

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TRABZON YÖRESİ TÜFLERİNİN ÇİMENTODA TRAS OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİ, ÇİMENTO İNCELİĞİ VE TRAS ORANININ TRASLI
ÇİMENTONUN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

İnş. Müh. Ahmet ÇAVDAR

139102

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"İnşaat Yüksek Mühendisi"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.01.2004

Tezin Savunma Tarihi : 23.01.2004

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şükrü YETGİN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Şener CERYAN

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

Trabzon 2004

ÖNSÖZ

Trabzon yöresi tüflerinin çimentoda tras olarak kullanılabilirliği, tras inceliği ve katılım oranındaki değişimin çimento özelliklerine etkisinin incelendiği bu çalışmayla hem ülke bilimine hem de bölge ekonomisine katkılar sağlamayı amaçlamış bulunmaktayım.

Bu çalışma konusunu bana öneren, çalışmam sırasında kıymetli vakitlerini ve büyük desteklerini benden esirgemeyen, Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Şükrü YETGİN'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca yoğun çalışmalarından vakit ayırarak tezimi inceleyen Sayın Hocam, Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Şener CERYAN'a müteşekkir olduğumu belirtir saygılar sunarım.

Bu çalışmayı bir proje çerçevesinde destekleyen KTÜ Bilimsel Araştırmalar Fonu yöneticilerine de şükranlarımı sunarım.

Arazi ve laboratuvar çalışmalarımı gerçekleştirmek üzere, Trabzon'da bulunmam gereken süre zarfında, görevlendirme konusunda anlayış göstererek, bu çalışmayı yapabilmeme fırsat tanıyan, Fakültemizin eski Dekanı, Kıymetli Hocam, Sayın Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ, yeni Dekanı Sayın Prof. Dr. Fikri BULUT ve Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Ümit UZMAN'a saygıyla teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler sırasında, tüm laboratuvar imkanlarını seferber eden Trabzon Çimento Fabrikası yöneticilerine ve bu deneyleri, büyük bir itina ile takip eden, üretim sorumlusu sayın Kim. Müh. Halil SÜNGÜN'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca KTÜ Gümüşhane Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Orhan KARSLI'ya minarolojik incelemelerde, Arş. Gör. Ferkan SİPAHİ'ye XRD incelemelerinde gösterdikleri yardımlarından dolayı minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Bu çalışmamı, her türlü zorluklara göğüs gererek ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayarak bu günlere gelmemi sağlayan, anneme ve babama ithaf ediyorum.

Ahmet ÇAVDAR

Trabzon 2004

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Portland Çimentosu.....	1
1.1.1. Portland Çimentosu Üretim Süreci.....	1
1.1.2. Portland Çimentosunun Temel Kimyası.....	2
1.1.3. Ana Bileşenlerin Portland Çimentosunun Özelliklerine Etkisi.....	4
1.1.4. Portland Çimentosunun Hidratasyonu.....	5
1.1.5. Çimento Modülleri.....	7
1.1.5.1. Kireç Modülü II.....	7
1.1.5.2. Silis Modülü.....	8
1.1.5.3. Alümin Modülü.....	8
1.1.6. Tane İnceliğinin Portland Çimentosunun Özelliklerine Etkisi.....	8
1.2. Puzolanlar.....	10
1.2.1. Puzolanların Sınıflandırılması.....	11
1.2.1.1. Doğal Puzolanlar.....	11
1.2.1.1.1. Kor Kırıntılı (Piroklastik) Kayaçlar.....	11
1.2.1.1.2. Klastik Kayaçlar	12
1.2.1.1.3. Karışık Kökenli Kayaçlar (Hibrit Kayaçlar).....	13
1.2.1.2. Yapay Puzolanlar.....	13
1.2.2. Puzolanik Aktivite.....	16
1.2.3. Kireç – Puzolan Tepkimesi.....	17
1.3. Puzolan İçeren Çimentolar.....	19
1.3.1. Puzolan İçeren Çimentoların Çıkışı.....	19

1.3.2.	Puzolan İçeren Çimentoların Üretimi.....	20
1.4.	Dünyada ve Türkiye’de Çimento Üretimi ve Tüketimi.....	21
1.4.1.	Dünyada Çimento Üretimi ve Tüketimi.....	21
1.4.2.	Türkiye’de Çimento Üretimi ve Tüketimi.....	22
1.5.	Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	22
1.5.1.	İnceleme Alanının Jeolojik Özellikleri.....	23
1.5.2.	Türkiye’deki Puzolan Kaynakları ve Puzolanik Aktiviteleri.....	23
1.5.3.	Puzolan Tipinin ve Bileşiminin Dayanıma Etkisi.....	25
1.5.4.	Tane İnceliğinin Basınç Dayanımına Etkisi.....	26
1.5.5.	Puzolan Oranının ve Tipinin Dayanıma Etkisi.....	28
1.5.6.	Puzolan Oranının ve Tipinin Katılaşma Sürelerine Etkisi.....	30
1.5.7.	Puzolan Oranının ve İnceliğinin İşlenebilirliğe Etkisi.....	31
1.5.8.	Puzolan Oranının ve Tipinin Dayanıklılığa Etkisi.....	32
1.6.	Amaç ve Kapsam	34
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME.....	36
2.1.	Hammadde Seçimi.....	36
2.1.1.	Kayaç Örneklerinin Toplanması.....	36
2.1.1.1.	A Örneğinin Kaynak Özellikleri.....	36
2.1.1.2.	T1 Örneğinin Kaynak Özellikleri.....	38
2.1.1.3.	T2 Örneğinin Kaynak Özellikleri.....	38
2.1.1.4.	K Örneğinin Kaynak Özellikleri.....	39
2.1.1.5.	B Örneğinin Kaynak Özellikleri.....	39
2.1.1.6.	P Örneğinin Kaynak Özellikleri.....	40
2.1.2.	Petrografik ve Mineralojik İnceleme.....	40
2.1.2.1.	A Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme.....	41
2.1.2.2.	T1 Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme.....	42
2.1.2.3.	T2 Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme.....	43
2.1.2.4.	K Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme.....	44
2.1.2.5.	B Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme.....	45
2.1.2.6.	P Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme.....	46
2.1.3.	X-Ray Difraktometre İncelemesi.....	47
2.1.3.1.	A Örneğine Ait XRD İncelemesi.....	47
2.1.3.2.	T1 Örneğine Ait XRD İncelemesi.....	48

2.1.3.3.	T2 Örneğine Ait XRD İncelemesi.....	48
2.1.3.4.	K Örneğine Ait XRD İncelemesi.....	49
2.1.3.5.	B Örneğine Ait XRD İncelemesi.....	50
2.1.3.6.	P Örneğine Ait XRD İncelemesi.....	51
2.2.	Puzolanik Aktivite.....	51
2.2.1.	Tanım ve Yöntem.....	51
2.2.2.	Puzolanların Kimyasal Özellikleri.....	52
2.2.3.	Puzolanik Aktivite Tayini.....	53
2.2.4.	Puzolanik Aktivite ile Puzolanların Tane İnceliği ve Kimyasal Bileşimleri Arasındaki İlişkiler.....	54
2.3.	Tane İnceliğinin Traslı Çimentoların Özelliklerine Etkisi.....	60
2.3.1.	Tanım ve Yöntem.....	60
2.3.1.1.	Tras Türünün Seçimi.....	60
2.3.1.2.	Tras Oranının Seçimi.....	61
2.3.1.3.	Çimento Tane İnceliklerinin Seçimi.....	61
2.3.2.	Traslı Çimentolarda İnceliğin Dayanıma Etkisi.....	62
2.3.3.	Traslı Çimentolarda İnceliğin Katılaşma Süresine Etkisi.....	63
2.3.4.	Traslı Çimentolarda İnceliğin Hacim Genleşmesine Etkisi.....	66
2.4.	Tras Oranının Traslı Çimentonun Özelliklerine Etkisi.....	68
2.4.1.	Tanım ve Yöntem.....	68
2.4.1.1.	Tras Türünün Seçimi.....	68
2.4.1.2.	Tras inceliğinin Seçimi.....	68
2.4.1.3.	Tras İkame oranlarının Seçimi.....	69
2.4.2.	Çimento Örneklerinin Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	69
2.4.3.	Tras Oranının Çimento Dayanımına Etkisi.....	70
2.4.4.	Tras Oranının İşlenebilirliğe Etkisi.....	73
2.4.5.	Tras Oranının Katılaşma Sürelerine Etkisi.....	74
2.4.6.	Tras Oranının Hacim Genleşmesine Etkisi.....	76
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	78
4.	KAYNAKLAR.....	80
	ÖZGEÇMİŞ.....	84

ÖZET

Doğal puzolanlar (tras), kendi başlarına bağlayıcılık özelliği bulunmayan, fakat çok ince öğütüldüklerinde, pişirme işlemine gerek kalmaksızın bağlayıcı özellik kazanabilen malzemelerdir. Bu malzemeler, ince öğütülebilmesi sayesinde şişerek çimento içerisindeki kılcal boşlukları doldurduğu gibi asitli, sülfatlı ortamlarda da öncelikle betonun bağlayıcı dokusunu (çimento hamuru) daha dirençli bir konuma getirmektedir. Bunun yanında, üretim maliyetini önemli ölçüde düşürmeleri nedeniyle de tercih edilmektedir. İçerisinde yüksek oranda SiO_2 ile Al_2O_3 bulunan tuf çeşidi kayalar, asidik özellik taşımakta olup çimentoda tras olarak kullanılabilir.

Genellikle volkanik kökenli kayaların bolca bulunduğu Trabzon ili ve çevresi, bu yörede hizmet veren çimento fabrikasının da katkılı çimento üretmesi nedeniyle incelemeye değer, beklentilere açık bir bölge durumundadır.

Bu çalışmada, üç aşamadan oluşan deneylerde, öncelikle Trabzon yöresinden alınan altı ayrı volkanik kayaç örneğinin puzolanik aktivitelerinin göstergesi olarak 6.7 ile 11.0 MPa arasında değişen basınç dayanımları tespit edilerek, aynı zamanda bu değerlerin oksit oranlarıyla ilişkisi ortaya konulmuştur. İkinci aşamada, tras tipi ve tras katılım oranı sabit tutularak, 2847 ile 3714 cm^2/g arasında beş farklı özgül yüzey inceliğinde öğütülen çimentoların özellikleri incelenmiş ve çimento inceliğindeki bu artışın, erken yaştaki basınç dayanımını yaklaşık %38 oranında yükselttiği ve katılma sonlanma süresini de 30-40 dk kadar geciktirdiği belirlenmiştir. Son aşamada ise tras tipi ve tras inceliği sabit tutularak, %0 ile %35 arasında altı farklı oranda tras içeren çimento üretilmiş olup tras oranı artışının, çimentonun erken yaştaki dayanımını, beklendiği gibi belirgin ölçüde düşürdüğü, bunun yanında betonun hacim genleşme oranını yaklaşık 2/3 oranında azaltarak beton dayanıklılığına önemli oranda katkı sağlayabilecek özellikte olduğu tespit edilmiştir.

Üç bölümden oluşan bu çalışmanın birinci bölümünde çimentolar ve puzolanlar hakkında genel bilgilere, araştırma sonuçlarına, ikinci bölümde, yukarıda değinilen deneylere ve bulguların irdelenmesine, son bölümde ise netice ve önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal Puzolan, Tuf, İncelik, Puzolan İçeren Çimento

SUMMARY

Availability of Trabzon District's Tuffs as Natural Pozzolan on Cement and Effects of Fineness and Trass Ratio on Characteristics of Cement

Natural pozzolans are materials that don't have binding character. Having ground very finely, they could gain binding character without kiln drying process. These materials have ability of be ground finely and fill the capillary gap by swelling. Furthermore they increase durability of matrix against acidic and sulfuric medium. In addition, these are preferred due to reduce the cost of product. The rocks like tuffs that contain high quantity of SiO_2 and Al_2O_3 show acidic character. And these are used as natural pozzolan in cement.

Trabzon district where volcanic rocks exist a lot is sensible to investigate, because the cement plant in this district also product pozzolan mixed cement.

The experiments in this study had been occurred three phases. Firstly, six rock samples had been gotten from Trabzon District and found their pozzolanic activities, compressive strengths, 6.4 up to 11.0 MPa. In addition, the relationships between these values and oxide rates had been established. In second phase, the properties of cements grinded five different finenesses, changing 2847 up to 3714 cm^2/g , by fixing trass type and trass ratio had been investigated. This increase on fineness is determined to elevate compressive strength about 38% at early age and to retard the final setting times about 30 – 40 minutes. In the last phase, the cements include trass in six different ratio, changing 0 %_m – 35 %_m, had been produced by fixing trass type and trass fineness. The increase of trass ratio in cement had been investigated to reduce the compressive strength of concrete in early age and also increase durability of concrete by reduce volume expansion ratio about 2/3.

The first chapter of the study includes general information and results of some investigations about cements and pozzolans. The experimental studies and results of them and discussions are given Chapter II. The last chapter is devoted to the results and recommendations.

Key Words: Natural Pozzolan, Tuff, Fineness, Blended Cement

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Puzolanların sınıflandırılması.....	15
Şekil 2. Dünyada çimento üretim ve tüketimi.....	21
Şekil 3. Türkiye'deki çimento üretimi ve iç pazara arzı.....	22
Şekil 4. Betonun basınç dayanımı üzerindeki mikro dolgu ve puzolanik etkiler	27
Şekil 5. Doğal puzolan ve Portland Çimentosu içeren betonların basınç dayanımı.....	29
Şekil 6. Örnek alınan yerlerinin haritadaki yerleri.....	37
Şekil 7. A kayacına ait el örneği.....	38
Şekil 8. T1 kayacına ait el örneği.....	38
Şekil 9. T2 kayacına ait el örneği.....	39
Şekil 10. K kayacına ait el örneği.....	39
Şekil 11. B kayacına ait el örneği.....	40
Şekil 12. P kayacına ait el örneği.....	40
Şekil 13. A örneğine ait mikroskop görüntüsü.	41
Şekil 14. T1 örneğine ait mikroskop görüntüsü.....	42
Şekil 15. T2 örneğine ait mikroskop görüntüsü.....	43
Şekil 16. K örneğine ait mikroskop görüntüsü.....	44
Şekil 17. B örneğine ait mikroskop görüntüsü.....	45
Şekil 18. P örneğine ait mikroskop görüntüsü.....	46
Şekil 19. A örneğine ait difraktogram.....	47
Şekil 20. T1 örneğine ait difraktogram.....	48
Şekil 21. T2 örneğine ait difraktogram.....	49
Şekil 22. K örneğine ait difraktogram.....	50
Şekil 23. B örneğine ait difraktogram.....	50
Şekil 24. P örneğine ait difraktogram.....	51
Şekil 25. Dayanım – özgül yüzey ilişkisi.....	55
Şekil 26. Dayanım – SiO ₂ ilişkisi.....	56
Şekil 27. Dayanım – Al ₂ O ₃ ilişkisi.....	56
Şekil 28. Dayanım - Fe ₂ O ₃ ilişkisi.....	57

Şekil 29. Dayanım – $Al_2O_3+Fe_2O_3$ ilişkisi.....	57
Şekil 30. Dayanım - ($Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$) ilişkisi.....	58
Şekil 31. Dayanım – CaO ilişkisi.....	58
Şekil 32. Dayanım - ($MgO+K_2O$) ilişkisi.....	59
Şekil 33. Özgül yüzey – basınç dayanımı ilişkisi.....	63
Şekil 34. Özgül yüzey – katılaşma başlangıç süresi ilişkisi.....	65
Şekil 35. Özgül yüzey – katılaşma bitiş süresi ilişkisi.....	65
Şekil 36. Özgül yüzey – hacim genişmesi ilişkisi.	67
Şekil 37. Tras Oranı – dayanım ilişkisi.....	71
Şekil 38. Yaş – dayanım ilişkisi.....	72
Şekil 39. T1 örneğine ait yaş - dayanım ilişkisi.....	73
Şekil 40. Tras oranı – su alma (%) ilişkisi.....	74
Şekil 41. Katılaşma başlangıcı – tras oranı ilişkisi.....	75
Şekil 42. Katılaşma sonu – tras oranı ilişkisi.....	76
Şekil 43. Tras oranı – hacim genişmesi ilişkisi.....	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1. Portland çimentosunun oksit bileşimi ve yüzdeleri.....	3
Çizelge 2. Çimentonun ana bileşenleri.....	4
Çizelge 3. ABD’de üretilen Portland Çimentolarındaki Ana Bileşenlerin Yaklaşık Oranları (ASTM’ye göre)	4
Çizelge 4. Alman Çimento Üreticileri Birliğinin (VDZ), Almanya’da üretilen çimentolar için tespit ettiği ana bileşen oranları.....	4
Çizelge 5. Çimento ana bileşenlerinin özellikleri.....	5
Çizelge 6. Dünya çimento üretimi.....	21
Çizelge 7. Bazı puzolanların özellikleri.....	24
Çizelge 8. Bazı puzolanların TS 25’e göre puzolanik aktiviteleri.....	24
Çizelge 9. Basınç dayanımlarıyla oksit konsantrasyonları arasındaki bağıntılar.....	26
Çizelge 10. Basınç Dayanımlarıyla bazı bileşenler (%) arasındaki bağıntılar.....	26
Çizelge 11. Puzolanların kimyasal analiz sonuçları.....	52
Çizelge 12. Örneklerin kimyasal bileşim bakımından TS25’e uyumluluğu.....	53
Çizelge 13. Puzolanların mekanik ve fiziksel özellikleri.....	53
Çizelge 14. Örneklerin mekanik bakımdan TS 25’e uyumluluğu.....	54
Çizelge 15. Malzemelerin incelik değerleri.....	61
Çizelge 16. Çimento özgül yüzeyleri ile dayanım arasındaki ilişki.....	62
Çizelge 17. Örneklerin katılaşma süreleri.....	64
Çizelge 18. Örneklerin hacim genişmesi değerleri.....	66
Çizelge 19. Örneklerin fiziksel değerleri	69
Çizelge 20. Örneklerin kimyasal analizleri	70
Çizelge 21. Farklı oranlarda tras içeren çimento örneklerinin basınç dayanımları.....	71
Çizelge 22. T1 örneğinin dayanım – yaş değerleri.....	72
Çizelge 23. Örneklerin su alması.....	73
Çizelge 24. Örneklerin katılaşma süreleri.....	75
Çizelge 25. Örneklerin hacim genişmeleri.....	76

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Portland Çimentosu

Çimento kelimesi, Latince’de yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki "caementum" kelimesinden türemiştir. Daha sonraları ise bu kelime, “bağlayıcı” anlamında kullanılmaya başlamıştır. İlk betonarme yapı 1852 yılında yapılmasına rağmen bağlayıcı malzemelerin kullanımı çok eskilere, muhtemelen ateşin bulunmasından hemen sonraki döneme dayanır. İlk bağlayıcı madde olarak kireç kullanılmıştır. Yapılan araştırmalara göre Anadolu’da Çatalhöyük’teki evlerin yapımında kullanılan sıva 7000 yıl öncesine aittir. Ayrıca Eski Mısır, Roma, Çin ve Yunan dönemlerine ait eserlerde de çeşitli muhtevalarda bağlayıcılara rastlanmaktadır. Bununla birlikte, yakın tarihlere kadar, bağlayıcı malzeme kullanımında önemli bir ilerleme kaydedilmediği de bilinmektedir.

Yeni bir bağlayıcı malzeme olarak portland çimentosu, ancak 19. yy’a gelindiğinde, insanlığın hizmetine sunulabilmiştir. 1824 yılında, İngiltere’de Joseph Aspdin adlı bir duvarcı ustası hazırladığı ince taneli kil ve kalker karışımını pişirerek ve daha sonra da öğütürerek yeni bir bağlayıcı ürün elde etmiştir. Bu ürün su ve kumla karıştırılıp sertleştiğinde oluşan yeni malzeme, İngiltere’nin Portland adasından elde edilen yapı taşlarını andırdığı için “Portland Çimentosu” adı ile anılmıştır. Ancak bu ürün yeterince yüksek sıcaklıklarda pişirilmediği için günümüz portland çimentosu özelliklerini tam anlamıyla yansıtmamaktaydı. Nihayet 1845 yılına gelindiğinde Isaac Johnson adlı bir İngiliz, kireç ile kil taşları karışımını yüksek sıcaklıklarda pişirmeyi başararak günümüz portland çimentosunu üretmiştir [1]

1.1.1. Portland Çimentosu Üretim Süreci

Portland çimentosu kireç, alümin, demir oksit ve silis bileşimli hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp, yüksek sıcaklıkta, ergime sınırı üzerinde (sinterleşme) pişirilmesi sonucu meydana gelen klinkerin, öğütülmesiyle elde edilmektedir. Su ile tepkimeye girip sertleşerek taşlaşmakta olduğu gibi yeniden suyla da çözünmemektedir; böylece portland çimentosu hidrolik bir bağlayıcı özelliği göstermektedir.

Portland çimentosunun üretim süreci,

- ince bir şekilde öğütülerek uygun oranlarda bir araya getirilen kireçli ve killi hammadde karışımının hazırlanması,
- sıcaklığın üst uçta 800 – 900 °C, alt uçta ise 1500 °C dolayında olan silindirik şekilli döner fırınlarda, karışımın 1350 – 1450 °C civarında pişirilmesiyle elde edilen çoklu oksit bileşiklerinin “klinker” adıyla bilinen irili ufaklı taneleri oluşturması,
- döner fırından çıkan klinkerin soğuduktan sonra, toz inceliğinde yeniden öğütülmesi,
- klinkerin öğütülmesi esnasında küçük bir oranda (%_m 3 – 6) alçıtaşı katılaşma geciktiricisi olarak, ya da katkıli çimento üretilecekse katkı malzemesi eklenerek öğütme işleminin birlikte yapılması

şeklindeki aşamalarla tamamlanmış olmaktadır.

Bu üretim aşamalarından sonra portland çimentosu boz (gri) bir renk almaktadır. Portland çimentosu bu rengini özellikle hammaddesindeki demirli bileşiklerden elde etmektedir. Portland çimentosu tanecikleri 1 – 200 µm arasında çap büyüklüğü göstermekte ise de, çoğunlukla bu tanecikler 20 – 30 µm boyutlarındadır. Portland çimentosunun özgül kütlesi 3.10 – 3.16 gr/cm³ arasında olabilmektedir.

1.1.2. Portland Çimentosunun Temel Kimyası

Portland çimentosu üretimindeki ilkel maddelere killi ve kireçli kayalar kaynak teşkil etmektedir. Çimento bileşimine, silis (SiO₂), alümin (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) killerden, kireç (CaO), magnezi (MgO) ve diğer bileşenler ise kireçli taşlardan kazandırılmış olmaktadır [2].

Tipik bir portland çimentosundaki oksit bileşenleri ve kütle yüzdeleri (Çizelge 1) karşılaştırılırken kireç ve silis kümelerinin çokluğu dikkat çekmektedir.

Buradan, portland çimentosunun CaO, SiO₂, Al₂O₃, ve Fe₂O₃ olmak üzere dört büyük oksit ile MgO, Na₂O, K₂O ve SO₃ gibi küçük orandaki oksit katılımcılarından meydana geldiğini belirtmek gerekir. Kireç ve silis portland çimentosu içeriğinin büyük bir bölümünü (yaklaşık %77–92) oluşturarak kalsiyum silikat bileşenleriyle çimentoya dayanım kazandırmaktadır. Magnezi ve alkaliler gibi küçük oksitlerin ise dayanıma önemli bir katkıları bulunmamaktadır. Ayrıca mevcut standartlar, betonda hacim genleşmeleri ve çatlaklar oluşturabilecekleri gerekçesiyle küçük oksitlere bazı kısıtlamalar getirmektedir.

Benzer şekilde SO_3 bileşenin de yüksek oranda temsil edilmesiyle çimentoda, dolayısıyla betonda hacim genişlemeleri ve çatlama, düşük oranda karıştırılması halinde ise hızlı katılaşma ve sertleşme ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 1. Portland çimentosunun oksit bileşimi ve kütle yüzdeleri [3].

Bileşen	Bilinen İsmi	Sembolü	İçerik (%m)
CaO	Kireç	C	60-67
SiO ₂	Silis	S	17-25
Al ₂ O ₃	Alümin	A	3-8
Fe ₂ O ₃	Demir oksit	F	0.5-6
MgO	Magnezi	M	0.1-4
Na ₂ O ve K ₂ O*	Soda ve Potassa	N ve K	0.2-1.3
SO ₃	Sülfürik anhidrit	S̄	1-3

* Bunlar alkaliler olarak da bilinirler.

Çimentoyu oluşturan çok ince öğütülmüş killi ve kireçli malzemeler (ilkel maddeler), döner fırında pişirilirken, 100 °C sıcaklık civarında kristal bağlantısı olmayan serbest su buharlaşmakta, 500 – 600 °C sıcaklıkta killi maddeler kristal suyunu dışarı vermektedir. Hammaddelerin içerisinde bir miktar magnezyum karbonat (MgCO₃) bulunduğu takdirde ise bu madde 600 – 700 °C sıcaklıkta bileşenlerine ayrılarak geriye MgO kalmaktadır. Özdeş biçimde kireç taşı da (CaCO₃) 900 °C civarında içerisindeki karbondioksitten kurtularak kirecin ana maddesine (CaO) dönüşmektedir. 900 – 1200 °C arasında kireç, silis ve alümin arasında kimyasal reaksiyonlar, 1250 – 1280 °C arasında ise oksitler criyik haline dönüşmeye başlamaktadır. Nihayet 1280 °C ve daha yukarı sıcaklıklarda çimentonun ana bileşenleri, çoklu bileşikler halinde meydana gelmektedir. Yaklaşık olarak 1350 – 1400 °C sıcaklıkta pişirildikten sonra “klinker” yarı ham madde olarak ortaya çıkmış olmaktadır. Bu çok karmaşık reaksiyonlar sonucunda oluşan klinker, yukarıda sözü edilen dört ana ögesiyle (Çizelge 2) öğütülmeye hazır duruma gelmiş olmaktadır [4]. Çimento ana bileşenlerinin çimentodaki oranları konusunda Alman ve Amerikan kaynaklarında, farklı bilgiler mevcuttur (Çizelge 3, Çizelge 4).

Çizelge 2. Çimentonun ana bileşenleri

Ana Bileşenler	Sembolleri
Dikalsiyum silikat (2CaO.SiO_2)	C_2S
Tri kalsiyum silikat (3CaO.SiO_2)	C_3S
Tri kalsiyum alüminat ($3\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$)	C_3A
Tetra kalsiyum alimüno ferrit ($4\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$)	C_4AF

Çizelge 3. ABD’de üretilen Portland Çimentolarındaki Ana Bileşenlerin Yaklaşık Oranları (ASTM’ye göre) [4].

Çimento Tipi	Genel Açıklama	Ana Bileşenlerin Oranı (%m)			
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
I	Normal Portland Çimentosu (Genel amaç için kullanılmakta)	49	25	12	8
II	Değiştirilmiş Portland Çimentosu (Tip I’e göre daha az hidrasyon ısısına ve daha çok sülfat dayanıklılığına sahip)	46	29	6	12
III	İlk Dayanımı Yüksek Portland Çimentosu	56	15	12	8
IV	Düşük Isılı Portland Çimentosu (Barajlarda olduğu gibi kütle betonlar için kullanılmakta; Hidrasyon ısısı az)	30	46	5	13
V	Sülfata Dayanıklı Portland Çimentosu	43	36	4	12

Çizelge 4. Alman Çimento Üreticileri Birliğinin (VDZ), Almanya’da üretilen çimentolar için tespit ettiği ana bileşen oranları [5].

Ana Bileşen	Kütlece Oranı (%m)		
	En Yüksek	Ortalama	En Düşük
C_3S	85	65	52
C_2S	27	13	0.2
C_3A	16	8	4
C_4AF	16	11	7

1.1.3. Ana Bileşenlerin Portland Çimentosunun Özelliklerine Etkisi

Çimento ana bileşenlerinin hidrasyona etkileri farklıdır. Bu yüzden, her bir ana bileşen, çimentonun hidrasyon hızı, ısı gelişimi ve dayanım gelişimi gibi özelliklerine ayrı etkiler yapmaktadır. Diğer bir deyişle her bir ana bileşen katılım oranına göre, çimentonun özelliklerinin ve türünün belirlenmesinde (Çizelge 5) büyük işlev üstlenmiş olmaktadır.

Çizelge 5. Çimento ana bileşenlerinin özellikleri [4].

Çimento Özellikleri		Bileşenlerin Özellikleri			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Reaksiyon Hızı		Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı		Orta	Az	Çok	Orta
Bağlayıcılık Değeri	İlk zamanlar	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
	Sonunda	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

1.1.4. Portland Çimentosunun Hidratasyonu

Çimento, su ile karıştırıldığında bir dizi tepkime meydana gelir. Su ile gerçekleşen bu tepkimelere hidratasyon denilmektedir. Hidratasyon sonucunda çimento katılaşır ve sertleşmektedir. Katılaşma (priz) başlangıcında çimento hamuru kısmen yumuşaklık arz ettiği gibi, katılaşma sonunda da kısmen sertleşme evresine girmiş olmaktadır.

Çimentoyla suyun birleşmesi sonucu çok karmaşık tepkimeler meydana gelir. Çimentonun her ana bileşeninin ise su ile ayrı ayrı tepkime verdiği varsayılır. Bu tepkimeleri basit bir şekilde ifade etmek mümkündür:

Kalsiyum silikatlar (C₃S ve C₂S) ile su (H) reaksiyona girerek kalsiyum-silikat-hidratı (C₃S₂H₃) ve kristal yapıdaki CH'yı meydana getirirler. C₃S₂H₃ ya da yaygın kısaltmasıyla C-S-H jelinin adı tobermorittir.

Kalsiyum silikat reaksiyonları,



Bu iki silikat tepkimesinin farkı, C₃S'nin C₂S'ye göre daha büyük miktarda kireç içermesi ve dolayısıyla C₃S'nin tepkime hızının, C₂S'nin tepkime hızından daha yüksek olması şeklinde ifade edilebilir.

Çimentonun bağlayıcılık özelliğine asıl etkiyen bileşenler ise yine kalsiyum silikat içeren bu iki bileşen olmaktadır. Her iki bileşen de çimentonun bağlayıcılık derecesini önemli ölçüde etkilemektedir. Ancak C₂S bileşeninin çimentonun bağlayıcılık özelliğine etkisinin ilk günlerde az, fakat daha sonraları çok yüksek mertebelere çıktığı bilinmektedir. C₃S'nin ise hem ilk günlerde hem de uzun vadede bağlayıcılık özelliğine etkisi yüksektir.

C_3A 'nın suyla reaksiyonu,



kristalleşme özelliğinden dolayı çok hızlı gerçekleşmektedir:

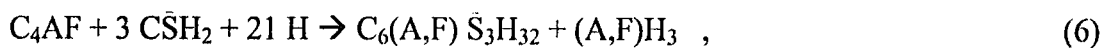
Kalsiyum alimüno hidrat kararlı bir bileşik değildir ve erkenden kübik kristalli yapıya geçip kararlı hale (C_3AH_6) dönme eğilimindedir. Bu tepkime çok hızlıdır ve büyük miktarda ısı açığa çıkar. Bu yüzden de genellikle “yalancı priz” adıyla anılan ani katılaşma olayı gerçekleşmektedir. Bunu engellemek için pişirme sürecinden sonra, öğütme aşamasında klinkere bir miktar alçı ($C\bar{S}H_2$) katılır. Böylece C_3A ile alçı suyla ayrı ayrı tepkimeye girerek iğne yapısında, uzun (çubuksu) hekzagonal kristal yapıya sahip $C_6A\bar{S}_3H_{30-32}$ bileşimini (etrenjit) oluştururlar. Ancak, etrenjit ortamda yeterli sülfat varsa oluşmaktadır, aksi takdirde C_3A , plaka şeklinde kristal yapıya sahip $C_4A\bar{S}H_{12}$ 'a (monosülfo alüminat) dönüşmektedir;

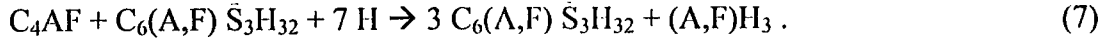


Bu ürünler, özellikle $C_6A\bar{S}_3H_{32}$, sertleşmiş çimento ve betonda genişlemeye sebep olabilmektedir; çok miktarda bulunmaları halinde ise son derece tehlikeli hacim değişikliklerine yol açarlar. Ancak, sınırlı bir oranda alçı kullanılmasıyla zararlı olmayacak sonuçlar elde edilmekte ve C_3A sözü edilen tepkimeleri sürdürürken kalsiyum silikatların reaksiyonu ve C-S-H'nin oluşması da beklenen biçimde devam edebilmektedir. C_3A ana bileşeni, ilk saatlerde ve ilk gün içerisinde çimentonun bağlayıcılık değerine küçük bir miktar katkıda bulunmakla birlikte çimento için en tehlikeli bileşen olabilmektedir.

C_4AF reaksiyonu, C_3A reaksiyonuna göre hem daha yavaş hem de daha az ısı açığa çıkarmaktadır. Ayrıca, C_4AF hızlı tepkime vermediğinden, C_3A gibi ani katılaşmaya (ani priz) da sebebiyet vermemektedir. Alçının, çabuk katılaşmayı geciktirmedeki etkisi, C_4AF üzerinde daha belirgindir.

C_4AF ile alçı arasındaki tepkimeyi aşağıdaki şekilde yazmak mümkündür;





Kısaca C_3A ve C_4AF bileşenleri, düşük oranda alçı ile karıştırıldıklarında çimentonun bağlayıcılık özelliğini başlangıçta az da olsa olumsuz etkilemektedir. Ancak, çimentonun asıl bağlayıcılık değeri ise C_3S ve C_2S bileşenleri tarafından ortaya konulmuş olmaktadır [4].

1.1.5. Çimento Modülleri

Uzun yıllardan beri devam ede gelen çimento üretiminde, uygulamaya yönelik kolaylıklar sağlayan bir çok tecrübe kazanılmıştır. Portland çimentosunun kimyasal analiz sonuçlarının mukayeseleri sırasında, kireç miktarı ile silis, alümin ve demir oksitleri arasında var olan, nitelik yönünden anlamlı ilişkiler tespit edilmiştir.

1.1.5.1. Kireç Modülü II

Kireç Modülü II, Alman ve İngiliz eski standartlarındaki hidrolik modülün geliştirilmiş hali olup

$$KM = \frac{CaO}{CaO_{max}} \quad (8)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Burada;

CaO klinkerde bulunan gerçek kireç (CaO) miktarını,

CaO_{max} , teorik olarak olabilecek en büyük kireç miktarını ifade edip

$$CaO_{max} = 2.80 SiO_2 + 1.18 Al_2O_3 + 0.65 Fe_2O_3$$

toplamı üzerinden hesaplanmaktadır.

KM oranı 0.90 – 1.04 arasında değişmekle birlikte en uygun değer 0.97 civarında kabul edilmektedir. Bu oran CaO fazlarının istenilen biçimde oluşabilmesi için gerekli görülmektedir [5].

1.1.5.2. Silis Modülü

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (9)$$

Klinkerin pişme sürecinde yapısına kazandırdığı oksitlerin oranı olup 1.5 – 4.0 arasında değer alabilmektedir. Ancak en uygun değeri ise 2.3 – 2.8 arasındadır. Bu oran, ısıtma işlemi sürecinde ortaya çıkan bileşenlerin homojen dağılımının bir göstergesi sayılmaktadır. Bu değerlerin düşük çıkması, kütle toplanmalarına ve çökelmelere sebep olur [5].

1.1.5.3. Alümin Modülü

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (10)$$

Fırınlama aşamasındaki klinker eriyiğinin faz durumu hakkında fikir verir. 1.5 – 4.0 arasında değerler almakla birlikte, en düşük sıcaklıkta en uygun eriyik yapılına ve faz dağılımı 1.4 – 1.6 değerleri arasında elde edilmiş olmaktadır. Örneğin bu değerlerin 0.6 düzeyine düşmesiyle C₃A oluşumu gerçekleşmemektedir. Dolayısıyla C₃A oluşumunun sınırlanması ya da engellenmesi istenilen özel durumlarda, Fe₂O₃ değeri artırılarak, bu oranın alt düzeylere çekilmesine başvurulması ayrı bir çözüm olmaktadır [5].

1.1.6. Tane İnceliğinin Çimentonun Özelliklerine Etkisi

Portland çimentosu üretimindeki son aşama, klinkerin bir miktar alçı ile çok ince bir şekilde öğütülmesidir. “Çimento inceliği” ifadesi ise çimento tanelerinin ortalama boyutunu ortaya koymaktadır.

Çimento inceliği, bir gram çimento örneğinin santimetre kare cinsinden toplam tane yüzeyinin (cm²/g), ya da standartlarla belirlenmiş eleklerden elendikten sonra elek üzerinde kalan kütle oranının (%m) bir anlatımı olmaktadır. Ancak bir çok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de çimento inceliğini ifade etmede daha çok özgül yüzey kavramına başvurulmaktadır. Türkiye’de üretilen değişik tip çimentoların incelik değeri 2800 – 4000

cm²/g arasında olup bu değer istenilen en düşük incelik sınırının (2000 cm²/g) üstünde bulunmaktadır.

Çimento inceliği, çimento ve betonun katılaşma süreleri, hidrasyon ısı ve dayanımı gibi bazı teknik özellikleri üzerinde etkisi olan önemli bir ölçüttür. Aynı kütleye sahip iki çimento türünden daha ince olanının hem tane sayısı hem de özgül yüzeyi daha fazladır. Bu da suyla temas edebilecek toplam tane dış yüzeyinin fazlalığını ortaya koymaktadır. Tane inceliğinin, hidrasyon hızına da önemli etkisi bulunmaktadır. Tane inceliği arttıkça tepkime hızı artmakta ve ortaya daha büyük miktarda ısı çıkmakta, dolayısıyla da beton daha çabuk dayanım kazanmaktadır.

Çimento tanelerinin aşırı derecede ince olmasının veya aşırı derecede kalın olmasının bazı sakıncaları bulunmaktadır. Çimento tanelerinin gereğinden ince öğütülmesiyle, öğütme değirmeninde veya depolama sırasında çimento ortamdan nem alarak hidrasyona başlayabilmektedir. Bu da bağlayıcılık değerinde kayba neden olacağından, istenmeyen bir durumdur. Ayrıca tane inceliğinin artırılmasıyla, katılaşma süresi de kısıllacağından, bu süreyi geciktirmek için daha fazla alçı katılması söz konusu olacaktır. Bunun bir nedeni de daha önce de değinildiği gibi C₃A'nın suyla olan tepkime hızındaki artıştır.

Çimento inceliği arttıkça ortaya çıkan bir diğer önemli husus ise, taze betonun ilk aşamada gereğinden fazla suya ihtiyaç duyarak toplanmalara (yumaklaşma) neden oluşturmasıdır. Ayrıca çimento inceliğinin artırılmasıyla çimento maliyetindeki artış da göz önünde bulundurulmalıdır.

Çimentoda tane inceliğinin dayanım üzerindeki olumlu etkisi ise yaklaşık bir hafta ile sınırlı olup bu etki daha uzun sürelerde azalmaktadır. Dolayısıyla nihai dayanım üzerinde, çimento bileşimi yanında incelik etkisi önemli bir yer tutmamaktadır. Ayrıca Portland çimentosunu yüksek inceliklerde öğütmek, büzülme (rötre) çatlaklarına neden olmasından dolayı da dikkat edilmesi gereken bir husustur [6].

Diğer yandan doğal puzolanlar, ince öğütülme yetenekleri sayesinde, çimentoya katıldıklarında, yukarıda belirtilen sakıncalara yol açmadan çimento inceliğini artırmış ve iktisadi açıdan kazanım sağlamış olmaktadır.

Çimento tanelerinin gereğinden fazla kaba olması halinde ise bir miktar hidrasyon suyu, kusulmak suretiyle dışarı atılmış olacak ve dolayısıyla hidrasyon sırasında gerçekleşen kimyasal tepkimelerin akıbeti de bu ölçüde belirsizliğe terk edilmiş olacaktır. Böyle bir sonuç ise çimentonun bağlayıcılık özelliğini önemli ölçüde düşürmektedir.

Ayrıca, katılaşma süreleri, hidrasyon ısısı gibi değerlerde de yeterli düzeye çıkılması güçleşecektir.

1.2. Puzolanlar

Puzolanlar, kendileri belirgin bir ölçüde bağlayıcılık özelliğine sahip olmasalar da normal sıcaklıklarda, sulu ortamda, kireçle birleşerek tepkime gösterip bağlayıcılık özelliği kazanabilmektedirler. Ortaya çıkan bileşikler ise suda çözünmeyen bir kararlılık göstermektedir. Bu davranış puzolanların yapılarından kaynaklanan bir özellik olarak bilinmektedir [7].

TS 25'e göre ise "tras", silisli ve alümino silisli volkanik bir tüf olup yalnız başına hidrolik bir özellik göstermediği halde, ince öğütüldüğünde sulu ortamda, kalsiyum hidroksitle birlikte, normal sıcaklıkta kimyasal reaksiyona girerek hidrolik özellik gösteren doğal puzolan olarak tanımlanmaktadır.

Her ne kadar tras ismi özel bir doğal puzolanı tanımlamaktaysa da Türkiye'de tüm doğal puzolanlar genel olarak tras adı ile anılmaktadır. Bu çalışmada da bazen tras, ancak malzemenin gerçek itibarı göz önünde bulundurularak, onun yerine daha doğru bir kavram olan "doğal puzolan" terimi kullanılmaktadır.

Puzolan ismi, Naples yakınlarında bir yer olan Puzzuoli'den gelmektedir. Burada eski Roma devirlerinden beri bu malzeme kireçle uygun oranlarda karıştırılarak daha mükemmel hidrolik bir çimento elde edilirdi [7].

Türkiye'de İç Anadolu, İç Ege, Marmara, Karadeniz, Akdeniz Bölgelerinde bol miktarlarda doğal puzolan kaynakları bulunmaktadır. Türkiye jeoloji haritasında aşağı yukarı 155.000 km² alanı kaplayan volkanik kayaç oluşumlarının varlığı görülmektedir. Bu alan Türkiye yüzölçümünün yaklaşık 1/5'i kadardır. Bu verilere göre ülke tras hammaddesi bakımından oldukça zengin bir konumda bulunmaktadır. Üretilen çimentoların %14.6'sını 1985 – 1990 yılları arasında tras içeren çimentolar oluştururken, 1992 – 1994 yılları arasında bu değer %36.31 düzeyine ulaşmıştır [8].

1.2.1. Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanları, doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayırmak (Şekil 1) olanaklıdır. Doğal puzolanlar, öncelikle az ya da çok değişikliklere uğramış, volkanik kaynaklı tortul kayalardan oluşmakla birlikte, değişik kaynaklı katılımcılar da içerirler. Yapay puzolanlar, bir takım doğal malzemelerin, kil ya da şist olarak, ısıtılma işlemi sonucu elde edilirler. Bundan başka diğer yanmış ürünlerin artıkları olarak da elde edilmektedirler. Sözelimi silis dumanı, metal-silis alaşımı veya diğer silis temelli karışımların üretimi amacıyla yönelik olarak elde edilirken, uçucu kül termik güç santrallerindeki öğütülmüş ocak kömürünün yanmasından elde edilmektedir [7].

1.2.1.1. Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar, yukarıda da belirtilmiş olan puzolanik özellikleri sağlayan doğal kayalar olarak tanımlanmaktadır.

1.2.1.1.1. Kor Kırıntılı (Piroklastik) Kayalar

Kor kırıntılı kayalar, volkanların püskürtmüş olduğu çeşitli malzemelerin bir çimento ile kaynaşmasından oluşan taşlardır. Çimento görevini birikme yerinde oluşan neoformasyon mineralleri (kalsedon, kuvars, kalsit) görebildiği gibi, yine volkanlar tarafından çıkarılan küller de görmektedir [9]. Patlama sırasındaki ani basınç düşüşü, sıvı magma içerisinde çözülmüş olan gazların açığa çıkmasına sebep olur. Açığa çıkan gazların geride boşluklar bırakması nedeniyle katılaşılan parçacıklarda mikroskobik ve makroskobik boşluklu yapı görülür. Katılaşılan parçacıkların ayrıca ani soğumaya maruz kalması bu türden malzemelerde camsı yapı oluşmasını sağlar [10]. Massazza [7] ise bu kapsamdaki malzemeleri, gevşek yapıli kayalar ve sıkı yapıli kayalar olmak üzere iki alt grupta toplamıştır.

Gevşek yapıli kayalar, kimyasal bileşim açısından çok geniş bir yelpazede bulunurlar. Bu gruptaki puzolanlar eski çağlardan beri kullanım alanı bulmuş tipik İtalyan trasları yanında, ABD’de, Hindistan’da ve Türkiye’de bulunan benzer özellikteki gevşek yapıli kayaları ve riyolitleri içerir.

Piroklastik malzeme sahip olduğu ilksel sıcaklık nedeniyle birbiriyle kaynaşmış (welded) olabilmektedir. Kaynaşmamış ve gevşek durumda olan piroklastik malzemenin arasındaki boşlukların (gözeneklerin), daha sonra dolaşan çözeltilerin yardımıyla veya mevcut minerallerin bozunması sonucu ortaya çıkan yeni minerallerle doldurulmuş olduğu da görülmektedir. Bu kayaçlarda çoğunlukla karbonat, kil ve zeolit grubu minerallerin dolgu/bağlayıcı malzeme olarak bulunduğu görülür [10].

Hava etkisine maruz kalması trasın camsı yapısının zeolitleşmesine (zeolitiation) ya da ayrışmak suretiyle killeşmesine (argillation) sebep olabilir. Zeolitleşme trastaki camsı yapının dış etkilerle zeolit grubu minerallerine dönüşmesidir. Feldspat ve feldspatoid mineralleri ve asit–intermediyer bileşimli volkan camı parçaları içeren tüfler zeolit minerallerine dönüşebilir [10]. Zeolitler, ısıtıldıklarında kristal yapılarını bozmadan su içeriklerini kaybedebilir. Daha da önemlisi alkali atomlarını verip, kalsiyum ve magnezyum iyonlarını alabilirler [7]. Bunlar, kanallar şeklindeki ve büyük boşluklu ($d=11.4 \text{ \AA}$) iskeletli mineral yapıları sayesinde, su iyonlarını bünyelerine kolaylıkla alıp geri verebilirler [11]; bu iyonlar esasen kafes yapıyı oluşturmada ortak değildirler. Dolayısıyla, zeolit mineralleri bakımından zengin piroklastikler (doğal puzolan) sönmüş kireç ve su ile karışıklarında duraylı silikat mineralleri oluştururlar [10]. Killeşmedeyse camsı yapı uygun ortamda, kristal yapıya su molekülleri alarak daha kolay bir biçimde kil minerallerine dönüşmektedir. Zeolitleşme, malzemenin puzolanik özelliklerinde iyileşmeye yol açarken, killeşme için tam tersi bir durum söz konusudur. Kısaca genel olarak puzolanik tüfler, volkanik kökenli kayaçların zeolitleşmesi sonucunda oluşur. Zeolitleşme hızı ve oluşan zeolit mineralinin tipi esas olarak basınç ve sıcaklık gibi çevre şartlarıyla beraber diğer birçok faktörlere de bağlıdır. Tüflerde silika ve silika–alümina içeriği diğer volkanik kökenli malzemelerle benzerlik gösterir. Genelde kızdırma kaybı oldukça yüksektir ve minör element içeriği çok değişkendir [12].

1.2.1.1.2. Klastik Kayaçlar

Killer ve diatomitli topraklar, tortullaşmayla (sedimentation) oluşan kısmen puzolanik özellik taşıyan malzemelerdir. Killer volkanik kayaçların değişiminden oluşurken, diatomitli topraklar mikro organizmaların silisli iskeletlerinin tatlı sularda ya da deniz suyunda katılaşmalarıyla oluşur. Her iki malzeme de farklı kökenlerine rağmen suda birikir. Dolayısıyla bu malzemeler, doğada karışık halde bulunurlar.

Genel olarak, kil mineralleri, özellikle montmorillonit grubuna dahil olanlar, kireçle tepkime vererek kalsiyum silikat ve alüminat hidratları oluştururlar. Fakat killerin puzolan olarak kullanımı, betonun su ihtiyacını artırarak dayanımını düşürmelerinden dolayı uygun görülmemektedir.

Yüksek miktarda amorf silika içermesi ve yüksek özgül yüzeye sahip olmasından dolayı diatomitli topraklar kireç ile birlikte ileri derecede tepkime isteklidirler. Fakat bu yapısına rağmen puzolanlı çimentolarda diatomit kullanımı sınırlıdır. Çünkü diatomitlerin son derece yüksek olan özgül yüzeyi betonda su ihtiyacını artırmaktadır. Bununla beraber, küçük oranlarda diatomit kullanımı, taze betonda işlenebilirliğin daha uygun bir duruma gelmesini ve kuma tehlikesinin azalmasını sağlar. Silis miktarı, diatomitli topraktaki kil minerali miktarı azaldıkça artış göstermektedir. Alümina için ise tam tersi bir durum söz konusudur. Diatomitli topraklardaki opal miktarı % 25 – 100 arasında değişir. Opal dışındaki kısım ise kil mineralleri yanında, kuvars, feldspat gibi başka minerallerden oluşmaktadır [12].

1.2.1.1.3. Karışık Kökenli Kayaçlar (Hibrit Kayaçlar)

Bu grupta aynı anda birden çok, değişik şekilde oluşmuş puzolanları bir arada bulunduran malzemeler vardır. Bu kapsamda ele alınan doğal puzolan yataklarında piroklastik, tortul ve organik kökenli yapılanmalar katmanlar halinde bir arada olabilmektedir [12].

1.2.1.2. Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar, sanayideki üretim atıklarıdır. Bunlar, doğal puzolanlardaki oksit bileşenleri (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO) içerdiklerinden puzolan ismini alırlar. Atıktaki silisin aktivitesi puzolanın aktivitesini belirlemektedir. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü gibi atıklar yapay puzolan olarak kullanılmaktadır.

Yüksek fırın cürufu: Demir – çelik endüstrisinde, yüksek fırında, cevhere ilave edilen CaCO_3 ile ergime sıcaklığı düşürülür. Kok kömürü yanmasıyla elde edilen yüksek sıcaklıkta ise bir dizi reaksiyon sonucu demir filizi geriye kalan düşük oranda refakatçi malzemelerle alaşım halinde dışarı sevk edilir. Demir (font) üretimi sırasında cüruf atık

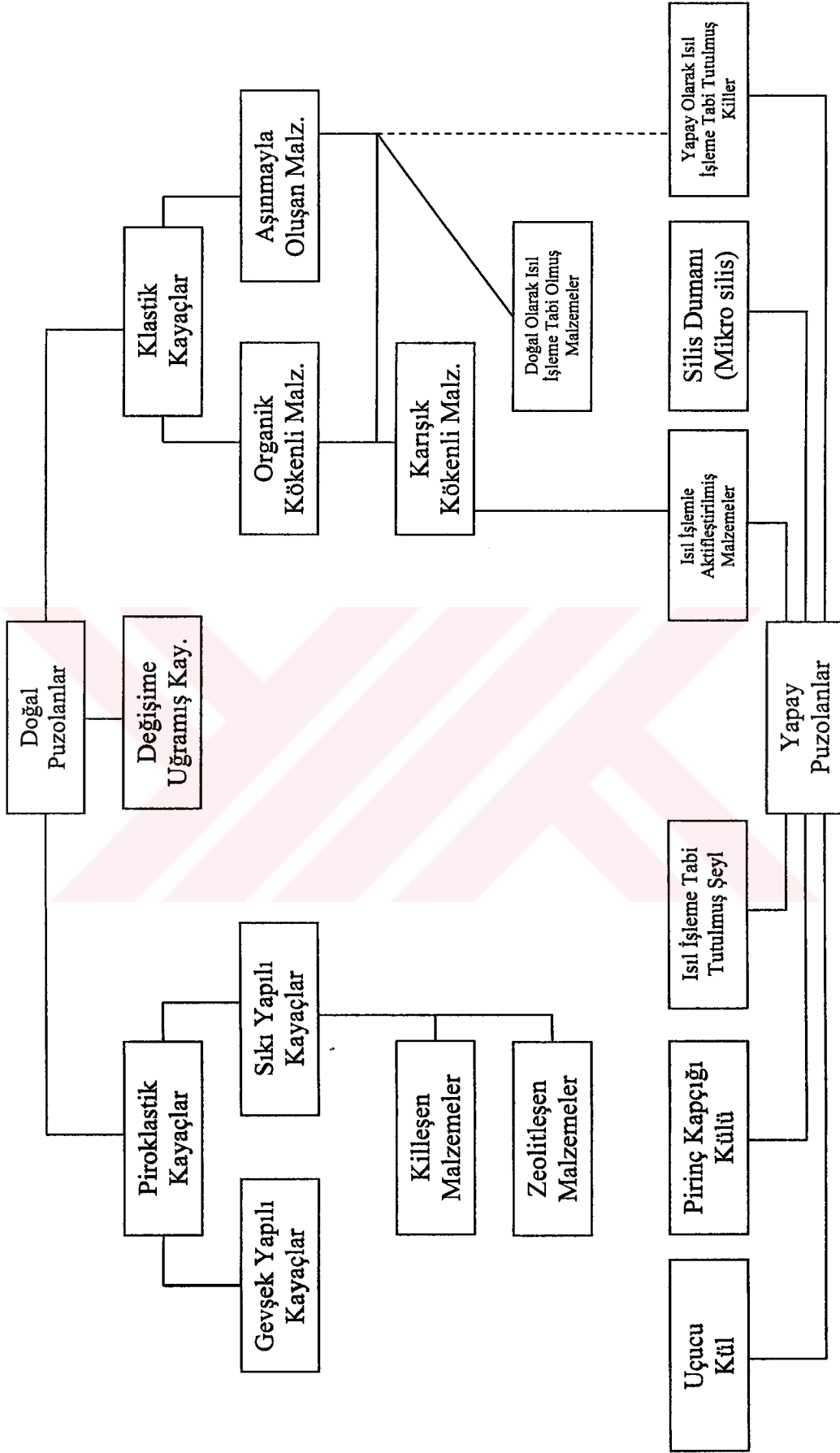
olarak ortaya çıkar. Fırının alt düzeyinden alınan cüruf, ani olarak su ile soğutularak tanelenmiş (granüle) hale getirilir. Cürufun puzolanik özelliği soğuma hızına ve içerdiği demir oranına göre değişir.

Uçucu kül: Termik santrallerde toz kömürün yanması sonucu oluşan kül, bacalardaki elektro filtrelerde veya torbalı filtrelerde tutulur. Filtrelerde gazla katı madde birbirinden ayrılır. Tutulan çok ince, katı malzemeye uçucu kül denir. Küldeki CaO miktarının düşük veya yüksek olmasına göre puzolanik özelliği değişir.

Silis dumanı: Elektrik ark fırınlarında ferrosilikon ve metalik silisyum üretimi sırasında kömürle kuvars indirgenmesi sonucu yan ürün olarak elde edilmektedir.

Pirinç kabuğu külü: Çeltik üretimi sonunda elde edilen zirai ürün atığı kabukların, yakılmasıyla elde edilen külün hızlı şekilde soğutulmasıyla elde edilir.





Şekil 1. Puzolanların Sınıflandırılması [7].

1.2.2. Puzolanik Aktivite

Puzolanik aktivite, puzolanların, çeşitli bağlayıcı malzemelerde var olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile sulu ortamlarda tepkimeye girme ve sertleşme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Ölçülebilir büyüklükte puzolanik aktiviteden söz edebilmek için, bu iki ögenin de aynı anda ortamda bulunması gerekmektedir [7]. Ayrıca puzolanın bağlanma (tepkime) hızı da büyük önem arz etmektedir. Bu değişkenlerin özellikleri, puzolanların aktiviteleri hakkında belirleyici olup, malzemenin içerisinde bulunan aktif fazların niteliğine bağlı olarak gelişme gösterdiği bilinmektedir. Puzolanik aktivite, puzolanların heterojen yapısı ve hidrasyonunun karmaşık yapısı dolayısıyla, bir modelle açıklanması zor olmakla birlikte, bu hususta çözüme götüren bazı yaklaşımlar da mevcuttur [12].

Diğer özelliklerin sabit kalması koşuluyla puzolanın bağladığı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarının fazlalığı, bu puzolanda aktif olan madde miktarının da fazlalığına işaretir.

1. Bir puzolanın kısa sürede aktivitesi esas olarak özgül yüzeyine, buna mukabil uzun süredeki aktivitesi ise kimyasal ve mineralojik yapısına bağlıdır.
2. Bir puzolanın bağladığı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı, puzolanın aktif fazları içerisindeki SiO_2 miktarı ile ilişkilidir.
3. Belirli sınırlar dahilinde kireç-puzolan karışımlarında kireç/puzolan oranının yüksekliği $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile gerçekleşen tepkime kapasitesini de artırıcı olmaktadır.
4. Zeolitik puzolanlar camsı puzolanlara göre genel olarak daha aktiftirler.
5. Farklı puzolanlarda bulunan camsı fazlar farklı oranlarda kireç bağlayabilme yeteneğine sahiptir.
6. Puzolan-kireç karışımlarında ortamda bulunan su miktarının fazla olması bağlanan kireç miktarını artırır.

Bir puzolanın, uygulanabilirliği hakkında değerlendirmede bulunabilmek için öncelikle puzolanik aktivitesinin belirlenmesi esastır. Genel olarak bir maddenin puzolanik aktivitesini belirlemek için kullanılan yöntemler fiziksel, kimyasal ve mekanik olmak üzere üç ana grupta toplanabilir.

Çok yaygın olarak kullanılan *kimyasal metodlar*, hidratlı kireç ve portland çimentosuyla karıştırılan puzolanın sabitleştirdiği kireç miktarını belirlemeye dayanmaktadır. Doymuş kireç çözeltisine karıştırılan puzolanın belirli zaman aralıklarında bağladığı kalsiyum iyonları, bu iyonlarındaki azalmanın tespitiyle belirlenmektedir.

Fiziksel metodlarla puzolanik aktivitenin belirlenmesi ise, puzolanın nitrik–floridik karışım içerisinde erimesi sırasında, bir saatlik zaman diliminde gerçekleşen aşınma kaybindan sonra, ilk aşamada çözünmeden geriye kalan kalıntının daha sonra erimesiyle açığa çıkan ısı miktarının belirlenmesine bağlı bulunmaktadır.

Diğer yandan XRD teknikleriyle de kireç–puzolan karışımlarında bağlanmış Ca(OH)_2 miktarı tayin edilebilmektedir.

Puzolan aktivitesini değerlendirmede geçerli diğer bir yöntem ise puzolan–kireç ya da puzolan–çimento harçlarının *mekanik* dayanımının ölçümü sonucuyla değerlendirilmektedir. Puzolanik tepkimeler sonucu, puzolan – kireç veya puzolan – çimento karışımlarındaki puzolanın bağladığı kireç miktarı arttıkça dayanım da artış göstermektedir. Ancak bu iki değişkenin kesin bir biçimde ilişkilendirilmesi mümkün olmadığı için, bağlanan kireç miktarına dayalı olarak değişen puzolan dayanımının da önceden hesaplanabilmesi olanaksız gözükmektedir. Bunun yerine, puzolanların aktivitesinin tespiti için, puzolan–kireç veya puzolan–çimento karışımlarının dayanımlarını doğrudan tespit etmek daha isabetli bir yol olarak görülmektedir. Bu amaca yönelik olarak geliştirilmiş yöntemde, puzolana belirli oranlarda kireç ya da çimento karıştırılarak hazırlanan prizma numunelerin belirli süreler sonunda dayanımının tespiti esas alınmaktadır.

Genel olarak, puzolan ocağının niteliği incelenirken, ilk aşamada, bir ölçüde yeterli sayılabilecek sonuçlara çabuk erişebilmek için kimyasal yöntemlere başvurup, daha sonra mekanik yöntemler yardımıyla elde edilen verilerle kesin sonuç değerlendirmesine gitmek izlenmesi gereken yol olarak benimsenmektedir.

1.2.3. Kireç – Puzolan Tepkimesi

Çok kesin olmamakla birlikte, kireç puzolan reaksiyonu için iki varsayımda bulunulur. İlki, doğal puzolanlarda alkali bakımından zengin zeolit bileşimlerinin bulunduğu gerçeğinden hareketle, yumuşatma suyundaki Ca^{++} iyonları ile benzer şekilde zeolitlerdeki alkali iyonlarının değişimini puzolanik bir aktivite olarak kabul etmektir. Ancak bu varsayım, bağlanan kireç miktarının kaybolan alkali miktarından fazla olması veya alkali miktarının çok düşük olduğu silisçe zengin kayaçların ve yanmış killerin de kayda değer puzolanik aktivite göstermesi gibi bazı noktaları açıklamada yetersiz kalmaktadır.

İkinci varsayımda, ilkinin tersine, puzolan, kireç ve su arasında meydana gelen tepkime sonucunda mevcut bileşiklerin değişime uğrayarak yerine yenilerinin oluşmasıyla ortaya çıkan durum, gerçek kimyasal bileşim olarak kabul edilir. Bu varsayım, çok sayıda deney sonucuna dayandırılmak koşulu ile ve her şeyden önce, puzolan–kireç tepkimelerinde ortaya çıkan ürünlerin, puzolan–portland çimentosunun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan ürünlerle özdeş olması gerçeğiyle desteklenir.

Her doğal puzolanın kireçle tepkimesi aynı ürünleri açığa çıkarmasa da puzolan–kireç tepkimesi sonucunda ortaya çıkan ürünler genel olarak[12];

1. C-S-H formunda Kalsiyum Silikat Hidrat,
2. C_4AH_x formunda Kalsiyum Alüminat Hidrat ($9 \leq x \leq 13$),
3. Hidratlaşmış Gehlenit, C_2ASH_8 ,
4. Kalsiyum Karboalüminat, $C_3A.CaCO_3H_{12}$,
5. Etrenjit, $C_3A.3CaSO_4.H_{32}$,
6. Kalsiyum Alüminat Monosülfat, $C_3A.CaSO_4.H_{12}$

şeklinde dir.

Bu ürünlerin tümünün bir arada bulunması olanaklı değildir. Örneğin Kalsiyum Alüminat Monosülfat ortamda genellikle hidratasyonun ilk safhalarında bulunur ve zamanla etrenjite dönüşür.

Puzolan – kireç karışımlarının dayanımı, bu iki bileşen arasındaki tepkime ile doğrudan ilişkilidir. Dayanım, karışımın yaşıyla ve kireç/puzolan oranıyla orantılıdır. Ancak dayanım üzerine yapılan çalışmalarda etkili olan bir diğer etkenin de hidratasyon ürünlerinin özgül yüzeyleri olduğu tespit edilmiştir [7].

Kireç – doğal puzolan tepkimesi ile portland çimentosu – doğal puzolan tepkimesinde eşdeğer kimyasal olgular görülür. Bilindiği üzere portland çimentosunda bulunan C_3S ve C_2S minerallerinin hidratasyonu ile $Ca(OH)_2$ açığa çıkar ve gözeneklerde çözelti halinde birikir. Açığa çıkan bu ürün, su ile çözülür ve yıkanmayla geride boşluklar bırakarak ortamı terk edebilir. Ayrıca $Ca(OH)_2$, betonda kimyasal tepkimelere en çok istekli olan bileşiklerden biridir. Bu yüzden puzolan içeren çimentolarda, bu çimentolardaki portland çimentosu içeriğinin hidratasyonu ile açığa çıkan $Ca(OH)_2$ 'nin, puzolan kısmıyla bağlanması sonucu, dayanımı sağlayan C-S-H jellerine dönüşmesi, aynı zamanda betonun dayanıklılığı açısından önemli bir gelişme olarak sayılmaktadır.

Portland çimentosu–doğal puzolan tepkimesinin, kireç–doğal puzolan tepkimesinden farkı ise doğal puzolanın tepkimesi için gereken kireç bileşeninin, karışımın suyla

karıştırıldığı ilk anda ortamda hazır bulunmamasıdır. Kireç, portland çimentosundaki C_3S ve C_2S minerallerinin hidrasyonundan sonra ancak tepkimeye hazır bir durumda ortamda birikmeye başlar. Bu aşamadan sonra başlayan puzolanik tepkimeler sonucu, puzolan C-S-H jellerine dönüşür.

1.3. Puzolan İçeren Çimentolar

1.3.1. Puzolan İçeren Çimentoların Çıkışı

Doğal puzolan betonları ve kireç, 19. yüzyılın sonlarına kadar kullanıla gelmiş temel inşaat malzemeleri olmuştur. Puzolanik harçların ve betonların kullanımı ve önemi, başarılı uygulanabilirliği ve hızlı dayanım kazanma özelliklerine sahip olan portland çimentosunun yaygınlaşmasıyla bir düşüş göstermiştir. Sonraları, portland çimentosu, puzolan ve puzolanın tepkimesi için kireç ilavesiyle yeni tip çimentolar üretilmiştir. Ancak kalsiyum silikatın hidrasyonu sonucu ortamda oluşan bir kısım kirecin, puzolan için gereken kireç miktarını karşıladığı anlaşılınca, kireç ilavesinden vazgeçilerek, puzolan içeren çimentolar üretilmeye başlanmıştır. Nitelikli puzolan yataklarına sahip ülkeler, özellikle dayanıklılık (durabilite) konusundaki başarımından dolayı, puzolan içeren çimentoları yaygın bir şekilde üretmeye ve kullanmaya devam etmektedir. Ayrıca, düşük ısı açığa çıkarmaları nedeniyle puzolanlı çimentolar kütle betonlarda tercih edilmişlerdir. Alkali – agrega tepkimelerine karşı azaltıcı etki göstermeleri de bir başka tercih sebebinin ortaya koymaktadır.

Çimentodaki puzolan oranını belirleyen etkenlerden biri de kalsiyum silikatların hidrasyonu sırasında oluşan kireci bağlayabilme kabiliyetidir. Bu durum puzolanlık testi yardımıyla belirlenir. Bu yeterli değilse puzolan oranı artırılır.

Daha önce de değinildiği üzere, tras kelimesi her ne kadar özel olarak bir tip doğal puzolanı tarif etmekte ise de Türkiye’de tüm doğal puzolanlar tras ismiyle anılmaktadır. Yürürlükteki standartlara göre beş tip doğal puzolan içeren çimento mevcuttur.

TS 26’ya göre, traslı çimento (TÇ 32.5) kütlece 20 – 40 kısım tras, 80 – 60 kısım portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçı taşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır.

TS 10156'ya göre, katkılı çimento, kütlece en çok 19 kısım puzolanik madde ile karşılıklı olarak en az 81 kısım portland çimentosu klinkerinin, bir miktar alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır.

Bunun dışında, standartlarda tanıtılan puzolan içerikli diğer çimentolar ise, katkı olarak doğal puzolan, endüstriyel puzolan veya silisli uçucu kül karışımıyla üretilen *kompoze çimento (TS 12142)*, katkı olarak doğal puzolan, endüstriyel puzolan, silisli uçucu kül, kireçli uçucu kül, kalker, silis dumanı veya granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen *portland kompoze çimento (TS 12143)* ve katkı olarak doğal puzolan, endüstriyel puzolan, silisli uçucu kül, silis dumanı veya granüle yüksek fırın cürufu karıştırılarak üretilen *puzolanik çimento (TS 12144)* olarak bilinmektedir.

1.3.2. Puzolan İçeren Çimentoların Üretimi

Fabrikalarda çimentoya tras katılması işlemi iki yolla,

1. tras, portland çimentosu klinkeri ve katılma süresini düzenlemek için ilave edilen alçıtaşı ile birlikte öğütülerek,
2. klinker, alçıtaşı ile birlikte, tras ise yalnız başına öğütülüp daha sonra birbirleriyle karıştırılarak,

gerçekleştirilmektedir.

Beraber öğütme tekniğiyle daha homojen bir karışım elde edilebilmesine rağmen, üretilen çimentoda tane boyutu dağılımını denetleyebilmek daha zor olmaktadır. Çünkü tras ve klinker farklı incelikte öğütülebilen malzemelerdir. Daha sert bir yapıya sahip olan klinker, trasla elde edilen inceliğe göre daha kaba bir tanelilik arz etmektedir.

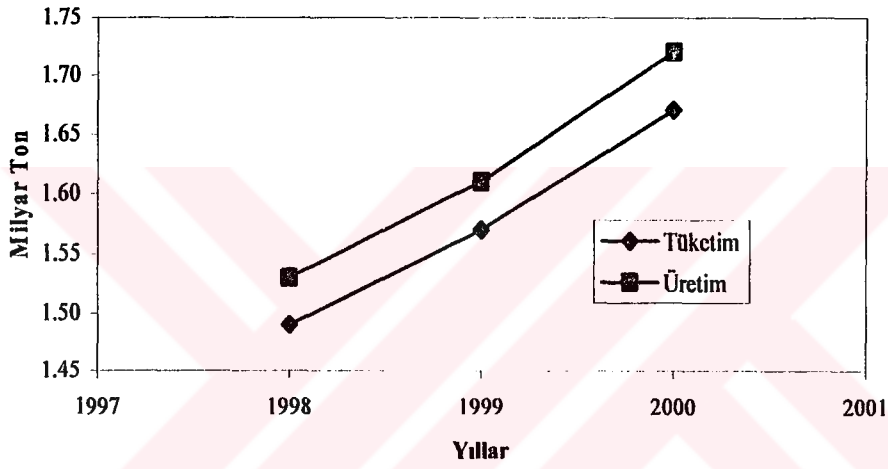
Ayrı ayrı öğütülüp karıştırma tekniğinde ise çimentodaki klinker ve tras bileşenlerinin tane boyutu dağılımı istenilen oranlarda ayarlanabilmekle birlikte, diğer yandan karışımın homojenliğini sağlamak güçleşmektedir.

Türkiye'de genel olarak traslı çimentoların bileşimi, birlikte öğütme yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.

1.4. Dünya'da ve Türkiye'de Çimento Üretimi ve Tüketimi

1.4.1. Dünyada Çimento Üretimi ve Tüketimi

2000 yılı verilerine göre, Dünyada çimento üretimi önceki yıllara göre küçük bir artış göstererek 1.66 milyar tona ulaşmıştır. Dünya çimento üretiminde aynı yılda 576 milyon ton ile Çin başı çekerken Türkiye 37 milyon tonluk üretimiyle dokuzuncu sırada yer almıştır. Çimento ihraç eden ülkeler arasında ise 9 milyon ton ile Endonezya birinci Türkiye ise 3.7 milyon ton ile yedinci sırada yer almıştır [13].



Şekil 2. Dünyada çimento üretim ve tüketimi

Çizelge 6. Dünya çimento üretimi, (Milyon ton) [13].

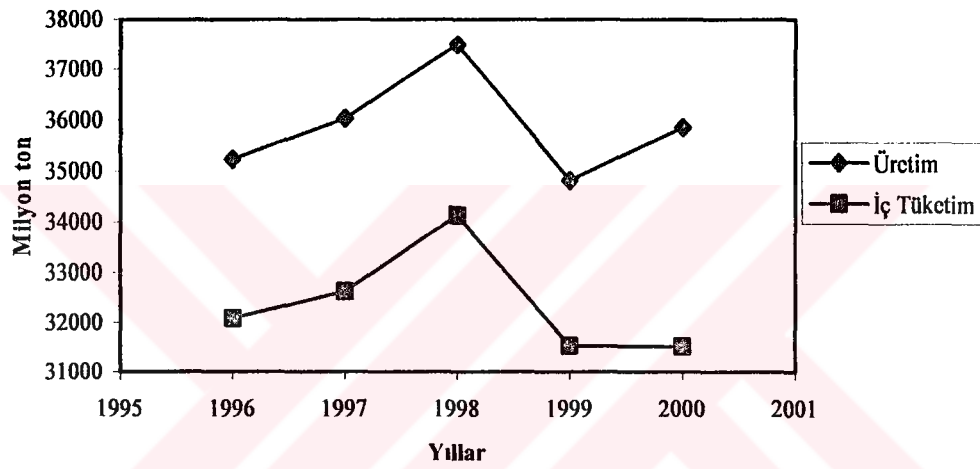
	1999	2000
Çin	573.0	576.0
Hindistan	97.9	107.7
ABD	85.4	86.0
Japonya	81.7	81.0
Güney Kore	49.5	52.3
Brezilya	40.0	40.0
İtalya	37.3	38.8
İspanya	35.8	37.8
Türkiye	34.8	35.9
Endonezya	23.9	34.9
Rusya	29.2	33.0

1.4.2. Türkiye’de Çimento Üretimi ve Tüketimi

Dünyada çimento üretim ve satışına 1878 yılında başlanmasına rağmen, Türkiye’de çimento üretimi ancak 1912 yılında özel sektörün girişimi sonucu başlayabilmiştir.

Türkiye’deki çimento sektörü, 2000 yılı verilerine göre, 39 çimento fabrikası (6’sı Karadeniz Bölgesinde) ve 18 öğütme tesisi (4’ü Karadeniz Bölgesinde) ile 9,708 kişiyi (1098 kişi Karadeniz Bölgesinde) istihdam etmektedir.

2000 yılında üretilen 35.9 milyon ton çimentonun, 31.5 milyon tonu iç pazara, 4.4 milyon tonu ise dış pazara arz edilmiştir.



Şekil 3. Türkiye’deki çimento üretimi ve iç pazara arzı

1.5. Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde, tez konusunu ilgilendiren inceleme alanı öncelikli olmak üzere, ülkede bulunan diğer puzolan yataklarının yararlılığı hakkında yapılan çalışmalardan bazıları seçilerek, bunlardan elde edilen sonuçlardan özetle bilgi aktarılacaktır. Bu sırada puzolan içeren çimentoların ayrıntılı özellikleri de yeri geldikçe, kaynakların elverdiği ölçüde tanıtılmış olacaktır.

1.5.1. İnceleme Alanının Jeolojik Özellikleri

Aydın [14], yaptığı çalışmada, Trabzon ili çevresinde, genel olarak, jeolojik anlamda üst kratese ve neojen yaşlı volkanik kayaların mevcut olduğunu açık olarak göstermektedir.

Üst kratese yaşlı volkanik kayaların başlıcaları, bazalt, spilit bazalt, bazaltik andezit, andezit ve bunların piroklastitlerinden oluşmaktadır. Bu kayaları meydana getiren ana mineraller pilajiyoklas, klinopiroksen ve Fe-Ti-Oksit içermektedir. Neojen yaşlı volkanitlerden ise bazanit, olivin, tefrit, fonolitik tefrit, tefridik fenolit bulunmaktadır. Bunlar ana mineral olarak klinopiroksen, pilajiyoklas, K-feldspat, feldspatoidler ve yer yer olivin, biyotit, amfibol, Fe-Ti-Oksit ve opatit içermektedirler. Ayrıca aynı yaşta olmak üzere alkali bazalt, trakibazalt, bazaltik trakiandezit, trakit ve riyolit de bulunmaktadır.

Yöredeki volkanik kayalarda, özellikle feldspatoid içerenlerde, ikincil minerallerden en yaygın olarak zeolitler bulunmaktadır. Bunların yanında yine yaygın olarak bulunan killer ise büyük ölçüde ayrışma sürecini tamamlamıştır. *Dokuz* [15] da Maçka yöresinin piroklastik kayalarını incelediği çalışmasında yine benzer sonuçlara varmıştır.

1.5.2. Türkiye'deki Puzolan Kaynakları ve Puzolanik Aktiviteleri

1984 yılında Leckebush [16], Türkiye Çimento Müstahsiller Birliği tarafından desteklenen kapsamlı çalışmasında, Türkiye'deki doğal puzolan kaynaklarını araştırmış, Balıkesir, Bolu, Çanakkale, Elazığ, Eskişehir, Konya, Kula (Afyon) ve Niğde'den aldığı 67 örnekle yaptığı çalışmada örneklerin bir çoğunun yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğunu belirlemiştir.

Türkmenoğlu ve Tankut [17] ise Bağlum – Elmadağ yöresinde (Ankara) yaptıkları kapsamlı bir araştırma sonucunda, yöredeki volkanitlerin gerek kimyasal gerekse mekanik açıdan TS'de belirtilen sınırlar dahilinde kaldığını ve dolayısıyla çimentoda puzolan olarak kullanılabilecek özelliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Okucu [8] ise Turnatepe ve Bigadiç yörelerinde (Balıkesir) yaptığı incelemeler sonucunda bu yöredeki tüflerin yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğunu tespit etmiştir.

Selçuk [18], Dereboğazı (Isparta) yöresi tras yataklarını özellikle kimyasal ve mineralojik olarak incelediği çalışmasında yöredeki tüflerin kimyasal olarak TS 25'te belirtilen özelliklere sahip olduğunu belirlemiştir.

Kılınçkale [19], Şile'den (İstanbul) aldığı doğal puzolan, Karabük'ten (Zonguldak) aldığı yüksek fırın cürufu, Çatalağzı Termik Güç Santralinden (Zonguldak) aldığı uçucu kül, Etibank Ferrokrom Tesislerinden (Antalya) aldığı silis dumanı ve Ayvansaray'dan (İstanbul) aldığı pirinç kabuğu külü ile yaptığı puzolanik aktivite deneyleri sonucunda (Çizelge 7, 8) puzolanların TS 25'te belirtilen mekanik sınırlar dahilinde olduğu ve bu kaynaklardan elde edilen puzolanların çimentoda kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Çizelge 7. Bazı puzolanların özellikleri [19].

	Fiziksel Özellikler		Kimyasal Bileşim (%m)							
	Özgül Kütle (mg/m ³)	Özgül Yüzey (cm ² /g)	Ç.müş SiO ₂	Ç.memiş SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Kızdırma Kaybı
Pirinç K. Külü	1.90	560000 (BET)	80.25	7.25	4.75	2.00	0.89	0.64	-	4.05
Silis Dumanı	2.21	260000 (BET)	75.54	17.46	1.00	2.00	1.50	0.70	0.40	0.74
Uçucu Kül	2.20	4030 (Blaine)	56.25*	-	32.10	3.90	3.92	1.40	-	2.22
Y.Fırın Cürufu	3.08	2770 (Blaine)	35.85	0.32	20.77	0.98	37.2	4.90	-	-
Tras	1.90	11880 (Blaine)	25.71	35.74	20.04	1.46	3.43	0.70	-	12.15

* Toplam SiO₂

Çizelge 8. Bazı puzolanların TS 25'e göre puzolanik aktiviteleri [19].

	Pirinç K. Külü	Silis Dumanı	Uçucu Kül	Y. Fırın Cürufu	Tras	TS25
Çekme Dayanımı (Mpa)	1.4	1.6	1.6	2.0	2.3	1.0
Basınç Dayanımı (MPa)	4.8	5.8	5.2	6.9	5.4	4.0

Bayoğlu [20], Afyon, Balıkesir, İzmir, Ankara, Çorum ve Kara Mürsel'den aldığı doğal puzolan örnekleriyle yaptığı çalışmalar sonucunda bu örneklerin gerek kimyasal bileşim gerekse puzolanik aktivite yönünden TS 25'e uygun olduğunu tespit etmiştir.

Bayat [21], Türkiye'deki uçucu küllerin özelliklerini incelediği çalışmasında Yatağan, Seyitömer, Soma, Yeniköy, Tunçbilek, Afşin-Elbistan linyit santrallerinden ve Çatalağzı taş kömürü işletmelerinden almış olduğu uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik incelemelerini yapmış ve bunların kimyasal açıdan puzolan olarak kullanabilecek özelliğe sahip oldukları sonucuna varmıştır.

1.5.3. Puzolan Tipinin ve Bileşiminin Dayanıma Etkisi

Okucu [8], farklı tip tüfleri kullandığı çalışmasında vardığı sonuçlara göre, camsı fazın yüksek miktarda bulunduğu puzolanlardan oluşan katkılı çimentoların 2 ve 7 günlük dayanım deneylerinden, zeolitlenmenin hakim olduğu puzolanlardan oluşan katkılı çimentoların ise 28 günlük dayanım deneylerinden iyi sonuçlar aldığını bildirmektedir.

Liebig ve Althaus [22], volkanik tüf ve breşlerin puzolanik aktivitelerine, kalsinasyonun etkisini inceledikleri çalışmalarında, ısıtılmış volkanik tüflerin, yine ısıtılmış volkanik breşlere göre daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip oldukları gibi, bunların aynı zamanda harç sıvısına daha çok çözünmemiş Na ve K bıraktıklarını belirtmektedirler. Breşlerin üstün yanlarını ise daha az Na ve K içermelerine bağlayarak değerlendirmektedirler. Ayrıca, malzeme kalsinasyonla aktifleşebilecek bileşenler içeriyorsa, bu tüflerin reaktivitesinin ısıtılmış ile artırılacağı da varılan sonuçlar arasında gösterilmektedir. Breşlerin puzolanik aktivitesinin 800°C'de kalsinasyonla önemli ölçüde artırılacağı ve ayrıca kireç katılımıyla da ısıtılmış işlem görmemiş malzemeye göre basınç dayanımının üç kat daha artırılacağı yine bu çalışmada belirtilmektedir. Volkanik tüfler içinse, kalsinasyonun basınç dayanımını azaltan bir etkisi olduğu, ancak kimyasal bileşimine bağlı olarak her tüfün farklı sonuçlar verebileceği de varılan bir diğer sonuç olarak bildirilmektedir.

Sevim [23], Çine (Aydın) ve Ödemiş (İzmir) yörelerinden aldığı volkanik olmayan leptit örnekleri üzerinde puzolanik aktivite deneyleri yapmış, örneklerin kimyasal olarak TS 25'te verilen sınırlara uymasına rağmen basınç dayanımlarının ancak küçük değerler verdiğini, bu yüzden de bu kayaların çimentoda puzolan olarak kullanımlarının uygun olmadığı kanaatine varmıştır.

Leckeubush [16], daha önce de değinilen, 67 puzolan örneğiyle yaptığı çalışmada, puzolanlara ait bileşenlerle dayanımlar arasında bağıntılar oluşturmuştur (Çizelge 9).

Bayoğlu [20] da altı farklı tüf örneğiyle yaptığı benzer bir çalışmada basınç dayanımlarıyla kimyasal bileşimler arasında bazı bağıntılar tespit etmiştir (Çizelge 10).

Çizelge 9. Basınç dayanımlarıyla oksit konsantrasyonları arasındaki bağıntılar[16].

Türetilen Eşitlik	Ortalama Kareler Sapması
$B.D. = -0.543 Al_2O_3 + 24.08$	1.301
$B.D. = -1.12 CaO + 18.59$	0.551
$B.D. = -1.05 Fe_2O_3 + 18.32$	0.590
$B.D. = 3.35 K_2O + 6.12$	0.752
$B.D. = -2.15 MgO + 17.91$	0.503
$B.D. = 0.571 SiO_2 - 20.93$	0.426
$B.D. = 0.574 Al_2O_3 + 0.701 SiO_2 + 39.16$	0.147
$B.D. = 0.567 Al_2O_3 - 0.0311 Fe_2O_3 + 0.685 SiO_2 - 37.92$	0.147
$B.D. = 0.478 CaO - 0.635 Fe_2O_3 - 0.187 MgO + 18.04$	0.457
$B.D. = -0.739 K_2O + 0.673 SiO_2 - 25.42$	0.413

Çizelge 10. Basınç Dayanımlarıyla bazı bileşenler (%m) arasındaki bağıntılar [20].

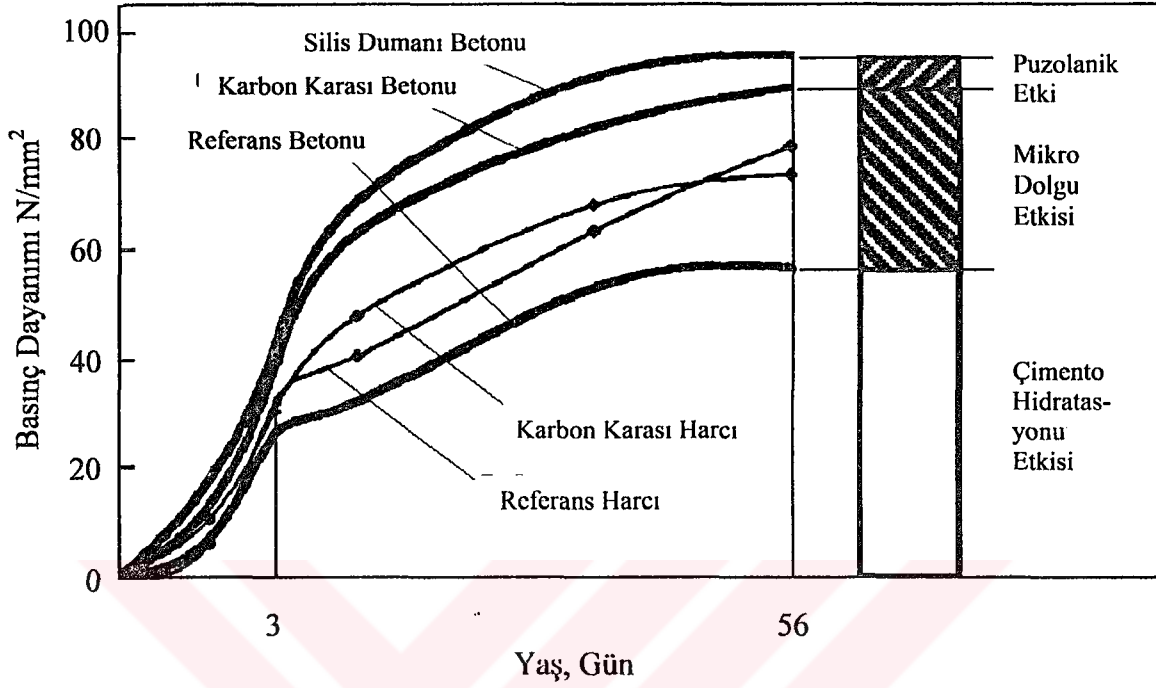
Türetilen Eşitlik	Korelasyon Katsayısı
$B.D. = 36.73 + 0.586 SiO_2$	0.81
$B.D. = 23.33 + 0.652 (SiO_2 + Al_2O_3)$	0.81
$B.D. = -0.479 + 0.919 (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)$	0.83

1.5.4. Tane İnceliğinin Basınç Dayanımına Etkisi

Taşdemir [24], yaptığı çalışmada, çimentoda kütlece %30 oranında silis dumanı, uçucu kül, kumtaşı dolgusu ve kireçtaşı dolgusu gibi mineral katkı maddesi ikame ederek, mineral katkı maddelerinin, ince öğütülebilme ve puzolanik aktivite özellikleri sayesinde basınç mukavemetinde artış sağladığını, ayrıca bu katkılar öğütülürken içinde kalan kaba parçaların da basınç dayanımını olumlu etkilediğini tespit etmiştir. Buna gerekçe olarak da mineral katkıların, mikro boşlukları doldurma yeteneğiyle, betonun dayanımı üzerinde puzolanik aktiviteden daha yüksek bir etki sağladığını göstermektedir (Şekil 4). Mineral katkıların inceliğinin, agrega – çimento geçiş bölgesindeki zayıf bağların yeniden yapılandırılmasında önemli bir işlevi olduğunu da, Taşdemir çalışmasında, verdiği kaynaklara dayanarak savunmaktadır.

Leckebush [16] ise iki farklı puzolanı farklı inceliklerde öğütmek suretiyle yaptığı deneyler sonucunda, örneklerin birinde tane inceliği arttıkça basınç dayanımının da arttığı sonucuna varırken, diğer örnekte bunun tersi olan bir durumla karşılaşmıştır. Buradan da dayanımın her zaman özgül yüzey değeri (Blaine) ile orantılı olmayabileceği kanaatine

varmıştır. Buna bir gerekçe olarak da puzolan içindeki camsı fazın öğütme işleminden sonra aktivitesini kaybetmesini göstermiştir.



Şekil 4. Betonun basınç dayanımı üzerindeki mikro dolgu ve puzolanik etkiler [24]

Pan vd. [25] ise lağım atığından elde edilen puzolanı, kütlesince %20 oranında çimentoda ikame ederek ve puzolan inceliğini 5000 ile 10000 cm^2/g arasında değiştirmek suretiyle yaptıkları deneyler sonucunda, bu puzolanların inceliğindeki artışla örnek harçlarda basınç dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca bu incelik artışıyla harçların işlenebilirliğinde de bir artış söz konusu olmuştur. Bu da ince öğütülmüş puzolanın, harca kayganlaştırıcı özellik kazandırarak işlenebilirliğini artırdığı düşüncesine dayandırılmaktadır.

Turanlı [26], altı farklı incelikte ve farklı tipteki çimentoyla yaptığı deneyler sonucunda çimento inceliğinin, hidratasyon hızını artırdığını tespit etmiştir. Yazara göre, daha ince öğütülmüş çimento, dayanımı artırıcı etkisi olan C-S-H jelleri oluşumunu ve Ca(OH)_2 üretimini hızlandırmaktadır. Erken yaşlarda daha büyük miktarlarda ortaya çıkan Ca(OH)_2 ise puzolanik reaksiyonların daha erken başlamasına sebep olarak yeni C-S-H jellerinin oluşmasına, böylece de dayanım artışına katkı sağlamış olmaktadır.

Turhan ve Doğulu [27] ise %50 oranında cüruf içeren çimentoyu 3000 ile 6500 cm^2/g arasında yedi farklı incelikte öğütmek suretiyle, Blaine inceliğinin 3000 cm^2/g 'dan

6500 cm²/g'a çıkarılmasıyla, hem 7 hem de 28 günlük basınç dayanımlarında %36 oranında artış sağlandığını tespit etmişlerdir.

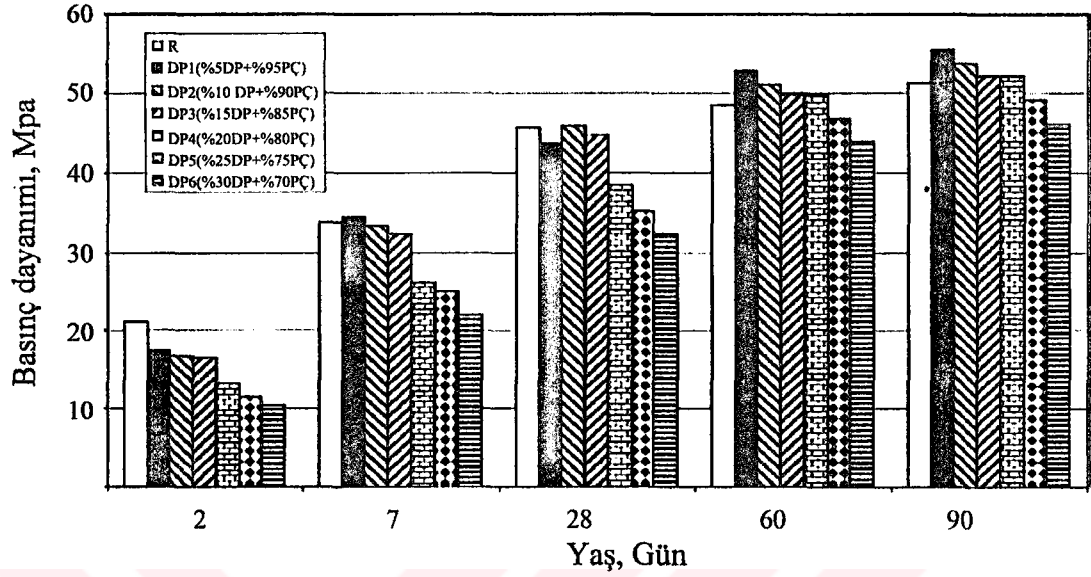
1.5.5. Puzolan Oranının ve Tipinin Dayanıma Etkisi

Uzal ve Turanlı [28], yaptıkları çalışmada %55 oranında doğal puzolan içeren çimento kullanmış ve 91 güne kadar yapılan deneylerde, portland çimentosunun puzolanlı çimentoya göre daha yüksek basınç dayanımı vermekte olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca portland çimentosunun 28 günlük basınç dayanımı, puzolan içeren çimentoya göre yaklaşık %35 daha yüksek olduğu da varılan sonuçlar arasındadır.

Targan vd. [29] ise doğal puzolan, cüruf, kömür dip külü ve uçucu kül kullanımının çimentonun özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmalarında, adı geçen katkıları %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 kütle oranlarıyla artırarak 28 çeşit çimento elde etmişlerdir. Yaptıkları deneylerin sonuçlarını ise bir portland çimentosu sonucuyla karşılaştırmışlardır. Yapılan karşılaştırmada, doğal puzolan oranının %15 sınırına kadar çıkarılmasıyla, puzolanlı çimentonun portland çimentosuna göre 28 günden sonra gerçekleştirilen basınç dayanımlarında daha yüksek değerlere ulaşabildiği gözlemlenmiştir (Şekil5). Bu da, elde bulunan malzemelerin türüne bağlı olarak, çimento kütlelerinin %15'inden daha fazla doğal puzolan içeren betonların, gereğinden fazla ince öğütülmüş puzolan malzemeye sahip olmaları nedeniyle, portland çimentosu taneciklerinin hidratasyon neticesinde birbirinden fazlaca uzaklaşmaları sonucu, basınç dayanımlarında düşüş gözlemlenmiştir, şeklinde yorumlanmaktadır.

Canpolat vd. [30] zeolit, kömür dip külü ve uçucu kül kullanımının çimento özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmada ise adı geçen katkıları %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %35 kütle oranlarında değiştirerek 21 çeşit katkılı çimento üretmişlerdir. Bu numunelerden elde edilen basınç dayanımı sonuçlarını portland çimentosu ile de karşılaştıran araştırmacılar, %15 zeolit içeren çimentoların PÇ 42.5'a göre daha yüksek dayanım vermekte olduğunu ve ayrıca %20 zeolit içeren çimentoların ise tüm yaşlarda en yüksek dayanıma eriştiğini tespit etmişlerdir. Diğer yandan, ilk 7 günde zeolit ikame oranı arttıkça basınç dayanımının düşmekte olduğu da bulgular arasındadır. Yine bu çalışmaya göre, %20 zeolit veya %5 zeolit + %5 uçucu kül veya %5 zeolit + %5 kömür dibi külü katkı oranları TS' de istenen dayanım sınırının aşılabilmesi için yeterli görülmektedir. Saf Portland çimentosu kullanımı yerine puzolanlı çimentolara uygulama alanı tanımak,

beklenen teknik üstünlükler yanında hem ekonomik hem de çevre dostu bir çözüm olmaktadır.



Şekil 5. Doğal puzolan ve portland çimentosu içeren betonların basınç dayanımı [29].

Vu vd. [31] ise bir çeşit yapay puzolan olan kalsine edilmiş kaolini (kil) kütlesince %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında çimentoda ikame ederek yaptıkları çalışmada, 3-7 günlük harç numuneleri üzerinde gerçekleştirdikleri dayanım deneylerinden, %10'luk kalsine kil ilavesiyle basınç dayanımının artırılabilirliğini, daha yaşlı harçlarda ise yine dayanım artışı sağlayabilmek için bu oranın yükseltilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Buna göre, 7-28 gün numune yaşı için bu oranın %15-20, daha yaşlı harçlar için ise %20-25'e kadar yükseltilmesi söz konusu olabilmektedir.

Shannag [32] ise doğal puzolan ve silis dumanı kullanarak yüksek dayanımlı beton elde etmeyi amaçladığı çalışmasında, çimentoya ek olarak, beton karışımına çimento kütlesinin %5, %10, %15, %20, %25'i oranlarında doğal puzolan ve silis dumanını, ayrı ayrı veya birlikte ilave etmiş ve sonuçları irdelemiştir. Yapılan çalışmaya göre doğal puzolan ve silis dumanının aynı anda kullanımı, betonun basınç dayanımını artırmada, doğal puzolan veya silis dumanının tek başına kullanımından daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Böylece, çimento kütlesinin yaklaşık %15'i kadar katkı malzemesiyle 110 Mpa'a kadar basınç dayanımına sahip beton üretimi başarılmıştır. Dayanımdaki bu artış, silis dumanının, çok ince tane yapısından dolayı, betonunun içerisindeki agrega-hamur bağını güçlü kılmasına bağlanmaktadır. Bu çalışmadan çıkarılan diğer bir sonuca göre ise

silis dumanı – doğal puzolan karışımlarında 400 – 460 kg/m³ toplam bağlayıcı kullanılarak ve orta dereceli bir işlenebilirlikle, 28 günde 69 – 85 MPa arasında bir basınç dayanımına ulaşmak mümkün gözükmektedir. Ayrıca üretilen bu betonların daha yüksek elastisite modüllerine sahip oldukları da bilinmektedir.

1.5.6. Puzolan Oranının ve Tipinin Katılma Sürelerine Etkisi

Targan vd. [29] yukarıda sözü edildiği gibi gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda çimento kütlelerinin %20'si ve daha düşük oranlarda puzolan ikamesiyle, doğal puzolanların çimentonun katılma başlangıcını geciktirebileceği, bununla birlikte, puzolan ikame oranındaki artışın, portland çimentosuna göre katılma sonlanma süresinde bir düşüşe sebep olabileceğini tespit edilmişlerdir. Ayrıca yine elde edilen sonuçlara göre, aynı anda üç katkı içeren çimentolarda, toplam bağlayıcı içinde, uçucu kül ve dip külünün sabit tutulup, doğal puzolanın artırılmasıyla, katılma sonunun çabuklaştırıldığı bildirilmektedir. Diğer yandan %4 kütle oranında cüruf içeren çimentolara, doğal puzolan ilave edildikçe, doğal puzolanın artışına koşut (paralel) olarak da katılma sonlanma süresinde önemli ölçüde (yaklaşık 6 saat) gecikme gözlemlenmiştir.

Özer ve Özkul [33], portland çimentosu (PÇ 32.5), katkılı çimento (KÇ 325) ve trash çimento (TÇ 32.5) ile ürettikleri betonları altı farklı durumda kür uygulamasıyla gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda, kür koşullarının hem portland çimentosunun hem de puzolanlı çimentoların dayanım gelişmesini etkilediğini tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra, puzolanik çimentoların, puzolanik aktivitelerini kazanması için en az 7 gün kür edilmeye ihtiyaç duyduğunu, 14 gün suda kür edilmiş puzolanik çimentonun, azami 2 ay kadar küre tabi tutulmuş portland çimentosunun dayanımına ancak erişebildiğini ve ayrıca yalnızca 3 gün veya daha az, suda kür edilmiş puzolanik çimentoların asla portland çimentosundan üretilmiş betonunun dayanımına erişemeyeceğini söylemektedirler. Portland çimentosunun, su içinde dayanım kazanma hızının, puzolanik çimentoya göre nispeten daha düşük olduğunu, hava küründe ise aksine, portland çimentosundan yapılmış betonun dayanım kazanma hızının daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca Portland çimentosu betonları, 14 gün ve daha fazla kür edilenler hariç, 90 ile 180 gün arasında yapılan deneylerde dayanım kaybederken, puzolanik çimentoların 90 günden sonra dayanım kazanmaya devam ettikleri de varılan bir diğer sonuçtur. Ortaya çıkan bu

puzolanlı çimento lehine gelişen durumu bir ölçüde, araştırmacılar, büzülme çatlaklarının puzolan aktivitesiyle gerilemiş ya da azalmış olmasına dayandırmaktadırlar.

Vu vd. [31] ise yukarıda sözü edilen çalışmalarında kütlece %10-20 arasında kalsine edilmiş kaolin içeren çimentoların katılma sürelerinde bir değişim olmadığını, ancak, bundan daha yüksek oranda kaolin ilavesiyle katılma sürelerinde önemli bir gecikme söz konusu olduğunu belirtmektedirler.

Uzal vd. [28] yaptıkları çalışmada, birbirine çok yakın kimyasal yapıya sahip iki farklı tip doğal puzolan kullanarak, yaklaşık eşit incelikte ve %55 kütle oranında puzolan içeren çimentolar üretmiş, ayrıca kıyaslamak amacıyla bir de portland çimentosuyla deneyler yapmışlardır. Buna göre, puzolanlı çimentonun portland çimentosuna göre su ihtiyacı yaklaşık %50 oranında artış göstermiştir. Bununla birlikte puzolan ilavesinin, katılma süresini, puzolan tipine bağlı olarak iki farklı yönde etkilemekte olduğu da bu çalışmada tespit edilmiştir. Bir tip puzolan ilavesiyle katılma süreleri portland çimentosuna göre gecikmekte iken, diğer bir tip puzolan ilavesiyle ise katılma daha erken gerçekleşmiştir. Bu duruma ise yazarlar bir açıklama getirememişlerdir.

Özkul [34], hızlandırılmış kürün, beton üzerinde etkilerini incelediği çalışmasında, portland çimentosu (PÇ 32.5) ve traslı çimento (TÇ 32.5) kullanarak ürettiği betonlara iki farklı kürde hızlandırma yöntemi, sıcak su ve kaynayan su yöntemleri olmak üzere, uygulamıştır. Aynı kür yardımı ile hızlandırma yöntemi uygulanan betonlardan, tras içeren çimento ile üretilmiş betonlar üzerindeki kür etkisinde, katılma süreleri açısından, portland çimentosuyla üretilmiş beton örneğine göre gecikme tespit edilmiştir.

Türker [35], çimento tiplerinin betonların özelliklerine etkisini incelediği çalışmasında, puzolanik katkıları içeren kompoze portland çimentolarıyla üretilen C20 gibi düşük dayanımlı betonlara göre, portland çimentosuyla üretilmiş betonların, aynı dayanım sınıfı ve işlenebilirlik özelliğine sahip olabilmesi için, daha düşük su/çimento oranları ve daha yüksek oranlarda çimento kullanımı ile üretilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

1.5.7. Puzolan Oranının ve İnceliğinin İşlenebilirliğe Etkisi

Vu vd. [31] daha önce de değinilen kalsine edilmiş kaolini (kil) çimentoda ikame ederek yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak yalnız portland çimentosu kullanarak ortalama bir taze beton kıvamı elde edebilmek için su/bağlayıcı (S/B) oranını 0.25 olarak belirlemişlerdir; buna karşın portland çimentosuna %30 kütle oranında kaolin katarak

hazırladıkları taze betonda ise aynı kıvamı sağlayabilmek için S/B oranını 0.41'e çıkarmak zorunda kalmışlardır. Vardıkları sonuç ise, en uygun kaolinli çimento karışımının, toplam öğütölmüş malzemenin kütlelerinin %10 ile %20 arasında kaolin eklemesiyle gerçekleştirilebileceğini belirlemek olmuştur. Bu çimento karışımı ile hazırlanan taze betonun en uygun su gereksinmesi ise 0.32 ile 0.42 arasında bir S/B oranıyla belirlenmiş olmaktadır.

Yılmaz [36] ise çimentoya farklı oranlarda puzolan katarak ve çimentoyu farklı inceliklerde öğüterek yaptığı deneyler sonucunda, normal taze beton kıvamını sağlayabilmenin, karıştırılan puzolan oranına ve çimentonun tane inceliğine bağlı olarak, su ihtiyacının artırılmasıyla mümkün olacağını bildirmektedir.

Turanlı ve Erdoğan [37] da yaptıkları çalışmada, puzolan oranı arttıkça, aynı kıvamı elde edebilmek için çimentoya ilave edilen su miktarının da artırılması gerektiğini belirlemişlerdir. Bunun da katılma sürelerini bir ölçüde geciktirmekte olduğu sonucuna varmışlardır.

1.5.8. Puzolan Oranının ve Tipinin Dayanıklılığa Etkisi

Uzal ve Turanlı [28], yaptıkları ve daha önce de değinilen çalışmalarında, birbirine çok yakın kimyasal yapıya sahip iki farklı tip doğal puzolan kullanarak, yaklaşık eşit incelikte ve %55 oranında puzolan içeren çimentolar üretmişler, ayrıca karşılaştırmak amacıyla bir de portland çimentosu örneği uygulamaya alarak alkali silika genleşmeleri üzerine bazı deneyler yapmışlardır. Buna göre, %_m55 tras katkılı çimentolarda alkali-silika genleşmelerinin azalma gösterdiği saptanmıştır.

Ramlochan vd. [38] ise yüksek sıcaklıkta kür uygulamasıyla harçların genleşmesi üzerinde, doğal puzolan ve cüruf katkılarının etkisini inceledikleri çalışmalarında, çimentoda değişik oranlarda adı geçen katkıları kullanarak bazı sonuçlar elde etmişlerdir. Buna göre, uzun süre yüksek sıcaklıkta kür uygulamasıyla, %8 çimento kütle oranında karıştırılan silis dumanının, geciktirilmiş etrenjit oluşumu ile ortaya çıkan genleşmelerin sınırlandırılmasında etkili olmadığı belirlenmiştir. Buna karşın eşdeğer bir oranda metakaolinle gerçekleştirilen deneylerden ise uzun sürede ortaya çıkan genleşmelerin azaltılabileceği sonucu çıkarılmış bulunmaktadır. Ayrıca çimentoya yüksek fırın cürufu ve uçucu kül karıştırılmasının da istenmeyen genleşmeleri engelleyeceği yazarlar tarafından belirtilmektedir.

Sabir vd. [39] ise bir çeşit kalsine edilmiş kil biçimi olan metakaolini harçlarda yapay puzolan olarak kullandıkları çalışmalarında, metakaolinin, portland çimentosuna göre yüksek maliyetli olmasına karşın, yüksek aktiviteli bir tip puzolan olduğunu belirtmekte olup, çimento hamurunun boşluk yapısını değiştirerek, su ve ayrıca zararlı iyon girişine engel teşkil ettiğini, böylece de betona yüksek direnç kazandırdığı sonucuna varmışlardır.

Hekal vd. [40] katkılı çimentoların sülfat direncini inceledikleri çalışmalarında, portland çimentosuna kütlece %10 ile %15 oranında silis dumanı, %20 ile %40 oranında cüruf ve %5 ile %10 oranında kalsiyum karbonat ilave ederek, hazırladıkları değişik içerikli çimentolarla yaptıkları harçları ayrıca %10 kütle oranıyla elde edilen $MgSO_4$ çözeltisinde kür uygulamasına tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak %10-15 oranında silis dumanının betonda yeterli sülfat direncini sağlayamadığını, bununla birlikte %40 cüruf veya %5 oranında kalsiyum karbonat içeren betonların ise kayda değer şekilde sülfat direnci sağlamakta olduğunu tespit etmişlerdir.

Çolak [41] ise önce alçı taşı ile portland çimentosunu karıştırmış ve bununla elde ettiği sonuçları, portland çimentosu, alçı taşı ve doğal puzolan üçlüsü ile çıkardığı sonuçlarla karşılaştırmıştır. Portland çimentosunun suya karşı direncini arttırmak için doğal puzolan ilavesinin etkili bir yöntem olduğu, ayrıca alçı taşı, portland çimentosu ve doğal puzolan karışımının suya ve donma – çözülme etkisine karşı direncinin de çimentonun alçı içeriğine ve su/çimento oranına bağlı olarak değişim gösterdiği bu çalışmada tespit edilmiştir. Bunun yanında 41:41:18 (alçı:klinker:puzolan) oranlarında çimento karışımlarının, su etkisine maruz kalmaları halinde belirgin ölçüde bir zarar görmedikleri ve ayrıca orta düzeyde bir basınç dayanımı sergiledikleri belirtilmektedir.

Kılınçkale [19] ise portland çimentosunda kütleince %20 doğal puzolan, pirinç kabuğu külü, silis dumanı, uçucu kül ve cüruf kullanarak oluşturduğu harçları HCl ve $MgSO_4$ çözeltileri etkisinde bırakmak suretiyle gerçekleştirdiği deneyler sonucunda cürufllu çimentodan yapılmış harçlar dışındaki tüm harçların adı geçen çözeltilerde yüksek direnç gösterdiklerini tespit etmiştir.

Canpolat vd. [30] daha önce de değinilen çalışmalarında CaO, MgO ve SO_3 gibi bileşenlerin hacimsel dengeyi bozmakta olduklarını, bu sebeple de bu bileşenlere ait oranların belirli değerlerin altında tutulması gerektiğini bildirmekte olup, örneğin serbest CaO oranının %2'nin altında tutulması durumunda hacim genleşmesi sorununun ortaya çıkmadığını tespit etmişlerdir.

1.6. Amaç ve Kapsam

Türkiye, büyük miktarda doğal puzolan kaynaklarının bulunduğu bir ülkedir. Bu kaynakların çimento sektöründe kullanılabilirliği üzerine bazı çalışmalar mevcuttur. Bununla birlikte, Trabzon ili ve çevresinde, kayaç yapısının büyük ölçüde volkanik kökenli kayalardan meydana gelmiş olmasına rağmen, kaynakların belirlenmesi doğrultusunda gerçekleştirilen kapsamlı çalışmalara rastlanamamaktadır. Oysa halen bilinmekte ve işletilmekte olan puzolan yataklarına yenilerinin eklenmesi ihtimali çok yüksektir. Nitekim bu çalışmada Maçka yöresinden alınan malzeme örneği, standartların bir puzolana yönelttikleri talepleri üst düzeyde bir yeterlilikle karşılamaktadır. Yörenin puzolan kaynaklarının hem nicel hem de nitel olarak incelenip özelliklerinin belirlenmesi gereksinimini, halen burada işler durumda olan ve TS 10156'ya göre katkı çimento üreten bir fabrikanın bulunması da açık olarak ortaya koymaktadır.

Türkiye'de doğal puzolan içeren çimento türlerinin de üretimi oldukça yaygındır. Daha önce de değinildiği üzere, yürürlükteki standartlara göre, Türkiye'de beş farklı puzolan içeren çimento türü bulunmaktadır. Ancak, bunlar arasında en yaygın olarak üretilip uygulanan da yine TS 10156'ya göre doğal puzolan karıştırılarak düzenlenmiş olan KÇ 32,5 tipi katkı çimentodur. Bu tip çimentonun özdeş anma dayanımı ile üretilen portland çimentosundan dayanım (N/mm^2) yönüyle herhangi bir farkı bulunmamaktadır. Son yıllarda Türkiye'de çimento üretiminin yaklaşık %90'ını katkı çimentoların oluşturmasına karşın, bu çimentoların 1980 yılına kadar bina türü yapılarda kullanılmasına izin verilmemekte idi; bu alanda traslı çimentoların kullanılmasına ise halen müsaade edilmemektedir. Bu gelişmeler de ayrıca tras nitelikli doğal puzolanlar ve bunların kaynakları üzerinde çalışmaların yoğunlaştırılması gerektiğini desteklemektedir.

Bu çalışmanın amacı, Trabzon ilinde şu an kullanılan tras yataklarından ve henüz kullanıma açılmamış olan bazı yeni sahalardan örnekler alınarak, bu örneklerin çimentoda tras olarak kullanılabilirliğini tespit etmek ve böylece yöre kaynaklarının ekonomiye kazandırılmasını sağlamaktır. Böylece, bu amaca yönelik daha sonra yapılacak olan çalışmalara da bir ölçüde yol gösterilmiş olmaktadır. Ayrıca, çalışmanın diğer aşamalarında portland çimentosu, katkı çimento ve traslı çimentolar üretilerek, tras oranının, çimentonun dayanımı başta olmak üzere bazı özelliklerine etkisini belirlemek amaçlanmıştır. Bunlara ek olarak çimentonun tane inceliği değiştirilerek, inceliğin yine bu özelliklere etkisinin anlaşılması da bir diğer hedefi oluşturmaktadır.

Bu amaçlar doğrultusunda çalışma üç aşamadan sonra sonuca ulaşmaktadır. Birinci aşamada, ikisi Trabzon Çimento Fabrikası tarafından halen kullanılan tras yataklarından, diğer dördü ise henüz kullanıma açılmamış sahalardan olmak üzere altı çeşit örnek alınmış olup, bunlar üzerinde mineralojik, petrografik, X-Ray Difraktometre incelemeleriyle, puzolanik aktivite, özgül kütle, özgül yüzey, tane büyüklüğü, çözünmeyen kalıntı, kızdırma kaybı tayinleri ve kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler sonunda, hangi kimyasal yapıdaki örneğin en uygun özellikleri gösterdiği ve çimentoda tras olarak kullanılıp kullanılmayacağı konusunda bir yargıya varma olanağı çıkarılmış olmaktadır. Bu arada elde edilen ilk sonuçlardan, çalışmanın diğer inceleme aşamalarında kullanılmak üzere en yüksek puzolanik aktiviteye sahip bir örneği seçme imkanı da mümkün olmuştur.

İkinci aşamada, tras tipi ve tras oranı (%_m 25) sabit tutularak, beş farklı incelikte çimento üretilmiş olup, tane büyüklüğü, özgül yüzey, kıvam tayini, katılma süresi, hacim genişmesi ve basınç dayanımı deneyleri yapılarak, çimento inceliğindeki değişimin, çimentonun dayanımı, katılma süresi, hacim genişmesi özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

Üçüncü aşamada ise tras tipi ve tras inceliği sabit tutularak, beş farklı oranda tras içeren çimento üretilmek suretiyle tane büyüklüğü, özgül yüzey, kıvam, katılma süresi, hacim genişmesi, basınç dayanımı, çözünmeyen kalıntı, kızdırma kaybı tayinleri ve kimyasal analizler yapılarak, tras oranındaki bu değişimin, çimentonun dayanımı, işlenebilirliği, katılma süresi, hacim genişmesi gibi özelliklerine olan etkisi belirlenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

2.1. Hammadde Seçimi

Bu bölümde, Trabzon ve Bayburt illerinin belirli yerlerinden seçilmiş, altı çeşit kayaç örneğinin, alındığı yerlerin coğrafi konumu, türleri ve mineralojik özellikleri hakkında bilgiler sunulmaktadır. Bu amaçla, aşağıda verilen başlıklar altında deneyler ve incelemeler yapılmıştır;

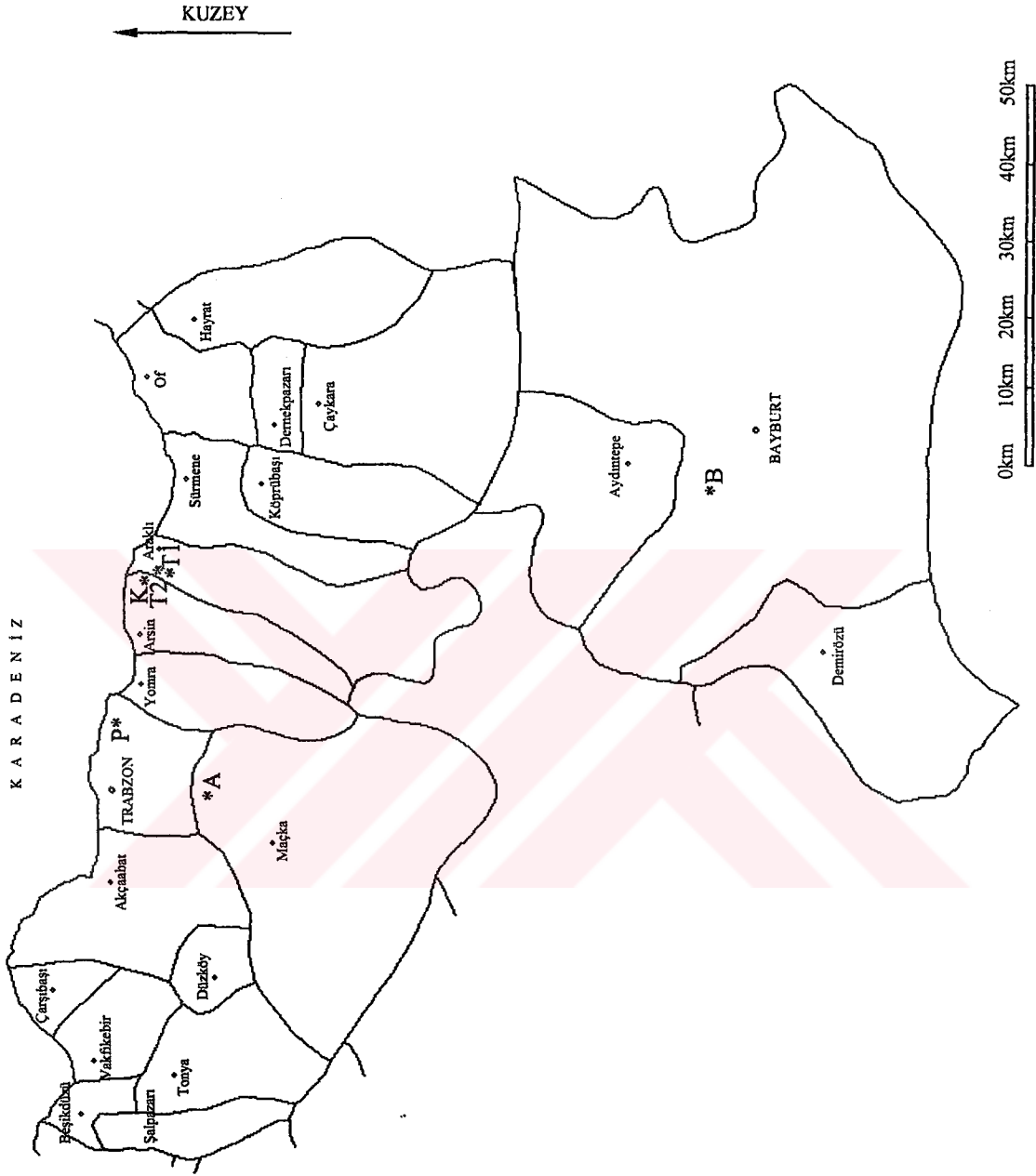
- Petrografik ve Mineralojik İnceleme,
- X-Ray Difraktometre İncelemesi.

2.1.1. Kayaç Örneklerinin Toplanması

Çalışma kapsamında, Trabzon yöresinden beş, Bayburt yöresinden ise bir örnek alınmıştır. Örnek alınacak yerler seçilirken, belli bir sistematığe uyulmamıştır. Örneklerin biri Gümüşhane Çimento Öğütme Tesislerinin Bayburt yöresinden aldığı tristan, ikincisi Trabzon Çimento Fabrikası'nın kullanmakta olduğu tras yatağından, diğer dördü ise henüz kullanıma açılmamış yerlerden alınmıştır. Örnek alınan yerlerin özellikleri ve haritadaki konumları (Şekil 6) aşağıda sunulmaktadır. Örnek isimleri alındıkları yerlere göre isimlendirilmiştir.

2.1.1.1. A Örneğinin Kaynak Özellikleri

A örneği, Trabzon'un Maçka ilçesine bağlı, Alaçam Köyü, orman altı mevkiinden alınmıştır. Örnek alınan yerdeki kayaçların üzeri fındıklık araziyle kaplı bulunmaktadır. Nadir yerlerde kayaçlar yüzlek vermektedir. Rezervin büyüklüğü konusunda bir çalışma yapılmamıştır.



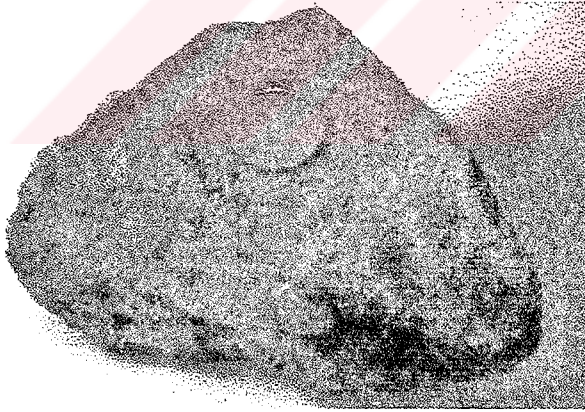
Şekil 6. Örnek alınan yerlerinin haritadaki yerleri



Şekil 7. A kayacına ait el örneği

2.1.1.2. T1 Örneğinin Kaynak Özellikleri

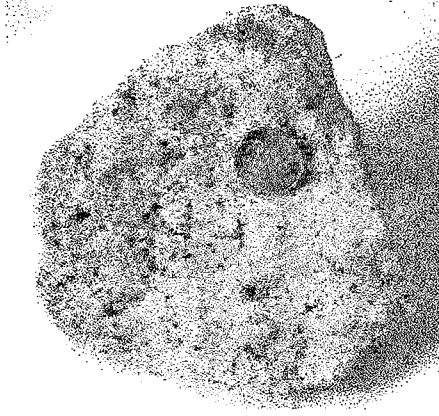
T1 örneği, Trabzon'un Araklı ilçesi Taşönü Köyü'nde, Trabzon Çimento Fabrikası'nın tras hammaddesini temin ettiği ocaklardan alınmıştır. Çimento Fabrikasının tras ihtiyacını uzun süre (yaklaşık 10-15 yıl) karşılayacak kadar büyük bir rezerve sahiptir.



Şekil 8. T1 kayacına ait el örneği

2.1.1.3. T2 Örneğinin Kaynak Özellikleri

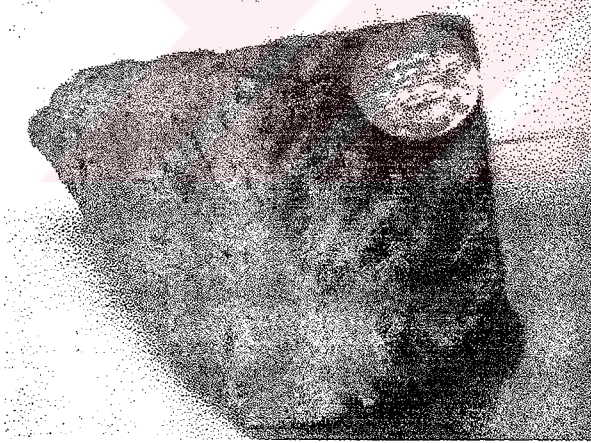
T2 örneği, Araklı ilçesi, Taşönü Köyü girişinde, Y1 örneğinin alındığı noktadan yaklaşık 2 km daha kuzeyde bir noktadan alınmıştır. Örnek alınan nokta, yol kenarında yaklaşık 20 m yükseklikteki bir şevdir. Rezerv tespiti yapılmamıştır.



Şekil 9. T2 kayacına ait el örneği

2.1.1.4. K Örneğinin Kaynak Özellikleri

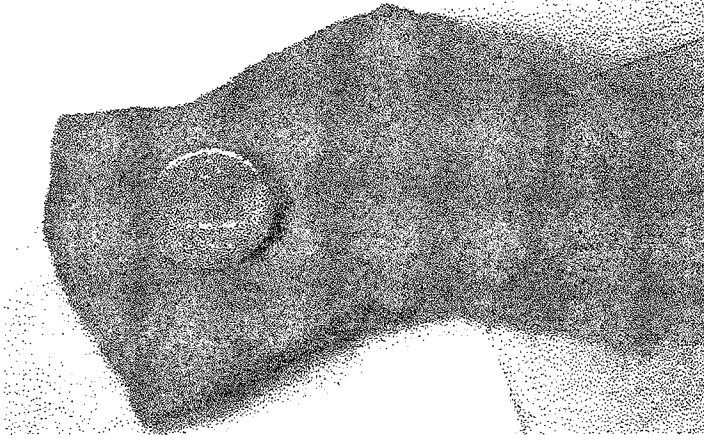
K örneği, Arsin ilçesi Kuzguncuk Köyü'nde, yol üzerindeki bir şevden alınmıştır. MTA kaynaklarına [42] göre, sahada, üst kratese yaşlı volkanik kayalar bulunmaktadır. Rezerv tespiti yapılmamıştır.



Şekil 10. K kayacına ait el örneği

2.1.1.5. B Örneğinin Kaynak Özellikleri

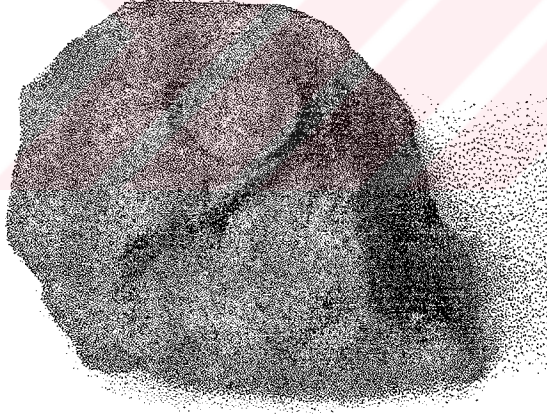
B örneği, Bayburt-Gümüşhane yolu, Nişantaşı Köyü, Tanakbur Mevkii'ndeki Gümüşhane Çimento Öğütme Tesisleri'nce tras hammaddesi olarak kullanılan ocaktan alınmıştır. Arazi düzlüktür ve yer kazınarak hammadde alınmaktadır.



Şekil 11. B kayacına ait el örneği

2.1.1.6. P Örneğinin Kaynak Özellikleri

P örneği, Trabzon-Rize yolu üzeri, Pelitli Mevkii'nden alınmıştır. Örnek alınan yer yaklaşık 30 m yüksekliğinde bir şevdir. Rezerv tespiti yapılmamıştır.



Şekil 12. P kayacına ait el örneği

2.1.2. Petrografik ve Mineralojik İnceleme

Mineralojik ve petrografik incelemeler KTÜ Gümüşhane Mühendislik Fakültesi, Optik Mineraloji Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Derlenen kayaç örneklerinin 0.02mm kalınlıktaki ince kesitleri ise "Taş kesme ve parlatma laboratuvarı"nda hazırlanmıştır. Hazırlanan ince kesitlerin mineralojik ve petrografik incelemeleri "James Swift" türü

mikroskopla yapılmıştır. Söz konusu kayaların doku, tane boyutu, mineral birleşimi, modal oranları ve ayrışma ürünleri gibi çeşitli özellikleri tanımlanmıştır.

2.1.2.1. A Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme

Makroskobik İnceleme:

Renk: Kahverengi ve yeşilimsi.

Yapı/Doku: Tabakalanma göstermektedir. Kırık yüzeylerde hematit ve limonit mineralleri oluşmuştur.

Mikroskobik İnceleme:

Mineral Tane Boyutları: 0.2mm'den daha küçük bulunmaktadır.

Mineral Özellikleri ve Modal Oranı:

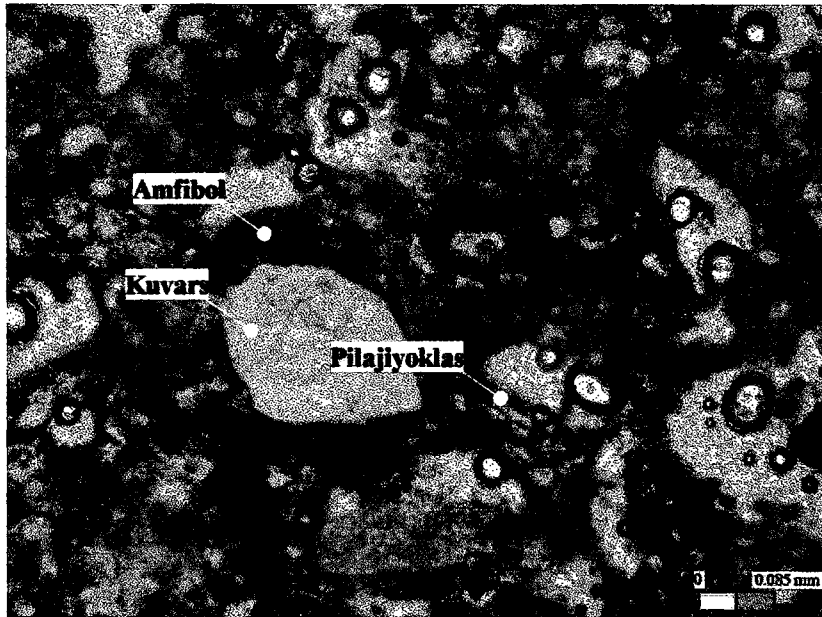
Kuvars (%1) : Çok ince taneler halinde, öz şekilsiz, bazen ikincil boşluk dolguları olarak bulunmaktadır.

Pilajiyoklas (%2-3) : Küçük çubuksu kristaller halinde bulunmaktadır.

Amfibol (%1-2) : Ayrışmış, kloritleşmiş ve çok ince iğnemsî kristaller halinde bulunmaktadır.

Hamur (%85) : Tamamen silistik ve düşük oranda killeşmiş durumdadır.

Bu bilgiler dahilinde, kayaç örneği "*dasidik tüf*" olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 13. A örneğine ait mikroskop görüntüsü (Tek nikol).

2.1.2.2. T1 Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme

Makroskobik İnceleme:

Renk: Açık yeşilimsi

Yapı/Doku: İnce taneli yapıda bulunmaktadır.

Mikroskobik İnceleme:

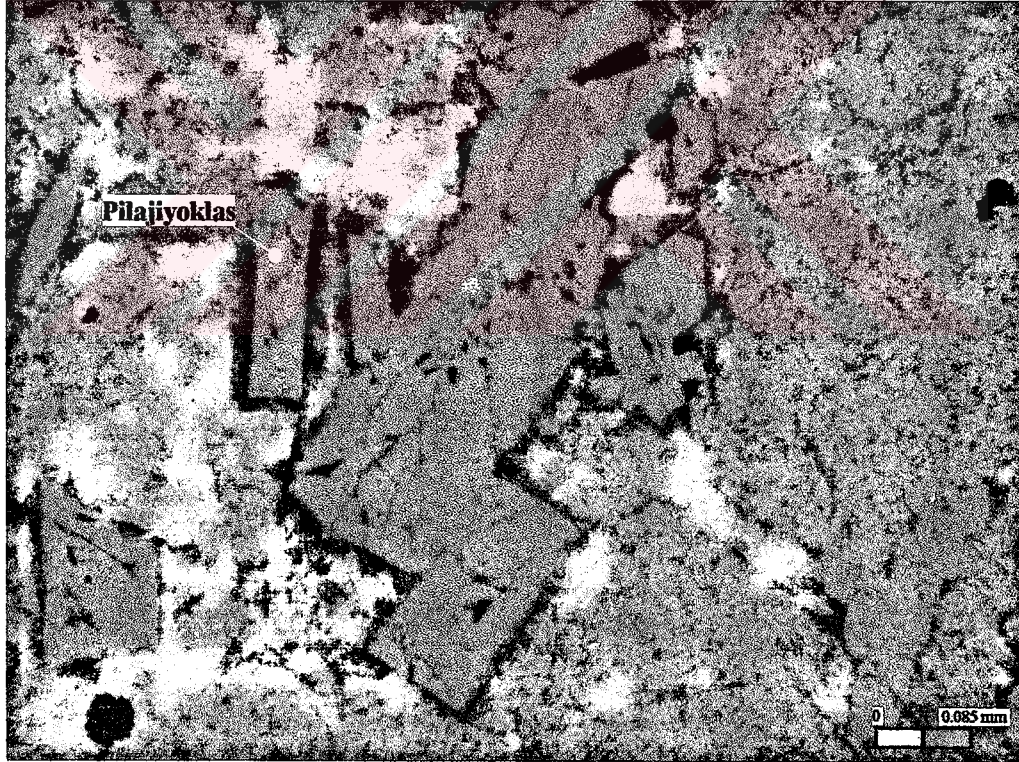
Mineral Tane Boyutları: 0.4mm dolayında bulunmaktadır.

Mineral Özellikleri ve Modal Oranı:

Pilajiyoklas (%15) : Genelde andezin bileşimli, çoklukla Karlsbat ikizlemesi göstermektedir. Çok az albit ikizlenmesi vardır.

Hamur (%85) : Hamur killeşmiş, Pilajiyoklas mikrolitlerinden ve çok ince feldspatlardan oluşmaktadır.

Bu bilgiler dahilinde, kayaç örneği "*andezidik tüf*" olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 14. T1 örneğine ait mikroskop görüntüsü (Tek nikol).

2.1.2.3. T2 Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme

Makroskobik İnceleme:

Renk: Krem rengi

Yapı/Doku: İnce taneli yapıda bulunmaktadır.

Mikroskobik İnceleme:

Mineral Tane Boyutları: 0.2mm ile 0.5mm arasında değişmektedir.

Mineral Özellikleri ve Modal Oranı:

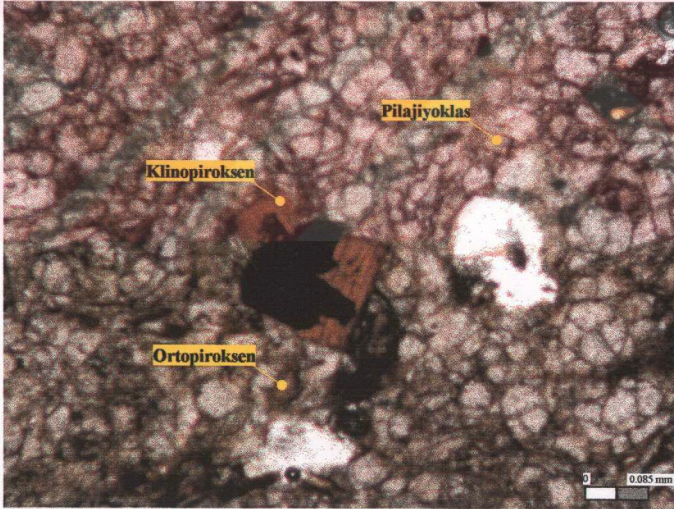
Pilajiyoklas (%5) : Genelde andezin bileşimli, lata biçimli, genellikle albit ikizlenmesi göstermektedir..

Ortopiroksen (%10) : Lata biçimli, kırıklanmış halde bulunmaktadır.

Klinopiroksen (%2) : Oval biçimli haldedir.

Hamur (%83) : Büyük oranda ayrılmış ve killeşmiş durumdadır.

Bu bilgiler dahilinde, kayaç örneği “andezidik tüf” olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 15. T2 örneğine ait mikroskop görüntüsü. Tek nikol, 4X0,10

2.1.2.4. K Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme

Makroskobik İnceleme:

Renk: Açık yeşilimsi

Yapı/Doku: Çok boşluklu yapıdadır.

Mikroskobik İnceleme:

Mineral Tane Boyutları: 0.3mm ile 0.4mm arasında değişmektedir.

Mineral Özellikleri ve Modal Oranı:

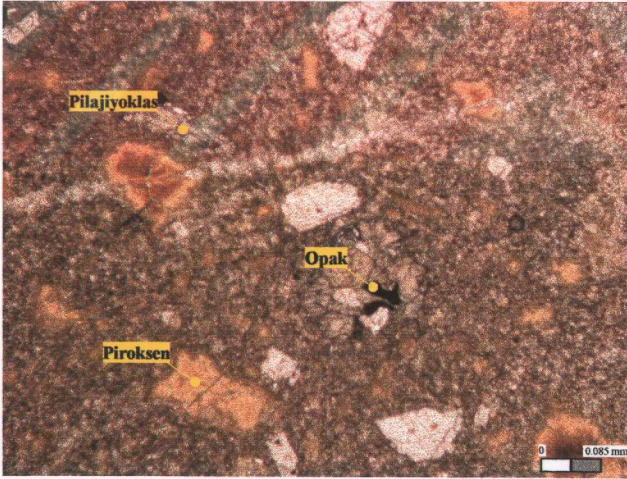
Pilajiyoklas (%15) : Genelde andezin bileşimli, çoklukla Karlsbat ikizlemesi göstermektedir. Çok az albit ikizlenmesi vardır.

Piroksen (%3) : Yarı öz şekilli taneler halinde yer yer zonlu halde bulunmaktadır.

Opak (%2) : Öz şekilsiz taneler halinde bulunmaktadır.

Hamur (%80) : Çoğunlukla kloritleşmiş halde bulunmaktadır. Hamurda ikincil boşluklar çoğunlukla zeolitlenmiş durumdadır.

Bu bilgiler dahilinde, kayaç örneği “andezidik tüf” olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 16. K örneğine ait mikroskop görüntüsü (Tek nikol).

2.1.2.5. B Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme

Makroskobik İnceleme:

Renk: Yeşilimsi.

Yapı/Doku: Tabakalanma göstermekte, yer yer hematit ve limonit ikincil kristallerinden oluşan boşluk dolguları mevcut bulunmaktadır.

Mikroskobik İnceleme:

Mineral Tane Boyutları: 0.3 mm den daha küçük boyutlara sahiptir.

Mineral Özellikleri ve Modal Oranı:

Kuars (%15) : Çok küçük, özşekilsiz bir halde bulunmaktadır.

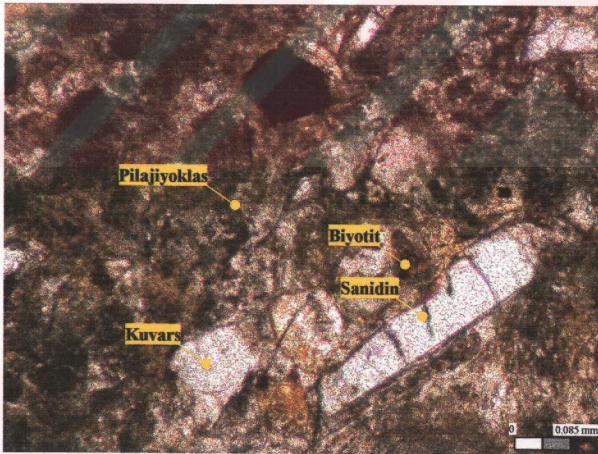
Pilajiyoklas (%5) : Latamsı kristaller halinde, çok kırıklı bir halde bulunmaktadır.

Sanidin (%5) : Uzun lâta biçimli kristaller halinde bulunmaktadır.

Biyotit (%2) : Çok bozmuş, tamamen opaklaşmış bir haldedir.

Hamur (%73) : Yer yer kalsitleşme bulunmaktadır. Kil ve silis hakim durumdadır.

Bu bilgiler dahilinde, kayaç örneği “*dasidik tüf*” olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 17. B örneğine ait mikroskop görüntüsü (Tek nikol).

2.1.2.6. P Örneğine Ait Petrografik ve Mineralojik İnceleme

Makroskobik İnceleme:

Renk: Koyu yeşil, açık kahverengi

Yapı/Doku: İnce taneli yapıdadır.

Mikroskobik İnceleme:

Mineral Tane Boyutları: 0.6mm ile 1.0 mm arasında değişmektedir.

Mineral Özellikleri ve Modal Oranı:

Klinopiroksen : Öz şekilli, kırılanmış yapıdadır.

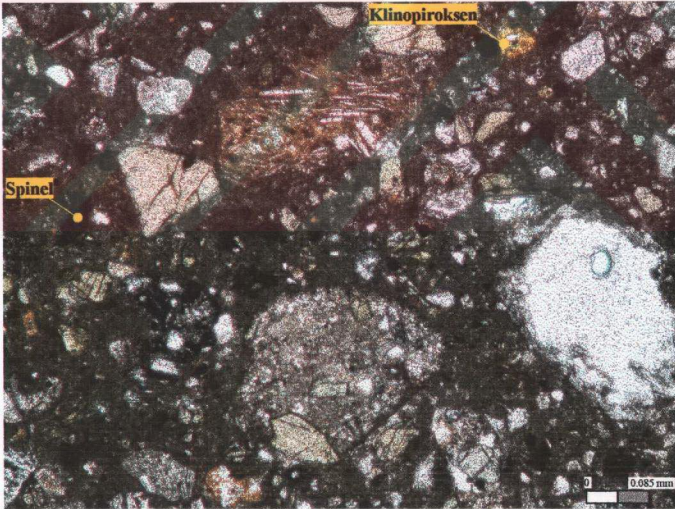
(%30)

Spinel (%2) : Öz şekilsiz taneler halindedir.

Hamur (%68) : Hamurda çok küçük klinopiroksenler bulunmaktadır.

Killeşme vardır.

Bu bilgiler dahilinde, kayaç örneği “bazanit” olarak nitelendirilmektedir.

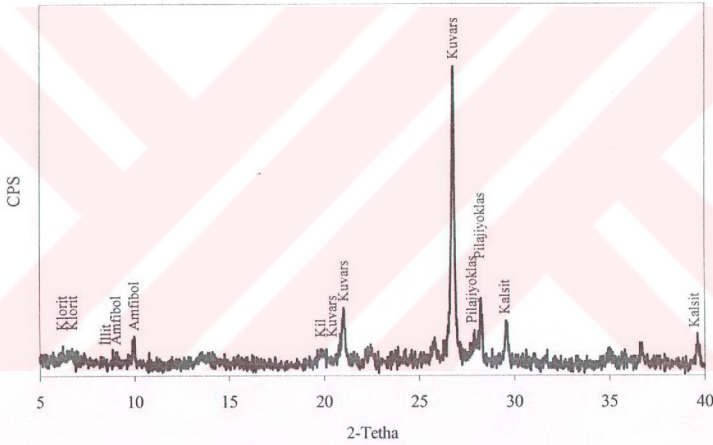


Şekil 18. P örneğine ait mikroskop görüntüsü (Tek nikol).

2.1.3. X-Ray Difraktometre İncelemesi

Örneklerin mineralojik özelliklerinin daha belirgin hale getirilmesi için, KTÜ Fizik Bölümü, Katıhal Fizikî Araştırma Laboratuvarında X-Ray Difraktometre toz metodu ile inceleme yapılmıştır. Bunlara ait difraktogramlar Şekil 19, 20, 21, 22, 23, 24'te verilmiştir. Ayrıca mineralojik incelemeler ile XRD incelemelerinin karşılıklı değerlendirmesi de şekillerin altında yer almaktadır. Kimyasal bileşime kaynak teşkil etmesi bakımından, minerallerin kimyasal bileşimleri de verilmiş bulunmaktadır.

2.1.3.1. A Örneğine Ait XRD İncelemesi



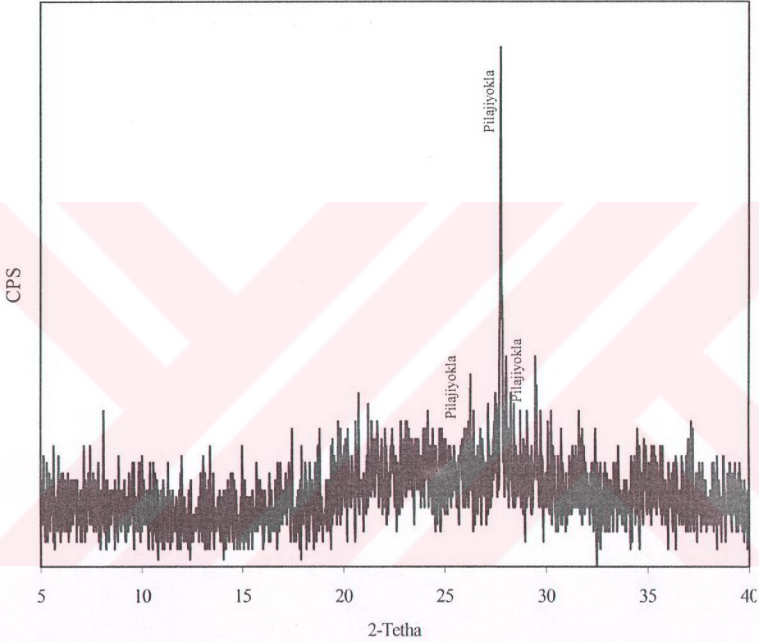
Şekil 19. A örneğine ait difraktogram

Yapılan XRD incelemeleri sonucunda daha önce ince kesit gözlemlerinde tespit edilen Kuvars (SiO_2), Pilajiyoklas [$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)\text{-Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$], Amfibol minerallerine ilaveten Klorit [$(\text{Mg,Fe})_3(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$], İllit [$[\text{K}_y\text{Al}_4(\text{Si}_{8-y}\text{Al}_y)\text{O}_{20}(\text{OH})_4$; ($y < 2$)], Kalsit [$\text{Ca}(\text{CO}_3)$] mineralleri belirlenmiştir.

Ayrıca hamurunun silistik karakterli olması ve dolayısıyla SiO_2 oranının yüksek olması da ikincil kuvars oluşumunun fazlalığından kaynaklanmaktadır.

2.1.3.2. T1 Örneğine Ait XRD İncelemesi

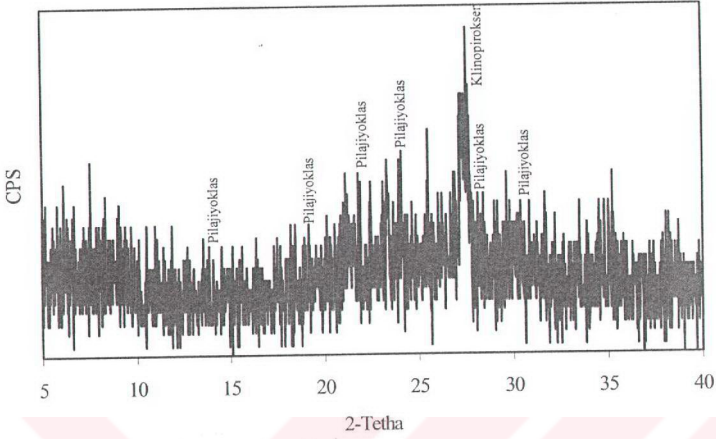
Bu örnekte XRD incelemeleri sonucunda daha önce ince kesit gözlemlemesi yardımıyla tanınabilen Pilajiyoklas $[\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)\text{-Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)]$ minerallerine ilaveten kayda değer bir mineral izine rastlanmamıştır.



Şekil 20. T1 örneğine ait difraktogram

2.1.3.3. T2 Örneğine Ait XRD İncelemesi

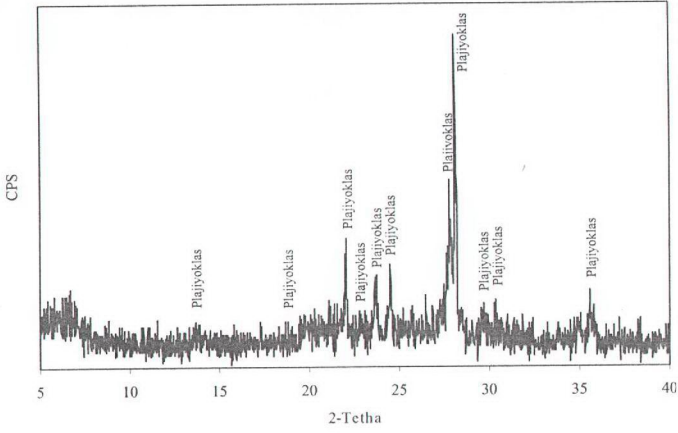
T2 örneği üzerinde gerçekleştirilen XRD analizlerinde, daha önce ince kesit gözlemlemesi yardımıyla tanınabilen Pilajiyoklas $[\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)\text{-Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)]$, Ortopiroksen $[(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3]$, Klinopiroksen $(\text{CaMgSi}_2\text{O}_6\text{-CaFeSi}_2\text{O}_6\text{-Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6\text{-Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6)$ minerallerine ilaveten kayda değer bir mineral izine rastlanmamıştır.



Şekil 21. T2 örneğine ait difraktogram

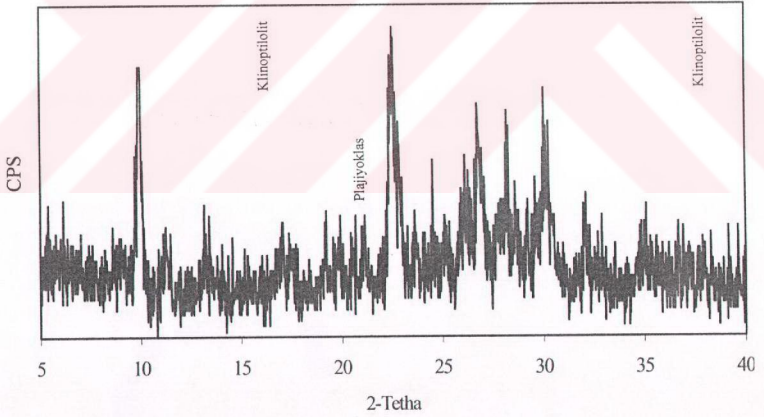
2.1.3.4. K Örneğine Ait XRD İncelemesi

Bu örnekte gerek XRD incelemelerine gerekse de ince kesit gözlemlerine dayanarak elde edilen sonuçlar örtüşmekte olup mineral türleri Plajiyoklas [$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$]- $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$], Piroksen ve Opak olarak ortaya çıkarılmış bulunmaktadır.



Şekil 22. K örneğine ait difraktogram

2.1.3.5. B Örneğine Ait XRD İncelemesi



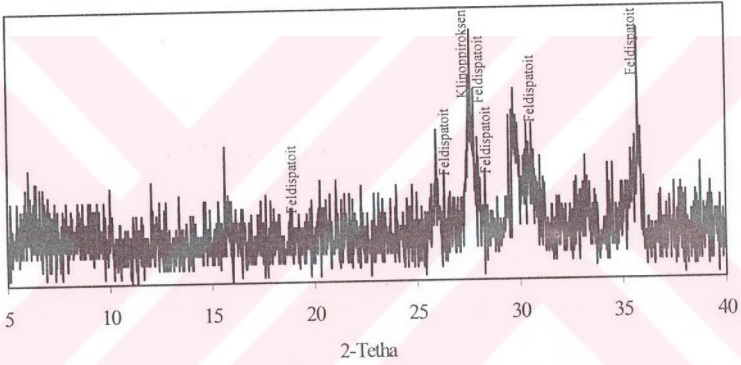
Şekil 23. B örneğine ait difraktogram

Burada gerçekleştirilen XRD incelemeleri, ince kesitte belirlenen Kuvars (SiO_2), Plajiyoklas [$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)\text{-Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$], Sanidin (KAlSi_3O_8) ve Biotit

(K(Mg,Fe)₃(Al,Si)₃O₁₀(OH)₂ mineralleri dışında zeolit grubu minerallerinden Klinoptolit mineralinin tespitine de yardımcı olmuştur.

2.1.3.6. P Örneğine Ait XRD İncelemesi

Difraktogram (Şekil 24) üzerinden de görüldüğü gibi ince kesit incelemelerinde tespit edilen Klinopiroksen (Ojit) [(Ca, Mg, Fe⁺², Fe⁺³, Ti, Al)₂ (Si,Al)₂ O₆ ve Spinel (MgAl₂O₄) minerallerine ek olarak Feldispatoyid grubundan Lösit [K(AlSi₂O₆)] minerali de bulunmuştur.



Şekil 24. P örneğine ait difraktogram

2.2. Puzolanik Aktivite

2.2.1. Tanım ve Yöntem

Puzolanik aktivite kavramı bir puzolanın bağlayabileceği en fazla Ca(OH)₂ miktarını ve bağlanma işleminin hızını ifade etmektedir. Bahsedilen her iki değişken de puzolanın özelliklerine ve içerisinde bulunan aktif fazların niteliğine ve miktarına bağlıdır.

Tüm puzolanların ve dolayısıyla doğal puzolanların aktivitesi açısından özgül yüzeyin, kimyasal bileşimin ve mineralojik yapının büyük rol oynadığı bilinmektedir.

Fakat bunların birbirleriyle etkileşim içerisinde olmaları nedeniyle aktivite mekanizması oldukça karmaşıktır [11].

Tras bileşimi ile ilgili olarak, Alman standartlarında (DIN 51043), SiO₂ oranının kütlece %50 – 67 arasında, Al₂O₃ oranının %14 – 20 arasında, Fe₂O₃ oranının ise %2 – 5 arasında, CaO+MgO toplamının %10'dan daha düşük ve Na₂O+K₂O toplamının ise %3 – 8 arasında olması gerektiği belirtilmektedir [43]. Bu konuda Türk Standartları'ndaki sınırlamalar ise (Çizelge 12) ana bileşenlerin toplamı üzerinden verilmektedir.

Bu bölümde, daha önce mineralojik özellikleri ve türleri tespit edilmiş kayaç örneklerinin çimentoda doğal katkı malzemesi (puzolan) olarak kullanılabilirliği TS25'te öngörülen sınırlar dahilinde incelenmektedir. Bu bağlamda, altı örnek üzerinde fiziksel ve kimyasal testler yapılmış olup ayrıca çalışmanın diğer aşamalarında kullanılmak üzere, içlerinden en uygun puzolanik niteliğe sahip örnek belirlenmiş bulunmaktadır.

Bu bölüm kapsamında yapılan fiziksel deneyler (ölgül kütle, ölgül yüzey, tane büyüklüğü) TS24, kimyasal deneyler (çözünmeyen kalıntı, kızdırma kaybı, kimyasal analiz) TS687 kapsamında gerçekleştirilmiştir.

2.2.2. Puzolanların Kimyasal Özellikleri

TS 25'e göre puzolan olarak kullanılabilen malzemelerde bazı kimyasal nitelikler aranmaktadır. Örnek puzolanlara ait kimyasal analiz sonuçları (Çizelge 11) ve bunların TS 25'e göre uyumluluğu (Çizelge 12) irdelenmiş olmaktadır.

Çizelge 11. Puzolanların kimyasal analiz sonuçları

Örnek	Çözünmeyen Kalıntı (%m)	Kimyasal Analiz (%)									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Kızdırma Kaybı	Na ₂ O	K ₂ O	Toplam
A	77,24	70,89	9,08	2,96	5,40	0,62	-*	7,23	1,11	1,92	99,21
T1	83,65	67,96	13,73	2,57	3,24	1,12	0,51	6,37	2,54	1,40	99,44
T2	85,75	67,93	4,43	1,26	2,28	0,61	0,48	4,61	4,48	2,92	88,39
K	79,90	61,01	15,10	5,35	5,16	1,74	0,71	3,88	3,76	2,88	99,59
B	55,33	60,14	13,17	4,35	4,83	2,34	0,17	10,71	0,71	3,08	99,50
P	54,63	43,10	13,77	9,56	13,52	4,80	-*	6,00	2,29	2,02	95,06

* Bu değerler ölçülmemiştir.

Çizelge 12'de görüldüğü gibi P örneği hariç diğer örnekler TS25'te belirtilen sınırlar dahilindedir. P örneğinin Si₂O₃ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ toplamı %66,43 < %70 olduğundan, bu

örnek, adı geçen standartlara göre çimentoda puzolan olarak kullanılabilir kimyasal özelliğe sahip bulunmamaktadır. Bununla birlikte, MgO oranının da konulan sınıra bir miktar altında olduğu görülmektedir. Kimyasal yönden P örneği aranan özelliği tam olarak sağlamasa da puzolanik aktivite deneylerine (Çizelge 13) tabi tutulmuştur.

Çizelge 12. Örneklerin kimyasal bileşim bakımından TS25'e uyumluluğu

	TS25	A	T1	T2	K	B	P
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	En az %70	82,93	84,26	73,62	81,46	77,76	66,43
MgO (%)	En çok %5	0,62	1,12	0,61	1,74	2,34	4,80
SO ₃ (%)	En çok %3	-*	0,51	0,48	0,71	0,17	-*

* Bu değerler ölçülmemiştir.

2.2.3. Puzolanik Aktivite Tayini

Puzolanik aktivitelerinin anlaşılması için, altı çeşit tristan TS 25'e uygun olarak prizmatik kalıplar hazırlanmış, yedi gün sonunda basınç ve eğilmede çekme dayanımları belirlenmiştir. Standartlara göre, malzemenin adı geçen dayanım özellikleri, puzolanik aktivitenin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Buna göre sonuçlar (Çizelge 13) standardın tayin ettiği altı dayanım sınırlarının (Çizelge 14) üzerinde olup gerekli ölçütleri sağlamış bulunmaktadır.

Çizelge 13. Puzolanların mekanik ve fiziksel özellikleri

Örnek	Eğilmede Çekme Dayanımları (N/mm ²)	Basınç Dayanımları (N/mm ²)	İncelik		Özgül Yüzey cm ² /gr	Özgül Kütle gr/cm ³	Birim Kütle gr/cm ³	Öğünme Süresi
			200µ	90µ				
B	3,02	8,30	0,1	4,6	6226	2,25	658	35 dk
K	1,90	6,70	0,1	3,3	5286	2,40	747	30 dk
T1	3,96	10,10	0,1	3,0	4153	2,29	739	30 dk
T2	3,14	9,10	0,1	3,0	4869	2,40	765	25 dk
A	4,45	11,00	0,6	4,4	5908	2,49	-*	45 dk
P	2,86	9,00	0,3	2,7	5887	2,71	-*	40 dk

* Bu değerler ölçülmemiştir.

Burada (Çizelge 14) görüldüğü gibi puzolanik aktivite deneyleri sonucunda elde edilen değerler, TS 25'te öngörülen sınır değerlerinin çok üzerindedir. Bu duruma göre, altı örnek de mekanik olarak çimentoda puzolan olarak kullanılabilir özelliğe sahip bulunmaktadır. Ancak P örneği kimyasal yönden Si, Al, Fe oksitlerinin toplam oranıyla

istenilen sınırın altında kalmasına rağmen, dayanım özelliğiyle TS 25'te belirtilen niteliğe sahip bulunmaktadır.

Çizelge 14. Örneklerin mekanik bakımdan TS 25'e uyumluluğu

	Eğilmede Çekme Dayanımları (N/mm ²)	TS 25'e Göre Alt Sınır	Basınç Dayanımları (N/mm ²)	TS 25'e Göre Alt Sınır
B	3,02	1,00	8,30	4,00
K	1,90		6,70	
T1	3,96		10,10	
T2	3,14		9,10	
A	4,45		11,00	
P	2,86		9,00	

Puzolanik aktivite bakımından daha uygun bir kimyasal bileşime ve yüksek bir dayanıma sahip olan A örneği çalışmanın ilerleyen bölümlerinde çimento katkı maddesi olarak kullanılacak puzolan olarak seçilmiştir. Böylece gerek tras oranının, gerekse tane inceliğinin çimentoya kazandırmış olduğu iyileştirmeler, *A tras örneği* karışımıyla gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre tartışılacaktır.

2.2.4. Puzolanik Aktivite ile Puzolanların Tane İnceliği ve Kimyasal Bileşimleri Arasındaki İlişkiler

Puzolanik aktivite üzerinde diğer bazı özelliklerin de etkisi olmasına rağmen, puzolanların dayanımının özellikle, kimyasal bileşim oranları, tane inceliği ve camsı faz miktarından etkilendiği kaynaklarca belirtilmektedir [16].

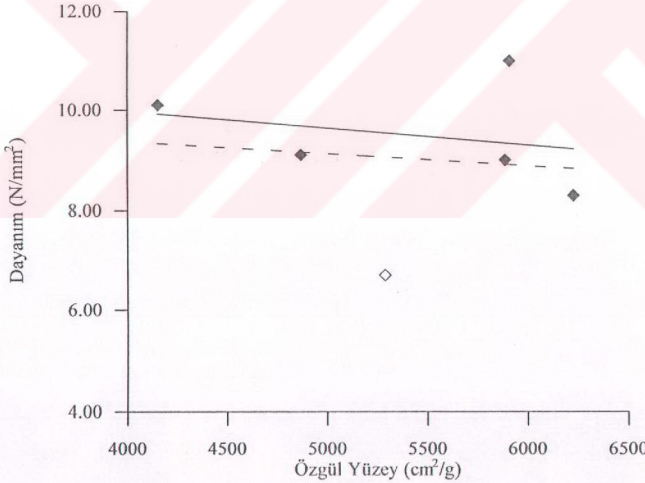
Bu kısımda, puzolan özellikleriyle dayanım arasında, bağıntılar kurulmaya çalışılacaktır. Ancak camsı faz, tespit edilmemiş olması nedeniyle tartışmanın dışında bırakılacaktır. Buna göre, puzolanik aktivite (basınç dayanımı), tane inceliği ve bileşik yapısı olmak üzere iki ayrı değişkenden aynı anda etkilenmektedir. Ancak kurulan ilişkilerde her bir değişkeninin etkisi ayrı ayrı incelenecektir. Ayrıca puzolanik aktivite, TS 25'e uygun olarak belirlendiği için basınç dayanımı deneyleri kür ortamında yedi günü tamamlamış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Puzolan bileşik yapısının büyük bir yüzdesini teşkil eden SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO bileşikleri ve diğer bazı bileşikler ile basınç dayanımları arasındaki ilişki üzerinde

durularak, böylece bir puzolanın kimyasal bileşiminden hareketle dayanım hakkında fikir yürütebilme olanağı değerlendirilmiş olmaktadır. Yine aynı şekilde, tane inceliğinin, basınç dayanımına etkisi de incelenerek, değişkenler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayılarının hesabı Grapher programı yardımıyla yapılmıştır.

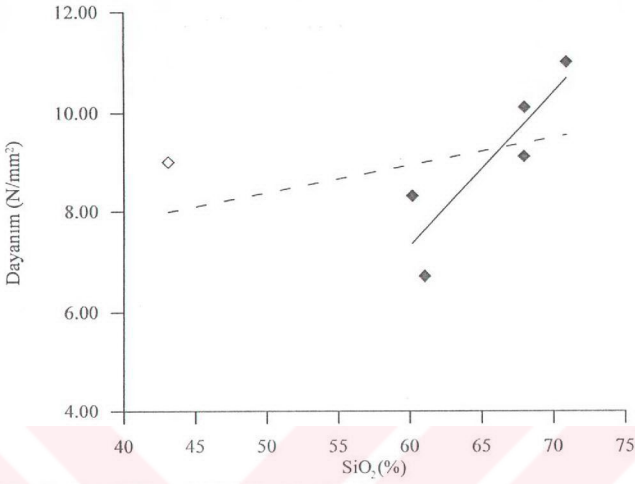
TS 25 'e göre $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının en az %70 oranında olması istenmektedir. Bu da bu bileşenlerin puzolanik aktiviteyi harekete geçiren asıl unsur olduğunu göstermektedir. Söz konusu durumun doğruluğu, herbir bileşiğin ayrı ayrı ve beraber olarak etkileri göz önünde bulundurularak grafikler ve bağıntılar yardımıyla araştırılmaktadır.

Aşağıdaki grafiklerde kesikli çizgiler altı örneğin doğrusal ilişkisini, sürekli çizgiler ise daha yüksek korelasyonlu bağıntı elde edebilmek için korelasyonu düşüren bir örneğin (içi boş simgeli olan) çıkarılması sonucu elde edilen doğruyu temsil etmektedir. Grafiklerin altındaki bağıntılar en uygun beş örnek üzerinden kurulmuştur. Ayrıca T testi ile ilişkiler test edilmiştir.



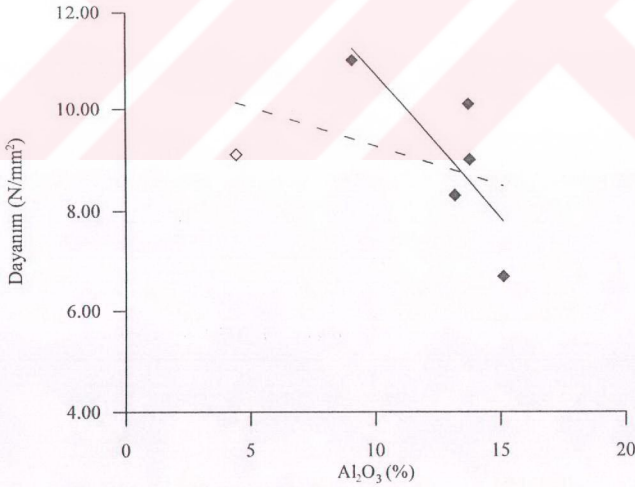
Puzolanik Aktivite = $-0.00033 (\text{Özgül Yüze}) + 11.31$
 Korelasyon Katsayısı = 0.28

Şekil 25. Dayanım – özgül yüzey ilişkisi



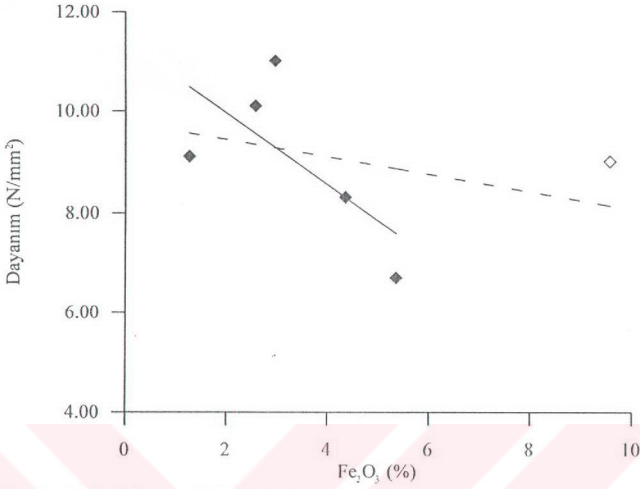
Puzolanik Aktivite = $0.309 (\%SiO_2) - 11.24$
 Regresyon Katsayısı = 0.88

Şekil 26. Dayanım – SiO₂ ilişkisi



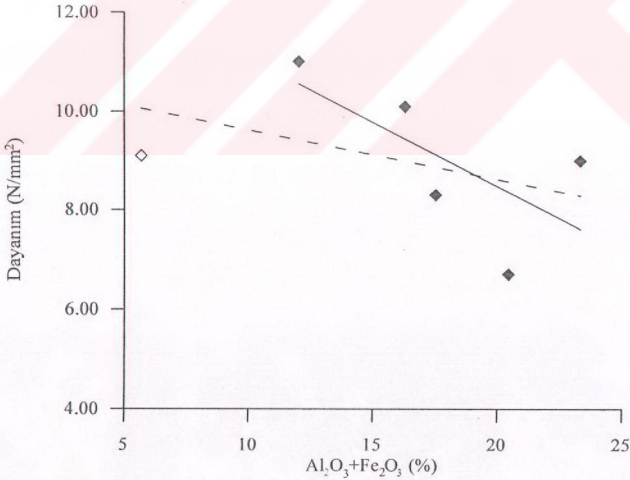
Puzolanik Aktivite = $-0.57 (\%Al_2O_3) + 16.45$
 Regresyon Katsayısı = 0.79

Şekil 27. Dayanım – Al₂O₃ ilişkisi



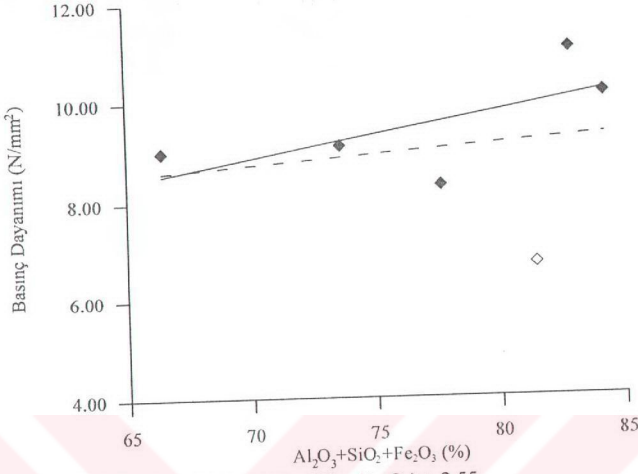
Puzolanik Aktivite = $-0.71 (\%Fe_2O_3) + 11.37$
 Regresyon Katsayısı = 0.68

Şekil 28. Dayanım - Fe₂O₃ ilişkisi



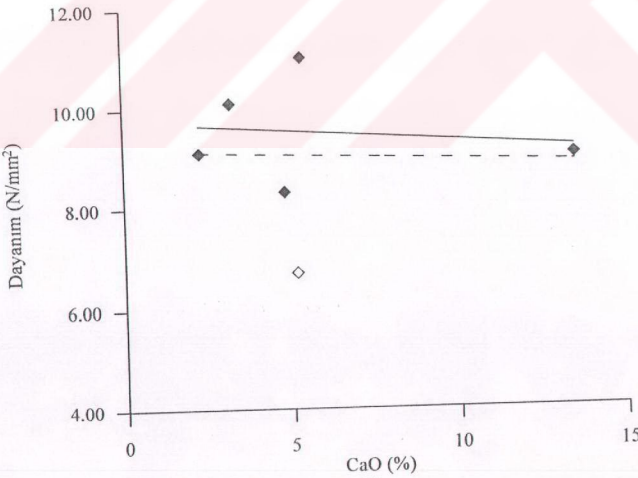
Puzolanik Aktivite = $-0.26 (\%Al_2O_3+Fe_2O_3) + 13.70$
 Regresyon Katsayısı = 0.68

Şekil 29. Dayanım - Al₂O₃+Fe₂O₃ ilişkisi



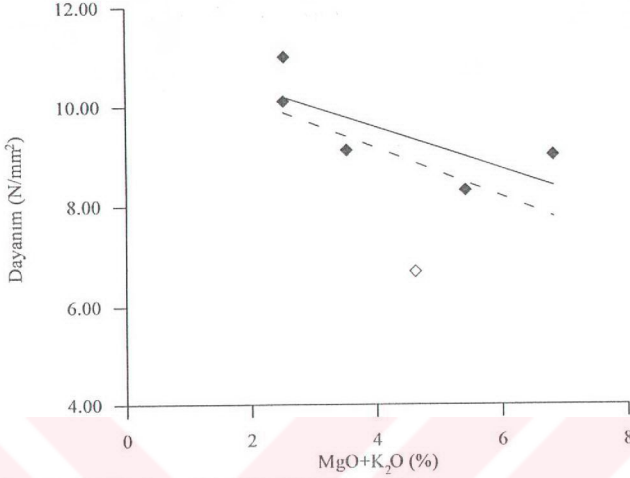
Puzolanik Aktivite = $0.09 (Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3) + 2.55$
 Regresyon Katsayısı = 0.62

Şekil 30. Dayanım - ($Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$) ilişkisi



Puzolanik Aktivite = $-0.043 (\%CaO) + 9.75$
 Regresyon Katsayısı = 0.18

Şekil 31. Dayanım - CaO ilişkisi



Puzolanik Aktivite = $-0.42 (\text{MgO} + \text{K}_2\text{O}) + 11.24$
 Regresyon Katsayısı = 0.75

Şekil 32. Dayanım - (MgO+K₂O) ilişkisi

Yapılan tartışmaların sonucuna göre numunelerin, basınç dayanımları ile tane inceliği arasındaki yüksek korelasyonlu bir ilişki kurulamamakla birlikte (%28), elde edilen grafikte (Şekil 25) puzolan – kireç karışımının basınç dayanımı tane inceliğine bağlı olarak yükselmediği gibi küçük bir miktar da olsa düşüş göstermektedir. Ancak yukarıda da değinildiği üzere, grafik üzerindeki her bir nokta hem farklı kimyasal özelliğe hem de farklı tane inceliğine sahip puzolan örneğini temsil etmekte olduğundan, dayanımdaki bu düşüş kimyasal yapıdan da kaynaklanabilmektedir.

Si₂O oranı ile basınç dayanımı arasında ise yüksek korelasyonlu (%88) bir bağımlı kurulmuş ve grafikten (Şekil 26) de görüldüğü gibi Si₂O oranı arttıkça puzolanik aktivite de artmakta olduğu tespit edilmiştir.

Al₂O₃ oranındaki artış ise basınç dayanımını düşürmektedir (Şekil 27). Ayrıca korelasyon katsayısının da oldukça yüksek olduğu (%79) yine aynı grafikten görülmektedir. Benzer şekilde Fe₂O₃ bileşeninin oranındaki artışa bağlı olarak da basınç dayanımı düşmektedir (Şekil 28). Dolayısıyla Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bileşenlerinin toplamındaki artış da basınç dayanımında deney koşullarında düşüşe neden olmaktadır (Şekil 29).

Görüldüğü gibi, SiO_2 'deki artış basınç dayanımını artırsa bile Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oksitleri oranlarındaki artışı, basınç dayanımını düşürmektedir. Her ne kadar bu üç bileşenin toplamının da dayanımı artırması (Şekil 30) söz konusu ise de bu artışın aslında SiO_2 'den kaynaklandığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu da TS 25'te belirtilen ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70$) sınır değerinin gerekçesinin sorgulanmasına yardımcı olabilecek bir bulgu olarak benimsenmelidir.

CaO için ise yüksek korelasyonlu (%18) bir bağıntı kurulamamıştır (Şekil 31).

MgO ve K_2O toplamı ise arttıkça basınç dayanımını düşürmektedir (Şekil 32). Yine burada kurulan bağıntının da korelasyonu yüksek sayılabilecek (%75) bir düzeydedir.

Sonuç olarak, bir doğal puzolanın puzolanik aktivitesine artıran en önemli bileşenin SiO_2 oksidi olduğu görülmektedir. Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO ve K_2O oksitleri ise puzolanik aktiviteyi azaltmaktadır. Bu yüzden, doğal puzolan olarak kullanılacak kayaçların yüksek SiO_2 içeriğine sahip olması gerekmektedir. Görüldüğü gibi kimyasal bileşenlerle basınç dayanımı arasında bir ölçüde ilişki kurmak olanaklıdır. Farklı kaynaklarda [16, 20], bu konuyla ilgili başka bağıntılara ulaşmak da mümkündür.

2.3. Tane İnceliğinin Traslı Çimentonun Özelliklerine Etkisi

2.3.1. Tanım ve Yöntem

Çimentoda doğal katkı maddesi olarak kullanılan puzolanların, çimentoların bir çok özelliğine olumlu yönde etki ettiği daha önceki bölümlerde belirtilmiştir. Aynı şekilde çimentoların tane inceliklerinin değiştirilmesiyle de çimentonun özelliklerinde değişimler söz konusu olmaktadır.

Bu bölümde, traslı çimentonun inceliği değiştirilerek, tane büyüklüğü, özgül yüzey, kıvam tayini, katılma süresi, hacim genişmesi, basınç dayanımı deneyleri TS24 çerçevesinde belirlenerek sonuçları karşılaştırılmaktadır.

2.3.1.1. Traslı Türünün Seçimi

Söz konusu deneylerde, 2.2 bölümünde, en uygun puzolanik özelliğe sahip olduğu belirlenen A örneği, doğal puzolan (tras) olarak kullanılmıştır. Bu örneğe ait mineralojik ve

petrografik veriler 2.1. bölümünde, kimyasal, fiziksel ve puzolanik veriler ise 2.2. bölümünde yer almaktadır.

2.3.1.2. Tras Oranının Seçimi

Oluşturulan çimentolarda, kütlece %25 oranında tras, %70 oranında klinker ve %5 oranında alçı kullanılmıştır. Kütlece %25 oranında tras içeren bu çimentolar, TS 26'ya göre traslı çimento sınıfına dahildir.

2.3.1.3. Çimento Tane İnceliklerinin Seçimi

İncelik değişiminin, traslı çimentolarda dayanım, hacim genişmesi ve katlaşma sürelerine etkisinin incelenmesi için kütlece %25 tras, %5 alçı ve %70 klinkerden oluşan örnek çimento, aynı değirmende, değişik sürelerde öğütülmek suretiyle farklı inceliklerde edilmeye çalışılmış ve beş farklı incelikte çimento (Çizelge 15) üretilmiştir. Ayrıca kıyaslanması amacıyla bir de portland çimentosu bu deneylere tabi tutulmuştur. Burada bulunan değerler her ne kadar Türk standartlarında belirtilen Blaine gaz geçirimsizlik yöntemine göre yapılırsa da özgül yüzey değerleri saptanırken, özellikle çok miktarda boşluk içeren asidik yapıya sahip puzolanlarda, özgül yüzeye bir ölçüde katkısı bulunan küçük ve kapalı gözenekçikler göz önüne alınmamıştır.

Daha önce de değinildiği üzere; Türkiye'de traslı çimentolar, yaygın olarak bir tek karışım halinde öğütülüp üretildiği için bu çalışmada da örnek çimento; tras, klinker ve alçı beraber öğütülerek hazırlanmıştır.

Çizelge 15. Malzemelerin incelik değerleri

Örnek	200 μ 'luk elekte kalan kütle(% _m)	90 μ 'luk elekte kalan kütle (% _m)	Özgül yüzey (cm ² /gr)
PÇ	0,1	3,7	2847
TÇ1	0,3	8,0	2822
TÇ2	0,2	7,4	2834
TÇ3	0,2	4,9	2933
TÇ4	0,1	3,4	3170
TÇ5	0,1	1,6	3714

2.3.2. Traslı Çimentolarda İnceliğin Dayanım Etkisi

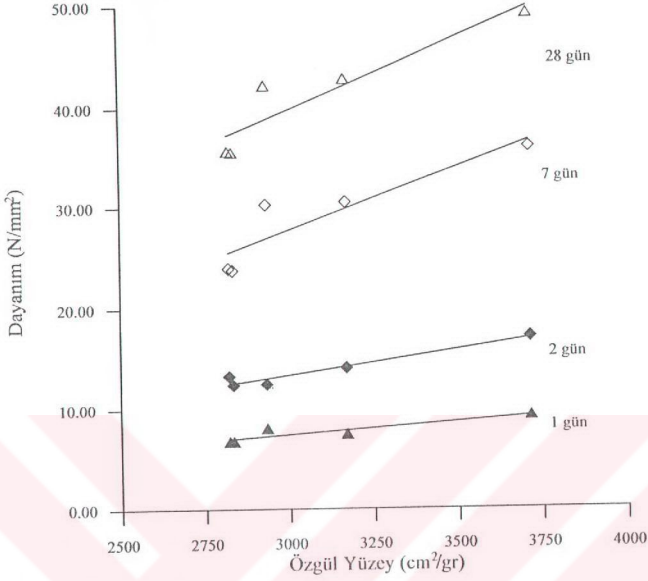
Daha önceki çalışmalar, çimento inceliğinin betonların mekanik dayanımı üzerine etkisi olduğunu göstermiştir. İnce öğütülmüş çimentoların daha süratli mukavemet kazandığı, fakat, uzun süre sonra, geç dayanımın nispeten daha kaba öğütülmüş çimentolara göre fazla artış göstermediği görülmüştür [2]. Ancak dayanımın her zaman özgül yüzey değeri ile doğru orantılı olmayabileceğini gösteren çalışmalar da mevcuttur [16].

Çalışmanın bu bölümünde daha önce hazırlanmış ve incelik değerleri (Çizelge 16) belirlenmiş olan TÇ1, TÇ2, TÇ3, TÇ4 ve TÇ5 çimentolarıyla 1, 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyleri yapılmış olup sonuçları (Çizelge18; Şekil 33) karşılaştırılmaktadır.

Grafikten (Şekil 33) de görüldüğü gibi traslı çimentonun özgül yüzeyi dolayısıyla tane inceliği arttıkça basınç dayanımı da artmaktadır. Ayrıca aynı grafiğe göre, 1 ve 2 günde elde edilen basınç dayanımı doğruları ile 7 ve 28 günde elde edilen basınç dayanımı doğruları arasındaki eğim farkı, incelik artışının 7 ve 28 günlük basınç dayanımına etkisinin, 1 ve 2 günlük basınç dayanımlarına etkisinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Ancak 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları kendi aralarında değerlendirildiğinde, doğrunun eğiminin sabit kalması dayanım üzerinde tane inceliğinin yedinci günden sonra fazla etkili olmadığını göstermektedir. 28 günlük basınç dayanımı eğrisinden de görüldüğü gibi çimento inceliğinde yaklaşık 1000 cm²/g'lık artış (yaklaşık %38), yaklaşık %40'lık bir dayanım artışına sebep olmaktadır.

Çizelge 16. Çimento özgül yüzeyleri ile dayanım arasındaki ilişki

Örnek	Özgül yüzey (cm ² /gr)	Dayanım (N/mm ²)			
		28 Günlük	7 Günlük	2 Günlük	1 Günlük
TÇ5	3714	49.1	35.9	17.1	9.2
TÇ4	3170	42.8	30.4	14.1	7.4
TÇ3	2933	42.2	30.2	12.5	8.0
TÇ2	2834	35.5	23.7	12.4	6.7
TÇ1	2822	35.6	23.9	13.3	6.7



Şekil 33. Özgül yüzey – basınç dayanımı ilişkisi

2.3.3. Trash Çimentolarda İnceliğin Katlaşma Süresine Etkisi

Portland çimentosu ile doğal puzolan karışımlarının kullanıldığı betonlarda katlaşma başlangıcı ve sonu, puzolanın portland çimentosu yerine ikame miktarına, inceliğine ve reaktifliğine bağlı olduğu kaynaklarda belirtilmiştir [11].

Bu bölümde incelik artışıyla katlaşma başlangıç ve katlaşma sonlanma süreleri arasındaki ilişki gösterilmeye çalışılacaktır. Önceki bölümde de kullanılan TÇ1, TÇ2, TÇ3, TÇ4 ve TÇ5 çimentolarıyla deneyler yapılmış olup sonuçlar (Çizelge 17; Şekil 34) birbiriyle karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 17. Örneklerin katılaşma süreleri

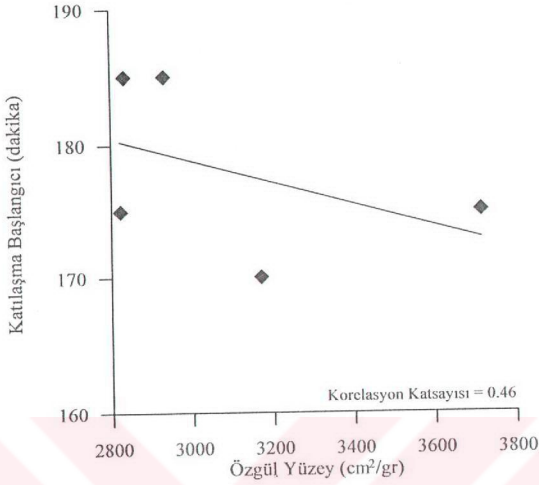
Örnek	Özgül yüzey (cm^2/gr)	Katılaşma Süresi	
		Başlangıç (dk)	Son (dk)
PC	2847	150	305
TÇ5	3714	175	265
TÇ4	3170	170	280
TÇ3	2933	185	310
TÇ2	2834	185	300
TÇ1	2822	175	305

Elde edilen sonuçlardan (Çizelge 17 ve Şekil 34) da görüldüğü gibi traşlı çimento örneklerinin özgül yüzeylerinin artırılmasıyla katılaşma başlangıç sürelerinde çok belirgin ve yüksek korelasyonlu bir düşüş söz konusu olmamaktadır. Diğer yandan, portland çimentosunun özgül yüzeyinin, tras katkılı çimento örneklerinin özgül yüzeylerinden daha düşük olmasına rağmen ($2847 < 3714$; cm^2/gr), katılaşma başlangıç süresi bu çimento örneklerine göre çok daha kısa olarak çıkmıştır ($150 < 175$; dk). Buradan, traşlı çimento örneklerinin göreceli incelik artışı, katılaşma başlangıç süresini önemli ölçüde etkilememektedir, denilebilir.

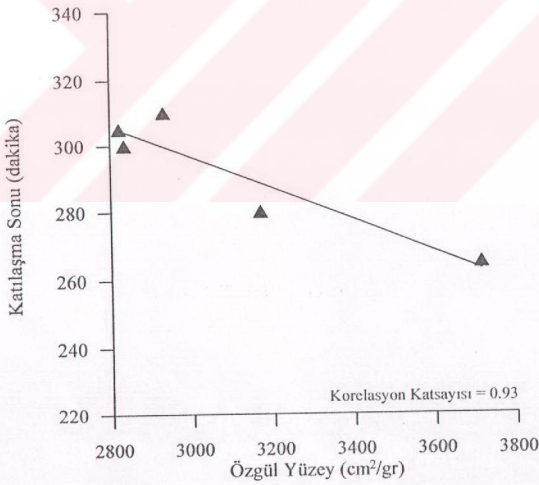
Portland çimentosuyla yaklaşık aynı inceliğe sahip traşlı çimento örneğinin katılaşma başlangıç sürelerindeki belirgin gecikmeden (20-25 dk), traşlı çimentolar, portland çimentosuna göre daha geç katılaşmaya başlamaktadır kanaatine varılabilir.

Diğer yandan, traşlı çimento örneklerinin özgül yüzeyleri arttıkça (Şekil 35) katılaşma sonlanma sürelerinde önemli bir düşüş söz konusu olmaktadır. Buradan, traşlı çimentolarda, eldeki veriler çerçevesinde incelik arttıkça katılaşma sonlanma süresinin belirgin bir şekilde kısalmakta olduğu anlaşılmaktadır.

Ayrıca TÇ1 ve TÇ2 örnekleriyle yaklaşık eşit incelik değerine sahip portland çimentosu da bu örneklere yakın katılaşma sonlanma süresi vermektedir. Aynı inceliğe sahip portland çimentosuyla traşlı çimento örneklerinin aynı katılaşma sonlanma süresine sahip olmaları ilginç bir durumu ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte kaynaklar, kütlece %20-25 mertebesinde doğal puzolan içeren çimentoların, portland çimentosu içeren karşılaştırma numuneleriyle yakın düzeyde katılaşma süreleri verdiğini de söylemektedir. Ancak daha yüksek oranda doğal puzolan katılımının ($\%_m 30-70$) katılaşma sürelerini önemli miktarda geciktirdiği de bilinmektedir [11].



řekil 34. Özgül yüzeý – katılma bařlangıç süresi iliřkisi



řekil 35. Özgül yüzeý – katılma bitiş süresi iliřkisi

2.3.4. Traslı Çimentoalarda İnceliğın Hacim Genleşmesine Etkisi

Çimento içerisinde çok düşük oranlarda CaO ve MgO bulunabilir. Bu maddeler su ile karşılaşınca şişerek çimento hacminin genleşmesine sebep olmaktadır. Bunun dikkate alınmaması halinde betonda önemli hasarlara yol açılmış olmaktadır. Çimento içerisinde serbest CaO bulunması,

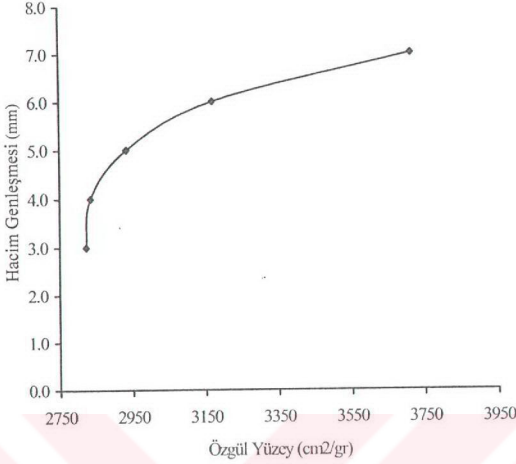
- ya ilkel maddelerin doğru oranlarda karıştırılmaması,
- ya bunların kafi derecede öğütülmemeleri
- veya uygun bir şekilde ayarlanmış ve öğütülmüş bir karışımın sıcaklığının ve ısı işlem süresinin düşük tutulması sonucundan kaynaklanmış olabilmektedir.

1040 C°'nin üstünde pişirilmiş olan kireç, yanmış ve normal olarak zayıf reaksiyonlu olmakla beraber, çimento içerisinde son derece ince öğütülmüş bulunacağından hidrasyon hızı oldukça yüksektir. MgO ise çimentoda daima çok pişmiş, kristalleşmiş (periklas) şekilde bir kirlilik olarak mevcuttur. Deneyler, rutubetli kür sonunda çimento hamurları, harçları ve betonlarında görülen hacim büyümesinin, çimentodaki serbest CaO ve MgO miktarları ile birlikte arttığını göstermektedir [2].

Çalışmanın bu kısmında traslı çimento örneğinin inceliği artırılarak oluşturulan TÇ1, TÇ2, TÇ3, TÇ4 ve TÇ5 çimentolarıyla harçlar yapılmış ve hacim genleşmelerindeki değişim (Çizelge 18; Şekil 36) incelenmiştir. Ayrıca karşılaştırma amacıyla kütlece %5 alçı ve %95 klinker içeren bir portland çimentosu deneylere ilave edilmiştir.

Çizelge 18. Örneklerin hacim genleşmesi değerleri

Örnek	Özgül Yüzey (cm ² /g)	Hacim Genleşmesi (mm)
PÇ	2847	7
TÇ5	3714	7
TÇ4	3170	6
TÇ3	2933	5
TÇ2	2834	4
TÇ1	2822	3



Şekil 36. Özgül yüzey – hacim genişmesi ilişkisi

Çıkan sonuçlardan (Çizelge 18 ve Şekil 36) görüldüğü gibi traşlı çimento örneklerinin özgül yüzeyi arttıkça hacim genişme miktarları da artmaktadır. Ayrıca karşılaştırma örneği olan portland çimentosunun hacim genişmesi ise 7 mm olarak belirlenmiştir. Portland çimentosu ile yaklaşık aynı inceliğe sahip Ç1 ve Ç2 örnekleri sırasıyla 3 mm ve 4 mm hacim genişmesi göstermiştir. Bu durum, yani aynı incelikteki portland ve traşlı çimento örneklerinden, traşlı çimento örneklerinin daha düşük hacim genişmesi göstermesi, katılan %25 oranındaki traşın toplam CaO miktarını ve dolayısıyla serbest CaO oranını düşürmesinden kaynaklandığı şeklinde açıklanabilir. Ancak traşlı çimentonun inceliğinin arttıkça hacim genişmesi değerinin portland çimentosunun hacim genişme değerine ulaşması klinker içerisinde bulunan CaO'in daha ince öğütülerek daha fazla tepkimeye girmiş olması şeklinde yorumlanabilir.

2.4. Tras Oranının Trash Çimentonun Özelliklerine Etkisi

2.4.1. Tanım ve Yöntem

Daha önceki bölümlerde de değinildiği üzere traslar (doğal puzolanlar) çimentolara veya betonlara belirli oranlarda katılarak çimento veya betona bazı, özellikleri yönünden farklı etkilerde bulunmaktadır.

Bu bölümde, doğal puzolan (tras) türü ve tane inceliği göreceli sabit tutularak, portland çimentosuna değişik oranlarda katılması suretiyle, bu katkının çimentonun dayanım, katılma süreleri ve hacim genişmesi gibi özelliklerine etkileri incelenmektedir.

Bu amaca yönelik olarak tane büyüklüğü, özgül yüzey, kıvrım tayini, katılma süresi, hacim genişmesi, basınç dayanımı deneyleri TS24, çözünmeyen kalıntı, kızdırma kaybı, kimyasal analiz deneyleri ise TS687 dahilinde gerçekleştirilmiştir.

2.4.1.1. Tras Türünün Seçimi

Deneyler sırasında, 2.2 bölümünde, en uygun puzolanik özelliğe sahip olduğu belirlenen A örneği, doğal puzolan olarak kullanılacaktır. Bu örneğe ait mineralojik ve petrografik veriler 2.1. bölümünde, kimyasal, fiziksel ve puzolanik veriler ise 2.2. bölümünde yer almaktadır.

2.4.1.2. Tras İnceliğinin Seçimi

Bu bölümde sadece tras oranının çimento özelliklerine etkisi inceleneceği için tras inceliğinin de bir ölçüde sabit tutulması gerekmektedir. Farklı oranlarda örnek çimentolar oluşturulurken, kütlece %5 alçı eklenmesi ile beş farklı oranda tras ve klinker her seferinde ayrı bir değirmende öğütülmüştür. Ancak özellikle tras oranlarının farklı olması nedeniyle inceliğin sabit tutulması mümkün olmamıştır. 2.3 Bölümünde de ifade edildiği üzere inceliğin çimentolarda, dayanım, hacim genişmesi ve katılma süreleri gibi özelliklerine etki ettiği bilinmektedir. Bu konuya şu şekilde bir açıklama getirmek mümkün gözükmektedir: Tras ve klinkerin öğütülebilme yeteneği farklı olmaktadır. Nitekim

trasların klinkerden daha ince ($\geq 6000 \text{ cm}^2/\text{g}$) öğütülebildiği açık olarak gözlemlenebilmekte olup kaynaklarda da sabittir. Şu halde çimento içindeki tras oranı arttıkça da daha ince öğünen tras, çimento inceliğini etkileyen asıl faktör olmaktadır. Bu yüzden, bu kısımdaki deneylerde asıl etkili olan, çimento inceliğinden çok tras oranı olup tane inceliğinin katkısı da yine trasın ince öğütülmesinden kaynaklandığı varsayılmıştır.

2.4.1.3. Tras İkame oranlarının Seçimi

Portland çimentosuna eklenen tras katkı oranları kütlece %10, %20, %25, %30 ve %35 olarak beş farklı değerde seçilmiştir. Verilen oranlarda tras içeren bu çimentoların özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Ayrıca karşılaştırma amacıyla bir de portland çimentosu örneği aynı deneylere tabi tutulmuştur.

Yukarıda verilen oranlar dahilinde örnek çimentolar, rakamlar tras katılım oranını temsil etmek üzere TÇ10, TÇ20, TÇ25, TÇ30 ve TÇ35 simgeleri ile, portland çimentosu da PÇ şeklinde (Çizelge 21) adlandırılmıştır. Örnek: %5 alçı, %85 klinker, %10 tras içeren çimento örneği TÇ10 olarak isimlendirilmiştir.

2.4.2. Çimento Örneklerinin Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Belirtilen oranlarda tras içeren çimento örneklerinin kimyasal katılımları, oranlarıyla belirlenmiş olup (Çizelge 20) buna ilaveten fiziksel özellikleri de (Çizelge 19) çıkarılarak değerler yeri geldikçe tartışmaya alınmıştır.

Çizelge 19. Örneklerin fiziksel değerleri

	PÇ	TÇ10	TÇ20	TÇ25	TÇ30	TÇ35
Özgül Kütle (gr/cm^3)	3,12	3,10	3,03	3,06	3,05	2,86
90 μ 'luk elekte kalan (%m)	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
200 μ 'luk elekte kalan (%m)	4,8	4,7	4,7	4,5	4,3	5,0
Özgül Yüzey (cm^2/gr)	2880	3596	3770	4103	4310	4392
Litre Kütlesi (gr/l)	995	1002	928	979	953	914

Çizelge 20. Örneklerin kimyasal analizleri

Kütle Oranları (% _m)	PÇ	TÇ10	TÇ20	TÇ25	TÇ30	TÇ35
Çözünmeyen SiO ₂		8,42	15,20	17,12	28,64	28,53
Toplam SiO ₂	21,49	26,51	30,33	31,68	38,31	38,84
Toplam Al ₂ O ₃	2,18	4,65	5,23	5,49	6,03	6,27
Toplam Fe ₂ O ₃	7,27	3,76	3,81	3,81	3,81	3,85
Toplam CaO	64,26	58,29	52,15	52,12	44,13	43,40
Toplam MgO	1,11	0,84	1,84	1,20	1,14	1,26
Toplam SO ₃	1,78	1,78	1,86	1,54	1,27	1,35
Kızdırma Kaybı	0,72	1,23	1,89	1,94	2,85	2,92
Na ₂ O	0,20	1,27	1,22	0,41	1,24	0,67
K ₂ O	0,75	0,96	0,96	1,01	1,18	1,18
Toplam	99,76	99,29	99,29	99,20	99,96	99,74
Cl ⁻	-	0,014	0,028	0,035	0,039	-
CO ₂	-	0,76	1,03	1,13	1,57	1,61

2.4.3. Tras Oranının Çimento Dayanımına Etkisi

Puzolanlar, betonda, klinkerin hidrasyonu sonucu oluşan Ca(OH)₂ ile tepkimeye girer ve bu nedenle betona karıştırılan su ilavesinden sonra, bir süre ortamda Ca(OH)₂ birikene kadar portland çimentosuna seyreltici bir etki yapar. Fakat zamanla ortamda Ca(OH)₂ birikmesi, puzolanların da sistemin dayanımını artıran etkilerinin ortaya çıkmasını sağlar. Bu sebeple, puzolan kullanımıyla betonun erken dayanımında bir düşüş olması beklenir. Sonuç olarak portland çimentosu-puzolan karışımı içeren çimentolar dolayısıyla betonlar aynı incelikteki portland çimentosu içeren betonlara göre daha uzun süre suya (kür) ihtiyaç duyarlar [11]. Ancak nihai dayanımın karşılaştırma örneklerinin sonuçlarına ulaşması hatta bunları geçmesi beklenir.

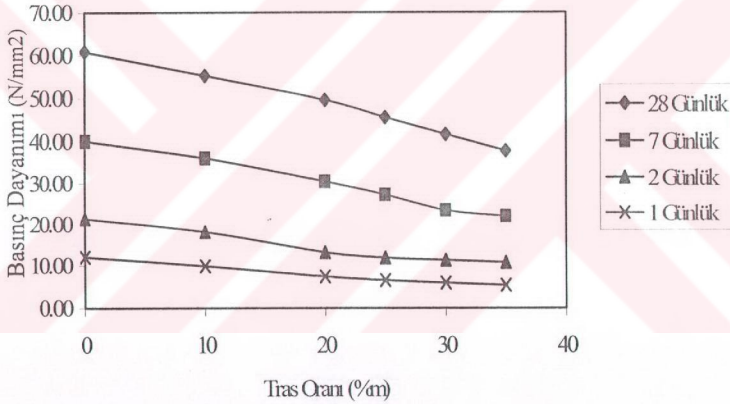
Bu etkiyi görmek için sırasıyla kütlece %10, %20, %25, %30 ve %35 oranında çimento içeren TÇ10, TÇ20, TÇ25, TÇ30 ve TÇ35 çimentolarıyla deneyler yapılmış ve sonuçlar çizelgeler ve grafikler (Çizelge 21; Şekil 37, 38) yardımıyla irdelemeye sunulmuş bulunmaktadır.

Basınç deneylerinden (Çizelge 21; Şekil 37, 38) görüldüğü gibi tras oranı arttıkça erken yaştaki dayanım düşmektedir. Ayrıca traşlı çimentoların basınç dayanımlarından (Şekil 38) görüldüğü gibi, eğrilerin eğimleri portland çimentosu eğrisini kesmemekle birlikte, nihai anlamda kesecek şekilde yükseliş göstermektedir. Nitekim, burada örneklerin yaşlarının 28 güne sınırlı kalması, traşlı çimentolardaki trasın tümüyle henüz

hidratasyona geçmediği anlamına gelmektedir. Yapılan çalışmalar, traşlı çimentolar ancak bir yıl sonra portland çimentosunun mukavemetine erişebildiğini göstermektedir [11].

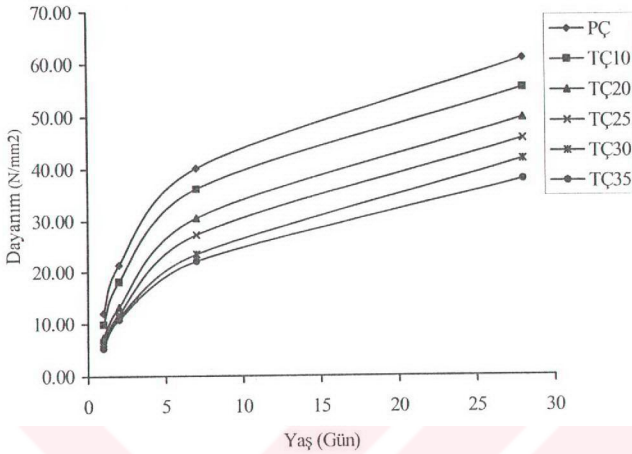
Çizelge 21. Farklı oranlarda tras içeren çimento örneklerinin basınç dayanımları

Örnek	Basınç Dayanımı (N/mm ²)			
	1 Günlük	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
PÇ	12	21.3	40.1	60.8
TÇ10	9.9	18.1	36.1	55.2
TÇ20	7.4	13.2	30.5	49.6
TÇ25	6.5	11.9	27.2	45.6
TÇ30	5.9	11.3	23.4	41.7
TÇ35	5.3	10.8	22	37.8



Şekil 37. Tras Oranı – dayanım ilişkisi

Portland çimentosundan üretilmiş beton, kütlece %35 oranında tras içeren çimentodan üretilmiş betona göre 28 gün sonunda ancak %38 oranında bir dayanım fazlalığı sergilemektedir. Bununla birlikte, bu fark, birinci günde %56 iken, ikinci günde %49 ve yedinci günde ise %45 oranında gerçekleşmiştir. Bu durum da traşlı çimento örneklerinin dayanım kazanma hızlarının, portland çimentosuna göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.



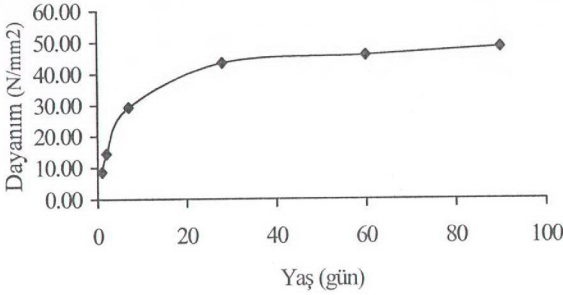
Şekil 38. Yaş – dayanım ilişkisi

Bu çalışma sırasında 1, 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Ancak daha önce de değinildiği üzere doğal puzolanların hidratasyonu uzun sürmekte olup kendinden beklenen yüksek dayanıma oldukça geç ulaşabilmektedir. Nitekim bu deneylerden bağımsız olarak, daha önceki bölümlerde özellikleri verilmiş olan, T1 doğal puzolanıyla 1, 2, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları deneyleri yapılmıştır. $\%_m14.43$ tras oranı ve $3362 \text{ cm}^2/\text{g}$ özgül yüzeyi ile hazırlanan çimento örneğinin basınç dayanımı sonuçları (Çizelge 22; Şekil 39) da traslı çimento örneklerinin ancak uzun sürede beklenen dayanıma eriştiklerini açık olarak göstermektedir.

Çizelge 22'de de görüldüğü gibi 90 gün sonunda örneğin basınç dayanımı, 28 günlük dayanım sonucuna göre yaklaşık $\%11$ oranında bir yükseliş göstermektedir.

Çizelge 22. T1 örneğinin dayanım – yaş değerleri

Yaş (gün)	1	2	7	28	60	90
Dayanım (N/mm^2)	8,60	14,4	29,3	43,4	45,8	48,3



Şekil 39. T1 örneğine ait yaş - dayanım ilişkisi

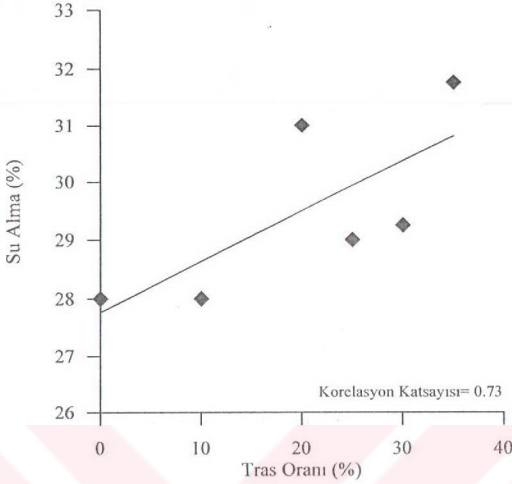
2.4.4. Tras Oranının İşlenebilirliğe Etkisi

Çimentoya ikame edilen tras oranı arttıkça işlenebilirlik ve dolayısıyla aynı kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarı göreceli de olsa artış göstermektedir (Çizelge 23; Şekil 40).

Çizelge 23. Örneklerin su alma (%)

Örnek	Su Alma (%)
PÇ	28.00
TÇ10	28.00
TÇ20	31.00
TÇ25	29.00
TÇ30	29.25
TÇ35	31.75

Ancak su alma oranıyla tras katışım oranı bire bir, eşit düzeyde (oranda) bir gecikme göstermemektedir. Örneğin TÇ35, kütlece %35 tras ilavesiyle ancak %13 oranında bir su fazlasına gereksinim duymaktadır. Bu da trasın su/çimento oranını fazla yükseltmeden, tane inceliğinden dolayı, özdeş taze beton kıvamını elde etmeye önemli katkı sağladığını açık olarak göstermektedir.



Şekil 40. Tras oranı – su alma (%) ilişkisi

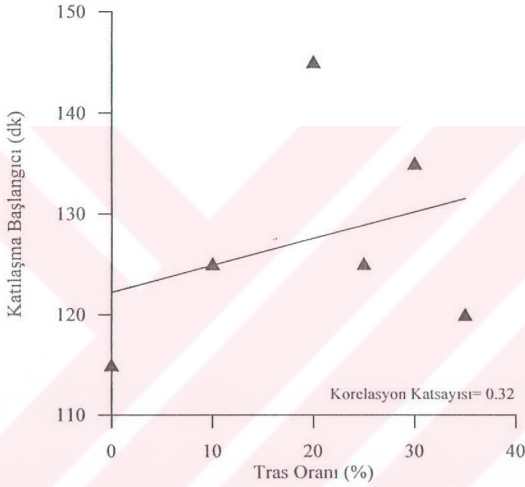
2.4.5. Tras Oranının Katılaşma Sürelerine Etkisi

Çimento hamurunun katılaşma özellikleri, çimento yerine ikame edilen doğal puzolan oranlarından etkilenmektedir. Belirtilen oranlarda tras içeren TÇ10, TÇ20, TÇ25, TÇ30 ve TÇ35 traslı çimentoları ile PÇ, farklı katılaşma başlangıç ve bitiş süreleri (Çizelge 24; Şekil 41, 42) sergilemektedir.

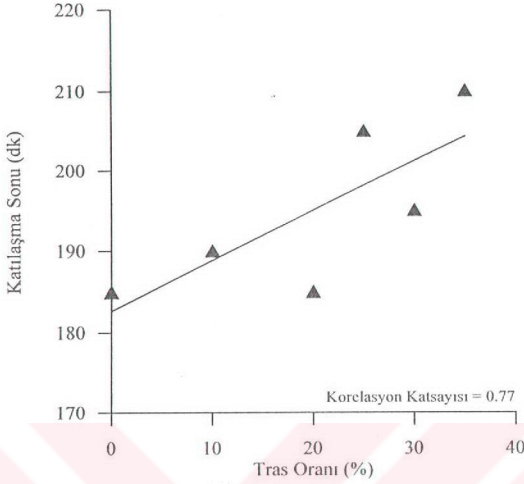
Deney koşulları katılaşma başlangıcındaki gecikmeyi, bir ölçüde orantılı bir zaman artışı ile göstermektedir. Ancak, bu orantılı gösterim katılaşma sonu ile ilgili olarak (Şekil 42) daha anlaşılır bir biçimde gerçekleşmiştir. Bu da, kullanılan tras örneklerinin kendilerinden beklenen bu önemli işlevi yerine getirdiklerini, böylece katılaşma gecikmesiyle hidrasyon hızını yavaşlattıklarını, hidrasyon ısı ve sıcaklığını düşürerek büzülme tehlikesine karşı etkili olduklarını açık bir şekilde göstermiş olmaktadır. Ancak, bazı kaynaklar katılaşma sürelerindeki bu gecikmeyi, W/C oranındaki artışa isnat ettirmektedirler [37, 41].

Çizelge 24. Örneklerin katılma süreleri

Örnek	Katılma Başl. (dk.)	Katılma Sonu (dk.)
PÇ	115	185
TÇ10	125	190
TÇ20	145	185
TÇ25	125	205
TÇ30	135	195
TÇ35	120	210



Şekil 41. Katılma başlangıcı – tras oranı ilişkisi



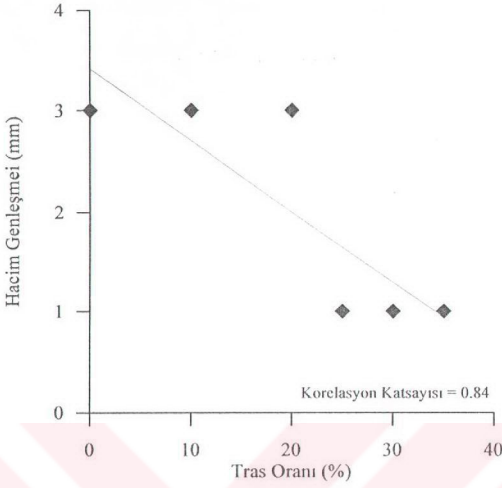
Şekil 42. Katlaşma sonu – tras oranı ilişkisi

2.4.6. Tras Oranının Hacim Genleşmesine Etkisi

Çimentolarda serbest halde bulunan CaO ve MgO bileşikleri şişme etkisi yapmaktadır. Bu nedenle de bunların oranlarının sınırlı (yaklaşık %1) tutulması gerekir. Tras oranı arttıkça serbest kireç oranı düşeceği için hacim genleşmesinde de bir düşüş beklenir. Bu etkinin görülebilmesi için TÇ10, TÇ20, TÇ25, TÇ30, TÇ35 traşlı çimentoları ve PÇ örneğiyle yapılan deneylerin sonuçları (Çizelge 25; Şekil 43) karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 25. Örneklerin hacim genleşmeleri

Örnek	Hacim Genleşmesi (mm)
PÇ	3
TÇ10	3
TÇ20	3
TÇ25	1
TÇ30	1
TÇ35	1



Şekil 43. Tras oranı – hacim genleşmesi ilişkisi

Deney koşulları hacim genleşme farklarını bir azalma sürekliliği ile ortaya koyamasa da, TÇ25 ve daha yüksek oranda tras içeren örneklerin hacim genleşmesi (mm) 2/3 oranında bir düşüşü göstermekte olup, böylece kullanılan tras örneklerinin bu özellikleriyle beton dayanıklılığına (durabilite) katkıda bulunabilecekleri açık olarak görülmektedir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Üç aşamadan oluşan bu çalışmadan çıkan sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Trabzon yöresinden alınan kayaç örneklerinin gerek puzolanik aktivite gerekse kimyasal açıdan çimentoda katkı maddesi olarak kullanılabilirliklerinin incelendiği birinci aşamada, kimyasal bileşim ile dayanım arasındaki ilişki de göz önünde bulundurulmuş olup, bu çerçevede aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Trabzon ilinin çeşitli yerlerinden alınan, beş farklı örneğin ve Bayburt'tan alınan bir örneğin tümü puzolanik aktivite (basınç ve eğilmede çekme dayanımları) yönünden TS 25'te istenen şartları sağlamaktadır. Sadece bir örnek (P) ana oksitlerin toplam oranı (%66.43) bakımından TS 25'te belirtilen sınırın (%70) altında kalmaktadır. Bu sonuç, Trabzon ve yakın çevresinde çimento katkı maddesi olarak doğal puzolanların yörede kolaylıkla bulunabileceğinin açık bir göstergesi olmaktadır. Ayrıca bu örneklerin tümü (P bazanit) dasidik veya andezitik tuf niteliği taşımaktadır.
2. Puzolanların, puzolanik aktivitesi, puzolan bileşimindeki SiO_2 oranı arttıkça artmaktadır.
3. Puzolan bileşimindeki Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşenlerinin ayrı ayrı veya toplam oranı arttıkça, puzolanik aktivite düşmektedir.
4. CaO bileşenin puzolan içindeki oranı, olması gerektiği gibi, düşük düzeyde ($\text{CaO}+\text{MgO}<\%10$) bulunduğundan puzolanik aktiviteyi etkilememektedir.
5. MgO ve K_2O bileşenlerinin oranı ise puzolanların aktivitesini düşürmektedir. Ancak bu oran sınırların altındadır (Tablo 13).

Puzolan oranı ($\%m_{25}$) ve puzolan tipinin (A örneği) sabit tutularak çimento inceliğindeki artışın, traslı çimento özelliklerine etkisinin incelendiği aşamada ise çıkarılan sonuçlar şöyledir:

1. Tane inceliğinin artışından dolayı, çimento harçlarının dayanımındaki artış özellikle yedi güne kadar yapılan deney sonuçları üzerinde etkili olmuştur. Yedi günden sonra elde edilen dayanım sonuçlarına, tane inceliğindeki artış belirgin bir katkı sağlamamıştır.
2. Çimento inceliğindeki $1000 \text{ cm}^2/\text{g}^{\text{lik}}$ (%38) artış, erken yaştaki basınç dayanımına yaklaşık %40 düzeyinde bir yükselme kazandırmıştır.

3. Tane inceliğindeki artış, traslı çimentoların katılma başlangıcını önemli ölçüde etkilememiştir.
4. Ancak tane inceliğindeki artış, traslı çimentolarda katılma sonlanmasını önemli ölçüde (≈ 40 dk) düşürmüştür.
5. Traslı çimentoların hacim genleşmesi değeri, aynı inceliğe sahip portland çimentosunun hacim genleşmesine göre daha düşük ölçüde gerçekleşmiştir. Tane inceliği artırıldığında ise hacim genleşme değerleri az da olsa yükselme göstermiştir.
6. Elde bulunan tras örneğinin (A), özellikle daha düşük hacim genleşmesi göstermesi nedeniyle beton dayanıklılığına katkı sağlayacağı açık olarak görülmektedir.

Üçüncü aşamada ise puzolan tipi (A) ve çimento incelikleri (yaklaşık) sabit tutularak, puzolanın portland çimentosu yerine ikame oranının, puzolan içeren çimento özelliklerine etkisi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Tras oranı arttıkça erken yaştaki dayanım düşmektedir.
2. 28 gün sonunda, kütlece %35 tras içeren çimento ile üretilen betonun basınç dayanımı, portland çimentosuyla üretilen betona göre yaklaşık %38 oranında daha düşüktür.
3. 90 gün sonunda katkılı çimento ile üretilmiş olan beton örneklerinin basınç dayanımı, 28 günlük dayanım sonucuna göre yaklaşık %11 oranında bir yükseliş göstermektedir.
4. Tras oranı arttıkça işlenebilirlik ve dolayısıyla aynı kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarı gıreceli artmaktadır.
5. Tras oranı arttıkça katılma başlangıç ve sonlanma sürelerinde (≈ 20 dk) belirgin bir uzama görülmektedir.
6. Tras oranı arttıkça çimento hamurunun hacim genleşmesi değeri ($\approx 2/3$) düşüş göstermektedir. Bu da tras örneğinin betonun dayanıklılığına (durabilite) katkıda bulunacağına önemli bir göstergesidir.

Bu yönde, ileride yapılacak çalışmalar için ise aşağıdaki öneriler uygun görülmüştür.

1. Örnek alınan bu bölgelerdeki kaynak kapasitesinin belirlenmesi.
2. Gerek farklı incelikte gerekse farklı oranda tras içeren çimento örneklerinin asitli ve sülfatlı ortamlarda sağladıkları katkıların belirlenmesi.

4. KAYNAKLAR

1. Bogue, R.H., The Chemistry of Portland Cement, Second Edition, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1955.
2. Kocataşkın, F., Çimento ve Özellikleri Hakkında Ne Biliyoruz, İTÜ Matbaası; Gümüşsuyu, 1965.
3. Lea, F.M., The Chemistry of Cement and Concrete, Third Edition, Edward Arnold Publishers Ltd., Glasgow, 1979.
4. Erdoğan, T.Y., Çimentolar, THBB Yayınları, Ankara, 1995.
5. Locher, F, W; Zement; VBT; Dusseldorf; 2000.
6. Czernin, W., Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers, First Edition, Crosby Lockwood & Sons Ltd., London, 1962.
7. Massazza, F., Puzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Seminer, Mayıs 1989, Ankara, Tebliğler Kitabı.
8. Okucu, A., Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin puzolanik Özellikleri, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1998.
9. Aslaner, M., Kor ve Kor Kırıntılı Kayaçlar, 1. Baskı, KTÜ Basımevi, Trabzon, 1989.
10. Erkan, Y., Magmatik Petrografi, Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Yayın No:40, Ankara, 2001.
11. Rösler, H.J., Lehrbuch Der Mineralogie, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Berlin, 1983.
12. Erdoğan, K.E., Tokyay, M. ve Türker, P., Traslara ve Traslı Çimentolar, TÇMB AR-GE Enstitüsü, Ankara, 2001.
13. TÇMB, Annual Report, 2000, Ankara.
14. Aydın, F., Değirmendere Vadisi (Trabzon – Esiroğlu, KD – Türkiye) Volkanitlerinin Petrolojisi ve Petrojenezi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2003.
15. Dokuz, A., Maçka (Trabzon) Yöresinin Jeolojisi ve Piroklastik Kayaçların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1990.

16. Leckebush, R., Türkiye'de Doğal Pozolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı Üzerine İncelemeler, Teknik Rapor, TÇMB Yayını, Ankara, 1984.
17. Türkmenoğlu, A.G. ve Tankut, A., Use of Tuffs from Central Turkey as Addmixture in Pozzolan Cements Assessment of Their Petrographical Properties, Cement and Concrete Research, 32, 2002, 629-637.
18. Selçuk, G., Dereboğazi (Isparta) Yöresi Tras Yataklarının Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, 1992.
19. Kılınçkale, F.M., The Effects of $MgSO^4$ and HCl solutions on the strenght and Durability of Pozzolan Cement Mortars, Cement and Concrete Research, 27, 1997, 1911-1918.
20. Bayoğlu, A.S., Evaluation of the Reactivity of the Pozzolan, 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, November 1997, İstanbul, Bildiriler Kitabı, Sayfa 45-58.
21. Bayat, O., Characterisation of Turkish Fly Ashes, Fuel, 77, 1998, 1059-1066.
22. Liebig, E. ve Althaus, E., Pozzolanik Aktivite of Volcanic Tuffs and Suevite: Effects of Calcination, Cement and Concrete Research, 28, 1998, 567-575.
23. Sevim, F., A New Material Research For Tras in Cement Industry, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 1997.
24. Taşdemir, C., Combined Effects of Mineral Admixtures and Curing Conditions on the Sorptivity Coefficient of Concrete, Cement and Concrete Research, 33, 2003, 1637-1642.
25. Pan, S., Tseng, D., Lee, C.C. ve Lee C., Influence of the Fineness of Sewage Sludge Ash on the Mortar Properties, Cement and Concrete Research, 33, 2003, 1749-1754.
26. Turanlı, L., Effect of Natural Pozzolan Addition on the Properties of Portland-Pozzolan Cements and the Concretes Made with Those Cements, Doktora Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1995.
27. Turhan, Y.E. ve Doğulu, S., Effect of Fineness of Ground Granulated Blast-Furnace Slags on Their Cementitious Properties and Uses, 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, November 1997, İstanbul, Bildiriler Kitabı, Sayfa 221-227.
28. Uzal, B. ve Turanlı, L., Studies on Blended Cement Containing a High Volume of Natural Pozzolans, Cement and Concrete Research, 33, 2003, 1777-1781.
29. Targan, Ş., Olgun, A., Erdoğan, Y. ve Sevinç, V., Influence of Natural Pozzolan, Colemanite Ore Waste, Bottom Ash and Fly Ash on the Properties of Portland Cement, Cement and Concrete Research, 33, 2003, 1175-1182.

30. Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M., Sümer, M. ve Yurdusev, M., Use of Zeolite, Coal Bottom Ash and Fly Ash as Replacement Materials in Cement Production, Cement and Concrete Research, 2324, 2003,1-5.
31. Vu, D., Stroeven, P. ve Bui, V., Strenght and Durability Aspects of Calsined Caolin – Blended Portland Cement Mortar and Concrete, Cement & Concrete Composites, 23, 2001, 471-478.
32. Shannag, M., High Strenght Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume, Cement & Concrete Composites, 22, 2000, 399-406.
33. Özer, B. ve Özkul, H., The Influence of Initial Water Curing on the Strenght Development of Ordinary Portland and Pozzolanic Cement Concrete, Cement and Concrete Research, 2406, 2003.
34. Özkul, H., Efficiency of Accelerated Curing in Concrete, Cement and Concrete Research, 31, 2001, 1351-1357.
35. Türker, F. ve Koçkal, U., Farklı Ortam Koşullarının Değişik Çimentolarla Üretilen Normal ve Yüksek Dayanımlı Beton Özelliklerine Etkileri, Teknik Rapor, TÇMB Yayını, Antalya, 2002.
36. Yılmaz, A., Effects of Clinker Composition on the Properties of Pozzolanic Cements, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara, 1998.
37. Turanlı, L. ve Erdoğan, T.Y., Effecets of Natural Pozzolanas Addition on Heat of Hydration and Other Properties of Portland-Pozzolan Cements, 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, November 1997, İstanbul, Bildiriler Kitabı, Sayfa 99-105.
38. Ramlochan, T., Zacarias, P., Thomas, M. ve Hooten, R., The Effecets of Pozzolan and Slag on the Expansion of Mortars Cured at Elevated Temperature. Part 1: Expansive Behaviour, Cement and Concrete Research, 33, 2003, 807-814.
39. Sabir, B., Wild, S. ve Bai, J., Metacaolin and Calcined Clays as Pozzolan for Concrete: a Review, Cement & Concrete Composites, 23, 2001, 441-454.
40. Hekal, E., Kishar, E. ve Mostafa, H., Maggnesium Sufat Attack on Hardened Blended Cement Pastes Under Different Circumstances, Cement and Concrete Research, 32, 2002, 1421-1427.
41. Çolak, A., The Long-Term Durability Performance of Gypsum - Portland Cement - Natural Pozzolan Blends, Cement and Concrete Research, 32, 2002, 109-115.
42. Yılmaz, S., Saraloğlu, A., Köse, Z. ve Köse, F., Trabzon İlinin Doğal Kaynaklar Envanteri, MTA Genel Müdürlüğü, 1994, Trabzon.
43. Scholz, W., Baustoffkenntnis, Werner-Verlag, 1991, Dusseldorf.

44. TS 19, Portland Çimentosu, Türk Standartları Enstitüsü, 1992.
45. TS 24, Çimentoların Fiziki ve Mekanik Deney Metodları, Türk Standartları Enstitüsü, 1985.
46. TS 25, Tras, Türk Standartları Enstitüsü, 1975.
47. TS 26, Traslı Çimentolar, Türk Standartları Enstitüsü, 1992.
48. TS 687, Çimento – Kimyasal Analiz Metodları, Türk Standartları Enstitüsü, 1994.
49. TS 10156, Katkılı Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, 1992.
50. TS 12142, Çimento – Kompoze, Türk Standartları Enstitüsü, 1997.
51. TS 12143, Çimento – Portland Kompoze, Türk Standartları Enstitüsü, 1997.
52. TS 12144, Çimento – Puzolanik, Türk Standartları Enstitüsü, 1997

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet ÇAVDAR, 1980 yılında Trabzon'un Maçka ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Trabzon'da tamamlayarak, 1997 yılında Affan Kitapçıoğlu Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl girdiği ÖYS sınavı sonucu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2001 yılında bu bölümden mezun oldu ve aynı yıl, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. Yine aynı yıl, KTÜ Gümüşhane Mühendislik Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak göreve başlayan Ahmet ÇAVDAR araştırmalarını Yapı Malzemesi Bilim Dalı'nda sürdürmektedir.

İngilizce bilen Ahmet ÇAVDAR, bekar'dır ve halen yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.