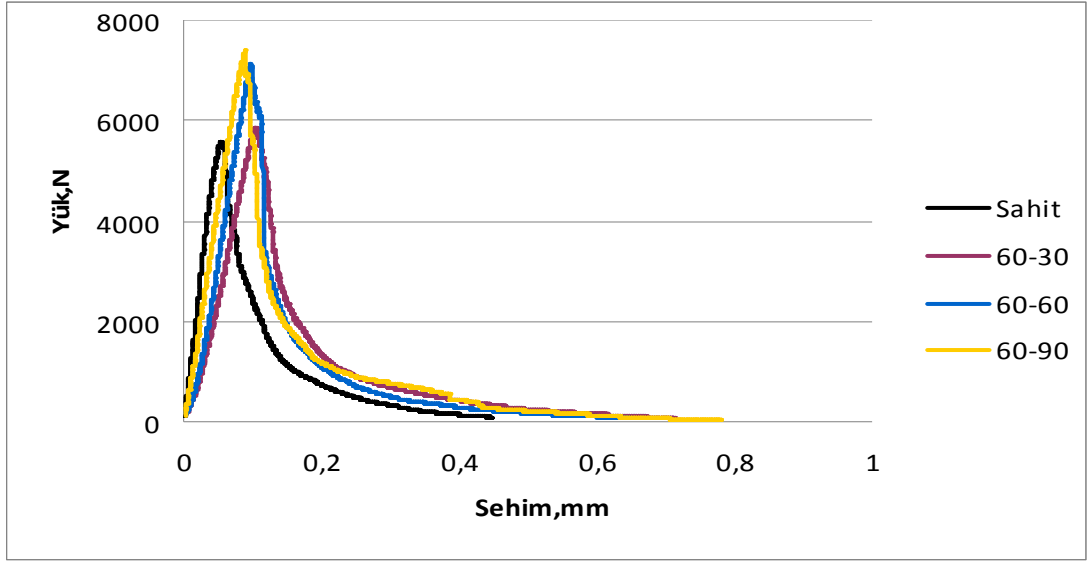
Şekil A.5: N Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %30 çimento azaltılmış %30,60,90 cüruf eklenmiş numunelerin 7 günlük yük-sehim ilişkileri



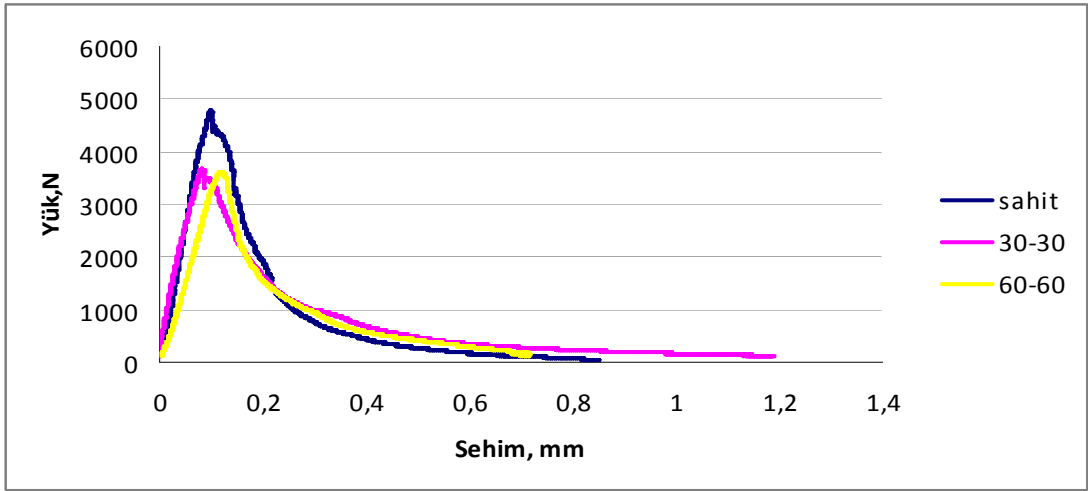
Şekil A.6: N Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %60 çimento azaltılmış %30,60,90 cüruf eklenmiş numunulerin 7 günlük yük-sehim ilişkileri



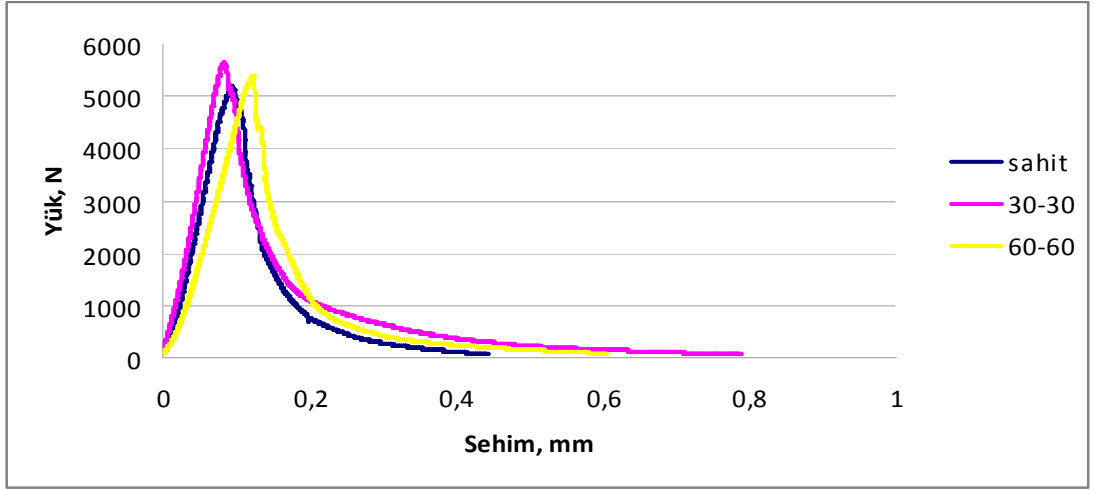
Şekil A.7: N Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %30 çimento azaltılmış %30,60,90 cüruf eklenmiş numunulerin 28 günlük yük-sehim ilişkileri



Şekil A.8: N Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %60 çimento azaltılmış %30,60,90 cüruf eklenmiş numunelerin 28 günlük yük-sehim ilişkileri



Şekil A.9: R Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %30 ve %60 çimento azaltılmış eşit miktarda cüruf ikame edilmiş numunelerin 7 günlük yük-sehim ilişkileri



Şekil A.10: R Tipi Çimento ile yapılan üretimlerde %30 ve %60 çimento azaltılmış eşit miktarda cüruf ikame edilmiş numunelerin 28 günlük yük-sehim ilişkileri

ÖZGEÇMİŞ

Lütfiye KOCABIYIK, 1984 yılında İstanbul’da doğdu. İlkokul öğrenimini 12 Eylül İlköğretim Okulu’nda bitirdi. Liseyi ise Özel Bilgi Lisesi’nde tamamladı. 2002 yılında İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümüne girdi. 2004 senesinde İ.Ü. Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde çift anadal programına başladı. 2006 senesinde tamamladığı Çevre Mühendisliği lisans öğreniminden sonra 2007 senesinde de İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2008-2009 güz yarıyılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı Yapı Mühendisliği Programında yüksek lisans öğrenimine başladı. Öğrenimine halen devam etmektedir.