

155652

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI KATKILI YOL BETONLARININ
DAYANIM VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Engin YENER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM

2004

Her hakkı saklıdır

Yrd. Doç. Dr. Sinan HINISLIOĞLU danışmanlığında Engin YENER tarafından hazırlanan bu çalışma 09.09.2004 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Sinan HINISLIOĞLU

İmza :

Üye : Prof. Dr. Sadri ŞEN

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mahir GÖKDAĞ

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylarım

(İmza)

Prof. Dr. Mehmet ERTÜĞRÜL
Enstitü Müdürü

M. Ertüğürlü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI KATKILI YOL BETONLARININ DAYANIM VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Engin YENER

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Sinan HINISLIOĞLU

Türkiye’de yolcu ve yük taşımacılığının çok büyük bir kısmı karayolu ağında yapılmaktadır. Bu nedenle; karayolu trafik hacmi ve trafik içindeki ağır taşıt sayısı hızla artmaktadır. Esnek üst yapılar, bu yoğun ve ağır trafiği karşılayamayıp beklenen dizayn ömründen önce büyük onarımlara ihtiyaç duymaktadır. Bunun sonucunda esnek üstyapıya alternatif olarak beton yollar ülke gündemine girmiştir.

Beton yolların trafik yüklerini taşıyabilmesi, çevre koşullarına direnebilmesi ve ekonomik olması istenmektedir. Bunu sağlayabilmek için rijit kaplamayı oluşturan betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada; çimento yerine ağırlıkça %0 , %5 , %10 oranlarında Silis Dumanı (SD) ve %0 , %5 , %10 , %15 oranlarında Uçucu Kül (UK) katılarak 12 farklı karışım hazırlanmıştır. Bu karışımların bazı dayanım ve dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır.

Dayanım kriteri olarak eğilme mukavemeti alınmış ve 7 , 28 , 91 günlük mukavemet değerleri tespit edilmiştir. Eğilme deneyleri sonucunda elde edilen verilere göre; SD ve UK, ayrı ayrı veya birlikte kullanılmaları durumunda eğilme mukavemetlerinde artışlar sağlamıştır. En yüksek 7 günlük mukavemet değeri %0SD-%15UK karışımında, en yüksek 28 günlük mukavemet değerleri %10SD-%10UK ile %5SD-%15UK karışımlarında ve en yüksek 91 günlük mukavemet değerleri %5SD-%15UK ile %5SD-%10UK karışımlarında gözlenmiştir.

Dayanıklılık değerlendirmesi için donma-çözülme (D-Ç) direnci kriteri alınmıştır. Arazide beton yollar ısınma ve soğumaya yol yüzeyinden tek yönlü ısı geçişiyle maruz kalırlar ve buz çözücü tuzlar da bu yüzeyden beton kaplamaya nüfuz eder. Arazideki bu durumu en iyi şekilde temsil edecek bir donma-çözülme deney düzeneği hazırlanmış ve donma-çözülme direncinin değerlendirilmesinde esas parametre olarak numune yüzeylerinde oluşan pullanma kullanılmıştır.

D-Ç deneyi sonucunda elde edilen verilere göre; SD ve UK katkılı tüm numuneler katkısız numunelerden daha yüksek D-Ç direnci sağlamıştır. UK içermeyen karışımlarda kullanılan SD, D-Ç direncinde büyük artışlar sağlamıştır. UK içeren karışımlarda SD kullanılması durumunda da D-Ç direnci artmıştır. Ancak; UK oranı arttıkça SD’nın D-Ç direncine sağladığı katkı azalmıştır. UK kullanılması durumunda D-Ç direncinde az miktarda bir artış gözlenmiştir. Tüm karışımlar içinde en yüksek D-Ç direncini %10SD-%10UK içerikli karışım sergilemiştir.

2004, 93 sayfa

Anahtar kelimeler: Beton yol, silis dumanı, uçucu kül, eğilme dayanımı, dayanıklılık, donma çözülme direnci, buz çözücü tuz etkisi.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF STRENGTH AND DURABILITY CHARACTERISTICS OF CEMENT CONCRETE PAVEMENTS WITH FLY ASH AND SILICA FUME

Engin YENER

Atatür University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Sinan HINISLIOĞLU

A very big part of the passenger and goods transportation in Türkiye has been doing on road network. Accordingly, the traffic volume on highways and the number of heavy vehicles in traffic are increasing rapidly. Flexible pavements could not bear that dense and heavy traffic. Early deterioration problems were observed on flexible pavements. As a result, rigid pavements have been a current issue as an alternative to flexible pavements.

Rigid pavements should bear heavy traffic loads, and should resist the environmental conditions. To ensure that, cement concrete which constitutes the rigid pavement should have adequate strength and durability.

Silica fume (SF) and fly ash (FA) were used respectively in proportions of %0, %5, %10 and %0, %5, %10, %15 as cement replacement by weight in mixes. Thus, 12 different mixes were prepared and investigated the strength and durability characteristics of these mixes in this study.

The flexural strengths of samples at 7, 28 and 91 days were determined to evaluate the strength characteristics of the mixes. According to the flexural strength test results, silica fume and fly ash additives achieved some extra strengths in comparison to the %100 portland cement concrete sample. The maximum flexural strength at 7, 28 and 91 days were acquired from respectively %0SF-%15FA, %5SF-%15FA and %5SF-%0FA mix compositions.

Freeze-thaw (F-T) resistance were used to evaluate the durability. In the field, Concrete pavements are exposed to freezing and thawing by a uniaxial heat flux through the direction from the pavement surface to the bottom of the pavement. A test mechanism which will be able to be representative for the field situation was prepared. Scaling which is the loss of material at the surface of concrete due to freeze-thaw deicing agent attack was used to evaluate the freeze-thaw resistance.

According to the freeze-thaw test results, all the specimens containing SF and FA performed better freeze-thaw resistance than the reference specimens. SF addition to mixes free from FA increased the freeze-thaw resistance effectively. Additional F-T resistance by SF decreased as increasing FA addition.

According to the freeze-thaw test results, Silica Fume and FA increased the freeze-thaw resistance. But, silica fume comparing to fly ash is much more effective reducing the freeze-thaw deterioration. Among all mixtures, the specimens containing %10SF-%0FA performed the best freeze-thaw resistance.

2004, 93 sayfa

Keywords : Concrete pavement, silica fume, fly ash, flexural strength, durability, freeze-thaw resistance, deicing agent effect.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarımın her aşamasında değerli fikirleri ve yönlendirmeleriyle bana kılavuzluk eden danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Sinan HINISLIOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmama vermiş olduğu burs ve doküman katkıları ile destek olan Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'ne teşekkür ederim.

Değerli bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim Sayın Yrd. Doç. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA'ya, yakın ilgi ve desteğini esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Mahir GÖKDAĞ'a, Araş. Gör. O. Ünsal Bayrak'a, Sayın Araş. Gör. Hatice Nur Aras'a, bölümün ve fakültenin teknik imkanlarını çalışmalarım için kullanmamı sağlayan İnş. Müh. Böl. Bşk. Vk. Yrd. Doç. Dr. Ayla P. Amil'e, dekanlık yetkililerine ve tüm bölüm elemanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel aşamada, laboratuarda ve malzeme temininde yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Sayın İnş. Yük. Müh. Abdülhamit KANTARCI ve Sayın İnş. Müh. İsmail TAKIM'a teşekkür ederim.

Engin YENER

Nisan 2004

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Karayolu Üstyapıları	2
1.1.1. Esnek Üstyapı	3
1.1.2. Rijit Üstyapı	5
1.1.3. Esnek ve Rijit Üstyapının Karşılaştırılması	6
1.1.3.1. Trafik	7
1.1.3.2. Dış Yüklerin Taban Zeminine İletilmesi	7
1.1.3.3. Malzeme	7
1.1.3.4. İklim	8
1.1.3.5. Trafiğin Engellenmesi	8
1.1.3.6. Yolu Kullananların Harcamaları	9
1.1.3.7. Finansman Kaynakları	9
1.1.3.8. Enerji Tüketimi	9
1.1.3.9. Toplam Ekonomik Maliyet	10
1.2. Beton	12
1.2.1. Beton Özellikleri	13
1.2.1.1. Segregasyon (Ayrışma)	13
1.2.1.2. İşlenebilme	14
1.2.1.3. Kıvam	15
1.2.1.4. Çökme değeri	15
1.2.1.5. Su İhtiyacı	15
1.2.1.6. Priz Alma ve Priz Süresi	16
1.2.1.7. Terleme	16
1.2.1.8. Beton Dayanımı	18

1.2.1.9. Betonun Dayanım Kazanma Hızı	18
1.2.1.10. Betonun Dayanıklılığı	19
1.2.1.11. Donma-Çözülme Etkisi	20
1.2.1.12. Beton Yüzeyinin Pullanması	21
1.2.1.13. Ekonomiklik	21
1.3. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler	22
1.3.1. Çimento	22
1.3.2. Agregalar	25
1.3.3. Su	27
1.3.4. Beton Katkı Maddeleri	28
1.3.4.1. Kimyasal Katkı Maddeleri	28
1.3.4.2. Hava Sürükleyici Katkı Maddeleri	28
1.3.4.3. İnce Taneli Mineral Katkı Maddeleri	29
1.3.5. Silis Dumanı	29
1.3.5.1. Silis Dumanının Su İhtiyacı ve Kıvama Etkisi	30
1.3.5.2. Silis Dumanının Hamur - Agrega Arayüzeyine Etkisi	30
1.3.5.3. Silis Dumanının Betonun Birim Ağırlığına Etkisi	32
1.3.5.4. Silis Dumanının Betonun Basınç Dayanımına Etkisi	32
1.3.5.5. Silis Dumanının Betonun Çekme ve Eğilme Dayanımlarına Etkisi	34
1.3.5.6. Silis Dumanının Betonun Geçirgenliğine Etkisi	34
1.3.5.7. Silis Dumanının Betonun Zararlı Kimyasallara Direncine Etkisi	36
1.3.5.8. Silis Dumanının Alkali – Agrega Reaksiyonuna Etkisi	37
1.3.5.9. Silis Dumanının Betondaki Çelik Donatının Korozyonuna Etkisi	37
1.3.5.10. Silis Dumanının Betonun Donma-Çözülme Direncine Olan Etkisi	38
1.3.5.11. Silis Dumanının Betonun Aşınmaya Karşı Direncine Olan Etkisi	39
1.3.6. Uçucu Kül	39
1.3.6.1. Uçucu Külün Beton Karışımının Su İhtiyacına Etkisi	40
1.3.6.2. Uçucu Külün İşlenebilmeye Etkisi	40
1.3.6.3. Uçucu Külün Dayanıma Etkisi	41
1.3.6.4. Uçucu Külün Betonun Ekonomikliğine Etkisi	41
2. KAYNAK ÖZETLERİ	42

3. MATERYAL VE YÖNTEM	49
3.1. MATERYAL	49
3.1.1. Çimento	49
3.1.2. Silis Dumanı	50
3.1.3 Uçucu Kül	50
3.1.4. Agrega	52
3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı	56
3.1.6. Karışım Suyu	57
3.2. Malzemelerin Karışımlarda Kullanım Oranları	57
3.3. Deney Örneklerinin Üretimi	59
3.4. Deney Örneklerinin Sayı ve Boyutları	59
3.2. YÖNTEM	60
3.2.1. Donma Çözülme Deneyi	60
3.2.1.1. Genel Kapsam	60
3.2.1.2. Tanımlar	61
3.2.1.3. Gereçler	62
3.2.1.4. Numunelerin Hazırlanması	66
3.2.1.5. Deney Prosedürü	67
3.2.1.6. Kuru depolama (dry storage)	67
3.2.1.7. Ön doyurma (pre-saturation)	67
3.2.1.8. Donma çözülme çevrimleri	69
3.2.1.9. Pullanma ölçümleri	70
3.2.2. Birim Hacim Ağırlıkların Tespiti	71
3.2.3. Kılcal Su Emme Miktarlarının Tespiti	71
3.2.4. Eğilme Dayanımlarının Tespiti (Eğilmede Çekme Dayanımı)	71
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	86
4.1. Ağırlık Değişimlerine İlişkin Bulgular	74
4.2. Birim Hacim Ağırlıklara İlişkin Bulgular	76
4.3. Kılcal Geçirimsizliğe İlişkin Bulgular	78
4.4. Donma-Çözülme Sonucu Oluşan Pullanmaya İlişkin Bulgular	80
4.5. Eğilme Dayanımına İlişkin Bulgular	82

5. SONUÇ	87
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	93



SİMGELER DİZİNİ

ACI	American Concrete Institute
BHA	Birim Hacim Ağırlık
C2S	Dikalsiyum Silikat
C3A	Trikalsiyum Aluminat
C4AF	Tetrakalsiyum Alüminoferrat
CDF	Capillary suction, Deicing agent, Freeze thaw cycles
CH	Kalsiyum Hidroksit
CIF	Capillary suction, Internal damage, Freeze thaw cycles
C-S-H	Kalsiyum Silika Hidrat
FA	Fly Ash
IDOT	Iowa Department of Transportation
P	Eğilme deneyinde kiriş numunelerin kırılma yükü
RRL	İngiltere yol araştırma laboratuvarı
s/b	Su / Bağlayıcı oranı
SD	Silis dumanı
σ _e	Eğilme dayanımı (kgf/cm ²)
SF	Silica fume
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TRR	Transportation Research Records
UK	Uçucu Kül
V	Hacim
W	Ağırlık

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Esnek Kaplama Tabakaları	4
Şekil 1.2. Esnek üstyapıda tekerlek yüklerinin zemine aktarılışı	4
Şekil 1.3. Rijit Kaplamalarda Taban Zeminindeki Yük Dağılımı	5
Şekil 1.4. Rijit Kaplama Tipleri	6
Şekil 1.5. Silis dumanı katkısının arayüzeye etkisi	32
Şekil 1.6. Silis dumanı katkısının beton basınç dayanımına etkisi	33
Şekil 1.7. Silis dumanının beton dayanımına etkisi	34
Şekil 1.8. Betonlarda silis dumanı miktarı ile geçirgenlik arasındaki bağıntı	36
Şekil 3.1. Agregra gruplarının birleştirilmesi ile elde edilen yeni karışımın tane dağılım eğrisi	55
Şekil 3.2. D-Ç numunesinin deney kabında yerleşim şekli	62
Şekil 3.4. Isı denetim kutusunun genel görünüşü	63
Şekil 3.3. Deney kaplarının ısı denetim kutusu içinde yerleşim şekli	63
Şekil 3.5. 12 saatlik bir ısınma-soğuma periyodu boyunca referans noktasında ölçülen sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi	64
Şekil 3.6. Donma çözülme deney düzeneği	66
Şekil 3.7. Deney kabında 5mm yüksekliğindeki ayaklar üzerine yerleştirilmiş deney numunesi	68
Şekil 3.8. Donma Çözülme deneyinde kullanılan 36 adet numunenin kılcal emme (capillary suction) için deney kaplarına yerleştirilmiş hali	68
Şekil 3.9. Isı denetim kutularının derin dondurucu içindeki yerleşim şekli	69
Şekil 3.10. Yüzeiden pullanan malzemenin kağıt filtreden süzülmesi	70
Şekil 3.11. 91. günde kırılmak üzere kür ortamında bekletilen kiriş numuneler	72
Şekil 3.12. Eğilme deney düzeneği ve kiriş numunenin yükleme durumu	73
Şekil 4.1. %0SD, %5SD ve %10SD durumlarında UK-BHA ilişkisi	77
Şekil 4.2. %0UK, %5UK, %10UK ve %15UK durumlarında SD - Kılcal Emme İlişkisi	79
Şekil 4.3. %0SD, %5SD ve %10SD durumlarında UK - Kılcal Emme ilişkisi	80
Şekil 4.4. UK ve SD katkısının donma-çözülme ile oluşan pullanma üzerine etkisi	82
Şekil 4.5. SD ve UK Katkısının 7 Günlük Eğilme Mukavemetine Etkisi	85

Şekil 4.6. SD ve UK Katkısının 28 Günlük Eğilme Mukavemetine Etkisi.....85

Şekil 4.7. SD ve UK Katkısının 91 Günlük Eğilme Mukavemetine Etkisi.....86



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Çimentonun Ana Bileşenleri	23
Çizelge 1.2. Çimentodaki Anabileşenlerin Rölatif Özellikleri	24
Çizelge 1.3. Çimentonun Kimyasal Analizi	24
Çizelge 1.4. Betonlarda klor geçirgenliği	35
Çizelge 3.1. Deneyleerde Kullanılan Çimentonun Özellikleri	49
Çizelge 3.2. Silis Dumanının Kimyasal Bileşimi ve Elek Analizi	50
Çizelge 3.3. Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları	51
Çizelge 3.4. Agrega gruplarının elek analiz sonuçları	53
Çizelge 3.5. Agrega guruplarının birleştirilmesiyle elde edilen yeni karışımın elek analiz sonuçları	54
Çizelge 3.6. Agrega gruplarının Birim Ağırlık, Özgül Ağırlık ve Yüzey Nemi Oranı değerleri	55
Çizelge 3.7. Karışımlara katılan süperakışkanlaştırıcı katkı (İksament-NS) miktarı ve taze beton karışımların çökme deney sonuçları	56
Çizelge 3.8. Karışımlardaki Uçucu Kül ve Silis Dumanı oranları	57
Çizelge 3.9. Bir metreküp karışımın hazırlanmasında kullanılan malzeme miktarları	58
Çizelge 4.1. Donma çözülme deney sürecinde elde edilen ağırlık ölçümleri	75
Çizelge 4.2. Birim Hacim Ağırlık değerleri	76
Çizelge 4.3. Kılcal Su Emme Miktarı değerleri	78
Çizelge 4.4. Donma-çözülme deneyinde ölçülen pullanan malzeme miktarları	81
Çizelge 4.5. Eğilme deneyinde presten okunan kırılma değerleri	83
Çizelge 4.6. Eğilme Mukavemeti Değerleri	84

1. GİRİŞ

Türkiye’de karayollarının yük taşımacılığındaki payı %92, yolcu taşımacılığındaki payı ise %95’tir (Anonim 2002). Bu nedenle; karayolu trafik hacmi ve trafik içindeki ağır taşıt sayısı hızla artmaktadır. Esnek üst yapılar, bu yoğun ve ağır trafiğin etkisiyle beklenen dizayn ömründen önce bozulmakta ve büyük onarımlara ihtiyaç duymaktadır. Bunun sonucunda ağır taşıt trafiğinden ve iklim şartlarının bozucu tesirlerinden daha az etkilenen beton yollar esnek üstyapıya alternatif olarak ülke gündemine girmiştir.

Rijit üstyapının beklenen performansı sergileyebilmesi için kaplamayı oluşturan betonun yüksek mukavemet (dayanım) ve durabilite (dayanıklılık) özelliklerine sahip olması gerekir. Ayrıca bu özellikler sağlanırken ekonomiklik de göz önünde bulundurulmalıdır. Betonda ekonomikliği sağlamak içeriğindeki en pahalı malzeme olan çimento miktarını azaltmakla ve bunun paralelinde mukavemet ve durabilite özelliklerini iyileştirerek kaplamanın ömrünü uzatmakla gerçekleştirilir. Bu tez çalışmasında belirtilen özelliklere sahip beton üretimine katkı sağlayacak deneysel araştırmalar yapılmıştır.

Uçucu kül, çimentoya göre maliyeti çok ucuz olan bir atık malzemedir. Puzolanik özelliklerinden dolayı beton karışımlarda çimento ile birlikte bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Karışımdaki çimento miktarı azaltılarak yerine ağırlıkça kullanılmasıyla betonun birim maliyeti azaltılmış olur. Bunun yanısıra uçucu kül kullanımının ekonomik olabilmesi için betonun mukavemet ve durabilite özelliklerinde yetersizliklere yol açmamalıdır.

Silis dumanı, çimentoya göre pahalı olmakla birlikte beton karışımı içinde kullanılmasıyla betona üstün mukavemet ve durabilite özellikleri katabilmektedir. Böylece uzun ömürlü bir kaplama elde edilip ekonomiklik sağlanabilir.

Yapılan bu tez çalışmasında; silis dumanı %0, %5, %10 oranlarında, uçucu kül ise %0, %5, %10, %15 oranlarında eksiltelen çimento yerine ağırlıkça kullanılmış ve bunların 12 farklı kompozisyonundan oluşan beton karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar ile deney numuneleri dökülmüş, bunların dayanım ve durabilite özellikleri araştırılmıştır.

Uçucu kül ve silis dumanının bazı beton özellikleri üzerine etkileri konusunda çelişkili bilgiler bulunmaktadır. Bu çalışmada silis dumanının ve uçucu külün karışım içinde ayrı ayrı veya birlikte kullanılmaları durumunda betonun özellikleri üzerine etkileri araştırılmış, böylece literatüre konuyla ilgili katkı sağlanmıştır.

Rijit kaplamalarda kullanılacak beton karışım yüksek eğilme mukavemetine sahip olan, çevre ve iklim şartlarının bozucu etkilerine karşı dirençli, ekonomik bir karışım olmalıdır. Bu çalışma ile böyle bir karışımın dizaynını mümkün kılacak sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Beton yolların dizaynında dayanım kriteri olarak eğilme mukavemeti kullanıldığı için bu çalışmada kiriş numuneler dökülüp bunlar üzerinde eğilme deneyi yapılmış ve 7, 28, 91 günlük eğilme mukavemetleri tespit edilmiştir.

Dayanıklılık değerlendirmesi için donma-çözülme direnci kriter alınmıştır. Arazide beton yollar ısınma ve soğumaya yol yüzeyinden tek yönlü ısı geçişiyle maruz kalırlar ve buz çözücü tuzlar da bu yüzeyden beton kaplamaya nüfuz eder. Arazideki bu durumu en iyi şekilde temsil edecek bir donma-çözülme deney düzeneği hazırlanmıştır. Donma-çözülme ve %3NaCl çözeltisi etkisiyle deney numunelerinin yüzeylerinde meydana gelen malzeme kaybı (pullanma) dayanıklılık değerlendirilmesinde dikkate alınmıştır.

Beton yolları tanıyabilmek için karayollarında uygulanan üst yapı tiplerini ve bu üst yapılarda kullanılan malzemeleri bilmek gerekir. Bu bağlamda üst yapı tipi olarak esnek ve rijit üst yapı hakkında genel bilgiler verilecek , karşılaştırmaları yapılacaktır. Daha sonra rijit üst yapının ana bileşeni olan beton, beton özellikleri, beton bileşenleri ve bunların beton özelliklerine etkileri hakkında bilgiler verilecektir.

1.1. Karayolu Üstyapıları

Trafik yükünü taşımak üzere tesviye yüzeyine (taban zemini üzerine) yerleştirilen tabakalı yol yapısı “**üstyapı**” olarak adlandırılır.

Karayolu üstyapıları trafik yüklerini zemine ileten ve çevre etkilerine karşı dayanıklı olan mühendislik yapılarıdır. Üst kaplama tabakasında bağlayıcı olarak asfalt kullanılanlara esnek, çimento kullanılanlara ise rijit üstyapı denilir. Ayrıca her iki bağlayıcının birlikte kullanıldığı durumlarda kompozit üst yapılar ortaya çıkar. Üstyapılar trafik türü, hacmi ve ileriye dönük beklentiler ile sürüş güvenliği ve konforu, zemin ve çevre koşulları gibi faktörlere bağlı olarak tasarlanır. (Tunç 2001)

Üst kaplama tabakası trafikte sürüş güvenliği ve konforunun sağlayacak yüzeyi oluşturur. Trafik yükü ve çevre koşullarına doğrudan maruz kaldığı için yeterli dayanım ve dayanıklılıkta olmalıdır. Esnek üst yapılarda sıcak karışım asfalt ile aşınma ve binder tabakaları olarak uygulanır. Düşük standartlı yollarda ise sathi kaplama yapılır.

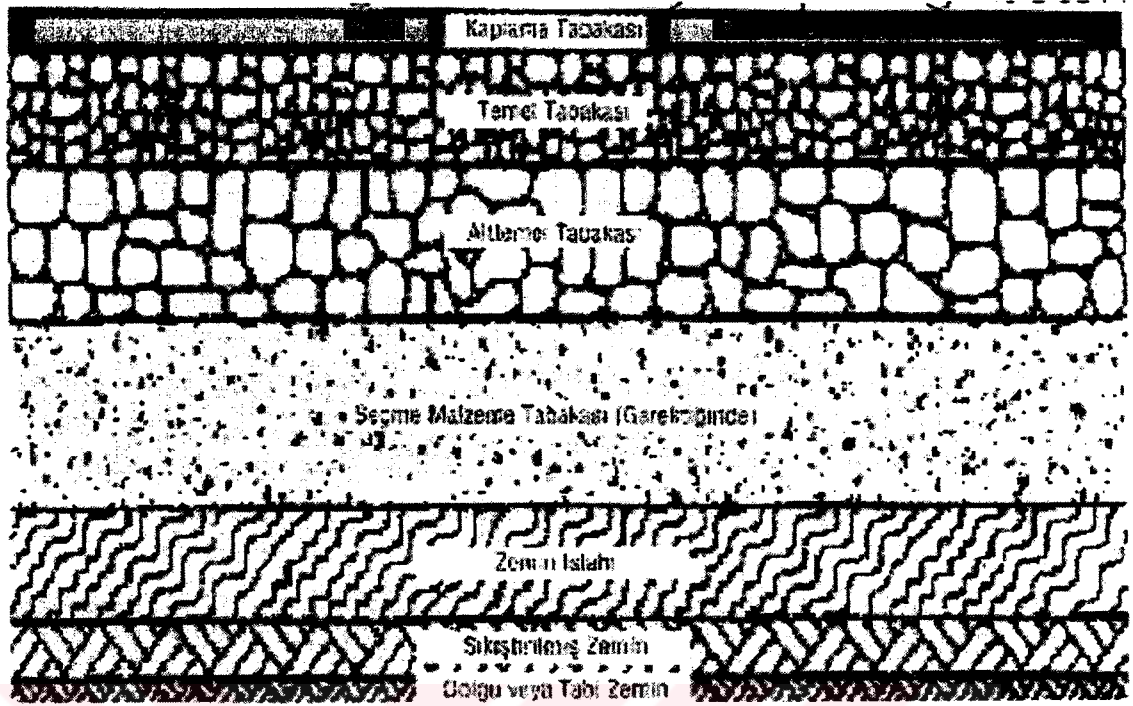
Karayolu üstyapıları trafik yüklerini taban zeminine aktarış şekline göre “esnek üstyapı” ve “rijit üstyapı” olarak sınıflandırılırlar. Kullanılan bağlayıcı türüne göre ise “Asfalt Yollar” ve “Beton Yollar” olarak adlandırılırlar.

1.1.1. Esnek Üstyapı

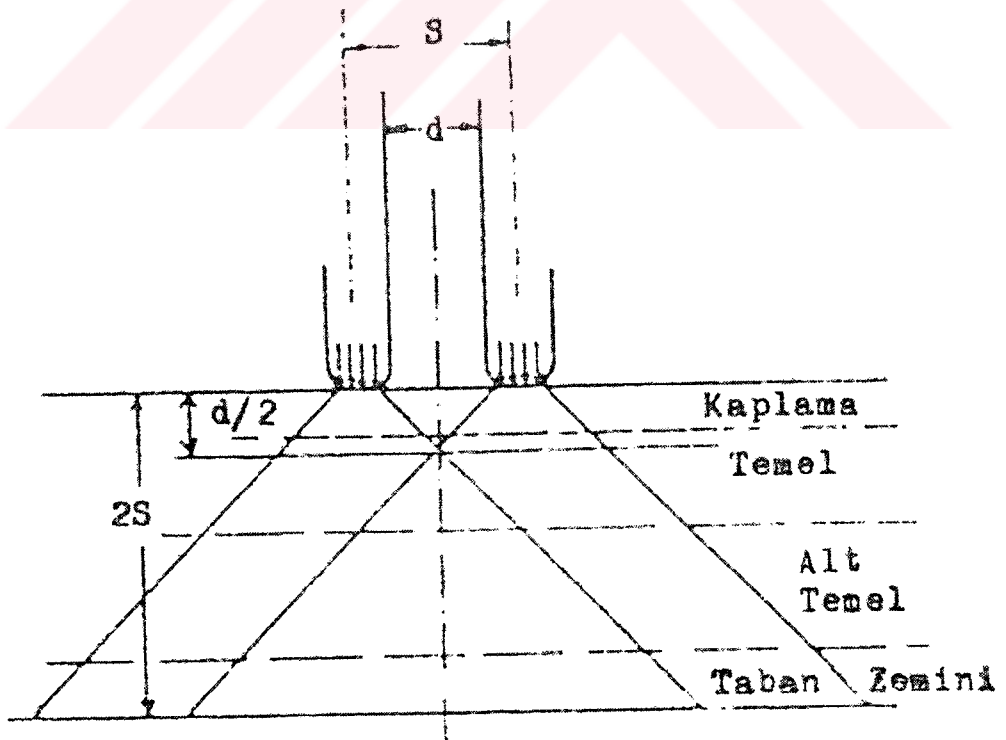
Devamlı olarak her noktada taban yüzeyi ile sıkı temas sağlayan ve yükleri taban yüzeyine dağıtan üstyapı şeklidir. Ana bağlayıcı bileşen olarak bitüm (asfalt) kullanılan kaplamalar “Asfalt Yollar” olarak adlandırılırlar.

Esnek üstyapılar; kaplama, temel ve alttemel tabakasından oluşurlar. Kaplama tabakası, aşınma ve binderden oluşan iki tabaka şeklinde sıcak bitümlü karışımdan yada sathi kaplama şeklinde soğuk bitümlü karışımdan oluşturulur. Diğer tabakalar ise granüler bir malzeme veya az miktar bağlayıcı ile işlem görmüş karışımlardır. Tipik bir esnek kaplama enkesiti Şekil 1.1’de gösterilmiştir.

Esnek üstyapılarda asfalt kaplama tabakasına gelen trafik yükü sırası ile temel ve alttemel tabakalarına yayılarak altyapıya intikal eder. Bu nedenle yükün taşınmasında her tabaka önemlidir. Tabaka kalınlıkları yüke ve zemin özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Şekil 1.2’de esnek kaplamalarda yük aktarımı ve taban zeminindeki yük dağılımı görülmektedir.



Şekil 1.1. Esnek Kaplama Tabakaları (Anonim 2002)

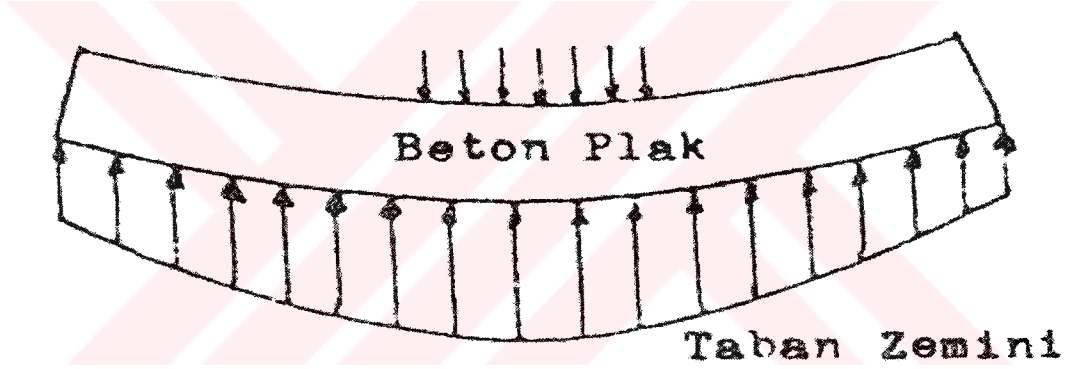


Şekil 1.2. Esnek üstyapıda tekerlek yüklerinin zemine aktarılışı (Ağar vd 1998)

Bitümlü karışımlar, agrega, bitüm ve hava boşluğundan oluşur. Karışımda agrega oranı %92, bitüm oranı ise %7-8 civarındadır.(Aras 2003)

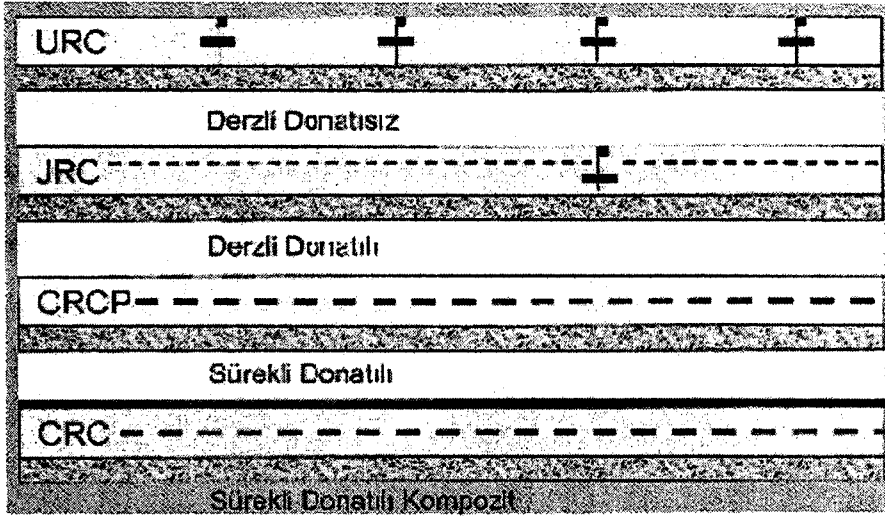
1.1.2. Rijit Üstyapı

Oldukça yüksek eğilme direncine sahip ve Portland çimentosundan yapılmış tek tabakalı plak vasıtasıyla yükleri taban zemine dağıtan üstyapı tipidir. Şekil 1.3.'de rijit kaplamalarda taban zeminindeki yük dağılımı görülmektedir. Ana bağlayıcı bileşen olarak çimento kullanılan betonlar ile üretilen kaplamalar "Beton Yollar" olarak ta adlandırılır.



Şekil 1.3. Rijit Kaplamalarda Taban Zeminindeki Yük Dağılımı (Ağar vd 1998)

Rijit üst yapılarda beton kaplama betonun yüksek dayanımı ve Elastisite modülü dolayısı ile rijit bir plak gibi çalışır. Beton kaplamalar donatısız, kısmen donatılı, sürekli donatılı olarak dökülebilir. Temel tabakası ile birlikte, bileşik veya iki tabakalı, derzli veya derzsiz döküm yöntemleri vardır. Değişik rijit kaplama tipleri Şekil 1.4.'de gösterilmiştir (Willis 2002).



Şekil 1.4. Rijit Kaplama Tipleri (Willis 2002)

Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmasını önlemektir. Bir tekerlek yükü bir beton plak üzerinden geçerken çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri oluşur. Tekerlek geçtikten sonra gerilmeler yön değiştirerek kaybolur. Özellikle yoğun kamyon trafiği taşıyan bir beton yolda bu gerilme değişimleri kısa zaman aralıkları ile sürekli olarak kendini gösterir. Bu gerilme değişimleri betonun yorulmasına neden olur. Oluşan gerilmelerin, betonun direncinden çok düşük olması gerekir. Beton kaplama oluşan bu gerilmeleri taşıyabilmeli ve gelen tekerlek yüklerini emniyetli bir şekilde taban zeminine iletebilmelidir. Beton yollarda kaplama tipi ve kalınlığı seçimi projelendirmenin esasını teşkil eder. Bu kararları verirken kullanılacak betonun dayanım özelliklerinin bilinmesi gerekir. Rijit üstyapılarda beton dayanımı için genellikle “Eğilme Mukavemeti” kriter olarak alınır.

1.1.3. Esnek ve Rijit Üstyapının Karşılaştırılması

Yeni karayolu yapımında ve üstyapı yenileme çalışmalarında, üstyapı seçimi yapılırken üstyapı teknikleri, teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılır. Ülke koşulları da dikkate alınarak bir karara varılır.

Bu bölümde alt başlıklarda her teknik ve ekonomik kriter için kısa bilgiler verilip esnek ve rijit kaplamalar karşılaştırılacaktır.

1.1.3.1. Trafik

Trafik hacminin yoğun olduğu, trafik artış hızının yüksek olduğu ve trafik içindeki ağır taşıt yüzdesinin fazla olduğu yollar için rijit üstyapılar daha uygundur.

Düşük trafik artışları durumunda, kademeli inşaata elverişli esnek üstyapı ile gelişen bu trafiği karşılamak mümkün olabilmektedir.

1.1.3.2. Dış Yüklerin Taban Zeminine İletilmesi

Esnek üstyapılar, çekme dirençleri fazla olmayan malzemelerden yapılmış alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşur. Trafik yüklerinin bu tabakalardan geçerek taban zeminine iletilmesi, zemin içindeki klasik yük dağılışı şeklindedir. Tekerlek yükleri altında esnek üstyapı deforme olur ve her tabaka, üzerine gelen yükü bir alttakine biraz daha yayarak iletir. Esnek üstyapıda oluşan gerilmeler yolun en üst tabakasından alta doğru inildikçe düşmektedir.

Beton yol plağının Elastisite modülü taban zemininkinden çok büyüktür. Bu nedenle beton yol, elastik zemine oturan bir döşeme gibi çalışır. Rijit beton plak taban zemin ile sürekli temasta olduğu sürece taşıyıcı bir eleman olarak görev yapar. Taban zemin çeşitli nedenlerle yer yer oturma yapıp çökerse, taban zemininin deformasyonuna uymayan rijit beton plak, kiriş gibi çalışmaya başlar. Bu nedenle rijit üstyapılar, zayıf taban zeminleri üzerinde, esnek üstyapılara kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir.

1.1.3.3. Malzeme

Asfalt betonundaki bağlayıcı malzeme olan bitüm termoplastik bir malzeme olması, onun bu özelliğinin asfalt betonuna yansımaya da yol açmaktadır. Bu nedenle asfalt betonunun hazırlanmasından serilip sıkıştırılmasına kadarki tüm aşamalarda, şartnamede belirtilmiş olan ısı derecelerine büyük bir titizlikle uyulması zorunludur.

Beton yolda bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun özellikleri sıcaklığa bağlı olmadığından orada böyle bir sorun yoktur.

Asfalt betonunun gerilme deformasyon ilişkileri, yükleme hızının ve sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, onun çimento betonu gibi sabit bir Elastisite modülü ve Poisson oranı yoktur. Üstyapı projelendirme yöntemleri ise genel olarak elastiklik varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle esnek üstyapıların projelendirilmesi, rijit üstyapıya göre daha karmaşıktır.

Bitümlü bağlayıcıların yapısı, kaplamanın yapımından birkaç yıl sonra, bağlayıcı içindeki uçucu bileşenlerinin uzaklaşması ve bağlayıcının oksidasyonu ile bozulmaktadır. Bu “yaşlanma” olayı sonucu, agregaya karşı adezyon azalır. Rijit kaplamalarda böyle bir durum olmamakla birlikte, beton yaşı ile betonun dayanımı sürekli artmaktadır.

Beton yollar çelik donatının kullanılabilceği tek kaplama tipidir.

1.1.3.4. İklim

Bitümlü esnek kaplamaların uygulanacağı zeminin kuru veya en çok %2 oranında nemli olması gerekir. Bu zorunluluk, yağışlı bölgelerde bitümlü sıcak kaplamaların uygulanma süresinin kısılmasına yol açmaktadır. Buna karşın beton kaplamalar, nemli zeminler üzerine yapılmaktadır.

Kara ikliminin hüküm sürdüğü bölgelerde, yazın tekerlek izi oluşmasına direnç gösteren, kışın ise çatlamayan bir bitümlü karışımın formüle edilmesi güçtür. Bu tip bölgelerde rijit üstyapının yapılması daha uygundur.

1.1.3.5. Trafiğin Engellenmesi

Beton yolun trafiğe açılması için beton yapımından ve yerine serilmesinden itibaren en az 7 gün gerekmektedir. Buna karşılık bitümlü kaplamaların, yapımından itibaren birkaç saat içinde trafiğe açılması mümkündür. Fakat bitümlü kaplamalar, beton yollara kıyasla daha fazla bakım ve onarım gerektirmektedir. İyi yapılmış beton yollar, çok dayanıklı ve çok ender durumlarda bakım gerektirdiğinden, bu yönleri ile de avantajlı sayılmaktadır.

1.1.3.6. Yolu Kullananların Harcamaları

Normal olarak, lastik eskimesi, yağ ve yakıt tüketimi gibi işletme masrafları, her iki üstyapı tipinde de birbirine oldukça yakın durumdadır. Fakat 20-30 yıllık hizmet ömrü süresince yol bakım çalışmalarının açtığı gecikme zararları ve masrafları, esnek üstyapılarda oldukça fazla olup, buna karşılık rijit üstyapılarda bu sakınca yok denecek kadar azdır.

1.1.3.7. Finansman Kaynakları

Yalnızca yapım masraflarının finanse edildiği durumlarda rijit üstyapılar tercih edilmektedir. Fakat, artan trafiğe cevap verebilmek için ardı ardına tabakaların yapılması gibi kademeli inşaatı gerektiren, yatırım kaynakları sınırlı bulunan hallerde esnek üstyapıyı tercih etmek daha avantajlı olur.

1.1.3.8. Enerji Tüketimi

Burada bahsedilen enerji; yolda kullanılmak üzere beton, asfalt , temel, alt temel , çelik gibi malzemelerin üretimi ve temini için harcanması gereken enerjidir. Ayrıca yol bakım ve onarım çalışmalarının etkisiyle trafikte meydana gelecek sıkışıklıktan dolayı araçların yakıt sarfiyatında bir artış olacak ve dolaylı olarak enerji kayıpları olacaktır. Yine, yoldaki bozulmaların etkisiyle zamanla hizmet kalitesindeki düşüşten kaynaklanan yakıt tüketimindeki artışlar, tekerlek eskimesi, araçların yıpranması ve trafik kazalarının meydana gelmesi gibi olaylar da enerji tüketimini artırıcı etkenler olarak dikkate alınmaktadır. Yol kaplamasının yapılması sürecinde harcanan enerji sarfiyatından kaynaklanan maliyet ve bu enerji tüketiminden açığa çıkacak emisyon miktarının küresel ısınmaya potansiyel etkisi (CO2 Eşdeğeri / Km) , enerji tüketiminin azaltılması hususunu önemli kılmaktadır (Yeğinoğlu 2002).

Yol inşaatında enerji sorunu, zamana ve ülkeye göre değişkenlik gösterir. Fransa'da, yol yapım, bakım ve onarım çalışmalarında harcanacak enerji miktarı, esnek ve rijit üstyapılar için hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Buna göre:

Ortalama günlük trafik miktarının 3000'in üzerinde olduğu durumlarda, rijit üstyapıların yapımı, esnek üstyapılarınkinden daha az enerji gerektirdiği görölmüştür.

Trafik hacmi düştükçe, düşüş oranına göre fark azalmakta, eşitlenmekte ve hatta esnek üstyapı lehine dönmüştür.

Yüksek trafik durumunda 25 yıllık periyot için, beton yolların bakımında esnek yollarinkine kıyasla çok az enerji tüketildiği, düşük trafikte ise bakım masraflarının birbirine yaklaştığı görölmüştür.

1.1.3.9. Toplam Ekonomik Maliyet

Agregalar, tüm üstyapıların ana malzemesi olduğundan, bunlar toplam maliyeti büyük ölçüde etkilemektedir. Betonun, rijitliği sayesinde kaplama kalınlığı azalmakta olduğundan, esnek üstyapıya göre malzeme tüketiminde ekonomi sağladığı açıktır. Ayrıca beton agregasının, bitümlü kaplamalarınkiler kadar yüksek kaliteli olması gerekmediğinden, sağlam agreganın az olduğu bölgelerde, temizlik ve granülometri koşulunu sağlayan daha düşük kaliteli agreganın kullanılması mümkün olup burada ekonomi sağlanmaktadır. Ülkemiz için asfalt kullanımı “döviz harcaması” anlamına gelir; buna karşılık çimentonun hammaddesi tamamen yerli olup çimento fabrikalarının %100'e yaklaşan bir oranda yerli kaynaklarla gerçekleştirildiği, bir petrol rafinerisinin kurulmasının ise %80 oranında yabancı kaynağıa dayalı olduğu, bunun da beton yol lehine bir avantaj sayılması gerekir.

Taşıma uzaklığı arttıkça taşıma maliyeti de artmaktadır. Ülkemizdeki rafineri sayısının azlığı sebebiyle asfaltın, rafineriden işyerine taşınması maliyeti fazladır. Çimento fabrikaları ise tüm yurt sathına fazla sayıda dağılmış olduğundan çimentonun taşınma ücreti, asfalta göre daha düşük düzeyde kalmaktadır.

Malzemelerin hazırlanmasında, yola serilmesinde ve yapımın bütün aşamalarındaki kontrolün sağlanmasında, beton yol yapımı için değişik konularda ihtisaslaşmış kalifiye eleman gereksinimi, asfalt yola kıyasla daha fazladır.

Çimento kullanılan beton santrallerinde depolama ve dozaj sistemleri gerekmektedir. Beton için de süreksiz santraller tercih edilir. Asfalt betonun imali kurutma ve yeniden ısınma gibi ek üniteler içeren daha pahalı santraller gerektirir. Bu tip santraller aynı zamanda çevre kirliliği yönünden de sorun yaratmaktadır.

Ülkemizde, Bayındırlık Bakanlığı birim fiyatları esas alınarak yapılan hesap ve karşılaştırmalarda, zayıf taban zeminlerinde ve ağır trafiği olan yollarda, beton yolun ilk yapım maliyetinin daha ekonomik olduğu, aksi durumlarda ise asfalt yol maliyetinin daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır.

Trafik ve iklim koşulları, yolun bozulmasına neden olan iki ana faktör sayılmaktadır. Bu etkilere karşı koymak için yollarda bakım yapmak zorunlu olmaktadır.

Beton yollar 30-40 yıllık hizmet süreleri için projelendirilir. Bu yollarda yüzey yenilenmesi ve takviyesi işlemlerine gerek duyulmamaktadır. Beton yollar tüm hizmet ömürleri boyunca çok az miktarda bakım gerektirirler. Periyodik olarak yapılması istenen ve gereken bakım, derzli beton kaplamalarda yaklaşık 4-5 yılda bir derz dolgularının yenilenmesidir. Bunun dışında beton yol, projelendirme ve inşaat yönleriyle iyi bir şekilde gerçekleştirilmişse, küçük boyutlu ve az masraflı onarımları gerektirebilmektedir.

Esnek üstyapılar, rijit üstyapılardan oldukça farklı bir bakım ve onarım ömrüne sahiptir. İlk 5 yıl içinde yüzeysel onarımlar ve yüzey kaplaması; onuncu yılda yol yüzeyinin büyük bir olasılıkla yenilenmesi ve pürüzlendirilmesi gerekmektedir. Bunların dışında temel ve alttemel tabakalarının onarımı ve hatta değiştirilmesi gibi çok önemli bakım ve yenilemeler de gerekli olabilir. Bu çalışmalar için oldukça yüksek bir harcama ile birlikte yolun bir şeridinin veya tamamının kapatılması sorunları ortaya çıkmaktadır.

İngiltere Yol Araştırma Laboratuvarı'nın (RRL) elemanları tarafından yapılan çalışmalarda, kırsal ikinci sınıf yollarda ve konut bölgelerindeki yol ağında, beton yolların ilk yapım masraflarının esnek üstyapıunkine kıyasla daha fazla olduğu; buna karşılık bölge otoyollarında beton yolun masrafının esnek yolunkinden önemli ölçüde düşük olduğu belirlenmiştir.

1.2. Beton

“Beton”, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir.

Beton üretiminde, malzemeler karıldıktan sonra elde edilen plastik durumun, çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle giderek azalıp, katılaşmanın başladığı ana kadarki haline “taze beton” denir.

Taze beton, kolayca karılabilir, taşınabilir, yerleştirilebilir, sıkıştırılabilir ve yüzeyi düzeltiler olabilir olmalıdır; bu işlemler sırasında iri agregalarla çimento harcı arasında ayrışma olmamalıdır. Bu özelliklerin tümü “işlenebilme” olarak tanımlanır.

Yerine yerleştirilen taze betonun içerisindeki suyun yukarıya çıkma eğilimi (terleme) mümkün olduğu kadar az olmalıdır. Betonun homojen yapısı bozulmamalıdır.

Malzemelerin karılmasından hemen sonra plastik duruma sahip bir betonda, plastikliğin kaybolmasına kadar geçen sürenin uzunluğu (priz süresi), gerekenden daha uzun veya kısa olmamalıdır.

Betonun katılaşma olayından sonraki safhadaki durumu, “sertleşmiş beton” olarak anılmaktadır.

Sertleşmiş betondan beklenen özellikler şunlardır:

- 7 günlük, 28 günlük, 91 günlük gibi herhangi bir yaş için hedeflenmiş olan minimum beton dayanımından daha az bir dayanım sergilememelidir.

- Çevredeki suyun ve diğer sıvıların beton içerisine kolayca girerek olumsuz etki yaratmaması için, yeterince geçirimsiz olmalıdır.
- Yapıda hizmet gördüğü süre içerisinde çevrede oluşan yıpratıcı etkenler karşısında yeterince dayanıklı olmalıdır. Bir başka deyişle, donma-çözülme, ıslanma-kurumaya, ısınma-soğumaya, aşınmaya, asitlere, sülfatlara ve alkali-agrega reaksiyonu gibi kimyasal reaksiyonlara karşı dayanıklılık gösterebilecek kalitede olmalıdır. Betonun zaman içerisinde çevreden maruz kalabileceği etkenler karşısındaki dayanıklılığı, “durabilite” olarak ta adlandırılmaktadır.
- Yeterli hacim sabitliğine sahip olmalıdır; yani, çatlamalara yol açacak ölçüde büzülme (rötre) veya genişleme göstermemelidir.

Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı tekrarlı yükler altında yorulma dayanımı, gerilme-birim deformasyon ilişkisi, elastiklik modülü, Poisson oranı, ısıl genişleme katsayısı, rötre (büzülme), sabit yükler altında sünme ve yoğunluk betonda aranan önemli özelliklerdir.

Gerek taze betonun ve gerekse sertleşmiş betonun tüm özellikleri, beton karışımının oluşturulmasında kullanılan çimentonun, agreganın, suyun ve katkı maddelerinin özellikleri ve karışım içerisinde yer almış oldukları oranlar tarafından etkilenmektedir.

1.2.1. Beton Özellikleri

1.2.1.1. Segregasyon (Ayrışma)

Taze betonun içerisinde yer alan iri agregaya ile çimento harcının ayrı ayrı bölgeler oluşturacak şekilde kümelenmesi ve böylece, beton içerisindeki malzemelerin homojen dağılımının bozulmasına “segregasyon” denilmektedir.

1.2.1.2. İşlenebilme

Taze betonun segregasyon göstermeden kolayca karılabilme, yerleştirilebilme, sıkıştırılabilme ve yüzeyinin düzeltilebilme özelliklerinin tümü, “işlenebilme” olarak tanımlanır.

İşlenebilme özelliği, betonun yapısından kaynaklanan şu özellikler ile ilgilidir:

- Taze beton kütleğinde akma başlatacak kuvvete karşı betonun göstereceği direnç (kayma dayanımı),
- Akma başladıktan sonraki hareketlilik (akıcılık),
- Betonu oluşturan malzemelerin birbirine ne ölçüde bağlanmış olmaları, böylece, segregasyona karşı göstereceği direnç (kohezyon),
- Yerleştirilmeyi ve yüzeyinin düzeltilmesini etkileyen yapışkanlık.

Beton karışımının sahip olduğu ıslaklık, taze betonun taşınabilirliği, pompalanabilirliği, yerleştirilebilirliği, segregasyonu, sıkıştırılabilirliği ve yüzeyinin düzeltilebilirliği gibi kavramların tümü, betonun işlenebilme özelliği içerisinde yer alan kavramlar olduğu için; bütün bu özelliklerin tek bir isim altında ve tek bir özellik olarak yeterince hassas bir şekilde ifade edilebilmesi mümkün değildir. Başka bir deyişle, işlenebilme rölatif bir özelliktir.

İşlenebilmeyi Etkileyen Faktörler:

- Çimento miktarı
- Çimento özellikleri
- Karma suyu miktarı
- Agregada gradasyonu (tane dağılımı) ve en büyük agrega tane boyutu
- İnce agreganın miktarı ve tane dağılım oranı
- Agregaların tane şekli
- Beton yapımında kullanılan ince taneli mineral katkıları

- Beton yapımında kullanılan kimyasal katkıları
- Hava sürüklenmiş betonlardaki sürüklenen hava miktarı
- Sıcak hava koşulları ve beton karışımının sıcaklığı
- Betonun karıldığı andan, kıvamın ölçüleceği ana kadar geçen süre

Taze betonun kıvamı ve işlenebilirliğinin araştırılmasında en çok kullanılan deneyler şunlardır:

- Çökme deneyi,
- Vebe deneyi,
- Sıkıştırma faktörü deneyi,
- Akıcılık deneyi (Sarsma Tablası Deneyi).

1.2.1.3. Kıvam

Taze betonun sahip olduğu ıslaklık derecesi “kıvam” olarak anılmaktadır. Betonun kıvamı sadece taze beton kütleindeki kayma kuvvetleri tarafından etkilenmektedir. Akıcılık ve kohezyon kıvam kavramı içerisinde yer almamaktadır.

1.2.1.4. Çökme değeri

Kesik koni şeklindeki bir huniye yerleştirilen betonda huni çekildikten sonra meydana gelen çökme miktarıdır. Taze betonun çökme değeri, betonun ıslaklık durumunu gösterir ve beton kıvamını ifade etmek için kullanılır.

1.2.1.5. Su İhtiyacı

Taze betonda hedeflenen kıvam, sertleşmiş betonda hedeflenen dayanım betonda kullanılan su miktarından önemli ölçüde etkilenir. Gereğinden az kullanılan su, gereken işlenebilmeyi sağlayamamakta ve nihayetinde betonun diğer özelliklerini de olumsuz yönde etkilemektedir. Gereğinden fazla kullanılan su ise, daha gözenekli bir beton

yapısına neden olmakta, betonda daha çok büzülme meydana gelmektedir. Neticede beton daha az dayanım ve dayanıklılığa sahip olmaktadır.

Betonda hedeflenen kıvamı ve dayanımı sağlayacak miktardaki su, betonun “su ihtiyacı” olarak anılmaktadır.

1.2.1.6. Priz Alma ve Priz Süresi

Beton malzemelerin karılma işlemi biter bitmez şekil verilebilir durumda olan taze betonun, bir süre sonra katılarak şekil verilemez duruma gelmesine “**priz alma**” denilmektedir.

Taze betonun hazırlandığı an ile katılma gösterdiği an arasındaki süreye “**priz süresi**” denilmektedir. Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların yer alma hızı (hidratasyon hızı) priz süresinin kısalığını veya uzunluğunu etkileyen önemli bir faktördür.

Taze betona uygulanacak taşıma, yerleştirme, sıkıştırma ve yüzey düzeltme işlemleri beton katılma göstermeden önce yapılmaktadır. O nedenle, priz sürelerinin uzunluğu veya kısalığı önemli bir özellik durumundadır.

1.2.1.7. Terleme

Yerine yerleştirilen taze betonun içerisindeki katı malzemeleri, yerçekimi etkisiyle, dibe doğru hareket etme eğilimleri vardır. Bu etki nedeniyle, taze betonun içerisinde yer alan suyun da yukarıya doğru hareket etme eğilimi olmaktadır. Taze betonun içerisindeki suyun yukarıya, beton yüzeyine, çıkma eğilimine “terleme” denilmektedir. Taze betonun, mümkün olabildiği kadar az terleme yapması istenmektedir.

Terlemenin Betondaki Olumsuz Etkileri:

- Taze betonun içerisindeki suyun üst kısımlara doğru hareket etmesi sonucunda, betonun üst bölgesi çok sulu bir beton durumuna gelmektedir. Betonun üst kısımları daha gözenekli ve daha zayıf bir betondan oluşmaktadır. Bu durumda elde edilen

sertleşmiş betonun içerisine dışarıdan daha rahat su (veya sülfatlı su, asitli su) sızabilmektedir.

Gözenekli betonun içerisine sızmış olan sular, çok soğuk havalarda donarak betonun çatlamasına yol açabilmekte, beton dayanıklılığının önemli ölçüde zedelenmesine neden olmaktadır.

- Taze betonun içerisindeki su yukarıya doğru hareket ederken beraberinde henüz hidratasyon yapmamış çimento tanelerini veya çok ince agregalar gibi çok ince katı parçacıkları da sürüklemektedir. Bu durum, betonun üst bölgelerinin ve yüzeyinin çok ince taneciklerden oluşmasına yol açmaktadır. Yüzeyinde ince katı parçacıkların yer almış olduğu sertleşmiş beton, aşınmaya karşı daha az dayanıklı olmaktadır.

- Betonun içerisinde su yukarıya doğru hareket ederken, bazen bu suyun bir miktarı iri agrega tanelerinin altına, yada , betonarme yapı betonlarında yer alan demir donatıların altına takılarak hapsolmakta, su ceplerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Bu su ceplerinin oluşturduğu boşluklardan dolayı çimento hamuru ile agrega ve donatı arasındaki aderans (bağ) zayıflamaktadır.

- Beton yüzeyine çıkan suyun buharlaşma hızı, terleme hızından daha çok olduğu takdirde, betonun iç bölgeleri plastik durumunu korur iken, betonun üst yüzeyi hemen kuruyup katılaşma göstermektedir. Bu durumda betonun üst yüzeyinde “plastik büzülme çatlakları” denilen gelişigüzel bir çatlak ağı oluşmaktadır.

Terlemeyi azaltacak faktörler:

- Kullanılan çimentonun inceliğinin yüksek olması
- Çimento kompozisyonundaki C_3A ve C_3S miktarının fazla olması
- İnce öğütülmüş mineral katkıların mevcudiyeti
- Karma suyu miktarının azaltılması

- Beton içerisine sürüklenmiş hava miktarının fazla olması
- Tabaka halinde yerleştirilen betonların tabaka derinliğinin azaltılması

1.2.1.8. Beton Dayanımı

Üzerine gelen yüklerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı, betonun gösterebileceği direnme kabiliyetine, “beton dayanımı” denilmektedir.

Betonun üzerine değişik yönlerde uygulanan yükler, değişik etkiler yaratabilmektedir. Basınç, çekme, eğilme ve kayma etkisi yaratacak yükler altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyeti, sırasıyla, basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, ve kayma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Tekrarlı yüklerin altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyetine ise yorulma dayanımı denilmektedir.

Betonun dayanımı aşağıdaki dayanım büyüklüklerine bağlıdır.

- Çimento hamurunun dayanımı
- Agreganın dayanımı
- Çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderans

1.2.1.9. Betonun Dayanım Kazanma Hızı

Beton dayanımı betonda kullanılan çimento hamurunun dayanımının, agrega dayanımının ve çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansın ne kadar iyi olduğuna bağlıdır. Çimento hamurunda ne kadar hızlı ve çok miktarda hidrasyon olur ise, çimento hamuru (ve ona bağlı olarak, beton) daha hızlı dayanım kazanır.

Betonun ilk günlerdeki dayanımının yüksek olması, beton yolların trafiğe erken açılabilmesine imkan sağlar.

1.2.1.10. Betonun Dayanıklılığı

Betonun içerisine sızan su, karbon dioksit, oksijen, sülfat, asit ve klor gibi maddeler, betonda değişik türlerdeki kimyasal olayların yer almasına neden olmaktadır. Betonun içerisindeki alkalilerle reaktif agregalar arasında gelişen ve sertleşmiş betonun genişerek yıpranmasına yol açan reaksiyonlar da kimyasal olaylar sonucunda meydana gelmektedir.

Islanma-kuruma, donma-çözülme, ısınma-soğuma, ve aşınma gibi olaylar betonun yıpranmasına yol açacak nitelikteki fiziksel olaylardır.

Hava koşullarından, sülfatlı veya asitli sulardan, veya betonun kullanıldığı ortam koşullarından kaynaklanan yıpratıcı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında, betonun hizmet süresi boyunca gösterebileceği direnme kabiliyetine "dayanıklılık" "durabilite" veya "kalıcılık" denir.

Betonun dayanıklılığını olumsuz olarak etkileyen bazı önemli kimyasal ve fiziksel olaylar şunlardır:

- Betondaki kalsiyum hidroksitin çözünmesi ve beton yüzeyinde "çiçeklenme" oluşması
- Sülfat etkisi (sülfat hücumu)
- Deniz suyunun etkisi
- Asit etkisi (asit hücumu)
- Karbonatlaşma
- Alkali-agrega reaksiyonu
- Betonun içerisine yerleştirilen çelik donatının korozyonu
- Donma-çözülme etkisi
- Beton yüzeyinin pullanması
- Aşınma

1.2.1.11. Donma-Çözülme Etkisi

Betondaki kapiler boşluklar tamamen veya %91'den daha çok suyla dolu durumda olduklarında, donmanın başlaması ve suyun bir miktarının buz haline dönüşmesiyle, ortaya çıkan hacim genişmesi, boşluklardaki henüz donmamış durumdaki su üzerinde hidrolik basınç yaratmaktadır; henüz donmamış durumdaki su , boşluklardan dışarıya itilmektedir. Boşluklardan dışarıya çıkmaya zorlanan su, boşlukların etrafındaki çimento hamurunun çatlamasına yol açacak büyüklükte gerilmeler yaratmaktadır.

Betondaki sıcaklığın artması ile, beton soğukken oluşmuş olan buzlar çözülme, böylece, betonun içerisindeki gerilme ortadan kalkmış olmaktadır. Ancak, bir başka zamanda yer alan soğuma karşısında aynı olaylar tekrar etmektedir.

Kapiler boşluklarda henüz tamamen donmamış durumdaki suyun gösterdiği hidrolik basıncın artmasına katkısı olan iki olay daha bulunmaktadır:

- Jel boşluklarındaki su ile buz arasındaki termodinamik dengesizlik, jel suyunun bir miktarının kapiler boşluklara yönelerek donmasına , böylece, hidrolik basıncın artmasına neden olmaktadır.
- Kapiler boşluklardaki saf suyun dışarı çıkması sonucunda, geriye kalan sudaki tuz ve benzeri maddelerin konsantrasyonu artmakta, osmotik basınç artmaktadır.

Donma-çözülme olayı, fiziksel bir etkidir. Islanarak doymuş duruma gelen ve donma-çözülme devirlerine maruz kalan bütün betonlar kısa sürede hasar görmektedirler. Park alanlarında , hava alanlarında, kaldırımlarda, yollarda kullanılan betonlar, bu tür hasara maruz kalabilecek betonlardır. Tekrar tekrar yer alan donma-çözülme olayları karşısında, betondaki iç gerilmeler nedeniyle, beton yüzeyindeki agregalar gevşeyip kopmakta, betonun içerisinde çatlaklar oluşmakta, ve bu çatlaklar giderek daha büyük çatlaklar haline gelmektedirler. Şiddetli ortamda çok sayıda donma-çözülme olaylarına maruz kalan en iyi betonlar dahi en çok bir-iki yıl içerisinde büyük hasar görebilmektedir (Erdoğan 2003).

1.2.1.12. Beton Yüzeyinin Pullanması

Beton yolların, kaldırımları, park yerlerindeki ve hava alanı pistlerindeki betonların üzerinde kışın oluşmakta olan buz tabakasından kurtulabilmek için , beton yüzeyine “buz-çözücü” tuzlar serilmektedir. Kalsiyum klorür ve sodyum klorür, en yaygın olarak kullanılmakta olan tuzlardır. Beton yüzeyine serilen bu tuzlar, zamanla, beton yüzeyindeki rastgele noktalarda , kum ve çakılın gevşeyip çıkmasına , lokal boşluklar, patlaklar oluşmasına, ve beton yüzeyinden ince bir tabakanın balık pulu gibi sıyrılık kalkmasına neden olabilmektedirler. Bu şekilde, beton yüzeyinin ince tabakalar halinde gevşeyip kopma göstermesine “pullanma” denir.

Buz-çözücü tuzların beton yüzeyinde yarattığı pullanma olayının oluşum nedeni henüz çok açık olarak bilinmemekle birlikte; pullanmanın oluşmasına hidrolik ve osmotik basınç yaratan olayların sebep olduğu düşünülmektedir (Erdoğan 2003).

1.2.1.13. Ekonomiklik

Betonun ekonomik olması, gerek üretim esnasında ve gerekse daha sonraları daha az masraf gerektiriyor olmasıdır.

Betonu oluşturan temel malzemelerden en pahalı olanı çimentodur. Betondan istenilen özelliklerden vazgeçmemek kaydıyla, mümkün olan en az miktardaki çimentoyu kullanmak, betonda ekonomikliğe yol açmaktadır.

Ayrıca, yol betonunun bir an önce dayanım kazanıp trafiğe açılması, işlenebilmesi iyi olan betonla işçilerin daha az zahmetle daha randımanlı çalışabilmeleri ve benzeri olaylar betonu daha ekonomik kılmaktadır.

Uygun şekilde kullanılan katkı maddelerinin, yukarıda belirtilen beton özellikleri üzerinde çok önemli olumlu etkileri olmaktadır. Ancak kötü bir beton karışımının veya kötü bir uygulamanın neden olduğu eksiklikleri gidermeye yeterli olamamaktadırlar.

1.3. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler

1.3.1. Çimento

Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve “klinker” olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonunda elde edilen bir türüdür. Su ile birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır. Su altında sertleşebilen ve suda erimeyen bağlayıcıya “hidrolik bağlayıcı” denilmektedir.

Portland çimentosu tanelerin boyutları 1 – 200 μm arasında değişmektedir. Özgül ağırlığı ise 3.10 – 3.15 kadardır. Torbalanmış durumdaki çimentonun birim ağırlığı 1.5 t/m³ civarındadır.

Çimento ve su birleştiği andan itibaren aralarında “hidratasyon” olarak adlandırılan kimyasal reaksiyonlar başlamakta ve devam etmektedir. Önceleri, yumuşak plastik durumda olan çimento hamuru, zaman ilerledikçe daha az plastik duruma gelmekte ve katılaşp, sertleşmektedir. Çimento hamurunun katılaşma göstererek şekil verilemez bir duruma gelmesine “priz alma” denilmektedir.

Çimento hamurunun içerisindeki su ve çimento arasındaki kimyasal reaksiyonlar uygun sıcaklık ve nemlilik ortamı mevcut olduğu sürece devam etmekte, kazanılan dayanım miktarında artış olmaktadır.

Çimento hamurunun katılaşma hızı ve dayanım kazanma hızı, çimentonun ana bileşenleri ile su arasındaki kimyasal reaksiyonların hangi hızla ve ne ölçüde gerçekleşmiş olmasına bağlıdır. Böyle bir durum ise çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin oranlarına, çimento tanelerinin inceliğine, reaksiyonların devam edebilmesi için yeterli nemlilik ve sıcaklık ortamının mevcut olup olmamasına bağlıdır.

Çimento hamuru, beton karışımının içerisinde yer alan agrega tanelerinin yüzeyini kaplamakta, aralarındaki boşlukları doldurmakta ve taneleri bağlayarak bu kompozit malzemenin tek bir malzeme gibi davranmasını sağlamaktadır.

Çimento, su ve agregaların birlikte karılmasıyla elde edilen beton ilk zamanlarda plastik yapıdadır. Birkaç saat içerisinde katılaşmakta, sertleşmektedir. Sertleşmeye başlayan beton, zaman ilerledikçe daha büyük dayanım kazanmaktadır. Betonun bu özellikleri, hidrasyon nedeniyle çimento hamurunun yapısında yer alan değişikliklerden ileri gelmektedir. Ayrıca, sertleşmiş betonda zamana bağlı olarak yer alabilecek büzülme veya sünme deformasyonları, çimento hamurunda yer alan hacim değişiklikleridir. Dolayısı ile , çimento sadece taze betonun özelliklerini ve sertleşmiş betonun dayanımını değil , aynı zamanda, betonun dayanıklılığını da önemli ölçüde etkilemektedir.

Çimento türleri hidrasyon ısısı bakımından en yüksekten en düşüğe doğru aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- Alüminli çimentolar
- Yüksek mukavemetli portland çimentoları (PÇ 52,5 ve PÇ 42,5)
- Portland çimentoları PÇ 32,5 ve
- Puzolanlı çimentolar

Çimento ana bileşenleri ve bunların kısaltılmış halleri Çizelge 1.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Çimentonun Ana Bileşenleri

Adı	Kimyasal formülü	Simgesi
Trikalsiyum silikat	$\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$	C_3S
Dikalsiyum silikat	$\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$	C_2S
Trikalsiyum alüminat	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$	C_3A
Tetra kalsiyum alüminoferrat	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$	C_4AF

Bu bileşenlerden C_3S ve C_2S çimentoya mukavemet kazandıran en önemli silikatlardır. C_4AF ise çimentoya rengini veren maddedir. Çimento ana bileşenlerinin reaksiyon hızı, hidratasyon ısı ve dayanıma katkısı özellikleri rölatif olarak Çizelge 1.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.2. Çimentodaki Anabileşenlerin Rölatif Özellikleri

	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon Hızı :	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı :	Orta	Az	Çok Yüksek	Orta
Dayanıma Katkısı				
İlk Günlerde :	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Sonunda :	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

Çimento kompozisyonu hakkında bir fikir vermek maksadıyla, çimento bileşiminde bulunan kimyasal maddelerin isimleri ve bunların çimentoda bulunma aralığı Çizelge 1.3.'te gösterilmiştir.

Çizelge 1.3. Çimentonun Kimyasal Analizi

Kimyasal Madde	Toplamdaki Miktarı %
CaO	63 – 67
SiO ₂	20 – 25
Al ₂ O ₃	5 – 10
Fe ₂ O ₃	2 – 4
SiO ₃	1 – 2,5
MgO	0,5 – 2,7
Diğer Maddeler	0,5 - 2

Çimentolarda hidrasyon birkaç yıl devam eder. Zaman içinde gelişmekte olan bu olaya hidrasyon sinetiği denir. Çimento hamurunda her durumdaki su oranı hidrasyon süresince değişir (Postacıoğlu 1987).

Sertleşme başlangıcında suyun yaklaşık %50 si van der Waals kuvvetleri ile çimento parçacıklarına tutunan sudur. Çimento hamurunun başlangıçtaki mukavemetini elde etmesi bu adsorbe su seviyesinde gerçekleşir. Fakat zaman içinde hidrasyonun devam etmesiyle adsorbe su azalır. Su, hidrasyon ve oluşma suyu halini alır. Böylece hidrate elemanların miktarının artmasıyla mukavemette de zamanla artış olur. Çimento içindeki makro boşluklar azalır, mikro ve jel boşlukları artar (Süvari 1995).

1.3.2. Agregalar

Agregalar, beton yapımında çimento ve su ile birlikte kullanılan, kum, çakıl, kırmataş gibi taneli malzemelerdir. Beton hacminin yaklaşık %75'i agrega tarafından oluşturulur.

Beton agregası doğal kum ve çakıl karışımlarından, ayrıca yapay kırmataş (mıcır) malzemedan meydana gelir. Doğal agregalar taş ocaklarından, kurak mevsimde dere ve göl yataklarından, deniz ve nehir tabanlarından, çöllerden elde edilirler. Bu taktirde agregalar yuvarlak biçimli olup, "Doğal Kum" veya "Çakıl" olarak adlandırılırlar. Hedeflenen boyutların elde edilebilmesi için iri taş kütleleri konkasörde kırılıp agrega daha ufak tane boyutuna indirgenebilir. Bu durumda taneler köşeli ve pürüzlü yüzeyle olup, "kırmataş – mıcır" veya "kırmakum" adlarını alırlar.

Beton yapımında kullanılan temel malzemeler (çimento, su ve agrega) arasında en pahalı olanı çimentodur. Agreganın maliyeti, çimento maliyetine göre çok düşüktür. O nedenle, istenilen kalitedeki betonu elde edebilmek kaydıyla, betonda mümkün olabildiği kadar çok miktarda agrega kullanılması, betonun daha ekonomik olmasına yol açar.

Beton yapımında agrega kullanılmasının tek nedeni daha ekonomik beton üretmek değildir. Agrega, betonun teknik özelliklerine de önemli katkılarda bulunmaktadır. Agreganın sağladığı teknik yararlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çimento hamuru, zamanla, kuruyarak büzülme gösteren bir malzemedir. Betonun içerisinde bulunan agrega taneleri, çimento hamurunun zamana bağlı olarak gösterebileceği hacim değişikliğinin serbestçe yer alabilmesini belirli ölçüde engellemektedir. O nedenle, sadece çimento hamurundan oluşmuş olan bir malzemeye oranla, betonun göstereceği hacim değişikliği ve buna bağlı olarak yer alabilecek çatlaklar daha az olmaktadır.
- Beton yapımında kullanılan agregalar, genellikle, sert ve dayanımı oldukça yüksek olan malzemelerdir. Agrega dayanımının yüksek olması, beton dayanımının da yüksek olmasına katkıda bulunmaktadır. Sert ve dayanıklı agregalar betonun aşınmaya karşı veya çevreden gelebilecek diğer yıpratıcı etkenlere karşı daha dayanıklı olabilmesine yardımcı olmaktadır.

Beton yapımında kullanılacak agrega özellikleri genelde şunlardır: Gradasyon, maksimum tane büyüklüğü, tane şekli, yüzey dokusu, su emme kapasitesi, birim ağırlık, özgül ağırlık, agregadaki zararlı yabancı maddelerin türü ve miktarı, aşınmaya dayanıklılık, dona dayanıklılık, dayanım, elastiklik modülü ve ısıl özellikler. Beton karışım oranlarının hesaplanmasında bu bilgilerin bazıları gereklidir.

Bunlar:

- Gradasyon (tane dağılımı),
- Maksimum agrega tane boyutu,
- Agregadaki mevcut su durumu ve agreganın su emme kapasitesi,
- Birim ağırlık,
- Özgül ağırlık.

Beton yollarda, aşınma tabakasını oluşturan üst betonda uygulanacak agreganın basınç direnci yüksek (en az 1500 kgf/cm²), aşınma direnci büyük ve hava etkilerine dayanıklı

malzemedden sağlanması gerekir. Kırmataşın tane biçimi, kübik forma yeterince yakın olmalıdır.

Mıcır olarak en çok kullanılan dayanıklı kireçtaşları, dolomitler veya dolomitik kireçtaşlarıdır. Sert kayaç grubuna giren bazaltlardan daha az yararlanılmakla beraber kullanıldıkları yerler bakımından önemlidirler. Şehir içleri dahil her türlü raylı ulaşım yapılarının zeminlerinde dazalt , diyabaz, riyolit gibi sağlam mağmatik kayaçlar kullanılır. Çok ağır yükler alacak önemli zeminlerin betonlarında da bu taşların mıcırları kullanılır. Türkiye’de yol agregası olarak en fazla kullanılan kayaçlar sırası ile Kireçtaşı, Bazalt, Dolomit, Granit, Kuvarsit, Grovak’tır (Ünsal 2001).

1.3.3. Su

Betonla ilgili işlemlerde su, “karışım suyu”, “kür suyu” ve “yıkama suyu” olarak kullanılır.

Çimento ve agreganın yanı sıra, betonu oluşturan bir diğer temel malzeme olan suyun karışım suyu olarak iki önemli görevi vardır.

1. Çimento ile birleşerek hidratasyonun (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların) yer almasını sağlamak
2. Betonun karılma işleminde agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak üretilen taze beton karışımında istenilen işlenebilmeyi (segregasyon olmadan, betonun kolayca karılabilirliğini, yerleştirilebilirliğini, sıkıştırılabilirliğini ve yüzeyinin düzeltilebilirliğini) sağlamak.

Beton üretiminde kullanılacak karışım suyunun kalitesi ve miktarı betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir:

Beton karışımında kullanılacak suyun içerisinde istenmeyen miktarlarda yabancı maddelerin yer alması durumunda, çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların hızı ve hidratasyonun ne ölçüde gerçekleşebileceği etkilenmektedir. Buna bağlı olarak,

taze betonun priz süresi, sertleşmiş betonun dayanımı ve dayanıklılığı etkilenmiş olmaktadır. Ayrıca, betonarme yapılarıdaki betonun içerisinde yer alan demir donatılar daha kolay ve daha çok miktarda korozyon gösterebilmektedir.

Beton karışımında kullanılmaya uygun su, betonun prize, dayanımına, dayanıklılığına ve görünümüne olumsuz etki yapabilecek türde ve miktarda yabancı maddeler içermeyen sudur. Karışım suyundaki bu maddelerin miktarları için bazı şartnamelerde sınırlamalar getirilmiştir. Örneğin; Türk Standartlarında TS 500'e göre karışım suyu için bazı hükümler mevcuttur.

1.3.4. Beton Katkı Maddeleri

Beton karışımını oluşturmak üzere kullanılan temel malzemelerin, karılma işleminden hemen önce veya karılma işlemi esnasında beton karışımının içerisine katılan malzemeye "beton katkı maddesi" denilmektedir.

Beton katkı maddeleri, betonun bazı özelliklerini değiştirerek performansını artırabilmek veya betonun daha ekonomik olmasının sağlayabilmek için kullanılmaktadır.

1.3.4.1. Kimyasal Katkı Maddeleri

Beton teknolojisinde, kimyasal katkı maddeleri, "su içerisinde erime özelliği gösteren katkı maddeleri" olarak tanımlanmaktadır.

Betonun karışım suyu ihtiyacını azaltan katkılar, taze betonun priz almasını geciktiren katkılar ve priz almasını hızlandıran katkılar, "kimyasal katkı maddeleri" olarak anılan katkı grubu içerisinde yer alan maddelerdendir.

1.3.4.2. Hava Sürükleyici Katkı Maddeleri

Beton karışımının içerisine katıldıklarında, çimento hamurunun içerisinde birbiriyle bağlantısı olmayan çok küçük ve kararlı hava kabarcıkları oluşturan katkı maddeleri, "hava sürükleyici katkı maddeleri" olarak tanımlanmaktadır.

Hava sürükleyici katkı maddeleri, betonun dona karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

1.3.4.3. İnce Taneli Mineral Katkı Maddeleri

Beton yapımında kullanılan mineral katkı maddeleri, uçucu kül, silis dumanı, tras, granüle yüksek fırın cürufu gibi puzolanik özellikli maddelerdir.

Betonda kullanılacak mineral katkı maddelerinin mutlaka çok ince taneli durumda olmaları gerekmektedir. Uçucu kül ve silis dumanı, çok ince taneli puzolanik malzemeler olarak elde edilmektedir.

Puzolanik malzemelerin dışında, taşunu gibi puzolanik özellik taşımayan ince taneli malzemeler de beton katkı maddesi olarak kullanılabilirlerdir.

İnce taneli mineral katkıları, betonun işlenebilmesini, dayanımını, dayanıklılığını ve ekonomikliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu katkıları, betondaki çimento ağırlığının yaklaşık %5 - %50' sine denk gelen miktarlarda kullanılmaktadırlar.

1.3.5. Silis Dumanı

Silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olan silis dumanı, başlangıçta çevre kirliliğini önlemek amacıyla elektro filtrelerde toplanmıştır. Tozlar yığın oluşturunca bunların değerlendirilmesi gündeme gelmiş ve bu amaçla ilk çalışmalar 1950'li yıllarda Norveç'te yapılmıştır. Çok ince taneli ve yüksek oranda amorf silis içeriği nedeni ile etkin bir puzolan olan bu madde çimento katkısı olarak kullanılmış. Sonraları betonun mukavemet ve durabilite özelliklerine olan olumlu katkıları tespit edilmiş. Zamanla kullanım alanı yaygınlaşmış ve atık bir madde olan silis dumanı günümüzde artık para ile alınıp satılan değerli bir madde haline gelmiştir. (Yeğınobalı 2003, Demirboğa 1999).

Silis dumanı katkılı çimento ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılık isteyen yerlerde kullanılmaktadır. Uygulama alanları olarak yerinde dökülmüş veya prefabrike yüksek dayanımlı veya erken dayanımı yüksek beton elemanları, ağır aşınmaya maruz döşemeler ve yol kaplamaları, erozyona ve oyulmaya maruz hidrolik yapılar, zararlı kimyasallara maruz betonlar, deniz yapıları, yüksek dayanımlı hafif beton elemanlar, beton elemanların onarımı ve güçlendirilmesi, çelik donatının korunması, yüksek performanslı çimento şerbet ve sıvaları sayılabilir.(Yeğinoğlu 2003)

Silis dumanının çimento hamuru ve sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkileri aşağıdaki başlıklar altında belirtilmiştir.

1.3.5.1. Silis Dumanının Su İhtiyacı ve Kıvama Etkisi

Çok ince ve yuvarlak silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek burada sıkışan suyu dışarı iterler ve taze hamurun kıvamı üzerinde etkili hale getirirler. Bu olumlu etkiye karşın silis dumanı tanelerinin oluşturduğu büyük yüzey alanı su ihtiyacını artıracak ve kıvamı olumsuz etkileyecektir. Dolayısı ile sonuç hamurdaki çimento ve silis dumanı miktarları ile su/bağlayıcı malzeme oranlığı gibi faktörlere bağılı olarak değışebilecektir. Araştırmalara göre çimentonun %5'i kadar katılan silis dumanı su ihtiyacını fazla değıştirmemekte, daha büyük miktarlarda ise su ihtiyacı artmaktadır (Khayat and Aitcin 1992).

Benzer şekilde, çimento yerine %7,5'dan fazla silis dumanı katıldığında hamurun akma sınırı ve viskozitesinin arttığı, daha az miktarlarda ise azaldığı bulunmuştur (Ivanov and Roshevelov 1990).

1.3.5.2. Silis Dumanının Hamur - Agrega Arayüzeyine Etkisi

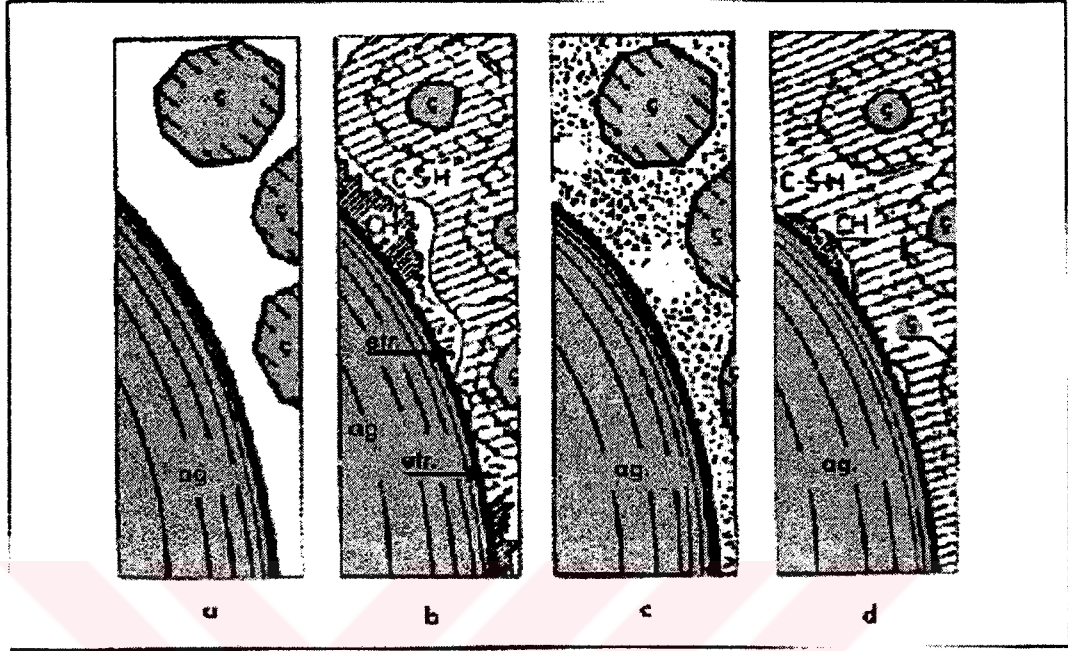
Özellikle genç yaşlardaki betonlarda iri agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki arayüzey bölgesi hamurun diğere bölgelerinden daha zayıftır. Bunun nedenleri şöyle sıralanabilir:

- Taze betonun terlemesi sırasında iri agrega taneleri altında toplanan su arayüzey bölgesinde su/çimento (s/ç) oranlığını yükseltir ve boşluk yüzdesi artar.

- Gene aynı nedenle çimento ana bileşenlerinden kalsiyum silikatların (C2S, C3S) hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit (CH) kristalleri bu bölgede daha büyüktür ve miktarca daha fazladır. Hidratasyonun başlıca ürünü ve hamurdaki esas bağlayıcı madde olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerine oranla CH'nin bağlayıcılık değeri çok daha azdır. Ayrıca kristallerin boyu büyüdükçe toplam yüzey alanı küçülür ve dolayısı ile van der Waal kuvvetleri daha da zayıflar.
- İri agrega yüzeyi boyunca katı taneler çeper etkisi nedeni ile daha gevşek bir düzen içinde yer alırlar. Burada hamur boşluk oranı daha da artar.

Araştırmacılar silis dumanı katkısının beton dayanımı üzerindeki olumlu etkisini daha ziyade agrega-hamur arayüzeyini kuvvetlendirmesine bağlamaktadırlar. Bazılarına göre çimentonun %15'i yerine katıldığında ortalama her çimento tanesine karşın iki milyon silis dumanı tanesi girmektedir. İnce silis dumanı taneleri arayüzeydeki boşlukları doldurmakta, terleme azaldığı için agrega taneleri altında daha az su toplanmakta ve daha yapışkan hale gelen hamur ile agrega taneleri arasındaki fiziksel aderans artmaktadır. Sellovold (1987) 'a göre çok ince taneli mineral katkıları çimentonun ilk yaşlardaki hidratasyonunun hızlandırmaktadır. Ayrıca bu tür ince taneler CH kristalleri için de daha fazla sayıda çekirdeklenme noktası sağladıklarından arayüzeydeki iri CH kristalleri yerine daha küçükleri oluşmaktadır.

Şekil 1.5'te katkısız ve silis dumanı katkılı hamurların agrega ile olan arayüzeyleri gösterilmiştir. a) katkısız taze hamurdaki arayüzeyi belirtmektedir. Çimento taneleri (ç) arasında su ile dolu boşluklar görülmektedir. b) de aynı arayüzey sertleştikten sonra resmedilmiştir. C-S-H ve CH kristalleri, kısmen etrenjit içeren boşluklar görülmektedir. Şeklin c) ve d) bölümlerinde ise silis dumanı katkılı taze ve sertleşmiş hamurlardaki durum gösterilmiştir. Silis dumanı (SD) taneleri boşlukları doldurmakta, CH kristallerini küçültmektedir. Ayrıca ilave puzolanik C-S-H jeli de meydana gelerek boşlukları azaltmakta, dayanımı artırmaktadır.



Şekil 1.5. Silis dumanı katkısının arayüze etkisi (Khayat and Aitcin 1992)

1.3.5.3. Silis Dumanının Betonun Birim Ağırlığına Etkisi

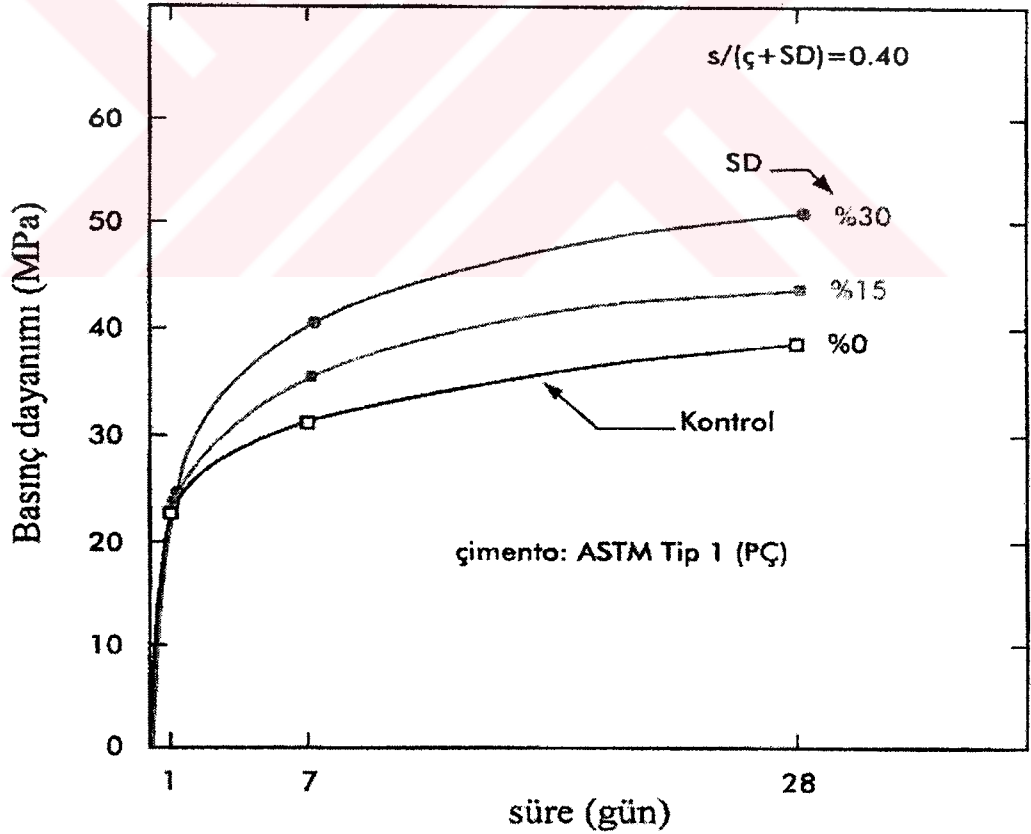
Silis dumanının özgül ağırlığı çimento ve agregaya oranla daha azdır. Bu nedenle beton birim ağırlığında biraz azalmaya neden olabilir. Ancak, silis dumanlı betonlarda diğer malzeme miktarları da değişeceğinden genellikle önemli bir ağırlık farkı söz konusu değildir.

1.3.5.4. Silis Dumanının Betonun Basınç Dayanımına Etkisi

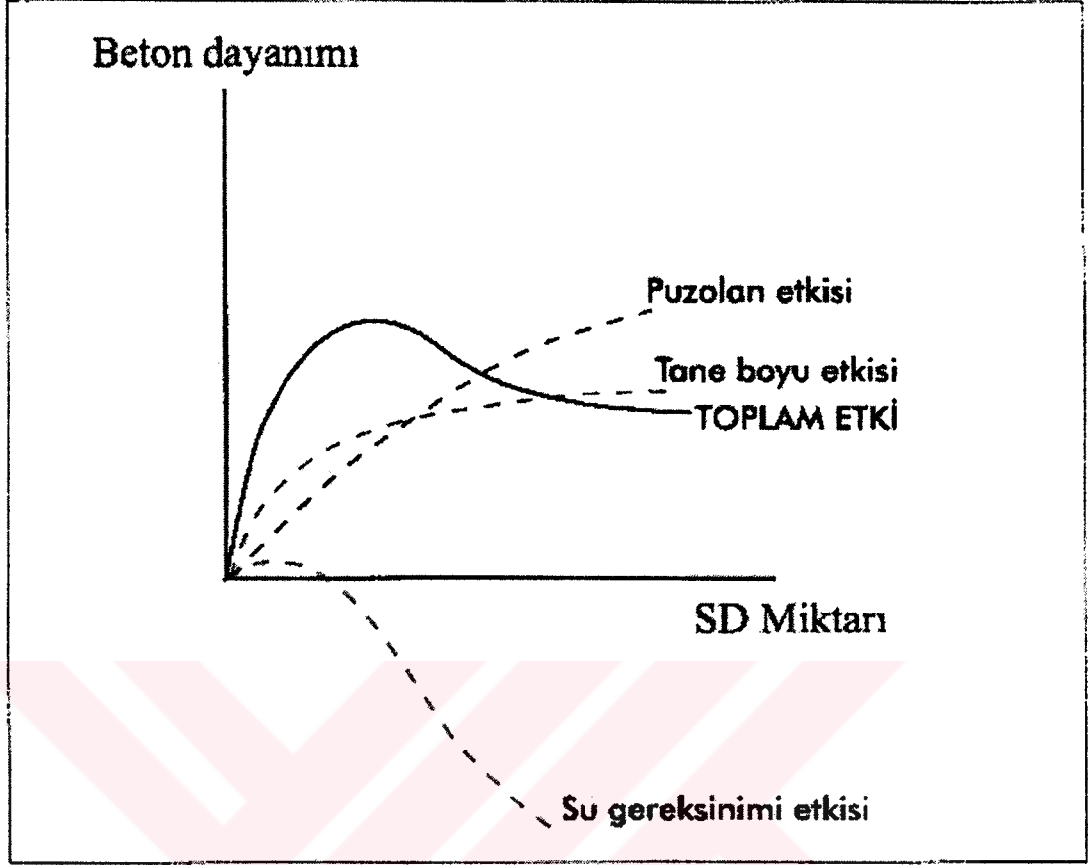
Silis dumanı katkısının beton dayanımına olan etkisi Şekil 1.7 (sayfa 34)'deki gibi açıklanabilir. Diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşturmalarına bağlanır. Ayrıca ince silis dumanı taneleri, agrega-hamur arayüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirerek beton dayanımını artırır. Bazı araştırmacılara göre silis dumanı katkısının beton dayanımına olan olumlu etkisi agrega-hamur arayüzeyinin kuvvetlenmesinden dolayıdır. Zira aynı çimento/silis dumanı orantısında silis dumanı katkılı ve katkısız çimento hamurlarının dayanımları arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Diğer

tarafından en önemli faktörün daha sıkı ve kaliteli bir çimento hamuru oluşması olduğu da öne sürülmektedir.

Silis dumanının beton basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgindir. Normal bakım koşullarında bu etki 3-28 gün arasında kendini gösterir. Ancak su/bağlayıcı (s/b) oranını 0,40 civarına indirerek 1 günlük dayanımları dahi yükseltmek mümkündür (Khayat and Aitcin 1992). Şekil 1.6.'da görüldüğü gibi süper akışkanlaştırıcı kullanıp s/b oranını 0,40'da sabit tutarak dökülen betonlarda çimentonun %30'una kadar varan miktarlarda katılan silis dumanı ilk birkaç günden itibaren dayanımları artırmaktadır (Malhotra *at al* 1987). İleri yaşlarda olumlu etki azalmakta olup bazı araştırmacılara göre silis dumanlı betonlarda dayanım 90. günden sonra düşebilmektedir (Carette *at al* 1987). Diğer taraftan, 4-6 yıl sonra dahi dayanımlarda azalma olmadığını bildirenler de vardır.



Şekil 1.6. Silis dumanı katkısının beton basınç dayanımına etkisi (Malhotra *at al* 1987)



Şekil 1.7. Silis dumanının beton dayanımına etkisi (Jahren 1983)

1.3.5.5. Silis Dumanının Betonun Çekme ve Eğilme Dayanımlarına Etkisi

Silis dumanı katkılı betonlarda çekme ve eğilme dayanımlarının basınç dayanımına oranı katkısız betonlarınkine benzer. Basınç dayanımı arttıkça çekme ve eğilme dayanımları da artar. Ancak artış hızı giderek yavaşlar. Silis dumanı miktarının artması veya süper akışkanlaştırıcı kullanılmaması eğilme-basınç dayanımları orantısının katkısız betonlarınkinden daha küçük olmasına yol açmaktadır.

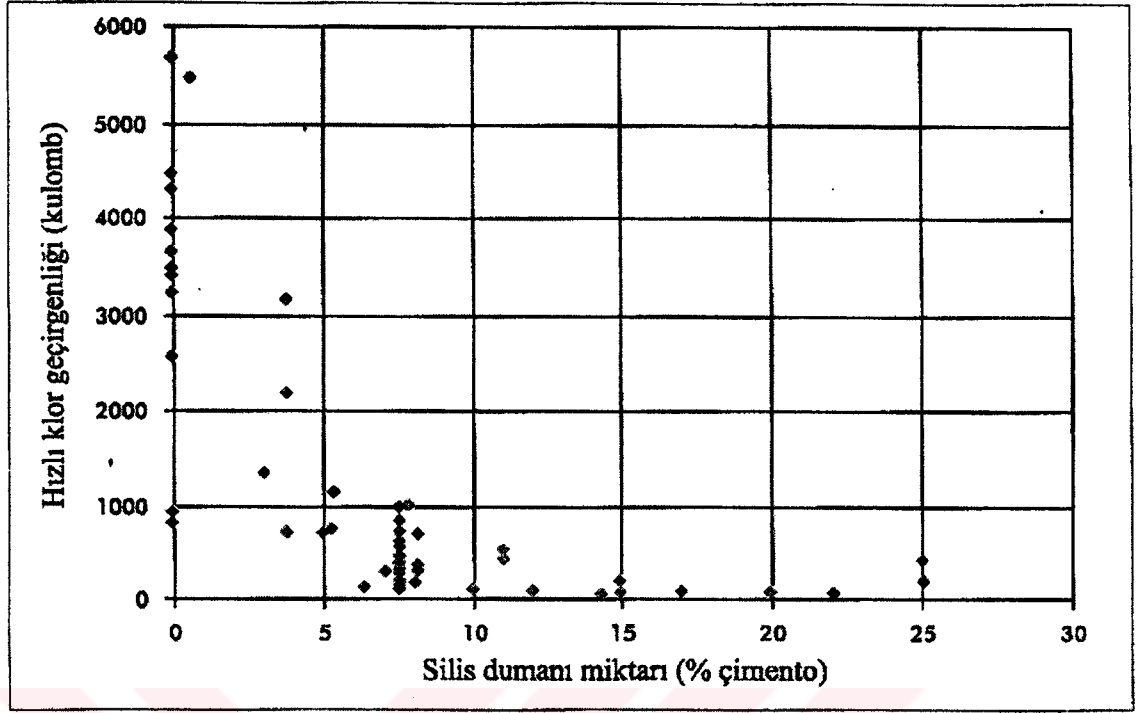
1. 3.5.6. Silis Dumanının Betonun Geçirgenliğine Etkisi

Betonun çevre etkilerine karşı dayanıklılığı büyük ölçüde geçirgenliği ile ilişkilidir. Normal betonlarda olduğu gibi silis dumanlı betonlarda da geçirgenlik bileşim, bileşenlerin özellikler, yerleştirme koşulları ve bakım gibi faktörlere bağlıdır. Ancak, geçirgenliğin azalması bağlayıcı hidrasyonundan etkilendiğinden burada bakım

metodu ve süresi daha da önem kazanmaktadır. Silis dumanı, hamurlardaki gözenek yapısını daha geçirimsiz hale getirmektedir. Silis dumanı katkılı betonlarda benzer bakım koşullarındaki betonlara göre geçirgenlik azalmaktadır. ACI tarafından yayınlanan “Betonda Silis Dumanı Kullanımı” isimli kılavuzdan alınan Çizelge 1.4 ve Şekil 1.8’de silis dumanı içeriğinin klor geçirgenliği üzerindeki etkisi görülmektedir.

Çizelge 1.4. Betonlarda klor geçirgenliği (ACI 2000)

Beton türü	Klor geçirgenliği	Geçen elektrik yükü (kulomb)
Normal beton ($s/\ç > 0.6$)	Fazla	4000 den fazla
Normal beton ($s/\ç = 0.4-0.5$)	Orta	2000 - 4000
Normal beton ($s/\ç < 0.4$)	Az	1000 - 2000
%5-15 silis dumanlı, düşük s/b orantılı beton, lateksli beton	Çok az	100 - 1000
%15-20 silis dumanlı, düşük s/b orantılı beton, polimerli betonlar	ihmal edilebilir	100 den az



Şekil 1.8. Betonlarda silis dumanı miktarı ile geçirgenlik arasındaki bağıntı (ACI 2000)

1.3.5.7. Silis Dumanının Betonun Zararlı Kimyasallara Karşı Direncine Etkisi

Kimyasal maddelerin betonu yıpratıcı etkileri çeşitli yollardan olabilir. Asitler kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek suda çözünen tuzlar meydana getirirler. Betonlardan ayrılan tuzlar geçirgenliği artırır ve zararlı etkilere karşı direnci azaltırlar. Sülfatlar katyona bağlı olarak alçı ve etrenjit oluşturarak betonda şişme ve çatlamalara yol açarlar veya C-S-H jelini ayrıştırırlar. Silis dumanı geçirgenliği etkin bir şekilde azaltması ve kalsiyum hidroksiti bağlamadaki yüksek aktivitesi dolayısı ile başlangıçtan itibaren betonda zararlı etkilere karşı direnç sağlar.

Çimentoya %10-30 oranında katılan silis dumanı ile harçların sodyum, magnezyum ve kalsiyum klorürlere karşı direncinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Klorür çözeltileri içinde bekletilen harç numunelerinin çeşitli özelliklerini incelendiği bir çalışmada da silis dumanı katkısının olumlu etkileri ortaya çıkmıştır.

Normal portland çimentosuna %10-15 kadar silis dumanı katıldığında sülfatlara dayanıklı çimento benzeri bir çimento elde edilebilmektedir. Silis dumanı katkısı özellikle sodyum sülfata karşı etkili olmaktadır.

1. 3.5.8. Silis Dumanının Alkali – Agrega Reaksiyonuna Etkisi

Betonda zamanla genişleme ve çatlamalara yol açan alkali-agrega reaksiyonları genellikle alkali-karbonat ve alkali-silika reaksiyonları olarak iki ana grupta ele alınır.

Silis dumanı katkısının alkali karbonat reaksiyonunun kontrol altına alınmasında fazla etkili olmadığı bildirilmektedir.

Alkali-silika reaksiyonu ise betona silis dumanı gibi bazı puzolanların yeterli miktarda katılması halinde geciktirilebilmekte veya önlenebilmektedir. Puzolanların ince taneleri içindeki silis çimento hamuru gözenek sıvısındaki alkalileri hızla bağlayarak yoğunlukları ve sıvının pH değerini azaltır. Bu durumda gözenek sıvısında azalan alkalilerin agregadaki reaktif silis ile reaksiyona girmeleri zorlaşır. İlâveten, katkılı hamurda geçirgenliğin azalmış olması da olumlu etki yapmaktadır.

1. 3.5.9. Silis Dumanının Beton İçindeki Çelik Donatının Korozyonuna Etkisi

Beton içine gömülü çelik donatı çubuklarının çevresindeki pH değeri yüksek (13 civarında) olan ortam çeliğin yüzeyindeki demir oksit tabakasının pasif halde kalmasını ve korozyonun ilerlemesini önleyici bir rol oynamasını sağlar. Bu tabaka klor iyonlarının ortama girmesi veya havadaki CO₂ gazının içeri sızması (karbonatlaşma) gibi etkilerle pH değerinin yaklaşık 11,5'un altına düşmesi sonucu koruyuculuk işlevini kaybeder ve çelikte korozyon başlar.

Silis dumanı, çimento hamurundaki CH ile reaksiyona girerek ilave C-S-H jeli oluştururlar. Bu sırada pH değeri bir miktar düşer. Bu düşüş korozyonu hızlandırıcı etki yapabilir. Ancak, silis dumanı katkısı dolayısı ile artan geçirimsizlik, beton içinde klor iyonu ve CO₂ yayılmasını yavaşlayacağı için silis dumanının net etkisi korozyonu azaltıcı yönde olmaktadır.

Silis dumanı katkısı sodyum klorür çözeltilerine karşı çelik donatı korozyonu üzerinde de olumlu etki yapmaktadır.

1. 3.5.10. Silis Dumanının Betonun Donma-Çözülme Direncine Olan Etkisi

Betonun donma-çözülme etkisine karşı direnci geçirimsizliği ve boşluk yapısı ile yakından ilişkilidir. Bu konuda farklı araştırmalar olmasına karşın genelde, düşük s/ç oranı, iyi sıkıştırma, etkin kür ve kimyasal katkı yolu ile hava sürüklenmesinin donma çözülme direncini artırdığı belirtilmektedir.

Saucier (1984), %15 silis dumanı katkılı, yüksek dayanımlı betonlarda 28 günlük kür sonunda ASTM C 666 metodunu uygulayarak %95 gibi yüksek bir dayanıklılık faktörü elde etmiştir. Gene yüksek dayanımlı ($s/b=0,35$) ve %10, 15 ve 20 oranlarında silis dumanı içeren, 14 gün kür edilmiş betonlarda da dayanıklılık faktörü %90'ı geçerken katkısız kontrol betonunda %56'da kalmıştır. Uçucu kül ve silis dumanı katkılı yüksek dayanımlı betonlarda dayanıklılık faktörü sırası ile %98 ve %96 olmuştur. Bir grup araştırmacıya göre s/b oranı 0,25 iken silis dumanı %30'a varan katılma oranlarında donma-çözülme direncini olumlu etkilemekte, ancak yüksek s/b oranlarında etki olumsuz olmaktadır. Başka bir çalışmada da 14 gün kür edilmiş betonlarda silis dumanı katkısının s/b oranısından bağımsız olarak olumsuz sonuçlarına değinilmiştir.

Hava katkılı ve s/b oranı 0,40 olan betonlarda çimentonun %20-%30'u yerine katılan silis dumanı donma-çözülme direncini düşürmüştür. Silis dumanı %5 oranında katıldığında ise az bir miktar olumlu etki gözlenmiştir. Geçirgenliği az olan silis dumanlı hamurlarda oluşan hidrolik basıncın olumsuz etkiye neden olduğu ileri sürülmektedir. Uygun miktarda hava sürüklenmiş betonlarda silis dumanı katkısının olumsuz etkisi pek görülmemektedir. Hava katkılı veya katkısız betonlarda çimentonun %7,5 veya %15'i yerine katılan silis dumanının donma-çözülme direnci üzerindeki etkisi s/b oranına bağlı olarak değişebilmektedir. Olumlu etki s/b oranı 0,60 olduğunda az, 0,45 olduğunda ise daha fazladır. Yüksek dayanımlı ($s/b=0,32$) betonlarda ise etki olumsuzlaşmaktadır.

Sonuç olarak, silis dumanı katkısının betonda donma-çözülme direnci üzerindeki etkisi konusundaki araştırmalardan çelişkili sonuçlar alınmaktadır. Bunda kullanılan malzeme özellikleri, beton karışımı, kür seviyesi ve hava katkısı gibi parametrelerdeki farklılıklara ilaveten uygulanan deney metodu da rol oynamaktadır.

1. 3.5.11. Silis Dumanının Betonun Aşınmaya Karşı Direncine Olan Etkisi

Beton yüzeylerinin servis koşulları altında bozulup çatlayarak parçalanması trafik yükleri altında veya akarsuların etkisi ile erozyon ve oyulma şeklinde meydana gelir. Silis dumanı katkısı gerek hamur gerekse hamur-agrega arayüzey dayanımlarını artırması nedeni ile betonun bu gibi yıpratıcı etkilere karşı direncini artırmaktadır. Böhme cihazı ile yapılan deneylerde çimentonun %10'u kadar katılan silis dumanı ile aşınma kaybının %40 mertebesinde azaltılabileceği bulunmuştur.

1.3.6. Uçucu Kül

Elektrik üretimi için, termik santrallerin çoğunda yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Kömür, %80'inin $75\mu\text{m}$ elekten geçebilecek inceliğe sahip olacak tarzda öğütülmekte ve havayla birlikte, buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla, yakıt olarak püskürtülmektedir. Yanma işlemi ile birlikte ortaya çıkan çok ince taneli küller, yakıt gazlarıyla uçarak bacadan dışarı çıkmak üzere hareket etmektedirler. Birtakım elektrostatik veya elektro mekanik yöntemler vasıtasıyla bunlar tutulmakta ve kül toplayıcı silolara kanalize edilmektedir. Daha sonra termik santralin uzağında bir yerde atık olarak depolanmaktadır.

Uçucu küllerde çok yüksek miktarlarda yer alan oksitler SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'dür. Bunların yanı sıra CaO , MgO , C (çok ince taneli yanmamış kömür) ve Na_2O da bulunabilmektedir.

Uçucu küllerin yapısının büyük bir bölümü (%60 - %90'ı) amorf durumdadır. Geri kalan bölümünde, mullit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer alabilmektedir.

Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1 - $150\mu\text{m}$ arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak, 2,1 – 2,7 (ortalama 2,4) g/cm^3 yoğunluğa sahiptirler.

Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de, aynen ince taneli doğal Puzolanlar gibi, puzolanik özellik

göstermektedirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır. Hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde hem de beton katkı maddesi olarak kullanılabilirler.

Uçucu külün betonun bazı özelliklerine olan etkileri aşağıdaki başlıklar altında belirtilmiştir.

1.3.6.1. Uçucu Külün Beton Karışımının Su İhtiyacına Etkisi

Sabit bir çökme değeri elde edebilmek için uçucu küllü beton karışımının ihtiyacı olan su miktarı genellikle, katkısız betonunkinden daha az olmaktadır. Yapılan araştırmalarda, çimento ağırlığının %20-30'u azaltılarak onun yerine uçucu kül kullanılan betonların su ihtiyacında yaklaşık %7 kadar daha az su kullanıldığı görülmüştür. Kül taneciklerinin küresel şekilli olmaları, daha az sürtünmeye yol açtığı için, daha az su ihtiyacı olmasına neden olmaktadır.

Uçucu küllü betonların su ihtiyacı, uçucu külün inceliğine ve kullanıldığı miktara bağlı olmaktadır. İncelik arttıkça su ihtiyacında artma olmaktadır.

1.3.6.2. Uçucu Külün İşlenebilmeye Etkisi

Uçucu küllü betonların işlenebilmesi, katkısız betonlarınkinden daha iyi olmaktadır. Bunun iki nedeni bulunmaktadır:

- Uçucu külün yoğunluğu portland çimentosunun yoğunluğundan daha azdır. O nedenle, puzolanik beton yapımı için çimento ağırlığının bir bölümünün yerine uçucu kül kullanıldığında, betondaki bağlayıcı hamurun hacmi artmaktadır. Daha büyük hacme sahip bağlayıcı hamur, taze betondaki agrega tanelerinin arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır.
- Uçucu kül taneleri küresel şekillidir. Küresel şekilli tanecikler iç sürtünmeyi azaltmakta, betonun akıcılığını artırmaktadır.

1. 3.6.3. Uçucu Külün Dayanıma Etkisi

Normal olarak, ilk zamanlarda, uçucu küllü betonun dayanımı, katkısız beton dayanımına kıyasla birazcık daha az olmaktadır. Ancak nihai dayanım oldukça yüksektir. İlk günlerdeki dayanım artışı, uçucu külün inceliğine ve tipine göre değişiklik göstermektedir. C tipi küllerin ilk zamanlardaki dayanıma katkısı, F tipi küllerinkinden daha fazladır (Erdoğan 1996). Ayrıca, incelik arttıkça, ilk zamanlardaki dayanım nispeten daha yüksek olmaktadır.

1. 3.6.4. Uçucu Külün Betonun Ekonomikliğine Etkisi

Uçucu küller, portland çimentosuna kıyasla, çok daha ucuz olan atık malzemelerdir. Katkısız betondakine oranla daha az portland çimentosunun yer aldığı uçucu küllü betonlar daha ekonomik olmaktadır. Ayrıca, uçucu küllü betonların işlenebilmesinin daha iyi, pompalanabilirliğinin daha kolay, yüzey düzeltilmesinin daha rahat olması, betona uygulanan işlemleri kolaylaştırmakta ve böylece ekonomikliğe olumlu katkı sağlamaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde tez konusu paralelinde yapılan geçmiş tarihli çalışmalar sunulacaktır.

Cramer ve Carpenter (1999), agrega dağılımının optimizasyonu ile, inşa aşamasında ve hizmet süresi boyunca beton performansında iyileştirmelerin elde edilebileceğini belirtmiş. Üç farklı gradasyon, tortul ve volkanik kökenli iki tür kayaç, hem kırmataş hem de doğal malzeme kullanarak beton deney numuneleri hazırlamış. Üretilen numuneler üzerinde dayanım, büzülme, geçirimsizlik ve donma çözülme deneyleri yapmıştır. Araştırma sonucunda şu bulgular elde edilmiştir:

No.4 ve No.16 arası tanelerin azaltıldığı açık gradasyonlu karışımlar %2-14 kadar bir dayanım düşüşüne sebep olmuş, büzülme %8 oranda artmış, geçirimsizlik %25 oranında artmıştır. Bu gradasyonla hazırlanan karışımlar en düşük donma-çözülme direnç değerlerini vermiştir.

No.4 ve No.16 elekleri arasındaki tanelerin artırıldığı, No.50 ile No.200 elekleri arası tanelerin azaltıldığı optimize edilmiş gradasyonlu karışımlarla üretilen numuneler, basınç dayanımını %10-20 kadar artırmış, aynı hava içeriği için gerekli hava sürükleyici katkı miktarını azaltmıştır. Bu gradasyon, segregasyonu önemli ölçüde azaltmış ve uzun süre uygulanan (1-3 dakika) vibrasyon sonucu daha yüksek yoğunluklu yüzeyler elde edilmesini sağlamıştır.

Literatürde 8/18 band gradasyon olarak adlandırılan tane dağılımı sınırları içinde kalan optimize edilmiş gradasyon ve kontrol gradasyonu, dayanım ve dayanıklılık açısından iyi performans sergilemiştir.

Donma çözülme direnci açısından en kötü performansı, kayaç cinsi olarak, doğal tortul kayaçlar göstermiştir. En iyi performansı ise kırmataş volkanik kayaçlar sergilemiştir.

Sarkar ve Little (1999) yaptıkları çalışmada sülfatlı ortamlarda üretilen betonlarda veya sülfatla kirlenmiş agrega ile üretilen betonlarda, büyük miktarda genleşme ve bozulmaların gözlemlendiğini belirtmiş. Bu genleşme ve bozulmaların, çok miktarda oluşan

“calsium sulfoaluminate hidrate” (etringite) ve “calsium silicasulfo hidrate” (thaumasite) minerallerinden kaynaklandığını ifade etmiştir. Yapılan çalışma sonucunda; %13 oranında kullanılan sülfata dirençli çimento (Tip V) kullanılan ve %9 oranında sülfata dirençli çimento ile birlikte %10 C sınıfı uçucu kül kullanılan karışımlarda, genleştirici etkisi olan “sulfo hidrate” minerallerin oluşumunun engellendiği gözlenmiştir.

Hoff ve Buck (1983), Detwiler *et al* (1989); “kritik yaş” kavramının, herhangi bir yaştaki betonun yeterince sağlamlaşması, doyumluk derecesinin yeterince düşmesi ve betonun başlangıç donmasının onu hasara uğratmaması için sahip olması gereken yaş olduğunu belirtmişler. Bu kavram, kür yöntemler, dayanımı hızlandırmak için uygulanan metotlar ve/veya beton kesitinin kalınlığına göre belirlenen bir niteliktir ve yapının servis kategorisine, hızlandırıcı yada erken yüksek dayanımlı çimento kullanılıp kullanılmadığına bağlıdır. Genellikle kritik yaş 8-48 saat arasında değişir (Şahin 2003).

Hoff and Buck (1983), “kritik dayanım” kavramının, betonun donmaya karşı dirençli olduğu minimum dayanım olduğunu belirtmişler. Ancak, kritik dayanım değeri üzerinde kesin bir mutabakat yoktur. İsveç’te 2,4 – 4,4 MPa, Kanada’da 6,9 – 10,3 MPa, Rusya’da 4,8 – 8,8 MPa, Japonya’da 5,9 MPa, İsviçre’de 14,5 MPa değerleri önerilmiştir (Şahin 2003).

Douglas (1987), Durekoviç *et al* (1989), Hooton (1993), Bilodean and Malhotra (1997), silis dumanı, uçucu kül ve fırın cürufu gibi mineral katkı maddeleri uygun oranlarda kullanıldıkları zaman betonun mekanik özellikleri ve durabilite karakteristiklerinde mükemmel iyileşmelere yol açtığını belirtilmiş. Ancak, yapılan çalışmalar incelendiğinde mineral katkı maddelerinin betonun don direnci üzerindeki etkilerinin birbirinden farklı olduğu görülmüştür: Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı katkılı betonlar, uçucu kül katkılı betonlardan daha yüksek don direncine sahiptirler. Diğer taraftan, hava sürüklenme mineral katkılı betonların don direncini tamamen değiştirmiştir. Hava sürüklenmemiş mineral katkılı betonlar normal portland çimentolu betonlardan daha zayıf don direnci göstermişken, hava sürüklenmiş betonlar ise normal portland çimentolu betonlardan daha iyi don direnci göstermiştir (Şahin 2003).

Miller *et al* (2000), çimento yerine değişik oranlarda uçucu kül ve silis dumanı kullanarak beton karışım dizaynı yapmış. Yayında şu bulgulara yer verilmiştir:

Agrega tipi değiştirilmiş, bunun sonucu büzülme çatlakları oluşmuş. Bu çatlaklar uygun kür koşulları ile elimine edilebilmiştir.

Özellikle uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi puzolanların kullanılması ve düşük su/bağlayıcı oranlarında üretilen betonlarda yoğunluk artmış, bu da çok daha iyi bir dayanıklılığı sonuç vermiş.

Puzolanik materyallerin, çimento hidrasyon ürünü olan kalsiyum hidroksiti, kalsiyum silika hidrata dönüştürdüğü ifade edilmiş ve bunun sonucu da puzolanik materyal katkılı betonlarda dayanım artışı sağlandığı belirtilmiştir.

Puzolanların daha yavaş hidrasyon olduğu ve daha geç dayanım kazandığı belirtilmiş.

Çimento tanelerinden küçük olan uçucu kül taneleri bunların arasını, daha da küçük olan silis dumanı taneleri de uçucu kül tanelerinin arasını doldurarak mikofiller etkisi göstermiş ve yoğunluğu artırmıştır.

Bajorski and Streeter (2000), silis dumanı, uçucu kül ve toplam bağlayıcı miktarının, betondaki çatlaklar ve geçirimsizlik özellikleri üzerine etkisini incelemişler. Çalışmada betonun diğer özelliklerinde bir kötüleşme olmadan geçirimsizlikte daha ileri düzeyde bir azalma yapılmaya çalışılmıştır. Karışımlarda çimento yerine ağırlıkça %4-14 arası silis dumanı, %10-35 arası uçucu kül, 327-428 kg/m³ toplam bağlayıcı miktarı kullanılmıştır. Araştırmada şu bulgulara yer verilmiştir:

%15-20 uçucu kül, %11-12 silis dumanı ve 327-375 kg/m³ toplam bağlayıcı madde içeren karışım numuneleri en düşük geçirimsizlik değerlerini vermiş.

Genel eğilim olarak uçucu kül miktarı arttıkça, geçirimsizlik, hava içeriği, çökme değeri artarken çatlak genişliğinin, çatlak sıklığının ve basınç dayanımının azaldığı görülmüştür.

Silis dumanı içeriği arttıkça, geçirimsizlik, hava içeriği, çatlak genişliği, çatlak sıklığı azalırken basınç dayanımı artmıştır.

Carpenter and Cramer (1999), silis dumanı, uçucu kül, öğütülmüş cam ve fırın cürufu, reaktif agrega içeren betonlarda alkali silika reaksiyonunun olumsuz etkilerini azaltmak için kullanmışlar.

%20 oranında kullanılan uçucu kül alkali, silika reaksiyonunu azaltmada etkili olmuştur.

CaO içeriği az olan, silika içeriği nispeten daha fazla olan F sınıfı uçucu kül, alkali silika reaksiyonunu azaltmada, C sınıfı uçucu külden daha etkili olmuştur.

Öğütülmüş cam, F sınıfı uçucu kül veya düşük su/çimento oranı sorunu çözmede anahtar rol oynamıştır.

Mukai *et al* (2000), içinde bağlayıcı olarak uçucu kül, silis dumanı, fırın cürufu, portland çimentosu bulunan karışımlar hazırlamış. Toplam bağlayıcı miktarı 524 kg/m^3 ve silis dumanını 17 kg/m^3 olacak şekilde sabit tutmuş, (uçucu kül)/(fırın cürufu) oranını değiştirerek farklı karışımlar hazırlamış. İlk günlerdeki dayanımı ve nihai dayanımı gözlemlemiştir.

Uçucu kül/fırın cürufu oranı arttıkça hem ilk günlerdeki hem de nihai dayanım artmıştır.

Çalışmada, 1 günlük maksimum basınç dayanım değeri olarak 33.5 MPa gibi yüksek bir değer elde edilebilmiştir.

Siddique (2003), ince agrega yerine uçucu kül kullanmış ve betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü değerleri üzerine etkilerini araştırmış. %0-50 arası

oranlarda ince agrega yerine uçucu kül kullanmıştır. Çalışma sonucunda şu bulgular elde edilmiştir:

İncelenen tüm beton özellikleri uçucu kül içeriği arttıkça iyileşmiş. İyileşme 28. günden sonra daha açık bir şekilde gözlenmiş.

Beton yaşı ile birlikte araştırılan beton özelliklerindeki iyileşmede artmış.

En büyük eğilme dayanımı %50 uçucu kül içeriğinde gözlenmiş. 28. gün 4.3 MPa, 91. gün 5.2 MPa, 365. gün 5.4 MPa eğilme dayanım değerleri elde edilmiş.

Sonuç kısmında, yapı betonlarında F sınıfı uçucu kül kullanımının çok uygun olduğu belirtilmiş.

Yoon *et al* (2002), yüzeyi betonla kaplanmış kaya dolgu barajlarda çimento yerine kullanılan uçucu kül oranındaki artışın bazı dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerine etkisini araştırmıştır. Uçucu kül oranı arttıkça dayanıklılık özelliklerinin iyileştiği gözlenmiş. Araştırmada, uçucu kül %0, 10, 15 ve 20 oranlarında kullanılmış. En iyi performansı % 15 çimento yerine kullanılan uçucu küllü karışımlar sergilemiştir.

7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarında en yüksek değerleri %10 uçucu kül içerikli karışım vermiş. 2900 cm²/gr özgül yüzey alanlı normal portland çimentosunun %100 kullanıldığı (%0 uçucu kül) karışım numuneleri en düşük basınç dayanım değerlerini vermiş.

Islanma-kuruma periyotlarında dayanım düşüşü, uçucu kül içeriği arttıkça artmış. Yani uçucu küllü numuneler kötü performans sergilemiş.

En yüksek geçirimsizliği %15 uçucu kül içeren karışımlar sergilemiş.

300 donma çözülme çevrimi sonunda en yüksek elastisite modülü değerleri, %15 ve %20 uçucu küllü numunelerde gözlenmiş.

3.2-3.6 MPa arasında eğilme dayanımları elde edilmiş. En yüksek eğilme dayanımı %10 uçucu kül içeriğinde, en düşük ise %0 uçucu kül içeriğinde gözlenmiş.

En yüksek aşınma dayanımı, 90 günlük numunelerde ve %15 uçucu kül içeriğinde görülmüş.

Papadakis *et al* (2003), kimya mühendisliği bölümünde yaptığı çalışmada, silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, doğal puzolan gibi çimentolayıcı özelliği olan katkı maddelerinin bağlayıcılık özelliklerinin, kimyasal içerikleri ile ilişkisini incelemiştir. Reaktif silika içeriği ile k-faktörü⁽¹⁾ arasında bir ilişki kurmayı amaçlamıştır. Araştırmada, mineral katkıların inceliğinin mukavemet artışına katkı sağladığını belirtmiş. Ancak çözülebilir silika içeriğinin (aktif silika), mukavemet kazandırmada, inceliğinden çok daha etkili olduğunu vurgulamıştır. Aktif silika içeriği ile basınç dayanımları arasında doğrusal bir ilişki tespit etmiştir.

Mineral katkıların aktifliği, içerdiği aktif bileşenlere bağlanır. Bu aktif bileşen esas olarak çimento hidratasyon ürünü olan CH'i, C-S-H'a (Kalsiyum Silika Hidrat) dönüştürerek mukavemet kazandıran toplam silika içeriğinin bir parçası olan aktif silikadır. (Taylor 1997, Young 1999)

Aktif silika, kireç ile bağlanıp C-S-H jel artışı sağlar. Aksine kristal silika çok düşük reaktivite sergiler. (Richartz 1984)

Güvercin (2002) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, silis dumanı ve uçucu külün karışım suyu ihtiyacını artırdığını gözlemiştir. %10 silis dumanı içeriği yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. %10 ve %20 oranlarındaki uçucu külün, çimentonun basınç dayanımını 90 gün sonunda artırdığını gözlemiştir.

(1) k-faktörü, aynı dayanımı sağlaması ve aynı su/bağlayıcı oranına sadık kalmak koşuluyla elde edilen mineral katkılı (uçucu kül veya silis dumanı) ve normal (mineral katkısız) betonların karşılaştırılması sonucunda kullanılan mineral katkının bağlayıcı performansının ifade edilmesi için geliştirilen bir kavramdır.

Belli bir miktar çimentonun azaltılıp yerine aynı dayanımı sağlayacak kadar uçucu kül (ağırlıkça eksiltelen çimentodan az, eşit veya fazla olabilir) katılmasıyla elde edilen uçucu kül miktarının, eksiltelen çimentoya oranının tersi k-faktörü olarak adlandırılır (Türker 2003).

Şahin (2003) yapmış olduğu doktora tez çalışmasında don etkisi ile betonda oluşan hasarın tespiti için farklı iki durumda, değişik değerlendirme yöntemleri uygulamıştır. Donma-çözülme etkisi ile betonda 100 çevrim sonunda meydana gelen hasarı en iyi boy ve ağırlık değişiminin temsil ettiğini belirtmiştir. Donma-buz çözücü tuz etkisi ile betonda 50 çevrim sonucu oluşan hasarı ise en iyi yansıtan değerlendirme parametresi, birim alandaki pullanma miktarı olmuştur.

Demirboğa (1999) silis dumanı ve uçucu külün, perlit ve pomza ile üretilen hafif betonların özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmış. Elde edilen sonuçlarda, SD ve UK'ün, çalışmaya konu olan hafif betonların rötre ve donma-çözülme özelliklerini iyileştirdiğini, ısı iletkenlik değerleri ve birim ağırlıklarını azalttığını belirtmiş. Silis dumanının 28 günlük basınç dayanımını artırdığını, uçucu külün ise düşürdüğünü ortaya koymuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MATERYAL

Bu bölümde beton deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan malzemeler, beton karışım oranları ve üretilen deney numuneleri hakkında bilgiler verilmiştir.

3.1.1. Çimento

Bu çalışmada beton deney numuneleri için Aşkale Çimento Fabrikası ürünü olan portland çimentosu (PÇ 42,5) kullanıldı. Çimentonun özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneylerde Kullanılan Çimentonun Özellikleri

Kimyasal Analiz Sonuçları (%)		Fiziksel Test Sonuçları		
SiO ₂	20,06	İncelik	0,2mm elek üstü %	-
Al ₂ O ₃	5,16		0,04mm elek üstü %	17,7
Fe ₂ O ₃	3,6	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		3,15
CaO	62,43	Özgül Yüzey(cm ² /gr)		3264
MgO	2,82	Litre Ağırlığı(gr)		1800
SO ₃	2,32	Priz Başlangıcı(saat-dk)		2sa-10dk
Kızdırma Kaybı	1,55	Priz Sonu(saat-dk)		3sa-00dk
Na ₂ O	0,36	Hacim Gen.(mm)		3
K ₂ O	0,6	Basınç Day. (N/mm ²)	2.Gün	24,5
	0,0171		7.Gün	
Ölçülemeyen	1,05		28.Gün	
Toplam	100	Eğilme Day. (N/mm ²)	2.Gün	4,8
Serb.CaO	1,03		7.Gün	
Çözünmeyen Kalıntı	0,72		28.Gün	

3.1.2. Silis Dumanı

Çalışmada kullanılan silis dumanı Antalya'da Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinde elde edilmiştir. Bu tesisten yıllık elde edilen silis dumanı miktarı, toplam 1000 – 2000 ton arasında değişmektedir. Silis dumanının kimyasal bileşimi ve elek analizi Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Silis Dumanının Kimyasal Bileşimi ve Elek Analizi

Kimyasal Bileşim		Elek Analizi	
Madde	Miktar(%)	mm	Kalan(%)
Cr ₂ O ₃		+ 0,250	0,3-1
SiO ₂	85-95	+0,125	0,8-2,5
F ₂ O ₃	0,5-1,0	+0,074	0,5-2,5
Al ₂ O ₃	2,0-3,0	+0,044	1,0-7,5
MgO	1,0-2,0	+0,038	3,0-7,0
CaO	0,8-1,2	-0,038	92-80
C	0,5-1,0		
S	0,1-0,3		
Kızdırma Kaybı	0,5-1,0		

3.1.3 Uçucu Kül

Deneyleerde Çayırhan Termik Santrali Uçucu külü kullanılmıştır. Uçucu külün kimyasal analiz sonuçları ve standartlara uygunluğunun karşılaştırılması Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit, %	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO ₂	50,98						
Al ₂ O ₃	13,11						
Fe ₂ O ₃	9,74						
S+A+F	73,83				>70,00	>70,00	>70,00
CaO	11,82						
MgO	3,91				<5,00		
SO ₃	3,94	<3,00			<5,00	<5,00	<5,00
K ₂ O	1,91						
Na ₂ O	2,71						
KK	0,86	<5,00	<5,00	<5,00	<10,00	<5,00	<6,00
Cl ⁻	0,014	<0,10					
Serb.CaO	0,56	<1,00					
Reak.SiO ₂	40,89	>25,00					
Reak.CaO	8,78						

Çayırhan uçucu külü, reaktif kireç miktarının %10'un altında olması nedeniyle TS EN 197-1 standardına göre V sınıfına (silissi uçucu kül) girmektedir. Yine ASTM C 618 standardına göre SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃ değerinin %70'in üzerinde olması nedeniyle F sınıfına (düşük kireçli) dahil olmakla birlikte, analitik CaO miktarının %10'un üzerinde olması nedeniyle kireçsi kül sınıfına da girmektedir. Buna göre, bu külün her iki uçucu kül sınıfı için de sınırda olduğu görülmüştür. Çizelge 3.3'te görüldüğü gibi, Çayırhan uçucu külü, ASTM C 618 ve TS 639'daki S+A+F>70 koşulunu sağlamaktadır.

Sonuç olarak Çayırhan uçucu külünün, üç standartta da kimyasal bileşen bazında istenilen koşullara tamamıyla uygun, TS EN 450'ye de SO₃ hariç uygun bir küldür.

3.1.4. Agregas

Deneyleerde kullanılan agregas, Erzurum – Aşkale yolu üzerinde bulunan Makimsan kırma-eleme tesisinden temin edilmiştir. Eleme tesisinden değişik boyut aralıklarında 4 gruba ayrılmış halde alınan agregas kümelerinin tane dağılımları (elek analizi sonuçları) Çizelge 3.4'te gösterilmiştir. Tüm gruplardaki agregalar, bu tesisten elde edilen kırılmış bazalt agregasıdır.

Bazalt; koyu siyah renkli, ufak kristalli veya camsı, volkanik bir kayas olup, gabronun yüzey tipidir. Bileşiminde plajiolaz, ojit, olivin, nadiren kuvars, manyetit ve ilmenit bulunur. Bunlar koyu renkli camsı bir hamur içindedir. Gözle ancak iri mineraller olan olivin, kuvars, ojit ve plajiolaz fark edilir (Ünsal 2001).

Agregalar aşağıda belirtilen şekilde farklı açılardan sınıflandırılabilir. Kullanılan agreganın sınıflandırmadaki yeri (x) işareti ile gösterilmiştir.

Kaynağına göre :	Doğal(x)	Yapay
Özgül ağırlığına göre :	Normal (2.4-2.8kg/dm ³)(x) Ağır	Hafif
Tane şekline göre :	Yuvarlak Yassı	Köşeli(x) Uzun
Elde edilmesine göre :	Doğal(x) Isıl işleme tabi tutulmuş	Yan ürün
Jeolojik orijine göre :	Volkanik Metamorfik(x)	Tortul
Reaktif özelliklere göre:	Reaktif	Reaktif olmayan(x)

Çizelge 3.4. Agrega gruplarının elek analiz sonuçları

Elek no	Elek Üstünde Kalan %			
	A	B	C	D
37,5				
25				
19				100,0
12,5			44,7	0,0
9,5		10,9	51,1	0,0
5	0,5	76,2	4,2	
2,36	34,7	11,0		
1,18	31,1			
600	19,3			
300	9,3			
150	4,5			
75	0,4			
Elek altı	0,1			

İstenilen gradasyonda bir agrega karışımı elde etmek için bazı hesaplamalar yapılmıştır. Sonuçta agrega gruplarının;

A grubu: %45

B grubu: %12

C grubu: %29

D grubu: %14

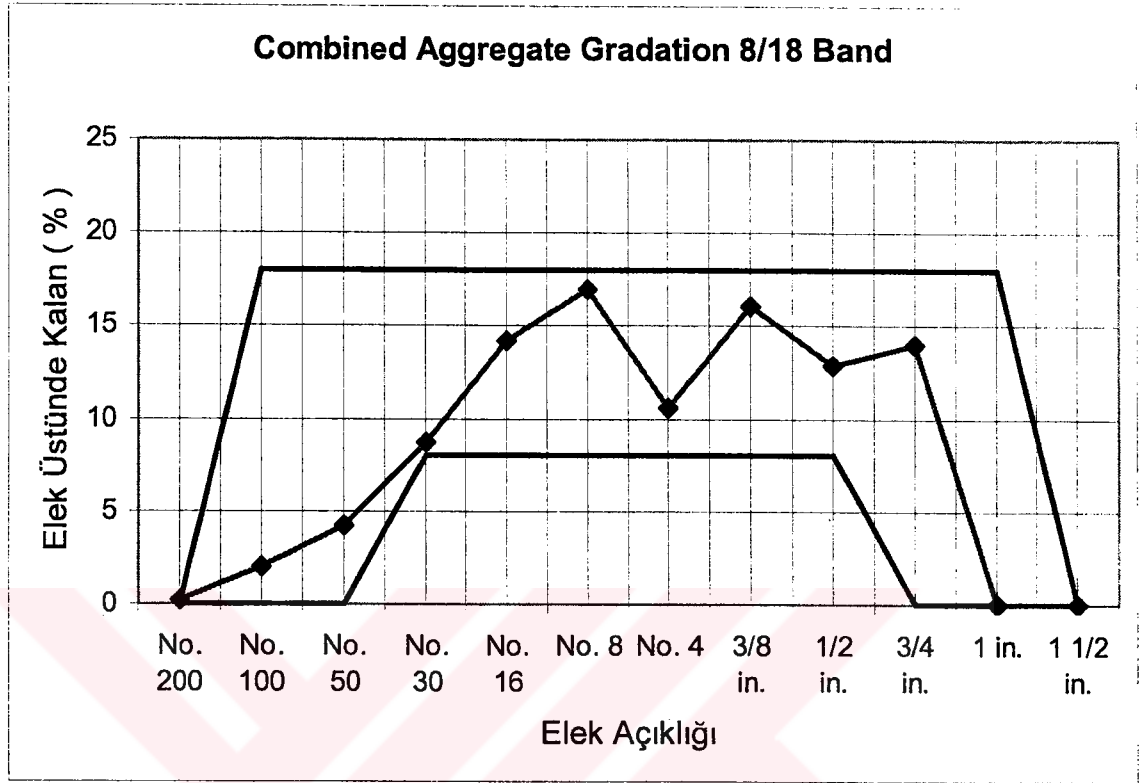
oranlarında karıştırılması uygun bulunmuştur. Agrega gruplarının belirtilen oranlarda ağırlıkça birleştirilmesiyle oluşan yeni karışımın tane dağılım değerleri Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Agrega guruplarının birleştirilmesiyle elde edilen yeni karışımın elek analiz sonuçları

Elek No.	Birleştirilmiş Gradasyon			Gradasyon Limitleri
	%Kalan	Yığılımlı		8-18 Band
		%Kalan	%Geçen	%Kalan
1 1/2 in. 37,5mm	-	-	-	0
1 in. 25mm	-	-	100	0 - 18
3/4 in. 19mm	14,0	14	86	8 - 18
1/2 in. 12,5mm	12,9	26,9	73,1	8 - 18
3/8 in. 9,5mm	16,1	43,1	56,9	8 - 18
No. 4 5mm	10,6	53,7	46,3	8 - 18
No. 8 2,36mm	17,0	70,6	29,4	8 - 18
No. 16 1,18mm	14,2	84,8	15,2	8 - 18
No. 30 600µm	8,7	93,5	6,5	8 - 18
No. 50 300µm	4,2	97,7	2,3	0 - 18
No. 100 150µm	2,0	99,7	0,3	0
No. 200 75µm	0,2	99,9	0,1	-
Elek altı	< 0,1	100	0	-

Çizelge 3.5'te "Gradasyon Limitleri" sütununda belirtilen sınır değerler, Iowa Department of Transportation (IDOT) tarafından yayınlanan "Aggregate Proportioning Guide for PC Concrete Pavement" isimli kılavuzdan alınmıştır. Kılavuzda, yol betonlarında kullanılacak agreganın tane dağılımının "Combined Aggregate Gradation 8-18 Band" şeklinde isimlendirilen bu gradasyonu limitleri arasında kalmasıyla iyi performans sergileyeceği belirtilmiştir.

Şekil 3.1. Agrega gruplarının birleştirilmesi ile elde edilen yeni karışımın tane dağılım eğrisi



Karışım hesapları için agregalara ait bazı özelliklerin bilinmesi gerekmektedir. Bunların tespiti için birim ağırlık, özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deneyleri yapılmış, sonuçlar Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Agrega gruplarının Birim Ağırlık, Özgül Ağırlık ve Yüzey Nemi Oranı değerleri.

Agrega Grubunun ismi	Tane Büyüklüğü	Birim Ağırlık t/m ³	Özgül Ağırlık t/m ³	Yüzey Nemi Oranı %
A grubu	Kırma kum	1,44	2,38	-0,754
B grubu	İnce Mıcır	1,56	2,57	0,266
C grubu	Orta Mıcır	1,64	2,56	-0,337
D grubu	Kaba Mıcır	1,65	2,60	0,092

3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı

İKSA Ltd. Şti.'nin üretmiş olduğu İksament-NS isimli katkı, karışım suyuna çimento ağırlığının %1,25-2'si oranlarında katılarak kuru-plastik kıvamlı taze betonlar elde edilmiştir. Akışkanlaştırıcı katkı ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir. Karışımlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı oranları ve taze beton karışımlarından slump deneyi sonucu elde edilen çökme değerleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Ad : İKSAMENT – NS

Tanım : YÜKSEK ORANDA SU AZALTICI VE SÜPER AKIŞKANLAŞTIRICI

Dozaj : Çimento ağırlığına göre %0,5 ila %3 oranında kullanılır

Uygulama : Beton karma suyuna veya hazır betona ilave edilir.

Yoğunluk : 1,20 Kg/L

Raf Ömrü : Orijinal ambalajında 1 yıl.

T.S. : 3452(Y.A.) Normu

Çizelge 3.7. Karışımlara katılan süperakışkanlaştırıcı katkı (İksament-NS) miktarı ve taze beton karışımların çökme deney sonuçları.

KARIŞIM NO	U.K. (%)	S.D. (%)	İksament-NS		Çökme Değeri (cm)
			(%)	(kg/m ³)	
1	0%	0%	2	7	2,5
2	0%	5%	2	7	2,5
3	0%	10%	2	7	2,5
4	5%	0%	1,5	5,25	2,5
5	5%	5%	1,5	5,25	2
6	5%	10%	2	7	3
7	10%	0%	1,25	4,375	2
8	10%	5%	1,5	5,25	3
9	10%	10%	1,5	5,25	3
10	15%	0%	1,25	4,375	2,5
11	15%	5%	1,25	4,375	2,5
12	15%	10%	1,25	4,375	3

3.1.6. Karışım Suyu

Deneylerde kullanılan karışım suyu, Atatürk Üniversitesi içme suyu şebekesinden alınmıştır.

3.2. Malzemelerin Karışımlarda Kullanım Oranları

Deneylerde kullanılacak beton karışımlar için bağlayıcı miktarı 350 kg/m^3 , su/bağlayıcı oranı 0.45, boşluk oranı %2 alınarak karışım hesapları yapılmıştır. Hesaplarda agregalar için yüzey nem oranları dikkate alınarak nem düzeltmesi de yapılmıştır. Karışımlarda ağırlıkça %0, %5, %10 oranlarında Silis Dumanı ve %0, %5, %10, %15 oranlarında Uçucu Kül çimento yerine kullanılarak 12 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Her bir karışım için çimento miktarı, belirlenen oranlarda azaltılmış ve aynı ağırlıkta mineral katkı, beton karışımına bağlayıcı olarak ilave edilmiştir. 12 farklı karışıma katılan Uçucu Kül ve/veya Silis Dumanı oranları Çizelge 3.8’de gösterilmiştir. Her bir karışıma giren malzeme miktarları hesaplanmış ve elde edilen değerler Çizelge 3.9’da sunulmuştur.

Çizelge 3.8. Karışımlardaki Uçucu Kül ve Silis Dumanı oranları

KARIŞIM NO	ÇİMENTO YERİNE KULLANILAN MİNERAL KATKI ORANLARI	
	1	0% UK
2	0% UK	5% SD
3	0% UK	10% SD
4	5% UK	0% SD
5	5% UK	5% SD
6	5% UK	10% SD
7	10% UK	0% SD
8	10% UK	5% SD
9	10% UK	10% SD
10	15% UK	0% SD
11	15% UK	5% SD
12	15% UK	10% SD

Çizelge 3.9. Bir metre küp karışımın hazırlanmasında kullanılan malzeme miktarları

KARIŞIM NO	U.K. (%)	S.D. (%)	A Grubu Kırnakum (kg)	B Grubu İnce Mıdır (kg)	C Grubu Orta Mıdır (kg)	D Grubu Kaba Mıdır (kg)	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Sihis Dumanı (kg)	Karışım Suyu (kg)	İksament-NS (kg)
1	0%	0%	762,5	219,6	528,5	258,7	350,0	0,0	0,0	167,1	7
2	0%	5%	762,5	219,6	528,5	258,7	332,5	0,0	17,5	167,1	7
3	0%	10%	762,5	219,6	528,5	258,7	315,0	0,0	35,0	167,1	7
4	5%	0%	762,5	219,6	528,5	258,7	332,5	17,5	0,0	167,1	5,25
5	5%	5%	762,5	219,6	528,5	258,7	315,0	17,5	17,5	167,1	5,25
6	5%	10%	762,5	219,6	528,5	258,7	297,5	17,5	35,0	167,1	7
7	10%	0%	762,5	219,6	528,5	258,7	315,0	35,0	0,0	167,1	4,375
8	10%	5%	762,5	219,6	528,5	258,7	297,5	35,0	17,5	167,1	5,25
9	10%	10%	762,5	219,6	528,5	258,7	280,0	35,0	35,0	167,1	5,25
10	15%	0%	762,5	219,6	528,5	258,7	297,5	52,5	0,0	167,1	4,375
11	15%	5%	762,5	219,6	528,5	258,7	280,0	52,5	17,5	167,1	4,375
12	15%	10%	762,5	219,6	528,5	258,7	262,5	52,5	35,0	167,1	4,375

3.3. Deney Örneklerinin Üretimi

Beton karışımı için gereken malzeme miktarları ağırlık olarak konulup yeterli hacimde beton harcı üretilmiştir. Bunun için beton harcı hacmi, kendisini oluşturan malzemelerin hacminden daha küçük olacağı ve muhtemel malzeme zayıfları düşünülerek daha büyük hacimde üretim gerçekleştirildi. Beton üretimi için yapılan çalışmada , karışım oranları belirlenen malzemeler 0,01 gr hassasiyetli terazide tartıldıktan sonra betonyere ilk etapta agregalar kabadan inceye doğru olmak üzere konmuştur. Daha sonra Silis Dumanı, Uçucu Kül ve çimento katılarak karıştırmaya başlanmıştır. Karıştırmaya başladıktan bir müddet sonra süper akışkanlaştırıcı içeren su ağır ağır ilave edilmiştir. Böylece toplan 4,5 dakika karıştırma işlemi yapılmıştır. Betonyere malzeme konmadan önce her seferinde iç yüzey ve kanatlar beton harcı kalıntılarında ve diğer yabancı maddelerden temizlenip ıslak bezle nemlendirilmiştir. Betonyere her seferde karıştırabileceği maksimum malzeme miktarının (25 dm³) altında malzeme konulmuş karıştırma sonunda da bakkal küreği ile segregasyon veya herhangi bir ayrışmaya sebebiyet vermeden itinayla alınan harçlar 10*10*40cm. ve 13*13*7cm. boyutlu kalıplara yerleştirilmiştir. Her bir farklı karışım oranı için ikişer kez 22dm³ hacminde harç hazırlanmıştır. Toplam 12*2=24 kez harç hazırlanmış ve kalıplara dökülmüştür. Döküm esnasında prizmatik numuneler ikişer tabaka halinde dökülüp her tabaka için 25'er şişleme yapılmıştır. Kalıpların içi daha önceden yağlanmış olup harcın yerine yerleştirilmesinin akabinde mala ile üst yüzeyler düzeltilerek etiketlenilmiştir. Beton numuneleri laboratuvar ortamında bekletildikten 24 saat sonra kalıplarından itina ile çıkarılıp 20 ± 2 °C kirece doymuş su kürü ortamına konmuştur.

3.4. Deney Örneklerinin Sayı ve Boyutları

Deneyler için %45'lik sabit bir su/çimento oranı ve 350 kg/m³'lük sabit bir bağlayıcı dozajı seçilmiştir. Silis dumanı çimento ağırlığının %0 , 5 ve 10'u kadar , uçucu kül ise %0 , 5 , 10 ve 15'i kadar eksiltelen çimentonun yerine kullanılmıştır. Neticede 12 farklı karışım elde edilmiştir. Eğilme deneyinde kullanılmak üzere her karışım için üçer adet 10*10*40cm boyutlu prizmatik numune hazırlanmıştır. Yani belirli bir yaştaki eğilme mukavemetinin tespiti için 12 * 3 = 36 adet numune hazırlanmıştır. Her bir karışımın üç farklı yaştaki (7, 28 ve 91 günlük) eğilme mukavemet değerlerini belirleyebilmek

için toplam $36 * 3 = 108$ adet $10*10*40$ cm boyutlu prizmatik numune dökülmüştür. Donma-çözülme (D-Ç) deneyinde kullanılmak üzere her bir karışım için üçer adet $13*13*7$ cm boyutlu prizmatik numuneler dökülmüştür. Yani 12 karışım için toplam $12 * 3 = 36$ adet numune D-Ç numunesi dökülmüştür. Sonuçta hazırlanan toplam beton numune sayısı $108 + 36 = 144$ adet olmuştur.

3.2. YÖNTEM

3.2.1. Donma Çözülme Deneyi

Donma çözülme buz çözücü tuz direnç deneyi **RILEM Test** prosedürüne uygun olarak uygulanmıştır. Laboratuardaki donma çözülme deneyinde test sıvısı olarak buz çözücü tuz içeren %3NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Bu durumda deney literatürde **CDF¹** (Capillary suction, Deicing agent, Freeze-thaw cycles) olarak isimlendirilmektedir. Deney hakkında önce genel bir bilgi verilip daha sonra Laboratuarda uygulanan deneysel yöntem açıklanmıştır.

3.2.1.1. Genel Kapsam

CIF (Capillary suction, Internal damage, Freeze-thaw cycles) deneyi, belirli bir deney sıvısı içindeki belirli sayıdaki donma çözülme tekrarı tatbiki ile betonun iç yapısında sebep olunan hasarın ölçülmesine imkan verir. Deney pullanmanın ölçülmesi ile tamamlanabilir veya birleştirilebilir. Genelde donma çözülme dayanımı için damıtık su kullanılır. Donma çözülmeye ve buz çözücü tuzlara karşı direncin tespitinde yaygın olarak %3'lük sodyum klorür (NaCl) çözeltisi kullanılır ve bu durumda deney CDF olarak adlandırılır.

(1) CDF Test - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - tests with sodium chloride solution (CDF). RILEM Recommendation TC117-FDC: Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete. Materials and Structures Vol. 29 (1996) 523-528

CIF deneyi sürecinde, önce (genelde damıtık su kullanılarak) eşit sıcaklık ortamında kılcal emme vasıtasıyla beton numunelerin doygunluk derecesi artırılır. Sonra bu numuneler bir akışkan aracılığıyla, tek eksenli ısı akışı sağlanacak şekilde, iyi belirlenmiş bir dizi donma çözülme döngüsüne tabi tutulur. Bu işlem ile istenilen sayıda donma çözülme tatbiki sonunda betonun iç yapısındaki hasarın tespiti yapılabilir. Yüzey pullanması da ölçülüp değerlendirilirse hem iç hem de dış hasar öğrenilebilir. Emilen su miktarı ve bununla ilişkili olarak suya doygunluk derecesi, ölçümlerin önemli bir parametresidir. Bu değerler, test sonuçlarının yorumlanmasında yardımcı olurlar.

Donma çözülme ve buz çözücü tuzlara karşı direnç testi için yaygın olarak %3 sodyum klorid çözeltisi CIF deney uygulama formunda belirtildiği gibi uygulanır. CIF ve CDF test prosedürlerinin kombinasyonları da uygulanabilir. %3 NaCl kullanıldığında yüzey pullanması baskın olur. İlave parametre olarak iç hasar dikkate alınabilir.

Bu tez çalışmasında laboratuarda uygulanan deneyde %3NaCl çözeltisi test sıvısı olarak kullanılmıştır. Numuneler, 12 saatlik bir periyotta -20°C ile $+20^{\circ}\text{C}$ arasında değişen sıcaklık çevrimine maruz bırakılmış ve toplam 28 donma çözülme çevrimi uygulanmıştır. Donma çözülme ve buz çözücü tuz direncinin değerlendirilmesinde test yüzeyinde meydana gelen malzeme kaybı (pullanma) dikkate alınmıştır. Malzeme kaybı ölçümleri 14. ve 28. donma çözülme periyodu sonunda yapılmıştır. Ayrıca numuneler donma çözülmeye tabi tutulmadan önce, kılcal emmeye bırakılarak doygunluk dereceleri artırılmış ve su emme miktarları tespit edilmiştir.

3.2.1.2. Tanımlar

Donma çözülme ve buz çözücü etmen direnci : Deney sıvısı olarak buz çözücü etmenlerin kullanılması durumundaki donma çözülme direnci.

Deney sıvısı: Numunelere temas ettirilen sıvı.

Pullanma: Deney sonucu beton yüzeyinde olan materyal kaybı.

Referans nokta: Isı değişimlerinin gözleendiği ölçüm noktasıdır.

Referans sıcaklık: Referans noktasında ölçülen sıcaklık derecesidir.

Test yüzeyi: Deney esnasında deney sıvısının ve ısı değişiminin hasara uğrattığı numune yüzeyidir.

Ölçüm araları: Her bir hasar ölçümü arasında geçen zaman. Deneyde ölçüm aralığı 14 çevrim (7gün) olarak seçilmiştir.

Deney süresi: Buz çözücü etmen çözeltisi kullanılması durumunda 28 donma çözülme döngüsü (14gün) deney süresi olarak alınır.

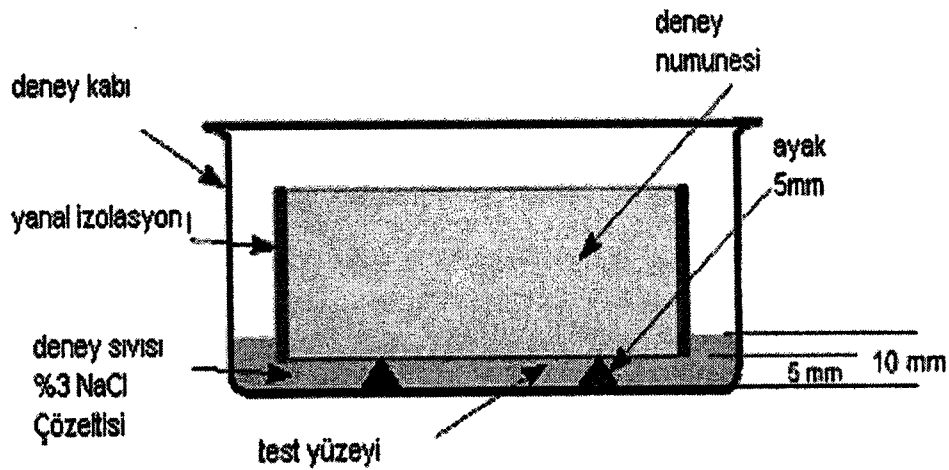
3.2.1.3. Gereçler

Bekleme odası: $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve $\%65 \pm 5$ rölatif nem ortamına sahip oda.

Yanal kaplama için epoksi reçine: Minimum sıcaklık olan -20°C ye dayanıklı, kırılğan olmayan reçine.

Deney sıvısı: Buz çözücü tuz çözeltisi. Ağırlıkça $\%97$ damıtık su ve $\%3$ NaCl.

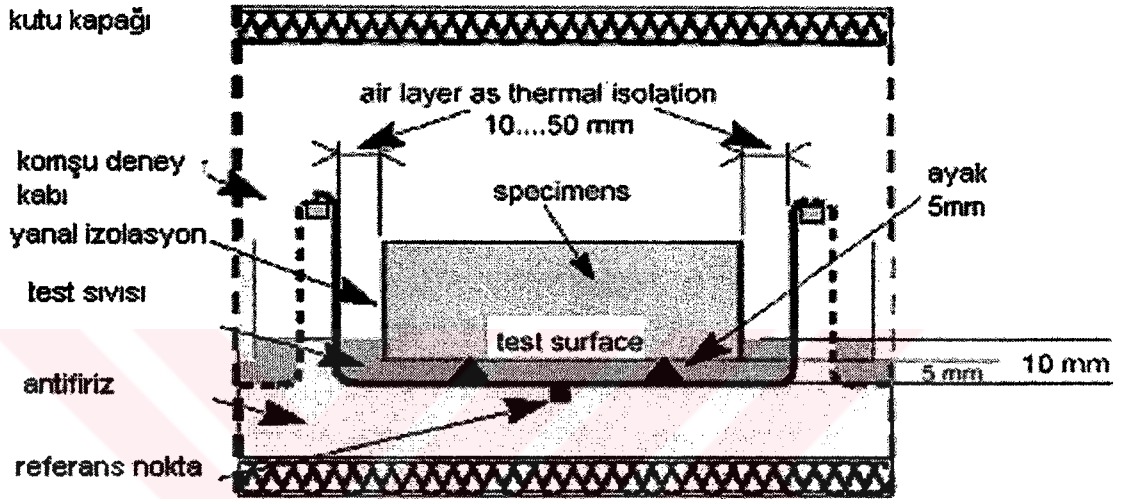
Deney kapları:



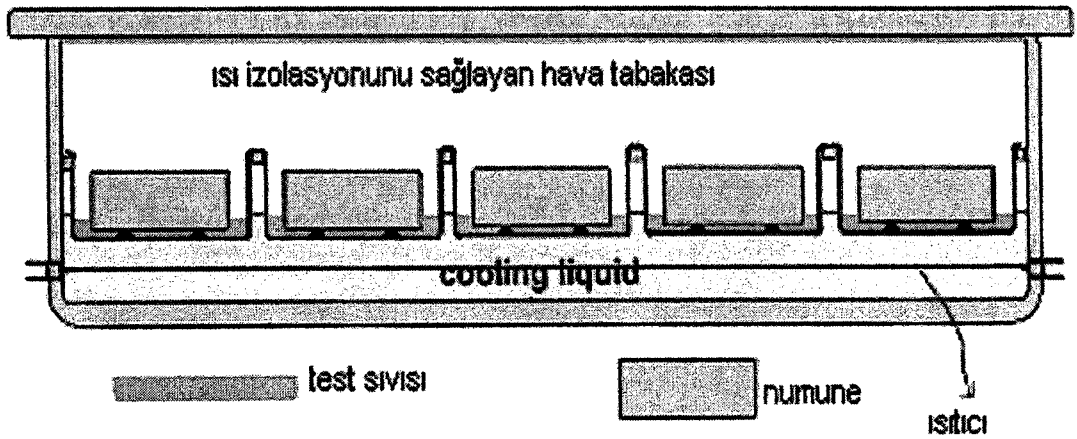
Şekil 3.2. D-Ç numunesinin deney kabında yerleşim şekli

Isı denetim kutusu:

Sıcaklık değişimleri boyunca sıvı kalabilen bir akışkanın bulunduğu bir kutudan ibarettir. Kutu ısı iletkenliği yüksek olması dolayısıyla metalden yapılmıştır. Sıcaklık değişimleri, numunelerin bulunduğu kaplara alttan temas eden akışkan aracılığı ile aşağıdan yukarıya doğru tek yönlü bir ısı akışı ile test yüzeyine ulaştırılır.



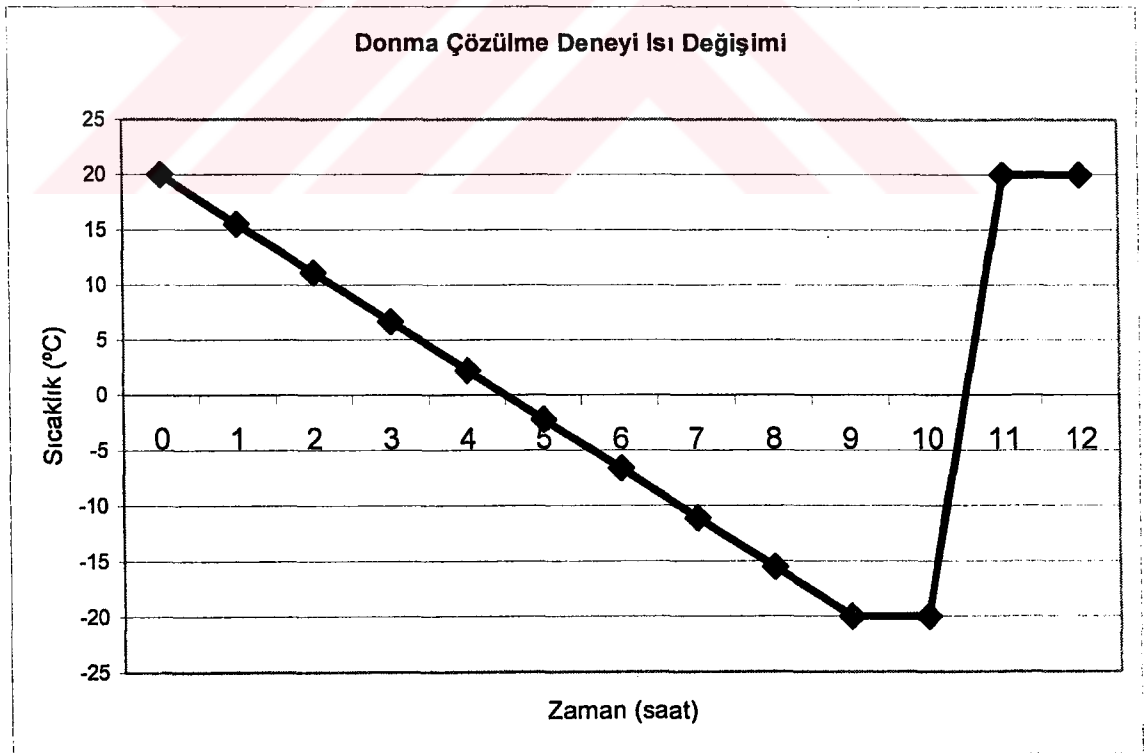
Şekil 3.3. Deney kaplarının ısı denetim kutusu içinde yerleşim şekli.



Şekil 3.4. Isı denetim kutusunun genel görünüşü

Sıcaklık döngüsü:

12 saatlik bir periyot içinde referans noktasındaki sıcaklık $-20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $+20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında değiştirilir. Hasar parametreleri sıcaklık $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 'in üzerinde iken ölçülür. Deneyde 12 saatlik bir ısınma soğuma periyodu boyunca referans noktasında ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi ortalama olarak Şekil 3.5'te görüldüğü gibidir. $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ deki test sıvısının sıcaklığı 9 saatlik soğutma işlemi ile $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmüş ve bu sıcaklıkta 1 saat tutulmuştur. Bekleme sonunda ısıtıcı düzenek çalışmaya başlamış ve 40 dakika içinde $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ deki test sıvısının sıcaklığı $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkarılmıştır. $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ısıtıcı devreden çıkıp bu sıcaklıkta numuneler bir saat bekletilmiştir. Böylece 12 saatlik bir ısınma-soğuma periyodu tamamlanmıştır. Birinci periyodun ardından hemen soğutucu devreye girip ikinci periyoda otomatik olarak geçilmiştir. Birinci ölçüm arası 14. ısınma-soğuma periyodu sonunda verilip, numunelerin sıcaklığı $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de iken, test yüzeylerinden deney kabı içine dökülen tanelerin ağırlık ölçümleri (pullanma ölçümleri) yapılmıştır. İkinci 14 periyotluk süreç 24 saat sonra başlatılmıştır.



Şekil 3.5. 12 saatlik bir ısınma-soğuma periyodu boyunca referans noktasında ölçülen sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi

Sıvı seviyesini ayarlama tertibatı: Bir şırıngaya tutturulmuş ölçekli bir çubuktan ibarettir.

Etüv: 110 ± 5 °C

Kağıt filtre: Ölçüm aralarında test sıvısı içine dökülen tanelerin toplanmasında kullanılır.

Terazi: $\pm 0,01$ g hassasiyette.

Donma Çözülme Deney Düzeneği: Düzenek aşağıda belirtilen parçalardan oluşmaktadır.

- Derin Dondurucu: Soğutma işlemi için kullanılan dolap tipi derin dondurucu Profilo DF 3200 markadır.
- Isı denetim kutularına montajlı 6 adet ısıtıcı.
- Isı denetim kutusu içerisinde -28 °C'ye kadar direçli antifiriz. Numunelerdeki eşit sıcaklık değişimleri, deney kaplarına alttan temas eden bu antifirizin soğutulup ısıtılması ile sağlanır. Isı akışı tek yönlüdür.
- 2 adet dijital zaman saati. Bunların birisi ısıtıcıların diğeri de derin dondurucunun istenen zaman aralığında aktif olmasını sağlar.
- Dijital Isıdenetir: Test sıvısının sıcaklığı +20 °C'yi aşması durumunda ısıtıcılara giden enerjiyi keser. Test sıvısı sıcaklığı bu alettaki dijital göstergeden okunur.

Donma çözülme deney düzeneği Şekil3.6'da görülmektedir. Resimde belirtilen numaraların gösterdiği araçlar şunlardır:

1. Derin dondurucu
2. Derin dondurucuya ve ısıtıcılara bağlı olan zaman saatleri
3. Isıdenetir.
4. Isıdenetirin referans noktasındaki sıcaklık okumalarını yapan parçasının bağlantı kablosu.
5. Isıtıcılara enerji götüren kablo.



Şekil 3.6. Donma çözülme deney düzeneği.

3.2.1.4. Numunelerin Hazırlanması

Donma çözülme deneyi numuneleri, boyutları 13*13*7cm olan prizmatik beton numunelerdir. Daha önce de belirtildiği gibi her bir farklı karışım için üçer adet numune hazırlanmış ve bu deney için toplam $12 * 3 = 36$ adet numune dökülmüştür. Beton numuneler döküldükten 24 ± 2 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve 6 gün boyunca 20 ± 2 °C kirece doymun su ortamında kür edilmiştir. Deney prosedürü kür periyodunun hemen ardından aşağıda belirtildiği şekilde başlatılmıştır.

3.2.1.5. Deney Prosedürü

Deney üç aşamadan oluşur: Kuru hava ortamında bekletme (the dry storage), kılcal emme ile ön doyurma (the pre-saturation by capillary suction) ve donma çözülme çevrimleri (the freeze-thaw cycles). Deney prosedürü kür işleminden hemen sonra, deney numuneleri 7 günlük iken başlatılmıştır.

3.2.1.6. Kuru depolama (dry storage)

7 günlük numuneler +20 °C de ve %65 bağıl nem ortamında 21 gün yüzey kuruması için bekletildi. Yüzey kurumasının sağlıklı gerçekleşmesi için numuneler yanları üzerine en az 50 mm ayrı olarak yerleştirildi. Her numunenin ağırlığındaki değişimler gözlemlendi ve kaydedildi.

3.2.1.7. Ön doyurma (pre-saturation)

- **Numunelerin hazırlanışı:** Ön doyurma işleminden 2 gün önce, numuneler 26 günlük iken, deney numunelerinin yan yüzeyleri epoksi reçine ile kaplandı. Yüzeylerin kuru ve temiz olmasına dikkat edildi. Yanal kaplamadan önce ve sonra numunelerin ağırlıkları $\pm 0,1$ g hassasiyetle ölçüldü. Numunelerin su emmelerinin tespitinde yanal izolasyon olmadan ölçülen ağırlıklar referans ağırlık olarak kullanıldı.
- **Kılcal emme ile öndoyurma:** Kuru depolamanın hemen ardından, deney numuneleri deney kaplarının içine 5 mm yükseklikteki ayaklar üzerine test yüzeyi altta kalacak şekilde Şekil 3.7'de görüldüğü gibi yerleştirildi. Ardı sıra, deney sıvısı numunelerin üst yüzeyini ıslatmadan deney kaplarına 10 ± 1 mm yüksekliğe kadar doldurulur. Kılcal emme esnasında buharlaşmayı önlemek için deney kaplarının üstü bir kapak ile örtüldü. Kılcal emme süresi 20 ± 2 °C sıcaklıkta 7 gündür. Kılcal emme esnasında sıvı seviyesi düzenli aralıklarla kontrol edilmiş ve numune ağırlıklarındaki artışlar ölçülmüştür.



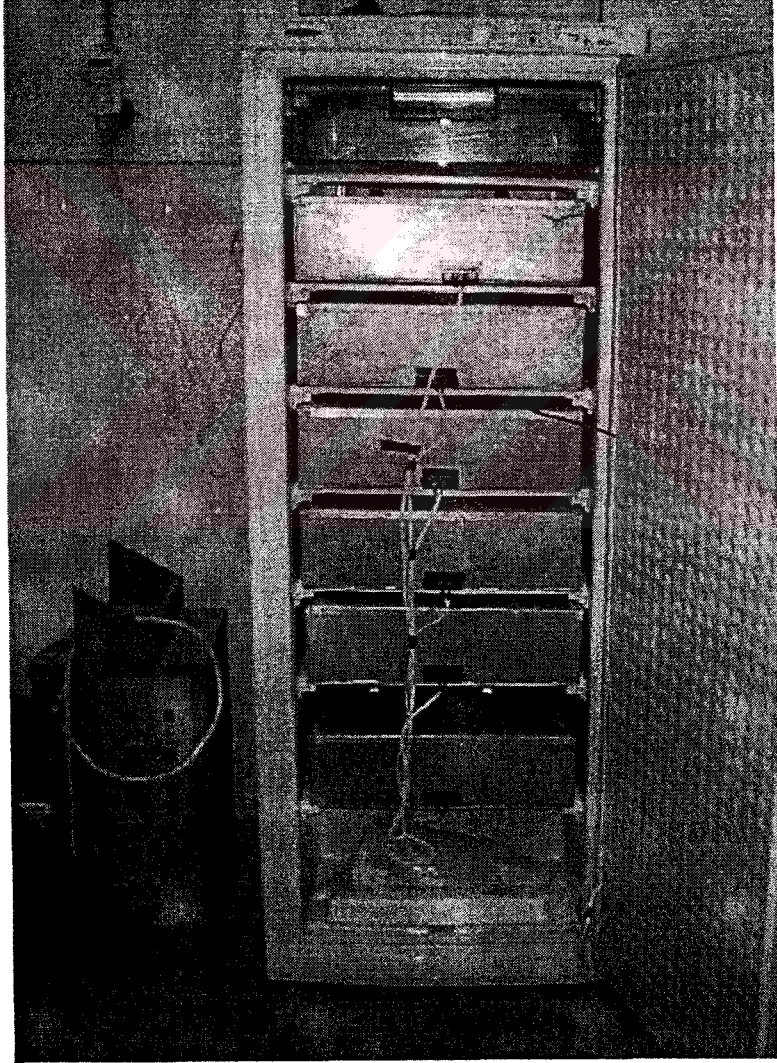
Şekil 3.7. Deney kabında 5mm yüksekliğindeki ayaklar üzerine yerleştirilmiş deney numunesi.



Şekil 3.8. Donma Çözülme deneyinde kullanılan 36 adet numunenin kılcal emme (capillary suction) için deney kaplarına yerleştirilmiş hali

3.2.1.8. Donma çözüme çevrimleri

Bu aşamadaki deney numuneleri 35 günlüktür. Kılcal emme sonrası deney kapları içindeki NaCl çözeltisi dökülüp yerine yeniden %3 NaCl çözeltisi 10mm seviyesine kadar doldurulur. Deney numuneleri deney kaplarına test yüzeyi alta gelecek şekilde yerleştirilir. Deney kapları da ısı denetim kutuları içine yerleştirilir. Böylece; 36 adet deney numunesi, her biri 6 adet deney kabı içeren 6 ısı denetim kutusu içerisine yerleştirilmiş olur. Isı denetim kutularının derin dondurucu içindeki durumu Şekil 3.9'da görülmektedir.

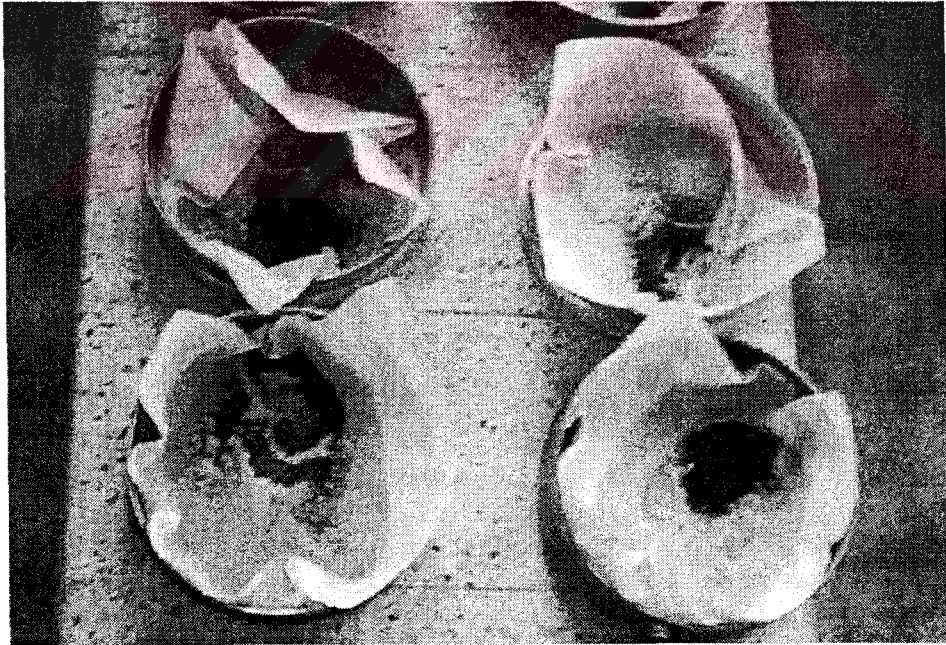


Şekil 3.9. Isı denetim kutularının derin dondurucu içindeki yerleşim şekli

Yerleştirme işleminden sonra referans noktasındaki sıcaklığın +20 °C olması sağlanmış ve sonra düzenek aktif hale getirilerek birinci ölçüm aralığına kadar sürecek donma-çözülme periyotları başlatılmıştır.

3.2.1.9. Pullanma ölçümleri

Deneydeki donma çözülme periyotlarının etkisiyle numunelerin yüzeylerinden deney kabının içindeki çözeltiliye dökülen taneleri toplamak için çözeltili, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi kağıt filtreden süzülür. Ardından kağıt filtre, 100 ± 5 °C de 24 saat etüvde kurutulur ve 1 saat (± 5 dak.) 20 ± 2 °C de soğutulur. Kurumuş pullanma tanelerini içeren kağıt filtrenin ağırlığı μ_b , 0,01 g hassasiyetle ölçülür. Boş filtrenin ağırlığı μ_f , aynı hassasiyetle süzme işleminden önce belirlenir. Daha sonra pullanma tanelerinin ağırlığı; $\mu_s = \mu_b - \mu_f$ şeklinde hesaplanır.



Şekil 3.10. Yüzeyden pullanan malzemenin kağıt filtreden süzülmesi

3.2.2. Birim Hacim Ağırlıkların Tespiti

Birim hacim ağırlıkların tespitinde donma çözülme deney prosedürü içinde elde edilen verilerden yararlanılmıştır. Deneyde 13*13*7cm boyutlu prizmatik numunelerin kuru depolama (dry storage) aşamasında, kılcal emme öncesi yüzeye reçine kaplanmadan ölçülen numune ağırlıkları kullanılmıştır. Bu aşamadaki numuneler su küründen sonra 19 gün oda şartlarında kurumaya bekletilen numunelerdir. Dolayısıyla numuneler hava kuruşu durumundadır. Bu ağırlıklar (W_k), numunelerin tespit edilen hacmine (V) bölünerek birim hacim ağırlıklar (BHA) bulunmuştur.

$$BHA = W_k / V$$

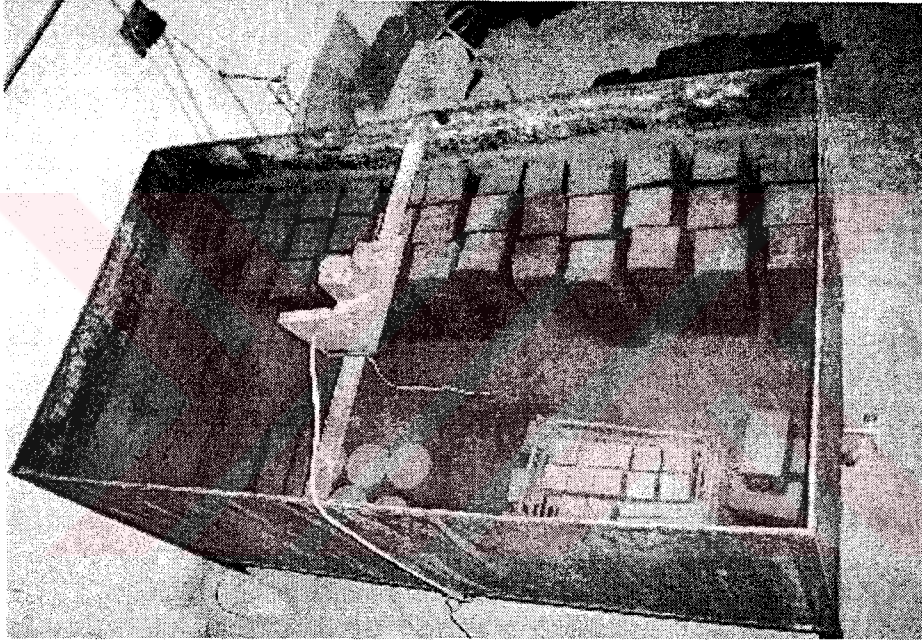
3.2.3. Kılcal Su Emme Miktarlarının Tespiti

Kılcal geçirimsizliği değerlendirmek için kılcal yolla emilen sıvı miktarları kullanılacaktır. Kılcal su emme miktarlarının tespitinde donma çözülme prosedürü içinde elde edilen verilerden yararlanılmıştır. Donma çözülme deneyinde kılcal emme (capillary suction) aşamasından iki gün önce hava kuruşu durumundaki numunelerin yan yüzeyleri reçine ile kaplanmıştır. Böylece yan yüzeylerden su emilimi engellenmiştir. Reçine ile kaplı halde iki gün daha oda şartlarında bekletilen numunelerin ağırlıkları tartılmış ve daha sonra numuneler kılcal emmeye maruz bırakılmıştır. Bunun için beton dökümü işleminde üstte kalan numune yüzeyi, alta gelecek şekilde numuneler ters çevrilerek deney kapları içinde 10 mm yükseklikteki %3 NaCl çözeltisine 5 mm daldırılarak konmuştur. Buharlaşma yolu ile sıvı seviyesinde olabilecek düşüşleri engellemek ve çözelti kompozisyonunun değişmesini önlemek maksadıyla deney kaplarının üzeri örtülmüştür. Bu durumda 7 gün bekletilen numunelerin ağırlıkları tartılmış ve ilk ağırlıklar, bulunan değerden çıkarılarak kılcal su emme miktarları tespit edilmiştir. Kılcallığın değerlendirilmesinde aynı karışım ile hazırlanan üç numunenin kılcal su emme miktarlarının ortalaması kullanılmıştır.

3.2.4. Eğilme Dayanımlarının Tespiti (Eğilmede Çekme Dayanımı)

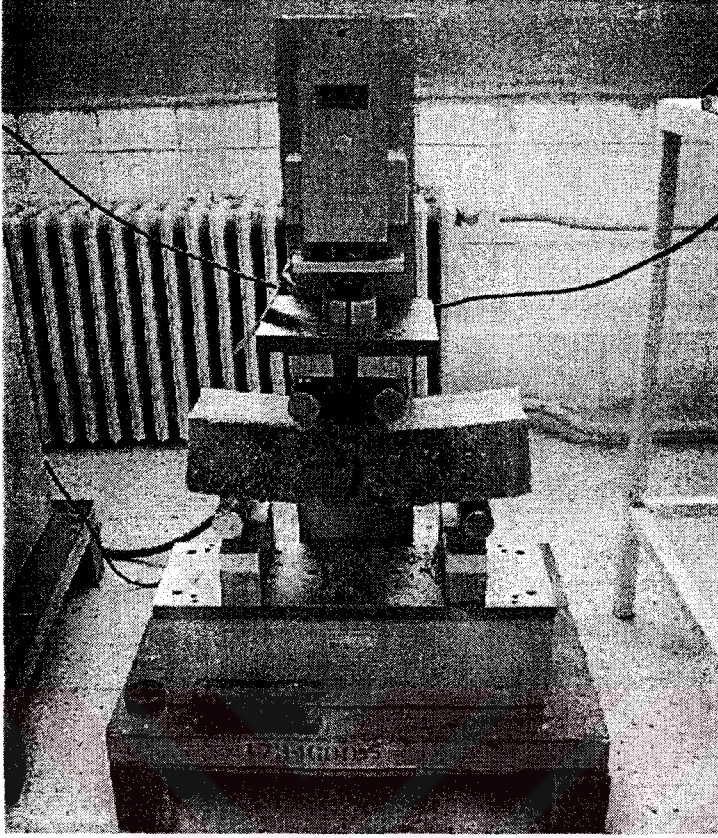
Eğilme dayanımlarının tespitinde 10*10cm² kesitli 40cm uzunluğunda beton kiriş numuneler kullanılmıştır. Numunelerin hazırlanmasında 10*10*40cm iç boyutlu ahşap

kalıplar kullanılmıştır. Her karışım için 9 numune olmak üzere 12 farklı karışım için toplam 96 kiriş numune dökülmüştür. Bu deney numuneleri beton dökümünden bir gün sonra kalıplarından çıkarılıp 20 °C kirece doymun su ortamında küre bırakılmıştır. Kür ortamındaki bazı eğilme numuneleri Şekil 3.11’de görülmektedir. Numunelerin yaşı 7. gün, 14. gün ve 91. güne ulaştığında herbir karışım için hazırlanan numunlerin üç tanesine eğilme deneyi yapılmıştır. Böylece 12 farklı karışımın 7 , 14 ve 91 günlük eğilme mukavemetleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.11. 91. günde kırılmak üzere kür ortamında bekletilen kiriş numuneler.

Eğilme deneyinde, TS 3284 ve ASTM C 78 standartlarına uygun olarak, beton kirişin oturtulduğu mesnetlerden $L/3$ uzaklıktaki iki noktadan yük uygulanmıştır. Kirişin oturtulduğu mesnetler kenarlardan 5 cm içerde olacak şekilde numuneler yerleştirilmiştir. Kiriş açıklığı 30cm’dir. Yükün uygulama yeri, mesnetlerden $30 / 3 = 10$ cm uzaklıktadır. Yükleme hızı 2,5 kgf/sn seçilmiştir. Deney düzeneği ve yükleme durumu Şekil 3.12’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.12. Eğilme deney düzeneği ve kiriş numunenin yükleme durumu

Beton kiriş numunelerde kırılmaya neden olan yük deney presinin göstergesinde okunduktan sonra, eğilme dayanımının hesaplanabilmesi için aşağıdaki formülden yararlanılmıştır.

$$\sigma_e = (P \cdot L) / (b \cdot d^2)$$

Burada;

σ_e : Eğilme dayanımı (kgf/cm²)

P : Kırılma yükü (kgf)

L : Kiriş açıklığı (cm)

b : Kiriş kesitinin eni (cm)

d : Kiriş kesitinin yüksekliği (cm)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde çalışmaya konu olan silis dumanı ve uçucu kül katkılı 12 farklı karışım ile üretilen numuneler üzerinde yapılan deneylerde elde edilen donma-çözülme direnci, birim hacim ağırlık, kılcallık ve eğilme dayanımına ilişkin bulgular tablolar halinde sunulacaktır.

4.1. Ağırlık Değişimlerine İlişkin Bulgular

Donma çözülme deneyinde kullanılan 13*13*7cm boyutlu numuneler döküldükten bir gün sonra kalıplar çıkarılmış, 6 gün kür ortamında bekletilmiş daha sonra da 21 gün boyunca oda şartlarında kurumaya bırakılmıştır. Numunelerin yan yüzeyleri, kılcal emme aşamasından 2 gün önce reçine ile kaplanmıştır. İki gün reçinenin kuruması beklendikten sonra numuneler, 7 gün boyunca kılcal emmeye bırakılmıştır. Bu süreç boyunca numunelerin ağırlıklarındaki değişimler gözlenmiş ve beş kez ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümler aşağıda belirtilmiştir.

1. Numuneler kürden çıkarıldıktan sonra yüzeyleri bir bezle kurulanıp tartılarak kuru yüzey doygun ağırlıkları (W1) bulunmuştur.
2. Kuru depolama aşamasında 7 günlük ağırlıklar (W2) ölçülmüştür.
3. Kuru depolama aşamasında, yan yüzeylerin reçine kaplanmasından hemen önce, 19 günlük ağırlıklar(W3) ölçülmüştür.
4. Kuru depolama aşamasının sonunda yan yüzeyleri reçine kaplı olan numunelerin ağırlıkları (W4) ölçülmüştür.
5. Yedi gün boyunca kılcal emmeye bırakılan numunelerin 7. gün sonundaki ağırlıkları (W5) ölçülmüştür.

Yapılan ölçümler sonucu elde edilen ortalama değerler, yukarıda belirtildiği gibi sırasıyla W1 , W2 , W3 , W4 ve W5 olarak Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Donma çözülme deney sürecinde elde edilen ağırlık ölçümleri

KARIŞIM NO	U.K. (%)	S.D. (%)	W1 (gr)	W2 (gr)	W3 (gr)	W4 (gr)	W5 (gr)
1	0%	0%	2887,80	2849,50	2832,46	2834,51	2857,89
2	0%	5%	2737,43	2700,48	2682,73	2685,12	2707,82
3	0%	10%	2794,67	2756,76	2737,79	2740,05	2762,23
4	5%	0%	2834,51	2794,75	2773,99	2775,28	2801,02
5	5%	5%	2820,84	2784,80	2765,92	2767,13	2788,59
6	5%	10%	2815,82	2782,32	2765,50	2767,08	2785,98
7	10%	0%	2749,40	2709,41	2688,98	2689,76	2718,29
8	10%	5%	2712,12	2672,07	2650,96	2652,73	2677,28
9	10%	10%	2810,42	2772,58	2756,79	2758,35	2781,42
10	15%	0%	2740,43	2701,41	2682,90	2684,79	2707,43
11	15%	5%	2724,05	2686,59	2669,85	2671,62	2692,76
12	15%	10%	2755,33	2715,62	2699,02	2701,01	2725,97

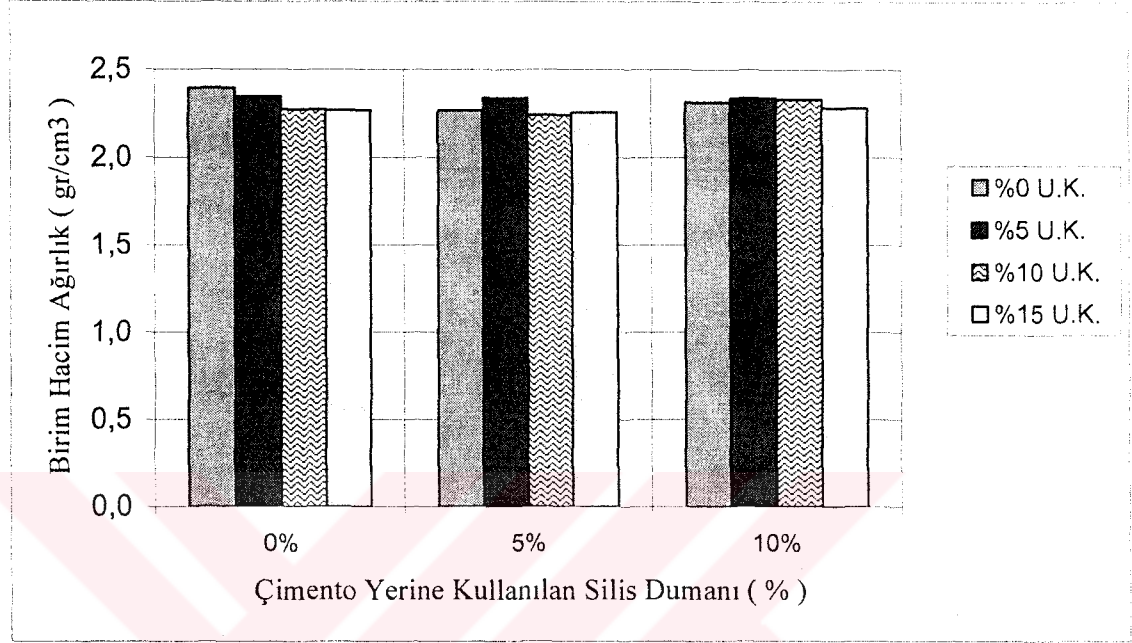
4.2. Birim Hacim Ağırlıklara İlişkin Bulgular

Birim hacim ağırlıkların tespitinde daha önce belirtildiği gibi donma çözülme deney prosedürü içinde kuru depolama aşamasında 19. günde yapılan ağırlık ölçümleri kullanılmıştır. Bu ağırlıklar Çizelge 4.1'de W3 ile belirtilen değerlerdir. Hesaplanan ortalama birim hacim ağırlık (BHA) değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Birim Hacim Ağırlık değerleri

KARIŞIM NO	U.K. (%)	S.D. (%)	Wk (gr)	BHA (gr/cm ³)
1	0%	0%	2832,46	2,394
2	0%	5%	2682,73	2,268
3	0%	10%	2737,79	2,314
4	5%	0%	2773,99	2,345
5	5%	5%	2765,92	2,338
6	5%	10%	2765,50	2,338
7	10%	0%	2688,98	2,273
8	10%	5%	2650,96	2,241
9	10%	10%	2756,79	2,330
10	15%	0%	2682,90	2,268
11	15%	5%	2669,85	2,257
12	15%	10%	2699,02	2,282

Çimento yerine kullanılan silis dumanı miktarının %0 , %5 ve %10 oranlarında sabit tutulup aynı anda karışıma katılan uçucu kül miktarının %0, %5, %10, %15 şeklinde artırılmasıyla BHA'da meydana gelen değişimler Şekil 4.1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.1. %0SD, %5SD ve %10SD durumlarında UK-BHA ilişkisi

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi; silis dumanı kullanılmaması durumunda (%0 SD) , uçucu kül miktarı arttıkça birim hacim ağırlıklarda azalma görülmektedir. Bunun sebebi uçucu külün BHA'nın çimentodan daha düşük olmasına bağlanabilir. Ancak, silis dumanı %5 ve %10 oranlarında kullanılması durumunda önce bir artış sonrada bir azalma görülmektedir. Buradan anlaşılan odur ki; beton numunenin BHA'ın değişmesini etkileyen tek parametre çimento yerine kullanılan mineral katkıların BHA değildir. Mineral katkıların inceliğinden dolayı ve işlenebilirliğe etkilerinden dolayı, bir optimum değerde daha iyi sıkışan ve doluluğu daha yüksek olan beton karışımlar elde edilebilmektedir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi; %5 SD içeriğinde %5 UK kullanımı ve %10 SD içeriğinde %10 UK kullanımı optimum BHA değerlerini vermiştir.

Genel olarak, silis dumanı ve uçucu kül BHA'nın çimentonunkinden düşük olmasından dolayı katılı karışımların çoğunun BHA'ı düşmüştür. Buna karşılık SD veya UK kullanılması durumunda, UK tanelerinin daha büyük olan çimento tanelerinin arasını

doldurmasıyla ve daha ince olan SD tanelerinin de bu uçucu kül tanelerinin arasına girmesiyle BHA'nın artması sağlanabilir.

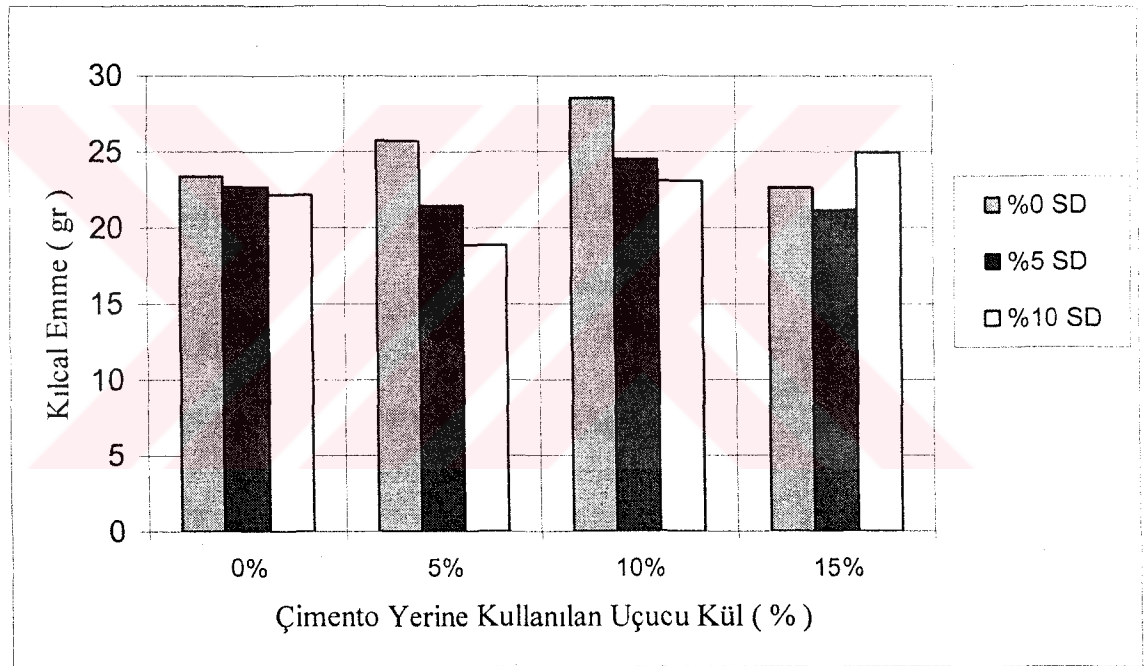
4.3. Kılcal Geçirimsizliğe İlişkin Bulgular

Kılcal geçirimsizliği değerlendirmek için kılcal yolla emilen su miktarları kullanılmıştır. Kılcal su emme miktarlarının tespitinde daha önce belirtildiği gibi donma çözülme prosedürü içinde elde edilen verilerden yararlanılmıştır. Donma çözülme deneyinde kılcal emme (capillary suction) aşamasının başlangıcındaki ve sonundaki değerler arasındaki fark hesaplanarak kılcal su emme miktarı bulunmuştur. Kılcal emme başlangıcındaki ve sonundaki ağırlıklar, Çizelge 4.1'de sırasıyla W4 ve W5 sütunlarında belirtilen değerlerdir. Hesaplanan ortalama kılcal su emme miktarı değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Kılcal Su Emme Miktarı değerleri

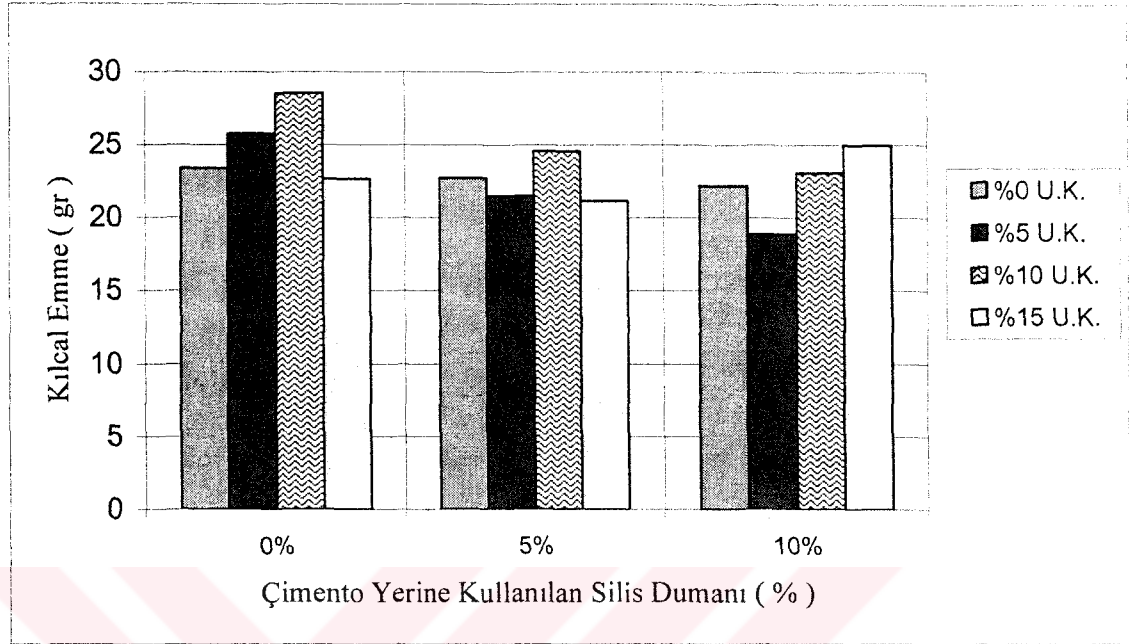
KARIŞIM NO	U.K. (%)	S.D. (%)	W_{ilk} (gr)	W_{son} (gr)	Emilen Su Miktarı (gr)
1	0%	0%	2834,51	2857,89	23,38
2	0%	5%	2685,12	2707,82	22,70
3	0%	10%	2740,05	2762,23	22,18
4	5%	0%	2775,28	2801,02	25,74
5	5%	5%	2767,13	2788,59	21,47
6	5%	10%	2767,08	2785,98	18,90
7	10%	0%	2689,76	2718,29	28,53
8	10%	5%	2652,73	2677,28	24,55
9	10%	10%	2758,35	2781,42	23,07
10	15%	0%	2684,79	2707,43	22,65
11	15%	5%	2671,62	2692,76	21,14
12	15%	10%	2701,01	2725,97	24,96

Sonuçlardan anlaşıldığı gibi silis dumanı katkısı, kılcal emmeyi azaltmada çok etkili olmuştur. Silis dumanı, kılcal emmeyi azaltmada iki şekilde katkı sağlar. Birisi; çok ince silis dumanı tanelerinin mikrofiller etkisi ile bağlayıcı hamurun ve dolayısıyla beton karışımının kompasitesini (doluluk) artırmasıdır. İkincisi ise; agrega taneleri ve bağlayıcı hamuru arasındaki arayüzey bölgeye sağladığı katkıdır. Bu katkı, terlemeyi azaltarak agrega tanelerinin altında su ceplerinin oluşmasını önlemesi ve arayüzey bölgesinde Kalsiyum Hidratları (CH), Kalsiyum Silika Hidratlara (C-S-H) dönüştürmesi ile sağlanır. Şekil 4.2’de SD katkısının kılcal emme üzerine etkisi açıkça görülmektedir.



Şekil 4.2. %0UK, %5UK, %10UK ve %15UK durumlarında SD - Kılcal Emme İlişkisi

Yalnızca uçucu külün kullanıldığı karışımlarda, %10 UK değerine kadar UK'nın artışıyla kılcal emme de artmış, %15 UK değerinde ise kılcal emme azalmıştır. %5 Silis dumanı katkılı betonlarda, UK artışıyla kılcal emme inişli çıkışlı bir seyir izlemiştir. %10 SD katkılı betonlarda ise; UK artışıyla kılcal emme önce azalmış sonra artan bir seyir izlemiştir. Şekil 4.3'te UK katkısının kılcal emme üzerine etkisi görülmektedir.



Şekil 4.3. %0SD, %5SD ve %10SD durumlarında UK - Kılcal Emme ilişkisi

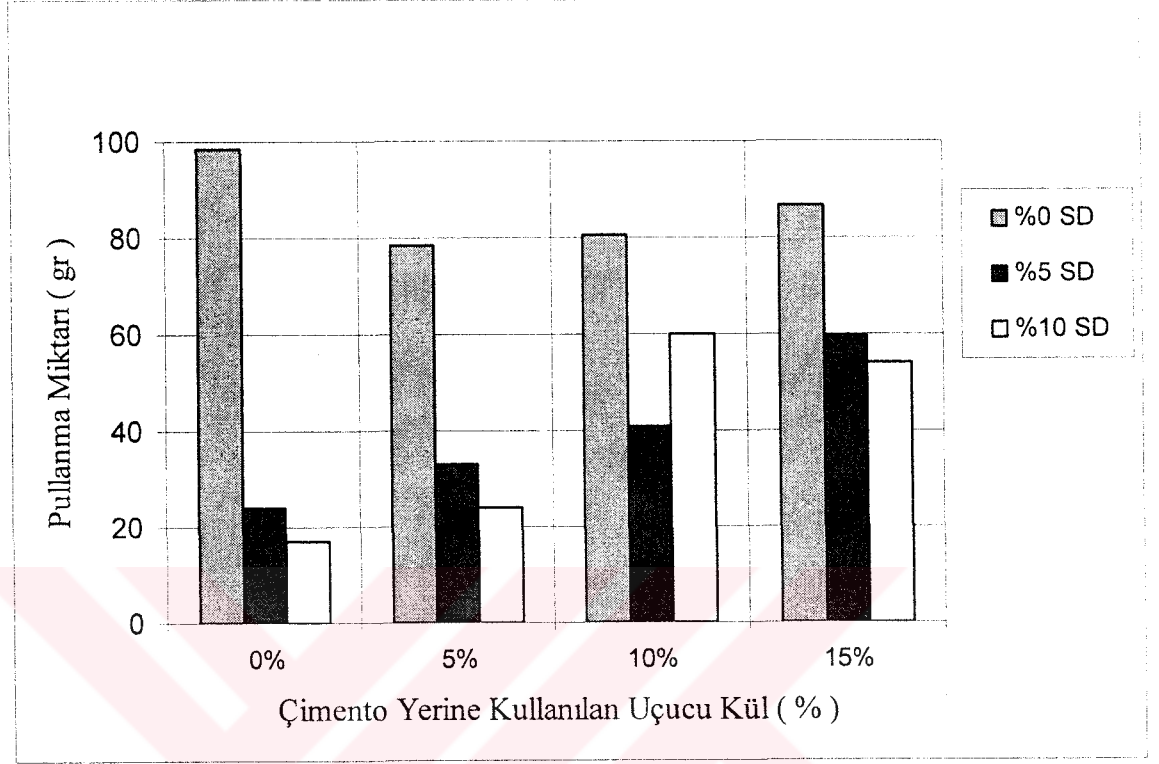
Bütün karışımlar içinde minimum kılcal emme 18,90gr ile bağlayıcı kompozisyonu %5 UK, %10 SD ve %85 PÇ42,5 olan 6 No'lu karışımda tespit edilmiş, maksimum kılcal emme ise 28,53gr ile bağlayıcı kompozisyonu %10 UK, %0 SD ve %90 PÇ42,5 olan 7 No'lu karışımda tespit edilmiştir. %100 PÇ42,5 ile hazırlanan karışımda 23,38gr kılcal emme ölçülmüştür.

4.4. Donma-Çözülme Sonucu Oluşan Pullanmaya İlişkin Bulgular

Materyal ve Yöntem bölümünde belirtildiği gibi donma çözülme deneyi yapılmış ve pullanan malzemeler toplanıp ağırlıkları tespit edilmiştir. Test yüzeyinden olan malzeme kaybı (pullanma) ölçümleri 14. ve 28. donma-çözülme çevriminin ardından yapılmıştır. Elde edilen veriler üç numunenin ortalaması olarak Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Donma-çözülme deneyinde ölçülen pullanan malzeme miktarları

Karışım No	U.K. (%)	S.D. (%)	Pullanan Malzeme Miktarları		
			Birinci Ölçüm Aralığı 14 D-Ç Periyodu Sonu (gr)	İkinci Ölçüm Aralığı 28 D-Ç Periyodu Sonu (gr)	Toplam Pullanma (gr)
1	0%	0%	50,32	48,15	98,47
2	0%	5%	10,79	13,22	24,01
3	0%	10%	9,79	7,18	16,97
4	5%	0%	38,29	40,01	78,30
5	5%	5%	21,71	11,23	32,94
6	5%	10%	15,63	8,27	23,90
7	10%	0%	38,77	41,88	80,65
8	10%	5%	23,64	17,14	40,78
9	10%	10%	28,98	31,08	60,06
10	15%	0%	39,41	47,25	86,66
11	15%	5%	27,08	32,66	59,74
12	15%	10%	27,71	26,47	54,18



Şekil 4.4. UK ve SD katkısının donma-çözülme ile oluşan pullanma üzerine etkisi

4.5. Eğilme Dayanımına İlişkin Bulgular

Eğilme dayanımının tespiti için, Materyal ve Yöntem bölümünde belirtildiği gibi prese yerleştirilen numuneler 2,5 kgf/sn yükleme hızı ile yüklenmiş ve kiriş numunenin kırılması anındaki yük presten okunmuştur. Her bir karışım için bu şekilde üç numune deneye tabi tutulmuştur. Elde edilen verilerin ortalamaları alınarak 7 , 28 , 91 günlük kırılma değerleri (P) bulunmuş ve bu değerler Çizelge 4.5'te gösterilmiştir..

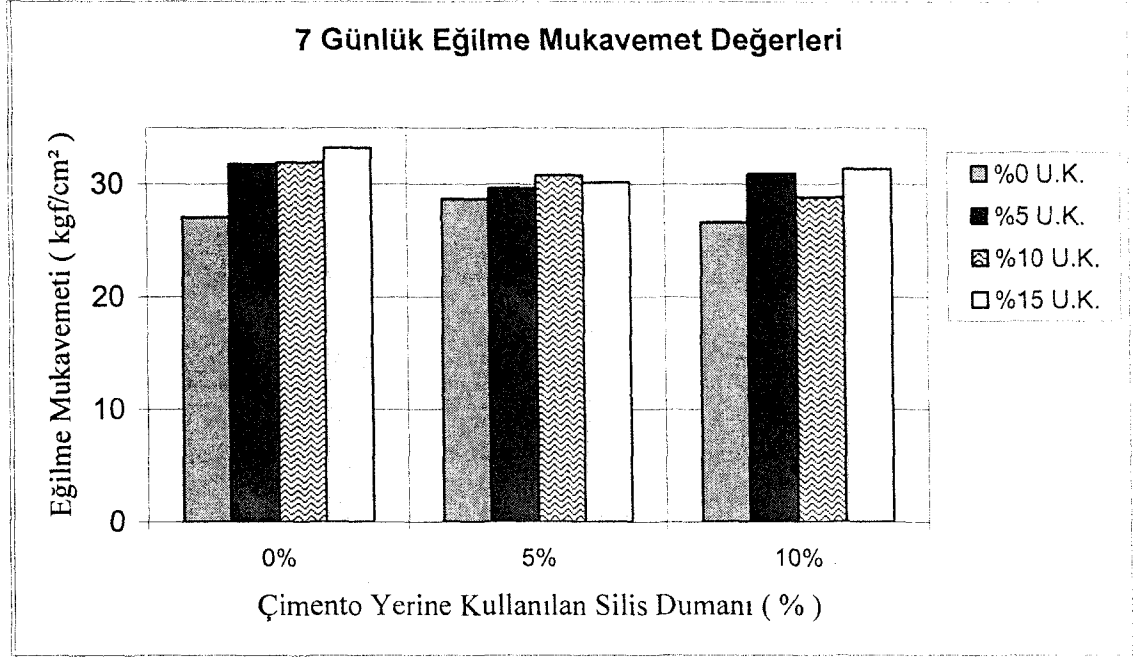
Çizelge 4.5. Eğilme deneyinde presten okunan kırılma değerleri

Karışım No	U.K. (%)	S.D. (%)	Preste Okunan Kırılma Değerleri (P)		
			7. Gün (kgf)	28. Gün (kgf)	91. Gün (kgf)
1	0%	0%	901	1386	1416
2	0%	5%	956	1464	1656
3	0%	10%	887	1409	1527
4	5%	0%	1059	1264	1319
5	5%	5%	988	1388	1609
6	5%	10%	1030	1478	1609
7	10%	0%	1064	1228	1364
8	10%	5%	1026	1437	1585
9	10%	10%	961	1541	1422
10	15%	0%	1107	1376	1425
11	15%	5%	1005	1522	1683
12	15%	10%	1045	1505	1506

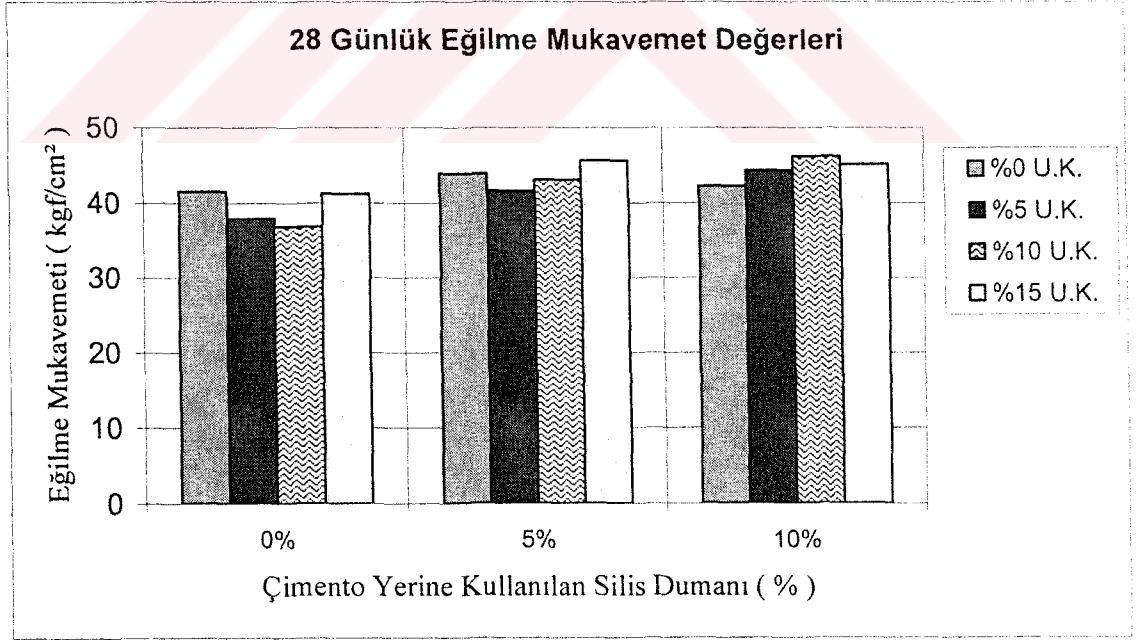
Materyal ve yöntem kısmında anlatıldığı şekilde $\sigma_e = (P \cdot L) / (b \cdot d^2)$ formülü kullanılarak 7 , 28 ve 91 günlük eğilme mukavemeti değerleri hesaplanmış, sonuçlar Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Eğilme Mukavemeti Değerleri

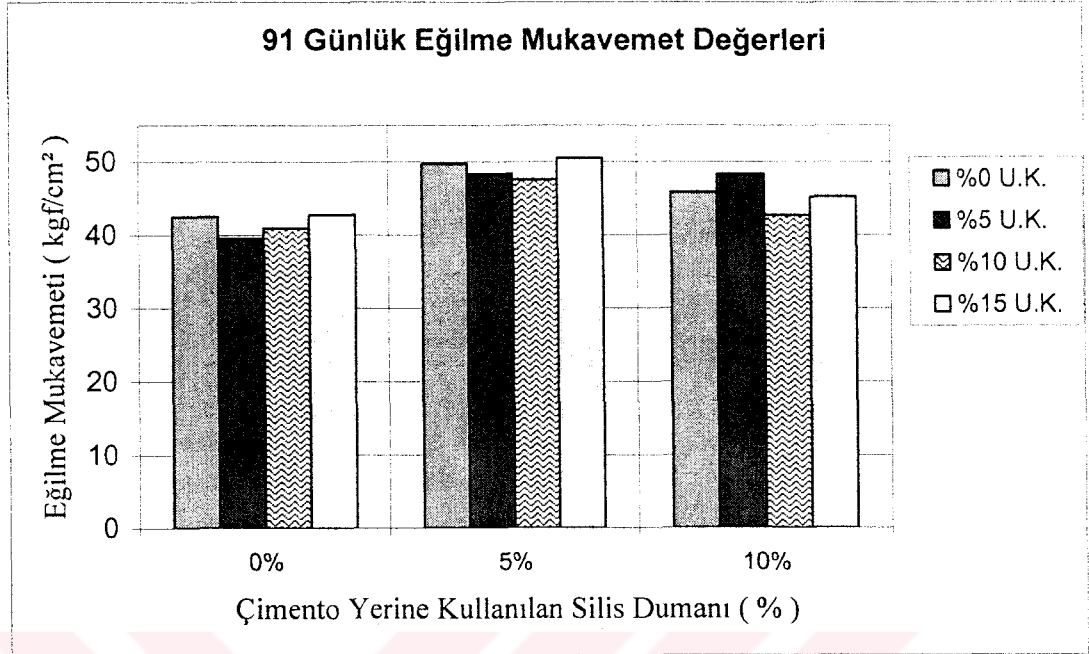
Karışım No	U.K. (%)	S.D. (%)	Eğilme Mukavemeti Değerleri (σ_e)		
			7. Gün (kgf/cm ²)	28. Gün (kgf/cm ²)	91. Gün (kgf/cm ²)
1	0%	0%	27,04	41,57	42,48
2	0%	5%	28,69	43,92	49,68
3	0%	10%	26,61	42,28	45,81
4	5%	0%	31,76	37,91	39,56
5	5%	5%	29,63	41,63	48,28
6	5%	10%	30,91	44,34	48,28
7	10%	0%	31,92	36,85	40,93
8	10%	5%	30,77	43,11	47,55
9	10%	10%	28,83	46,22	42,66
10	15%	0%	33,20	41,27	42,76
11	15%	5%	30,16	45,67	50,50
12	15%	10%	31,35	45,15	45,18



Şekil 4.5. SD ve UK Katkısının 7 Günlük Eğilme Mukavemetine Etkisi



Şekil 4.6. SD ve UK Katkısının 28 Günlük Eğilme Mukavemetine Etkisi



Şekil 4.7. SD ve UK Katkısının 91 Günlük Eğilme Mukavemetine Etkisi

5. SONUÇ

Silis dumanı ve uçucu kül katkılı karışımlar ile üretilen numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Karışımlarda çimento yerine kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça BHA'ların azaldığı gözlenmiştir. Bunun sebebi UK'ün BHA'nın çimentonunkinden düşük olmasına bağlanabilir. Aynı nedenle silis dumanı katkısı betonun birim hacim ağırlığının düşmesine sebep olmuştur. En büyük BHA değeri (2.394 gr/cm³) %100 portland çimentosu kullanılan referans karışımda elde edilmiştir.

Silis dumanı katkısının kılcal su emme miktarını önemli ölçüde azaltmıştır.

Donma çözümü sonucu oluşan pullanmayı hem SD hem de UK azaltmıştır. Katkılı tüm karışımlar referans karışımdan daha iyi performans sergilemiştir. SD, UK içermeyen karışımlarda D-Ç direncini önemli ölçüde artırmıştır. Karışımlara katılan UK oranı arttıkça SD'nin DÇ direncine sağladığı katkı azalmıştır. En kötü performansı sergileyen %100 portlant çimento bağlayıcılı karışımda toplam pullanma 98.47 gr iken, en iyi performansı sergileyen %0UK-%10SD karışımında toplam pullanma 16.97 gr olmuştur.

UK katkı oranı arttıkça 7 günlük eğilme mukavemet değerleri önemli ölçüde artmıştır. En büyük 7 günlük eğilme mukavemeti (33.20 kgf/cm²) %15UK-%0SD karışımında görülmüştür. Bu değer referans karışımın mukavemetinden %23 daha büyüktür. En küçük değer (27.04 kgf/cm²) bağlayıcı olarak %100 PÇ içeren referans karışımında gözlenmiştir.

%10UK-%10SD karışımın yüksek 28 günlük eğilme mukavemet değerini vermiştir. Bu değer referans karışımın mukavemetinden %12 daha büyüktür.

%15UK-%5SD karışımı en yüksek 91 günlük eğilme mukavemet değerini vermiştir. Bu değer referans karışımın mukavemetinden %19 daha büyüktür.

Sonuçlardan görüldüğü üzere silis dumanı ve uçucu kül birlikte veya ayrı ayrı kullanılarak betonun donma-çözülme direncine ve eğilme mukavemetine olumlu katkılar sağlanabilir.



KAYNAKLAR

- Siddique R., 2003. Effect of fine aggregate replacement with Clas F fly ash on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Research* 33 539-547, India.
- Türker P., Erdoğan B., Katnaş F., Yeğınobalı A., 2003. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. TÇMB Ar-Ge Enstitüsü, 76 s., Ankara.
- Setzer M.J., Auberg R., 2003. CIF Test. <http://www.uni-essen.de/rilem117/CIF/CIFENG.htm>, Essen, Germany.
- Erdoğan T.Y., 2003. Beton. Metu Press, 741s., Ankara.
- Yeğınobalı A., 2003. Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı. TÇMB Ar-Ge Enstitüsü, 64s., Ankara.
- Aras H.N., 2003. Yüksek yoğunluklu polietilen ve astragalus ile modifiye asfalt betonlarının bazı mekanik özelliklerinin araştırılması. Atatürk Üniversitesi Fen Bil. Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 81s., Erzurum.
- Şahin R., 2003. Normal portland çimentolu betonların don direncinin Taguchi yöntemi ile optimizasyonu ve hasar analizi. Atatürk Üni. Fen. Bil. Enstitüsü Doktora Tez Çalışması, 183s., Erzurum.
- Yoon Y. S., Won J.P., Woo S.K., Song Y.C., 2002. Enhanced durability performance of fly ash concrete for concrete-faced rockfill dam application. *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 23-30, South Korea.
- Papadakis V.G., Antiohos S., Tsimos S., 2002. Supplementary cementing material in concrete Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor. *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1533-1538, Greece.
- Willis D., 2002. Beton yol yapımının geleceği. Ulusal Beton Yollar Kongresi Konuşma Metinleri, 2003, Ankara.
- Yeğınobalı A., 2002. Beton Yollar Asfalt Yollar: Faydalı ömür maliyetleri konusunda örnekler. Ulusal Beton Yollar Kongresi Konuşma Metinleri, 2003, Ankara.
- Güvercin T., 2002. Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun bağlayıcı olarak çimento üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Atatürk Üni. Fen Bil. Ens. Yüksek Lisans Tezi, 72s., Erzurum.

- “Bir seçenek daha var: Beton yollar”, Türkiye Hazır Beton Birliği Teknik Yayınları, 2002.
- “Beton Yollar”, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, 2002.
- “Türkiye Karayolları İstatistik Yıllığı 2000-2001”, T.C Karayolları Genel Müdürlüğü, 2002.
- Smith T., Tighe S., Fung R., 2001. Concrete Pavements in Canada: A review of their usage and performance. Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Halifax.
- Tunç A., 2001. Yol malzemeleri ve uygulamaları. Atlas yayın dağıtım ltd. şti., 839s. İstanbul.
- Ünsal N., 2001. İnşaat mühendisleri için jeoloji. Fazi Üni. Müh. Mim. Fak., 306s., Ankara.
- ACI Committee 234, 2000. Guide for the use of silica fume in concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Bajorski P. and Streeter A.D., 2000. Optimization of amount and blending of cementitious materials in High-Performance concrete. Transportation Research Records, TRR1698, Paper No. 00-1217.
- Miller R., Baseheart T.M., Sprague R., 2000. Use of high performance concrete for bridge abutments. Transportation Research Records, TRR 1740, Paper No. 00-1151.
- Mukai D.J., Altan S. and Ehrgott J.Q., 2000. Early strength of self compacting concrete. Transportation Research Records, TRR 1698, Paper No. 00-1043.
- Demirboğa R., 1999. Silis dumanı ve uçucu külün perlit ve pomza ile üretilen hafif beton özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Atatürk Üni. Fen Bil. Enstitüsü Doktora Tezi, 147s., Erzurum.
- Cramer S.M. and Carpenter A.J., 1999. Influence of total aggregate gradation on freeze-thaw durability and other performance measures of paving concrete. Transportation Research Records, TRR 1668, Paper No. 99-1064.
- Sarkar S.L. and Little D.N., 1999. Microstructural stability of sulfate-contaminated crushed concrete treated with cementitious materials. Transportation Research Records, TRR 1673, Paper No. 99-0976.

- Carpenter A.J. and Cramer S.M., 1999. Mitigation of Alkali-Silika reaction in pavement patch concrete that incorporates highly reactive fine aggregate. Transportation Research Records, TRR 1668, Paper No. 99-1087.
- Young J.F., Mindess S., Gray R.J., Bentur A., 1999. The science and technology of civil engineering materials, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Ağar E., Süttaş İ., Öztaş G., 1998. Beton Yollar (Rijit Yol Üstyapıları). İTÜ İnşaat Fakültesi Yayınları, 392s., İstanbul.
- Taylor T.F.W., 1997. Cement Chemistry, Thomas Telford, London.
- Erdoğan T.Y., 1996. High-Lime fly ash concretes. Proceedings, Cairo First International Conference on Concrete Structures, Vol.1, Jan 1996, pp. 4-1 to 4-9.
- Süvari Y., 1995. Hızlandırılmış rötre ile hidrolik rötre arasındaki ilişkinin incelenmesi. 4-6-19-20-12-16, İstanbul.
- Khayat K.H. ve Aitcin P.C., 1992. Silica fume in concrete: an overview. American Concrete Institute, ACI SP-132, 835-865, Detroit.
- Ivanov Y.P. ve Rochevelov T.T., 1990. The effect of condensed silica fume on the rheological behavior of cement pastes. Int. Conf. on Rheological Behavior of Cement Pastes, Proc., 23-26, Liverpool.
- Sellevold E.J., 1987. The function of condensed silica fume in high strength concrete. Symp. On Utilization of High Strength Concrete. Proc., 39-49, Stavanger, Norway.
- Carette G.G., Malhotra V.M. and Aitcin P.C., 1987. Preliminary data on long-term strength development of condensed silica fume concrete. CANNET Int. Workshop on Condanced Silica Fume in Concrete, Montreal.
- Malhotra V.M. *at all*, 1987. Condensed silica fume in concrete. CPC Press Inc., Boca Raton, Florida.
- Postacıoğlu B., 1987. Beton (Agregalar, Beton). Teknik kitaplar Yayınevi, 3, 29-46-55-65 141,142, 164, İstanbul.
- Saucier K., 1984. High strength concrete for peace keeper facilities. Mis. Paper SL-84-3, U.S. Army Engineer Waterway: Exp. Sta., Vicksburg, MS.
- Richartz W., 1984. Composition and properties of fly ashes. Traslantino ZKG, Zem. Kalk Gips 84 (2) (1984) 62.

Jahren P., 1983. Use of silica fume in concrete. American Concrete Institute, ACI SP-79, 625-645, Detroit.



ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Rize'nin Kalkandere ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Kalkandere, Bayburt ve Erzurum'da tamamladı. 1996 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden Haziran 2000'de mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisansa başladı. 2000-2001 öğrenim sezonunda Fen Bilimleri Enstitüsünde İngilizce hazırlık sınıfını okudu.

