

Boraks Üretiminde Ortaya Çıkan Atık Malzemenin
Çimento İçerisinde
Puzolanik Malzemeler İle Birlikte Kullanılmasının Çimento Üzerindeki Etkileri

Ali Uğurlu

DOKTORA TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart 2009

The Effects of Utilization of Waste Material Generated During Borax Production
with Pozzolanic Materials within Cement

Ali Uğurlu

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Chemical Engineering

March 2009

BORAKS ÜRETİMİNDE ORTAYA ÇIKAN ATIK MALZEMENİN
ÇİMENTO İÇERİSİNDE PUZOLANİK MALZEMELER İLE BİRLİKTE
KULLANILMASININ ÇİMENTO ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Ali Uğurlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Kimyasal Teknolojiler Bilim Dalı
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Mine Özdemir

Mart 2009

ONAY

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı doktora öğrencisi Ali Uğurlu'nun DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Boraks Üretiminde Ortaya Çıkan Atık Malzemenin Çimento İçerisinde Puzolanik Malzemeler İle Birlikte Kullanılmasının Çimento Üzerindeki Etkileri" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Mine Özdemir

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Mine Özdemir

Üye: Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Üye: Prof. Dr. O. Sermet Kabasakal

Üye: Prof. Dr. Hürriyet Erşahan

Üye: Prof. Dr. Süleyman Kaytakoğlu

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun..... tarih
ve..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK
Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada boraks üretiminde ortaya çıkan katı atıkların çimento içerisinde uçucu kül ve volkanik tuf ile birlikte katkı maddesi olarak değerlendirilmesi ele alınmıştır. Türkiye 803 milyon ton bor cevheri ile dünyadaki bor cevheri rezervinin yaklaşık % 63'üne sahiptir. Türkiye'deki en önemli bor cevherleri kolemanit, üleksit ve tinkaldir. Boraks üretiminde kullanılan tinkal minerali ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Bu üretim sırasında her yıl 400.000 ton katı atık ortaya çıkmakta ve çevreye verilmektedir. Bu atık kil pestili olarak adlandırılmaktadır. Kil pestilinin herhangi bir şekilde değerlendirilmemesi durumunda çevre sorunlarına yol açtığı da bilinmektedir. Kil pestili atık malzemesi içerisinde B_2O_3 , dolomit ve montmorillonit bulunmaktadır. Araştırmacılar tarafından daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda, kil pestilinin çimento içerisinde ancak % 5 oranında kullanılabilmesi ortaya konmuştu. Bu düzeyde bir kil pestili kullanımının verimli olmayacağı düşüncesinden hareketle bu çalışmada puzolanik açıdan daha aktif olan uçucu kül ve volkanik tuf gibi puzolanlar ile çimentodaki kil pestili kullanım oranının artırılması amaçlanmıştır. Uçucu kül ve volkanik tuf gerek ülkemizde çok bulunması ve gerekse de çimentoya pişirilmeden sadece öğütülerek katıldıkları için ekonomik malzemelerdir. Ayrıca içine katıldıkları çimentoların bazı teknik özelliklerini de iyileştirdikleri için çimento üretiminde kullanılması tercih edilen malzemelerdir.

Yapılan çalışmalarda önce kil pestili ile uçucu kül ile ve daha sonra da volkanik tuf ile değişik karışımlar üzerinde deneyler gerçekleştirilerek en iyi puzolan+kil pestili karışımları saptanmıştır. İkinci deneysel çalışmada ise belirlenen % 10 ve % 15 kil pestili kullanım oranlarında değişik oranlarda kil pestili+uçucu kül+volkanik tüften oluşan farklı karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlar üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar portland çimentosu ve Türk standartları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, kil pestilinin çimento içerisinde bu puzolanlar ile % 10-15 oranında kullanılabilmesi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bor, çimento, puzolan, kil pestili, uçucu kül, volkanik tuf

SUMMARY

In this study, utilization of clay wastes which are generated during borax production as an additive with fly ash and volcanic tuff within cement was discussed. Turkey has 803 million tons boron reserves, which consist of 63 % of the total world boron reserves. The most important boron ores in Turkey are colemanite, ulexite and tincal. The tincal mineral which is used in borax production is very important from economic point of view. During the processing of borax ore 400.000 tons of solid wastes are formed per year and given to environment. This solid material is called clay waste. It's well known that clay wastes can cause environmental issues if they are not utilized in any way. This waste material consist of B_2O_3 , dolomite and montmorillonite. Early studies performed by researchers have been revealed that only 5 % of clay waste within cement can be utilized. Obviously utilization rate of clay wastes at this ratio won't be efficient. Therefore in this study it is aimed to increase the utilization ratio of clay wastes within cement by pozzolanas like fly ash and volcanic tuff which are more active from pozzolanic point of view. Fly ash and volcanic tuff are economical materials because they are very common in Turkey and they are being added to cement only after grained without calcined. In addition they are preferred materials in cement production because they also improve some technical characteristics of the cement they mix with.

During the studies, experiments made with different mixtures consist of firstly clay waste and fly ash then clay waste and volcanic tuff in order to determine the best pozzolana+clay waste mixtures. Secondary experimental study covers the preparation of clay waste+fly ash+volcanic tuff mixtures with different ratios considering 10 % and 15 % clay waste usage rates. The results obtained from experiments made with the mixtures were compared with Portland cement and Turkish standards. Finally in this study it was determined 10-15 % of clay waste within cement can be utilized by the help pozzolanas.

Key words: Boron, cement, pozzolan, clay waste, fly ash, volcanic tuff

TEŞEKKÜR

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü'nde doktora tezi olarak yaptığım bu çalışmada danışmanlığımı üstlenerek beni yönlendiren, bilgi, anlayış ve yardımlarını esirgemeyen hocam Doç. Dr. Mine ÖZDEMİR'e, beni doktora yapmak için teşvik eden, yönlendiren, bilgi anlayış ve yardımlarını esirgemeyen, yapı malzemesi laboratuvarının olanaklarından yararlanmamı sağlayan, çalışmalarımda yardımlarını gördüğüm tez izleme komitesi üyesi Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU'ya, fikirleri ile bana yardımcı olan ODTÜ öğretim üyesi Prof. Dr. Mustafa TOKYAY'a, görüşleri ile çalışmamda katkı sağlayan tez izleme komitesi üyesi Prof. Dr. O. Sermet KABASAKAL'a, tez çalışmalarım sırasında her türlü akademik konuda yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN'a, deneylerin gerçekleşmesi konusunda yardımlarını gördüğüm Yrd. Doç. Dr. Ö. Fatih ESER, Dr. Mehmet CANBAZ ve Dr. Cenk Karakurt'a, ders aldığım ve laboratuvar olanaklarından yararlandığım Gazi Üniversitesi Yapı Malzemesi Bölümü öğretim üyelerine, laboratuvar olanaklarından yararlandığım Fen – Tek ve Teknik Araştırma Laboratuvarı yetkili ve çalışanlarına, laboratuvar çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan teknisyen Sevgin YILMAZ'a ders aldığım İnşaat Mühendisliği ve Kimya Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, beni yetiştiren, bana olanak sağlayan ÜLKEME, bu güne değin maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen ve bu günlere gelmemi sağlayan değerli ailem; eşim, oğlum ve kızıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xx
1. GİRİŞ	1
2. BOR	6
2.1. Bor Elementi ve Özellikleri.....	6
2.2. Önemli Bor Mineralleri	7
2.2.1. Tinkal (Boraks)	7
2.2.2. Üleksit	9
2.2.3. Kolemanit	9
2.2.4. Kernit	10
2.2.5. Probertit	10
2.2.6. Sasolit	10
2.3. Önemli Bor Bileşikleri.....	11
2.3.1. Borik asit	11
2.3.2. Susuz borik asit	11
2.2.3. Boraks dekahidrat	11
2.2.4. Boraks pentahidrat	12
2.2.5. Susuz boraks	12
2.2.6. Sodyum perborat	12
2.4. Bor Yataklarının Oluşumu	12
2.4.1. Dünyada ve Türkiyede bor yatakları	13
2.4.2. Eskişehir Kırka bor yatakları	14

İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4.3. Kütahya Emet bor yatakları	14
2.4.4. Balıkesir Bigadiç bor yatakları	15
2.4.5. Bursa Mustafa Kemal Paşa bor yatakları	15
2.5. Borun Kullanım Alanları	15
2.5.1. Cam ve seramik endüstrisi	17
2.5.2. Tarımda borun kullanılması	18
2.5.3. Sabun ve diğer temizleyiciler	18
2.5.4. Emaye işleminde ve metalürjide bor kullanımı	18
2.5.5. Süper kaygan yüzey oluşumunda bor kullanımı	19
2.5.6. Diğer kullanım alanları	19
2.6. Borun Çevresel Etkileri.....	20
2.7. Bor Üretimi ve Teknolojisi.....	22
2.7.1. Kırka Boraks İşletmesi	22
2.7.2. Konsantratör tesisi.....	23
2.7.3. Bor türevleri tesisi	25
2.7.3.1. Çözme bölümü	25
2.7.3.2. Kristallendirme bölümü	26
2.7.3.3. Kurutma bölümü.....	26
2.7.3.4. Ergitme bölümü	26
2.7.4. İşletmede oluşan atıklar.....	27
3. ÇİMENTOLAR	29
3.1. Çimento Üretimi	29
3.2. Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler ve Çimentonun İç Yapısı. .	31
3.3. ÇimentoLarın Bazı Önemli Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	34
3.3.1. Hidratasyon	34
3.3.2. Priz ve katılaşma	36
3.3.3. Sertleşme	37

İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
3.3.4. Hacim sabitliği	38
3.3.4. Çimento türleri ve diğer özellikleri	39
4. MİNERAL KATKILAR.....	44
4.1. Doğal ve Yapay ve Puzolanlar.....	47
4.2. Uçucu Kül.....	53
4.2.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması.....	55
4.2.2. Uçucu küllerin kimyasal ve minerolojik bileşimleri.....	57
4.2.3. Uçucu küllerin morfolojik özellikleri.....	58
4.2.4. Uçucu küllerin çimentolu sistemlere sağladığı yararlar.....	60
4.3. Volkanik Tüf.....	62
5. BOR ATIKLARININ YAPI MALZEMESİ ÜRETİMİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÇİMENTODA PUZOLAN KULLANIMI İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	67
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	75
6.1. Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	75
6.1.2. Çimento	75
6.1.2. Standart harç kumu	76
6.1.3 Karma suyu	76
6.1.4. Uçucu kül.....	77
6.1.5. Volkanik tüf.....	80
6.1.6. Kil pestili atık malzemesi.....	83
6.2. Kabul Edilen İlkeler ve Üretilen harç Serileri	87
6.2.1. Harç üretimi, örneklerin hazırlanması ve bakımı	89
6.3. Deney Yöntemi	93
6.3.1. Eğilmede çekme dayanımı deneyi	94
6.3.2. Basınç dayanımı deneyi	95

İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
6.3.3. Alkali silis Reaksiyonu.....	97
6.3.4. Ultrases geçiş süresi	99
6.3.5. Priz başlangıç ve bitiş süreleri.....	101
6.3.6. Hacim genleşmesi deneyi	103
6.3.7. Birim ağırlık deneyi	104
6.3.8. Dayanıklılık deneyleri	105
6.3.9. Taramalı elektron mikroskobu ile içyapı incelemeleri.....	106
7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	108
7.1. Birinci Deneysel Çalışma.....	108
7.1.1. Basınç dayanımı.....	108
7.1.2. Eğilmede çekme dayanımı.....	127
7.2. İkinci Deneysel Çalışma.....	143
7.2.1. Basınç dayanımı	144
7.2.2. Eğilmede çekme dayanımı	147
7.2.3. Alkali Silis Reaksiyonu.....	150
7.2.4. Ultrases geçiş hızı	153
7.2.5. Priz başlangıç ve bitiş süresi	157
7.2.6. Birim ağırlık	160
7.2.7. Hacim genleşmesi.....	161
7.2.8. Dayanıklılık.....	163
7.2.9. Taramalı elektron mikroskop ile iç yapı incelemeleri.....	168
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	177
9. KAYNAKLAR DİZİNİ	181
ÖZGEÇMİŞ.....	193

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Borun kullanım alanları	16
2.2. Kırka Boraks İşletmesi konsantratör tesisi akım şeması	24
2.3. Kırka Boraks İşletmesi bor türevleri tesisi akım şeması	28
3.1. Hidrate olmuş bir çimento mikroyapısı	37
4.1. a) Betonda Ca(OH) ₂ oluşumu.....	49
4.1. b) Puzolanın Ca(OH) ₂ bağlaması.....	49
4.2. Uçucu kül SEM görüntüsü.....	59
4.3. Volkanik tuf (Zeolit) SEM görüntüsü.....	63
4.4. Türkiye'deki zeolit yatakları.....	65
6.1. Uçucu külün X-ray difraktogramı	78
6.2. Volkanik tufün X-ray difraktogramı.....	82
6.3. Kil pestili atık malzemesinin X-ray difraktogramı	86
6.4. Harç makinesinde harcın karıştırılması.....	90
6.5. Numune kalıpları.....	91
6.6. Kür edilen örnekler.....	93
6.7. Eğilmede çekme deneyi.....	95
6.8. Basınç dayanımı deneyi.....	96
6.9. ASR deney örnekleri	98
6.10. Ultrases geçiş süresinin ölçümü.....	101
6.11. Vicat iğnesi ile priz süresi ölçümü.....	102
6.12. Le Chatelier aleti ile hacim genişmesi ölçümü.....	103
6.13. Na ₂ SO ₄ ve MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen örnekler.....	105
7.1. % 0 UK içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.....	112
7.2. % 10 UK içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.....	112
7.3. % 20 UK içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.....	113
7.4. % 30 UK içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.....	113
7.5. Değişik oranda UK içeren karışımların 7 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.....	114

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.6. Değişik oranda UK içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.....	114
7.7. Değişik oranda UK içeren karışımların 90 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.....	115
7.8. % 0 VT içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.....	115
7.9. % 10 VT içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.....	116
7.10. % 20 VT içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.....	116
7.11. % 30 VT içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.....	117
7.12. Değişik oranda VT içeren karışımların 7 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.....	117
7.13. Değişik oranda VT içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.....	118
7.14. Değişik oranda VT içeren karışımların 90 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.....	118
7.15. % 5 KP içeren karışımların basınç dayanımının UK ile değişimi.....	119
7.16. % 10 KP içeren karışımların basınç dayanımının UK ile değişimi.....	119
7.17. % 15 KP içeren karışımların basınç dayanımının UK ile değişimi.....	120
7.18. % 20 KP içeren karışımların basınç dayanımının UK ile değişimi.....	120
7.19. % 25 KP içeren karışımların basınç dayanımının UK ile değişimi.....	121
7.20. Değişik oranda KP içeren karışımların 7 günlük basınç dayanımlarının UK ile değişimi.....	121
7.21. Değişik oranda KP içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımlarının UK ile değişimi.....	122
7.22. Değişik oranda KP içeren karışımların 90 günlük basınç dayanımlarının UK ile değişimi.....	122
7.23. % 5 KP içeren karışımların basınç dayanımının VT ile değişimi.....	123
7.24. % 10 KP içeren karışımların basınç dayanımının VT ile değişimi.....	123

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.25. % 15 KP içeren karışımların basınç dayanımının VT ile değişimi.....	124
7.26. % 20 KP içeren karışımların basınç dayanımının VT ile değişimi.....	124
7.27. % 25 KP içeren karışımların basınç dayanımının VT ile değişimi.....	125
7.28. Değişik oranda KP içeren karışımların 7 günlük basınç dayanımının VT ile değişimi.....	125
7.29. Değişik oranda KP içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımının VT ile değişimi.....	126
7.30. Değişik oranda KP içeren karışımların 90 günlük basınç dayanımının VT ile değişimi.....	126
7.31. % 0 UK içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi...	128
7.32. % 10 UK içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.	128
7.33. % 20 UK içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.	129
7.34. % 30 UK içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.	129
7.35. Değişik oranda UK içeren karışımların 7 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	130
7.36. Değişik oranda UK içeren karışımların 28 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	130
7.37. Değişik oranda UK içeren karışımların 90 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	131
7.38. % 0 VT içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi	131
7.39. % 10 VT içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi	132
7.40. % 20 VT içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi	132
7.41. % 30 VT içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi	133
7.42. Değişik oranda VT içeren karışımların 7 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	133
7.43. Değişik oranda VT içeren karışımların 28 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	134

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.44. Değişik oranda VT içeren karışımların 90 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	134
7.45. % 5 KP içeren karışımın eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi....	135
7.46. % 10 KP içeren karışımın eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi...	135
7.47. % 15 KP içeren karışımın eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi...	136
7.48. % 20 KP içeren karışımın eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi...	136
7.49. % 25 KP içeren karışımın eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi...	137
7.50. Değişik oranda KP içeren karışımların 7 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	137
7.51. Değişik oranda KP içeren karışımların 28 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	138
7.52. Değişik oranda KP içeren karışımların 90 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	138
7.53. % 5 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi	139
7.54. % 10 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi	139
7.55. % 15 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi	140
7.56. % 20 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi	140
7.57. % 25 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi	141
7.58. Değişik oranda KP içeren karışımların 7 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	141
7.59. Değişik oranda KP içeren karışımların 28 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	142
7. 60. Değişik oranda KP içeren karışımların 90 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.....	142
7.61. % 10 KP içeren karışımlarda basınç dayanımının toplam puzolan oranı ile değişimi.....	145
7.62. % 15 KP içeren karışımlarda basınç dayanımının toplam puzolan oranı ile değişimi.....	145

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.63. % 10 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının toplam puzolan oranı ile değişimi.....	148
7.64. % 15 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının toplam puzolan oranı ile değişimi.....	148
7.65. Toplam puzolan miktarı ile değişen boy uzama oranı.....	152
7.66. Çalışmada kullanılan bir harç çubuğunda ortaya çıkan ASR çatlakları.....	152
7.67. % 10 KP içeren karışımların ultrases geçiş hızının toplam puzolan oranı ile değişimi.....	155
7.68. % 15 KP içeren karışımların ultrases geçiş hızının toplam puzolan oranı ile değişimi.....	155
7.69. % 10 KP içeren karışımların priz süresinin toplam puzolan oranı ile değişimi.....	158
7.70. % 15 KP içeren karışımların priz süresinin toplam puzolan oranı ile değişimi.....	158
7.71. Birim ağırlığın toplam puzolan oranı ile değişimi.....	161
7.72. Hacim genişmesinin toplam puzolan oranı ile değişimi.....	162
7.73. Na ₂ SO ₄ çözeltilinde bekletilen örneklerdeki ağırlık kaybı.....	166
7.74. MgSO ₄ çözeltilinde bekletilen örneklerdeki ağırlık kaybı.....	166
7.75. Na ₂ SO ₄ ve MgSO ₄ çözeltilinde bekletilen örneklerde ortaya çıkan hasarlar	167
7.76. U1 ve V1 örneğine ait 250 büyütme bir mikrografi.....	169
7.77. U1 ve V1 örneğine ait 5000 büyütme bir mikrografi.....	169
7.78. K1 örneğine ait 1000 büyütme bu mikrografi.....	170
7.79. K3 örneğine ait 1000 büyütme mikrografi.....	171
7.80. K4 örneğine ait 1000 büyütme mikrografi.....	171
7.81. Na ₂ SO ₄ ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K1 örneği mikrografisi.....	172
7.82. Na ₂ SO ₄ ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K5 örneği mikrografisi.....	173

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>sayfa</u>
7.83. Na ₂ SO ₄ ile yapılan 60 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K4 örneği mikrografisi.....	174
7.84. MgSO ₄ ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K1 örneği mikrografisi.....	175
7.85. MgSO ₄ ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K5 örneği mikrografisi.....	175
7.86. MgSO ₄ ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K4 örneği mikrografisi.....	176

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Önemli bazı bor mineralleri ve B ₂ O ₃ içerikleri	8
2.2. Önemli bor bileşikleri ve B ₂ O ₃ içerikleri	9
2.3. Türkiye’deki borat yatakları	14
2.4. Bor ve bileşiklerinin kullanım alanları	17
3.1. Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları	32
3.2. Çimentonun ana bileşenleri	32
3.3. Portland çimentosu ana bileşenlerinin özellikleri	33
3.4. TS EN 197-1’e göre çimentoların bileşimleri	40
3.5. TS EN 197-1’e göre çimentoların fiziksel özellikleri	41
3.6. Çimento tipleri için gerekli kimyasal özellikler	42
3.7. Çimentoların karakteri ve kullanıldıkları yerler	43
4.1. Puzolanların kimyasal özellikleri	50
4.2. Bazı puzolanların ortalama kimyasal bileşimleri ile özgül yüzeyleri.....	52
4.3. Uçucu kül uygunluk kriterleri	56
6.1. Çalışmalarda kullanılan Portland çimentosunun özellikleri	75
6.2. Standart kumun elek analizi	76
6.3. Kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi	77
6.4. Kullanılan Tunçbilek Termik santrali uçucu külünün özellikleri.....	77
6.5. Tunçbilek uçucu külünün değerlendirilmesi.....	80
6.6. Kullanılan volkanik tüfün özellikleri.....	81
6.7. Kullanılan puzolanların dayanım aktivite indeksleri	83
6.8. Kil pestili atık malzemesinin özellikleri	84
6.9. Birinci deneysel çalışma kapsamında üretilen örnekler.....	87
6.10. İkinci deneysel çalışma kapsamında üretilen örnekler.....	88
6.11. Karıştırıcının karıştırma kanadı hızları	91
6.12. Harç çubuklarında kullanılan agrega granülometrisi.....	98
6.13. Ultrasonik test yöntem ile beton kalitesinin değerlendirilmesi.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.1. Uçucu kül içeren karışımların basınç ve eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçları	109
7.2. Volkanik tüf içeren karışımların basınç ve eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçları	110
7.3. Basınç dayanımı deneyi sonuçları	144
7.4. Kullanılan malzemelerin alkali miktarları.....	150
7.5. ASR deneyi sonuçları ve ASR sınır koşulları.....	151
7.6. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları.....	154
7.7. Priz başlangıç ve bitiş süresi deneyi sonuçları.....	157
7.8. Birim ağırlık deney sonuçları	160
7.9. Na ₂ SO ₄ ile yapılan dayanıklılık deney sonuçları	164
7.10. MgSO ₄ ile yapılan dayanıklılık deney sonuçları	165

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
A ⁰	Angström
°C	Santigrat derece
%	Yüzde
µm	Mikro metre
m	Metre
α	Basınç dayanımı
P	Kırılma yükü
L	Mesafe
B	Prizma kenar uzunluğu
A	Alan
lt	Litre
gr	Gram
V	Sesüstü dalga hızı
L _{i,x,g}	Boy
N	Newton
R ²	Regresyon katsayısı

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
A.B.D.	Amerika Birleşik Devletleri
KMO	Kimya Mühendisleri Odası
BOREN	Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü
TSE EN	Türk Standartları Avrupa normu
TSE	Türk Standartlar Enstitüsü
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
BPH	Boraks pentahidrat
BDH	Boraks dekahidrat
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASR	Alkali silika reaksiyonu

MPa	Mega paskal
kHz	Kilohertz
TMMOB	Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
KP	Kil pestili
UK	Uçucu kül
VT	Volkanik tuf
Ç	Çimento
CEM	Cement
S-ç	Su-çimento
XRD	X ışını difraksiyonu (X-ray diffraction)
XRF	X ışını floresans (X-ray floresance)
SEM	Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bor madenciliği konusunda Türkiye dünya bor rezervlerinin % 63'üne sahip olup ABD'den sonra en büyük bor mineralleri üreticisidir. Borun yaşamın çok değişik alanlarında kullanılma gerçeği de dikkate alınırca bu madenin ülkemiz açısından büyük bir stratejik öneme sahip olduğu kolayca anlaşılır. Özellikle yakın bir gelecekte borun enerji kaynağı olarak da değerlendirilebileceği olasılığı düşünüldüğünde bu durumun daha dikkatli değerlendirilmesi zorunluluğu ortaya çıkar. Türkiye'de Zonguldak – Mersin hattının batısında kalan neojen göl tortulları içerisinde yer alan bor yatakları 19. yüzyılın ikinci yarısında yabancı şirketler tarafından işletilmeye başlanmıştır. 1968 yılında yabancı şirket imtiyazlarının devlete devredilmesi ile bor madenleri Etibank ve bir kısım küçük ölçekli ulusal şirket tarafından işletilmeye başlanmıştır (KMO, 2003). 1978 yılında bu madenlerin devletçe işletilmesi kararından sonra madencilik, yatırım, üretim ve pazarlama konusundaki tüm aktiviteler Etibank tarafından yerine getirilmeye başlanmıştır. Devletleştirme kararından bu güne kadar geçen yaklaşık 25 yıllık süre içerisinde gerek madencilik ve gerekse rafine bor ürünleri üretiminde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. 1978 yılında 600 milyon ton olarak bilinen rezervin yapılan çalışmalar sonucu 2 milyar ton civarında olduğu tespit edilmiştir. Yine 1978 yılı itibari ile 25.000 ton/yıl civarında olan rafine bor üretim kapasitesi yapılan yatırımlar ile 2003 yılında 750.000 ton/yıl düzeyine ulaşmıştır. Bütün bunların sonucunda 1970'li yıllarda % 16 olan pazar payımız da bu gün % 35 düzeyine ulaşmıştır (KMO, 2003).

Türkiye, geçen yıllardan bugüne, bor madeninin sahip olduğu ekonomik ve stratejik öneme rağmen bor madenciliği konusunda yeterince yatırım yapmamış, bu güne kadar daha çok hammadde ihracı ile yetinmiş, yarı mamul ve mamul bor ürünlerinin üretimine gerekli önemi ne yazık ki vermemiştir. Bu durum bor madenlerinden elde edilen gelirin düşük kalmasına neden olmuştur. Bu olumsuzluğun ortaya çıkmasında bir başka etken ise bor ürünleri iç tüketiminin oldukça düşük olması gerçeğidir. Türkiye 2003 yılı itibari ile toplam bor mineralleri üretiminin yaklaşık % 10'unu iç piyasaya kullanılmak üzere vermekte geri kalan % 90'ını ise ihraç etmektedir (Maden Yasası, 2002).

2003 yılında Türkiye Büyük Millet Meclisi Plan ve Bütçe Komisyonu kararı ile Ulusal Bor Araştırma Enstitüsünün (BOREN) kurulması konusu gündeme alınarak kabul edilmiştir. Mevcut üretim ve proseslerin geliştirilmesi, ürün kalitesinin yükseltilmesi, iç tüketimin artırılması, özel bor ürünlerinin üretimine yönelik konularda araştırma yapılması gibi amaçlar doğrultusunda kurulan bu enstitü 2004 yılı itibari ile çalışmalarına başlamıştır. Şüphesiz ki bu durum yukarıda açıklanan amaçların gerçekleşmesi doğrultusundaki çabaların yoğunlaşmasına, ekonomik ve teknik yönden güçlenmiş bir üretim anlayışının bor stratejisi için iyi bir alt yapı oluşturulmasına ciddi anlamda katkıda bulunacaktır.

Bilindiği üzere bor mineralleri karasal koşullarda az enerji ile akan yüzey suyu ve göl ortamında; oluşmuş veya oluşmakta olan kil, marn ve piroklastik çökellerle (tüflerle) ara tabakalı olarak meydana gelir. Oluşan boratlar kil, marn ve piroklastiklerin üzerinde veya iç bünyelerinde bulunurlar. Boratlar bu kil ve tüfler arasında yumrular halinde bulunur. Düşük bor oksit içeriğindeki bu cevherlerden rafine bor ürünleri (bor türevleri ve bileşikleri) üretimi sırasında katı ve sıvı atıklar ortaya çıkar.

Bor tesislerinde cevherin zenginleştirilmesi işlemi sırasında kil pestili, şlam gibi atık malzemeler ortaya çıkmaktadır. Her yıl milyonlarca ton düzeyinde ortaya çıkan bu atık malzemeler herhangi bir şekilde değerlendirilmemekte genellikle tesislerin yakınında oluşturulan katı ve sıvı atık depolama alanlarında gün gittikçe büyüyen yığınlar halinde depolanmaktadır (Kavas, 1997; Elbeyli, 2000). Bilindiği üzere atık malzemeler günümüzde endüstrileşmiş ülkeler için başlı başına büyük bir problemdir. Özellikle içerisindeki boraks nedeniyle ekolojik dengeyi bozabilecek, insan ve çevre sağlığı için tehlikeli olabilecek kimyasal atıkların depolanmasında gerekli teknik koşullar yerine getirilmedikçe büyük problemlerin yaşandığı bilinmektedir. Bu sorunların çözümü; eğer atık malzemenin başka bir üretim sürecinde değerlendirme olasılığı yoksa çevre ve insan sağlığına zararlı olmayacak şekilde iyi depolanmasıdır. Bu tür depolama ise beraberinde ciddi bir ekonomik yük de getirmektedir.

Cevher zenginleştirme tesislerinden çıkan atıklar ince boyutlu (taneli, pestil, vs.) veya yoğun bir sıvı halindedir. Çevre bilinci gelişmeden önce maden yataklarının

yakınına depolanan ya da akarsu ve denizlere boşaltılan bu maddelerin son yıllarda değerlendirilmesi doğrultusunda çalışmalar yapılmaktadır. Atıkların hammadde veya katkı maddesi olarak değerlendirilmesine yönelik çalışmalardan elde edilen sonuçlar olumlu olmakla birlikte şu an atık yığınlarını azaltacak düzeyde değildir. Özellikle inşaat sanayinde; çimento, tuğla, fayans, kiremit, vs. üretiminde değerlendirilmesi için son yıllarda değişik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar; bu atıkların yukarıda sözü edilen ürünlerin üretiminde kullanılması ile teknik olarak daha üstün ve ekonomik açıdan da daha ucuz malzeme üretilebileceğini gösterir niteliktedir.

Dünyada atıkların değerlendirilmesi ile ilgili yürütülen çalışmaların tarihi son 40 yıllık bir süreci kapsamaktadır. Özellikle Avrupa ve eski doğu bloğu ülkelerinde atık problemi ekolojik dengeyi bozacak, insan ve çevre sağlığını tehdit edecek boyutlara ulaşıncaya atık sorununun çözümü için değişik alternatifler aranmaya başlanmıştır. Bu çabaların büyük bir kısmı atığın çevre ve insan sağlığını tehdit etmeyecek şekilde depolanması anlayışına dayansa da bir diğer kısmını ise atıkların ya olduğu gibi ya da fiziksel ve kimyasal yapısının başka ürünlerle değiştirilerek bir katkı maddesi olarak kullanılmasına dayanmaktadır. Bu nedenle özellikle ürün sayısındaki çeşitliliği dikkate alınarak inşaat sanayinde değişik ürünlerin üretiminde atık malzemeler değerlendirilmeye başlanmıştır. Dünyada yaşanan bu gelişmelere koşut olarak Türkiye’de de bu anlayışın gelişmesi sonucu son yıllarda atık malzemelerin başka bir malzeme içerisinde değerlendirilmesi çabaları anlam kazanmıştır. Özellikle üniversiteler gibi bilim merkezlerinde bu yöndeki çabalar azımsanmayacak ölçektedir. Yapılan ve yapılacak olan bu çalışmalar sonucunda; atıkların depolama maliyeti azalacak, çevre kirliliği en aza indirgenecek, atık malzemenin içine katıldığı madde daha ekonomik elde edilebilecek ve teknik yönden verimi daha iyi ürünler ortaya çıkabilecektir (DPT 1996; Ayyıldız, 2003).

Yapılan bu çalışma da yukarıda anlatılan gerçekler ve ana fikir dikkate alınarak yürütülmüştür. Çalışma; yaklaşık 500 milyon ton rezerve sahip olduğu bilinen Etibank Maden Grubuna ait Eti Bor Kırka Boraks İşletmesinde tinkal ve boraks pentahidrat üretimi sırasında yılda 400.000 ton düzeyinde ortaya çıkan ve kil pestili olarak adlandırılan katı atıkların çimento (dolayısıyla harç ve beton) içerisinde

değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Yine aynı şekilde ülkemizde kömürle çalışan 11 adet termik santralden her yıl 13 milyon ton civarında uçucu kül elde edilmekte ve bunun çok az bir kısmı değerlendirilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan bir diğer malzeme olan volkanik tuf açısından da ülkemiz oldukça zengin yataklara sahiptir.

Burada amaç depolanması belli bir maliyet gerektiren, teknik ve sağlık yönünden sorunlar gösteren atık bir malzeme olan kil pestili malzemesini değerlendirmek ve pişirilmeden sadece öğütülerek çimentoya katıldıkları için daha ekonomik ve teknik yönden de daha iyi bir çimento elde edilmesini sağlayan uçucu kül ve volkanik tuf gibi iki malzemeden de yararlanmaktır.

B_2O_3 içeriği % 26 - 27 arasında değişen ve dünyadaki en büyük boraks yatağı olarak bilinen Eskişehir - Kırka'daki tinkal cevheri, hammadde konsantratör tesisinde yıkama ve dağıtma yöntemi ile zenginleştirilerek tenörü % 34'lere kadar çıkartılmaktadır. Bu işlem sırasında katı halde kil pestili, çözelti halinde ise şlam adı verilen atık maddeler ortaya çıkmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan kil pestili atık malzemesi içerisinde % 7 ile % 19 arasında değişen B_2O_3 kalmaktadır. Bu çalışmada konsantratörden çıkan kil pestili atıkları tesisten alınarak fiziksel ve kimyasal özellikleri tespit edilmiştir. Yapılan bu incelemelerde yapısındaki SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 'den dolayı atığın düşük de olsa puzolanik bir karakter taşıdığı anlaşılmıştır. Puzolanların çimento hidrasyonu sırasında ortaya çıkan serbest kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı C-S-H (tobermorit) yapısını meydana getirdiği bilinir. Katı atıkların bu özeliği göz önüne alınarak çimento içerisine, uygun hale getirilmiş kil pestili atık malzemesi katılarak TS EN 197-1'de belirtilen ve çimentonun bazı özelliklerini belirlemek amacıyla tanımlanmış olan deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha önce, yüksek lisans çalışmasında kil pestili atık malzemesinin çimento içerisinde hangi ölçüde kullanılabileceği belirlenmişti (Uğurlu, 2004). Sözkonusu çalışmada kil pestilinin çimento içerisinde ağırlıkça % 5 oranında kullanılabileceği, bunun üzerindeki kullanımlarda çimento özelliklerinin kötüleştiği tespit edilmişti. Elde edilen bu sonuçlar anlamlı olmakla birlikte ortaya çıkan bu kullanım oranının çimento üretimi açısından uygulamada çok düşük kalacağı düşüncesinden hareketle bu oranın artırılması düşünülmüştür. İşte bu çalışmanın temeli de bu eksen üzerine oturtulmuştur. Bu amaçla, puzolanik aktivitesi

daha yüksek malzemeler ile kil pestilinin daha yüksek oranda kullanılabilceği düşünölmüş ve bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle ölkemizde bol bulunan ve ekonomik değeri düşük olan uçucu kül ve volkanik tuf gibi iki puzolan seçilerek bunlarla birlikte daha yüksek oranda kil pestili atık malzemesi kullanım olanakları araştırılmıştır. Bu amaçla iki kısımdan oluşan deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. I. Deneysel çalışmada kil pestili ile uçucu kül ve volkanik tuf ayrı ayrı değişik oranlarda kullanılarak en uygun puzolan + kil pestili oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmalarda çimentodan % 5, 10, 15, 20 ve 25 oranında eksiltme yapılarak yerine aynı oranda öğütölmüş kil pestili atığı kullanılmıştır. Yine bu oranlarda her bir puzolan % 0, 10, 20 ve 30 ölçüsünde kullanılarak karışımlar gerçekleştirilmiştir. Farklı kombinasyonlarda hazırlanan harç numuneleri üzerinde yapılan basınç ve eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları değerlendirilerek uçucu kül ve volkanik tuf için en uygun kil pestili kullanım oranları belirlenmiştir.

II. Deneysel çalışmada ise I. deneysel çalışmada belirlenmiş olan en uygun kil pestili oranları kullanılarak içerisinde uçucu kül ve volkanik tuf olan çimentolu dörtlü karışımlar (çimento + kil pestili + uçucu kül + volkanik tuf) hazırlanmıştır. Bu karışımlarda, belirlenmiş her bir kil pestili oranı için % 0, 10, 20, 30 oranlarındaki toplam puzolanla karışımlar hazırlanarak bunlar üzerinde çimento standartlarının gerekli gördüğü esas deneyler gerçekleştirilmiş ve puzolanlar ile desteklenmiş kil pestilinin çimentoda hangi oranlarda faydalı ve verimli olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir.

BÖLÜM 2

BOR

2.1. Bor Elementi ve Özellikleri

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında (3A), metal olmayan (ametal) tek elementtir. Bor elementi periyodik sistemde B simgesi ile gösterilir. Atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81, özgül ağırlığı 2,30 – 2,46 ergime noktası ise 2300 °C'dir. Havada 100 °C'de yavaşça yükseltgenir ve yüksek sıcaklıklarda yeşil alev vererek yanar. Elmastan sonra gelen en sert maddedir. Doğada sırasıyla % 19,10 – 20,3 ve 79,7 – 80,0 oranında ¹⁰B – ¹¹B ile gösterilen iki adet izotopu vardır. Doğada serbest halde bulunmaz. Genellikle sodyum, kalsiyum ve magnezyum tuzları halinde bulunur. Yer kabuğu bileşiminde komşuları, karbon, alüminyum ve silisyum kadar yaygın değildir. Ortalama olarak yer kabuğunda 1 ppm ve denizlerde ise 3 - 4 ppm civarında bulunmaktadır. Volkanik gazlar içersinde ve sıcak kaynar sularda bor miktarının yüksek olduğu, hatta bazı yerlerde ekonomik derişimlere ulaştığı bilinmektedir. Türkiye ve ABD'de bor yataklarındaki sıcak kaynak sularında bor miktarı 100 ppm'in üzerindedir.

Doğada yüz elliden fazla mineralin yapısında bor elementi vardır. Önemli ölçüde hafif ve ısıya karşı kararlıdır. Bor elementinin elektriksel iletkenliği oda sıcaklığında zayıf olup yüksek sıcaklıklarda ise iyi bir iletkenlik gösterir. Ayrıca kristal bor kimyasal olarak inerttir. Kristal yapıda; siyah renkli, kırılğan, sert ve katı haldedir. Amorf durumda ise toz halinde olup siyah veya kahverengi renktedir (Kavas, 1997; Elbeyli, 2000; Ayyıldız, 2003; Sümer, 2003).

Borun kaynağı magmaya bağlansa da sedimanter kayaçların magmatiklerden daha çok bor içerdiği gerçeği de unutulmamalıdır. Bor bileşikleri içersinde ticari olarak en fazla önem taşıyanları boratlardır. Boratlar grubundan boraks gerek doğada yaygın bulunması ve gerekse de endüstriyel kullanım alanının çok fazla olması nedeniyle bor madenciliği boraks madenciliği; bor endüstrisi de boraks endüstrisi olarak adlandırılır (Ayyıldız, 2003; Sümer, 2003).

2.2. Önemli Bor Mineralleri

Bor mineralleri doğada serbest halde bulunmaz. Oksijenle bağ kurmaya yatkın olduklarından pek çok değişik oksijen bileşimleri vardır. Basitten karmaşığa, sonsuz sayıda değişik molekül yapısına sahip olabilen bor – oksijen bileşimlerine bilim dünyasında borat ismi verilmektedir. Borun bu özeliğinden dolayı sayısı 230'a yaklaşan değişik bor minerali mevcuttur.

Bor mineralleri yapılarında değişik oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren minerallerdir. Bor mineralleri içerisinde en önemlileri; tinkal, kolemanit ve üleksit' dir. Bor ürünlerinin nihai kullanımında yapıdaki B_2O_3 içeriği önemli olduğu için çeşitli bor ürünleri birbirlerinin yerine kullanılır (Sümer, 2003).

Ticari ve endüstriyel önem taşıyan bazı bor mineralleri Çizelge 2,1'de gösterilmektedir (DPT, 2001k, 2003). Bu bor mineralleri bazı uygulamalarda doğrudan kullanılmakla birlikte endüstride daha çok yıkama, eleme, flotasyon, kalsinasyon gibi cevher zenginleştirme işlemlerinden geçirilerek rafine bir şekilde kullanılır. Bu şekilde rafine edilmiş ve daha yüksek katma değerli hale getirilen bor mineralleri bor bileşikleri türevlerine dönüştürülür. Önemli bor bileşikleri ve bor içerikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Çizelge 2.2'den görüleceği üzere zenginleştirme sonucu ortaya çıkan bor bileşiklerinin B_2O_3 yüzdesi bor minerallerine göre daha yüksektir (Elbeyli, 2000; Sümer, 2003).

2.2.1. Tinkal (Boraks)

Sodyum borat hidratı olup kimyasal formülü $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ' dur. Tinkal; % 16 Na_2O , % 36,5 B_2O_3 ve % 47,5 H_2O içerir. Sertliği 2,0 – 2,5 arasında olup özgül ağırlığı 1,7 'dir. Monoklinik sistemde kristalleşir. Öz biçimli tek kristaller veya kristal kümeleri halinde, çamur ve şeyl içinde bulunur. Kristal yapısı kısa prizma şeklindedir. Tinkal temiz ve cam gibidir. Açık havada dehidratasyona uğradığından yüzey kısmı veya tamamı ince taneli boraks pentahidrat kümesi haline dönüşür ve tebeşir beyazı

rengini alır. Tatlı – tuzlu bir tadı vardır. Suda alkali bir eriyik vererek kolaylıkla çözünür ve çözünürlüğü çözeltinin sıcaklığının artması ile artar. Benzen alevinde ergir ve boraks camını meydana getirir. Boraks çamurlu ve tuzlu göllerin buharlaşması sonucu oluşan yataklarda kil, marn ve piroklastik çökeller ile ara tabakalı olarak meydana gelir. Ayrıca susuz bölgelerde, toprakta veya sıcak su kaynaklarında da tinkale rastlanır.

Çizelge 2.1. Önemli bazı bor mineralleri ve B₂O₃ içerikleri (DPT, 2001)

Mineral	Kimyasal formülü	B ₂ O ₃ , %
Tinkal (ham boraks)	Na ₂ B ₄ O ₇ . 10 H ₂ O	36,6
Tinkalkonit	Na ₂ B ₄ O ₇ . 5 H ₂ O	47,8
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ . 4 H ₂ O	51,0
Üleksit	Na ₂ Ca ₂ B ₁₀ O ₁₈ . 16 H ₂ O	43,0
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ . 5 H ₂ O	50,9
Meyerhofferit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ . 7 H ₂ O	46,7
İnyonit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ . 13 H ₂ O	37,6
Pandermit	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ . 7 H ₂ O	50,0
Kurnakovit	Mg ₂ B ₆ O ₁₁ . 15 H ₂ O	37,3
Borasit (stasfurit)	2Mg ₂ B ₈ O ₁₅ . MgCl ₂	62,6
Datolit	CaBSiO ₄ . (OH)	21,8
Priseit	4CaO.5B ₂ O ₃ . 7 H ₂ O	49,8
Probertit	Na ₂ O. 2CaO. 5B ₂ O ₃ . 10 H ₂ O	49,6
Hidroborasit	CaO. MgO.3B ₂ O ₃ . 6 H ₂ O	50,5
İnderit	2MgO.3B ₂ O ₃ . 15H ₂ O	37,3
Aşarit	Mg ₂ B ₂ O ₅ . H ₂ O	10,7
Sasolit	B(OH) ₃	56,3

Çizelge 2.2. Önemli bor bileşikleri ve B₂O₃ içerikleri (Elbeyli, 2000; Sümer, 2003)

Ürün adı	Kimyasal formülü	B ₂ O ₃ , %
Boraks dekahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ . 10 H ₂ O	36,5
Boraks pentahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ . 5 H ₂ O	47,8
Susuz boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69,2
Borik asit	H ₃ BO ₃	56,3
Susuz borik asit	B ₂ O ₃	100,0
Sodyum perborat	NaBO ₃ . 4 H ₂ O	22,0
Sodyum metaborat	Na ₂ B ₄ O ₄ . H ₂ O	64,2
Sodyum oktaborat	Na ₂ B ₈ O ₁₃	81,8

İran, Hindistan, Tibet, Türkiye ve ABD’ de boraks yatakları mevcut olup dünya boraks üretiminin % 75’i ABD’deki Kaliforniya ve Eskişehir Kırka’dan sağlanmaktadır (Sarız ve Nuhoglu, 1992; DPT 2001).

2.2.2 Üleksit

Sodyum kalsiyum borat hidratı olan üleksitin kimyasal formülü Na₂Ca₂B₁₀O₁₈ . 16 H₂O’dur. Kimyasal bileşimi % 7,1 Na₂O, % 14,1 CaO, % 43 B₂O₃, % 35,5 H₂O’dur. Beyaza yakın şeffaf yapısı nedeniyle bu mineral “pamuk gülü” olarak da adlandırılır. Ufak yumrular ve mercekler halinde bulunur. Çoğunlukla ipek gibi çok uzun lif demetleri şeklinde görülür. Sertliği 2,5 olup özgül ağırlığı 1,96 ‘dir. Üleksit gibi soğuk suda az sıcak suda ve asit içerisinde soda eriyiği bırakarak kolayca çözünür. 25 °C’de sudaki çözünürlüğü 7,60 gr/l’dir. Kurak bölgelerde, kurumuş tuzlu göllerde rastlanır.

2.2.3. Kolemanit

Monoklinal kristal yapısında olup birçok yatakta parlak kristaller halinde oyuklar içinde yer alır. Kimyasal formülü Ca₂B₆O₁₁.5 H₂O’dur. Yapısındaki bor içeriği

% 15,7 bor oksit içeriği ise % 50,8'dir. Doğada renksiz ve saydamdır. Sertliği 4,0 – 4,5, özgül ağırlığı ise 2,42 'dir. Suda çok zor çözünmesine karşılık asitte (HCl) çok kolay çözülür. 25 °C' de sudaki çözünürlüğü 0,81 gr/l' dir. Kolemanit bor mineralleri içerisinde en yaygın olanıdır (Bayar, 2001).

2.2.4. Kernit (Razorit)

Bir sodyum borat hidratı olan kernitin kimyasal formülü $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 'dur. Bileşiminde % 23 Na_2O , % 51 B_2O_3 , % 26 H_2O bulunur. Doğada renksiz, saydam ve iğne şeklindeki küme kristaller halinde bulunur. Sertliği 2,5 – 3,0 olup özgül ağırlığı 1,95'dir. Yapısında % 15,8 bor bulunur. Camsı parlaklık gösterir. Soğuk suda yavaş çözünür. ABD, Arjantin ve Eskişehir Kırka'daki yataklarda bulunur (Bayar, 2001).

2.2.5. Probertit

Kimyasal formülü $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ olup yapısında % 49,6 düzeyinde bor oksit bulunur. Doğada, kirli beyaz ve açık sarı renklerde görülür. Lifsi görünüşe sahiptir. Kristalleri 5 mm'den 5 cm'ye kadar uzayabilir. Bursa Kestelek, Kütahya Emet Doğanlar civarındaki yataklarda kalın tabakalar halinde bulunur. Önemli ölçüde bulunduğu yer ABD'dir (Bayar, 2001).

2.2.6. Sasolit (Borik asit)

Kimyasal formülü H_3BO_3 olan sasolit katı borik asit olarak da bilinir. Triklinal kristal sisteme sahiptir. Yapısında % 17,5 bor, % 56,4 B_2O_3 vardır. Sertliği 1,0 olup özgül ağırlığı 1,48'dir. Küçük öz biçimli, beyaz ve yağlı parlak görümlü kristaller şeklinde, doğal olarak amonyum tuzları ve kaynakları civarında bulunur. Yapay borik asit endüstride genellikle kolemanitten üretilir (Sarız ve Nuhoğlu, 1992; Elbeyli 2000; Önem, 2000).

2.3. Önemli Bor Bileşikleri

Bor mineralleri bazı alanlarda doğrudan kullanılmakla birlikte daha çok yıkama-eleme, flotasyon, kalsinasyon gibi cevher zenginleştirme işlemlerinden geçirilerek rafine bir şekilde endüstride kullanılmaktadır. Bu şekilde rafine edilerek daha yüksek B_2O_3 içeriğine getirilen bor mineralleri bor bileşikleri türevlerine dönüştürülür. Bor bileşiklerinin pek çok türevi vardır. Ancak bunlardan borik asit, susuz borik asit, boraks dekahidrat, boraks pentahidrat, sodyum perborat gibi bor bileşikleri büyük miktarlarda kullanılmakta ve pazarlanmaktadır.

2.3.3. Borik asit (H_3BO_3)

Borik asit, Bandırma Bor ve Asit fabrikalarında üretilir. Endüstride çok kullanılan bir bor bileşiğidir. Kimyasal bileşimi % 56,3 B_2O_3 , % 43,7 H_2O 'dur. Molekül ağırlığı 61,8 özgül ağırlığı 1,44 'dir. Beyaz, parlak görünüşte suda çözünen ve altıgen pulcuklar halinde kristalleşen bir asittir.

2.3.4. Susuz borik asit (B_2O_3)

Bor trioksit veya susuz borik asit olarak da bilinen bor oksit, bor oksitleri içinde ticari bakımdan önemli olanıdır. Borik asidin yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak suyunun uçurulması ile elde edilir. Renksiz ve camsı yapıdadır. Ergime noktası $580^{\circ}C$ civarında olup daha çok cam üretiminde kullanılmaktadır.

2.3.5. Boraks dekahidrat ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)

Molekül ağırlığı 381,43, özgül ağırlığı 1,71 olan bu bileşik $740^{\circ}C$ 'de erir. Suda çözünürken hafif alkali bir çözelti verir. Sudaki çözünürlüğü sıcaklıkla artar. Bileşiminde % 36,5 B_2O_3 vardır.

2.3.6. Boraks pentahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Molekül ağırlığı 291,35 ve özgül ağırlığı 1,88'dir. Mineral adı tinkalkonit olan boraks pentahidrat, doğada boraksın atmosferde dehidratasyonundan oluşan birikintiler halinde bulunur.

2.3.7. Susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)

Disodyum tetraborat olarak da bilinen bu bileşiğin molekül ağırlığı 201,27 özgül ağırlığı ise 2,3 olup renksiz ve çok sert bir kristaldir. Hem camsı hem de çeşitli kristalin yapısında bulunur. Boraksın kademeli olarak ısıtılıp kristal suyunun uçurulması ile elde edilir.

2.3.8. Sodyum perborat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Deterjanlarda katkı maddesi olarak kullanılan bir bileşiktir. Ayrıca tekstil sanayinde, mum, sünger ve tutkal yapımında da kullanılır. Suda metaborata göre daha az çözünen bir madde olduğu için perborat olarak adlandırılır. Uygulamalarda hiçbir zaman neminin % 1'in altına düşmesi istenmez. Aksi durumda depolanmasında sorunlar yaşanır (Othmer, 1978).

2.4. Bor Yataklarının Oluşumu

Bor yatakları neojen dönemde yaklaşık günümüzden 24 milyon yıl önce dünyayı saran levhaların birbirleri ile sınır oluşturdukları bölgelerde meydana gelmiştir. Bor yataklarının bulunduğu yerlerde volkanik kayaların ve volkanik kaynaklı kayaların çok yaygın ve yoğun olması, boratların tüfler içerisinde yataklanması, bor yatakları ile volkanizma arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Dünyanın en büyük borat yatakları kumsal çökelme sonucu gölsel ortamlarda meydana gelmiştir. Bunlar genellikle kil, kil taşı, volkanik kül (tuf), kireç taşı ve benzer tortul tabakalarla ara katmanlıdır.

Boratların göllerde çökelmesini kontrol eden koşullar, göl suyu sıcaklığı, ortamın buharlaşma hızı, suyun pH'ı, basınç, dip ve yüzey akıntılarıdır. Bu nedenle suyun sıcaklığının yüksek olması ve yüksek pH (8,5 – 11,0) boratların çözünürlüğünü arttırır ve dolayısıyla da çökelme durur.

Borat yataklaşması, gölün dip ve yüzey akıntılarından korunmuş, hareketsiz bölgelerde suyun bor içeriği açısından doygunluğa erişmesi sonucu meydana gelmiştir. Bor yataklarının devamlılık göstermeyip merccekler halinde olması da bu yüzdendir. Denizlerde de borat oluşumlarına rastlanmaktadır. Buradaki boratlar çoğunlukla ekonomik değere sahip değildir (Sarıiz ve Nuhoğlu , 1992; Önem, 2000).

2.4.1. Dünyada ve Türkiye’de bor yatakları

Dünyadaki borat yatakları önem sırasına göre; Türkiye, ABD, Arjantin ve Rusya federasyonu olarak sıralanmaktadır. Bu dört ülkenin dışında çorak bölgelerde mevsimlik birikinti göllerin kurumasıyla yüzeyde ortaya çıkan borat yatakları da Çin, Şili, Bolivya, Sırbistan, Peru ve İran gibi ülkelerdedir (Sarıiz ve Nuhoğlu., 1992).

Türkiye’ de ise bilinen ve işletilmekte olan borat yatakları Balıkesir (Bigadiç-Susurluk), Bursa (Kestelek - M. Kemal Paşa), Kütahya (Emet) ve Eskişehir (Kırka) yörelerinde toplanmıştır (Çizelge 2.3) (Sümer, 2003).

Türkiye’deki borat yatakları mineralojik ve jeolojik açıdan büyük benzerlikler gösterir. Borat yataklarının içinde bulunduğu karasal neojen yapı; hemen hemen her yerde kireç taşları ile başlayıp, tüflerle ara katkılı marnlı - killi boratlı serilere geçer ve üst kısımda kireç taşları ile sonlanır (Sarıiz ve Nuhoğlu., 1992; Elbeyli, 2000; Bayar, 2001; Sümer, 2003).

Çizelge 2.3 Türkiye'deki borat yatakları (Sümer, 2003)

Üretim yeri	Cevher	Rezerv, milyon ton	Tenör % B ₂ O ₃	Kapasite, ton/yıl	Üretim, ton/yıl
Kırka	Tinkal	605,5	25,8	200 000	558
Bigadiç	Üleksit	49,2	29,1	200 000	200
	Kolemanit	576,4	29,4	200 000	90
Emet	Kolemanit	835,6	27,5-28,5	500 000	300
Kestelek	Kolemanit	7,7	25,0-33,2	100 000	60
Toplam		2 074,4		1 200 000	1208

2.4.2. Eskişehir, Kırka bor yatakları

Eskişehir' in güney batısında yer alan Kırka borat yatakları Türkiye de bilinen tek sodyumlu borat yatakları olup Etibank tarafından işletilmekte ve tinkalden üretim yapmaktadır. Yapılan çalışmalarda yaklaşık % 25 B₂O₃ içeren 605 milyon ton üzerinde cevherin varlığı saptanmıştır. Bölgede açık maden işletmeciliği yapılmaktadır. Tesisin yıllık kapasitesi 200 000 ton, yıllık üretim 558 ton'dur. Zenginleştirme sonrası cevherin tenörü % 34'lere yükseltilmektedir.

2.4.3. Kütahya, Emet yatakları

Kütahya'nın yaklaşık 60 km. batısında yer alan ve Etibank tarafından işletilen beş ocak vardır. Bu ocaklarda kolemanit üretimi yapılmaktadır. Bölgenin toplam rezervi 836 milyon tondur. Cevherin tenörü % 28 ile % 37 arasında değişmektedir. Cevher zenginleştirme işlemi sonrası B₂O₃ oranı % 43 – 45'lere yükseltilmektedir. Ocaklar açık ve kapalı olarak işletilmektedir. Etibank tarafından işletilen tesisin yıllık kapasitesi 500 000 ton olup yıllık üretim ise 300 ton'dur.

2.4.4. Balıkesir, Bigadiç bor yatakları

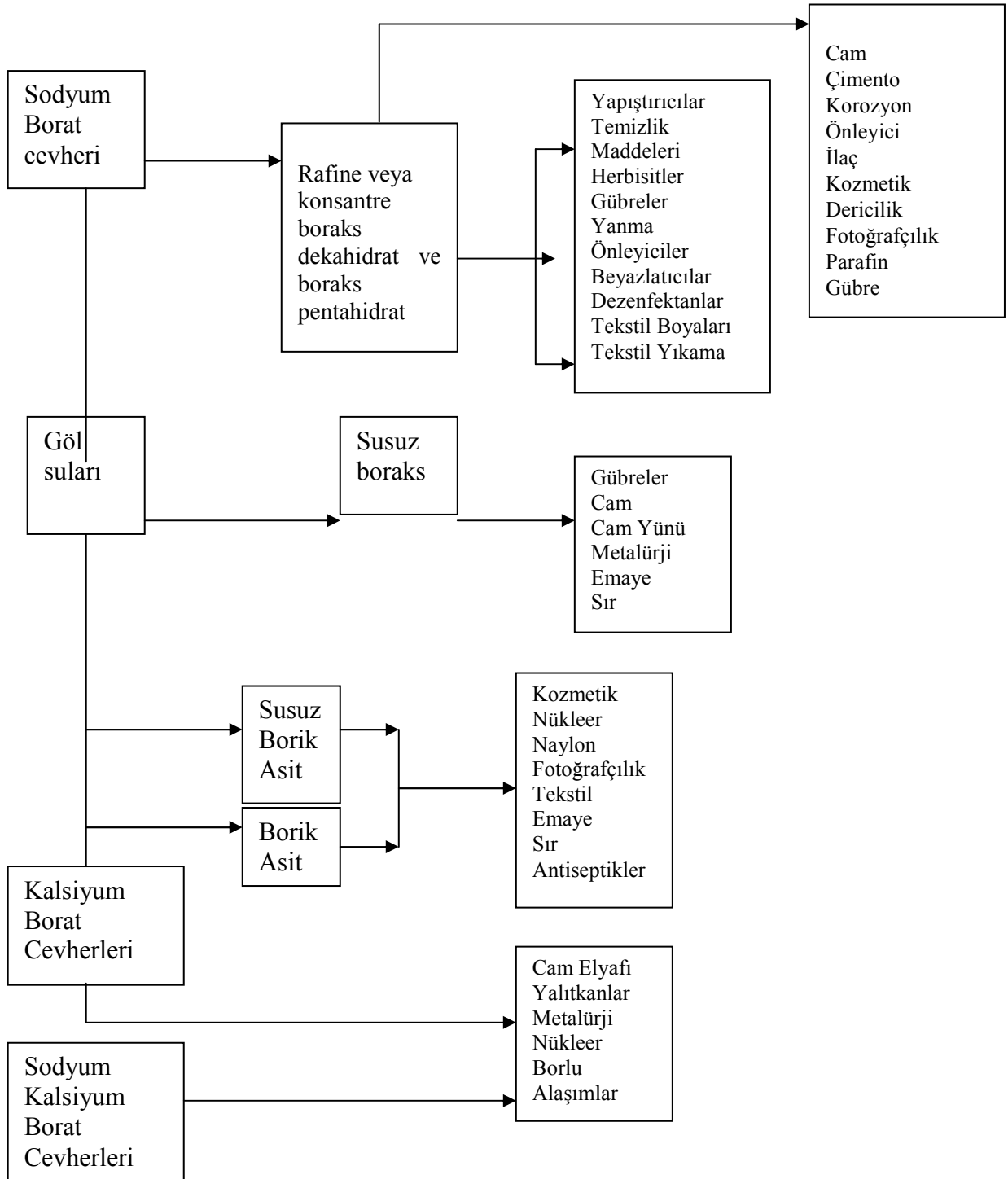
Balıkesir ilinin 40 km. güneyinde Bigadiç yöresinde işletilen iki ocak mevcuttur. Yatakların toplam rezervi 44 milyon ton üleksit 576 milyon ton kolemanittir. Cevherin tenörü % 40 (B_2O_3) düzeyindedir. Mercekler veya tabakalar şeklinde olan boratların ana minerali kolemanit olup bunun yanı sıra üleksit, pandemit ve inyonit de mevcuttur. Tesiste konsantre kolemanit ve üleksit üretimi yapılmaktadır. Tesis kapasitesi kolemanit ve üleksit için 400.000 ton olup yıllık üretim 200 ton üleksit ve 90 ton kolemanittir. Cevher zenginleştirme işlemleri sonrası tenör % 40 - 44 düzeylerine ulaşmaktadır.

2.4.5. Bursa, Mustafa Kemal Paşa bor yatakları

Bölgede 7,7 milyon ton rezerve sahip kolemanit yatakları bulunmaktadır. Cevherin tenörü % 25 - 32 (B_2O_3) düzeyindedir. Tesis kapasitesi 100 000 ton olup yılda 60 ton kolemanit üretimi yapılmaktadır (Sarıiz ve Nuhoglu, 1992; DPT, 2001; Sümer, 2003).

2.5. Borun Kullanım Alanları

Ülkemiz açısından büyük stratejik öneme sahip doğal bir kaynak olan bor mineralleri; hammadde, yarı mamul ve mamul madde olarak çok geniş ve çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Şekil 2.1). Günlük yaşamımızda ve endüstride değişik amaçlarla kullanılan çok sayıdaki bor bileşikleri içerisinde en çok kullanılanları boraks, sodyum tetraborat, pentahidrat, susuz sodyum tetraborat, borik asit, sodyum perborat ve susuz borik asittir. Bazı endüstrilerde bor minerali konsantreleri kullanılırken bazılarında ise rafine bor bileşikleri tercih edilmektedir. Ayrıca bor bileşikleri ve minerallerinin ucuz olması da borun kullanım alanlarını hayli yaygınlaştırmıştır. Bazı durumlarda ise mineral konsantreleri ile bor bileşikleri birbirinin yerine kullanılabilir.



Şekil 2.1. Borun kullanım alanları (DPT, 1995).

Yine, aynı alanda karışık özelliklere sahip ürünlerin üretiminde de kullanılır. Örneğin patlayıcı yapımında kullanıldığı gibi yanmayı önleyicilerin yapımında da bor kullanılmaktadır (Sarıiz ve Nuhoğlu, 1992; Bayar, 2001).

Tüketim paylarına göre bor ve bileşiklerini kullanım alanları açısından Çizelge 2.4 ' deki şekilde sınıflandırmak mümkündür.

Çizelge 2.4. Bor ve bileşiklerinin kullanım alanları (DPT, 2001; Uğurlu, 2004)

Sanayi Adı	Tüketim Payı, %
Cam ve Cam Eşya	34
Sabun ve Deterjan	16
Porselen ve Emaye	14
Ziraat	14
Metal	2
Diğer	20

2.5.1. Cam ve seramik endüstrisi

İstenilen özellikte özel camlar elde etmek üzere cam üretimi sırasında cam hamuruna % 0,5 - 23 arasında B_2O_3 katılarak ticari adı pyrex olan borosilikatların oluşması sağlanır. Bor katılmasıyla camın ısıl genleşme katsayısı düşer ve ısıya dayanıklı cam meydana gelir. Ayrıca katılan bor, işlem sırasında erimeyi ve camlaşmayı kolaylaştırır, çizilmeye karşı dayanımı artırır ve camın rengini iyileştirir (Sarıiz ve Nuhoğlu, 1992; Bayar, 2001). Normal cama % 5 - 7 arasında B_2O_3 katılarak (kolemanit) cam lifi üretimi yapılır. Cam lifi bilindiği üzere cam yünü ve pestili yapımında kullanılır. Cam liflerinin hafif, yanmaya karşı dayanıklı, ısı iletkenliğinin düşük olması nedeniyle endüstride kullanım alanı oldukça fazladır. Cam lifleri ayrıca plastiklerin, endüstriyel dokumaların, çeşitli lastiklerin ve kalın kağıtların dayanımlarını artırmak için de kullanılır. Bu amaçla yapılan üretimde % 8 - 9 arası B_2O_3 kullanılır.

Boraks seramik malzemesi sırlamasında da yararlanılan bir mineraldir. Bu amaçla kullanılan boraks, silisin kolay erimesini ve eridikten sonra seramik yüzeyine çabuk yayılmasını sağlar. Sırlamada kullanılan boraks miktarı istenilen amaca göre % 20 - % 40 arasında değişir (Othmer, 1978; Sarıöz ve Nuhoglu, 1992; DPT 1995; DPT, 2001).

2.5.2. Tarımda borun kullanılması

Bor, tarımda bitki büyümesi, gübre ve tarım ilacı yapımında kullanılır. Bitkilerin büyümesi için bir miktar bora gereksinimi vardır. Fazla kullanılması durumunda ise bitkiler üzerinde öldürücü bir etki yapar.

Borca fakir topraklara susuz boraks veya boraks dekahidrat bileşiği verilir. Çözünürlüğü farklı olan sodyum pentaborat ve di sodyum oktaborat tetrahidrat ise bitkilere doğrudan püskürtülerek uygulanabilir.

Fazla kullanılan borun bitkilerde zehirleyici olması nedeniyle bitki büyümesi istenmeyen alanlarda havaalanı, demiryolu gibi alanlarda bor bileşikleri, özellikle boraksla ilaçlama yapılır.

2.5.3. Sabun ve diğer temizleyiciler

Perboratlar 55 °C'nin üzerinde aktif duruma geçtikleri için sıcak yıkamalarda kullanılan çamaşır tozlarında ve sabun yapımında kullanılırlar. Sodyum perboratın aktif oksijen kaynağı olması nedeniyle yıkama öncesi kullanılan temizleyicilerin de üretiminde kullanıldığı bilinmektedir.

2.5.4. Emaye işleminde ve metalürjide borun kullanımı

Bor bileşikleri seramiklerin dışında kalan diğer gereçlerin sırlanmasında da kullanılır. Banyo küvetleri, beyaz eşya, sobalar emayelenirken bor bileşikleri de kullanılır. Bor ve bileşikleri metalürjide cüruf yapıcı alaşım elementi ve yüzey

sertleştirici olarak da kullanılır. Borun kullanılması ile birlikte malzeme yüzeyi aşınma ve sürtünmeye karşı dayanıklı hale getirilir. Yine metalürjide koruyucu cüruf yapıcı ve ergimeyi hızlandıran katalizör olarak ta kullanılır..

2.5.5. Süper kaygan yüzey oluşumunda bor bileşiğinin kullanımı

Bir bor bileşiği olan borik asitin özelliklerinden faydalanılarak neredeyse sürtünmeyi ortadan kaldıran karbon film kaplaması adı verilen, sürtünme katsayısı 0,001 olan bir teknoloji geliştirilmiştir. Bu katsayı yağla kaplı yüzeylerde ortaya çıkan sürtünmeden 100 kez daha düşüktür.

2.5.6. Diğer kullanım alanları

Bor ve bileşiklerinin diğer kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir;

- Enerji taşınımı
- Kanser tedavisi
- Üre - formaldehit reçineleri üretimi
- Ateşe dayanıklı ve yanmaz mamul üretimi
- Kağıt kaplama
- Nükleer yakıt
- Askeri silah üretimi
- Sentetik reçine
- Böcek ilaçları
- Elektrolit yoğunlaştırıcı
- Yapı malzemesi üretimi (Çimento, harç, beton, alçı, tuğla, kiremit, enjeksiyon şerbeti, katkı maddesi)
- Otomotiv sanayi
- İzolasyon (Othmer, 1978; Sarıiz ve Nuhoğlu,1992; DPT, 1995, Kavas, 1997;DPT, 2001; Ayyıldız, 2003;).

2.6. Borun Çevresel Etkileri

Bor cevherinin belli maden sahalarında olması nedeniyle bu sahalarda borun çevresel etkileri yok denecek kadar azdır. Doğal sular (akarsu, kaynak, yeraltı suyu, gölet vs.) ve toprakta bulunan bor derişimi de oldukça düşüktür. Bu durumda da zararlı etkinin ortaya çıkabilmesi için borun su ya da toprakta zararlı etkinlik derecesine kadar birikmesi gereklidir.

Borun çevre ve insan sağlığına zarar verecek düzeyde bir etkinliği ancak bor üretimi sırasında ortaya çıkan atıkların biriktirilmesi sonrasında görüldüğü bilinmektedir. Bu durum, özellikle toprak ve suların kirlenmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bunun dışında daha önceki bölümlerde borun tarımda değişik amaçlar doğrultusunda kullanıldığı belirtilmişti. Bu amaçla kullanım sırasında ortama fazla bor ya da bor katkılı bileşiklerin verilmesi de uzun zaman sonra toprak ve suda kirlenmeye yol açabilir.

Bilindiği üzere bor gübre yapımında kullanılan, bitkilerin gelişmesi için gerekli bir elementtir. Buna karşılık borun suda fazla bulunması bitki gelişimine zarar verir, hatta bitkiyi öldürür (Taner, 1995). Bitkilerin bor alımında toprağın mineralojik yapısı da önemli rol oynar. Örneğin illit ve montmorolinit tipi kil toprakların bor absorpsiyonu diğer topraklara göre daha yüksektir.

Sulama sularında da 2 mg/lt'den fazla bor bulunması bazı bitkilerin yok olmasına yol açar. Hatta bazı bitkiler için bu eşik 1 mg/lt'ye kadar düşebilir. İçme suları ise bor açısından fakirdir. Nadir olarak 1 mg/lt' den fazla bor görülebilir. İçme suları için 0,1 mg/lt' den küçük dere suları zararsız kabul edilir.

Daha önce de belirtildiği üzere borun zararlı çevresel etkileri daha çok bor atıklarının biriktirilip depolandığı andan itibaren ortaya çıkmaktadır. Konsantre bor üretimi sırasında ortaya çıkan kil pestili katı atıkları boş araziye, sulu şlam atıkları ise atık göletine alınarak depolanmaktadır. Depolamada sulu şlam atıkları için kil tabakalı atık göletleri inşa edilmekte ve şlam bu göletlere dökülmektedir. Bilindiği üzere atık

depolanması başlı başına uzmanlık gerektiren ve sürekli takip edilmesi gereken bir durumdur. Özellikle sulu atıkların ya da su ile temasında çözünen atıkların depolanması toprağın geçirimsizliği nedeniyle daima yüksek risk taşır. Bu tip atıkların depolanmasında kesin geçirimsizlik için kil tabaka altına jeomembran ya da benzeri geçirimsiz örtüler serilerek depolama alanlarının kesin geçirimsizliliği sağlanmalıdır. Ülkemizde mevcut bor cevheri işleme tesislerinin yanındaki depolama havuz alanları için bu önlemlerin alındığını söylemek pek mümkün değildir. Örneğin DSİ tarafından yürütülen bir çalışmada Eskişehir – Kırka’da tıncal üretimi sırasında ortaya çıkan atıkların tarım ürünlerini kirlettiğini ve bu durumun da toprak ve sulama suyunun kirlenmesi nedeniyle ortaya çıktığı anlaşılmıştır (DSİ, 1983). Keza yine DSİ’nin yürüttüğü bir çalışmada ise bor atıkları ile kirlenen Simav çayının suları ile bitkilerde sararma, yanma, büyüme hızının yavaşlaması, verim azalması ve kuruma gibi olumsuzluklar görüldüğü tespit edilmiştir (DSİ, 1976).

İnsanlar tarafından başta meyve ve sebzeler olmak üzere yiyecek ve içecekler aracılığı ile günde 10 - 20 mg bor vücuda alınabilmektedir (Sümer, 2003). Bu dozajın aşılması durumunda insanlarda kramp, sara, koma ve benzeri belirti ve hastalıklar ortaya çıkabilir.

Yetişkinler için öldürücü dozaj literatüre göre değişmektedir. Bazılarında bu 5 - 20 mg bazılarında ise 20 - 45 gr olarak verilmektedir (Genç et al.,1997). İçme suyunda bor konsantrasyonunun 30 mg/lit olması insan yaşamı için bir tehdit olarak kabul edilir (Rand et al., 1975). Borun hayvanlar için taşıdığı tehlike sınırı hayvan türüne bağlı olarak değişir.

Sulama suyunda bor miktarının 4 mg/lit’ yi geçmesi bora karşı en dayanıklı bitkilere bile zarar verebilmektedir. Bu oran sulama suyu için fazla olmamakla birlikte borun toprak tarafından tutulması ve sulamanın yinelenmesi ile topraktaki bor derişiminin artması sonucu zararlı etkinlik derecesine ulaşılır ve tarım ürünleri zarar görebilir (Erdoğan ve Zeybek, 1996).

2.7 Bor Üretimi ve Teknolojisi

Deneysel çalışmalarda kullanılan kil pestili atıklarının da ortaya çıktığı bir üretim süreci olması nedeniyle bu bölümde Eskişehir – Kırka yöresinde ham boraks ya da tinkal olarak adlandırılan bor mineralinin üretimi incelenmiştir.

2.7.1. Kırka boraks işletmesi

Kırka Boraks İşletmesi Eskişehir ilinin 70 km güneyindeki Kırka bucağının 4,5 km batısında kurulmuştur. Dünyanın en büyük boraks yatağı olan Kırka boraks yatağı 1950-1960 yılları arasında Türk vatandaşları tarafından arama ruhsatı alınarak yapılan aramalar neticesinde bulunmuştur. 1962 yılında bütün ruhsatları İngiliz Borax Consolidated Limited şirketine geçen Kırka boraks yatakları 1968 yılında Etibank tarafından bu şirketten devir alınmıştır. Bölgedeki büyük boraks oluşumu gerçek boyutlarıyla 1968 yılında MTA ve 1969 yılında Etibank tarafından yapılan sondajlarla ortaya çıkarılmıştır.

Kırka tinkal yatakları, miosen sonunda oluşan fay çatlaklarından gelen borik asit, sodyum ve magnezyum içeren eksolasyonların, volkanik çamur ve küllerin, neojen göl sularına karışıp çökmesi sonucu oluşmuşlardır. Derin kesimlerde boraks kristalleşirken sığ kesimlerde üleksit primer olarak çökelmiştir. Alüvyonlar ve bazaltın altında bir kalker tabakası, bu tabakanın altında ise 60 m kalınlığında kil – marn serisi vardır. Bu seriyi borat serisi takip etmektedir. Boratlar, başlıca tinkal cevherinden ibarettir. Bunun yanı sıra kolemanit, kernit, üleksit gibi mineraller ve kurnakorit, inderit, inderborit gibi sulu magnezyum boratlar da vardır (Genç et al., 1997). Kırka'daki yataklarda camsı, tabakalı ve parçalı olmak üzere üç tip cevherleşme belirlenmiştir. Yatağın % 90' ını parçalanmış cevher oluşturmaktadır.

Kırka boraks işletmesinde cevher üretimi açık işletme yöntemi ile yapılmaktadır. Cevherin üzerindeki sedimanter kayalar, 8 m yükseklik ve 25 m genişliği olan basamaklar oluşturacak şekilde kazılmaktadır. Basamakların eğimi 16 – 25⁰, genel şev açısı ise 85⁰ dir. Tinkal cevheri ekskavatör ile çıkarılıp kamyonlar ile konsantratör

tesisine taşınmaktadır. Dekopaj oranı $3,59 \text{ m}^3/\text{ton}$ olup 30 – 50 m kalınlığındaki örtü tabakasının altında 30 – 150 m kalınlığında cevher bulunmaktadır (Kavas, 1997). Tesisler; bir adet ön hazırlık (tinkal konsantresi kazanma) ve dört adet de ana proses (çözünme, kristallendirme, kurutma ve eritme) bölümünden meydana gelmiştir.

2.7.2. Konsantratör tesisi

1975 yılında devreye giren konsantratör tesisi % 80 verim ile % 32-34 B_2O_3 tenörlü boraks konsantresi üretecek şekilde projelendirilmiştir. Proje değerlerine göre tesis yılda 600.000 ton cevher işleyerek 400.000 ton konsantre boraks üretecek kapasitede kurulmuştur. 1987 yılında 1. konsantratör tesisi ile paralel çalışan 2. konsantratör tesisi devreye sokularak kapasite 500.000 tona çıkarılmıştır. Günümüzde ise tesis, yılda ortalama 1.150.000 ton cevher işleme ve 800.000 ton konsantre boraks üretme kapasitesine sahiptir (Ediz,1999; DPT, 2001; Kıpçak, 2004).

Şekil 2.2'deki akım şemasında da görüldüğü gibi ocaktan konsantratör tesisine gelen boraks cevheri, üzerinde 400 mm'lik ızgara bulunan 200 tonluk bir siloya boşaltılır. Buradan çelik paletli bir besleyici ile 100 mm açıklığındaki bir titreşimli ızgaraya beslenen cevherin elek üstü – 100 mm'ye kırılarak elek altı ile birleştirilir. Benzer şekilde 25 mm'lik elekten geçirilen ve – 25 mm'ye indirgenen cevher 10.000 tonluk stok sahasında depolanır.

Ara stok sahasından düzenli olarak alınan – 25 mm tane iriliğindeki cevher 6 mm'lik bir eleğe beslenir. Elek üstünde kalan cevher eski tesiste merdaneli kırıcıdan geçirilerek pestil haline gelen killer, ufalanan tinkalden eleme yoluyla ayrılmaktadır. Ayrılan bu kil pestilleri tüvenan cevherin yaklaşık % 2'si kadardır ve 1. kil pestili olarak adlandırılır. Yeni tesiste ise merdaneli kırıcı yerine darbeli kırıcı bulunmakta ve bu kırıcı daha homojen bir kırma sağlayarak kırma sırasında cevher tenörünün artmasını sağlamaktadır (Kıpçak, 2004).

Yapılan işlemler sonucu 6 mm boyutunun altına indirgenen cevher yaklaşık 1/1 oranında boraksa doymuş su ile karıştırılarak skraberlere verilir. Eski tesiste her biri 6,5 m³ hacimli 6 adet, yeni tesiste ise aynı hacimde 12 adet birbirine seri bağlı skraber bulunmaktadır. Skraberlerde, yumuşak ve dağılabilir yapıdaki safsızlıklar ana çözeltide disperse edilerek cevher zenginleştirilmektedir. Skraberlerden alınan bulamaç 1mm'lik eleğe beslenir. Elek üstü, santrifüjlere verilerek suyundan arındırılır ve yaklaşık % 32,5 B₂O₃ tenörlü konsantre boraks olarak alınır. Elek altı, hidrosiklonlara pompalanır. Hidrosiklonların üst akımları ikinci grup hidrosiklonlara pompalanırken alt kısımları seri olarak çalışan üç adet mekanik klasifikatöre verilir. İkinci grup hidrosiklonların alt kısmı birinci grup siklonların alt akımları ile birlikte bu klasifikatörlere verilirken üst akımları atık göletine pompalanır. Boraks şlamı olarak adlandırılan atığın B₂O₃ içeriği % 14'tür (Ediz, 1999; DPT, 2001; Kıpçak, 2004).

2.7.3. Bor türevleri tesisi

Proje çalışmalarına 1972 yılında başlanan Kırka Bor Türevleri Tesisinin açılışı 1984 yılında yapılmıştır. Projeye göre tesis, konsantratör tesisinden temin edilecek yılda 400.000 ton konsantreyi işleyerek 160 000 ton/yıl boraks pentahidrat (BPH), 60 000 ton/yıl susuz boraks ve 17 000 ton/yıl rafine boraks dekahidrat (BDH) üretecek kapasitedir (DPT, 1996; Ediz, 1999).

Uygulanan proseste üretim; çözünme kristallendirme, kurutma ve ergitme olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır (Şekil2.3).

2.7.3. 1. Çözme bölümü

Konsantre haline getirilen tinkal su buharı ile ısıtılan ve içinde karıştırıcı bulunan çözme tankına beslenir. Burada, boraks dekahidrat kristalizöründen çözme tankına devrettirilen seyreltik çözelti ve katılan su ile karıştırılarak çözündürülür. Çözme tankı su buharı ile endirekt ısıtılarak 98 °C' de tutulur. Doymuş tinkal çözeltisi, çözülmeyen maddelerin ayrılması için basınçlı filtrelerden süzülür ve temiz çözelti şeklinde su buharı ile ısıtılan dolum tankına gönderilir. Buradan pompalarla

kristallendirme bölümüne verilir. Filtre edilen çözelti içindeki çözünmeyen parçacıklar bir tankta toplanarak pompa ile atık göletine atılır.

2.7.3.2 Kristallendirme bölümü

Besleme tankından alınan çözelti 66 °C' de, vakum altında çalışan penta kristalizörüne gönderilir ve burada $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ kristallendirilir. Kristaller bir tanka alınır, hidrosiklon ve santrifüjde kristaller ve çözelti ayrılır. Çıkan madde % 95 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ içerir. Hidrosiklonda ve santrifüjde kristallere ayrılan çözelti $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ kristallerini elde etmek için 46 °C' de çalışan deka kristalizörüne gönderilir. Bu kristalizörden alınan kristaller de bir tanka alınır. Hidrosiklon ve santrifüjde çözeltilerden ayrılır. Ana çözelti beslenen boraks konsantrasyonunu çözmek için tekrar çözme tankına gönderilir. Elde edilen pentahidrat ve dekahidrat kristalleri ise kurutma bölümüne gönderilir.

2.7.3.3. Kurutma bölümü

Bu bölümde BPH ve BDH kristalizörlerinden gelen kristalize ürünler kurutulurak BPH ve BDH ürünleri elde edilir. Kurutmadan önce kristaller içerisinde adsorbe su bulunmaktadır. BPH, rafine BDH ve BDH kurutma prosesleri farklı farklıdır. BDH kurutucundan alınan elek altı ve elek üstü ürün kavurucuya gönderilerek dekahidrat kristallerinin 2,5 mol su içeren boraks haline gelmesi sağlanır.

2.7.3.4. Ergitme bölümü

Üretilen BPH ile oluşan standart dışı ürünler (BPH tozu, vs.) susuz boraks üretmek için ergitme fırınına verilir. Burada 774 °C' de boraks bünyesindeki kristal suyundan arındırılır, soğutulur ve kırılır elenir (DPT, 1996; Kavas, 1997; Ediz, 1999; Kıpçak, 2004).

2.7.4. İşletmede oluşan atıklar

Kırka Boraks İşletmesinde yılda toplam 400.000 ton civarında katı proses atığı oluşmaktadır. Bu atıkların 250.000 tonu konsantratör tesisinden, 150.000 tonu ise bor türevleri tesisinden kaynaklanmaktadır. Bor türevleri tesisindeki atığın yaklaşık 50.000 tonu 2. kil pestili olarak adlandırılan DSM elek üstü atık, 100.000 tonu ise ikinci kademe alt atık (tikner altı) şeklindedir. DSM elek üstü atık çözündürme tankından sonra DSM eleğine beslenen çözeltilerdeki çözünmeyen kısımlardan oluşan, elek üstünden alınan atıklardır. İkinci kademe alt atık ise ikinci kademe tiknerde çöken malzemedir. DSM elek üstü atığının boyutları 6 mm'nin altındadır. İkinci kademe alt atığın boyutları ise 1 mm'nin altındadır (Şekil 2.3).

Konsantratör tesisinde ise, 6 mm'lik elekten elenen cevherin elek üstü eski tesiste merdaneli kırıcıdan geçirilmekte, oluşan kil pestilleri 15 mm'lik bir elekten elendikten sonra elek üstü atılmaktadır. Atılan bu kil pestilleri tüvenan cevherin yaklaşık % 2'si kadardır ve 1. kil pestili olarak adlandırılır. Ayrıca yine konsantratör tesisinden % 14 civarında B₂O₃ içeren boraks şlamı atık göletine verilmektedir (Kıpçak, 2004).

Konsantratör ve bor türevleri tesislerinden kaynaklanan atık sular bir kanalda birleşerek tesis yakınındaki gölete doğal akış ile akmaktadır. Yüksek miktarda katı madde içeren atık sular gölette dinlendirilip çökmeleri sağlandıktan sonra üretimde tekrar kullanılmaktadır. Tesisin yakınında bulunan gölet 4 kademeli olup toplam yüzey alanı yaklaşık 1,2 milyon m² ve içerdiği toplam su miktarı 7 milyon m³ civarındadır (Ediz, 1999; Kıpçak, 2004).

BÖLÜM 3

ÇİMENTOLAR

Beton; çok değişik alanlarda kullanılması, ekonomik bir malzeme olması, teknik özellikleri ve kolay işlenebilmesi nedeni ile günümüzün en çok kullanılan yapı malzemesidir. Betonun en önemli bileşeni ise beton içerisindeki diğer bileşenleri birbirine bağlayan çimentodur.

Toz halinde bulunan ve su ile karıştırıldığında başlangıçtaki plastik durumunu yavaş yavaş kaybederek sertleşme özelliği gösteren, içine karıştırıldığı ortamdaki taneleri birbirine bağlayarak istenilen boyut ve şekilde yapı elemanlarının elde edilmesini sağlayabilen maddelere bağlayıcı madde adı verilir (Uğurlu, 1997). Kireç, çeşitli çimentolar ve alçı en önemli bağlayıcı maddelerdir. Kireç en eski bilinenidir. Romalılar kirece puzolan katarak günümüze kadar dayanan yapılar inşa etmişlerdir. 19. yüzyılın sonuna kadar da bu malzeme kullanılmıştır. 1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentinde Joseph Aspdin isimli bir duvarcı ustası hazırladığı ince taneli kil ve kalker karışımını pişirip öğütürerek bağlayıcı bir ürün elde etmiştir. Bu ürüne su ve kum katıldığında ortaya çıkan malzemenin İngiltere'nin portland adasından elde edilen yapı taşlarına benzediğini gören Aspdin elde ettiği bu bağlayıcıya Portland Çimentosu adını vermiştir. Daha sonra 1845 yılında Isaac Jhonson tarafından kil ve kalker karışımı bu malzeme yüksek sıcaklıkta pişirilince bu günkü çimento özelliklerine çok yakın olan bir bağlayıcı elde edilmiştir (Troxell et al., 1979).

3.1. Çimento Üretimi

Genel olarak bağlayıcı maddeler, toz halinde, su ile reaksiyona giren, bir süre plastik davranış gösteren ve daha sonra katılaştıran malzemelerdir. Bağlayıcı malzemeler; hidrolik bağlayıcılar (havada ve suda katılaşabilen) ve hava bağlayıcılar (sadece havada katılaşabilen) olmak üzere ikiye ayrılır. Birinci guruba çimentoları, ikinci guruba ise sönmemiş kireci (CaO) örnek verebiliriz.

Portland çimentosunun üretiminde iki ana hammadde kullanılır; kireçtaşı, marn gibi kalkerli malzemeler ve içerisinde önemli miktarda silis bulunan kil, şeyl, şist, kum gibi malzemelerden oluşan killi malzemeler. Bu iki ana hammadde dışında çimento içerisinde ani prizi önlemek için % 3-6 arasında alçıtaşı ve doğal yada yapay puzolanlar da (tras, tuf, uçucu kül, curuf, vs) katılır. Kalkerli malzemeler çimentonun yaklaşık $\frac{3}{4}$ 'nü geri kalanını da killi malzemeler oluşturur. Puzolanların kullanılması ile birlikte bu oranlar değişir.

Kalkerli ve killi hammaddeler uygun oranlarda bir arada öğütülür. Bu durumdaki hammaddeye Fransızca'da un anlamına gelen farin denilir. Bu karışım kendi eksenini etrafında % 3 - 4 derece eğimle dönen fırınlarda 1350-1500 °C sıcaklıkta pişirilir. Hammadde, fırına su ile ıslatılarak çamur halinde ya da kuru olarak verilebilir. Kuru ya da ıslak süreç olarak adlandırılan bu üretim sistemlerinin birbirine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Döner fırında sıcaklık etkisiyle hammadde içerisindeki kalkerin ayrışması sonucu sönmemiş kireç (CaO) ve kilin ayrışması sonucu da silisyum dioksit (SiO₂), alüminat (Al₂O₃) ve demiroksit (Fe₂O₃) meydana gelir. Fırın sonuna doğru sıcaklığın artması ile bu maddeler arasında meydana gelen reaksiyonlar sonucu klinker olarak adlandırılan ve yapısında çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran silikatlar ve alüminatlar bulunan bir malzeme meydana gelir. Döner fırından çıkan klinker soğutulduğunda henüz bağlayıcılık özelliği yoktur. Bu nedenle değirmenlerde öğütülerek toz haline getirilir. Öğütülme sırasında klinker içerisinde % 3 ile % 6 arasında alçıtaşı (CaSO₄. 2H₂O) eklenerek birlikte öğütülür. Alçıtaşı ilavesi çimentonun priz süresini düzenlemek amacıyla yapılır. Daha sonra tane boyutu 90 ile 6,5 mikron arasında değişen çimento elde edilir (Erdoğan, 1995).

Kalkerli ve killi malzemeler döner fırına yüklendikten sonra sıcaklığın etkisiyle sırasıyla aşağıdaki olaylar meydana gelir;

- Önce, hammadde içerisinde bulunan serbest su (rutubet) 100 °C civarında buharlaşır.

- Kilin yapısında bulunan en önemli madde 2SiO₂.Al₂O₃.2H₂O kimyasal formülündeki kaolindir. 500 - 600 °C sıcaklık civarında su molekülü kaolinden ayrılır ve kaolin (SiO₂) ve amorf alüminaya (Al₂O₃) dönüşür.

- 600-700 °C sıcaklıklarda kalker içerisinde bir miktar magnezyum karbonat ($MgCO_3$) varsa bu madde ayrışarak magnezyum oksit (MgO) haline dönüşür.

- 900 °C sıcaklık civarında kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) sıcaklık nedeniyle ağırlığının yaklaşık % 44'ünü oluşturan karbondioksiti (CO_2) kaybederek sönmemiş kirece (CaO) dönüşür.

- 900-1200 °C sıcaklıkta sönmemiş kireç, silis ve alümina arasında kimyasal reaksiyonlar başlar ve kireç ile silisin reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikatlar, sönmemiş kireç ile alüminanın tepkimesi sonucunda ise alüminatlar meydana gelir.

- 1250-1280 °C'ler arasında oksitlerin eriyik haline dönüşmeye başlamasından sonra çimento bileşenleri ortaya çıkar.

- Sıcaklığın artması ile birlikte bu tepkimeler daha da hızlanarak başlı başına bir ürün olan klinker meydana gelir (Erdoğan, 1995; Uğurlu,1997).

3.2. Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler ve Çimentonun Yapısı

Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve yaklaşık miktarları Çizelge 3.1'de verilmiştir (Mindess and Young, 1986). Çizelgeden görüleceği üzere Portland çimentosu bileşiminde yüksek miktarlarda sönmemiş kireç, silis, alümina ve demiroksit vardır.

Kalkerli hammaddenin ayrışması sonucu kireç, killi hammaddelerin ayrışması sonucu ise silis ve alümina meydana gelir. Kükürt trioksit ise klinker öğütülerek eklenen alçı taşından ileri gelir. Kükürt trioksit, magnezyumoksit ve alkali maddeler çimento için istenmeyen maddeler olmakla birlikte Çizelge 3.1' deki oranlar içerisinde ise çimento için zararsızdırlar. Döner fırında sıcaklığın etkisi ile meydana gelen tepkimeler sonucu çimentonun dört ana bileşeni meydana gelir. Silisyum dioksit (SiO_2) kireç ile birleşerek dört tür kalsiyum silikat meydana getirir. Alümina (Al_2O_3) kireç (CaO) ile birleşerek dört çeşit kalsiyum alüminanın oluşmasına neden olur.

Demir üç oksitin alümina ve sönmemiş kireç ile tepkimesi sonucu da tetrakalsiyum alümina ferrit (C_4AF) bileşiği meydana gelir. Döner fırındaki tepkimeler sonucu çimentonun çok büyük bir kısmını trikalsiyum silikat, dikalsiyum silikat, trikalsiyum alüminat ve tetrakalsiyum alüminaferrit oluşturur (Mindess and Young,

1986; Erdoğan,1995). Çimentonun ana bileşenleri Çizelge 3.2' de ve özellikleri ise Çizelge 3.3' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Portland çimentosunu oluşturan oksitler (Mindess and Young.,1986).

Eleman	Oksit	Çimento kimyasına göre sembolü	Miktar, %
Kireç	CaO	C	60-67
Silisyum dioksit	SiO ₂	S	17-25
Alümina	Al ₂ O ₃	A	3-8
Demir oksit	Fe ₂ O ₃	F	0.5-6
Kükürt trioksit	SO ₃	S	1-3
Magnezyum oksit	MgO	M	0.1-4
Alkaliler	Na ₂ O+K ₂ O	N+K	0.2-1.3

Çizelge 3.2. Çimentonun ana bileşenleri (Mindess and Young.,1986; Erdoğan, 1995).

Kimyasal adı	Kimyasal formülü	Sembolü	Ağırlık, %
Trikalsiyum silikat	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	50
Dikalsiyum silikat	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	25
Trikalsiyum alüminat	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A	12
Tetrakalsiyum alümina ferrit	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	8
Alçı taşı	CaSO ₄ . 2H ₂ O	CSH ₂	3.5

Çimento ana bileşenleri hidrasyonlarını değişik zamanlarda tamamlarlar. Örneğin C₃A ilk üç gün sonunda hidrasyonun % 70' ini tamamladığı halde C₂S aynı zaman aralığında ancak % 12 ölçüsünde hidrasyona uğrar. Tepkime hızı ile hidrasyon ısı arasında doğrudan bir ilişki olduğundan aynı durum tepkime hızı ile priz süresi için de geçerlidir. Çizelge 3.2' den görüleceği üzere silikatlar çimentonun yaklaşık % 75'ini oluşturup çimentonun esas yapısını oluştururlar. Silikatlar çimentonun nihai bağlayıcılık değerini belirleyen bileşenlerdir. C₃S ve C₂S hidrasyon

sonunda benzer ürünleri meydana getirir. Bu ürün kısaca C-S-H olarak tanımlanan kalsiyum-silika-hidrat adı verilen tobermorit bileşiğidir. Ancak her iki bileşenin hızları açısından farklılıklar vardır. C_3S ' in tepkime hızı ve ısı C_2S 'e göre daha yüksektir. Ayrıca C_3S ' de yan ürün olarak meydana gelen $Ca(OH)_2$, C_2S ' e göre iki kat daha fazla olup bu istenmeyen bir durumdur. Özellikle su yapılarında serbest kirecin çözünmesi sonucu dayanım ve dayanıklılık problemleri ortaya çıkar.

Çizelge 3.3. Portland çimentosu ana bileşenlerinin özellikleri (Erdoğan, 2003).

Çimento özellikleri	Bileşenler ve Özellikleri				Çimento bileşimi oranı, %
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
Reaksiyon hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta	
Hidratasyon ısı	Orta	Az	Çok	Orta	
Bağlayıcılık değeri	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	
- ilk zamanlar					
- sonlarda	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	
Çimento bileşenleri	Hidratasyon Isısı, cal/g				Çimento bileşimi oranı, %
	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün	
C_3A	141	158	209	222	12
C_3S	97	109	116	124	50
C_4AF	22	60	90	99	8
C_2S	5	25	40	44	25

C_3A bileşeni su ile birleştiğinde çok hızlı tepkimeye girerek ani prize neden olur. Bu olayı yavaşlatmak için klinkerin öğütülmesi sırasında içerisine bir miktar alçıtaşı katılır. Ancak, eğer C_3A ve ilave edilen alçıtaşı miktarı fazla olursa etrenjit oluşarak genleşmeye yol açan ürünlerin meydana gelmesine neden olabilir. Bundan dolayı sülfatlı sularda C_3A yüzdesi sınırlanmış olan çimentoların kullanılması önerilir. C_4AF bileşeni, su ve alçıtaşı arasında da benzer tepkime gerçekleşmekle birlikte bu tepkime

şiddetli bir şekilde meydana gelmez. Portland çimentosu kimyasal olarak analiz edildiğinde, bileşimde en fazla miktarda kireç olduğu görülür. Kireç çimento ana bileşenlerinin oluşmasında görev alır. Bu oluşum için gerekli kireç miktarının dışında serbest kirecin fazla olmaması istenir. Aksi takdirde fazla kireç ve su birleştiği zaman genişletirici etkisi olan CaCO_3 ' in oluşmasına yol açar. Çimento bileşiminde yaklaşık olarak % 21' lik bir oranla silis ikinci bileşendir. Bileşimdeki SO_3 de klinkere katılan alçıtaşından kaynaklanır. Fazla miktarda olması durumunda C_3A ve su ile tepkimeye girerek genişletirici etkisi olan kalsiyum-sülfo-alüminahidrat ürünlerinin meydana gelmesine neden olur. MgO ve alkaliler de çimento için faydalı olmayan bileşiklerdir. MgO genişletirici etkisi olan MgCO_3 ' in oluşmasına neden olur. Sodyum, potasyum alkalileri ise agrega içerisinde bulunabilecek reaktif silis ile tepkimeye girerek genişletirici etkisi olan alkali silis jellerinin meydana gelmesine neden olur (Troxell et al.,1979; Erdoğan, 1995; Uğurlu, 1997). Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı üzere çimento hammaddelerinin bileşimi ve miktarı çimentonun kimyasal yapısını etkileyen en önemli faktördür.

3.3. Çimentoların Bazı Önemli Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

3.3.1. Hidratasyon

Çimento su ile temas ettiğinde su ile birleşerek önce katılaşır (priz) sonra da sertleşerek yeni ürünler meydana getirir. Çimento ve suyun birleşerek kimyasal tepkimelerin ortaya çıkması olayına çimentonun hidratasyonu denir. Çimentonun hidratasyon yapabilmesi için öncelikle çok ince öğütülmüş olması gereklidir. Çimento hidratasyonu, yaklaşık 100 saatte tamamlanmış gözükse de yıllarca devam eden bir olaydır. Bu olaya hidratasyon kinetiği denilmektedir (Postacıoğlu,1986). Hidratasyonun bir başka özelliği ise bunun ekzotermik bir tepkime oluşudur. Hidratasyon tepkimeleri oldukça karmaşık olmakla birlikte bu tepkimelerin nasıl gerçekleştiği tam olmamakla birlikte büyük ölçüde çözülmüştür. Hidratasyonun seyri ya da kinetiği birbirinden farklı şu yöntemler ile belirlenir;

- Çimento pastasındaki Ca(OH)_2 miktarının ölçülmesi
- Hidratasyon sırasında çıkan ısının ölçülmesi

- C₃S miktarındaki azalmanın belirlenmesi
- Çimento pastası özgül ağırlığının belirlenmesi
- Kimyasal olarak bağlanmış su miktarının belirlenmesi
- Hidrate olmamış çimento miktarının ölçümü (Neville,1986; Postacıoğlu, 1986).

Çimento ile su karıştırıldığında önce hızlı bir hidratasyon ısısının verildiği 1. aşama gerçekleşir. Bu aşamayı; daha az hidratasyonun gerçekleştiği ve adına Dormant Periyodu denilen 2. aşama izler. Bu aşama boyunca beton plastik bir haldedir. İlk priz 2 ile 4. saatler arasında C₃S' in yüksek oranda hidratasyonu ile Dormant Periyodunun sonunda 3. ve 4. periyot olarak adlandırılan aşamanın başlangıcında başlar. C₃S aşağıdaki tepkimede verildiği gibi tobermorit denilen, son yıllarda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) olarak tanımlanan bir ürün ile kristal yapıya sahip kalsiyum hidroksit bileşiği (CH) meydana getirir.

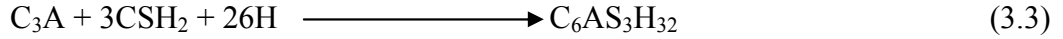


Bu ürünler meydana gelirken maksimum düzeyde hidratasyon ısısı verilir. Bu ısının azalması ile birlikte dikalsiyum silikat da Denklem (3.2)' de görüleceği üzere benzer ürünleri vermek üzere tepkimeye girer.



C₃S' in meydana getirdiği C-S-H miktarı C₂S' in meydana getirdiği ürünün yaklaşık 5 -6 katıdır (Erdoğan,1995). Çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran da C-S-H jelleridir. Kalsiyum silikat hidrat ürününün büyüklüğü moleküler mertebededir. Bu ürün yaklaşık olarak çimento tanesinden 1000 kez daha küçüktür.

Trikalsiyum alüminat ve suyun birleşmesi çok hızlı bir tepkimedir. C₃A' nın hızlı priz yapmasını önlemek üzere klinkere bir miktar alçıtaşı katılır. Alçıtaşı katılmamış çimentolar ani priz yaparak betonun işlenebilmesini ve bağlayıcılık özelliğini engeller. C₃A iki şekilde reaksiyona girer;



Denklem (3.3)' den görüleceği üzere trikalsiyum alüminat, alçıtaşı ve suyun reaksiyonu sonucu etrenjit meydana gelir. Bu ürünün fazla miktarda oluşması çimento ve betonda hacim genişlemesinden ileri gelen hasarların ortaya çıkmasına neden olur. Ancak klinkere katılan alçıtaşı miktarının ayarlanması ile böyle bir sorun yaşanmaz. C_3A 'nın tepkimeleri sonucu hidrogarnet (C_3AH_6) adı verilen kübik kristalli bir bileşik meydana gelir. Bu kristalleşmenin meydana gelmesi için çok uzunca bir süre geçmesi gereklidir. Tetrakalsiyum alüminaferrit (C_4AF) bileşiğinin hidratasyon hızı daha yavaş olmakla birlikte C_3A 'nın hidratasyonu gibidir. Alçıtaşı ve su C_4AF ile reaksiyona girerek kübik kristal sisteme sahip hidrogarnet (C_3AH_6) bileşiği meydana gelir. C_4AF , C_3A gibi hiçbir zaman ani olarak hidrate olmaz. C_4AF bileşeni yüzde olarak çimentonun en küçük bileşiği olması nedeniyle sonuçlar üzerinde çok etkili olamaz. C_4AF ve C_3A 'nın tepkimeleri C_3S ve C_2S 'in tepkimeleri meydana gelirken gerçekleşir. İlk reaksiyon ürünlerinin oluşumundan sonra 5. periyot olan ve hidratasyon ürünleri oluşumunun yavaşladığı düzenli safhaya ulaşılır, (Mindess and Young,1986; Postacıoğlu, 1986; Erdoğan, 1995; Uğurlu,1997). Hidratasyonu tamamlanmış bir Portland çimentosunun boşluklar dışındaki çimento hamuru hacminin % 58' ini C-S-H, % 27' sini $Ca(OH)_2$ ve % 15' ini de diğer hidratasyon ürünleri oluşturur (Postacıoğlu, 1986).

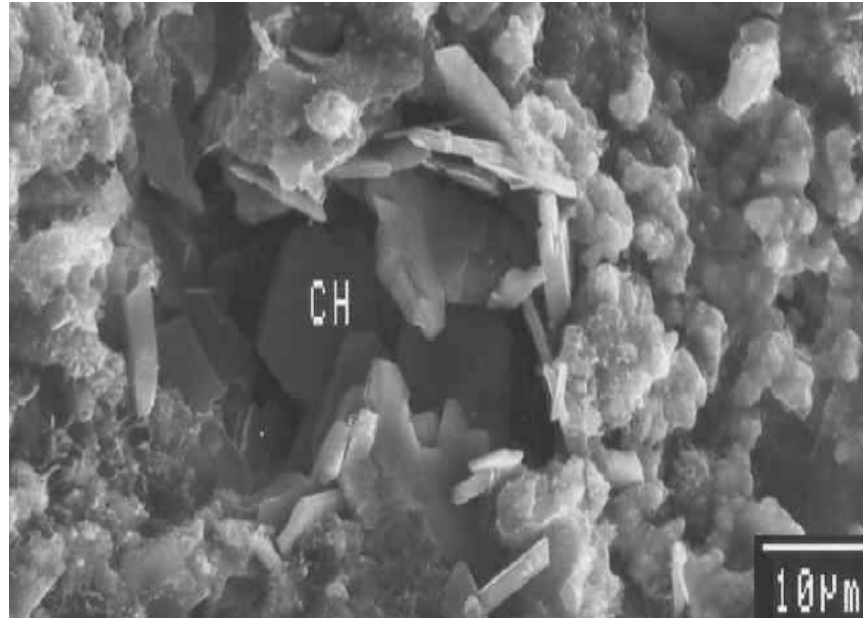
3.3.2. Priz veya katılaşma

Hidratasyon olayı gelişerek belli bir seviyeye ulaştınca bağlayıcı madde hamuru yavaş yavaş plastik özelliğini kaybetmeye başlar. Hamurun viskozitesinde belirli bir artış görülür. Bu olay prizin (katılaşma) başlangıcıdır. Hidratasyonun ilerlemesi ile birlikte hamur plastikliğini tamamen kaybeder. Bu durum da priz sonu olarak tanımlanır. Priz çimento ve dolayısıyla beton için önemli bir olaydır. Bu nedenle priz başlama süresi TS EN 197-1 standardında 32,5 dayanımlı çimentolar için ≥ 75 dakika, 42,5 dayanımlı çimentolar için ≥ 60 dakika ve 52,5 dayanımlı çimentolar için ise ≥ 45 dakika şeklinde sınırlanmıştır. Çimentoya alçı taşı katılmaması durumunda bu sürenin 8-15 dakika arası olacağı bilinir (Erdoğan, 1995; TS EN 197-1, 2002). Sıcaklık, yoğurma suyu miktarı, çimentoların nemli olup olmadığı, havalandırılıp

havalandırılmadığı gibi durumlar prize etki eden fiziksel etkenlerdir. Bunlar içerisinde sadece sıcaklık prize hızlandırır, diğerleri ise geciktirici etkenlerdir. Kimyasal katkı maddeleri ile de prize etkilemek mümkündür. Çimento inceliği olarak tanımlanan çimento özgül yüzeyinin artması ile de priz süresi kısalmır. Çimento prize ile ilgili bilinen iki teori vardır. Bunların birincisi ve en eski olanı kristalizasyon teorisidir. Le Chatelier tarafından geliştirilen bu teoriye göre priz; susuz çimento bileşenlerinin çözeltiye geçtikten sonra hidrasyon sonucu çökerek geometrik bir düzene göre dizilip kenetlenmesi olayıdır. Bu teori çözünme-çökme teorisi olarak da bilinir. İkinci teori ise 1893'te W. Michaelis tarafından geliştirilen kolloid teorisidir. Bu teoriye göre çimento kolloidal jeller olarak çöker, sertleşir, kurur ve büzülür (Uğurlu,1997).

3.3.3. Sertleşme

Hidrasyon ve onu takip eden katılaşma olayını izleyen, çimento hamuru iç yapısının şekillenmesine neden olan sertleşme olayıdır. Şekil 3.1'de hidrate olmuş bir çimento mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 3.1. Hidrate olmuş bir çimento mikroyapısı (Yetgin and Çavdar,2006).

Elektronik mikroskoplar ile yapılan incelemelerde, içyapıda hidrasyon sonunda meydana gelen hidrasyon ürünleri (hidrasyon ürünü jeller, jel boşlukları, vs.) görülmüştür. Hidrasyonun uzun zaman alması nedeniyle, bunların gelişmesini tamamlayamadıkları ve bu nedenle de düzenli bir kristal yapıya sahip olmadıkları tesbit edilmiştir. Hidrasyon sonunda meydana gelen ürünler arasında çeşitli boyutta boşluklar bırakarak bir araya gelirler. Bunlar;

- Makro boşluklar : 10^4 A⁰ den büyük boşluklar
- Kılcal boşluklar : 10^4 - 10^2 A⁰ arası boşluklar
- Mikro boşluklar : 10^3 - 10^2 A⁰ arası boşluklar
- Jel boşlukları : 10^2 A⁰ den küçük boşluklardır (Postacıoğlu,1986).

Hidrasyonun ilerlemesi ile makro ve kılcal boşluklar azalır buna karşın mikro ve jel boşlukları ile jelleşme (C-H-S, CH) artar. Çimento özellikleri ve bileşenlerinin hidrasyon süreci üzerinde etkisi olduğu bilinir. Özgül yüzeyin büyümesi ile de dayanımlarda artışlar kaydedilir. Çimento taneleri ile suyun temas etmesi sonucu, çok büyük özgül yüzey alanına sahip hidrate jellerin meydana gelmesi ile sertleşme olayı gerçekleşir. Çimento özgül yüzeyinin 3000 - 4000 cm²/g arasında olduğu buna karşılık meydana gelen hidrate jellerin ise 2×10^6 ile 6×10^6 cm²/g arasında özgül yüzeye sahip oldukları bilinmektedir (Postacıoğlu,1986).

3.3.4. Hacim sabitliği

Çimento bileşiminde fazla miktarda serbest kireç (CaO) veya magnezyum oksit (MgO) bulunması durumunda çimento hamurunun hacmi genişleyebilir. Bu maddeler döner fırının içerisindeki oluşumları sırasında yeterli sıcaklığın üzerinde bir sıcaklığa tabi tutuldukları için çok yavaş bir şekilde hidrasyon yaparlar. Bu nedenle çimentonun içerisindeki serbest CaO ve MgO'nun su ile tepkimeleri çimento hamuru veya beton sertleştikten aylar sonra meydana gelir. Bu oksitlerin hidrasyonu sonunda sertleşmiş çimento hamurunda genişleme olduğundan beton yapılarda iç gerilmeler ve çatlamlar meydana gelebilir.

3.3.5. Çimento türleri ve diğer özellikleri

Türkiye’ de TS EN 197-1 Türk Standardı esas alınarak beş ana tip çimento üretilmektedir (Çizelge 3.4) (TSE EN 197-1, 2002). TS EN 197-1’e göre üretilen çimentolardan CEM II Portland Kompoze Çimentosu ise kendi içinde yedi farklı alt sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar kullanılan mineral katkı cinsi ile birbirinden ayrılmaktadır. Bunun dışında çimentonun içerdiği katkı miktarının en az ve en çok olması esasına dayanan bu beş ana tip çimentonun altında 27 tip farklı çimento üretilmektedir. Harç ve Sorel Çimentolarının standardı olmasına rağmen bu çimentolar üretilmemektedir. TS EN 197-1 ‘de; CEM I Portland Çimentosu, CEM II Portland Kompoze Çimento, CEM III Portland Yüksek Fırın Cürüflü Çimento, CEM IV Puzolanik Çimento ve CEM V de Kompoze Çimento olarak tanımlanmaktadır.

Bu ana tipler Çizelge 3.4’ de verilen 27 çimento alt tipini kapsamaktadır. Bu ayırmada kullanılan tip ve ana bileşen sembollerini şu şekilde açıklamak mümkündür; A çimentonun en az mineral katkı içeren tipi, B çimentonun A tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipini ve C de çimentonun B tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipini gösterir.

Bunların dışındaki semboller ise aşağıdaki gibidir;

K: Klinker	S: Granüle yüksek fırın cürufu
D: Silis dumanı	P: Doğal puzolan
Q: Doğal, kalsine edilmiş puzolan	V: Silissi uçucu kül
W: Kalkersi uçucu kül	T: Pişmiş şışt
L: Kalker (TOC < % 0.5)	LL: Kalker (TOC < % 0.2)

Bu esas bileşenlerin dışında çimento tiplerine % 0-5 arasında minör bileşen de katılabilmektedir. Bu madde o çimentoda ana bileşen olarak kullanılmamış bir mineral katkı veya çimento özelliklerini iyileştirecek başka bir inorganik madde olabilmektedir.

Çizelge 3.4. TS EN 197-1 Genel çimentoların bileşimleri (TS EN 197-1, 2002)

Ana Tipler	Çimento Tipleri ve İşaretleri		Ana Bileşenler										Minör İlave Bileşen
			Klinker	Yük. Fırın Curufu	Silis Dum.	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker		
						Doğal	Doğal Klsine Edilmiş	Silis	Kalker		L	LL	
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL				
CEM I	Portland Çimento	CEMI	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland Cürüflu Çimento	CEMII/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/A-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEMII/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Puzolanlı Çimento	CEMII/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEMII/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEMII/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEMII/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEMII/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEMII/A	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEMII/B	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portland Kalkerli Çimento	CEMII/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEMII/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEMII/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEMII/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland Kompoze Çimento	CEMII/A-M	80-94	←----- 6-20 ----->									0-5
CEM II/B-M		65-79	←----- 21-35 ----->									0-5	
CEM III	Yüksek Fırın Cürüflu Çimento	CEM III /A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzolanlık Çimento	CEM IV/A	65-89	-	11-35				-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55				-	-	-	0-5	
CEM V	Kompoze Çimento	CEM IV/A	35-64	18-30	-	18-30		-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-34	31-50	-	31-50		-	-	-	-	0-5	

Dayanım sınıfları tanımlanırken de 32.5, 42.5 ve 52.5 gibi 3 standart dayanım sınıfı tanımı yapılmıştır. Bu değerler 28 günlük çimento norm dayanımını ifade etmektedir. Ayrıca her standart dayanım sınıfı için iki erken dayanım sınıfı tanımı da yapılmıştır. Bu amaçla N ve R sembolleri kullanılmıştır. N normal erken dayanım sınıfını R ise yüksek erken dayanım sınıfı belirtmektedir.

Bu çimentoların fiziksel özellikleri Çizelge 3.5’de, kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.6’da verilmiştir. Çizelgelerden görüleceği üzere bu çimentolar fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından birbirlerinden farklıdırlar. Bu nedenle kullanım yerleri ve amaçları da birbirinden farklıdır. Çizelge 3.7’de bu çimentolar karakteri ve kullanım yerlerine göre sınıflandırılmıştır (Troxell et al., 1979; Erdoğan, 1995, 2003).

Çizelge 3.5. Çimentoların fiziksel özellikleri (TS EN 197-1, 2002)

Dayanım sınıfı	Basınç dayanımı, MPa				Priz başlama süresi, dakika	Genleşme, mm
	Erken dayanım		Standard dayanım			
	2 günlük	7 günlük	28 günlük			
32.5 N	-	≥ 16	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75	≤ 10
32.5 R	≥ 10	-				
42.5 N	≥ 20	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60	
42.5 R	≥ 20	-				
52.5 N	≥ 20	-	≥ 52.5	-	≥ 45	
52.5 R	≥ 30	-				
	TS EN 197 - 1				TS EN 196 - 3	

Çizelge 3.6. Çimento tipleri için gerekli kimyasal özellikler (TS EN 197-1, 2002;
TS EN 196-2, 2002)

Özelik	Standart	Çimento tipi	Dayanım sınıfı	Özellikler
Kızdırma kaybı	EN 196-2	CEM I CEM II	Hepsi için	$\leq \% 5$
Çözünmeyen kalıntı	EN 196-2	CEM I CEM II	Hepsi için	$\leq \% 5$
Sülfat miktarı (SO ₃) olarak EN 196-2		CEM I CEM II CEM IV CEM V	32.5N 32.5R 42.5N	$\leq \% 3.5$
		CEM III		$\leq \% 4$
Klorür içeriği	EN 196-2	Hepsi için	Hepsi için	$\leq \% 0.1$
Puzolanik özellik	EN 196-5	CEM IV	Hepsi için	Deneyi sağlar

Çizelge 3.7. Çimentoların karakteri ve kullanıldığı yerler (Erdoğan, 2004)

Çimento tipi	Karakteri	Ana bileşenlerin Miktarları, %			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEM I	Normal portland çimentosu. Her türlü beton yapımında; genel amaçlar için	49	25	12	8
CEM II	Portland kompoze çimentosu. CEM I göre daha az hidrasyon ısısına ve daha çok sülfat dayanımına sahiptir.	46	29	6	12
CEM III	Portland Yüksek fırın cürufu çimentosu. İlk dayanımı yüksek çimento. Erken dayanım gerektiğinde	56	15	12	8
CEM IV	Puzolanik çimento. Düşük ısı çimento. Temeller, istinat duvarları, barajlar gibi hidrasyon ısısı yayılımının az olması gereken kütle betonu dökümlerinde	30	46	5	13
CEM V	Kompoze çimento. Sülfata dayanıklı çimento. Aşırı sülfatlara maruz beton işlerinde	43	36	4	12

Yukarıdaki çizelge mevcut Türk Standartlarında olmamakla birlikte uygulamada kullanılan çimento seçimi doğrultusunda hazırlanmıştır (Erdoğan, 2003, 2004; Yeğinoğlu ve Ertün, 2004).

BÖLÜM 4

MİNERAL KATKILAR

Beton ya da daha genel anlamıyla çimentolu sistemlerin taze ve sertleşmiş durumdaki bazı özelliklerini istenilen yönde değiştirmek, zayıf olan özelliklerini iyileştirmek amacıyla beton karışımına giren; temel malzemelerin karılma işleminden hemen önce ya da bu işlem sırasında karışım içersine katılan kimyasal ve/veya mineral malzemelere beton katkı maddesi denilir

Bu katkı maddelerinden kimyasal olanları değişik maddelerden üretilmiş yapay malzemelerdir. Sıvı ya da toz halinde bulunurlar. Toz halinde olanları su içerisinde çözünme özeliği gösteren bir yapıya sahiptir. Beton ya da harçtaki kullanım oranları oldukça düşüktür. Daha çok betonun işlenebilirlik, priz süresi, korozyon direnci, terleme, hava içeriği ve su ihtiyacı gibi özelliklerini etkileyerek sonuçta dayanım, dayanıklılık ve hacim sabitliği üzerinde olumlu anlamda önemli bir rol oynarlar.

Kimyasal katkı maddeleri;

- Su azaltıcılar (akışkanlaştırıcılar)
- Priz geciktiriciler
- Priz hızlandırıcılar
- Su azaltıcı ve priz geciktiriciler
- Su azaltıcı ve priz hızlandırıcılar
- Yüksek oranda su azaltıcılar
- Yüksek oranda su azaltıcılar ve priz geciktiriciler
- Hava sürükleyiciler
- Diğer katkılar

diye sınıflandırılır (Mehta, 1985; Erdoğan, 1977, 2003; Topçu, 2006).

Betonda kimyasal katkı kullanımı ile birlikte betonun ayrışması önlenir, işlenebilmesi kolaylaşır, kıvamı artar, çökme değeri yükselir, su ihtiyacı azalır, priz süresi istenilen yönde değişir, terlemesi kontrol altına alınır, dayanım özellikleri gelişir ve artar, dayanım kazanma hızı istenilen yönde değişir, dayanıklılık artar ve bazı katkıların kullanımı ile çimentodan eksiltme yapılarak daha ekonomik bir beton elde

edilir (Mehta, 1985; Erdoğan, 1977, 2003; Topçu, 2006). Çimentoda mineral katkı kullanımının bir diğer yararlı amacı ise ekonomik ve çevresel etkiler bakımından elde edilen kazanımlardır. Çünkü çimento üretiminde 1 ton çimentonun elde edilebilmesi için yaklaşık 1 ton CO₂ gazı atmosfere bırakılmaktadır. Dünyada küresel ısınmaya yol açan CO₂ gazı üretiminin % 7'si çimento endüstrisinden kaynaklanmaktadır. Çimento ve beton performansının geliştirilmesinde uygun puzolanların, uygun miktarlarda, bilinçli bir şekilde kullanılması birçok çevresel, teknik ve ekonomik yararlar sağlamaktadır (Postacıoğlu, 1986).

Kimyasal katkılar yukarıda sayılan görevlerini yerine getirirken daha çok çimento ile etkileşime girerek bu işlevi sağlarlar. Bu etki çoğu zaman kimyasal mekanizmalar ve olaylarla olmakla birlikte bazen de fiziksel olaylarla meydana gelir. Kullanılan katkılar daha çok kimyasal olarak polimer yapısındadır. Sülfonatlar, naftalenler, formaldehitler, melaminler, polikarboksilatlar ve kopolimerler en çok kullanılanlarıdır (Akman, 2005).

Mineral katkılar da kimyasal olanlar gibi betonun bazı özelliklerini iyileştirmek, ona istenilen doğrultuda yön vermek amacıyla kullanılan, doğada bulunan ya da bazı endüstrilerin yan ürünü ya da atığı olan, puzolanik özellik taşıyan, ince öğütüldüğünde dolgu malzemesi etkisi de gösterebilen malzemelerdir (Erdoğan, 1977, 2003; Neville and Brooks, 1987).

Mineral katkıları elde edildikleri kaynaklara göre üç grupta toplamak mümkündür;

- Doğal malzemeler (volkanik kül ve tuf, diatomit toprağı, bims, taşunu, vs.)
- Endüstriyel atık ya da yan ürün malzemeler (uçucu küller, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, vs)
- Isıl işlem uygulanmış (kalsinasyon) malzemeler (pişirilmiş şeyl, kil, vs.)

Bu mineraller içerisinde suda soğutulmuş yüksek fırın cürufu gibi bağlayıcı özeliğı olanlar, kalkersi uçucu kül, bazı bitümlü şist külleri gibi hem bağlayıcı hem de puzolanik özellikte olanlar, silis dumanı, pirinç kabuğı külü gibi puzolanik aktivitesi

yüksek olanlar, silissi ucucu kül, doğal veya kalsine puzolanlar gibi normal puzolanlar ve ince öğütülmüş kuvars, kalker ve bentonit gibi atıl malzemeler vardır.

Mineral katkıları genelde doğal ve yapay puzolanlardır. Bu nedenle mineral katkıların çok ince öğütülmüş (en az çimento inceliğinde) olmaları, silisli-alümina içeren kimyasal yapıda ve amorf şekilde bulunmaları gerekmektedir. Mineral katkıları kimyasal katkıların aksine çimentolu sistemlere büyük oranda katılırlar. Bu oran bazı çalışmalarda % 70'lere kadar çıkabilir, (Uğurlu ve Eser, 2008). Bu katkıları ya beton üretimine giren temel malzemeler gibi ayrı bir malzeme olarak betona doğrudan katılarak ya da çimento içerisinde kullanılarak dolaylı bir şekilde karışıma katılırlar. Çimento katılacak mineral katkıları ve bunların oranları TS EN 197-1 çimento standardı tarafından düzenlenmiştir. Bu standartta yüksek fırın cürufu, silis dumanı, kalsine edilmiş ve edilmemiş doğal puzolan, silissi ve kalkersi uçucu kül, pişmiş şist ve kalker gibi mineral katkıları tanımlanarak değişik çimentolar içerisinde % 6' dan % 95' e kadar değişik oranlarda kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu standarda göre çimento içerisinde bu katılardan biri kullanılabileceği gibi bunların birkaçının bir arada kullanıldığı karışımlar şeklinde kullanımlar da mümkündür. Çimento bileşiminin % 90 kadarı dört tür oksitten oluşur. Bunlar C_3S ve C_2S olarak belirtilen kalsiyum silikatlar ile C_3A ve C_4AF olarak belirtilen kalsiyum aluminatlarıdır. Çimento üretiminde mineral katkıları genellikle klinker elde edildikten sonra klinkerle birlikte öğütülerek kullanılırlar. Dolayısı ile çimento elde etmek için daha az hammadde (doğal kaynak) ve daha az enerji kullanılmakta, ortaya daha az sera gazı çıkmaktadır. Katkı maddesi endüstriyel atık ise çevresel yararları daha fazladır. Bu arada toplam bağlayıcı içindeki dört tür oksit in göreceli miktarları katkı miktarına bağlı olarak azalmaktadır. Mineral katkı olarak kullanılan puzolanlar özel koşullar altında kireçle tepkime veren malzemelerdir. Kireç-doğal puzolan tepkimesi aynı şekilde Portland çimentosu-doğal puzolan karışımlarında da görülür.

Çimentolu sistemlerde mineral katkıların kullanılması ile birlikte şu faydalar sağlanır;

- Sertleşmiş beton yapısındaki boşluk oranı ve serbest kireç miktarı azalır, C-H-S jelleri artar

- İşlenebilme iyileşir, kıvam artar, terleme ve ayrışma azalır
- Hidratasyon ısısı düşer
- Alkali silika reaksiyonlarından kaynaklanan genleşmeler azalır
- Geçirgenlik azalır
- Çeşitli kimyasallara karşı dayanım ve dayanıklılık artar
- Bazı katkıların kullanımıyla dayanım özellikleri ve dayanım kazanma hızı artar
- Çoğu kez çimentodan eksilme yapıldığı için daha ekonomik bir beton elde edilir
- Doğal kaynakların ve çevrenin korunması sağlanarak, sera gazlarının emisyonu düşer (Erdoğan, 2003; Yeğinobalı ve ark.,2004; Topçu, 2006)

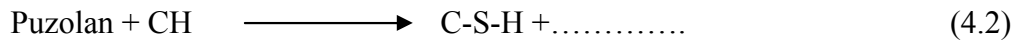
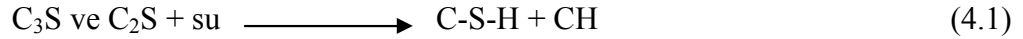
ASTM C 618 ve ASTM C 989; sırasıyla uçucu kül, atık malzemeler ve ısıtma işlem görmüş doğal puzolanlar ile yüksek fırın cürufuyla ilgili standartlardır (ASTM C 618, 1991; ASTM C 989, 2002). Türk Standartları içerisinde ise TS 25 tras standardı ve TS EN 197-1 çimento standardı konu ile ilgili başlıca standartlardır (TS 25, 1975; TSE EN 197-1, 2002).

4.1. Doğal ve Yapay Puzolanlar

Puzolanlar; silis veya silis ve alümina içeren yapıda, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği çok az olan ya da hiç olmayan, ancak ince öğütüldüğünde ve nemli ortamlarda kireç ile tepkimeye girdiklerinde bağlayıcı özellik kazanan malzemelerdir (Troxell et al., 1979; Mindess and Young, 1986; Postacıoğlu,1986; Neville, 1986; Uğurlu,1997; Erdoğan, 2004). Bu özellikleri nedeniyle puzolanlar çimento, harç ve betonda mineral katkı maddesi olarak sıkça kullanılırlar. TS EN 197-1 de tanımlanan beş ana tip çimentonun CEM I hariç diğerleri değişik oranlarda puzolan katılan çimentolardır. Bu çimentolar kullanılan puzolan cinsine göre isimlendirilip kendi arasında 10 farklı alt gruba ayrılır. Bu ayrımında belirleyici özellik puzolanın cinsi ve çimentodaki kullanım oranıdır. Daha önceki çimento standartlarında bu tip çimentolar katkılı ve traşlı çimento ana başlığı altında toplanmıştır. TS EN 197-1 'de ise bu sınıflama ve puzolan cinsi ve kullanımı daha geniş tutularak geliştirilmiştir. Bu çimento standardında puzolan

kullanım oranı puzolanik çimentoda % 95'lere kadar çıkmaktadır. Bu tip çimentoların üretiminde klinker hazırlandıktan sonra puzolan öğütülme esnasında çimentoya katılmaktadır. Puzolan pişirilmeden sadece öğütüldüğünden bu çimentoların üretiminde daha az yakıt sarfıyatı ve daha az CO₂ emisyonu oluşmaktadır.

Puzolanların içerisinde kolloidal halde fazla miktarda silis ve alümina bulunur. Bu maddeler daha önce Bölüm 3' de anlatılan C₃S ve C₂S' in hidratasyonu sonucu meydana gelen sönmüş kireç ile tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği olan C-S-H jelleri meydana getirirler. Bu tepkimeler aşağıdaki denklemler ile açıklanır;

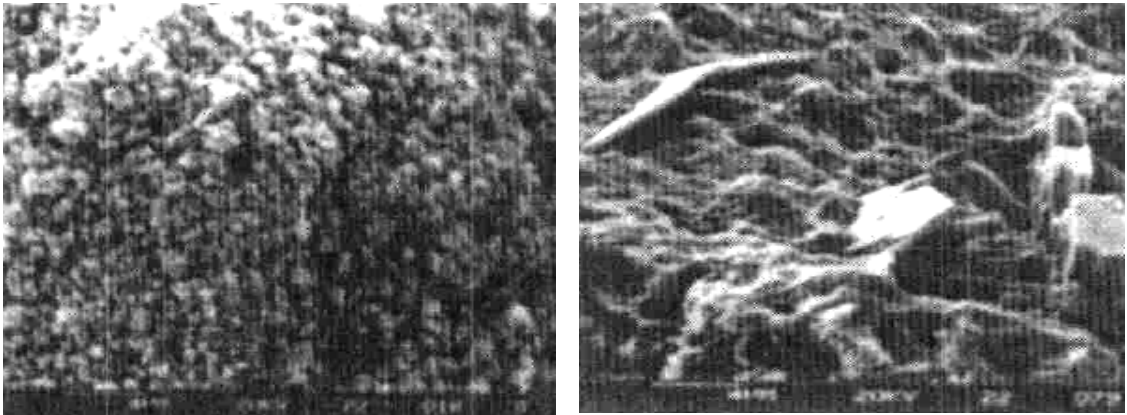


Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireç ve su ile ne ölçüde tepkimeye girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği puzolanik aktivite olarak tanımlanır. Bu malzemelerin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için yeterince ince taneli öğütülmüş olması, yeterli miktarda silis, alümina, demiroksit içermesi ve amorf yapıda olması gereklidir, (Erdoğan, 2004). Bütün katkılarda olduğu gibi puzolanların kullanılacağı durumlarda da mutlaka gerçek kullanım şartlarına uygun denemeler yapılması gerekir. Her puzolanik malzemenin beton özelliklerine etkisi bir diğerinden farklı olduğu gibi, aynı kaynaktan farklı zamanlarda alınan puzolanların da özelliklerinde değişiklikler olması kaçınılmazdır. Puzolanların, beton özellikleri üzerindeki etkileri kimyasal, mineralojik bileşimlerine, inceliklerine, birlikte kullanıldıkları çimentonun özelliklerine vb. bağlı olarak değişebilir. Örneğin uçucu küllerin özellikleri, elde edildikleri kömürün cinsine ve içerdiği safsızlıklara, termik santraldeki yakma sıcaklığına, kül toplama sistemlerine vb. birçok değişkene bağlıdır. Bu özelliklerdeki farklılıklar da kullanıldıkları betona olan etkilerinde değişikliklere yol açar.

Puzolan katkılı çimentolardaki klinker miktarının portland (CEM I) çimentosu klinker miktarından daha az olması sebebiyle çimento ana bileşenleri de bu tip çimentolarda daha azdır. Bu tip çimentoların su ile teması sonrasında ortaya çıkan C-S-H jeli oluşumu da başlangıçta yani puzolanik tepkime gerçekleşene kadar daha

düşüktür. Bu nedenle puzolan katkılı çimentoların ilk günlerdeki dayanım kazanma hızı daha düşüktür. Buna karşılık silikatların hidratasyon tepkimesi sonucu ortaya çıkan serbest kireci (CH) bağlayıp C-S-H jeline dönüştürdükleri için de nihai dayanımları portland çimentolarına göre çoğu zaman aynı seviyede veya daha yüksektir. Bileşimlerdeki az miktardaki klinkerin ilk başlarda hidratasyona katılan kütlelerin az olmasına yol açması nedeniyle puzolan katkılı çimentoların hidratasyon ısısı da düşüktür. Puzolanlı çimentoların gerek dayanım kazanma hızı ve gerekse de hidratasyon ısısındaki azalma kullanılan puzolanın aktivitesine, miktarına ve inceliğine bağlı olarak değişir.

Bilindiği gibi Portland çimentosunda bulunan C_3S ve C_2S bileşenlerinin hidratasyonu ile $Ca(OH)_2$ açığa çıkar ve gözeneklerde çökelti halinde birikir. Portland çimentosu hidratasyonu ile açığa çıkan $Ca(OH)_2$; suda çözünür ve geride boşluklar bırakarak ortamı terk edebilir. Ayrıca $Ca(OH)_2$ betonda zararlı kimyasal etkilere en açık bileşendir. Dolayısıyla mineral katkılı çimentolarda Portland çimentosu kısmının hidratasyonu ile açığa çıkan $Ca(OH)_2$ 'in puzolanlar ile birleşerek dayanım kazanımını sağlayan C-S-H jelleri vermesi (Şekil 4.1) (Karakurt, 2008) betonun dayanıklılığı açısından olumlu gelişmeler sağlar.



Şekil 4. 1 a) Betonda $Ca(OH)_2$ oluşumu. b) Puzolanın $Ca(OH)_2$ bağlaması.

Puzolanik malzemelerin çimentolu sistemlere sağladığı faydaların yanı sıra puzolanların dikkat edilmesi gereken olumsuz etkileri de vardır. Puzolanlı çimentolar ya da puzolanların bir şekilde kullanıldığı çimentolu sistemlerin özellikle soğuk havada

prizi geç olup ve ilk günlerdeki dayanım kazanma hızı da düşüktür. Bu nedenle puzolanlar kalıp alma süresini uzatır. Böylece betonun daha dikkatli ve daha uzun kür edilmesine gereksinim duyulur. Ayrıca betonda hava sürükleyen katkı kullanılması durumunda hava içeriğini azaltacağından dolayı daha fazla katkı maddesi kullanımını gerektirir. Aynı zamanda rötreyi de arttırdığı bilinmektedir.

Puzolanların kullanımı yaklaşık olarak 2000 yıl öncesine dayanır. Romalılar, bugünkü İtalya’ da Vezüv yanardağı eteklerinde bulunan Pozzuoli kasabasında volkanik küllerin su ve söndürülmüş kireçle karıştırıldığında bağlayıcı bir malzeme olduğunu keşfetmiştir. Eski Mısır ve Ön Asya’ da ise kilin pişirilip sönmüş kireç ile karıştırılması sonucu Horasan denilen bir harç üretilerek bununla çeşitli yapılar inşa edilmiştir. Osmanlılar da bu harcı yaygın olarak kullanmışlardır (Postacıoğlu, 1986; Uğurlu,1997; Erdoğan, 2004).

Puzolanlar sönmüş kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcılık kazanma özelliği bakımından farklılıklar gösterirler. Bir puzolanın reaksiyon sonunda bağladığı kireç miktarı ne kadar fazla ise puzolanik özelliği de o kadar yüksektir. TS 25 ve ASTM C 618’e göre puzolanın içerdiği $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının ağırlıkça en az % 70 olması da gereklidir (TS 25,1975; ASTM C 618, 1991). Çizelge 4.1’deki bu kimyasal özelliklerin uygun olması halinde ayrıca yapılacak olan kimyasal ve fiziksel deneyler ile kullanılan maddenin puzolanik özeliğinin varlığı kanıtlanmalıdır. Bu deneyler TS 25 ve ASTM C 618’e göre yapılır. Deneylerde iki farklı yöntem kullanılır. Birincisinde; Portland çimentosu, puzolan, kum ve su kullanılarak üretilerek harçların 28 günlük dayanımları puzolansız basınç dayanımının en az % 75’ ini sağlaması koşulu aranır (ASTM C 618, 1991).

Çizelge 4.1. Puzolanların kimyasal özellikleri (TS 25,1975; ASTM C 618, 1991)

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$,	en az	% 70,0
MgO,	en çok	% 5,0
SO ₃ ,	en çok	% 3,0
Rutubet,	en çok	% 10,0

İkinci yöntem TS 25' de mevcuttur. Bu yöntemde göre puzolan, sönmüş kireç, kum ve su kullanılarak elde edilen harçların 7 günlük basınç dayanım değerleri saptanır. Bu değerlerin en az 40 kgf/cm² olması gereklidir. ASTM C 618' e göre ise doğal puzolan veya uçucu kül kullanılması durumunda bu değerlerin en az 55 kgf/cm² olması gereklidir.

Puzolanlar; doğal puzolanlar ve bir üretim sırasında yan ürün ya da atık malzeme olarak elde edilen yapay puzolanlar olmak üzere ikiye ayrılır (Postacıoğlu,1986; Uğurlu,1997; Erdoğan, 2004). Isıl işlem sonrasında puzolanik özellik gösteren malzemeler de yapay puzolanlar içerisinde değerlendirilir. Doğal puzolanların büyük bir bölümü volkanik orijinli malzemelerdir. Volkanik püskürme sırasında silisli ve alüminli malzemelerden oluşan eriyik durumdaki magma yüzeye lav olarak çıkar ve çok çabuk soğuma gösterdiği takdirde camsı (amorf) bir yapıya dönüşür. Püskürme sırasında eriyik içerisinde gazların da bulunması nedeniyle malzeme yoğun olarak gözenekli olup yüzey alanı da çok büyüktür. Yapay puzolanlar içerisinde ise en çok bilinen ve kullanılanı uçucu kül, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufudur. Bu malzemelerin puzolanik aktiviteleri yüksek olup temini de kolaydır. Doğal puzolanlar: volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, tras, pomza taşları, opalin çeşitleri, volkanik camlar, killi şışt, diatomit ve vs'dir. Yapay puzolanlar ise uçucu kül, mikro silis, pirinç kabuğu külü, yüksek fırın cürufu, kil (pişirildiğinde), genleştirilmiş kil, şeyl (pişirildiğinde), öğütülmüş tuğla ve vs'dir.

Bu sınıflandırmadan da anlaşılacağı üzere, doğal puzolanlar kimyasal bileşim itibari ile çimentoya yakın bir oksit bileşimi içerdiğinden pişirilmeden sadece öğütülerek doğrudan çimentoya katılır. Böylece enerjiden büyük tasarruf sağlanmış olur. Doğal puzolanlar bizim ülkemizde daha çok tras olarak adlandırılır. Dünyanın en önemli doğal puzolan yatağı Almanya' da Ren vadisindedir. Buradan çıkarılan puzolan tras diye isimlendirilir. Bu puzolanın üstün özelliklere sahip olması bakımından doğal puzolanlar birçok ülkede tras diye adlandırılmaktadır.

Türkiye doğal puzolanlar açısından oldukça zengin bir bölgedir. Türkiye jeoloji haritasına bakıldığında 155 000 km² lik bir alanın volkanik kayaç oluşumlarına sahip olduğu görülür. Bununla birlikte bu alan üzerinde büyük jeolojik farklılıklar tespit edilmiştir. Türkiye’de puzolanların aktivitesi yüksek olup özellikle Çorum bölgesindekiler epeyce iyidirler. Geniş bir coğrafyaya yayılmış olan puzolanların kalitesi de doğal olarak bölgeden bölgeye farklılık gösterir. Doğal tras yataklarından elde edilen puzolanların kimyasal özellikleri arasında oldukça fark vardır. Doğal olarak bu fark çimentonun davranışına da yansır. Çizelge 4.2. Bazı puzolanların ortalama kimyasal bileşimleri ile özgül yüzeyleri verilmiştir (Turanlı, 1995).

Çizelge 4.2. Bazı puzolanların ortalama kimyasal bileşimleri ile özgül yüzeyleri (Turanlı, 1995)

Bileşimdeki Oksitler	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	Özgül Yüzey, m ² /kg
Portland Çimentosu	21	6.5	64	20-30
Doğal Puzolanlar	65	18	6	≥ 20-30
F-tipi(Si-Al) Uçucu kül	80-90	10-20	0	≥ 20-30
Pirinç Kabuğu Külü	90-95	-	0	50000-60000
Silis Dumanı	100	-	-	15000-25000

Yapay puzolanlar içerisinde çimento - yapı sektöründe en çok kullanılanları pişmiş kil, uçucu kül ve yüksek fırın cürufudur. Bunlardan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, çimento içerisine çimentodan eksiltme yapılarak katılma suretiyle kullanılmaktadır. Mikro silika ise çimento yerine doğrudan betona katılarak kullanılmaktadır. Pişmiş kil ve şeyl kilin bileşimine bağlı olarak, kilin 600 - 900 °C’ler arasında pişirilip en az çimento inceliğinde öğütülmesi ile elde edilirler. Tuğla ve kiremit tozu da aynı şekilde kullanılabilir. Uçucu küller ise termik santrallerdeki elektrik enerjisinin elde edilmesi sırasında toz haline getirilmiş düşük kalorili kömür tozlarının 800 - 1000 °C’lik fırınlara püskürtülerek yakılması sonucu meydana gelen kül partiküllerinin büyük kısmı baca çekişi nedeniyle bacada tutulmakta ve baca gazları içinde ani soğuma neticesinde

puzolanik özellik kazanan küllerin toplanması ile elde edilir. Yüksek fırın cürufu (granüle); yüksek fırında demir cevherinin işlenmesi sırasında pik demirle aynı anda yan ürün olarak elde edilir. Ana bileşenleri kalsiyum ve alüminyum silikatlar olan ve ani soğuma sonucunda puzolanik özellik kazanan bir malzemedir.

4.2. Uçucu Kül

Uçucu kül çimento, harç ve betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılan yapay bir puzolandır. Diğer puzolanlar gibi kendi başına bağlayıcılık değeri olmamasına karşın nemli ortamda kireçle tepkimeye girerek C-S-H jelleri oluşturarak sertleşir. Uçucu küller kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde ortaya çıkan bir atık üründür. Üretimde genellikle endüstride kullanılmayan, düşük kalorili kömürler kullanılır. Bu kömürler çok ince öğütülürler ve termik santral fırınında yakılırlar. Termik santrallerde kullanılan taş kömürlerinin %10-15'i, linyit kömürlerinin ise % 20 - 40'ı küldür. Elektrik enerjisi üretimi için termik santrallerin çoğunda yakıt olarak kömür kullanılır. Burada kömürün % 80'ni 75 mikron elekten geçebilecek şekilde inceliğe kadar öğüterek hava ile birlikte kazanları ısıtmak amacıyla püskürtülerek verilir (Erdoğan, 2003). Bu ince öğütülmüş kömürün yanmasıyla büyük bir miktarı çok ince olan, kalan bir miktarı da nispeten daha iri olan kül tanecikleri ortaya çıkar. Bu santrallerde; görece olarak iri taneli olup baca gazları ile taşınamayan ve kazan tabanına düşen taban külü, siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutulularak uzaklaştırılması ile elde edilen ham kül ve çok ince taneli olup baca gazları ile taşınırken elektron filtrelerde tutulan uçucu kül olmak üzere üç tür uçucu kül elde edilir (Türker vd., 2007). Uçucu küller daha sonra bunkerlerde biriktirilir ve periyodik olarak santral dışına alınır. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık % 75 – 80'ni gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli uçucu küllerdir. Küllerin filtrelerde tutulması sonucu önemli bir çevre kirliliği önlenmiş olunur. Yakılan 1 kg kömürden 17,5 gr. uçucu kül oluştuğu bilinmektedir.

Türkiye'de halen Afşin Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 adet termik santral bulunmakta ve yılda yaklaşık 50 milyon ton linyit kömürü

yakılmaktadır. Yakılan kömürden yaklaşık 13 milyon ton/yıl uçucu kül atık olarak doğal çevreye bırakılmaktadır. Çok geniş miktarlarda depolama alanlarında biriken atık malzeme tarım alanları su kaynakları ve doğal çevreye önemli zararlar vermektedir. Bu küllerin taşınması ve depolanması da ciddi maliyetler oluşturmaktadır. Ayrıca uçucu küllerin biriktirilmesi veya atılması önemli oranda çevre kirliliğine yol açmaktadır. Uçucu küllerin neden olduğu çevre problemleri arasında, tozlanma, tarım ürünlerine zarar vermesi, yağmur ve rüzgâr erozyonu, toprakta süzülme nedeniyle toksik madde taşınması ve radyasyon sayılabilir. Bu çevre sorunları nedeniyle tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölge ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

Her endüstriyel atık gibi uçucu külden de yararlanma olasılıkları araştırılmıştır. Bunların başında çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması gelmektedir. Beton blok ve boruların üretiminde de uçucu külden yararlanılmaktadır. Ayrıca özel işlemlerle uçucu külden dayanıklı hafif agrega elde edilebilir. Diğer kullanım alanları: beton ve asfalt yol temel tabakalarında dolgu malzemesi olarak, zemin stabilizasyonunda, kireç-kumtaşı blokların üretiminde, katı atıkların stabilizasyonunda ve bitki yetiştirilmesinde kullanımları sayılabilir. Uçucu külün çok az bir kısmı ise yine inşaat sanayinde tuğla üretiminde ve yol yapımında kullanılmaktadır. Uçucu külün çok az miktarı çimento ve beton üretiminde agreganın yerine ya da katkı olarak yapı malzemesi üretiminde kullanılabilir. Dünya’da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır. En büyük uçucu kül üretimi Rusya ve ABD’de yapılmaktadır. Dünyada üretilen toplam uçucu külün % 25’den daha azı değerlendirilmektedir. Ülkelere göre ise değerlendirme oranları farklılıklar sergilemektedir. Almanya, Hollanda ve Belçika’da üretilen toplam uçucu külün % 95’ten fazlası, İngiltere de ise yaklaşık % 50’si kullanılmaktadır. Büyük miktarlarda uçucu kül üreten ABD’de % 32, Çin’de % 40 oranında uçucu kül kullanılmaktadır (ACI 232.2R-03, 2004).

Türkiye’de betonda uçucu kül kullanımı ile ilgili ilk çalışmalar 1960 yıllarında başlamıştır. DSİ tarafından yürütülen çalışmalar sonucu Porsuk ve Gökçekaya barajları kütle betonlarında hidrasyon ısısını düşürmek için çimentonun ağırlıkça % 25’i yerine

yaklaşık 55 bin ton ağırlığında Tunçbilek uçucu külü kullanılmıştır (Tokyay,1993). Bu gelişmelerden sonra TSE tarafından uçucu kül ve uçucu küllü çimento standartları yayınlanmışsa da ülkemizde uçucu küllü çimento üretimi hiç yapılmamıştır.

Uçucu külün özellikleri yakılan kömürün özelliklerine ve yakma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Yüksek miktarda SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içerirler. Bunların yanı sıra CaO , MgO ve sodyum ve potasyum alkali oksitleri de içerirler (Mehta, 1985; Erdoğan, 2003; ACI 232.2R-03, 2004). Uçucu küllerin büyük bir bölümü (% 60-90) amorf durumdadır. Geri kalan bölümünde mullit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer almaktadır (Lane and Best,1982; Erdoğan, 2003). Genellikle küresel şekilli olup katı parçacıklar şeklinde bulunurlar. Tane boyutları 1–150 mikrometre arasında değişiklik gösterirler. Normal olarak 2,1 ila 2,7 gr/cm^3 arasında yoğunluğa sahiptirler.

4.2.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması

Uçucu küller kimyasal bileşenlerine göre sınıflandırılmaktadır. Sınıflandırmalarda ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır, ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F (düşük kireçli) ve C (yüksek kireçli) sınıflarına ayrılır (ASTM C 618, 1991), Çizelge 4.3' de uçucu kül uygunluk kriterleri verilmiştir. F sınıfı uçucu küller; bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 70'den fazla olan uçucu küllerdir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılır. F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller; linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı % 50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küller $\text{CaO} > \% 10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu küller olarak da adlandırılır. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

Çizelge 4.3. Uçucu kül uygunluk kriterleri

Oksit Bileşenler	TS 639	TS EN 450	TS EN 197-1		ASTM C 618	
			V	W	F tipi	C tipi
SiO ₂	-					
Al ₂ O ₃	-					
Fe ₂ O ₃	-					
S+A+F	> 70,0	> 70,0			> 70,0	> 50,0
CaO	< 10,0				< 10,0	>10,0
MgO	< 5,0					
SO ₃		< 3,0			< 5,0	< 5,0
K ₂ O						
Na ₂ O		-				
KK	<10,0		<5,00	<5,00		
Cl						
Serbest CaO	<1,00					
Reaktif SiO ₂	>25,00	>25,00	>25,00	>25,00		
Reaktif CaO		<10,00	<10,00	>10,00		
Nem	<3,0	<3,0			<3,0	<3,0

TS EN 197 – 1 standardına göre ise uçucu küller V sınıfı (silissi) ve W sınıfı (kalkersi) olmak üzere iki gruba ayrılır (TSE EN 197 – 1, 2002). V sınıfı uçucu küller; çoğunluğu puzolanik özelliğe sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO₂) ve alüminyum oksitten (Al₂O₃) oluşur; geri kalanı ise demir oksit ve diğer bileşenlerden oluşan küllerdir. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının ise % 25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller; hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO₂ ve Al₂O₃'dan oluşurlar. Bu küllerde, reaktif kireç oranı (CaO) % 10'dan, reaktif silis miktarı ise % 25' ten fazla olması gerekmektedir (Çizelge 4.3).

4.2.2. Uçucu küllerin kimyasal ve minerolojik bileşimleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve üretim süreci koşulları tarafından (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, kükürt giderme gibi) belirlenir. Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ve CaO olup diğerleri SO_3 , MgO ve alkali oksitlerdir. Ayrıca içerisinde yanmamış karbon ve bunun yanı sıra titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunmaktadır. Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO_2 kaybını da içine almaktadır. Kızdırma kaybı, % 1,0 – 10 arasında değişmektedir (ACI 232.2R-03, 2004; Türker vd. 2007).

Uçucu külde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanımda önemli rolü olan kalsiyum silikat hidrat jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis külün aktif bileşeni olup puzolanik tepkimelere girmek üzere alkali ortamda çözünen silistir. Bu bileşik, amorf veya camsı faz halinde bulunurken mullit veya kuvars gibi diğer silissi bileşenler inert olup kristal halde bulunurlar. Reaktif silis miktarının, uçucu külün tipine bağlı olmaksızın en az % 25 olması gerekmektedir. Reaktif kireç ise düşük kireçli küllerde %10'un altında olmakta; yüksek kireçli küllerde % 10-15 arasında değişmektedir (ACI 232.2R-03, 2004; Türker vd. 2007).

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşimlerinden daha çok minerolojik yapıları ile ilgilidir. Özellikle camsı fazın durumu uçucu külün reaktivitesinde etkili olmaktadır. Uçucu külün minerolojik bileşimi, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirit, alçı taşı, karbonatlar) ve süreç koşullarına (kömür hazırlanma ve yanma gibi) bağlıdır. Uçucu külün minerolojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımda olmak üzere, camsı ve kristal yapılu bileşenlerden oluşmaktadır. Uçucu külün minerolojik bileşimi, külün puzolanik özelliklerini etkilemektedir. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı faz, SiO_2 açısından zengin, polimerleşmiş silis veya alüminyum da içeren alüminosilikat bileşimindedir. Silissi veya alümina silikat camsı faz düşük kireçli külün reaktif bileşeni olup, su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona

girerek, küle puzolanik özellik kazandırmaktadır. Yüksek kireçli külden ise aktif bileşen, içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camı fazın yanı sıra aktif kristal fazlardır. Burada saf silikat camı Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Bu faz bir bakıma cüruf yapısına benzemektedir. Yüksek kireçli külden camı ve kristal fazları, külden puzolanik özelliğinin yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlar.

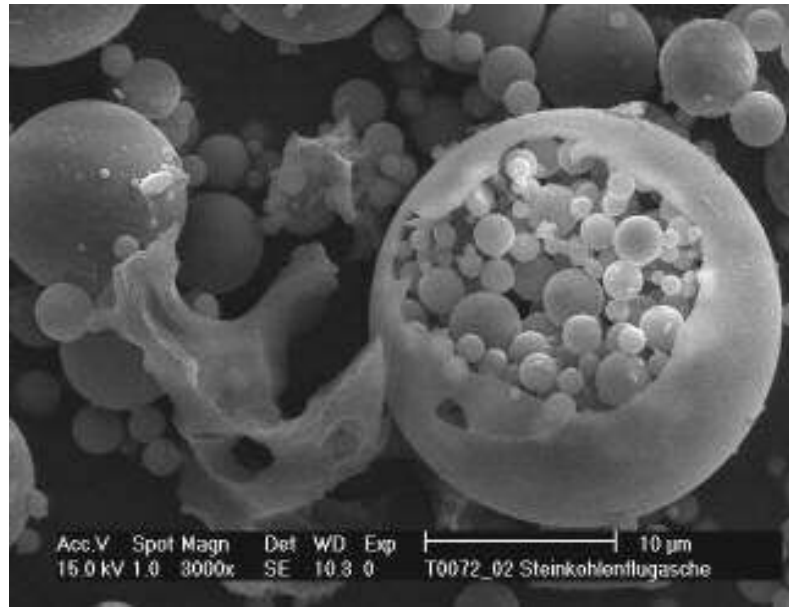
Düşük kireçli uçucu külden yüksek silisi camı faz genellikle kalsiyum, alkali ve hidroksit ilavesi halinde yavaş olarak tepkimeye girer. Yüksek kireçli külden kalsiyum alüminasilikat camı fazı su ile tepkimeye girerek bağlayıcı fazları oluşturur. Bu nedenle yüksek kireçli uçucu külden camı fazı düşük kireçli uçucu külden daha az, ancak daha reaktif olduğu bilinir. Yüksek kireçli külden anhidrit, serbest kireç gibi kristalize fazlar külden kendiliğinden bağlayıcı olmasına katkıda bulunmakla birlikte, SO₃ en fazla % 3 ve % 5 (TS 639, 1975; ASTM C 618, 1991; TS EN 450, 1998), serbest kireç % 1'i aştığı takdirde SO₃ fazlalığı ileri yaşlarda betonda sülfat genişlemesine, serbest kireç ise hidrasyon sırasında kalsiyum hidroksit oluşturarak betonda genişleme ve çatlak oluşumuna sebep olur. Ayrıca yüksek kireçli uçucu külden bulunan alüminat bileşimindeki gehlenit de külden yüksek SO₃ olduğunda tepkimeye girmekte buna karşılık düşük kireçli külden kristalize faz olan mullit, alüminat bileşiminde olduğu için inert bileşen olarak kalmakta; dolayısıyla sülfat genişlemesine yol açmamaktadır (ACI 232.2R-03, 2004; Türker vd. 2007).

4.2.3. Morfolojik özellikleri

Tanecik morfolojisi ve tanecik büyüklüğü dağılımında; kömürün orjini ve üniform olması, kömürün pulverizasyon durumu, sıcaklık ve oksijen seviyesi gibi yanma koşulları, yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi sürece bağlı etmenler etkili olmaktadır.

Uçucu külden büyüklükleri 0.5 – 150 mikron arasında değişen hem camı hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır (Şekil 4.2). Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları uçucu külden düşük veya yüksek kireçli olmasından kaynaklanmaktadır. Küresel olmayan tanecikler kömürden gelen ve yanma

tepkimelerine katılmamış minerallerden oluşmaktadır (ACI 232.2R-03, 2004; Türker vd., 2007). Düşük kireçli küllerde genellikle camsı fazı gösteren içi boşluksuz tam küresel tanecikler ve bunun yanı sıra senosfer, plerosferler bulunmakta olup bu küller, şekil dağılımı açısından genelde homojen olan mikro yapıya sahiptirler. Yüksek kireçli küllerde, mikro yapı içerisinde hem köşeli hem de küresel, dengesiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küllerdeki kadar düzgün değildir.



Şekil 4.2. Uçucu kül SEM görüntüsü (ACI 232.2R-03).

Taneciklerin şekil ve büyüklük dağılımları, taze betonun su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi reolojik özelliklerine etki etmektedir. Bu etki; özellikle küresel taneciklerin kayganlaştırıcı nitelik taşıması ve dolgu maddesi özelliğine sahip olma ve şekilsiz, pürüzlü yüzeye sahip olanların ise su ihtiyacını artırma şeklinde olmaktadır. Ayrıca uçucu külün tane büyüklüğü dağılımının çok değişken olması halinde de su ihtiyacı artmaktadır. Uçucu külün granülometrik bileşiminin çoğunun 40 mikronun altında olması ve şeklinin de küresel olması puzolanik aktiviteye olumlu etki etmektedir. Özellikle yüzeyi pürüzsüz ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip oldukları için kireç-silikat tepkimelerine daha hızlı girmektedirler. Buna bağlı olarak

yüksek kireçli külün aktivitesinde kristal aktif fazlar (anhidrit-kireç) ve az camsı faz rol oynamakta, düşük kireçlide ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın fazlalığı önem taşımaktadır (ACI 232.2R-03, 2004; Türker vd., 2007).

4.2.4. Uçucu küllerin çimentolu sistemlere sağladığı yararlar

Çok ince taneciklerden oluşan uçucu küllerin katılması ile çimentolu sistemlerin işlenebilme özelliği düşünülenin aksine artar. Burada gelişen daha çok taze betonun kohezyonu, yani kendi kendisini bir arada tutabilme yeteneğidir. Ancak uçucu küllü beton yerleştirme sırasında da yeterli bir akıcılığa sahip olabilmektedir. Yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri daha kolaylıkla yapılabilir. Uçucu küllerin ince olmaları nedeni ile malzemenin özgül yüzeyini de arttırmaktadır. İlk bakışta, betonun su ihtiyacının artacağı ve dolayısı ile daha düşük mukavemetli bir beton elde edileceği düşünülebilir. Ancak uçucu küllerin küresel bir geometriye sahip olmaları su ihtiyacını arttırmadığı gibi daha düşük bir su-çimento oranı ile istenilen işlenebilme özelliğini elde etmeye olanak sağlamaktadır.

Çimentoya katılarak kullanılmaları halinde, beton dayanımına katkıları ilk günlerde çok düşüktür. Ancak 3 - 4 hafta sonunda beton dayanımında normalin üstünde bir artış gözlenir. 56. gün civarında ise bu artış iyice belirginleşir. Küçük ve üniform tanelerden oluştuğu için uçucu kül betonun daha düzgün yüzeyli olmasını sağlar. Cephe betonu dediğimiz bürüt beton elemanların karışımlarında uçucu kül kullanılabilir. Ancak renginin koyu olacağı dikkate alınmalıdır. Hidratasyon ısısı daha düşüktür, dolayısı ile beton elemanlarındaki ısı gelişimi düşük, termik rötne ve çatlak olma olasılığı azdır. Bu nedenle büyük miktarda dökülen barajların kütle betonlarında uçucu kül aranılan bir malzemedir. Düşük yoğunlukları nedeni ile betonun yoğunluğunun azalmasını sağlarlar. Taze betonda, kalıba yerleştirme sırasında küller hafiflikleri ve elektro-statik itme yetenekleri sonucu askıda kalırlar, çökmezler. Ortamdaki çimentonun çökmesi de bu nedenle kısıtlanmış olur ve sonucunda terleme olayı da önemli ölçüde azalır. Harç kararlı hale gelerek daha homojen bir yapıda sertleşir. Kararlılık, özellikle enjeksiyon harçlarında aranılan bir özelliktir. Bu yüzden uçucu

küllü çimento şerbetleri öngerme kablolarının kanallarının enjeksiyonlarında ve zemin enjeksiyonlarında çok kullanılır.

Çimentonun hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan serbest sönmüş kireç Ca(OH)_2 portland çimentolu betonlar için bir zayıflık kaynağıdır. Bu kireç suda çözünerek betonun boşluklu yapıya sahip olmasına ve geçirimsizliğini yitirmesine neden olur. Ayrıca serbest kireç ortamdaki SO_2 ile birleşerek alçı taşına dönüşebilir ve betonda hasar meydana getirebilir. Bu etkiler serbest kirecin bağlanması ile ortadan kaldırılabılır. Uçucu küller sulu ortamda kireci bağlamaları nedeniyle betonların dış etkilere daha dayanıklı olmalarını da sağlarlar.

Bazı portland çimentolarında mevcut olabilen Na_2O , K_2O gibi alkali oksitleri agregada bulunabilecek kristobalit, opal, kalseduvan gibi aktif silis minerallerle birleşerek bir Ca-Na-K silikat jeli oluştururlar. Bu jel şişip genişerek betonda hasar oluşturur. Bu olay, ortama çimentodan yeterince Na^+ , K^+ iyonlarının geçebilmesine ve jelin oluşabilmesi de ortamda yeterli miktarda Ca^{++} iyonu bulunmasına bağlıdır. Uçucu kül kireci bağlayarak ilgili iyonların ortama geçmelerini engeller. Bu bakımdan alkali-agrega reaksiyonunu durdurur. Ancak bu durum uçucu külün belli bir orandan fazla bulunması halinde mümkündür. Eğer uçucu kül az ise uçucu kül aktif silis miktarını arttıracığı için, tepkime daha da şiddetlenebilir. Uçucu küllerin çimentolu sistemlerin geçirgenliğini de azalttığı belirtilmektedir (ACI 232.2R-03, 2004).

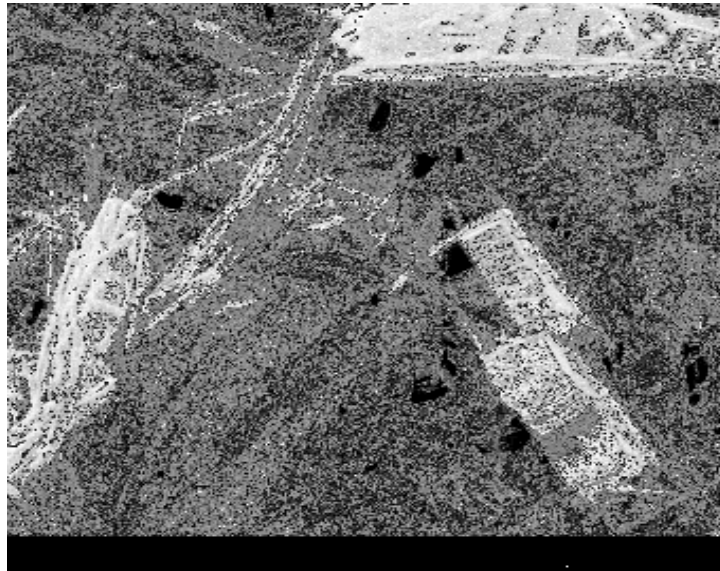
Çimentodaki serbest kireçle reaksiyona giren küldeki silistir. F tipi küllerin yapısının % 90'a yakın kısmı silis veya silis ve alümina olduğundan betonda çimentoya ilave veya ikame olarak kullanılmaları mümkündür. C tipi küller de aynı amaçla kullanılabilirler. Ancak silis miktarları F tipine kıyasla daha az ve kireç oranları ise çok yüksektir. Kirece doymun olduklarından çimentodaki serbest kireci bağlayacak silis bulursa dahi, ortamda yine de kireç var olacaktır. Bu bakımdan daha çok betonda ince dolgu malzemesi olarak kullanılmaları daha uygundur.

4.3. Volkanik Tüf

Doğal puzolanların büyük bir bölümü volkanik orijinli malzemelerdir. Magmatik kayaç sınıfına dahildirler. Volkanik camlar, tüfler (traslar) ve küller en çok bilinenleridir. Volkanik püskürme sırasında silis ve alüminalı malzemelerden oluşan eriyik durumdaki magma yüzeye lav olarak çıkarak çok çabuk soğuduğunda camsı (amorf) yapıya sahip olur. Püskürme sırasında eriyik içerisinde gazların bulunması sebebiyle malzeme gözenekli hale gelir. Yüzey alanının büyük olması ve düzensiz yerleşim göstermelerinden ötürü alüminalı silisler sulu ortamda kalsiyum iyonlarıyla kolayca reaksiyona girebilmektedir. Volkanik püskürmenin çok çabuk gerçekleşmesi malzemenin daha fazla amorf yapıya ve yüksek puzolanik aktiviteye sahip olmasına yol açmaktadır (Erdoğan, 2003). Volkanik tüfler volkanik patlamalar sonucunda atmosfere atılan erimiş magma parçacıklarından oluşur. Genellikle sıkışmamış parçacıkların metamorfoz ya da diğer doğal işlemlerle, hava etkisine maruz kalması ve taşlaşmasından oluşan sıkışık katmanlarla beraber bulunurlar. Hava etkisine maruz kalma tüfün camsı yapısının zeolitleşmesine neden olmaktadır. Zeolitleşme malzemenin puzolanik özeliğinde iyileşmeye yol açar. Puzolanik aktivite, tüflerin camsı yapısı ve içinde bulunan amorf silis miktarı ile doğru orantılıdır. Doğal puzolanların hemen hemen tamamı volkanik kökenlidir. Anadolu toprakları volkanik aktivitelere maruz kaldıklarından volkanik tüfler bakımından oldukça zengindir. Özellikle orta Anadolu yöresinde çok miktarda bulunan bu malzemelerin çimento üretiminde kullanılması ekonomik ve çevresel yönden olumlu kazanımlar sağlayacaktır. Volkanik tüflerin puzolanik aktivitesi yüksek sıcaklıkta kalsinasyon işlemi ile arttırılabilmektedir. Volkanik tüflerin kimyasal yapısı yöresel olarak farklılık gösterse de birbirine yakın içeriklere sahiplerdir (Liebig and Althaus, 1998; Erdoğan vd., 2003; Karakurt, 2008). Su tutma kapasitesi yüksektir. Yalnız olarak kullanılabilceği gibi diğer malzemelerle değişik oranlarda karıştırılarak da kullanılabilir. Özellikle karıştırıldığı ortamların havalanmasını artırır.

Volkanik tüfler özellikle Orta ve Doğu Anadolu Bölgelerinde yaygın olarak bulunan, kolay dağılabilen, koyu kırmızı, beyaz ve siyah gibi değişik renkte olan bir puzolandır. Volkanik tüflere en iyi örnek zeolit tüfleridir (Topçu, 2006b). Zeolit kelime

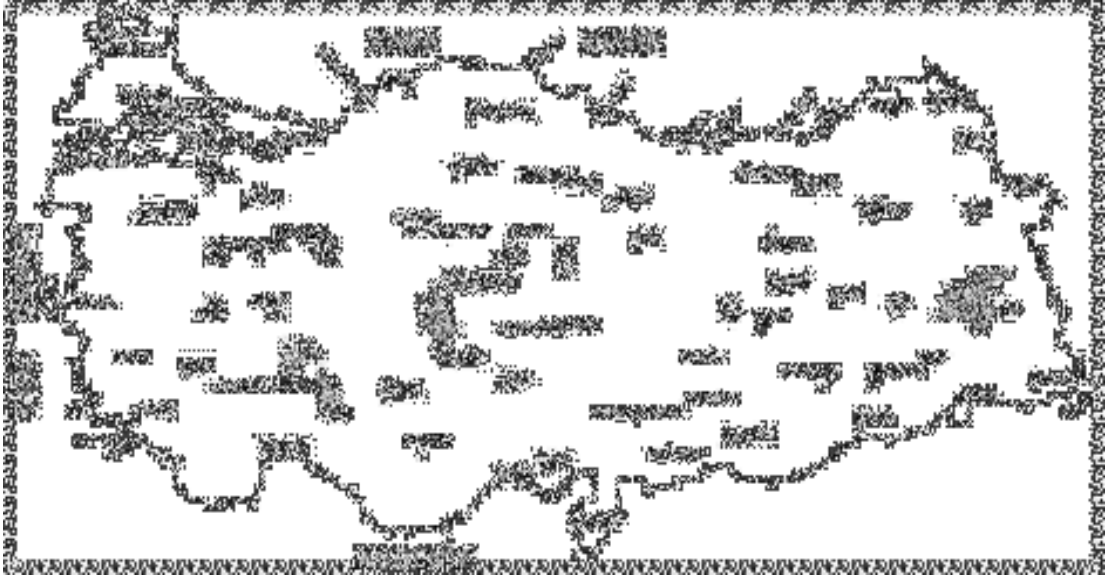
olarak kaynayan taş anlamında olup, 1756 yılında İsveçli mineralog Fredrich Cronstedt tarafından bulunmuştur. Temel yapısını SiO_2 ve Al_2O_3 oluşturur. Bu yapının en önemli özeliği, büyük oranda boşluk ve kanal içermesi; bu boşluk ve kanallarda yer alan suyu yüksek sıcaklıklarda yapı bozulmadan kaybedebilmesi ve yapı içerisinde gevşek bağlı olarak değiştirilebilir özellikte bulunan katyonlara sahip olmasıdır. Dünyada birkaç tip zeolit endüstride kullanılabilir saflıkta ve kalitededir. Bu tiplerden silis içeriği açısından zengin olan klinoptilolit ve mordenit endüstriyel anlamda önemli malzemelerdir. İki asır boyunca yalnız volkanik kayaların boşluklarında aksesuar mineralleri olarak buldukları bilinen zeolitler 1750'lerden bu yana bilinmektedir. Ancak 1930'larda yapıları çözümlenebilmiştir. Son yıllarda düşük dereceli metamorfik kayaların ve sedimenter kayaların önemli minerali oldukları saptanmıştır. Özellikle volkanik kaynaklara yakın göl ortamlar zeolit oluşumu için çok uygundur. Zeolitler volkanik malzemenin göl suyu ya da gözenek suyu ile reaksiyonu sonucu oluşurlar. Kırk kadar zeolit minerali bilinmekte olup denizsel ortamlarda veya tüflü tortulların çözülme metamorfizması sonucunda oluşabilirler. Zeolit mineralleri alkali ya da toprak alkali metal katyonu taşıyan sulu alümina-silikat bileşikleridir. Kuvars ve feldspat gibi tectosilikat ailesinin üyesidir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Volkanik tuf (zeolit) SEM görüntüsü (Liebig and Althaus,1998).

Zeolitler kristal yapı ve kimyalarından ileri gelen özellikleri ile dikkati çekmiştir. İyon değiştirme ve dehidratasyon özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulama alanları ortaya çıkmıştır. Doğada kırk tür doğal zeolit ve buna ek olarak da yüzelliden fazla sentetik zeolit varlığı bilinmektedir. Doğada en çok rastlanan doğal zeolit mineralleri analsim- klinoptilolit- heulandit, erlonit, merdonit ve şabaazittir. Yüksek silis içeriği nedeniyle zeolitin puzolanik aktivitesi oldukça yüksektir. Zeolit, çimentolu sistemlerde silikatların hidratasyon reaksiyonları sonucu ortaya çıkan serbest kireç ile tepkimeye girerek bağlayıcı özellik taşıyan C-S-H jellerini meydana getirir. Zeolit kullanılarak hazırlanan çimento hamuru örneklerindeki boşluk oranının azaldığı gözlenmiştir. Bu da çimento hamuruyla agrega fazı arasındaki bağın kuvvetli olmasını sağlar. Bu durum betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkileyen bir faktördür. Boşluk oranının azalması ile birlikte çimentolu sistemlerin geçirgenliği azalır ve dayanıklılığı artar. Yani sistem; asit, sülfat, tuz, vs. korozyonuna karşı güçlenmiş olur (ACI 232. 1 R-00, 2004; Karakurt , 2008).

Türkiye'deki zeolit yatakları Şekil 4.4'den gösterilmiştir. Ülkemizin doğal zeolit kaynaklarınca zengin olması bu maddenin çimento endüstrisinde kullanılarak ülke ekonomisine katkısını önemli kılmaktadır. Özellikle dünyanın en büyük çimento üreticisinden birisi olan Çin'de çimento üretimi için yılda 30 milyon ton zeolit kullanılmaktadır (Canpolat, 2004). Türkiye'de de daha önceleri Traslı Çimento adı altında üretilen ve yine yeni standartlardan TS EN 197-1'e göre üretilen CEM II Portland Puzolanlı Çimento ve CEM IV Puzolanik Çimentoları ekseriyette zeolit kökenli volkanik tuf (tras) kullanılarak üretilmektedir. Bu nedenle yapı sanayi açısından oldukça önemli bir katkı maddesi olarak değerlendirilmektedir (Karakurt, 2008).



Şekil 4.4. Türkiye'deki zeolit yatakları (Karakurt, 2008).

Zeolitin önemli kullanım alanları su sertliğinin azaltılması, su tutulması ve suyun temizlenmesi, buzlanmayı önleyici madde, hayvan besini, çiçekçilik ve seracılık, gaz ve petrol işleme merkezleri, atık su temizlemesi ve kağıt endüstrisi, yalıtım malzemesi üretimi, çimento ve diğer yapı malzemeleri sanayidir. Ayrıca zeolitler endüstrinin farklı alanlarında moleküler filtre olarak kullanılmaktadır. Karbondioksit, sülfür dioksit ve su gibi saf olmayan kısımların ayrılması ile doğal gazların saflaştırılması ve iyileştirilmesinde kullanılır. Doğal gazı iyileştirmesinin dışında zeolit absorpsiyon kolonlarında oksijen ve azotu ayırmada da kullanılır. Zeolitler kağıt üretiminde doldurucu olarak kullanılırlar. Yapı üretiminde taş olarak da özellikle İç Anadolu'da yaygın olarak kullanılırlar. Tüfler ocakta iken yumuşakçadır ve dolayısıyla çıkarılmaları ve yontulmaları kolaydır. Ocaktan çıkarılıp açık havada bırakılınca içindeki ocak suyu uçar ve taş sertleşir. Bu nedenle Orta Anadolu'da geniş alanlar kaplayan volkanik tüflere *yonu* da denilmektedir (Ünsal, 2006). Doğal zeolitin yüksek bir iyon değişim kapasitesi ve ağır metal katyonları belirli bir şekilde çekme özelliği vardır. Çözüldüğü stronyum 90, sezyum 137 ve diğer radyoaktif izotopları emebilir ve 3 boyutlu kristal yapısında tutabilir. Zeolitler kolayca çimento ve cam sistemleriyle tepkimeye girerek, radyoaktif atığın tutulmasına ve güvenli bir şekilde saklanmasına yardımcı olur. Zeolitler fiziksel olarak serttir ve nükleer parçalanmaya dayanıklıdır ve organik iyon

değişim reçinelerinden daha ucuzdur (Englert and Rubio, 2005). Zeolit ya da volkanik tüflerin betonda kullanılması ile birlikte;

-Taze beton işlenebilirliği artar

-Terleme azalır

-Taze beton kohezyonu artar ve ayrışmaya karşı bir direnç ortaya çıkar

-İlk günlerde düşük olsa da nihai dayanım daima eşit ya da daha yüksek olur

-Hidratasyon ıssısı azalır termik çatlaklar önlenmiş olunur

-Hacimsel genleşmeler ve alkali tepkimeler azalır

-Geçirgenlik ve porozite azalır

-Tuzlara ve asitlere karşı dayanım artar, durabilitesi yüksek bir malzeme elde edilir (ACI 232. 1 R-00, 2004).

BÖLÜM 5

BOR ATIKLARININ YAPI MALZEMESİ ÜRETİMİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÇİMENTODA PUZOLAN KULLANIMI İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Puzolanların çimento, harç ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması üzerine yapılmış binlerce çalışma vardır. Öyle ki günümüzde neredeyse puzolansız çimento üretilmemekte ve beton dökülmemektedir. Bu durum yukarıda Bölüm 4’ de “Mineral Katkılar” bahsinde açıklanmıştı. Kısacası puzolanların yüzyıllardan beri kullanılması sonucu bu konuda yeterli bir birikim ve pratiğin oluşmasına yol açmıştır. Bu nedenle puzolanları kullanmanın faydaları tartışmasız kabul görmektedir. Günümüzde yapılan, çalışmalar daha çok puzolanların bir arada ya da puzolanik aktivitesi kil pestili gibi düşük malzemelerle birlikte kullanılması üzerinedir. Bu gerçekliğe karşılık dünyada kısıtlı sayıdaki ülkede bulunan bor minerali ve atıklarının çimentolu sistemlerde kullanılması üzerine yapılmış araştırma ise oldukça sınırlı sayıdadır.

Dünya bor rezervlerinin neredeyse 2/3’ nün Türkiye’ de olması nedeni ile bu konuda yapılan çalışmaların birçoğu Türkiye’de yapılmıştır. Bor atıklarının değerlendirilmesi ile ilgili çalışmaların ülkemizdeki geçmişi son on yıla dayanmaktadır. On yıl önce bu konuda yapılan ilk çalışmalarda atıkların fayans üretiminde sır malzemesi ve tuğla - briket yapımında kullanılması araştırılmıştır (Ediz, 1994; Ediz ve Topçu, 1995; Kavas, 1997). Söz konusu bu çalışmalarda Kırka Boraks tesislerinden çıkan atıklar tuğla toprağıyla değişik oranlarda karıştırılarak sır malzemesi ve tuğla üretilmiştir. Bu şekilde üretilen tuğlalarda bor atıklarının kullanılması ile ekonomik ve teknik yönden geleneksel tuğla üretimine göre avantajlar elde edilmiştir. Üretilen tuğlanın basınç dayanımları daha yüksek bulunmuş ve tuğlalar geleneksel tuğlalara göre daha düşük sıcaklıklarda pişirilmiştir. Keza yine bu çalışmada katkılı tuğlaların birim ağırlıkları da normal tuğlalardan % 27 ölçüsünde daha düşük bulunmuştur (Ediz ve Topçu, 1995).

Yukarıda açıkladığımız bu çalışmaların dışındaki çalışmalarda ise bor atıkları çimento içerisinde ve harç üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılmıştır (Erdoğan

ve Zeybek, 1996). Bu çalışmada Kütahya - Emet Espey yataklarından çıkarılan cevherden kolemanit üretimi sırasında ortaya çıkan 25 mm elek artığı ve şlam kullanılarak farklı oranlarda Portland ve Traslı çimento içerisinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda katkılı numunelerden elde edilen dayanımların TS standartlarında istenilen çimento dayanımlarını sağladığı görülmüştür.

Boraks ve borik asit üretiminde ortaya çıkan katı atıkların çimento sanayinde değerlendirilmesi üzerine yürüttüğü çalışmada Elbeyli (1997); Bandırma bölgesinde bulunan boraks ve borik asit fabrikasından çıkan katı atıkları PÇ 42.5 çimentosu içerisinde kullanarak elde edilen örnekler üzerinde çimento deneyleri gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma ile, atıkların çimento içerisinde değerlendirilmesinin mümkün olduğu, çimento endüstrisi için ek hammadde kaynağı yaratıldığı, çevre kirliliğinin önlenebileceği ve boraks atığı kullanımı ile çimento özelliklerinde herhangi bir olumsuzluk ortaya çıkmadığı görülmüştür.

Tonak ve Sarıkaya (1999) kolemanit içeren bor cevheri ve atıklarının çimento üretiminde hammadde olarak kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada Kırka, Kestelek ve Bigadiç İşletmelerinden temin edilen bor cevheri ve atıklarını kullanmışlardır. Kolemanit ve atıklarının Na_2O içeriğinin düşüklüğü nedeniyle çimentoda kullanılmasının uygun olacağını belirtmişlerdir. Yapılan çalışma sayesinde daha düşük sıcaklıkta klinker üretimini gerçekleştirmiş ve bu çimentonun ince öğütülmesi durumunda PÇ 32.5 çimentosuna göre daha yüksek norm dayanımlar elde edileceğini belirtmişlerdir.

Zeybek (2000) yapmış olduğu doktora çalışmasında; Kütahya- Emet-Hisarcık Bor Konsantre Tesislerinden elde ettiği kolemanit konsantratör atığını PÇ klinkerine çeşitli oranlarda ilave ederek çimento karışımları hazırlamış ve bu çimentolardan oluşan harçların nötron tutma kapasitelerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; kolemanit konsantratör atığı ilavesiyle oluşturulan çimento karışımlarının katkısız çimentoya göre daha fazla suya ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanım değerleri de yine PÇ değerlerinden düşüktür. Borlu çimento harçlarının nötron tutma kapasiteleri incelendiğinde ise, % 7 atık ilavesiyle

oluşturulan çimento numunelerinde nötron geçirgenliğinin en az olduğu belirlenmiştir. Portland Çimentosu ile hazırlanan bir betonun nötronları 4 cm. kalınlıkta % 60' ını tutabilirken %15 Hisarcık elekaltı katkılı çimentolarla hazırlanan beton blokların nötron tutma kapasiteleri % 76. 2 olduğu görülmüştür.

Boncukoğlu ve arkadaşları (2001, 2002) tinkal ve kolemanit üretiminde ortaya çıkan atık malzemeleri çimento içerisinde değerlendirerek çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda tinkal üretimi sırasında ortaya çıkan atık malzemenin kullanımı ile dayanımda artışlar ve radyoaktif geçirgenlikte de azalmalar tespit etmişlerdir. Kolemanit üretiminde ortaya çıkan atıkları çimento içerisinde doğal alçı taşı (jips) yerine kullanarak çimento, harç ve dolayısıyla de betonda priz süresini uzatmışlardır.

Doktora tezi çalışmasında Targan (2001) bir bor minerali olan kolemanit konsantratör atıklarını PÇ 42.5 klinkerine Kula Cürufu ve bentonit ile birlikte ikili karışımlar şeklinde %4 oranında ilave ederek alçı taşı ile birlikte karışımı kuru bir şekilde öğütürerek çimentonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kolemanit konsantratörü atığının ilavesiyle oluşan çimento karışımlarında priz sonu değerleri diğer harçların priz değerlerinden daha fazla olmuştur. Basınç dayanım değerleri dikkate alındığında kolemanit konsantratörü atığı ilavesiyle oluşturulan çimento harçlarının basınç dayanım değerleri PÇ değerlerine göre düşük çıkmış ancak Kula cürufu ile birlikte ikili karışım harcı oluşturduğu için tüm basınç dayanım değerleri TS'ye uygun çıkmıştır. Fakat 60 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri incelendiğinde %5 bentonit ile birlikte kolemanit konsantratör atığı kullanılarak hazırlanan çimento harçlarının basınç dayanım değerleri TS değerlerinden yüksek çıkmıştır.

Bir başka çalışmada Köseoğlu ve Bayça (2002) yapmış oldukları araştırmada döküm çamuruna %10 ve % 20 kolemanit ve üleksit atıkları ilavesinin vizkozite ve mukavemet özellikleri üzerine etkilerini incelemişler ve sonuç olarak kolemanit konsantratörü atıklarının gerek mukavemet gerekse vizkozite açısından üleksit atığına göre daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya çıkarmışlardır.

Kolemanit ve tinkal üretiminde ortaya çıkan atıkların çimento içerisinde uçucu kül, doğal puzolan ve dip külü ile birlikte kullanılarak üretilen çimentonun özelliklerinin araştırıldığı bazı çalışmalarda katkı maddelerinin çimentoda kullanımı ile priz süresinin geciktiğini, bentonitin erken yaşlarda dayanım artırdığını, doğal puzolanın da aynı olumlu etkiyi gösterdiğini ve yüksek miktarda tinkal ve kolemanit (% 5' in üzerinde) kullanımı ile basınç dayanımında azalmalar ortaya çıktığı belirlenmiştir (Targan et al., 2002, 2003; Kula et al., 2002).

Özdemir ve Öztürk (2003) ise tinkal üretimi sırasında ortaya çıkan 1. ve 2. kil pestili atığını klinkere değişik oranlarda katarak atığın çimentodaki fiziksel ve kimyasal etkilerini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada % 1 atık içeriğinde yüksek basınç dayanımı, % 5'lere kadar olan katkılı karışımlarda da yine çimento norm dayanımından daha yüksek dayanımlar elde etmişlerdir.

Yüksek lisans tezi çalışmasında Uğurlu (2004) tinkal üretimi esnasında ortaya çıkan borakslı kil pestili atık malzemesini çimento içerisine %1, 1.5, 2.5, 5, 7.5, 10, 15 ve 20 oranlarında katarak standart çimento deneyleri ile elde edilen çimentonun özelliklerini değerlendirmiştir. Bu çalışma sonucunda boraks içeren 1. ve 2. kil pestili atık malzemesinin kullanılması ile birçok çimento özelliğinin etkilendiği saptanmış ve bu malzemelerin çimento içerisinde sırasıyla % 5 ve % 7 oranlarında kullanılabileceği belirlenmiştir.

Erdoğan vd. (2004) kolemanit konsantratör atığı ve Karabük cürufu katkılı portland çimentosu üreterek çimento özelliklerini inceledikleri çalışmada bu malzemelerin çimento içerisinde katkı maddesi olarak kullanılabileceğini saptamışlardır.

Bir başka çalışmada ise Karacasu vd. (2004); boraks, sepiyolit, çok ince nehir kumu ve zeolit kullanarak asfalt betonu üretimi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada betonun direkt çekme dayanımında azalmalar, işlenebilirliğinde ise iyileşmeler tespit etmişleridir.

Yine Erdoğan vd. (2004), boraks atığı, uçucu kül, alunit minerali kullanarak çimento özelliklerini inceledikleri çalışmalarında bu malzemelerin birlikte çimento içerisinde değerlendirilebileceğini görmüşlerdir.

Derun ve Pişkin (2006) ise endüstriyel borik asit atığı kullanarak ham perlit agregalı beton üretimini gerçekleştirdikleri çalışmalarında bu atık malzemenin dayanımı olumsuz etkilemediğini tespit etmişlerdir.

Olgun vd. (2007), yaptıkları çalışmada kolemanit atığı kullanarak ürettikleri boraks katkılı çimentoların erken ve geç dayanımları üzerinde fiziko kimyasal yapının etkilerini araştırmışlardır.

Kavas vd. (2007) ise çimentoya ağırlıkça % 0,1 oranında pektin ilave ederek ürettikleri kolemanit atıklı borakslı çimentonun fiziko kimyasal ve mekanik özellikleri üzerine pektinin etkisini araştırmışlardır.

Yaptığımız çalışmalar kapsamında puzolan katkılı çimentolar ve bu çimentoların kimyasal ortamdaki davranışları konusundaki literatür de araştırılmıştır. Bunların bazıları aşağıdadır.

Turanlı (1995), yaptığı çalışmada farklı dozajlarda doğal puzolan katılan çimentoların özelliklerini incelemiştir.

Shannag ve Yeğınobalı (1995), doğal puzolan kullanarak yürüttükleri çalışmada çimento pastası, harç ve beton üzerinde doğal puzolanların etkisini incelemişler ve puzolan kullanımı ile bu malzemelerin birçok özeliğinin olumlu yönde değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Xu ve Sarkar (1996), "Uçucu kül ve uçucu külün bağlayıcı matriksdeki özellikleri" adlı makalelerinde; betonda çimentonun yerini alan uçucu külün çimento hidratasyonunun ilerleyişini değiştirdiğini, hidratasyon ürünlerinde değişiklikler meydana getirdiğini ve gözenek sistemini modifiye ettiğini belirtmişlerdir. Aynı

zamanda uçucu külün yüksek hacimde kullanılması durumunda, CH makrokristallerinin tükenmesinin hem pastada hem de pasta-agrega ara yüzeyinde meydana geldiği, bu olayın daha yüksek dayanım, pasta yoğunlaşması ve gözenek içinin saflaştırılmasında katkıda bulunduğu yine aynı makalede vurgulanmıştır. Bununla birlikte uçucu kül ile birlikte dayanımdaki artışın sadece sonraki yaşlarda fark edilir olduğunu da belirtilmektedir.

Bir başka çalışmada ise Topçu ve Canbaz (2001), uçucu kül kullanımının betondaki etkilerini inceledikleri çalışmalarında uçucu kül kullanımı ile birlikte betonun bazı özelliklerinin iyileştiğini tespit etmişlerdir.

Tsivilis ve arkadaşları (2003) ise dolomit katkılı çimentolarda doğal puzolan, cüruf, uçucu kül ve metakaolin gibi katkıları kullanarak tomasit oluşumunu yavaşlatarak azaltmışlardır.

Al-Dulaijan et al. (2003), değişik miktarda sodyum sülfat içeren çözeltilerde puzolan katkılı ve katkısız çimentoların sülfat direncini araştırdıkları çalışmalarında puzolan katkılı çimentoların katkısız çimentolara göre çok iyi bir sülfat direnci gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Tosun vd. (2003), "Uçucu kül içeren çimento harçlarının sülfata dayanıklılığını" belirlemek amacıyla yapmış oldukları araştırmanın sonucunda; portland çimentosu ve SDC (sülfata dayanıklı çimento) içeren karışımlarda uçucu külün yüksek oranda kullanılmasının (% 30, % 40) erken dayanımı düşürdüğünü, ancak bu etkinin ilerleyen yaşlarda büyük oranda kaybolduğunu, % 10 ve % 20 uçucu kül içeren karışımların 90 günlük dayanımlarının genellikle sadece çimento içeren kontrol karışımlarının dayanımlarından daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Sülfata maruz kalmış örneklerin basınç dayanımları kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında, sürekli sülfat etkisine sadece yüksek oranda uçucu kül içeren karışımlarda düşük mertebede dayanım kayıpları tespit edilmiştir.

Canpolat vd. (2004) ise zeolit, taban külü ve uçucu kül kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada bu puzolanlar ile değişik çimentolar üretilip bunların kimyasal ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir.

Siddique (2004), yüksek oranda F sınıfı uçucu kül kullanarak taze ve sertleşmiş beton üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada betonda yüksek oranda (çimentonun yarısı ölçüsünde) uçucu kül kullanımının beton özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve olumlu sonuçlar elde etmiştir.

Yine Turanlı vd. (2005), yüksek oranda doğal puzolan kullanarak elde ettikleri katkılı çimentoların özelliklerini inceledikleri çalışmada çimentonun bazı özelliklerinin puzolan kullanımı ile birlikte iyileştiğini tespit etmişlerdir.

Bir başka çalışmada Atakay (2006), uçucu küllerin katkılı çimento üretiminde kullanılmasını tane inceliği ve katkı dozajı açısından incelemiştir. Çalışma sonuçlarına göre tane inceliği yüksek uçucu küllerin çimento özellikleri üzerinde olumlu etkisi gözlenmiştir. Aynı şekilde bazı çimento özellikleri açısından uçucu külün çimentoda yüksek oranda faydalı bir şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Binici ve Aksoğan (2006), puzolan katkılı ve katkısız çimentoların sülfata karşı dayanımını araştırdıkları çalışmalarında yüksek fırın cürufu ve doğal puzolan kullandıkları çimentoların sülfat direncinin katkısız çimentolara göre daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Topçu ve Boğa (2006), uçucu küllü betonların donatı korozyonunu araştırdıkları çalışmalarında uçucu kül katkısının betonda korozyona karşı direnci arttırdığını tespit etmişlerdir.

Yetgin ve Çavdar (2006), doğal puzolan kullanarak yürüttükleri araştırmada puzolan kullanımı ile birlikte harç numunelerin işlenebilirliğinde ve kimyasallara karşı dayanımında meydana gelen iyileşmelere karşılık harçların ilk yaşlardaki dayanımlarında azalmalar ve priz süresinde ise gecikmeler tespit etmişlerdir.

Bir başka çalışmada ise yine puzolan katkılı ve katkısız çimentoların sülfat direnci ve karbonasyon dayanımı araştırılmıştır (Sideris et al., 2006). Bu çalışmada da puzolan kullanımı ile sülfat etkisine karşı bir direncin ortaya çıktığı ve bunun kullanılan puzolan miktarı ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Buna karşılık karbonasyon derinliği puzolan katkılı çimentolarda katkısız çimentolara göre daha yüksek bulunmuştur.

Topçu ve Karakurt (2007), gerçekleştirdikleri çalışmada ise farklı endüstriyel ve doğal puzolan kullanarak elde ettikleri çimentonun özelliklerini incelemişler ve sonuçta puzolan kullanımıyla çimento özelliklerinin değiştiğini tespit etmişlerdir.

Şahmaran vd. (2007), gerçekleştirdikleri çalışmalarında puzolan katkılı çimentolarda bileşim özelliklerinin ve su – çimento oranının bu çimentoların sülfat dayanımı üzerindeki etkisini incelemişler ve sülfata karşı dayanımda bu faktörlerin önemli bir rol oynadığını tespit etmişlerdir.

Ghrici vd. (2007) ise doğal puzolan ve kireçtaşı katkılı çimentolar ile üretilmiş harç ve betonların durabilite ve mekanik özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında harç ve betonların mekanik özelliklerinin iyileştiğini, bu malzemelerin sülfat ve asit etkisine karşı daha dayanıklı hale geldiğini ve geçirgenliğinin de azaldığını gözlemişlerdir.

Karakurt (2008) doktora çalışmasında, zeolit ve volkanik tüfleri çimento üretiminde diğer endüstriyel atıklarla birlikte kullanarak ürettiği çimentoların beton performansı üzerine etkilerini değerlendirmiştir. Çalışma, bu katkı maddelerinin beton ve çimento için yararlı olduğunu bir kez daha ortaya çıkarmıştır.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar kapsamında TS EN 196-1 standardı esas alınarak harç numuneleri üretilmiştir (TS EN 196-1, 2002). Hazırlanan harç numunelerinde Kırka boraks işletmesinden alınarak çalışmalarda kullanılmak üzere hazır hale getirilen kil pestili atığı, uçucu kül ve volkanik tuf ile standart kum, CEM I 42.5 çimentosu ve şebeke suyu kullanılarak örnekler üretilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde deneylerde kullanılan malzemeler hakkında bilgi verilip deney yöntemi açıklandıktan sonra deneysel bulgular ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

6.1. Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

6.1.1. Çimento

Deneysel çalışma kapsamında hazırlanan katkılı ve katkısız harç örneklerde Ankara'daki (SET) Çimento Fabrikasının ürettiği TS EN 197-1'e uygun CEM I 42.5 Portland Çimentosu kullanılmıştır (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1. Çalışmalarda kullanılan portland çimentosunun (CEM I 42.5) özellikleri

Oksit bileşenleri	Ağırlıkça, %	Fiziksel Özellikler		
CaO	61,17	Özgül ağırlık	3,13	
MgO	1,15	Özgül yüzey, cm ² /g	3075	
SiO ₂	23,24	Basınç dayanımı, MPa		
Al ₂ O ₃	3,96		2 gün	23,3
Fe ₂ O ₃	4,16		7 gün	37,6
Na ₂ O	0,07	28 gün	46,3	
K ₂ O	0,49	Çekme dayanımı, MPa		
SO ₃	2,66		2 gün	1,80
Cl	0,010		7 gün	3,4
		28 gün	5,7	
Kızdırma kaybı	1,19	Priz süresi, (saat, dakika)		
		başlangıç	2,45	
		bitiş	3,55	
Çözünmeyen kalıntı	0,27	Hacim genişmesi, (mm)		
			1,5	

Çimento yerine ikame edilecek olan kil pestili atığı + puzolan karışımlarının etkisini daha iyi görebilmek için çimento içerisinde katkı olmaması gerektiği düşüncesinden hareketle katkısız çimento seçimi yapılmıştır. Çimento, fabrikadan torbalar halinde paketlenmiş olarak alınmış ve kullanılmadan önce laboratuvarında harmanlanarak naylon torbalar içerisinde muhafaza edilmiştir. Deney örnekleri hazırlanmadan önce çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Rigaku marka RIX 2080 model XRF cihazı ile analiz edilmiş ve çimentonun TS EN 197-1'e uygun olduğu görülmüştür.

6.1.2. Standart harç kumu

Hazırlanan harç örneklerinde Set Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş.'nin Trakya Çimento Fabrikasında üretilen ve TS 819'a uygun standart kum (harç kumu) kullanılmıştır (TS 819, 1976). Karışımlarda kullanılan standart kumun elek analizi Çizelge 6.2' deki gibidir.

Çizelge 6.2. Standart kumun elek analizi

Elek Göz Açıklığı, mm	Elekte kalan, %
0,08	98±2
0,16	87±2
0,50	67±2
1,00	33±2
1,60	9±2
2,00	0

6.1.3. Karma suyu

Çalışma kapsamında üretilen harç örneklerinin hazırlanmasında Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Çizelge 6.3'ten de görüleceği üzere şebeke suyunun yapılan

kimyasal analizinde suyun TS EN 1008'deki karma suyu niteliklerine uygun olduğu görülmüştür (TS EN 1008, 2004).

Çizelge 6.3. Kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi

Parametre	Bulunan Değerler	Sınır Değerler
pH	6,74	>7
Çözünmüş tuz, mg/lt	1550	<15000
Askıdaki katı madde, mg/lt	1150	< 2000
Sülfat (SO ₃), mg/lt	635	< 3000
Klorür (Cl ₂), mg/lt	250	<1000

6.1.4. Uçucu kül (UK)

Uçucu kül seçiminde, puzzolanik aktivitesinin yüksek olması nedeniyle Kütahya Tunçbilek Termik Santrali uçucu külünün kullanılmasına karar verilmiştir. Bu kül Ankara'da bir hazır beton firmasından alınarak Rigaku marka RIX 2080 model XRF cihazı ile kimyasal ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.4'de verilmiştir. Uçucu külün mineralojik analizi XRD ile yapılmış ve Şekil 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Kullanılan Tunçbilek Termik Santrali uçucu külünün özellikleri

Oksit bileşenleri	Ağırlıkça, %	Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	56,24	Özgül ağırlık	2,23
Al ₂ O ₃	16,06		
Fe ₂ O ₃	15,16	Özgül yüzey, cm ² /g	3975
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	87,46		
CaO	2,32	90 µm elekte kalan, %	3,7
MgO	4,85		
Na ₂ O	0,35	45 µm elekte kalan, %	24,5
K ₂ O	1,49		
SO ₃	1,01	200 nolu elekte kalan, %	0,3
Cl	0,010		
Kızdırma kaybı	1,84		
Çözünmeyen kal.	0,27		

Şekil 6.1'den görüleceği üzere uçucu külde başta camsı faz olmak üzere kuvars, mullit, hematit ve ferritspinel grubundan manyetit, magnezyoferrit gibi kristalize fazlar bulunmaktadır. Camsı fazın, kuvars kristalinin en büyük pikine yakın olması nedeniyle bu fazın silissi bir özellik taşıdığı belirlenmiştir. Silissi ve camsı fazın belirgin olması Tunçbilek uçucu külünün puzolanik aktivitesinin güçlü olduğunun bir işareti olarak kabul edilebilir.

Çalışmalarda kullanılan uçucu külün kimyasal özelliklerinin TS EN 197-1, TS EN 450, TS 639 ve ASTM C 618 ile karşılaştırılması Çizelge 6.5'de verilmiştir. Uçucu kül reaktif kireç miktarının % 10 'un altında olması nedeniyle TS EN 197 – 1'de verilen V sınıfı silissi uçucu kül kapsamına girmektedir. Aynı zamanda $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin % 70'in üzerinde ve CaO'in % 10'un altında olması nedeniyle de ASTM C 618 standardına göre F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir. SO_3 miktarının % 3'ten düşük olması ve düşük kireçli olması nedeniyle de TS EN 450' ye uygunluk göstermektedir. Ayrıca, Çizelge 6.5' deki uygunluk koşullarına göre TS 639'a da uygundur.

Çizelge 6.5. Tunçbilek Termik Santrali uçucu külünün değerlendirilmesi

Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit, %	Uçucu kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO ₂	56,24						
Al ₂ O ₃	16,06						
Fe ₂ O ₃	15,16						
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	87,46	>70,0			>70,0	>70,0	>50,0
CaO	2,32				<10,0	<10,0	>10,0
MgO	4,85				<5,0		
Na ₂ O	0,35						
K ₂ O	1,49						
SO ₃	1,01	<3,0				<5,0	<5,0
Cl	0,010						
KK	1,84		<5,0	<5,0	<10,0	<6,0	<6,0
Serb. CaO	0,22				<1,0		
Reak. SiO ₂	39,01	>25,0	>25,0	>25,0	>25,0		
Reak. CaO	1,17	<10,0	<10,0	>10,0			

6.1.5. Volkanik tuf (VT)

Diğer bir katkı maddesi olan volkanik tuf Nevşehir yöresinden temin edilmiştir. Bu tuf fiziksel yapısı nedeniyle zeolit olarak da adlandırılmaktadır. Volkanik tufün fiziksel ve kimyasal özellikleri Rigaku marka RIX 2080 model XRF cihazı ile belirlenmiş ve Çizelge 6.6'da verilmiştir. Volkanik tufü oluşturan mineraller ise Rigaku Rint 2200 marka XRD cihazı ile analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.6. Kullanılan volkanik tüfün özellikleri

Oksit bileşenleri	Ağırlıkça, %	Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	58,12	Özgül ağırlık	2,24
Al ₂ O ₃	19,05		
Fe ₂ O ₃	9,11	Özgül yüzey, cm ² /g	3850
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	86,28		
CaO	5,39	90 µm elekte kalan, %	3,8
MgO	3,75		
Na ₂ O	0,24	45 µm elekte kalan, %	19,4
K ₂ O	1,72		
SO ₃	0,84	200 nolu elekte kalan, %	0,2
Cl	0,016		
Kızdırma kaybı	1,4	Su emme, %	106
Çözünmeyen kal.	0,27		

Çizelge 6.6'dan görüleceği üzere volkanik tüf gerek ASTM C 618'e ve gerekse TS 25 Tras standardına uymaktadır. ASTM C 618 ve TS 25'e göre su emme %'nin en çok % 115, 45 µm elekte kalan miktarın en çok % 34, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarının en az % 70 ve SO₃ miktarlarının da en çok % 3 olması gerekmektedir. Çizelge 6.6'da verilen sonuçlar bu sınırlamalar arasında kalmaktadır..

Şekil 6.2'de volkanik tüfün XRD analizi sonucu elde edilen pik değerleri ve ana malzeme fazları görülmektedir. Difraktogram incelendiğinde volkanik tüfün yoğun miktarda albit ve anorit içerdiği görülecektir. Camsı fazda bulunan ana pikin yoğunluğu 5000 Cps değerine kadar çıkmıştır. Volkanik kökenli bu malzemede bulunan albit ve anorit içeriği puzolanik camsı fazın varlığını ortaya koymaktadır.

Puzolanlar için çok önemli bir özellik olan puzolanik aktivite deneyi ise uçucu kül ve volkanik tuf için ayrı ayrı yapılmıştır. TS EN 450 standardı esas alınarak yapılan bu deneyde malzeme; orijinal hali, 90 ve 200 µm eleklerden elenmiş hali gibi üç durumda standartta tanımlandığı üzere ile 28 ve 90 günlük aktivite deneylerine tabii tutulmuştur. Bunun yanı sıra kullanacağımız bu malzemelerin kısa süredeki davranışını tahmin edebilmek için 7 günlük puzolanik aktivite deneyleri ASTM C 311'e göre yapılmıştır (ASTM C 311, 1994). Bu deneyde önce 500 gr çimento 1375 gr standart CEN kumu ve 242 gr su kullanılarak numune üretilmiştir. Daha sonra 400 gr çimento, 100 gr puzolan ve 1375 gr CEN kumu kullanılarak referans harçta elde edilen yayılma değerinin 5 değerini sağlayacak miktarda su ile karışım hazırlanmıştır. Test karışımının referans karışıma (orijinal) % oranı dayanım aktivite indeksini vermiştir. Sonuçlar Çizelge 6.7'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan çalışmalarda kullanılan yapay ve doğal puzolanların her ikisinin de puzolan olarak aktif olduğu yani serbest kireci bağlama kapasitesini yeterince sağladığı görülmüştür. TS EN 450 standardına göre referans (orijinal) numunelerin puzolanik aktivite sonuçları değerlendirilirken 28 günlük aktivite sınırı olan % 75'lik değer ve 90 günlük aktivite sınırı olan % 85'lik değer her iki puzolanda da sağlanmıştır. 7 günlük değer için ASTM C 618' de verilen % 75'lik limit değer de sağlanmıştır.

Çizelge 6.7. Çalışmalarda kullanılan puzolanların dayanım aktivite indeksleri

Numune	7 günlük aktivite, %			28 günlük aktivite, %			90 günlük aktivite, %		
	Orjinal	200µm altı	90µm altı	Orjinal	200µm altı	90µm altı	Orjinal	200µm altı	90µm altı
Uçucu kül	80	85	89	83	96	100	101	111	115
Volkanik tuf	74	81	83	79	87	91	87	93	100

6.1.6. Kil pestili atık malzemesi (KP)

Çalışmalarda Etibank Kırka Boraks tesislerinden alınan kil pestili olarak adlandırılan atık malzeme kullanılmıştır. İşletmeden getirilen atık malzeme laboratuvara

alınarak serilmiş ve doygun kuru yüzey durumuna gelmesi sağlanmıştır. Yaklaşık 2 ay bu şekilde kurutulan malzeme daha sonra etüve alınarak etüvde 60 °C'de 1 saat bekletilip tamamen kurutulmuştur. Etüvden alınan malzeme havada soğutulularak değirmende öğütülmüştür. Değirmende öğütülen malzeme içerisine iri malzeme girebileceği düşüncesi ile 100 mesh (0,0125 mm) eleklerle elenerek deneylerde kullanılmak üzere naylon çuvalara alınarak muhafaza edilmiştir. Bu şekilde karışımlarda kullanılmaya hazır hale getirilen kil pestilinin kimyasal ve fiziksel analizleri Rigaku marka RIX 2080 model XRF cihazı ile belirlenmiş ve Çizelge 6.8'de verilmiştir. Kil pestili atık malzemesini oluşturan minerallerin belirlenmesinde ise Rigaku Rint 2200 marka XRD cihazı ile analiz edilmiş sonuçlar Şekil 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Kil pestili atık malzemesinin özellikleri

Oksit Bileşenler	Kil pestili, ağırlıkça, %	Fiziksel özellikler	
B ₂ O ₃	8,78	Özgül ağırlık	2,12
CaO	22,86	Özgül yüzey, cm ² /gr	2830
MgO	18,26	Priz süresi, saat.dakika	
SiO ₂	15,47	başlangıç	19.15
Na ₂ O	5,13	bitiş	97.22
Al ₂ O ₃	2,55		
Fe ₂ O ₃	1,74	200 µm elekte kalan, %	0,9
K ₂ O	1,33	90 µm elekte kalan, %	0,4
Kızdırma kay.	23,88		

Kil pestili üzerinde yapılan deneyler sonucu puzolanik açıdan malzemenin ASTM C 618'deki kriterleri sağlamadığı görülmüştür. Kil pestilindeki SiO₂+ Al₂O₃ + Fe₂O₃ % 19,76'dır. Kil pestilinin içerdiği MgO yüzdesi ASTM C 618'de doğal ya da yapay puzolanlar için verilen en fazla % 5 kriterinden daha yüksektir. Aynı şekilde CaO miktarı ise % 22,86 olup ASTM C 618'de belirtilen en az % 4 olmalı koşulunun

çok üzerindedir. Bütün bunlardan bu malzemenin puzolanik aktivitesinin oldukça düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 6.3' de gösterilen kil pestili atık malzemesinin XRD analizi sonucuna göre atığın montmorillonit $((Na,Ca)_{0.33} (Al,Mg)_2 (Si_4O_{10}) (OH)_2 \cdot nH_2O)$, dolomit $(CaMg(CO_3)_2)$ ve tinkal $(Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O)$ minerallerini içerdiği görülmüştür. X-ray difraktogramında camsı faz tam olarak saptanamamış olmasına karşın en yüksek piklerin olduğu bölgede bir yoğunluk olduğu gözlenmiştir. Difraktogram incelendiğinde kil pestili atık malzemesinin yoğun miktarda montmorillonit ve dolomit içerdiği görülmüştür. Ana pik montmorillonit yapısındadır. Boraksa ait pikler daha küçüktür.

6.2. Kabul Edilen İlkeler ve Üretilen Harç Serileri

Deneyisel çalışma iki aşamalı olarak oluşturulmuştur. Birinci deneysel çalışma kapsamında sadece kil pestili atık örneği esas alınarak kil pestili (KP) + uçucu kül (UK) ve kil pestili (KP) + volkanik tuf (VT)' den oluşan harç karışımı örnekleri üretilmiştir. Bu deneysel çalışma kapsamında Çizelge 6.9'da verilen bileşimlerdeki örnekler üretilmiştir.

Çizelge 6.9. Birinci deneysel çalışma kapsamında üretilen örnekler

Ç, %	KP, %	Kodu	KP+UK, %	Kodu	KP+VT, %
95	5	U1	5+0	V1	5+0
85		U2	5+10	V2	5+10
75		U3	5+20	V3	5+20
65		U4	5+30	V4	5+30
90	10	U5	10+0	V5	10+0
80		U6	10+10	V6	10+10
70		U7	10+20	V7	10+20
60		U8	10+30	V8	10+30
85	15	U9	15+0	V9	15+0
75		U10	15+10	V10	15+10
65		U11	15+20	V11	15+20
55		U12	15+30	V12	15+30
80	20	U13	20+0	V13	20+0
70		U14	20+10	V14	20+10
60		U15	20+20	V15	20+20
50		U16	20+30	V16	20+30
75	25	U17	25+0	V17	25+0
65		U18	25+10	V18	25+10
55		U19	25+20	V19	25+20
45		U20	25+30	V20	25+30

Ç: Çimento, KP: Kil pestili, UK: Uçucu kül, VT: Volkanik tuf

Ç+KP+UK ve Ç+KP+VT harç karışımlarından toplam 40 seri (120 adet) örnek üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu örnekler hazırlanırken çimentodan % 5, 10, 15, 20 ve 25 ölçüsünde eksiltilecek yerine aynı oranda kil pestili atığı kullanılmıştır. Aynı zamanda

yine bu çimentolardan % 0, 10, 20 ve 30 oranında eksiltilerek yerine uçucu kül veya volkanik tuf kullanılarak harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan bu harç karışımları üzerinde 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilmede çekme dayanımı deneylerini gerçekleştirmek üzere TS EN 196-1 (Çimento Deney Metotları – Dayanım) standardı esas alınarak toplam 120 adet örnek üretilmiştir.

İkinci deneysel çalışmada ise birinci deneysel çalışma sonrasında belirlenmiş olan en uygun karışım serilerinin kil pestili (KP) +uçucu kül (UK) + volkanik tuf (VT)'ten oluşan harç karışımları örnekleri üretilmiştir (Çizelge 6.10).

Çizelge 6.10. İkinci deneysel çalışma kapsamında üretilen örnekler

Kod	Ç, %	KP, %	UK, %	VT, %	Toplam puzolan, % (UK+VT)	Toplam katkı, % (KP+UK+VT)	Karışım
K1	90	10	0	0	0	10	90Ç+10KP+0 UK+0 VT
K2	80		5	5	10	20	80Ç+10KP+5 UK+5 VT
K3	70		15	5	20	30	70Ç+10KP+15UK+5 VT
K4	70		5	15	20	30	70Ç+10KP+5 UK+15VT
K5	60		20	10	30	40	60Ç+10KP+20UK+10VT
K6	60		10	20	30	40	60Ç+10KP+10UK+20VT
K7	85	15	0	0	0	15	85Ç+15KP+0 UK+0 VT
K8	75		5	5	10	25	75Ç+15KP+5 UK+5 VT
K9	65		15	5	20	35	65Ç+15KP+15UK+5 VT
K10	65		5	15	20	35	65Ç+15KP+5 UK+15VT
K11	55		20	10	30	45	55Ç+15KP+20UK+10VT
K12	55		10	20	30	45	55Ç+15KP+10UK+20VT

Ç: Çimento, KP: Kil pestili, UK: Uçucu kül, VT: Volkanik tuf

İkinci deneysel çalışmada % 10 ve % 15 iki farklı kil pestili içeriğinde % 10, 20 ve 30 uçucu kül ve volkanik tuf oranlarında (Ç+KP+UK+VT)'ten oluşan harç

karışımlarından toplam 12 seri örnek üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada yapılan tüm deneyler için toplam 252 adet adet örnek üretilmiştir. Her bir deney için üç adet örnek üretilmiş ve sonuç verilirken bunların aritmetik ortalamaları esas alınmıştır. Deneysel çalışmalarda üretilen harç örnekleri TS EN 196-1 (Çimento Deney Metotları – Dayanım) standardı esas alınarak hazırlanmıştır. TS EN 196-1’ deki numune hazırlama; yani karışım oranları, karıştırma, döküm, bakım, kür ve deneyler konusundaki hükümler esas alınarak harç örnekler üretilmiştir. Hazırlanan harç örnekleri üzerinde TS EN 197-1’ de ve aşağıda verilen deneyler gerçekleştirilmiştir

Üretilen çimentolu sistemler, içerisine katılan katkı maddeleri düşünüldüğünde aslında yeni çimento standartlarında geçen CEM II (Kompoze) ve CEM IV (Puzolanik) çimentolarına karşılık gelmektedir.

6.2.1. Harç üretimi, örneklerin hazırlanması ve bakımı

Harç üretimi, örneklerin hazırlanması ve bakımında TS EN 196-1 standardı esas alınarak çalışmalar yürütülmüştür. Harç, ağırlıkça 1 kısım çimento, 3 kısım TS 819’da tanımlanmış olan standart kum ve 1/2 kısım suyun karıştırılması ile hazırlanmıştır. Karma suyu olarak içilebilir ya da karma suyu niteliklerine sahip bir su kullanmıştır, (TS EN 196-1, 2002).

Harç hazırlanırken üç örnek için 450 gr çimento, 1350 gr kum ve 225 gr su tartılmıştır. Tartımlar 1 gr duyarlıklı terazide yapılmış ve harç, sıcaklığı 20 ± 2 °C olan bir odada karıştırılarak hazırlanmıştır. Çimento, kum, su, karıştırıcı ve kalıpların da aynı sıcaklıkta olması için bu malzemeler daha önceden oda içinde bekletilmiştir. Karıştırma kabına önce 225 gr su boşaltılmış, üzerine 450 gr çimento ilave edilmiştir. Karıştırıcı düşük hızda 30 sn çalıştırılarak 30 sn sonunda 1350 gr kum karıştırma devam ederken yavaş yavaş karışıma ilave edilmiştir. Kumun katılması 1 dakika sonunda bitmiştir. 1 dakika sonunda karıştırıcı yüksek hıza ayarlanarak 30 sn daha karıştırılmıştır.



Şekil 6.4. Harç makinesinde harcın karıştırılması.

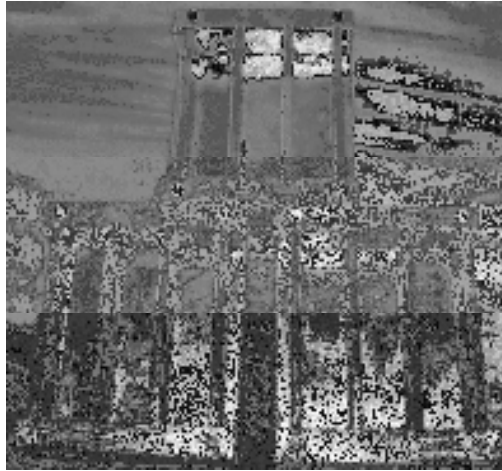
Toplam 90 sn'lik çalıştırmadan sonra karıştırıcı durdurularak 15 sn içinde karıştırma kabının cidarlarına yapışmış olan harç kauçuk başlı bir çubuk ile kabın içine kazınmıştır. Kabın üzeri örtülerek 75 sn beklenmiş ve bu süre sonunda karıştırıcı yüksek hızda yeniden 1 dakika daha çalıştırılmıştır. Böylece toplam olarak 4 dakika sonunda harç kalıplara konulmak üzere hazır hale getirilmiştir. Yaptığımız çalışmada kullanılan karıştırıcının (Şekil 6.4) otomatik olarak bu şekilde çalışma özelliği olduğundan dolayı karıştırma işine müdahale edilmemiş ve karışım işlemi yukarıda tanımlandığı şekilde gerçekleştirilmiştir.

Harç hazırlanmasında kullanılan karıştırıcının karıştırma kabı paslanmaz çelikten yapılmış olup kapasitesi 4,7 litredir. Karıştırıcı kanadı, hem kendi eksenini etrafında hem de karıştırma kabının eksenini etrafında dönebilen bir yapıdadır. Dönme yönleri birbirlerine zıt olup hızlar bir elektrik motoru ile kontrol edilmektedir. Karıştırma Çizelge 6.11' de verilen iki ayrı hız ile yapılmıştır.

Çizelge 6.11. Karıştırıcının karıştırma kanadı hızları

Hızlar	Karıştırıcı Kanadı	
	Kendi eksenini etrafında dönme hızı, devir/dak.	Kabın eksenini etrafında dönme hızı, devir/dak.
Düşük Hız	140 ± 5	62 ± 5
Yüksek Hız	285 ± 10	125 ± 10

Yukarıda özellikleri açıklanan karıştırıcı ile TS EN 196-1'e göre hazırlanan harç kalıplara doldurulmuş ve sıkıştırılarak laboratuvar ortamında bekletilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Numune kalıpları.

Örneklerin hazırlanmasında kullanılan kalıplar en az 400 Vickers sertliğinde çelikten imal edilmiştir. Kalıplarda 3 örnek prizmasını aynı anda hazırlayabilmek için 3 ayrı bölmeli kalıp kullanılmıştır. Kullanılan kalıpların biçim ve boyutları aşağıda verilmiştir.

Uzunluk : 160 ± 0,4 mm

Genişlik : 40 ± 0,1 mm

Yükseklik : 40 ± 0,1 mm

Açılar : 90 ± 0,5°

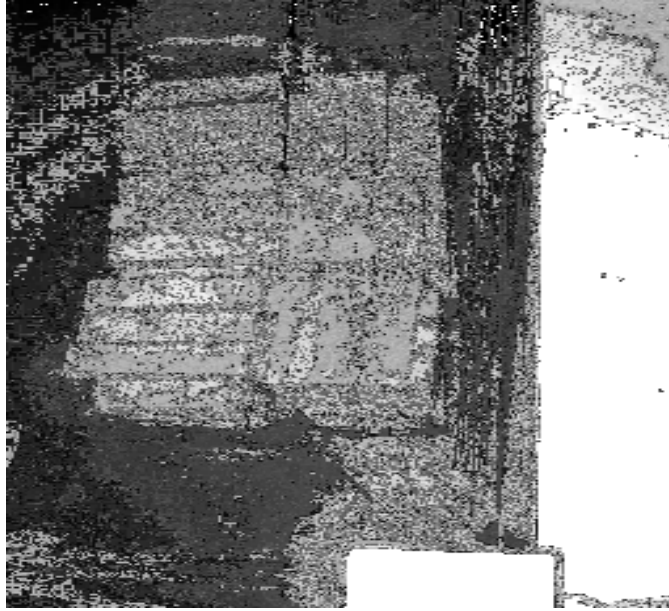
Et kalınlığı: en az 10 mm

Kalıpların üzerine, harcın kalıpların içine doldurulmasını sağlamak üzere bir başlık takılmıştır. Başlığın dik kenarlarının yüksekliği 20 - 40 mm'dir. Kalıplar harç ile doldurulmadan önce kalıpların içi ince bir yağ ile hafifçe yağlanmıştır. Kalıplar tabla vibratörü üzerine yerleştirilerek bağlama vidaları sıkıştırılmış ve daha sonra kalıp başlığı takılmıştır.

Harç örneklerin yerleştirilip sıkıştırılmasında kullanılan vibratör, esas olarak dikdörtgen şeklinde bir sarsma tablasından oluşur. Bu tabla, hafif bir metalden yapılmış iki mil üzerine sağlamca oturtulmuştur. Miller, tablanın merkezinden itibaren 80 cm uzunlukta ve $1 \pm 0,3$ kg ağırlıktadır. Tabla, altında bulunan eksantrik bir disk vasıtasıyla 15 mm yüksekliğe kaldırılıp ve serbest olarak düşürülmesi prensibine göre çalışmaktadır. Saniyede 1 devir yapan, 250 watt'lık bir motorla hareket ettirilen bir disk 60 düşme yaptıktan sonra otomatik olarak durmaktadır. Kalıplar, prizmaların uzun kenarları diskin dönme eksenine dik gelecek şekilde tabla üzerine yerleştirilmiş ve her iki tarafta bulunan vidalarla sağlamca tespit edilmiştir. Tabla, kalıp, kalıp başlığı ve tutturma vidalarının toplam ağırlığı 20 ± 1 kg'dır. Vibratör, 1 m uzunluk, 30 cm genişlik ve 80 cm yüksekliğinde beton bir blok üzerine oturtulmuştur. Alet betona saplanmış 4 vida ile sağlamca tespit edilir. Aletin tabanı ile beton bloğun üzeri arasına bol çimentolu bir harç doldurularak aletin bloğa iyice oturması sağlanmıştır.

Hazırlanan harç, kalıp bölmelerinin her biri içine önce yaklaşık olarak 320 gr kadar yani kalıp hacimlerinin yarısı ölçüsünde doldurulmuştur. Bu işlem, ölçüsü belli bir kaşık ile yapılmıştır. Kalıplara konan harç, kaşık ile ileri geri yayılarak, harcın kalıp içinde aynı kalınlıkta dağılıp yerleşmesi sağlanmıştır. Tabla vibratörü çalıştırılarak aletin 60 saniye içinde 60 sarsma yapması sağlanmıştır. Vibratör durdurulduktan sonra harcın ikinci tabakası da aynı şekilde yerleştirilmiş ve vibratör yeniden 60 sarsma yapacak şekilde 60 saniye çalıştırılmıştır. Kalıplar sarsma tablasından alındıktan sonra üzerindeki huni çıkartılmış ve harcın fazlası metal bir master ile sıyrılarak alınmıştır. Daha sonra kalıp üst yüzü aynı master ile düzeltilmiştir. Bu şekilde yerleştirilerek hazırlanan numuneler etiketlenerek kür ortamına alınmıştır. Hazırlanan örneklerden suyun buharlaşarak kaybolmasını önlemek için kalıp üzerleri çelik veya lastik bir plaka ile örtülmüştür. Kalıplar 20 ± 1 °C sıcaklık ve en az % 90 oranında nemli bir oda içinde

bekletilmiştir. Örneklerin geç priz alması dikkate alınarak dökümden itibaren 2 - 3 gün sonra kalıplar sökülmüş, kalıptan çıkan her harç prizması kontrol için tartılmış ve alt yüzleri numaralanmıştır. Harç prizmaları daha sonra 23 ± 2 °C'lik sıcaklıkta ve % 90 görece nem koşullarına sahip kür odasına alınarak teste tabi tutulacakları güne kadar (7, 28, 90 gün) bu ortamda bekletilmiştir. Prizmalar bütün yüzeyleri nem alacak şekilde ve birbirinden ayrı olarak duracak şekilde bekletilmiştir. Örnekler deneyden 1 saat kadar önce kür odasından alınıp doymun kuru yüzeye gelene kadar oda sıcaklığında tutulduktan sonra yapılacak deneyler için hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Kür edilen örnekler.

6.3. Deney Yöntemi

Birinci deneysel çalışmalar kapsamında UK ve VT kullanılarak üretilen kil pestili içeren karışımlar üzerinde en uygun kil pestili ve puzolan karışımını bulmak için sadece basınç ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. İkinci deneysel aşamada ise UK ve VT ile üretilen kil pestilli (KP) örneklerin çimento, harç ve dolayısıyla beton üzerindeki etkisini incelemek amacıyla; 7, 28 ve 90 günlük örnekler üzerinde basınç ve eğilmede çekme dayanımı, ASR (alkali silika reaksiyonu)

ile ultrases geçiş süresi deneyleri yapılmıştır. Bunlara ilaveten taze harç üzerinde priz başlangıç ve bitiş süreleri tespit edilmiş ve hacim genişmesi deneyleri yapılmıştır. Yine sertleşmiş 28 günlük harç örnekleri üzerinde birim ağırlık, Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltileri ile dayanıklılık deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

6.3.1. Eğilmede çekme dayanımı deneyi

Eğilmede çekme deneyi TS EN 196-1'e göre gerçekleştirilmiştir. Eğilmede çekme deneyinde kullanılan presin TS EN 196-1'e göre duyarlılığı, 10000 N'dan daha az yüklerde % 1, daha büyük yüklerde ise % 0,8 olmalıdır. Eğilme aletinin yükleme düzeni birbirinden 100 veya 106,7 mm uzaklıkta olan 10 mm çaplı iki destek silindirden oluşur. Bu iki silindirin tam orta yerinde aynı çapta üçüncü bir yükleme silindiri vardır. Bu üç silindirin eksenlerinden geçen düşey düzlemler birbirine paralel olmalı ve deney süresince paralel kalmalıdır.

Destek silindirlerinden birisi ve yükleme silindiri prizma üzerinde yükün eşit şekilde dağılımını sağlayacak ve burulma gerilimi meydana getirmeyecek şekilde kendi merkezleri etrafında aşağı yukarı ayarlanabilmelidir. Harç prizmaları, kalıptan çıkmış yan yüzlerinden biri üzerine ve uzunluğuna eksenine destek silindirler eksenine dik gelecek şekilde destek silindirler üzerine konulur. P yükü, yükleyici silindir vasıtası ile örneğe karşı yüzdendik olarak uygulanır. Yükleme hızı saniyede 50 ± 10 N olacak şekilde ayarlanmalıdır. Eğilme momentinden çekme dayanımı σ_c aşağıdaki formül ile hesaplanır (Şekil 6.7).

$$\sigma_c = 3PL/2bd^2 \quad (6.1)$$

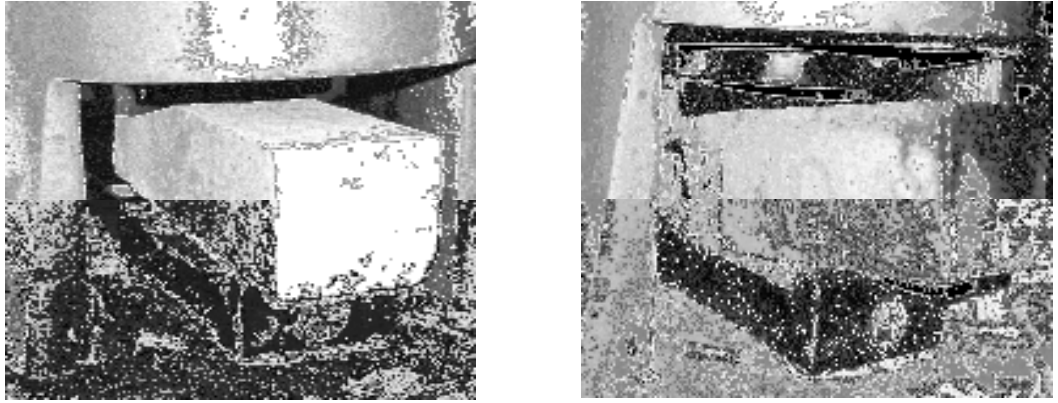
Bu denklemden;

σ_c : Eğilmede çekme dayanımı, P: Kırılma kuvveti, L:Alt mesnetler arası mesafe

b: Prizma kesit genişliği ve d: Prizma kesit yüksekliğidir.

Deneyde Şekil 6.7'de gösterilen özel yükleme aparatı kullanılmıştır. Basınç presine yerleştirilen bu aparatta 10 cm aralıklı iki mesnet üzerine basit kiriş gibi yerleştirilen harç örneğinin tam orta noktasına aksenal basınç kuvveti uygulanmıştır. Buradan elde edilen kırılma kuvveti Denklem (6.1) ile çekme kuvvetine dönüştürülerek

prizma örneklerinin çekme dayanımı belirlenmiştir. Kür havuzundan alınan örnekler önce bir köşede kurumaya bırakılmıştır. Doymun kuru yüzey durumuna gelen örnekler pres başlıkları arasına her iki taraftan da ortalanarak yerleştirilmiştir. Uygulanan bu kuvvet zamanla artarak örneğin kopmasını sağlamıştır.



Şekil 6.7. Eğilmede çekme deneyi.

6.3.2. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyi TS EN 196-1'e göre yapılmıştır. Çimento kalitesini tayin etmek üzere yapılması zorunlu bir deneydir. Eksenel basınç yükü altında malzemede ortaya çıkan maksimum gerilme basınç dayanımı olarak tanımlanır. Eğilme deneyinde iki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Her yarım prizma 40x40 mm'lik ve kalınlığı en az 10 mm olan sert metalden yapılmış iki kalın levha arasında kalıplanmış yan yüzler üzerinden kırılmıştır. Bu levhalar en az 600 Vickers sertliğinde çelikten veya daha iyisi volfram karbüründen yapılmış ve yüzleri hassas taşlanmış olmalıdır. Kırma presinin duyarlılığı en küçük yerlerde bile en az % 1.5 olmalıdır. Presin yük göstergesi biri 4 veya 5 ton diğeri 15 veya 25 ton olmak üzere en az iki kademeli olmalıdır.

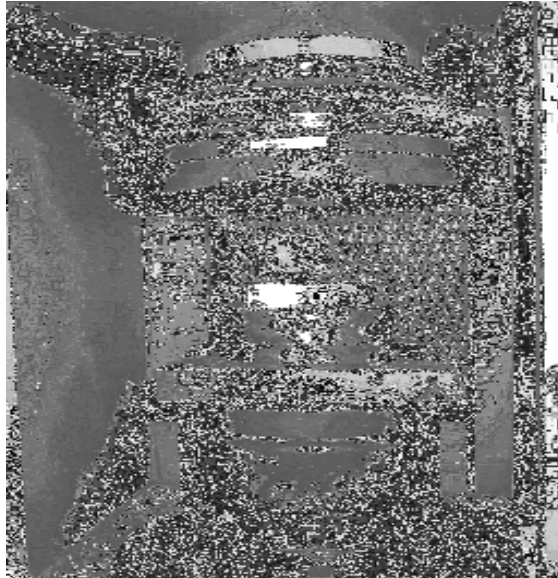
Prizmalar presin alt ve üst tablaları arasına yerleştirilen kırma başlığı yardımı ile kırılır. Kırma başlığı yükü, herhangi bir sürtünmeye sebep olmadan prizmaya iletmelidir. Prizma kırıldıktan sonra kırma başlığı otomatik olarak eski halini almalıdır.

Yükleme, basınç saniyede 10 – 20 MPa artacak şekilde yapılmalıdır. Hiçbir halde kırma süresi 10 sn'den az olmamalıdır. Basınç dayanımı aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$\sigma = P/A \quad (6.2)$$

Burada; σ : basınç dayanımı, P: kırılma yükü, A: yükün uygulandığı yüzeyin alanıdır.

Eğilme deneyi sırasında, 4x4x16 cm boyutlarındaki standart örnekler yaklaşık olarak ortadan ikiye ayrılmıştır. İkiye ayrılan bu örneklerin alt ve üst yüzlerine 4x4 cm boyutlarında çelik levhalar yerleştirilerek 4x4x4 cm boyutlarında küp elde edilmiştir. Her yarım örneğin alt ve üst yüzlerine 4x4 cm boyutlarında metal kırma başlığı yerleştirilmiş ve örneklere deney presinde aksenal basınç kuvveti uygulanmıştır. Şekil 6.8' da kırma başlıkları arasındaki yarım prizmanın 4x4x4 cm'lik bir küp örneğine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Basınç dayanımı deneyi.

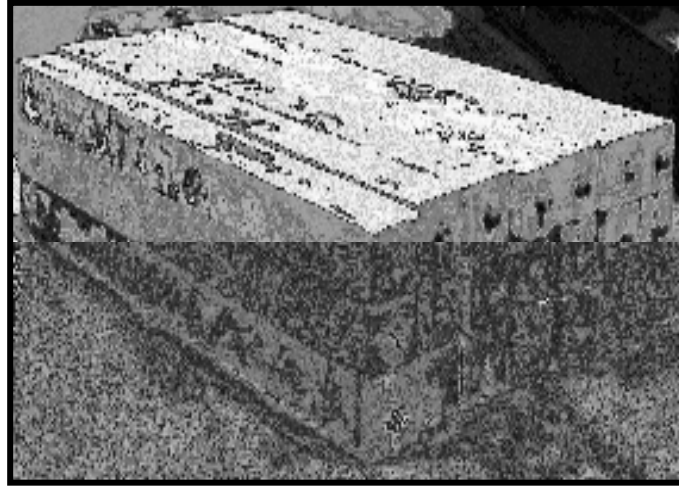
Basınç deneyinden elde edilen en büyük kırılma kuvvetinin kesit alanına bölünmesiyle elde edilen değer örneğin o yaştaki dayanımını vermektedir.

Çimentoların dayanım sınıfları 28 günlük basınç deneyi sonucunda elde edilen basınç dayanımına göre değerlendirilmektedir.

6.3.3. Alkali silis (ASR) reaksiyonu deneyi

Alkali-silis reaksiyonu (ASR) çimentodan kaynaklanan alkali oksitlerle reaktif silis içeren agregalar arasında oluşan ve betonda genleşme etkisine neden olan reaksiyondur. ASR basitçe iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada alkalilerle reaktif silislerin birleşmesiyle ASR jel ürünleri oluşur ve daha sonra ikinci aşamada alkali silis jelleri ortamdaki nem ile birleşerek genleşmeleri oluşturur. Oluşan bu genleşmeler de zamanla betonun çatlamasına ve bozulmasına neden olur (Bazant and Meyer, 2000). Hizmet ömrü boyunca kuru kalan bir betonda ASR ciddi bir tehlike olmayabilir. Araştırmalar bağıl nem oranı % 80'in üstünde olan betonlarda ASR'nin oluştuğunu göstermektedir (Aşık vd., 2004). ASR'ye neden olabilecek mineraller opal, camsı silis, kalsedon, tridimit, kristobalit, kuvars gibi reaktif silisli minerallerdir (Topçu, 2006b). Betonda ASR'yi ortaya çıkarmak için kullanılan deney yöntemleri agregalar ve harç örnekleri ile yapılabilen deneyler olmak üzere ikiye ayrılabilir. Harçlar ile yapılan deneylerden olan ASTM C 227 deney yönteminin uzun zaman alması ve uygulamasının zor olmasından dolayı hızlı yöntemler daha kullanışlı olmaktadır (Davraz ve Gündüz, 2004). Bu çalışmada da daha hızlı olmasından dolayı ASTM C 1260, deney yöntemi seçilmiştir (ASTM C 1260, 2002). İçinde aktif silis bulunan ve ASR'ye yol açan agregaların kullanılması halinde, bağlayıcı maddeye bir miktar puzolan ilave edilerek tepkime hızı azaltılabilmektedir. ASR nedeni ile oluşacak genleşmelerin önlenmesi için bağlayıcı maddelerin alkali içeriği düşük olmalı ve dış kaynaklardan alkali gelmesi önlenmelidir. Doğal puzolanlar, uçucu küller, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı genleşen jel oluşmasını azaltmaktadır. Bu mineral katkıları arayüz sıvısındaki Ca(OH)_2 dengesini kurarlar ve ayrıca daha geçirimsiz beton elde edilmesine yardımcı olarak ASR' nünü önlerler (Akman, 1999). Deneysel çalışmalar kapsamında reaktifliği bilinen cam agregası kullanılarak katkılı çimentolarla harç örnekleri üretilmiş ve ASTM C 1260'a göre genleşmeler ölçülerek çimentoların ASR performansı araştırılmıştır.

Betonda alkali-silis (ASR) etkisini belirlemek için kullanılan deney yöntemleri; agregalar ve harç örneklerinde yapılan deneyler olmak üzere ikiye ayrılır. Deneysel çalışmalar kapsamında ASR oluşturmak için agrega olarak ASTM C 1260 standardına uygun olarak reaktifliği bilinen ağırlıkça % 50 cam agregası ve % 50 standart kum karışımı kullanılmıştır. ASTM C 1260'a göre 25x25x285 mm boyutlarında standart harç çubukları 0.47 su - çimento oranında ve Çizelge 6.12'de verilen granülometride üretilmiştir (Şekil 6.9). Harç çubukları neme doymun kür kabiniinde 24 saat süreyle kür edilmiştir. Daha sonra kalıplarından alınan örnekler 80 ± 2 °C sıcaklıkta hazırlanan su banyosuna yerleştirilerek 24 saat süreyle ikinci bir küre bırakılmıştır.



Şekil 6.9. ASR deney örnekleri (harç çubukları).

Çizelge 6.12. Harç çubuklarında kullanılan agrega granülometrisi

Elek Çap Aralığı, mm	Elekler Arası Malzeme Miktarı, %
4.75 - 2.36	10
2.36 - 1.18	25
1.18 - 0.60	25
0.60 - 0.30	25
0.30 - 0.15	15

Sıcak su banyosundan çıkarılan harç çubuklarının boyları 0.001 mm hassasiyet ile ölçülerek ilk okumaları yapıp referans boyları belirlenmiştir. Başlangıç boy

ölçümleri yapılan harç çubukları daha sonra ağırlıkça % 4 NaOH içeren 80 ± 2 °C sıcaklıktaki çözelti banyosu içerisine konularak 14 gün süre ile saklanmıştır. NaOH çözeltisi içerisinde kür edilen harç çubukları üzerinde sırasıyla 4, 8 ve 14. günde boy uzaması ölçümleri yapılarak toplam 16 günlük deney süresi tamamlanmıştır. Harç çubuklarının ortalama boy uzamaları yüzde cinsinden Denklem 6.3 ile hesaplanmıştır.

$$\Delta l: (L_x - L_i / L_g) \times 100 \quad (6.3)$$

Burada; Δl : x yaşındaki % boy değişimi, L_x : x yaşındaki harç çubuğunun komparatör okuması, L_i : harç çubuğunun ilk (sıfır) okuması L_g : nominal ölçü boyu (285 mm) olarak tanımlanmıştır. Deneyde sonuçlar değerlendirilirken portland çimentosunun toplam eşdeğer alkali içeriği $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$ bağıntısıyla belirlenmiştir. Bu, kullanılan çimentonun ne kadar alkali karaktere sahip olduğu konusunda bir fikir verir. Deney sonuçları ASTM C 1260'a göre değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar değerlendirirken boy uzamaları dikkate alınmış. Boydaki uzamalar;

0,00 – 0,10 ölçüsünde zararsız

0,10 – 0,20 ölçüsünde riskli

> 0,20 ölçüsünde ise zararlı olarak değerlendirilmiştir.

6.3.4. Ultrases geçiş süresi

Hasarsız olarak yapılan bu deneyle; çimento, harç ve betonun içyapısı, yoğunluğu, dinamik elastisite modülü gibi özellikleri hakkında bilgi edinilebilir. Titreşim frekansı 20 KHz'den yüksek olan ses dalgalarının örneğin bir yüzeyinden gönderilip diğerinden alınması esasına dayanan bu deneyde ses dalgasının örnek içinden geçiş süresi belirlenir. İçyapıda çatlak ve boşluk olması durumunda ya da düşük yoğunluklu ve su-çimento oranı yüksek örneklerde bu sürenin uzadığı bilinir. Sürenin kısılması, çatlaksız ve boşluksuz bir içyapı ve yüksek yoğunluğun ifadesi olarak değerlendirilir. Bu deneyde ses üstü dalganın geçiş süresi hesaplandıktan sonra dalga hızı aşağıda verilen Denklem 6.4 ile belirlenir.

$$V = \frac{x}{t} \times 10^3 \quad (6.4)$$

Bu denklemde; V: ses üstü dalga hızı (km/sn), x: örneğin ses üstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalgaların alındığı yüzeyi arasındaki mesafe (km), ve t: ses üstü dalganın gönderilmiş olduğu örnek yüzeyinden alındığı yüzeye kadar geçen süreyi (µsn) ifade eder. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.13' de verilen beton için literatürde belirlenmiş değerlendirme kriterleri esas alınarak yapılır. Harç, çimento gibi diğer malzemelerde ise referans örnek ile kıyaslama yaparak bir değerlendirme yapılabilir.

Çizelge 6.13. Ultrasonik test yöntemiyle beton kalitesinin değerlendirilmesi

Dalga Hızı, m/sn	Beton Kalitesi
>4500	Mükemmel
3500-4500	İyi
3000-3500	Şüpheli
2000-3000	Zayıf
<2000	Çok Zayıf

Deney, Şekil 6.10'da görülen Pundit cihazı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler ASTM C 597 esas alınarak yürütülmüştür. Cihaz yardımı ile ultrases dalgaları alıcı ve verici problar yardımıyla beton örneğin bir ucundan verilip diğerinden alınmış ve aradaki zaman cihazın skalasından µs olarak okunmuştur. Deneyler 28 günlük örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir.



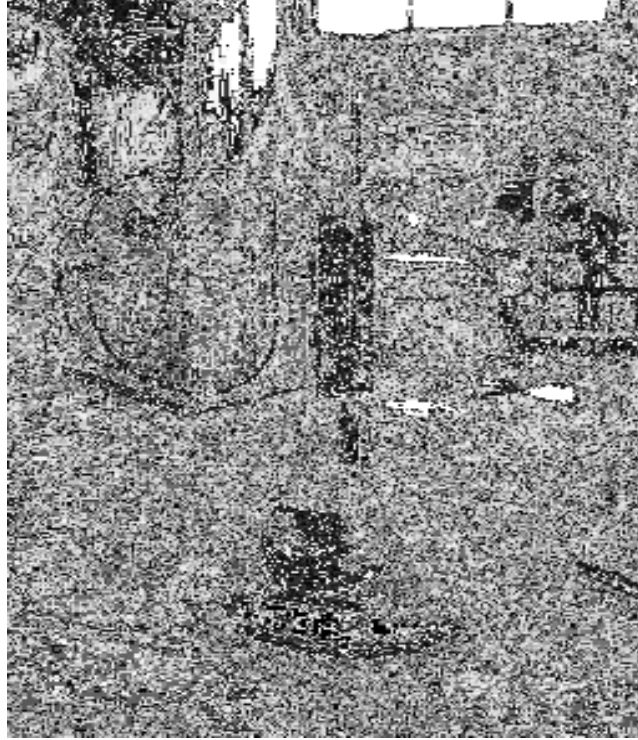
Şekil 6.10. Ultrases geçiş süresinin ölçümü.

6.3.5. Priz başlangıç ve priz bitiş süresi

Deney TS EN 196-3 standardı esaslarına göre yürütülmüş olup deneyde Şekil 6.11’de görülen Vicat aleti, Vicat iğnesi ve Vicat halkası kullanılmıştır. Vicat aletine iğne takılarak, üst tablasına 27,5 gr’lık bir ağırlık konulup, göstergesi; iğne, cam levhaya değdiği zaman sıfırı gösterecek şekilde ayarlanmıştır. Normal kıvamda hazırlanan çimento hamuru Vicat halkasına yerleştirilmiştir. Vicat iğnesi halka içindeki hamurun üst yüzeyine dokunacak kadar indirilerek yan taraftaki vida ile sıkıştırılmıştır. Sonra vida hafifçe gevşetilerek iğnenin hamur içine serbest olarak girmesi sağlanmıştır.

Vicat aleti kullanılarak yapılan priz sürelerinin belirlenmesi TS EN 196-3 standardında belirtildiği gibi yapılmıştır. Deney için Vicat cihazına takılmış olan iğne taban plakasının üzerine indirilmiş ve iğneli Vicat cihazı gösterge üzerinde sıfıra ayarlanmıştır. Sonra iğne yukarı kaldırılarak duruş konumuna alınmıştır. Vicat kalıbı, çimento pastası ile doldurularak düzlenmiştir. Doldurulmuş Vicat kalıbı taban plakası ile birlikte Vicat cihazına ve iğnenin altına yerleştirilir. Sonra hareket eden parçalar

birden bırakılır ve iğnenin düşey olarak pastanın içine girmesi sağlanmıştır. İğnenin aynı numuneye batırılma işlemi, iğnenin pastaya batırıldığı noktalar arasındaki veya kalıp kenarından en az 10 mm mesafe olacak şekilde ve 10 dakikalık uygun zaman aralıkları ile tekrarlanmıştır. Sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından itibaren iğne ile taban plakası arasındaki mesafe (4 ± 1) mm oluncaya kadar geçen süre en yakın 5 dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedilmiştir. Priz başlangıç süresinin belirlenmesi için iğne her beş dakikada bir hamura batırılmıştır. İğnenin bir defa girmiş olduğu yere bir daha girmemesi için Vicat halkasının durumu her batılıştan sonra değiştirilmiştir.



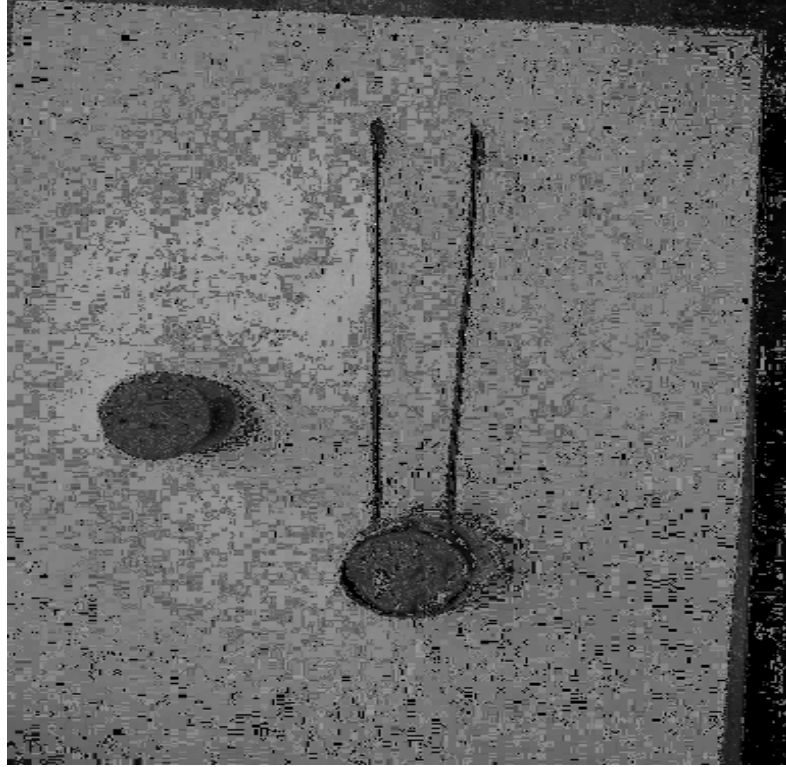
Şekil 6.11. Vicat iğnesi ile priz süresi ölçümü.

Priz başlamasından sonra örnek kalıbı ters çevrilmiş ve düzgün yüzey üzerinde priz sonu deneyine devam edilmiştir. Vicat iğnesi çimento pastasına 0.05 mm kadar battığı an ile sıfır olarak kabul edilen süre arasında kalan zaman priz sona erme süresi olarak tanımlanır. Elde edilen süre en yakın 15 dakikaya yuvarlanarak priz sonu süresi olarak kaydedilmiştir. Prizin sona erme süresinin belirlenmesi için, prizin

başlamasından sonra iğne her 15 dakikada bir harca batırılmıştır. İğnenin bir kez girmiş olduğu yere bir daha girmemesi için Vicat halkasının durumu her batırılıştan sonra değiştirilmiştir. İğnenin hamura en çok 1 mm girebildiği kıvam oluşuncaya kadar batırılışlara devam ederek priz bitiş süresi tespit edilmiştir.

6.3.6. Hacim genleşmesi tayini

Deney, TS EN 196-3' de belirtilen esaslara göre yürütülmüştür. Bu deneyde çimento hacminin değişimini ölçmek için Le Chatelier aleti kullanılmıştır (Bkz. Şekil 6.12). Aletin silindirik halkasının et kalınlığı 0,5 mm, iç çapı 30 mm ve yüksekliği 30 mm'dir. Silindirik halka eksenini doğrultusunda yarıktır. Yarığın her iki tarafına ve silindirin tam ortasına gelmek üzere 150 mm uzunluğunda iki çubuk lehimlenmiştir.



Şekil 6.12. Le Chatelier aleti ile hacim genleşmesi ölçümü.

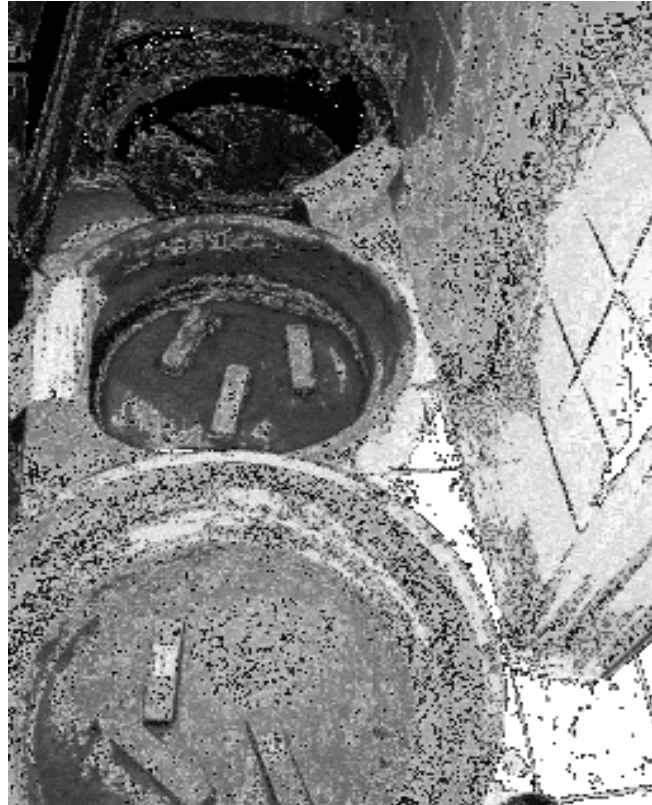
Deneye başlamadan önce silindir halkanın yarık kenarlarının birbirine değmiş olduğu gözlenmiştir. Çimento karışımı doldurulurken çubukların arasının açılmaması için çubuklar lehim yanından ipe bağlanmıştır. Halka, yağlanmış bir cam levha üzerine konularak içi normal kıvamda çimento karışımı ile doldurulmuştur. Halka üst yüzeyi, bir spatula ile kenar seviyesinde düzeltilerek üst yüzey bir cam levha ile kapatılmıştır. Cam levha üstüne ağırlık konularak çubuklara bağlanan ipler çözülmüştür. İpler çözüldükten hemen sonra çubuk uçlarının açıklığı (a) mm olarak ölçülmüştür. Sonra kalıplar, çubukların durumu bozulmadan sıcaklığı 20 °C olan su içine daldırılmıştır. Karışım kalıba konulduktan 24 saat sonra çubuk uçlarının açıklığı (b) tekrar ölçülmüştür. Kalıpların üzerindeki cam levha itina ile kaldırılarak çubuklar yukarı gelecek şekilde tekrar bir beher içindeki suya daldırılmıştır. Bundan sonra içinde kalıpların bulunduğu su dolu beher 30 dakika içinde kaynamaya başlayacak şekilde yavaş yavaş ısıtmaya başlanmıştır. Kaynamaya 4 saat devam edilmiştir. Dört saat kaynama sonunda örnekler laboratuvar sıcaklığına kadar soğutulmuş çubuk uçlarının açıklığı (c) mm olarak ölçülmüştür. Bu işlemlerden sonra hacim genişmesi (c-a) mm olarak belirlenmiştir.

6.3.7. Birim ağırlık deneyi

Kil pestili atığının çimento birim ağırlığına olan etkisini araştırmak üzere yapılmış bir deneydir. Deney 28 gün sonunda oluşacak olan ve bor oksitini de içinde olacağı tepkimeleri, hidrasyon gelişimi ve hidrasyon ürünlerini de dikkate alarak 28 günlük sertleşmiş harç örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Birim ağırlık deneyi ile belirli bir hacim içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmiş harcın birim hacmine karşılık gelen ağırlığı bulunmuştur. Birim ağırlığı azalması ya da referans örneğe göre küçülmesi harç içyapısının yeterince yoğun olmamasının bir göstergesi olarak kabul edilir. Bu amaçla her seriden 3 adet örnek hazırlanmış ve 28 gün kür edilmiştir. 28 gün sonunda örnekler sudan çıkartılarak doymuş kuru yüzey durumuna getirilmiştir. Daha sonra 0,1 gr duyarlıklı terazi ile tartılan örneklerin ağırlığı standart kalıp hacmine bölünerek birim ağırlık saptanmıştır.

6.3.8. Dayanıklılık deneyleri

Bilindiği üzere beton değişik yapılarda sadece yüke ya da gerilmelere değil çevresel olumsuz koşullara da maruz kalmaktadır. Özellikle endüstri ve deniz yapıları bu etkinin en yoğun yaşandığı ortamlar olmakla birlikte toprak, su ve havanın da beton için zararlı bileşenler barındırdığı bilinir. Bu bileşenlerin zararlı etkinlik derecesinin üzerinde bulunması durumunda çimento bağlayıcılı yapı malzemesi (çimento, harç ve beton) zamanla tahrip olur ve yapı hizmet görme yeteneğini kaybeder. Bu nedenle günümüz araştırmalarında çevresel etki değerlendirmesi de göz önüne alınarak çalışmalar yürütülmektedir. Yapılan çalışmada da bu durum göz önüne alınarak özellikle doğada en sık rastlanan ve betonu kolayca tahrip eden sülfat, sodyum ve magnezyum etkisini incelemek üzere Na_2SO_4 ve MgSO_4 bileşikleri ile sulu çözeltiler hazırlanarak örnekler bu ortamda kimyasal etkilerle karşı karşıya bırakılmıştır (Bkz. Şekil 6.13).



Şekil 6.13. Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletilen örnekler.

Bu konuda ASTM de C 1012 ve C 452 numaralarıyla verilen ve referans alınan standartların hepsi dayanıklılık deneylerini beton için tanımlamıştır. Bu nedenle belirtilen deneyler harç örneklerine uygulanamamıştır. Bundan dolayı deney genelde uygulanan koşullar ile benzeşim oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 1 litre suda ayrı ayrı 50 gr Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözülerek hazırlanan % 5'lik iki adet çözelti ile deneyler gerçekleştirilmiştir. 28 günlük eğilmede çekme dayanımı deneyinden çıkan her seriden en az iki parça alınarak tartılmış ve ilk ağırlıkları kaydedilmiştir. Sonra her deney için ayrı ayrı kaplara konulan örnekler üzerine, örnekleri örtecek miktarda daha önceden hazırlanmış olan çözelti ilave edilmiştir. Örneklerin içinde bekletildiği kaptaki çözeltinin her yirmi günde bir derişimi ölçülmüş ve başlangıçtaki derişimin azalması halinde çözeltiye kimyasal madde ilavesi yapılarak derişim ilk halinde tutulmaya çalışılmıştır. Toplam 60, 90, 120, 150 ve 180. günler sonunda örnekler çözelti içerisinde alınarak laboratuvar ortamında kurutulup tartılmıştır. Aradaki fark % cinsinden ağırlık kaybı olarak verilmiştir.

6.3.9. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile iç yapı incelemeleri

Üretilen örneklerde iç yapıda meydana gelen farklılıklar ve zamanla ortaya çıkan değişimler hakkında bilgi edinebilmek amacıyla bazı örnekler üzerinde taramalı elektron mikroskopu SEM (Scanning Elektron Microscope) ile incelemeler yapılmıştır. Elektron mikroskoplarının çözme güçleri, odaklama derinlikleri ve büyütme oranları optik mikroskoplara göre çok daha fazladır. Bu nedenle örneklerin kristal yapılarından yararlanılarak SEM analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde iç yapıdaki C-S-H jelleri, ASR sonrası ortaya çıkan çatlamlar, sülfat etkisi sonrası görülen etrenjit kristalleri gibi oluşumlar gözlenerek filme alınmıştır.

İncelemesi yapılacak örneklerin SEM mikrografları çekilmeden önce, harç örneklerinden parça kesme ya da kırma suretiyle örnek alındıktan sonra polyester kalıplara alınarak yüzeyi parlatılmıştır. Parlak kesitli ve kırık yüzeyli örnekler vakum pompasına alınarak 0.4 bar vakum elde edilinceye kadar yaklaşık 45 - 60 dakika bekletilmiştir. İstenilen vakuma ulaşıncaya örnekler 200 \AA kalınlığında altın film ile

kaplanmıştır. Örneklerin altın kaplanmasından sonra deneyler JEOL – JSM 6080 marka SEM cihazına yerleştirilerek mikrografileri çekilmiştir.

BÖLÜM 7

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Aşağıdaki bölümlerde birinci deneysel çalışma kapsamında kil pestili + uçucu kül ve kil pestili + volkanik tuf içeren karışımlar ile ikinci deneysel çalışma kapsamında kil pestili + uçucu kül + volkanik tuf içeren karışımlar üzerinde yapılan deneyler ile ilgili deneysel bulgular verilmiş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

7.1. Birinci Deneysel Çalışma Bulguları

Birinci deneysel çalışmada; kil pestili (KP) + uçucu kül (UK) ve kil pestili (KP) + volkanik tuf (VT)'ten örnekler üzerinde en uygun kil pestili ve puzolan karışımını bulmak amacıyla yapılan basınç ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri ile ilgili deneysel bulgular verilerek elde edilen sonuçların tartışılmıştır.

7.1.1. Basınç dayanımı

KP + UK ve KP + VT içeren karışımların basınç dayanımı sonuçları Çizelge 7.1 ve 7.2 ile Şekil 7.1 - 7.30'da verilmiştir.

Şekil 7.1-7.14'in incelenmesi sonucu, genel olarak kil pestili içeriğinin artması ile bütün yaşlarda basınç dayanımının azaldığı (negatif korelasyon durumu) görülmüştür. En yüksek dayanım azalması % 25 KP kullanımı ile ortaya çıkmaktadır. % 10, 15 ve 20 kullanım oranları arasında dayanım kaybı açısından % 10 kadar bir fark vardır (Şekil 7.5-7.7 ve 7.12-7.14). Dayanımdaki bu düşüş VT kullanılan serilerde UK kullanılan serilere göre biraz daha fazladır. Bir başka deyişle UK kullanılan serilerin basınç dayanımı VT kullanılan serilere göre biraz daha yüksektir. Bu durum uçucu külün puzolanik aktivitesinin ve inceliğinin volkanik tüfe göre daha yüksek olması gerçeği ile açıklanabilir. Bu serilerde göze çarpan bir diğer konu da örnek yaşının (deney yaşı) 7 günden 90 güne çıkması ile korelasyon doğrusu eğiminin artması gerçeğidir. Bunun sonucu olarak örnek yaşının artması ile genel olarak regresyon katsayısı (R^2) de büyümüştür (Şekil 7.1-7.4 ve 7.8-7.11).

Çizelge 7.1. Uçucu kül içeren karışımların basınç ve eğilmede çekme dayanımı sonuçları

Kodu	Karışım, %	Basınç dayanımı, MPa			Eğilmede çekme dayanımı, MPa		
		7 gün	28 gün	90 gün	7 gün	28 gün	90 gün
U1	95Ç+5 KP+ 0 UK	35	44	46	3,4	5,7	6,2
U2	85Ç+5 KP+10UK	39	49	56	3,6	5,5	5,8
U3	75Ç+5 KP+20UK	42	54	65	3,8	5,9	6,4
U4	65Ç+5 KP+30UK	40	50	61	3,1	5,5	6,2
U5	90Ç+10KP+ 0UK	30	36	43	3,2	5,2	5,5
U6	80Ç+10KP+10UK	35	48	54	3,4	5,3	5,9
U7	70Ç+10KP+20UK	39	49	62	3,6	5,6	6,1
U8	60Ç+10KP+30UK	37	47	57	3,4	5,1	5,9
U9	85Ç+15KP+ 0 UK	28	33	38	3,0	4,9	5,2
U10	75Ç+15KP+10UK	34	44	48	3,1	5,0	5,7
U11	65Ç+15KP+20UK	37	47	57	3,5	5,4	5,5
U12	55Ç+15KP+30UK	35	43	51	3,3	5,0	5,5
U13	80Ç+20KP+ 0 UK	27	32	36	2,9	4,6	4,9
U14	70Ç+20KP+10UK	33	40	44	3,1	4,9	5,4
U15	60Ç+20KP+20UK	36	45	52	3,4	5,2	5,7
U16	50Ç+20KP+30UK	35	42	48	3,2	5,0	5,3
U17	75Ç+25KP+ 0 UK	25	28	30	2,9	3,7	4,0
U18	65Ç+25KP+10UK	26	29	32	2,9	3,9	4,2
U19	55Ç+25KP+20UK	29	30	33	3,0	4,1	4,3
U20	45Ç+25KP+30UK	26	29	31	2,8	3,8	4,0

Ç: Çimento, KP: Kil pestili, UK: Uçucu kül

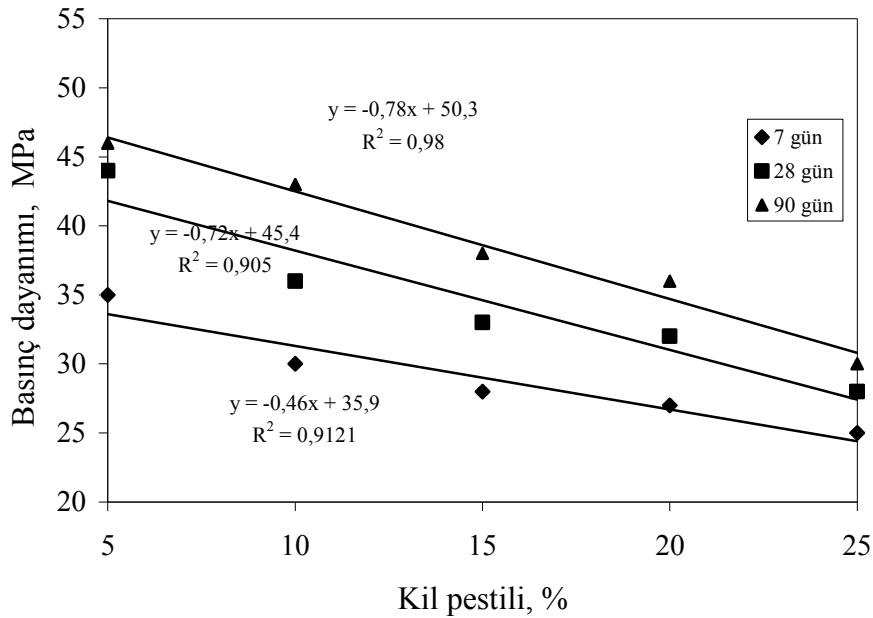
Çizelge 7.2. Volkanik tüf içeren karışımların basınç ve eğilmede çekme dayanımı sonuçları

Kodu	Karışım, %	Basınç dayanımı, MPa			Eğilmede çekme dayanımı, MPa		
		7 gün	28 gün	90 gün	7 gün	28 gün	90 gün
V1	95Ç+5 KP+ 0 VT	35	44	46	3,4	5,7	6,2
V2	85Ç+5 KP+10VT	39	47	56	3,5	5,4	5,8
V3	75Ç+5 KP+20VT	41	52	62	3,7	5,8	6,2
V4	65Ç+5 KP+30VT	38	50	59	3,1	5,5	5,9
V5	90Ç+10KP+ 0 VT	31	35	40	3,1	5,3	5,7
V6	80Ç+10KP+10VT	34	46	53	3,1	5,3	5,8
V7	70Ç+10KP+20VT	37	49	58	3,3	5,7	6,0
V8	60Ç+10KP+30VT	36	47	54	3,3	5,4	5,9
V9	85Ç+15KP+ 0 VT	27	33	39	2,9	4,9	5,2
V10	75Ç+15KP+10VT	33	43	47	3,0	4,7	5,5
V11	65Ç+15KP+20VT	36	45	55	3,3	5,1	5,7
V12	55Ç+15KP+30VT	34	41	48	3,1	4,8	5,3
V13	80Ç+20KP+ 0 VT	27	31	35	3,0	5,1	5,3
V14	70Ç+20KP+10VT	32	39	41	3,1	5,0	5,5
V15	60Ç+20KP+20VT	35	44	48	3,2	5,3	5,7
V16	50Ç+20KP+30VT	34	41	47	3,2	5,1	5,6
V17	75Ç+25KP+ 0 VT	24	27	31	2,7	3,6	4,0
V18	65Ç+25KP+10VT	25	30	33	2,9	3,7	4,1
V19	55Ç+25KP+20VT	26	31	33	2,9	4,0	4,3
V20	45Ç+25KP+30VT	24	28	30	2,6	3,6	3,9

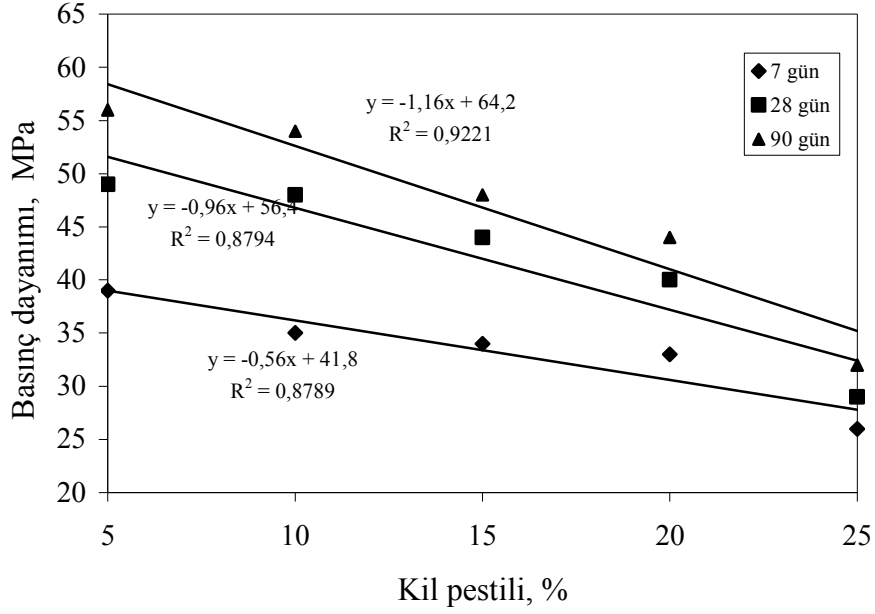
Ç: Çimento, KP: Kil pestili, UK: Uçucu kül

Şekil 7.15-7.30'da UK ve VT içeriği ile değişen basınç dayanımı ilişkisi verilmiştir. Burada da genel olarak UK ve VT içeriğinin artması ile basınç dayanımında neredeyse doğrusal bir artış (pozitif korelasyon durumu) söz konusudur. Bu serilerde de UK ile hazırlanan karışımların VT ile hazırlanan karışımlara göre biraz daha yüksek basınç dayanımı sağladığı görülmüştür. % 5, 10, 15, 20 ve 25 kil pestili içeriklerinde kullanılan uçucu külün % 20 kullanıldığı serilerin diğer serilere göre daha iyi dayanım

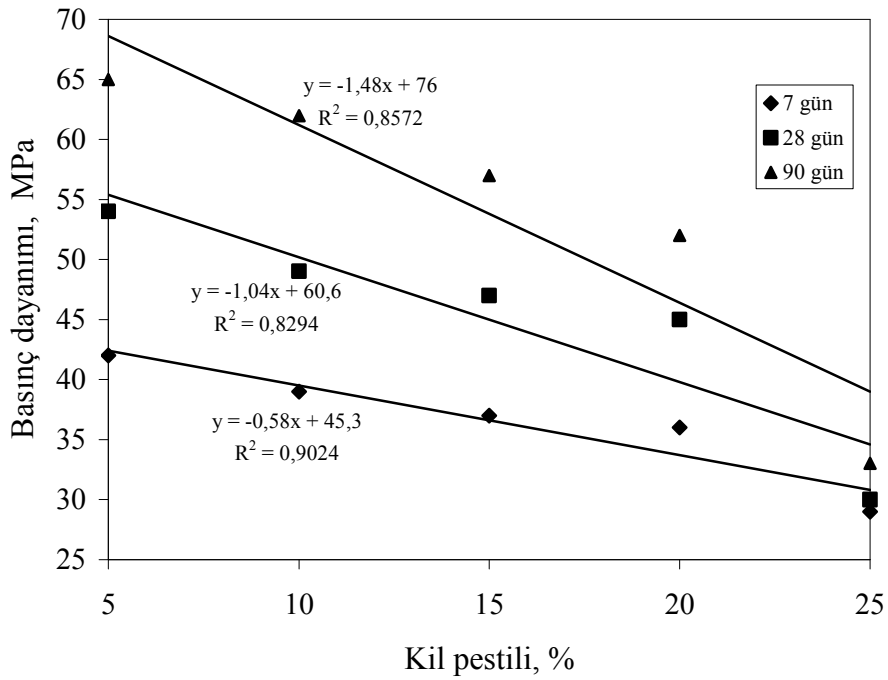
verdiği tespit edilmiştir. Bu durum karışım içerisindeki puzolanın kireci bağlaması ile ilgilidir. Bu sonuç ancak % 20 puzolanın kireçle tepkimeye girdiğini bunun üzerinde kullanılan puzolanın CSH jellri oluşturmak için ortamda yeterince kireç bulamadığını göstermektedir. Aynı durum VT kullanımı için de geçerlidir. 90 günlük deney sonuçlarında ise birçok seride çimento norm dayanımının üzerinde dayanımlar elde edilmiştir. Bunun yanı sıra % 30 UK içeren karışımlara ait dayanımlar % 10 UK içeren karışımların dayanımlarına göre daha yüksektir. Bu puzolanik malzemelerin puzolanik etkilerinin dışında filler etkisi ile ilgilidir. Gerek UK ve gerekse de VT çimentodan daha ince oldukları için çimento taneleri arasında kalan bazı boşlukları doldurarak dayanımı arttırmışlardır. Bu durum, çalışma kapsamında belirlenen optimal puzolan kullanım oranının (% 20) altında bir katkı kullanımı yerine daha yüksek oranda puzolanik katkı kullanımının hem ekonomik hem de teknik anlamda daha doğru bir tercih olabileceğini ortaya koymaktadır. Örnek ya da deney yaşının (deney yaşı) 7 günden 90 güne çıkması ile korelasyon eğrisi eğimi genel olarak artmıştır.



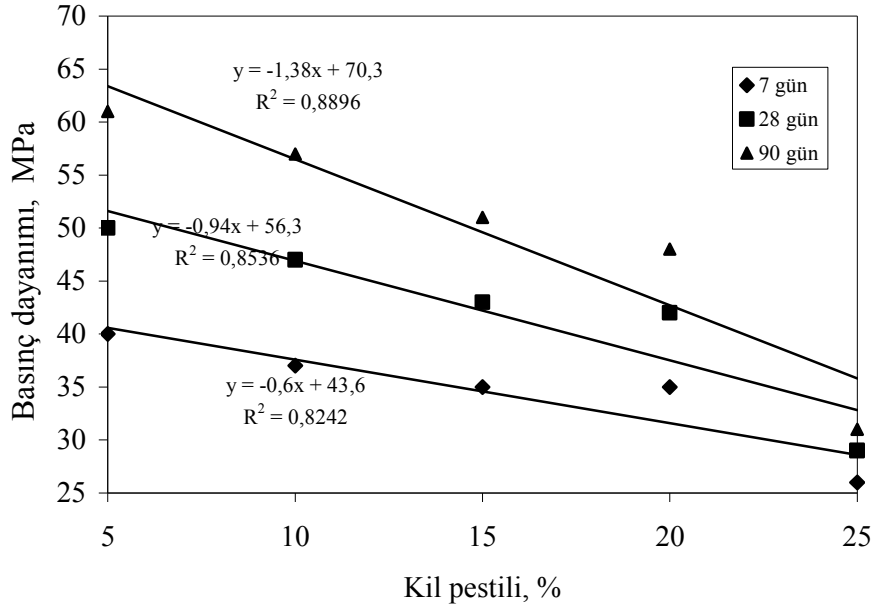
Şekil 7.1. % 0 UK içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.



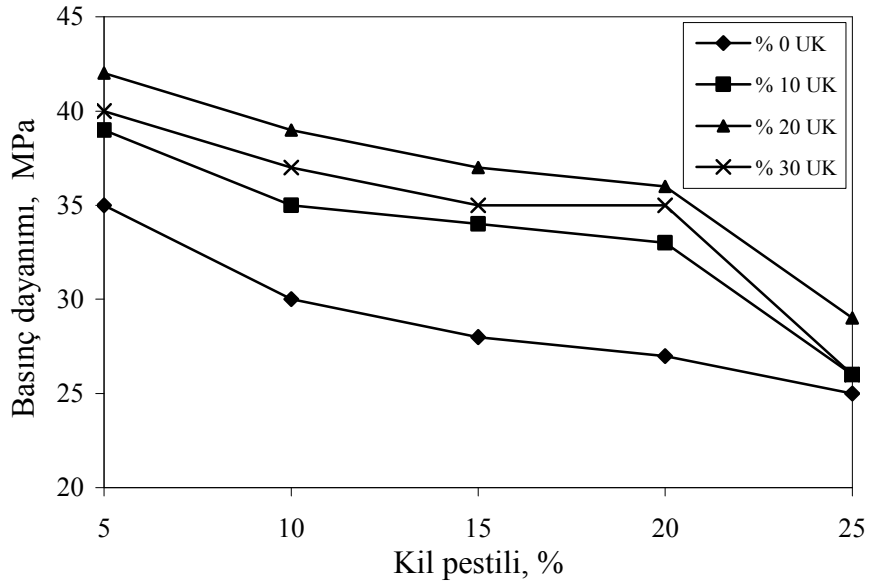
Şekil 7.2. % 10 UK içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.



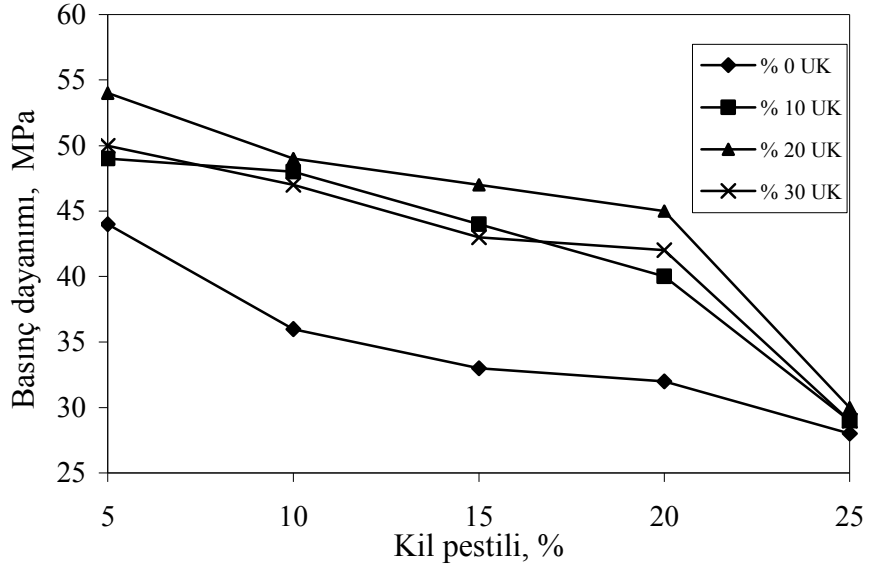
Şekil 7.3. % 20 UK içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.



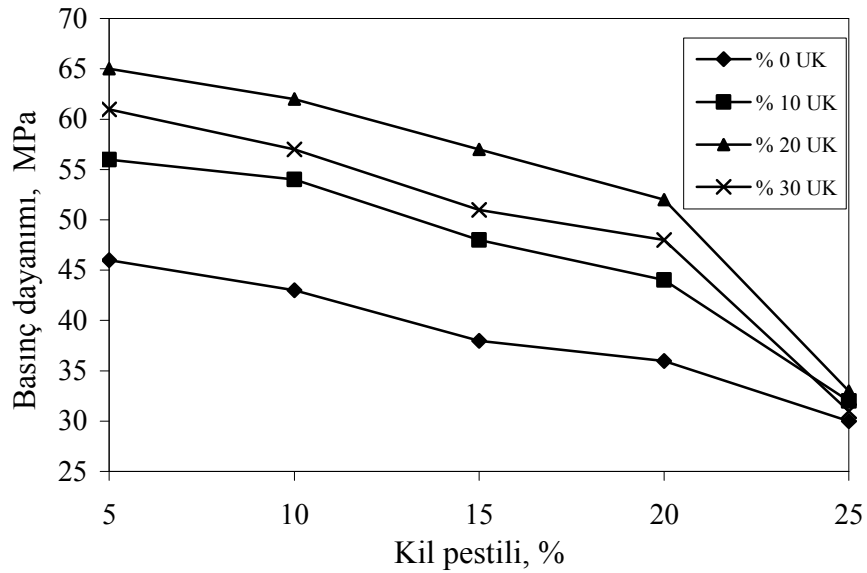
Şekil 7.4. % 30 UK içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.



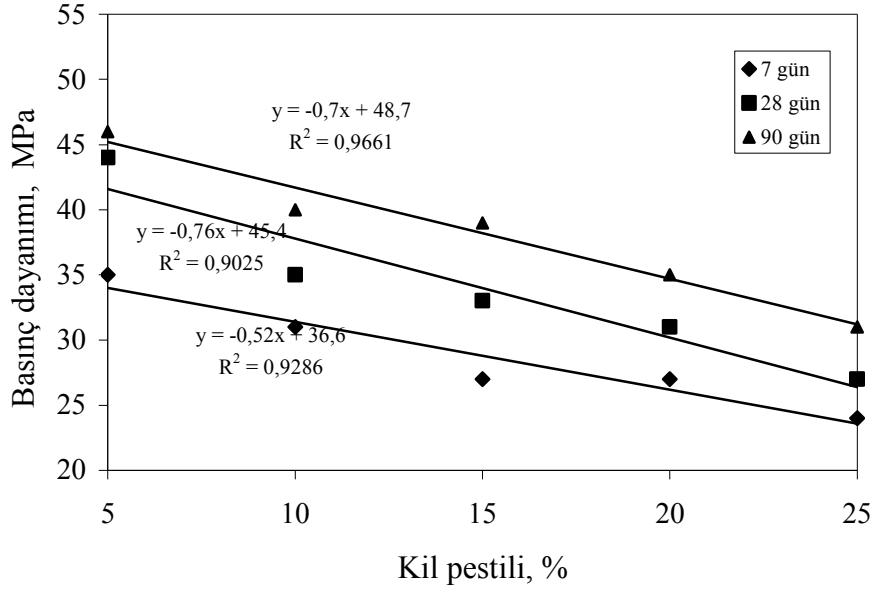
Şekil 7.5. Değişik oranda UK içeren karışımların 7 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.



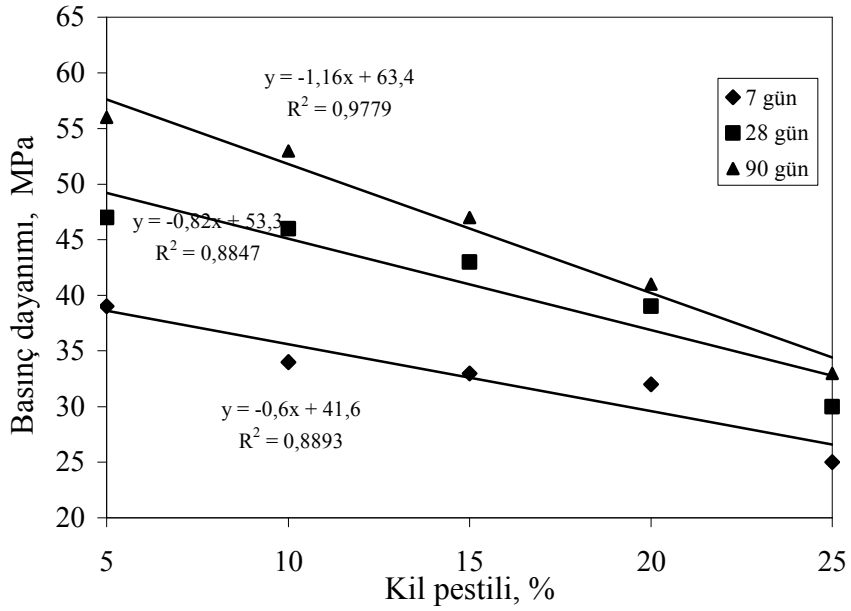
Şekil 7.6. Değişik oranda UK içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.



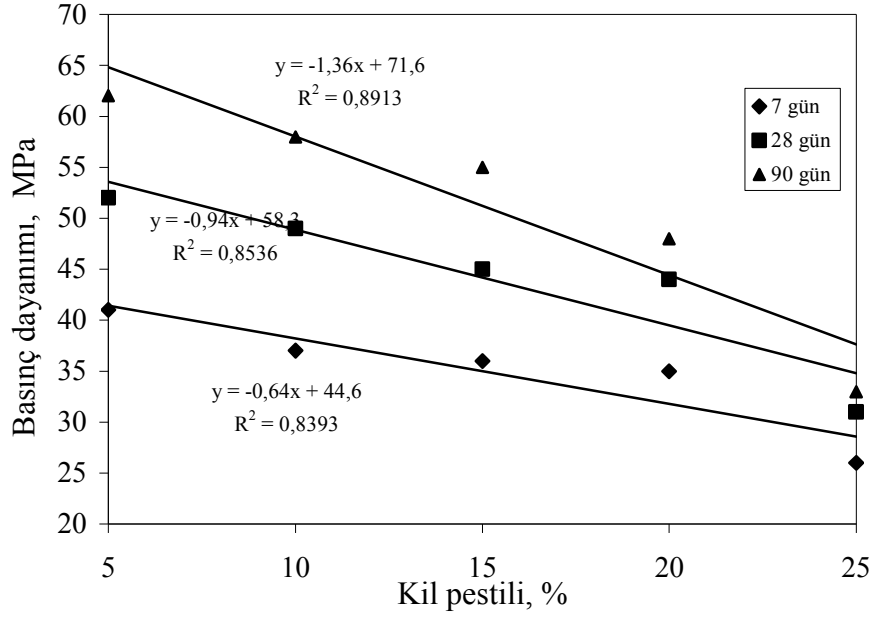
Şekil 7.7. Değişik oranda UK içeren karışımların 90 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.



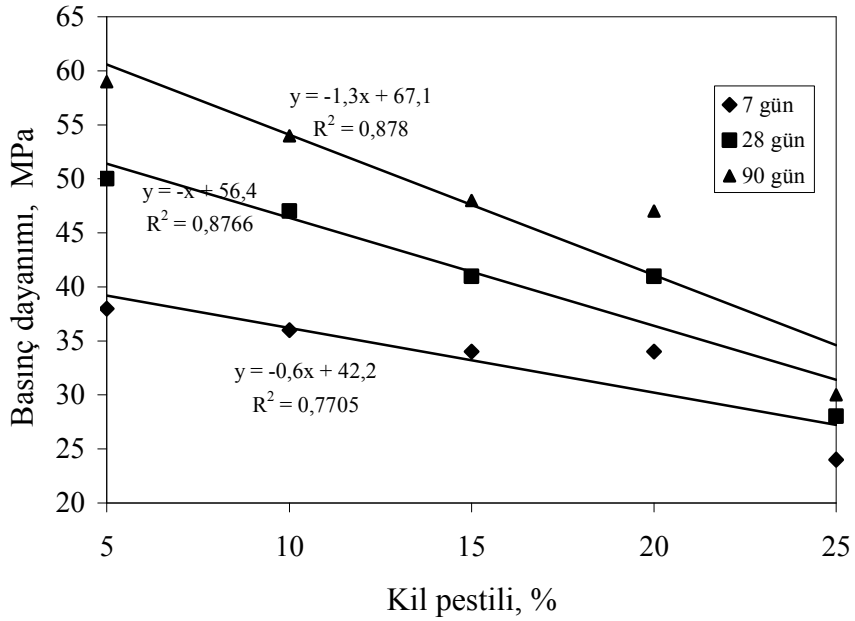
Şekil 7.8. % 0 VT içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.



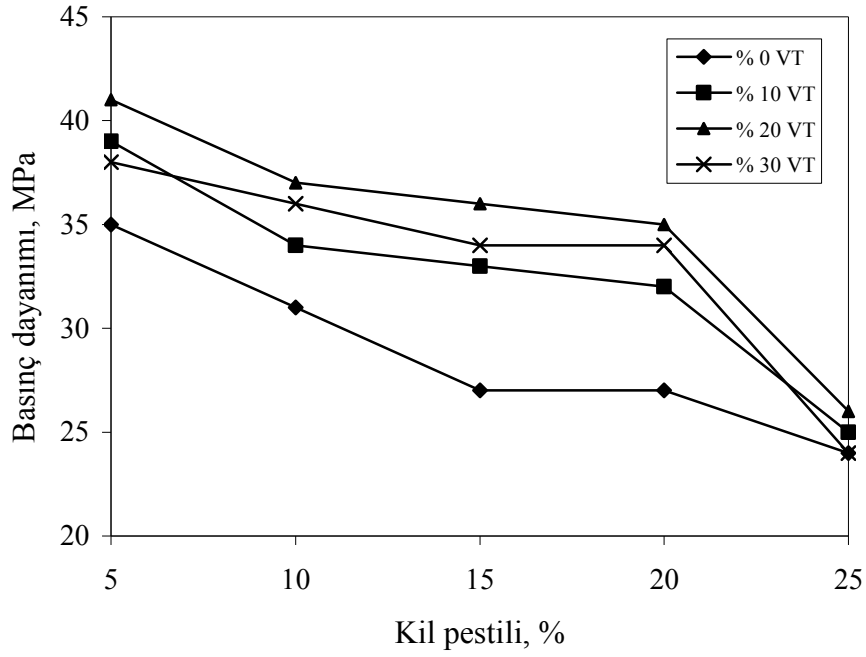
Şekil 7.9. % 10 VT içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.



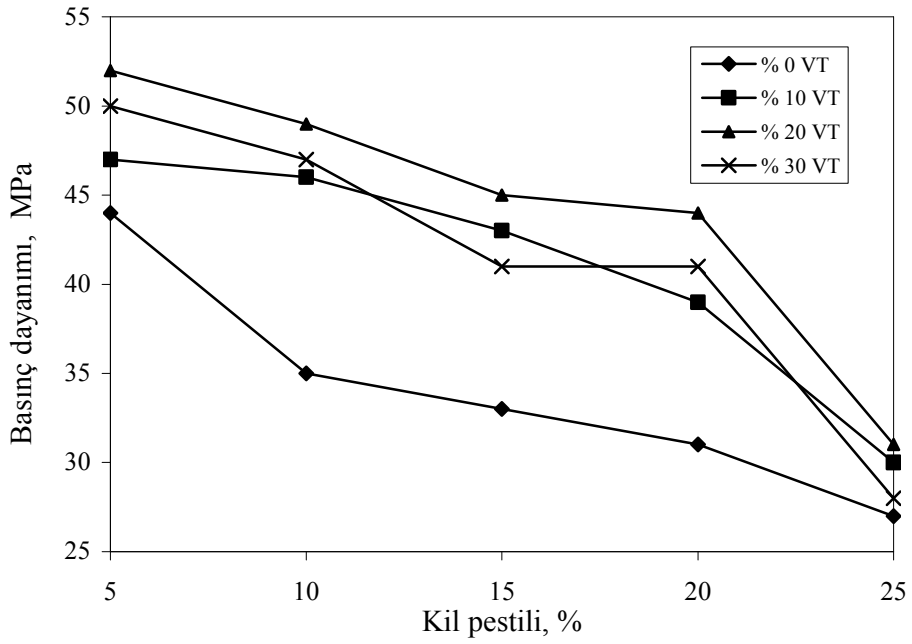
Şekil 7.10. % 20 VT içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.



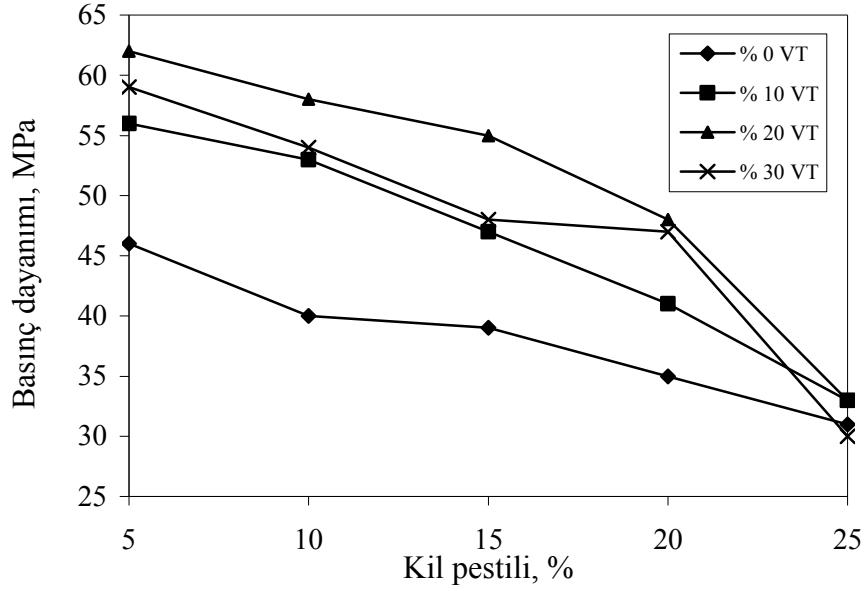
Şekil 7.11. % 30 VT içeren karışımların basınç dayanımının KP ile değişimi.



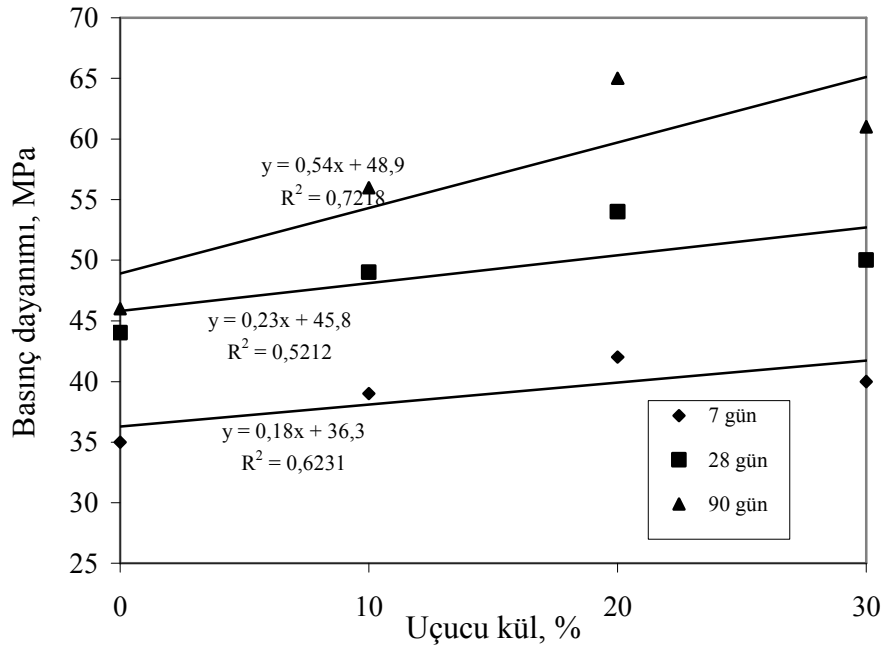
Şekil 7.12. Değişik oranda VT içeren karışımların 7 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.



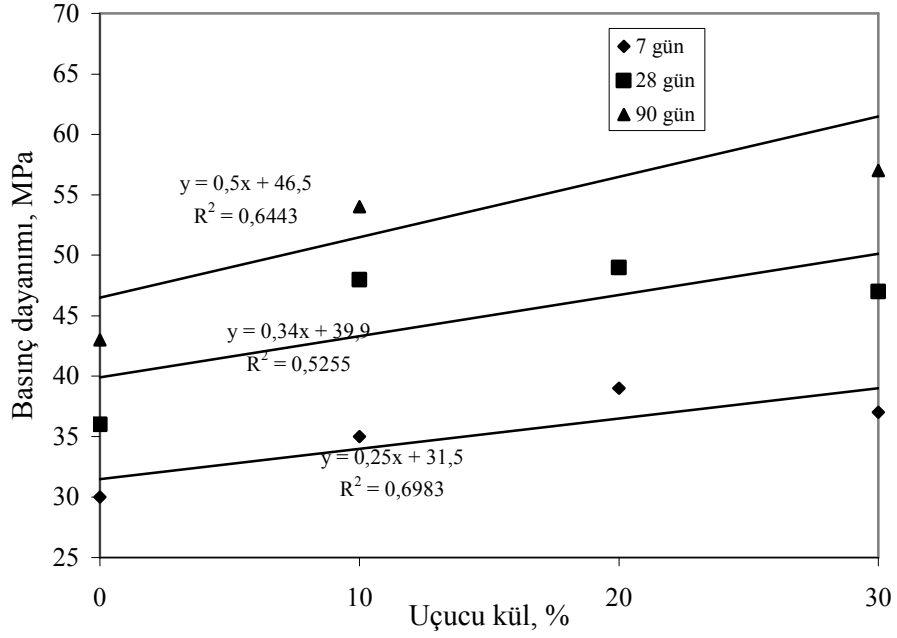
Şekil 7.13. Değişik oranda VT içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.



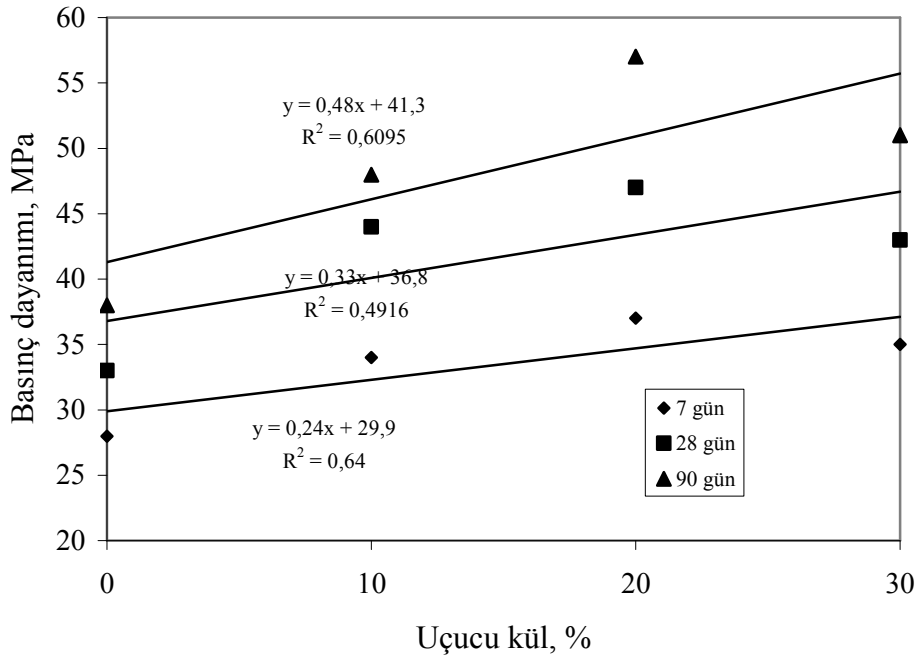
Şekil 7.14. Değişik oranda VT içeren karışımların 90 günlük basınç dayanımının KP ile değişimi.



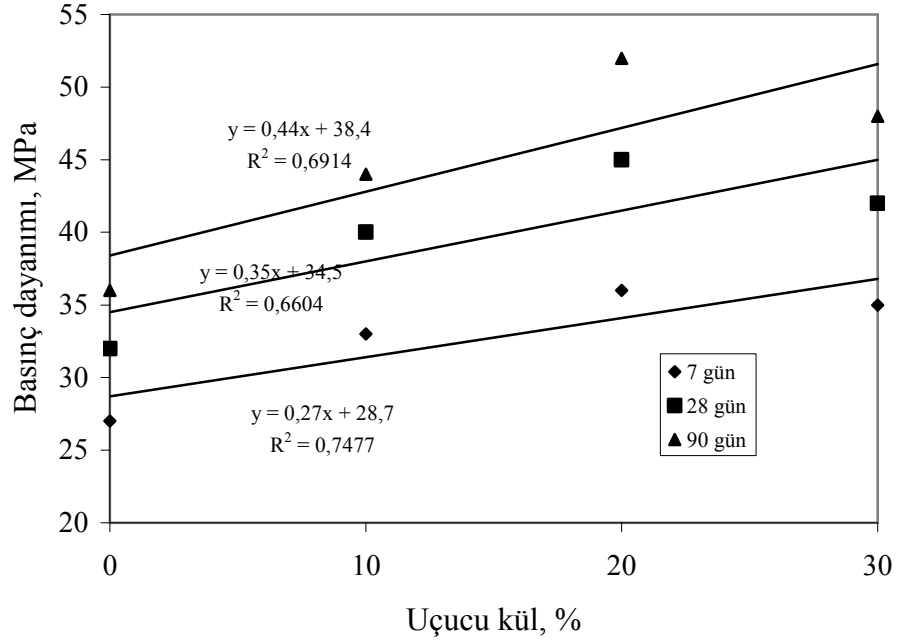
Şekil 7.15. % 5 KP içeren karışımların basınç dayanımının UK ile değişimi.



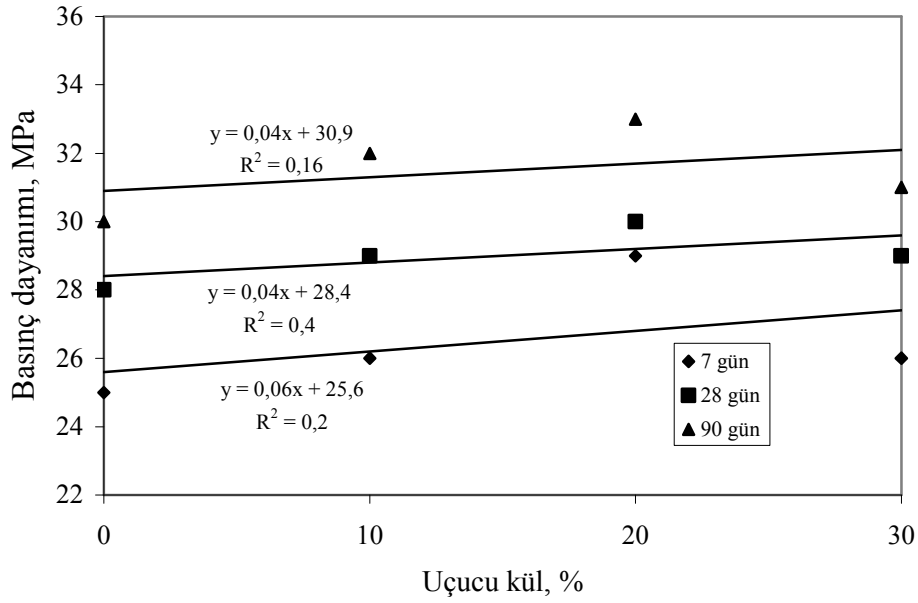
Şekil 7.16. % 10 KP içeren karışımların basınç dayanımının UK ile değişimi.



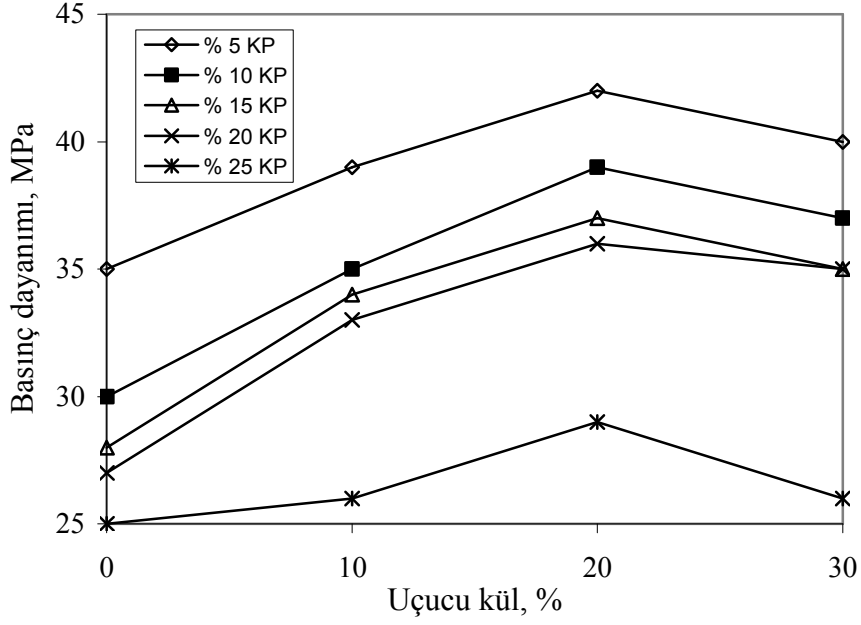
Şekil 7.17. % 15 KP içeren karışımların basınç dayanımının UK ile değişimi.



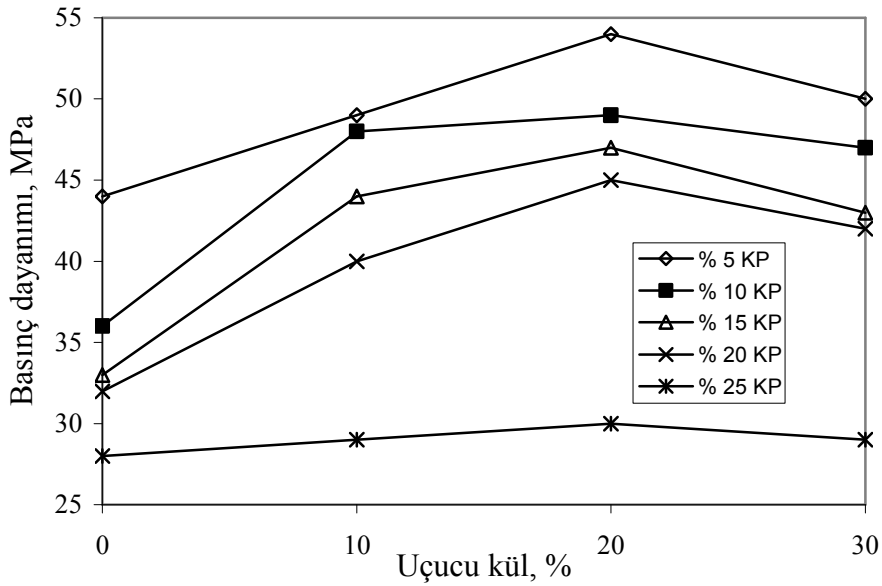
Şekil 7.18. % 20 KP içeren karışımların basınç dayanımının UK ile değişimi.



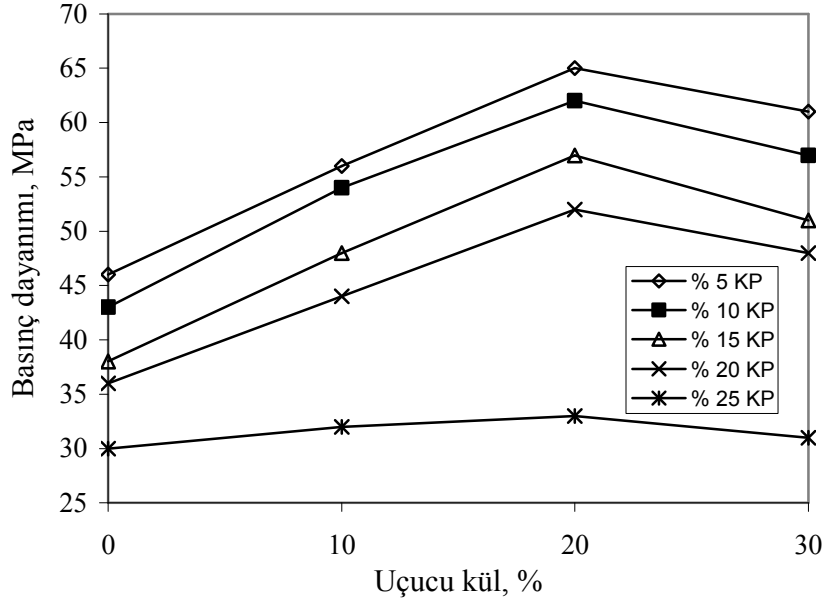
Şekil 7.19. % 25 KP içeren karışımların basınç dayanımının UK ile değişimi.



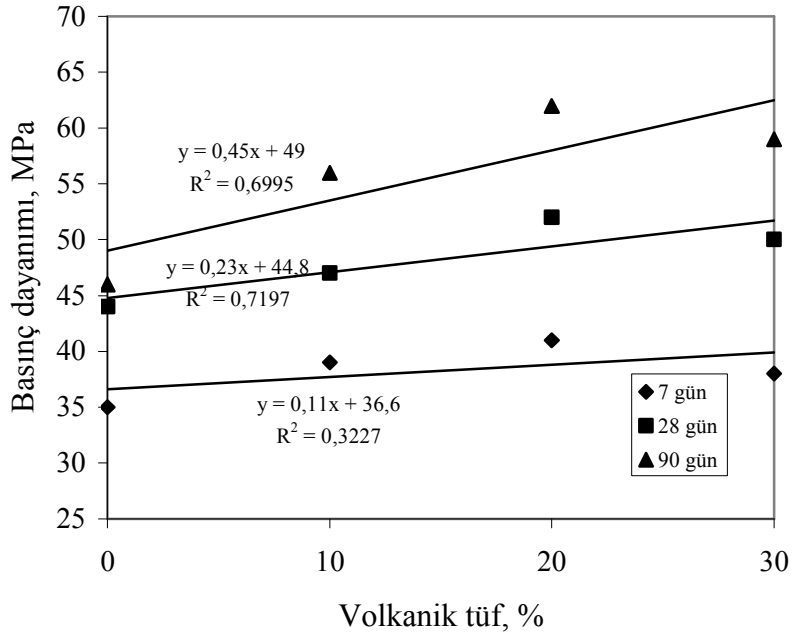
Şekil 7.20. Değişik oranda KP içeren karışımların 7 günlük basınç dayanımlarının UK ile değişimi.



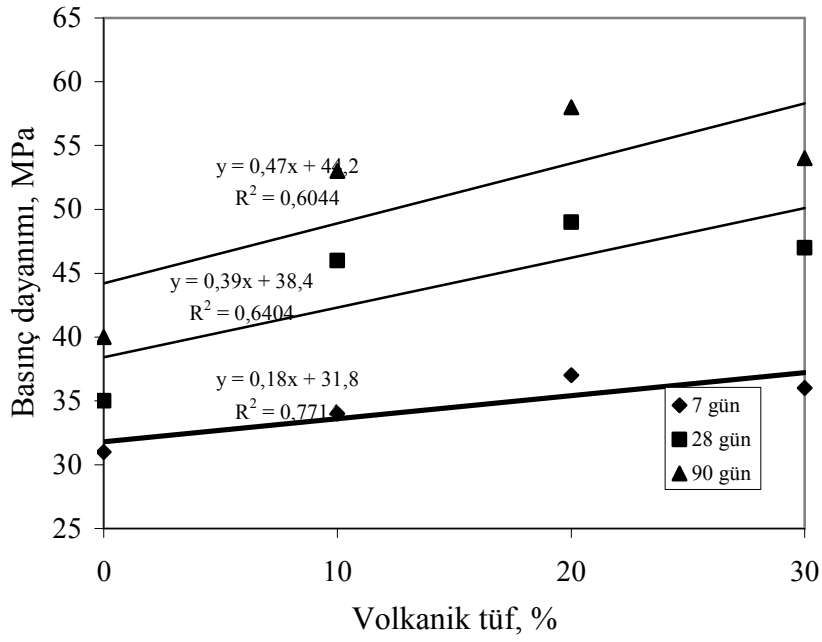
Şekil 7.21. Değişik oranda KP içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımlarının UK ile değişimi.



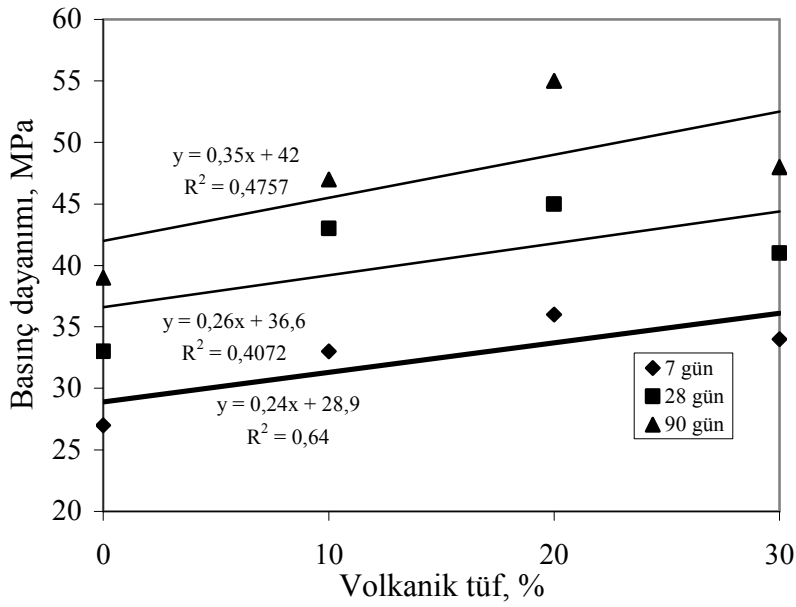
Şekil 7. 22. Değişik oranda KP içeren karışımların 90 günlük basınç dayanımlarının UK ile değişimi.



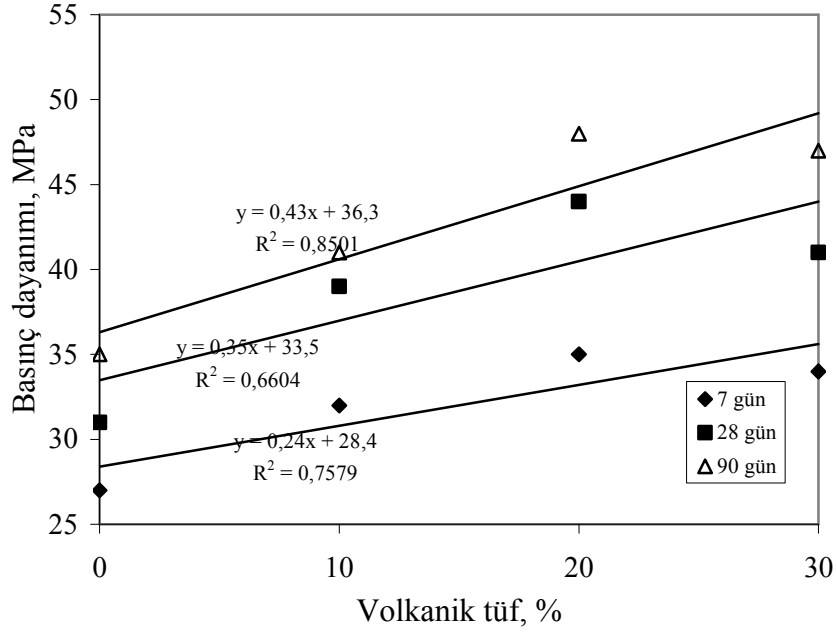
Şekil 7.23. % 5 KP içeren karışımların basınç dayanımının VT ile değişimi.



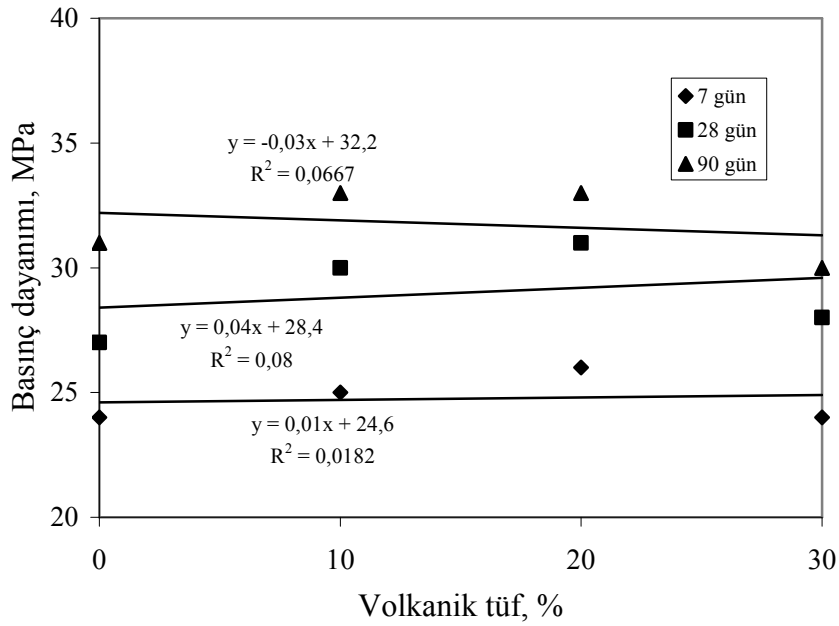
Şekil 7.24. % 10 KP içeren karışımların basınç dayanımının VT ile değişimi.



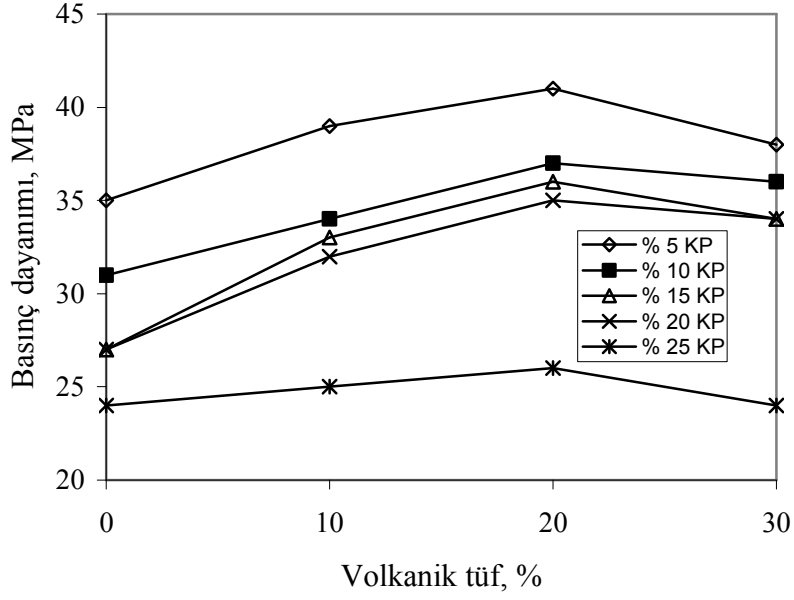
Şekil 7.25. % 15 KP içeren karışımların basınç dayanımının VT ile değişimi.



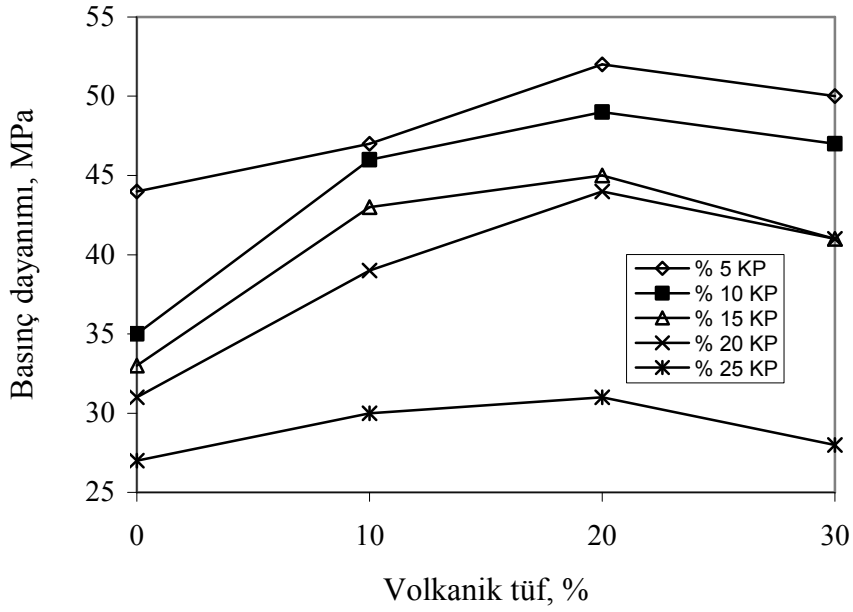
Şekil 7.26. % 20 KP içeren karışımların basınç dayanımının VT ile değişimi.



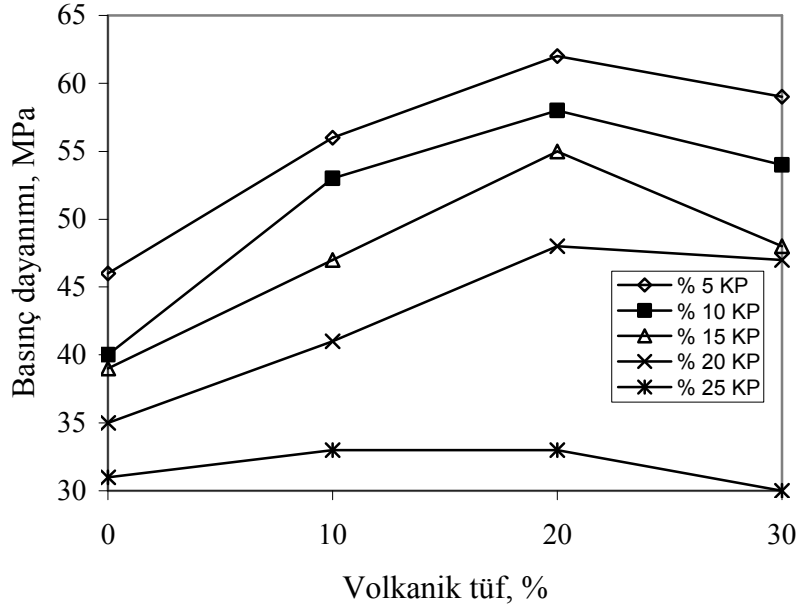
Şekil 7.27. % 25 KP içeren karışımların basınç dayanımının VT ile değişimi.



Şekil 7.28. Değişik oranda KP içeren karışımların 7 günlük basınç dayanımının VT ile değişimi.



Şekil 7.29. Değişik oranda KP içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımının VT ile değişimi.



Şekil 7.30. Değişik oranda KP içeren karışımların 90 günlük basınç dayanımının VT ile değişimi.

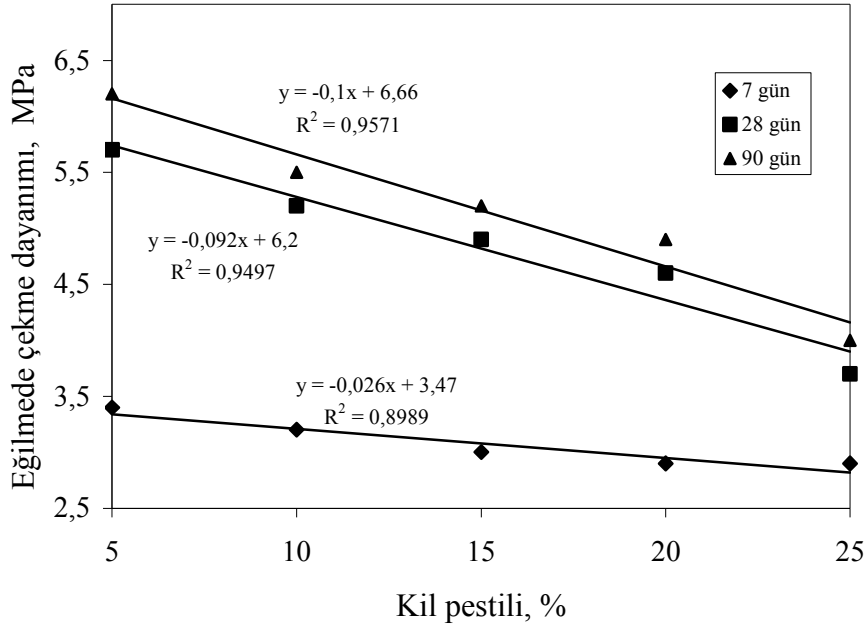
7.1.2. Eğilmede çekme dayanımı

KP + UK ve KP + VT içeren karışımların eğilmede çekme dayanımı sonuçları Çizelge 7.1 ve 7.2 ile Şekil 7.31 -7.60' da verilmiştir.

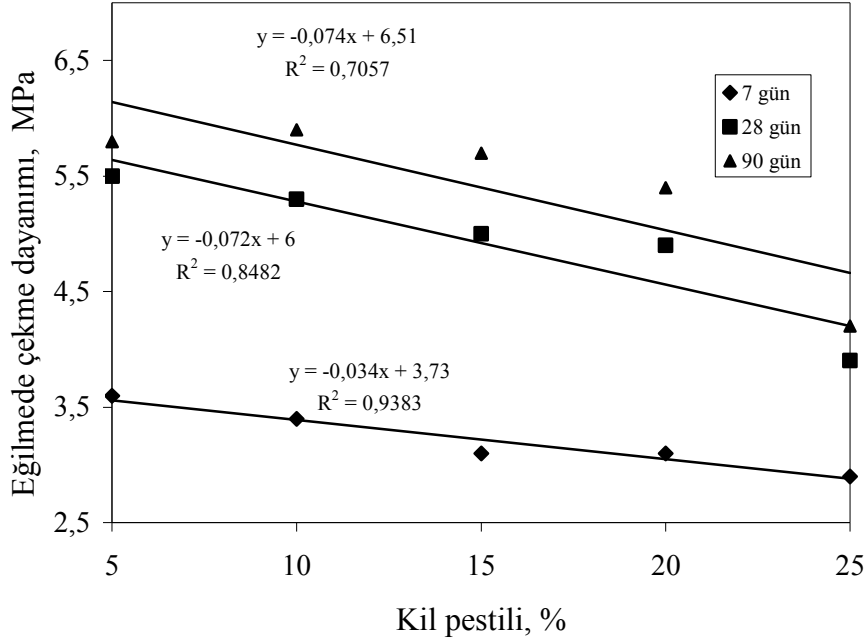
Eğilmede çekme dayanımı sonuçları büyük bir oranla basınç dayanımı sonuçları ile uyumluluk göstermiştir. Şekil 7.31-7.44'ün incelenmesi sonucu, genel olarak KP içeriğinin artması ile bütün yaşlarda eğilmede çekme dayanımının azaldığı (negatif korelasyon durumu) görülmüştür. Bu azalma VT kullanılan serilerde UK kullanılan serilere göre biraz daha fazladır. Bir başka deyişle UK kullanılan serilerin eğilmede çekme dayanımı VT kullanılan serilere göre biraz daha yüksektir. Yine bu serilerde göze çarpan bir diğer durum da örnek yaşının 7 günden 90 güne çıkması ile korelasyon doğrusu eğiminin artması gerçeğidir.

Şekil 7.45 - 7.60'da UK ve VT içeriği ile değişen eğilmede çekme dayanımı ilişkisi verilmiştir. Burada da genel olarak UK ve VT içeriğinin artması ile eğilmede

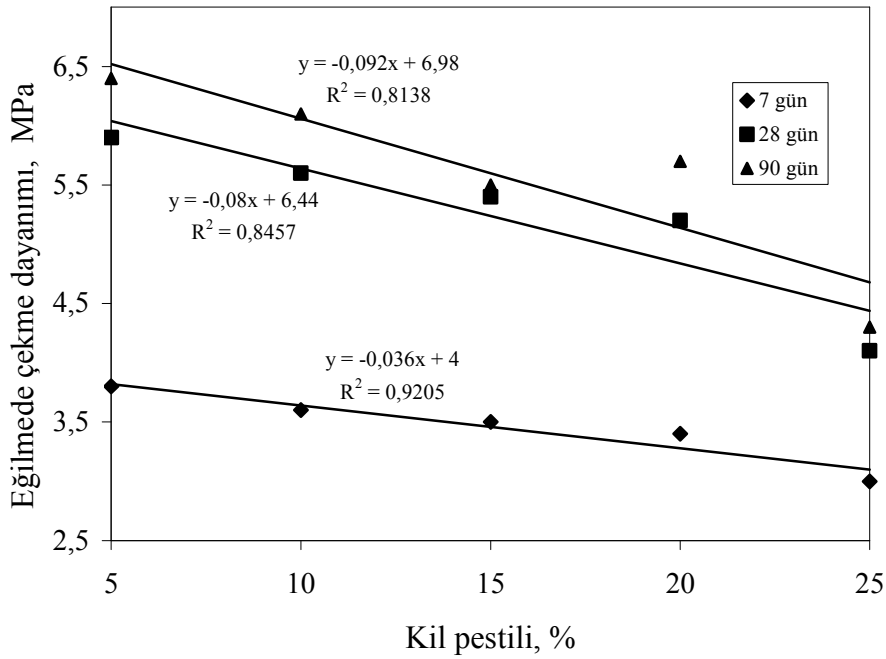
çekme dayanımında neredeyse doğrusal bir artış (pozitif korelasyon durumu) söz konusudur. UK ile hazırlanan karışımların VT ile hazırlanan karışımlara göre biraz daha fazla eğilme dayanımı sağladığı görülmüştür. % 5, 10, 15, 20 ve 25 kil pestili içeriklerinde kullanılan UK'ün % 20 kullanıldığı serilerin diğer serilerden daha iyi dayanım verdiği tespit edilmiştir. Benzer durum VT kullanımı için de geçerlidir. Bir diğer durum da örnek yaşının 7 günden 90 güne çıkması ile korelasyon eğrisi eğiminin genel olarak artmış olmasıdır.



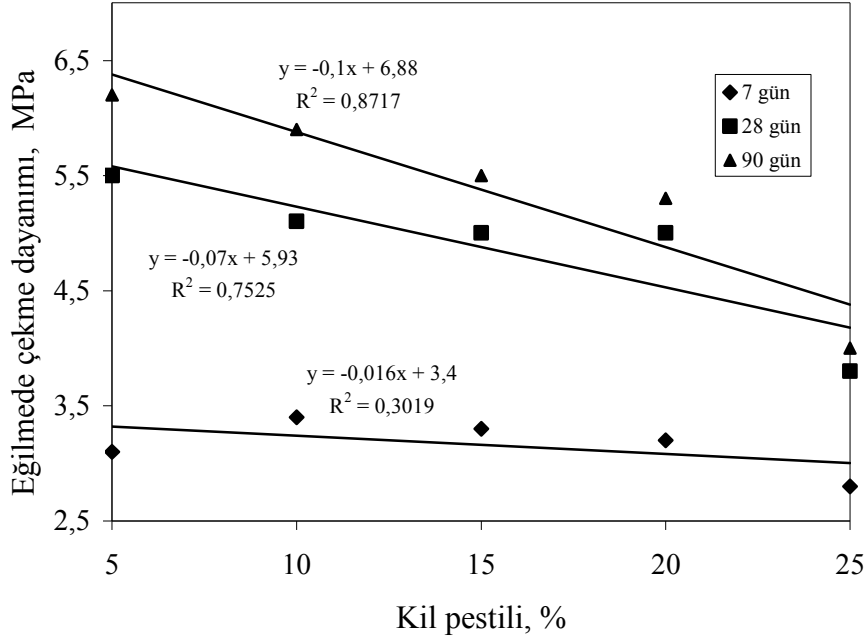
Şekil 7.31. % 0 UK içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



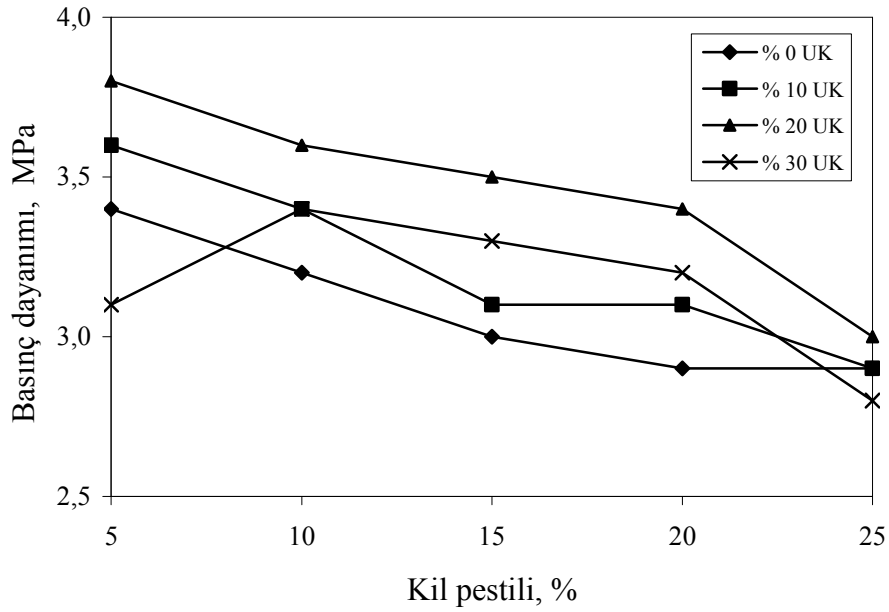
Şekil 7.32. % 10 UK içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



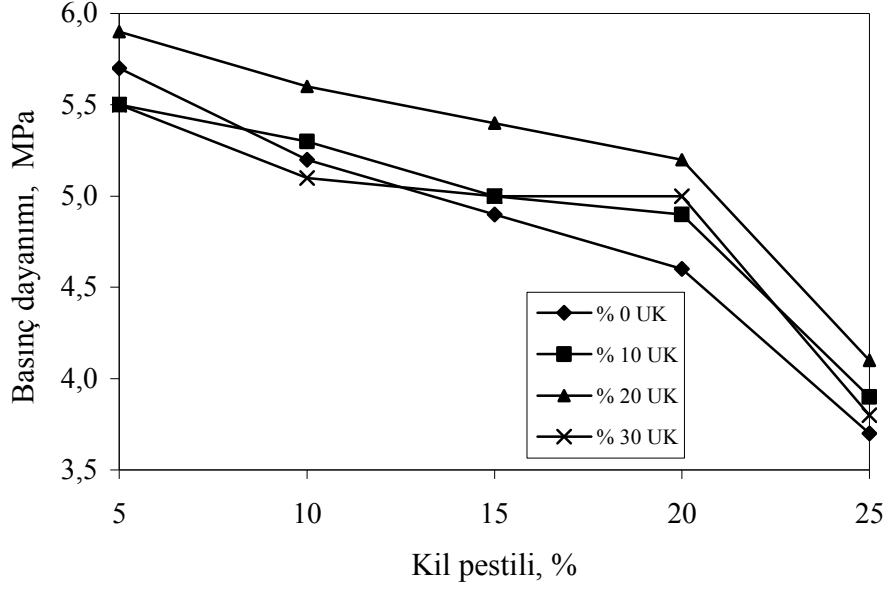
Şekil 7.33. % 20 UK içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



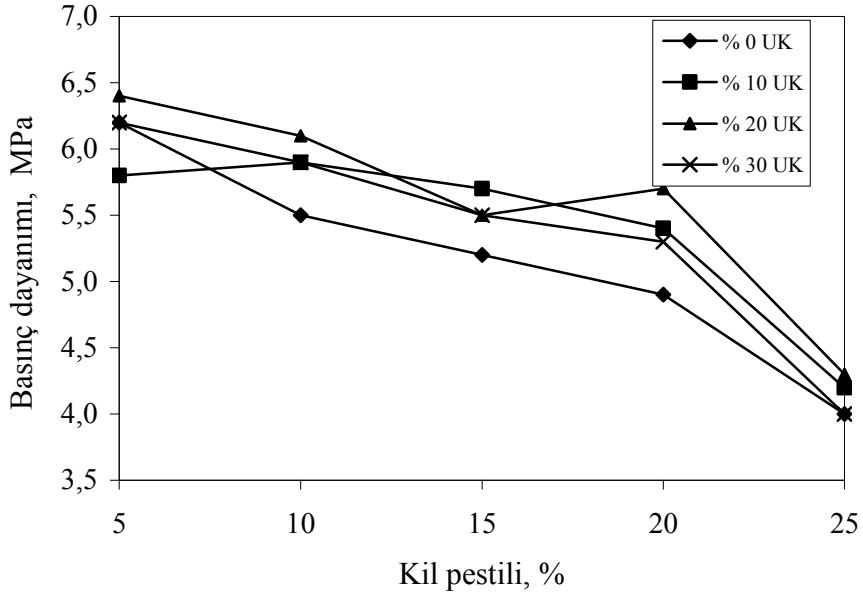
Şekil 7.34. % 30 UK içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



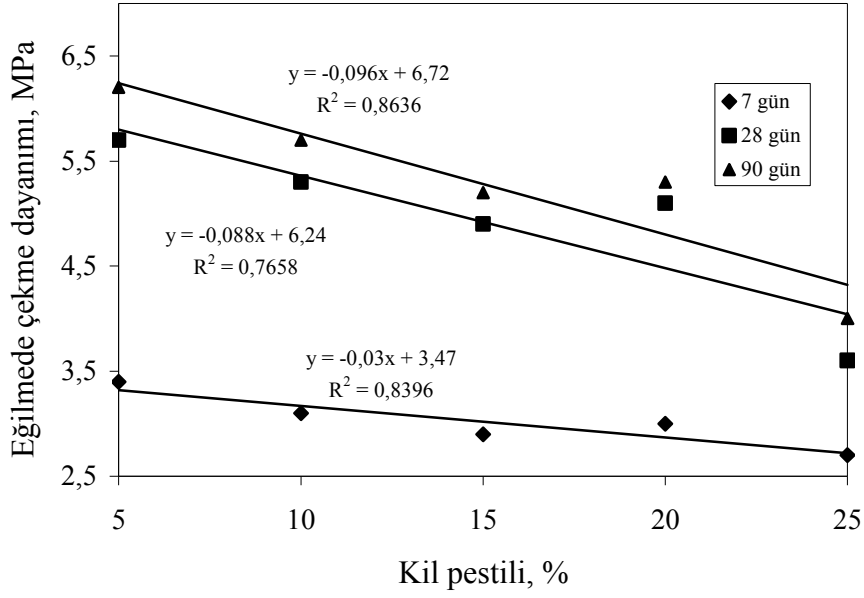
Şekil 7. 35. Değişik oranda UK içeren karışımların 7 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



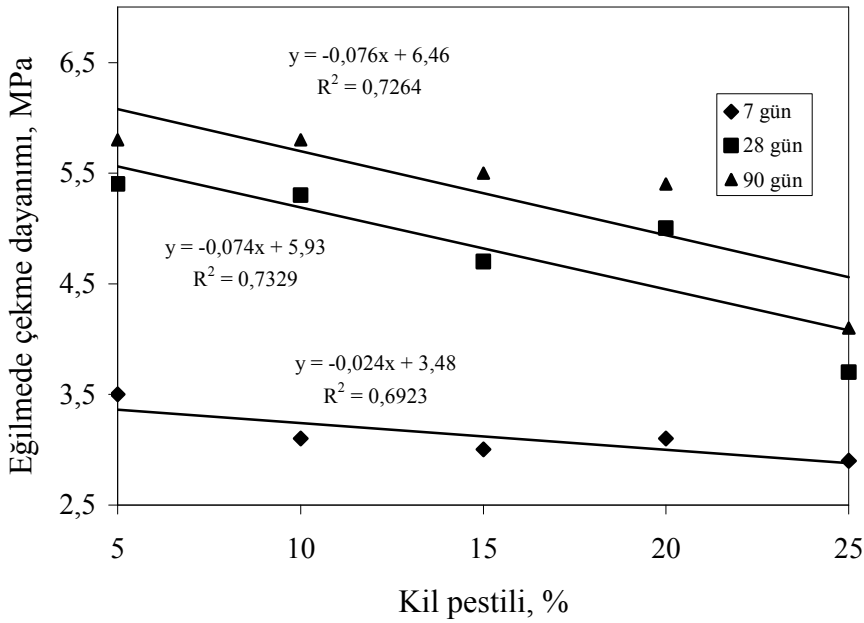
Şekil 7. 36. Değişik oranda UK içeren karışımların 28 günlük eğişilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



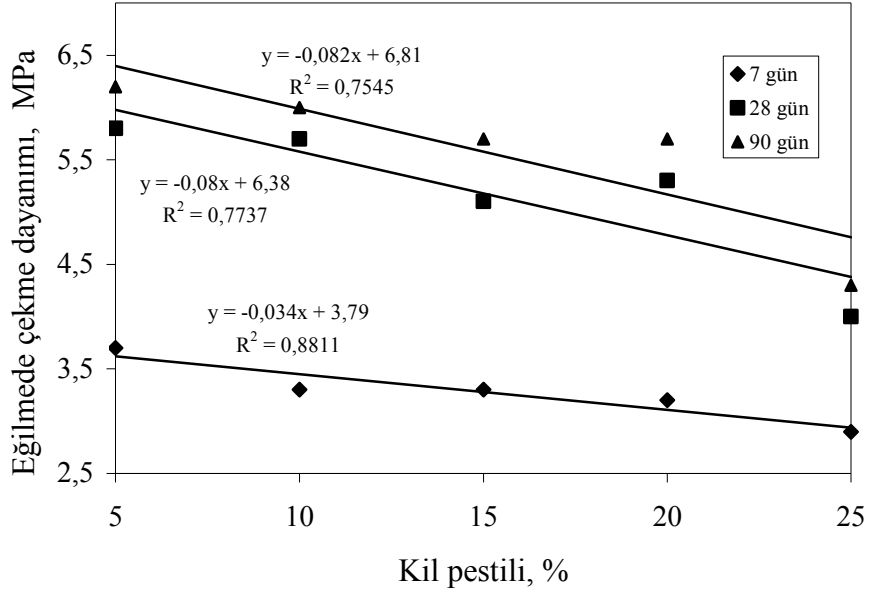
Şekil 7. 37. Değişik oranda UK içeren karışımların 90 günlük eğişilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



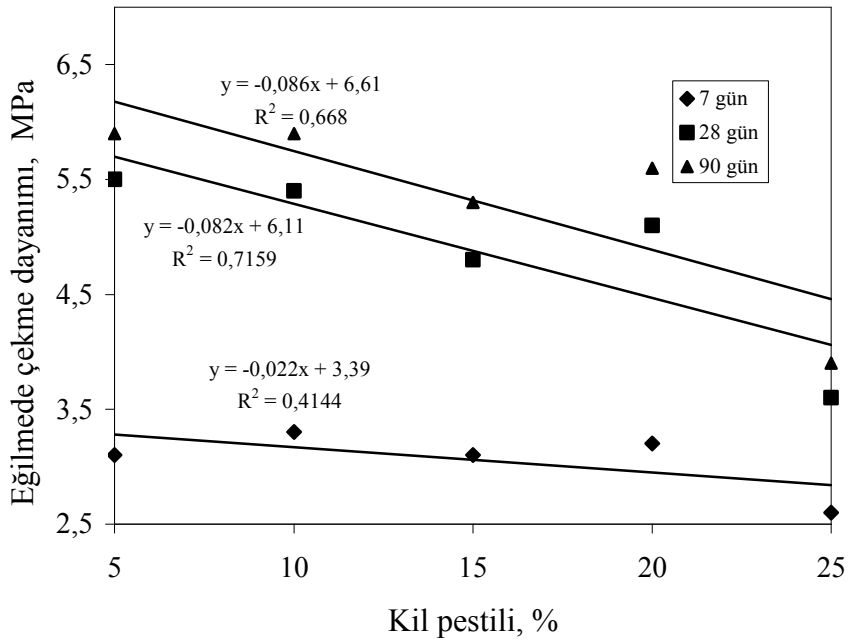
Şekil 7.38. % 0 VT içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



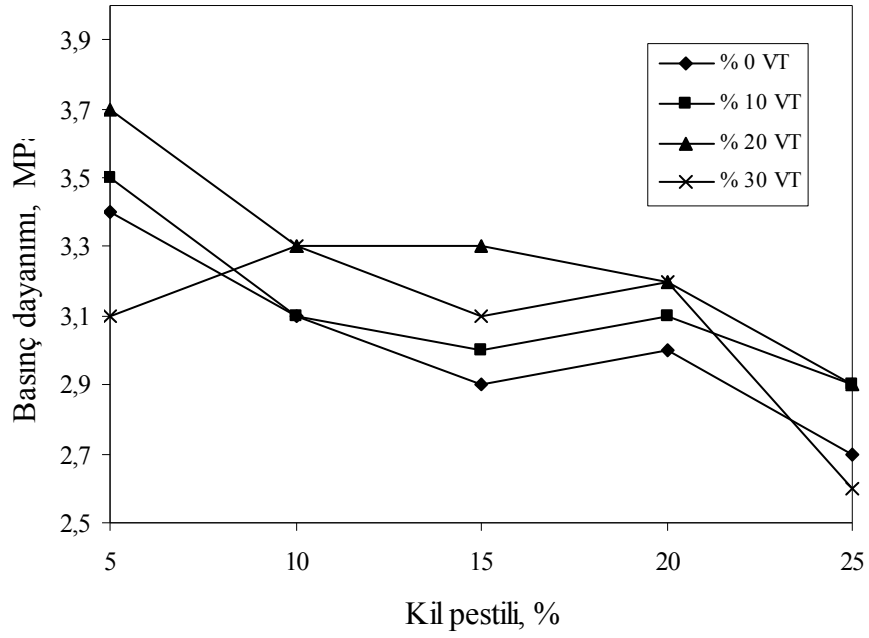
Şekil 7.39. % 10 VT içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



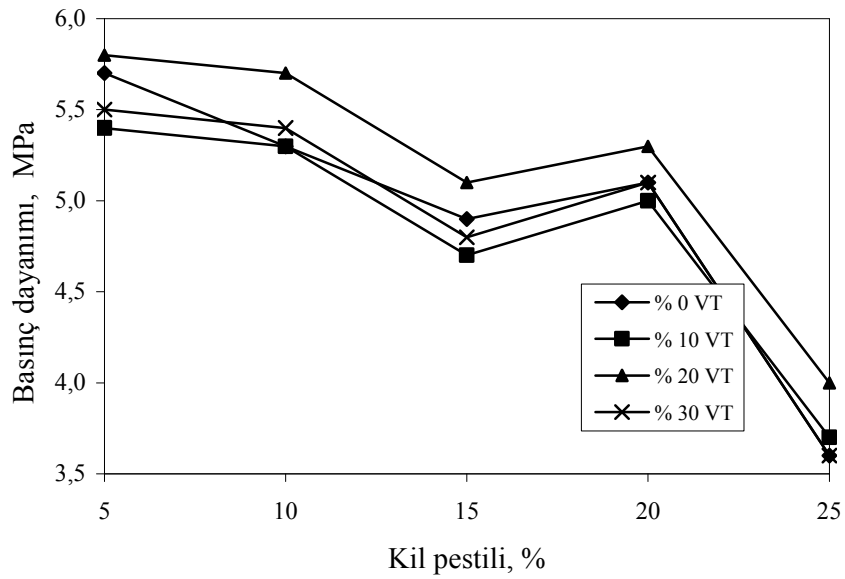
Şekil 7.40 % 20 VT içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



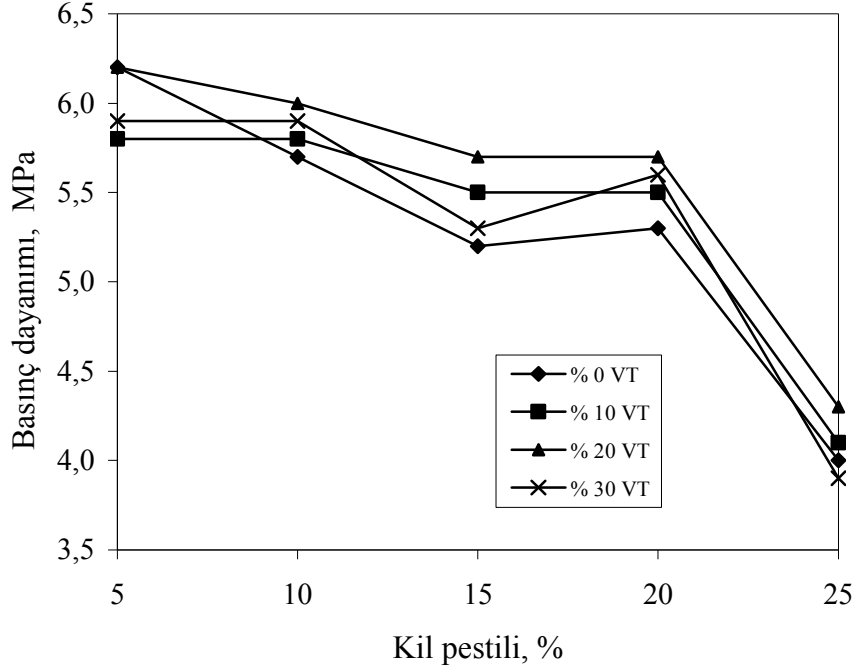
Şekil 7.41. % 30 VT içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



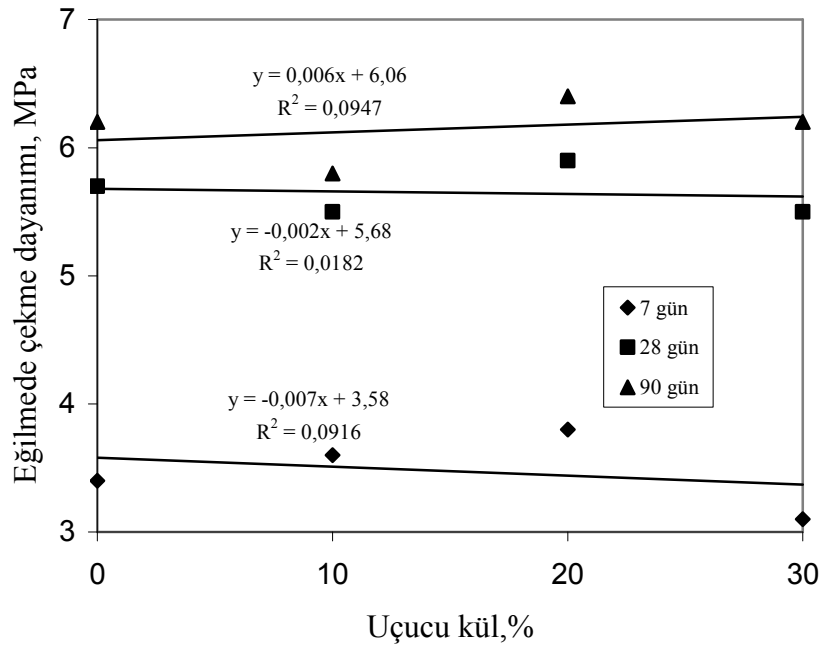
Şekil 7.42. Değişik oranda VT içeren karışımların 7 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



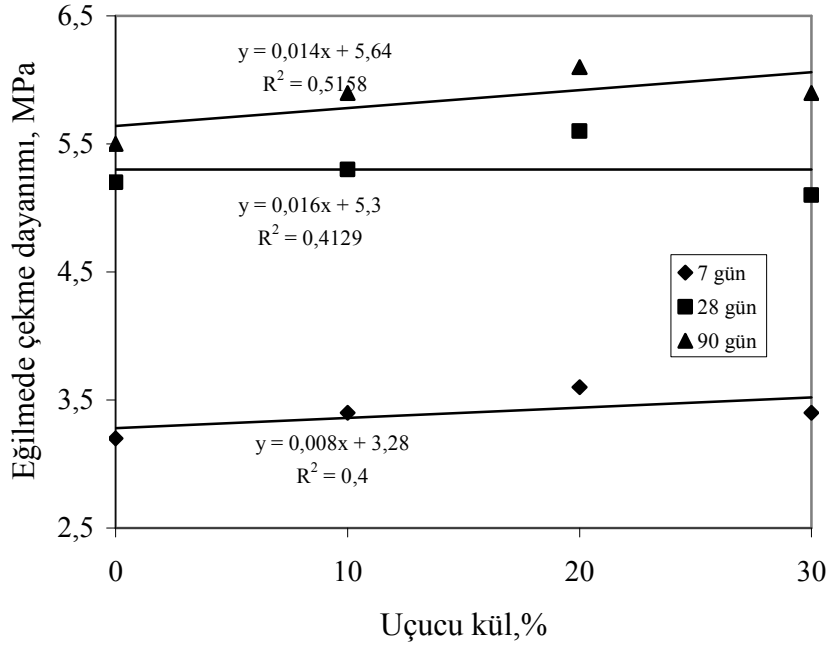
Şekil 7.43. Değişik oranda VT içeren karışımların 28 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



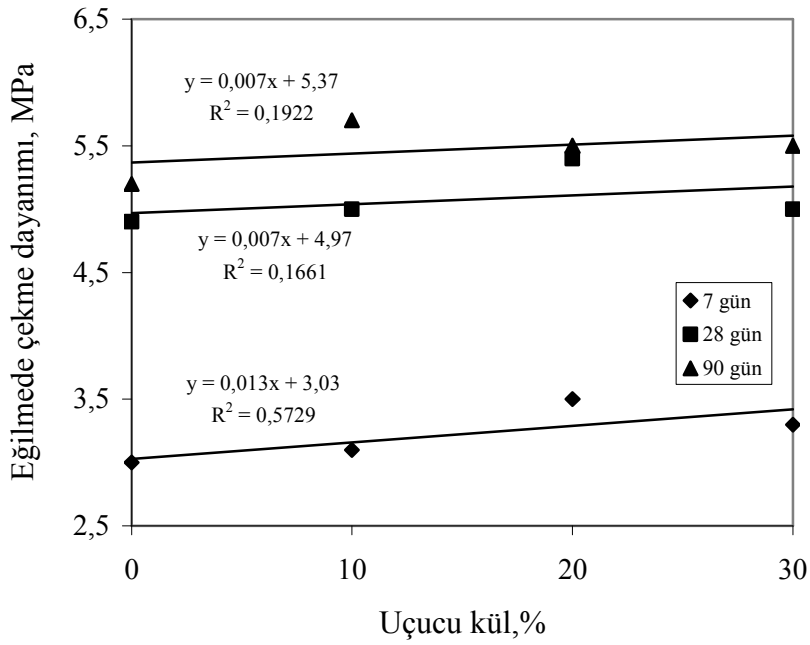
Şekil 7.44. Değişik oranda VT içeren karışımların 90 günlük eğilmede çekme dayanımının KP ile değişimi.



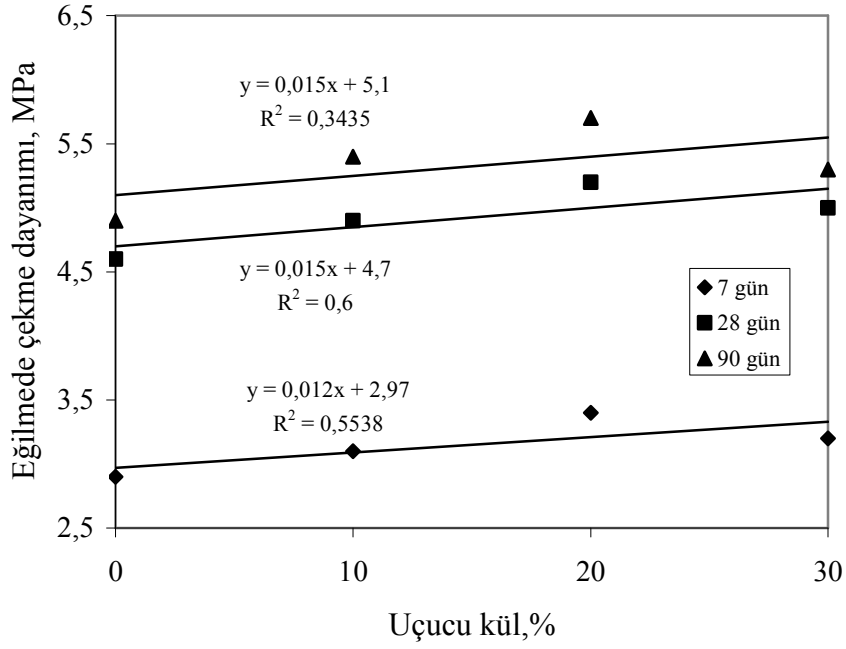
Şekil 7.45. % 5 KP içeren karışımın eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi.



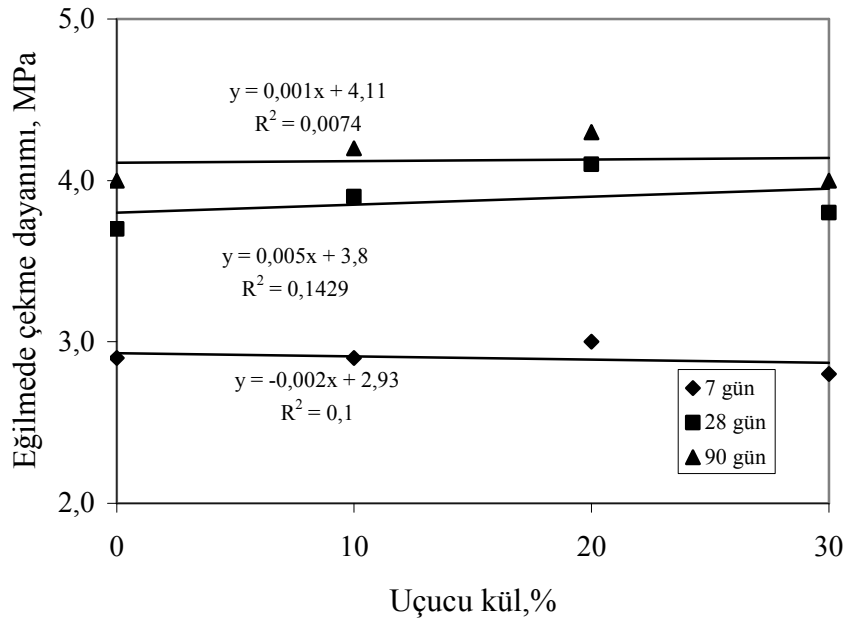
Şekil 7.46. % 10 KP içeren karışımın eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi.



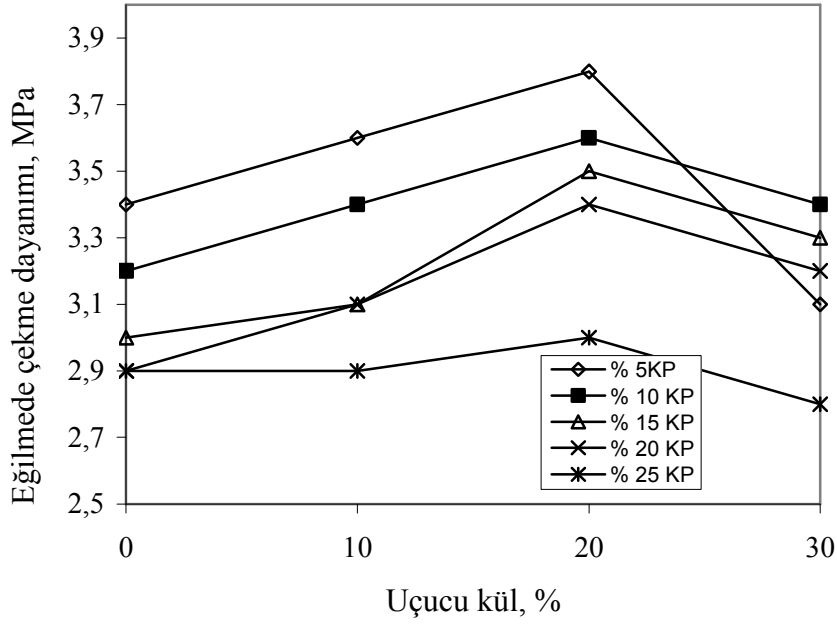
Şekil 7.47. % 15 KP içeren karışımın eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi.



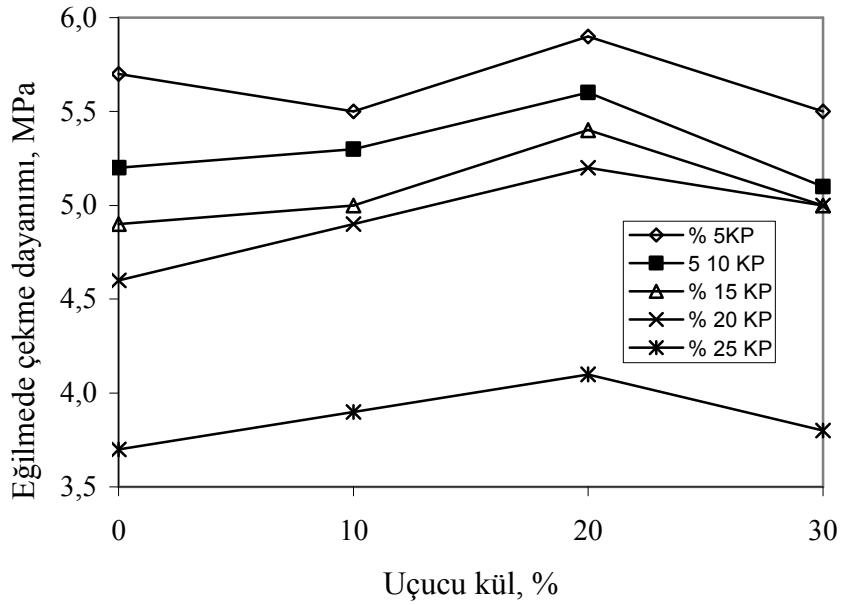
Şekil 7.48. % 20 KP içeren karışımın eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi.



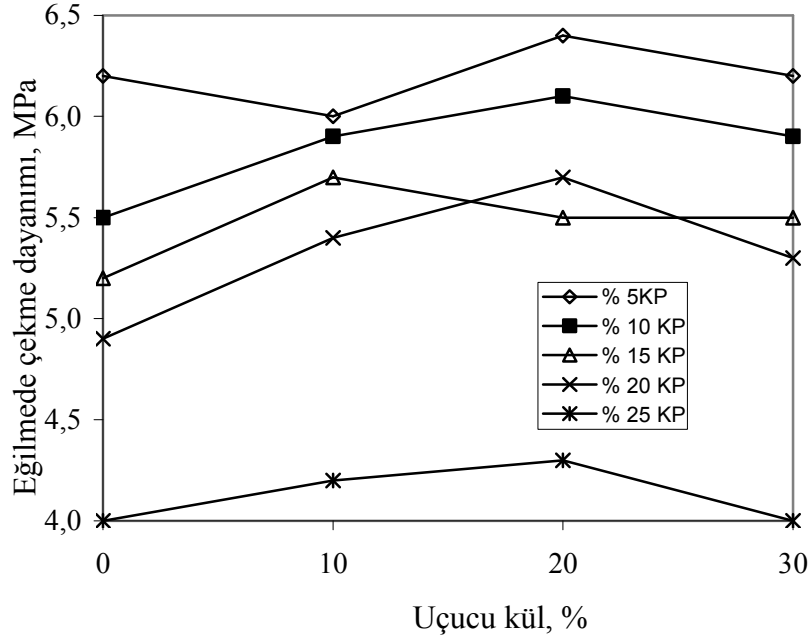
Şekil 7.49. % 25 KP içeren karışımın eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi.



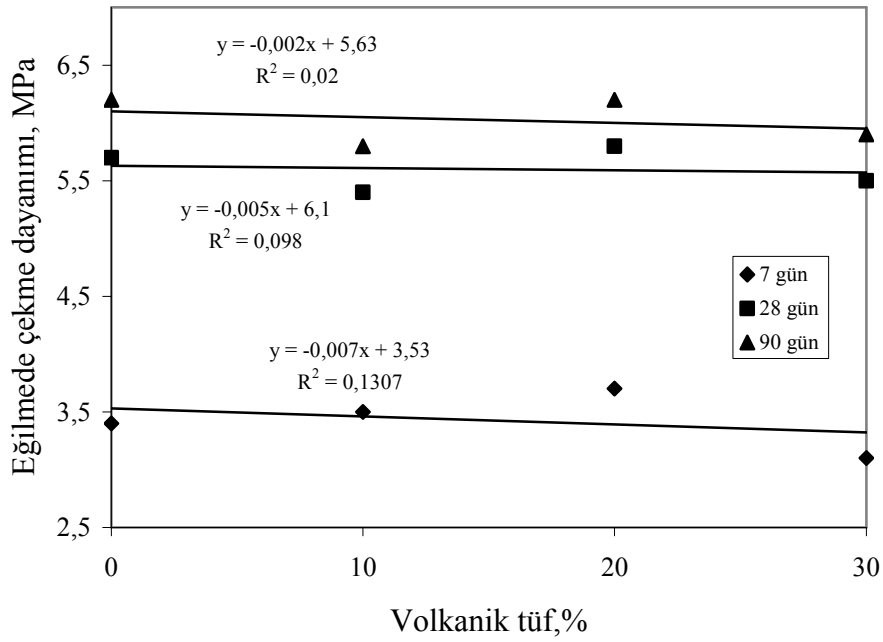
Şekil 7.50. Değişik oranda KP içeren karışımların 7 günlük eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi.



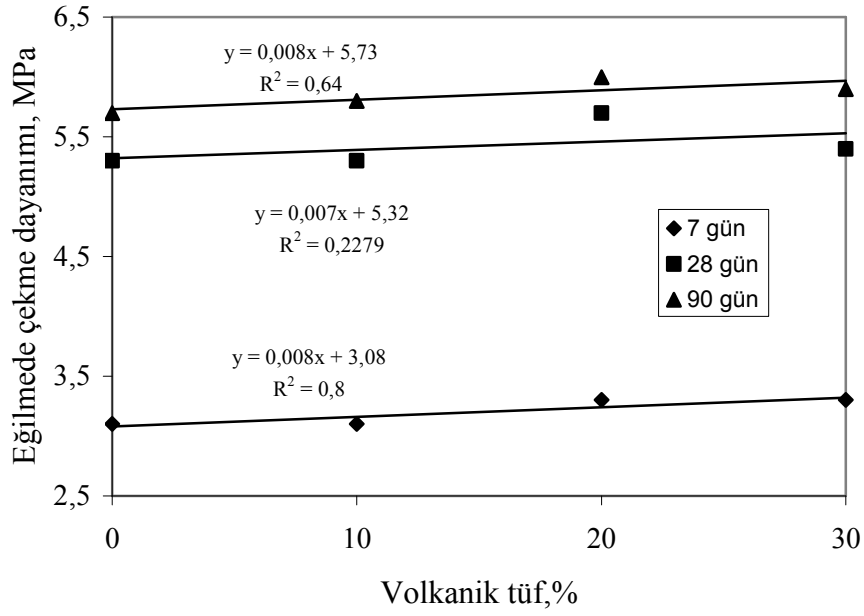
Şekil 7.51. Değişik oranda KP içeren karışımların 28 günlük eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi.



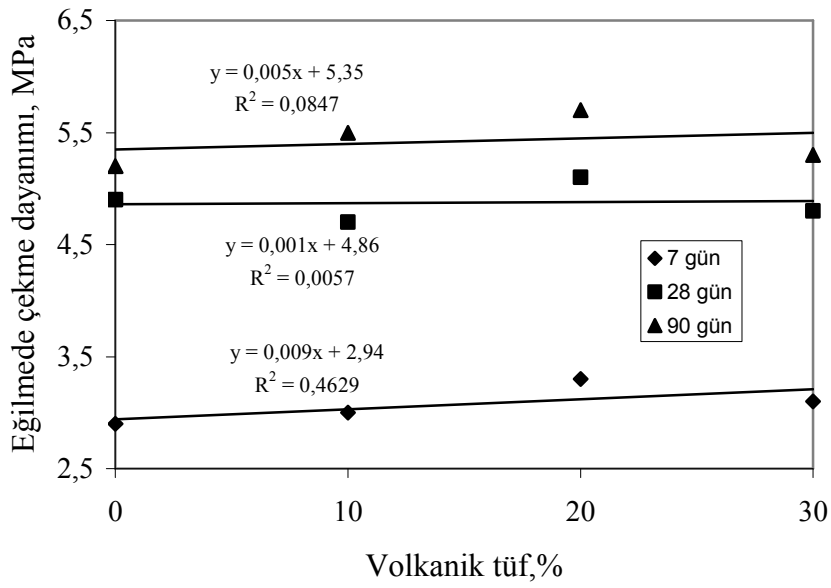
Şekil 7.52. Değişik oranda KP içeren karışımların 90 günlük eğilmede çekme dayanımının UK ile değişimi.



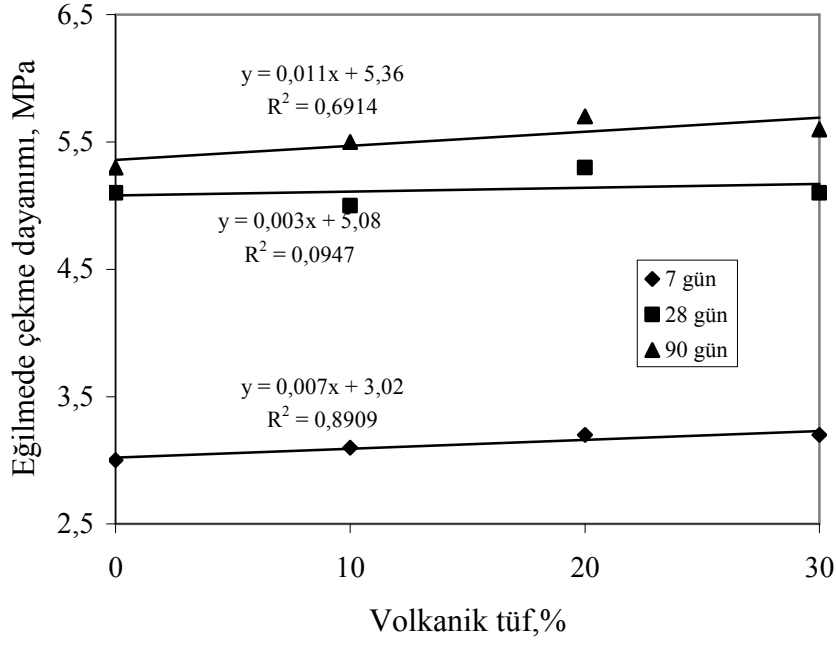
Şekil 7.53. % 5 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi.



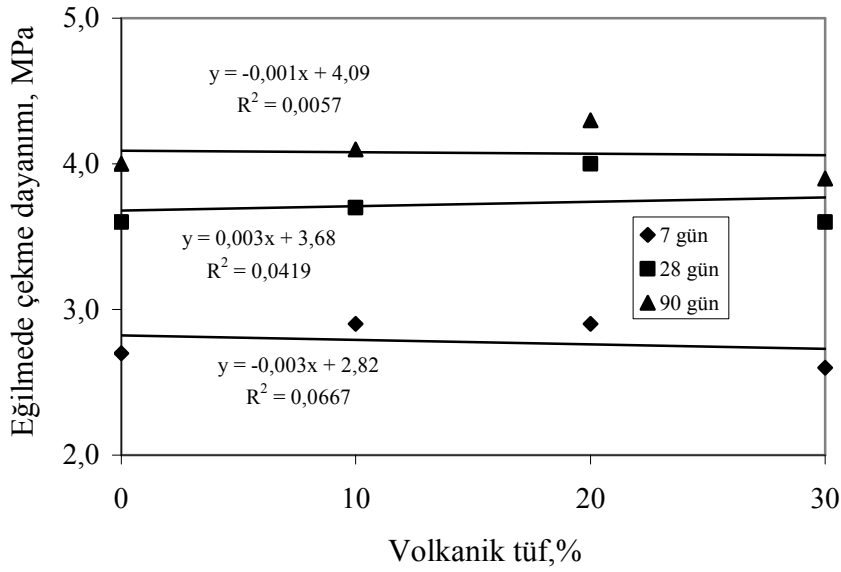
Şekil 7.54. % 10 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi.



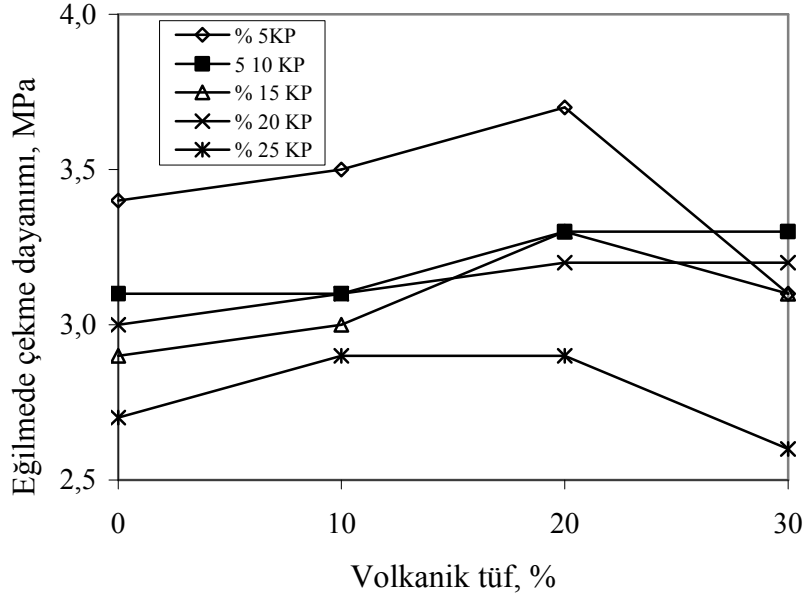
Şekil 7.55. % 15 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi.



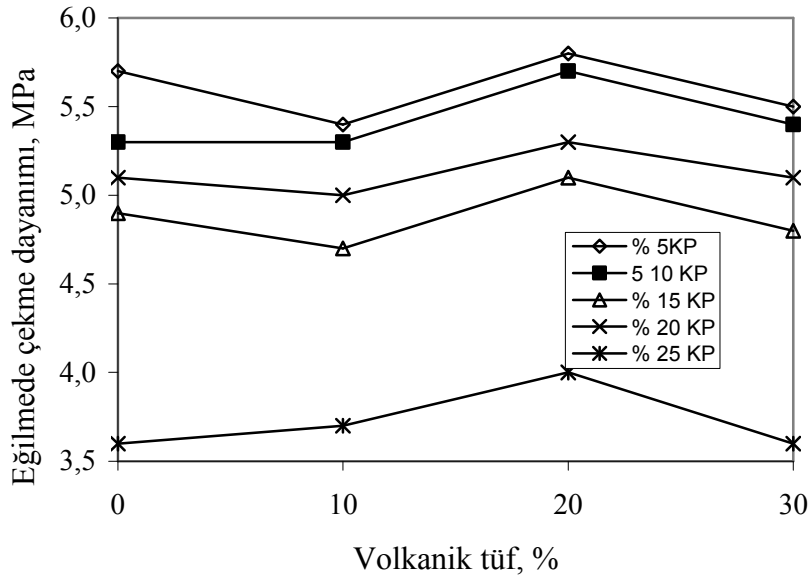
Şekil 7.56. % 20 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi.



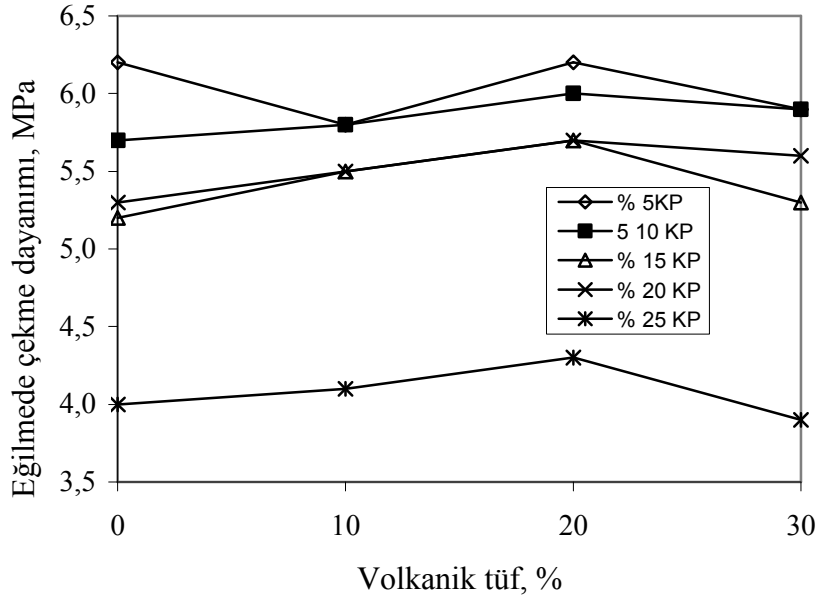
Şekil 7.57. % 25 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi.



Şekil 7.58. Değişik oranda KP içeren karışımların 7 günlük eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi.



Şekil 7.59. Değişik oranda KP içeren karışımların 28 günlük eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi.



Şekil 7. 60. Değişik oranda KP içeren karışımların 90 günlük eğilmede çekme dayanımının VT ile değişimi.

7.2. İkinci Deneysel Çalışma Bulguları

İkinci deneysel çalışmada birinci deneysel çalışma sonrasında belirlenmiş olan en uygun karışım serilerinin kil pestili (KP) + uçucu kül (UK) + volkanik tuf (VT)'ten oluşan harç karışımları örnekleri üretilmiştir (Çizelge 6.10).

İkinci deneysel aşamada kil pestili atığının çimento, harç ve dolayısıyla beton içerisinde değerlendirilebilirliğini araştırmak üzere basınç ve eğilmede çekme dayanımı, alkali silis genişmesi (ASR) ölçümü, ultrases geçiş süresi ölçümü, priz başlangıç ve bitiş süresi ölçümü, birim ağırlık, hacim genişmesi, dayanıklılık deneyleri ve SEM ile içyapı incelemeleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki bölümlerde tartışılmıştır.

Birinci çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucu UK ve VT katkılı harçlarda % 5 KP içeriğinde en iyi basınç ve çekme dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Bu

düzyeyde KP kullanımının verimli olmayacağı gerçeği göz önüne alınarak çalışmalarda % 10 ve % 15 kil pestili içeriği esas alınarak üçlü karışımlar (KP+UK+VT) için bileşim oranları belirlenmiştir. Aynı şekilde dayanım açısından da en iyi sonuçların % 20 UK ve VT puzolan içeriğinde sağlandığı görülmüştür. Bununla birlikte hazırlanan karışımlarda puzolanik katkıların etkisini daha iyi görebilmek amacıyla üç farklı puzolan dozajında (% 10, 20 ve 30 UK ve VT oranlarında) alışılmıştır.

Sonuç olarak % 10 ve 15 KP ve % 10, 20 ve 30 UK ve VT içeriklerinde +KP+UK+VT'den oluşan karışımlar hazırlanarak esas deneyler bu örnekleler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan dökümlerde toplam katkı miktarı kadar çimentodan eksiltme yapılmış ve bunun yerine KP, UK ve VT ikame edilerek harç karışımları oluşturulmuştur. Karışımlar hazırlanırken % 10 puzolanik katkı içeriğinde UK ve VT eşit oranda yani % 5 ve 5 olarak kullanılmıştır. % 20 puzolanik katkı içeriğinde UK ve VT ağırlıklı olarak % 15 - 5 ve % 5 - 15 oranlarında iki farklı şekilde kullanılmıştır. % 30 puzolanik katkı içeriğinde ise UK ve VT yine ağırlıklı olarak % 20 - 10 ve % 10 - 20 şekilde iki farklı oranda kullanılmıştır. Bu şekilde toplam 12 seri harç dökümü gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçları grafiğe geçirilirken UK ve VT'ün hiç kullanılmadığı (K1 ve K7) seriler ile eşit oranda kullanıldığı (K2 ve K8) serileri dışında diğer karışımlarda UK ve VT kullanım oranları farklı farklıdır. Bu nedenle grafiklerde % 10 puzolan katkı (UK + VT) kullanım oranından sonra düz ve kesikli çizgi halinde iki eğri ortaya çıkmıştır. Düz izgi UK'ün yüksek olduğu (K3, K5, K9, K11) serilerini, kesikli çizgi ise VT'ün yüksek olduğu (K4, K6, K10, K12) serilerini belirtmek üzere kullanılmıştır.

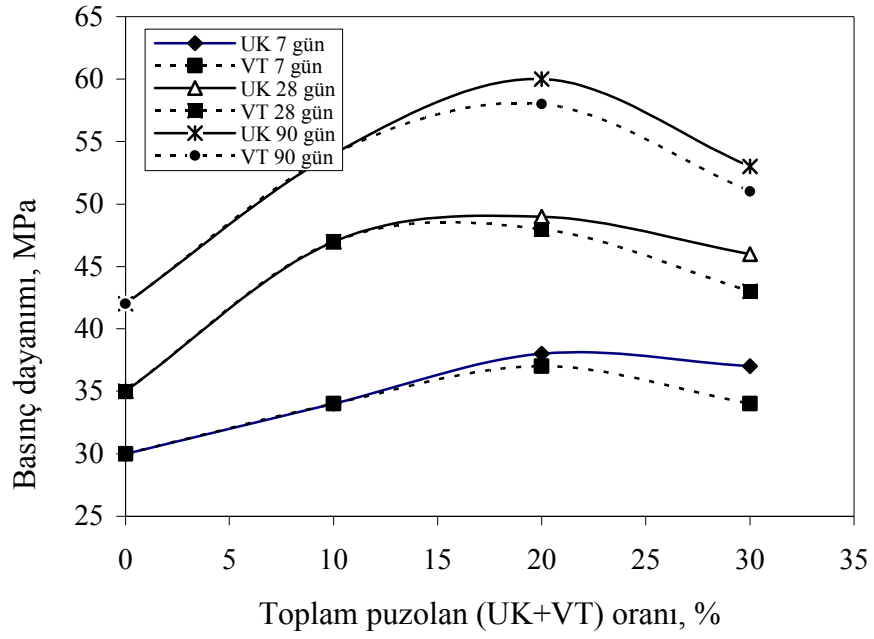
7.2.1. Basınç dayanımı

KP+UK+VT içeren karışımların basınç dayanımı sonuçları izelge 7.3 ve şekil 7.61 ve 7.62'de verilmiştir.

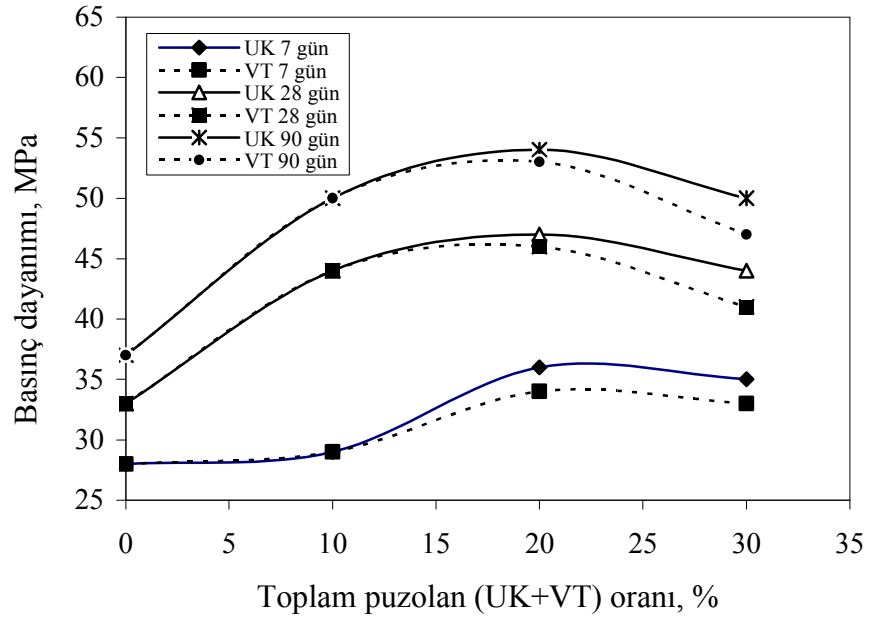
Çizelge 7.3. Basınç dayanımı deneyi sonuçları

Kod	Toplam puzolan % (UK+VT)	Karışım	Basınç dayanımı, MPa			Eğilmede çekme dayanımı, MPa		
			7 gün	28 gün	90 gün	7 gün	28 gün	90 gün
K1	0	90Ç+10KP+0 UK+0 VT	30	35	42	3,2	5,1	5,5
K2	10	80Ç+10KP+5 UK+5 VT	34	47	54	3,3	5,4	5,8
K3	20	70Ç+10KP+15UK+5 VT	38	49	60	3,5	5,6	6,0
K4	20	70Ç+10KP+5 UK+15VT	37	48	58	3,4	5,3	5,9
K5	30	60Ç+10KP+20UK+10VT	37	46	53	3,4	5,1	5,6
K6	30	60Ç+10KP+10UK+20VT	34	43	51	3,3	5,0	5,4
K7	0	85Ç+15KP+0 UK+0 VT	28	33	37	3,0	4,9	5,3
K8	10	75Ç+15KP+5 UK+5 VT	29	44	50	3,2	5,2	5,6
K9	20	65Ç+15KP+15UK+5 VT	36	47	54	3,3	5,4	5,8
K10	20	65Ç+15KP+5 UK+15VT	34	46	53	3,2	5,3	5,7
K11	30	55Ç+15KP+20UK+10VT	35	44	50	3,0	5,0	5,5
K12	30	55Ç+15KP+10UK+20VT	33	41	47	2,8	4,8	5,1

Ç: Çimento, KP:Kil pestili, UK: Uçucu kül, VT:Volkanik tuf



Şekil 7.61. % 10 KP içeren karışımlarda basınç dayanımının toplam puzolan oranı ile değişimi.



Şekil 7.62. % 15 KP içeren karışımlarda basınç dayanımının toplam puzolan oranı ile değişimi.

Çizelge 7.3 ile Şekil 7.61 ve 7.62'den görüleceği üzere çimentonun bir kısmı yerine ikame edilen KP atığı ve puzolanların (UK,VT) kullanılması ile çimentonun basınç dayanımında değişiklikler meydana gelmektedir. Kil pestili atık oranının % 10' dan % 15' e artması ile basınç dayanımı yaklaşık % 6 ila % 10 arasında azalmaktadır. Kullanılan KP miktarının artması ile basınç dayanımında düşüşler ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle KP içeriğinin % 10 olduğu ilk altı seri karışımın basınç dayanımı sonuçları KP içeriği % 15 olan seriye göre daha yüksektir. Gözlenen bu ilişki 7, 28 ve 90 günlük bütün yaşlar için geçerlidir. Çimentoda KP kullanılması ile ortaya çıkan dayanımdaki bu azalmanın KP atık malzemesinin puzolanik aktivitesinin düşüklüğü ve priz geciktirme özeliği ile de ilgili olduğu düşünülmektedir.

İlgili çizelge ve şekiller incelendiğinde; kullanılan toplam puzolan içerisindeki UK yüzdesinin yüksek olduğu (K3, K5, K9, K11) karışımların, VT içeriği yüksek olan karışımlara (K4, K6, K10, K12) göre basınç dayanımı açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Puzolanik katkı kullanım oranının % 20 olduğu karışımlarda bu fark az olmasına rağmen puzolan katkı içeriğinin % 30'a yükseldiği karışımlarda bu fark % 5 civarındadır. Bu durum puzolanik katkılar içerisinde UK'ün daha iyi performans gösterdiğinin işaretidir. Bu olay Bölüm 6.1' de belirtilen UK'ün puzolanik ve fiziksel özelliklerinin VT' ten daha üstün olması ile açıklanabilir.

Elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere basınç dayanımı açısından en etkin puzolanik katkı kullanım oranı % 20'dir (Şekil 7.61 ve 7.62). Puzolan kullanımı ile birlikte basınç dayanımı giderek artmakta, % 20 puzolan kullanım oranında en yüksek değere ulaşıldıktan sonra yine giderek azalmaktadır. Yapılan çalışmalarda % 10 puzolan kullanımı ile % 30 puzolan kullanımı arasında basınç dayanımı açısından belirgin bir fark gözlenememiştir. Aradaki fark yaklaşık % 1-2 düzeyindedir. Bu nedenle çimento ekonomisi düşünülerek toplam % 10 yerine % 30 oranında puzolan kullanılması önerilebilir (Şahmaran, 2007; Siddique, 2004; Turanlı, 2005; Uğurlu ve Eser, 2008).

Basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde 7 günlük dayanımlar ile 28 günlük dayanımlar arasında puzolanik katkı kullanımı ile birlikte yaklaşık 0,75 düzeyinde bir oran olduğu yani 7 günlük dayanımların ortalama % 30' luk bir artışla 28

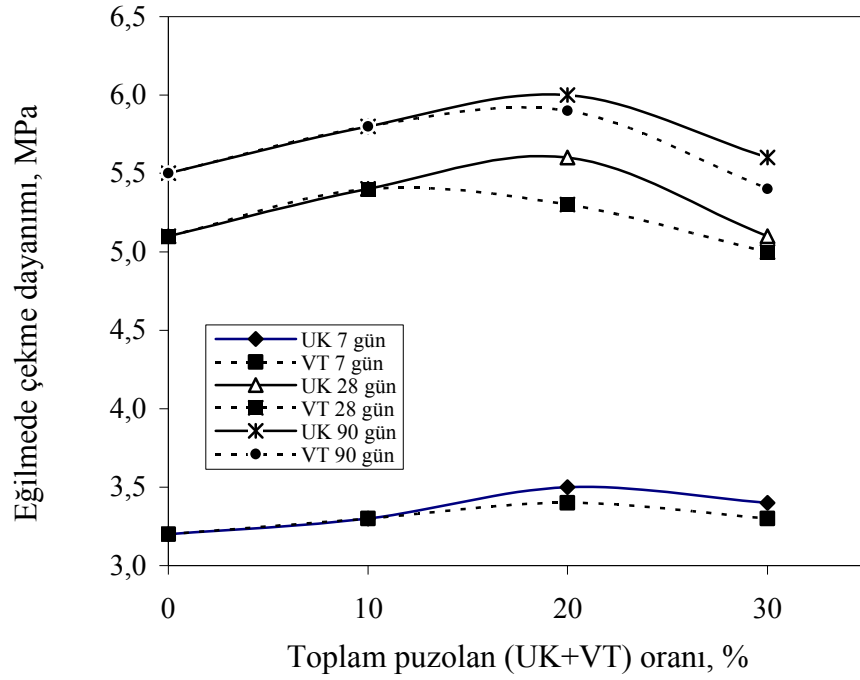
günlük dayanımlara eriştiği görülmüştür. Çalışmada asıl önemli artış 7 günlük dayanımlar ile 90 günlük dayanımlar arasındadır. 7 günlük dayanımların 90 günlük dayanımlara oranı ortalama 0,65 düzeyinde olup 7 günlük dayanımlara göre 90 günlük dayanımlarda meydana gelen artış ortalama % 57 düzeyindedir. Bu durum her iki KP oranı için aşağı yukarı aynıdır. Sonuçlar 90 günlük örneklerde meydana gelen dayanım artışının 28 günlük örneklerle göre çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum puzolanik tepkimenin uzun süre devam ettiğini ve puzolanik katkı kullanılması durumunda beton ya da harç dayanımı belirlenirken 28 günlük dayanım yerine 90 günlük dayanımların esas alınmasının malzemenin nihai davranışı açısından daha doğru olacağını göstermektedir (ACI 232. 1R-00, 2004; Turanlı, 2005).

Elde edilen basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde; çimentonun 28 günlük norm dayanımı olan 46.3 MPa'lık değer (Çizelge 6.1) puzolan kullanılan serilerin birkaç tanesi dışında büyük bir çoğunluğunda elde edildiği görülmüştür. 28 günlük dayanımların bazısında görülen dayanım düşüklüğü 90. günde yükselerek ortadan kalkmış ve çimento nihai dayanımının üzerinde dayanımlar elde edilmiştir.

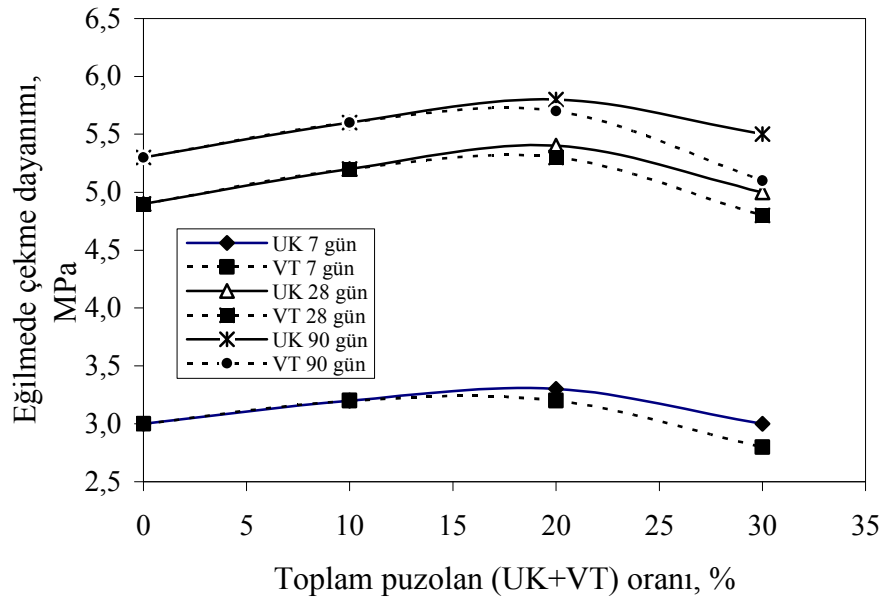
7.2. 2. Eğilmede çekme dayanımı

KP+UK+VT içeren karışımların eğilmede çekme dayanımı sonuçları Çizelge 7.3 ve Şekil 7.63 ve 7.64'te verilmiştir.

Elde edilen deney sonuçları eğilmede çekme dayanımı sonuçlarının büyük ölçüde basınç dayanımı sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Şekil 7.63 ve 7.64'den görüleceği üzere çimento yerine ikame edilen KP ve puzolanların (UK+VT) kullanılmasıyla çimentonun eğilmede çekme dayanımında değişiklikler ortaya çıkmaktadır (Erdoğan, 2004; Turanlı, 2005). Sonuçlar, bu değişimde puzolanların olumlu KP' nin ise olumsuz rol oynadığını gösterir niteliktedir.



Şekil 7.63. % 10 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının toplam puzolan oranı ile değişimi.



Şekil 7.64. % 15 KP içeren karışımların eğilmede çekme dayanımının toplam puzolan oranı ile değişimi.

Eğilmede çekme dayanımı sonuçları da basınç dayanımında olduğu gibi artan KP oranı ile azalmaktadır. KP kullanım oranının % 10'dan % 15'e artması ile eğilmede çekme dayanımı azalmaktadır. Böylece KP atık malzemesinin olumsuz etkisi görülmektedir. Bu durum 1. deneysel çalışma sonuçları ile uyumludur. Bu nedenle KP oranının % 15 olduğu karışımların (K7,.....K12) eğilmede çekme dayanımı değerleri KP oranının % 10 olduğu karışımların (K1,....K6) eğilmede çekme dayanımı değerlerinden daha düşüktür. Burada eğilmede çekme dayanımında ortaya çıkan dayanım kaybı ortalama %5-10 düzeyindedir. Bu sonuçlar KP malzemesinin puzolanik aktivitesinin düşük olması gerçeği ile açıklanabilir.

Çizelge 7.3, Şekil 7.63 ve 7.64 incelendiğinde kullanılan toplam puzolan içerisindeki UK oranının yüksek olduğu (K3, K5, K9, K11) karışımların VT içeriği yüksek olan karışımlara (K4, K6, K10, K12) göre eğilmede çekme dayanımı açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu farklılık toplam puzolan kullanımının % 20'den % 30'a yükselmesi ile daha belirginleşmektedir. Bu durum Bölüm 6.1' de belirtilen UK'ün daha iyi puzolanik karakteri ve fiziksel özellikleri ile yakından ilgilidir

İlgili çizelge ve şekillerin incelenmesinden görüleceği üzere eğilmede çekme dayanımı açısından en etkin puzolan katkı kullanım oranı % 20' dir. Puzolan kullanımı ile eğilmede çekme dayanımı artmakta ve % 20 puzolan kullanım oranında en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu oranın üzerinde puzolan kullanılması durumunda eğilmede çekme dayanımı düşmektedir. Bu deneyde eğilmede çekme dayanımı açısından % 10 puzolan kullanımı ile % 30 puzolan kullanımı arasında önemli bir fark olmadığı görülmüştür. Bu nedenle çimento ekonomisi açısından % 10 yerine % 30 puzolan kullanımının tercih edilmesinde fayda vardır (Şahmaran, 2003; ACI 232. 1R-00, 2004; Siddique, 2004; Turanlı, 2005; Uğurlu ve Eser, 2008).

Çimento kabulü için bir koşul olmamakla birlikte çimentonun 28 günlük 5,7 MPa olan eğilmede çekme dayanımı değerine (Çizelge 6.1) 28 günlük örneklerde % 20 puzolan kullanımında yaklaşılmıştır. Bu oranda puzolan içeren örnekler 90. günde bu eksikliği fazlasıyla sağlamışlardır. Elde edilen 90 günlük eğilmede çekme dayanımları yüksek olup 28 günlük dayanımların 90 günlük dayanımlara oranı ortalama 0.90

düzeindedir. 7 günlük dayanımlara göre 90 günlük dayanımlarda meydana gelen artış ortalama % 60 düzeyindedir. Bu durum çimento hidrasyonunun 28 günde tamamlanmadığını, 90. güne kadar puzolanik tepkimelerin devam ettiğini göstermektedir.

7.2.3. Alkali silika reaksiyonu (ASR)

Portland çimentosu içerisindeki alkali oranının belli bir miktarı aşması ve agrega içerisinde reaktif silis bulunması durumunda nemli ortamda alkali silis reaksiyonu oluşur. Uzun zaman alan bu reaksiyon ile ortaya çıkan genleşmeler sonucu önce kılcal çatlaklar ortaya çıkar ve zamanla diğer etkilerin de yardımıyla beton parçalanır (Şekil 7.65) (Akman, 1999; Erdoğan, 2003; Karakurt, 2008).

Çimentoda katkı maddesi olarak kullanılan KP, UK ve VT içerisinde Na_2O ve K_2O gibi alkali oksitlerin bulunması bu deneyin yapılmasını zorunlu kılmaktadır (Çizelge 7.4). Çizelge 7.4'ten görüleceği üzere özellikle KP içerisinde önemli miktarda alkali oksit mevcuttur. Aynı şekilde UK ve VT içerisindeki K_2O miktarı da yüksek olup ASR riskini arttırmaktadır. Portland çimentosunun toplam eşdeğer alkali içeriği $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$ bağıntısıyla belirlenir. Bu bağıntı kullanılarak üretilen 12 seri çimentonun toplam eşdeğer alkali içeriği hesaplandığında, bu değer % 0,95 ila % 1,52 arasında değiştiği görülmüştür. Bu oranlar üretilen çimentolu karışımlarında ASR riskinin olabileceğini göstermektedir (ASTM C 1260, 2002).

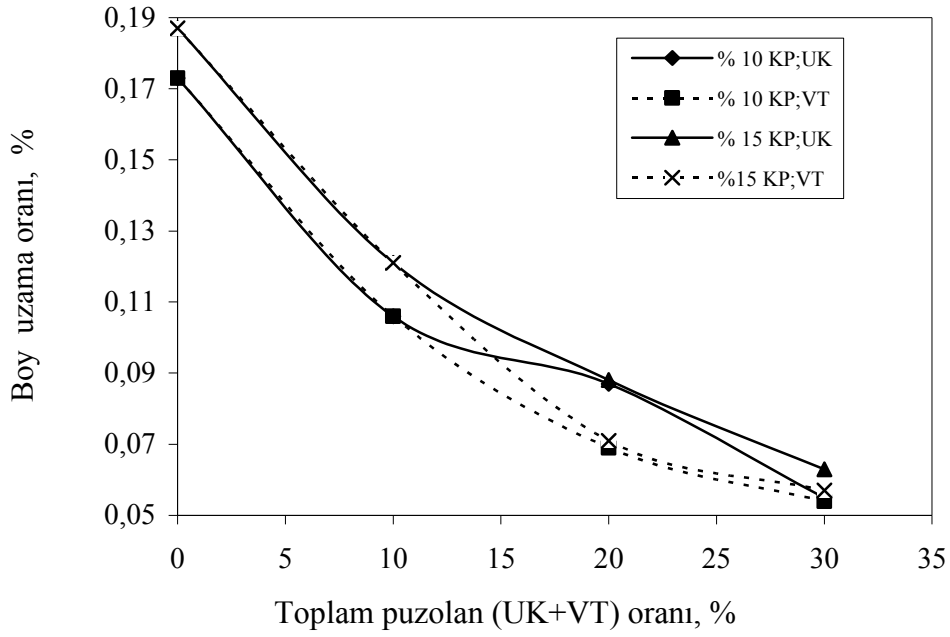
Çizelge 7.4. Kullanılan malzemelerin alkali miktarları

Malzeme	Na_2O , %	K_2O , %
Ç	0,07	0,49
UK	0,35	1,49
VT	0,24	1,72
KP	5,13	1,33

ASTM C 1260 (2002) standardına göre % 5 NaOH çözeltisinde 14 gün bekletilen harç çubuklarının boy değişimleri Çizelge 7.5 ve Şekil 7.65’da verilmiştir.

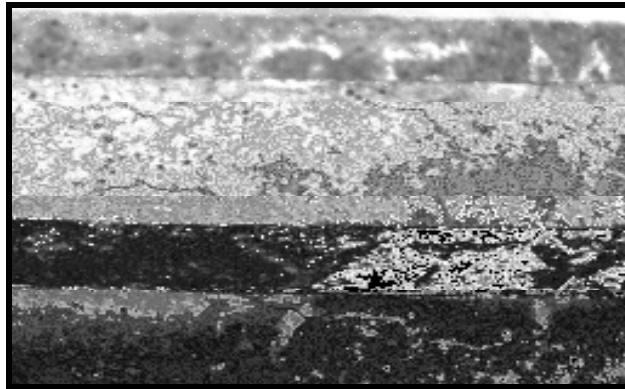
Çizelge 7.5. ASR deneyi sonuçları ve ASR sınır koşulları

Kod	Toplam puzolan % (UK+VT)	Karışım	Boy Uzama Oranı, %			Sınır Koşulları, (14. gün için), % (ASTM C 1260)		
			4. Gün	8. Gün	14. Gün	Zararsız	Riskli	Zararlı
K1	0	90Ç+10KP+0 UK+0 VT	0,031	0,133	0,173	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K2	10	80Ç+10KP+5 UK+5 VT	0,023	0,076	0,106	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K3	20	70Ç+10KP+15UK+5 VT	0,028	0,061	0,087	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K4	20	70Ç+10KP+5 UK+15VT	0,025	0,046	0,069	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K5	30	60Ç+10KP+20UK+10VT	0,023	0,037	0,054	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K6	30	60Ç+10KP+10UK+20VT	0,024	0,035	0,055	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K7	0	85Ç+15KP+0 UK+0 VT	0,037	0,134	0,187	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K8	10	75Ç+15KP+5 UK+5 VT	0,032	0,084	0,121	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K9	20	65Ç+15KP+15UK+5 VT	0,029	0,071	0,088	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K10	20	65Ç+15KP+5 UK+15VT	0,027	0,042	0,071	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K11	30	55Ç+15KP+20UK+10VT	0,025	0,039	0,063	0-0,10	0,10-0,20	>0,20
K12	30	55Ç+15KP+10UK+20VT	0,024	0,037	0,057	0-0,10	0,10-0,20	>0,20



Şekil 7.65. Toplam puzolan miktarı ile değişen boy uzama oranı (14. gün).

Çizelge 7.5 ve Şekil 7.65. incelendiğinde puzolan kullanımı ile birlikte boy uzamalarının neredeyse doğrusal bir şekilde azaldığı, bir başka deyişle ASR riskinin azaldığı görülmektedir. 14 günlük sonuçlara tek tek bakıldığında K1, K2, K7 ve K8 serilerinde ASR riski olduğu görülmektedir, Şekil 7.65. Bu seriler hiç puzolan kullanılmayan ve % 10 puzolan kullanılan serilerdir. Toplam puzolan kullanım oranının % 20'ye yükselmesiyle ortaya çıkan uzamalar zararsız sınırlar içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.66. Çalışmada kullanılan bir harç çubuğunda ortaya çıkan ASR çatlakları

Toplam puzolan kullanımının % 30 olduğu serilerde boy uzamaları en düşük düzeyde kalmıştır. Bu durum puzolan kullanımı ile ASR riskinin azaldığını göstermektedir. Toplam puzolan kullanım oranının % 20 ile % 30 ve VT'ün yüksek olduğu serilerdeki boy uzamaları UK'ün yüksek olarak kullanıldığı serilere göre biraz daha düşük elde edilmiştir. Bu nedenle VT'ün ASR karşısındaki performansı UK'den daha iyidir.

7.2.4. Ultrases geçiş hızı

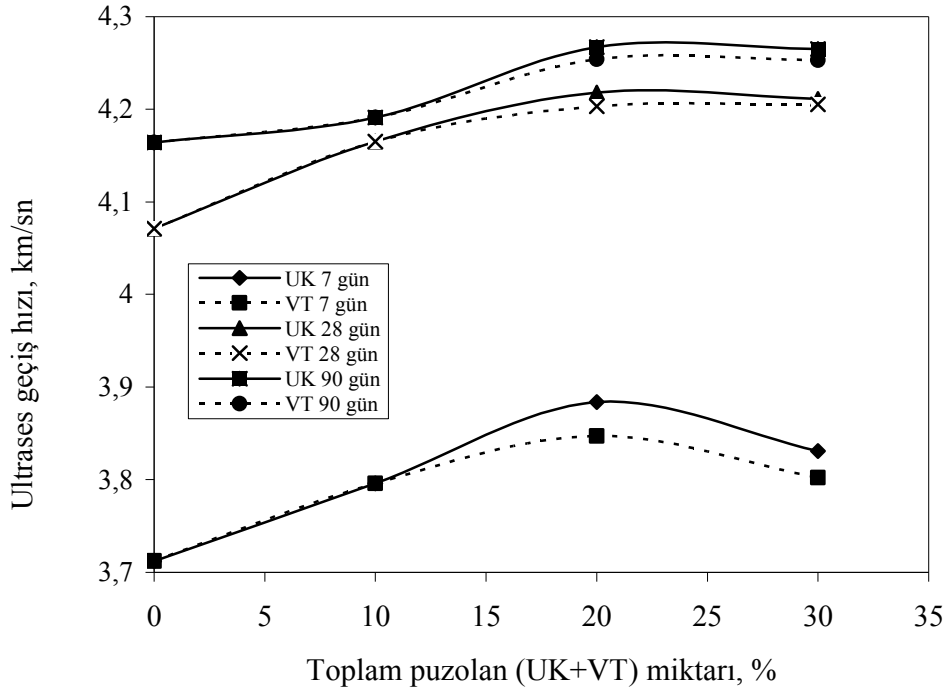
Hasarsız bir uygulama olan bu deneyde frekansı 20 KHz'den yüksek olan ses dalgalarının örnek içerisinden geçişi sırasında malzeme içerisindeki çatlak, boşluk gibi içyapı kusurları sesin geçiş süresini uzatırlar. Bu süreksizliklerle karşılaşan ses dalgası bu fazların etrafından dolaşarak geçiş süresinin uzamasına neden olur. Sesin malzeme içinden kısa zamanda geçmesi yüksek yoğunluk ve sağlam bir içyapının göstergesidir (Erdoğan 2004; Uğurlu, 2004).

Bilindiği üzere çimento bağlayıcı yapı elemanlarında içyapı kusurları sadece yerleştirme ya da sonradan ortaya çıkan gerilmelerin bir sonucu gelişen bir durum değildir. Özellikle mineral ve puzolan katkılı çimento bağlayıcı malzemelerde katkı maddesi ile çimento bileşenleri arasında ve çimento bileşenlerinin hidratasyonu sonucu ortaya çıkan hidratasyon ürünleri ile katkı maddesi arasındaki tepkimeler de bu oluşumları etkileyebilir (Mehta, 1985; Erdoğan, 2004).

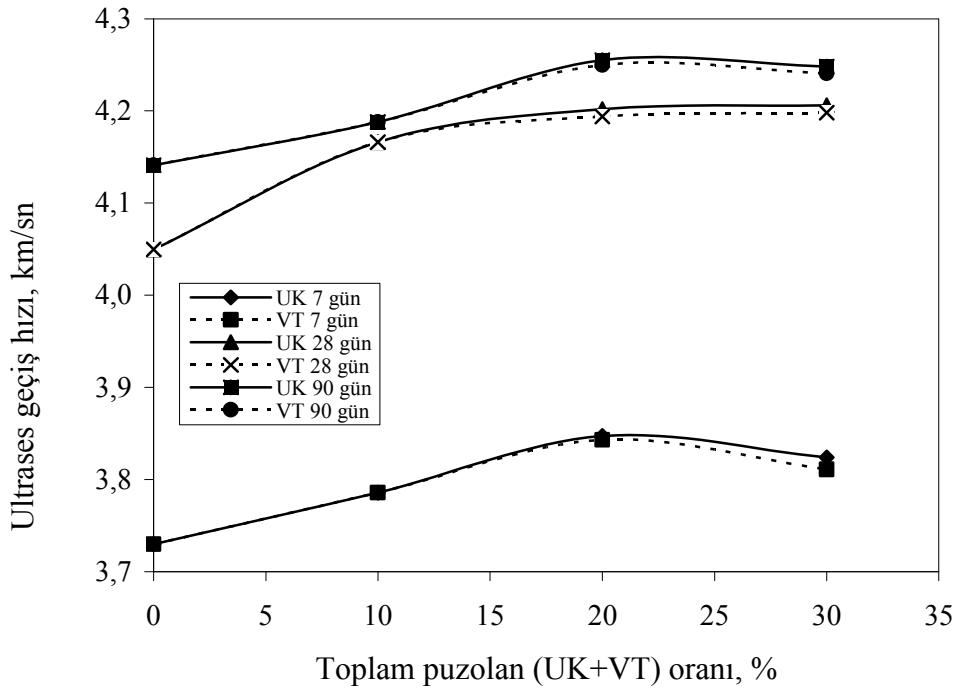
Çalışmada içyapı hakkında bilgi edinilmesi amacıyla ultrases geçiş hızı deneyi gerçeleştirilmiştir. Ultrases geçiş süresi deney sonuçlarından hesaplanan ultrases geçiş hızı sonuçları Çizelge 7.6 ile Şekil 7.67 ve 7.68'de verilmiştir.

Çizelge 7.6. Ultrases geçiş hızı sonuçları

Kod	Toplam Puzolan, % (UK+VT)	Karışım	Ultrases geçiş hızı, km/sn		
			7 gün	28 gün	90 gün
K1	0	90Ç+10KP+0 UK+0 VT	3,712	4,071	4,164
K2	10	80Ç+10KP+5 UK+5 VT	3,796	4,165	4,191
K3	20	70Ç+10KP+15UK+5 VT	3,884	4,218	4,267
K4	20	70Ç+10KP+5 UK+15VT	3,847	4,203	4,254
K5	30	60Ç+10KP+20UK+10VT	3,831	4,211	4,265
K6	30	60Ç+10KP+10UK+20VT	3,802	4,205	4,253
K7	0	85Ç+15KP+0 UK+0 VT	3,730	4,050	4,141
K8	10	75Ç+15KP+5 UK+5 VT	3,786	4,166	4,188
K9	20	65Ç+15KP+15UK+5 VT	3,847	4,202	4,255
K10	20	65Ç+15KP+5 UK+15VT	3,843	4,194	4,250
K11	30	55Ç+15KP+20UK+10VT	3,824	4,206	4,247
K12	30	55Ç+15KP+10UK+20VT	3,801	4,198	4,241



Şekil 7.67. % 10 KP içeren karışımların ultrases geçiş hızının toplam puzolan oranı ile değişimi.



Şekil 7.68. % 15 KP içeren karışımların ultrases geçiş hızının toplam puzolan oranı ile değişimi.

Ultras ses geçiş hızı sonuçları incelendiğinde çimentoda puzolanik katkı maddesi (UK, VT) kullanılması ile birlikte geçiş hızının yükseldiği görölmüştür. Hızın büyümesi içyapıda daha boşluksuz ve rijit bir yapıya ulaşıldığını göstermektedir. Böylece puzolanik tepkimeler sonucu içyapının yoğunluğu artmıştır. Ayrıca, puzolanik malzemelerin çimentodan daha ince olması nedeniyle bir filler etkisi de söz konusudur. Bu durum içyapı doluluğunun artmasına neden olmuştur (Mindess and Young, 1986; Turanlı, 1995).

Diğer deney sonuçlarında görölen ve UK'ün VT'ten daha olumlu olduğunu gösteren sonuçlar ultras ses geçiş hızı ölçümlerinde de görölmüştür. Bu nedenle % 20 ve % 30 oranında puzolanik katkı kullanımında UK'ün VT'e göre daha yüksek oranda kullanıldığı serilerin ultras ses geçiş hızları daha yüksek elde edilmiştir. Böylece VT'ün yüksek olduğu serilerde içyapıda bir yoğunluk azalması söz konusudur. Bu fark çok belirgin olmasa da ilgili şekillerden açıkça görölebilir.

şekillerden göröleceği üzere % 30 puzolan kullanım oranı ile elde edilen ultras ses geçiş hızı değerleri, % 20 puzolan kullanım oranında elde edilen sonuçlara çok yakın ve bazı kür süreleri için de bu sonuçlardan daha büyük bulunmuştur. İlgili çizelge ve şekillerin incelenmesi sonucu KP kullanım oranının % 10'dan % 15'e yükselmesi ile ultras ses geçiş hızında çok düşük de olsa azalmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum KP'nin puzolanik aktivitesinin düşük olması nedeniyle büyük bir kısmının hidratasyona katılmaması gerçeği ile açıklanabilir.

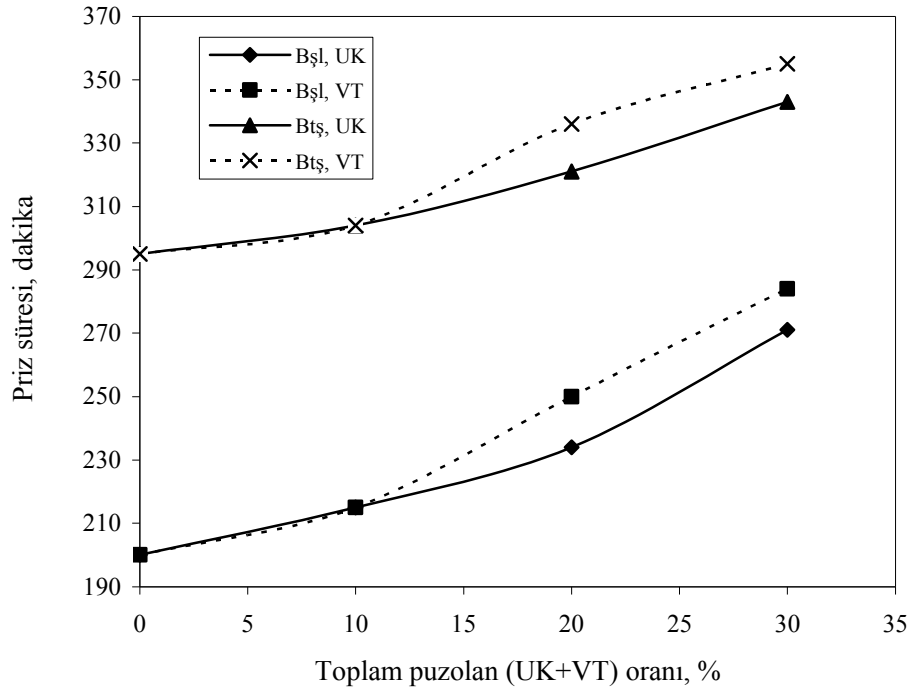
Dayanım gelişimi açısından sonuçlar değerlendirildiğinde 7 günlük geçiş hızlarının 28 günlük geçiş hızlarına göre ortalama % 10, 90 günlük sonuçlara göre ise ortalama % 11 daha düşük olduğu görölmüştür. Böylece, 28 günlük geçiş hızları ile 90 günlük geçiş hızları arasında % 1-2 düzeyinde çok düşük bir fark olduğu görölecektir. Bu durum, boşluk sistemleri açısından içyapının 28. günden sonra çok fazla değişmediğini bir başka deyişle ilk 7 güne kadar gelişiminin % 90'ını tamamladığını ortaya koymaktadır.

7.2.5. Priz başlangıç ve bitiş süresi

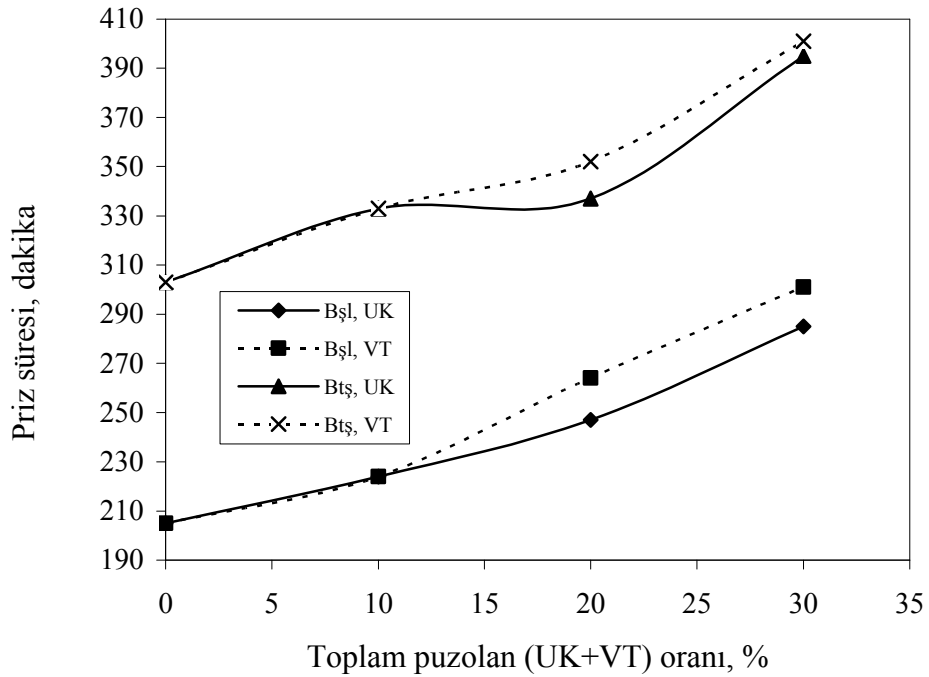
Çalışma kapsamında gerçekleştirilen priz başlangıç ve bitiş süresi deneyi sonuçları Çizelge 7.7 ile Şekil 7.69 ve 7.70’de verilmiştir.

Çizelge 7.7 Priz başlangıç ve bitiş süresi deneyi sonuçları

Kod	Toplam puzolan, % (UK+VT)	Karışım	Priz süresi, dakika	
			Başlangıç	Bitiş
K1	0	90Ç+10KP+0 UK+0 VT	200	295
K2	10	80Ç+10KP+5 UK+5 VT	215	304
K3	20	70Ç+10KP+15UK+5 VT	234	321
K4	20	70Ç+10KP+5 UK+15VT	250	336
K5	30	60Ç+10KP+20UK+10VT	271	343
K6	30	60Ç+10KP+10UK+20VT	284	355
K7	0	85Ç+15KP+0 UK+0 VT	205	303
K8	10	75Ç+15KP+5 UK+5 VT	224	333
K9	20	65Ç+15KP+15UK+5 VT	247	337
K10	20	65Ç+15KP+5 UK+15VT	264	352
K11	30	55Ç+15KP+20UK+10VT	285	395
K12	30	55Ç+15KP+10UK+20VT	301	401



Şekil 7.69. %10 KP içeren karışımların priz süresinin toplam puzolan oranı ile değişimi.



Şekil 7.70. %15 KP içeren karışımların priz süresinin toplam puzolan oranı ile değişimi.

Çizelge 6.8'den görüleceği üzere içerisinde bor oksit bulunan kil pestili atıklarının priz başlangıç ve bitiş süreleri Çizelge 6.1'de verilen Portland çimentosunun deneysel priz süresinin çok üzerindedir (Elbeyli, 2000; Boncukoğlu et al, 2001; Kula et al, 2002). Bir başka deyişle kullanılan katkı maddeleri (KP, UK, VT) doğal olarak prizi geciktirmişlerdir. Daha önce yapılmış çalışmalardan da bildiğimiz üzere prizin bu denli uzamasının esas nedeni KP'dir (Boncukoğlu, 2001; Uğurlu, 2004). Puzolanik aktivitesinin çok düşük olması ve içerisinde bulunan bor oksit nedeniyle KP' nin priz süresi oldukça uzundur. Bundan dolayı içerisine katıldığı malzemenin de priz süresini uzatması kaçınılmazdır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1'de verilen ve bu çalışmada kullanılan çimentonun priz sürelerine göre daha uzundur. Ancak TS EN 197-1'de belirtilen CEM I 42,5 dayanımlı çimentolar için "*priz başlama süresi ≥ 60 dakika*" koşulunu sağlamaktadır.

İlgili çizelge ve şekillerden görüleceği üzere KP atık malzemesinin kullanım oranının % 10'dan % 15'e çıkması sonucu priz başlangıç ve bitiş süreleri uzamıştır. Yine bunun yanı sıra priz süresi çimentoya göre daha uzun olan ve sadece KP ile üretilmiş karışımlara (K1, K7) puzolanik katkı maddesi ilave edildiğinde priz süreleri daha da uzamıştır. Prizdeki bu gecikme kullanılan puzolan oranı ile doğrusal bir şekilde artmıştır. Bunun nedeni, puzolanik tepkimelerin çimentonun esas bileşenlerinin tepkimesinden sonra oluşması ile ilgilidir. Elde edilen deney sonuçları değerlendirildiğinde priz başlangıç ve bitiş süreleri arasında ortalama 90 ila 110 dakika arasında bir fark olduğu görülmektedir. Bu fark çimentonun priz davranışı açısından normal olup kabul edilebilir bir durumdur.

Priz süresi deneyleri sonuçlarında da UK ve VT kullanım oranı açısından fark olduğu tespit edilmiştir. UK'ün yüksek oranda kullanıldığı karışımların (K3, K5, K9, K11) priz başlangıç ve bitiş süreleri VT'ün yüksek oranda kullanıldığı karışımlara (K4, K6, K10, K12) göre daha düşüktür. Böylece, VT priz süresini uzatmıştır. Kısacası VT'ün UK' e göre priz üzerinde olumsuz bir etkisi söz konusudur. Bu büyük ölçüde bu iki katkı maddesi arasındaki tane inceliğinden kaynaklanmıştır. Bu durum prizin uzamasının istenildiği örneğin yüksek hava sıcaklığının olduğu ortamlarda bir avantaj olarak da değerlendirilebilir.

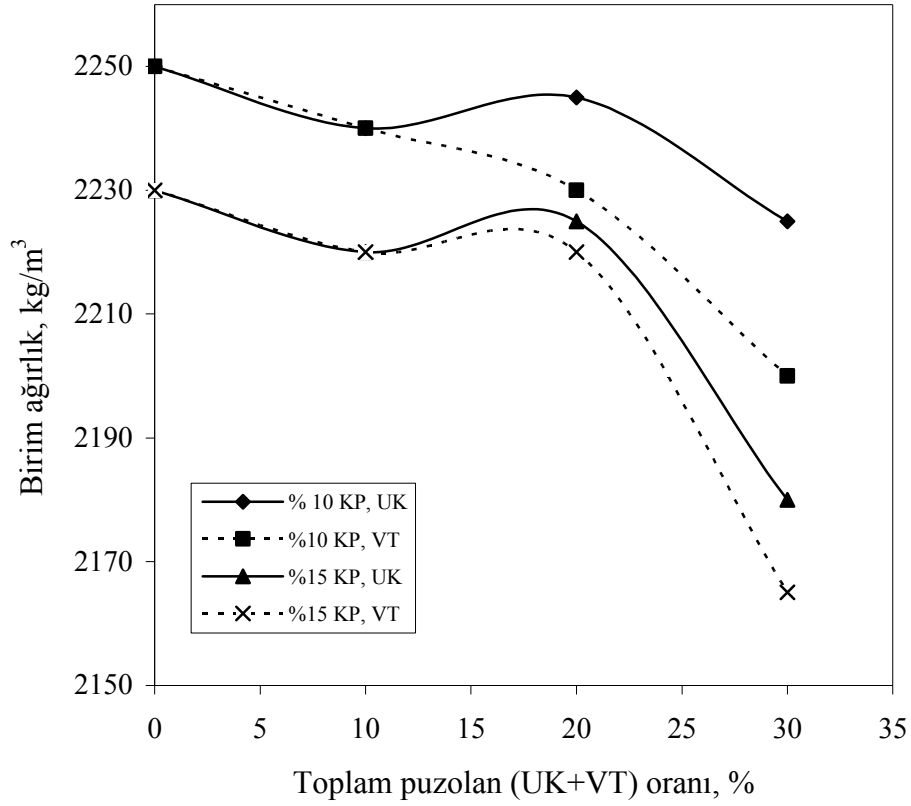
7.2. 6. Birim ağırlık

Çalışma kapsamında 28 günlük sertleşmiş örnekler üzerinde gerçekleştirilen birim ağırlık deneyi sonuçları Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Çizelge 7.8. Birim ağırlık deney sonuçları

Kod	Toplam puzolan % (UK+VT)	Karışım	Birim ağırlık, kg/m ³	Hacim genleşmesi, mm
K1	0	90Ç+10KP+0 UK+0 VT	2250	2
K2	10	80Ç+10KP+5 UK+5 VT	2240	2
K3	20	70Ç+10KP+15UK+5 VT	2245	3
K4	20	70Ç+10KP+5 UK+15VT	2230	3
K5	30	60Ç+10KP+20UK+10VT	2225	4
K6	30	60Ç+10KP+10UK+20VT	2200	3
K7	0	85Ç+15KP+0 UK+0 VT	2230	3
K8	10	75Ç+15KP+5 UK+5 VT	2220	3
K9	20	65Ç+15KP+15UK+5 VT	2225	3
K10	20	65Ç+15KP+5 UK+15VT	2200	3
K11	30	55Ç+15KP+20UK+10VT	2180	3
K12	30	55Ç+15KP+10UK+20VT	2165	4

Çizelge 7.8’de verilen değerler ile çizilen birim ağırlık – toplam puzolan oranı ilişkisini gösteren grafik ise Şekil 7.71’de verilmiştir. Gerek Çizelge 7.8 ve gerekse de Şekil 7.71’den görüleceği üzere çimento içerisinde puzolanik malzeme (UK, VT) kullanılması ile birlikte birim ağırlıklarda çok az da olsa bir azalma meydana gelmektedir (Uğurlu, 2004). Kullanılan puzolan oranının artması ile birim ağırlıktaki bu düşüş artmaktadır (Turanlı, 1995; Atakay 2006). Birim ağırlıktaki en fazla azalış % 30 puzolan kullanımında görülmektedir.



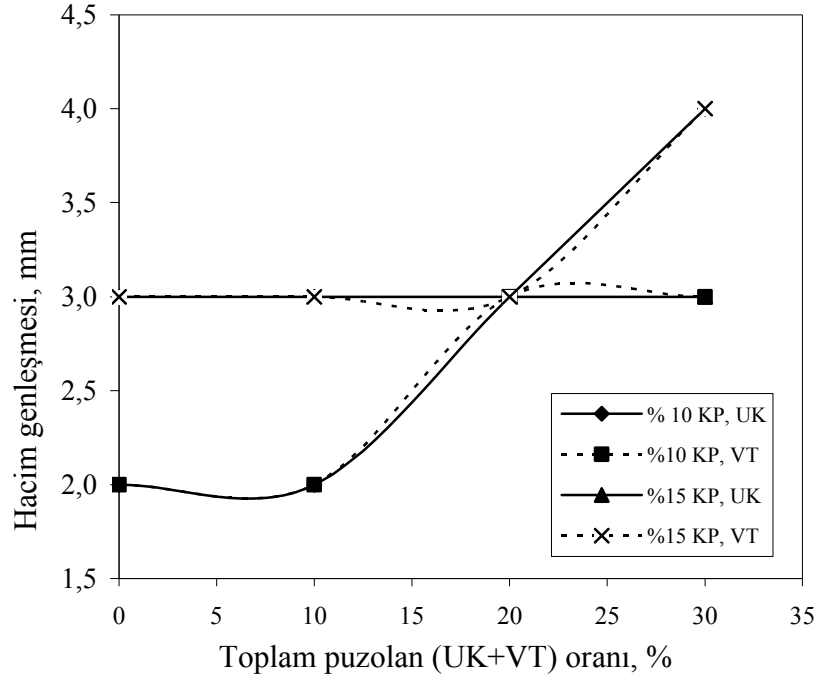
Şekil 7.71. Birim ağırlığın toplam puzolan oranı ile değişimi.

Burada da birim ağırlık sonuçları açısından UK veya VT kullanımı arasında fark vardır. UK kullanım oranı yüksek olan serilerin (K3, K5, K9, K11) birim ağırlığı VT kullanım oranı yüksek olan serilere (K4, K6, K10, K12) göre en yüksek % 1 kadar daha büyüktür. Puzolan kullanım oranı arttıkça bu fark iyice artmaktadır.. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar genel olarak diğer deney sonuçları ile uyum göstermektedir.

7.2.7. Hacim genişmesi

Çalışmada kullanılan KP, UK ve VT katkı malzemelerinin herhangi bir hacimsel genişlemeye neden olup olmadığını tespit etmek üzere Le Chatelier cihazı

kullanılarak hacim genişemesi deneyleri yapılmış ve sonuçları Çizelge 7.8 ve Şekil 7.72'de verilmiştir.



Şekil 7.72. Hacim genişemesinin toplam puzolan oranı ile değişimi.

Bilindiği üzere çimento içerisinde fazla miktarda serbest kireç (CaO) veya serbest magnezyum oksit (MgO) bulunması hacim genişemesine yol açar (Erdoğan 2004; Topçu, 2006c). Çalışmalarda kullanılan KP atık malzemesi, UK ve VT puzolanları içerisindeki toplam CaO ve MgO miktarları Portland çimentosundan daha düşüktür (Çizelge 6.1, 6.4, 6.6 ve 6.8).

TS EN 197-1, Portland çimentolarında en çok 10 mm hacim genişemesine izin vermektedir. Kil pestili ve puzolan malzemeleri ile hazırlanan örnekler üzerinde yapılan hacim genişemesi deneyleri sonucu en fazla 4 mm'lik bir genişeme tespit edilmiş olup bu değer standardın belirlediği sınırlar içerisinde kalmaktadır. Çizelge 7.8 ve Şekil 7.72 incelendiğinde hacim genişemesi açısından UK ile VT arasında herhangi bir fark

olmadığı görülmüştür. Puzolan katkı kullanım oranının artması ile hacimsel genleşmeler artsa da çok anlamlı bir ilişkiden söz etmek olası değildir.

7.2.8. Dayanıklılık

Çimentonun kabul standartlarında olmasa da çimentolu sistemler için önemli bir kriter sayılan “kimyasallara karşı dayanım” ya da kısaca dayanıklılık olarak tanımlanabilen bu deneyde hazırlanan KP+UK+VT karışımlı harçların Na_2SO_4 ve MgSO_4 karşısındaki davranışı araştırılmıştır.

Bilindiği üzere Na_2SO_4 ve MgSO_4 bileşikleri beton, harç ve çimento üzerinde parçalayıcı etkisi olan tuzlardır. Özellikle MgSO_4 'ın sülfat etkisi Na_2SO_4 'a göre daha yüksektir. Deneyde kullanılan her iki tuz da sertleşmiş çimento içerisindeki kireç $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile tepkimeye girerek yumuşak ve jelatinimsi bir malzeme olan $\text{Mg}(\text{OH})_2$, NaOH ve CaSO_4 'ı meydana getirirler. Bu tepkime sonrası alçı çimento içerisindeki C_3A ile birleşerek Candlot tuzu (etringit) denilen büyük hacimli trikalsiyum sülfat alüminatı meydana getirir. Bu tuz yapısında 31 molekül su tutar. Bu nedenle tuzun oluşumu sırasında çok büyük bir hacim artışı ortaya çıkar ve beton bu hacimsel genleşme sırasında içsel gerilmeler nedeniyle parçalanır (Baradan vd., 2002; Erdoğan, 2003).

Sülfatlar hidratlanmış çimento bileşenleriyle, özellikle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C_3A ile tepkimeye girerek alçıtaşı ve kalsiyum sülfat alüminatları meydana getirir. İlk ürünün oluşmasıyla katı fazın hacmi % 124, ikinci ürün oluşumunda ise katı fazın hacmi % 227 artar. Çimentolu sistemde meydana gelen bu hacim artışı sonucu yapıda önce çatlamlar, dökülmeler görülür sonra ise parçalanma şeklinde bir hasar ortaya çıkar. Ayrıca MgSO_4 bu tepkimelere ilaveten CSH jelleri ile de tepkimeye girmekte ve bu jellerin bir miktarının çözünmesine yol açmaktadır. Böylece genleşme oluşturmanın yanısıra çimentonun bağlayıcılık özelliğini kaybetmesine de neden olmaktadır. Öte yandan MgSO_4 'ın oluşturduğu hacim artışı Na_2SO_4 'ün oluşturduğu hacim artışından daha fazladır (Uğurlu, 1993; Baradan vd., 2002; Erdoğan, 2003).

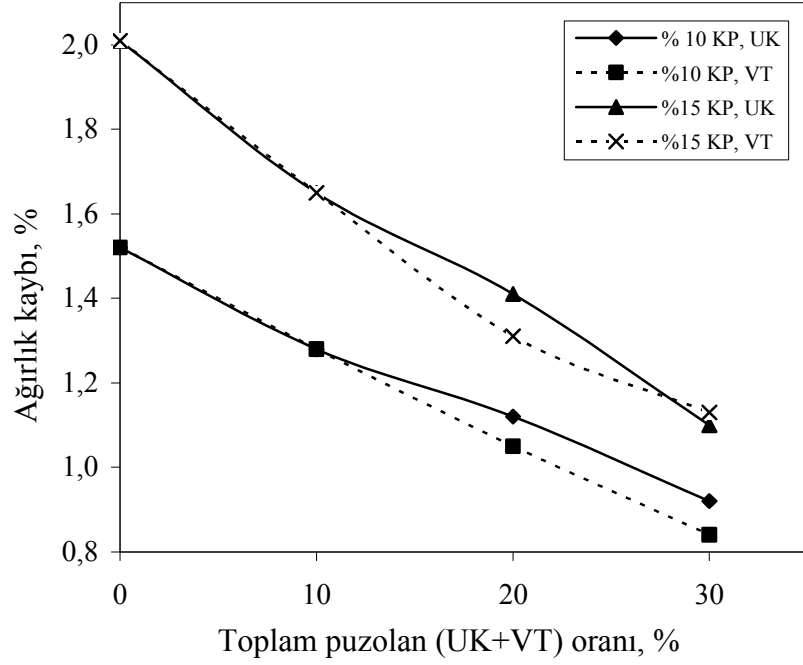
Bir litresinde 50 gr Na_2SO_4 ve MgSO_4 bulunan çözeltilerde 60, 90, 120, 150 ve 180 gün bekletilen örneklerin ağırlık kaybı ölçülerek yapılan dayanıklılık kaybı deneylerinin sonuçları Çizelge 7.9 ve 7.10'da gösterilmiş olup bu değerlerin grafiğe geçirilmesi sonucu elde edilen şekiller de Şekil 7.73 ve 7.74'de verilmiştir.

Çizelge 7.9. Na_2SO_4 ile yapılan dayanıklılık deney sonuçları

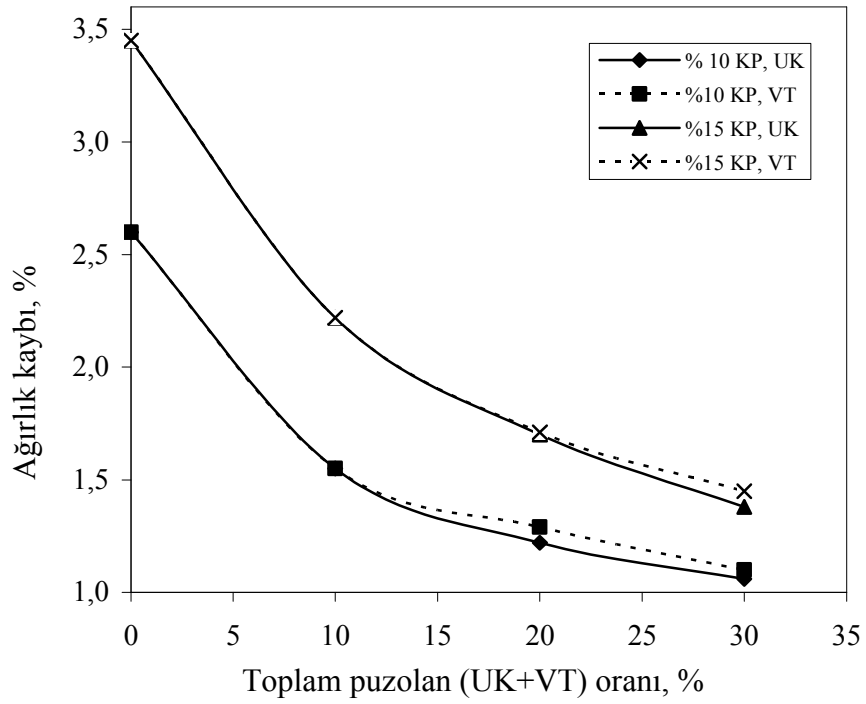
Kod	Toplam puzolan % (UK+VT)	Karışım	Ağırlık kaybı, %				
			60. gün	90. gün	120. gün	150. gün	180. gün
K1	0	90Ç+10KP+0 UK+0 VT	0,40	0,52	0,72	1,01	1,52
K2	10	80Ç+10KP+5 UK+5 VT	0,35	0,45	0,61	0,85	1,28
K3	20	70Ç+10KP+15UK+5 VT	0,27	0,35	0,50	0,70	1,12
K4	20	70Ç+10KP+5 UK+15VT	0,28	0,37	0,52	0,69	1,05
K5	30	60Ç+10KP+20UK+10VT	0,21	0,27	0,39	0,55	0,92
K6	30	60Ç+10KP+10UK+20VT	0,20	0,28	0,38	0,56	0,84
K7	0	85Ç+15KP+0 UK+0 VT	0,54	0,70	0,96	1,34	2,01
K8	10	75Ç+15KP+5 UK+5 VT	0,43	0,56	0,78	1,10	1,65
K9	20	65Ç+15KP+15UK+5 VT	0,32	0,41	0,57	0,81	1,41
K10	20	65Ç+15KP+5 UK+15VT	0,35	0,45	0,63	0,88	1,34
K11	30	55Ç+15KP+20UK+10VT	0,28	0,36	0,52	0,73	1,10
K12	30	55Ç+15KP+10UK+20VT	0,29	0,38	0,50	0,75	1,13

Çizelge 7.10. MgSO₄ ile yapılan dayanıklılık deney sonuçları

Kod	Toplam puzolan % (UK+VT)	Karışım	Ağırlık kaybı, %				
			60. gün	90. gün	120. gün	150. gün	180. gün
K1	0	90Ç+10KP+0 UK+0 VT	0,37	0,44	0,63	1,38	2,6
K2	10	80Ç+10KP+5 UK+5 VT	0,31	0,38	0,53	0,87	1,55
K3	20	70Ç+10KP+15UK+5 VT	0,25	0,30	0,42	0,71	1,22
K4	20	70Ç+10KP+5 UK+15VT	0,26	0,31	0,44	0,72	1,29
K5	30	60Ç+10KP+20UK+10VT	0,20	0,24	0,34	0,59	1,06
K6	30	60Ç+10KP+10UK+20VT	0,18	0,22	0,31	0,56	1,10
K7	0	85Ç+15KP+0 UK+0 VT	0,52	0,62	0,87	1,72	3,45
K8	10	75Ç+15KP+5 UK+5 VT	0,45	0,54	0,76	1,23	2,22
K9	20	65Ç+15KP+15UK+5 VT	0,33	0,41	0,58	0,93	1,70
K10	20	65Ç+15KP+5 UK+15VT	0,32	0,41	0,60	0,96	1,71
K11	30	55Ç+15KP+20UK+10VT	0,26	0,32	0,45	0,72	1,38
K12	30	55Ç+15KP+10UK+20VT	0,27	0,33	0,49	0,81	1,45



Şekil 7.73. Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen örneklerdeki ağırlık kaybı (180 gün).



Şekil 7.74. MgSO₄ çözeltisinde bekletilen örneklerdeki ağırlık kaybı (180 gün).

Deneysel sonuçlara göre deney süresinin artması ile harçlarda ortaya çıkan ağırlık kaybı artmıştır. Öyle ki 180. günde ölçülen ağırlık kayıpları 60. günün yaklaşık dört katı civarındadır. Örneklerde ortaya çıkan ağırlık kayıplarının yanı sıra yoğun olarak çatlama türünde de hasarlar gözlenmiştir (Şekil 7.75).



Şekil 7.75. Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilisinde bekletilen örneklerde ortaya çıkan hasarlar (180 günlük K1, K2, K4, K5 örnekleri).

İlgili çizelge ve şekillerden görüleceği üzere her iki kimyasal madde deneyinde de çimentoda KP miktarının % 10'dan % 15'e çıkması ile % 25-50 arasında bir ağırlık kaybı artışı ortaya çıkmaktadır. Bu kil pestilinin harcın dayanıklılığını olumsuz etkilediğinin işaretidir. Ç+KP karışımına puzolan ilavesi ile ağırlık kayıplarında azalmalar ortaya çıkmaktadır. Ağırlık kayıpları, puzolan miktarının artması ile yaklaşık olarak doğru orantılı bir şekilde azalmaktadır (Binici and Aksoğan, 2006). % 30 puzolan kullanımında ağırlık kaybındaki azalma maksimumdur. Sonuç olarak puzolanlar harçların kimyasal etkenlere karşı dayanıklılığını artırmıştır.

Kullanılan kimyasal madde türünün dayanıklılık deney sonuçları üzerine etkisine bakıldığında MgSO_4 'ün Na_2SO_4 'den daha etkin olduğu görülmektedir.

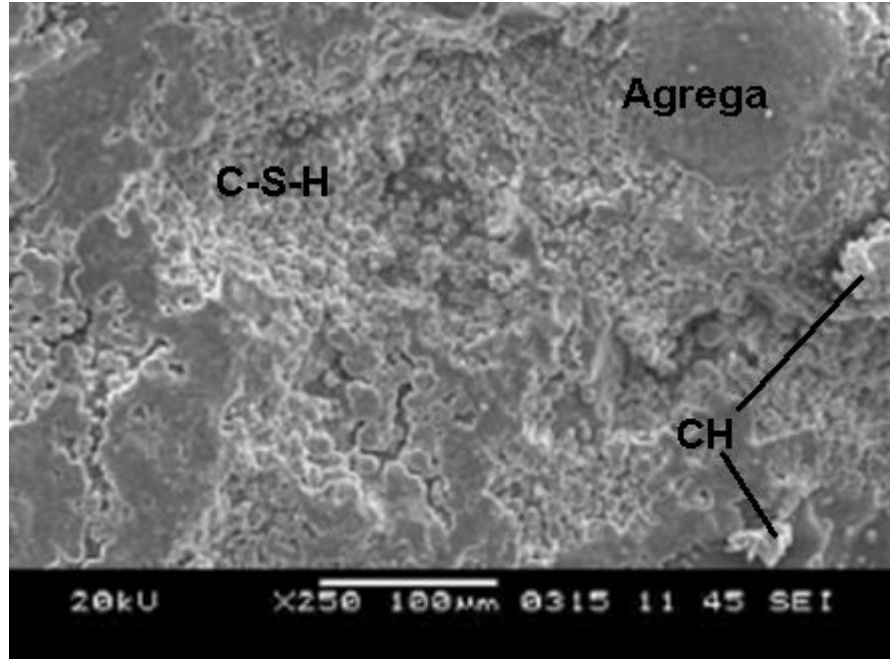
MgSO₄ çözeltisinde 180 gün bekletilen örnekler ortalama olarak % 30 daha fazla ağırlık kaybı göstermiştir. Bu durum MgSO₄'ün genleşme etkisi yanında çimentonun CSH jellerini çözmesi sonucu ortaya çıkan bir durumdur (Mindess and Young, 1986; Al- Dulaijan et al., 2003; Erdoğan , 2004)

Diğer deney sonuçlarında UK ile VT arasında görülen fark burada da görülmüştür. Özellikle MgSO₄'a dayanım açısından UK katkısının VT' e göre daha iyi bir performans gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 7.73 ve 7.74). Bu durum KP'nin % 15 olarak kullanıldığı seride daha belirgindir.

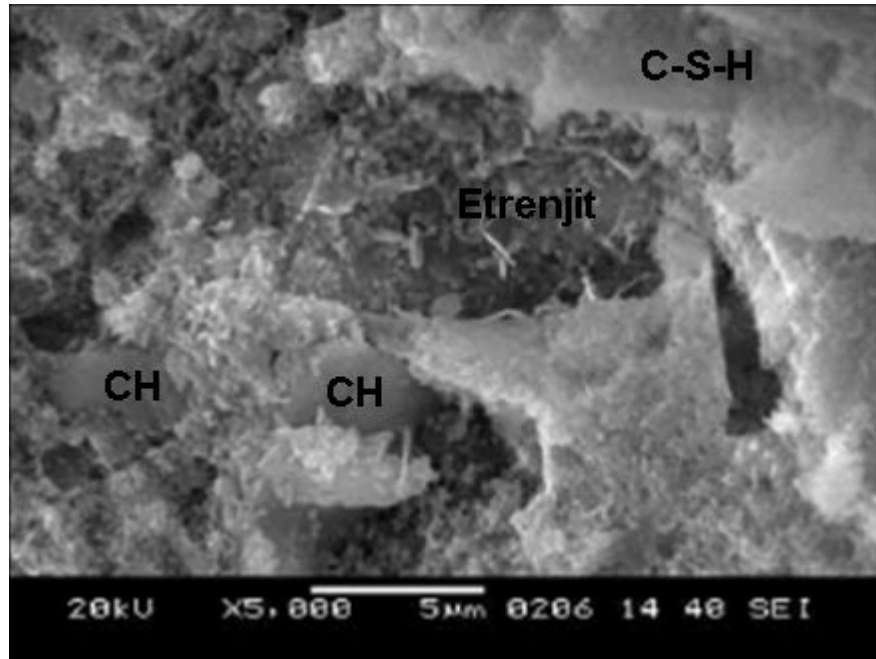
7.2.9. Taramalı elektron mikroskop (SEM) ile iç yapı incelemeleri

Çalışma kapsamında üretilen puzolanlı ve puzolansız bazı örneklerin hidrasyon ve alkali silis reaksiyonları ile sülfat etkisi sonucu iç yapılarında ortaya çıkan değişimleri anlayabilmek için SEM analizi ile mikrografileri çekilmiştir. Bu mikrografilerde çimento, kil pestili ve puzolanlar arasında ortaya çıkan tepkimeler sonucu oluşan hidrasyon ürünleri (C-S-H ve CH), ASR sonrası iç yapıda ortaya çıkan genleşme sonuçları ve dayanıklılık deneyleri sırasında sülfat etkisine maruz kalan örneklerde ortaya çıkan etrenjit yapısı ve gelişimi görülmüştür.

Şekil 7.76'da birinci deneysel çalışma kapsamında üretilen U1 ve V1 örneğine ait bir mikrografi görülmektedir. 250 büyütme bu mikrografiden görüleceği üzere C-S-H ve CH yapısı kabaca da olsa görülmektedir. Şekil 7.77'de ise bu yapının 5000 büyütme mikrografisi verilmiştir. Burada hidrasyon ürünü C-S-H ve CH yapısı ile agrega ve C₃A'nın jips ile reaksiyonu sonucu ortaya çıkan çok az miktardaki etrenjit yapısı görülmektedir.

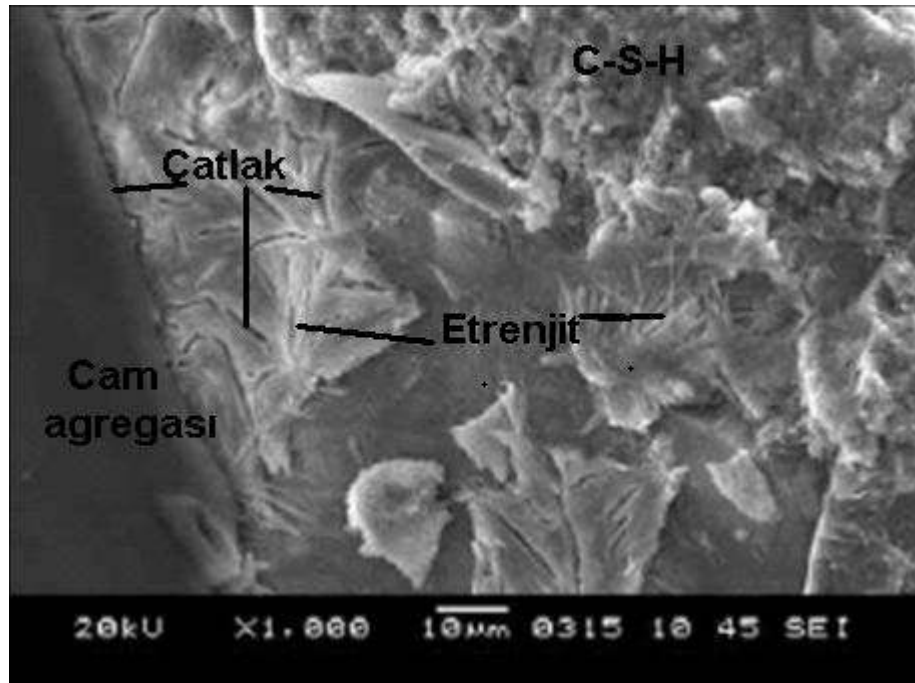


Şekil 7.76. U1 ve V1 örneğine ait 250 büyütme bir mikro yapı.



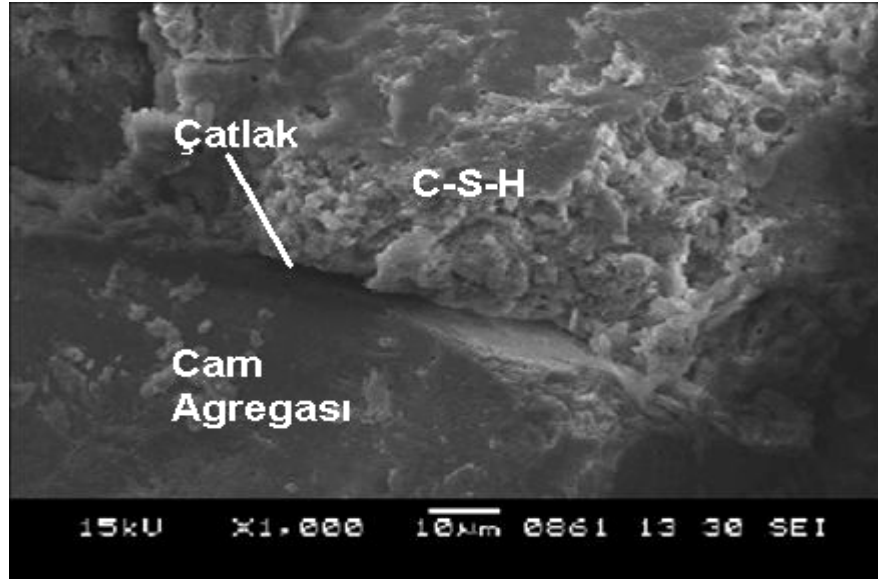
Şekil 7.77. U1 ve V1 örneğine ait 5000 büyütme bir mikro yapı.

ASR deneyi uygulanmış örnekler (Şekil 7.78, 7.79 ve 7.80) üzerinde yapılan çalışmalarda ise değişik bulgular saptanmıştır. Bileşim içeriği ve oranlarına göre örneklerde farklı bulgular saptanmıştır. Şekil 7.78 bu çalışmalardan birini göstermektedir. K1 örneğine ait 1000 büyütme bu mikrografiden görüleceği üzere 14. gün sonunda C-S-H yapısında genleşmeler nedeniyle yoğun olarak çatlaklar görülmektedir. Yine cam agregası ile C-S-H arayüzeyinde de kalın bir çatlak vardır. Bu veriler ASR deneyi sonuçlarında ortaya çıkan bu örneğin ASR riski taşıdığı sonucunu desteklemektedir.



Şekil 7.78. K1 örneğine ait 1000 büyütme mikrografisi.

Şekil 7.79’da ise K3 örneğine ait mikrografisi verilmiştir. 1000 büyütme mikroyapı incelemesinden de görüleceği üzere K1 örneğinin aksine burada genleşme çatlakları görülmemektedir. Sadece cam agregası ile C-S-H yapısı arayüzeyinde oluşan genleşme sonucu bir çatlak söz konusudur. K3 örneğinde % 20 oranında puzolan kullanılmıştır. Puzolanlar bilindiği üzere $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek Ca bileşenli alkali silika jellerinin oluşumunu önlerler (Baradan vd., 2002). 14 gün sonunda Çizelge 7.5’ten de görüleceği üzere ASR açısından zararsız bir genleşme söz konusudur.



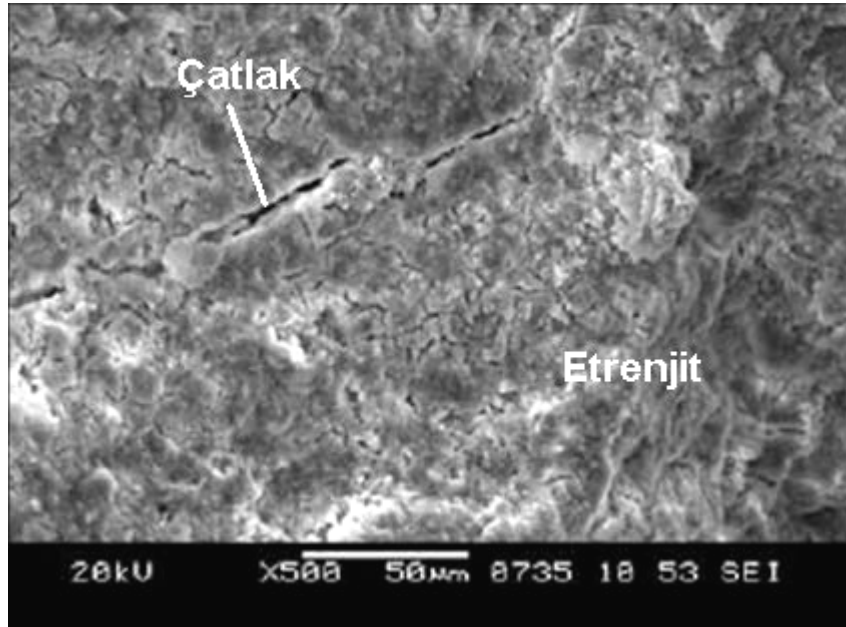
Şekil 7.79. K3 örneğine ait 1000 büyütme mikroskobu fotoğrafı.

Şekil 7.80'de ise K4 örneğine ait mikroskobu fotoğrafı verilmiştir. Örnekte % 20 puzolan içeriğinden dolayı genişleme ve çatlama oluşmamıştır. Mikroskobusundan da bu açıkça görülmektedir. 14 gün sonunda ASR deneyinden çıkan bu örnekte de yine Çizelge 7.5'ten de anlaşılacağı üzere ASR riski yoktur.



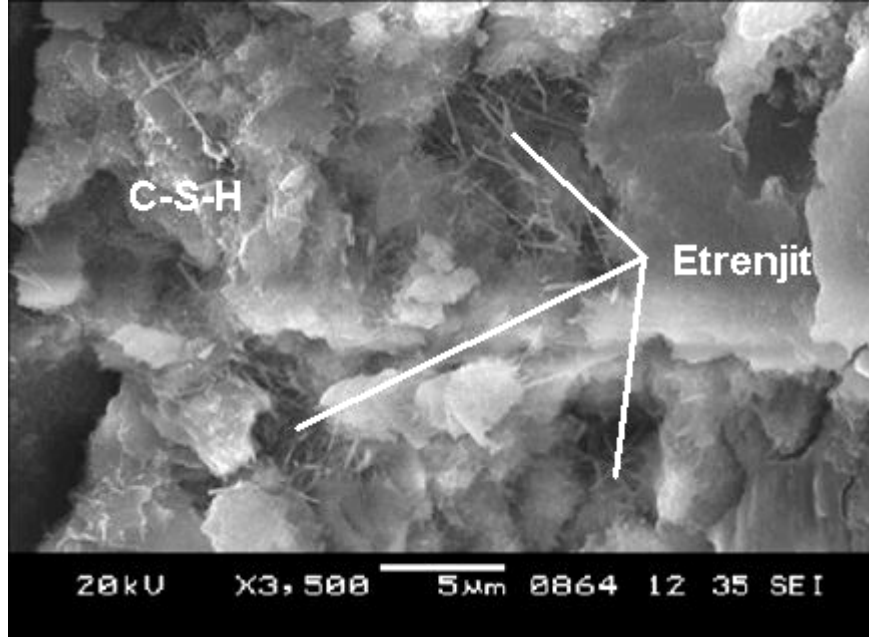
Şekil 7.80. K4 örneğine ait 1000 büyütme mikroskobu fotoğrafı.

Na_2SO_4 ile yapılan dayanıklılık deneyleri örneklerine ait mikrografi incelemeleri Şekil 7.81, 7.82, ve 7.83'te verilmiştir. Şekil 7.81'de Na_2SO_4 ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K1 örneği üzerinde 500 büyütme mikrografi verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere yapıda bütünüyle masif etrenjit oluşumu görülmektedir. Etrenjit, C-S-H kütlesini tamamamen sarmış ve yapıda yer yer yoğun çatlaklar görülmektedir. K1 örneği Çizelge 7.9'dan görüleceği üzere Na_2SO_4 ile yapılan dayanıklılık deneyinde ağırlık kaybının en yüksek olduğu bir örnektir.



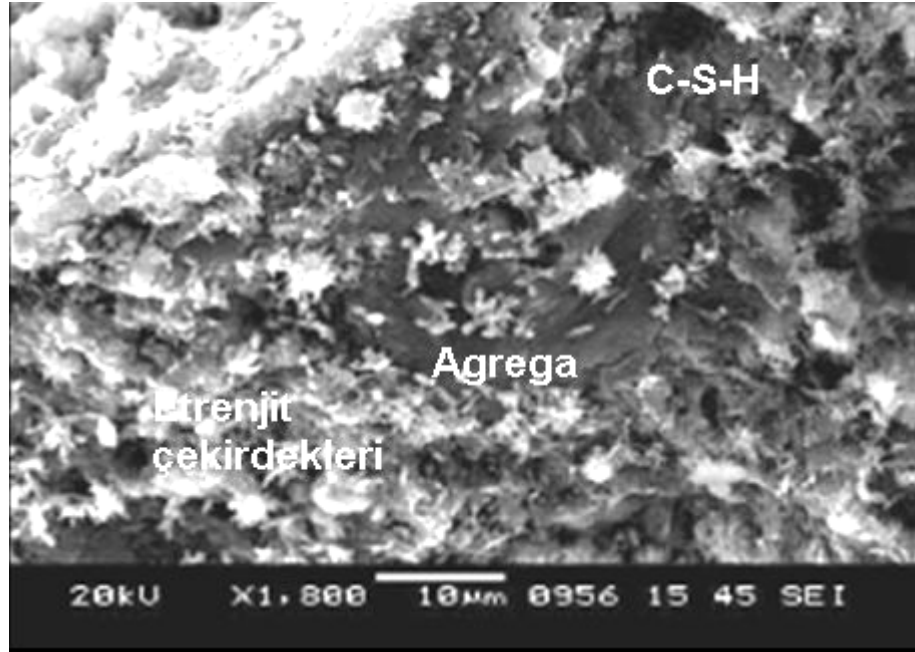
Şekil 7.81 Na_2SO_4 ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyi uygulanmış K1 örneği mikrografisi.

Şekil 7.82'de ise Na_2SO_4 ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K5 örneği mikrografisi verilmiştir. 3500 büyütme bu mikrografiden görüleceği üzere C-S-H yapısı aralarında ve yer yer üzerinde yoğun olmayan bir şekilde iğne şekilli etrenjit kristalleri mevcuttur. Aralarda top etrenjit oluşumları da dikkat çekmektedir. Bu mikrografi incelemesinde yoğun bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Çatlak daha kısa ve az sayıdadır.



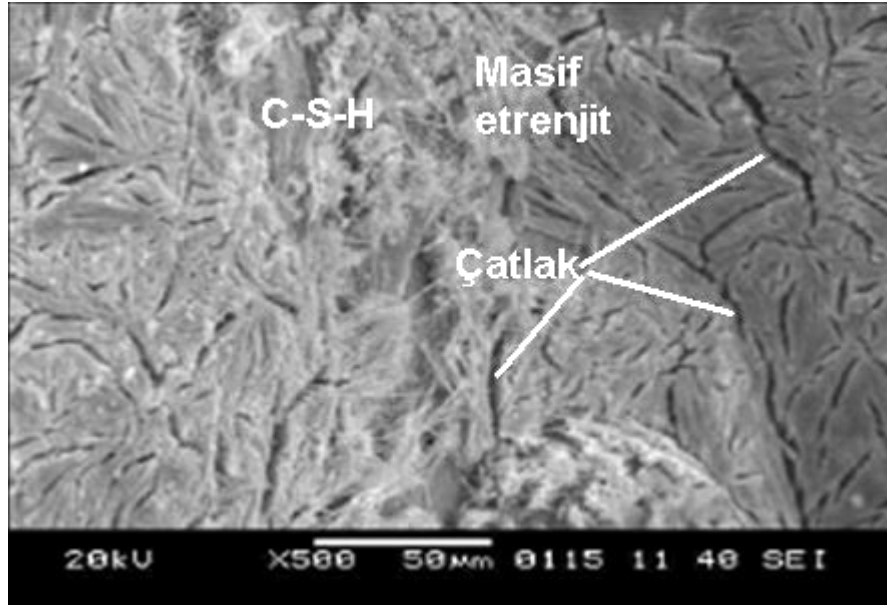
Şekil 7.82 Na_2SO_4 ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyi uygulanmış K5 örneği mikrofrafisi.

Şekil 7.83'te ise Na_2SO_4 ile yapılan 60 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K4 örneği mikrofrafisi verilmiştir. 1000 büyütme bu mikrofraftan görüleceği üzere C-S-H yapısı aralarında etrenjit çekirdekleri ve etrenjit kristalleri mevcuttur. Mikrofraftan görüleceği üzere burada 60 gün içerisindeki tepkimeler sonucu ortaya çıkmış etrenjit kristalleri ve yeni oluşmakta olan etrenjit çekirdekleri bulunmaktadır. Yapılan incelemede etrenjit kristallerinin yoğun olmadığı, buna karşılık etrenjit çekirdeklerinin ise daha yoğun olduğu görülmüştür. Bu durum sülfat reaksiyonunun gecikmesi ya da oluşmasının engellenmesi olarak da yorumlanabilir



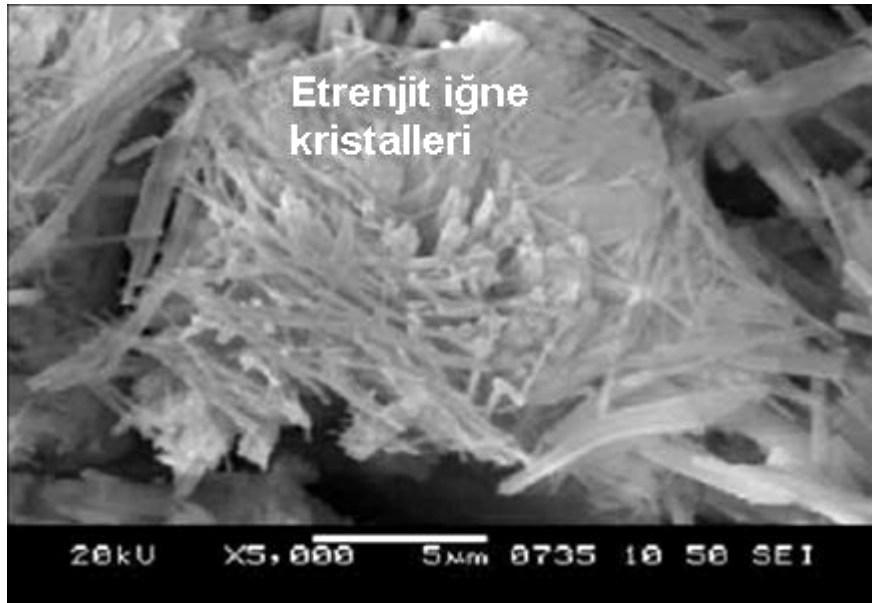
Şekil 7.83. Na_2SO_4 ile yapılan 60 günlük dayanıklılık deneyi uygulanmış K4 örneği mikrofrafisi.

MgSO_4 ile yapılan dayanıklılık deneyleri örneklerine ait mikrofrafî incelemeleri Şekil 7.84, 7.85, ve 7.86'da verilmiştir. Şekil 7.84'de MgSO_4 ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K1 örneği üzerinde 500 büyütme mikrofrafî verilmiştir. Bu mikrofrafiden görüleceği üzere C-S-H yapısı üzerinde bütünüyle yer kaplamış masif bir etrenjit yapısı söz konusudur. Bu yüzeye yoğun bir çatlak oluşumu hakimdir. Bu daha önce belirtilen ve MgSO_4 'ın Na_2SO_4 'dan daha farklı bir sülfat etkisi vardır tezini de doğrulamaktadır (Bölüm 7.2.8). Çünkü buradaki çatlak morfolojisi Na_2SO_4 ile yapılan Şekil 7.81'de verilen örneğe göre daha farklıdır. Ayrıca hem çatlaklar daha yoğundur hem de etrenjit bütünü sarmıştır. Aralarda yer yer kireç oluşumları ve top etrenjit yapısı da fark edilmektedir.



Şekil 7.84. MgSO₄ ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K1 örneği mikrofrafisi.

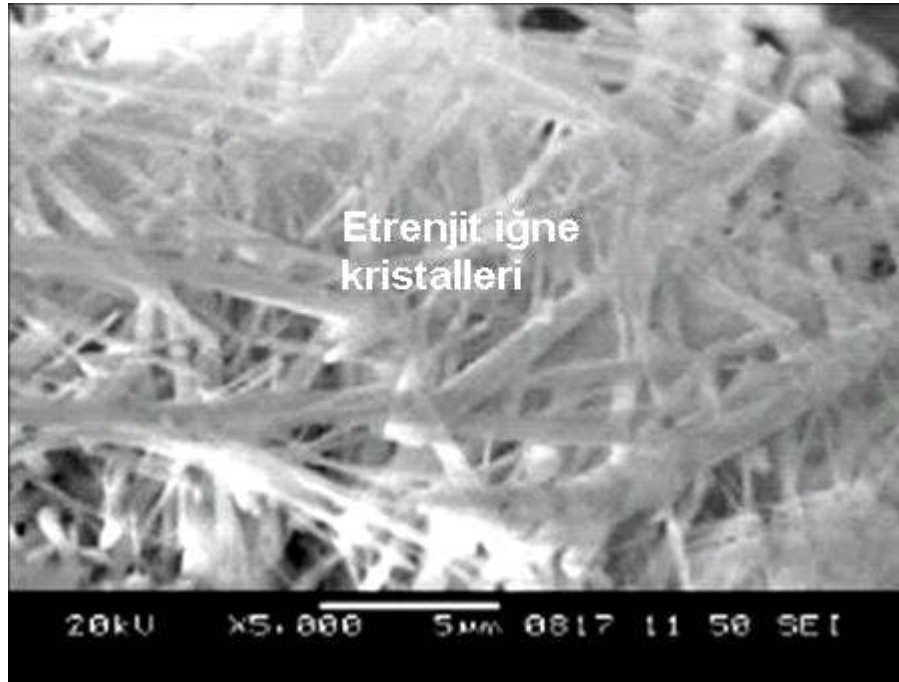
Şekil 7.85’de ise MgSO₄ ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K5 örneği üzerinde 5000 büyütme mikrofrafisi verilmiştir.



Şekil 7.85. MgSO₄ ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyi uygulanmış K5 örneği mikrofrafisi.

Şekil 7.85'den görüleceği üzere mikrografide açılmış bir top etrenjit ve içerisinde iğne kristali şeklinde etrenjit yapısı görülmektedir. Etrenjit oluşumu tüm yapıyı sarmıştır. Daha az bir büyütme ile yapılacak bir incelemede büyük olasılıkla masif etrenjit oluşumlarına raslanacaktır.

Şekil 7.86' de ise $MgSO_4$ ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K4 örneği üzerinde 5000 büyütme mikrografisi verilmiştir. Bu mikrografiden görüleceği iğne şekilli yoğun bir etrenjit yapısı sözkonusudur. Mikrografinin üst sağ köşesinde top etrenjit yapısı da gözükmemektedir. Buradaki etrenjit oluşumları daha kalındır. Aradaki siyah boşluklar kireç oluşumlarıdır.



Şekil 7.86. $MgSO_4$ ile yapılan 180 günlük dayanıklılık deneyinden çıkmış K4 örneği mikrografisi.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, tıncal üretimi sırasında ortaya çıkan ve kil pestili olarak adlandırılan malzemenin çimento, harç ve dolayısıyla beton içerisinde verimli bir ölçüde değerlendirilebilirliğinin çimentolu sistemlerde KP ile birlikte puzolan kullanılması durumunda olası olduğu anlaşılmıştır. Gerek atık probleminin çözümüne yardımda bulunmak ve gerekse de teknik özellikleri yüksek ve daha ekonomik bir çimento etmek bakımından çalışma sonuçları itibari ile faydalı olmuştur.

Özellikle çevre ve insan sağlığı için doğaya verilmesinde sakınca olan KP gibi atıkların endüstride herhangi bir amaçla değerlendirilmesi dünyanın geleceği bakımından da umut verici bir gelişmedir. Yapılan çalışmada KP gibi bir atık malzemenin çimentoda önemli bir oranda kullanılmasını sağlamak için puzolanlardan yararlanılmıştır. Bilindiği üzere puzolanlar hidrasyon ürünü serbest kireçle tepkimeye girdiğinde çimentodaki gibi C-S-H jelleri oluşturan bağlayıcı malzemelerdir. Bu malzemelerin klinkerin aksine pişirilmeden sadece öğütülerek çimentoya verilmesi çimento üretiminde ciddi anlamda ekonomik bir tasarruf yaratmakta diğer yanda ise üretim sırasında ortaya çıkan ve çevre sorunlarına yol açan CO₂ emisyonunun düşmesine yol açmaktadır. Bütün bu olumlu kazanımlara çimentonun teknik özelliklerinde ortaya çıkan bazı olumlu gelişmeleri de eklersek yapılan çalışmanın yararlı olduğu görülecektir.

Günümüzde TSE tarafından kabul edilen yeni çimento standartları incelendiğinde; çimento içerisinde çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini olumsuz etkilemeyen her türlü mineral katkı malzemesinin kullanılmasının mümkün olduğu görülecektir. Bahsedilen yeni çimento standartlarında aynı cins çimentoda birden fazla katkı kullanımı öngörülmektedir. Bu durum mineral katkı kullanımını teşvik etmekten çok teknik özellikleri birbirinden farklı çimentoların elde edilmesine yönelik bir tutumdur. Burada amaç çimentoyu teknik özelliklerinde herhangi bir olumsuzluk olmadan daha ekonomik olarak elde etmektir. Gerçekleştirilen bu çalışmada

kullanılan KP, UK ve VT gibi atık malzeme ve puzolanlar dikkate alındığında ve ortaya çıkan teknik sonuçlar değerlendirildiğinde elde edilen çimentoların TS EN 197-1’de tanımlanan CEM II Kompoze ve CEM IV Puzolanik çimentolarına uyarlık gösterdiği görülecektir. Yalnız burada KP atık malzemesi puzolanik karakter taşımadığı için beş tip ana çimento için tanımlanan ve % 5 oranında kullanılması önerilen minör bileşen sınıfında değerlendirilebilir. Yapılan çalışmada KP atık malzemesinin stoklanması yaratacağı çevresel tehditler ve ekonomik maliyet dikkate alınarak daha aktif puzolanların kullanılması ile birlikte bu oran % 10, 15’lere çıkarılmıştır. Elde edilen teknik sonuçlar bunun olabileceği yönündedir.

Çalışma sonuçları açısından özetlenirse;

1. Boraks içeren kil pestili atık malzemesi puzolanik aktivitesi yüksek mineral katkı maddeleri ile çimento içerisinde % 10 hatta % 15 oranında kullanılabilir. Kil pestili atık malzemesi puzolanik bir karakter taşımadığı için mineral katkı maddesi olarak kullanılacak puzolanların puzolanik aktivitelerinin yüksek olması gereklidir. Bu durum kil pestili kullanımından ileri gelebilecek teknik olumsuzlukları azaltıp önlemeye yöneliktir.

2. Yapılan deneysel çalışmalar, kil pestilinin çimentonun dayanım özelliklerinde herhangi bir olumsuzluk yaratmadan ancak % 5 oranında kullanılabilceğini göstermiştir. Bu oranın üzerinde kil pestili kullanılması durumunda çimento dayanımında ciddi oranda azalmalar ortaya çıkmaktadır. Kil pestili atık malzemesinin puzolanik aktivitesinin olmaması dayanımdaki bu azalmanın esas nedenidir. Bu oranının üzerinde kil pestili kullanımı ancak puzolanik aktivitesi yüksek bir ya da birkaç mineral katkının birlikte kullanılması ile mümkün olabilmektedir.

3. Deneysel sonuçlar kil pestili atık malzemesinin % 10-15 oranında kullanılması durumunda en yararlı puzolan kullanım oranının % 20 olduğunu göstermiştir. Bu oranının üzerinde (% 30) puzolan kullanılması durumunda çimentonun özelliklerinde % 20 puzolan kullanım oranına göre bazı olumsuzluklar ortaya çıksa da

elde edilen sonuçlar kullanılan çimento özellikleri (referans) ile karşılaştırıldığında çok önemli olmadığı sonucuna varılmıştır.

4. Sabit % 10 ve % 15 kil pestili kullanım oranında, kullanılan puzolan oranının artması ile çimento özellikleri doğru orantılı olarak priz süresi dışında iyileşmektedir. Priz süresi ise kullanılan katkı maddesi (KP+puzolan) ile doğru orantılı olarak uzamaktadır.

5. Özellikle ikinci deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler dikkate alındığında yüksek oranda (% 10-15) kil pestili atık malzemesi kullanılması durumunda bile elde edilen çimentoların teknik özelliklerinde priz süresi deneyi hariç herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Elde edilen priz başlangıç ve bitiş süreleri TSE standartlarına uygun olmakla birlikte kullanılan çimentonun priz sürelerine göre daha geçtir.

6. Deneysel sonuçlar, % 10-15 kil pestili içeriğinde ve % 20-30 puzolan kullanım oranında basınç ve eğilmede çekme dayanımının arttığını, alkali silika reaksiyonu riskinin azaldığını, çimento iç yapısının olumsuz olarak etkilenmediğini, sülfat etkisine karşı dayanıklılığın arttığını, hacimsel kararlılığın korunduğunu göstermiştir. Bununla birlikte gerek atık malzemeninin depolama riski ve maliyeti açısından ve gerekse de çimento ekonomisi bakımından belirlenen oranda (% 10-15) kil pestili atığı ve puzolan (% 20) kullanılmasında yarar vardır. Üretim sırasında CO₂ emisyonunu düşürmesi ve pişirmeden sadece öğütülerek klinkere katılması nedeniyle atık katkılı çimentoların üretim maliyeti de daha düşük olacaktır.

7. Kil pestili ve puzolanların kullanılması ile priz başlangıç ve bitiş sürelerinde meydana gelen uzama koşullara göre çimentolu sistemler için bir avantaja da dönüşebilir. Özellikle sıcak bölgelerdeki harç ya da beton uygulamalarında, soğuk derzin önlenemediği durumlarda ve betonun uzun süre taşınmasının gerektiği hallerde çimento, harç ya da beton içerisinde kil pestili atığı ya da kil pestili atık malzemesi katkılı çimento kullanılabilir. Kil pestili atık malzemesi, priz geciktirici özeliği

nedeniyle çimento üretiminde; çimentoya priz düzenlemek için katılan alçıtaşı yerine de kullanılabilir.

8. İkinci deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen deney sonuçları, bu araştırmada uçucu külün volkanik tüften daha iyi bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum uçucu külün puzolanik aktivitesi ve fiziksel özellikleri ile ilgilidir.

Çalışma sonuçları açısından faydalı olup geliştirilmeye uygundur. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki daha önce kiremit ve tuğla gibi farklı yapı malzemeleri içerisinde değerlendirilen boraks içeren kil pestili atık malzemesi harç ve beton içerisinde farklı puzolanlar ile birlikte çimentolu bağlayıcılarla kullanılabilir.

BÖLÜM 9

KAYNAKLAR DİZİNİ

ACI 232. 1R-00, 2004, Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete, Concrete Institute, Detroit, USA.

ACI 232.2R-03, 2004, Use of Fly Ash in Concrete, Amerikan Concrete Institute, Detroit, USA.

Akman, M.S., 1999, Betonlarda alkali silika reaksiyonunun fiziko kimyası, hasar düzeyi, önlem ve onarım süreçleri, SİKA Teknik Bülteni, 1999, İstanbul.

Akman, M.S., 2005, Kimyasal beton katkılarının gelişimi ve çimentolarla uyumu, Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu I, TMMOB, KMO-İMO, Ankara.

Al-Dulaijan, S.U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M.M., Sharif, A.M., Shammeem, M. and İbrahim, M., 2003, Sulfate resistance of plain and blended cementsexposed to varying concentrations of sodium sulfate, Cement and ConcreteComposites 25, 429-437.

ASTM C 125, 2002, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, USA.ASTM C 1260, 2002, Standart Test Methods for Potential Alkali Reaktivty of Aggregates (Mortar - Bar Methods), Annual Book of ASTM Standards, USA.

ASTM C 311, 1994, Standart Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash for Natural Pozzolans for Use a mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, USA.

ASTM C 597, 1997, Test for Pulse Velocity Through Concrete, Concrete, Annual Book of ASTM Standards, USA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

ASTM C 618, 1991, Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement, Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, USA.

ASTM C 989, 2002, Standard Specification for Ground Iron Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars, *Annual Book of ASTM Standards*, USA.

ASTM C 1260, 2002, Standard Test Methods for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar – Bar Methods), *Annual Book of ASTM Standards*, USA.

Aşık, İ., Şen, H., Ergintav, Y., Ünsal, A., Şentürk, E. ve Bayrak, E., 2004, Alkali agrega reaksiyonu yönünden zararlı olan bir ocağın iyileştirilmesi, Beton Sempozyumu, İstanbul.

Atakay, O., 2006, Uçucu Küllerin Çimento Üretiminde Kullanılması – Tane İnceliği ve Katkı Miktarının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Ayyıldız, G., 2003, Borun Harçta Kullanılması, Yapı Lab. Projesi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., 2002, Betonarme Yapılarda Kalıcılık, DEÜ Müh. Fak. Yayınları, Yayın no: 298, İzmir.

Bayar, D., 2001, Sulu Çözeltiden Adsorbsiyonla Bor Giderimi ve Deney Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Bazant, Z.P., Zi, G. and Meyer, C., 2000, Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different Sizes, Journal of Eng. Mechanics, 126, 226 - 232.
- Binici, H. and Aksoğan, O., 2006, Sulfate resistance of plain and blended cement, Cement and Concrete Composition, 28, 39 - 46.
- Boncukoğlu, R., Yılmaz T.M., Kocakerim, M.M. and Tosunoğlu, M., 2002, Utilization of trommel sieve waste as an additive in portland cement production, Cement and Concrete Research, 32, 35 - 39.
- Boncukoğlu, R., Yılmaz T.M., Kocakerim, M.M. and Tosunoğlu, M., 2001, Utilization of borogypsum as set retarder in portland cement production, Cement and Concrete Research, 32, 471- 475.
- Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M.M., Sümer, M. and Yurdusev, M.A., 2004, Use of zeolite, coal bottom ash and fly Ash as replacement materials in cement Production , Cement and Concrete Research, 34, 731–735.
- Davraz, M. ve Gündüz, L., 2004, Doğal amorf silikanın ASR gelişimine etkisi, Beton 2004 Sempozyumu, İstanbul.
- Derun, E. M. ve Pişkin, M.B., 2006, Endüstriyel borik asit atıklarının Ham perlit agregalı hafif beton üretiminde değerlendirilmesi, Hazır Beton, 73, İstanbul.
- DPT, 1995, Kimya Sanayi Hammaddeleri, Devlet Planlama Teşkilatı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, DPT: 2414, Ankara.
- DPT, 1996, Bor Bileşikleri Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Devlet Planlama Teşkilatı Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Raporu,

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

DPT:2427, Ankara DPT, 2001, Kimya Sanayi Hammaddeleri, Devlet Planlama Teşkilatı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, DPT: 2608, Ankara.

DSİ, 1976, Simav Çayının Boraks Madeni Atık Suları ile Kirlenmesinin Kontrolü, TAKK, Ankara.

DSİ, 1983, Kırka Yöresi Bor Kirliliği Araştırması, DSİ, No: 9, Ankara.

Ediz, N., 1999, Borlu Suların Arıtılmasında Tek Kademeli Çözme Helezonu Kullanımı, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Ediz, N. ve Topçu, İ.B., 1995, Kırka boraks tesis atıklarının tuğla malzemesi olarak kullanımı, İMO, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sanayinde Kullanımı Sempozyumu, Ankara.

Elbeyli, İ.Y., 1997, Boraks ve Borik Asit Üretiminde Ortaya Çıkan Katı Atıkların Çimento Sanayinde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Erdoğan, T.Y., 1977, Admixtures for Concrete, METU Pres, Ankara.

Erdoğan, T.Y., 1995, Çimentolar: Betonlu Oluşturan Malzemeler, THBB yayını, Ankara

Erdoğan Y. ve Zeybek, A., 1996, Kolemanit konsantratör atıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilmesi, UKMK-2, İstanbul.

Erdoğan, T.Y., 2003, Beton, METU Press, Ankara.

Erdoğan, T.Y., 2004, Beton Malzemeleri, THBB, 2004, İstanbul.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Erdoğan, Y., Olgun, A., Özmal, F. ve Zeybek, B., 2004, Utilization of boron industry wastes, fly ash, bottom ash and alunite mineral in cement production as an additive material, 2. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye, 455 – 462.
- Erdoğan, K., Tokyay ve M., Türker, P., 2003, Traslara ve Traslı Çimentolar, TÇMB/ARGE/ Y99-02, Ankara.
- Erdoğan, E., Yılmaz , B., Erdoğan, Y. ve Avcıata, 2004, U., Sodyum karbonatın kolemanit atığı + karabük cürufu katkılı portland çimentosunun mekanik özellikleri üzerine etkisi, 2. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye, 425 – 430.
- Englert, A.H. and Rubio, J., 2005, Characterization and environmental application of chilean natural zeolite, International Journal of Mineral Processing, Vol. 75, 21-29.
- Genç, H., Ayas, A.P. and Yaylı, N., 1997, Protecting environment: evaluation techniques for waste mud produced by boric acid and barox factories, Journal of Qafqas University, 1, (1), 34-42.
- Ghrici, M., Kenai, S. and Mansour, M.S., 2007, Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended Cements, Cement and Concrete Composites 29.
- Karacasu, M., Koyuncu, H., Bakış, L., Taşpolat, T. ve Yılmaz, G., 2004, The use of borax, sepiyolite, zeolite, waste merrschau and contaminated river Sediment in asphalt concrete mixtures, 2. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye, 441-448.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Karakurt, C., 2008, Çimento Üretiminde Doğal Zeolit ve Volkanik Tüflerin Endüstriyel Atıklarla Birlikte Kullanılmasının Beton Performansı Üzerine Etkileri, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 179 s.
- Kavas, T., 1997, Seydişehir Kırmızı Çamuru ve Kırka Bor Atıkları Kullanılarak Kaliteli Yapı Malzemesi Üretim İmkanlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, A.K.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Kavas, T., Olgun, A., Erdoğan, Y. ve Önce, G., 2007, The effect of pectin on physicochemical and mechanical properties of cement containing boron, *Building and Environment*, 42, 138 – 147.
- Kıpçak, İ., 2004, Bor Endüstrisi Katı Atıklarından Borun Katı-Sıvı Özütleme İle Geri Kazanılması ve Katı Atıkların Seramik Üretiminde Kullanılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- KMO, 2003, Bor Çalışma Gurubu, Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, TMMOB Kimya Mühendisliği Dergisi, Ekim/Kasım, Sayı: 164–165, Ankara.
- Köseoğlu, K. ve Bayça, S.U., 2002, "Döküm çamuruna % 10-20 kolemanit ve üleksit atıkları ilavesinin viskozite ve mukavemet özellikleri üzerine etkileri", I. Uluslararası Bor Sempozyumu, Kütahya.
- Kula, I., Olgun, A., Sevinç, V. and Erdoğan, Y., 2002, An investigation on the use of tinkal ore waste, fly ash and coal bottom ash as portland, cement replacement materials, *Cement and Concrete Resarch*, 32, 227-232.
- Lane, R.O. and Best, J.F., 1982, Properties and use of fly ash in portland *cement* concrete, *Concrete International*, ACI, 81-92.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Liebig, E. and Althaus, E., 1998, Pozzolanic activity of volcanic tuff and suevite: effect of calcination, *Cement and Concrete Research*, 28,. 4, 567– 575.
- Maden Yasası 2002, TBMM Plan Bütçe Komisyonu, TBMM, Ankara.
- Mehta, P.K., 1985, *Concrete*, Prentice – Hall Inc., New Jersey, USA.
- Mindess, S. and Young, J.F., 1986, *Concrete*, Prentice – Hall Inc., New Jersey, USA.
- MTA, 1965, *Türkiye Borat Yatakları*, MTA Enstitüsü Yayınları, Ankara.
- Neville, A.M., 1986, *Properties of Concrete*, 3rd Edition, Longman Group Limited, England .
- Neville, A.M. and Brooks, J.J., 1987, *Concrete Technology*, Longman Group Limited 285, England.
- Olgun, A., Kavas, T., Erdoğan, Y. and Once, G., 2007, Physico-chemical characteristic of chemically activated cement containing boron, *Building and Environment*, 42.
- Othmer, K., 1978, *Rzynaelopatie of chemical technology*, 2.rd Edition, long Wiloy and Song, New York.
- Önem, Y. , 2000, *Sanayi Madenleri*, 2. Basım, Kazan Ofset, Ankara
- Özdemir, M. and Öztürk, N.U., 2003, Utilization of clay waste containing boron as cement additives, *Cement and Concrete Composites*, 33, 1659-1661.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Postacıoğlu, B., 1986, Beton: Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Cilt 1, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.
- Rand, M.C., Agnold., E. and Michael, J., 1975, Standart Methods, American Public Health Association, 14 th Edition , Washington , USA.
- Sarız, K. ve Nuhoğlu, İ., 1992, Endüstriyel Hammadde Yatakları ve Madenciliği, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Shannag, M.J. and Yeğinobalı, A., 1995, Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan, Cement and Concrete Resarch 25, 647-657.
- Siddique, R., 2004, Performance characteristic of high-volume class F fly ash concrete, Cement and Concrete Resarch 34, 487- 492.
- Sideris, K.K., Sava, A.E. and Papayianni, J., 2006, Sulfate resistance and carbonation of plain and blended cements, Cement and Concrete Composites 28, 563 -573.
- Sümer, G., 2003, Bor Bileşikleri, TMMOB Kimya Mühendisliği Dergisi, Ekim/Kasım, sayı:164-165, Ankara.
- Şahmaran, M., Kasap, O., Duru, K. and Yaman, I.O., 2007, Effects of mix composition and water - cement ratio on the sulfate resistance of blended cements, Cement and Concrete Composites 29,159-167.
- Taner, C.V. and Sparks, L.D.,1995, Chemical relaxation and double layer model analysis of boron adsorption on alumino, Soil Science Society of America Journal , 59, 395-404.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Targan, Ş., 2001, Kula Cürufu ve Bentonit ile Termik Santral ve Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Targan, Ş., Olgun, A., Erdoğan, Y. and Sevinç, V., 2002, Effects of supplementary cementing materials on the properties of cement and concrete, *Cement and Concrete Research* 32, 1551- 1558.
- Targan, Ş., Olgun, A., Erdoğan, Y. and Sevinç, V., 2003, Influence of natural puzzolan, colemanite ore waste, bottom ash and fly ash on the properties of portland, cement and concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 1175-1182.
- Tokyay, M., 1993, Betonda uçucu kül kullanımı (Türkiye deneyimi), Endüstriyel Atıkların İnşaat sektöründe Kullanılması Sempozyumu I, TMMOB/İMO, Ankara.
- Tonak, T. ve Sarıkaya, Y., 1999, Bor minerallerinin çimento üretiminde kullanılması, *Çimento ve Beton Dünyası*, 3,19, 65-73.
- Topçu, İ.B., 2006a, Yapı Malzemeleri ve Beton, Eskişehir.
- Topçu, İ.B., 2006b, Beton, TMMOB İMO Eskişehir Şubesi, 2, Eskişehir.
- Topçu, İ.B. ve Boğa, A. R., 2006, Uçucu küllü betonlarda donatı korozyonunun hızlandırılmış yöntem ile araştırılması, 3. Yapı Malzemesi Kongresi, Antalya, 132- 143.
- Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., 2001, Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri, *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Dergisi*, 14, 11–21.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Topçu, İ. B. and Karakurt, C., 2007, Effect of different industrial wastes and natural pozzolans on cement properties, TÇMB, 3rd International Symposium Sustainability in Cement and Concrete, İstanbul, 179–189.
- Tosun, K., Yazıcı, H., Yiğiter, H., Baradan, B., 2003, Uçucu kül içeren çimento harçlarının sülfat dayanıklılığının incelenmesi, 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 17- 26.
- Troxell, E.G., Davis, E.H. and Kelly, J.W., 1979, Composition and Properties of Concrete, 2nd Edition, Mc Graw - Hill Book Company, New York.
- TS 25, 1975, Tras, TSE, Ankara.
- TS 26, 1992, Çimentolar, Traslı, TSE, Ankara.
- TS 639, 1975, Uçucu Küller, TSE, Ankara.
- TS 819, 1976, Rilem Cembureau Standart Kumu, TSE, Ankara.
- TS 1247, 1984, Beton Yapım, Döküm ve bakım Kuralları, TSE, Ankara
- TS EN 196-1, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 196-2, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, TSE, Ankara.
- TS EN 196-3, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini, TSE, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- TS EN 197 – 1, 2002, Genel Çimentolar-Bölüm I: Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
- TS EN 450, 1998, Uçucu Kül-Betonda Kullanılan- Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, TSE, Ankara.
- TS EN 1008, 2004, Beton Karma Suyu, TSE, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., 2007, Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, TÇMB/ARGE/Y03.03, Ankara
- Turanlı, L., 1995, Effect of Natural Pozzolan Addition on Properties of Portland Pozzolan Cements and the Concretes Made With Those Cements, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, 152 s.
- Turanlı, L., Uzal, B. and Bektaş, F., 2005, Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements, Cement and Concrete Research, 35, 1106-1111.
- Tsivilis, S., Kakali, G., Sakaropoulou, A., Sharp, J.H and Swamy, R.N., 2003, Use of mineral admixtures to prevent thaumasite formation in limestone cement mortar, Cement and Concrete Composites 25, 969-976.
- Uğurlu, A., 1993, Sulama Kanallarında Sülfat Problemi ve Çözüm Önerileri, DSİ TAKK, Ankara.
- Uğurlu, A., 1997, Farklı Çimentoların Basınç ve Çekme Dayanımı Yönünden Betondaki Davranışı, DSİ TAKK, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Uğurlu, A., 2004, Boraks Üretiminde Ortaya Çıkan Atık Malzemenin Çimento İçerisinde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Uğurlu A. ve Eser, Ö. F., 2008, Yüksek oranda uçucu kül içeren betonların özellikleri, THBB Beton 2008 Sempozyumu, İstanbul, 221-229.
- Ünsal, N., 2006, Jeoloji - İnşaat Mühendisleri için-, Alp yayınevi, 30, Ankara.
- Yeğınobalı, A.ve Ertün,T., 2004, Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar, TÇMB/ARGE/Y04.01, Ankara.
- Yetgin, Ş. and Çavdar, A., 2006, Study of effects natural pozzolan on properties of cement mortars, Journal of Materials in Civil Engineering, 54.
- Zeybek, M.S., 2000, Borlu Çimentoların Üretilmesi ve Nötron Tutma Kapasitelerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adapazarı.
- Xu, A. ve Sarkar, S.L., 1996, Uçucu kül ve uçucu külün bağlayıcı matrisdeki özellikleri, Concrete Technology for Developing Countries, Fourth International Conference, UK.

Ali Uğurlu

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı
06100, Yücepete/Ankara
Tel: (312)3992796 Fax: (312) 3992795

e-posta: aliugurlu@mynet.com

**Ali UĞURLU' nun ÖZGEÇMİŞİ**

1960 yılında Şanlıurfa'da doğdu. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya. Mühendisliği Bölümünden 1982 yılında mezun oldu. 1983 – 1987 yılları arasında özel sektörde ve Atatürk Barajı ve HES şantiyesinde çalıştı, 1987 yılından beri DSİ Genel. Md' lüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığında değişik görevlerde bulunmaktadır. Bir dönem TSE İnşaat Hazırlık Grubunda yarı zamanlı olarak bazı standartların hazırlanmasında görev aldı. DSİ tarafından yayınlanmış beton ile ilgili 8 kitabı ve araştırmaları vardır. 50 civarında bildiri ve makalesi yurt içi ve dışında çeşitli bilimsel dergilerde ve teknik kongre kitaplarında yayımlanmıştır. Yüksek lisans ve doktora eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesinde tamamlayan yazar evli ve iki çocuk babasıdır.