

154385

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**UÇUCU KÜL, KATKILI ÇİMENTO VE BETONLARIN
NORMAL, SÜLFATLI, DENİZ SULARINA KARŞI
DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI**

154385

Kimya Müh. Maide Menekşe SEVİMLİ

**FBE Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Kimya Mühendisliği Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sabriye PIŞKIN

Prof. Dr. Ülker BEKER

Prof. Dr. Ahmet EKERİM

S. Pişkin
Ü. Beker
A. Ekerim

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMA LİSTESİ.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇİMENTO	2
2.1 Tarihçesi.....	2
2.2 Türkiye’de Endüstrinin Tarihçesi ve Durumu.....	3
2.3 Dünyadaki Durumu.....	7
3. ÇİMENTONUN TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI.....	9
4. ÇİMENTO ÜRETİMİ.....	13
5. ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDELER.....	15
5.1 Ana Hammaddeler	15
5.1.1 Kireçtaşı	15
5.1.2 Kil	16
5.1.3 Marn.....	17
5.2 Çimento Hammaddelerinin Sınıflandırılması	18
5.3 Çimentoda Kullanılan Katkı Maddeleri.....	18
5.3.1 Tras	18
5.3.2 Sülfatlar.....	20
5.3.3 Uçucu Küller.....	21
5.3.3.1 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Minerolojik Yapısı	23
5.3.3.2 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	24
5.3.3.3 Uçucu Küllerin Kullanımı	25
6. HİDRATASYON.....	28
7. BETON	33
7.1 Tanımı	33
7.2 Betonu Oluşturan Maddeler	33

7.2.1	Ana Hammaddeler	33
7.2.1.1	Agrega.....	33
7.2.1.2	Karışım Suyu	34
7.2.2	Katkı Maddeleri	34
7.2.2.1	Kimyasal Katkılar	34
7.2.2.2	Mineral Katkılar	35
8.	DAYANIM	36
8.1	Sülfat Etkisi.....	43
8.2	Deniz Suyu Etkisi	50
9.	MATERYAL VE DENEYSEL ÇALIŞMA	54
9.1	Deney Programı	54
9.2	Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	54
9.2.1	Kullanılan çimentolar	54
9.2.2	Kullanılan uçucu küller.....	54
9.2.3	Kullanılan katkı malzemeleri.....	54
9.2.4	Kullanılan agrega.....	54
9.3	Çalışmada Kullanılan Su Özellikleri	61
9.4	Kullanılan Teçhizatlar.....	61
9.5	Uçucu Küllerin Bazı Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi	63
9.6	Kimyasal Analizi	73
9.7	Çalışma Yöntemi	73
10.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	83
	KAYNAKLAR.....	85
	İNTERNET KAYNAKLARI.....	88
	EK BETON ÇALIŞMASI.....	89
	ÖZGEÇMİŞ.....	96

KISALTMA LİSTESİ

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TEAŞ	Türkiye Elektrik Anonim Şirketi
TS	Türk Standardı
PCA	Portland Cement Association
PÇ	Portland Çimento
PLÇ	Portland Kalkerli Çimento
PSFÇ	Portland Silika Fıme Çimento
CÇ	Cürufu Çimento
TÇ	Traslı Çimento
UKÇ	Uçucu Küllu Çimento
SDÇ	Sülfata Dayanıklı Çimento
PZÇ	Puzolanik Çimento
PKÇ	Portland Kompoze Çimento
BPÇ	Beyaz Portland Çimento



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Türkiye çimento üretimi.....	4
Şekil 1.2	1911-2000 Yılları arası endüstri yaşam döngüsü.....	6
Şekil 1.3	Dünya çimento üretimi ve tüketimi.....	8
Şekil 4.1	Çimento fabrikası çalışma sistemi.....	14
Şekil 5.1	Dr. Nelia Dunbar'ın denetiminde New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources' da uçucu küllerin elektron mikroskobu ile yapılan analiz örnekleri....	25
Şekil 5.2	Puzolanların sınıflandırılması	27
Şekil 6.1	Hidratasyonun başlangıcında betonun ve çimento hamurunun yapısı	28
Şekil 6.2	Tam hidrate olmuş çimento hamurunun basitleştirilmiş modeli.....	29
Şekil 6.3	C ₃ A'nın kübik yapıdaki kristalleri	30
Şekil 6.4	Etrenjitin kristal yapısı; a) kolon Al ³⁺ (kırmızı), Ca ²⁺ (mavi), ve H ₂ O (gri), b) SO ₄ ²⁻ ve su (sarı)	31
Şekil 6.5	Monosülfatın kristal yapısı; a) Al ³⁺ (kırmızı) ve Ca ²⁺ (mavi), b)SO ₄ ²⁻ (x) ve su.....	31
Şekil 8.1	Puzolan - Portland çimento karşılaşmalarının hidratasyonunda serbest kireç miktarının değişimi.....	38
Şekil 8.2	İyi hidrate olmuş portland çimento ve puzolan - portland çimento karışımlarında çimento hamuru yapısının karşılaştırılması	39
Şekil 8.3	Portlant çimento betonları ve puzolanlı betonların mukavemetinin zamanla artış	40
Şekil 8.4	Uçucu kül ve beton test bölümlerinde sıcaklık yükselmesi eğrisi	40
Şekil 8.5	Betonun kimyasal zararlı etkiler sonucu bozulması.....	42
Şekil 8.6	Magnezyum sülfat etki mekanizması.....	47
Şekil 8.7	Sodyum sülfatın etki mekanizması	49
Şekil 8.8	Betonun yapısının deniz suyunda bozulma şeması	51
Şekil 9.1	PÇ 42,5'un farklı sularda dayanımı.....	75
Şekil 9.2	PÇ 42,5 + Uçucu Kül (%21)'ün farklı sularda dayanımı.....	76
Şekil 9.3	PZÇ 32,5'un farklı sulardaki dayanımı	77
Şekil 9.4	PZÇ + PÇ'nin farklı sulardaki dayanımı	78
Şekil 9.5	PÇ 42,5 + Uçucu Kül (%17)'ün farklı sularda dayanımı.....	79
Şekil 9.6	Farklı çimentoların normal suda dayanımı.....	80
Şekil 9.7	Farklı çimentoların sülfatlı suda dayanımı.....	81
Şekil 9.8	Farklı çimentoların deniz suyunda dayanımı	82

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1	Türkiye çimento üretimi – ihracat – ithalat bilgileri	4
Çizelge 1.2	Türkiye çimento üretimi	5
Çizelge 1.3	Türkiye’deki başlıca çimento fabrikaları ve öğütme tesisleri	5
Çizelge 1.4	Dünya çimento üretimi, 10 ³ ton	7
Çizelge 1.5	Dünya çimento üretimi ve tüketimi	8
Çizelge 5.1	Türkiye’ de uçucu kül kullanımı	22
Çizelge 5.2	Türk standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri	24
Çizelge 7.1	Betonu oluşturan maddeler	33
Çizelge 8.1	Deniz sularında ortalama tuz miktarları	52
Çizelge 9.1	Çimentoların TS standardına göre mevcut özellikleri	55
Çizelge 9.2	Portland çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri	56
Çizelge 9.3	Puzolanlı çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri	57
Çizelge 9.4	Trasın kimyasal ve fiziksel özellikleri	58
Çizelge 9.5	Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri	59
Çizelge 9.6	Farklı termik santrallerden alınan küllerin dayanım sonuçları	60
Çizelge 9.7	Laboratuvar teçhizat listesi	62
Çizelge 9.8	2002 yılı Haziran ayı uçucu kül kimyasal analizleri	64
Çizelge 9.9	2002 yılı Temmuz ayı uçucu kül kimyasal analizleri	64
Çizelge 9.10	2002 yılı Ağustos ayı uçucu kül kimyasal analizleri	64
Çizelge 9.11	2002 yılı Eylül ayı uçucu kül kimyasal analizleri	65
Çizelge 9.12	2002 yılı Ekim ayı uçucu kül kimyasal analizleri	65
Çizelge 9.13	2002 yılı Kasım ayı uçucu kül kimyasal analizleri	65
Çizelge 9.14	2002 yılı Aralık ayı uçucu kül kimyasal analizleri	65
Çizelge 9.15	2003 yılı Ocak ayı uçucu kül kimyasal analizleri	66
Çizelge 9.16	2003 yılı Şubat ayı uçucu kül kimyasal analizleri	66
Çizelge 9.17	2003 yılı Mart ayı uçucu kül kimyasal analizleri	66
Çizelge 9.18	2003 yılı Nisan ayı uçucu kül kimyasal analizleri	66
Çizelge 9.19	2003 yılı Mayıs ayı uçucu kül kimyasal analizleri	67
Çizelge 9.20	2003 yılı Haziran ayı uçucu kül kimyasal analizleri	67
Çizelge 9.21	2003 yılı Temmuz ayı uçucu kül kimyasal analizleri	67
Çizelge 9.22	2003 yılı Ağustos ayı uçucu kül kimyasal analizleri	67
Çizelge 9.23	2003 yılı Ekim ayı uçucu kül kimyasal analizleri	68
Çizelge 9.24	2003 yılı Kasım ayı uçucu kül kimyasal analizleri	68
Çizelge 9.25	2003 yılı Aralık ayı uçucu kül kimyasal analizleri	68
Çizelge 9.26	Seyitömer Termik Santrali uçucu külü 2003 yılı ortalama kimyasal bileşen Değerleri	69
Çizelge 9.27	Çayırhan Termik Santrali uçucu külü 2003 yılı ortalama kimyasal bileşen Değerleri	70
Çizelge 9.28	Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü 2003 yılı ortalama kimyasal bileşen Değerleri	71
Çizelge 9.29	Tunçbilek Termik Santrali uçucu külü 2003 yılı ortalama kimyasal bileşen Değerleri	72
Çizelge 9.30	Farklı çimentoların normal su, sülfatlı su ve deniz suyundaki dayanımları	74

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yapılmasına olanak sağlayan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sabriye Pişkin'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ham madde ihtiyacımı sağladığım Bursa Çimento AŞ.'ye, deneylerin yapılmasında olanak sağlayan fabrika yetkililerine ve özellikle Kalite Kontrol Müdürü Sayın Güler Yurter ve Laboratuar Şefi Sayın Sabiha Kan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Türkiye Hazır Beton Birliği yetkililerinden Genel Sekreter Sayın Ferruh Karakule ve Teknik Ofis Sorumlusu Sayın Tümer Açıkalin'a teşekkürlerimi sunarım.

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği AR-GE Direktörü Sayın Prof. Asım Yeğınobalı'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince gösterdikleri destekten dolayı aileme en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.



ÖZET

Termik santrallerde atık malzeme olan uçucu kül, çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Mineral katkıları daha ekonomik ve çevre dostu olmalarının yanında, özellikle sülfatlara dayanıklılık gösterme gibi avantajları da bulunmaktadır.

Bu çalışmada, uçucu kül ve doğal puzolanik malzeme olan trasın çeşitli oranlarda çimentoya katılarak, çimento üretiminde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Uçucu kül ve tras katılarak hazırlanan çimento harçları kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıplar, normal su, deniz suyu ve sülfatlı su havuzlarında kırıma sürelerine (2, 3, 7, 28, 60 ve 90 gün) kadar kür edilmişlerdir. Bu sürelerde basınç dayanımları ölçülmüştür. Denemelerde portland çimentosuna %17 ve %21 oranlarında Seyitömer Termik Santrali uçucu külü katılmıştır. Kullanılan puzolanlı çimento %15 oranında tras, %24 oranında kül içermektedir.

Hazırlanan harçların, agresif sulara karşı gösterdiği dayanım sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Portland çimentosu ile farklı kombinasyonlarda hazırlanan uçucu kül katkılı çimento numunelerinin, deniz suyuna nazaran sülfatlı suya daha iyi dayanım sağladığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çimento, uçucu kül, tras, sülfatlı su, deniz suyu.

ABSTRACT

Fly ashes form during the production of electricity in thermoelectric power as solid waste. Mineral admixtures as fly ash have the advantages of durability against sulfate resistance as well as being economic and protecting the environment.

In this study, utilization of fly ash and tras, which have natural pozzolanic properties, in production of cement by mixing of cement at different ratios was investigated.

The cement mixtures prepared with fly ash and tras was molded. These mould was placed in sea water, sulfate water and tap water pools. The compressive strength of mortars was determined at 2, 3, 7, 28, 60 and 90th days. In the experiments, fly ash obtained from Seyitömer Termik Santrali was mixed with proportions of 17% and 21% respectively. Pozzolanic cement used in experiments consist of tras 15% and fly ash 24%.

Results of compressive strenght of prepared mortars in aggressive water was given as compared with them. It was observed that cement samples, which were prepared with fly ash in different combination and portland cement have high compressive strength in sulfate water in according to the sea water.

Keywords: Cement, fly ash, tras, sulfate water, sea water.

1. GİRİŞ

Farklı endüstriyel alanlardaki üretimler sonucu, çeşitli atık malzemeler açığa çıkmaktadır. Bu ürünlerin değerlendirilmesi yoluna gitmeksizin, ya kısa vadede depolanması ya da çevreye atılması söz konusudur. Çünkü bu atıkların ekonomik değeri göz ardı edilmekte, çevreye verebileceği zararlar dikkate alınmamaktadır.

Uçucu kül, termik santrallerde enerji üretimi için kullanılan kömürün yakılması sonucu elde edilen bir yan üründür. 1937 yılında başlayan araştırmalar sonucu, uçucu kül inşaat sektöründe değerlendirilmeye başlanmıştır. Ülkemizde uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 15 milyon ton olmakla birlikte, kullanımı oldukça düşüktür.

Tras, doğal puzolanik bir malzeme olup, çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Ülkemiz puzolan kaynakları açısından zengin olup, bu kaynakların değerlendirilmesi gerekmektedir.

Portland çimentosu, kaliteli olmasına karşın maliyeti oldukça yüksektir. Günümüzde sürekli olarak kaliteden taviz vermeden maliyeti düşürme eğilimi içinde olma bilinci yerleşmektedir. Özellikle ülkemiz deprem kuşağı üzerinde yer aldığından bu konuda hassas davranılması gerekmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda da uçucu külün ve tras gibi katkıların beton yapımında kullanımı yaygınlaştırılmalıdır.

Bu çalışmada, Seyitömer Termik Santrali'nden alınan uçucu kül, %17 ve %21 oranında portland çimentosuna katılmıştır. Kullanılan puzolanik çimento %24 kül, %15 tras katkısından oluşmaktadır. Hazırlanan harç numuneleri normal su, sülfatlı su ve deniz suyu ile hazırlanan havuzlarda bekletilmiştir. Katkılı çimentoların agresif sulara karşı gösterdiği dayanım araştırılmıştır.

2. ÇİMENTO

2.1 Tarihçesi

Çimento ve çimento gibi bağlayıcı maddelerin tarihi çok eskilere dayanmaktadır. İlk olarak kireç bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır. Kirecin bağlayıcı özelliğinin ilk ne zaman anlaşıldığı konusunda bir çok spekülasyon yapılmaktadır. Sönmüş kirecin ilk uygulamaları mağara duvarlarına yapılan resimlerde görülmüştür. Daha sonra yine mağaralarda iç ve dış dekorasyon ve sıva yapımında kullanılmaya başlanmıştır.

Eski Mısır, Kıbrıs, Girit ve Mezopotamya' nın değişik yörelerinde kirecin bir yapı malzemesi olarak kullanılmasına ait örneklere rastlanılmıştır. Eski Yunanlılar ve Romalılar kireci hidrolik bağlayıcı olarak kullanmışlardır. M.Ö. 70-25 yılları arasında yaşamış olan Mimar Vitruvius "On Architecture" (Mimarlık Üzerine) adlı on ciltlik kitabında puzolan ve kireç karışımlarının hidrolik özelliklerinden bahsetmiş, nehir ve deniz kıyısında yapılacak olan yapılarda kullanılabilecek harç için karışım oranını, iki kısım puzolan bir kısım kireç olarak vermiştir. Araştırma sonuçları Anadolu'da Çatalhöyük'teki evlerin yapımında kullanılan sıvanın 7000 yıl eski olduğunu ortaya çıkarmıştır [1].

Eski Mısırlılar'ın kalsine edilmiş killi jipsten oluşan bir tür çimento kullandıkları, Anadolu'daki Hattuşaş ve Boğazkale gibi antik Hitit kentlerinde de kireç ile doğal puzolanik toprakların karıştırılarak harç yapıldığı bilinmektedir. Avrupa' da ise ilk kez İtalya'da, Büyük Roma İmparatorluğu'nda Sezar döneminde (MÖ.12 – 14yy.) Caligula Wharf yapılarda çimentoyu kullanmıştır [11].

Tarihte, Mısır Piramitleri, Çin Seddi ve değişik zamanda yapılan kalelerde o dönemin medeniyetini simgeleyen birçok değişik bağlayıcı madde kullanılmıştır. Daha sonra yaklaşık 2000 yıl önce, Romalılar söndürülmüş kireci volkanik küllerle ve sonraları, pişirilmiş tuğladan elde edilen tozlarla karıştırarak bugünkü çimentonun özelliklerine benzer bir hidrolik bağlayıcı kullanmaya başlamışlardır. Eski Yunanlılar ise Santorin Adası'ndaki volkanik tüfleri kireçle karıştırarak veya killi kireç taşından elde ettikleri bir tür hidrolik kireçle harç yapmışlardır.

Eski Yunanlılar ve Romalılar kireç ve puzolan karışımlarının hidrolik özelliğinin farkına varmış ve bunları kullanmış olmakla birlikte, ne kirecin elde edilmesini ne de puzolanik reaksiyonları kimyasal olarak açıklayamamışlardır.

Bağlayıcı malzemelerin kalitesi ve kullanımı konusunda ancak 18.yy.'dan itibaren bir gelişme gözlemlenebilmiştir. 1756 yılında Eddystone Lighthouse'u yeniden inşa etmekle görevlendirilen John Smeaton kirecin kimyasal özelliklerini ilk anlayan kişi olarak bilinmektedir. Daha sonraki gelişme ise Joseph Parker tarafından "Roman Cement" (Roma Çimentosu), adı ile bilinen bağlayıcının elde edilmesidir.

1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentinde, Joseph Aspdin isimli bir duvarcı ustası hazırladığı ince taneli kil ve kalker karışımını pişirerek ve daha sonra öğütürerek bağlayıcı bir ürün elde etmiştir.

Bu ürüne su ve kum katıldığında ve zamanla sertleşme olduğunda, ortaya çıkan malzemenin İngiltere'nin Portland adasından elde edilen yapı taşlarını andırdığını gören Joseph Aspdin, elde ettiği bu bağlayıcı için 21.10.1824 tarihinde "Portland Çimentosu" adı altında patent almıştır. Bu bağlayıcı daha sonraki yıllarda büyük gelişmeler gösterse de "portland" ismi aynen korunmuştur. Aslında Joseph Aspdin tarafından üretilen bağlayıcı, üretim sırasında yeterince yüksek sıcaklıklarda pişirilmediği için bugünkü portland çimentosunun özelliklerine tamamen sahip değildir. İngiltere Kirkgate İstasyonunun yanındaki halen ayakta olan "Wakefield Arms" binasının Joseph Aspdin'in yaptığı bağlayıcı ile yapıldığı bilinmektedir. Hammaddelerin yüksek sıcaklıklara kadar pişirilip öğütülmesi olayı daha sonra Isaac Johnson isimli bir İngiliz tarafından 1845 yılında gerçekleştirilmiştir.

İlk Çimento Fabrikası İngiltere'de 1848 yılında kurulmuştur. İlk Alman Çimento Standardı 1860 yılında oluşturulmuştur. American Concrete Institute (ACI)'nin kuruluşu ve ilk Amerikan Yönetmeliklerinin oluşturulması ise 1913 yılına rastlamaktadır [1].

2.2 Türkiye'de Endüstrinin Tarihçesi ve Durumu

Türkiye'de çimento üretimi 1911 yılında Darıca ve Eskişehir'de açılan iki portland çimentosu fabrikasıyla başlamıştır. Cumhuriyet döneminde ülkedeki çimento fabrikalarının sayısı hızla artmış ve çimento sektörünün özellikle II. Dünya Savaşı sonrası tüm dünyada gösterdiği ilerlemeye paralel olarak Türk Çimento Sektöründe de hızlı bir gelişme yaşanmıştır.

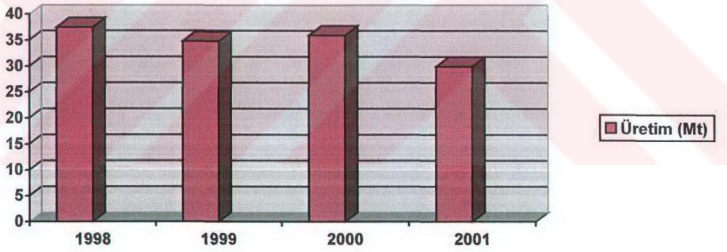
Politik kararlar ve nakliye şartlarının zor olması nedeniyle, kamu fabrikaları daha çok Doğu Anadolu, Güney Doğu Anadolu ve İç Anadolu Bölgelerinde kurulmuştur. Dünyadaki gelişmenin yanı sıra, Türkiye'de özel sektörün çimento sanayiine girmesinin de sektörün dinamikleşmesinde çok büyük bir payı olmuştur. Çimento üretimi, hızlı kentleşme ve alt yapı çalışmalarından kaynaklanan ihtiyacı, ancak 1960 yılında karşılar duruma gelmiştir. Her ne kadar Türkiye 1963 yılında çimento ithalatına tekrar başlamışsa da bu dönem uzun sürmemiş

ve artırılan üretim kapasitesiyle Türkiye, 1970 yılında iç talebini tamamıyla karşılamış ve çimento ihracatına başlamıştır.

1979 yılında iç talepte azalma meydana gelmiş, önceki yıllarda yapılan yatırımlar ve artırılan kapasitelerden dolayı oluşan iç talep fazlası çimento; ihracat yoluyla değerlendirilmiş ve ülke ekonomisine ciddi miktarda kaynak sağlamıştır.

1983 yılından sonra ve yaşanan kriz dönemleri hariç sektörde iç talep sürekli olarak artmıştır. Mevcut kapasiteleriyle talebi karşılamakta zorlanan fabrikalar, gerek modernizasyon çalışmaları gerekse kapasite artırımı yaparak üretimlerini artırmışlar ve gerçekleştirdikleri ihracatla da Türkiye ekonomisine büyük katkılar sağlamışlardır (Andersen, 2001).

Türkiye'nin en eski ve önemli sanayi sektörlerinden olan çimento özellikle 70'li yıllardan sonra yaptığı atakla Türkiye'yi dünya çimento sektörünün önemli üreticileri arasına sokmuştur. 1911'lerde İstanbul'da 20 bin ton/yıl kapasite ile hayata geçen çimento sektörü 1998 yılına gelindiğinde 37.488 milyon ton/yıl üretim ile, dünyada yedinci sıraya yükselmiştir. Türkiye 1998 – 2001 yılları arasındaki çimento üretimi – ihracat – ithalat bilgileri Çizelge 1.1'de verilmiştir [1,10].



Şekil 1.1 Türkiye çimento üretimi

Çizelge 1.1 Türkiye çimento üretimi – ihracat – ithalat bilgileri [5,10]

Milyon ton	1998	1999	2000	2001
Üretim	37,488	34,813	35,952	29,959
İhracat	4,036	4,417	6,524	8,134
İthalat	-	0,309	0,269	0,176

Türkiye çimento üretiminin, bölge bazında dağılım miktarları Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2 Türkiye çimento üretimi [10]

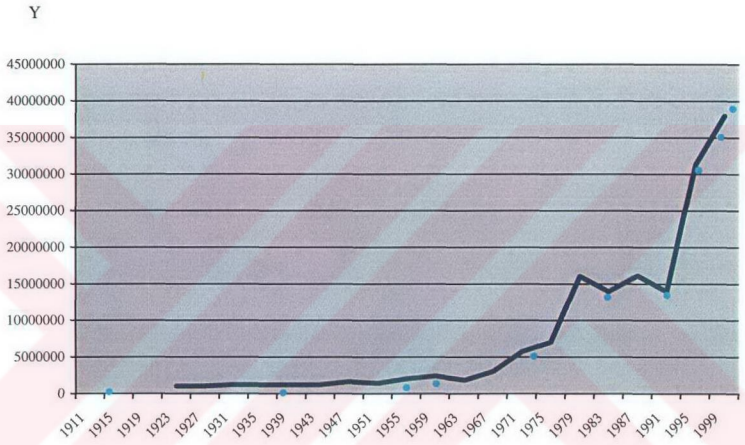
Yıllar	Marmara	Ege	Akdeniz	Karadeniz	İç Anadolu	Doğu Anadolu	G.Doğu Anadolu	TOPLAM (Ton)
1991	8.781.749	3.609.416	4.109.117	2.760.219	3.999.214	917.518	2.083.336	26.260.569
1992	9.854.939	4.052.204	4.095.769	3.006.376	4.437.990	964.243	2.195.808	28.607.329
1993	10.555.575	4.186.754	4.036.991	3.415.914	5.634.503	1.077.482	2.458.532	31.365.751
1994	10.262.597	4.223.667	4.045.883	3.382.725	4.649.679	989.337	1.965.345	29.519.233
1995	11.599.332	4.355.751	4.453.206	3.973.432	5.197.730	1.043.114	2.520.825	33.143.390
1996	11.675.563	4.687.340	4.798.772	4.498.101	5.495.885	1.059.355	3.017.933	35.232.949
1997	11.695.033	5.129.695	5.574.514	4.164.533	5.678.501	1.279.620	2.512.959	36.034.855
1998	11.505.882	4.952.491	5.789.989	4.795.240	6.218.554	1.351.627	2.874.278	37.488.061
1999	10.564.756	4.743.054	5.250.117	4.297.749	5.669.679	1.379.241	2.909.138	34.813.734
2000	10.447.340	4.735.952	5.356.079	4.675.421	6.133.679	1.650.173	2.953.871	35.952.515
2001	8.109.979	4.294.975	5.157.849	3.279.445	5.161.322	1.456.637	2.498.847	29.959.054

Türk çimento sektörü, teknolojik alt yapısıyla; 39'u entegre 17'si öğütme ve paketlenme olmak üzere toplam 56 tesisiyle, Avrupa'da birinci üretici konumundadır (Çizelge 1.3). Sektörde faaliyet gösteren kamu çimento fabrikalarının özelleştirilmesine 1987 yılında başlanmış ve 1997 yılında özelleştirme tamamlanmıştır (Andersen, 2001).

Çizelge 1.3 Türkiye'deki başlıca çimento fabrikaları ve öğütme tesisleri [1]

ÖZELLEŞTİRME ÖNCESİ			
Grup adı	%	Fabrika	Öğütme tesisi
Kamu	42	22	3
Karma	15	5	
Özel	43	14	
Toplam	100	41	3
ÖZELLEŞTİRME SONRASI			
Sabancı Holding	18	4	3
Oyak	16	5	1
Rumeli	11	8	1
Set Grup	8	4	1
B.Anadolu	7	2	1
Çimentaş	5	2	1
Yibitaş Lafarge	5	3	3
Vicat	5	2	
Lafarge	3	1	1
Diğer fabrikalar	23	8	
Bağımsız öğütme tesisleri	-	-	5
Toplam	100	39	17

Çimento sektörü, 2001 yılında patlak veren krizin etkisini 2002 yılında da yaşamıştır. 2001 yılında krizin çimento satışlarını bölgesel olarak nasıl etkilediği incelendiğinde en fazla azalışın %22 ile Marmara Bölgesi'nde gerçekleştiği, bu bölgeyi %20, %18, %12 ve %8 azalış oranları ile sırasıyla Ege, Karadeniz, İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri'nin izlediği belirlenmiştir. Bu bölgelerin aksine, 2000 yılına göre 2001 yılında ton bazında çimento satışları, Akdeniz Bölgesi'nde %4, Doğu Anadolu Bölgesi'nde ise %1 oranında artış göstermiştir. Şekil 1.2'de, çimento endüstrisinin 1911 - 2000 yılları arası yaşam döngüsü özetlenmektedir (Andersen, 2001; Erşen, 2003).



Şekil 1.2 1911 – 2000 Yılları arası endüstri yaşam döngüsü (Andersen, 2001)

- İlk çimento fabrikası Darıcada kuruldu (1911)
- Devletin çimento fiyatlarına müdahalesi (1935)
- ÇİSAN'ın kurulmasıyla devletin çimento fabrikalarını tek bir yapı altında toplanması (1953)
- TÇMB kurulumu (1957)
- İthalatın durması ve ihracata yönelme (1970)
- İhtilal ve beraberindeki ekonomik ve siyasi istikrarsızlık (1980)
- Kamu çimento fabrikalarının özelleştirilmesine başlanması (1987)
- 5 Nisan kararları (1994)
- Özelleştirmenin tamamlanması (1997)
- Yaşanan büyük depremler (1999)

Y: İç Tüketim + İhracat (ton)

2.3 Dünyadaki Durumu

Dünyanın en büyük çimento üreticisi, daha önceki yıllarda olduğu gibi, 1998 yılında da yaklaşık 500 milyon ton üretim ile Çin Halk Cumhuriyeti olmuştur. Çin Halk Cumhuriyeti'ni Amerika, Hindistan, Japonya, Güney Kore, Brezilya ve Türkiye takip etmiştir. Dünyada çimento tüketimi 1990 yılında 1 milyar ton barajını aşmıştır. Dünya çimento tüketimi 1996 ve 1997'de sırasıyla %4 ve %3 arttıktan sonra, 1998 yılında %2 azalmıştır. Bu azalma da Asya'da başlayan ekonomik krizin etkilerinin, 1998'de ağırlaşarak, öncelikle Rusya ve diğer gelişmekte olan ekonomilere bulaşmasının rolü büyüktür [1].

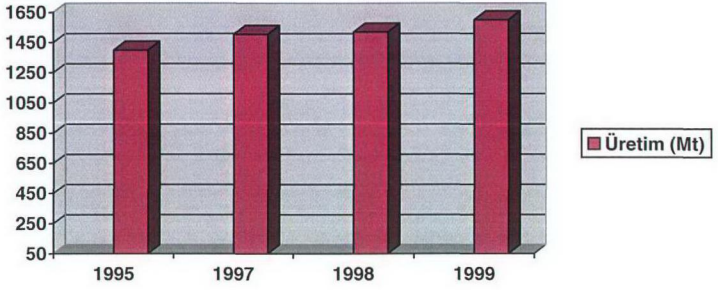
2000 yılında dünya çimento üretimi 1.6 milyar ton barajına ulaşmıştır (Çizelge 1.4) [10].

Çizelge 1.4 Dünya çimento üretimi, 10³ ton [10]

ÜLKELER	1996	1997	1998	1999	2000	2001*
A.B.D.	80.818	84.255	85.612	87.777	89.510	91.100
Brezilya	34.597	38.096	43.000	40.270	39.208	40.000
Çin	490.000	492.600	513.500	573.000	583.190	595.000
Mısır	-	-	19.203	22.000	24.143	22.000
Fransa	20.000	19.000	19.500	19.527	20.000	21.000
Almanya	40.000	37.000	36.610	38.099	38.000	40.000
Hindistan	76.220	80.000	85.000	90.000	95.000	100.000
Endonezya	25.000	26.000	22.000	24.000	27.789	28.000
İtalya	34.000	33.721	35.000	36.000	36.000	36.000
Japonya	94.492	91.938	81.328	80.120	81.300	82.000
Kore	57.334	59.796	46.791	48.157	51.225	52.000
Meksika	22.829	27.548	27.744	29.413	31.677	30.000
Rusya	27.800	26.600	26.726	28.400	32.400	35.000
İspanya	25.157	27.632	27.943	30.800	30.000	30.000
Taiwan	21.537	21.522	19.538	18.283	18.500	18.500
Tayland	35.000	36.000	30.000	34.500	32.000	32.000
Türkiye	32.500	36.035	38.200	34.403	35.825	36.000
Diğer Ülkeler	367.280	379.000	360.000	375.000	330.000	340.000
DÜNYA TOPLAMI	1.485.000	1.515.000	1.520.000	1.600.000	1.600.000	1.650.000

* Tahmini

Dünya çimento üretim ve tüketim değerleri Çizelge 1.5' te gösterilmektedir.



Şekil 1.3 Dünya çimento üretimi

Çizelge 1.5 Dünya çimento üretimi ve tüketimi [1,10]

Milyon ton	1995	1997	1998	1999
<i>Tüketim</i>	1.381	1.495	-	-
<i>Üretim</i>	1.400	1.505	1.520	1.600

3. ÇİMENTONUN TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI

Çimento kelimesi, yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince “caementum” kelimesinden türemiştir. Daha sonra bu kelime bağlayıcı anlamında kullanılmaya başlanmıştır [1].

Çimento başlıca silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri ihtiva eden hammaddelerin teknolojik metotlarla sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen yarı mamul madde olan klinkerin, tek veya daha fazla cins katkı maddesi ile öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır (BS, 2000).

Çimentonun beton içerisindeki işlevi, agrega tanelerinin yüzeyini kaplayarak ve taneler arasındaki boşlukları doldurarak bağlayıcılık görevi yapmaktır. Çimento, ana hammaddeler ile mineral parçaların (kum, çakıl, tuğla, briket...vs.) yapıştırılmasında kullanılan bir malzemedir. Çimentonun bu yapıştırma özelliğini yerine getirebilmesi için mutlaka suya ihtiyaç vardır. Çimento, su ile reaksiyona girerek sertleşen bir bağlayıcıdır.

Çimento birçok beton karışımında hacimce en küçük yeri işgal eden bileşendir, ancak beton bileşenleri içinde en önemlisidir. Klinkere %4 - 5 oranında alçı taşı eklenip, çok ince toz halinde öğütülerek Portland Çimentosu elde edilir. Katkılı çimento üretiminde; klinker ve alçı taşı dışında, çimento tipine göre tek veya birkaçı bir arada olmak üzere tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb. katılır [17; 6].

En çok kullanılan çimento tipleri;

1. Portland Çimento (PÇ)

Portland çimentoları; klinkerle, az miktarda (yaklaşık %4 - 5) alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen katkısız çimentolardır. Bu çimentolar 28 günlük basınç dayanımlarına göre başlıca 3 tiptir. Bunlar; PÇ 32.5, PÇ 42.5 ve PÇ 52.5'tur. PÇ 52.5 çimento, çok yüksek dayanımlı ve ilk dayanımı yüksek beton yapımında kullanılır. Prefabrik, ön gerilmeli betonlar, sanat yapıları, tünel – kalıp uygulamaları için uygundur [1].

2. Portland Kalkerli Çimento (PLÇ)

Portland kalkerli çimento; klinker ile kalkerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İhtiva ettikleri kalker miktarına göre 2 sınıfa ayrılırlar. Kütlece %6 – 20 arasında kalker ihtiva edenler A sınıfı, kütlece %21 – 35 arasında kalker ihtiva edenler B sınıfıdır. Portland Kalkerli Çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre PLÇ 32.5, PLÇ 32.5R, PLÇ 42.5, PLÇ 42.5R, PLÇ 52.5, PLÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir [1].

3. Portland Silika F me  imento (PSF )

Portland silika f me  imento; klinkerle, kütlece %6 - 10 oranında silika f me ve az miktarda alçı taşının birlikte    t lmesi ile elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı vardır. 28 günlük basınç dayanımına göre PSF  32.5 olmak üzere tek tiptir [1].

4. Cüruflu  imento (C )

Cüruflu  imento; klinkerle, kütlece %20 – 80 arasında cürufun ve az miktarda alçı taşının birlikte    t lmesi ile elde edilen çimentodur. Katkılı  imento 28 günlük basınç dayanımlarına göre C  32.5 ve C  42.5 olmak üzere iki tiptir. Sülfatlı, deniz, klorlu, karbonatlı, termal sular ile yapılan deneyler sonucunda cüruflu çimentoların zararlı kimyasal etkiler altında performansının yüksek olduğu belirlenmiştir (Tokyay ve Erdo du, 2001).

5. Trasl   imento (T )

Trasl   imento, klinker ile %20 – 40 arasında trasın ve az miktarda alçı taşının birlikte    t lmesi ile elde edilen çimentodur. Trasl   imento 28 günlük dayanıma göre T  32.5 olmak üzere tek tiptir (Erdo du vd., 2002).

6. Uçucu K ll   imento (UK )

Uçucu k ll   imento; klinkerle, kütlece %10 – 30 arasında uçucu külün ve az miktarda alçı taşının birlikte    t lmesi ile elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. Uçucu k ll   imento 28 günlük basınç dayanımına göre UK  32.5 olmak üzere tek tiptir [1].

7. Sülfata Dayanıklı  imento (SD )

Sülfatlara dayanıklı  imento, C_3A (trikalsiyum alüminat) miktarı en fazla %5 olan klinker ile az miktarda alçı taşının birlikte    t lmesi ile elde edilen çimentodur. Bu  imento, sülfatlı suların ve sülfatlı zeminlerin olduğu ortamlarda, sülfat ataklarına karşı, C_3A 'nın %5'in altında olması nedeniyle dayanmakta ve bu çimentodan üretilen betonlar sülfat atakları nedeniyle hasar görmemektedir. Sülfatlı çimentolardan üretilen betonlar, etrenjit oluşmaması nedeniyle uzun ömürlüdür. Yine C_3A 'nın düşük olması nedeniyle hidrasyon ısıları portland çimentolarına göre düşük ve priz süreleri daha uzundur. Deniz suyu etkisinin olduğu yerlerde, sülfatlı suların ve zeminlerin etkisinde olan yerlerde, yeraltı sularında, istinat duvarlarında, kanalizasyon betonlarında, endüstriyel atıkların etkisinde olan yerlerde SD  kullanımı son derece uygundur. Sülfata dayanıklı çimentonun tek bir sınıfı mevcuttur. Sülfatlara dayanıklı  imento 28 günlük basınç dayanımına göre SD  32.5 olmak üzere tek tiptir [19].

8. Puzolanik Çimento (PZÇ)

Puzolanik çimento; klinkerle, puzolanik maddelerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İhtiva ettikleri toplam katkı maddesinin miktarına göre 2 sınıfa ayrılır. Kütlece %11 – 35 arasında puzolanik madde ihtiva edenler A sınıfı, kütlece %36 – 55 arasında puzolanik madde ihtiva edenler B sınıfıdır. Puzolanik çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre PZÇ 32.5, PZÇ 32.5R, PZÇ 42.5, PZÇ 42.5R, PZÇ 52.5, PZÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir [1].

9. Portland Kompoze Çimento (PKÇ)

Portland kompoze çimento; klinkerle, puzolanik maddelerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İçerdiği ince dolgu malzemesi, beton içindeki mikro gözenekleri doldurarak sıkılaştırır. Geçirimsizliği artırır. İhtiva ettikleri toplam katkı maddesinin miktarına göre iki sınıfa ayrılırlar. Kütlece %6 - 20 arasında kalker ihtiva edenler A sınıfı, kütlece %21 – 35 arasında kalker içerenler B sınıfıdır. Portland kompoze çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre PKÇ 32.5, PKÇ 32.5R, PKÇ 42.5, PKÇ 42.5R, PKÇ 52.5, PKÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir. Betonarme konut inşaatlarında, istinat betonu, kanal ve bordür imalatlarında, sıva ve harç uygulamalarında, çok amaçlı ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok yüksek dayanımın istenmediği her türlü hazır beton imalatında PKÇ çimentosu kullanılmaktadır [2; 12].

10. Kalsiyum Alüminatlı Çimento

Kalsiyum alüminatlı çimentonun alümina içeriği %40'tır. Diğer çimento tipleri ile karşılaştırıldığında, erken yüksek dayanım kazanmasının ötesinde, kimyasal aşındırıcılara, diğer aşınmalara, yüksek ısıya ve çarpmaya karşı da son derece dayanıklıdır. Havaalanı pistleri, köprüler, baraj savakları, otoyollar ve döşeme yollar, madencilik, boru ve atık su mühendislik uygulamaları, kimyasal aşınmalara mukavemetli olması nedeni ile kanalizasyon sistemlerinin iç kaplamalarında, endüstriyel kazanlar, merdivenler, kısa sürede hizmete girmesi gereken yapılarda, zemin kaplama, sıva ve çeşitli onarım işlerinde, sülfatlı sulara ve deniz suyuna maruz kalan beton elemanlarında kullanılır. Portland çimentosu ile karıştırılarak su sızıntılarının engellenmesinde ve tamir işlerinde kullanılır [2].

11. Beyaz Portland Çimento (BPÇ)

Dekoratif amaçlı çimentodur. Renk verici oksitler içermeyen ya da çok az oranda içeren hammaddeler kullanılarak üretilen katkısız çimentodur. Beyaz Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre BPÇ 32.5 ve BPÇ 42.5 olmak üzere iki sınıftır. Hidrolik olarak çok aktiftir. Alkali - agrega reaksiyonlarına karşı dirençlidir. Her türlü mimari, estetik ve sanatsal ürünlerle yapı malzemelerinde sağlamlık ve görünüş güzelliği sağlar [1; 2].



4. ÇİMENTO ÜRETİMİ

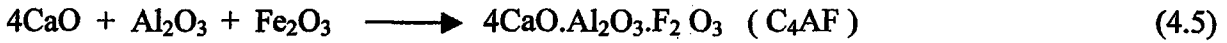
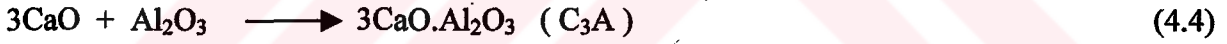
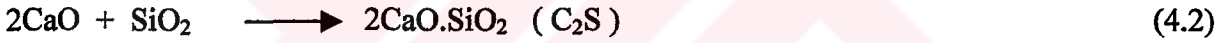
Çimento üretimi için gerekli olan hammaddelerden kalker, kil veya işletme şartlarına göre marn, ocaklardan alınarak belli oranlarda kırıcılara gönderilir. Bu hammaddeler ön homojene tesisine alınır. Ön homojene de stoklanmış olan ham karışım kazıyıcı yardımı ile farin değirmenine gönderilmek üzere hammadde silosuna doldurulur.

Diğer taraftan, kırılan kalker ve demir cevheri de silolara alınır. Kimyasal kompozisyonu ve hangi hammaddelerden hangi oranlarda besleneceği bilgisayar ile denetlenerek silo altlarından tartılarak alınan bu hammaddeler farin değirmenine beslenir.

Değirmene beslenen malzemeler parçalanarak işletme şartlarınca istenilen inceliğe kadar öğütülür. Üretilen farin silolara gönderilir ve homojenizasyon için kompresör ile silo alt bölümlerinden hava beslenir. Farin ön ısıtmaya tabi tutulur. Ardından döner fırına gönderilir. Fırın içinde 800 °C-1000 °C arasında kalsinasyon meydana gelir .



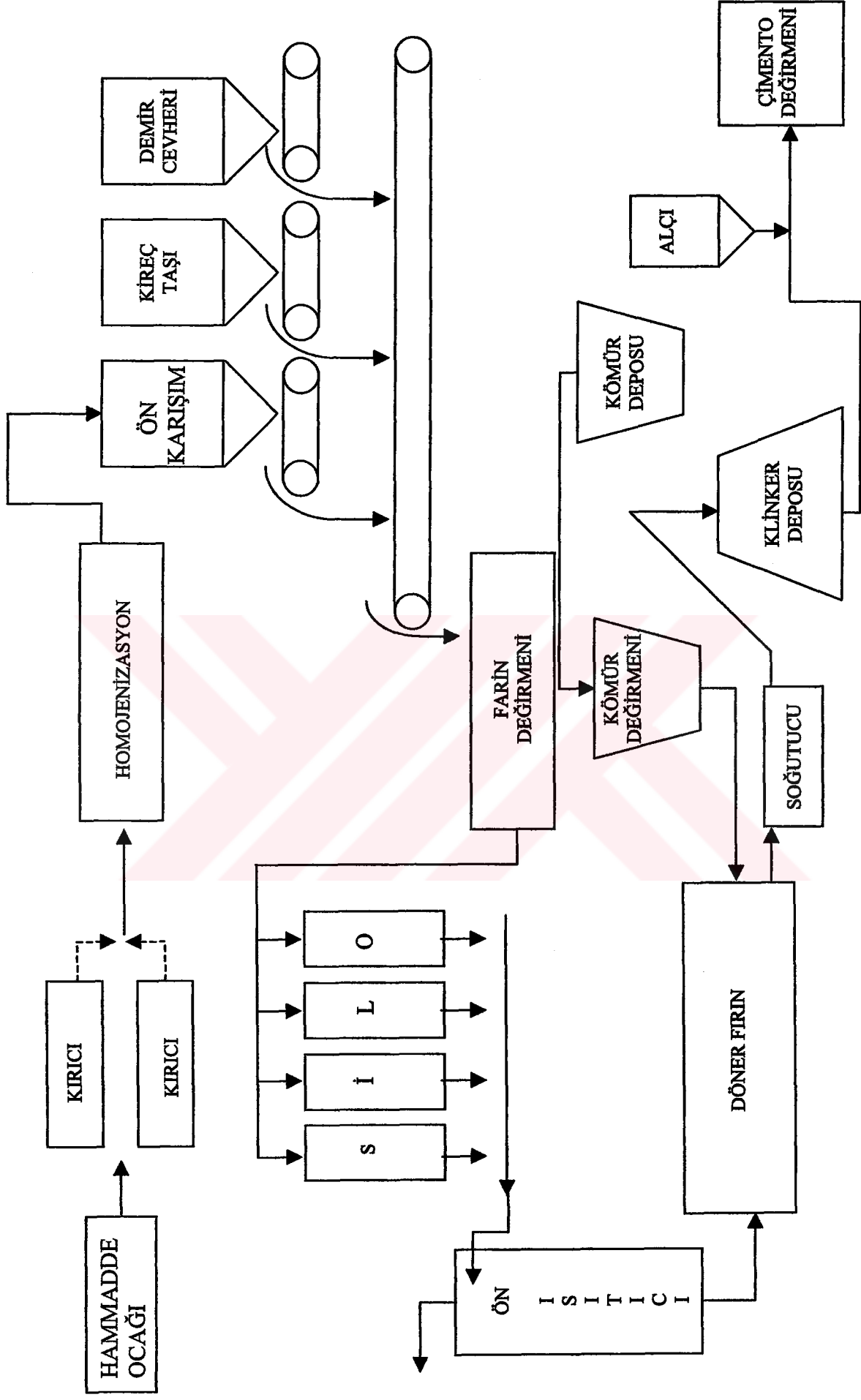
1000 - 1450 °C arasında ise sinterleşme oluşur.



oluşur. Klinkere yaklaşık %3 - 5 oranında alçı katılarak öğütülme işlemi sonucu çimento elde edilir.



Tras, uçucu kül, cüruf gibi diğer katkı maddeleri ile karıştırılarak istenilen inceliğe kadar öğütülmesi sonucu katkılı çimento elde edilir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Çimento fabrikası çalışma sistemi

5. ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDELER

Çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeler kireçtaşı, kil ve mardır. Bu kayalar, herhangi bir jeolojik yaşta olabilirler. Yaşlı kireçtaşları fosil içerikli olabilirler. Bazıları da hem fosilli, hem de kil-kalker karışımı şeklinde olabilir. Bunlar da kireçtaşı-kil oranına göre kireçli marn, killi marn ya da marn adını alırlar. Bu kireçtaşları içerdikleri CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarlarıyla doğal çimento olarak yorumlanabilmektedir.

Çimento üretimi için kullanılan kil mineralleri genellikle yumuşak ve gevşek yapılı materyallerdir. Bu materyaller tane boylarına göre sınıflandırılmaktadır (kil, kum gibi).

Klinker üretimi için gerekli katkı maddeleri ise ham karışımın kimyasal bileşimini düzeltici yönde etkiye sahip, Fe , SiO_2 ya da Al_2O_3 içerikli materyallerdir. Bunlara örnek olarak fırınlanmış pirit, düşük yüzdeli demir cevheri, kuvarslı kum ya da boksitler verilebilir.

Çimento üretiminde kullanılacak olan hammaddelerin uygunluk dereceleri onların kimyasal bileşimleriyle orantılıdır. Kireçtaşı bileşeni için kireç standardı bir kriter olarak kullanılmaktadır. Bu değer SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 gibi bileşenler hakkında bilgi vermekle birlikte CaO içeriği konusunda da aydınlatıcıdır. Kil minerali olarak kullanılacak kayalarda silikat ve alümina oranı dikkate alınarak değerlendirilmektedir [11].

5.1 Ana Hammaddeler

5.1.1 Kireçtaşı

Kimyasal bileşiminde en az %90 CaCO_3 (kalsiyum karbonat) içeren kayalara kalker ya da kireçtaşı adı verilmektedir. Ayrıca mineralojik bileşiminde en az % 90 kalsit minerali bulunan kayalara da kalker adı verilmektedir.

Kalker saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluşur. Kalsit ve aragonit kalsiyum karbonatın iki ayrı kristal şekli olup, teorik olarak %56 CaO ve %44 CO_2 içerir. Ancak doğada hiçbir zaman saf olarak bulunmaz. İkincil derecede değişik madde ve bileşiklerin içinde yer alması nedeniyle orijinal halde sarı, kahverengi ve siyah renklerde görülebilmektedir. Kalkerin sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı $2,5 \text{ N } 2,7 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır.

Yeraltı sularında travertenler şeklinde, deniz ya da tatlı sularda ise kimyasal organik veya mekanik çökelme sonucu kalker yatakları oluşur. Oluşum süreçlerinden de anlaşılacağı üzere kalker üç ana grup altında toplanabilmektedir.

Kalsit (hegzagonal CaCO_3) ve aragonit (ortorombik CaCO_3) kristallerinin her ikisi de modern kireçtaşı oluşumlarında yer alabilmektedir. Fakat aragonit kristallerinin kalsit kristaline daha kolay dönüşebilmesi nedeniyle eski kireçtaşı oluşumlarında aragonit kristali bulmak çok güçtür.

5.1.2 Kil

Kil teriminin geniş bir anlamı vardır. Hem bir kayaç terimi olarak, hem de tane boyu terimi olarak kullanılmaktadır. Kayaç olarak bozunma ürünleri ya da hidrotermal olaylarla oluşmuş çökeller için kullanılan bir terimdir. Killerin kimyasal analizleri; silisyum, alüminyum ve sudan oluştuklarını göstermektedir. Demir, alkaliler ve alkali topraklarda değişik miktarlarda yer almaktadır. Kil terimi; kayaç olarak doğal, topraklı, ince taneli ve su ile karışıtklarında plastik özellikleri gelişen materyalleri içine almaktadır.

Kayaç oluşturan kil mineralleri değişik oranlarda bir kayaç içerisinde bulunabilirler ve bunlar killi kayaçların temel bileşenleridirler. Genellikle kristalin formda ve küçük partiküller halinde oluşmaktadırlar. Yukarıda sözü edildiği gibi sulu alüminyum silikatlardır. Mineralojik bileşiminde % 90'a kadar kil minerali bulunduran kayaçlara kil denilmektedir.

Killerin özellikleri en azından 5 temel faktör tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar; kil minerallerinin ve kil minerali olmayan bileşenlerin bileşimi, organik materyaller, eriyebilir tuzlar ve değişebilen iyonlar ile yapı-dokudur. Bunlar içerisinde en önemlisi, kil minerallerinin bileşimidir. Bir kil mineralinin ekonomik olarak kullanımı kil minerali bileşimi ile ortaya çıkarılmaktadır.

Kil minerallerinin kesin bir sınıflandırılması yapılmamakla beraber aşağıda yapılan sınıflama, uygulamalarda geçerli olan bir sınıflamadır.

I- Amorf

Allofan grubu

II- Kristalin

A. İki tabakalı

A.1 Kaolinit grubu

A.2 Halloysit grubu

B. Üç Tabakalı

B.1.a Montmorillonit grubu

B.1.b Nontronit

B.2 İllit grubu

C. Düzenli karışık tabakalı

D. Zincir yapılı

Kil minerallerinin çoğu laboratuvar koşullarında sentez edilmiştir. Bu deneylerden, minerallerin oluşum ortamları ve çevresel koşullarla ilgili pek çok sonuç ortaya çıkarılmıştır. Düşük sıcaklıklarda asidik ortamlarda kaolinit, alkali ortamda montmorillonit oluşabilmektedir.

Çimento sektöründe hammadde olarak kullanılan killeri ise Neojen havzalarının üst düzeylerindeki karasal koşullarda oluşmuş çoğu killi ve kireçli topraklardır. Kaolin ayrı bir çalışma komisyonu tarafından incelenmekte olup, çimento sektöründe düşük demir oksit içeren türleri kullanılmaktadır.

5.1.3 Marn

Doğada, %50 - 70 oranında kalker ve %30 - 50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaca marn denilmektedir. Oluşum bakımından genellikle düzenli tabakalı olarak bulunur. Marn oluşumu için, daha çok tektonik ve orojenik hareketlerin durulduğu, sakin ortamlar daha uygundur. Çimento klinkeri ortalama %70 kalker ve %30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn doğal olarak bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğu için ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay üretilmekte, kırma-öğütme sırasında enerji tüketimi düşük olmaktadır [11].

5.2 Çimento Hammaddelerinin Sınıflandırılması

Çimento sanayiinde kullanılan ve Kuhl tarafından CaCO_3 oranına göre yapılan sınıflandırma aşağıda verilmektedir [11].

% CaCO_3 Oranı:	Hammadde Adı:
99 - 100	Mermer
90 - 98	Kalker
75 - 90	Kalkerli Marn
40 - 75	Marn
10 - 40	Killi Marn
2 - 10	Marnlı Kil
0 - 2	Kil

5.3 Çimentoda Kullanılan Katkı Maddeleri

5.3.1 Tras

“Tras” sözcüğü ya da diğer dillerdeki kullanımıyla “puzolan”, ilk defa milattan önce Vitruvius tarafından kullanılan bir sözcüktür ve o zamandan beri, inşaat tarihinde yazıtlara geçmiş bir malzemedir.

Traslı çimentonun bildiğimiz en eski kullanımı 2000 yıl önce Romalılar tarafından Ren Nehri boyunda yapılan su kanallarında görülmektedir. Burada çimento olarak kireç ve tras karışımının kullanıldığı görülmektedir.

Tras, volkanik kökenli bir malzemedir ve volkanlardan çıkan lavlar, tüfler yüksek sıcaklık etkisinde kaldıkları ve ani olarak soğudukları için içlerinde bulunan silis ve alüminyum aktif bir hale geçer, camlaşır, amorf bir yapı kazanırlar.

TS 25, “tras” standardına göre, tras, silisli ve alümino-silisli volkanik bir tuf olup, yalnız başına bulunduğu zaman hidrolik özellik göstermediği halde çok ince öğütüldüğünde sulu ortamda ve kalsiyum hidroksitle birlikte normal sıcaklıkta kimyasal reaksiyona girerek hidrolik özellik gösteren doğal puzolanik bir maddedir (Şekil 5.2).

Tras yalnız başına hidrolik bir bağlayıcı değildir. Ancak ince öğütüldüğünde sulu ortamda kireç ile reaksiyona girerek bağlama özelliğine sahip, suda çözülmeyen bileşikler oluşturan maddelerdir. Bu davranış, puzolanların karakteristik özelliğidir.

Tras, %40 – 90 arası silis, demir, alüminyum ve alkali oksitleri bünyesinde bulundurur. Aktif silis miktarı çok önemlidir. Miktarı arttıkça, kireç bağlama o kadar fazla olur. İkinci faktör, trasın ihtiva ettiği camsı fazdır. Camsı fazlarda kristal yapının azalacağı kesindir. Bu durum, kimyasal reaksiyona katılma kabiliyetinin yüksek olduğunu ifade eder. Üçüncü faktör olan spesifik yüzey büyük ise, taneciklerin boyutu o kadar küçük olur ve dolayısıyla kimyasal reaksiyon kabiliyeti o oranda artar.

Çimento üretiminde tras kullanımı ekonomi sağlamaktadır. Çünkü çimento üretiminde en önemli sorun ısı enerjisidir. Doğal puzolanlar karakter itibariyle çimentoya yakın bir oksit bileşimi gösterdikleri için bunlar pişirilmeden doğrudan klinkere katılabilmektedirler. Böylece büyük miktarda termik enerjiden kazanç sağlanmış olur. İkinci önemli nokta ise ülkemiz puzolan açısından çok zengindir ve bu kaynaklarımızın değerlendirilmesi gerekir.

Traslı çimentonun avantajları;

1. Hidratasyon ısını azaltır.

Beton döküldüğünde çıkan hidratasyon ısının yüksekliği nedeniyle su buharlaşmakta, dolayısıyla hidratasyon tamamlanamamakta veya betonda çatlaklar oluşmaktadır. Fakat çimentoya tras katıldığı zaman trikalsiyum alüminat ve trikalsiyum silikat miktarlarını azaltmakta, böylece hidratasyon ısı da düşmektedir.

2. Çatlamaya karşı betonun direncini artırır.

Çimentoda hidratasyon sırasında kalsiyum hidroksit oluşmaktadır. Bu kalsiyum hidroksit bağlanmadığı takdirde, havanın karbon dioksitiyle reaksiyona girerek, kalsiyum karbonat oluşturmaktadır. Oluşan kalsiyum karbonat, oluşum sırasında betonda hacim küçülmesine sebep olmakta, böylece betonda çatlakların meydana gelmesine sebep olmaktadır. Traslı çimento kullanımında ise trasta bulunan aktif silisyum dioksit, kalsiyum hidroksitle reaksiyona girmekte ve bunun sonucunda betonun dayanımını arttıran kalsiyum silika hidrat oluşmaktadır.

3. Su geçirmezliği artırır.

Traslı çimentodan beton hazırlandığında, çok sıkı bir yapı olan kalsiyum silika hidrat bileşiği oluşmaktadır. Bu yapı porları doldurarak içine bloke etmekte ve betonun geçirimsizliğini azaltmaktadır. Böylece beton su alt yapılarında rahatlıkla kullanılabilir.

4. Alkali-agrega reaksiyonu nedeni ile oluşan genleşmeyi önler.

Alkali-silika jeli çok yüksek su emme kapasitesine sahiptir. Traslı çimento kullanımı ile alkali oranı düşmekte ve böylece alkali silika reaksiyonu oluşum miktarı azaltılabilmektedir.

5. Sülfatlı sulara karşı betonun direncini artırır.

Çimentodaki alüminat bileşimi ile sülfatlı sulardan gelen sülfatlar reaksiyona girerek etrenjit oluşturmaktadır. Bu bileşimin oluşumu sırasında hacimce genleşme olduğundan betonda çatlamlar meydana gelmektedir. Çimento traslı olarak üretildiğinde tras, çimento bileşimleri için bir seyrelme etkisi gösterdiğinden trikalsiyum alüminat miktarı azaldığından sülfata dayanıklı çimento gibi, sülfata dayanıklılığı arttırmaktadır.

6. Deniz suyuna karşı betonun direncini artırır.

Traslı çimento kullanarak trasın aktif silisinin oluşturduğu kalsiyum silika hidrat geçirimsizliği azalttığından, poru bloke ettiğinden, klorun betona işlemesi önlenmiş olur.

7. Betonun klora karşı geçirgenliğini azaltarak betonarme demirini klor korozyonundan korur.

Betondaki demirin etrafında pasif bir gama demir oksit tabakası bulunmaktadır. Bu koruyucu bir tabakadır. Ancak yüksek bazik ortamda stabil olmaktadır. Fakat kalsiyum hidroksit havanın karbondioksiti ile reaksiyona girerek karbonatı oluşturursa, baziklik azalmaktadır. $\text{PH} = 3$ 'e düştüğünde bu betonların etrafındaki koruyucu tabaka parçalanmakta ve korozyon başlamaktadır (Akman vd., 1994; Erdoğan vd., 2002)

5.3.2 Sülfatlar

Jips ya da jips-anhidrit karışımını içeren değişik oranlardaki sülfat mineralleri son öğütme prosesinde portland çimentosu klinkerine katılabilmektedir. Sülfat üyelerinin eklenmesiyle çimentonun donma süresinin kontrolü daha kolay sağlanabilmektedir. Bu gibi materyaller çimentonun öğütülmesi sırasında %3 - 5 oranında katılabilmektedir. Jipsin kimyasal formülü $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, anhidritin ise CaSO_4 'tür [11].

5.3.3 Uçucu Kül

Termik santrallerde enerji üretiminde yakıt olarak kullanılan pulverize kömür, atık olarak değişik karakterde küllerin ve cürufun ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Termik santrallerde en önemli atık malzeme olan uçucu kül, yanma nedeniyle baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen çok ince kül parçacıkları olarak tanımlanır (Erdoğan, 1993).

TS 639'a göre uçucu kül, toz halinde veya öğütülmüş taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan ve baca gazları ile sürüklenen, silis ve alümino-silisli toz halinde bir yanma kalıntısı olarak tanımlanır (Özcan, 1997).

Uçucu kül terimi 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi endüstrisinin yayılmasıyla ortaya çıkmış ve uçucu külün portland çimentosu içinde kullanımı yine bu tarihlerde başlamıştır. 1937 yılında R.E. Davis Kaliforniya Üniversitesi'nde uçucu küllü betonla ilgili araştırma sonuçlarını yayınlamış ve bu çalışma ilk şartnamelerin, test metotlarının ve uçucu kül kullanımının temelini oluşturmuştur (Özcan, 1997).

Hoover Barajı için U.S. Bureau of Reclamation tarafından yapılan araştırmaları takiben ABD'de uçucu külün hidroelektrik yapılarında kullanımı yaygınlaşmıştır. ASTM bu konudaki ilk standartlarını 1954'te yayınlamıştır (Malhotra, 1996).

1970'li yıllarda yaşanan enerji maliyetindeki hızlı artış sonucunda, elektrik santrallerinde daha fazla kömür kullanılmaya başlanmıştır. Bunun sonucunda uçucu kül üretiminde bir artış meydana gelerek, uçucu kül kullanımı tüm dünya genelinde kabul görmeye başlamıştır (Özcan, 1997).

1989'da dünyada uçucu kül üretimi 400 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Eski Sovyetler Birliği 90 milyon ton ile en büyük üreticidir. Dünyada diğer uçucu kül kaynakları Amerika Birleşik Devleti 80 milyon ton, Çin 60 milyon ton, Hindistan 45 milyon ton, Polonya 25 milyon ton, Almanya 20 milyon ton, Türkiye 15 milyon ton ve İngiltere 15 milyon tondur (Malhotra, 1996).

2000 yılı verilerine göre dünyada uçucu kül miktarı yaklaşık 600 milyon tondur (Mirza vd., 2002).

Uçucu küllerin betonda kullanımına yönelik araştırmalar Türkiye'de 1960'lı yıllarda başlamıştır. Ülkemiz de uçucu kül üretimi yaklaşık 15 milyon ton olmakla birlikte kullanım son derece düşük düzeydedir (Çizelge 5.1). 1990'da tüketim üretimin %0,3'ü civarında gerçekleşmiştir (Tokyay, 1993).

Türkiye Atom Enerjisi Kurumunun (TAEK) yaptığı ölçümler sonucu bazı termik santrallerin uçucu küllerinde radyasyon düzeyi yüksek bulunmuş ve 1994 ortalarında TEAŞ (Türkiye Elektrik Anonim Şirketi) kül satışını durdurmuştur.

Bunun üzerine uçucu küllü ve külsüz betonlar üzerinde karşılaştırılmalı deneyler yaptırılmış ve 1994 sonlarında TAEK, sonuçlar arasında anlamlı fark bulunmadığı, diğer ülkelerin sonuçlarıyla aynı seviyelerde olduğu gerekçesiyle ve kullanılacak kül üzerinde periyodik deney yaptırarak onay almak koşulu ile kül kullanımına izin vermiştir (Gökçe vd., 1996).

Çizelge 5.1 Türkiye’de uçucu kül kullanımı (Tokyay, 1993)

Yıl	Kullanım Miktarı (ton)	Kullanım Amacı
1966	100	Veri bulunamamıştır
1967	220	Tuğla ve ateş tuğlası üretimi
1968	900	Baraj inşaatı
	11600	Çimento üretimi
	23	Tuğla üretimi
1969	4750	Baraj inşaatı
	11500	Çimento üretimi
1970	5890	Baraj inşaatı
	1200	Çimento üretimi
1971	31060	Baraj inşaatı
	350	Enjeksiyon
1972	13800	Baraj inşaatı
	6200	Çimento üretimi
1973	256	Baraj inşaatı
	3147	Çimento üretimi
	590	Ateş tuğlası üretimi
1974	49	Veri bulunamamıştır
	455	Çimento üretimi
	21	Veri bulunamamıştır
1977	100	Veri bulunamamıştır
1979	100	Ateş tuğlası
1980	5666	Çimento üretimi

5.3.3.1 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Minerolojik Yapısı

Uçucu kül, gözenekli veya dolu camsı küresel taneler ile yanmamış mineralleri içeren süngerimsi ve köşeli aglomera tanelerinden meydana gelmektedir (Koç, 1997).

Uçucu külde, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , SO_3 , MgO , Na_2O ve K_2O gibi oksitlerin hemen hemen tamamına rastlanmaktadır. Eser miktarda titanyum, fosfor, berilyum ve mangan gibi bileşenler de bulunabilmektedir. Ancak, bunların küldeki yüzdeleri değişmektedir. Türk standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir (Türker vd., 2003).

Uçucu küllerin reaktiviteleri doğrudan doğruya minerolojik kompozisyonları ile ilgilidir. Ama bir çok uçucu kül standardında yalnızca oksit analizi sonuçları kullanılarak bu malzemelerin kullanılabilirliğinin belirlenmesi alışkanlık haline gelmiştir (Özcan, 1997).

Uçucu külün fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonu bazı faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörler;

- Kömürün cinsi (taşkömürü, linyit),
- Öğütülme derecesi,
- Kazan tipi ve yakma verimi,
- Külün toplanma, taşıma ve stoklama yöntemleridir (Wasti, 1993).

Kimyasal yapılarına bağlı olarak uçucu küller 4 gruba ayrılır.

- Silikat-alümina esaslı uçucu kül: Bunlar taşkömürü uçucu külleridir. Yapılarının büyük kısmı kuvars (SiO_2) ve bir miktar alüminadan (Al_2O_3) oluşmaktadır.
- Silikat-kalsit esaslı uçucu kül: Yapısındaki ana oksitler, kuvars (SiO_2) ve kalsittir (CaCO_3).
- Sülfür-kalsit esaslı uçucu kül: Bu tip kül, genelde linyit kömüründen elde edilirler. Yapılarının büyük bölümü kükürt trioksit (SO_3) ve kalsitten (CaCO_3) meydana gelmiştir.
- Sınıflandırılmayan uçucu kül: Termik santrallerdeki yakma sisteminin homojen olmamasından dolayı belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küldür. Bu sınıfa giren külün kimyasal yapısı sürekli değişebilmektedir (Koç, 1997).

ASTM C-618 standardına göre uçucu kül F tipi ve C tipi olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Sınıflandırmadaki en belirgin değişken uçucu külde bulunan kalsiyum

miktardır. F tipi küllerde bulunan kalsiyum miktarı %10' dan daha azdır ve bu tip uçucu kül bitümlü kömürlerden elde edilir. F sınıfı uçucu küllerde SiO_2 ve Al_2O_3 oranı oldukça yüksektir. C tipi uçucu küllerde kalsiyum miktarı %10-40 arasında değişmekte ve geri kalan yüzdeyi SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşenleri oluşturmaktadır. Bu tip küller ise linyitten elde edilmektedir (Döven, 1998).

Cizelge 5.2 Türk standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri (Tokyay, 1993).

Kimyasal Bileşik	Standart Sınırları (%)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70
MgO	5
SO_3	5
Nem	3
Kızdırma Kaybı	10

5.3.3.2 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

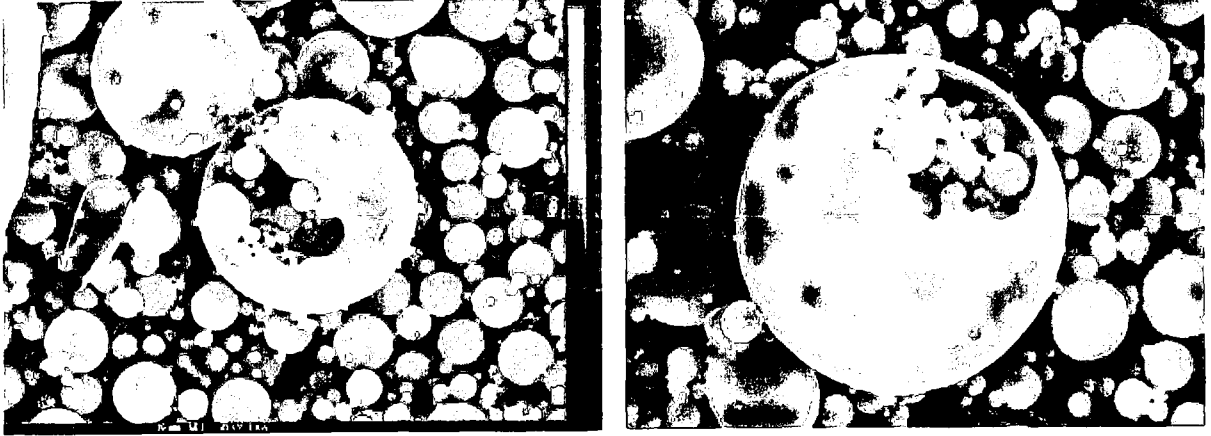
Uçucu kül taneciklerinin boyut dağılımı, bileşimi ve özgül ağırlığı taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini etkilemektedir. Uçucu küller genel olarak gri olup, içlerinde yanmamış karbon (kömür parçacıkları) miktarı fazla olduğu takdirde renkleri daha koyu olmaktadır (Özcan, 1997; Döven, 1998).

Uçucu küllerin tane boyutu, kullanılan kömürün cinsine ve pulverizasyon durumuna (öğütme derecesine) bağlı olarak değişmektedir. Taşkömürü uçucu küllerinin tane boyutu, linyit kömürü uçucu küllerinin tane boyutundan daha küçüktür. Tane boyutuna etki eden ikinci faktör ise, toz toplama sistemi tipidir. Elektro filtreler çok ince uçucu külleri tutabildiği için, burada tutulan küllerin tane boyutu, siklonlarda tutulana göre daha küçüktür (Koç, 1997; Türker vd., 2003).

Tipik olarak uçucu kül tanecikleri camsı, katı veya içi boş ve küresel şekilli olup çapları 1-150 μm arasında değişmektedir. Bu taneciklerin %75'inin çapı 45 μm 'dir (Erdoğan, 1993).

Uçucu küllerin yoğunluğu 2,2 - 2,7 g/cm^3 arasında değişmektedir (Erdoğan, 1993).

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi, içi küçük küreciklerle dolu olan taneciklere plerospheres, diğer içi boş küçük taneciklere de cenospheres denir. Fakat bu içi dolu olan taneciklerin, çatladığı için diğer küreciklerin içine dolduğu düşünülmektedir. Uçucu küllerin tane biçimi, hem çimento ile reaksiyonu nedeni ile, hem de betonda akıcılık açısından önemlidir [7].



Şekil 5.1 Dr. Nelia Dunbar' ın denetiminde New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources' da uçucu küllerin elektron mikroskobu ile yapılan analiz örnekleri [7]

5.3.3.3 Uçucu Küllerin Kullanımı

Uçucu küller, tuğla üretiminde, çimento-beton üretiminde, hafif agrega üretiminde, taşkın önlenmesinde, metal yüzeylerin püskürtme ile temizlenmesinde, petrol kuyuları sondajlarında, seramik sanayiinde ve karayolları yapımında kullanılmaktadır (Erdoğan, 1993; 16).

Uçucu küller hem çimentoya hem de betona katkı maddesi olarak katılırlar. Uçucu kül çok ince bir madde olduğundan kırıcıda ve hammadde değirmeninde elektrik enerjisinden tasarruf edilebilmektedir. Bu madde aynı zamanda kalsine olmuş ve kısmen pişmiş bir madde olduğundan fırında da enerji tasarrufu mümkün olmaktadır. Çimentodan daha ucuz olması nedeni ile de ekonomiktir (Tonak vd., 1989; 14).

Beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül kullanılır. Uçucu külün, betonun işlenebilmesini iyileştirme, geçirgenlik ve hidrasyon ısısını azaltma, sülfat dayanımını sağlama gibi faydaları bulunmaktadır. Ayrıca dayanım zamanla artmaktadır (Döven, 1998; 18).

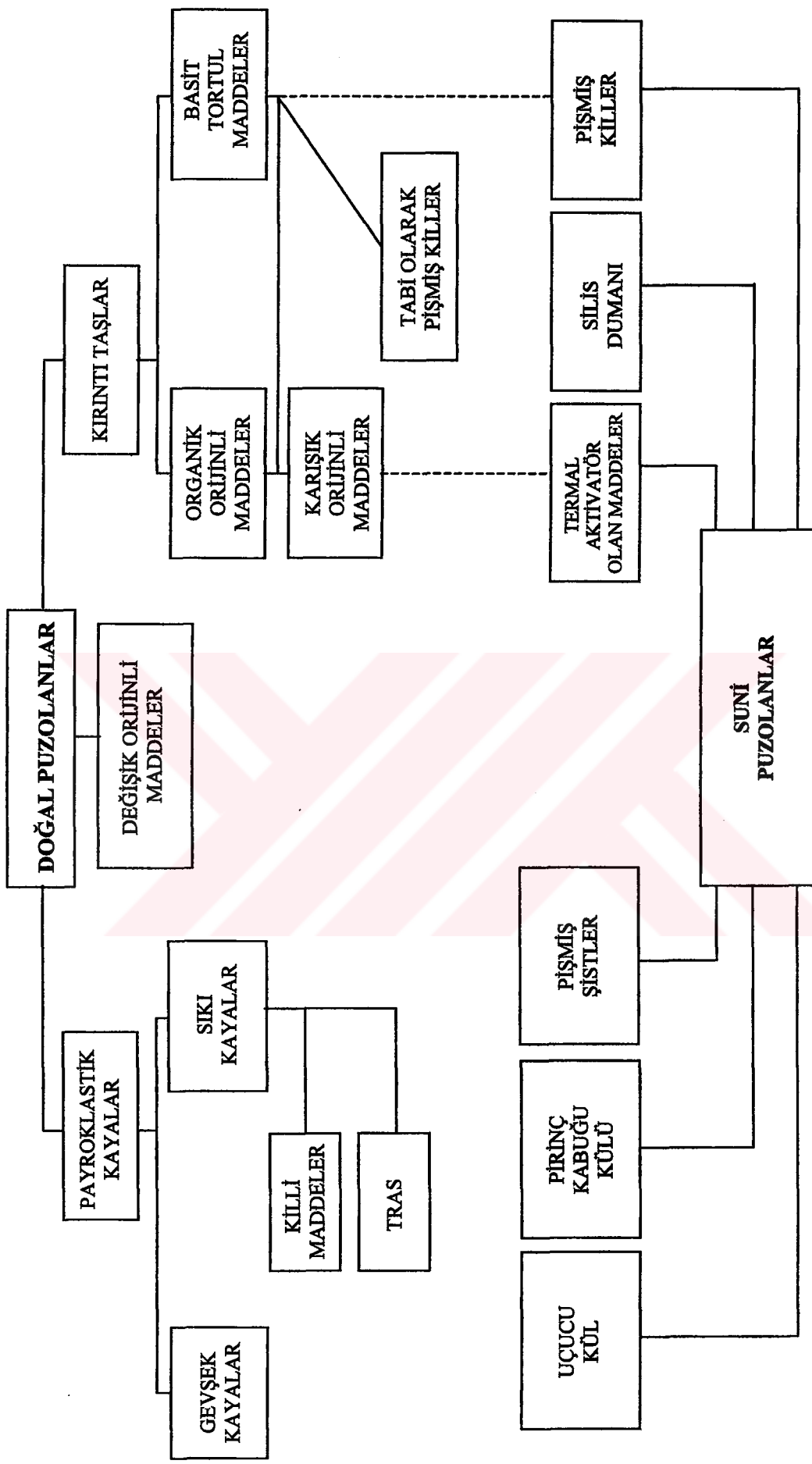
Türkiye'de inşaat sektöründe uçucu kül kullanımı, olması gerekenden çok daha düşük düzeydedir. Bunun sebepleri şöyle sıralanabilir:

- Sektörün nispeten tutucu karakterinden kaynaklanan yeni yöntem ve malzemelere karşı duyulan şüphe,
- Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve yapı malzemesi olarak kullanılabilirlikleri hakkında yeterli bilgi birikimi bulunmaması,

- Uçucu küllerin sabit özelliklere sahip olmamasıdır (Tokyay, 1993).

Ayrıca genel olarak, yeteri kadar propaganda yapılmaması ve uçucu kül üretim tesisleri ile bunları kullanan firmaların arasındaki koordinasyon eksikliği gibi nedenler de bulunmaktadır [16].



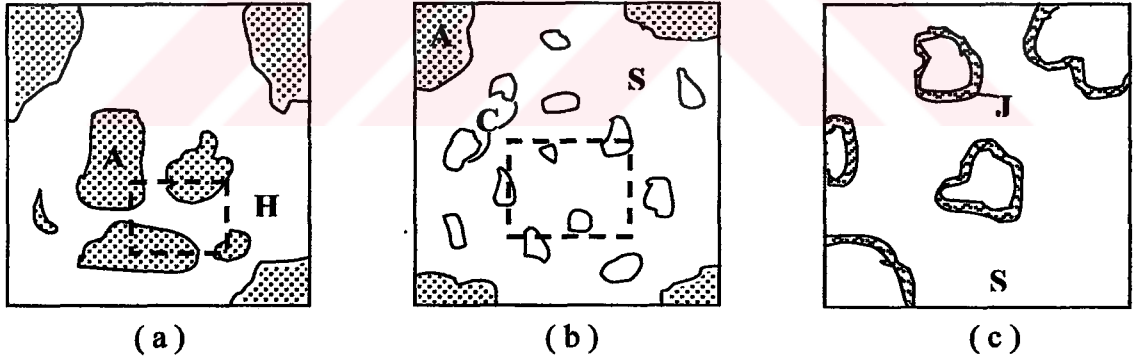


Şekil 5.2 Puzolanların sınıflandırılması (Massazza, 1989)

6. HİDRATASYON

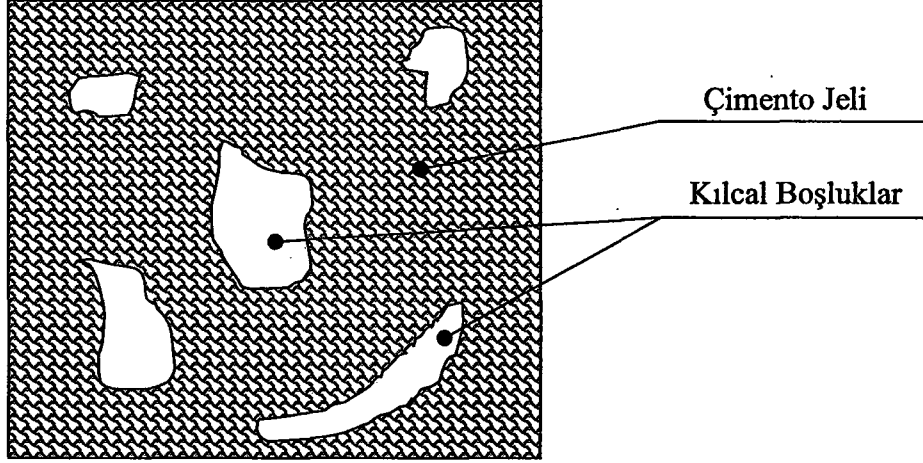
Çimentoyu oluşturan bileşenlerin su ile teması sonucu meydana gelen reaksiyonlara hidrasyon reaksiyonları denir. Hidrasyon reaksiyonu sonucunda oluşan ürünler zaman zaman çözünerek yapıdan uzaklaşırlar. Bu nedenle meydana gelen boşluklar, dayanımın düşmesine sebep olurlar.

Dayanım, su / çimento oranı artışı ile ters orantılıdır. Su / çimento oranının çimento hamurunun iç yapısına etkisi şu şekilde incelenebilir. Şekil 6.1a'da betonun basitleştirilmiş yapısı görülmektedir. A ile gösterilen agrega tanelerinin, H ile gösterilen çimento hamuru ile birleşiminden beton oluşmaktadır. Şekil 6.1b'de, Şekil 6.1a'nın içindeki kesikli çizgiyle işaretli kısım büyütülerek çizilmiş olup burada C ile işaretli hidrate olmamış çimento taneleri de görülmektedir. Burada gösterilen durum betonun içine suyun ilk karıştırıldığı an olarak düşünülebilir. Çimento tanelerinin yüzeylerinde hidrasyon olayı henüz başlamıştır. Hidrasyonun ilk anları ise Şekil 6.1c'de görülmektedir. Suyla çimentonun teması sonunda J ile gösterilen çimento jeli çimento tanelerinin yüzeylerinde meydana gelmiştir. Hidrasyonun başlamasıyla çimento tanelerinin yüzeylerindeki jel tabakaları gelişir (Oktar, 1984).



Şekil 6.1 Hidrasyonun başlangıcında betonun ve çimento hamurunun yapısı (Oktar, 1984)

Hidrasyonunu tamamlamış çimento hamurunun Powers tarafından verilen basitleştirilmiş modeli Şekil 6.2'de görülmektedir. Burada çimento tanelerinin tamamen jele dönüştüğü kabul edilmektedir (Oktar, 1984).



Şekil 6.2 Tam hidrate olmuş çimento hamurunun basitleştirilmiş modeli (Oktar, 1984)

Çimento dört ana bileşeni, gerek su ile reaksiyon hızları, gerekse çimentonun bağlayıcılık özelliğine katkıları yönlerinden birbirlerinden farklı karakter göstermektedirler (Yeğinobalı, 2003).

Bu bileşenlerin hidrasyon ürünleri şu şekilde incelenebilir:

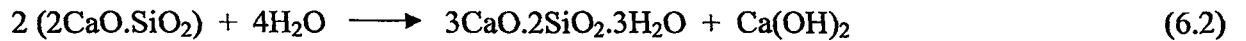
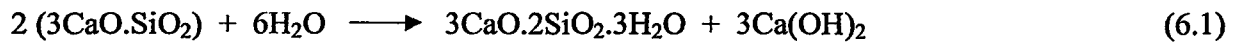
1. Kalsiyum Silikat (C_3S , C_2S)

Gerek C_3S , gerekse C_2S 'in hidrasyonu sonucunda $Ca(OH)_2$ ve kalsiyum silika hidrat jeli oluşmaktadır. Jelin çeşitli kompozisyonları vardır. Kalsiyum silika hidratlar CSH (I) ve CSH (II) şeklinde gösterilir. CSH (I) ; $CaO:SiO_2$ oranı 0,8 - 1,5 arası değişen, CSH (II) ise $CaO:SiO_2$ oranı 1,5 - 2 arası değişen hidratı simgeler.

Dikalsiyum silikatın dört ana (δ , β , α' , α) polimorfik yapısı bulunmakta ve genellikle β formu portland çimentoda görülmektedir. β formuna suyun etkisi çok yavaştır ve orijinal kristaller birkaç hafta sonunda mikroskop altında görülebilir.

C_2S 'in ilk ürünü yüzeyde oluşur ve $CaO:SiO_2$ oranı 2'dir. 12 saat içinde bu ilk ürün CSH (I)'e benzeyen ve $CaO:SiO_2$ oranı 1,1 - 1,2 arasında bir ürüne dönüşür. Daha sonra CSH (II)'ye benzeyen kararlı bir bileşik oluşur ve $CaO:SiO_2$ oranı artarak bir yıl veya daha sonrasında 1,65 - 1,80 son değerine ulaşır.

C_3S ve C_2S 'in hidrasyon reaksiyonları;



Her iki reaksiyon sonucunda da afwillit ($C_3S_2H_3$) oluşur. Aralarındaki fark C_3S 'in hidrasyon sonucunda daha fazla $Ca(OH)_2$ oluşumu ve reaksiyonun C_2S 'e göre daha hızlı bir şekilde

gerçekleşmesidir. Karışımın başlangıcında C_3S yüzeyini $CaO:SiO_2$ oranı yaklaşık 3 olan ürün kaplar ve reaksiyonu geciktirir. Birkaç saat sonrasında ürün çözünür ve reaksiyon hızlanır. Öncelikle CSH (I), sonrasında CSH (II) jeli oluşur. Tamamı ile hidratlanmış silikat, her iki ürünü de içeren heterojen bir materyaldir (Lea, 1970).

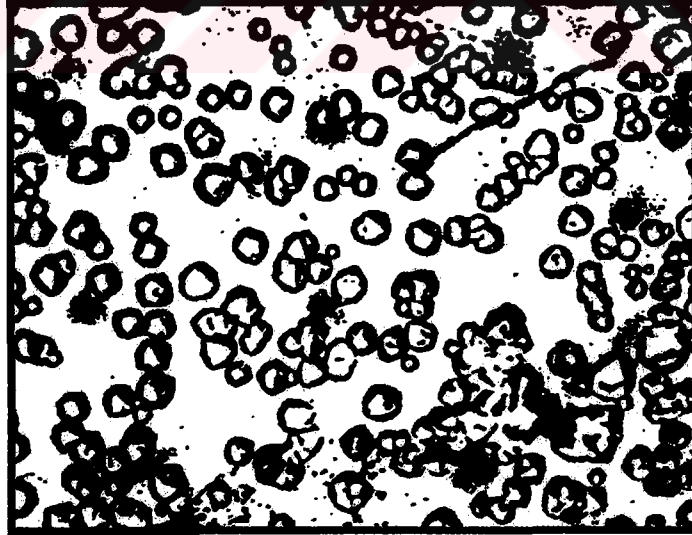
Kalsiyum silikatların davranışları çimento kimyasında oldukça ilgi çekicidir. Kalsiyum silika hidratlar (CSH) olağan portland çimentosunun temel bağlayıcı fazını oluşturarak önem taşırlar (Black vd., 2003).

Genellikle, C_3S içine atık katılımında, ilk hidratasyon reaksiyonlarında düşme gözlenirken puzolanik reaksiyonlar ise artar. Lin ve Wang tarafından yapılan, incelemelere göre C_3S yapısı içine atık katılması sonucu oluşan CSH ve $Ca(OH)_2$ miktarları, katkısız C_3S 'e göre daha az miktardadır (Lin vd., 2003).

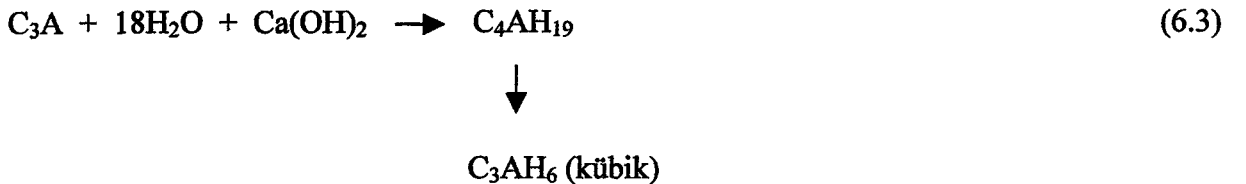
2. Trikalsiyum Alüminat (C_3A)

C_3A su ile oldukça hızlı bir reaksiyon verir. Reaksiyon sonucunda hekzagonal ve kübik olmak üzere iki çeşit kristal yapı oluşur. Hidratasyon sırasında birkaç dakika sonrasında hekzagonal kristal oluşumu artar (Lea, 1970).

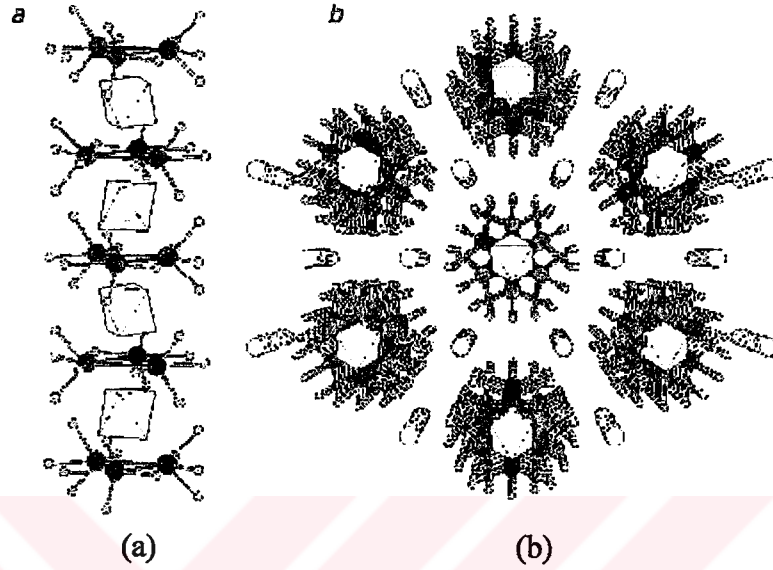
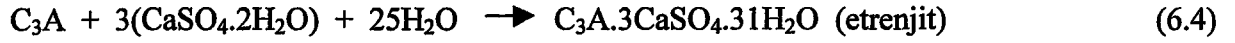
Oluşumu bir merkeze bağlı iğne kümeleri şeklinde gözlemek mümkündür. Yapı, daha sonra kararlı kübik yapıdaki ürüne dönüşür (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 C_3A 'ın kübik yapıdaki kristalleri, (Lea, 1970)

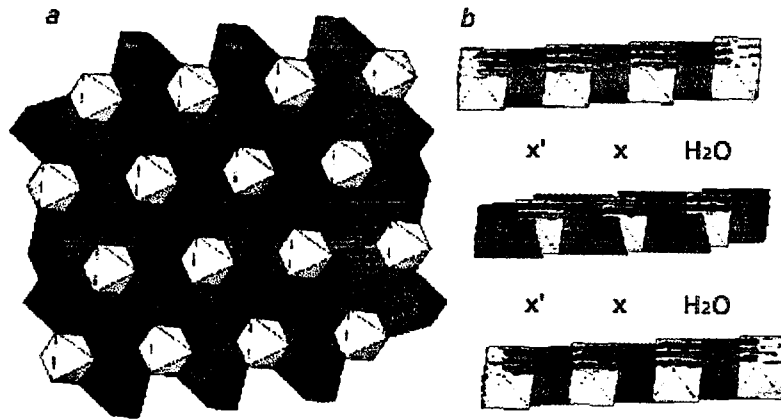
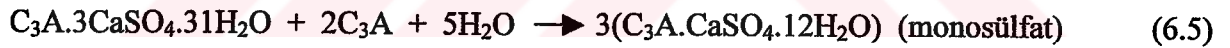


Jips, C_3A ile kalsiyum alüminat trisülfat ($C_3A.3CaSO_4.31H_2O$) veya kalsiyum alüminat monosülfat ($C_3A.CaSO_4.12H_2O$) oluşturmak üzere reaksiyona girer. (6.4) denkleminde oluşan etrenjitin kristal yapısı, Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Etrenjitin kristal yapısı; a) kolon Al³⁺ (kırmızı), Ca²⁺ (mavi), ve H₂O (gri), b) SO₄²⁻ ve su (sarı) [3]

6.5 denkleminde meydana gelen monosülfatın kristal yapısı, Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Monosülfatın kristal yapısı; a) Al³⁺ (kırmızı) ve Ca²⁺ (mavi), b) SO₄²⁻(x) ve su [3]

3. Tetra Kalsiyum Alümina Ferrit (C_4AF)

C_4AF su ile hemen reaksiyona girmektedir. Fakat C_3A 'ya göre daha yavaş ilerlemektedir. Su ile birleştiğinde hızlı bir şekilde hekzagonal kristaller oluşmaktadır.

C_4AF 'nın hidratasyonu kirecin varlığında veya doymuş kireç çözeltisinde daha yavaş bir şekilde reaksiyon meydana gelir. Bu durumda hekzagonal faz C_4A_{aq} ve C_4F_{aq} katı çözeltilerinden oluşur. $15^\circ C$ sıcaklık değerinin üstünde kübik C_3AH_6 - C_3FH_6 katı çözeltilisine dönüşmektedir (Lea, 1970).

7. BETON

7.1 Tanımı

Beton, çimento, su, agrega ve kimyasal veya mineral katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup, şekil verilebilen, zamanla katılaşp sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir [17].

7.2 Betonu Oluşturan Maddeler

Beton mutlak hacim olarak (Çizelge 7.1), yaklaşık olarak %75 oranında agrega, %10 oranında çimento ve %15 oranında sudan oluşmaktadır. Gerekğinde, çimento ağırlığının %2'sinden fazla olmamak kaydı ile katkı maddesi ilave edilebilir [6].

Çizelge 7.1 Betonu oluşturan maddeler [6]

Çimento (%)	Su (%)	Hava (%)	İnce agrega (%)	Kaba agrega(%)
7-15	14-18	0,5-8	24-28	30-50

7.2.1 Ana Hammaddeler

7.2.1.1 Agrega

Beton içerisinde kullanılan ve betonun yaklaşık olarak %60 - 80'ini oluşturan kırmataş, kum, çakıl gibi malzemelere agrega denir. Agregalar doğal (kum, çakıl, kırmataş) ve yapay (yüksek fırın cürufu) olmak üzere iki farklı kökene sahiptir. Ancak her mineral kökenli malzeme veya endüstriyel atık, beton agregası olarak kullanılamaz.

Agrega bir yerde betonun iskeletini oluşturduğundan özelliklerinin kullanılmasından önce deneylerle belirlenmesi gerekir. Agreganın kalitesini etkileyen birçok fiziksel ve kimyasal özellikler vardır ki, bu özellikler TS 706 standardında belirlenmiştir.

Hazır betonlar en büyük agrega tane büyüklüğüne göre:

- 1 No. agregalı (1. No.) tane boyutu 8-10 mm
 - 2 No. agregalı (2 No.) tane boyutu 16-20 mm
 - 3 No. agregalı (3 No.) tane boyutu 25-32 mm,
- olmak üzere üç türe ayrılır [6].

7.2.1.2 Karışım Suyu

Betonda kullanılan suyun iki işlevi vardır:

- a) Hidratasyon adı verilen kimyasal reaksiyonu başlatıp sürdürmek,
- b) İşlenebilirliği sağlamak.

Temiz, içilebilir, berrak ve kokusuz her su beton üretiminde kullanılabilir. Beton karma suyu asit niteliğinde olmamalıdır. Sülfat, değişik tuz vb... betona zarar verebilecek kimyasal maddeleri içermemelidir [6].

7.2.2 Katkı Maddeleri

Betonun özelliklerini geliştirmek üzere üretim sırasında veya dökümden önce transmiklere az miktarda ilave edilen maddelere katkı adı verilir. Katkı maddelerini kökenine göre kimyasal ve mineral katkıları olarak ikiye ayırmak mümkündür. Gereğinden fazla kullanıldığında aksi etkiler oluşturabileceği gibi yine gereğinden az kullanıldığı takdirde hiç bir faydası olmayabilir. Kurallarına uygun üretilen betonların da katkı maddeleri ile uyumu önceden yapılan deneylerle belirlenmelidir [17; 6].

7.2.2.1. Kimyasal Katkılar

a) Betonun işlenebilir özelliğini artırıcı katkı maddeleri (Akışkanlaştırıcılar)

Bu gruba giren katkıları çoğunlukla çimento ağırlığının %0,2 – 0,5 arası oranlarda kullanılır. Betonda aynı kıvamın veya işlenebilirliğin daha az su ile elde edilmesini sağlarlar. Taze betonda kullanılan su miktarı azaldıkça betonun dayanımı artar. Azalttığı su miktarı ile orantılı olarak normal ve süper olarak ayrılırlar.

b) Priz süresini değiştiren katkıları

Taze betonun priz adı verilen sertleşme sürecinin bazı koşullarda hızlandırılması veya geciktirilmesi istenir. Priz geciktiriciler, uzun mesafeye taşınan betonlar veya sıcak hava dökümleri için yararlıdır. Taze betonun katılaşmaya başlama süresini uzatırlar. Priz hızlandırıcılar, priz geciktiricilerin aksine, betonun katılaşma süresini kısaltırlar. Bazı uygulamalarda, erken kalıp almada ve soğuk hava dökümlerinde don olayı başlamadan betonun katılaşmasını sağlamak için kullanılırlar.

c) Antifrizler

Bu tip katkılar, beton içindeki suyun donma sıcaklığını düşürerek, suyun donmasını ve betonun çatlamasını engeller. Böylece çimentonun mukavemet kazanmasındaki aksamaya engel olurlar. Ancak soğuk hava şartlarında betona sadece antifriz katkı ilave edilmesi kesin çözüm olmayıp, döküm yerinde betonun korunması için özel önlemlerin alınması gereklidir.

d) Hava sürükleyici katkılar

Beton içinde çok küçük boyutlu ve eşit dağılan hava kabarcıkları oluşturarak betonun geçirimsizliğini ve don karşı direncini ve işlenebilirliğini artırır [6; 17].

7.2.2.2 Mineral Katkılar

Çimento gibi öğütülmüş, toz halde, silolarda depolanan cüruf , uçucu kül , silis dumanı... vb. çeşitli maddelere mineral katkı adı verilir. Mineral katkılar tek başına iken çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar fakat birlikte kullanıldıklarında çimentoya benzer görev yaparlar, dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar. Mineral katkılardan yüksek dayanımlı beton üretiminde de yararlanılır [17].

8. DAYANIM

Dayanım, malzemenin kırılmaya karşı gösterebileceği en yüksek gerilme olarak tanımlanır. Beton, basınç yükleri altında daha iyi davranış gösterdiğinden, betonun dayanımından söz edildiğinde, diğer dayanımlar belirtilmemişse, basınç dayanımı anlaşılır. Mühendisler, hesaplarında daha çok betonun 28 günlük basınç dayanımını esas alırlar. Dayanım, standart koşullar altında, standart boyutlardaki numunelerin, standart deney yöntemleri kullanılarak belirlenir [6].

Dayanıklılık, en genel anlamda, maddenin, çeşitli koşullar ve önceden belirlenmiş kullanma süresi şartları altında, elverişli özelliklerini ve performansını sürdürebilme kabiliyeti olarak nitelendirilebilir (Carrete, 1989).

Yakın geçmişte yapılan çalışmalarda tüm dikkatler kısa vadede inşaatlardaki güvenlik ihtiyaçları üzerinde toplanmıştır; uzun vadedeki problemlerle, dayanım konuları ihmal edilmiştir (Massazza, 1989).

Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Betonu servis ömrü boyunca etkileyen çevresel etkiler fiziksel ve kimyasal olabilir. Bu etkiler dalga, akıntı, sürüntü maddelerinin çarpması gibi aşındırıcı; asit, tuz etkisi, kristalleşme, alkali-agrega reaksiyonu gibi kimyasal ve donma-çözülme gibi fiziksel etkiler olabilir (Yıldırım vd., 2003).

Betona zarar veren aşındırıcı (agresif) ortamlar sulu çözeltilerdir. Bunların başlıcaları, sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum ve amonyum gibi katyonları, sülfat, klorür halindeki tuzları, asitleri ve bazı organik bileşenleri içeren yer altı suları, yüzey suları, deniz suları ve atık sularıdır (Biricik vd., 2003).

Ayrıca bazı mekanik etkilerle de beton hasara uğrayabilir. Aşınma etkisi bu mekanik etkilerden biridir. Aşınma, sürtünen yüzeylerin malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Aşınma miktarı malzemelerin türüne, sürtünen yüzeylerin biçimine ve sürtünme koşullarına bağlıdır.

Baraj, sulama kanalları gibi çeşitli hidrolik yapılar, nehir veya deniz içinde bulunan köprü ayakları veya liman yapıları ile endüstriyel zemin betonları, beton yollar, araç parkları veya betondan imal edilmiş yüzey kaplaması uygulamalarında beton, çeşitli aşınma etkilerine maruz kalmaktadır (Şengül vd., 2003)

Betonun hasar mekanizmasını mikroyapı belirler. Geçirimlilik özellikleri de doğrudan mikroyapıya bağlıdır. Betonun boşluksuz ve geçirimsiz olması dayanım bakımından yararlıdır. Betonun çevre etkilerine karşı kalıcılığını sürdürmek için en önemli önlem geçirimsizliği sağlamaktır.

Geçirimsizlikte en büyük etken dışa açık boşluklar ile çatlaklardır. Beton dayanımında olumsuz etki yapan bu boşluklar ve çatlaklar en zayıf halka olarak bilinen agrega-çimento hamuru temas yüzeyinde daha belirgindir [6].

Su / çimento oranı betonun kalitesi için önemli bir noktadır. Bu oran ne kadar düşük olursa, basma dayanımı yüksek, düşük geçirimlilik ve hava koşullarına karşı daha yüksek dayanım sağlanmış olur [14].

Günümüzde betonun ara yüzeylerinde ve çimento hamurundaki boşlukları doldurmak için, ultra incelikte silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik ve mikrofiller malzemelerin süperakışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılması beton teknolojisinde büyük ilerlemelere neden olmuştur. Bu iki önemli gelişme yani hem ultra incelikteki mineral katkıların hem de süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıların birlikte kullanılması betondaki su/çimento oranının düşmesini sağlamış ve boşlukların da doldurularak daha yoğun bir malzemenin oluşmasına neden olmuştur. Sonuçta betonun dayanımı artmıştır [6].

Hem doğal hem de yapay puzolanların betonun kimyasal dayanıklılığını arttırmada önemli işlevleri vardır.

Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda;



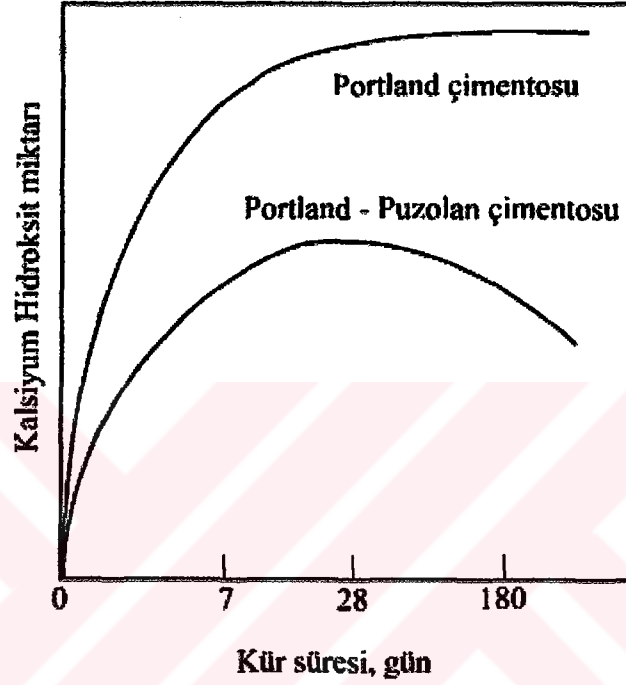
reaksiyonu meydana gelir. Bu reaksiyonda üretilen $Ca(OH)_2$ miktarı fazla ve oluşum hızı yüksektir (Lea, 1970).

Puzolan katkısı ile reaksiyon,

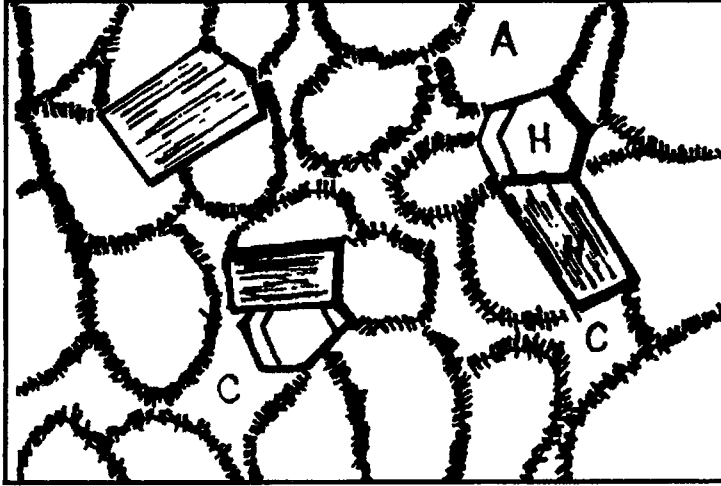


şeklinde gerçekleşir. Her iki reaksiyon karşılaştırıldığında (8.1) reaksiyonunda CH oluşumu, (8.2) reaksiyonunda ise CH'nin harcandığı görülmektedir.

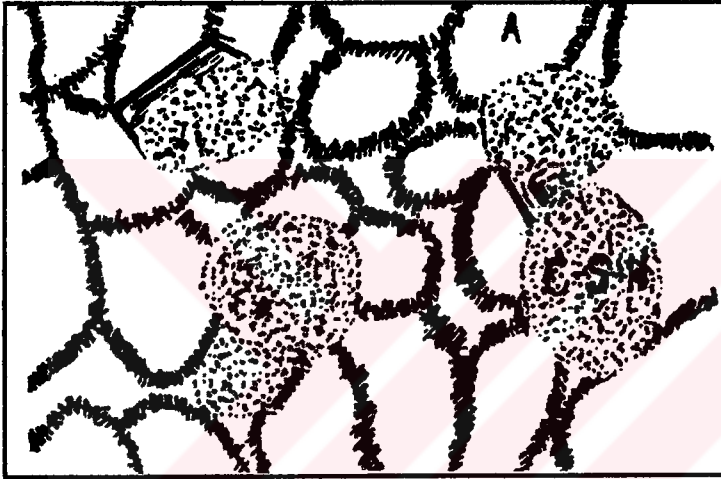
Belli bir süre sonunda puzolan içeren çimento hamurunda, portland çimentosu hamuruna oranla daha az serbest kireç ve daha çok kalsiyum silikat hidrat oluşumunu gözlenir (Şekil 8.1). Daha çok bağlayıcı ürün oluşması mukavemet artışına neden olurken, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileşmesi (Şekil 8.2), geçirimsizliği ve dolayısıyla zararlı dış etkenlere karşı dayanıklılığı arttırmaktadır (Özturan, 1991).



Şekil 8.1 Puzolan-Portland çimento karşılaşmalarının hidrasyonunda serbest kireç miktarının değişimi (Özturan, 1991)



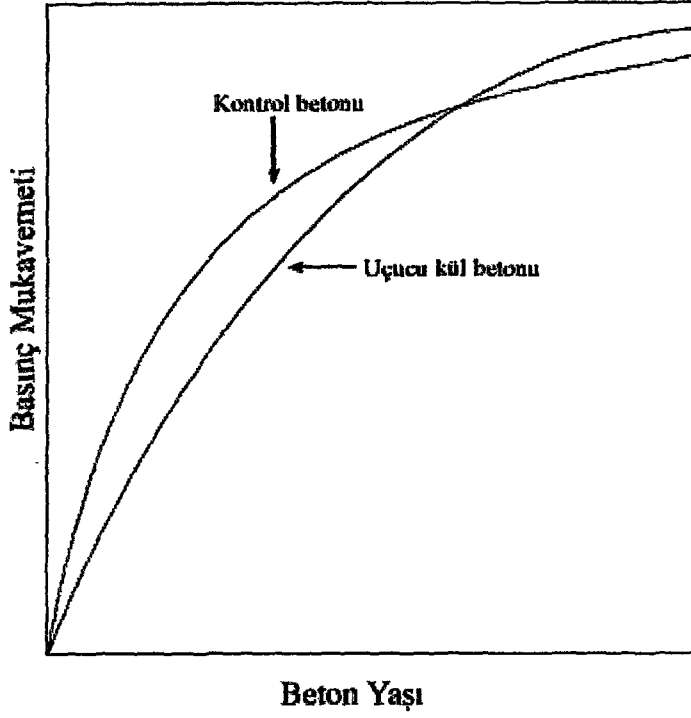
- A. İyi kristalize olmamış C-S-H partikülleri.
 H. Hekzagonal kristal CH.
 C. Su ile dolu kapiler ve büyük boşluklar.



$CH + S \longrightarrow C-S-H$
 (Düşük yoğunluklu) Pozolanik reaksiyon yoğun CH fazını ve büyük boşlukları düşük yoğunluklu C-S-H elemanlarına ve küçük boşluklara dönüştürür.

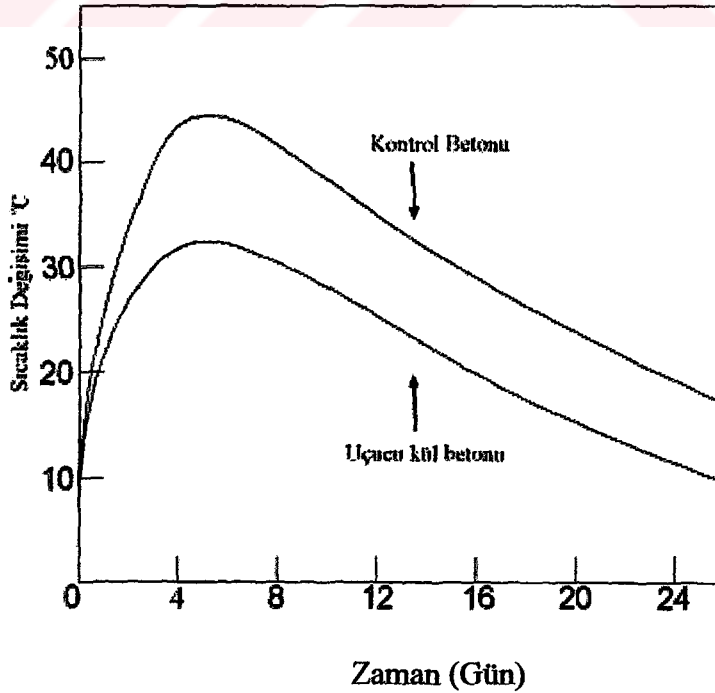
Şekil 8.2 İyi hidrate olmuş portland çimento ve puzolan-portland çimento karışımlarında çimento hamuru yapısının karşılaştırılması (Özturan, 1991)

Puzolanik reaksiyonun, portland çimentosu hidratasyonundan daha yavaş gelişmesi puzolanlı betonların mukavemet kazanma hızlarını da etkilemektedir. Genellikle bu tür betonlarda erken dayanım düşük olmakta, fakat 56 veya 90 gün sonraki basınç dayanım değerlerini Şekil 8.3'te görüldüğü gibi yakalamaktadır (Özturan, 1991).



Şekil 8.3 Portlant çimento betonları ve puzolanlı betonların mukavemetinin zamanla artışı (Özturan, 1991)

Çimentonun hidratasyonu sırasında ısı açığa çıkmaktadır. Fakat açığa çıkan bu ısı, betonda ek bir ısı yükselmesine neden olmamalıdır. Isınma ve ardından betondaki soğuma çatlaklara neden olmaktadır. Puzolan ihtiva eden çimentolar, hidrotasyon ısını ve özellikle sıcaklık yükselmesini Şekil 8.4'te görüldüğü gibi azaltırlar (Massazza, 1989).



Şekil 8.4 Uçucu kül ve beton test bölümlerinde sıcaklık yükselmesi eğrisi (Massazza, 1989)

Katkılı çimento üretiminde kullanılan uçucu kül, yapay puzolandır. Beton üretimde uçucu kül kullanımının, hem ekonomik açıdan hem de beton özellikleri açısından olumlu katkıları vardır. Betonda uçucu kül kullanımının sağladığı yararlar;

- i) çimento miktarını azaltarak beton maliyetinde düşüş,
 - ii) hidrasyon ısısında azalma,
 - iii) işlenebilirliğin iyileşmesi,
 - iv) yaklaşık 90 günden sonra beton dayanımında artış,
- olarak sıralanabilir [6].

Betonun kimyasal zararlı etkiler sonucu bozulma aşamaları Şekil 8.5'te verilmiştir. Şekil içindeki sembollerin açıklamaları şu şekildedir:

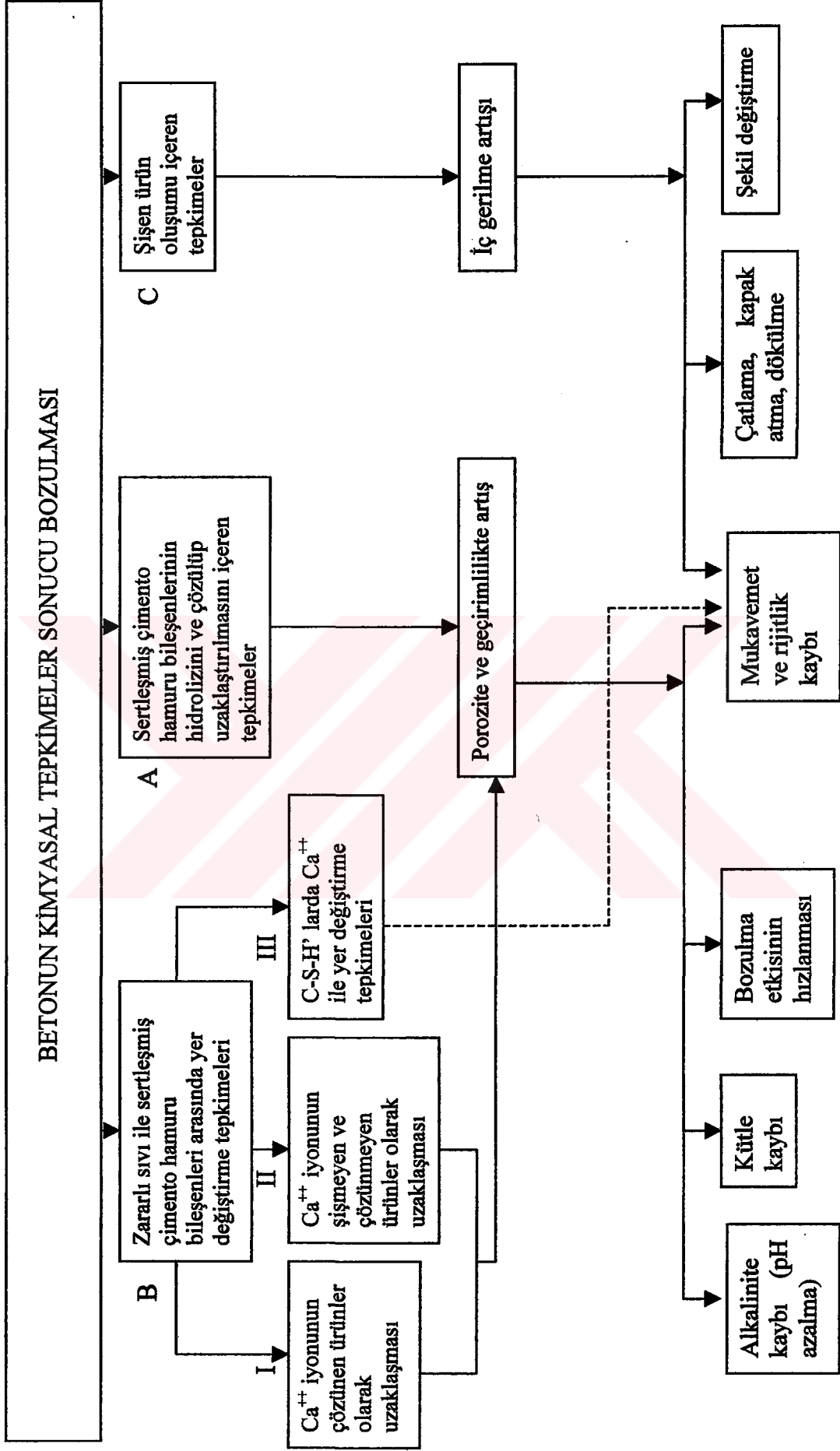
B_i: Asid ve tuz çözeltileri etkisi ile kalsiyum nitrat, kalsiyum klorür vb. oluşumu

B_{ii}: Okzalik asid ve tuzların etkisi sonucu kalsiyum okzalat oluşması

B_{iii}: Uzun süre deniz suyu etkisi sonucu C-S-H yapısındaki Ca^{++} iyonunun yerini Mg^{++} ' un alması

A: Yumuşak suların kalsiyum hidroksit ve C-S-H bileşenine etkisi

C: (i) sülfat etkisi sonucu etringit ve alçı oluşması, (ii) alkali-agrega reaksiyonları, (iii) beton içindeki çeliğin korozyonu (Güner, 1984).



Şekil 8.5 Betonun kimyasal zararlı etkiler sonucu bozulması (Güner, 1984)

8.1 Sülfat Etkisi

Sülfat etkisi, sülfatlı sular ile temas içinde olan betonda meydana gelen ve yapıya zarar veren bir etkidir. Betonda sülfat etkisi en önemli dayanım sorunlarından biridir. Sülfat ortamı yapının bulunduğu yere göre değişmektedir. Sülfatlar kurak topraklarda, deniz suyunda ve atık su tesislerinde bulunmaktadır [6; 15].

Sülfat konsantrasyonu yüksek olan bölgelerde sülfata dayanıklı çimento kullanılır. Bu çimentonun oluşumu için yani dayanımın sağlanması için kimyasal kompozisyondaki C_3A miktarının belli limit değeri vardır [8].

Portland çimentolu betona sülfat etkisi başlıca iki sülfat reaksiyonundan kaynaklanır. Birinci olay; sülfat iyonları ile C_3A 'nın reaksiyona girmesi ve hidrasyon ürünleri ile etrenjitin oluşumudur. Böylece hacim artışı ve dolayısıyla yapıda kırılmalar meydana gelir. İkinci olay; sülfat iyonlarının kalsiyum hidroksit ile reaksiyonu sonucu alçı oluşumudur. Genellikle alçının zarar verdiği kabul edilse de, bu durum tam olarak kanıtlanmamıştır.

Sülfat etkisi altındaki betonlar, genleşme reaksiyonlarının oluşumuna maruz kaldığından yıkıma uğrarlar. Yıllardır araştırmacılar meydana gelen bu mekanizma ve bununla mücadele metotları üzerinde çalışmaktadırlar. Fakat hala bu mekanizma çözülüş değildir. Kanıtlanmış bilinen yanı C_3A 'dan kaynaklanan zararlı etki veya beton içinde bulunan diğer alümina kaynaklarının kimyasal etkisidir.

Bazı araştırmacılara göre sadece etrenjit, sülfat etkisinde genleşmenin kaynağıdır. Genleşme sonucu çatlama, dağılma gibi birçok zararlı olay meydana gelmektedir. Bu nedenle portland ve sülfata dayanıklı çimentolarda C_3A bileşimi ASTM Tip II ve V çimentolara göre belli limit değerlerde tutularak satışa sunulur. Bu çimentolar şiddetli sülfat konsantrasyonuna maruz kalan betonlarda kullanılırlar. Ayrıca bazı laboratuvar çalışmalarında Tip V çimentosunun yani C_3A oranı %5'in altında olmasına rağmen sülfata karşı dayanım gösteremediği ve bazı hallerde C_3A oranı "0" olması durumunda da sülfat etkisine karşı çimentonun direnç gösteremediği dikkati çekmektedir. Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi sülfat etki mekanizması gerçekten karmaşıktır.

Sülfat etkisi altında portland çimentolu betonlardaki genleşme ve kırılmalar etrenjit oluşumuna özgü olmayabilir. Diğer bir etken olarak alçı oluşumunun dikkate alınması gerekir. Birbirini destekleyen deneysel çalışmaların yanında birçok desteklenemeyen önerilerde bulunmaktadır. Çalışmalarda portland çimentolu betonlarda alümina oranları belli bir değerde

belirtilmiştir. Genelde alçı oluşum etkisinin de kütle ve güç kaybına sebep olduğu kabul edilir. Dökümanlarda alçı oluşumunun genişmeye sebep olduğu netleşmemiştir. Alçı oluşumu sadece sülfat etkisine karşı bilinmesi gereken bir faktör değil, aynı zamanda portland çimentosu içerisindeki C_3S 'in kabul edilen limitasyonu için de gereklidir. Day ve Joshi çimento bileşimindeki C_3S 'in yükselmesi ile betonda sülfat etkisinin daha ciddi boyutta olabileceğini bildirmişlerdir (Tian ve Cohen, 2000).

Etrenjit oluşumu genişleme nedeniyle betonun yapısında gerilmelere sebep olur. Şayet bu gerilmeler betonun karşılayabileceğinden daha yüksek olur ise beton çatlar. Bu kırılma ve çatlamlar sülfatın nüfuz etmesini kolaylaştırır ve hızlandırırlar. Bu nedenle,

- Betonun geçirgenliği,
- Sülfat taşıyıcı suyun konsantrasyonu,
- C_3A ve $Ca(OH)_2$ içeriği,

sülfat etkisinde dikkate alınması gereken faktörlerdir [15].

Son zamanlarda sülfatın, etrenjit ve alçı oluşumu dışındaki reaksiyonlar ile etkisi üzerine incelemeler yapılmaktadır. Öncelikle mikroyapı ve kimyasal çalışmalara başlanmıştır. Klasik sülfat etkisinin sadece etrenjit ve alçıya bağlı olduğu görülmektedir. Bu klasik etkinin yanında Hime ve Mather betona zarar verebilecek diğer etkileri araştırmaktadırlar.

Verbeck yaptığı çalışmalarda sülfat etkisinde, su/çimento oranı ve hidrasyon derecesi ile geçimlilik ve diğer transfer özelliklerinin kontrol edilebileceği sonucuna varmıştır. Transfer özelliğindeki en önemli kural, sadece sülfatlı sulara maruz kalan betonun zarar görmesinin kontrolü değil de diğer kimyasalların da zarar verici etkisinin dikkate alınmasıdır (Skalny vd., 2000).

Sülfat etkisi su / çimento oranı düşürülerek önlenabilir. Çünkü bu şekilde düşük porozite ve geçirimlilik sağlanabilir [13].

Sülfat etkisi, kimyasal ve fiziksel olarak betonun yapısını etkiler. Bu etkenler ile betonun dayanımı düşer, kimyasal ve mikroyapısı değişir, mekanik özellikleri etkilenir. Şiddetli sülfat etkisine maruz kalan yerlerde sülfata dayanıklı çimento kullanılmalıdır ve bazı koşullara dikkat edilmelidir:

1. Karışım dizaynında;

- Çimento kompozisyonu,
- Karışımındaki oran (S/Ç),
- Mineral katkıları,

2. İşletmede;

- Kür şartları

3. Çevresel etkenler;

- Çevre kimyası (yer altı suları...)
- Atmosferik şartlar (nem, sıcaklık) [9].

Ouyang'ın, sülfat etkisi üzerine önerdiği model, kırılmanın ilerleyişi görüşüne dayanmaktadır. Hasarın ilk aşamasını harcın jel ve boşluk oranına bağlamaktadır. Sülfat etkisinde genişlemenin oluşumu ile boşluk oranı daha da artar (Santhanam vd., 2003).

Betonda sülfat etkisi, yüzeyde beyazımsı izlerle görülür. Hasar daha çok köşelerde, sivri noktalarda ve birleşim yerlerinde başlar. Daha sonra ilerleyen çatlaklar ve dökülmeler görülür. Ardından beton, kırılğan ve yumuşak hale gelip dağılır (Şengül ve Filibeli, 1996).

Çimento içine çeşitli puzolanlar, uçucu kül ve cüruf katılarak yüksek yoğunluk elde edilebilir. Örneğin, PCA'da yapılan bir çalışmada %20 oranında uçucu kül katkılı çimentonun sülfata karşı direnç gösterdiği saptanmıştır. Fakat tüm puzolanların aynı etkiyi vermediği de bilinmektedir [4].

Kurtis ve Monteiro, denemelerinde %25 ile %45 uçucu kül içeren çimentolarda, puzolan içermeyen çimentolara nazaran daha az genişleme görüldüğünü saptamışlardır (Monteiro ve Kurtis, 2003).

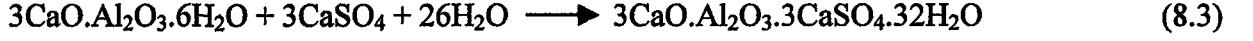
Portland çimentolarda ise C_3A miktarı %5'den yüksek olduğundan sülfatlara karşı dayanıksız olmaktadır. Fakat cüruf, uçucu kül ve tras gibi puzolan katkılı çimentoların, C_3A miktarını seyrelterek sülfatlara karşı direncini arttırdıkları çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmektedir. Bazı araştırmacılar klinkerden gelen C_3A miktarının yeterince seyreltilmesi için tras gibi puzolanik maddelerin oldukça yüksek oranda katılması gerektiğini belirtmektedir.

Tonak, Öz tarafından yapılan çalışma sonucunda tras katılarak üretilen çimentonun sülfata dayanıklılığında, C_3A miktarının seyreltilmiş olmasından ziyade, trasın özelliklerinin çok daha etkin olduğu tespit etmişlerdir (Tonak vd., 1994).

Sülfatlar, betona çok zarar veren amonyum, magnezyum, sodyum ve kalsiyum sülfat halindedirler:

1. Kalsiyum sülfat (CaSO₄):

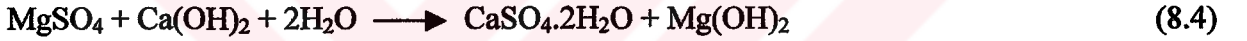
CaSO₄ ve sertleşmiş çimentonun hidratlı kalsiyum alüminatı arasındaki devamlı gelişen reaksiyona göre sudaki sülfat içeriği betonu kötü yönden etkiler.



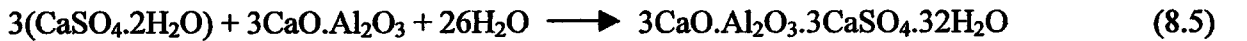
Bu reaksiyon sonucu oluşan etrenjit, çubuk veya iğne formunda kristalleşir. Pasta içindeki Ca(OH)₂ miktarı çimentonun tipine bağlıdır, portland çimentosunda en yüksek değerde, puzolanlı çimentolarda ise en düşük değerdedir. Sülfat etkisine karşı çimento içindeki ana sorumlunun trikalsiyum alüminat olduğu düşünülmektedir (Massazza, 1989).

2. Magnezyum sülfat (MgSO₄):

Magnezyum sülfat, taze harçlarda ilk olarak çözeltideki Ca(OH)₂ ile reaksiyona girer.



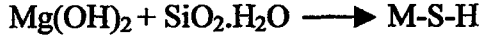
Bu reaksiyonda oluşan Mg(OH)₂ brunit olarak adlandırılır. Brunitin çözünürlüğü çok düşüktür. Brunit oluşumu yüksek oranda kalsiyum hidroksitin tüketimini sağlar. Ayrıca taze harçlarda yukarıdaki reaksiyonda oluşan alçıtaşı, hidrate olmamış kalsiyum alüminat ile reaksiyona girer ve (8.5) denklemindeki reaksiyon sonucunda etrenjit oluşur. Oluşan bu etrenjit zararsızdır. Çünkü taze harçta oluştuğundan dolayı sadece taze harcın hacminin artmasına neden olur.



Magnezyum sülfat çözeltili harçlarda sertleşme olduktan sonra alçıtaşı oluşumu devam eder ve alçıtaşı oluşumunun artması şişmeye neden olarak ilk zararlı etkiyi meydana getirir. Öte yandan magnezyum sülfat çözeltili harçlarda sertleşme olduktan sonra etrenjit oluşumu devam etmez. Çünkü brunit oluşumu ve çözeltinin pH değerinin düşük olması hem etrenjit hem de C-S-H (kalsiyum silika hidrat)'ın stabilitesini bozar. Bilindiği üzere C-S-H yapısı, çimento hamurunun ana bağlayıcı özelliği olan önemli bir bileşendir. Magnezyum ve kalsiyum iyonlarının valans değerlerinin aynı ve iyonik yarıçaplarının yakın olmasından dolayı magnezyum sülfat, C-S-H jeli ile aşağıdaki reaksiyonu oluşturur.

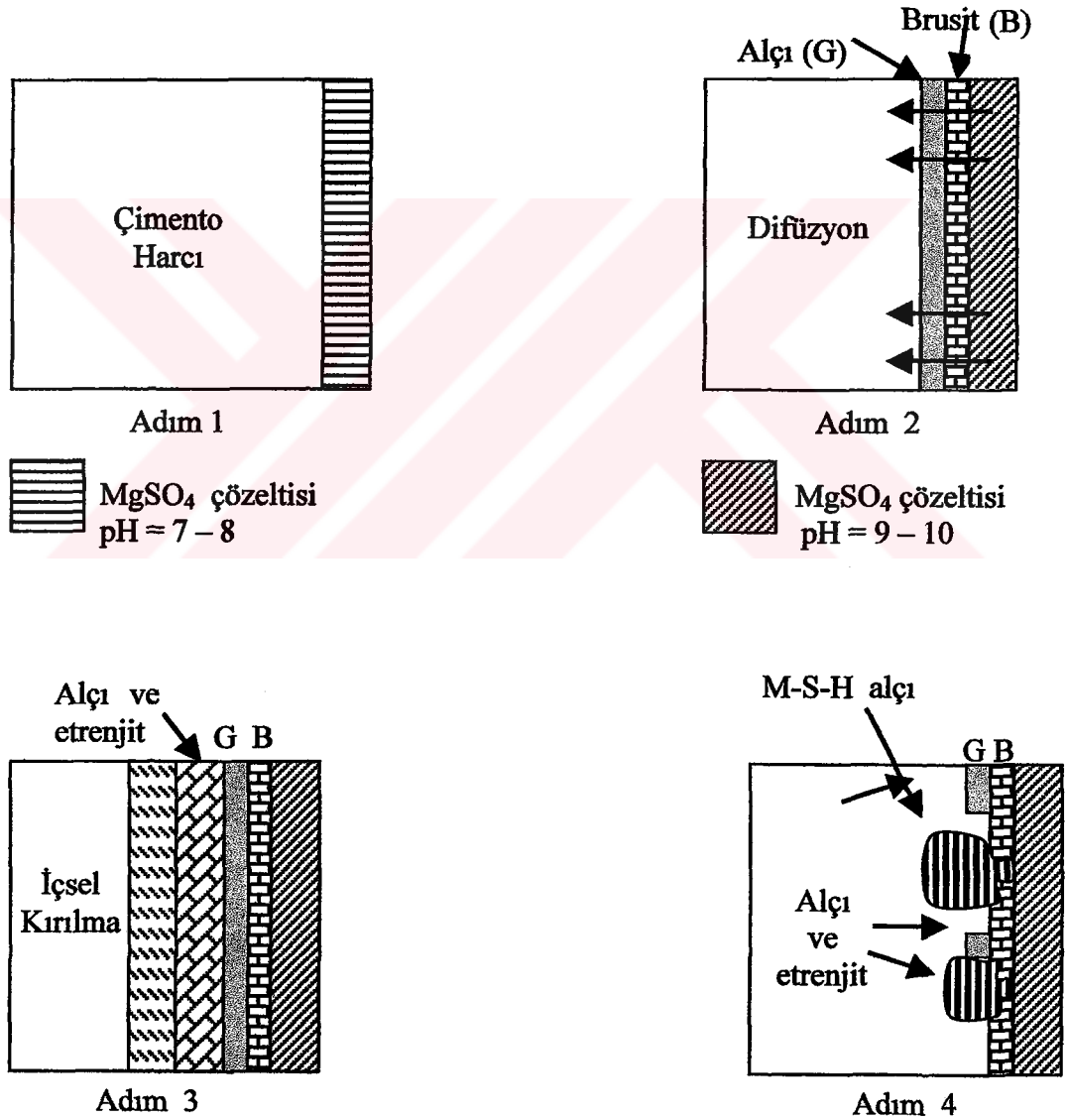


Burada oluşan $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ silika jelidir ve bu jelin bağlayıcı ve dayanım özelliği C-S-H jelinin bağlayıcı ve dayanım özelliğine göre çok düşüktür. Çimento hamurunda alçıtaşının ve brüstitin konsantrasyonu artarken C-S-H gittikçe kirecini kaybeder ve bağlayıcı özelliği azalır. Brüst konsantrasyonunun artmasıyla beraber brüst, silika jel ile (8.7) denklemine göre reaksiyona girer ve bunun sonucunda bağlayıcı ve dayanım özelliği olmayan M-S-H (magnezyum silika hidrat) oluşur. Brüst M-S-H'ye dönüştükçe oranı da gittikçe azalır.



(8.7)

Sonuç olarak bu oluşum sertleşmiş çimento hamurunun yumuşamasına ve bozulmasına neden olur (Kılınç ve Uyan, 2003).

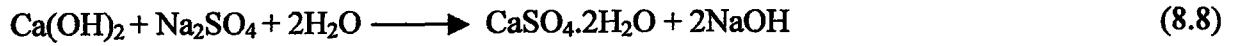


Şekil 8.6 Magnezyum sülfat etki mekanizması (Santhanam vd., 2003)

Şekil 8.6'da görüldüğü gibi; birinci adımda, harç pH = 7-8 arasında olan MgSO₄ çözeltisine konur ise birkaç dakika sonra pH = 9-10 seviyesine çıkmaktadır. İkinci adımda, alçı ve brusit tabakaları görülür. Bu yüzey tabakalarından çözelti nüfuz etmeye devam etmektedir. Üçüncü adımda, etrenjit ve alçı oluşumları sonucu içsel kırılmalar görülür. Sülfat çözeltisinin ilerleyişi ve genişmeden dolayı brusit tabakası kırılabilir. Dördüncü adımda, harcın yapısındaki bu tabakaların parçalanması ile güç ve bütünlük kaybı ortaya çıkmaktadır (Santhanam vd., 2003).

3.Sodyum Sülfat (Na₂SO₄) :

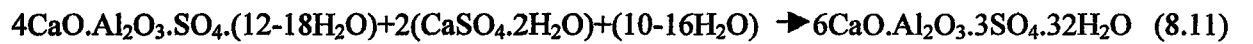
Sodyum sülfat, taze harçlarda magnezyum sülfattaki gibi ilk olarak Ca(OH)₂ ile reaksiyona girer.



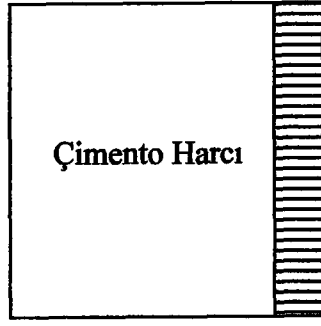
Taze harçlarda yukarıdaki oluşan CaSO₄·2H₂O hidrate olmamış kalsiyum alüminat ile (8.9) denklemindeki gibi reaksiyona girer ve bu reaksiyon sonucunda etrenjit oluşur ve oluşan bu etrenjit zararsızdır. Çünkü taze harçtan oluştuğundan dolayı sadece taze harcın hacminin artmasına neden olur.



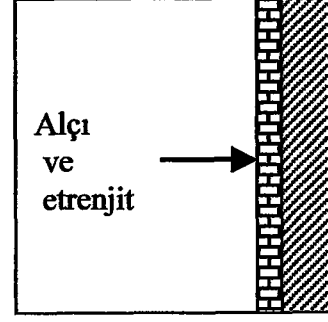
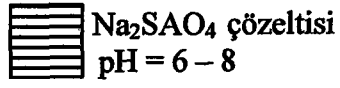
Sodyum sülfat çözeltili harçlarda da magnezyum sülfat çözeltili harçlarda olduğu gibi sertleşme olduktan sonra alçıtaşı oluşumu devam eder ve alçıtaşı oluşumunun artması şişmeye neden olarak ilk zararlı etkiyi meydana getirir. Diğer taraftan sertleşmiş harçlarda oluşan alçı taşı, hidrate kalsiyum alüminatlarla, hidrate kalsiyum sülfalüminatlarla veya anhidrik kalsiyum alüminatlarla reaksiyona girer ve aşağıdaki denklemlere göre sertleşme başlangıcından itibaren etrenjit oluşur:



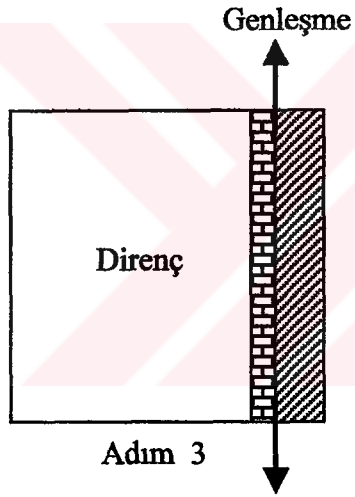
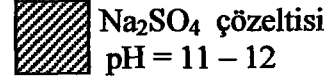
Oluşan bu etrenjit harçta şişme ve çatlamalara sebep olarak bozulma ve dayanım kaybına neden olur. Sodyum sülfatın etki mekanizması temel olarak sertleştikten sonraki etrenjit oluşumu üzerinde odaklanır. Bu yüzden çimentolarda C₃A oranını sınırlamak gerekir (Kılınç ve Uyan, 2003).



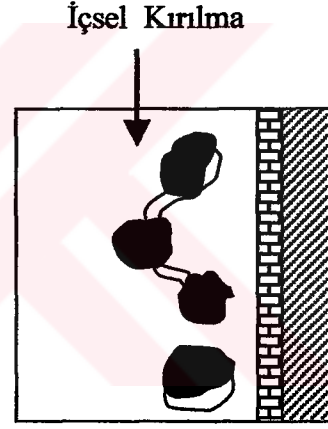
Adım 1



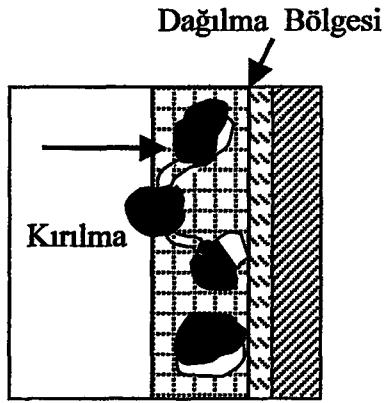
Adım 2



Adım 3



Adım 4



Adım 5

Şekil 8.7 Sodyum sülfatın etki mekanizması (Santhanam vd., 2003)

Şekil 8.7’de görüldüğü gibi; birinci adımda, çimento harcı $\text{pH} = 6-8$ olan Na_2SO_4 çözeltisi içine konmuştur. Birkaç dakika sonra $\text{pH} = 11-12$ olarak değişme göstermiştir. İkinci adımda, yüzeyde etrenjit ve alçı oluşumu başlar ve yüzey genleşme için gerilim sergilemektedir. Üçüncü adımda, yüzey bir basınç kuvvetine maruz kalmaktadır. Dördüncü adımda, iç kırılmalar görülür. Zaman ilerledikçe çözeltinin yapıya nüfuz etmesi nedeniyle hasar devam etmektedir. Beşinci adımda, dağılma bölgesi oluşur ve yeni içsel kırılmalar görülmektedir. (Santhanam vd., 2003).

8.2 Deniz Suyu Etkisi

Deniz suyunun çimentoya etkisinin ve buna karşılık çimento pastasının direncinin genelde, gelişen ve tam olarak belirlenemeyen nitelikte olduğu düşünülmüştür. Bu konuya şimdiye kadar detaylı olarak bir açıklama getirilmemiştir. Bunun sebebi, deniz suyunun betona etkisinde yer alan mekanik, fiziksel ve kimyasal hareketlerin çok sayıda olmasının yarattığı karmaşıktır (Carrete, 1989).

Birçok beton veya betonarme yapı yeryüzünün yaklaşık %78’ini oluşturan denizlerle doğrudan temas halindedir veya dolaylı olarak deniz ortamından etkilenmektedir (Yazıcı vd., 2003).

Denizle ilgili çalışmalarda kullanılan betonlar; dalga ve gelgitin neden olduğu yüzey aşınması, porların içinde tuzların kristalleşmesi sonucu şişmeler, deniz suyundaki çözünmüş tuzların kimyasal etkisi gibi farklı etkilere maruz kalmaktadır.

Deniz suyunun etkisi altında kalan betonlarda çalışma yapmak için Şekil 8.8’de tanımlandığı gibi üç alanda analiz gerekmektedir. Bunlar, tamamen suya daldırılmış olan bölge, gelgit olayının akıntısından etkilenen bölge ve gelgitte su seviyesinin en yüksek olduğu durumdan etkilenmiş olan bölge şeklinde sıralanabilmektedir (Massazza, 1989).

Beton yapısına klorür iyonlarının nüfuz etmesi önemli ölçüde zarar verici etkindir. Klorür iyonları korozyon etkisini kuvvetlendirir ve çatlamalara, beton örtüsünün dökülmesine neden olur (Pigeon vd., 1993).

- Donatı yüzeyinde oluşan pas orijinal donatı hacmine göre daha fazladır. Bu nedenle, genleşme ve betonda çatlamlara neden olur. Bu çatlamlar zararlı sular ve gazların beton içine nüfus etmesini ve dolayısı ile paslanmayı hızlandırır.
- Paslanma nedeni ile donatı kesit alanında meydana gelen azalma donatıların yük taşıma kapasitesini düşürür.

Deniz suyunun beton üzerindeki kimyasal etkisi çözülmüş bazı tuzları içermesinden kaynaklanmaktadır. Denizlere ve okyanuslara göre farklılıklar olsa da, tipik tuzluluk oranı %3,5 civarındadır. Buharlaştırmanın yüksek olduğu sıcak iklimlerde tuzluluk oranı artmaktadır. Deniz suyunda önemli miktarlarda bulunabilen tuzlar (Çizelge 8.1), sodyum klorür (NaCl), magnezyum klorür (MgCl₂), magnezyum sülfat (MgSO₄), kalsiyum sülfat (CaSO₄), potasyum klorür (KCl) ve potasyum sülfat (K₂SO₄) olarak sıralanabilir (Yazıcı vd., 2003).

Çizelge 8.1 Deniz sularında ortalama tuz miktarları (Güner, 1984)

Tuz	1000 g. Suda (g)	Toplam Tuz Miktarı (%)
Sodyum klorür	26,9	78,32
Magnezyum klorür	3,2	9,44
Magnezyum sülfat	2,2	6,40
Kalsiyum sülfat	1,3	3,94
Kalsiyum klorür	0,6	1,69
Diğerleri (potasyum, sülfat, kalsiyum bikarbonat, magnezyum bromür)	-	0,21
Toplam tuz içeriği	34,3	100,00

İçerdiği yüksek sülfat konsantrasyonu ile deniz suyu beton üzerinde sülfat etkisi yapar. C₃A ve CSH ile sülfat iyonlarının reaksiyonundan etrenjit oluşur. Yapılan araştırmalar klorür iyonlarının bulunduğu ortamda oluşan etrenjtin genişlemeye yol açmadığını ve deniz suyunda çözüldüğünü göstermektedir. Yüksek C₃A içerikli çimento kullanıldığında hasar genişleme ile değil katı bileşenlerin erozyona uğrayarak kütleden ayrılmasıyla kendini göstermektedir. Bu nedenle sülfat etkisi açısından deniz suyu yüksek miktarda sülfat iyonu içermesine rağmen genellikle orta şiddetli etki sınıfında kabul edilir.

Deniz suyunun beton üzerindeki bir diğer kimyasal etkisi ise magnezyum iyonlarının kalsiyum iyonlarıyla yaptığı aşağıda gösterilen yer değiştirme reaksiyonudur:



Oluşan Mg(OH)₂ brusit adıyla da bilinir. Çökelerek yüzeydeki gözenekleri tıkar ve koruyucu bir tabaka oluşturarak reaksiyonun gelişimini yavaşlatır. Ayrıca Ca(OH)₂'in CO₂ ile reaksiyonundan aragonit formundaki CaCO₃ oluşur ve çökelir. Kısa sürede oluşan bu koruyucu tabakaların kalınlığı 20-50 µm civarındadır ve yapının suya tamamen gömülü kısımlarında görülürler. Ancak, yapının dalgaların aşındırıcı etkilerine maruz kısımlarında bu tabakaların uzaklaşmasıyla reaksiyon tekrarlanır ve kütle kaybı süreklilik kazanır. Betonun magnezyum tuzlarıyla uzun süreli teması halinde CSH içindeki kalsiyumun da Mg iyonlarıyla yer değiştirdiği görülür ki oluşan magnezyum silikat hidratın (MSH) bağlayıcılık özelliği yoktur, kolayca parçalanabilir. Bu durum betonda rijitlik ve dayanım kaybına yol açar (Yazıcı vd., 2003).

Deniz suyu etkisiyle çimento pastasında etrenjit, alçı, brusit, MSH oluşum ve çimento pastasından CH'nin ayrılması, başlıca çimentodaki C₃A'nın farklı kristalin formlarının (kübik, ortorombik ve tetragonal) çeşitli oranlarına, yapılarına, tane büyüklüğüne bağlıdır.

Kübik C_3A 'nın deniz suyuyla temas etmesi kloroalüminata kıyasla daha fazla etrenjit oluşumuna sebep olur; çimentolarda tetragonal ve ortorombik C_3A için ise daha az etrenjit oluşumu söz konusudur (Carrete, 1989).

Islanma kuruma etkisini, deniz suyu ile beton içine sızan tuzların kuruma esnasında suyun buharlaşmasıyla betonda kalması, ıslanma-kuruma tekrar sayısı arttıkça betondaki tuz yoğunluğunun artması, tekrar ıslanma periyodunda kuru tuzların suyla temas edince hacimlerinin artması, beton boşluklarında iç basınç artışı sonucu doğan çekme gerilmelerinin betonda hasar oluşturmaları olarak özetlemek mümkündür. Ayrıca tuzların kristalleşirken de beton boşluklarında büyük basınçlar oluşturduğu bilinmektedir (Yazıcı vd., 2003).

Genelde tüm puzolanlar betonda sıvı geçirimsizliğini arttırmaktadırlar. Etkin bir dolgu maddesi olarak davranması ve puzolanik etki sonucu hamurun boşluk yapısının değişmesi nedeniyle betonda geçirimsizlik artmaktadır (Özturan, 1991).

Lorenzo tarafından yapılan çalışmada ise değişik oranlarda uçucu kül içeren hamurlar 90 gün boyunca yapay deniz suyunda bekletilmişlerdir. Özellikle yüksek oranda uçucu kül içeren örneklerin eğilme dayanımlarının yapay deniz suyu etkisi ile arttığı yazarlarca ifade edilmektedir (Yazıcı vd., 2003).

Shannag ve Shaia tarafından yapılan çalışmada ise portland çimento, doğal puzolan ve silika tozu içeren beton örnekleri Ölü Deniz ve Kızıl Deniz sularında 1 yıl bekletilmişlerdir. En iyi performans, %15 doğal puzolan ve %15 silika tozu içeren betonlarda alınmıştır. Sülfatlı ve deniz suyuna karşı daha iyi koruma sağlanmıştır (Shannag ve Shaia, 2003).

Dunstan ve arkadaşları yüksek oranlarda uçucu kül içeren beton ile yapılan deniz yapısının sürekli gel-git olaylarına maruz kalmasına rağmen gayet iyi performans gösterdiğini rapor etmektedirler.

Paillere ve arkadaşları uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı harç numunelerini yapay deniz suyu içinde tutmuşlar ve uçucu küllü harçların cürufu harçlardan daha az şişme yaptığını gözlemişlerdir (Özturan, 1993).

9. MATERYAL VE DENEYSEL ÇALIŞMA

9.1. Deney Programı

Portland, Pozolanlı çimentolar ile Portland-Uçucu Kül katkılı çimentoların sülfatlı su, deniz suyu ve normal sudaki dayanımlarının araştırılması asıl amacı oluşturmaktadır.

Deneysel çalışmada asıl amaca ulaşmak için yapılan ön işlem, iki aşamada gerçekleşmiştir. İlk aşama, Türkiye'deki termik santrallerden alınan uçucu küllerin, çimento üretiminde değerlendirilebilmesi imkanlarının araştırılmasıdır.

İkinci aşama ise, küller arasında uniform özellik gösteren külün seçimi ve çimento harcına farklı oranlarda katılma işlemidir.

9.2 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

9.2.1 Kullanılan çimentolar

Çalışmaların yapıldığı portland ve pozolanlı çimentolar Bursa Çimento Fabrikası AŞ'den alınmıştır. Bu çalışmada; TS 19 standardına göre üretilen PÇ 42.5 (portland çimentosu) ve TS 12144 standardına göre üretilen PZÇ 32.5 (pozolanlı çimento) olmak üzere iki çimento tipi kullanılmıştır (Çizelge 9.1). Kullanılan bu çimentoların kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 9.2 ve 9.3'te verilmiştir.

9.2.2 Kullanılan uçucu küller

Ülkemizde bulunan termik santral uçucu külleri kullanılmıştır. Bunlar; Soma4, Soma5 ve Soma6 olmak üzere her üç üniteye ait küller ile Çatalağzı, Çayırhan, Tunçbilek ve Seyitömer termik santrallerinden alınan küllerdir.

9.2.3 Kullanılan katkı malzemeleri

Katkı maddesi olarak tras ve uçucu kül kullanılmıştır. Trasın kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 9.4'de verilmiştir. Uçucu kül olarak, Seyitömer Termik Santrali'nden alınan kül kullanılmıştır ve bu külün özellikleri Çizelge 9.5'te verilmiştir. Ayrıca Çizelge 9.6'da diğer termik santrallerden alınan küllerin karşılaştırılmalı dayanım sonuçları verilmiştir.

9.2.4 Kullanılan agrega

Çimento harç numunesi hazırlamak için TS 819'a göre standart kum kullanılmıştır.

Çizelge 9.1 Çimentoların TS standardına göre mevcut özellikleri (Bursa Çimento)

Çimento Tipi	İşareti	Standart No	Dayanım sınıfı (Mpa)				Priz başlama süresi (dakika)	Sülfat miktarı (SO ₃ % olarak)	Çözün-meyen Kalıntı %	Kızdırma Kaybı %	CI %	Katkı %
			2 gün	7 gün	28gün	28gün						
PORTLAND ÇİMENTO	PÇ 42,5	TS 19	≥20,0	≥31,5	≥42,5	-	≥ 60	≤ 3,5	≤ 1,5	≤ 4,0	≤ 0,1	-
PORTLAND KOMPOZE ÇİMENTO	PKÇ/B 32,5 R	TS 12143	≥ 10	-	≥ 32,5	≤52,5	≥ 60	≤ 3,5	-	-	≤ 0,1	21-35
PUZZOLONİK ÇİMENTO	PZÇ/B 32,5 R	TS 12144	≥10,0	-	≥32,5	≤52,5	≥ 60	≤ 3,5	-	-	≤ 0,1	36-55

Çizelge 9.2 Portland çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

KİMYASAL ÖZELLİKLER %	
SiO ₂	20,07
Al ₂ O ₃	5,74
Fe ₂ O ₃	3,47
CaO	65,59
MgO	0,86
SO ₃	2,59
Na ₂ O	0,49
K ₂ O	0,49
Serbest CaO	1,45
Cl ⁻	0,004
Kızdırma Kaybı	1,40

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
90 µ (%)	1,2
45 µ (%)	11,6
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,13
Blaine (cm ² /g)	3200
Priz Baş.(saat)	02:15
Priz Sonu (saat)	03:10

Çizelge 9.3 Puzolanlı çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

KİMYASAL ÖZELLİKLER %	
SiO ₂	33,02
Al ₂ O ₃	9,49
Fe ₂ O ₃	4,67
CaO	42,46
MgO	1,74
SO ₃	2,68
Na ₂ O	0,87
K ₂ O	1,15
Serbest CaO	0,85
Cl ⁻	0,015
Kızdırma Kaybı	3,13

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
90 µ (%)	2,2
45 µ (%)	14,8
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,76
Blaine (cm ² /g)	4688
Priz Baş.(saat)	03:10
Priz Sonu (saat)	04:25

Çizelge 9.4 Trasın kimyasal ve fiziksel özellikleri

KİMYASAL ÖZELLİKLER %	
SiO ₂	65,42
Al ₂ O ₃	12,15
Fe ₂ O ₃	2,90
CaO	3,25
MgO	1,18
SO ₃	0,04
Na ₂ O	0,08
K ₂ O	2,75
Serbest CaO	-
Cl ⁻	0,008
Kızdırma Kaybı	10,80

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
90 µ (%)	1,2
45 µ (%)	6,7
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,35
Blaine (cm ² /g)	6593

Çizelge 9.5 Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

KİMYASAL ÖZELLİKLER %	
SiO ₂	52,31
Al ₂ O ₃	16,49
Fe ₂ O ₃	12,38
CaO	5,72
MgO	5,01
SO ₃	1,16
Na ₂ O	0,51
K ₂ O	2,27
Serbest CaO	0,15
Cl ⁻	0,0106
Kızdırma Kaybı	1,13

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
90 μ (%)	-
45 μ (%)	35
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,05
Blaine (cm ² /g)	3200

Çizelge 9.6 Farklı termik santrallerden alınan küllerin dayanım sonuçları

Kullanılan	Karışım Oran ve Miktarları				DAYANIM (N/mm ²)					
	Kül %	Kül gr.	PÇ 42,5 gr.	2 Gün	7 Gün	28 Gün	56 Gün	90 Gün		
Çatalağzı	15	68	382	18,1	32,9	44,2	45,5	52,1		
	25	113	337	14,4	27,1	37,0	42,1	46,0		
	35	158	292	10,9	21,1	30,5	35,3	39,0		
Seyitömer	15	68	382	19,7	39,0	51,8	56,8	58,8		
	25	113	337	16,1	30,1	45,5	50,6	49,0		
	35	158	292	12,0	22,6	34,7	36,2	36,9		
Çayırhan	15	68	382	20,8	37,9	48,8	50,9	55,2		
	25	113	337	15,7	31,3	39,9	45,6	49,2		
	35	158	292	10,7	21,7	32,0	37,6	40,3		
Tunçbilek	15	68	382	20,7	37,5	47,7	53,9	56,6		
	25	113	337	16,4	31,5	44,3	51,2	54,9		
	35	158	292	11,7	23,5	37,0	46,1	46,3		

9.3 Çalışmada Kullanılan Su Özellikleri

Sülfatların betona zararlı bir etki vermesi, su içinde litrede 300 mg'dan fazla sülfat içermesine bağlıdır. 0,35 M. Na₂SO₄ çözeltisi havuzların hacmine göre hazırlanmıştır. Etenjitin en kararsız olduğu bilinen pH = 6 değerinde tutulmuştur. Böylece en ağır sülfat koşullarında betonun dayanımları izlenmiştir.

0,35 M. Na₂SO₄ çözeltisinin hazırlanması için;

$$\text{Molarite} = m / (M * V) \quad (9.1)$$

(9.1) denklemi kullanılır.

m : Çözünen madde miktarı (g),

M : Mol tartısı (g/gmol),

V : Çözelti hacmi (lt),

Molarite : Molar konsantrasyon (gmol/lt).

Deniz suyu olarak havuzlara Mudanya'dan getirilen deniz suyu konulmuştur. PH = 9 olarak saptanmıştır.

Normal su olarak, pH = 8 olan normal su kullanılmıştır.

9.4 Kullanılan Teçhizatlar

Kimyasal ve fiziksel özelliklerin tayini ile basınç dayanımının belirlendiği tüm alet ve cihazlar Çizelge 9.7'de verilmiştir.

Çizelge 9.7 Laboratuvar teçhizat listesi

Teçhizat Adı	İmalatçı Firma	Model-Seri No
X - Ray	ARL	8680S-282
X - Ray	SPECTROMETRE	XEPOS/76004814
Pres Makinesi	HERZOG	1-262-775/34192
Manuel Pres	SPECAC	
Özgöl Ağırlık Cihazı	QUANTACHROME	MVP/11497101401
Elektronik Terazı	METTLER	AE 200S/19602
Blaine Cihazı	TONINDUSTRI	72071
Harç Karıştırma Makinesi	ATOM TEKNİK	1197
Basınç Presi	ATOM TEKNİK	7*1996
Elek	ALPIN	

9.5 Uçucu Küllerin Bazı Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi

Farklı termik santrallerden alınan uçucu küllerin, yaklaşık 18 ay boyunca kimyasal özellikleri yapılan analizlerle incelenmiştir. TS EN 196-2 (Çimento Deney Metotları – Çimentonun Kimyasal Analizi) standardına göre, kızdırma kaybı ve kükürt trioksit tayinleri yapılmıştır. TS EN 451-1 (Uçucu Kül Deney Metodu, Serbest Kalsiyum Oksit Muhtevasının Tayini) standardına göre, serbest kalsiyum oksit tayini yapılmıştır. TS EN 196-21 (Çimento Deney Metotları – Çimentoda Klorürü, Karbondioksiti ve Alkali Miktarları Tayini) standardına göre, klorür tayini yapılmıştır. Tüm kimyasal analiz sonuçları Çizelge 9.8 ile Çizelge 9.25 arasında gösterilmiştir. Ayrıca Çatalağzı, Çayırhan, Tunçbilek ve Seyitömer Termik Santralleri'ne ait uçucu küllerin 2003 yılı kimyasal analiz sonuçlarının ortalamaları alınarak, Çizelge 9.26 ile Çizelge 9.29 arasında verilmiştir.



Çizelge 9.8 2002 yılı Haziran ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
SOMA	1,110	0,071	1,030	2,300
ÇAYIRHAN	0,290	0,107	0,130	3,560
ÇATALAĞZI	0,900	0,071	0,010	0,560
TUNÇBİLEK	0,680	0,320	0,040	1,300
SEYİTÖMER	2,030	0,036	0,130	1,700
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.9 2002 yılı Temmuz ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
SOMA	0,681	0,017	0,360	1,334
ÇAYIRHAN	0,209	0,089	0,040	3,240
ÇATALAĞZI	1,106	0,149	0,030	0,270
TUNÇBİLEK	0,310	0,099	0,130	0,650
SEYİTÖMER	1,228	0,083	0,350	0,840
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.10 2002 yılı Ağustos ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
SOMA	0,568	0,035	1,106	2,498
TUNÇBİLEK	1,007	0,094	0,050	1,011
SEYİTÖMER	2,024	0,066	0,080	1,741
ÇATALAĞZI	1,400	0,034	0,100	0,560
ÇAYIRHAN	0,288	0,041	0,130	4,454
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.11 2002 yılı Eylül ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
SOMA4	1,049	0,0109	1,980	2,132
SOMA5	0,900	0,0496	2,740	3,084
TUNÇBİLEK	0,595	0,0354	0,010	0,746
SEYİTÖMER	1,582	0,0355	0,030	1,144
ÇAYIRHAN	0,406	0,0886	0,080	4,340
ÇATALAĞZI	1,015	0,0106	0,160	0,259
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.12 2002 yılı Ekim ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
SOMA4	0,660	0,0177	2,550	1,718
ÇATALAĞZI	0,783	0,0354	0,300	0,127
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.13 2002 yılı Kasım ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
SEYİTÖMER	1,860	0,0358	0,080	1,068
ÇAYIRHAN	0,246	0,1109	0,520	2,603
SOMA6	1,060	0,0284	4,400	5,800
TUNÇBİLEK	0,540	0,0462	0,080	0,559
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.14 2002 yılı Aralık ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
ÇATALAĞZI	0,884	0,028	0,160	0,142
ÇAYIRHAN	0,117	0,004	0,680	3,600
SEYİTÖMER	1,002	0,025	0,080	0,930
SOMA6	1,032	0,056	4,080	5,140
TUNÇBİLEK	1,189	0,007	0,190	0,710
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.15 2003 yılı Ocak ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
SEYİTÖMER	1,215	0,035	0,120	0,659
ÇAYIRHAN	0,164	0,046	0,630	3,543
ÇATALAĞZI	0,516	0,032	0,140	0,134
TUNÇBİLEK	0,208	0,042	0,027	0,560
SOMA4	0,584	0,095	5,670	4,207
SOMA6	0,943	0,028	6,700	4,995
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.16 2003 yılı Şubat ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
SOMA4	0,541	0,0248	6,500	3,547
TUNÇBİLEK	0,612	0,0249	0,096	0,719
ÇAYIRHAN	0,168	0,0245	0,713	3,814
SEYİTÖMER	1,500	0,0210	0,110	0,883
ÇATALAĞZI	0,926	0,0177	0,192	0,169
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.17 2003 yılı Mart ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
ÇAYIRHAN	0,194	0,0088	0,410	1,971
ÇATALAĞZI	0,722	0,0071	0,190	0,075
SEYİTÖMER	0,837	0,0110	0,160	0,930
TUNÇBİLEK	0,672	0,0496	0,027	0,542
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.18 2003 yılı Nisan ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
TUNÇBİLEK	0,304	0,025	0,082	0,643
ÇAYIRHAN	0,271	0,021	0,466	2,522
SEYİTÖMER	0,907	0,018	0,110	1,175
ÇATALAĞZI	0,574	0,011	0,192	0,228
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.19 2003 yılı Mayıs ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl ⁻	% Serbest CaO	% SO ₃
TUNÇBİLEK	0,657	0,0213	0,247	0,715
ÇAYIRHAN	0,805	0,2120	0,466	3,736
SEYİTÖMER	1,506	0,0420	0,247	1,858
ÇATALAĞZI	0,469	0,0071	0,164	0,096
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.20 2003 yılı Haziran ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl ⁻	% Serbest CaO	% SO ₃
TUNÇBİLEK	0,624	0,0210	0,109	0,663
ÇAYIRHAN	0,834	0,0170	0,549	3,423
SEYİTÖMER	1,106	0,0160	0,164	1,073
ÇATALAĞZI	0,686	0,0250	0,109	0,142
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.21 2003 yılı Temmuz ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl ⁻	% Serbest CaO	% SO ₃
TUNÇBİLEK	0,690	0,0106	0,137	0,590
ÇAYIRHAN	0,158	0,0071	0,713	3,932
SEYİTÖMER	0,327	0,0030	0,096	0,926
ÇATALAĞZI	0,854	0,0071	0,206	0,085
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.22 2003 yılı Ağustos ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl ⁻	% Serbest CaO	% SO ₃
TUNÇBİLEK	0,592	0,0142	0,109	0,586
ÇAYIRHAN	0,172	0,0071	0,768	3,990
SEYİTÖMER	0,909	0,0180	0,123	1,141
ÇATALAĞZI	1,603	0,0142	0,301	2,442
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.23 2003 yılı Ekim ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
ÇAYIRHAN	0,863	0,0070	0,548	3,316
SEYİTÖMER	1,328	0,0070	0,082	0,780
ÇATALAĞZI	0,518	0,0036	0,109	0,102
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.24 2003 yılı Kasım ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
TUNÇBİLEK	1,172	0,0070	0,068	0,576
ÇAYIRHAN	1,107	0,0071	0,686	3,110
SEYİTÖMER	1,612	0,0140	0,164	1,073
ÇATALAĞZI	1,551	0,0035	0,130	0,209
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.25 2003 yılı Aralık ayı uçucu kül kimyasal analizleri

FİRMA	% K.K.	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
TUNÇBİLEK	1,046	0,0070	0,109	0,689
ÇAYIRHAN	0,179	0,0071	0,658	3,875
SEYİTÖMER	1,173	0,0280	0,137	1,234
ÇATALAĞZI	1,519	0,0035	0,027	0,253
STANDART	5	0,1	1	3

Çizelge 9.26 Seyitömer Termik Santrali uçucu külü 2003 yılı ortalama kimyasal bileşen değerleri

SEYİTÖMER	% Kızdırma Kaybı	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
Ocak	1,215	0,035	0,120	0,659
Şubat	1,500	0,021	0,110	0,883
Mart	0,837	0,011	0,160	0,930
Nisan	0,907	0,018	0,110	1,175
Mayıs	1,506	0,042	0,247	1,858
Haziran	1,106	0,016	0,164	1,073
Temmuz	0,927	0,003	0,096	0,926
Ağustos	0,909	0,018	0,123	1,141
Ekim	1,328	0,007	0,082	0,780
Kasım	1,612	0,014	0,164	1,073
Aralık	1,173	0,028	0,137	1,234
Yıllık Ortalama	1,183	0,019	0,138	1,066

Çizelge 9.27 Çayırhan Termik Santrali uçucu külü 2003 yılı ortalama kimyasal bileşen değerleri

ÇAYIRHAN	% Kızdırma Kaybı	% Cl⁻	% Serbest CaO	% SO₃
Ocak	0,164	0,0460	0,630	3,543
Şubat	0,168	0,0245	0,713	3,814
Mart	0,194	0,0088	0,410	1,971
Nisan	0,271	0,0210	0,466	2,522
Mayıs	0,805	0,2120	0,466	3,736
Haziran	0,834	0,0170	0,549	3,423
Temmuz	0,158	0,0071	0,713	3,932
Ağustos	0,172	0,0071	0,768	3,990
Ekim	0,863	0,0070	0,548	3,316
Kasım	1,107	0,0071	0,686	3,110
Aralık	0,179	0,0071	0,658	3,875
Yıllık Ortalama	0,447	0,033	0,601	3,385

Çizelge 9.28 Çatalağzı Termik Santrali uçucu küllü 2003 yılı ortalama kimyasal bileşen değerleri

ÇATALAĞZI	% Kızdırma Kaybı	% Cl	% Serbest CaO	% SO ₃
Ocak	0,516	0,0320	0,140	0,134
Şubat	0,926	0,0177	0,192	0,169
Mart	0,722	0,0071	0,190	0,075
Nisan	0,574	0,0110	0,192	0,228
Mayıs	0,469	0,0071	0,164	0,096
Haziran	0,686	0,0250	0,109	0,142
Temmuz	0,854	0,0071	0,206	0,085
Ağustos	1,603	0,0142	0,301	2,442
Ekim	0,518	0,0036	0,109	0,102
Kasım	1,551	0,0035	0,130	0,209
Aralık	1,519	0,0035	0,027	0,253
Yıllık Ortalama	0,903	0,012	0,160	0,357

Çizelge 9.29 Tunçbilek Termik Santrali uçucu külü 2003 yılı ortalama kimyasal bileşen değerleri

TUNÇBİLEK	% Kızdırma Kaybı	% Cl⁻	% Serbest CaO	% SO₃
Ocak	0,208	0,0420	0,027	0,560
Şubat	0,612	0,0249	0,096	0,719
Mart	0,672	0,0496	0,027	0,542
Nisan	0,304	0,0250	0,082	0,643
Mayıs	0,657	0,0213	0,247	0,715
Haziran	0,624	0,0210	0,109	0,660
Temmuz	0,690	0,0106	0,137	0,590
Ağustos	0,592	0,0142	0,109	0,586
Kasım	1,172	0,0070	0,068	0,576
Aralık	1,046	0,109	0,0070	0,689
Yıllık Ortalama	0,657	0,032	0,091	0,628

9.6 Kimyasal Analizi

Yaptığımız deneysel çalışmada kullanılan tüm çimento ve katkıların, X-Ray cihazı ile tüm oksitli bileşenleri miktarları belirlenmiştir. Kızdırma kaybının tayini için, 1 gr. numune porselen krozeye konarak yaklaşık 1000⁰C sıcaklığa kadar kızdırılmıştır. Desikatörde soğutulduktan sonra tartımı alınmıştır. Son tartımdan boş kroze ağırlığı çıkarılıp, numune miktarına bölünerek kızdırma kaybı değeri bulunmuştur.

9.7 Çalışma Yöntemi

TS EN 196-1 standardına göre harç numuneleri hazırlanmıştır. Harç, üç adet prizma biçimli numunenin aynı anda hazırlanabilmesi için, en kesiti 40mm × 40mm ve uzunluğu 160mm olan üç yatay bölümden oluşan kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıpların bekletildiği rutubet odası sıcaklığı 20 ⁰C ± 1 ⁰C sıcaklıkta ve nemi %90 olup, kür suyunun sıcaklığı 20 ⁰C ± 1 ⁰C'de tutulmuştur. Kalıplar havuzlarda kırılma sürelerine (2, 3, 7, 28, 60 ve 90 gün) kadar kür edilmişlerdir. Prizmaların düzgün olan yan yüzeyleri 4 × 4cm kırma başlığına sahip basınç dayanım cihazına konulmuştur. Yük, prizmalar kırılana kadar uygulanmıştır. Uygulanan basma kuvvetleri, aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$F_b = P_k / A_o \quad (9.2)$$

F_b : Basma mukavemeti (N/mm²)

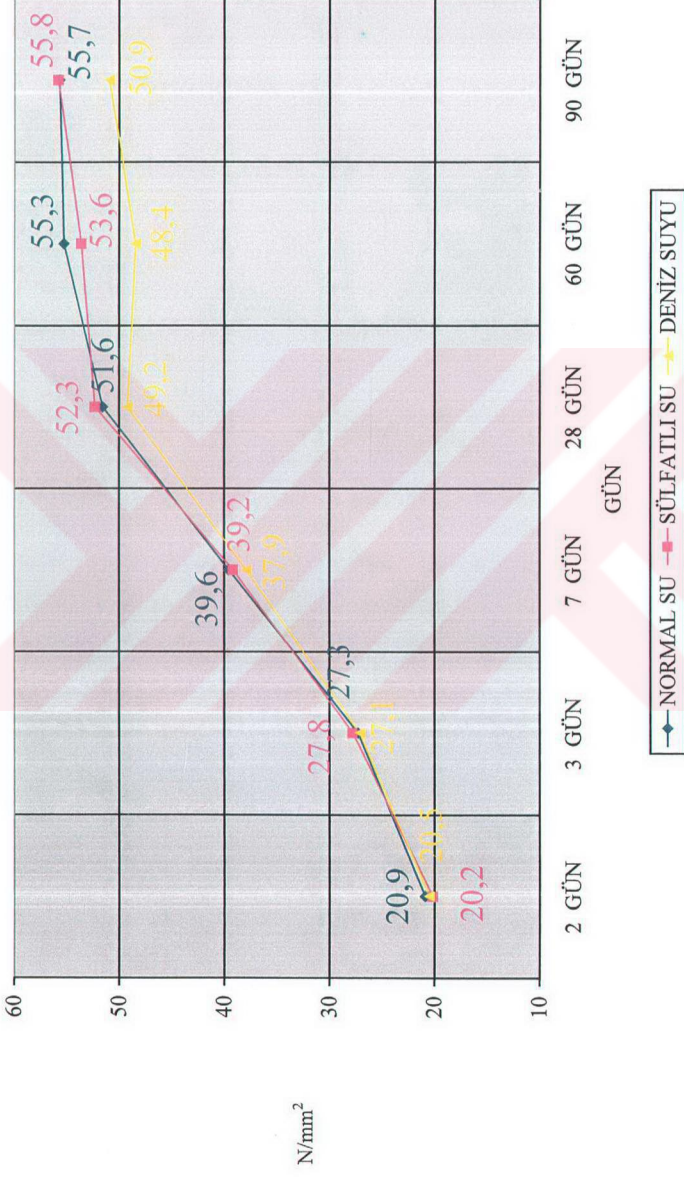
P_k : Kırılma anındaki yük (N)

A_o : Numunelerin basınç uygulanan yüzeyinin alanı (mm²).

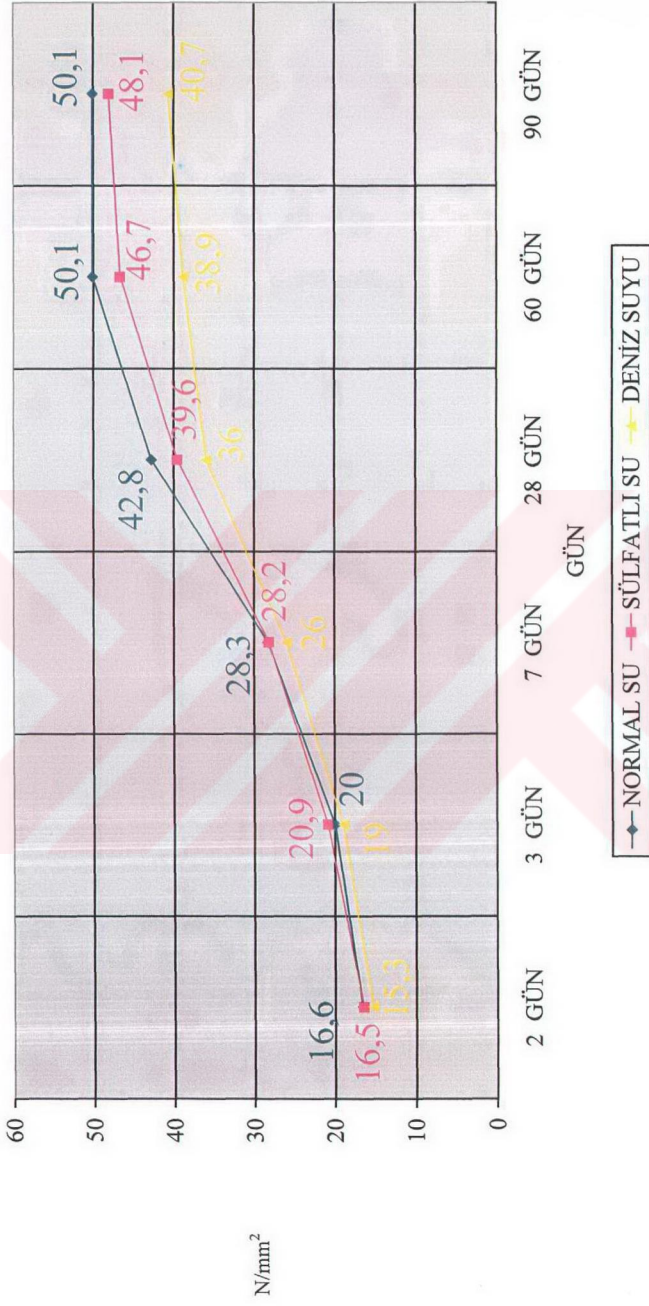
Kalıpların bekletildiği sülfatlı su, deniz suyu ve normal su havuzları 14 günde bir değiştirilmiştir. Farklı çimento ve karışımdaki numunelerin belirlenen bu ortamlardaki dayanım sonuçları Çizelge 9.26'da verilmiştir. Portland çimentosuna %17 ve %21 oranlarında uçucu kül katılarak denemeler yapılmıştır. Pozolanlı çimento %39 katkılı olup, %24 kül ve %15 tras içermektedir. Ayrıca %52 oranında portland çimentodan ve %48 oranında pozolanlı çimentodan alınarak hazırlanan karışımın da normal su, sülfatlı su ve deniz suyundaki dayanımı incelenmiştir. Tüm dayanımlara ait değerler grafiksel olarak Şekil 9.1 ile 9.8 arasında gösterilmiştir.

Çizelge 9.30 Farklı çimentoların normal su, sülfatlı su ve deniz suyundaki dayanımları

ÇİMENTO TİPİ	Karışım Oranı %	DAYANIMLAR (N/mm ²)						
		2 gün	3 gün	7 gün	28 gün	60 gün	90 gün	
PÇ/NORMAL SUDA	-	20,9	27,3	39,6	51,6	55,3	55,7	
PÇ/SÜLFATLI SUDA	-	20,2	27,8	39,2	52,3	53,6	55,8	
PÇ/DENİZ SUYUNDA	-	20,5	27,1	37,9	49,2	48,4	50,9	
PÇ+U.KÜL/ NORMAL SUDA	21	16,6	20	28,3	42,8	50,1	50,1	
PÇ+U.KÜL/ SÜLFATLI SUDA	21	16,5	20,9	28,2	39,6	46,7	48,1	
PÇ+U.KÜL/ DENİZ SUYUNDA	21	15,3	19	26	36	28,9	40,7	
PZÇ / NORMAL SUDA	39	10,4	14	21,3	34,9	42,3	43,8	
PZÇ /SÜLFATLI SUDA	39	10,3	12,8	20,1	35,2	37,6	43,1	
PZÇ / DENİZ SUYUNDA	39	9,8	12,3	20,1	27	32,5	35,5	
PZÇ+PÇ / NORMAL SUDA	48 52	17,8	23	32,3	45,9	51,3	52,1	
PZÇ+PÇ / SÜLFATLI SUDA	48 52	17,9	22,9	32,3	45,9	49,6	52	
PZÇ+PÇ / DENİZ SUYUNDA	48 52	16,9	21,8	31	40,3	43,4	41,2	
PÇ+U.KÜL/ NORMAL SUDA	17	17,3	22,2	30,4	46,0	51,1	51,9	
PÇ+U.KÜL/ SÜLFATLI SUDA	17	17,1	21,8	30,1	44,2	48,4	50,7	
PÇ+U.KÜL / DENİZ SUYUNDA	17	16,9	20,5	28,5	40,0	41,0	41,0	



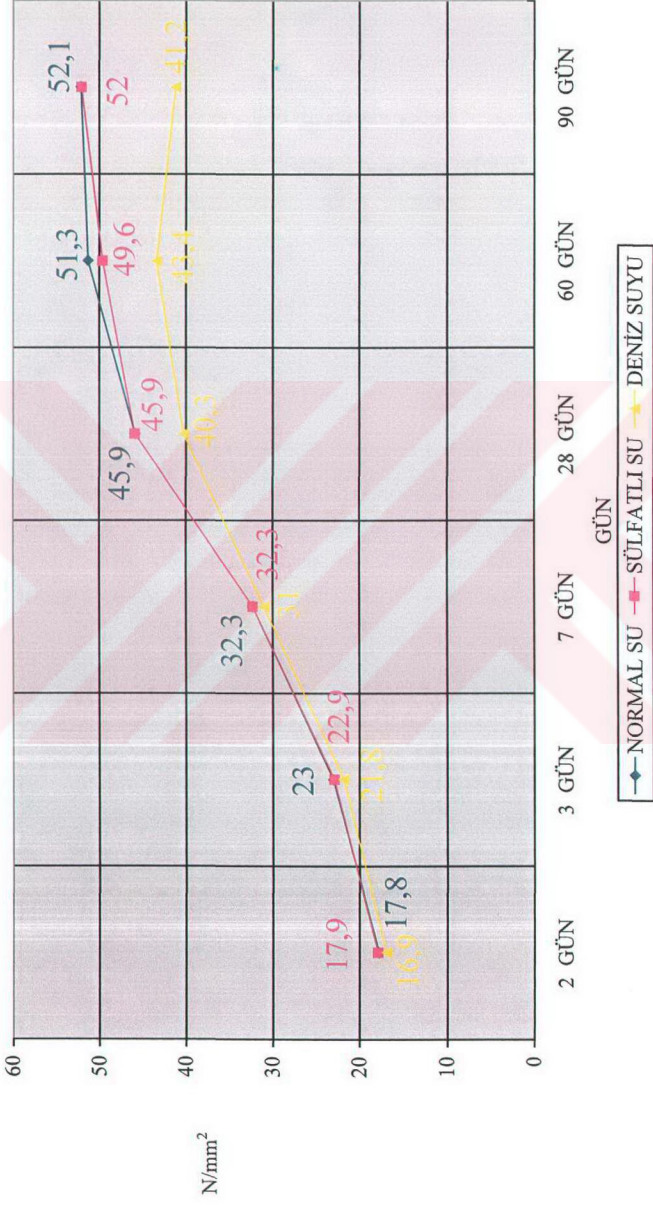
Şekil 9.1 PÇ 42,5'un farklı sularda dayanımı



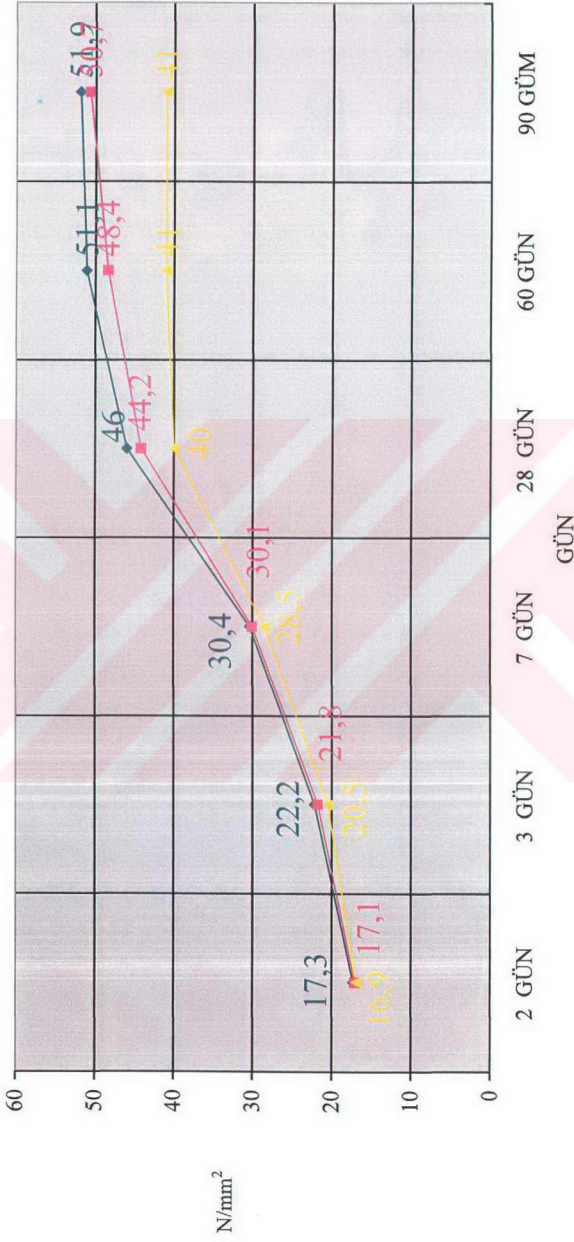
Şekil 9.2 PÇ 42,5 + Uçucu Kül (%21)'in farklı sularda dayanımı



Şekil 9.3 PZÇ 32,5'un farklı sulardaki dayanımı

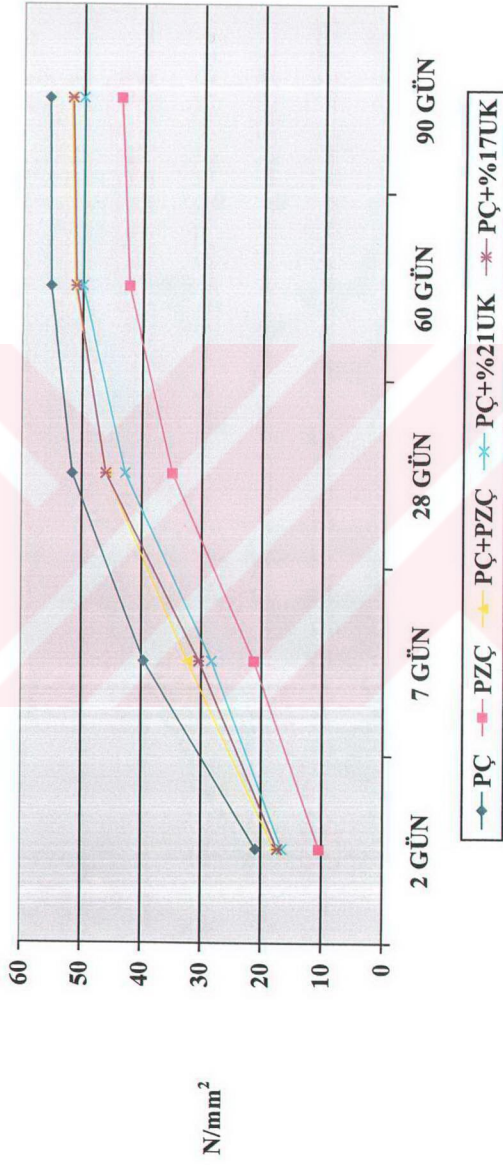


Şekil 9.4 PZÇ + PÇ'nin farklı sulardaki dayanımı

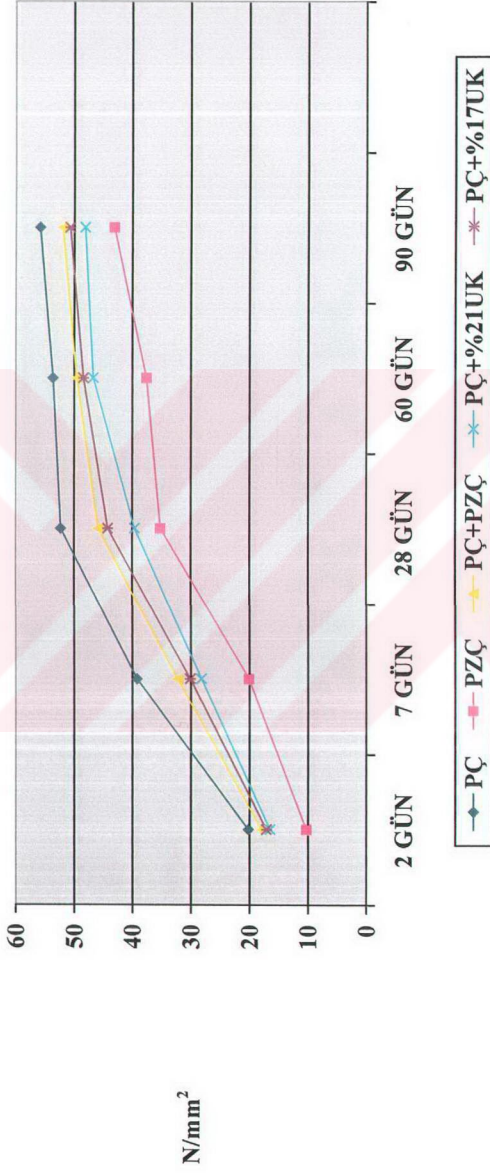


—◆— NORMAL SU —■— SÜLFATLI SU —▲— DENİZ SUYU

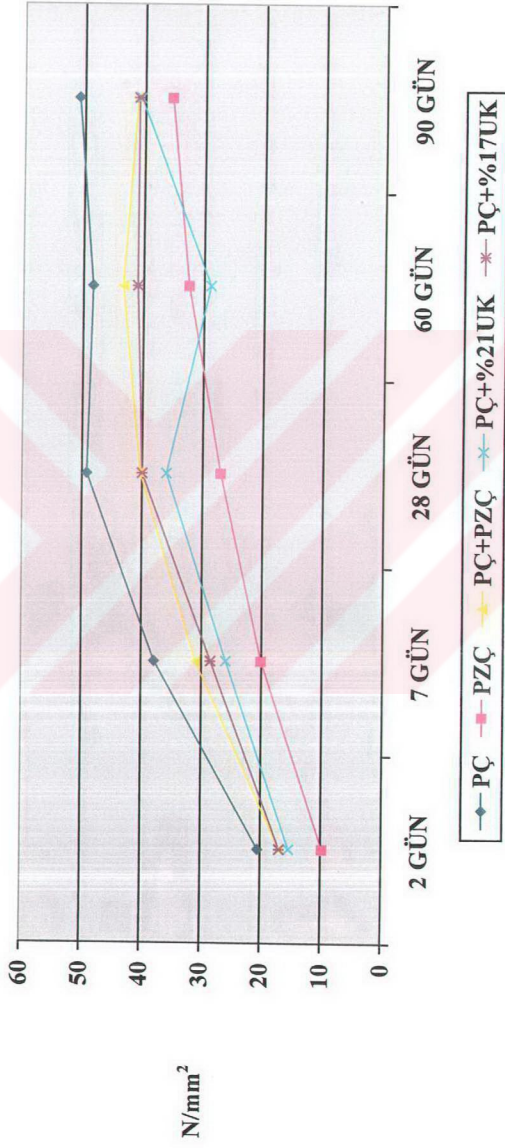
Şekil 9.5 PÇ 42,5 + Uçucu Kül (%17)'ün farklı sularla dayanımı



Şekil 9.6 Farklı çimentoların normal suda dayanımı



Şekil 9.7 Farklı çimentoların sülfatlı suda dayanımı



Şekil 9.8 Farklı çimentoların deniz suyuunda dayanımı

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çimento üretiminde, uçucu kül kullanımı ile; atık malzeme değerlendirilmiş, öğütme işlemi uygulanmadığından enerji tasarrufu sağlanmış, çevre kirliliği önlenmiş ve hammaddeden daha ucuz olması nedeni ile ekonomi sağlanmış olur.

Ülkemizde bulunan Soma, Seyitömer, Çatalağzı, Çayırhan ve Tunçbilek Termik Santralleri'nden aldığımız uçucu kül örnekleri ile yaptığımız analizler ile bazı sonuçlara varılmıştır. Bunlar öncelikle, uçucu küllerin kimyasal bileşenlerinin değişken olduğu ve bazı küllerin belirtilen standartlara uygun olmayışdır. Soma'dan gelen uçucu kül, yüksek oranda kükürt trioksit ve serbest kalsiyum oksit içerdiğinden çimento üretiminde katkı olarak kullanılması uygun görülmemiştir. Diğer yandan Seyitömer Termik Santrali'nden elde edilen külün benzer kimyasal özellik gösterdiği görülmüştür. Bu kül standart kimyasal bileşen bazında gereken koşullara tamamen uymaktadır. Bu nedenle çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanılmasında bir sakınca görülmemektedir. Ayrıca Çatalağzı, Çayırhan ve Tunçbilek Termik Santralleri'nden alınan küller de kimyasal bileşen olarak standartları sağladığından çimento üretiminde değerlendirilebileceği görülmüştür.

Bu çalışmada, katkı kullanılarak hazırlanan numunelerden, katkısız numunelere yakın performans alındığı gözlenmiştir. Her iki mineral katkı ile hazırlanan örneklerde, sülfatlı su ve deniz suyuna karşı dayanım sağlanmıştır. Basınç dayanım sonuçlarını değerlendirdiğimizde, olumsuz etki görülmemiştir. Tüm ortam koşullarında, 90 güne kadar bekletilen katkılı ve katkısız numunelerde dayanım zamanla artmıştır. Yalnızca deniz suyunda bekletilen numunelerin dayanım değerleri, diğer koşullardaki numunelere göre farklılık göstermiştir. Bunun nedeni olarak, deniz suyunda çözünmüş haldeki tuzların varlığı gösterilebilir.

Portland çimentosu ile değişik kombinasyonlarda katkının birlikte kullanımı, basınç dayanımını, bazı oranlarda etkilediği gözlenmiştir. Katkı oranının yaklaşık %15 – 20 arasında olmasının daha uygun olduğu görülmüştür.

%17 uçucu kül katkılı denemenin, 28 günlük dayanım sonuçlarının, %19 katkılı (%11,5 uçucu kül + %7,5 tras) çalışma ile paralel olduğu söylenebilir. Bunun sebebi olarak, kullanılan trasın kimyasal özelliklerinin uçucu küle yakın olması gösterilebilir.

Ayrıca tras katkılı çimentoların sülfatlı ve deniz suyuna karşı dayanımını güncel bir çalışma ile sunmak mümkündür. Gemlik Liman inşaatında kullanılmak üzere hazırlanan betonların uzun bir süre sonra da özelliğini yitirmediği gözlenmiştir. Çünkü puzolanik aktivitesi yüksek

tras katılması ile elde edilen çimentoyla yapılan betonlarda, serbest kireci absorbe etme ve bağlama kapasitesinin yüksek olması nedeni ile betonlar, gerek sülfatlı sulara gerekse deniz sularına karşı dayanım göstermiş ve yıpranma, aşınma gibi olaylar meydana gelmemiştir. 2003 yılı sonlarında çekilen görüntüler Ek bölümünde Şekil 1.1’de verilmiştir.

Çimento harcı numunelerinin basınç dayanımları, beton numunelerinin basınç dayanımlarından yüksek çıkmaktadır. Bunun nedeni, çimento harcına agrega olarak sadece kumun katılmasıdır. Fakat yaptığımız çalışma ile Liman İnşaatı beton çalışmaları dayanım sonuçları karşılaştırıldığında, farklı bir noktaya dikkat çekmek gerekir. Çalışmamızda her üç su havuzlarında yaptığımız denemelerde, %39 katkılı puzolanik çimento harcı dayanımı, %30 tras katkılı beton dayanımından yüksek çıkmıştır. Yani katkı oranı düşük olmasına karşın beton dayanım değeri daha düşük çıkmıştır. %24 oranında uçucu kül, %15 oranında tras ile toplam %39 katkılı denemenin dayanım performansı daha yüksektir.

Birçok yönden avantaj sağlayan uçucu külün, yeni bir kaynak olarak inşaat sektöründe yer alması beklenmektedir. Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN)’nin Çimento ve İnşaat Kireci Teknik Komitesi son toplantısı 8 – 10 Ekim’de yapılmıştır. Sülfatlara dirençli çimentolar için, performans esaslı bir harmonize standard çıkarılamayacağı görüşünde birleşilmiş ve bir öneri raporu hazırlanacağı bildirilmiştir. Uçucu kül ve tras gibi puzolanik malzemelerin, sülfatlara karşı direnç gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle yeni bir konu için daha detaylı çalışmalar yapılmalıdır. Farklı oranlarda, daha uzun süreli denemeler gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Akman, S., Evcil, B. ve Tonak, T., (1994), "Traslı Çimento Nedir? Ne Değildir?", İnşaat Mühendisleri Odası Paneli, Aralık 1994, Ankara.

Andersen, (2001), Türk çimento sektörü, Stratejik Araştırma Raporu, Andersen Yönetim ve İnsan Kaynakları Danışmanlık Limited Şirketi.

Biricik, H., Gündüz, A.S., Çakır, Ö. ve Sarier, N., (2003), "Doksan Gün Sülfat Etkisinde Kaldıktan Sonra Kalker ve Silis Dumanı Katkılı Betonların Bazı Özellikleri", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1 – 2 – 3 Ekim 2003, Cemal Reşit Rey Konser Salonu, İstanbul.

Black, L., Stumm, A., Garbev, K., Stemmermann, P., Hallam, K.R. ve Allen G.C., (2003), "X-Ray Photoelectron Spectroscopy of the Cement Clincer Phases Tricalcium Silicate and β -Dicalcium Silicate", Cement and Concrete Research, 33: 1561-1565.

BS EN 197-1, (2000), "Cement – Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements", British Standard.

Bursa Çimento Fabrikası, çeşitli fabrika dökümanları.

Carrete, J.C., (1989), "Dayanıklılık", (Çev. P. Türker), Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Semineri, 11 – 12 Mayıs 1989, Ankara.

Döven, A.G., (1998), "Uçucu Kül (I) Tanımı Standartları Kullanım Alanları", Hazır Beton Dergisi, 25(5): 64-65.

Erdoğan, T. Y., (1993), "Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 18 – 19 Kasım 1993, Tek Genel Müdürlüğü Toplantı Salonu, Ankara.

Erdoğan, K., Tokyay, M. ve Türker, P., (2002) "Traslar ve Traslı Çimentolar", Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu.

Erşen, K., (2003), "2002 Yılı Türk Çimento Sektörü", Çimento ve Beton Dünyası, 43(8): 28.

Gökçe, A., Çiçekli, O.C., Uyan, M. ve Öztekin, E., (1996), "Uçucu Küllü Betonların Mekanik Özellikleri Üzerine Bir DeneySEL Çalışma", 4. Ulusal Beton Kongresi Tartışmaları, 30–31 Ekin – 1 Kasım 1996, İstanbul.

Güner, A., (1984), "Kimyasal Zararlı Ortamda Beton Üretim, Bakım ve Önlemler", Beton Semineri, 6 – 10 Şubat 1984, Ankara.

Kılınç, K. ve Uyan, M., (2003), "Beton Karışım Suyundaki Sülfat Tuzlarının Çimento Harcı Özelliklerine Etkisi", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1 – 2 – 3 Ekim 2003, Cemal Reşit Rey Konser Salonu, İstanbul.

Koç, Ö., (1997), Bor Atıkları, Uçucu Kül ve Silis Dumanının İnşaat Tuğlası Üretiminde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Lea, F.M, (1970), The Chemistry of Cement and Concrete, Edward Arnold (Publishers) Ltd., London.
- Lin, K.L., Wang, K.S., Lee, T.Y. ve Tzeng, B.Y., (2003), "The Hydration Characteristics of MSWI Fly Ash Slag Present in C_3S ", Cement and Concrete Research, 33: 957-964.
- Malhotra, V.M., (1996), "İlave Bağlayıcı Maddelerin Betondaki Önemi", (Çev. S. Güven) Hazır Beton Dergisi, 13(3): 33.
- Massazza, F., (1989), "Puzolanlar", (Çev.B.Atalay, H. Çolakoğlu, F. Ertürk, F. Kantaş), Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Semineri, 11 N 12 Mayıs 1989, Ankara.
- Mirza, J., Mirza, M. S., Roy, V. ve Saleh, K., (2002) "Basic Rheological and Mechanical Properties of High _Volume Fly Ash Grouts", Construction and Building Materials, 16: 353-363.
- Monterio, P.J.M ve Kurtis, K.E., (2003), "Time to Failure for Concrete Exposed to Severe Sulfate Attack", Cement and Concrete Research, 33: 987-993.
- Oktar, O.N., (1984), "Beton Bileşimi Hesaplarında Prensipler", Beton Semineri, 6 N 10 Şubat 1984, Ankara.
- Özcan, M., (1997), Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayısının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.
- Özturan, T., (1991), "Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkılı Maddelerinin Etkinliği", 2. Ulusal Beton Kongresi, 27 N 28 N 29 N 30 Mayıs 1991, İTÜ, İstanbul.
- Özturan, T., (1993), "Uluslararası IV. Canmet Acı Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 18 N 19 Kasım 1993, Tek Genel Müdürlüğü Toplantı Salonu, Ankara.
- Pigeon, M., Garnier, F., Pleau, R. ve Aitcin, P.C., (1993), "Influence of Drying on the Chloride Ion Permeability of HPC", Concrete International, 15: 65-69.
- Santhanam, M., Cohen, M.D. ve Olek, J., (2003), "Mechanism of Sulfate Attack : a Fresh Look Part 2. Proposed Mechanisms", Cement and Concrete Research, 33: 341-346.
- Shannag, M.J ve Shaia, H.A, (2003), "Sulfate Resistance of High-Performance Concrete", Cement & Concrete Composites, 25: 363-369.
- Skalny, J., Odler, I. ve Young, F., (2000), "Discussion of the Paper Sulfate Attack or is It?", Cement and Concrete Research, 30: 161-162.
- Şengül, F. ve Filibeli, A., (1996), "Hazır Beton Tesislerinde Su Kullanımı, Atıksu Kaynakları ve Çevre Sorunları İçin Çözüm Önerileri", Hazır Beton Dergisi, 15(3): 46-52.
- Şengül, Ö., Taşdemir, C., Kuruç, Ş. ve Yüceer, Z., (2003), "Agrega Türünün Farklı Beton Sınıflarının Aşınma Dayanımına Etkisi ", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1 N 2 N 3 Ekim 2003, Cemal Reşit Rey Konser Salonu, İstanbul.

Tian, B. ve Cohen, M.D., (2000), "Does Gypsum Formation During Sulfate Attack on Concrete Lead to Expansion?", Cement and Concrete Research, 30: 117-123.

Tokay, M., (1993), "Betonda Uçucu Kül Kullanımı", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 18 N 19 Kasım 1993, Tek Genel Müdürlüğü Toplantı Salonu, Ankara.

Tokay, M. ve Erdoğan, K., (2001), "Cüruflar ve Cürufllu Çimentolar", Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu.

Tonak, T., Atay, Y. ve Ertürk, F., (1989), "Termik Santral Atık Maddelerin Çimento Üretiminde Kullanımı İle Enerji Tasarrufu", Çimento Sanayiinde Enerji Tasarrufu Semineri, 19 N 20 Ekim 1989, Ankara.

Tonak, T., Öz, U., Sipahi, F. ve Atay, Y., (1994), "Tras Katılmış Çimentoların Sülfatlı Sulara Dayanıklılığı", Çimento Bülteni, 328:1-17.

TS EN 196-1, (2002), "Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini", Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinoğlu, A., (2003), Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), Ankara.

Wasti, Y., (1993), "Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 18 N 19 Kasım 1993, Tek Genel Müdürlüğü Toplantı Salonu, Ankara.

Yazıcı, H., Türkel, S., Yiğitler, H. ve Aydın, S., (2003), "Beton İçindeki Bağlayıcı Miktarının Betonun Deniz Suyuna Dayanıklılığına Etkisi", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1 N 2 N 3 Ekim 2003, Cemal Reşit Rey Konser Salonu, İstanbul.

Yeğinoğlu, A., (2003), Çimento Yeni Bir Çağın Malzemesi, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), Ankara.

Yıldırım, H., Gülseren, H., Uyan, M. ve Kemerli M.K., (2003), "Geçirimsizlik Sağlayan Katkı Türlerinin Betonun Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1 N 2 N 3 Ekim 2003, Cemal Reşit Rey Konser Salonu, İstanbul.

INTERNET KAYNAKLARI

- [1] www.akcansa.com.tr
- [2] www.cimsa.com.tr/urunler.htm
- [3] www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci712/Chap6-modifi.ppt
- [4] www.claytonsonline.com
- [5] <http://ekutup.dpt.gov.tr/madencil/sanayiha/oik625.pdf>
- [6] www.geocities.com/agregakalite/b_files/beton_gen.htm
- [7] http://geoinfo.nmt.edu/new_cool.html
- [8] www.irishcement.ie/products_normal
- [9] <http://kbla.com>
- [10] <http://www.maden.org.tr/yeni3/yayinlar/kitaplar/madenciliksektoru2002/cimentosektoru2002>
- [11] http://www.maden.org.tr/www/7.BYKP/ekutup96/o491/cimento_hammaddeleri_kalker
- [12] www.oysa.com.tr
- [13] www.rjlg.com
- [14] www.sierrareadymix.com/concrete_101/concrete_101.html
- [15] www.slagcement.org/info_sheets/mitigating_sulfate_attack
- [16] www.teriin.org/energy/flyash.htm#need
- [17] www.thbb.org/tr/beton/incimento.htm
- [18] www.wrashg.org/product.htm
- [19] www.yibitas_corum_propro

EK BETON ÇALIŞMASI

Bu çalışma, Gemlik Liman ve Depolama Tesisi inşaatında kullanılacak betonların farklı sulardaki dayanımını incelemek amacıyla yapılmıştır. Kullanılan TÇ 32,5 çimentosu Bursa Çimento Fabrikası'ndan alınmıştır ve katkı oranı %30'dur. Çimentonun kimyasal analizleri Çizelge EK.1'de, fiziksel özellikleri Çizelge EK.2'de verilmiştir. Ayrıca bu çizelgelerde puzolanik katkı olan trasın da özellikleri yer almaktadır. Çimento dozajı 375 kg/m^3 olarak hazırlanan numunelere farklı oranlarda agregalar katılarak üç farklı program oluşturulmuştur. Agregalar olarak kum ve Bursa Kester mıcırı kullanılmıştır. Agregaların elek analizleri Çizelge EK.3'de verilmiştir. Hazırlanan beton numuneleri için $d = 15 \text{ cm}$, $h = 30 \text{ cm}$ olan silindirik kalıplar kullanılmıştır. Bu kalıplar $\text{pH} = 6$ olan sülfatlı su, $\text{pH} = 9$ olan deniz suyu (Mudanya) ve $\text{pH} = 8$ olan normal su havuzlarında bekletilmiştir. TS 24 standardına göre 14 günde bir her üç havuzunda suları değiştirilmiştir. Dayanım ölçümü kırma preste silindirik şeklinde iken kırılıp, Çizelge EK.4'de verilen çevirme faktörüne göre küp dayanımına çevrilmiştir. Farklı sulardaki her üç programa göre hazırlanan denemelerin dayanım sonuçları Çizelge EK.5'te verilmiştir. Şekil EK.1'de limandan alınan görüntüler sunulmuştur (Bursa Çimento).

Çizelge EK.1 Kullanılan çimentoların kimyasal analizleri, (Bursa Çimento)

Çimento Tipi	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Serbest CaO (%)	Kızdır.Kaybı (%)
Program 1 ve 2 için TÇ 32,5	19,66	7,19	3,03	49,84	1,60	2,24	0,95	3,49
Program 3 için TÇ 32,5	12,31	6,73	3,47	54,88	2,20	1,95	1,57	2,18
Kullanılan Tras	67,89	11,64	2,44	6,89	1,42	-	-	7,68

Çizelge EK.2 Kullanılan çimentoların fiziksel analizleri, (Bursa Çimento)

Çimento Tipi	90 μ (%)	200 μ (%)	Özgül Yüzey (cm ² /gr)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Priz baş. (saat)	Priz sonu (saat)
Program 1 ve 2 için TÇ 32,5	2,4	0,0	4294	2,86	02:25	03:40
Program 3 için TÇ 32,5	6,8	0,3	3277	2,92	02:20	03:50
Kullanılan Tras	7,8	0,3	6107	2,46	-	-

Çizelge EK.3 Agregâ elek analizleri, (Bursa Çimento)

ELEKLER (mm)	Program 1 için Agrega (%)	Program 2 için Agrega (%)	Program 3 için Agrega (%)
0,25	9,00	9,50	9,65
0,5	18,62	20,11	21,49
1	28,76	30,90	32,55
2	33,47	35,65	36,72
4	45,27	47,33	46,46
8	52,13	54,32	52,94
16	96,37	96,53	96,26
32	100,00	100,00	100,00

Çizelge EK.4 Silindir basınç dayanımını, küp basınç dayanımına çevirme faktörü değerleri

λ	Çevirme Faktörü (f) (d=10)	Çevirme Faktörü (f) (d=15)
0,50	1,37	1,44
0,75	1,12	1,18
1,00	1,00	1,05
1,25	0,93	0,97
1,50	0,87	0,92
1,75	0,84	0,88
2,00	0,81	0,85

$$B_k = B_s / f$$

B_k : Küp dayanımı

B_s : Silindir dayanımı

f : Faktör

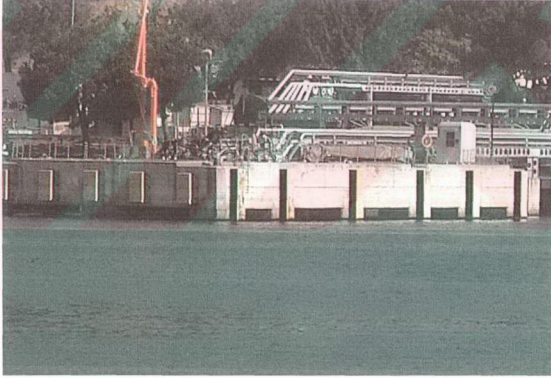
$$\lambda = h / d$$

h : Silindir yüksekliği, (cm)

d : Silindir çapı, (cm)

Çizelge EK.5 Beton örneklerinin farklı sulardaki dayanımları (N/mm²), (Bursa Çimento)

Çimento Tipi	Havuz Suları	Kum	Agrega (0-10)	Agrega (10-20)	Çimento Miktarı	Su Miktarı	3 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	60 GÜN	90 GÜN
Program 1 TÇ 32,5	Normal	400	600	795	375	183	15,4	22,6	32,8	36,4	38,9
	Sülfatlı	"	"	"	"	183	16,7	23,4	33,2	40,7	41,0
	Deniz	"	"	"	"	183	13,5	23,3	31,0	34,1	34,5
Program 2 TÇ 32,5	Normal	470	565	760	375	192	15,0	21,5	31,4	35,6	38,1
	Sülfatlı	"	"	"	"	200	15,4	23,6	32,4	36,6	40,7
	Deniz	"	"	"	"	192	13,3	21,2	30,0	34,5	36,3
Program 3 TÇ 32,5	Normal	590	375	810	375	209	16,2	27,2	32,8	39,4	47,6
	Sülfatlı	"	"	"	"	183	17,0	24,6	34,8	42,1	44,1
	Deniz	"	"	"	"	209	15,8	26,4	34,8	39,0	38,1



Şekil EK.1 Gemlik Limanı görüntüleri

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 22.07.1980

Doğum yeri İstanbul

Lise 1994-1998

Lisans 1998-2002

Yüksek Lisans 2002-2004

Kadir Has Lisesi

Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak.
Kimya Mühendisliği Bölümü

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri
Enstitüsü Kimya Müh. Anabilim Dalı, Kimya
Mühendisliği Programı