



T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PUZOLANİK ZEOLİTİN ÇİMENTODA
KATKI UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

SUZAN FEN YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Antakya/HATAY
EYLÜL-2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	IV
ABSTRACT.....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç.....	5
1.2. Yöntem.....	6
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
3.1 Materyal (Deneylerde Kullanılan Malzemeler).....	12
3.1.1. Zeolitler.....	16
3.1.1.1. Zeolitlerin Tanımı ve Önemi.....	16
3.1.1.2. Zeolit Rezervleri ve Jeolojik Özellikleri.....	18
3.1.1.3. Türkiye’deki Doğal Zeolitler.....	22
3.1.1.3.1. Önemli Zeolit Türleri.....	22
3.1.1.3.1.1. Analsim.....	22
3.1.1.3.1.2. Şabazit.....	23
3.1.1.3.1.3. Höylandit.....	23
3.1.1.3.1.4. Lamontit.....	23
3.1.1.3.1.5. Klinoptilolit.....	24
3.1.1.3.1.6. Nartolit.....	24

3.1.1.4. Zeolitlerin Fiziksel ve Kimyasal Yapısı.....	25
3.1.1.5. Zeolitlerin Hafif Agregada Olarak Kullanılması.....	29
3.1.1.5.1. Zeolit Hafif Agregalarda Genel Özellikler.....	29
3.1.1.5.2. Granülometrik Bileşim.....	30
3.1.1.5.3. En Büyük Tane Boyutu.....	31
3.1.1.5.4. Tane Şekli ve Yüzey Yapısı.....	32
3.1.1.5.5. Birim Ağırlık ve Yoğunluk.....	32
3.1.1.5.6. Agregalarda Boşluk Oranı ve Su Emme.....	34
3.1.1.5.7. Basınç (Ezilme) Dayanımı.....	35
3.1.1.5.8. Zararlı Maddeler.....	36
3.1.2. Çimentolar.....	36
3.1.2.1. Çimentonun Ana Maddeleri.....	37
3.1.2.1.1. Kalker.....	38
3.1.2.1.2. Kil.....	38
3.1.2.1.3. Marn.....	39
3.1.2.2. Çimentoda Hammadde Karışımı ve Modüller.....	39
3.1.2.3. Çimentonun Üretimi.....	40
3.1.3. Puzolanlar.....	42
3.1.3.1. Puzolanların Tanımı ve Genel Sınıfları.....	42
3.1.3.1.1. Doğal puzolanlar.....	44
3.1.3.1.2. Yapay puzolanlar.....	46
3.1.3.2. Betonların Genel Özellikleri İle Puzolan İlişkisi.....	46
3.1.3.2.1. Beton karışım suyu ihtiyacı, işlenebilirlik.....	46
3.1.3.2.2. Priz süresi.....	47

3.1.3.2.3. Terleme.....	48
3.1.3.2.4. Hidratasyon Isısı.....	48
3.1.3.2.5. Sürüklenmiş hava etkisi.....	48
3.1.3.2.6. Dayanım.....	48
3.1.3.2.7. Su geçirimsizliği.....	49
3.1.3.2.8. Sülfatlara dayanıklılık.....	50
3.1.3.2.9. Alkali-agrega reaksiyonu.....	50
3.1.3.2.10. Betonun Ekonomikliği.....	50
3.2. Yöntem.....	50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	52
4.1. Kimyasal Analiz.....	53
4.2. Zeolit Katkılı Çimentolarla Yapılan Hamur İncelemeler.....	53
4.2.1 Aktivite Deneyi (Puzolanik katkı uygunluğu).....	53
4.2.2. Zeolit katkıli çimento hamurlarının malzeme dizaynı.....	54
4.2.3. Zeolit katkıli çimento hamurlarının MgSO ₄ direnci.....	55
4.2.4. Zeolit katkıli çimento hamurlarının x-ray difraksiyonu iç yapı incelemeleri.....	59
4.2.5. Zeolit katkıli çimento hamurlarının SEM (Scanning electron microscope) içyapı incelemeleri.....	62
4.3. Zeolit Katkılı Çimentolarla Yapılan Harç İncelemeleri.....	76
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR.....	83
TEŞEKKÜR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	88

ÖZET

Günümüzde, çimento endüstrisi gittikçe gelişmekte ve ilerlemektedir. Bilindiği üzere bir ton çimento klinkeri üretimi sırasında bir ton CO₂ gazı ortaya çıkmaktadır. Bunun üzerine hem çevre konuları için hem de çimento üretiminin daha düşük maliyetli olması için hidrolik çimentolara puzolan katılması uygundur. Yapılan bu deneysel çalışmada, Manisa-Gördes yöresinden elde edilen doğal zeolitin çimentoda katkı uygunluğu araştırılmıştır. Manisa-Gördes doğal zeolitin %0, % 15 ve %30 doğal zeolit katkı ve doğal zeolit + süperplastikleştirici katkı çimentoları fiziksel ve kimyasal özellikleri yönünden birbirleriyle ve kontrol çimentosu olan PÇ 42,5 ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanan zeolitli hamur numuneleri üzerinde X-ray difraksiyon ve SEM fotoğraf araştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar %15 doğal zeolit katkı numunelerin çimentoda uygun olduğu görülmüştür.

2007, 97 sayfa

Anahtar Kelimeler: Doğal zeolit, PÇ 42.5 R (CEM I) çimento, fiziksel ve kimyasal analiz, MgSO₄.

ABSTRACT

Nowadays, cement industry has been developed and improved. As known, one tonne of CO₂ gases come out during one tonne of clinker production. According to this, pozzolans are added in suitable amounts in hydraulic cement because of either environmental matters or production of cement with a minimum cost. In this experimental study, the usability of natural zeolite obtained from natural deposits in Gördes, Manisa, Turkey as an admixture to cement was examined. Natural zeolite added cements have been obtained %0, %15 and %30 by weight and added superplasticisers has been compared to both each other and PÇ 42.5 called control cement according to physical and chemical properties. Prepared mortar samples with zeolite have been researched by X-ray diffraction and SEM photos. Obtained results show that %15 natural zeolite addition can be used conducting in producing cements.

2007, 97 pages

Key Words: Natural zeolite, PÇ 42.5 R cement (CEM I), physical and chemical analysis, MgSO₄.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

XRD	X-Ray Difraksiyon
SEM	Scanning Electron Microskope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SP	Süperplastikleştirici
PÇ	Portland Çimentosu

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. PÇ 42.5 R kimyasal analiz sonuçları.....	12
Çizelge 3.2. Zeolitin kimyasal yapısı.....	13
Çizelge 3.3. Zeolitin elek analizi sonuçları.....	14
Çizelge 3.4. Süper plastikleştirici analiz raporu.....	15
Çizelge 3.5. Türkiye’de tespit edilmiş, endüstriyel önemi olan zeolit yatakları ve türleri.....	19
Çizelge 3.6. Literatür incelemesine göre zeolitlerin fiziksel ve kimyasal olarak karşılaştırılması.....	26
Çizelge 3.7. Endüstriyel kullanımı olan zeolit türleri ve özellikleri.....	28
Çizelge 3.8. Klinkerin oluşum tepkimeleri ve sıcaklık ilişkisi.....	41
Çizelge 3.9. Doğal puzolanların sınıflandırılması.....	44
Çizelge 3.10. Bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin miktarı.....	45
Çizelge 3.11. Doğal puzolanların çimentoda katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için standard limit değerleri.....	45
Çizelge 4.1. Hamur karışım dizaynı.....	54
Çizelge 4.2. Zeolit katkılı çimento hamurlarda basınç dayanımları.....	55
Çizelge 4.3. Zeolit katkılı çimento hamurlarının x-ray bulguları.....	61
Çizelge 4.4. Harç karışım dizaynı.....	76
Çizelge 4.5. Harçların basınç dayanımları.....	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Zeolitin iç yapısı.....	3
Şekil 1.2. Dörtüzlülerin birbirlerine bağlanması.....	3
Şekil 3.1. Standard kumun granülometrik eğrisi.....	15
Şekil 3.2. Türkiye'deki zeolit yatakları.....	19
Şekil 3.3. Analsim.....	22
Şekil 3.4. Şabazit.....	23
Şekil 3.5. Höylandit.....	23
Şekil 3.6. Lamontit.....	24
Şekil 3.7. Klinoptilolit.....	24
Şekil 3.8. Nartolit.....	24
Şekil 3.9. (a) zeolit a ve (b) zeolit x'in kristal yapıları.....	26
Şekil 3.10. Puzolanların sınıflandırılması.....	43
Şekil 4.1. Hamur numunelerinin eğilmede çekme dayanımı.....	56
Şekil 4.2. SP'siz hamur numunelerinin eğilmede çekme dayanımı.....	56
Şekil 4.3. SP'li hamur numunelerinin eğilmede çekme dayanımı.....	57
Şekil 4.4. Hamur numunelerinin basınç dayanımları.....	57
Şekil 4.5. SP'siz hamur numunelerinin basınç dayanımları.....	58
Şekil 4.6. SP'li hamur numunelerinin basınç dayanımları.....	58
Şekil 4.7. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük x-ışınları difraktometresi (XRD).....	64
Şekil 4.8. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük X 100 büyütme SEM incelemesi.....	65
Şekil 4.9. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük X 300 büyütme SEM incelemesi.....	66
Şekil 4.10. MgSO ₄ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük x-ışınları difraktometresi (XRD).....	67
Şekil 4.11. MgSO ₄ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük X 100 büyütme SEM	

incelemesi.....	68
Şekil 4.12. MgSO ₄ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük X 300 büyütme SEM incelemesi.....	69
Şekil 4.13. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı ve SP'li 28 günlük çimentolu hamurların x-ışınları difraktometresi (XRD).....	70
Şekil 4.14. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı ve SP'li 28 günlük çimentolu hamurların X 100 büyütme SEM incelemesi.....	71
Şekil 4.15. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı ve SP'li 28 günlük çimentolu hamurların X 300 büyütme SEM incelemesi.....	72
Şekil 4.16. MgSO ₄ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı SP'li 28 günlük çimentolu hamurların x-ışınları difraktometresi (XRD).....	73
Şekil 4.17. MgSO ₄ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük X 100 büyütme SEM incelemesi.....	74
Şekil 4.18. MgSO ₄ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük X 300 büyütme SEM incelemesi.....	75
Şekil 4.19. Harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımları.....	78
Şekil 4.20. SP'siz harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımları.....	78
Şekil 4.21. SP'li harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımları.....	79
Şekil 4.22. Harç numunelerinin basınç dayanımları.....	79
Şekil 4.23. SP'siz harç numunelerinin basınç dayanımları.....	80
Şekil 4.24. SP'li harç numunelerinin basınç dayanımları.....	80

1. GİRİŞ

1756 yılında Cronstedt tarafından, ısıtıldıklarında yapılarında bulunan suyu çıkartırken köpürmelerinden dolayı “kaynayan taş” olarak isimlendirilen zeolitler, alkali ve toprak alkali kristal yapıya sahip sulu alüminyum silikatlar olarak tanımlanır (Dpt, 1996).

Yapay ya da doğal, kristal yapılı, sulu alüminyum silikat bileşikleri olarak bilinen zeolitler; kırk yılı aşkın bir süredir çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmaktadırlar. Günümüzde yapay zeolitler katalizör, adsorblayıcı ve iyon değiştirici olarak kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılırken, doğal zeolitler göreceli olarak henüz gelişmiş kullanım alanlarına sahip değildir. Genel olarak doğal zeolitler hafif yapı taşı ve hafif agrega olarak inşaat sektöründe, katkı maddesi olarak kâğıt sanayisinde, toprak düzenleyici ve gübre katkı maddesi olarak tarım sektöründe değerlendirilmektedir (Yücel, 1987). TUBITAK – NAM tarafından hazırlanan bir raporda Türkiye’de yaklaşık 50 milyar ton doğal zeolit rezervi bulunduğu tahmin edildiği belirtilmektedir (Kocakuşak, 2001). Doğal zeolitlerin yüksek miktarlardaki reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 içeriklerinden dolayı, sönmüş kireç $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve su ile reaksiyona girerek bağlayıcı ürünler oluşturabilme olarak tanımlanan puzolanik özelliğe de sahip olmaları, bunların çimento veya betonda doğal puzolan olarak kullanımını da mümkün kılmaktadır. Çin’de ticari olarak kullanıma açık, başlıca klinoptilolit mineralinden oluşan bir doğal zeolit numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneyler, test edilen malzemenin, silis dumanı ve uçucu kül arasında bir puzolanik aktiviteye sahip olduğunu göstermiştir (Poon, Lam, Kou, Lin, 1999).

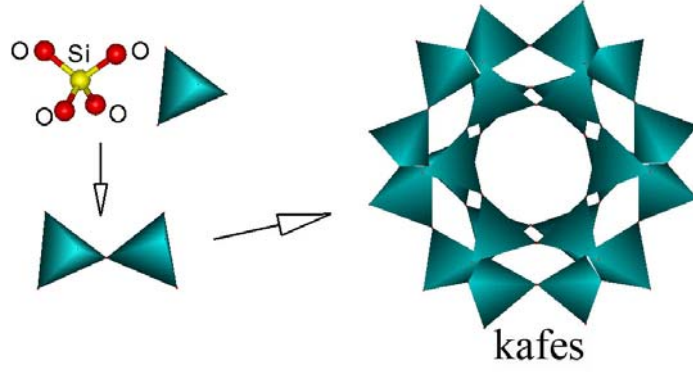
Bilindiği üzere, çimento ve beton sistemlerine doğal puzolanların dahil edilmesi, betonun işlenebilirlik, geçirimsizlik, geç yaşlardaki dayanım gibi özelliklerini geliştirmekte, alkali-agrega reaksiyonu ve sülfat etkisi gibi kimyasal dış etmenlere karşı dayanıklılığını artırmaktadır. Mehta, %10, %20 ve %30 oranlarında doğal puzolan katkısı ile elde edilen katkılı portland çimentolarının normal portland çimentosuna benzer veya daha fazla basınç dayanımı gösterdiklerini, ayrıca alkali-silika reaksiyonu ve sülfat etkisine karşı çok daha dirençli olduklarını rapor etmiştir (Mehta, 1981). Doğal zeolit katkısı içeren betonlar üzerinde yapılan çalışmalar da, zeolit beton özelliklerini geliştirdiğini ve yüksek performanslı beton üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir (Feng, Li, Zang, 1990). Ayrıca, doğal zeolit katkısının betonun basınç dayanımını

artırdığı ve alkali-agrega reaksiyonu kaynaklı istenmeyen genleşmeleri önlediği tespit edilmiştir (Feng, Jia, Chen, 1998).

Zeolitlerin bileşimlerinde genel olarak hidrate alüminyum silikat olup bir miktar potasyum, sodyum, kalsiyum ve bazen baryum ve stronsiyum vs. bulunur. Billurları camsı, beyaz ve saydam, enklüsyonların tesiriyle bazen renkli; sertlikleri 4–6, yoğunlukları 2–2.5 g/cm³ tür. Asitlerde silisli bir tortu bırakarak erirler ve üfleçte kabarak kaynarlar. Zeolitlerin oluşumlarında önemli rol oynayan sıcak ve madensel sulardır. Zeolitler 100°C ve daha yüksek ısıda bileşimlerindeki suyun önemli bir miktarını kayb ettikleri gibi nemli havadan da %4–14 oranında su çekerler. Suyu kayb ettikleri zaman saydamlıkları kalmaz. Fakat birçoğu su alınca tekrar eskisi gibi saydam olurlar. Bu durum su kaybolduğu zaman billurun bünyesinin değişmediğini gösterir. Yani su tekrar billurun ağsal yapısı arasından adeta bir süngerin ince deliklerine girer gibi geçer (Sayar, 1960, Ünsal, 2001).

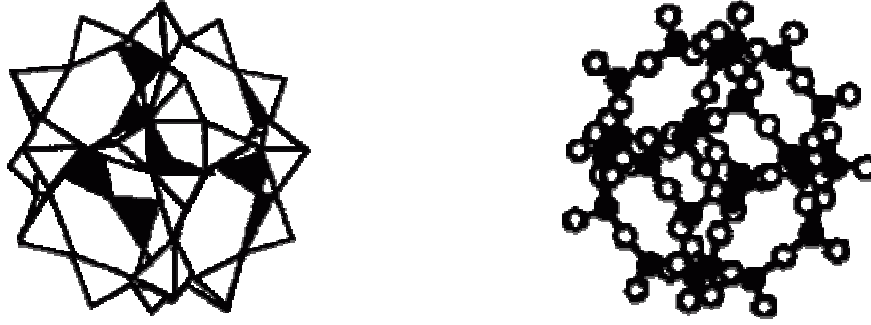
Zeolitlerin ayırt edici özellikleri, iyon değişimi, yapısındaki suyu tersinir olarak kaybetmesi ve kazanabilmesi, moleküler eleme olarak sıralanabilir. Zeolit yapıda, metal katyonları ve su molekülleriyle dolu, birbiriyle kanallarla bağlanmış boşluklar bulunur (Meier, 1968). Zeolitin kristal yapısı, köşelerindeki oksijen atomlarının, iki dörtyüzlü tarafından paylaşılan (SiO₄)⁴⁻ ve (AlO₄)⁵⁻ dörtyüzlülerinin, üç boyutta dizilmesiyle oluşur (Gottardi, Galli, 1985). Bütün dörtyüzlüler silisyum atomu içerseydi, kristal örgü nötr olurdu. Silisyum yerini alüminyum alması bir yük dengesizliğine neden olur ve yapıdaki büyük boşluklarda başka metal katyonlarının bulunmasını gerektirir. Doğal zeolitlerde bu metal iyonları, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ ve Ba²⁺ gibi katyonlardır. Zeolitler yapısal olarak, kristal örgüyü oluşturan yapı birimlerinin tipine göre (halka, çokgen v.b) sınıflandırılır. Yapıdaki boşluklar 2–8 Å arasında değişir. Bu durum katyonların boşluklar arasında kolayca hareket edebilmesini sağlar. İyonların ve suyun kristal örgüde kolay hareket etmesi, tersinir su kaybına ve iyon değişimine yol açar. Bu özellikler, kimyasal ve yapısal farklılıklara bağlı olarak değişir.

Zeolitte oksijen, alüminyum ve silisyumdan oluşan kristal yapının en küçük yapı birimi SiO₄ ve AlO₄ dörtyüzlüsüdür. Yapıdaki her oksijen, iki dörtyüzlü tarafından paylaşılır. Bu şekilde bir zincir oluşturulur. Bu zincirler birbirlerine aralarındaki Na, Ca ve K iyonlarıyla bağlanarak ortası kanal gibi açık bir yapı oluştururlar. Bu boşluk, diğer yabancı iyonlar ve su gibi molekülleri rahatlıkla barındırabilir. Bu boşluklar aralarında birleşerek yukarıda sözü edilen kanalları oluştururlar (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1. Zeolitin İç Yapısı (Anonim,2007)

Zeolitlerin en önemli yapısal özelliği, bu boşlukların birleşmesi ile oluşan kanallardır. Şekil 1.2.'de dörtyüzlülerin birbirine bağlanmaları verilmiştir. Zeolitler kristal yapıları ve kimyasal özellikleri nedeniyle günümüzde endüstriyel hammaddeler arasında önemli bir yere sahip olmuştur (Kibaroğlu, 2007).



Şekil 1.2. Dörtyüzlülerin Birbirlerine Bağlanması

Weigel ve Steinhof tarafından 1925 yılında yapılan çalışmalarda, suyu uçurulmuş zeolitlerin kanal çaplarından daha küçük molekülleri absorblayabilecekleri fakat daha büyük çaplı molekülleri kabul etmedikleri saptanmıştır. Bu nedenle zeolitlere 1932 yılında J. W. Mc Bain tarafından zeolitlere “molekül elek” adı verilmiştir. İlk moleküler elek olarak şabazit kullanılmıştır. Son yıllarda kullanımının artması büyük miktarlarda üretim yapabilecek doğal zeolit aramalarını hızlandırmıştır. Yine Union Carbide Corporation yer bilimcileri 1958 yılında ticari olarak kullanılacak sedimanter kayalar içerisindeki ilk doğal zeolit yataklarını bulmuşlardır. X-ışınları tekniğinin görsel ve denizel volkano-sedimanter kayalara uygulanması ile Japonya, İtalya, Yeni Zelanda ve Amerika’da büyük rezervli zeolit yatakları bulunmuştur. Bugün yukarıda

sözü edilen yatakların yanı sıra Bulgaristan, Türkiye ve Kanada’da zengin ve saf zeolit yataklarının varlığı bilinmektedir (Kibaroglu, 2007).

Isıtılan zeolit yapılarında hiçbir bozunma gözlenmez. Zeolit tamamen kurutulduktan sonra boşluklarına tekrar su, amonyak, civa buharı veya başka malzeme alabilir. Boşluklara girecek malzemenin molekül boyutları ile zeolitin molekül yapısının uygun olması gerekir. Zeolitlerin diğer ayırt edici özelliklerinden biri de iyon değişimi olayını gerçekleştirebilmeleridir. Zeolitten süzülen çözelti hiçbir engelle karşılaşmadan geçerken içlerindeki iyonlar zeolit yapısındaki iyonlar ile yer değiştirebilir. Bu yer değiştirme olayına iyon değişimi denir. Endüstride iyon değişimi oldukça çok uygulama alanı bulmaktadır (Kibaroglu, 2007).

Yapay zeolitleri pahalı oluşu doğal zeolit yataklarının aranması ve bulunmasını hızlandırmıştır. Zeolitler jeolojik haritalarda “bozunmuş tuf veya camsılığını yitirmiş riyolit ” olarak tanımlanmışlardır.

Zeolitlerin önemli özelliklerinden biri de yapılarının içindeki kanallarda su moleküllerinin bulunmasıdır. Yapıda su moleküllerinin yer alabileceği birkaç boşluk vardır. Bu boşluklarda Na, Ca, K katyonları su molekülleri ile çevrilirler ve su molekülleri zayıf bağlarla hem artı yüklü katyonlara hem de silikat yapısına bağlıdırlar. Zeolitler ısıtıldıklarında; 100–350 °C’de su, yapıda değişiklik yapmadan birçok minerallerde görüldüğünün tersine belli sıcaklıklarda kesikli olarak değil de sürekli şekilde yapıdan ayrılırlar. Suyun yapıdan uzaklaşması sırasında katyonların bazıları da dışarı atılırlar. X-ışınlarının difraksiyonu ile tortul kayaları oluşturan ince kristalli minerallerin tanınması kolaylaştığı için sayısız zeolit yataklarının bulunması olanağı ortaya çıkmıştır. Volkanik camların çoğu zeolitlerin oluşmasına en uygun alümine silikatlardır. Son yıllarda Atlantik Okyanusunda yapılan derin deniz sondajlarında zengin flipsit ve klinoptilolit içeren çamurlar elde edilmiştir. Pasifik Okyanusunda yapılan bir sondajda ise; (Guam yakınlarında) deniz dibinde 340 m derinde zeolitçe zengin bir katmanın varlığı saptanmıştır. Japonya, Yeni Zelanda, Avustralya ve Sovyetler Birliği’nde bu tip yataklar yaygındır. Ancak zeolitlerin yanında yabancı mineraller de bulunduğu için pek ekonomik oldukları söylenemez.

Zeolitlerin kullanım alanları sıralanacak olursa; bunlar yapı taşı olarak portland çimentosu yapımında, hafif yapı malzemesi olarak, kâğıt endüstrisinde, iyon değişiminde (stronsiyum ve kalsiyum iyonlarının zeolitler tarafından tutulması), hayvan yem rasyonlarında, gaz emici ve katalizör olarak kullanılır.

Ülkemizde Hacettepe Üniversitesi Yer Bilimleri Enstitüsü tarafından yapılan aramalarda zengin ve geniş zeolit yataklarının varlığı ortaya konulmuştur. Ancak çeşitli alanlarda kullanılmaları için araştırmalar henüz devam etmektedir.

Suyun yapıya sıkı bağlı olduğu zeolitlerde, su kaybı yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen, büyük boşluklu bazı zeolitlerde yüzeye tutunan su, düşük sıcaklıklarda zeoliti terk eder. İyon değişiminin hızı ise, boşluk büyüklüğüne ve aralarındaki kanal bağlantısına bağlıdır. Bu nedenle bazı iyonlar yapıya giremezler (Flanigen, Mumpton, 1986). Zeolit 350-400°C’ de birkaç saat ısıtılırsa, su, gözenekleri terk ettiğinde, kanallardan geçebilecek çaptaki moleküller, susuzlaşmış kanal ve gözenek yüzeylerinde tutunur. Kanalları geçemeyecek büyüklükte çapa sahip moleküller ise zeolite giremezler. Bu olaya zeolitin “moleküler eleme özelliği ” denir (Orhun, 1997).

Yukarıda bazı özellikleri anlatılan mineral esaslı malzeme bir puzolandır. Bu araştırmada zeolit, puzolan olarak çimentoda katkı malzemesi olarak, kullanılacaktır. Puzolanlar, tek başlarına bağlayıcı olmayan fakat kireç, çimento ile karıştırıldığında su ile reaksiyona girerek bağlayıcı madde özelliği taşıyan maddelerdir. Bir puzolana portland çimentosu karıştırıldığı vakit çimentonun hidratasyonu sonunda meydana gelen Ca(OH)_2 ile SiO_2 ve Al_2O_3 arasında gerçekleşen reaksiyon sonunda puzolan yine bağlayıcılık özelliği kazanır (Oymael, 2002). Puzolanlar içerisinde silis ve alümin bulduran ve çimento ve su ile birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır. Bu araştırmada kullanılan zeolit esasen bir volkanik tüftür.

Portland çimentosunun hidratasyonu sonunda meydana gelen serbest kirecin suda çözünmesi ve bu maddenin mukavemetinin düşük olması, çimentonun en zayıf tarafıdır. Çimentoya katılan puzolan çimentoda meydana gelen serbest kireçle birleşerek o maddenin çözünmesini önler ve mukavemetini artırır. Yavaş bir şekilde fakat devamlı olarak gerçekleşen bu birleşme puzolanlı çimentoların portland çimentosuna nazaran üstün olmalarını sağlar (Anonim, 2007).

1.1. Amaç

Zeolitler, puzolanik katkı maddesi olarak çimentoya katıldıklarında, çimentoların fiziksel ve kimyasal performansları üzerinde değişiklik yaratacağına kesin gözüyle bakılmaktadır. Bu nedenle, çimentoya %0, %15 ve %30 oranlarında zeolit katılmış bir portland çimentosundaki fiziksel ve kimyasal değişikliklerin yönü ve şiddeti

ile optimum değerlerin neler olabileceği konusunda araştırma yapmaktır. Bu amaçla; hazırlanacak imento pastası ve beton harcı üzerinde bir dizi deneysel çalışmalar yapılacaktır. Optimum zeolit katkısının bulunması durumunda, imento endüstrisinde ve maliyetlerinde ekonomiklik sağlanması, çimentolarla üretilen betonlarda performans yükselmesi sağlanmış olabilecektir.

Farklı kimyasal yapıdaki çözelti ortamında bekletilen imento hamurlarının ve harçlarının fiziksel ve kimyasal değişiminin araştırılması söz konusudur. Hazırlanan numuneler üzerinde eğilmede çekme, basınç dayanımları, birim ağırlık, XRD, SEM deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak zeolitin imento hamuru ve imento harcı içerisindeki katkı uygunluğunun olup olmadığı belirlenmiştir.

1.2. Yöntem

Bu alışma, literatür taraması ve deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Deneylerde imento hamuru ve standart kumlu imento harçları hazırlanarak, farklı kimyasal yapıdaki çözelti içinde farklı zamanlarda tutularak değişimleri incelenmiştir. Söz konusu numunelerin 40x40x160 mm olması ve çözeltinin: magnezyum sülfat ($MgSO_4$) olması öngörölmüştür. Deneysel çalışmalarda numuneler % 7'lik magnezyum sülfatlı ortamda bekletilerek denenmiştir. Bu likit ortamdaki numuneler su ortamındaki kontrol numuneleri ile karşılaştırılması yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Alkali ve alkali metallerin sulu alüminyum silikatları olarak tanımlanan zeolitler doğada çeşitli bileşikler halinde bulunur. Bu bileşikler sanayi dalında, madencilikte, inşaatçılıkta, tarım ve hayvancılıkta kullanılmaktadır. Reaktörlerde radyoaktif maddelerin süzülmesinde özellikle klinoptilolitten geniş ölçüde yararlanılmaktadır. Zeolitlerle yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Zeolitlerin oluşumu ve özellikleri Mumpton tarafından incelenerek bazı açıklamalar yapılmıştır: Her ne kadar zeolitlerin kullanılması hala başlangıç döneminde ise de yılda 300.000 tondan fazla zeolitik tüf U.S.A., Japonya, İtalya, Macaristan, Yugoslavya, Bulgaristan, Almanya, Kore ve Meksika' da çıkarılmaktadır. Doğal zeolitler portland çimentosunda ve hafif agrega olarak betonda, kirli suların arıtılmasında, havadaki oksijen ve nitrojenin ayrıştırılmasında, petrol katalizörlerinin düzeltilmesinde, gazların temizlenmesinde kurutulmasında absorbent olarak kullanılır (Mumpton, 1976).

Hay R.L.1978, zeolitlerin oluşumları konusunda yaptığı çalışmada genellikle metamorfize olmamış kayalar olduğunu, deniz tabanının dörtte üç veya daha fazlasında, sedimentler olarak şimdiki okyanusların havzalarında bulunduğunu tespit etmiştir. Çalışmaların devamında şu bulgulara varılmıştır: Zeolitler klasik sedimentler olup zengin volkanik cam olarak saf çökeltilerdir. Karasal alanlarda ve deniz taban sedimentlerinin her ikisinde bulunur. Zeolitler geniş çeşit ve mükemmellikte kristal yapıda olup genellikle lav akıntısı oyuklarında bulunur. Zeolitler genelde doğal oluşumları itibarıyla sedimantal kayalar olup, analcime, chabazite, klinoptilolite, crionite, heulandite, leumontite, mordenite, phillipsite, notralite grubu mineraldir. Türleri ve miktarı, başlıca değişimi, ana kayanın yapısının bileşiminin ve ara suyunun bileşiminin, yaşının ve ısısının bir fonksiyonudur. Erken oluşan zeolitler (Örnek: Klinoptilolit ve Phillipsite) genellikle diğer zeolitlere (Analcime, Heulandite, Leumontite) göre daha önce bulunmuşlardır. Bu özellikteki malzemeye Ph 9.5 olan birçok terkedilmiş göllerde rastlanabilmektedir. Zeolitler birkaç bin yıldan beri tanınmaktadır. Zeolitik başkalaşım birkaç tip hidrojenik sistemle tamamlanmıştır.

Bunlar;

- (1) Meteorik suyun kalın çözeltilerden süzülmesi sonucu,
- (2) Kapalı sistemde orijinal gözenek suyunun tutulmasıyla,
- (3) Hidrotermal çözeltilerin belirli bir yere yerleşmesi,

(4) Tuzlu ve Alkali topraklarda havanın yüzeysel etkisiyle ısının yükselmesi, zeolitlerin doğal ve kimyasal reaksiyon oranının belirlenmesine bağlı olarak önemlidir (Hay, 1978).

Hsu, Wang ve Lin (1967) toprak Ph'ı ile zeolit uygulaması arasındaki ilişkiyi şöyle belirtmiştir: 80 Kg/ha zeolit uygulaması toprak Ph'ına veya serbest demir (Fe) miktarına etki etmemektedir. Eriyebilir silisyum (Si) ise az da olsa artmaktadır. Katyon iyonları kapasitesi ve bununla beraber su, kil kapsamının azalmasıyla çoğalmaktadır. Düşük katyon değişim kapasiteli kumlu ve killi topraklarda gübre uygulamasından gelen besin kaybı zeolit karıştırılmasıyla azalmaktadır (Hsu, Wang ve Lin, 1967).

1948'de Union Carbide Corporation'un başlattığı araştırmalar olumlu sonuçlanmış ve yapay zeolitler üretilmeye başlanmıştır. Yapay zeolitlerin uygulamaya girdiği alanlar, normal parafin hidrokarbonlarının ayrılması ve kazanılması; hidrokarbon tepkimelerinde katalizör olarak kullanılması, havadaki oksijen dışındaki bileşenlerin tutulması ve oksijence zengin hava akımlarının elde edilmesi; radyoaktif iyonların tutulması ve kazanılması, doğal gazlar içinde bulunan zararlı karbondioksit ve kükürdün tutulması olarak sıralanabilir (Saldıray, 1978).

Recumijk (1974), bilinen zeolit uygulamalarının en önemlilerini şöyle özetlemiştir: Zeolitler; düzenli kafes yapıda olup çok önemli bir iyon değiştirme özelliği vardır. Toz veya kayaç halde bulunabilirler. Silisyum, alüminyum oranına bağlı olarak kafes yapılı silisçe zengin zeolitler daha stabildir, sulu solüsyonlarda Ph 4–12 arasında değişir. Zeolitlerdeki iyon değişim mekanizması diğer materyallerden farklıdır. Zeolitler radyoaktif iyonların tekrar elde edilmelerinde de kullanılmaktadırlar. Adsorbsiyon; dehidrat zeolitler pekiyi iyon tutucu özelliكتedir. Değişik moleküler boyuttaki bileşiklerin karışımını ayırmada özel por boyutları rol oynar. SO₂ gazının kirletilmiş havadan uzaklaştırılmasında mordenit gibi zeolitler yararlı bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca zeolitler sigara filtrelerinde cıva buharının uzaklaştırılmasında kullanılmıştır. Zeolitler geniş olarak katılar ve sıvılar ve doğal gazlar için de kurutucu olarak kullanılır. Zeolit ve adsorbe edilmiş ürünün yeniden elde edilmesi ısıtma veya diğer bir adsorbe edici ile yer değiştirilmesiyle başarılı bir sonuç elde edilebilmektedir. Katalizör olarak zeolitlerden çeşitli katalitik reaksiyonlarda aktif olarak yararlanılmaktadır. Kaolinit gibi zeolitler de kâğıtların beyazlaştırılmasında ve yumuşak dolgu maddesi olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca inşaat materyallerinde de başarı ile kullanılır. Yalnız su dengesi etki ettiğinden bu tip inşaat materyallerinde kafes yapılı zeolitlerin kullanılmamasına dikkat edilmelidir.

Smolka ve Schunger (1976), zeolitlerin deterjanlarla kullanılmasını açıklamaktadır. Doğal zeolitlerin deterjanlarla kullanılmasının mümkün olmasını şu faktörlere bağlamaktadır: (1) Dane iriliği dağılımı (2) İyon değiştirme kapasitesi (3) Saflık. Birçok doğal zeolitler oluşumları esnasında önemli miktarlarda iki değerli iyonlar ihtiva ederler. Bunlar kalsiyum ve baryum iyonu olup kullanılmadan önce Na formuna dönüşmeleri gereklidir. Zeolitin bir çeşidi olan modernite tüflerinden yapılan hafif tuğla ayrıca yüksek bacaların astarlanmasında kullanılmıştır. Şehir kanalizasyonlarından amonyağın uzaklaştırılmasında doğal zeolitlerden olan klinoptilolit den önemli ölçüde yararlanılmaktadır.

Zeolitik mineral katkılı yüksek dayanımlı ve akışkan betonlarda, % 10 oranında çimento yerine zeolit katılıp ve karışımın %31–35 arasında süper akışkanlaştırıcı katılırsa beton dayanımı 80 MPa ve çökmesi 18 cm olmaktadır. Bu dayanım, normal portland çimentolarının basınç mukavemetinin %10'dan % 15'e kadar çıkartmaktadır. Aynı zamanda kanama, ayrışma da olmamaktadır (Feng, 1990).

Otoklav hava sürüklenmiş betonlarda zeolitin etkisi incelenmiştir. Söz konusu çalışmada, hava sürüklenmiş betonlarda (AAC) zeolitin etkisi araştırılmıştır. AAC betonlarda quartzit yerine zeolit kullanılmıştır. Zeolitli hava sürüklenmiş beton (ZAAC) numunelerinin yoğunluğu 270–500 kg/m³ olarak hazırlanmıştır. Numuneler, XRD, X-ray floresan ve termal analizlere maruz bırakılmıştır. Yoğunluk, basınç testi ve termal iletkenlik gibi parametreler araştırılmıştır. Bu sonuçlara göre, AAC betonlara tobermorit, quartz ve anhidrit karıştırılmıştır. Fakat ZZAC beton numuneleri tobermorit ve quartz yanında klinoptilolit (zeolit) ve reakte olmayan anhidrit (alçı) katılmamıştır. ZAAC betonun 700–1000 C° de ısıtıldığında davranışlarında wollastonit, gehlenit ve ortoclase'in yeni faz formları XRD'de elde edilmiştir. AAC betonlarda quartz yerine zeolit kullanıldığında otoklav ürünlerin termal iletkenliğinde gözle görülür bir düşüş olmuş, basınç dayanımında ise 1.22–3.34 N/mm² oranında iyileşme gözlenmiştir (Albayrak, 2006).

Üretimlerinde puzolanlı çimento kullanılan mikrobetonlarda sülfatlara dayanıklılık ile ilgili yapılan bir çalışmada (Oymael, Şen, Durmuş, 2007), PKÇ 32,5/B-M (CEM II/B-M) çimentosu ve standard kumla 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler üzerinden sülfatlara dayanıklılık konusu araştırılmıştır. %0, %5, ve % 10'luk konsantrasyonlardaki MgSO₄ ve Na₂SO₄ çözeltilerinde 28 gün saklanan numunelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın orijinalliği mikrobeton numunelerinin ilk gün sonrası sülfatlara konmuş olmasıdır. Söz konusu çalışmada MgSO₄

çözeltisindeki numunelerin Na_2SO_4 içindikilerden daha fazla yıpranmış olduğu, bu yıpranmanın basınç dayanımlarına yansımış olduğu görülmektedir (Oymael, Şen, Durmuş, 2007).

Beton karışım suyundaki sülfat tuzlarının çimento harcı özelliklerine etkisi konulu bir çalışmada (Kılınç ve Uyan, 2003), karışım suyu olarak kullanılan MgSO_4 ve Na_2SO_4 çözeltilerinin çimento harcı özelliklerinden eğilme ve basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, MgSO_4 'ın hem eğilme hem de basınç mukavemeti için zararlı etkisi ortaya çıkmış ve Na_2SO_4 'ün MgSO_4 'e oranla daha zararlı olduğu sonucuna varılmıştır (Kılınç, Uyan, 2003).

Atahan, Pekmezci ve diğerleri çalışmalarında, sülfatlı ortamların üretilen betonların dayanıklılığı üzerindeki etkilerini inceleyerek, dayanıklılık yönünden çimento dozajı ve S/Ç oranının önemli olduğu konusuna varmışlardır (Atahan, Pekmezci ve Diğ., 2000).

Sodyum sülfat çözeltisinin buğday sapı külü katkılı çimentolarla üretilen beton numuneler üzerindeki etkilerinin incelendiği bir başka çalışmada, söz konusu külün betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını artırdığı sonucuna varılmıştır (Aköz, Biricik, 2000).

Sülfat etkisindeki beton numunelerin 360 gün süreyle %5'lik Na_2SO_4 çözeltisinde saklayarak sülfatın ürettikleri beton dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkilerini ortaya koymuşlardır (Lee, Moon ve Diğ., 2005).

Mitla (Mayan Centre), Monte Alban'da (Güney Meksika) son yıllarda yapılan çalışmalarda, birçok binada kullanılan tüflerin % 85–90 oranında mordenit ve klinoptilolitten oluştuğu bulunmuştur. Etna, Tecoaflan ve Tejuapanda'da lokal kullanımlar için hala işletilmektedirler. Kullanıma bir diğer örnekte Japonya için verilebilir. Yeşil tüf bölgesi olarak adlandırılan yataklara ait (Otsonomiya City) % 80–85 klinoptilolit ve az miktarlarda montmorillonit, selodorit ve camdan oluşan malzemeler yüzlerce yıldır benzer amaçlar için kullanılmışlardır. Orta İtalya Napoliten tüfleri, Batı Almanya Leacher Sea bölgesi tüfleri, Orta Avrupa'da birçok ünlü katedral ve binaların yapımında kullanılmışlardır (Kibaroglu, 2007).

Puzolanik Çimento ve Beton Uygulamaları: Eski Bizanslıların Napoliten yeşil tüfleri yol, su kanalları ve kentsel binaların yapımında kullanmaları puzolanik materyalin ilk ve yoğun kullanıldığı en eski dönemlerdir. İtalya'nın diğer bölgeleri ve Almanya'daki Eyfel bölgesindeki benzer özelliklerdeki altere tüf ve volkanik küller, bu dönemde Romalılar tarafından bütün Avrupa'nın çimento üretiminde kullanılmak

amacıyla işletilmişlerdir. Puzolan çimento ve beton endüstrisinde; zeolitik tuf yatakları birçok ülkede puzolanik hammadde olarak kullanılmaktadır. Zeolitik puzolanlar, son beton ürünün daima olarak yeraltı su korozyonuna maruz kalacağı hidrolik çimentolarda önemli uygulamalar bulmaktadır. Zeolitlerin su altyapılarda kullanılacak puzolan çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle betonun katılma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmelerindedir (Kıbaroğlu, 2007).

Zeolit puzolan olarak en önemli uygulama alanı, sürekli yeraltı suyu korozyonuna maruz yerlerde hidrolik çimento olarak kullanılmalıdır. Zeolit katkı stabiliteyi sağlamaktadır. Zeolit materyalin kullanıldığı en çarpıcı örnek 1912 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde 386 km uzunluğundaki su kanalı imalidir. Yapım için gerekli olan Portland çimento miktarının yaklaşık % 25'inin zeolit katkı çimento ile sağlanması yaklaşık 1.000.000 \$'lık bir kazanç sağlamıştır (Kıbaroğlu, 2007).

Yugoslavya, Bulgaristan, Rodos ana bileşeni klinoptilolit ve analsimden oluşan zeolit materyalin, çimento katkı maddesi olarak geniş kullanım alanı bulunduğu diğer bölgelerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal (Deneylerde kullanılan malzemeler)

Çimento: Araştırmada Mersin ÇİMSA çimento fabrikasının PÇ 42.5 (CEM I 42.5 R) çimentosu kullanılmıştır. Söz konusu çimentoya ilişkin kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. PÇ 42.5 R Kimyasal analiz sonuçları

NUMUNE	Portland Çimento 42.5		STANDARD:		
	(TİPİK ANALİZ)		TS EN 197-1 CEM I 42,5R		
RAPOR TARİHİ	03.11.2004				
KİMYASAL ÖZELLİKLER	Sonuçlar	Test Metodu	TS EN 197-1 CEM I 42.5R Standart Değerleri		
			En Az	En Çok	
Kızdırma Kaybı	%	2.9	TSEN 196-2	--	5.00
Çözünmeyen Kalıntı	%	0.5		--	5.00
Kükürtrioksit(SO ₃)	%	3.6	XRD	--	4.00
Klorür (Cl)	%	0.006	TS EN 196-2	--	0.10
FİZİKSEL ÖZELLİKLER					
Priz Başlangıcı	Dakika	150.0	TS EN 196-3	60,0	--
Hacim Genleşmesi	mm	0.5		--	10,0
2 Günlük Basınç Dayanımı	N/mm ²	26.0	TS EN 196-1	20,0	--
28 Günlük Basınç Dayanımı	N/mm ²	47.0		42,5	62.5

Zeolit: Zeolit, Manisa-Gördes yöresinden temin edilmiş olup klinoptilolit türündendir. OYSA Çimento Fabrikası laboratuvarlarında yapılan incelemede Blaine inceliği 8500 cm²/g olarak tespit edilmiştir. Zeolitin kimyasal yapısı Çizelge 3.2.'de, elek analizi sonuçları ise 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Zeolitin kimyasal yapısı

	1. test % ağırlıkça (Oysa,2006)	2. test% ağırlıkça (Oysa,2006)	Ort % ağırlıkça (Oysa,2006)	Literatür ICP % (Rota,2005)	Literatür ICP % (Enli,2007)
CaO	2.52	6.38	4.45	3.4	2.18
SiO ₂	65.8	65.43	65.615	71	67.11
Al ₂ O ₃	11	11.04	11.02	11.8	11.84
Fe ₂ O ₃	2.6	1.92	2.26	1.7	1.47
MgO	0.79	0.5	0.645	1.4	1.15
SO ₃	1.41	0.35	0.88	---	---
K ₂ O	0	3.05	1.525	2.4	3.44
Na ₂ O	---	---	---	0.4	0.38
TiO ₂	---	---	---	0.1	0.07
Kireç Modülü	$2.8 \times 65.6 + 1.18 \times 11.02 + 0.65 \times 2.26 = 198.16$				
Alumin Modülü	$2.26 = 2.26$				
Silis Modülü	$2.26 + 11.02 = 24.9$				

* OYSA Rapor,16.05.2006

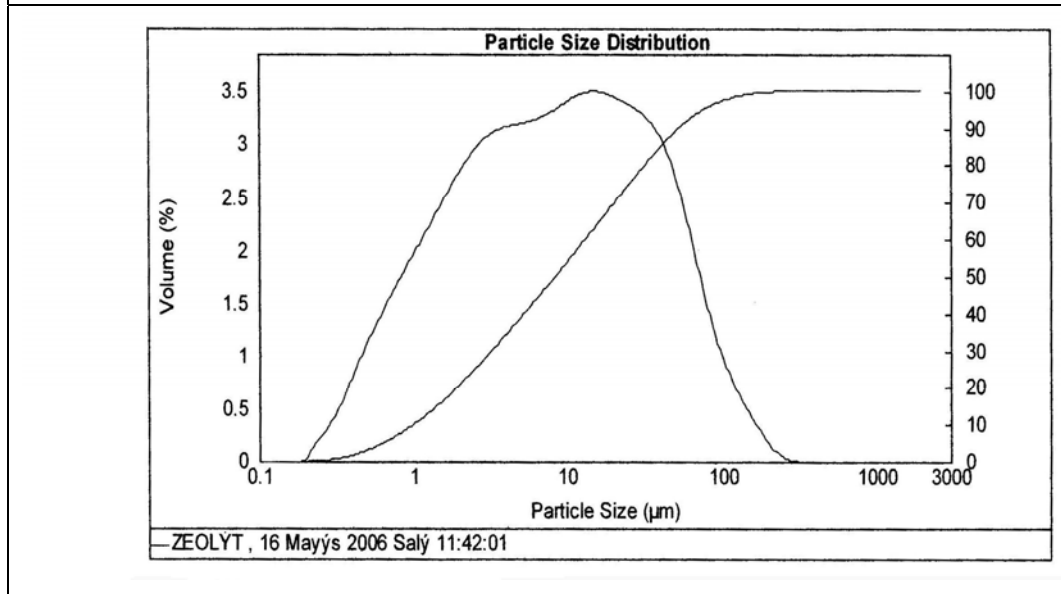
* Rota, Report, 2005 (This report is prepared in 01.07.2005 by General Directorate of Mineral Research on Exploration).

* Enli Mining, 2007, <http://www.enlimining.com.tr/tr/clinoptilolite.asp>

Çizelge 3.3. Zeolitin elek analizi sonuçları

Numune Adı: ZEOLİT	SOP Adı katkı 290	Tarih: 16 Mayıs 2006 Salı
Numune Yoğunluğu:2.9		
Homojenlik: 1.99	Spesifik alan: 0.755	Aralık: 6.222
Ağırlık: 0.311 kg/dm ³	Ort. Ağırlık: 2.741	
3.00 µm altında kalan %: 28.59	D(1,0):0.36 µm	D(0.10): 0.99 µm
3.00 ve 32.00 µm arasında kalan % :51.54	D(2,0):0.50 µm	D(0.25):2.50 µm
16.00 ve 24.00 µm arasında kalan % :9.16	D(3,0): 0.88 µm	D(0.50):8.34 µm
30.00 üstünde kalan %: 21.25	D(2,1):0.69 µm	D(0.75): 25.27 µm
45.00 üstünde kalan %: 12.90	D(3,1): 1.37 µm	D(0.90): 52.85 µm
90.00 üstünde kalan %: 3.41		
200.00 üstünde kalan %: 0.15		

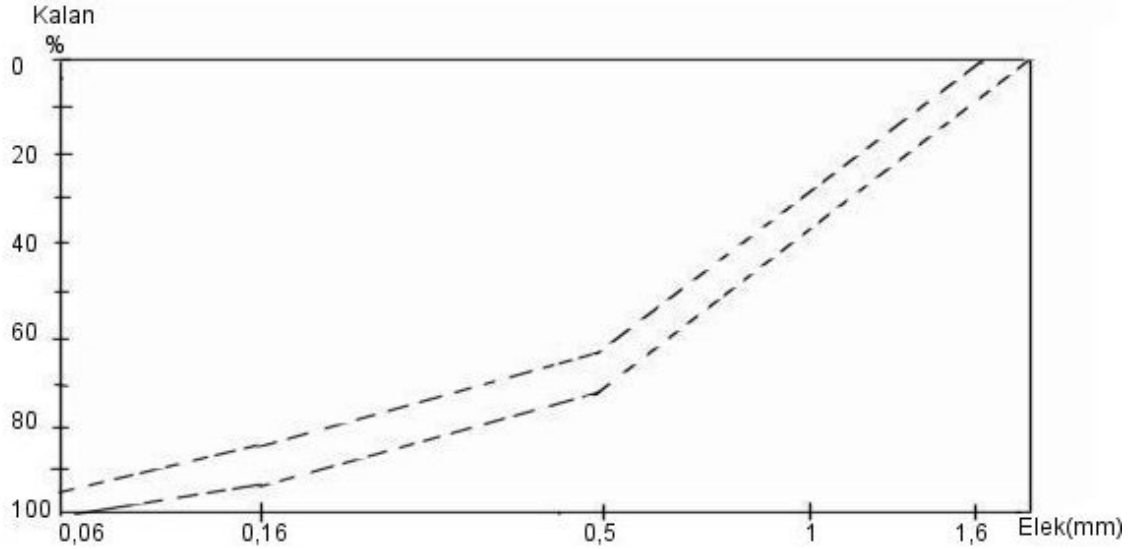
Zeolit Partikül Tane Dağılımı



* OYSA, Rapor, 16.05.2006 Zeolitin elek analizi raporu.

Standard kum: Araştırmada yer alan harç karışımlarının tümünde içinde % 90 SiO₂ bulunan TS819'a uygun olan Pınarhisar Çimento Fabrikası standart kumu kullanılmıştır. Standard kumun tane büyüklüğü sınırları şekil 3.1.'de verilmiştir (TS 819, 1981). Kumun granülometri eğrisinin ordinatlarının yüksek olması veya bu eğrinin p=1.00 doğrusuna yaklaşmasının iki önemli sakıncası vardır. Birisi su miktarının büyük değerler alması, diğeri kompasitenin düşük olması. Bu sebeplerden dolayı kumların granülometri eğrilerinin üst taraftan sınırlandırılması lazımdır. Granülometri eğrisinin

ordinatlarının düşük olması da kompasitenin düşük değerler alması bakımından zararlıdır. Bu sebeplerden dolayı beton üretiminde kullanılacak olan bir kumun granülometri eğrisi iki eğri tarafından sınırlandırılan bir bölge içinde yer almalıdır.



Şekil 3.1. Standard kumun granülometrik eğrisi

Süperplastikleştirici (SP): Araştırmada hem harç numunelerinde hem de hamur numunelerinde Aydos Kimya-Makine San. ve Tic. Ltd. Şti'ne ait süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcıya ait fiziksel ve kimyasal analiz raporu çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Süperplastikleştirici analiz raporu

ÜRÜN:AYDOS SÜPERFLOW T 40			
Özellik	Test Metodu	Test Sonucu	Kabul Kriteri
Üretim tarihi	21.09.2005		
Homojenlik	Göz ile	Ayrışma gözlenmemiştir	Ayrışma olmamalıdır
Renk	Göz ile	Koyu kahverengi sıvı	Koyu kahverengi sıvı
Bağıl yoğunluk (g/ml) 20 C°	ISO 758	1.16	1.16±1
pH 20 C°	ISO 4316	7.0	7±1
Katı madde (%)	EN 480-8	34.2	33.0 – 35.0
Toplam klorür (%)	ISO 1158	< %0.10	< %0.10 (ağırlıkça)
Suda çözünen klorür (%)	EN 480-10	< %0.10	< %0.10 (ağırlıkça)
Alkali miktarı (Na ₂ O) (%)	EN 480-12	<5.0	max. 5.0 (ağırlıkça)

Aydos, Rapor, aydos kimya kalite kontrol analiz raporu, 2005.

3.1.1. Zeolitler

3.1.1.1. Zeolitlerin Tanımı ve Önemi

İlk zeolit minerali 1756 yılında İsveç’li mineralog Baron Cronstedt tarafından bulunmuştur. Bu kristaller, ısıtıldıklarında yapılarında bulunan suyun köpürmesinden dolayı Yunanca “kaynayan taş” anlamına gelen zeolit adını almıştır.

Zeolitlere, iki yüzyıl boyunca yalnız volkanik kayaların kovuklarında yer alan aksesuar mineral olarak bakılmış ve kristal analizi yapılmamıştır. Kristal yapıları X-ışınları kırınımı, İnfrared (IR) adsorbsiyonu, Nuclear magnetic rezonance (NMR), Elektro Spin Rezonans (ESR) gibi analiz yöntemlerinin gelişmesi sonucu yapılmıştır. Zeolitler üzerinde yapılan ilk deneysel çalışmalar, A. Domour tarafından 1857 yılında zeolitlerin su atma tersinirliği ile 1858’de E. Erchorn’un gerçekleştirdiği iyon değiştirme özelliklerinin incelenmesidir. G. Friedel 1896 yılında dehidrate zeolitler üzerinde gazların, alkolün ve bazı maddelerin adsorblandığını göstermiştir. 1940–1945 yıllarında şabazit ve mordenite üzerinde yapılan çalışmalarla zeolitlerin seçimli adsorbsiyonu ve gaz ayırımları için olağanüstü potansiyelleri ile endüstriyel kullanım alanları belirlenmiştir. Endüstriyel kullanımı geniş olan bu mineralin sentezi 1948 yılında Union Carbide Corporation tarafından başlatılmış aynı anda doğada da doğal zeolit aramalarını hızlandırmıştır. Union Carbide Corporation jeologları tarafından 1958 yılında ticari olarak kullanılabilir tortul kayalar içinde ilk doğal zeolit bulunmuştur (İleri, 1978).

Zeolitler 1932 yılında Mc Bain tarafından, molekülleri büyüklüklerine göre ayırma özelliklerinden dolayı “molekül elek” adı verilmiştir. Volkanlardan çıkan külün milyonlarca yıl önce alkalın/tuz göllerinde depolandığı zaman oluşmuş doğal bir madendir. Zaman içinde, volkanik külün göldeki tuzlarla etkileşimi, külü değişikliğe uğratarak zeolit madeninin oluşmasına neden olmuştur.

Zeolitlerin endüstriyel uygulamadaki potansiyelleri 1940’lı yıllarda ortaya konulmasına rağmen, doğal zeolitlerin o dönemlerde yalnızca volkanik kayalar içindeki oluşumlarının bilinmesi ve gerek birkaç mineralin bir arada bulunması nedeniyle tek mineral olarak ayrılımlarındaki zorluk, gerekse de teknolojik özellikleri hakkındaki bilgi eksikliği araştırmaların sentetik zeolitler üzerinde yoğunlaşmasına neden olmuştur. 1950’li yıllara kadar yapı sanayindeki kullanımları ile sınırlı kalan

doğal zeolitlerin endüstriyel uygulamaları, sedimanter yataklar içerisindeki büyük miktarlardaki zeolit kaynaklarının bulunmasından sonra, araştırmacıların artan ilgileri ile spesifik özelliklerinin belirlenmesinin ardından artan bir gelişim göstermiştir. Doğal zeolitler NH_4^+ e, ağır metal iyonlarına (Cu^{++} , Pb^{++} , Cd^{++} , Hg^{++} vb.), radyoaktif iyonlara (Sr^{++} , Cs^+) karşı gösterdikleri özel seçicilik, asit ortamlardaki yüksek stabilite, moleküler elek özellikleri ve birim maliyetlerindeki ucuzluk (1'e 4 oranında) gibi nedenlerle sentetik zeolitlerin kullanımlarının uygun olmadığı proseslerde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Son yıllarda araştırmacıların belirli özellikler için uygun pazar arayışlarına yönelmeleri sonucu klasik uygulama alanlarının dışındaki kullanılabilirlikleri ve özel prosesler için fiziksel ve kimyasal modifikasyonları ile arttırılmış özellikleri doğal zeolitlere olan talebi arttırmıştır. Doğal zeolitlerin kullanım alanları aşağıda verildiği gibi özetlenebilir (Kibaroğlu, 2007).

Bulk Uygulamaları:

- Kâğıt dolgu maddesi
- Puzolanik çimento ve agrega
- Yapı taşı
- Hafif ağırlıklı agregat gübre ve toprak düzenleyici
- Hayvan yemi katkı maddesi
- Antibiyotik malzeme ve diş macunu katkı maddesi
- Seramik malzeme katkı maddesi

Adsorpsiyon / iyon Değişimi Uygulamaları:

- Havadan oksijen ve nitrojen ayırımı
- Oksijen üretimi
- Kömürün gazlaştırılması
- Baca gazı temizlenmesi (NO_x , SO_2 CO_2)
- Kurutma ve saflaştırma işlemlerinde (asite dayanıklı adsorbent olarak)
- Doğal gaz saflaştırılması
- Petrol ürünleri üretimi
- Pis koku giderimi
- Nem içeriği kontrolü, nem çekici madde
- Güneş enerjisi toplama
- Doğal gaz taşıyıcı malzeme

- Petrol sızıntılarının temizlenmesi
- İyon değişimi uygulamaları
- Radyoaktif atık ayırma
- Atık ve kullanma sularının temizlenmesi
- Su kültürü
- Maden yataklarının aranması
- Metalürji

3.1.1.2. Zeolit Rezervleri Ve Jeolojik zellikleri

Tanınmalarından 2000 yıl önce İtalya'da yapı taşı olarak kullanılan zeolitler, 1750 yılından beri bilinmelerine rağmen yurdumuzda ilk doğal zeolit oluşumları 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarındaki analsim oluşumlarında bulunmuştur. Bunu Ankara'nın batısında bulunan analsim ve klinoptilolit yatakları izlemiştir. Ülkemizde genel olarak gözlenen zeolit türü daha çok klinoptilolit ve analsim olup, diğer doğal zeolit türlerine çok az rastlanmıştır (Anonim, 2007). Türkiye'de tespit edilmiş, endüstriyel değeri olan zeolit yatakları ve türleri izelge 3.5. ve Şekil 3.2.'de verilmiştir.

Türkiye'deki yatakların büyüklüğü, kalitesi, işletilebilirliği ve kullanım alanları üzerindeki bilgilerin azlığı, zeolit kaynaklarının değerlendirilmesine engel teşkil etmektedir. Dünyada doğal zeolitlerin kullanımı ve üretimi hızla gelişmekte ise de ülkemizde bu ana kadar zeolit üretimi yapılmamıştır. Pilot çapta ürün kullanımı belirleme çalışmaları için küçük üretimler yapılmıştır.

Ancak, Etibank Bigadiç K Colemanit işletmesinde, alttaki boratlı birimler üzerinde örtü tabakası olarak bulunan zeolitli üst tüfler, üretimi yapan firma tarafından deкупaj yapılırken alınmaktadır. Klinoptilolit içeren bu tüflerin yağ ağartmada ve filtre edilmesinde kullanılabileceği, ayrıca imento sanayinde tras ikamesi olarak kullanıldığında B₂O₃ içeriği nedeniyle ısı tasarrufu sağlayabileceği ortaya konulmuştur (Dpt, 1996).

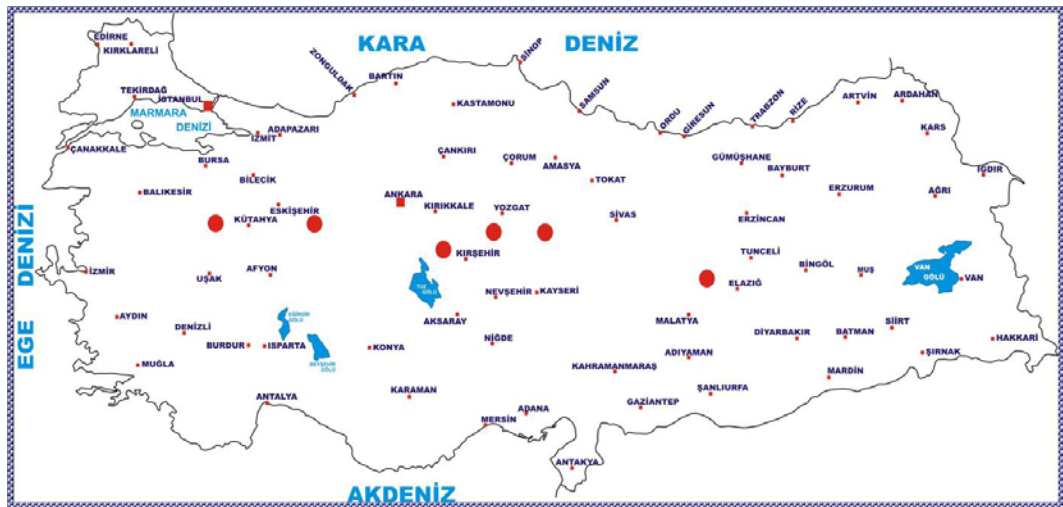
Bu tespit edilmiş yatlardan yalnızca Balıkesir-Bigadiç yöresindeki sahada yapılan çalışmalar sonunda, kolaylıkla işletilebilir nitelikte ve yaklaşık 500 milyon tonluk bir potansiyelin olduğu saptanmıştır. Diğer yörelerde sistemli bir rezerv belirleme çalışmaları yapılmamıştır. Fakat büyük yatlara sahip oldukları bazı

araştırmacılarca ifade edilmektedir. Bugüne kadar yapılan son derece kısıtlı gözlemlere göre toplam rezervin 50 milyar ton civarında olabileceği belirtilmektedir (Kıbaroğlu, 2007; Büyükakyol, 1988).

Türkiye’de detaylı etüdü yapılan tek zeolit rezervi Manisa-Gördes sahasıdır. Bu sahada 18 milyon ton görünür ve 20 milyon ton zeolitik tüf rezervi tespit edilmiştir. Yine Bigadiç-Balıkesir yöresinde ise Türkiye’nin en önemli zeolit yatakları tespit edilmiş olup kolayca işletebilecek 500 milyar ton rezerv tahmin edilmektedir. Türkiye genelindeki doğal zeolit rezervinin 50 milyar ton civarında olduğu bildirilmiştir Türkiye’de tespit edilmiş, endüstriyel önemi olan zeolit yatakları ve türleri Çizelge 3.5 ve Şekil 3.2’de verilmiştir (Dpt,1996).

Çizelge 3.5. Türkiye’de tespit edilmiş, endüstriyel önemi olan zeolit yatakları ve türleri

YER	ZEOLİT TÜRÜ
Balıkesir-Bigadiç	Klinoptilolit
Emet-Yukarı Yoncağağaç	Klinoptilolit
Kütahya-Şaphane	Klinoptilolit
Gediz-Hisarçık	Klinoptilolit
Manisa-Gördes	Klinoptilolit
İzmir-Urla	Klinoptilolit
Kapadokya Bölgesi (Kayseri-Tuzköy)	Klinoptilolit, Şabazit, ve Eriyonit
Bahçecik, Gölpaazarı, Göynük	Analsim
Polatlı, Mülk, Oğlakçı, Ayaş	Analsim
Nallıhan, Çayırhan, Beypazarı, Mihaliççık	Analsim
Kalecik, Çandır, Şabanözü, Hasayaz	Analsim



Şekil 3.2. Türkiye’deki zeolit yatakları

Zeolitlerin bileşimleri genel olarak hidrate alüminyum silikat olup bir miktar potasyum, sodyum, kalsiyum ve bazen baryum ve stronsiyum v.s. bulunur. Billurları camsı, beyaz ve saydam, enklüsyonların tesiriyle bazen renkli; sertlikleri 4–6, yoğunlukları 2–2.5 g/cm³ tür. Asitlerde silisli bir tortu bırakarak erirler ve üfleçte kabarak kaynarlar. Zeolitler feldispat ve feldispatoitlerin ayrışmasından ve hidrate olmasından meydana geldiklerinden bunlara hidrate feldispatlar demek de doğru olabilir. Feldispatlar ve feldispatoitlerin buldukları her yerde taş veya toprak aralarında zeolitlerin billursal oluşumlarına rastlanır. Fakat bunlar bazalt, fonolit v.s. gibi bazik taşların bünyelerindeki boşlukları veya ufak çatlakları doldururlar ve bu taşların koyu renkli yüzleri üzerinde beyaz veya açık renkli yuvarlak ve bademsi şekiller meydana getirirler. Bu şekillerinden dolayı zeolitlere Bademsi silikatlar da denilmektedir. Oluşumlarında önemli rol oynayan sıcak ve madensel sulardır. Zeolitler 100°C ısıda bileşimlerindeki suyun önemli bir miktarını kaybettikleri gibi nemli havadan da %4–14 oranında su çekerler. Suyu kaybettikleri zaman saydamlıkları kalmaz. Fakat birçoğu su alınca tekrar eskisi gibi saydam olurlar. Bu durum su kaybaldığı zaman billurun bünyesinin değişmediğini gösterir. Yani su tekrar billurun ağsal yapısı arasından adeta bir süngerin ince deliklerine girer gibi geçer.

Deshidratasyon olayıyla donuklaşan zeolitler zeytinyağına batırılarak eski saydamlıkları verilir ve bu suretle optik özellikleri incelenir. Zeolitli topraklar ziraat bakımından da pek uygundur. Bunlar bileşimlerindeki maddelerle ve bilhassa potasyum ve kireçle toprağın kuvvetini arttırırlar. Her ne kadar zeolitlerin birçok özellikleri aynı ise de gerek kimyasal bileşimleri ve gerek kristalimsi özellikleri bakımından aralarında önemli farklar vardır. Zeolitlerin cins ve türleri yirmiyi geçer. Bunlardan önemli olanlar şunlardır: Mezotip, analsim, şabazit, kristiyanit, apofillit, stilbit, klinoptilolit, höylandit, prehnit, harmotom, tomsanit, glokoni (Sayar, 1960).

Doğal zeolitlerin oluşum ortamları incelenecek olursa; 1950 yılından önce zeolit oluşumlarının çoğunun volkanik kayaçların, özellikle bazaltların boşluklarında ikincil olarak oluştuğu biliniyordu. Son yıllarda ise zeolitlerin, düşük dereceli metamorfik ve sedimanter kayaçların önemli mineralleri oldukları anlaşıldı. Sedimanter kayaçlar içerisindeki zeolitler çok ince kristalli olduklarından, sedimanter kayacı oluşturan diğer minerallerden ayırt edilemezler ve kaya görünümünde önemli bir değişiklik oluşturmazlar. Bu nedenle zeolitçe zengin kayaçlar görünümleri ile tanınmazlar. Son yıllarda x-ışınları difraksiyonu ile sedimanter kayaçları oluşturan ince kristalli mineraller tanınmayı kolaylaştığı için birçok zeolit yatağının bulunması mümkün

olmuştur. Zeolitler değişik koşullarda sedimanter kayaçları oluşturabilirler. Sedimanter zeolit kayaçlarını oluşturan zeolit minerallerinden önemli olanlar; analsim, şabazit, klinoptilolit, erionit, höylandit, mordenit, filipsittir. Sedimanter kayaçlardaki zeolitlerin çoğu, sedimanların gömülmesinden sonra alüminosilikatların gözenek suyu ile tepkimesi sonucu oluşur. Volkanik camların çoğu zeolitlerin oluşmasına en uygun alüminosilikatlerdir. Bunun dışında kil mineralleri, feldispatlar, feldispatoidler ve Al-Si jelleri uygun koşullarda zeolitlere dönüşürler (Kıbaroğlu, 2007). Bir diğer ifadeyle; herhangi bir zeolit kristalinin en küçük yapı birimi SiO_4 veya AlO_4 (silisyum tetra oksit, alüminyum tetra oksit) tir. Si ve Al tetraederlerinin oluşturduğu birincil yapı ünitelerinin birleşmesi ile tek ve çift halkalı ikincil yapı üniteleri ve yüksek simetrikli parametreler meydana gelir. Bu polieder ve ikincil yapı ünitelerinin üç boyutta dizilmesi ile de mikro gözeneklere sahip zeolit iskeleti ortaya çıkar (Dpt, 1996).

Doğal zeolit yataklarının oluşumu, oluşum ortamlarına F. A. Mumpton'a göre altı grupta toplanmıştır (Kıbaroğlu, 2007).

1. Kapalı tuzlu su göllerinde biriken volkanik malzemenin göl suyu ile kimyasal tepkimesi sonucu oluşan zeolit yatakları (Klinoptilolit ve mordenit bu tip yataklarda bulunur. Bu tür yatakların kalınlıkları birkaç santimetreden birkaç metreye kadar değişebilir).
2. Açık tatlı veya tuzlu göllerde biriken volkanik malzemenin deniz suyu ile kimyasal tepkimesi sonucu oluşan zeolit yatakları (Klinoptilolit ve mordenit bu tip yataklarda bulunur. Bu tür yatakların bir özelliği de şabazit ve eripnitin bulunmayışıdır. Zeolit içeren sedimanların kalınlıkları birkaç santimetreden birkaç yüz metreye kadar değişebilir).
3. Kıyı ve derin denizel ortamlarda biriken volkanik malzemenin deniz suyu ile kimyasal tepkimesi sonucu oluşan zeolit yatakları (Bu yatakların en önemli mineralleri klinoptilolit, mordenit ve az miktarda montmorillonittir. Bu tür yataklar çoğunlukla homojen bir yapıya sahip olup %95'e kadar tek bir zeolit mineralinden oluşabilir).
4. Düşük ısı gömülme metamorfizması ile volkanik malzemenin veya kalın sedimanter dizilim içindeki diğer Al-Si'li malzemenin oluşan zeolit yataklarıdır. Bu tip yatakların yüzeye yakın kısımlarında analsim, höylandit ve klinoptilolit, daha derinlerde ise lamontit kristallerine rastlanır. Ancak, zeolitler çok miktarda yabancı mineraller de içerdiğinden ekonomik değildir.

5. Hidrotermal suların veya sıcak kaynak sularının etkisi ile Al-Si'li malzemenin bozunması sonucu oluşan zeolit yataklarıdır. Şabazit ve filipsit özgün minerallerdir. Bunların yanında bazı zeolit mineralleri de bulunabilir. Ancak sürekli olmadıkları için ekonomik değildir.
6. Gölsel ve denizel ortamlarda oluşmuş fakat köken kayacın volkanik malzemeden olduğu belirleyici kanıtları izlemeyen zeolit yataklarıdır. Bu zeolit oluşumları çoğunlukla ikinci zaman sedimentleri içinde görülmektedir. En çok analsim ve klinoptilolitçe zengindirler.

3.1.1.3 Türkiye'deki Doğal Zeolitler

3.1.1.3.1. Önemli Zeolit Türleri

Günümüzde yapılan çalışmalar sonucu yaklaşık kırk çeşit doğal zeolit bulunmuştur. Doğal zeolitlerin büyük bir bölümünü oluşturan mineraller analsim, şabazit, klinoptilolit, erionit, feriyonit, höylandit, mordenit ve filipsittir.

3.1.1.3.1.1. Analsim

$\text{Na (AlSi}_2\text{O}_6) \text{H}_2\text{O}$ kimyasal formülüne sahip olan analsim, çoğunlukla kristal biçimdedir. Kristal sistemi kübiktir. Sertliği 5.5, özgül ağırlığı 2.3 g/cm^3 tür. Cam parlaklığında, saydam, renksiz, beyaz-kırmızımsıdır.



Şekil 3.3. Analsim

Üfleçte kolayca erir. Hidrotermal oluşumlu olup bazalt gibi mağmatik taşların oyuk ve kabarcıklarında bulunur. Derişik HCl asitle muamele edildiğinde jelâtinleşir. Analsim alevi sarıya boyar ve eridiği zaman renksiz cam biçimini alır. Kapalı bir tüp içerisinde bırakıldığı zaman ortama su verir. Kalsiyumca zengin analsim türü dehidrate olduğunda ortam sıcaklığında metan ve etan gibi molekülleri hapseder (Kıbaroğlu, 2007).

3.1.1.3.1.2. Şabazit

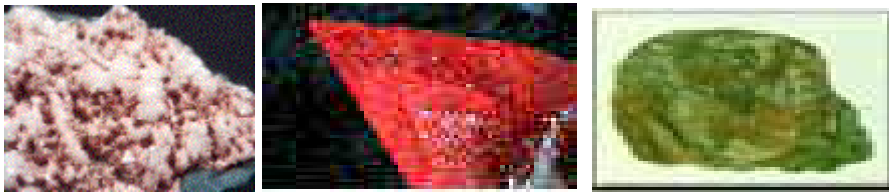
(Ca, Na)₂ (Al₂ Si₄O₁₂) 6 H₂O kimyasal formülüne sahip olan şabazit hegzagonal ve kristalleri küpe benzer şekillerde bulunur. Sertliği 4.5, özgül ağırlığı 2.1 g/cm³ civarındadır. Cam parlaklığında, saydam, yarısaydam, renksiz, beyaz ve kırmızımsı olur (Şekil 3.4.). HCl asitle çözünür ve silis ayrılır. Bazaltların oyuk ve yarıklarında bulunur. Kapalı tüpte bırakıldığında su verir.



Şekil 3.4. Şabazit

3.1.1.3.1.3. Höylandit

Ca (Al₂Si₇O₁₈) 6H₂O kimyasal formülüne sahip olan höylandit monoklinik, kristalleri ince veya kalın levha şeklindedir. Sertliği 4, Özgül ağırlığı 2.2 g/cm³ civarındadır. Cam ve sedef parlaklığındadır. Renksiz, beyaz, sarı ve kırmızı olur (Şekil 3.5.). Üfleçte köpürerek erir ve beyaz camsı madde verir. Yeni volkanik taşların oyuklarında bulunur. Kapalı kapta bulunursa su verir (Kibaroglu, 2007).



Şekil 3.5. Höylandit (Anonymous, 2007).

3.1.1.3.1.4. Lamontit

Ca₄(Al₈Si₁₆O₄₈)16H₂O kimyasal formülüne sahip olan lamontit monoklinik sistemde kristalleşir, kristaller uzunca ve uzunlamasına çizgilidir (Şekil 3.6.). Sertliği 2.2 olup donuk sarı veya donuk mavi renklindedir. Kuru havada toz haline gelir ve suyunun hemen hemen yarısı kaybolur. Bu nedenle kristaller matlaşır ve kırık hale gelir (Kibaroglu, 2007).



Şekil 3.6. Lamontit (Anonymous, 2007).

3.1.1.3.1.5. Klinoptilolit

(Na₃K₃) (Al₆Si₃₀O₇₂) 24H₂O kimyasal formülüne sahip olan klinoptilolittin kristal sistemi monoklinikdir. Isıya dayanıklı olup 700 °C'ye kadar kristal yapısını korur. Silika bakımından zengin bir doğal zeolit türüdür. Si/Al mol oranı 0.425/5.25'tir. Asitle işleme sokularak moleküler elekleri hazırlanabilir. Aside karşı dayanıklıdır. Kristal boşluğu %39'dur. SO₂, H₂S ve CO₂ gibi gazların tutulmasında, havanın oksijence zenginleştirilmesinde, kurutma ve saflaştırma teknolojisinde, radyoaktif izotopların tutulmasında kullanılır (Kibaroğlu, 2007).



Şekil 3.7. Klinoptilolit (Anonymous, 2007).

3.1.1.3.1.6. Nartolit

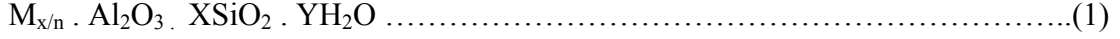
Na₂ (Al₂Si₃O₁₀) 2H₂O kimyasal formülüne sahip olan nartolit, monoklinik sistemdeki kristalleri uzun prizmalı olur. Lifli zeolitlerin en önemli temsilcisidirler. Genelde cam parlaklığında, ince lifli olanları ipek parlaklığındadır. Rengi genellikle beyaz, sarımsıdır. Üfleçte kolayca erir. Doğada bazalt ve fonolit oyuklarında bulunur (Kibaroğlu, 2007).



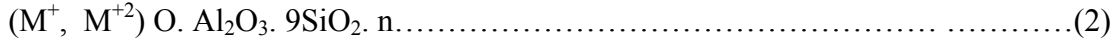
Şekil 3.8. Nartolit (Anonymous, 2007).

3.1.1.4. Zeolitlerin Fiziksel ve Kimyasal Yapısı

Zeolitler; alkali ve toprak alkali elementlerinin kristal yapıyı sahip sulu Alüminyum silikatları olarak tanımlanır. Adsorbsiyon özellikleri ilginç olan bu kristallerin genel yapısal formülleri (1) denklemi ile verilmiştir.



Burada M, n değerlikleri bir katyon (Na^+ , K^+ , Ca^+ vb.) dur. Mol sayılarını gösteren x ve y ise zeolit türüne göre değişir. Kristal yapılar şekil.....'de verilmiştir(5 no.lu kaynak). Bu konuda bir diğer genel formül ise (2) denklemi ile gösterilmiştir.

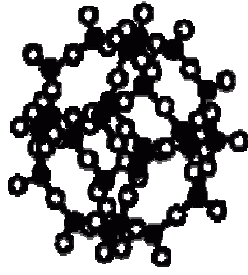


Burada M^+ bir alkali katyonu olup genellikle Na^+ veya K^+ , nadiren de Li^+ olur. M^{+2} ise bir toprak alkali katyondur ve genellikle Mg^{+2} , Ca^{+2} , Fe^{+2} nadiren de Ba^{+2} , Sr^{+2} olur (Dpt, 1996). Herhangi bir zeolit kristalinin en küçük yapı birimi, SiO_4 ya da AlO_4 dörtyüzlüsüdür. Bu dörtyüzlünün merkezinde, oksijenden çok daha küçük olan silisyum ya da alüminyum iyonu +4; alüminyum iyonu +3 ve oksijen iyonu -2 değerlikli olduğundan, bir silisyum iyonu kendini çevreleyen dört oksijen iyonun ancak -4 değerliğini karşılar.

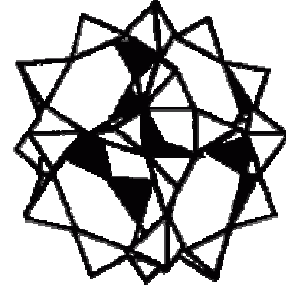
Böylece her oksijen iyonunun -1 değerliği kalır ve başka bir silisyum iyonu (ya da alüminyum iyonu) ile birleşebilir. Bu şekilde dörtyüzlülerin uzayda zincirleme birleşmelerinden, zeolitin bir bal peteğine benzer gözenek ve kanallar içeren kristal yapısı oluşur.

Silisyum iyonun yerine alüminyum iyonun alması sonucu dörtyüzlülerin elektrik yükünün dengelemesi için ek bir artı yüke ihtiyaç duyulur. Bu ek artı yük; değişebilir katyonlarca (Na^+ , K^+ , Ca^+) sağlanır.

Bazı zeolitlerin yapıları dörtyüzlülerin oluşturduğu çok yüzlüler tarafından daha iyi tanımlanır. Bu çok yüzlülerin en önemlilerinden olan kesik kübik sekizyüzlülerden oluşan A ve X zeolitlerinin kristal yapıları Şekil 3.9'da gösterilmektedir. (a) Zeolit A ve (b) Zeolit X in kristal yapıları çok yüzlülerin köşelerinde Si ve Al atomları ve kenarların orta noktalarına yakın yerlerde oksijen atomları bulunmaktadır. Literatür incelemesine göre zeolitin fiziksel ve kimyasal olarak karşılaştırılması Çizelge 3.6'da verilmiştir.



(a) Zeolit A



(b) Zeolit X

Şekil 3.9. (a) zeolit a ve (b) zeolit x'in kristal yapıları

Çizelge 3.6. Literatür incelemesine göre zeolitlerin fiziksel ve kimyasal olarak karşılaştırılması

Kimyasal Bileşim	İzmir-Urla Yöresi Zeoliti	Balıkesir-Bigadiç Yöresi Zeoliti	USA Florida Yöresi Zeoliti (%)
SiO ₂	72.05	67.08	56
Al ₂ O ₃	11.84	13.76	14
Fe ₂ O ₃	1.03	1.6	--
CaO	1.86	3.90	21.5
MgO	0.66	3.81	--
SO ₃	0.03	0.05	--
Na ₂ O	1.56	--	8.5
K ₂ O	4.21	--	--
Kızdırma Kaybı	6.07	9.28	--
Yoğunluk (g/cm ³)	2.74	2.15	--
İncelik Blaine (cm ² /g)	6550	8900	--
7 günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	1.3	--	--
7 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	9.8	% 66	--
28 günlük Basınç Dayanımı	--	%83	--
Çözünmeyen Kalıntı	--	62.88	--
45 mm Elekte Kalan %	--	31	--
Priz Başlama		--	--
Priz Sonu		--	--
Kaynak	(1)	(2)	(3)

(1) TÇMB Kalite Kontrol Bağımsız Deney Laboratuvarları Tras Aktivite Raporu, Rapor tarihi: 21.12.2004, Rapor No: 1245.

(2) Uzal, B., Bektaş, F., Turanlı, L., Öğütülmüş Zeolitin Alkali- Silika Reaksiyonu ve Sülfat Etkisi ile Genleşmesinin İncelenmesi, 5. Ulusal Beton Kongresi, TMMB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi.

(3) Grutzeck, M., Kwan, S., Dicola, M., Zeolite Formation in Alkali-Activated Cementitious Systems, Cement and Concrete Research 34, pp. 949-955, 2004.

Zeolitlerin gözenek boyutları kristal yapılarına ve bir dereceye kadar da içerdikleri katyonlara bağlıdır. Çoğu zeolitle kristal yapı Si-O-Al atomlarının meydana getirdiği halkalarla bağlanmış gözeneklerden oluşur. Bu halkaların oluşturduğu geçit pencere olarak adlandırılır ve pencere boyutu halkalardaki atom sayısı ile orantılıdır. Pencere boyutu 4 ile 12 arasında oksijen iyonu (ve eşit sayıda alüminyum ya da silisyum iyonu) içerir. Endüstriyel önemi olan zeolitlerde pencereler 8, 10 ya da 12 elemanlı halkalardan meydana gelir. Bu pencerelerin boyutları sırasıyla 5, 6, 7 Å dolayındadır. Dört ya da altı halkalı pencerelerden oluşan yapılar adsorblama bakımından pek önem taşımazlar, çünkü altı elemanlı bir pencerenin boyutu yaklaşık 2.5 Å kadardır ve ancak su gibi çok küçük moleküller bu pencereden geçebilir.

Bazı zeolitlerin kovuk sistemleri, pencerelerle birbirine bağlanmış gözenekler yerine bir kanallar sistemi ile daha iyi tanımlanabilir. Bu durumda kanalların pencere boyutları yine pencereleri oluşturan halkaların eleman sayısına bağlıdır. Zeolitlerin boşluk sistemleri bir, iki ya da üç boyutta olabilir (İleri, 1978).

Zeolitlerde SiO₂/Al₃ oranı (y/x) zeolit tipine bağlı olarak 1 ile 5 arasında değişir. Zeolitlerin benzer yapıdaki diğer mineral gruplarından ayıran en önemli özelliklerden birisi de yapı içindeki kanallarda su moleküllerinin bulunmasıdır. Yapıda bu su moleküllerinin yer alabileceği birkaç boşluk vardır. Bu boşluklarda Na⁺, K⁺ ve Ca⁺ su molekülleri ile çevrilir ve su molekülleri zayıf bağlarla hem artı yüklü katyonlara hem de silikat yapıya bağlıdır. Genellikle kalsiyumlu zeolitler diğerlerinden daha fazla su içerirler. Şabazit, höylendit ve stilbit yapısı içindeki su molekülleri potasyumdan daha çok kalsiyum katyonu ile bağlantılıdır (Yücel, 1987).

Zeolitler ısıtıldıklarında, su moleküllerinin yapıdan değişiklik yapmadan, birçok mineralde görülen aksine, belirli sıcaklıklarda, kesikli olarak değil de, sürekli şekilde yapıdan ayrılır. Suyun yapıdan uzaklaşması sırasında, katyonlardan bazıları da dışarı atılırlar. Yapıda elektrik dengesini korumak için bazı katyonlar kanalların çeperlerinde veya kanal yapılarındaki boşluklar içinde yer alırlar ve diğer katyonlarla her zaman değiştirilebilirler. Su moleküllerinin ve katyonlardan bazılarının atılması kanallardaki tıkanıklıkların giderilmesi sağlar. Ancak tutulan katyonların özellikleri kanal açıklığını büyük ölçüde etkiler. Örneğin, elektrik yükünün dengelenmesi bir Ca⁺⁺ katyonu iki Na⁺ katyonunun yerini alabilir. Böylece kanal genişliği artar. Na⁺ katyonunun yerini daha büyük yarıçaplı K⁺ katyonu alırsa kanal genişliği azalır. Yapıda katyonlar ne kadar az bulunurlarsa o kadar dolaşma yeteneğine sahip olurlar. Ayrıca tek yüklü katyonlar (K⁺, Na⁺) daha zayıf elektrik kuvvetleriyle bağlı olduklarından, çift yüklü katyonlardan

(Ca⁺⁺) daha hareketlidirler. Zeolitlerin pencere çapları birçok sıvı gaz ve moleküllerin büyüklükleri ile aynı düzeydedir. Zeolitlerin kristal yapının belirlediği homojen bir pencereye sahip olduklarından, bir karışım içinde sadece bu pencereden geçebilecek büyüklükteki moleküller adsorplanır, daha büyük boyutlu moleküllü zeolit dışında kalırlar.

Son 35 yıl içinde 150'nin üstünde zeolit, laboratuvarlarda sentezlenmiş ve 7 tür zeolit mineralin doğada bol miktarda ve oldukça saf olarak bulunduğu anlaşılmıştır. Bu zeolit türlerinden şimdilik 12–14 tanesinin endüstriyel önemi vardır. Bu zeolit türleri ve bazı özellikleri Çizelge 3.7.'de verilmiştir. Zeolitlere, molekülleri büyüklüklerine göre ayırma özelliğinden dolayı daha önce belirtildiği üzere “molekül elekleri” adı verilir.

Çizelge 3.7. Endüstriyel kullanımı olan zeolit türleri ve özellikleri (Yücel, 1987).

ZEOLİT TÜRLERİ	GÖZENEK BOYUTU(A°)	SiO₂/Al₂O₃ MOL ORANI
DOĞAL ZEOLİTLER		
Mordenit	(6.7 x 7.0)	8.2 – 10.0
Şabazit	(3.6 x 3.7)	3.2 – 6.0
Eriyonit	(3.6 x 5.2)	5.8 – 7.4
Klinoptilolite	(4.4 x 7.2) (4.1 x 4.7)	8.5 – 10.5
YAPAY ZEOLİTLER		
KA	3	2.0
NaA (Kristal yapıları CaA aynıdır)	4 5	2.0 2.0
X (Kristal yapıları Y aynıdır)	7.4 7.4	-- --
Mordenit (Zeolan)	(6.7 x 7.0)	10
ZSM	(5.4 x 5.6)	30
Omega	--	6.8

3.1.1.5. Zeolitlerin Hafif Agregalar Olarak Kullanılması

3.1.1.5.1. Zeolit hafif agregalarda genel özellikler

Hafif agregalar kökenlerine göre farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptirler. Bunların en önemli özelliği yüksek boşluk oranları nedeniyle düşük hacim yoğunluklarına sahip olmalarıdır. Hafif agregalar yapay ve doğal olmak üzere başlıca iki gruba ayrılırlar (Davis, Kelly, 1955).

Yapay hafif agregalar üretimi için çeşitli hammaddeler, endüstriyel yan ürün ve artıklar kullanılmakta, üretiminde çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler uygulanmaktadır (Budnikov, 1968).

Doğal hafif agregalar olarak kullanılan başlıca agregalar sünger taşı, volkan cürufu, zeolitler, volkan külü, volkanik tüf ve diyatomit tir. Diyatomit dışında diğerleri volkanik kökenlidir. Bunlar doğal durumları ile hafif ve yeteri kadar dayanıma sahiptir (Price, Cordon, 1949).

Hafif agregaları çeşitli gruplara ayırmak mümkündür (Yıldırım,1994; Öztok, 1997; Arefi, 1993):

1. Doğal hafif agregalar: Sünger taşı, volkan cürufu, zeolit, volkan külü, tüf ve diyatomit.
2. Yapay hafif agregalar (Doğal malzemelerden üretilen): Genleştirilmiş kil, şist, arduvaz ve perlit. Bunların, endüstriyel atıklardan oluşan hafif agregalar (yüksek fırın cürufu, uçucu kül) ve Endüstriyel atıkların işlenmesiyle üretilen hafif agregalar (Genleştirilmiş cüruf vb) çeşitleri vardır.
3. Organik kökenli hafif agregalar: Bitki ve ağaç parçacıklarından oluşan agregalardır.

Günümüzde beton üretiminde kullanılan çimentonun standartlaştırılmış olması ve suyun kalitesine de bağlı olarak beton özelliklerine etki edeceğinin bilinmesi nedeniyle beton kalitesini etkileyen faktörlerden agregalar özelliklerinin öncelikle belirlenmesi gerekir. Aksi halde özellikleri tam olarak bilinmeyen bir agregalar ile üretilen betondan istenilen faydanın sağlanması mümkün olmaz (Şahin, 1996).

Agregaların fiziksel dayanımı, tanelerin şekli ve yüzey yapısı, birim ağırlığı ve su emmesi, granülometrisi, nem etkisiyle oluşan boyut değişimleri ve ısı ile ilgili özellikleri beton yapımında önem taşır. Beton özellikleri agregalar özellikleri ile birlikte çimento niteliği, karışım oranları ve sıkıştırma derecesi tarafından da etkilenir. Bunlar

beton niteliği üzerinde agrega özelliklerinin ileri gelen etkilerden daha fazla önem taşırlar (Teychenne, 1975).

Hafif mineral agregalar normal agregalara göre daha yüksek su emme, daha düşük ısı iletimi, daha zayıf dayanım ve daha az birim ağırlık değerlerine sahiptir (Washa, 1956). Agreganın en önemli özellikleri granülometrik bileşimi, birim ağırlığı, tane şekli ve yüzey yapısı ile su emmesidir.

3.1.1.5.2. Granülometrik bileşim

Agregaların granülometrik bileşimi, boyutları belirli sınırları arasında bulunan tanelerin agrega içerisindeki dağılım oranını belirler. Agreganın granülometrisi üretilen beton özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir (Postacıoğlu, 1975).

Hafif agregalar tane büyüklüklerine göre genel olarak ince agrega, iri agrega ve karışık agrega olarak sınıflandırılmaktadır. Agreganın granülometrisi beton birim ağırlığı ve gerekli karışım suyu miktarını değiştirdiğinden, dolaylı olarak betonun basınç dayanımı üzerinde de etkili olmaktadır (Price, 1966).

İyi derecelenmiş bir agrega en az boşluk hacmine sahip olduğundan, boşlukların doldurulmasında daha az çimento hamuruna gerek duyulur. Hafif agregaların farklı büyüklükteki tanelerinin yoğunlukları, tane boyutu küçülürken artmaktadır. Genellikle 0.15 mm den küçük boyutlu tanelerin yoğunlukları doğal kuma yaklaşırken, bazı iri agrega taneleri de suda yüzebilmektedir. Bu bakımdan hafif beton karışımlarının boşluk ve çimento oranlarını belirleyen ve işlenebilirliğini belirleyen öge her elek üstünde kalan malzeme ağırlığı olmaktan çok, her tane grubunun kapladığı hacim olmaktadır. Hafif agregaların ağırlık esasına göre granülometri bileşimlerinde hacim olarak eşit tane boyutu dağılımını sağlamak amacıyla normal agregalara oranla ince elekler üzerinde kalan malzemenin daha fazla yüzdelere gerek vardır (Nesbit, 1966).

Agregaların farklı en büyük tane boyutuna göre üretilen betonlar için değişik granülometri bileşimlerine gerek duyulur. Hafif agregalar ve bunlarla yapılacak değişik nitelikteki betonlar için gerekli agrega granülometri bileşimi BS 3797 (1990, s. 6-7), ASTM C 330 (1976, s. 229), ASTM C 331 (1976, s. 232), ASTM C 332 (1976, s.235) ve TS EN 206 gibi çeşitli standartlarda verilmiştir.

Farklı standartlarda belirtilen granülometri değerleri, kullanım amaçları için genel bir kural verirler. Belirli bir agrega ile istenilen niteliklere sahip beton üretimi amacıyla, uygun oranlarının saptanması gerekir. Belirli bir granülometri bileşimine

sahip farklı agregalarla üretilen betonların her zaman benzer özellikleri olacağı ve bu konuda kesin kuralların konulabileceği söylenemez (Kluge, 1956). Çeşitli hafif agregaların, özellikle tane şekli ve yüzey yapısı bakımından aralarında önemli farklar bulunabilmesi nedeniyle, her agrega için uygun granülometri bileşiminin saptanması amacıyla ayrı ayrı analiz ve deneylerin yapılması gerekmektedir (Carlson, 1956).

Hafif iri ve ince agrega tanelerinin yoğunlukları arasında önemli farklar bulabilmesinden dolayı karışımda ağırlık esasına göre oransal olarak daha fazla miktarlarda ince malzemeye gerek duyabileceğinden, granülometri bileşiminin mutlak hacim esasına göre saptanması daha uygun olmaktadır (Price, Cordon, 1949).

Yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarında, uygun agrega karışımlarının normal agregalara göre daha yüksek oranlarda ince malzeme içermesi gerektiğini, hafif agregaların keskin köşeli biçiminin ve çoğu zaman pürüzlü yüzey yapısının bu konuda etkili olduğunu saptayarak, ince agreganın toplam agregaya oranının genellikle %50 - %60 arasında değişiklik gösterdiği anlaşılmıştır (Kluge, 1956).

3.1.1.5.3. En büyük tane boyutu

Hafif agreganın en büyük tane boyutu kullanılma amacına bağlı olarak değişirse de beton üretiminde genellikle 19,20 mm, 12,70 mm ve 9,52 mm en büyük tane boyutları alınmaktadır. Agreganın en büyük tane boyutu betonun işlenebilirliğini, ince – iri agrega oranını, çimento miktarını, betonun üst dayanım sınırını ve kuruma büzülmesini etkiler (Acı 213, 1967).

Betonlarda en büyük tane boyutu ile beton dayanımı arasındaki ilişkinin hafif agrega çeşidine göre değiştiğini, tane boyutunun büyütülmesiyle dayanımda bir artışın bulunmadığını, özellikle yüksek çimento dozajlarında, agrega en büyük tane boyutunun artırılmasının dayanımı düşürdüğünü ve tane boyutunun 19,10 mm.ye kadar düşürülmesinin betonun kuruma büzülmesini önemli derecede artırmadığını bildirmektedir (Walker ve Bloem, 1960; Bloem ve Gaynor, 1963).

3.1.1.5.4. Tane şekli ve yüzey yapısı

Hafif agregaların önemli özelliklerinden birisi de granülometri bileşimi ile birlikte tanelerin şekli ve yüzey yapısıdır. Agreganın tane şekli ve yüzey yapısı da beton niteliği üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu etki özellikle beton dayanımı üzerinde görülür (Price, 1966; Mather, 1966).

Agreganın gevşek durumda boşlukları tane şekli tarafından etkilenir ve tane şekli bozuldukça boşluk miktarı artar (Shacklock, 1974). Hafif agregaların genellikle normal agregalara oranla yüksek boşluk yüzdelerine sahip bulunduğunu ve bu nedenle üretilen betonların su gereksinmesinin fazla ve dayanımlarının düşük olduğu söylenebilir (Wills, 1974).

Taze betonun iyi bir şekilde işlenebilmesi için yuvarlak ve oldukça düz yüzeyli tanelere gereksinme duyulur. Hafif agregalar çoğunlukla köşeli yapıda ve pürüzlü yüzeylere sahip olduklarından genellikle katı karışımlar oluşturur. (Davis ve Kelly, 1955; Neville, 1973; Wills, 1974). Tane şekli ve yüzey yapısı betonun dayanımını etkilediğinden agrega tanelerinin şekil faktörü göz önünde bulundurulmalıdır. İyi nitelikte beton üretimi için en uygun biçimli agrega taneleri küre veya küp şekline yaklaşan tanelerdir. Tanenin şekil faktörü 2.5 veya daha büyük olan agrega miktarı ağırlık olarak toplam agreganın %15-%20 sinden fazla olmamalıdır (Budnikov, 1968; Postacıoğlu, 1975).

Yuvarlak taneli hafif agregalarla yapılan betonun 28 günlük basınç dayanımının, şekil faktörü en ve boy 1'e 4 olan uzun şekilli agregalarla yapılan betondan genellikle 60–80 kgf/cm² kadar daha fazla olabilmektedir (Czuryszkiewicz, 1973).

3.1.1.5.5. Birim ağırlık ve yoğunluk

Belirli bir hacmi dolduran agrega ağırlığının bu hacme oranı birim ağırlık olarak tanımlanmaktadır. Agreganın birim ağırlığı, agrega granülometrisi, şekil faktörü, yerleşme şekli ve agrega yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik gösterir (Postacıoğlu, 1975).

Hafif agregaların yoğunluğu boşluklu bünyeleri nedeniyle normal agregalardan düşük olup, tane boyutuna bağlı olarak değişiklik gösterir. Yoğunluk ince tanelerde yüksek, iri tanelerde düşüktür (ACI 213, 1967).

Hafif agregaların sıkı birim ağırlık deneyi, tanelerin kırılıp parçalanmalarına neden olarak derecelenmesini değiştirdiğinden bir anlam taşımayıp, uygulamada sadece

gevşek birim ağırlık değerleri saptanmaktadır (BS 3681, 1973., ASTM C 330, 1976., TS EN 206–1).

Hafif agregalar genellikle yüzeye açılan ve kapalı kalan boşluklar içerebildiğinden agrega yoğunluğu farklı şekillerde tanımlanmaktadır. Agreganın nem ve boşluk oranı göz önünde bulundurularak “fırın–kuru”, “doygun, yüzey–kuru” ve “görünen yoğunluk” (apparent specific gravity) gibi yoğunluk tanımlamaları bulunmaktadır (TS 707, 1980, TS 296 ISO 31–3, 2005). Beton karışım oranlarının saptanmasında doygun, yüzey-kuru koşuldaki agrega yoğunlukları önem taşımaktadır. Çünkü agreganın bütün iç boşluklarında bulunan su, çimentonun hidrasyonunda etkili olmayabilir (Neville, 1995).

Hafif agregaların gevşek (fırın-kuru) birim ağırlıkları ince, iri ve karışık agregalar için sırasıyla 1200 kg/m^3 , 1000 kg/m^3 ve 1100 kg/m^3 ten fazla olmamalıdır (TS EN 206–1). Yapı betonları (taşıyıcı betonlar), duvar birimleri ve yalıtım betonları için bu değerler ise yukarıdaki sıraya uygun olarak 1120 kg/m^3 , 880 kg/m^3 ve 1040 kg/m^3 ten fazla olmamalıdır (ASTM C 330–331–332, 1976). BS 3797 (1964) de en fazla 5 mm tane boyutuna kadar olan ince hafif agreganın birim ağırlığının 1200 kg/m^3 ’ü ve 5 mm den büyük boyutlu hafif iri agreganın ise 960 kg/m^3 ü geçmemesi belirtilmektedir.

Isı ve diğer hafif beton amaçları için kullanılan doğal, yapay ve organik hafif agregalarda birim ağırlıkların, iri agrega için en fazla 800 kg/m^3 ve 5 mm den ince taneler için ise 1200 kg/m^3 olması gerekmektedir (Gorshkov, 1968).

Agregaların birim ağırlıkları yapılacak betonun dayanım ve ağırlıkları konusunda bir ön bilgi verir (Lewis, 1966). Hafif agregalar normal agregalara oranla önemli derecede düşük birim ağırlıklara sahiptir. Agregası çeşidi, yoğunluğu, granülometri bileşimi ve tane şekline bağlı olarak bu değer $560\text{--}1120 \text{ kg/m}^3$ arasında değişiklik gösterir. Normal agrega birim ağırlıkları ise $1440\text{--}1760 \text{ kg/m}^3$ arasındadır. Aynı yoğunluğa sahip olan yuvarlak ve köşeli agregaların boşluk oranları değiştiğinden bunlar önemli derecede farklı birim ağırlıklara sahip olabilir (Pca, 1972).

3.1.1.5.6. Agregalarda boşluk oranı ve su emme

Agrega taneleri içindeki boşluklar agreganın özelliklerini önemli derecede etkiler. Hafif agregalardaki tanelerin boşluk oranı en önemli özelliklerden birisidir. Boşluk oranı arttıkça agreganın hafifleşir (Rudnai, 1963). Agreganın su emmesi betonun su emmesi, büzülme ve donma-çözülme gibi özellikleri üzerinde etkili olduğundan, önemli bir fiziksel özelliğini oluşturur (Helms ve Bowman, 1968).

Başlangıçta farklı nem düzeyinde bulunan aynı hafif agreganın örnekleri belirli bir süre suda ıslatıldığında fazla nem içeren agreganın örnekleri, kuru örneklerle oranla daha fazla toplam su emmektedir. Bu nedenle hafif agregaların kuru örneklerinde saptanan su emme ve yoğunluk değerleri, ıslak veya nemli agregalarla yapılacak betonların karışım hesaplarında kullanılmamalıdır. Hafif agregaların yoğunluk ve su emme değerlerinin betonun yapımı sırasındaki agreganın nemine göre saptanması gerekir (Landgren, 1964).

Hafif agregaların pürüzlü, boşluklu yüzeyleri, farklı büyüklükteki tanelerin su emme özelliklerindeki değişiklikler, belirli agregaların su emme ve yoğunluk değerlerinin kolayca ve doğrulukla saptanamadığını göstermektedir (Stamenkovic, 1970).

Normal ve hafif agreganın arasındaki en önemli fark, hafif agreganın oransal olarak daha fazla miktarlarda su emmesidir. İnce hafif agregalar ise iri hafif agregalardan daha az su emme özelliğine sahiptir (Lelewellin, 1968). Farklı iki hafif agreganın üzerinde yapılan araştırmada bunların hacimlerinin yaklaşık %9'u kadar suyu ilk anda emdikleri gözlenmiştir (Hobbs, 1964).

Hafif agregalar genellikle 24 saat suda kalmakla kuru agreganın ağırlık olarak %5–20'si oranında su emebilmektedir. Çeşitli agregalarda toplam su emme büyük değişiklikler gösterdiği gibi su emme hızı da geniş değişim aralıklarına sahiptir (Hanson, 1968; Pca, 1972).

Boşluklu agregaların su emme özelliğindeki değişimler nedeniyle beton üretiminde su çimento oranı olumsuz etkilenebilir. Bu nedenle karışıma çimento konulmadan önce hafif agregaya bir ön ıslatma uygulaması ile agreganın ani su emme gereksinimi giderilebilir. Böylece pürüzlü yüzeyli tanelerin büyük boşlukları su ile doldurularak, karışımın su-çimento oranındaki değişim önlenir (Timms, 1964).

Su püskürtülen hafif agreganın tanelerinin su içinde ıslatılan tanelere oranla daha fazla çimento hamuru gerektirdiği, buna karşılık kuru agreganın su ile doygun hale getirilen agregaya oranla yaklaşık olarak iki katı çimento hamuruna gereksinim

duyduğu yapılan deneylerle görülmüştür (Mihul, 1969). İlk ıslatma ile iyice doymun duruma getirilemeyen agrega karışımından sürekli olarak su emebileceğinden, betonun işlenebilirlik değeri karıştırma sırasında ve yerleştirme yerinde farklılıklar gösterebilir. Bu nedenle işlenebilirlikte aynılığın sağlanması için agreganın ıslatılması karıştırma işleminin de daha uzun sürede yapılması uygundur (Lelewellin, 1968).

Uygulamaya yönelik işlemlerde kuru ve boşluklu hafif agregaların özellikle kırılmış agregaların farklı su emme özelliklerinin göz önünde tutularak, karıştırmadan önce ıslatılmaları ile karıştırma sırasında agrega tarafından emilen su miktarı azaltılarak beton kıvamında oluşabilecek hızlı ve büyük değışmeler kontrol altına alınabilmekte ve uygun kıvamda karışım elde edilebilmektedir (Gray, 1955; Davis ve Kelly, 1955; Kluge, 1956).

Agregalara ilk ıslatma uygulanmasıyla sağlanan üstünlüklere ek olarak taşınması sırasında agregada herhangi bir nedenle ayrışma (segregasyon) olmayacağı, beton karışımında aynılığın daha kolay sağlanacağı ve kıvamın iyi bir şekilde kontrol edebileceği söylenebilir (Murlin ve Wilson, 1952; Acı 211, 1968).

3.1.1.5.7. Basınç (ezilme) dayanımı

Hafif agregaların dayanımı tanelerin yoğunluklarına bağlıdır. Aynı yoğunluğa sahip yuvarlak şekilli ve düzgün yüzeyli agregalar kırılmış veya köşeli, pürüzlü yüzeyli agregalardan daha fazla dayanımı ile taneler arasındaki boşluk hacmi olduğu görülmüştür (Budnikov, 1968).

Hafif agregaların çoğunun mekanik dayanımının normal agregalardan çok düşük olmasına karşın bunlarla normal betonlar kadar dayanıklı beton yapılabilir (Teychenne, 1975).

Karıştırma sırasında agreganın parçalanıp, ufalama derecesini saptamak amacına yönelik güvenilir bir yöntem yoktur. Bu bakımdan hafif agregaların basınç dayanımları agrega ile ilgili olarak çok genel bir bilgi vermektedir (Bs 3681, 1973).

3.1.1.5.8. Zararlı maddeler

Agregada bulunabilen zararlı maddeler, bağlayıcı maddenin ayrışmasına ve genişlemesine neden olarak betonun çatlamasına ve kırılmasına, çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki yapışmanın (aderansın) zayıflamasına ve yumuşak özellikte sağlam olmayan taneler de beton dayanımının azalmasına yol açarlar (Barnbrook, 1975).

Hafif agrega SO_3 olarak %1'den daha fazla suda çözünen sülfat içermemelidir. Yanma kaybı en fazla %4 olmalıdır. Hafif agrega organik madde miktarı standart ölçüt (referans) renkten daha koyu renk verecek derecede bulunmamalı ve kil toprakları agrega kuru ağırlığının %2'sini geçmemelidir (Bs 3797, 1964; Shacklock, 1974; Ts 1114, 1986; Astm C 330, 1976).

3.1.2. Çimentolar

Çimento bir hidrolik bağlayıcıdır. Üretim teknolojisi oldukça gelişmiş olmasına rağmen, çimento ile ilgili araştırmalar detaylı bir şekilde sürdürülmektedir. Çimentonun tarihi antik çağlara kadar uzanmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan en eski maddelerin normal ve hidrolik kireç olduğu tespit edilmiştir. Oldukça saf kireç taşı kalsine edilerek kireç elde edilmiş, sulandırılarak kumla karıştırılmış ve böylece kireç harcı elde edilmiştir. Elde edilen bu kireç harcı havadaki CO_2 'i kirecin adsorplaması ile sertleşmiş böylece kireç yine kireç taşı haline döndüğünden eski mekanik özelliğini kazanmıştır. Kireç taşının içinde silisyum, alüminyum ve demir oksitler de bulunduğu için kireç taşının kalsinasyonu sırasında, yeni bileşiklerin oluşumu ile elde edilen hidrolik kireç su ile karıştırıldığında sertleşebilmektedir. Böylece, hidrolik kireç, oluşan yeni bileşiklerle donma ve sertleşme özelliği kazanmaktadır. Eski çağlarda Mısır'da çimento yerine kalsine edilmiş saf olmayan Jips kullanılmıştır. Romalılar 2000 yıl kadar önce kireçle "pozzolin" adı verilen ve şimdi puzolan olarak bilinen volkanik küllü kireci birlikte öğüterek bağlayıcı madde olarak çimento yerine kullanmışlardır (Blanks ve Kennedy 1955, Taylor 1992). 1756 yılında İngiliz mühendisi J.Smeaton belli bir oranda kil içeren yumuşak kireç taşının en iyi çimentoyu oluşturduğunu tespit etmiştir. Bundan 40 yıl kadar sonra J. Parker, İngiltere'de safsızlık oranı daha fazla olan kireç taşından çimento üretmiştir. Kil ve kireç taşından çimento üretimine 1813 yılında Fransa'da Vicat tarafından, 1822 yılında da İngiltere'de Y.Frost tarafından başlanmıştır (Blanks ve

Kennedy, 1955). 1850 yılında Amerikalı D.O.Saylor bulduğu çimento kayasını fırında pişirdikten sonra öğütmek suretiyle doğal çimento elde etmiştir. Fakat Amerika Birleşik Devletleri'nde ve diğer bazı ülkelerde üretilen bu doğal çimentonun sağlamlığının, Portland çimentosuna göre daha zayıf olduğu tespit edilmiştir. Çimentonun gelişim süreci içinde en önemli aşama Portland çimentosunun üretimi olmuştur. Portland çimentosunun ilk olarak ne zaman keşfedildiğini belirlemek kolay değildir. İlk patentin 21 Ekim 1824 yılında J. Aspdin tarafından alınmış olması nedeniyle J. Aspdin, Portland çimentosunu ilk bulan kişi olarak bilinmektedir. Portland çimentosuna verilen "Portland" adı, Portland çimentosu ile aynı donmayı gösteren ve İngiltere'nin Portland civarında bulunan bir çeşit yapı taşından gelmiştir (Taylor, 1992). Aspdin'in patentindeki özelliklere göre ürettiği çimentonun doğal çimentodan daha üstün bir çimento olmasına rağmen bu günkü Portland çimentosu ile kıyaslanamayacak kadar farklı olduğu anlaşılmaktadır. Portland çimentosunun fabrikada üretilmesi çalışmaları ilk olarak İngiltere'de yapılmış ve Swanscombe'da 1825 yılında J. Frost tarafından gerçekleştirilmiştir. Bundan sonra Belçika ve Almanya'da 1855 yılında ilk çimento fabrikaları kurulmuştur. Birleşik Amerika'da ise 1865 yılında bu konu üzerinde durulmaya başlanmış ve Portland çimentosu üretimi ilk olarak D. O. Saylor tarafından 1871 yılında gerçekleştirilmiştir. Portland çimentosunun bileşimi ile ilgili sistematik çalışmalar Amerika'da başlamış ve 1906'da termik ve petrolojik metotların uygulanması çimento ile ilgili bilgileri bilimsel temele oturtmuştur. 1926 yılından itibaren de Portland Çimento Birliği'nde Portland çimentosu ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bunun yanında, birçok ülkede bu konuda çok sayıda bilimsel çalışma yapılmış ve hidrolik çimentonun gelişimi adım adım sürmüştür.

3.1.2.1. Çimentoların ana maddeleri

Çimento, esas olarak, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Diğer bağlayıcı maddeler gibi çimentolar da, CaO, MgO gibi alkalın ögeler ve SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi hidrolik ögelerden oluşur. Çimento bağlayıcılık görevini su ile tepkimeye girdikten sonra kazandığı için hidrolik bağlayıcı olarak adlandırılır. Alkalın ve hidrolik ögelerin oranları bağlayıcı maddenin niteliğini belirler. Çimento, su ile karıştırılıp plastik hamur durumuna geldikten bir süre sonra havada ya da su içinde yavaş yavaş katılaşır. Bu katılaşma olayına priz adı verilir. Normal şartlar altında bu

katılma olayı bir saat civarında gerçekleşir. Ancak bu olay içinde bulunulan koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilir ve en fazla on saat içinde tamamlanır. Çimento üretiminde esas olarak kalker, kil veya marn kullanılmaktadır. Bunun yanında hammadde karışımının demir oksit miktarı yetersiz olduğunda, bunu telafi etmek gayesi ile demir cevheri veya pirit külü de hammadde karışımının bir bileşeni olarak kullanılmaktadır. Aynı şekilde, silisyumdioksit miktarı yetersiz kaldığında bunu karşılamak amacı ile yüksek silisli kum hammadde karışımının bir bileşeni olarak kullanılmaktadır.

3.1.2.1.1 Kalker

Kalker çimentonun en önemli ve yüzde olarak en yüksek miktarda kullanılan hammaddesidir. Bilindiği gibi çimentoyu oluşturan ana bileşiklerin (klinker minerallerinin) hepsi CaO'li bileşiklerdir. Kalkerler genellikle yüksek miktarda kalsit (CaCO_3) ve çok az miktarda kuvars (SiO_2) minerallerini ihtiva ederler. Kalkerlerin sertliği 1.8–3.0 Mohs sertlik derecesi aralığındadır. Yoğunlukları ise 2.6–2.8 gr/cm^3 değerleri arasında değişir. Bazı kalkerler kalsit yerine CaCO_3 'ın değişik kristal yapısındaki şekli olan aragonit mineralini ihtiva eder. Kalsit minerali hegzagonal kristal yapısındadır ve yoğunluğu 2.7 gr/cm^3 dür. Aragonit minerali ise rombik kristal yapısındadır ve yoğunluğu 2.95 gr/cm^3 dür (Duada, 1976).

3.1.2.1.2. Kil

Çimento üretiminde ikinci önemli hammadde kildir. Killeri oluşturan ana bileşen sulu alüminyum silikat bileşikleridir. Killer; kaolin, montmorillonit ve illit gibi kil minerallerinin yanında önemli ölçüde demir oksit, demir sülfür, kum ve kalsit gibi kil dışı mineraller ve az miktarda organik madde içermektedirler. Demir killeri renklendiren esas maddedir. Bunun yanında organik maddeler de killerin renklenmesine katkıda bulunurlar. Bu şekilde safsızlık içermeyen killerin rengi beyazdır. Killer esas olarak kütlece en çok SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içeren maddelerdir. Bunlar az miktarda MgO, CaO, K_2O ve Na_2O içerirler (Bucci, 1980). Killerin özellikleri içerdikleri kil minerallerine göre farklılık göstermektedir (Duada, 1976). Killer genellikle bir veya birkaç kil mineralini birlikte içermektedirler. Kil minerallerinin yanında genellikle feldspat ve kuvars gibi mineraller de bulunmaktadır. Kil örneklerinin içerdiği kil mineralleri çok çeşitlidir ve aşağıdaki gibi gruplandırılmışlardır.

- a) Kaolinit
- b) Mika
- c) Montmorillonit
- d) Klorit
- e) Karışık tabakalı

3.1.2.1.3. Marn

İçinde değişik oranlarda SiO₂, kil mineralleri ve demir oksit gibi safsızlıklar bulunan kireç taşına "marn" denir. Hem kalker hem kil bileşenlerini yan yana içermesi nedeniyle marn da çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Jeolojik olarak tortul kayalar grubuna giren marn, kalsiyum karbonat ve kilin aynı zamanda sedimantasyonu ile oluşur. Marn kalkere nazaran daha yumuşaktır. Marnlar kalker ve kil bileşenlerinin her ikisini de homojene olmuş bir şekilde ihtiva ettiğinden çimento için çok elverişli hammaddelerdir. Örneğin, kalkersi marnın kimyasal bileşimi portland çimentosunun hammadde karışımına çok yakındır.

3.1.2.2. Çimentoda hammadde karışımı ve modüller

Fırına verilmek üzere hazırlanmış olan çimento hammadde karışımına "Farin" denilmektedir. Bilindiği gibi çimentoyu oluşturan ana bileşenler kütle yüzdelere göre CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ şeklinde sıralanır. Dolayısıyla, hammadde karışımı hazırlanırken karışımın kütlece bu bileşenleri ihtiva etmesine dikkat etmek gerekmektedir. Bu nedenle, çimento için hammadde hazırlanırken yaklaşık %75 kalker ve %25 kil karıştırılarak Farin oluşturulur. Bu oranlar kullanılacak olan kalker ve kilin kimyasal bileşimine göre değişmektedir. Bu nedenle, çimento üretimine uygun bir hammadde karışımını hazırlamak için, kullanılan kil ve kalkerin karışım oranları bir takım kimyasal modüllere bağlı olarak belirlenmektedir (Duada, 1976, Fundal, 1979). Bunlar, kireç doygunluk faktörü, silikat modülü ve alüminyum modülüdür. Bu modüller aşağıdaki formüllerle tanımlanır (Christensen 1979, 1981):

- a) $CaO \times 100 \text{ Kireç doygunluk faktörü (KM)} = 2,8 \times SiO_2 + 1,18 \times Al_2O_3 + 0,65 \times Fe_2O_3$
- b) $SiO_2 \text{ Silikat modülü (SM)} = Al_2O_3 + Fe_2O_3$
- c) $Al_2O_3 \text{ Alüminyum modülü (AM)} = Fe_2O_3$

Portland çimentosu için kireç doygunluk faktörü 90–95, silikat modülü 2.2 -2.6 değerleri arasında, alüminyum modülü ise 1.63 değeri civarında olmalıdır (Duada, 1976). Kireç doygunluk faktörü arttığında pişme için daha çok yakıt sarfiyatına gerek göstermektedir. Artan silikat modülü; pişme zorluğuna, yavaş priz almaya ve geç donmaya neden olmaktadır. Silikat modülünün yüksekliği ortamdaki sıvı fazın yetersiz olduğunu gösterir. Klinkerleşmede çok önemli rol oynayan sıvı fazın eksikliği ile pişme ve trikalsiyum silikat oluşumu güçleşir (Christensen, 1978, 1979, 1980, Della ve Sarkar 1979, Fial 1980). Alüminyum modülü ise klinkerde granül oluşumu üzerinde etkilidir, yukarıda belirtilen 1,63 değerinden uzaklaştıkça granülleşme zorlaşır. Bu modüllere ait değerlerin ayarlanması ile hammadde karışımının pişebilirliği etkilenmektedir. Hammadde karışımının pişebilirliği kullanılan kilin ihtiva ettiği kil mineralinin pişme özelliklerine göre de değişmektedir.

3.1.2.3. Çimentonun Üretimi

Ülkemizde çimento üretim sistemi genel olarak aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- a) Çimento hammaddesi olan kalker, kil (veya marn) hammadde ocağından alınarak kırıcıya gönderilir.
- b) Kırıcıdan geçen hammadde stoklanır.
- c) Stoktan alınan hammadde değirmene gönderilerek öğütülür. Belli oranlarda kil ve kalker karışımından ibaret öğütülmüş hammadde karışımına "Farin" adı verilir.
- d) Farin silolarda depolanır.
- e) Sonra ısı değiştiricilerden geçirilir.
- f) Döner fırına verilen Farin 1400°C -1450°C sıcaklıkta pişirilir. Farinin pişmesi sonucunda elde edilen ürüne "Klinker" adı verilir.
- g) Fırından çıkan klinker soğutuculardan geçirilir.
- h) Soğutulan klinker depolanır.
- 1) Klinkere alçı taşı eklenerek çimento değirmeninde öğütülür. Öğütülmüş klinker ve alçı taşı karışımına "Çimento" adı verilir.
- j) Çimento pompalanarak silolara doldurulur.
- k) Torbalanarak pazarlanır (Türkiye Çimento Sanayii T.A.Ş. Yayını, 1973, T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı Yayını, 1973).

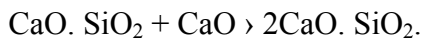
Çimentoda Klinker Oluşumuna gelince; hammadde karışımının fırında pişmesi

sırasında, çimentonun %95'ini teşkil eden klinker'in oluşum tepkimeleri ve sıcaklık dereceleri özet olarak Çizelge 3.8.'de verilmiştir (Taylor 1992, Lea 1970).

Çizelge 3.8. Klinkerin oluşum tepkimeleri ve sıcaklık ilişkisi

Sıcaklık Proses Termik değişimi:	
100°C	Hammaddenin serbest suyunun buharlaşması.
500°C ve üstü	Kil minerallerinin bağlı suyunun buharlaşması
800° -900°C	Kalsinasyon yani CaCO ₃ 'ün bozunma başlaması. CaCO ₃ › CaO + CO ₂
900°C ve üstü	Kil minerallerine ait ürünlerin kristalleşmesi.
900° -1200°C	Kalsiyum oksitle alüminasilikatlar arasında tepkimelerin oluşması.
1185° -1285°C	Trikalsiyum alüminat (3CaO. Al ₂ O ₃) ve tetra kalsiyum alümina ferrit (4CaO.Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃) oluşumu. Dikalsiyum silikat oluşumunun tamamlanması.
1250° -1280°C	Sıvı faz oluşumu başlaması.
1280°C'nin üstü	Daha fazla sıvı faz oluşumunun başlaması.

Alüminyum oksidin hepsi aşağıda görüldüğü gibi CaO ile tepkimeye girerek mono kalsiyum alüminat oluşturur (CaO+Al₂O₃›CaO.Al₂O₃). Bu basamakta silisyum dioksit de bir miktar kalsiyum oksitle tepkimeye girerek mono kalsiyum silikat oluşturur. CaO + SiO₂ › CaO. SiO₂ Oluşan bu mono kalsiyum silikat hemen daha fazla kalsiyum oksitle tepkimeye girerek, aşağıda görüldüğü gibi dikalsiyum silikat oluşturur. Fakat bu basamakta oluşan dikalsiyum silikat'ın derişimi düşüktür.



Bu sıcaklık aralığında mono kalsiyum alüminat daha fazla kalsiyum oksitle tepkimeye girerek, trikalsiyum alüminat oluşturur.



Aynı safhada bir miktar kalsiyum oksit, demir oksitle tepkimeye girerek dikalsiyum ferrit oluşturur. 2CaO + Fe₂O₃› 2CaO. Fe₂O₃

Bunu müteakip daha kompleks bir tepkime ile tetrakalsiyum alümina ferrit oluşur. CaO. Al₂O₃+ 3CaO + Fe₂O₃› 4CaO. Al₂O₃. Fe₂O₃ Endotermik Bunu müteakip

trikalsiyum silikat'ın aşağıda görüldüğü gibi oluşumu ile klinker veya çimento bileşiklerinin oluşumu tamamlanır. $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{CaO} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Muhtemelen endotermiktir. Yukarıda belirtilen tepkimeler sonucunda oluşan klinkere yaklaşık %4–5 oranında alçı taşı katılıp öğütülerek çimento elde edilir. Bu safhada puzolanik maddeler veya cüruf katılarak öğütülürse değişik katkı çimentolar elde edilir.

3.1.3. Puzolanlar

3.1.3.1. Puzolanların Tanımı ve Genel Sınıfları

Puzolan ismi, İtalya'daki Vezüv yanardağının eteklerinde bulunan "puzzuoli" isimli kasabanın isminden alınmıştır. Milattan yaklaşık 100 yıl önce, eski Romalılar, Pozzuoli kasabasının civarında volkanik kül ile söndürülmüş kirecin suyla birlikte karılmasıyla elde edilen malzemenin hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterdiğini fark etmişlerdir. O nedenle, su altında sertleşme gösterebilen bu malzeme, "puzolan" ismiyle anılmaya başlanmıştır (Günümüzde, ince taneli durumdayken söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık gösteren silisli ve alüminli malzemelerin tümü, aynı isimle anılmaktadır). Yaklaşık 2000 yıl önce Roma'da yaşayan ünlü bir mimar ve mühendis olan Vitruvius, kitaplarında, volkanik kül ve söndürülmüş kirecin suyla birleştirilmesiyle hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanıldığını açıklamaktadır. Ayrıca öğütülmüş tuğlaların (ince taneli durumdaki pişirilmiş kilin), volkanik küller gibi puzolanik özellik gösterdiği de belirtilmektedir (Vitruvius, 1960).

Volkanik küllerin ve ince taneli volkanik tüflerin kireçle ve suyla birleştirilmeleri sonunda elde edilen hidrolik bağlayıcılar eski Romalılar ve eski Yunanlılar tarafından yaygın olarak kullanılmışlardır. Bu malzemenin içerisine taş parçaları da katılarak bugünkü betona benzer betonlar üretilmiştir. İtalya'da, Fransa'da ve birçok ülkede, bu malzemelerle yaklaşık 2000 yıl önce yapılmış ve halen ayakta duran binalar ve su kanalları mevcuttur (Malinowski, 1982).

Bilim adamlarının Türkiye'de Çatalhöyük'teki eski yapılar üzerinde yaptıkları incelemelerde, bu yapılarda kullanılan harcın 8000 yıl eski olduğu ortaya çıkarılmıştır (Davidovitz, 1987). Bilindiği üzere, sadece kireç veya alçıdan elde edilen bağlayıcılar özellikle sulu ortam koşullarına karşı dayanıklı değildir ve bu bağlayıcıların bu kadar uzun süre dayanıklılık göstermeleri mümkün değildir. O nedenle, 8000 yıl eskilikteki harcın muhtemelen puzolanik malzemelerle yapıldığı anlaşılmaktadır. Bir başka deyişle,

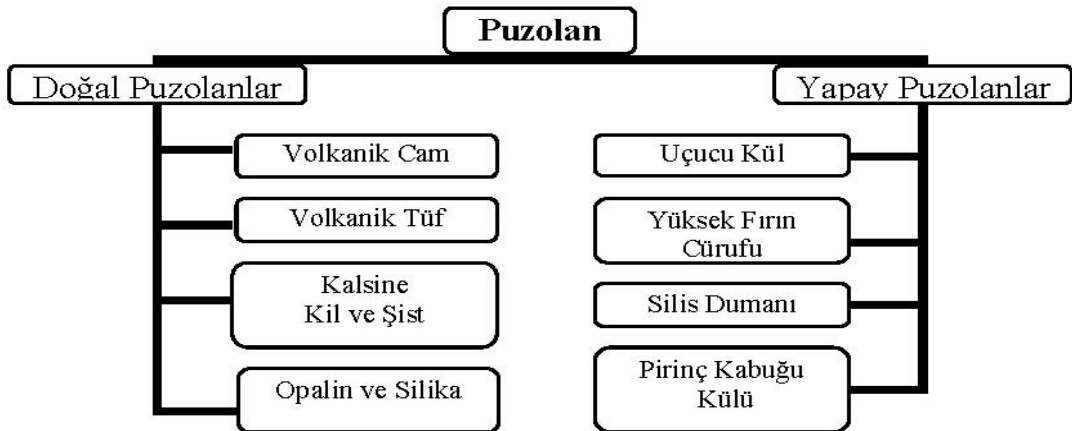
Romalılardan çok uzun yıllar önce de (bu malzemenin puzolan olarak adlandırılmasından çok önce), puzolanik malzemeler eski insanlar tarafından bir şekilde kullanım bulmuşlardır. Öğütülmüş tuğlanın (pişirilmiş kilin) ve kirecin suyla karılması sonucu elde edilen bağlayıcılarda, çok eski zamanlarda, yaygın olarak kullanılmışlardır. Bu malzemelerden yapılan harçlar, Hindistan’da “surkhi”, Mısır’da “hamra” adıyla anılmışlardır (Ramachandran, 1995). Osmanlılar dönemindeki Türkler tarafından yapılan çok önemli eserlerde de kullanılan bu harç “horasan harcı” olarak adlandırılmıştır.

Puzolanlar, “kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler” olarak tanımlanmaktadır (Astm C 125, 1994; Astm C 618, 1994).

Puzolanların yapısında büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir.

Puzolanlar iki genel gruba ayrılmaktadır (Şekil 3.10.):

1. Doğal puzolanlar; Doğada bulunan volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, ısıtılmış işlem görmüş killer ve şeyller ve diatomitli topraklar bu grup içerisindeki puzolanlardır. Zeolit bir çeşit volkanik tüfler grubuna girmektedir.
2. Yapay puzolanlar; Bunlar endüstriyel yan ürünlerdir. Uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu yapay puzolanlardır.



Şekil 3.10. Puzolanların sınıflandırılması

3.1.3.1.1. Doğal puzolanlar

Doğada bulunan ve ince taneli duruma getirildikten sonra kalsiyum hidroksit ve su ile birleştirildiklerinde hidroliz bağlayıcılık özelliği gösteren silisli ve alüminli malzemelere, doğal puzolanlar denilmektedir. Doğal puzolanlar iki ana başlık altında toplanmaktadır;

1. Volkanik orijinli doğal puzolanlar
2. Isısal oluşumlu killer, şeyller ve toprak malzemeleri (Erdoğan, 1997)

Volkanik camlar, volkanik tüfler (zeolitler de bu gruba girmektedir), traslar, diatomitli topraklar ve bazı killer ve şeyller doğal puzolanlardır. Zeolitler volkanik orijinli doğal puzolanlar sınıfındadır. Zeolitik malzemeler kireçle reaktivite gösterirler ve toz halindeki volkanik camlar gibi bağlayıcılık özellikleri gelişmiştir (Erdoğan, 1997). Doğal puzolanların sınıflandırılması Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Doğal puzolanların sınıflandırılması (Mielenz Et Al, 1986)

Aktivite Tipi	Aktivite Özellikleri
1	Volkanik cam
2	Opal
3a	Kaolinit tip kil
3b	Montmorillonit tip kil
3c	İllit tip kil
3d	Vermikülit karışık kil
3e	Attapuljit tip kil
4	Zeolit
5	Alüminyum hidrate oksitleri
6	Puzolan olmayanlar

Volkanik orijinli malzemelerin puzolanik özellik gösterebilmeleri için, çok ince taneli duruma (en az portland çimentosunun inceliğine) getirilmek üzere öğütülmeleri gerekmektedir. Öte yandan, kil, şeyl ve diatomitli toprak, önce ısı işleme tabi tutulup (pişirilip) daha sonra ince taneli duruma getirildiklerinde (öğütüldüklerinde) puzolanik özellik kazanabilmektedirler. İnce taneli durumdaki doğal puzolanların bağlayıcı olarak görev yaptıkları değişik kullanım alanları mevcuttur;

- a) Söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirilerek, çok eski zamanlarda olduğu gibi, doğrudan kullanılabilir veya
- b) Portland-puzolan tipi çimento üretiminde, portland çimentosunun klinkeri ile birlikte öğütülerek kullanılmaktadır veya
- c) Beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadırlar.

Yukarıda ilk sırada yer alan kullanım alanı, günümüzde pek yaygın değildir. Doğal puzolanlar, genellikle portland-puzolan tipi çimento ve puzolan katkılı beton üretiminde kullanılmaktadırlar. Çizelge 3.10.'da bazı doğal puzolanlarda yer alan oksit miktarları verilmektedir (Ramachandran, 1995). Buradan görülebileceği gibi, doğal puzolanların yapısını oluşturan ana oksitler, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 dür. Killerde, bu oksitlerin yanı sıra, %20 civarında CaO yer almaktadır.

Çizelge 3.10. Bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin miktarı (%) (Ramachandran, 1995).

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Alkali
Volkanik Cam	65.1	14.5	5.5	3.0	1.1	6.5
Volkanik Tüf	52.1	18.3	5.8	4.9	1.2	6.6
Diatomlu Toprak	86.0	2.3	1.8	—	0.6	0.4
Pişirilmiş Kil	42.2	16.1	7.0	21.8	1.9	1.3

Doğal puzolanların beton yapımında, uygun bir katkı maddesi olarak kullanılabilmeleri için sahip olmaları gereken fiziksel ve kimyasal özelliklere dair sınır değerler TS 25 ve ASTM C 618 nolu standartlarda belirtilmektedir (Ts 25, 1975; Astm C 618, 1994).

Bu fiziksel ve kimyasal değerler Çizelge 3.11'de belirtilmektedir.

Çizelge 3.11. Doğal puzolanların çimentoda katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için standard limit değerleri (TS 25, ASTM C 618)

FİZİKSEL LİMİTLER		TS 25	ASTM C 618
İncelik	45 mm göz açıklıklı elekten ıslak olarak elendiğinde, elek üzerinde kalan miktar, maks. %	---	34
	Özgül yüzey, Blaine Min. cm^2/gr	3000	---
Dayanım Aktivite İndeksi Min. %	7 günlük	---	75
	28 günlük	70	75
Su İhtiyacı	Kontrol numunesine kıyasla, Maks. %	---	115
KİMYASAL LİMİTLER			
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$		70.0	70.0
SO_3 , maks. %		5.0	4.0
Nemlilik, maks. %		3.0	3.0
Kızdırma kaybı, maks. %		10.0	10.0
MgO , maks. %		5.0	---
Na_2O olarak alkaliler, maks. %		1.5	1.5

3.1.3.1.2. Yapay puzolanlar

Yapay puzolanlar, kalsinasyon işlemi ile elde edilen puzolanlardır. (Mehta, 1983). Bunlar çoğunlukla endüstri artığı maddelerdir. Metal silis ve silis alaşımlarının üretiminden silis dumanı, termal elektrik güç santrallerinden uçucu kül, demir çelik endüstrisindeki font üretiminden cüruf, tarım artıklarından pirinç kapçığı külü, buğday sapı külü gibi malzemelerdir (Massazza, 1989).

—Uçucu kül: Termik santrallerde elektrik enerjisi eldesinde kullanılan kömürlerin yakılmasıyla elde edilirler. C ve F tipleri vardır. Linyit yakılmasıyla elde edilen daha fazla CaO bulunan kalkersi C tipi küller, taş kömürü yakılmasıyla elde edilen SiO₂ bulunan silisli F tipi küllerdir. Gri renkli ve küresel şekillidirler.

—Yüksek fırın cürufu: Demir üretiminde kullanılan yüksek fırında cevherden demir alındıktan sonra kalan kısımdır. Buna cüruf (letiyeye) denilmektedir. İçinde alümin, silis ve kireç bulunmaktadır.

—Silis dumanı: Elektrik ark fırınlarında hammadde olarak kullanılan kuvarzdan elde edilen bir üründür. Hava filtrelerindeki ince taneciklerdir. Amorf silis içermektedir. Akışkanlaştırıcı olarak betonun mekanik özelliklerini olumlu derecede etkilemektedir. Gri renkli, düzgün yüzeyle ve küreseldir. Yoğunluğu ~2.2 g/cm³'tür.

—Pirinç kabuğu külü: Çeltik bitkisi fabrikalarda işlenerek pirinç elde edilir. Bunun yakılması sonucunda bu kül elde edilir(Anonim, 2007).

3.1.3.2. Betonların Genel Özellikleri ile Puzolan İlişkisi

İnce taneli puzolanik katkı malzemelerinin beton özelliklerine etkileri Çizelge 3.11.'de özetlenmektedir. Belirli bir kıvam elde edebilmek için beton karışımının ihtiyacı olan su miktarı, taze betonun işlenebilme, kıvam, priz süresi ve terleme gibi özellikleri ile sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri çok önemlidir.

Aşağıda, bazı beton özelliklerinin ince taneli doğal puzolan katkıları tarafından ne şekilde etkilendiklerine dair kısa açıklamalara yer verilmektedir.

3.1.3.2.1. Beton karışım suyu ihtiyacı, işlenebilirlik

İnce taneli mineral katkıları, sabit bir çökme değeri için betonun ihtiyacı olan su miktarını genellikle biraz arttırmaktadır. Katkı maddesi olarak diyatomitli topraklar

kullanıldığında, betonun su ihtiyacı epeyce artmaktadır. Ancak, su ihtiyacındaki artma, su-azaltıcı katkı maddeleri kullanarak telafi edilebilmektedir. İnce taneli mineral katkı maddelerini betonda kullanırken, genellikle çimento ağırlığının belirli bir yüzdesi azaltılmakta ve azaltılan ağırlık kadar ince taneli mineral katkı eklenmektedir. Puzolanik malzemelerin özgül ağırlığı çimento hamurununkinden daha azdır. O nedenle, betonda kullanılan bağlayıcı maddelerin toplam hacmi (yani “çimento + puzolan” hacmi) artmaktadır. Bu durum, betondaki bağlayıcı hamurun hacmini artırmaktadır. Böylece, daha akıcı işlenebilmesi daha iyi olan bir beton elde edilebilmektedir.

3.1.3.2.2. Priz süresi

İnce taneli mineral katkı maddelerinin kullanımları durumunda genellikle, betondaki portland çimentosunun bir bölümü azaltıldığında (onun yerine ince taneli mineral katkı eklendiğinden) betonun priz süresi katkısız betondakine göre birazcık daha uzun olabilmektedir. Priz süresi, kullanılan katkı maddesinin miktarı, tipi ve inceliği tarafından etkilenmektedir.

Doğal puzolanların beton özelliklerine olumlu etkileri şunlardır:

- * Taze betonda işlenebilmeyi artırmaktadır,
- * Taze betondaki terlemeyi azaltmaktadır,
- * Betonun hidrasyon ısısını azaltmakta, böylece kütle betonlarındaki çatlama önlemektedir.
- * Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır,
- * Sertleşmiş betonun sülfatlara dayanıklılığını artırmaktadır,
- * Sertleşmiş betondaki alkali-silika reaksiyonu azaltmaktadır,
- * Ekonomiklik sağlamaktadır.

İnce taneli doğal puzolanların beton özelliklerine olumsuz etkileri şunlardır:

- * Özellikle soğuk havada taze betonun prizini geciktirmektedir,
- * Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltmaktadır,
- * Betonun daha dikkatli ve daha uzun süreyle kür edilmesi gerekmektedir,

* Hava sürüklenmiş betonların içerisine dahil edilecek sürüklenmiş hava miktarını azaltmakta, belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasını gerektirmektedir.

3.1.3.2.3. Terleme

Beton karışımında ince taneli malzemelerin yer alması durumunda, taze betonun içerisindeki katı malzemelerin yüzey alanları artmakta ve beton karışımının içerisindeki suyun katı taneler tarafından daha iyi tutulmasına yol açılmaktadır. Böylece, daha az terleme olmaktadır.

3.1.3.2.4. Hidratasyon ısı

Portland çimentosunun hidratasyonu ile açığa çıkan ısının hızı özellikle kütle betonlar için önemli olmaktadır. Hidratasyon ısı betonun sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Kütle betonda (kalınlığı 60 cm veya daha olanlarda), kullanılan çimentonun tipine ve ortam sıcaklığına bağlı olarak, betonun sıcaklığı 2-5 gün içerisinde 50°C'ye kadar yükselebilmektedir (Ramachandran, 1995). Sıcaklık artışı genişlemeye yol açmaktadır. Ancak, daha sonraki günlerde, beton sıcaklığı dışarıdaki hava sıcaklığının seviyesine düşmekte ve bunun sonucunda betonda büzülme ve çatlaklar oluşmaktadır. Puzolanik betonlarda, genellikle, beton karışımındaki çimento miktarı azaltılmakta ve onun yerine ince taneli puzolanik malzeme kullanılmaktadır. Daha az miktarda portland çimentosu kullanılması, hidratasyon ısısının daha az olmasına yol açmaktadır.

3.1.3.2.5. Sürüklenmiş hava etkisi

Donmaya karşı dayanıklılık sağlamak için kullanılan hava sürüklenmiş betonlarda, belirli miktarda sürüklenmiş hava oluşumunu elde edebilmek için kullanılan hava sürükleyici katkı maddesinin miktarı, puzolanik betonlarda daha fazla olmaktadır.

3.1.3.2.6. Dayanım

Betondaki portland çimentosu hamurunun kazanabileceği dayanım hızı ve miktarı, çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin suyla reaksiyonları sonucunda

ortaya çıkan kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin ne hızla ve ne miktarda oluştuğlarına bağlıdır. C-S-H jelleri ne kadar hızlı oluşurlarsa, dayanım o kadar yüksek olmaktadır. İnce taneli puzolanik katkıların çimento hamuru içerisinde dayanım kazanmaları, bu maddelerin çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girmeleriyle mümkün olabilmektedir. Puzolanik malzemelerle kalsiyum hidroksit ve su arasındaki reaksiyon, yeni C-S-H jellerinin oluşmasına ve dayanımın artmasına neden olmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, puzolanik beton yapımında, beton karışımında yer alacak portland çimentosu bir miktar azaltılmakta ve onun yerine puzolan eklenmektedir. Bir başka deyişle, puzolanik beton üretiminde daha az miktarda portland çimentosu kullanılmaktadır. Puzolanik betonun dayanım kazanabilmesi için, önce, puzolansız betonun yapımına kıyasla daha az miktarda kullanılmış olan portland çimentosu hidratasyon yapmaya başlamakta ve daha sonra, ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile puzolanların arasındaki reaksiyonlar yer almaktadır. İlk aşamada, puzolanik betonun içerisindeki portland çimentosunun hidratasyona başlamasıyla bağlayıcılık sağlayan bir miktar C-S-H jeli üretilmekte ve ikinci aşamada puzolanik reaksiyonların devam etmesiyle yeni C-S-H jelleri ortaya çıkmaktadır. O nedenle, puzolanik betonun ilk günlerde kazanabileceği dayanım miktarı, daha çok miktarda portland çimentosuna sahip olan puzolansız betona göre daha azdır. Ancak, puzolanik reaksiyonların oluşması ve yeni C-S-H jellerinin üretilmesiyle, puzolanik betonun nihai dayanımı, puzolansız betondan daha az olmamaktadır. Puzolanik betonun dayanım kazanma hızı ve nihai dayanımı, kullanılan puzolanların tipi ve miktarı tarafından etkilenmektedir.

3.1.3.2.7. Su geçirirliği

Betonun su geçirirliği betonun içerisinde yer alan ve birbiriyle bağlantılı olan boşluklardan kaynaklanmaktadır. Betondaki boşluk miktarı birçok faktör tarafından etkilenmektedir. Bunlar, çimento miktarı, karma suyu miktarı, agrega gradasyonu, taze betonun sıkıştırılması ve kürü gibi faktörlerdir. Araştırmacıların ortak görüşüne göre, beton yapımında kullanılan ince taneli malzeme miktarının artması, büyük boşlukların daha az miktarda yer almasına yol açmaktadır (TS 25, 1975).

3.1.2.2.8. Sülfatlara dayanıklılık

Çimento üretiminde klinkerin öğütülme safhasında klinkerle öğütülen alçı taşı, çimentonun içerisinde C_3A ana bileşeni ve su arasındaki hidrasyon reaksiyonları sonucunda yarı kararlı durumdaki kalsiyum alümino trisülfhidrat ürünü ortaya çıkmaktadır. Etrejitin, büyük genleşme kapasitesi vardır. Sertleşmiş betonun içerisine dışarıdan sülfat sızdığı takdirde, sertleşmiş çimento hamurunun yapısında bulunan kalsiyum hidroksitin bir bölümü alçı taşına dönüşmektedir. Daha sonra, alçı taşı, kalsiyum alümino monosülfhidrat ve su arasındaki reaksiyon sonucunda etrejit oluşmakta ve betonda genleşme yaratmaktadır. Puzolanik beton üretiminde, puzolan sız betona kıyasla daha az miktarda portland çimentosu kullanıldığından, betonda yer alan C_3A oranı da daha az olmaktadır. O nedenle, ince taneli puzolanların kullanıldığı ve daha az C_3A 'nın yer aldığı betonların sülfatlara karşı dayanıklılığı daha iyi olmaktadır.

3.1.3.2.9. Alkali-agrega reaksiyonu

Reaktif silika içeren agregalarla çimentonun alkalileri arasında yer alan reaksiyonlar sonucunda, sertleşmiş betonun içerisinde oluşan alkali-silika jelleri çok büyük genleşmelere yol açmaktadır. Daha az miktarda çimento ve dolayısıyla daha az miktarda alkali içeren puzolanik betonlarda, alkali-silika reaksiyonları daha az yer almaktadır.

3.1.3.2.10. Betonun ekonomikliği

Betonu oluşturan malzemeler arasında en pahalı olanı portland çimentosudur. O nedenle, daha az miktarda portland çimentosunun kullanılmasıyla elde edilen puzolanik betonlar, tamamen portland çimentosuyla yapılmış betonlara oranla daha ekonomik olmaktadır.

3.2.Yöntem

Çimento ve betonlarda bileşime giren malzemelerin ve sonuçta ortaya çıkan ürünlerinin niteliklerini anlayabilmek için bir dizi fiziksel ve kimyasal deneyler yapılmaktadır. Öyleki, bu deneylerin XRD (x-ray difraksiyonu) ve SEM (Scanning

electron microscope) ile desteklenmesi gerekir. Bu denemeler, çimentonun salt analizleri yapılabileceği gibi, çimento hamurları ve harçları üzerinde de yapılabilir. En iyisi, birden fazla yöntemin sentezine varmaktır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Kimyasal Analiz

Zeolitlerin çimentoda katkı uygunluğunun araştırılması için kimyasal analizler yapılmıştır (Çizelge 3.2). Elde edilen bu değerler dikkate alınarak zeolitin % 0, 15 ve 30 oranında PÇ 42.5 R' ye katılması uygun bulunmuştur. Kimyasal yapı, TS 197-6'da verilen değerlerle uyumaktadır. Yapılan fiziki deneylerde $MgSO_4$ içinde kür edilen % 15 Zeo katkılı sülfolara dayanımının su içinde kür edilenden fazla olmasına karşın her ikisinin de basınç dayanımlarının PÇ 42.5 Kontrol numunesinden yüksek olduğu görülmüştür.

Kireç modülünün 198.16 gibi yüksek çıkması (ilk dayanımı yüksek çimentolarda sınır değer 90-95'tir) serbest kireç oluşma olasılığını artırmaktadır. Sonuçta ise karbonasyon olayı meydana gelebilir. Serbest kirecin çimentoda bulunması, serbest kireçten kaynaklanan çimentonun bayatlama olasılığını artırır. Bu demektir ki, serbest kirecin su emme (nem alma) kabiliyeti fazladır. Zeolitin yüksek silis içermeleri nedeniyle, betonun katılaşma sürecinde açığa çıkan serbest kirecin nötrleşmesini sağlaması, en önemli özelliğidir (Kibaroglu, 2007).

Zeolitin inceliği ayrıca üzerinde durulması gereken bir husustur. Doğal üretimlerinde herhangi bir öğütmeye tabi tutulmaması ekonomik olarak avantajlı görülebilir. Türk standartlarının PÇ için verdiği incelik sınır değerlerine göre; 200 no.lu elek üzerinde en çok %1; 90 no.lu elek üzerinde ise %14 kalıntı olmalıdır. Doğal ocağından elde edilen zeolitin söz konusu değerlerinin düşüklüğü; özgül yüzeyinin $3180-3500\text{ cm}^2/\text{g}$ arasında değişmesi blaine inceliğinin iyi olduğunu gösterir. Zeolitin bu incelik değerleri ile yapılan kireçle aktivite deneyinde basınç 13 N/mm^2 ; 28 ve 180 gün itibariyle sırasıyla 44.4 ve 55.5 N/mm^2 harç dayanımına erişilmiştir. Bu değerler PÇ kontrol numunesinde daha yüksektir.

Zeolit katkılı çimentolarda su gereksinimi katkı miktarına göre değişmektedir. Buna göre katkı oranı arttıkça su miktarında nispi bir artış olacağı düşünülebilir. Çünkü zeolitin blaine inceliği çimentodan daha fazladır. Malzemelerde incelik arttıkça su gereksinimi de artar. Burada bu husus, S/B oranı 0, 40 alınarak aşmıştır.

Priz başlama ve bitim süreleri itibariyle incelemede, Zeolit katkılı çimentoların TS 24 ve ASTM C 191' de belirtilen 1- 10 saat sınırını aşmadığı görülmüştür. Ayrıca,

tüm katkılı çimento numunelerin hacimce genleşme değerleri PÇ' nin en fazla 10 mm olan sınır değerinin altındadır.

Bir puzolanda minimum CaO miktarının %63 olması gerektiği düşünülürse, zeolitin % 4,45'lik miktarı oldukça düşük olmaktadır. Bu husus aktivite deneylerinde de görüleceği üzere, daha fazla kireci bağlayabileceğini gösterir.

Çimento hidrasyonunu üzerinde etkili olan Al_2O_3 'ün PÇ Kontrol numunesiyle hemen hemen uyuşması, hacim genleşmesi yapan MgO'in şartname değerlerinin altında kalması, çimentoda etrenjit, monosülfoalüminat gibi olumsuz tuzların kaynağı olan SO_3 ün şartname değerlerinin altında olması olumludur.

Zeolit katkılı çimentolarda SiO_2 ve CaO miktarında önemli düşüşler söz konusudur. Bu husus C-S-H oluşumu için olumsuzluk sayılabilir. Özellikle %30 katkılıların fiziksel ve kimyasal değerlerinin %15 katkılıdan düşük çıkması, %30 katkılının kesinlikle uygun olmadığına yorumlanabilir. Bu demektir ki, puzolanik madde ortamdaki serbest kireci bağladıktan sonra geriye arttığı ve bünyede atıl madde olarak kaldığı düşünülebilir.

4.2. Zeolit Katkılı Çimentolarla Yapılan Hamur İncelemeleri

4.2.1. Aktivite deneyi (Puzolanik katkı uygunluğu)

Puzolanların kompozisyonu büyük ölçüde silis ve alüminden oluşmaktadır. İnce taneli durumdaki puzolanlar, söndürülmüş kireç ve su ile birleştirildiğinde, bu malzemeler arasında bir takım kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır. Kalsiyum hidroksit, silis ve su arasındaki reaksiyonlar, aynen portland çimentosunun hidrasyonunda olduğu gibi hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasına yol açmaktadır. Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği, "puzolanik aktivite" olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda "silis+alümin+demir oksit" içermesi gerekmektedir. Puzolanik aktivite, puzolanik malzemeyle yapılan deneyler sonucunda tayin edilmelidir. Puzolanik aktivite, "dayanım aktivite indeksi" olarak adlandırılan bir değer hesaplanmasıyla ifade edilmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

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

Burada,

A = Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı,

B = Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır.

Dayanım aktivite indeksinin belirli bir değerden daha az olmaması gerekmektedir.

Örneğin, doğal puzolanlar için, ASTM standartları, bu değer en az 75 olması gerektiğini belirtmektedir (Astm C 618, 1994). Türk standartlarına göre ise, bu değer en az 70 olmalıdır (Ts 25, 1975).

4.2.2. Zeolit katkıli çimento hamurlarında malzeme karışım dizaynı

Çimento hamurları 40x 40x 160 mm' lik numuneler üzerinden yapılmıştır. Üçer adetli kalıplara dökülen çimento hamurlarının malzeme karışımı Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Hamur karışım dizaynı

Karışı m No	Karışım	Karışım ve Miktarları (gr/m ³)						S/B	Yayıma (%)
		Özellik	PÇ	ZEO	SK	SU	SP		
1	% 0	SP' siz	1400	-	-	560	0	0.40	110
2	PÇ-KONTROL	SP' li	1400	-	-	560	14	0.40	111
3	%15 ZEO	SP' siz	1190	210	-	560	0	0.40	111
4	KATKILI	SP' li	1190	210	-	560	11.90	0.40	108
5	%30 ZEO	SP' siz	980	420	-	560	0	0.40	111
6	KATKILI	SP' li	980	420	-	560	9.80	0.40	112

Zeolit katkıli çimento hamurları üzerinde yapılan deneylerin numune adı (sembolleri) ve bileşimleri aşağıda verilmiştir.

Sıra numaraları ve bileşimleri:

- 1- PÇ 42.5 % 0 Zeo suda (kontrol)
- 2- PÇ 42.5 % 0 Zeo MgSO₄'ta
- 3- PÇ 42.5 % 15 Zeo suda
- 4- PÇ 42.5 % 15 Zeo MgSO₄'ta
- 5- PÇ 42.5 % 30 Zeo suda
- 6- PÇ 42.5 % 30 Zeo MgSO₄'ta
- 7- PÇ 42.5 % 0 Zeo SP'li suda
- 8- PÇ 42.5 % 0 Zeo SP'li MgSO₄'ta
- 9- PÇ 42.5 % 15 Zeo SP'li suda
- 10- PÇ 42.5 % 15 Zeo SP'li MgSO₄'ta
- 11- PÇ 42.5 % 30 Zeo SP'li suda
- 12- PÇ 42.5 % 30 Zeo SP'li MgSO₄'ta

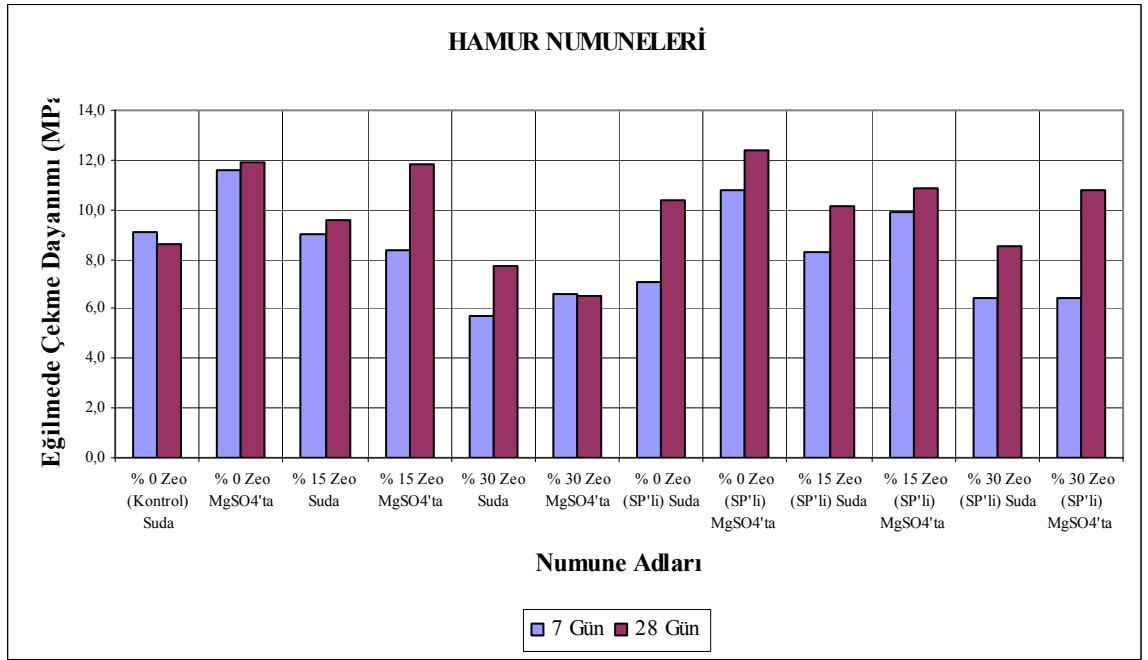
4.2.3. Zeolit katkılı çimento hamurlarının MgSO₄ direnci

Sülfatlı çözeltilerin çimento esaslı harç ve beton üzerindeki olumsuz etkilerinin ortaya çıkarılması yıllar alabilir. Bu bakımdan çimento ve katkı maddelerinin sülfat dirençlerini değerlendirebilmek için bu konuda kısa sürede sonuç alınabilecek deney yöntemlerine gereksinim vardır. Sülfat çözeltilerinin çimento hamuru üzerindeki yıpratıcı etkisi sülfat yoğunluğu ile birlikte artar ve yoğunluğa bağlı olarak korozyon mekanizması da farklılık gösterebilir. Burada S/B oranı önemli rol oynamaktadır. Optimum S/B oranı ile harç porozitesi ve puzolan katkısıyla kalsiyum hidroksit miktarındaki azalma, oluşacak hidratların daha fazla alüminyum bağlayarak oluşabilecek etrenjit miktarını azaltması, çözeltilerin harç ve beton içine nüfuz etmelerini yavaşlatır. Bu nedenle zeolit katkılı çimento hamurlarının MgSO₄ içinde dayanımına ilişkin çalışmalar yapılmıştır.

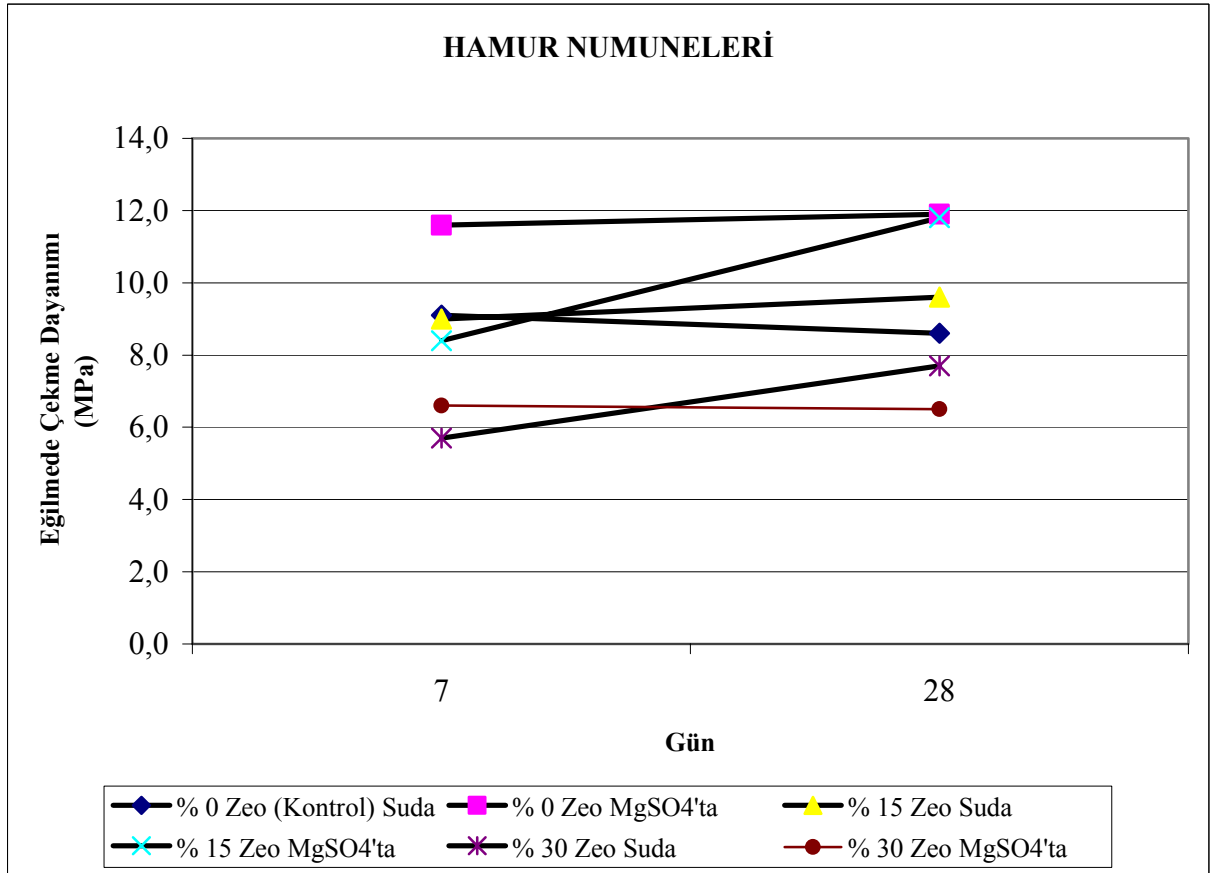
Tüm hamur numuneleri S/B= 0.40 olmak koşuluyla 40x40x160 mm.lik kalıplarla hazırlanmıştır. % 0, 15 ve 30 oranında katkılı çimentolarla 3'er adet üretilen hamur numuneleri 24 saatlik iken % 7'lik MgSO₄ çözeltilerine konulmuştur. Çözeltiler içine 7 ve 28 gün bekleyen numunelerin basınç ve eğilmede çekme dayanımları Çizelge 4.2 ile Şekil 4.1- 4.6 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.2. Zeolit katkılı çimento hamurlarda basınç dayanımları

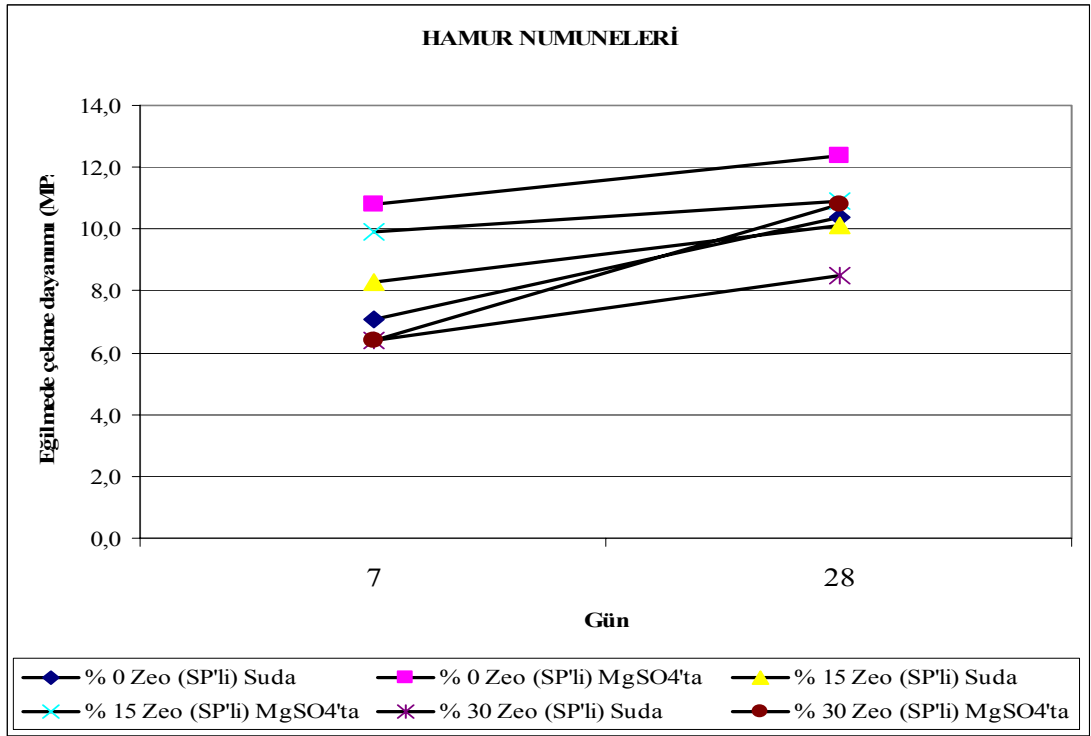
Sıra no	Sembol	Eğilmede çekme dayanımı (gün) (MPa)		Basınç dayanımı (gün) (Mpa)	
		7	28	7	28
1	% 0 Zeo (Kontrol) suda	8.6	9.1	49.6	62.3
2	% 0 Zeo MgSO ₄ 'ta	11.6	11.9	54.2	60.9
3	% 15 Zeo suda	9.0	9.6	46.5	56.3
4	% 15 Zeo MgSO ₄ 'ta	8.4	11.8	50.1	58.2
5	% 30 Zeo suda	5.7	7.7	42.3	62.1
6	% 30 Zeo MgSO ₄ 'ta	6.5	6.7	45.1	60.8
7	% 0 Zeo (SP'li) suda	7.1	10.4	47.4	55.9
8	% 0 Zeo (SP'li) MgSO ₄ 'ta	10.8	12.4	44.2	59.8
9	% 15 Zeo (SP'li) suda	8.3	10.1	44.4	62.5
10	% 15 Zeo (SP'li)MgSO ₄ 'ta	9.9	10.9	49.7	66.6
11	% 30 Zeo (SP'li) suda	6.4	8.5	45.3	55.5
12	% 30 Zeo (SP'li) MgSO ₄ 'ta	6.4	10.8	49.0	64.4



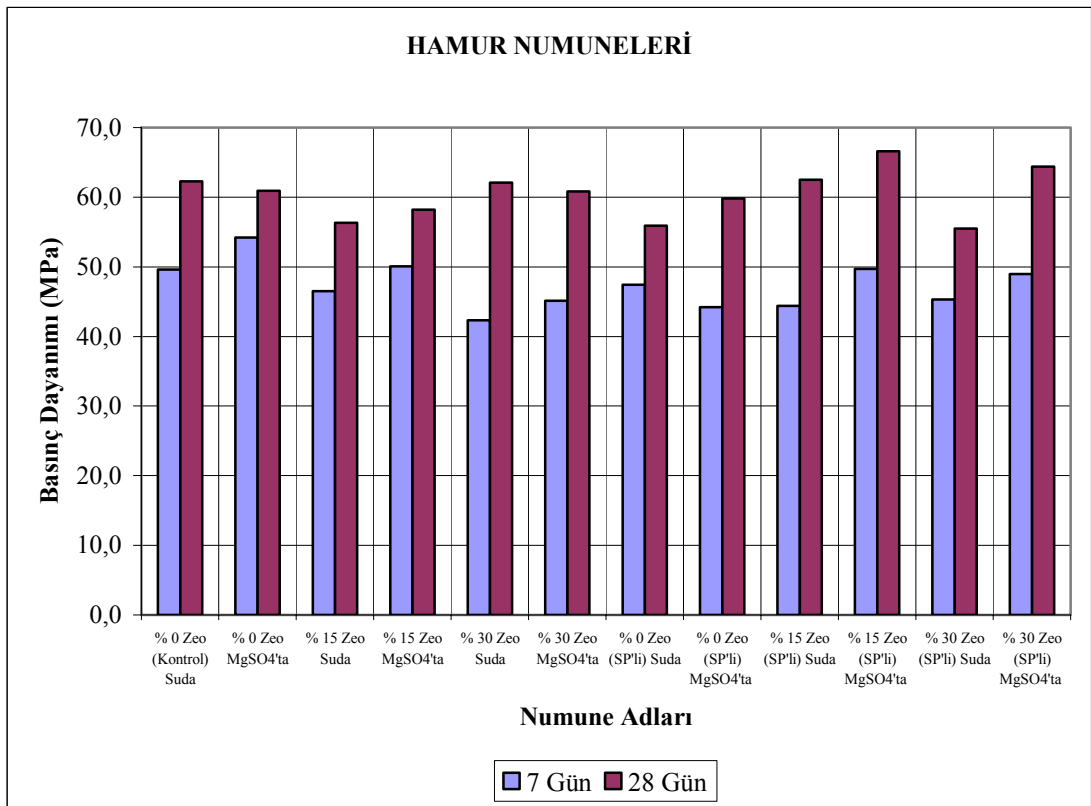
Şekil 4.1 Hamur numunelerinin eğilmede çekme dayanımı



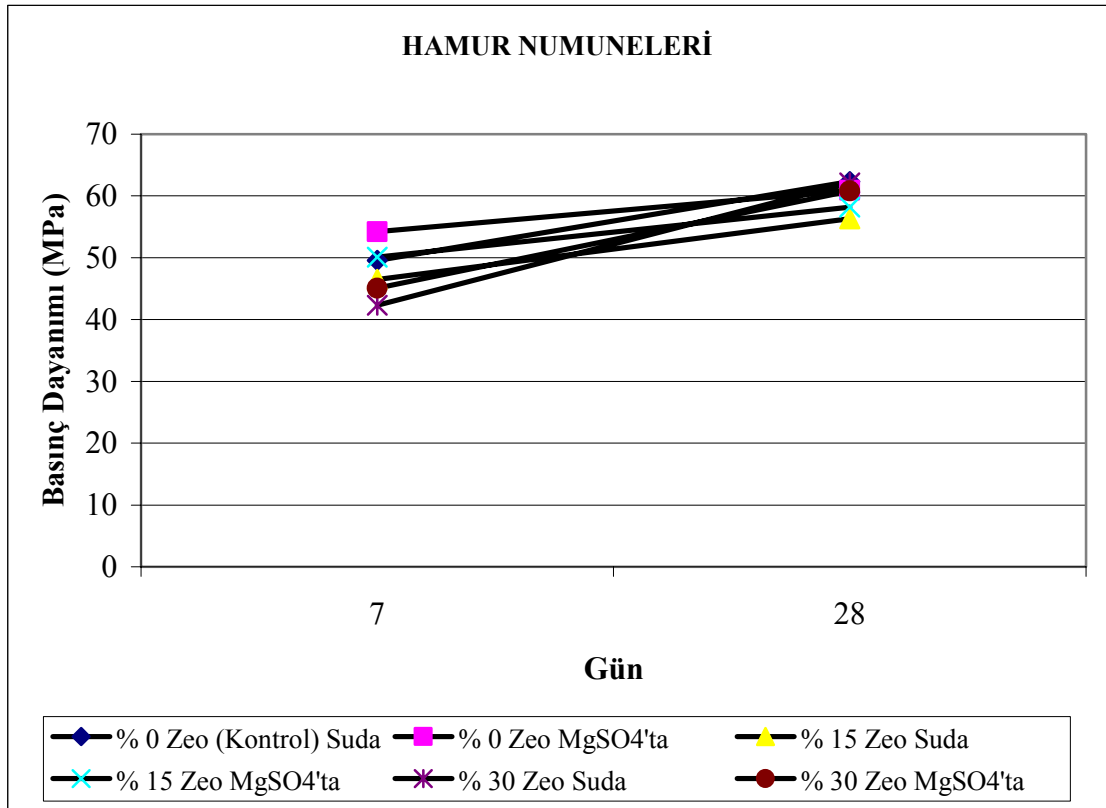
Şekil 4.2. SP'siz hamur numunelerinin eğilmede çekme dayanımı



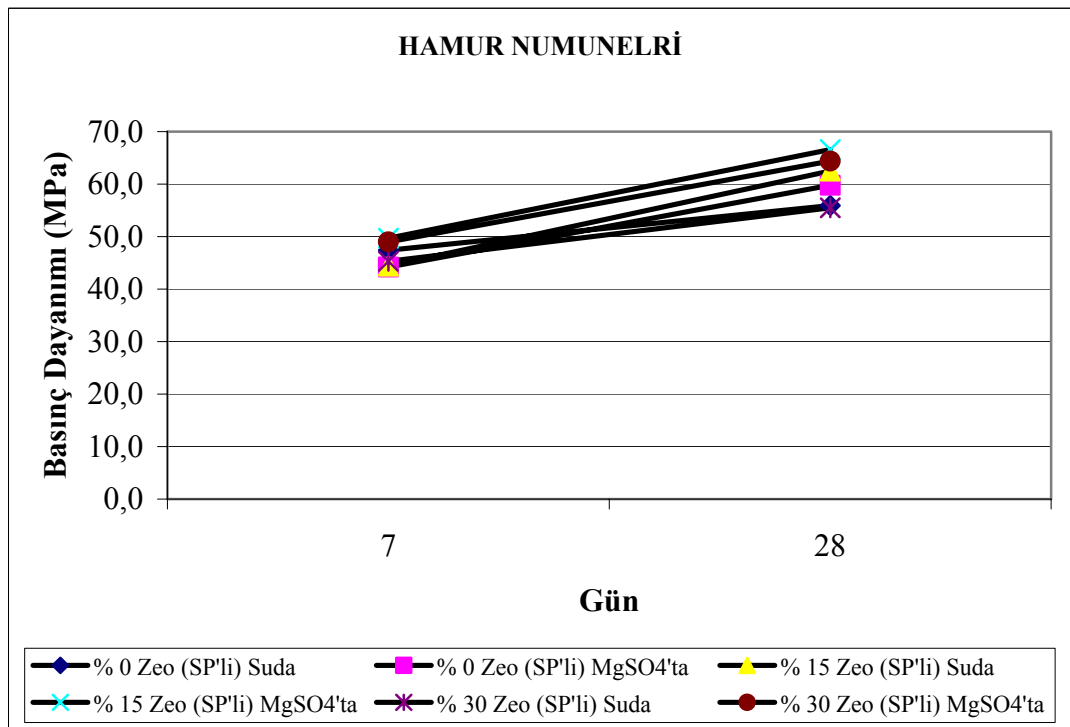
Şekil 4.3. SP'li hamur numunelerinin eğilmede çekme dayanımı



Şekil 4.4. Hamur numunelerinin basınç dayanımları



Şekil 4.5. SP'siz hamur numunelerinin basınç dayanımları



Şekil 4.6. SP'li hamur numunelerinin basınç dayanımları

4.2.4. Zeolit katkılı çimentolarda x-ray difraksiyonu iç yapı incelemesi

Çimentolarda hidratasyon ve reaksiyonların nasıl geliştiği konusunda bazı ilerlemeler sağlanmış olmakla beraber, özellikle hidratasyon ürünleri olan bileşiklerin yapıları hakkında henüz tam bir fikir birliğine varılamamıştır. Çimentoda bulunan CaO'in SiO₂ ile birleşmesiyle C₂S, C₃S₂ ve C₃S gibi kalsiyum silikatlar; CaO₂ in Al₂O₃ ile birleşmesiyle de CA, C₃A, C₃A₅ gibi kalsiyum alüminatlar oluşur.

Oluşan bu silikatlar, hegzogonal (C₂S α; C₂S α'H; C₂S α'L), monoklinik (C₂S_β) veya ortotrombik (C₂S γ) gibi değişik kristal yapılarda olabilir. Bunlardan ortotrombik kristallerin priz yapma özelliği yoktur. Herhangi bir β silikatu γ haline dönüşebilir fakat γ silikatu haline dönüşmüş olanı β haline tekrar geçemez. Bu bakımdan 20 C°'nin altında oluşmuş γ silikatları pek istenmez. Çözüm, β silikatlarının ani soğuması veya ilkel maddeler arasına B₂O₃ (Borik asit), Cr₂O₃ (Krom oksit) gibi kimyasallar karışmaktadır. Söz konusu kalsiyum silikatlar içinde en dinamik, en önemli olanı C₃S'dir. Özgül ağırlığı 3.15 g/cm³ olan bu bileşiğin içinden daha düşük sıcaklarda da olabileceği gibi, 1900 C°'de kireç ve C₂S ayrılır, fakat sonradan tekrar birleşerek C₃S'i meydana getirir"(Oymael, 1995).

Çimentolarda bulunan Ca-O atomlarının kısa bağlantıları nedeniyle bünyede bazı gerilmeler olur ve sistemin potansiyel enerjisi artar. Malzemenin içerisine su katılarak çözelti haline geçmesiyle birlikte bu enerji serbest hale geçerek hidratasyon olmaktadır. Hidratasyonla ortaya çıkan ısı ile ortamdaki fazla su buharlaşır ve priz olayı devam etmez.

Çimentonun birleşimine giren kil, Al₂O₃ bakımından zengindir. Reaksiyon anında CaO'in Al₂O₃ ile birleşmesi ile kalsiyum alüminatlar meydana gelir. Alüminatların fazla olması, deniz suyu ortamından çabuk zarar görme, prizi hızlandırma gibi sakıncaları vardır. Bu sakıncaların giderilmesi için çimentoya üretimi esnasında %2-4 oranında CaSO₄.2H₂O (alçı taşı) katılır. Çimentolarda ilk hidrate elemanları alüminatlar oluşturur ki, ince bir ağ şeklinde oluşan yapı arasındaki boşluklar yavaş yavaş C-S-H tarafından doldurulur.

Çimentolarda ilk dayanım adsorbe su ile olmaktadır. Zamanla hidratasyon ısısı arttıkça film kalınlığı azalan su, hidratasyon ve oluşma suyu haline dönüşür, dayanım da artmaya başlar (Postacıoğlu, 1986). Bir çimentoda hidratasyon için gerekli su miktarı çimento ağırlığının %24'üne tekabül eder.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında, çimentonun erken ve sonraki dayanımları üzerine zeolitın etkisini incelemek için zeolit katkılı çimentolara ait TS 24'e göre hazırlanan 28 gün süre ile su ve $MgSO_4$ çözeltisi içinde kür edilmiş hamur numuneleri, x- ışınları difaktometre cihazında ve taramalı elektron mikroskopta incelenmiştir. Elde edilen x- ışınları diyagramlarından ve elektron mikroskop resimlerinden bu çimentoların hidrasyon gelişimi incelenebilmiştir.

X- ışını difraksiyonu, taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemelerine esas olmak üzere %0, 15 ve 30 oranlarında zeolit katkılı çimentolarla hamurlar yapılmıştır. Karışımlarda S/B oranı 0,40 alınmıştır. İçinde tamamen su ve sülfat çözeltisi bulunan deney kaplarındaki numuneler 28 gün süreyle bekletilmişlerdir. Süresi gelen numune kürden çıkarılarak ve orta kesimden yaklaşık 25 g alınarak yaklaşık 5 mm büyüklüğünde kırılmıştır. Malzeme üzerine hidrasyonu durdurmak için saf aseton konularak yaklaşık 12 saat bekletilmiştir. Asetonlu numuneler etüvde 40–50 C°'de kurutulduktan sonra bir kısmı öğütülerek, diğer bir kısmı ise taneli olarak plastik şişelerde ambalajlanarak, desikatör içinde Ankara Çimento Müstahsilleri Birliği laboratuvarlarına gönderilmiştir.

Şekil 4-10'da zeolit ile hazırlanmış 28 günlük sertleşmiş hamur numunelerinin mineralojik yapısını gösteren x-ışınları difraktogramları verilmiştir.

Su içinde kür edilen numunelerin XRD diyagramları incelendiğinde, % 0 katkılı PÇ 42,5 kontrol numunesinde meydana gelen portlandit (P) miktarı %15 ve %30'da kademeli olarak azalmaktadır. Bu husus katkı miktarı arttıkça, çimentonun hidrasyon esnasında açığa çıkan portlanditin $Ca(OH)_2$ daha fazla bağladığını ve faydalı bileşik haline dönüştürüldüğünü gösterir. C-S-H (tobermorit) bakımından yapılan incelemede %0 katkılı PÇ 42.5 kontrol numunesinde en fazla C-S-H olmuş görünmekle beraber % 15 katkılıda oluşan C-S-H miktarı hemen hemen %0 katkılı (PÇ kontrol) kadar vardır. %0 ve % 15 zeolit katkılılarda Quartz minerali görülmemektedir. Buna karşın % 30'da quartz minerali görülmektedir. Bu, %30 katkılılarda, çimento bünyesine giren katkı miktarının fazla olduğuna, zaten zeolitten gelen yüksek SiO_2 'nin kireci bağladıktan sonra fazladan bünyede kaldığına, zeolitın daha serbest kireç bağlayacak miktarda olduğunu gösterir. Bu demektir ki, PÇ 42,5R çimentosuna %35 oranlarında zeolit katılırsa yine de bünyede oluşacak serbest kireç bağlanabilir.

Su içinde kür edilip de SP kimyasal kullanılmış hamurların XRD analizi SP katkısızlara göre fazla değişim göstermemektedir. SP' liler daha sık dokulu numune olmaktadır ki, bu husus basınç dayanımına tesir etmektedir.

MgSO₄ çözeltilisi içinde kür edilen hamur numunelerde, %0 katkılı (PÇ kontrol) numunesinde meydana gelen portlandit (P) ve C-S-H (C) miktarları hemen hemen %15 katkılılarda da görülmektedir. Bu quartz (Q) kristalleri %30 katkılıda artmakta ve karşılığında %30'da portlandit çok çok azalmaktadır. Bu husus, MgSO₄ çözeltilisinin zeolit katkısı üzerindeki tesir derecesinin azlığına, bir diğer ifadeyle zeolitin MgSO₄ çözeltilisine dayanımı kısmen artırdığına yorumlanabilir. % 15 zeolit katkılılarda basınç dayanımlarındaki nisbi artış bunun kanıtıdır.

MgSO₄ çözeltilisi içinde kür edilip de bileşiminde SP kimyasalı bulunan hamurların XRD analizlerinde SP katkısızlara göre dikkate değer bir değişim görülmemektedir. Numunelerdeki basınç dayanımlarındaki farklılıklardan, SP'li katkıların daha çok yararlı olduğu anlaşılmaktadır. Bunun kanıtı SEM fotoğraflarıdır.

Çizelge 4.3.'te zeolit katkılı çimento hamurlarının x-ray diyagramı bulguları ile Şekil 1-12'de bunlara ilişkin diyagramlar verilmiştir.

Çizelge 4.3. Zeolit katkılı çimento hamurlarının x-ray bulgular

Numuneler	Mineraller
PÇ 42.5 % 0 Zeo suda Şekil 1	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O]
PÇ 42.5 % 0 Zeo MgSO ₄ Şekil 2	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O]
PÇ 42.5 % 15 Zeo suda Şekil 3	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O] Feldispat [(K,Na)AlSi ₃ O ₈] Quartz (SiO ₂)
PÇ 42.5 % 15 Zeo MgSO ₄ Şekil 4	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O] Quartz (SiO ₂) Feldispat [(K,Na)AlSi ₃ O ₈]
PÇ 42.5 % 30 Zeo suda Şekil 5	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O] Quartz (SiO ₂) Feldispat [(K,Na)AlSi ₃ O ₈]
PÇ 42.5 % 30 Zeo MgSO ₄ Şekil 6	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O] Quartz (SiO ₂) Feldispat [(K,Na)AlSi ₃ O ₈]
PÇ 42.5 % 0 Zeo suda SP'li Şekil 7	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O]
PÇ 42.5 % 0 Zeo MgSO ₄ SP'li Şekil 8	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O]
PÇ 42.5 % 15 Zeo suda SP'li Şekil 9	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O] Quartz (SiO ₂)

PC 42.5 % 15 Zeo MgSO ₄ SP'li Şekil 10	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O] Quartz (SiO ₂)
PC 42.5 % 30 Zeo suda SP'li Şekil 11	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O] Quartz (SiO ₂) Feldispat [(K,Na)AlSi ₃ O ₈]
PC 42.5 % 30 Zeo MgSO ₄ SP'li Şekil 12	Portlandite [Ca(OH) ₂] C-S-H jeli [Ca ₅ Si ₆ (O,OH) ₁₈ . 5 H ₂ O] Quartz (SiO ₂) Feldispat [(K,Na)AlSi ₃ O ₈]

TÇMB Rapor No.0411, 05.04.2007.

4.2.5. Zeolit katkılı çimento hamurlarının SEM (Scanning electron microscope) iç yapı incelemeleri

Çimento pastası (hamuru) numunelerinin mikroyapısal özellikleri, tarama elektron mikroskobunda (LEO 435VP), ikincil elektron görüntüsü yöntemiyle incelenmiştir. İnceleme sonuçları aşağıda verilmiştir. Bunlar su içinde kür edilen, MgSO₄ içinde kür edilen olarak ayrılıp bunların x-ray difraktogramları ve bunlara ait Sem fotoğrafları verilmiştir. Sonuçta incelenen numunelerde, çimentonun başlıca hidratasyon ürünlerinin kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum hidroksit (portlandit), kalsiyum sülfalüminat (etrenjit) meydana geldiği görülmüştür. Özellikle, MgSO₄'lı suda bekletilen numunelerde, etrenjit oluşumu, diğer numunelere kıyasla daha belirgindir. Zeolitli ve zeolit-süperakışkanlaştırıcı numuneler arasındaki fark da, zeolit-süperakışkanlaştırıcı pastaların biraz daha yoğun yapıda olmasıdır. (Tçmb Rapor no. 0411, 2007).

SEM ile içyapı incelemeleri; SEM mikro yapısı incelendiğinde, dağınık ve prizmatik şekilli beyaz lekeler halinde portlandit [Ca(OH)₂] geliştiği görülür. Bu gelişim %15 zeolit katkılıda kısmen azalır gibi görünmesine karşın %30 katkılıda en alt düzeye inmektedir.

%15'ten %30'a doğru zeolit katkı oranı değiştiğinde, bünyedeki C-S-H miktarının kısmen azaldığı, buna karşın (Q) kuartz kristallerinin ortamda yer aldığı görülür.

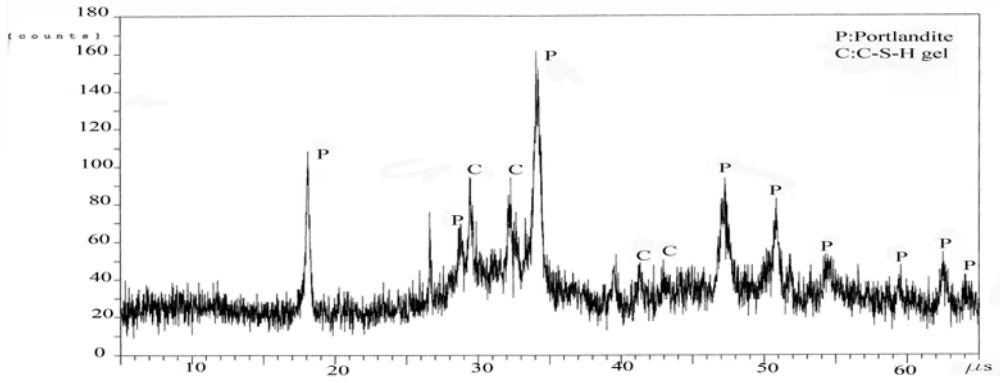
MgSO₄ çözümlü ortamlarda kür edilenlerde (Q) kuartz kristallerinin %15'ten %30'a doğru arttığı görülür. Bu artış su içinde kür edilenlerden daha fazladır. Burada

MgSO₄ çözeltilisinin özellikle (P) portlandit üzerinde yıpratıcı etki yaptığı, (Q) kuartz üzerindeki etkisinin ihmal edilir düzeyde olduğunu gösterir.

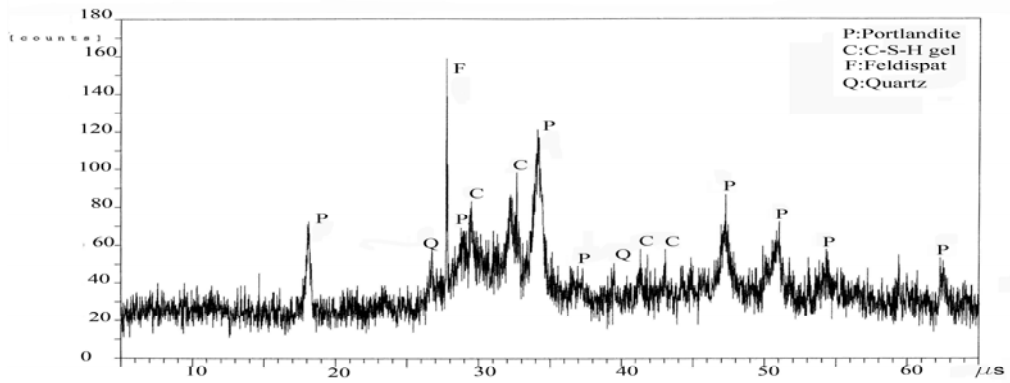
Bileşiminde SP kullanılmış olan yukarıda (Q) kuartz gelişimi ile ilgili verilen yargılar doğrulanmaktadır. SP katkılı ve katkısız tüm numunelerde C-S-H'nin hangisinde daha fazla geliştiği konusunda tam bir yargıya varılamamakla beraber SP katkılıların genelde daha sık bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu husus TÇMB raporu ile de doğrulanmaktadır (Tçmb Rapor No: 0411, 2007).

Numunelerin yaşının daha da artması ile C-S-H miktarının ne yönde gelişeceği özellikle MgSO₄'lı numunelerde incelenmelidir.

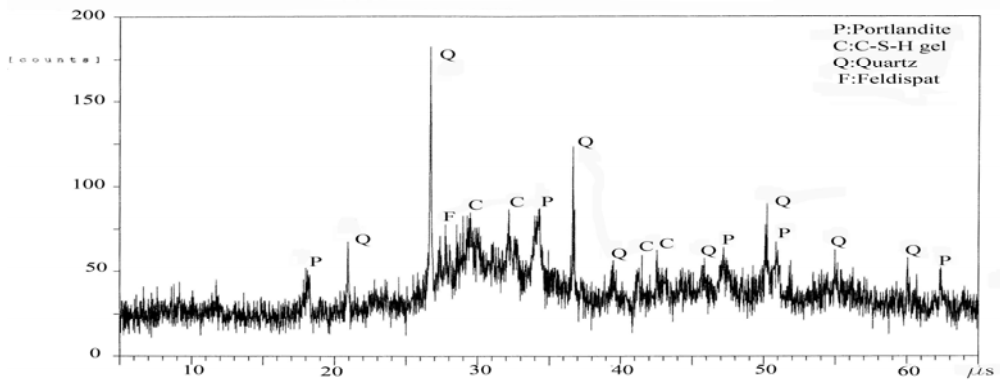
Portlandit, beton içinde zararlı bir unsur olarak görülen etrenjit oluşumuna benzer bir özellik taşır. Zararlılık özelliği, çimento ve beton içinde çözülebilir, donatıda korozyon yapabilir özelliğinden gelmektedir. Meydana gelen bu zayıf doku harç ve beton bünyede porozitenin ayrıca baş sebebi olarak da görülür. Buradaki bulgular genellikle Oymael' in bir çalışması ile benzerlikler göstermektedir (Oymael, 2007).



a



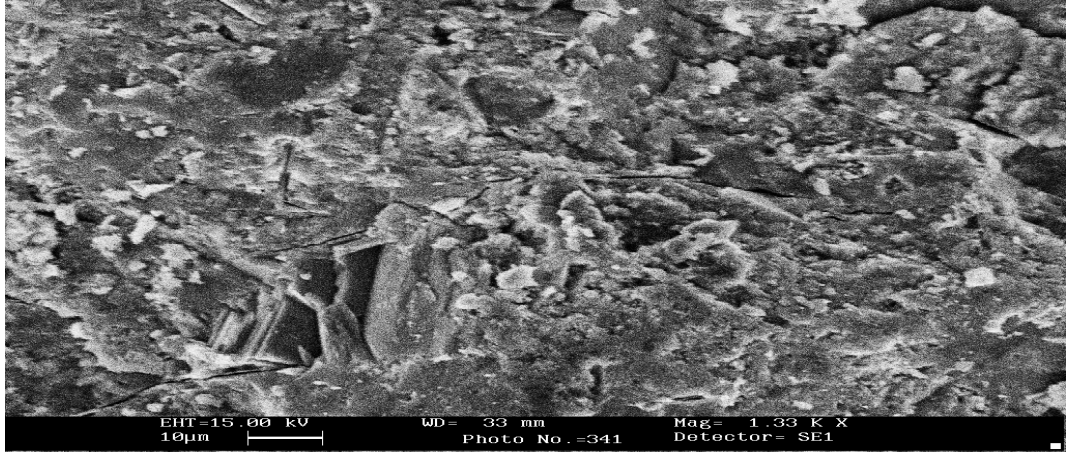
b



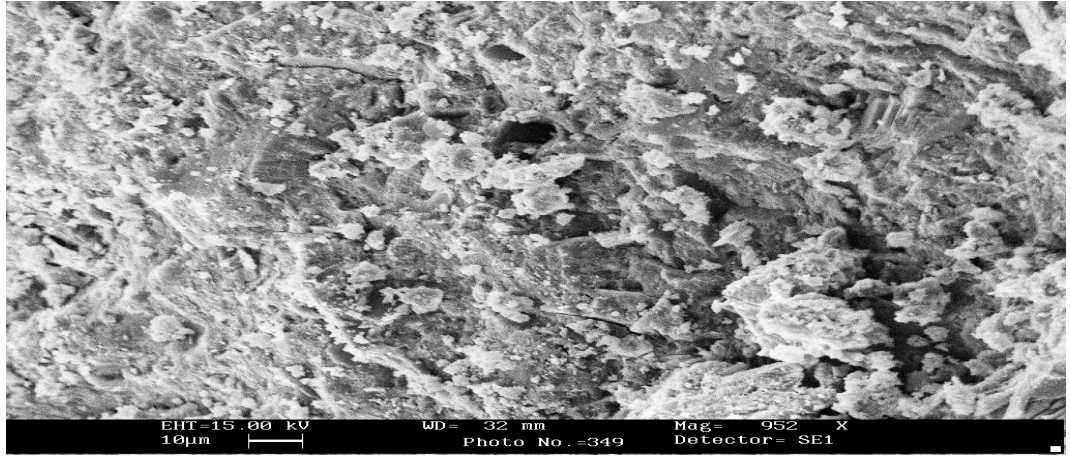
c

Şekil 4.7. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkıli çimentolu hamurların 28 günlük x-ışınları difraktometresi (XRD)

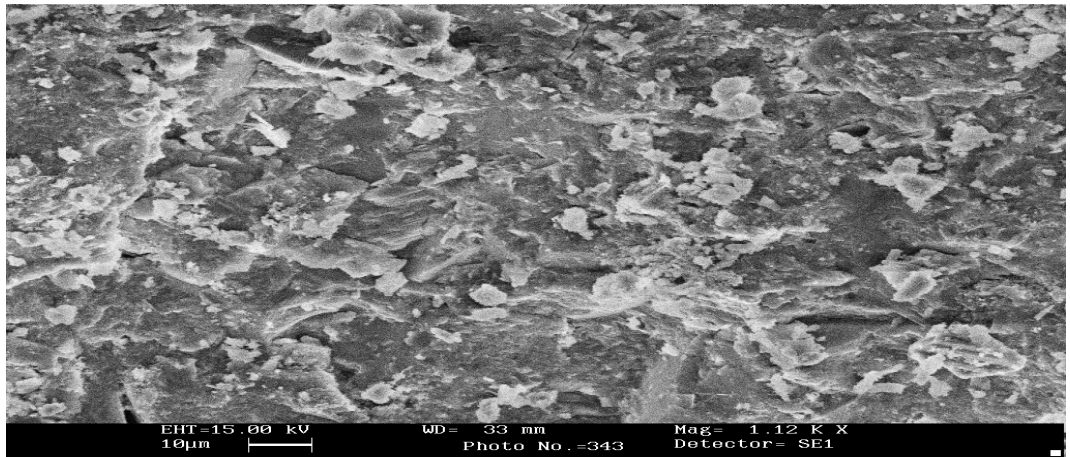
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkıli c) % 30 zeolit katkıli



a



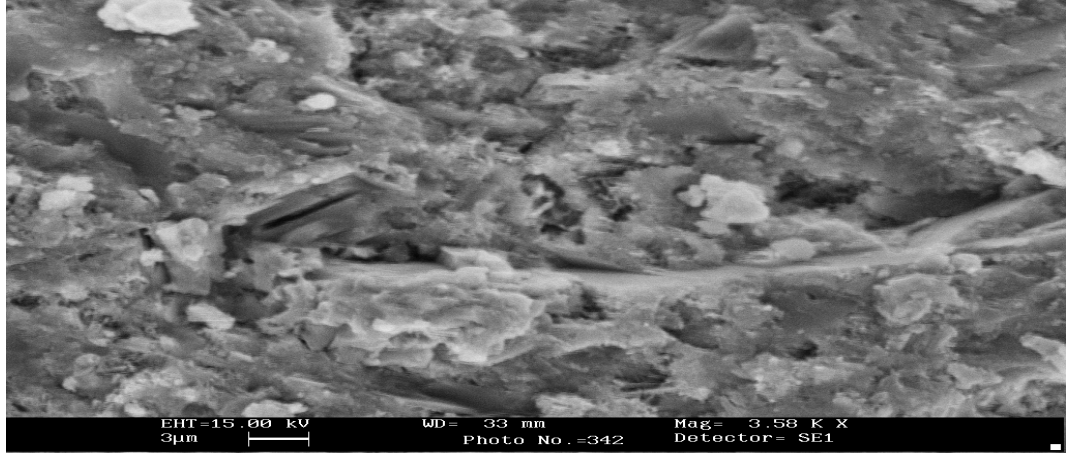
b



c

Şekil 4.8. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkıli çimentolu hamurların 28 günlük X 100 büyütme SEM incelemesi

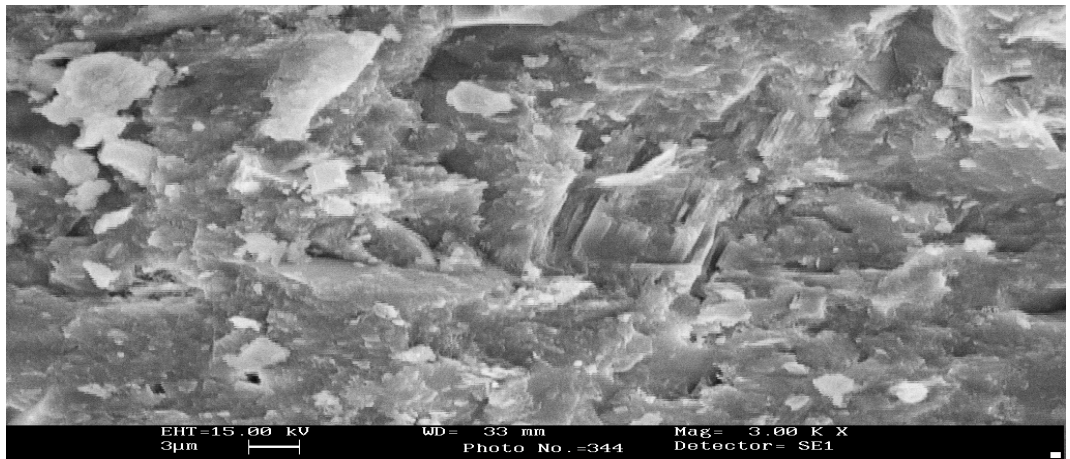
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkıli c) % 30 zeolit katkıli



a



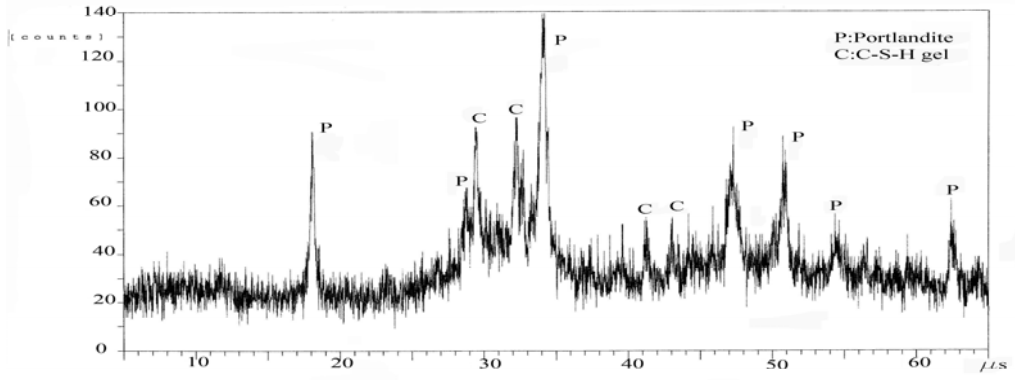
b



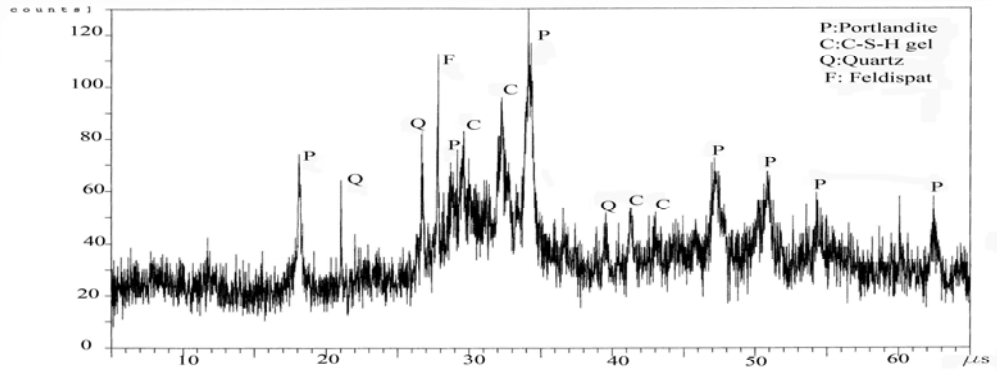
c

Şekil 4.9. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkıli çimentolu hamurların 28 günlük X 300 büyütme SEM incelemesi

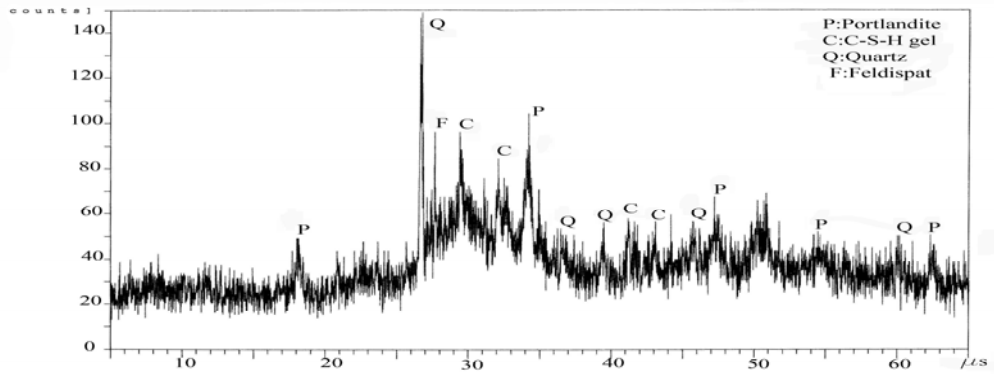
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkıli c) % 30 zeolit katkıli



a



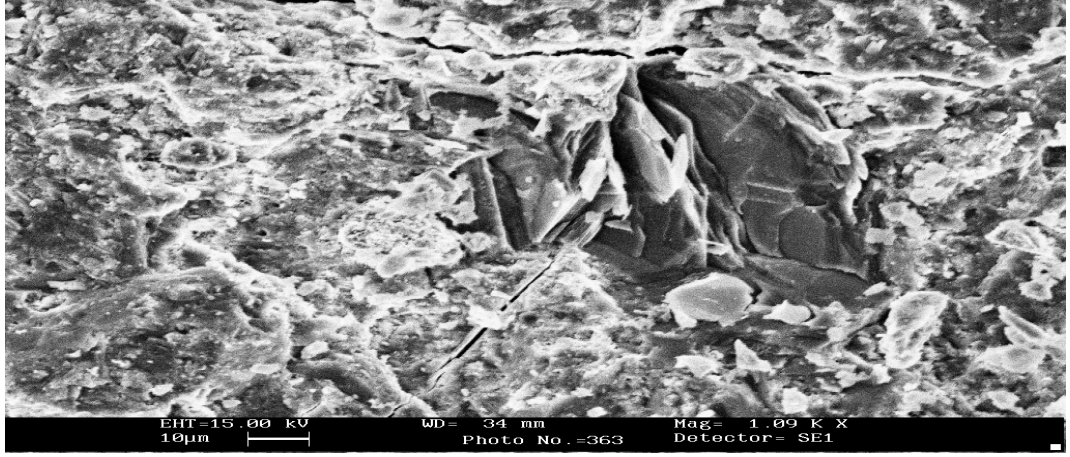
b



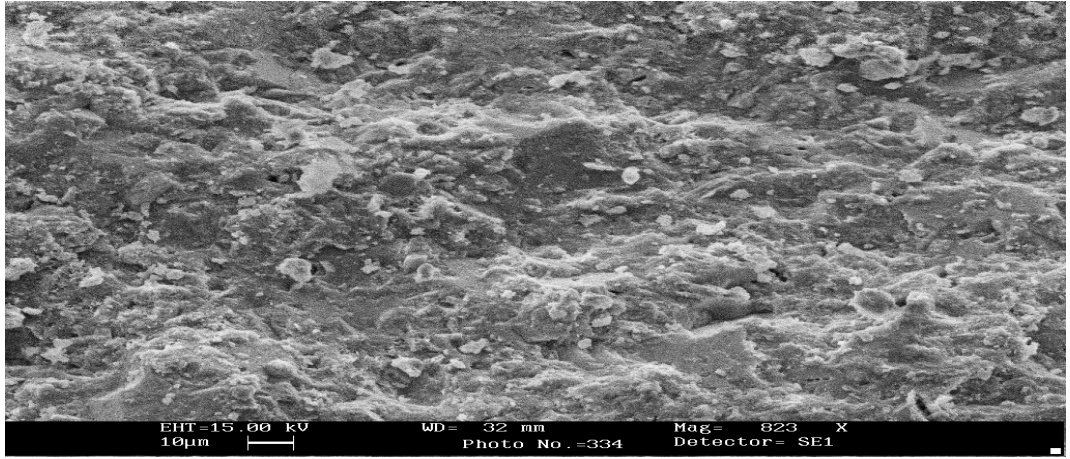
c

Şekil 4.10. $MgSO_4$ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkıli çimentolu hamurların 28 günlük x-ışınları difraktometresi (XRD)

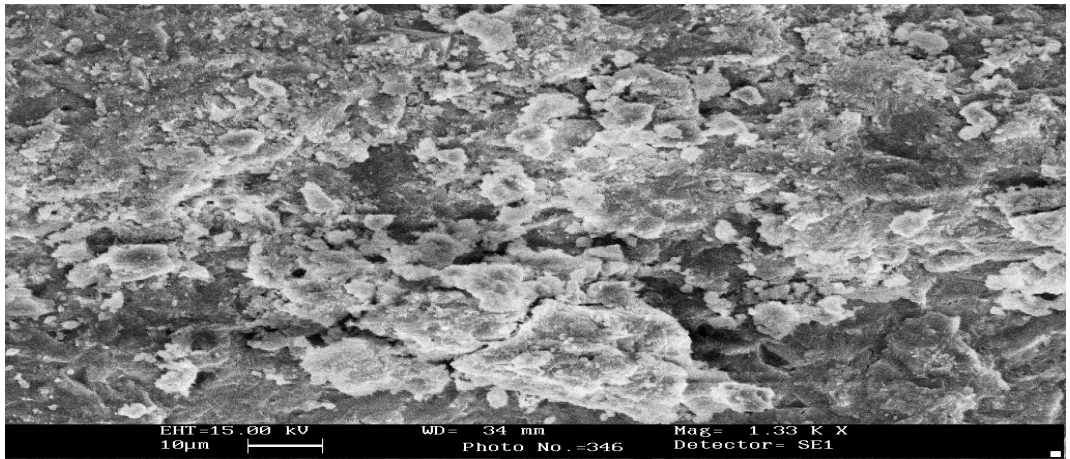
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkıli c) % 30 zeolit katkıli



a



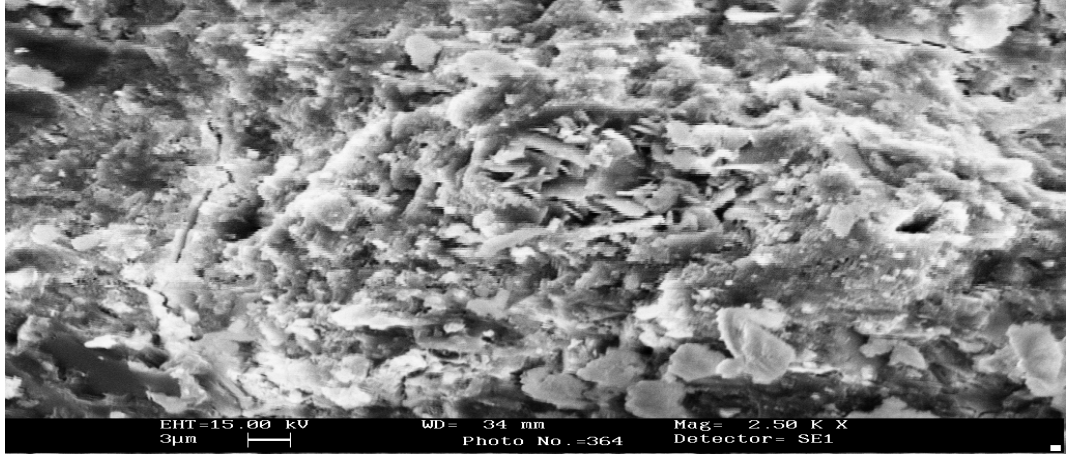
b



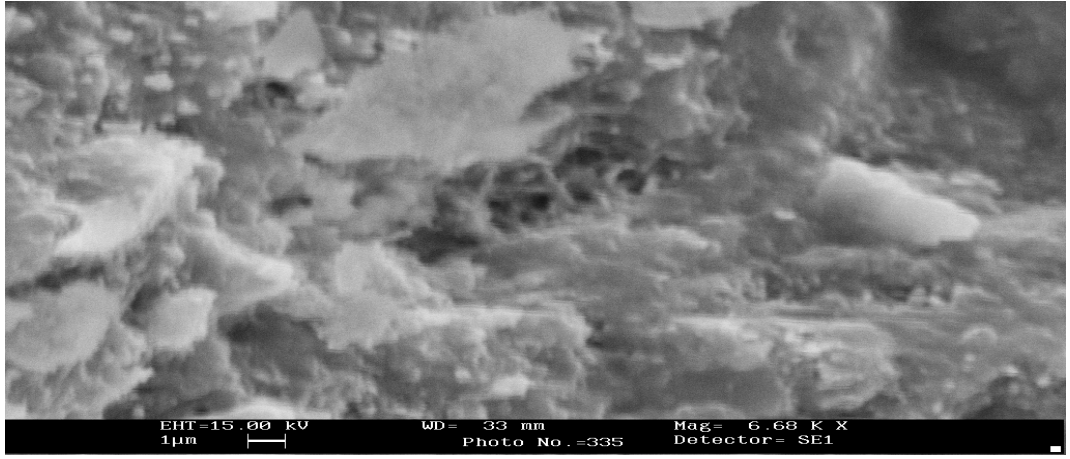
c

Şekil 4.11. $MgSO_4$ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkıli çimentolu hamurların 28 günlük X 100 büyütme SEM incelemesi

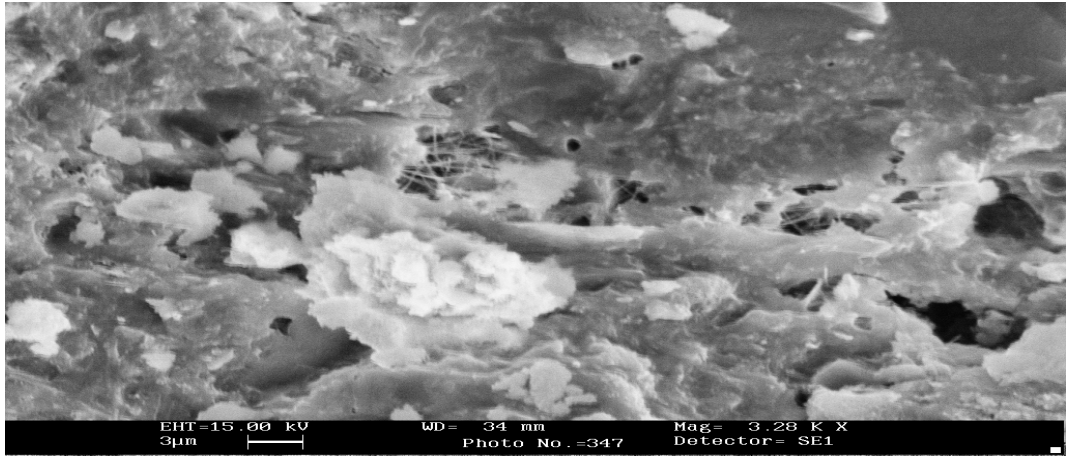
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkıli c) % 30 zeolit katkıli



a



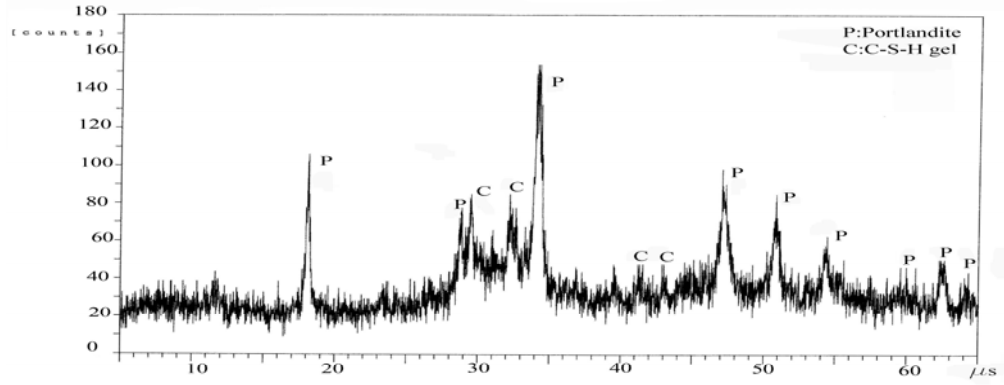
b



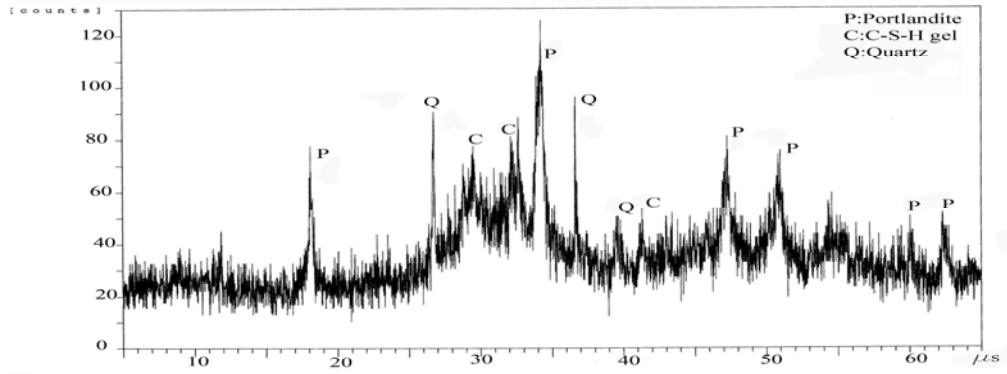
c

Şekil 4.12. $MgSO_4$ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük X 300 büyütme SEM incelemesi

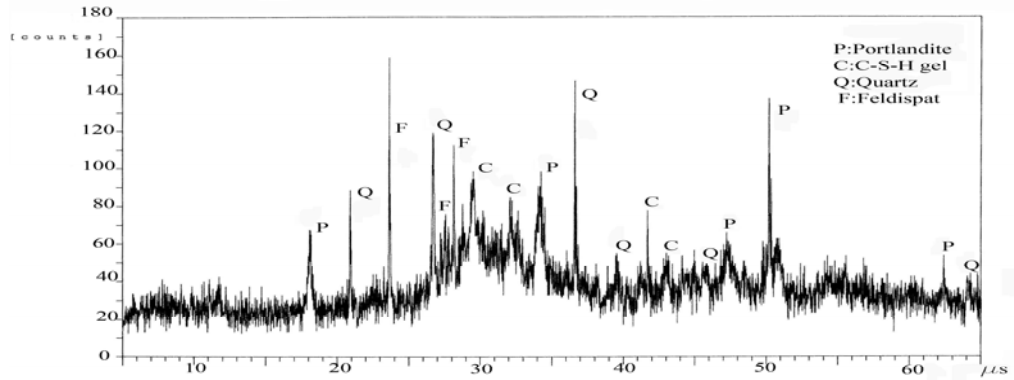
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkılı c) % 30 zeolit katkılı



a



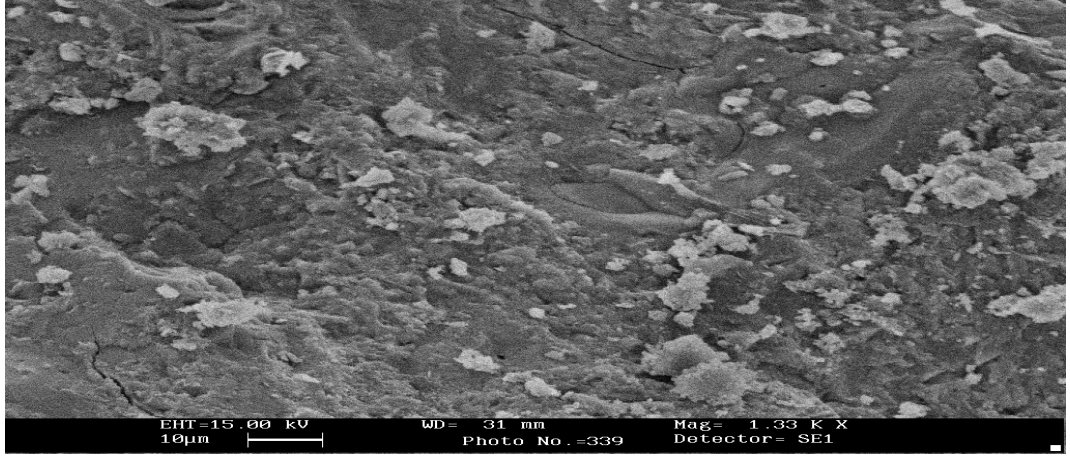
b



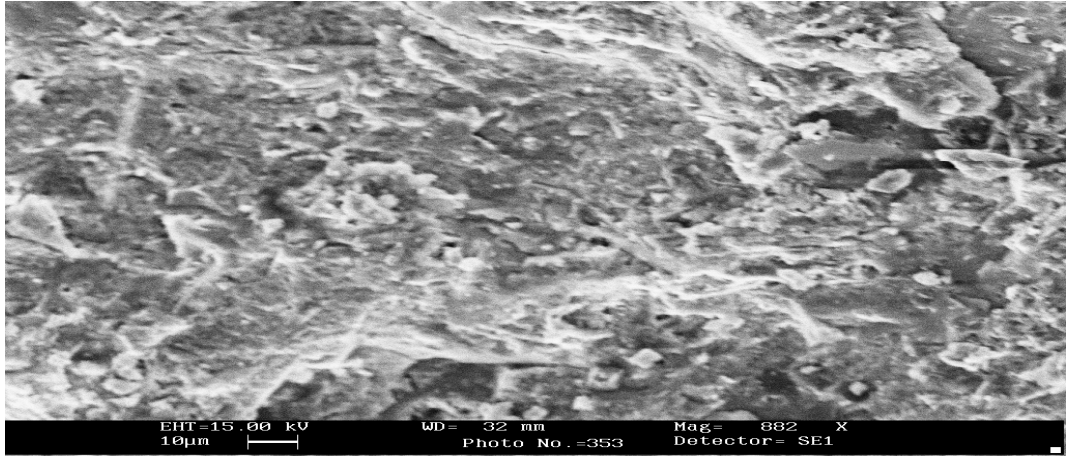
c

Şekil 4.13. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı ve SP'li 28 günlük çimentolu hamurların x-ışınları difraktometresi (XRD)

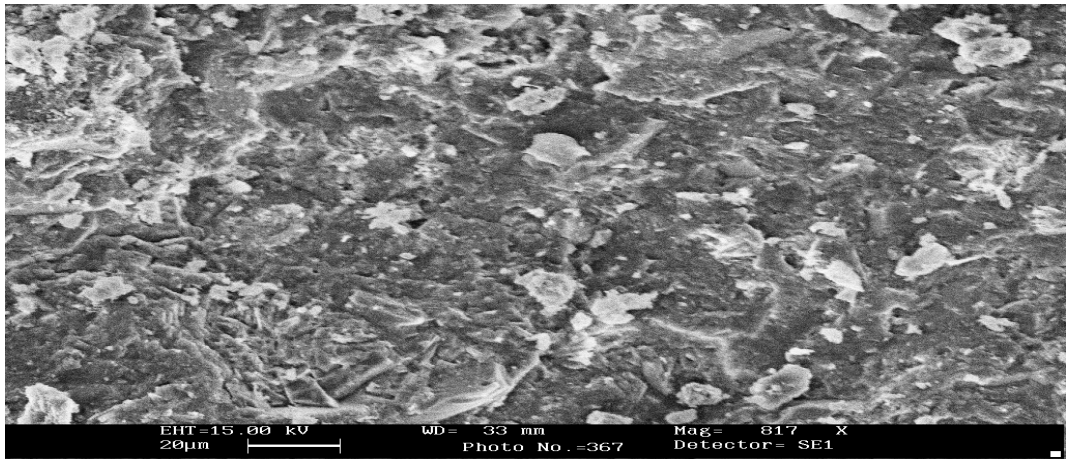
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkılı c) % 30 zeolit katkılı



a



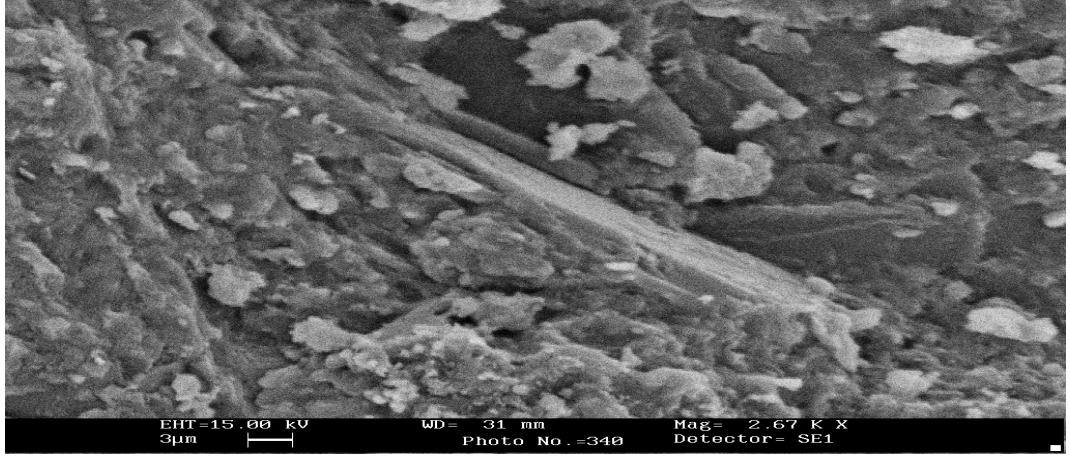
b



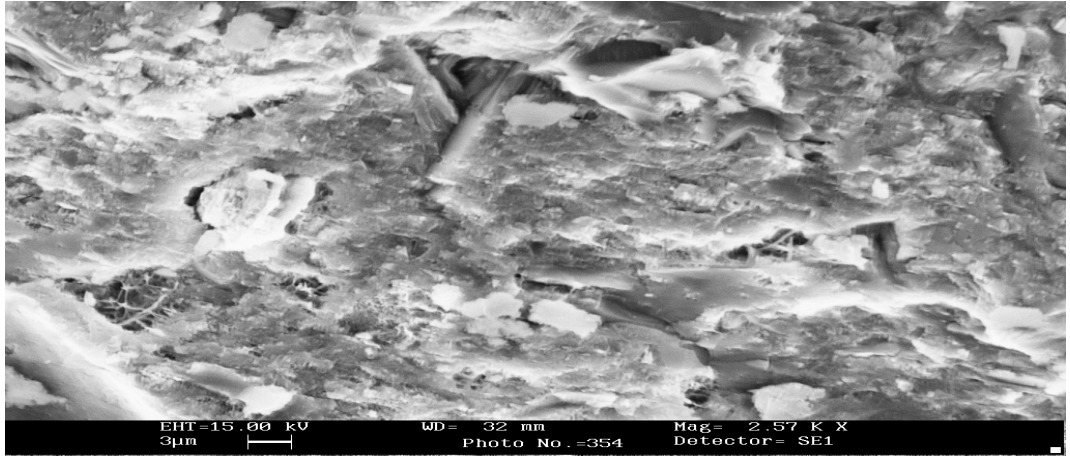
c

Şekil 4.14. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı ve SP'li 28 günlük çimentolu hamurların X 100 büyütme SEM incelemesi

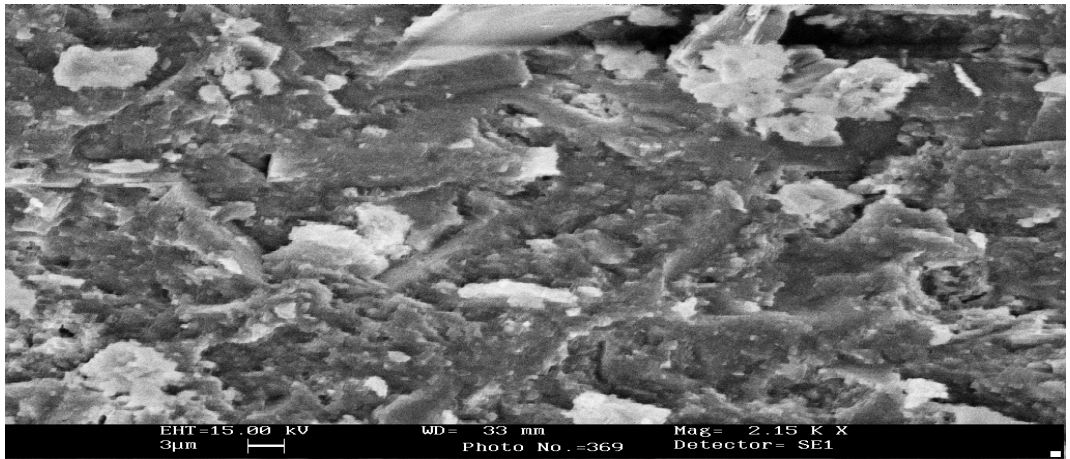
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkılı c) % 30 zeolit katkılı



a



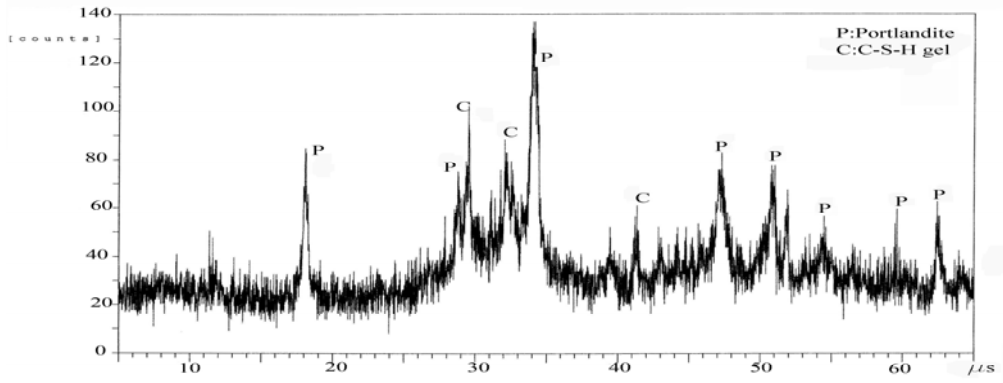
b



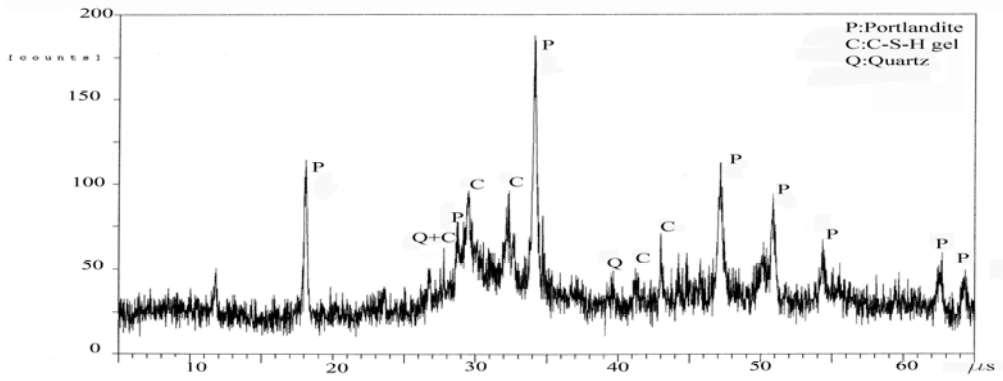
c

Şekil 4.15. Su içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı ve SP'li 28 günlük çimentolu hamurların X 300 büyütme SEM incelemesi

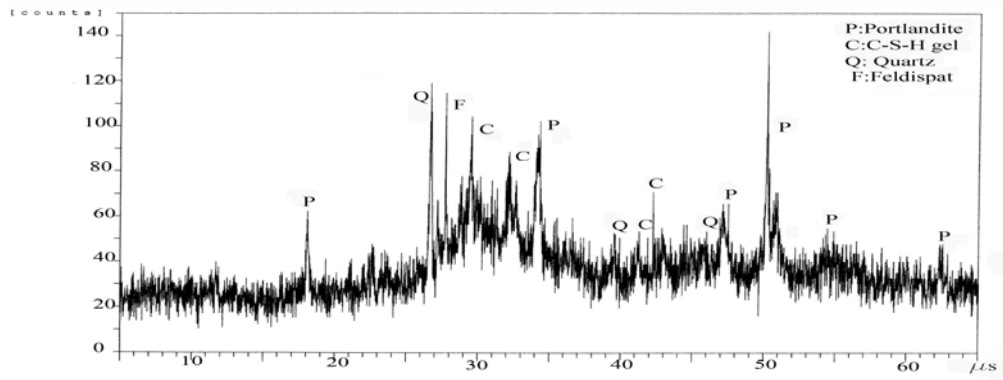
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkılı c) % 30 zeolit katkılı



a



b



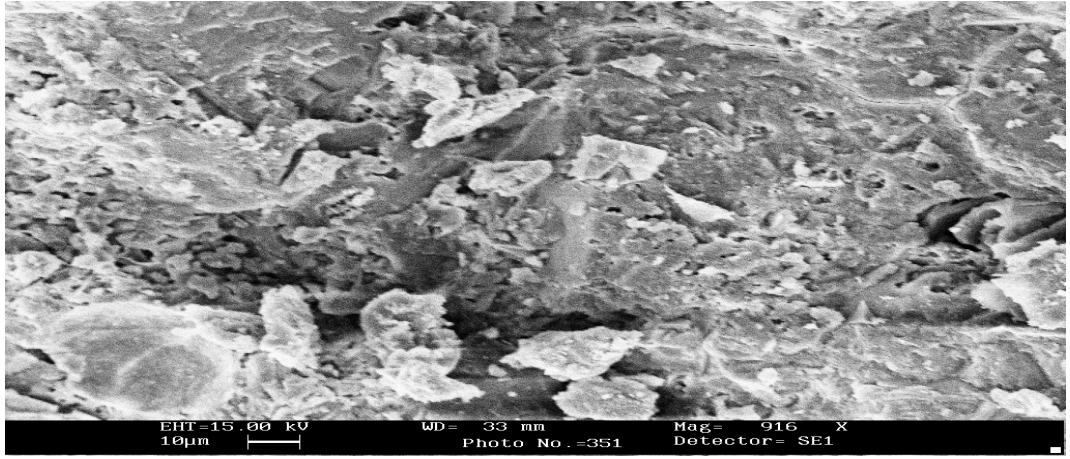
c

Şekil 4.16. $MgSO_4$ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkıli SP'li 28 günlük çimentolu hamurların x-ışınları difraktometresi (XRD)

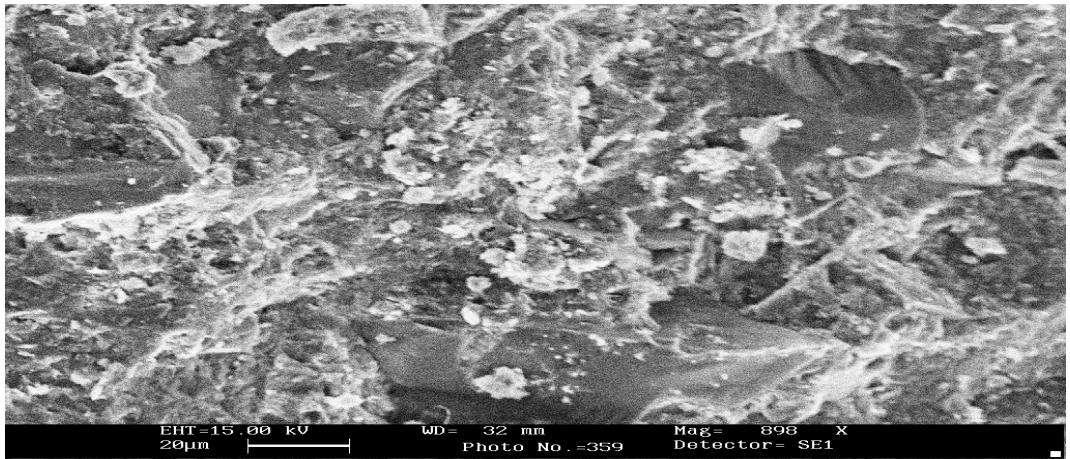
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkıli c) % 30 zeolit katkıli



a



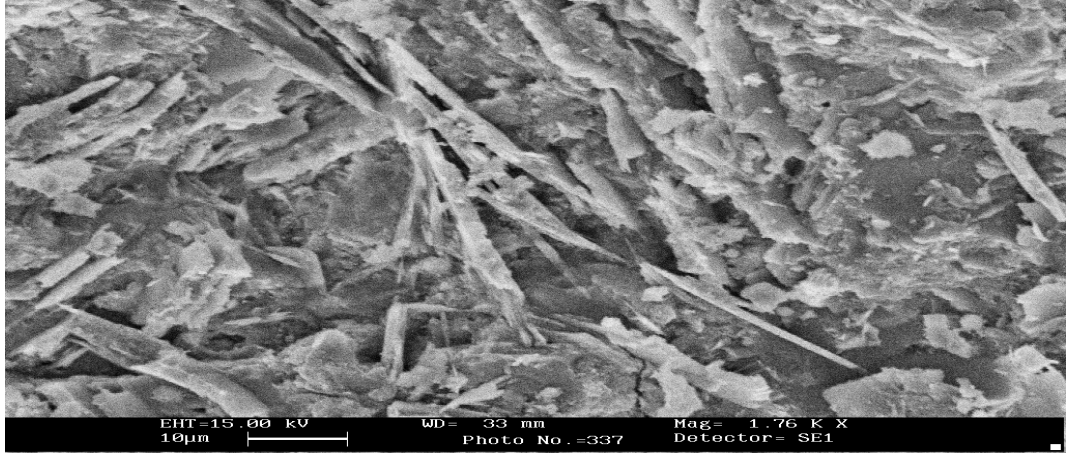
b



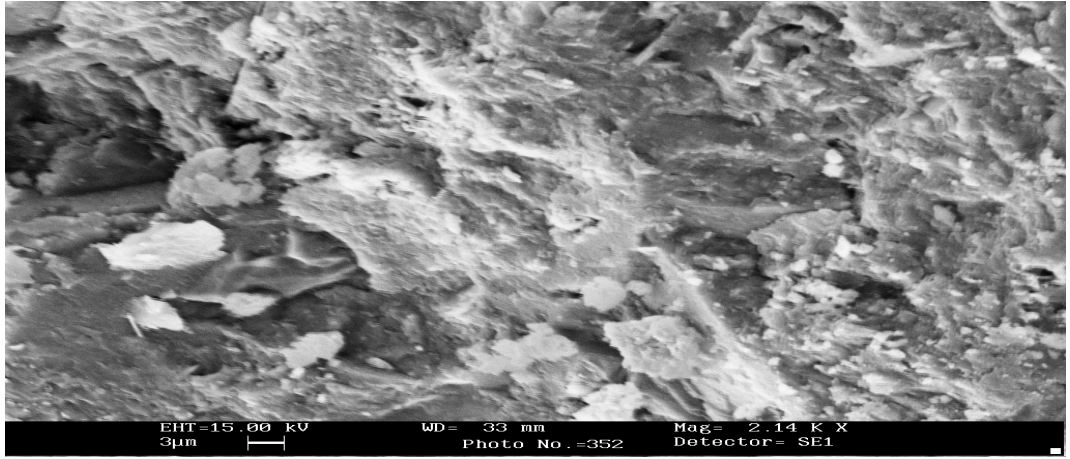
c

Şekil 4.17. $MgSO_4$ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük X 100 büyütme SEM incelemesi

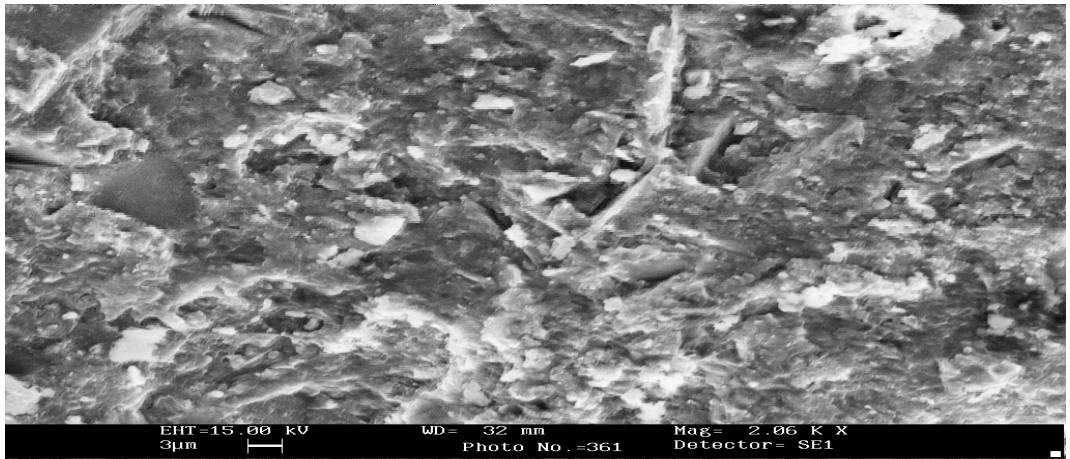
a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkılı c) % 30 zeolit katkılı



a



b



c

Şekil 4.18. $MgSO_4$ içinde kür edilen %0, %15 ve %30 zeolit katkılı çimentolu hamurların 28 günlük X 300 büyütme SEM incelemesi

a) % 0 zeolit PÇ Kontrol b) % 15 zeolit katkılı c) % 30 zeolit katkılı

4.3. Zeolit Katkılı Çimentolarla Yapılan Harç İncelemeleri

Beton, sülfatlı sular gibi tahrip edici (agresif) ortamlarda dayanıklılık (durabilite) bakımından sorunludur. Özellikle deniz suları gibi bazı sularda mevcut olan sülfatlar, betonun bünyesindeki sertleşmiş çimento hamuruyla tepkimeye girmektedir. Bu tepkime nedeniyle beton genleştiğinden çatlamakta ve tahrip olmaktadır. Bu durum betonların sülfatlara karşı performansların artırmayı gerektirmektedir. Bir beton sülfatlara dayanıklılığı, geçirimsizliği ile üretiminde kullanılan çimentonun özelliklerine bağlıdır. Teknik literatürde bileşiminde %5'ten az C_3A ve %25'ten az $2C_3A + C_4AF$ bulunan çimentoların sülfatlara dayanıklı olduğu kabul edilmektedir (ASTM C150-02, 2002). Bilindiği üzere, çimentoların hidrasyon ürünleri miktar ve özellikleri yönünden birbirinden farklı olduğundan sülfatlara dayanıklılık beton üretiminde kullanılacak uygun çimento seçimi konusunda bugün pek çok araştırmalar yapılmıştır (Erdoğan, 2003).

Harç incelemelerine esas olmak üzere, hazırlanan 40x40x160 mm.lik numunelerde kullanılan harcın karışım miktarları Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Karışımlarda çimentonun ağırlığının bir kısmı yerine olmak üzere, % 0, % 15, % 30 oranlarında zeolit kullanılmıştır.

Çizelge 4.4. Harç Karışım Dizayını

Karışım No	Karışım	Karışım ve Miktarları (gr/m ³)						S/B	Yayılma (%)
		Özellik	PÇ	ZEO	SK	SU	SP		
1	% 0	SP' siz	562.5	-	1350	225	0	0.40	110
2	PÇ-KONTROL	SP' li	562.5	-	1350	225	5.625	0.40	111
3	%15 ZEO	SP' siz	478.1	84.4	1350	225	0	0.40	111
4	KATKILI	SP' li	478.1	84.4	1350	225	4.781	0.40	108
5	%30 ZEO	SP' siz	393.8	168.7	1350	225	0	0.40	111
6	KATKILI	SP' li	393.8	168.7	1350	225	3.938	0.40	112

Çizelge halinde verilen bu karışım miktarları 350 kg/m³ çimento, 1950 kg/m³ kum ve 175 l/m³ içme suyu miktarlarına karşılık gelmektedir. Kıvam tayininde TS 3322'ye uygun sarsma tablası kullanılmıştır. Bu deneyle belirlenen yayılma % 105–115 arasında istenmiştir.

Mikserle karılan çimentolu harç numuneleri (mikrobeton), kalıplara otomatik sarsma makinesiyle yerleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında 24 saat bekletildikten sonra

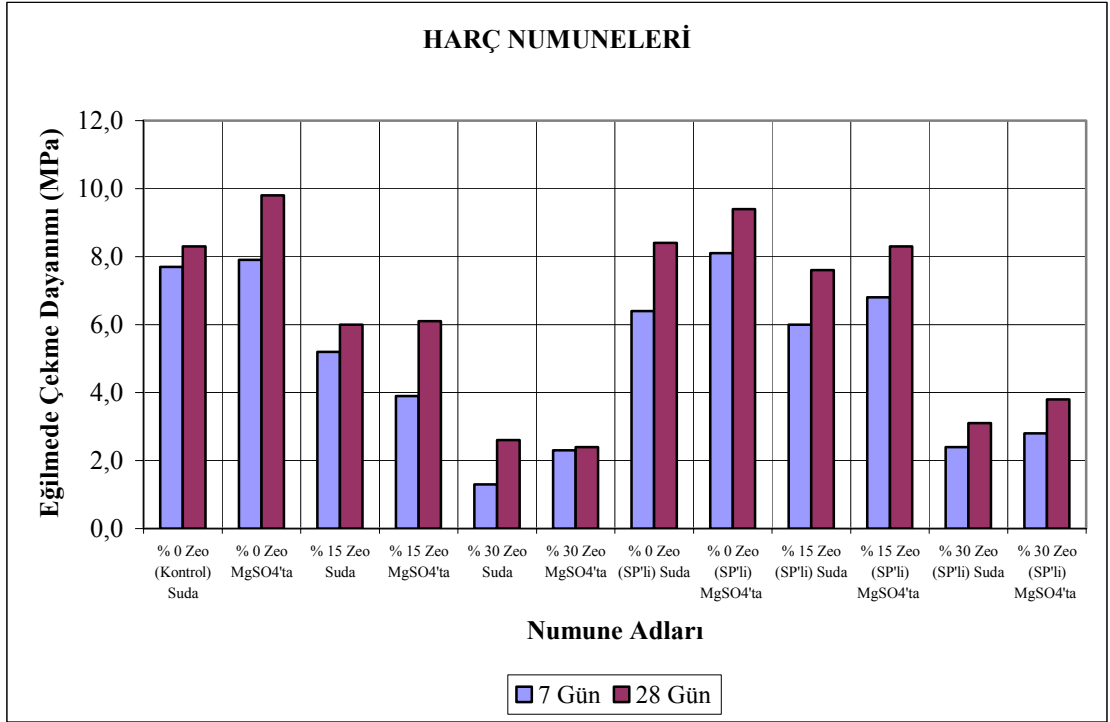
kalıplardan çıkarılan numuneler 28 gün süreyle su ortamında ve % 7'lik $MgSO_4$ çözeltisinde (kürde) saklanmışlardır. Saklama süresi sonunda kürden çıkarılan numuneler merkezi basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Numunelerden $MgSO_4$ çözeltisinde saklananların 7 ve 28 günlük kür süresi sonundaki basınç dayanımları, su içinde saklananlardan (kontrol numunesi) biraz fazla çıkmıştır. Bu bulgunun aksine, $MgSO_4$ çözeltisindeki 28 günlük harç numunelerinin basınç dayanımının az çıktığı araştırmalarda (Oymael, Şen ve Durmuş, 2007), vardır. Bu farklılığın, araştırmalarda kullanılan çimentoların farklı türden olmasından geldiği düşünülmektedir.

Bu araştırmada seçilen 28 günlük süre, sülfat dayanımına ne ölçüde dayanıklı olduğunu anlamak bakımından az görülebilir. Buradaki çalışmada beton harcın 24 saat sonunda sülfat ortamına konulmuş olması, karakteristik bir husustur.

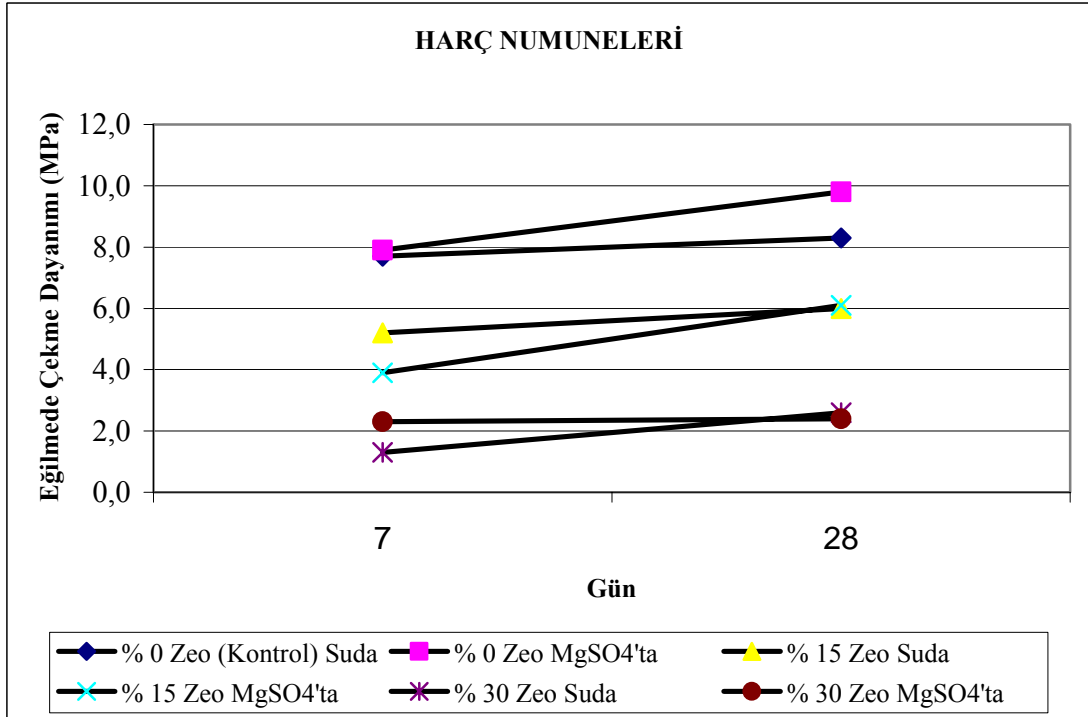
$MgSO_4$ çözeltisindeki numunelerin, kontrol numunelerine göre bir miktar fazla basınç dayanım vermesi ve bunun özellikle SP katkılı numunelerde görülmesi, beton harç numunelerin, sülfatların kristalize olma özelliğinden dolayı numunelerde bir miktar iç sıkıştırma meydana getirdiğine yorumlanabilir. Harç numunelerinin basınç ve eğilmede çekme dayanımları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Harçların basınç ve eğilmede çekme dayanımları

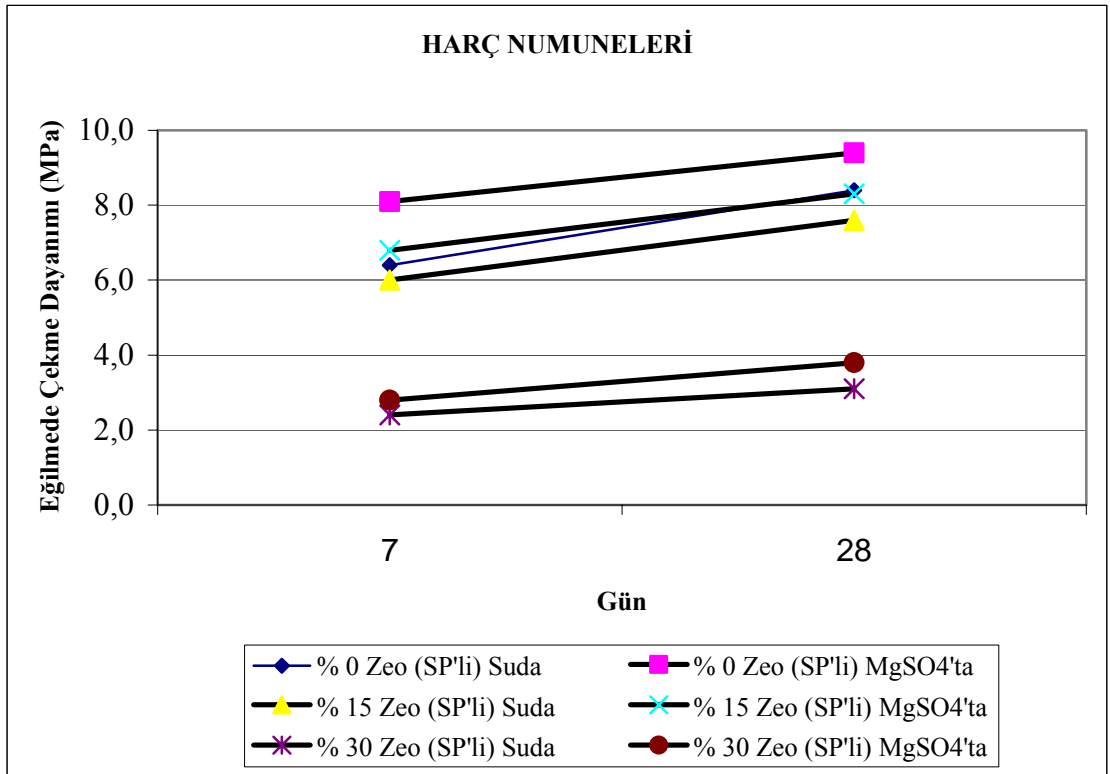
Sıra no	Sembol	Eğilmede çekme dayanımı (gün) (N/mm ²)		Basınç dayanımı (gün) (Mpa)	
		7	28	7	28
1	% 0 Zeo (Kontrol) suda	7.7	8.3	48.3	58.8
2	% 0 Zeo $MgSO_4$ 'ta	7.9	9.8	49.5	58.1
3	% 15 Zeo suda	5.2	6.0	31.7	39.9
4	% 15 Zeo $MgSO_4$ 'ta	3.9	6.1	25.9	31.1
5	% 30 Zeo suda	1.3	2.6	8.8	12.1
6	% 30 Zeo $MgSO_4$ 'ta	2.3	2.4	9.4	10.2
7	% 0 Zeo (SP'li) suda	6.4	8.4	47.6	54.6
8	% 0 Zeo (SP'li) $MgSO_4$ 'ta	8.1	9.4	50.4	59.3
9	% 15 Zeo (SP'li) suda	6.0	7.6	46.9	59.2
10	% 15 Zeo (SP'li) $MgSO_4$ 'ta	6.8	8.3	45.5	49.9
11	% 30 Zeo (SP'li) suda	2.4	3.1	12.1	16.6
12	% 30 Zeo(SP'li) $MgSO_4$ 'ta	2.8	3.8	13.2	16.8



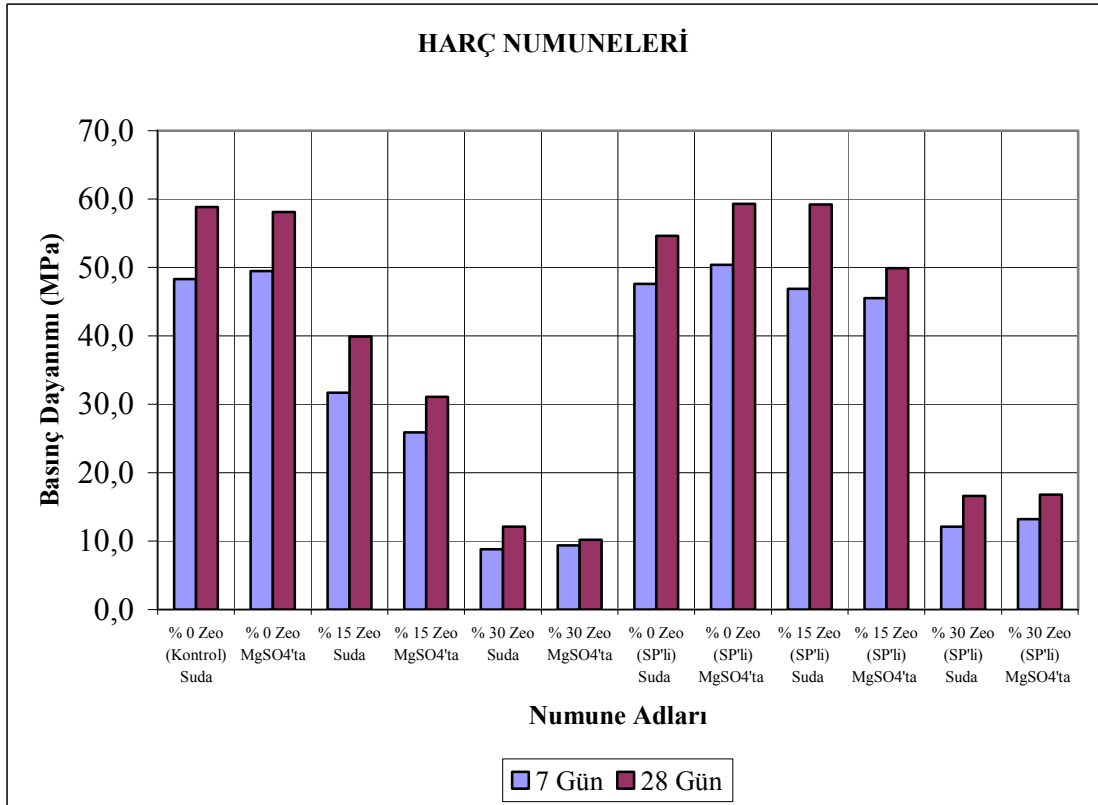
Şekil 4.19. Harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımları



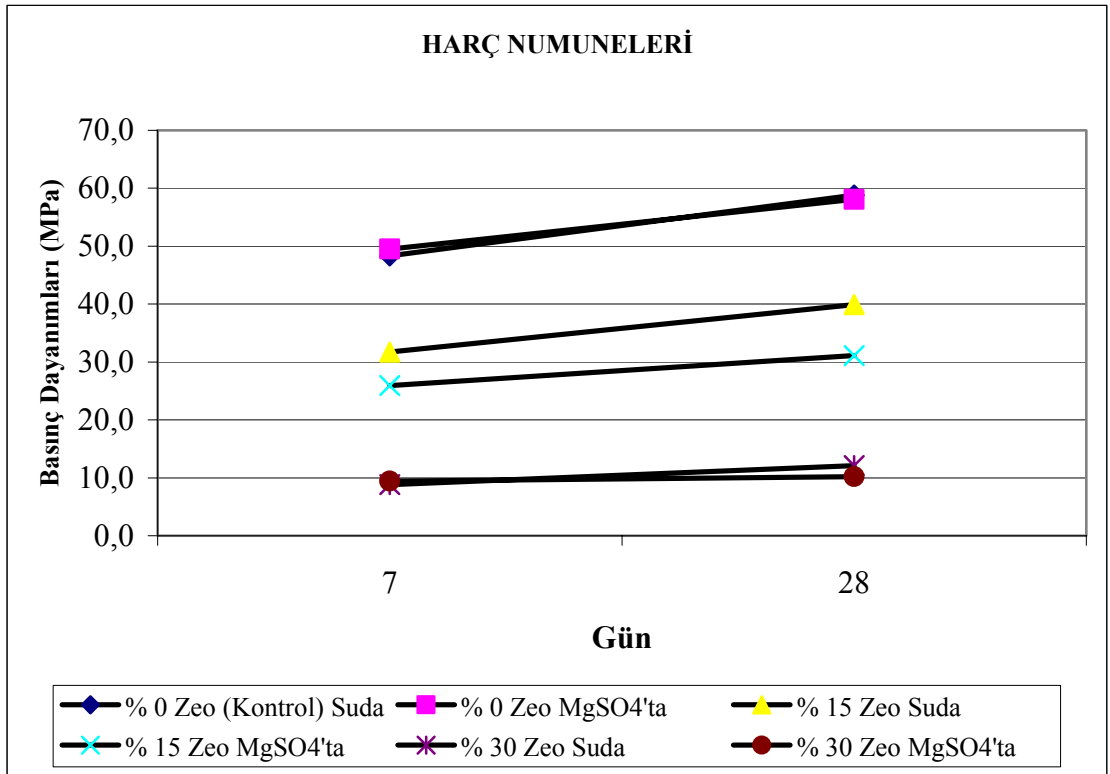
Şekil 4.20. SP'siz harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımları



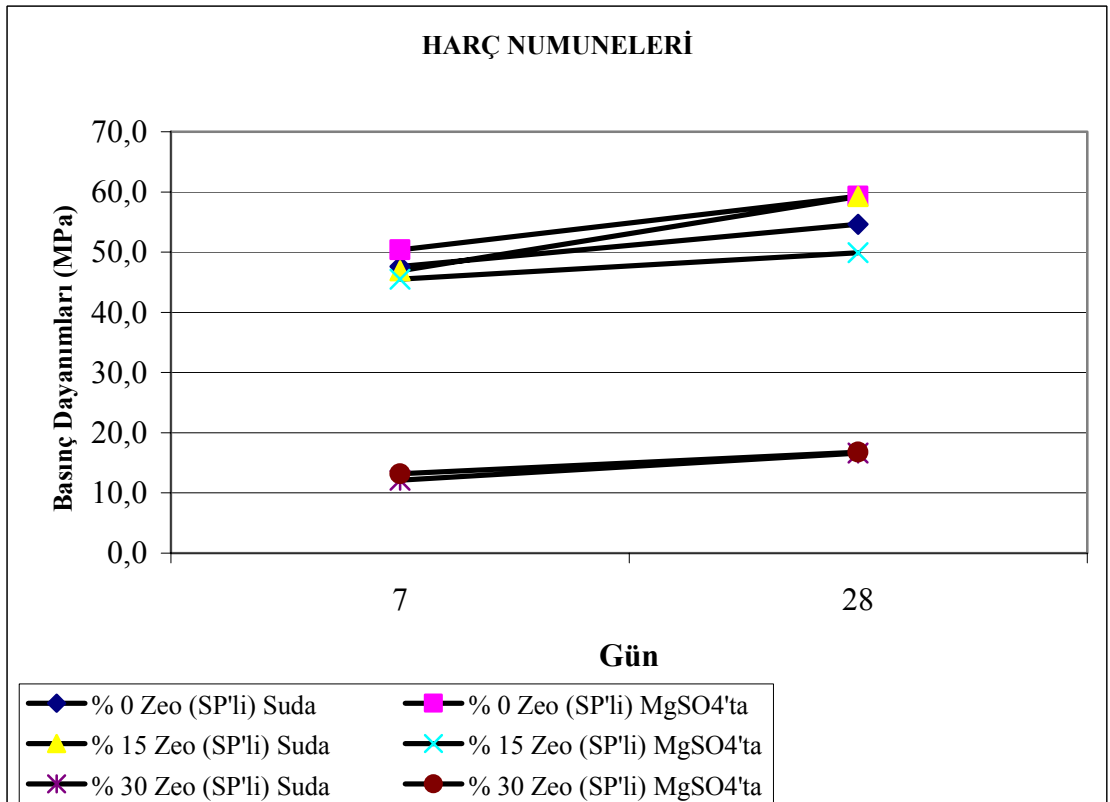
Şekil 4.21. SP'li harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımları



Şekil 4.22. Harç numunelerinin basınç dayanımları



Şekil 4.23. SP'siz harç numunelerinin basınç dayanımları



Şekil 4.24. SP'li harç numunelerinin basınç dayanımları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı, bileşiminde zeolit bulunan PÇ 42.5 R çimentosu ile üretilen hamur numunelerle, standard kum katkılı çimentolu harç (mikrobeton) numuneler üzerinde hem puzolanik uygunluk hem de katkı oranı uygunluğu araştırılmıştır.

Su içinde kür edilen numunelerle $MgSO_4$ çözeltisi içinde kür edilen numunelerin fiziksel ve kimyasal değişimleri ile basınç dayanımlarındaki değişim karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

Bu amaçla, mikrobetonlarda tahrip edici ortamlarda dayanıklılığı konusunda teknik literatürde mevcut bilgilerin kısa bir özetini takiben incelemede kullanılan yöntem, deney numunelerinin özellikleri, saklanmaları, gerçekleştirilen deneyler, elde edilen bulgular ve incelemeleri üzerinde duruldu. Elde edilen başlıca sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmiştir:

1. Bu çalışmaya konu olan PÇ 42.5 R çimentosu ile üretilen hamur ve mikrobeton numunelerde % 15 zeolit katkı uygun olarak görülmektedir. % 15 zeolit katkılı SP'li su içinde kür edilen kontrol numunelerin basınç dayanımları % 15 zeolit katkılı SP'li $MgSO_4$ çözeltisinde kür edilen numunelere göre bir miktar fazla çıkmıştır. Bu husus, puzolanın aktivitesinin yüksekliği ve puzolanlı çimentoların $MgSO_4$ çözeltisine karşı dayanıklılığını gösterir (Şekil 4.1 ve 4.4).
2. Zeolit katkısız kontrol numunelerinin XRD ve SEM incelemesinde portlandit meydana gelmektedir. Katkı oranı % 15 ve % 30 olunca portlandite azalmakla beraber, % 30 zeolit katkılarda ortamda (Q) kuartz görülmesi ortamda, oluşan portlanditi bağladıktan ve faydalı bileşik olan C-S-H (tobermorit) dönüştürdüktan sonra, fazladan puzolan kaldığına işarettir. Bu demek oluyor ki, % 30 katkı miktarı uygun değildir.
3. Çimentonun içinde portlandit oluşumunun zeolit katkısıyla bağlanarak C-S-H jellerine dönüşmesi, o çimentoyla yapılan betonun donatısının, oluşacak portlandit [$Ca(OH)_2$] ile korozyona uğramasının önlenmesi demektir. Ayrıca, çimento içinde zayıf dokunun ortadan kaldırılarak permeabilitesinin azaltılması anlamına da gelir.

4. Çimentoya % 15 oranında zeolit katkısı demek, çimentonun daha atıl bir malzeme olan zeolit ile miktarının % 15 oranında artırılarak daha ekonomik bir çimento sağlanması demektir.

Bu sonuçların hemen hepsi, bu konuda daha önce gerçekleştirilmiş olan çalışmalarla desteklenmektedir. Ancak, elde edilen bu sonuçların bu çalışmaya konu olan numune ve deneysel çalışma koşullarına ait olduğu açıktır. Bu nedenle, tüm betonlara genellemeden önce, daha uzun süreli olmak kaydıyla, benzer deneysel çalışmaların daha farklı bileşimlerle, çeşitli boyutlardaki numuneler üzerinde yapılması yararlı olacaktır. Bu hususlar, bu konudaki araştırmaların devamını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Acı 201.2r.77, 1986, Guide to durable concrete, chapter 3, abrasion. ACI Manual of Concrete Practice, Part I, Detroit.
- Acı 213, 1967, Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, ACI Committee 213, V. 64, Issue 8, August 1, 1967.
- Aköz, F., Biricik, H., 2000, Sodyum sülfat çözeltisinin buğday sapı külü katkılı ve katkısız harçlara etkileri, Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, 5(26), Ankara.
- Albayrak, M., 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.003>
- Anonim, 2007, http://www.teknomin.com.tr/turkce/zeolit_b.html.
- Anonim, 2007, http://hun.pamukkale.edu.tr/ders_notlari/yapi_malzemesi/Yapi_Malzemesi_3-baglayici-YAPAY-puzolan-alcı.pdf.
- Anonymous, 2007, <http://icnz.lanl.gov/Images/anal-2.jpg>, <http://icnz.lanl.gov/Images/chab-1.jpg>, <http://icnz.lanl.gov/Images/natro-1.jpg>, <http://icnz.lanl.gov/Images/heul-3.jpg>, <http://icnz.lanl.gov/Images/clino-1.jpg>
- Astm C-1012-87, Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to sulphate solution.
- Astm C-330, 1976, Requirements for structural lightweight aggregates symposium, St. Louis, MO, March 24-25, 1976.
- Atahan, H. N., Pekmezli, B. Y., Uyan, M., Yıldırım, H., 2003, Sülfatların portland çimentolu ve sülfatlara dayanıklı çimentolu betonların durabilitesine etkisi, 5. Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), İstanbul.
- Barnbrook G., 1975, "Concrete Practice". Cement & Concrete Association. 13-22.
- Bloem, D. L. & Gaynor, R. D., 1963, Effects of aggregate properties on strength concrete. Journal of the American Concrete Institute, 60(10), 1429-1455.
- Breck, D. W., 1984. Zeolite Molecular Sieves, Krieger Publ. Comp, Florida.
- Bs 3681, 1973, rev ed. BS 3797:1990 Specification for lightweight aggregates for masonry units and structural concrete, 1990.
- Bs 3797, 1990, Specification for lightweight aggregates for masonry units and structural concrete.
- Budnikov, P.P., 1968, Proceeding of 5th International Symposium of chemistry of cement, V. 4, pp 319-330.
- Büyükyol, M., 1988, Etibank Bülteni, sy. 30-109,
- Carlson, C. C., 1956, "Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units," Am. Concrete Inst. Jour., v. 28, no. 5, 1956. pp. 491-508.
- Christensen R., 1979, Mechanics of Composite Materials. New York: Wiley Interscience, Boca Raton.
- Christensen G. Lee, 1981, Some Aspects of Inorganic Versus Organic Sludge Co, National Lime Association, Alington, VA, pp. 15, 1981.
- Davis, Kelly, 1955. Journal of the American Ceramic Society Volume 38 Issue 6 Page 99 Issue 6 - 114 - June 1955.
- Dpt, 1996. Diğer Endüstri Mineralleri, V11. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Özel İhtisas Komisyonu Raporu Cilt 1, Ankara,
- Erdoğan, T.Y., 1997. Admixtures for Concrete, The Middle East Technical University Press, pp. 77-78, Ankara, Turkey.

- Feng, N. Q., Jia, H., Chen, E., (1998) "Study on the Suppression Effect of Natural Zeolite on Expansion of Concrete Due to Alkali – aggregate Reaction", Magazine of Concrete Research, Vol. 50, pp. 17 – 24.
- Feng, N.Q., Li, Z., G., Zang, X. W., (1990) "High – strength and Flowing Concrete with a Zeolite Mineral Admixture ", Cement and Aggregates, ASTM. Vol. 12, pp. 61 – 69.
- Flanigen, E. M., Mumpton, F. A., 1986. Commercial Properties of Natural Zeolites (Ed: Mumpton, F. A.), Short Course Notes 4, Min, Soc. Am., Washington D. C
- Gottardi, G., Galli, E., 1985. Naturel Zeolites, Springer Verlag, Berlin
- Grutzeck, M., Kwan, S., Dicola, M., 2004. Zeolite Formation in Alkali-Activated Cementitious Systems, Cement and Concrete Research 34, pp. 949–955.
- Hanson, J.A., 1968, "Effects of Curing and Drying Environments on Splitting Tensile Strength of Concrete," Journal of the American Concrete Institute, July 1968, pages 535-543.
- Hay, R. I., Geological Occurrences Of Zeolites, University Of California, 1976 Pp 135-143 Berkeley, U. S. A.
- Helms S.B., Browman A.L., 1968, "Corrosión del acero en muestras de hormigón ligero". ACI, núm. 12, págs. 1011–1016, diciembre 1968.
- Hobbs G. A, 1964, Importing And Managing The Alfalfa Leafcutter Bee. Canada Dept. Agr. Pub. 1209, 8 pp.
- Hsu, S. C., Wang, S. T. And Lin, 1967, Effects of Soil Conditioners on Taiwan Agric. Res., 16, No: 1, 50 – 57 ch. Soil and Fertilizer Vol. 31.
- Kılınc, K., Uyan, M., 2003, Beton karışım suyundaki sülfat tuzlarının çimento harcı özelliklerine etkisi, 5. Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), İstanbul.
- Kibaroglu, U. 2007, http://us.geocities.com/ukibaroglu/calismalar/zeolit.htm#_Doğal_Zeolitlerin_Kullanım#_Doğal_Zeolitlerin_Kullanım
- Kocakuşak, S., (2001) "Doğal Zeolitler ve Uygulama Alanları", Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Rapor No : KM 362, Kocaeli.
- Landgren R., 1964, "Water Vapor Adsorption/Desorption Characteristics of Selected Lightweight Concrete Aggregates," Bulletin 178, Portland Cement Association, Skokie, II 1964, pages 830-845.
- Lee, S.T., Moon, H.Y., Swamy, R.N., Kim, S.S. ve Kim, J.P., Sulphate attack of mortars containing recycled fine aggregates, ACI Materials Journal, July-August, Vol:102, No:4, pp:224-230.
- Lelewelin, 1968, 2002, Nev ed. Proceedings Of The Royal Society Of London Series A-Mathematical Physical And Engineering Sciences 458 (2020): 987–1016.
- Li, D., Chen, Y., Shen, J., Su, J., Wu, X., 2000. The Influence of Alkalinity on Activation and Microstructure of Fly Ash, Cement and Concrete Research 30, pp. 881–886.
- Malinowski, 1982 Malinowski, R.: Method of Casting Concrete. US Patent. No. 4362679. Dec. 7, 1982.
- Massazza F., 1989, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Mayıs, Ankara.
- Mather K., 1966, "Petrographic Examination of Hardened Concrete," Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete -Making Materials. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 125–143,.
- Mehta, P. K., 1981, "Studies on Blended Cements Containing Santorin Earth", Cement and Concrete Research, Vol. 11. pp. 507 – 518.

- Mehta, P.K., 1983, Pozzolanic and Cementitious by Products as Mineral Admixtures for Concrete, Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral by Products in Concrete, Vol 1, ACI SP 79, pp. 1–46.
- Meier, W. M., 1968. Zeolite Structures: Molecular Sieves, Soc. Clem. Ind., London,
- Mielenz Et Al, 1986. Concrete Technology and Design, ol.3, Cement Replacement Materials, R.N. Swamy (ed), Surrey University Pres.
- Mihul, A.; Zăcescu, A.; Capatu, C., Cucureanu, A, 1969, Rev. Constructiilor si a Materialelor, núm. 7, págs. 361–365, julio.
- Mumpton, F., Natural Zeolites a New Industrial Mineral Commodity, State University Collage, 1976, Brocfort, Newyork, U. S. A.
- Murlin Ve Wilson, 1952, Field Practice in Lightweight Concrete “Journal Proceedings” Volume 49, Issue 9, pp 21–36, September 1, 1952.
- Neville, A.M., 1995, “Properties of Concrete”, 4rd rev and final edition, Prentice-Hall
- Orhun, Ö., 1997. Zeolitlerde İyon Değişimi, Anadolu Üniversitesi Yayınları, No: 989, ss. 19–22, Eskişehir.
- Oymael, S., 1995, Bitümlü şist külünün Çimento ve Betonda Puzolanik katkı maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Fırat üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Oymael, S., Durmuş, A., 2006, Effect of sulphates on elastic modulus of concrete samples made from blends of cement with oil shale ash, Oil Shale, Vol: 23, No: 2, pp:125-134, Talin-Estonian.
- Oymael, S., 2002, Malzeme Bilgisi Ders Notları, MKÜ, ss. 50–54, Antakya.
- Oymael, S., Şen, L., Durmuş, A., 2007, Durability of pozzolanic cement added microconcrete against to sulphates, e-journal of New World Sciences Academy, Vol:2, Num. 3, Turkey.
- Öztok, İ., Yeğınobalı, A., 1997, Silis dumanı ve uçucu kül içeren taşıyıcı bims betonları, Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu bildiriler el kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, sayfa 73-95, Eskişehir.
- Pca, 1972, Bushhammering of Concrete Surfaces, IS051, Portland Cement Association,.
- Poon, C. S., Lam, L., Kou, S. C., Lin, Z. S., (1999) “A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cements”, Construction and Building Materials, Vol. 13, pp. 427–432
- Price W. H., Cordon W. A., 1949, "Test of Lightweight Aggregate Concrete Designed for Monolithic Construction," ACI Proceedings, Vol. 45, p. 581, April, 1949.
- Ramachandran V.S, 1995. Concrete Admixtures Properties, Science and Technology, Parkridge, NJ. 2nd ed., Noyes publications, 1995.
- Rudnai, G. 1963. Lightweight concrete, Budapeste, Akadémiai Kjadó. ACI Materials Journal, v. 88, n. 03, p.240-247.
- Saldıray, İ., 1978, Zeolitler Yer Yuvarı ve İnsan, Türkiye Jeoloji Kurumu.
- Sayar, M., 1960. Mineroloji ve Jeoloji, ss. 127–128, İstanbul Teknik Üniversitesi,
- Shacklock , B. W., 1974, “Concrete Constituents and Mix Proportions”, Cement and Concrete Association, pp 90.
- Smolka H. G, Schwuger M J, 1976. Cleaning Action of Nature Zeolites. Zeolite 1976 Conference, Tucson, Ariz.
- Stamenkovic, 1970, Determination of absorbed water in lightweight aggregate and quantities of ingredients in lightweight concrete, “Materials and Structures”, Volume 3, Number 1 / January, 1970.
- Şahin, B. Dpt VII. Beş Yıllık Kalkınma Planı ÖİK Raporu, Çimento Hammadeleri ve Yapı Malzemeleri. Cilt–2, 171–183, 1996.

- Tepe, Y., Akyurt, İ., Ciminli, C., Mutlu, E., Çalışkan, M., 2004. Protective Effect of Clinoptilolite on Lead Toxicity in Common Carp, *Cryprinus Carpio*, M. K. Ü., Antakya Fresenius Environmental Bullentin , No: 7.
- Teychenne, D.C., Franklin, R.E. And Erntrouy, H.C. 1975, Design of normal concrete mixes, Dept. of the Env.
- Timms A. G., 1964, Evaluating Subgrade Friction-Reducing Mediums for. Rigid Pavements. ... Research Council, Washington, D.C., 1964, pp. 28–38.
- Tmmob (İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi), 5. Ulusal Beton Kongresi, Ögütülmüş Doğal Zeolit Alkali–Silika Reaksiyonu ve Sülfat Etkisi ile Genleşmesinin İncelenmesi, ss. 403 – 409.
- Ts 1114, 1986, Hafif Agregalar-Beton İçin yerine geçen TS 1114 EN 13055–1 Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, harç ve şerbette kullanım için 16.4.2004.
- Tse En 197–1, 2002, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
- Tuthill, L.H., 1978, Resistance to chemical attack, ASTM Sp. Tech. Publicn. No: 169 B, pp: 369–387.
- Tüzüner, A., Tınay, E., 1984. Biga Yöresi Zeolitlerinin (Klinoptilolite) Toprağın Bazı Fiziksel Özelliklerine Olan Etkileri , Tarım, Orman ve Köyişleri Bakanlığı Yayınları. No. 110, Ankara.
- Uzal, B., Bektaş, F., Turanlı, L., 2003. Ögütülmüş Zeolitin Alkali-Silika Reaksiyonu ve Sülfat Etkisi ile Genleşmesinin İncelenmesi, 5. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi.
- Ünsal, N., 2001. İnşaat Mühendisleri İçin Jeoloji , S. 58, Gazi Üniversitesi,
- Vaughan, D. E. W., 1978. Propertis of Natural Zeolites; Occurrence, Properties, Use (Eds: Sand, L. B. and Mumpton, F. A.) Pergamon Press, Elmsford, New York, 353–371.
- Walker, S., And Bloem, D. L., 1960, “Effects of Aggregate Size on Properties. of Concrete,” *Acı Journal. , Proceedings V. 32, No. 3, Sept.*
- Washa, G.A., 1956, Properties of Lightweight Aggregates and Lightweight Concretes, American Concrete Institute, 375-382.
- Wills, 1974 *Journal of the American Ceramic Society Volume 57 Issue 7 Page 143–160, July 1974.*
- Yörükoğulları, E., 1997. Doğal Zeolitlerde Fiziksel Adsorpsiyon Uygulamaları, Anadolu Üniversitesi Yayınları, No. 988, Eskişehir.
- Yücel, H. (1990) “Zeolitler ve Uygulama Alanları” , III. Ulusal Kil Sempozyumu, Bildiriler, 391–402
- Yücel, H., Çulfaz, A., 1984. O.D.T.Ü. Uygulama Araştırma Dergisi, sayı: 3 ve 10.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında büyük bir titizlik, sabır ve özveriyle bana destek olan, yol gösteren ve iyi bir bilimsel çalışma ortamı sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Sabit OYMAEL'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Laboratuar çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Payas OYSA'da retim Őefi Mustafa ERDEMİR'e ve Antakya OYSA'da bulunan Fuat CİNKUR'a teőekkürlerimi belirtmek isterim. Ayrıca, araştırmalarım sırasında bana yardımda bulunan Prof. Dr. M. Mustafa YILDIRIM'a teőekkürlerimi bildiririm.

Tez çalışmalarım sırasında manevi desteğini esirgemeyen hayatımın her aşamasında bana destek olan eşime ve aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Antakya'da doğdum. İlköğrenimini Çankırı ilinin Ilgaz ilçesinde ve İçel ilinin Mut ilçesinde, orta ve lise öğrenimini Antakya'da tamamladım. 2004 yılında Lefke Avrupa Üniversitesinden İnşaat Mühendisi unvanıyla mezun oldum. Hemen ardından 2004 yılında M.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans programına başladım. İskenderun'da Şimşekler İnşaat Ltd. Şti.'de İnşaat Mühendisi olarak göreve başladım. Halen bu görevi sürdürmekteyim.