

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**HAM PERLİT VE GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİTİN
PUZOLANİK MALZEME OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EYLÜL SELİN KAYA

BALIKESİR, HAZİRAN 2019

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



HAM PERLİT VE GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİTİN
PUZOLANİK MALZEME
KULLANILABİLİRLİĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EYLÜL SELİN KAYA

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. F. Nurhayat DEĞİRMENCİ**
Doç. Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR
Doç. Dr. Arın YILMAZ (Tez Danışmanı)

BALIKESİR, HAZİRAN 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

EYLÜL SELİN KAYA tarafından hazırlanan “HAM PERLİT VE GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİTİN PUZOLANİK MALZEME OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 12/06/2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri


İmza

Üye
Prof. Dr. F. Nurhayat DEĞİRMENCİ

Üye
Doç. Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR

Danışman
Doç. Dr. Arın YILMAZ


.....

.....

.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Birimi tarafından 2010/06 nolu proje ile desteklenmiştir.**

ÖZET

**HAM PERLİT VE GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİTİN
PUZOLANİK MALZEME OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
EYLÜL SELİN KAYA
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ARIN YILMAZ)
BALIKESİR, HAZİRAN 2019**

Bu çalışmada, ham perlit ve geliştirilmiş perlit puzolanik malzeme olarak kullanılmıştır. Düşük maliyetli ve yerel kaynaklarımızdan biri olan perlitin çimentoda kullanılmasına yönelik bir araştırma yapılmıştır.

Balıkesir Limak Çimento Fabrikası'ndan alınan CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu ve puzolan olarak Uzay Perlit Madencilik Kim. Mad. San. Ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen ham perlit ve geliştirilmiş perlit kullanılmıştır. Portland çimentosu ağırlıkça %5, %10, %20 ve %30 oranlarında ham perlit ve geliştirilmiş perlitte yer değiştirilmiş ve perlit ikameli çimentolar hazırlanmıştır. Bu deneysel çalışmada, 4 çeşit ham perlit ikameli çimento, 4 çeşit geliştirilmiş perlit ikameli ve Portland çimentosu olmak üzere toplam 9 çeşit çimento kullanılmıştır.

Hazırlanan çimentoların, kimyasal analizleri, fiziksel ve mekanik deneyleri yapılmıştır. Çimento harçlarının 2, 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme ve basınç dayanımlarına, ayrıca üretilen harçların yüksek sıcaklık değerlerine karşı dayanıklılığı, donma-çözülme etkisi ve rötresine olan etkileri araştırılmıştır.

Deney sonuçları incelendiğinde, ham perlit ve geliştirilmiş perlit ikamesinin Portland çimentosuna göre rötreyi olumlu şekilde etkilediğini (yani azalttığını) söylemek mümkündür. CEM I Portland çimentosu ve harç numunelerinin ikameli çimento ve harç numunelerine göre hemen hemen tüm deneylerde daha yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Geliştirilmiş perlit ikameli çimentoların tüm deneylerdeki dayanım sonuçları çok düşük olduğu için çimentoda kullanımının uygun olmadığını, buna rağmen %5 ve %10 ham perlit ikamesinin çimentoda kullanılabileceğini söyleyebiliriz.

ANAHTAR KELİMELELER: Ham perlit, geliştirilmiş perlit, çimento, basınç dayanımı, rötre

ABSTRACT

AVAILABILITY OF RAW PERLITE AND EXPANDED PERLITE AS POZZOLANIC MATERIAL

MSC. THESIS

EYLÜL SELİN KAYA

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ARIN YILMAZ)

BALIKESİR, JUNE 2019

In this study, raw perlite and expanded perlite were used as pozzolanic material. Research has been conducted on the use of perlite, one of our low cost and local resources, in cement.

The Portland cement CEM I 42,5 R is, supplied from the Limak Cement Factory in Balıkesir, and raw perlite and expanded perlite used as an additive is supplied from Uzay Perlite Mining Kim. Art. Singing. And Tic. Ltd. Portland cement was replaced with 5%, 10%, 20% and 30% by weight of raw perlite and expanded perlite and perlite substituted cement were prepared. In this experimental study, 9 types of cement were used: 4 types of raw perlite substituted cement, 4 types of expanded perlite substituted and Portland cement.

Chemical analyses, physical and mechanical tests of the prepared cement were carried out. The effects of tensile and compressive strengths of cement mortar specimens on the strengths of 2, 7, 28 and 90 days, as well as their resistance to high temperatures, freezing-thawing and shrinkage were investigated.

When the test results are examined, it is possible to say that the substitution of the raw perlite and expanded perlite as an additive has a positive effect on shrinkage (i.e. decreases). CEM I Portland cement and mortar samples showed higher performance in almost all experiments than substituted cement and mortar samples. We can say that the strength results of expanded perlite substituted cement are not suitable for use in cement due to the poor performance at all experiments. However, 5% and 10% raw perlite substitutes can be used in cement.

KEYWORDS: Raw perlite, expanded perlite, cement, compressive strength, shrinkage

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOLE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	2
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1 Perlit	4
2.1.1 Ham Perlit	4
2.1.2 Genleştirilmiş Perlit	4
2.1.3 Perlitin Fiziksel Özellikleri	5
2.1.4 Perlitin Kimyasal Analizi	6
2.1.5 Perlitin Minerolojik Kompozisyonu	7
2.1.6 Perlitin Üretim Yöntemi ve Genleştirilmesi	7
2.1.7 Dünya'daki Mevcut Durum	10
2.1.7.1 Rezervler	10
2.1.7.2 Üretim ve Tüketim	10
2.1.7.3 İthalat ve İhracat	11
2.1.8 Türkiye'deki Durum.....	12
2.1.8.1 Perlitin Türkiye'de Bulunuş Şekilleri	12
2.1.8.2 Rezervler	13
2.1.8.3 Üretim ve Tüketim	14
2.1.8.4 İthalat ve İhracat	14
2.1.9 Kullanım Alanları	14
2.1.9.1 Genleştirilmiş Perlitin Kullanım Alanları	14
2.1.9.2 Ham Perlitin Kullanım Alanları	17
2.2 Çimento	18
2.2.1 Portland Çimentosu	18
2.2.2 Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler ve Anabileşenler	19
2.2.3 Çimentonun Üretimi.....	21
2.2.4 Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler	22
2.2.4.1 Kalker (Kireçtaşı).....	23
2.2.4.2 Kil.....	23
2.2.5 Çimento üretiminde Kullanılan Mineral Katkılar.....	24
2.2.6 Mineral Katkı Türleri ve Özellikleri	26
2.2.7 Puzolanik Maddeler (Puzolanlar).....	27
2.2.8 Çimento Tipleri – Bileşim ve İşaretleme	28
2.2.9 Literatür Tarama	32
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	44
3.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler	44
3.1.1. Çimento	44

3.1.2. Standart Kum	45
3.1.3. Su	46
3.1.4. Ham Perlit ve Genleştirilmiş Perlit	46
3.2. Perlit İkameli Çimentoların Hazırlanması	47
3.2.1. Kimyasal Analizler	48
3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneyler	48
3.3.1. Tane Büyüklüğü Tayini.....	48
3.3.2. Normal Kıvam.....	49
3.3.3. Priz Sürelerinin Bulunması	49
3.3.4 Hacim Genleşmesi Tayini	50
3.3.5 Özgül Ağırlık	51
3.3.6 Özgül Yüzey (Blaine)	51
3.4 Çimento Harçlarının Hazırlanması	51
3.5 Harç Deneyleri	53
3.5.1 Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi.....	53
3.5.2 Basınç Dayanımı Deneyi.....	54
3.5.3 Donma-Çözülme Deneyi.....	55
3.5.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi.....	55
3.5.5 Rötire Deneyi	56
4. DENEY SONUÇLARI	57
4.1 Kimyasal Kompozisyon	57
4.2 Normal Kıvam, Priz Süreleri ve Hacim Genleşmesi	58
4.3 Özgül Ağırlık, Özgül Yüzey (Blaine)	61
4.4 Basınç Dayanımları	63
4.5 Eğilmede Çekme Dayanımları	65
4.6 Donma-Çözülme Etkisi.....	67
4.7 Yüksek Sıcaklık Etkisi	69
4.8 Rötire	72
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	74
6. KAYNAKLAR.....	76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kayaç haldeki perlit (a), ham perlit (b) ve genişletilmiş perlitin (c) görünümü .	5
Şekil 2.2: Ham perlitin genişletirme şeması	9
Şekil 2.3: Türkiye perlit rezervleri haritası	13
Şekil 2.4: Çimento üretimi	22
Şekil 2.5: Puzolanların sınıflandırılması	28
Şekil 2.6: Pomza katkılı çimentolarda priz süresi-pomza miktarı ilişkisi	33
Şekil 2.7: PÇ 42,5 ve pomza katkılı çimentolara ait rötre-numune yaşı ilişkisi	34
Şekil 2.8: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının eğilme dayanımı-numune yaşı ilişkisi	38
Şekil 2.9: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının basınç dayanımı-numune yaşı ilişkisi	39
Şekil 2.10: PERKÇ'ler ile PÇ42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının rötre-numune yaşı ilişkisi	40
Şekil 3.1: X-Işını spektrometre cihazı	48
Şekil 3.2: Alpine marka incelik ölçüm cihazı	49
Şekil 3.3: Otomatik vicat cihazı	50
Şekil 3.4: Le Chatelier aleti	50
Şekil 3.5: Piknometre	51
Şekil 3.6: Harç kalıpları ve harç numuneleri	53
Şekil 3.7: Eğilmede çekme dayanımı cihazı	54
Şekil 3.8: Basınç dayanımı cihazı	55
Şekil 3.9: Rötre ölçüm cihazı	56
Şekil 4.1: Çimentoların normal kıvam suyu değerleri	60
Şekil 4.2: Çimentoların hacim genişmesi değerleri	60
Şekil 4.3: Çimentoların priz süreleri değerleri	61
Şekil 4.4: HP ve GP'lerin perlit miktarı-özümlü ağırlık ilişkisi	62
Şekil 4.5: HP ve GP'lerin perlit miktarı-özümlü yüzey(blaine) ilişkisi	63
Şekil 4.6: Ham perlit ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı değerleri	64
Şekil 4.7: Genleştirilmiş perlit ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı değerleri	65
Şekil 4.8: HP'lerin eğilmede çekme dayanımı değerleri	66
Şekil 4.9: GP'lerin eğilmede çekme dayanımı değerleri	67
Şekil 4.10: Donma-Çözülme etkisi altında basınç dayanımı değerleri	68
Şekil 4.11: Donma-Çözülme etkisi altında eğilmede çekme dayanımı değerleri	69
Şekil 4.12: Yüksek Sıcaklık etkisinde basınç dayanımı değişimi	70
Şekil 4.13: HP harçlarının rötre-numune yaşı ilişkisi	73
Şekil 4.14: GP harçlarının rötre-numune yaşı ilişkisi	73

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Ham perlit ve geliştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri	5
Tablo 2.2: Tipik bir perlitin kimyasal analizi.....	6
Tablo 2.3: Dünya ham perlit rezervleri	10
Tablo 2.4: Dünya ham perlit üretimi	11
Tablo 2.5: Türkiye perlit rezervleri	13
Tablo 2.6: Türkiye ham perlit üretimi	14
Tablo 2.7: Geliştirilmiş perlitin inşaat sektöründeki kullanım alanları	15
Tablo 2.8: Geliştirilmiş perlitin sanayii sektöründeki kullanım alanları	16
Tablo 2.9: Tipik bir Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları	20
Tablo 2.10: Çimentonun ana bileşenleri	20
Tablo 2.11: Çimentonun ana bileşenlerinin özellikleri	21
Tablo 2.12: TS EN 197-1 Genel Çimentoların Bileşimleri.....	31
Tablo 2.13: Çimentoların fiziksel özellikleri	32
Tablo 2.14: Çimento tipleri için gerekli kimyasal özellikler	32
Tablo 2.15: PÇ 42,5 ve pomza katkılı çimentolara ait rötre değerleri	34
Tablo 2.16: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının normal kıvam suyu ihtiyaçları	37
Tablo 2.17: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının özgül ağırlık deney sonuçları.....	37
Tablo 2.18: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının eğilmede çekme dayanımları	38
Tablo 2.19: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının basınç dayanımları.....	39
Tablo 2.20: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının rötre deney sonuçları	40
Tablo 3.1: CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal bileşenleri, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	45
Tablo 3.2: Ham perlit ve geliştirilmiş perlitin kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri.....	46
Tablo 3.3: Perlit ikameli çimentoların hazırlanması için kullanılan karışım oranları ve kodlama	47
Tablo 4.1: CEM I ve HP'lerin kimyasal analiz karşılaştırması	57
Tablo 4.2: CEM I ve GP'lerin kimyasal analiz karşılaştırması	58
Tablo 4.3: Normal kıvam, Priz süresi ve Hacim genleşmesi değerleri	59
Tablo 4.4: Özgül ağırlık ve Özgül yüzey değerleri	62
Tablo 4.5: Harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri	64
Tablo 4.6: Harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	66
Tablo 4.7: Donma-Çözülme deney sonuçları.....	67
Tablo 4.8: Yüksek Sıcaklık etkisinde dayanım değişimi	71
Tablo 4.9: Rötre deney sonuçları	72

SEMBOL LİSTESİ

°C	: Santigrat derece
%	: Yüzde
cal	: Kalori
kcal	: Kilokalori
g	: Gram
kg	: Kilogram
mm	: Milimetre
mm²	: Milimetre kare
cm²	: Santimetre kare
cm³	: Santimetre küp
m³	: Metre küp
W/Mk	: Isı iletkenlik katsayısı
Kgf	: Kilogram kuvvet
N	: Newton
μ	: Mikron
MPa	: Mega Pascal

ÖNSÖZ

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışma boyunca, desteğini, yardımlarını, ilgisini ve anlayışını esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Arın YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda, ham perlit ve geliştirilmiş perlit temininde Uzay Perlit Madencilik Kim. Mad. San. Ve Tic. Ltd. Şirketi'ne, deneylerin yapım aşamasında yardımcı olan Balıkesir Limak Çimento Fabrikası ve laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederim.

2010/06 No'lu proje ile tezimi maddi açıdan destekleyen Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca sevgi ve destekleriyle her zaman yanımda olan çok değerli anneannem Yıldız ERYILMAZ'a, canım annem ve babam, Gül Serpil ERDEM ve Ethem Semih ERDEM'e, sevgili eşim Kayhan KAYA'ya ve biricik kızım Yağmur Hazal KAYA'ya yapmış olduğum bu yüksek lisans tezini armağan ediyorum.

BALIKESİR, 2019

Eylül Selin KAYA

1. GİRİŞ

Ülkelerin teknolojik, ekonomik ve sosyal açılardan gelişmesi ile inşaat sektörü arasında yakın bir ilişki vardır. İnşaat sektörü diğer sektörlerin lideri konumunda olup, makroekonomik değişkenler üzerinde etkilidir. Çimento üretim teknolojisi gelişmiş ve ileri düzeyde ise inşaat sektörünün gelişmesi, dolayısıyla ekonomik kalkınma daha hızlı olur.

İnşaat ve yapı malzemeleri üretimi ekonominin lider sektörleri arasında bulunmaktadır. İnşaat ve yapı malzemeleri üretiminde, nüfus potansiyelindeki artış ve paralelinde yapı gereksinimine bakıldığında; düşük maliyetli, yerel kaynaklar kullanılarak, üretiminde, kullanımında ve dönüşümünde çevreye minimum zarar verecek yapı malzemeleri büyük önem göstermektedir. Günümüz yapı üretiminde yaygın olarak tüketilen çimentonun yüksek maliyeti ve çevreye olumsuz etkileri göz önüne alındığında, çimento katkı malzemelerinin araştırılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır [1].

Portland çimentosu uzun yıllardır Dünya’da kullanımı oldukça yaygın bir yapı malzemesi olmuştur. Ama özellikle 1970’lerdeki enerji kriziyle birlikte, Portland çimentolarına ilave edilecek farklı katkı maddeleri arayışı bilimsel ve endüstriyel olarak devam etmektedir [2].

Çimentoya mineral katkıların katılması, çimento üretiminde enerji tasarrufu, çevre kirliliğini azaltma ve hesaplılık gibi pozitif özellikler kazandırmaktadır. Puzolanik malzemeler mineral katkıların büyük bir bölümünü oluşturur. Bilindiği gibi çimento ve suya puzolanik malzemeler katıldığında ortaya çıkan sönmüş kireç (kalsiyum hidroksit) ile reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşikler oluştururlar ve böylece çimentolu ürünlerin zararlı kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı da arttırılmış olur [3].

Puzolanik bir malzeme olan perlit, genleşmiş haliyle önceki hacminin yirmi katına kadar çıkabilen ve bu şekilde oldukça hafif olan, çok iyi ses ve ısı izolasyonu özelliği olan bir kayadır. Dünya’daki olası perlit rezervinin yaklaşık %74’üne Türkiye sahiptir. Dünya’da ve ülkemizde, perlit kullanımı en fazla inşaat

sektöründedir. Bundan dolayı, perlit tüketimi inşaat sektöründeki olumsuzluklardan bir hayli etkilenmektedir. Perlitin ısı yalıtımı, ses yalıtımı ve depreme karşı dayanıklılık avantajları açısından önemli üstünlüklerinin olması, inşaat sektöründe ekonomiye olumlu katkılar sağlayacaktır [4].

Deprem kuşağı üzerinde yer alan ülkemizde; yüksek şiddetli, mal ve can kayıplarıyla sonuçlanan depremler meydana gelmektedir. Amerika ve Japonya gibi gelişmiş ülkelerde meydana gelen depremlerin büyük mal ve can kayıplarıyla sonuçlanmamasının nedeni olarak, inşaat teknolojilerindeki gelişmelerin uygulanması ve binalarda perlit, pomza ve gazbeton gibi hafif malzemelerin kullanımının benimsenmesi gösterilmektedir. Bina yükünü önemli oranda azaltmaya yardımcı olan bu malzemeler binaların kendi ağırlıklarıyla ezilmelerini engellemekte ve depremin yıkıcı etkilerini azalmaktadır. Aynı zamanda, depremden dolayı oluşan yatay ve düşey yöndeki şiddetli sarsıntılar perlit ve gazbeton gibi boşluklu malzemeler tarafından emilmekte, sonuç olarak bina sallanmasına rağmen yıkılmamaktadır [5].

Ülkemizde perlit madeninin önemi yeterli ölçüde anlaşılamamış olup, bu ürün inşaat sektöründe yeterli oranda kullanılmamaktadır. Perlitin kullanıldığı hafif yapı elemanları ve beton agregaları daha çok modern inşaat teknolojilerinin kullanıldığı yapılarda tercih edilmektedir. İnşaat sektöründe ham perlit ve geliştirilmiş perlit kullanımının teşvik edilmesi sağlanmalıdır.

Perlitin, ham veya geliştirilmiş olarak çimento üretiminde kullanılabilirliği üzerine az sayıda çalışma bulunmaktadır. Optimum miktarda kullanımın araştırılması gerekmektedir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada, ham perlit ve geliştirilmiş perlitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. CEM I Portland çimentosu ağırlıkça %5, %10, %20, %30 oranlarında ham perlit ve geliştirilmiş perlit ile yer değiştirilmiş ve perlit ikameli çimentolar hazırlanmıştır. Böylece, 4 çeşit ham perlit ikameli çimento, 4 çeşit geliştirilmiş perlit ikameli çimento ve CEM I kıyas çimentosu olmak üzere toplam 9 çeşit çimento kullanılmıştır.

CEM I çimentosunun ağırlıkça %5, %10, %20 ve %30 oranlarında ham ve geliştirilmiş perlitte yer değiştirmesi sonucu ortaya çıkan ikameli çimentoların, kimyasal bileşenleri, incelik tayinleri, özgül ağırlıkları, standart kıvam suyu değerleri, priz süreleri, hacim genişmeleri ve özgül yüzey (Blaine) değerleri yapılan deneylerle belirlenmiştir. Yine bu çimentolarla hazırlanan harçların, eğilmede çekme ve basınç dayanımına, donma-çözülme etkisine, yüksek sıcaklık değerlerine ve rötresine olan etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar CEM I Portland çimentosuyla karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, ham perlit ve geliştirilmiş perlitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliğinin aşağıda belirtilen olumlu sonuçları da beraberinde getirmesi beklenmektedir;

- Ekonomi sağlaması
- Yerel kaynakların kullanılması

Daha önceki çalışmalarda, genellikle sadece ham perlitin yada geliştirilmiş perlitin mineral katkı maddesi olarak çimentonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ise, ham perlitin yanında geliştirilmiş perlit de kullanılarak deneyler yapılmış, ham perlit veya geliştirilmiş perlitin hangi oranlarda kullanılması gerektiği hakkında önerilerde bulunulmuştur.

Günümüzde geliştirilmiş perlit yapı sektöründe sıva harçlarında ve hafif yapı malzemelerinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen amorf yapısı ve bağlayıcılık özelliklerinden yararlanılarak taşıyıcı sistemlerdeki kullanımına yönelik pek fazla araştırma bulunmamaktadır. Bu sebeple geliştirilmiş perlit ikameli çimentolar ve harçlar hazırlanarak, taşıyıcı sistemlerde kullanılıp kullanılmayacağı hakkında fikir verilmiştir.

Ayrıca, perlitin geliştirilmeden önceki ham halinin de sektörde kullanımının yaygınlaşması için ham perlit ikameli çimento karışımları elde edilmiş, böylece ekolojik ve dolayısıyla ekonomik açıdan bir yarar sağlaması da amaç edinilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Perlit

Perlit terimi magmanın asit fazında oluşan lavların soğuyup, gözle veya mikroskopla görülebilecek bir yapıda kırılmasının meydana getirdiği, kütle bünyesinde su damlacıkları bulunan, volkanik bir cam türünü ifade eder. Bazı perlit tipleri kırıldığı zaman inci parlaklığında küçük küreler elde edildiğinden; perlit ismi inci anlamına gelen "Perle" kelimesinden türetilmiştir [6].

2.1.1 Ham perlit

Ham perlit, kayaç haldeki perlitin öğütme ve boyutlandırma işlemlerinin ardından oluşan doğal halidir. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar değişiklik gösterebilmektedir. Ham perlitteki en önemli özelliklerden biri de ham perlitin kararlılığını sağlayan, hidratasyona uğramış camsı silika yapısındaki % 2.5 oranında bileşik halinde bulunan sudur [6].

2.1.2 Genleştirilmiş perlit

Kayaç haldeki perlit öğütülüp, boyutlandırıldıktan sonra ortaya çıkan ham perlit 400°C'ye kadar ön ısıtma işlemi görmektedir. Bu işlemin ardından ham perlit ani bir ısıtmaya (750-1200°C) maruz bırakılır ve ısıtma ile birlikte ortaya çıkan buharın tesiriyle genişerek cam gibi tanelerden oluşan bir köpük agregasını meydana getirir. Hacminin 20 kat fazlasına kadar genişeyen ham perlit böylece genişmiş perlite dönüşür. Genleştiğinde perlitin rengi tamamen beyazlaşmaktadır [6].

Perlitin kayaç hali, ham ve genleştirilmiş halinin görünüşleri Şekil 2.1'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, ham perlit gri tonlarında, genleştirilmiş perlit ise beyaz renktedir.



Şekil 2.1: Kayaç haldeki perlit (a), ham perlit (b) ve genişletilmiş perlitin (c) görünümü [7].

2.1.3 Perlitin Fiziksel Özellikleri

Farklı fiziksel özelliklere sahip olan ham perlit ve genişletilmiş perlit Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Ham perlit ve genişletilmiş perlitin fiziksel özellikleri [4,8].

	Ham perlit	Genleştirilmiş perlit
Renk	Gri, grinin tonları ve siyah	Beyaz, gri ve tonları, genişince tümüyle beyaz
Yumuşama Noktası	800-1100 °C	871-1093 °C
Erime Noktası	1315-1390 °C	1260-1343 °C
pH	6,6-8,0	-
Sertlik	-	5-6 mohs
Özgül Isı	0,2 kcal/kg°C	0,2 cal/g °C
Özgül Ağırlık	2200-2400 kg/m ³	-
Isı İletkenliği	-	0,04 W/Mk
Asitte Çözülme	Sıcak konsantre alkali, mineral konsantre asitlerde az erirken, seyreltik mineral veya konsantre zayıf asitlerde çok az erirler.	Sıcak konsantre alkali ve hidrolik asitte çözünken, mineral konsantre asitlerinde az, seyreltik mineral veya konsantre zayıf asitlerde çok az erirler.

Perlit, değişik boyutlarda çatlaklar içeren, soğan kabuğu Őeklinde ufak parçalara ayrılmış camsı bir yapıya sahiptir. Perlitin kayaç hali ise ince taneli, gözenekli, gevşek kolay kırılabilir özelliktedir. Doku ile görünümlerine bakarak perlit aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Taneli perlit
- Ponzalı perlit
- Konsantrik yapılı perlit
- Lifli perlit
- Feno kristalli perlit
- İrili ufaklı kum halinde perlit [8].

2.1.4 Perlitin Kimyasal Analizi

Tablo 2.2: Tipik bir perlitin kimyasal analizi [6].

Kimyasal Bileşenler	Miktar (%)
SiO ₂	71.0 - 75.0
Al ₂ O ₃	12.5 - 18.0
Na ₂ O	2.9 - 4.0
K ₂ O	0.5 - 5.0
CaO	0.5 - 2.0
Fe ₂ O ₃	0.1 - 1.5
MgO	0.02 - 0.5
TiO ₂	0.03 - 0.2
H ₂ O	2.0 - 5.0
MnO ₂ , FeO, Cr	0.0 - 0.1
Ba	0.0 - 0.05
PbO	0.0 - 0.03
NiO, Cu, B, Be	Eser
SO ₃ , Serbest Silis ve klorürler	0.0 - 0.2

Perlit özel bir dokuya sahip, yapısında su içeren, asit bileşimli volkanik bir camdır. Fibrik bir yapıya sahip değildir. Nitrat sülfat, fosfor, ağır metal, radyoaktif element ve organik madde içermez, kimyasal olarak oldukça saftır. Tipik bir perlitin kimyasal analizi Tablo 2.2’de gösterilmiştir [6].

2.1.5 Perlitin Minerolojik Kompozisyonu

Perlitin hacminin büyük bir kısmı (% 90–97) cam olup, feldspat ve biyotit gibi kristalleşen mineraller de içerir. Birazda manyetit ve apatit görülebilir. Volkanik camdan meydana gelen hamur, mikrolitler ve fenokristalleri içinde bulundurur [8].

Perlitin camsı yapısına rağmen, soğan kabuğu görünümlü çatlaklarından ince bir şekilde dağılmış zeolit kristalizasyonu, yani morderit oluşumu tespit edilmiştir. Perlit ortalama 1,497 kırılma indis değerine sahiptir. Perlit camı polarize ışıkta bakıldığında izotropik bir görünüme sahip olmakla birlikte bazen hafif bir çift kırılma gösterebilir. Perlitlerin x ışını analizi (XRD) ile en fazla %4 oranında serbest silis içerdiği tespit edilmiştir [8].

2.1.6 Perlitin Üretim Yöntemi ve Genleştirilmesi

Perlit madeninin üretimi açık işletmecilik metodu ile yapılmakta ve kırma-öğütme-sınıflandırma aşamalarından sonra genleştirilmiş perlit meydana gelmektedir. Perlit, ocağa yakın bir yerde ilk kaba kırmadan geçirilip, gerekli tane iriliğine getirilir ise ekonomi sağlamaktadır [6].

Perlitin hazırlanmasında dikkat edilmesi gereken özellikler ise:

- Yapılabildiği kadar perlit nodüllerine ayırmak veya küp biçiminde taneler elde etmek,
- Çok inceltmeden ve kabuksu dokusuna zarar vermeden gerekli tane iriliğine kadar perlit kırarak,
- İstenilen tane boyuna ayırmak olarak sıralanabilir.

Perlit, kolaylıkla kırılabilen ve iyi öğütülebilen bir kayadır. Fakat kırma darbeleri tane dağılımını etkilediğinden dolayı, kırıcı ve öğütücü seçimine dikkat edilmelidir [6].

Perlit hazırlama tesislerindeki işlemler aşağıdaki gibidir [6]:

- Ön öğütme
- Kurutma
- Öğütme
- İnce öğütme
- Eleme, sınıflandırma, boyutlama
- Depolama

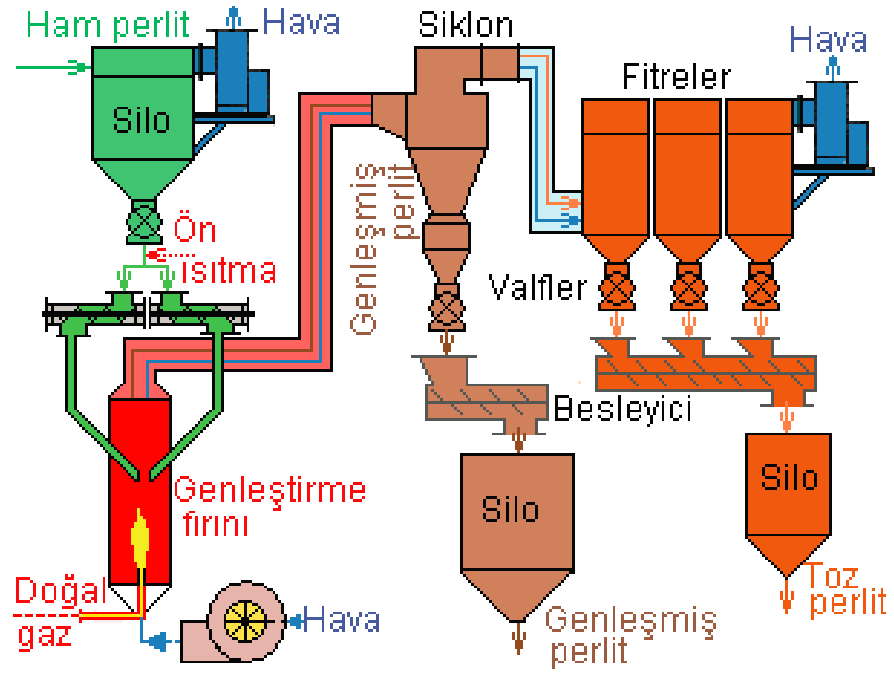
Perlit çeşitli kullanım alanlarına göre değişik boyutlarda talep edildiğinden öğütmede esneklik önemlidir. Perlit genellikle aşağıda verilen boyutlarda talep görmektedir [9]:

- 0,05 mm; 0,3-1 mm; 0,3-1,6 mm; 0,3-2 mm (0,3 mm altındaki miktar en çok %8)
- 0,3-2 mm (0,3 mm altındaki miktar en çok % 40)
- 0-0,4 mm; 0 – 1,2 mm (0,3 mm altındaki miktar en çok % 10)
- 0.8-1,6 mm; 0-2,0 mm (0,3 mm altındaki miktar en çok % 40)
- 0-0,4 mm; 0,4-1,2 mm; 1,2-2,0 mm.

1920’li yıllardan bu yana perlit ve perlit gibi volkanik cam kayaçların hızlı ısıtma ile genleştikleri, yine bu yıllarda perlitin Almanya’da geliştirilerek tuğla yapımında kullanıldığı da bilinmektedir. Perlit 1940 yılında ise Las Vegas’taki bir fırında deneme amaçlı geliştirilmiş, alçı ile birlikte kullanılarak yapı sıvası üretilmiştir. 1941’de Arizona yakınlarında bulunan Picket Post Dağı’ndan çıkarılmış olan ham perlit gaz fırınına ani bir şekilde atılarak pişirilmiş ve bu deneme sonucunda geliştirilmiş perlitin kullanılması ve işlenmesi ile ilgili deneyler yapan bir tesis kurulmuştur. 1950’li yıllara gelindiğinde ise, perlitin hafif beton agregalarında kullanımı yaygınlaşmış ve endüstrileşmenin gelişmesiyle de kullanım alanlarında ciddi artış olmuştur [8].

Ham perlitin günümüzdeki geliştirilme aşamalarını ise şöyle anlatabiliriz; Öğütülerek boyutlandırılması yapılan ham perlitin ön ısıtma ile (400°C) yüzey suyu uzaklaştırılır (%80-90’ı) ve patlamaya hazırlanır. Ardından perlit 700-1200°C arasında sıcaklığı değişen bir alev üzerinde içerdiği öz suyunun aniden buharlaşmasıyla çok kısa bir süre içinde sürede mısır taneleri gibi patlayarak hacmi 30 kata kadar artabilmektedir. Bu sayede geliştirilmiş perlit hafif, gözenekli ve

camsı bir yapıya sahip olur. Ham perlitin genişletirme şeması Şekil 2.2’de verilmektedir [10].



Şekil 2.2: Ham perlitin genişletirme şeması [10].

Perlit genişletilirken dikkat edilmesi gereken en önemli faktörler ise:

- Kullanılan perlitin cinsi
- Gerekli ısıtma süresi
- Tane iriliği
- Genleşme sıcaklığıdır.

Genleştirme tesisleri ise; hammadde depolama, genişletirme, ayırma ve paketlenme olmak üzere dört birimden meydana gelmektedir.

Genleştirme tesislerinde kullanılan fırınlar ise, perlitin cinsine ve istenen ürüne göre değişiklik göstermesine rağmen son yıllarda mazot ya da gazla çalışan sabit ve dikey fırınlar tercih edilmektedir [6].

2.1.7 Dünyadaki Mevcut Durum

2.1.7.1 Rezervler

Dünyada nemli perlit rezervleri Tersiyer-Erken orta Kuvaterner yaşlı volkanik bölgelerde yoğun olarak bulunmaktadır. Dünya perlit rezervleri volkanik kuşak içindeki bölgelerde mevcuttur. ABD, Türkiye, Yunanistan ve Macaristan zengin perlit kaynaklarına sahip ülkelerdir. Dünya görünür rezervi 700 milyon ton'dur. Dünya toplam rezervi (görünür+ muhtemel + mümkün) 7.700 milyon ton iken; bu rezervin 5.700 milyon tonu yani % 74'ü Türkiye'dedir. Dünya ham perlit rezervleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3: Dünya ham perlit rezervleri (milyon ton) [11,12].

Ülkeler	Görünen Rezervler	Toplam Rezervler
Amerika	50	200
Yunanistan	120	300
Türkiye	57	5.700
Macaristan	49	(a)
Diğer ülkeler	424	1.500
Dünya Toplamı	700	7.700

(a) Macaristan için toplam rezerv değerleri diğer ülkelerin içinde verilmiştir.

2.1.7.2 Üretim ve Tüketim

2011-2019 yılları arasında Dünyadaki perlit üretiminin diğer yıllara oranla artış gösterdiği gözlenmektedir. 2008'da Dünya perlit üretimi ortalama 1.7 milyon ton iken, 2014 itibariyle Çin'de perlit üretimine başladıktan sonra 2018 yılında Dünya perlit üretimi 4.6 milyon ton'a kadar ulaşmıştır. Çin'deki perlit üretimiyle birlikte Dünya'nın önde gelen üreticilerinin üretim oranlarında da azalma olmuştur. Üretim miktarları sırasıyla Çin %41, Türkiye %22, Yunanistan %21 ve Amerika %12'dir. Tablo 2.4'te 2017 ve 2018 yıllarındaki dünya perlit üretim miktarları verilmektedir [11,12].

Tablo 2.4: Dünya ham perlit üretimi (bin ton) [12].

Ülkeler	2017	2018
Çin	1.930	1.900
Türkiye	1.000	1.000
Yunanistan	930	950
Amerika	570	560
Ermenistan	45	45
Macaristan	35	35
İran	20	20
Meksika	20	20
Yeni Zelanda	25	25
Diğer Ülkeler	75	45
Dünya Toplam	4.650	4.600

Dünyada üretilen ham perlitin büyük bir kısmı geliştirilmiş olarak tüketilmektedir. Geliştirilmiş perlit çok iyi ısı ve ses yalıtım özelliğine sahip olduğu için, kullanımı oldukça yaygın bir yapı malzemesidir. Perlit tüketimi büyük ölçüde inşaat sektöründeki dalgalanmalara bağlı olarak değişiklik göstermektedir [6].

Amerika Dünya'daki önde gelen üretim ve tüketim yapan ülkelerden biri olup, 2018'de tükettiği 680 bin ton geliştirilmiş perlitin %58'ini inşaat üretim ürünlerinde, %15'ini tarım agregası olarak, %12'sisini filtre yardımcı malzemesi olarak, %9'unu dolgu malzemesi olarak ve %8'ini diğer alanlarda kullanmıştır [12].

2.1.7.3 İthalat ve İhracat

Perlit ihracatını en çok yapan ülkelerin başında Amerika gelmektedir. Fakat perlit geliştirme tesisleri tüketim alanlarına yakın olan doğu eyaletlerinde bulunurken, perlit yatakları ise batı eyaletlerinde bulunmaktadır. Bu sebeple daha ekonomik olduğu için okyanus navlunu kullanılarak, Yunanistan'dan perlit ithal edilmektedir. Amerika kendi üretimini de Kanada'ya ihraç eder, bir kısmını da ilgili tesislere ve ham olarak yöredeki tüketicilere dağıtır [6].

Yunanistan, Türkiye, Macaristan ve Ermenistan perlit ihracatı yapan diğer ülkeler arasındadır. Avrupa'da genellikle Belçika, Lüksemburg ve Fransa bu ülkelerden ithalat yaparlar. Yapılan ithalatın çoğunluğu Türkiye'den karşılanmaktadır [6].

Çin lider üretici olmasına rağmen, tüketimini iç piyasada yaptığı tahmin edilmektedir. Böylece Türkiye ve Yunanistan ihracat noktasında lider olmaya devam etmektedir [12].

Dünyanın en büyük perlit tüketicisi konumundaki Amerika, 2018 yılında 200 bin ton perlit ihracatı, 30 bin ton perlit ithalatı yapmıştır. 2014-2017 yılları arası ithal edilen perlitin %95'ini Yunanistan'dan, %2'sini Meksika'dan, %2'sini Türkiye'den ve %1'ini diğer ülkelerden temin etmiştir [12].

2.1.8 Türkiye'deki Durum

2.1.8.1 Perlitin Türkiye'de Bulunış Şekilleri

Ülkemizdeki önemli perlit rezervleri Tersiyer-Erken orta Kuvaterner yaşlı volkanik bölgelerde yoğun olarak mevcuttur. Genellikle riyolitik volkanizmalar ile alakalıdır [6].

Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan Sarıkamış perlitleri, genç neojen riyolitik volkanizmaları ile doğrudan bu akıntılarla biçimlenmiş, riyolit lavların, riyolitik tüf ve diğer volkanik tortular içerisinde geniş alanlara yayılmıştır. Güneydeki perlit rezervleri ise Mescitli Köyü yakınlarından başlayıp Sarıkamış civarına kadar 15 km'lik bir uzantıya sahiptir [6].

İç Anadolu'da ise Nevşehir perlitleri, Acıgöl krateri civarında plio-kuvaternere ait tali domlar şeklindedir. Ege Bölgesi'ne gelince, perlit oluşumu Menderes ve Karaburun masifleri arasında kalan mesozoyik bir kıvrımın miyosen riyolitik volkanizmaları ile alakalıdır. Menderes (Cuma Ovası) perlitleri ise, Murat tepe ile Karadağ arasında kesintili olarak 10 km boyunca devam eder. Cevher yataklarının derinliğinin 25-90 m arasında olduğu belirtilmektedir [6].

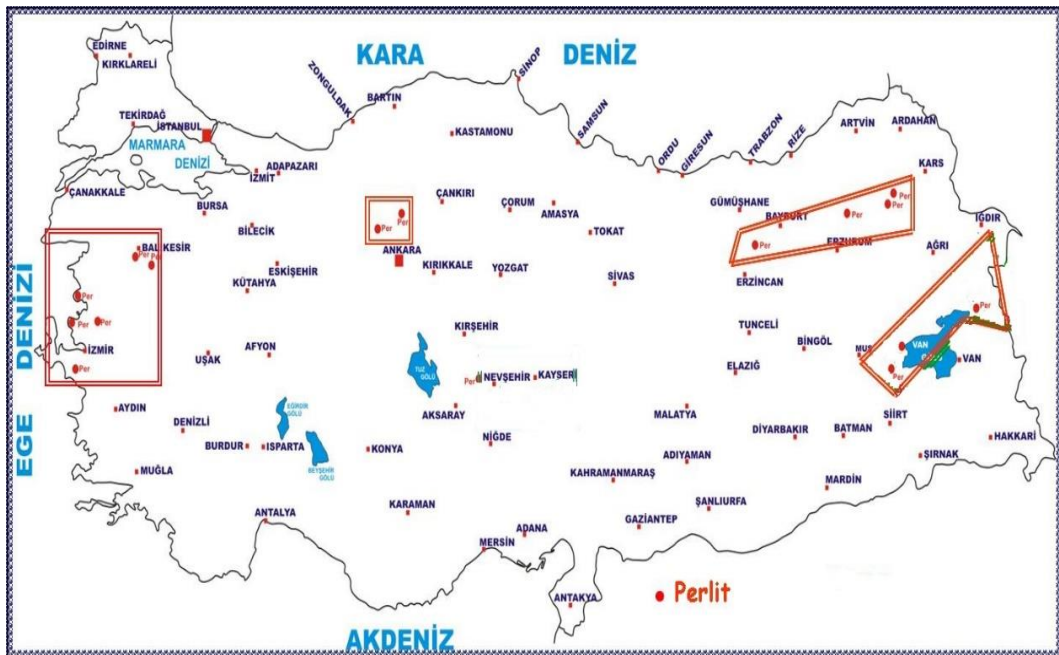
2.1.8.2 Rezervler

Tablo 2.5: Türkiye perlit rezervleri (bin ton) [13].

Bölge	Rezerv	Bölge	Rezerv
Kars-Sarıkamış	2.403.000	Ankara-Çubuk	51.000
Van-Erciş	1.400.000	Ankara-Kızılcahamam-Güvem	31.500
Bitlis-Adilcevaz ve Tatvan	940.000	Balıkesir-Savaştepe	26.000
Nevşehir-Derinkuyu-Acıgöl	800.000	Balıkesir-Sındırgı	21.206
Erzurum-Pasinler	386.824	Manisa-Saruhanlı	17.700
Çankırı-Orta-Kalfat	128.200	Kütahya-Avdan	11.500
İzmir-Bergama-Cumaovası-Foça	88.000	Ankara-Kızılcahamam-Çamkoru	8.000
Erzincan-Mollatepe	71.500	Ankara-Kızılcahamam-Korkmazlar	3.700
Toplam Rezerv			6.388.130

Tablo 2.5 bize Türkiye perlit rezervlerini göstermektedir. Dünya rezervlerinin %74'ü Türkiye'de bulunmaktadır. Dünya ile karşılaştırılınca, görülüyor ki Türkiye'de perlit rezervleri oldukça yüksektir. Bu nedenle perlit Türkiye için önemli bir mineraldir. Şekil 2.3.'de de Türkiye perlit rezervleri harita üzerinde gösterilmektedir.

Şekil 2.3: Türkiye perlit rezervleri haritası [8].



2.1.8.3 Üretim ve Tüketim

Tablo 2.6: Türkiye ham perlit üretimi (bin ton) [12,14].

Yıllar	Üretim Miktarı
2012	887
2013	1.075
2014	897
2015	925
2016	1.000
2017	1.000
2018	1.000

2014 yılında, Türkiye %40 oranla Dünya perlit üretiminin lideri durumunda olmuştur. 2018 yılına geldiğimizde, Çin'in üretime katılmasıyla birlikte üretim oranımız %22 ye kadar düşmüştür [12,14].

Türkiye zengin perlit rezervlerine sahip olmasına rağmen yurtiçinde talebi çok azdır. İyi bir ısı ve ses izolasyon malzemesi olan perlit iç tüketimdeki hak ettiği değeri bir türlü kazanamamaktadır. Perlit tüketimi ülkemizde %60 inşaat, %20 sanayi, %17 tarım ve %3 diğer kullanım alanlarında yapılmaktadır [6].

2.1.8.4 İthalat ve İhracat

Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü 2017 yılı Türkiye perlit dış ticaret verilerine göre; perlit ithalatı 97,49 ton iken, ihracatı ise 495,911 bin tondur [15].

2.1.9 Kullanım Alanları

2.1.9.1 Genleştirilmiş Perlitin Kullanım Alanları

Genleşmiş perlite ticari değer kazandıran en önemli özellikleri; fiziksel esnekliği, az hacimdeki düşük yoğunluğu, düşük ses geçirgenliği, kimyasal sabitliği ve ateşe karşı dayanıklı olmasıdır. Genleştirilmiş perlitin yaygın olarak kullanıldığı sektörleri şöyle sıralayabiliriz [6]:

A- İnşaat:

En geniş kullanım alanlarından birini inşaat sektörü teşkil eder. Özellikle geliştirilmiş perlitin son yıllarda inşaat sektöründeki kullanımını hızla artmaktadır. Geliştirilmiş perlitin inşaat sektöründeki kullanım alanlarını Tablo 2.7’de verilmiştir [6].

Tablo 2.7: Geliştirilmiş perlitin inşaat sektöründeki kullanım alanları [6].

Kullanım Alanları	Kullanım Yerleri
İzolasyon Malzemeleri	Çatı ve zeminlerde
Perlitli Sıvalar	İnşaat ve zeminlerde
Perlit Agregalı Hafif Yalıtım Betonu	Çimento ve alçı bağlayıcı olarak
Perlit Agregalı Hafif Yapı Elemanları	Tavan kiremitleri, boru izolasyonları vs.
Gevşek Dolgu Malzemesi	Zemin, duvar boşlukları ve tavan aralarında köpük yalıtım malzemesi
Yüzey Döşemelerinde	Isı ve ses yalıtım malzemesi
Özel Amaçlı	Çimento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan perlit betonları

B- Tarım:

Perlitten toprağın fiziksel özelliklerini arttıran “substrat” maddesi olarak, uygun toprak koşullarını sağlayarak, topraktaki sıklığın artmasına yardım etmek için, su drenajını azaltarak nemi tutmak, fidelerin üreme ortamını oluşturmak ve toprağı havalandırmak için; tarla tarımında, çimli spor alanlarında bahçe ve seracılıkta sıklıkla faydalanılmaktadır [6].

C- Sanayi:

Sanayi sektöründe geliştirilmiş perlit, en çok kimyasal olarak nötr olmasından dolayı gıda, ilaç ve diğer kimyasal maddelerin üretiminde filtre yardımcı maddesi olarak kullanılmaktadır. Geliştirilmiş perlitin sanayi sektöründeki kullanım alanları Tablo 2.8’de verilmiştir.

Tablo 2.8: Genleştirilmiş perlitin sanayi sektöründeki kullanım alanları [6].

Kullanım Alanları	Kullanım Yerleri
Filtre Yardımcı Malzemesi Olarak Gıda, İlaç ve Kimya Sanayiinde	Gıda sanayiinde; bitkisel yemeklik yağları, meyve suları vb. süzmede
	İlaç ve kimya sanayiinde; antibiyotiklerin ve boyaların süzülmesinde kullanılır. Kağıt sanayiinde ise; pektin, sitrik asit, flok ve fosforik asit süzmede, soda külü eriyiklerinin, sülfürik asit, sodyum silikat ve uranyum şerbeti filtrasyonlarında
	Yüzme havuzlarının suyu, makine yağı, atık suları ve içme suyu temizleme, süzme aşamalarında
İlaç ve Kimya Sanayiinde Dolgu Malzemesi Olarak	Çeşitli ilaçlarda, temizleyici tozlarda, dinamit üretiminde, gübrelerde, yüzeyi genli boyaların üretiminde, kozmetik sanayiinde
Sanayide Isı Yalıtım Malzemesi Olarak	Soğuk hava depolarının yalıtımında, 1000°C ye kadar sıcaklıktaki reaktörlerin, potanların vb. yalıtımında, sıvılaştırılmış gaz tanklarının ısı yalıtımında
Seramik ve Cam Sanayiinde	Katkı maddesi olarak
Metalürjide	Döküm kumuna katkı maddesi olarak, dökümcülükte metalurjik flaks olarak, potadaki ergimiş metalin korunmasında, demir-çelik sanayiinde ergimiş metalin cüruf kontrolünde, dövmede veya haddeye giden sıcak metal ingotların ısı kayıplarını önlemede, perlitli yalıtıcı refrakterlerin üretiminde (seramik bağlayıcılı refrakter tuğlalar, alüminyum fosfat bağlayıcılı perlit refrakter tuğla veya betonlar, perlitli refrakter harçlar)

D- Diğer Alanlardaki Uygulamalar

- 1) Çimentolama işlemini kolaylaştırıcı katkı maddesi olarak su, petrol ve jeotermal sondajlarda
- 2) Kalafat macunu olarak gemi diplerini kaplama ve yalıtımında
- 3) Özellikle denizlerdeki petrol ve diğer yağlı atıklardan kaynaklanan su kirliliğini temizlemede
- 4) Buharlaştırma sonucu oluşan su kaybını önlemek için baraj göllerinde, kentlerde, açık su rezervuarlarında
- 5) Dolgu malzemesi olarak ambalajlamada
- 6) Dolgu ve katkı malzemesi olarak Plastik köpük ve plakalara
- 7) Hafif ve ucuz plastik mobilya yapımında dolgu maddesi olarak
- 8) Özellikle çelik konstrüksiyonlarda yangını önlemek için yalıtım olarak [6].

2.1.9.2 Ham Perlitin Kullanım Alanları

Ham perlitin de genişletilmiş perlit gibi geniş kullanım alanları vardır. Ham perlitin kimyasal bileşiminde silisli ve alüminyumlu bileşikler bulunması kalsiyum esaslı bağlayıcılar ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik aktivite göstermesini sağlar. Aynı zamanda ham perlit çimentoya dayanıklılık da kazandırdığı için inşaat sektöründe de kullanımı uygundur. Ham perlit kayacı kırma, öğütme, eleme işlemleri sonucu kullanılabilirdiği gibi doğal agrega halinde bulunan perlit de kullanılabilir [6].

Ham perlitin, kırılmış öğütülmüş ve tane boyutlarına ayrılmış olarak kullanım alanları şöyle sıralanabilir [6]:

1. Özellikle kanalizasyon borularının üretiminde asit ve bazlara karşı dayanıklı olduğu için kullanılmaktadır.
2. İç ve dış inşaat sıvalarında
 - a) Su alan inşaatlarda (dona karşı dayanıklı olduğundan)
 - b) Çatı ve teraslarda (su izolasyonu)
 - c) Yüzme havuzların yapımında
 - d) Isı izolasyonu için sıva olarak veya briket gibi hafif yapı elemanı üretiminde,
3. Demiryollarında (patinaj kumu)

4. Abresif sanayiinde (aşındırıcı)
5. Su arıtma tesislerinde (filtre kumu veya çakıllı olarak)
6. Karayollarında (asfalt dolgu malzemesi)
7. Dökümhanelerde (metal temizleyici, atık koyulaştırıcı ve silis kaynağı)

2.2 Çimento

Çimento çok eski zamanlardan günümüze kadar süregelen ve hala geliştirilip üretilmeye devam eden bir yapı malzemesidir. Çimento asıl olarak Latince “caementum” kelimesinden gelir ve yontulmuş taş kırıntısı demektir. Ama sonra “bağlayıcı-birleştirici” anlamında da kullanılmaya başlanmıştır. “Ciment” kelimesi ise ilk olarak Fransa’da 1300’lerde kullanılmış, 1400’lere gelindiğinde ise “cement” olarak İngiltere’de kullanılmıştır [16].

‘Hidrolik Bağlayıcı’ esas olarak su ile tepkimeye girdiğinde havada veya suda sertleşerek etrafındaki maddeleri birbirine yapıştırma özelliği olan malzemelere denilmektedir [17].

Çimento ise; silisyum, kalsiyum, demir ve alüminyum oksitleri içeren kalker ve kil karışımının sinterleşme derecelerine (1250-1450°C) kadar pişirilmesi ile oluşan klinkerin, bir veya daha çok katkı maddesi ilave edilerek öğütülmesiyle üretilen, hidrolik bağlayıcı özellikli bir yapı malzemesi olarak tanımlanır [17].

2.2.1 Portland çimentosu

Portland Çimentosu adını Büyük Britanya’daki Portland Yarımadası’ndan almaktadır. Portland Çimentosu ilgili olduğu standartta ise; su ile karışımı sonucu hidrasyon reaksiyonları göstererek priz alan ve sertleşen bir hamur oluşturan, sertleştikten sonra ise suda bile kararlılığını ve dayanımını koruyabilen, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bir bağlayıcı olarak tanımlanmıştır [16].

Portland Çimentosu olarak elde edilen ürün genellikle gri renktedir. Bu gri renk, çimento üretiminde kullanılan hammaddelerde çok küçük miktarda yer alan demir oksitten (Fe_2O_3) kaynaklanmaktadır.

Portland çimentosu toz gibi ince tanelidir ve inceliği 1-200 µ arasında değişmektedir. Özgül ağırlığı ise 3,10-3,15 g/cm³ tür [18].

Su ve çimento bir araya geldiğinde iki malzeme arasında hidrasyon reaksiyonları başlayıp devam etmektedir. İlk önce yumuşak plastik gibi olan çimento hamuru, zamanla katılaşarak sertleşmiş bir hamura dönüşmektedir. Bu şekilde çimento hamurunun katılaşmasına ve sert şekil alamayacak duruma gelmesine çimentonun priz alması denilmektedir [18].

Çimento hamurunun hidrasyon sonrası katı, sert ve dayanıklı bir hal almış haline “sertleşmiş çimento hamuru” denilmektedir.

Çimento hamurunu meydana getiren su ve çimento bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyonlar (hidrasyon reaksiyonları) uygun sıcaklık ve nemlilik devam ettiği süre boyunca sürmektedir ve böylece kazanılan dayanım miktarında artış elde edilmektedir.

Çimento hamurunun hangi hızla katılaşabileceği, hangi hızla dayanım kazanabileceği, ana bileşenlerin su ile arasındaki kimyasal reaksiyonların hangi hızla ve ne ölçüde gerçekleşmiş olduğuna bağlıdır. Böyle bir durum ise çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin oranlarına, çimento tanelerinin inceliğine, reaksiyonların devam edebilmesi için yeterli nemlilik ve sıcak ortamının mevcut olup olmamasına bağlıdır [18].

2.2.2 Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler ve Anabileşenler

Tipik bir Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve yaklaşık miktarları Tablo 2.9’ da gösterilmiştir. Tablo 2.9’da görüleceği üzere Portland çimentosu bileşiminde yüksek miktarlarda sönmemiş kireç, silis, alümina ve demir oksit vardır.

Tablo 2.9: Tipik bir Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları [19].

Bileşenler	Oksit	Miktar (%)
Kireç	CaO	60-67
Silisyum Dioksit	SiO ₂	17-25
Alümina	Al ₂ O ₃	3-8
Demir Oksit	Fe ₂ O ₃	0.5-6
Kükürt Trioksit	SO ₃	1-3
Magnezyum Oksit	MgO	0.1-4
Alkaliler	Na ₂ O + K ₂ O	0.2-1.3

Silikatlar ve alüminatlar olarak ikiye ayrılan çimentonun ana bileşenleri Tablo 2.10’da gösterilmektedir.

Tablo 2.10: Çimentonun ana bileşenleri [16,18].

	Silikatlar		Alüminatlar	
Kimyasal Formülü	3CaO.SiO ₂	2CaO.SiO ₂	3CaO.Al ₂ O ₃	4CaO. Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
Kimyasal Adı	Trikalsiyum Silikat	Dikalsiyum Silikat	Trikalsiyum Alüminat	Tetrakalsiyum Alüminoferrit
Sembolü	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF

Çimento hamuru oluşurken, su ve çimento bir araya gelir gelmez çimentonun ana bileşenleriyle su ayrı ayrı reaksiyona girmektedir. Böylece her bir ana bileşenin reaksiyon hızı, reaksiyon esnasında açığa çıkan ısı ve sonucunda oluşan ürünün çimento hamurunun bağlayıcılık özelliğine aynı zamanda dayanımına katkısının farklı olmasını sağlamaktadır [18,19].

C₂S ve C₃S gibi kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin hidratasyonu sonucu çimento hamuru en son dayanımına ulaşmaktadır. Ancak, C₂S’nin çimento hamurunun dayanımına katkısı ilk günlerde az olmakla birlikte, daha sonra artış

gösterir. C_3A 'nın ilk saatlerde dayanıma katkısı yüksek olmasına rağmen, ilk bir iki haftaya bakılacak olduğunda dayanıma katkısı (bağlayıcılık özelliği) hem ilk hem de son günler için düşük olarak belirtilmektedir. Çimento ana bileşenlerinin özellikleri Tablo 2.11'de belirtilmiştir [18,19].

Tablo 2.11: Çimento ana bileşenlerinin özellikleri [18,19].

Çimento Özellikleri		Bileşenler ve Özellikler			
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon Hızı		Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Hızı		Orta	Az	Çok Yüksek	Orta
Bağlayıcılık Değeri	İlk Günlerde	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
	Sonunda	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

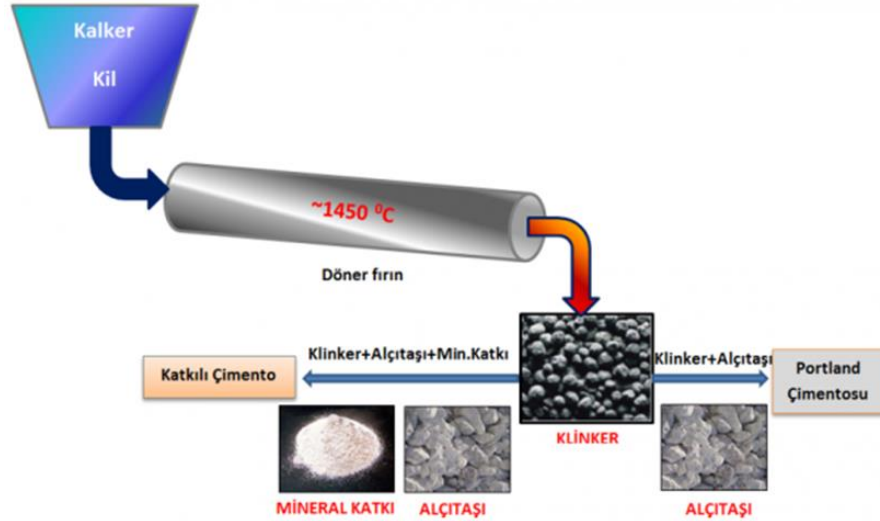
C_3A ve C_4AF 'nin özellikleri Tablo 2.11'de verilirken, çimentonun kompozisyonunda bulunan bir miktar alçıtaşının etkisi de göz önünde bulundurulmuştur. C_3A ve C_4AF 'nin su ile birleşmelerinde oluşan kimyasal reaksiyonlarda alçıtaşı da görev yapmakta ve bu reaksiyonları yavaşlatmaktadır. Alçıtaşı olmasa, C_3A ve su çok daha hızlı reaksiyona girmekte ve ayrıca çimento hamurunun dayanımına önemli katkıda bulunamamaktadır [18,19].

2.2.3 Çimentonun Üretimi

Çimentonun ana hammaddelerini kalker (kireç taşı) ve kil oluşturur. Çimento üretimi için uygun miktarda kireç (CaO), silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) içeren hammadde, belli bir eğime sahip döner fırında 1400-1500 °C sıcaklıklara kadar pişirilerek "klinker" adı verilen bir ürün elde edilmektedir.

Klinker soğutulduktan sonra %3 ile %6 oranlarında alçı taşı ilave edilerek birlikte öğütülürler. Alçıtaşı çimentonun priz süresini ayarlamak için ilave edilir. Böylece klinker ve alçı taşının beraber öğütülmesi sonucu "Portland Çimentosu" ortaya çıkmış olur.

Klinker ve alçı taşına öğütme esnasında ilgili standardın uygun bulunduğu miktarlarda mineral katkıları (tras, cüruf, uçucu kül, kalker tozu vb.) eklendiğinde ise “katkılı çimentolar” elde edilmiş olur [16,18]. Şekil 2.4’te çimento üretimi gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Çimento üretimi [16].

2.2.4 Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

Jeolojide sedimenter kayalar olarak da bilinen kalker(kireçtaşı) ve kil çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeleri oluşturur. Klinker üretiminin ana bileşenleri olan CaO için kalker (kireçtaşı); SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ için de kil mineralleri temel kaynakları oluşturur. Üretimde kullanılacak hammaddelerin uygunluk dereceleri onların kimyasal bileşimleri ile orantılıdır. Kireçtaşı bileşeni için kireç standardı bir kriter olarak kullanılmakla birlikte bu değer SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi bileşenler ve aynı zamanda CaO içeriği hakkında bilgi verir. Kil minerali olarak kullanılacak kayalarda silikat ve alümina oranı dikkate alınarak değerlendirme yapılmaktadır [17].

Ayrıca klinkerin öğütülmesi sırasında puzolanik maddeler, silis ve kalkerli uçucu küller, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi katkı maddeleri belirli oranlarda klinkere katılarak değişik tipte çimento üretimleri yapılmaktadır [17].

Çimentonun üretiminin başlamasıyla birlikte çimento içinde alçıtaşı kullanımı da başlamıştır. Kimyasal bileşimi kalsiyum sülfat olan alçıtaşı esas olarak çimentoya priz düzenlemek için ilave edilir. Alçıtaşı çimentoyu ani prizden korur ve böylece betonu birkaç saat işlenebilir yapar [17].

2.2.4.1 Kalker (Kireçtaşı)

Kireçtaşı kimyasal bileşiminde en az %90 CaCO₃ (kalsiyum karbonat) bulunan kayalara verilen addır. Ayrıca kireçtaşı, kimyasal bileşiminde %90'a kadar CaCO₃ ve minerolojik kompozisyonunda ise %90'a kadar kalsit içeren kayalar için de yerbilimciler tarafından kullanılan bir terimdir [20].

Kalkerin minerolojik kompozisyonunu saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluşur. Kalsit ve aragonit; kalsiyum karbonatın iki ayrı kristal şekli olup, teorik olarak %56 CaO ve %44 CO₂ içermektedir. Ama doğada hiçbir zaman saf olarak bulunmazlar. İkincil derecede değişik madde ve bileşiklerin içinde yer alırlar. Sarı orijinal renkleri olup, kahverengi ve siyah renklerde de görülebilmeleri mümkündür. Kalkerin sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı 2,5-2,7 g/cm³ arasındadır [20].

Çimento sanayii alanında hammadde veya düzenleyici yani korrektör olarak kullanılacak kalkerlerin kalitesinde, içerdiği yabancı öğelerden oluşan safsızlıkların durumu doğrudan etkili olmakla birlikte çimento içerisindeki safsızlıkların gerek klinker ve gerekse çimentoda bulunan miktarlarını sınırlayan norm ve standartlar mevcuttur. Bu kurallara bağlı kalınarak üretilen çimento tipi ve kalitesi her ülkede genel olarak kabul edilmekte ve uygulanmaktadır. Hammadde içerisindeki safsızlıkların klinkere yansıma durumu genel olarak hesaplamalarla değerlendirilebilmektedir [17].

2.2.4.2 Kil

Yerbilimciler kil tanımını, hem killi kayalar için hem de killer için kullanmaktadır. Böylece kil, minerallerinden oluşmuş kayalar olarak tanımlandığı gibi tane boyutları 2 mikron'dan daha küçük parçacıklardan oluşan kayalar veya çökellere de denilmektedir. Kil, minerolojik bileşiminde %90'a kadar kil mineralleri

bulunan kayalara verilen isimdir. Kil minerallerinin temel özelliğini kimyasal bileşimlerinde bulunan alüminyum oksit (Al_2O_3) ve sulu alüminyum silikatlar oluşturur. Ayrıca kil bünyesinde değişik miktarlarda demir, alkaliler ve alkali topraklarda bulundurmaktadır [20].

Killer genellikle mineralojik bakımdan plastik olan ve olmayan elemanları içerirler. Plastisite killeri diğer minerallerden ayıran en önemli özelliklerinden biridir. Bu sayede killer su ile kolayca şekil alma özelliğine sahip olmaktadır. Plastisite kil minerallerinin yapısında bulunan kolloidlerin yüzdesiyle ve killerin tane inceliğiyle doğrudan orantılıdır [20].

Çimento sanayinde kullanılan killerin plastisite sayılarının ise %15-20 arasında olması yeterlidir. Aynı zamanda çimento sanayinde kullanılacak killerde 900-1050°C 'de sinterleşme olması tercih edilmektedir [20].

Çimento hammaddesi olarak kullanılacak killerde mineralojik ve kimyasal özellikler ile birlikte homojenite de çok büyük önem taşır. Killerin kimyasal analizinde SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , SO_3 ve kızdırma kaybı % miktarları tespit edilmelidir. Mineralojik kompozisyonlarına bakarken de kil minerallerinin dışında bulunan safsızlıkları meydana getiren unsurlar ve bunların % miktarları tespit edilir.

Çimento üretiminde kullanılacak kilin kimyasal bileşiminde Al_2O_3/Fe_2O_3 oranı 2/1 civarında olması, SiO_2 % miktarının belirli bir üst sınırdan kalması ve alkali oksitlerin miktarının %1'in altında olması istenir. Bir kil minerali olan ve beyaz çimento üretiminde kullanılan kaolin ise, çimento sanayinde oldukça önemlidir [17].

2.2.5 Çimento Üretiminde Kullanılan Mineral Katkılar

Çimento ve betona uzun yıllardır doğal veya yapay (endüstriyel) kökenli mineral katkıları ilave edilmektedir. Bu katkıları detaylı bir şekilde incelemeye önce puzolanik maddenin tanımına bakalım.

Puzolanik Madde (Puzolan); Tek başına hidrolik bağlayıcı niteliği olmayan ama belli inceliklerde öğütülerek kireç hidrat ile karıştırıldığında bağlayıcı özelliğine sahip olan silis ve/veya alüminyum silikat bileşimli maddelerdir [21,22].

Mineral katkıları (örneklerle beraber) aşağıdaki gibi sınıflandırabiliriz [23]:

- Bağlayıcı özellikte olan katkıları: Suda soğutulmuş (granüle) yüksek fırın cürufu.
- Bağlayıcı ve puzolanik özelliği olanlar: Kalkersi uçucu kül ve birtakım bitümlü şist külleri.
- Puzolanik aktivitesi yüksek olan mineral katkıları: Silis dumanı ve pirinç kabuğu külü.
- Normal puzolanlar: Silissi uçucu kül, doğal veya kalsine puzolanlar.
- Puzolanik aktivitesi düşük olan mineral katkıları: Yavaşça soğutulmuş yüksek fırın cürufu, bazı doğal puzolanlar ve kazan cürufları vs.
- Atıl olan katkıları: İnce öğütülmüş kuvars, kalker ve bentonit.

Yukarıda atıl olarak sınıflandırılan katkı maddelerinden biri olan kalker tozunun, çimento hidratasyonu ve hamur oluşumu üzerinde olumlu etki yapabildiği belirtilmektedir.

İlave edildikleri çimento veya klinkerin özelliklerinden kaynaklı olarak mineral katkıların etkileri de değişiklik gösterebilir.

Çimentoya katılan mineral katılardan beklenen yararlar ise [23]:

- Ekonomi ve enerji tasarrufu,
- Çevre kirliliğini azaltılması ve doğal kaynakların korunması,
- Hidratasyon ısısında azalma,
- Çimentonun işlenebilirliğini kolaylaştırılması, dayanıklılığını ve dayanımını arttırmasıdır.

2.2.6 Mineral Katkı Türleri ve Özellikleri

- **Doğal Puzolan:** Puzolanik özellikte ve doğada bulunan madde ve kayalar olup genellikle volkanik kökenlidirler. “Tras” olarak da adlandırılırlar. TS EN 197-1’e bakıldığında, doğal puzolanların kimyasal kompozisyonunda reaktif silis miktarı %25’den az olmaması gerektiği belirtilmiştir.

- **Kalsine Edilmiş Doğal Puzolan:** Belirli ısı işlemler sonucu puzolanik özelliğe sahip olan doğal madde ve kayalardır. Reaktif silis miktarları doğal puzolanlar gibi en az %25 olmalıdır.

- **Granüle Yüksek Fırın Cürufu:** Yüksek fırında pik demir elde edilirken demir madeninde bulunan SiO_2 ve Al_2O_3 içeren gayri saflıklar yumuşatıcı olarak katılan kalkerdeki CaO tarafından bağlanır. Oluşan yüksek fırın cürufunun bileşimi ve Portland çimentosunun bileşimi birbirlerine oldukça benzemektedir. Fırından çıkarken hızlıca soğutulması ve en az 2/3 oranında camsı faz içermesi gerekmektedir. İçindeki CaO, MgO ve SiO_2 miktarları toplamı yine en az 2/3 oranında olmalıdır. $(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$ oranı da en fazla 1 olmalıdır.

- **Uçucu Kül:** Çimentodan çok daha ince olan ve çoğunlukla kömür yakan fırınların baca gazlarına karışan kül parçacıkları elektrostatik yöntemlerle tutulur ve gazlarından ayrılmaları sağlanır. Uçucu kül kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde elde edilmektedir. Kızdırma kaybı 1 saatte % 5’i geçmemekle birlikte, %5 ile %7 arasında ise uçucu kül koşullu olarak çimentoda üretiminde kullanılmaya uygundur.

- **Silisi Uçucu Kül:** Reaktif CaO oranı % 10’dan az ve puzolanik özelliği olan küller silisli uçucu küllerdir. Serbest CaO içerikleri en az % 1 olmalıdır. Serbest CaO değeri % 2.5’e kadar olan küller koşullu olarak çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilirler. Reaktif SiO_2 % 25’den fazla olmalıdır.

- **Kalkersi Uçucu Kül:** Reaktif CaO oranı % 10’dan fazla olan ve puzolanik özelliğe sahip olan uçucu küllerdir. Reaktif CaO oranı %15’e kadar olan küllerde reaktif SiO_2 oranı %25’den fazla olmalıdır. Reaktif CaO oranı %15’den fazla olan küller koşullu olarak çimentoda kullanılabilir. Hacim genişmesi değeri ise 10 mm’nin üzerine çıkmamalıdır.

- **Pişmiş Şist:** 800 °C sıcaklığa maruz bırakılan şist bileşimi puzolanik ve hidrolik bağlayıcı özellikler göstermektedir. Aynı çimento gibi 28 günlük basınç dayanımının en az 25 MPa olması beklenmektedir. Hacim genişleme değeri de 10 mm'yi geçmemelidir.

- **Silis Dumanı:** Silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretimleri esnasında elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsın kömürle indirgenmesi sonucu ortaya çıkan çok ince taneli baca tozları, silis dumanlarıdır. Reaktif silis içeriği %85'den az olmamakla birlikte özgül yüzeyi de en az 15 m²/g değerini vermelidir. Kızdırma kaybı ise 1 saatte en fazla %4 olmalıdır [23,24].

2.2.7 Puzolanik Maddeler (Puzolanlar)

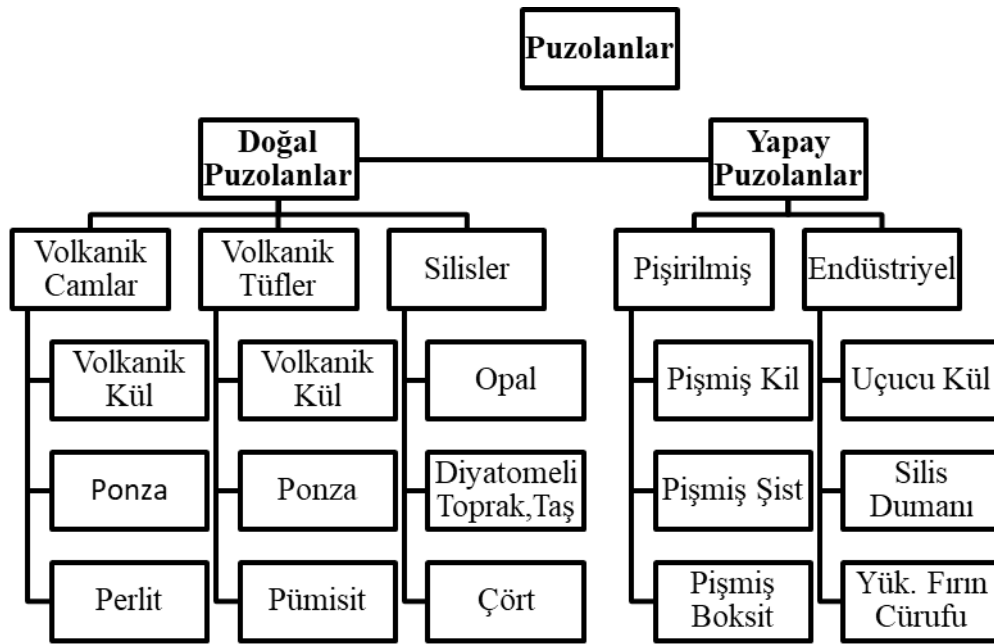
Bölüm 2.2.5'te de bahsedildiği gibi, puzolanlar; tek başlarına çok az hatta hiç hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip değildirler. Fakat çok ince taneler elde edilene kadar öğütüldüklerinde suyun içinde kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerler ve hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip bileşenlerin oluşmasını sağlayan silis ve alüminli malzemeler haline gelirler [21,22].

Puzolan ismini, Vezüv yanardağının kenarındaki Pozzuoli kasabasından almaktadır. Puzolanların kullanımı ise binlerce yıl öncesinden beri devam etmektedir. Örneğin Romalılar, yanardağın eteklerinde bulunan ve volkanik kül içeren tozu, kireçle ve suyla birleştirmiş ve suyun içinde bile sertleşebildiğini çok eski çağlarda tespit etmişlerdir. İnşa ettikleri deniz yapılarında bu bağlayıcıyı kullanmışlar, içene taş parçaları ilave ederek su altında sertleşebilen ve kolayca kullanılabilen bir malzeme ortaya çıkarmışlardır [25].

Puzolanların kimyasal kompozisyonu incelendiğinde büyük miktarda silis ve alümine sahip olduğu görülür. İnce taneli yapıda veya öğütülerek ince taneli yapıya getirilen puzolanların söndürülmüş kireç ve su ile birleştirilmesiyle kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Bu reaksiyonlar sonucu puzolanlar aynı portland çimentosunda olduğu gibi hidrasyona uğrayarak içerisindeki kalsiyum hidroksit ve silisi su ile beraber hidrolik bağlayıcılık özelliği içeren kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerine dönüştürmektedir [18].

Puzolanların söndürülmüş kireçle ve su ile hangi ölçülerde reaksiyona girebileceğine ve hangi ölçülerde bağlayıcılık gösterebileceğine ise “puzolanik aktivite” denmektedir. Puzolanik aktiviteyi etkileyen en önemli faktörler ise; malzemenin tane inceliği, amorf yapıda olması ve yeteri kadar silis- alümin-demir oksit içermesidir [18].

Puzolanik maddeleri doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayıran, genel olarak sınıflandırmalar arasında en çok kullanılan sistem Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5: Puzolanların sınıflandırılması [1].

2.2.8 Çimento Tipleri – Bileşim ve İşaretleme

Çimentonun, kullanım amaçlarına ve daha ekonomik olarak üretilmesine yönelik çeşitli tipleri üretilmiştir. Birkaç tipin haricinde katkısız ve katkılı çimento daima Portland Çimentosu klinkeri kullanılmaktadır.

Genel çimentolara TS EN 197-1’de “CEM Çimentosu” adı verilmiştir. Ayrıca klinker için ayrı bir standart olmadığından klinker için istenen özelliklere de çimento standardının içinde yer verilmiştir [24].

Türkiye’de TS EN 197-1 Türk Standardı esas alınarak beş ana tip çimento üretilmektedir.

- CEM I Portland Çimentosu
- CEM II Portland-Kompoze Çimento
- CEM III Portland Yüksek Fırın Cürüflü Çimento
- CEM IV Puzolanik Çimento
- CEM V Kompoze Çimento

Bu beş tip çimento Tablo 2.12’de verilen 27 alt tip çimentoyu içine almaktadır. Tabloda verilen çimento bileşimleri ana bileşen ile minör ilave bileşenlerden meydana gelmektedir.

- Ana Bileşenler:

A, B, C olarak yer alan çimento tiplerini takip eden D, L, LL, P, Q, S, T, V ve W harfleri, çimentonun kompozisyonundaki puzolan cinsini ve kalkerini belirtmektedir [23].

Çimento ana bileşenlerini klinker ve miktarları %5’in üzerinde olan katkı maddeleri meydana getirir. Çimento tiplerinin ve ana bileşenlerinin belirlenmesi için aşağıdaki sembollerden faydalanılmıştır;

A: En az mineral katkı çimento tipi

B: A tipinden daha fazla mineral katkı çimento tipi

C: B tipinden daha fazla mineral katkı çimento tipi

K: Klinker

D: Silis dumanı

L: Kalker (organik karbon içeriği % 0.5’den az)

LL: Kalker (organik karbon içeriği % 0.2’den az)

P: Doğal puzolan

Q: Kalsine edilmiş puzolan

S: Granüle yüksek fırın cürufu

T: Pişmiş şist

V: Silissi uçucu kül

W: Kalkersi uçucu kül

Çimento ana bileşenlerinin özellikleri ilgili standartta belirtilen hususlara uygun olmalıdır [23].

- Minör İlave Bileşenler:

Bu esas bileşenlerin dışında çimento tiplerine % 0 ile %5 oranında minör bileşen de ilave edilebilmektedir. Fakat ilave edilecek maddenin çimento ana bileşenlerinin içindeki mineral katkılardan olmaması ya da çimento özelliklerini iyileştirecek farklı bir inorganik madde olması gerekmektedir [23].

- Bileşim Oranları:

Tablo 2.12’de çimento tipleri için verilen bileşim yüzdeleri klinker, ana bileşen, katkı ve minör ilave bileşen katkıların toplamını oluşturur. Tüm bu bileşenlerin toplamı 100’dür. Alçı taşı da bu toplamın içindedir. Toplam ana bileşenlerin katkı yüzdesi Portland kompoze, kompoze ve puzolanik çimentolarda ise en az iki değişik katkı maddesi ilave edilerek elde edilir [23].

- Dayanım sınıfları tanımlanırken de;

32.5, 42.5 ve 52.5 gibi 3 standart dayanım sınıfı tanımı yapılmıştır. TS EN 196-1’e göre belirlenen ve MPa olarak ifade edilen değerler 28 günlük çimento norm dayanımını ifade etmektedir. Her standartta dayanım sınıfı için iki erken dayanım sınıfı tanımı da yapılmaktadır. Bunun için de N (normal erken dayanım) ve R (yüksek erken dayanım) sembolleri kullanılmıştır [23].

Tablo 2.12: TS EN 197-1 Genel Çimentoların Bileşimleri [24].

Ana Tipler	Çimento Tipleri ve İşaretleri		Ana Bileşenler										Minör İlave Bileşen		
			Klinker	Yük. Fırın Cürufu	Silis Dum.	Puzolan		Uçucu Kül	Pişmiş şist	Kalker					
			K	S	D	P	Doğal	Doğal Kalsine Edilmiş	V	W	T	L	LL		
CEM I	Portland Çimento	CEMI	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland Cürufllu Çimento	CEMII/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/A-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEMII/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland Puzolanlı Çimento	CEMII/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEMII/A-V	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/B-V	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/A-W	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEMII/B-W	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEMII/A	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEMII/B	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland Kalkerli Çimento	CEMII/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEMII/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEMII/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEMII/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland Kompoze Çimento	CEMII/A-M	80-88	6-20										0-5	
CEM II/B-M		65-79	21-35										0-5		
CEM III	Yüksek Fırın Cürufllu Çimento	CEM III /A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzolanik Çimento	CEM IV/A	65-89	-	11-35						-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55						-	-	-	0-5	
CEM V	Kompoze Çimento	CEM IV/A	35-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-34	31-49	-	31-49			-	-	-	-	-	0-5	

Bu çimentoların fiziksel özellikleri Tablo 2.13 kimyasal özellikleri de Tablo 2.14'de verilmiştir. Tablolardan görüleceği üzere bu çimentolar fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından birbirinden farklıdır. Bu nedenle yerleri ve amaçları da birbirinden farklıdır.

Tablo 2.13: Çimentoların fiziksel özellikleri [24].

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)			Priz Başlama Süresi (dk)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanım		Standart Dayanım		
	2 günlük	7 günlük	28 günlük		
32.5 N	-	≥ 16	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75
32.5 N	≥ 10	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60
42.5 N	≥ 20	-	≥ 52.5	-	≥ 45
42.5 R	≥ 20	-			
52.5 N	≥ 20	-			
52.5 R	≥ 30	-			
	TS EN 197 - 1			TS EN 196 - 3	

Tablo 2.14: Çimento tipleri için gerekli kimyasal özellikler [24].

Özellik	Standart	Çimento Tipi	Dayanım Sınıfı	Özellikler
Kızdırma Kaybı	EN 196-2	CEM I CEM II	Hepsi için	$\leq \% 5$
Çözünmeyen Kalıntı	EN 196-2	CEM I CEM II	Hepsi için	$\leq \% 5$
Sülfat Miktarı (SO ₃) olarak EN 196-2		CEM I CEM II CEM IV CEM V	32.5N 32.5N 42.5N	$\leq \% 3.5$
		CEM III		$\leq \% 4$
Klorür İçeriği	EN 196-2	Hepsi için	Hepsi için	$\leq \% 0.1$
Puzolanik Özellik	EN 196-5	CEM IV	Hepsi için	Deneyi sağlar

2.2.9 Literatür Tarama

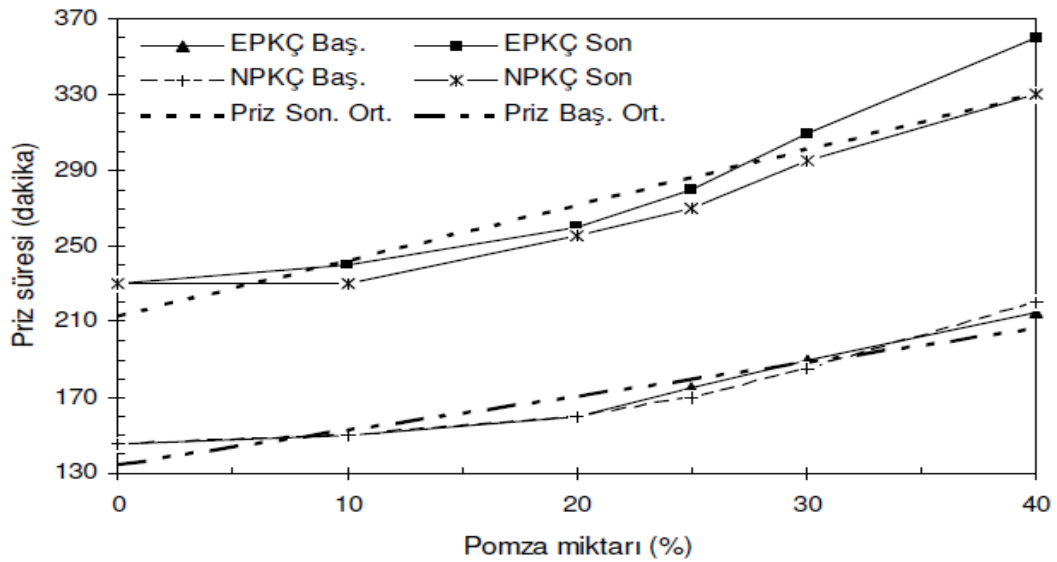
Puzolanik malzemelerin çimento üretiminde kullanılabilirliği amaçlı yapılan çalışmalar incelendiğinde;

Ulusu [26], doktora çalışmasında, Türkiye'de geniş rezervleri bulunan pomzanın çimento üretiminde puzolanik katkı olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çimento üretimine başlanmadan önce Erzincan ve Nevşehir yörelerinden temin

edilen pomzaların kimyasal kompozisyonlarını, fiziksel özelliklerini, mineralojik özelliklerini, mikro yapılarını ve puzolanik aktivitelerini belirlemiştir.

Yapılan çalışmada, hem Erzincan ve Nevşehir yöresi pomzalarını (%10, 20, 25, 30 ve 40) oranlarında klinker ile birlikte öğütürerek hem pomza katkılı çimentolar (PKÇ) elde etmiş hemde Portland çimentosunu aynı oranlarda yer değiştirerek pomza ikameli çimentolar (POİÇ) elde etmiştir. Böylece her bir pomza türünden beş katkılı ve beş ikameli çimento üretmiştir. Ayrıca deneylerden elde edilen sonuçlar hem PÇ 42,5 hem de PKÇ 32,5 ile (Portland Kompoze Çimento) kıyaslamıştır.

Yapılan deneyleri kısaca özetleyecek olursak; her iki yöreye ait pomzaların da kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri TS EN 197-1’de gösterilen sınır değerlerin içinde olduğu ve puzolanik özellik gösterdiğini belirtmiştir. PKÇ’lerde ve POİÇ’lerde standart kıvam oranları pomza katkı oranıyla doğru orantılı olarak artış göstermiştir. Priz sürelerine bakıldığında; standart kıvamda olduğu gibi yani pomza katkı ve ikame oranı arttıkça doğru orantılı olarak priz süreleri de uzamıştır. Bu durum katkı oranına bağlı olarak daha da belirginleşmiştir. Şekil 2.6’da priz süreleri pomza katkı oranları ile ilişkilendirilmiştir.



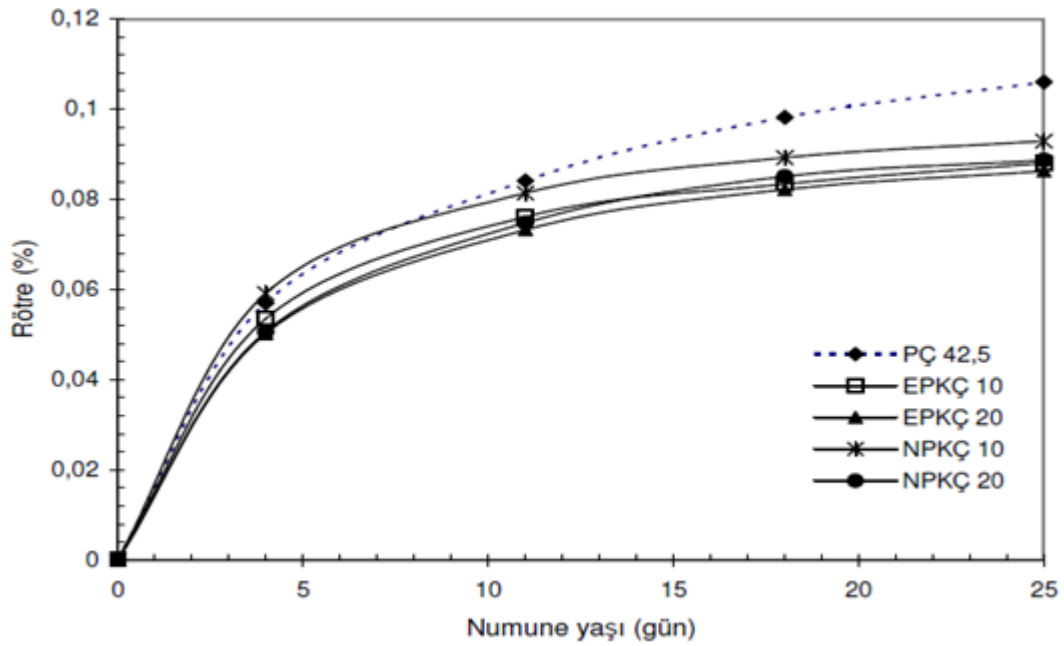
Şekil 2.6: Pomza katkılı çimentolarda priz süresi-pomza miktarı ilişkisi [26].

Eğilme çekme ve basınç dayanımlarına bakıldığında, tüm harç numunelerinde basınç dayanımı değerleri pomza katkı oranındaki artışla ters orantılı olarak azalmıştır. Ancak, ilerleyen yaşlarda katkılı ve ikameli çimento harçlarının basınç

dayanımlarında önemli artışlar olmakla birlikte %10 ve %20 pomza içeren PKÇ'ler ve POİÇ'ler kontrol çimentolarına çok yakın değerler vermiş bazen da onlardan daha yüksek değerlerde çıktığı gözlemlenmiştir.

Tablo 2.15: PÇ 42,5 ve pomza katkılı çimentolara ait rötre değerleri [26].

Çim.Tipi	PÇ 42,5	EPKÇ 10	EPKÇ 20	NPKÇ 10	NPKÇ 20
Num.Yaş(gün)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
4	0,0570	0,0535	0,0502	0,0591	0,0506
11	0,0841	0,0761	0,0732	0,0814	0,0748
18	0,0982	0,0834	0,0822	0,0892	0,0851
25	0,1060	0,0880	0,0863	0,0929	0,0887



Şekil 2.7: PÇ 42,5 ve pomza katkılı çimentolara ait rötre numune yaşı ilişkisi [26].

Tablo 2.15 ve Şekil 2.7 incelendiğinde rötre deneyinin sadece PÇ 42,5 ve %10-%20 oranlarında farklı iki yörenin pomzasını içeren PKÇ'lere uygulandığı ve pomza katkısının rötreyi pomza katkı oranındaki artışa bağlı olarak azalttığını

(Erzincan pomza katkısının Nevşehir pomza katkısına göre rötreyi daha fazla azalttığını) yani olumlu bir şekilde etkilediği belirtmiştir.

Sonuçta, Erzincan ve Nevşehir yöresi pomzalarının çimento üretiminde çimento ağırlığının en fazla %20'si oranında puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir [26].

Yıldırım [27], yapmış olduğu yüksek lisans tezinde, Manisa-Gördes yöresinden elde edilen doğal zeolitin çimentoda katkı maddesi olarak uygunluğunu araştırmıştır. Manisa-Gördes doğal zeolitin %15 ve %30 doğal zeolit katkılı ve doğal zeolit + süperplastikleştirici katkılı çimentoları kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından birbirleriyle ve Portland çimentosuyla ile karşılaştırarak deneyler yapmıştır. Hazırlanan zeolitli hamur numuneleri üzerinde X-ray Difraksiyon ve Taramalı Elektron Mikroskobu fotoğraf araştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde %15 doğal zeolit katkılı numunelerin çimentoda uygun olduğu belirtilmiştir.

Hossain [28], volkanik kül ve volkanik pomza tozunun katkılı çimento üretimi için uygunluğunun araştırıldığı çalışmada; kullandığı Portland çimentosuna %0-%50 arasında değişen oranlarda volkanik kül ve volkanik pomza tozu ilave etmiştir. Araştırma taze ve sertleşmiş beton üzerinde yapılan testleri kapsamaktadır. Volkanik kül ve volkanik pomza tozu katkılı karışımlar üzerinde yapılan standart deneyler; uçucu küllü çimentolara kıyasla daha cesaret verici sonuçlar sağlamıştır. Sonuç olarak, %20 katkıya kadar daha yüksek priz süresi ve daha düşük hidratasyon ısıyı sağlayan katkılı Portland volkanik küllü çimento ve katkılı Portland volkanik pomza çimentosu üretiminde iyi bir potansiyel gösterdiğini belirtmiştir.

Dayı [29], yaptığı yüksek lisans tezi çalışmada, doğal puzolanlarla birlikte atık malzemeleri de çimento üretiminde kullanmıştır. Bunun için, Manisa-Gördes zeoliti, Kemerköy uçucu küllü ve atık malzeme olarak da pencere camını kullanmıştır. Çimentolarla yapılan deneyler sonucunda, %5 atık cam ile birlikte %5 uçucu kül katkılı çimentoların tüm yaşlarda en yüksek dayanımı gösterdiğini tespit etmiştir. Bu sebeple, %5 atık cam ile birlikte %5 uçucu kül katkısının çimento üretiminde kullanılabilmesini belirtmiştir.

Atan [30], yapmış olduğu çalışmasında Orta Anadolu'da ki Kapadokya Bölgesi'ne ait doğal tufün puzolan olarak çimento üretiminde kullanılmasını araştırmıştır. Ürettiği çimentoların mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemiştir. Deneylerde klinker, alçıtaşı ve puzolan beraber öğütülerek kontrol çimentosu ve farklı oranlarda (%25 ve %50) doğal tuf katkılı çimentolar üretilmiştir. Deneyler sonucunda, puzolan miktarının artmasıyla hidrasyon ısısının azaldığını ve su ihtiyacının arttığını, ilk ve son priz süreleri de uzadığını belirtmiştir. Ayrıca yapılan deneylerde, doğal tuf katkısının çimentonun erken dayanım değerlerini azalttığını ama 90. ve 180. günler sonunda, basınç dayanım değerlerini büyük ölçüde arttırdığını gözlemlemiştir.

Perlitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmalar incelendiğinde ise;

Bulgu [31], puzolanik katkı maddesi olarak ham perlit kullanarak ürettiği çimentolar için, Manisa Yuntdağı yöresinden çıkarılan ve İzmir Cumaovası Etibank Perlit İşletmeleri'nde üretilen ham perlit, % 5-10-15-20-25-30 oranlarında çimento katkısı olarak kullanmıştır. Deneylerde ise farklı oranlarda hazırladığı perlit katkılı çimento numunelerinin sonuçlarını, PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 numuneleriyle karşılaştırmıştır.

Yukarıda açıklanan çalışmayı özetleyecek olursak; Ham perlit katkısını çimentoyu üretirken klinker ile öğüterek kullanmış ama bu şekilde kullanılan ham perlit katkısının işçilik, zaman ve ekonomik bakımdan çimento üretiminden sonra katılmasının daha uygun olduğunu çünkü ham perlitin öğütülmesinin zor olduğunu belirtmiştir. Ham perlit katkılı çimentolarla (PERKÇ) üretilen harçlarda, ham perlit oranının artmasıyla normal kıvam için gerekli olan su miktarının da artış gösterdiğini belirtmiştir. Sebebi ise, perlitin boşluklu bir yapıda olması ve su emmesinin yüksek olması olarak belirtilmiştir. Ama yine de ham perlit katkılı çimentoların normal kıvam değerleri, PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının değerlerinden daha düşük çıkmıştır. Perlit katkılı çimentoların normal kıvam değerleri Tablo 2.16'da gösterilmiştir. Bununla birlikte, perlit katkılı çimentoların priz süreleri ile standart kıvam değerleri arasında önemli bir ilişki olmadığını ve katkı oranındaki artış ile birlikte standart kıvamın, priz sürelerini fazla etkilemediğini belirtmiştir.

Tablo 2.16: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının normal kıvam suyu ihtiyaçları [31].

Çimento	Normal Kıvam (%)
PÇ 42,5	27,1
PKÇ B 32,5	29,6
PERKÇ %5	23,6
PERKÇ %10	23,8
PERKÇ %15	24,9
PERKÇ %20	25,1
PERKÇ %25	25,6
PERKÇ %30	26,2

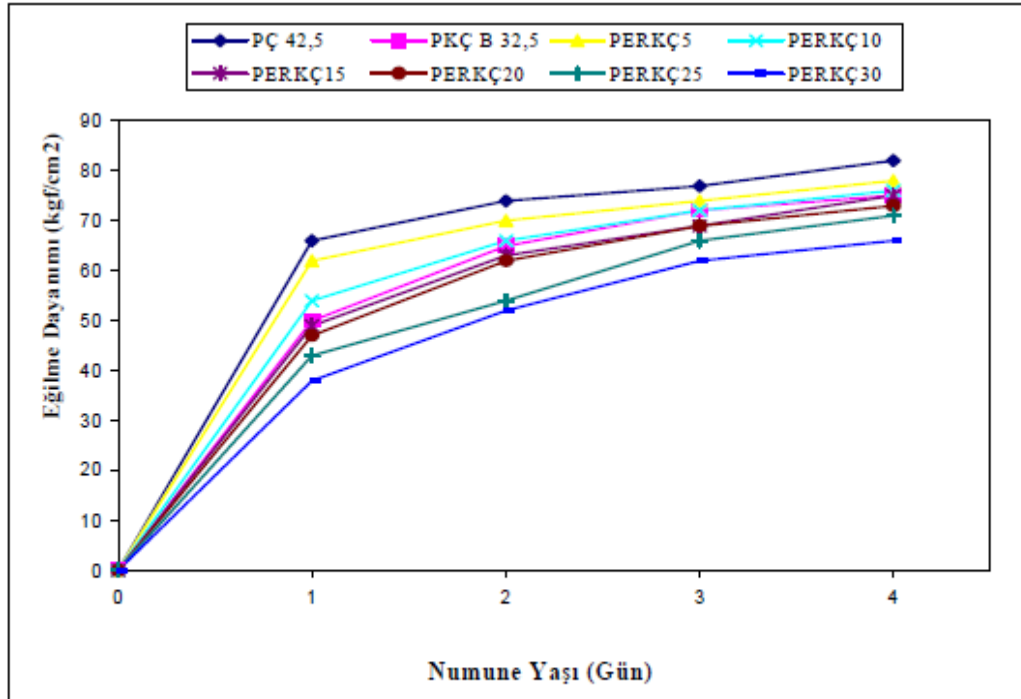
Ham perlitle üretilen katkıli çimentoların tane büyüklükleri olumsuz yönde etkilenmiş, PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarına göre daha fazla değerde çıkmıştır. Özgül ağırlık değerlerinin perlit oranı arttıkça düşmesinin nedeni olarak perlitin özgül ağırlık değerinin düşük olması gösterilmiştir. Perlit katkıli çimentoların özgül ağırlık deney sonuçları Tablo 2.17'de verilmiştir.

Tablo 2.17: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının özgül ağırlık deney sonuçları [31].

Çimento	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Çimento	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
PÇ 42,5	3,12	PERKÇ %15	2,92
PKÇ B 32,5	2,97	PERKÇ %20	2,90
PERKÇ %5	2,97	PERKÇ %25	2,86
PERKÇ %10	2,94	PERKÇ %30	2,79

Tablo 2.18: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının eğilmede çekme dayanımları [31].

Çimentolar	Eğilme Dayanımı (MPa)			
	7 Gün	28 Gün	90 Gün	180 Gün
PÇ 42,5	6,6	7,4	7,7	8,2
PKÇ B 32,5	5,0	6,5	7,2	7,5
PERKÇ %5	6,2	7,0	7,4	7,8
PERKÇ%10	5,4	6,6	7,2	7,6
PERKÇ%15	4,9	6,3	6,9	7,5
PERKÇ%20	4,7	6,2	6,9	7,3
PERKÇ%25	4,3	5,4	6,6	7,1
PERKÇ%30	3,8	5,2	6,2	6,6

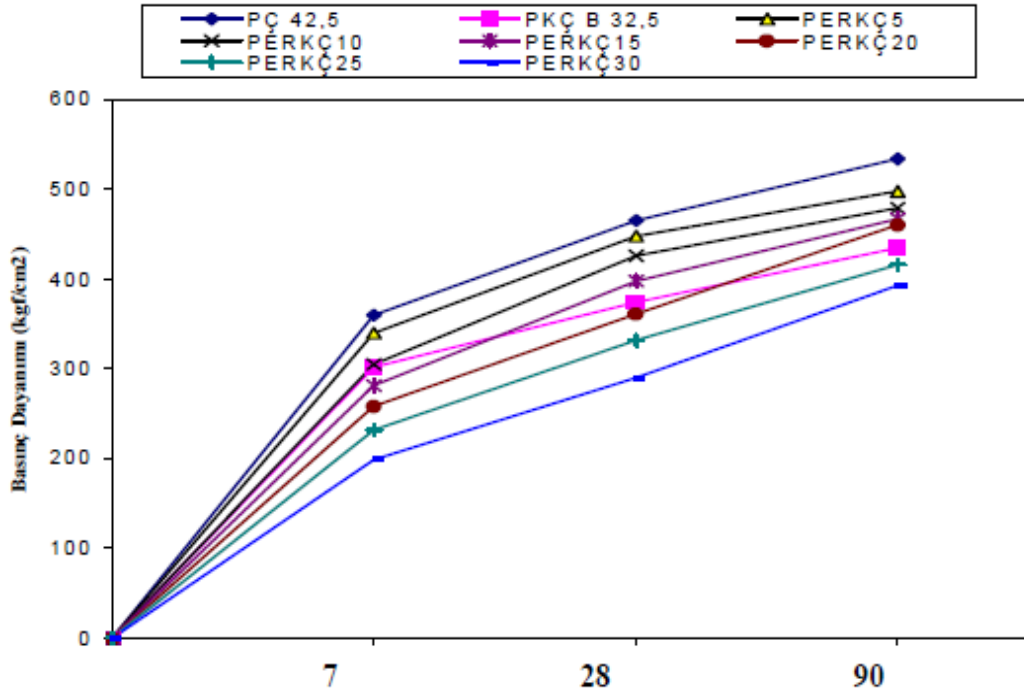


Şekil 2.8: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının eğilme dayanımı-numune yaşı ilişkisi [31].

Eğilme çekme dayanımlarına bakıldığında ise, 7 ve 28 günlük sonuçlarda % 5 ve 10, 90 günlük sonuçlarda ise sadece % 5 oranında ham perlit katkılı çimentoda PKÇ B 32,5'a göre olumlu sonuç alınmıştır.

Tablo 2.19: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının basınç dayanımları [31].

Çimentolar	Basınç Dayanımı (MPa)		
	7 Gün	28 Gün	90 Gün
PÇ 42,5	36	46,5	53,4
PKÇ B 32,5	30,2	37,4	43,5
PERKÇ %5	34	44,8	49,8
PERKÇ%10	30,5	42,6	47,9
PERKÇ%15	28,1	39,8	46,7
PERKÇ%20	25,8	36,1	46
PERKÇ%25	23,2	33,2	41,6
PERKÇ%30	19,9	29	39,3

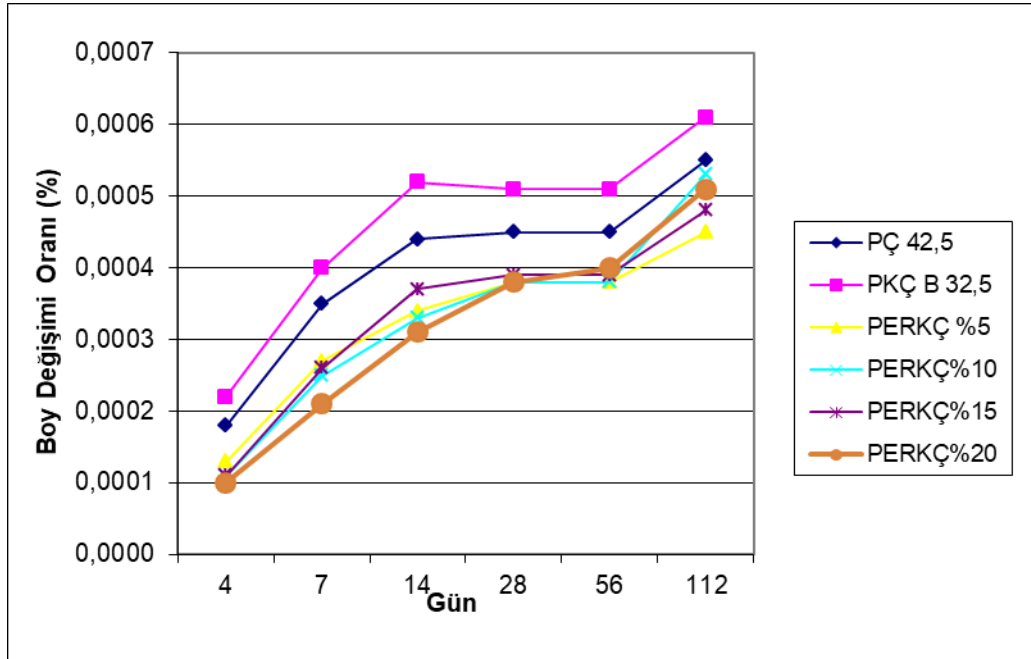


Şekil 2.9: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının basınç dayanımına yaşı ilişkisi [31].

Basınç dayanımı değerleri ise, 7 günlük sonuçlarda %5 ve %10, 28 günlük sonuçlarda % 5,10 ve 15, 90 günlük sonuçlarda da %25 ve %30 perlit katkı çimentolar hariç PKÇ B 32,5 çimentosuna kıyasla daha yüksek değerler tespit edilmiştir.

Tablo 2.20: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının rötre deney sonuçları [31].

Çimentolar	Boy Değişimi (%)					
	3 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün	56 Gün	112 Gün
PÇ 42,5	0,00018	0,00035	0,00044	0,00045	0,00045	0,00055
PKÇ B 32,5	0,00022	0,00040	0,00052	0,00051	0,00051	0,00061
PERKÇ	0,00013	0,00027	0,00034	0,00038	0,00038	0,00045
PERKÇ%10	0,00011	0,00025	0,00033	0,00038	0,00038	0,00053
PERKÇ%15	0,00011	0,00026	0,00037	0,00039	0,00039	0,00048
PERKÇ%20	0,00010	0,00021	0,00031	0,00038	0,00040	0,00051



Şekil 2.10: PERKÇ'ler ile PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 çimentolarının rötre - numune yaşı ilişkisi [31].

Tablo 2.20'ye bakarak, ham perlit katkılı çimento harçlarındaki boy değişim değerlerinin kontrol çimentoları olan PÇ 42.5 ve PÇ 32.5'a göre daha düşük olduğunu ve ham perlit katkı oranına bağlı olarak giderek azaldığını yani ham perlit katkısının rötreyi olumlu yönde etkilediği belirtmiştir.

Sonuç olarak, ham perlitin çimento üretiminde puzolanik katkı malzemesi olarak, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında kullanımının uygun olabileceğini yapılan deneylerle göstermiştir.

Bu çalışmada araştırılan ham perlit katkılı çimento üretimine ek olarak, geliştirilmiş perlit katkılı çimentoların da araştırılması gerektiğini söylemiştir [31].

Taban ve arkadaşları [32], yapmış oldukları çalışmada çimento üretim teknolojisini yenileyerek CO₂ salınımı olmayan, düşük maliyet ve teknolojik üstünlükler sağlması amacıyla doğal puzolanik malzemeleri kullanmayı hedeflemişlerdir. Bu sebeple çimento katkı malzemesi olarak zeolit, perlit, dolomit ve kolemanit kullanmışlar ve CEM I 42.5 R çimentosuyla ağırlıkça % 0, 10 ve 20 oranlarında yer değiştirilerek katkılı çimentolar üretmişlerdir. Katkılı çimentolarla hazırlanan numunelerin kimyasal analizleri ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Portland çimentosuyla deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Hazırlanan harç numuneleriyle dayanım deneyleri yapılmıştır. 28 günlük eğilmede çekme ve basınç dayanımı sonuçları bakıldığında; en yüksek dayanım değerlerinin dolomit katkılı çimento harçlarının, en düşük dayanım değerlerinin ise kolemanit katkılı çimento harçlarının verdiği belirtilmiştir.

Erdem ve arkadaşları [33], çalışmalarında doğal perlit kullanarak katkılı çimento üretimini amaçlamışlardır. Blaine değerleri 320 kg/m² ve 370 kg/m² olacak şekilde öğütülmüş, iki farklı bölgeye ait doğal perlitte farklı inceliklerde %20 ve %30 oranlarında perlit katkısıyla toplam 16 adet perlit katkılı çimentolar kullanarak harçlar hazırlamışlardır. Hazırlanan harçların 2, 3, 7, 28, 56 ve 91 günlük basınç dayanım değerleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, perlitin puzolanik karakteristik özelliğinden yararlanılarak çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiştir.

Yine Erdem [34], yaptığı çalışmada, içerdiği silika ve alüminden dolayı ilk olarak perlitin yeterli miktarda puzolanik özelliğe sahip olup olmadığının bulunmasını araştırmış ve ardından katkılı çimento üretiminde puzolanik katkı olarak da perlit kullanılıp kullanılmayacağını deneylerle göstermiştir. Bu amaçla, iki farklı bölgeye (İzmir ve Erzincan) ait perlitin puzolanik özellikleri araştırmıştır. Uygun sonuçlar elde ettikten sonra klinkerin, perlitin ve bu iki malzemenin çeşitli miktarlardaki öğütülebilirlik özelliklerini incelemiştir. Böylece değişik inceliklerde ve değişik miktarlarda birçok perlit katkılı çimento üretmiştir. Üretilen katkılı çimento hamurlarına ve bu çimentolarla hazırlanan harçlara, normal kıvam, priz süresi, basınç ve eğilmede çekme dayanımı, hızlı klor geçirgenliği, sülfat hücumu ve alkali- silika reaksiyonlarına karşı direncin tespit edilmesi için deneyler uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre, Türkiye'deki perlitler, çimento ve beton endüstrisinde kullanılmaları için yeterli puzolanik özelliğe sahiptirler. Ayrıca, bu çalışmada denenen özelliklerin, katkılı çimentolarla ilgili standartlarda istenen özellikleri sağladığı belirtilmiştir. %20 veya daha fazla perlit kullanılmasıyla perlit katkılı harçların dayanıklılığının arttırılabileceği bulunmuştur.

Chihaoui ve arkadaşları [35], Portland çimentosunda puzolanik katkı olarak doğal perlit tozunun potansiyel kullanımını araştırdıkları çalışmalarında, %5, %10, %15 ve %20 oranında doğal perlit tozunu Portland çimentosunun kütlesiyle yer değiştirerek çimento ve çimento harçları hazırlamışlardır. Bu numunelerle yapılan deney sonuçlarına bakıldığında ise, %20 doğal perlit tozlu çimento ve bu çimentolarla hazırlanan harçların, Portland çimentolu numunelere çok benzer fiziksel ve mekanik özellikler gösterdiğini ve çimento üretiminde puzolanik malzeme olarak kabul edilebileceğini belirtmişlerdir.

Sanchez ve arkadaşları [36], doğal ve geliştirilmiş perlit ikamesinin Portland Çimento harçlarındaki özellikleri araştırdıkları çalışmada, Portland çimentosunun kütlesini %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında doğal ve geliştirilmiş perlit ile yer değiştirip perlit ikameli numuneler hazırlamıştır. Hazırlanan numunelerle kimyasal analizler ve fiziksel deneyler yapmışlardır. Deney sonuçları, geliştirilmiş perlit ikameli çimentoların Portland çimentosuna göre dayanım değerlerinin düşük çıktığını ve en iyi basınç dayanımı değerini ise %5 doğal perlit ikameli çimento harçlarının verdiğini göstermiştir.

Cobirzan ve arkadaşları [37], yapmış oldukları çalışmada Portland çimentosuna katkı maddesi olarak uygun doğal puzolanik malzemenin seçilme aşamasında en önemli kriterlerin kimyasal reaktivite ve mineralojik kompozisyon olduğunu belirtmişlerdir. Kullanılacak puzolanların kimyasal reaktivite indeksi ve kuvars içeriğinin yüksek olmasının bağlayıcılık özelliğini arttıracaklarını söyleyerek, çimento endüstrisinde kullanımlarının uygun olup olmadıklarını belirlemek için, tuf ve perlitinin mineralojik, petrografik, kimyasal ve mekanik özelliklerini deneylerle incelemişlerdir. Sonuç olarak da, tuf ve perlitin puzolanik özelliklerinin yüksek olduğunu ve çimento üretiminde puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabileceklerini belirtmişlerdir.

Ramezianpour ve arkadaşları [38], çevre kirliliğini ve doğal kaynakların tüketimini azaltmak için çimento ilave edilecek katkı malzemelerinin kullanımının gerekliliğini aynı zamanda maliyeti ve dayanıklılığını da arttırdıklarını söylemişlerdir. Doğal camsı volkanik bir kayaç olan perlitin, kalsine perlit tozu olarak çimentoda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Portland çimento'nun kalsine perlit tozu ile kısmi ikame edilmesinin sonucu oluşan numunelerin 7, 28 ve 91 günlük basınç dayanım değerlerini önemli ölçüde azalttığı fakat kalsine perlit tozu ikameli harçların klorür geçirgenliğini sayesinde çimentonun yüzey direncini arttırdıklarını da söylemişlerdir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada; Balıkesir Limak Çimento fabrikasından alınan CEM I 42,5 R tipi çimento ve puzolanik malzeme olarak Uzay Perlit Madencilik Kim. Mad. San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen ham perlit ve geliştirilmiş perlit kullanılmıştır. CEM I Çimentosu ağırlıkça %5, %10, %20, %30 oranlarında ham perlit ve geliştirilmiş perlitte yer değiştirilmiş ve perlit ikameli çimentolar hazırlanmıştır. Bu deneysel çalışmada, 4 çeşit ham perlit ikameli çimento, 4 çeşit geliştirilmiş perlit ikameli çimento ve CEM I kontrol çimentosu olmak üzere toplam 9 çeşit çimento kullanılmıştır.

CEM I çimentosunun ağırlıkça %5, %10, %20 ve %30 oranlarında ham ve geliştirilmiş perlitte yer değiştirmesi sonucu ortaya çıkan ikameli çimentoların, kimyasal bileşenleri, özgül ağırlıkları, normal kıvam değerleri, priz süreleri, hacim genleşmeleri, özgül yüzey (Blaine) değerleri belirlenmiştir.

Yine bu çimentolarla hazırlanan harçların donma-çözülme etkisi, yüksek sıcaklık değerlerine karşı dayanıklılığı, eğilmede çekme ve basınç dayanımına ve rötresine olan etkileri de araştırılmıştır.

3.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Çimento

Kontrol çimentosu olarak kullanılan CEM I 42,5 R çimentosu TS EN 197-1'e uygun %5 kalker katkılı Portland tipi çimentodur [24].

CEM I 42,5 R Portland Çimentosunun kimyasal bileşenleri ve ağırlıkça yüzdeleri ile fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal bileşenleri, fiziksel ve mekanik özellikleri.

Kimyasal Bileşenleri		(%)
SiO ₂		18,74
Al ₂ O ₃		5,14
SO ₃		2,99
K ₂ O		0,80
CaO		62,79
Fe ₂ O ₃		3,26
MgO		1,46
Na ₂ O		0,20
Kızdırma Kaybı		4,08
Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Özgül ağırlık (g/cm ³)		3,13
Özgül yüzey (cm ² /g)		3614
40µ elek üstü kalan (µ)		17,9
Hacim genleşmesi (mm)		1
Priz (dakika)	Başlangıcı	300
	Sonu	380
Eğilme dayanımı (N/mm ²)	2 günlük	50
	7 günlük	66
	28 günlük	82
Basınç dayanımı (N/mm ²)	2 günlük	26,2
	7 günlük	43,2
	28 günlük	54,4

3.1.2 Standart Kum

Harç üretiminde kullanılan kum, Limak Çimento Balıkesir Fabrikasında üretilen standart kumdur. Referans kumu olan CEN; yuvarlak tanecikli, silisyum dioksit miktarı %98 ve üzerinde olan doğal silis kumudur [39]. CEN standart kumu tanecik büyüklüklerine göre ayrı ayrı veya önceden karıştırılmış olarak deneye hazır halde (1350 ± 5) gramlık plastik torbaların içinde temin edilmiştir.

3.1.3 Su

Harç üretiminde kullanılan su, Balıkesir Limak Çimento Fabrikası laboratuvar ortamında 20 °C’de bekletilmiş içilebilir şehir şebeke suyudur.

3.1.4 Ham Perlit ve Genleştirilmiş Perlit

Çalışmada puzolanik katkı maddesi olarak Uzay Perlit Madencilik Kim. Mad. San. ve Tic. Ltd. Şti.’den temin edilen ham perlit genleştirilmiş perlit kullanılmıştır. Ham perlit ve genleştirilmiş perlitin aynı inceliğe getirilmesi için ham perlitin Linatex marka bilyalı değirmende 45 dakika süren öğütme işlemi sonucunda 40µ elek üstü kalan (%) miktarı (50,0) genleştirilmiş perlitle aynı değere getirilmiştir.

Kullanılan ham perlitin ve genleştirilmiş perlitin kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Ham perlit ve genleştirilmiş perlitin kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri.

HAM PERLİT		GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT	
Kimyasal Bileşenleri	(%)	Kimyasal Bileşenleri	(%)
SiO ₂	72,4	SiO ₂	74,79
Al ₂ O ₃	12,89	Al ₂ O ₃	13,23
SO ₃	0,01	SO ₃	0,00
K ₂ O	4,40	K ₂ O	4,66
CaO	1,34	CaO	0,61
Fe ₂ O ₃	1,03	Fe ₂ O ₃	0,79
MgO	0,42	MgO	0,33
Na ₂ O	3,3	Na ₂ O	0,27
Kızdırma Kaybı	3,97	Kızdırma Kaybı	1,73
Fiziksel Özellikleri		Fiziksel Özellikleri	
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,41	Özgül ağırlık(g/cm ³)	2,89
Özgül yüzey (cm ² /g)	2528	40µ elek üstü kalan (µ)	50,0
40µ elek üstü kalan (µ)	50,0		

3.2 Perlit İkameli Çimentoların Hazırlanması

Ham perlit ve geliştirilmiş perlit ikameli çimentoların hazırlanmasında Tablo 3.3'te verilen oranlar kullanılmıştır. Perlit, çimentolar hazırlanmadan önce etüvde 105 °C ÷ 2 °C sıcaklıkta kurutulmuş, ham perlit ve geliştirilmiş perlit aynı inceliğe getirilmiştir. Daha sonra hazırlanan perlitler, ağırlıkça belirlenen oranlarda Portland çimentosuyla yer değiştirilmiştir. Ancak ikameli çimentoların homojenliğini artırmak için tüm deneyler için gerekli olan çimento miktarı bir seferde hazırlanmamış, her bir deney için gerekli olan çimento miktarı ayrı ayrı hazırlanmıştır. Bunun için, her bir deneyde kullanılacak çimento Tablo 3.3'teki oranlara göre alınan Portland çimentosu ve ham-geliştirilmiş perlitin, şişirilmiş bir naylon içerisinde homojen hale gelinceye kadar sallanması ile hazırlanmıştır.

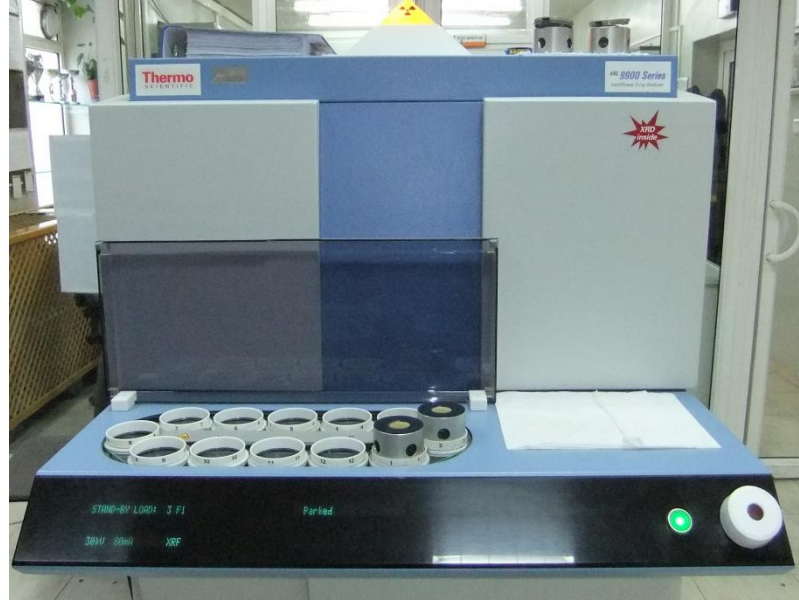
Hazırlanan ham ve geliştirilmiş perlit ikameli çimentolar, kullanılan perlit türünü ve oranını ifade edecek şekilde isimlendirilmiştir.

Tablo 3.3: Perlit ikameli çimentoların hazırlanması için kullanılan karışım oranları ve kodlama.

Çimento kodu	Portland Çimentosu (%)	Ham perlit (%)
HP 5	95	5
HP 10	90	10
HP 20	80	20
HP 30	70	30
		Genleştirilmiş perlit (%)
GP 5	95	5
GP 10	90	10
GP 20	80	20
GP 30	70	30

3.2.1 Kimyasal Analizler

Hazırlanan perlit ikameli çimentoların, Portland çimentosunun, ham ve geliştirilmiş perlitin kimyasal analizleri, X-ışını floresans spektrum (XRF) yöntemiyle, TS EN 196–2 standardına uygun olarak Limak Balıkesir Çimento Fabrikası Laboratuvarında yapılmıştır [40].



Şekil 3.1: X- Işını spektrometre cihazı.

3.3 Fiziksel ve Mekanik Deneyler

3.3.1 Tane Büyüklüğü Tayini

Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilen CEM I 42,5 R Portland çimentosu, ham ve geliştirilmiş perlitin tane büyüklüğü değerleri, 1 MPa emiş gücüne sahip, Alpine marka deney cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Tane büyüklüğü tayini, göz açıklığı 40 µm olan elek kullanılarak, 10 g numunenin 3 dakika boyunca elenmesi ve elek üstü malzemenin hesaplanmasıyla bulunmaktadır. Elek üstü malzeme yüzdesi, numunenin tane büyüklüğü hakkında fikir vermektedir.



Şekil 3.2: Alpine marka incelik ölçüm cihazı.

3.3.2 Normal Kıvam

Normal kıvam tayini Atom Teknik marka otomatik vicat aleti ve sondası kullanılarak TS EN 196-3'e uygun olarak yapılmıştır [41].

Deneyde amaç çimento kıvamını sağlayan su miktarını saptamaktır. Her bir deney için 500 g çimento kullanılmıştır. Perlit ikameli çimentolar için 500 gramlık numune hazırlanırken, ikame oranına bağlı olarak gerekli çimento ve perlit ayrı ayrı tartılmış ve homojenliği için şişirilmiş bir naylon torba içerisinde 2 dakika süre ile karıştırılmıştır. Çimentolara kütlelerinin %25'i kadar su eklenmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra, numuneler düşük hızda toplam 3 dakika süre ile karıştırılmıştır. Elde edilen numune, vicat kalıbına fazla miktarda olmak üzere hiçbir sıkıştırma veya vibrasyon uygulanmadan yerleştirilmiştir. Kalıbın üzerindeki fazla çimento alınarak yüzeyi düzeltilmiştir. Vicat aletinin sondasının serbest bırakıldığı andan itibaren 30 saniye içerisinde cam levhaya 5 - 7 mm uzaklıkta kaldığı anda, standart kıvam için gerekli su miktarı belirlenmiştir [41].

3.3.3 Priz Sürelerinin Bulunması

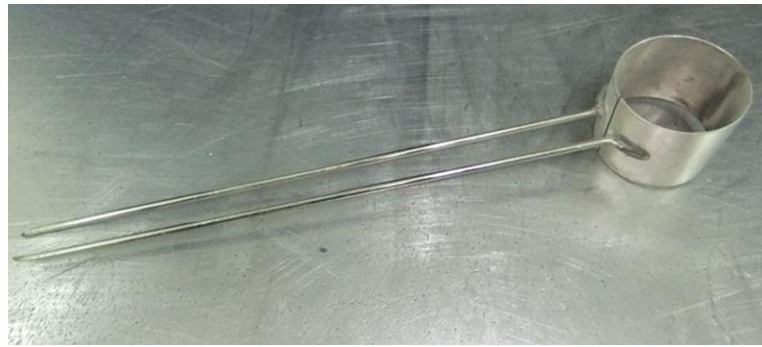
TS EN 196-3 standardı esas alınarak çimentoların priz süresi otomatik vicat cihazı ile tayin edilmiştir. Otomatik olarak 5 dakikalık periyotlarla çimento hamuruna iğne batırılır. Çimento hamuruna batan iğne, cam levhaya 3-5 mm uzaklıkta kaldığı an priz başlangıcı, iğneler 15 dakikada bir batırılarak çimento hamuruna en fazla 1 mm girebildiği an da priz sonu olarak kaydedilmiştir [41].



Şekil 3.3: Otomatik vicat cihazı.

3.3.4 Hacim Genleşmesi Tayini

Genleşme deneyi serbest kalsiyum oksit ve/veya magnezyum oksit hidratasyonu sebebiyle sonradan ortaya çıkabilecek genleşme riskini değerlendirmek için yapılmaktadır. Hacim genleşmesi deneyleri TS EN 196-3'e göre, Le Chatelier aleti ile yapılmıştır. Deney numunesi olarak normal kıvam tayini için hazırlanan çimento hamurundan bir miktar kullanılmıştır. Çimento hamuru Le Chatelier halkası içerisine hava boşluğu oluşmayacak biçimde konulmuştur. Çimento hamurunun üzeri ıspatula yardımıyla düzeltilip, üst kısmı cam plaka ile kapanmıştır. Suda bekletilen numunedan 24 saat sonra yapılan ölçümle, 3 saatlik kaynama sonunda laboratuvar sıcaklığına kadar soğuyan numune üzerinde yapılan ölçüm arasındaki fark, deney sonucu olarak kabul edilmiştir [41]. Hacim genleşme tayininde kullanılan Le Chatelier aleti Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Le Chatelier aleti.

3.3.5 Özgül Ağırlık

Özgül ağırlık değerleri, AccuPyc II 1340 Gas Pycnometer cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Yoğunluk tayin cihazı, 2–3 dakika süre zarfında zayıtsız olarak yoğunluk tayinini yer değiştirilmiş gazın ölçümü prensibi ile belirleyebilmektedir. Çimentoların özgül ağırlıkları TS EN 196-6'ya göre belirlenmiştir [42].



Şekil 3.5: Piknometre.

3.3.6 Özgül Yüze (Blaine)

Perlit ikameli çimentoların, Portland çimentosunun, ham perlitin ve genişletilmiş perlitin özgül yüze alanları, Atom Teknik marka Blaine cihazıyla TS EN 196-6'ya göre belirlenmiştir. Her bir deney için kullanılacak numune miktarı, o çimentonun özgül ağırlığı kullanılarak TS EN 196-6'da verilen formül ile hesaplanmıştır [42].

3.4 Çimento Harçlarının Hazırlanması

Harçlar TS EN 196–1 standardına uygun olarak üretilmiştir. Çimentolara su ve kum karıştırılarak harç üretimine başlanmıştır. Bu işlem TS EN 196-1'de verilen sıralamaya göre Portland çimentosuna uygulanmıştır [39].

- Kullanılan kum miktarı 1350 gramdır.
- Su/Çimento oranı ise 0,5 olarak alınmıştır.
- Çimento 450 gr, su 225 gr olarak alınmıştır.
- Su ve çimento konulduktan sonra karıştırma kabı yerine yerleştirilmiştir.
- Kum haznesine kum konulup, karıştırıcı çalıştırılmıştır.

- Hazırlanan harç numuneleri 40x40x160 mm boyutlarında prizma şeklindeki harç kalıplarına yerleştirilmiştir.
- Harç kalıbı şok aletine yerleştirilmiştir.
- Kalıba dökülen birinci tabaka 60 sarsma ile sıkıştırılıp, ikinci tabaka harç kalıba yerleştirmiş ve cihaz 60 vuruşa ayarlanmıştır.
- Kalıp şok aletinden çıkarıldıktan sonra üzerindeki fazlalık spatula yardımıyla alınıp ve rutubet dolabına konmuştur. Rutubet dolabı, harç kalıplarının kırılacakları güne kadar muhafaza edildikleri dolaptır. Kalıplar ilk 24 saatleri tamamlanıncaya kadar bu dolap içinde tutulmuşlardır. Bu bölümün sıcaklığının 20 ± 1 °C olarak tutulması gerekmektedir. Rutubetin ise, minimum %90 olması gerekir. Kalıplar ilk 24 saatten sonra, içi su dolu çekmecelerin içine konmuştur.
- Kalıplardan çıkarılan harç numuneleri istenen kür koşullarında deney günü gelinceye kadar bekletilmiştir.

Perlit ikameli çimentolarla harçlar hazırlanırken, 450 g'lık çimento %5, %10, %20, %30 oranlarında ham perlit ve genişletilmiş perlit ile yer değiştirilmiştir. Harç karışımına geçilmeden önce, çimento ve toz haldeki perlit şişirilmiş bir naylon torba içerisinde homojen bir şekilde karıştırılmıştır.

HP ve GP'ler le üretilen harçlara sabit bir kıvam için gerekli olan su ihtiyacı, ham perlit ve genişletilmiş perlit içeren çimentoların normal kıvam suyu ihtiyacına çok benzer bir özelliktir. Bu nedenle çimentoların normal kıvam ihtiyacı üzerinde etkili olan unsurlar, perlit ikameli çimentolarla üretilen harçlar içinde geçerlidir. Böylece çimentoların normal kıvam ihtiyacı üzerinde etkili olan yüzdelerden yararlanılarak, perlit içeren çimentolarla üretilen harçlar içinde gerekli olan su ihtiyaçları hesaplanmıştır. Ardından yukarıda verilen sıralamaya uygun olarak perlit ikameli çimento harçları hazırlanmıştır.



Şekil 3.6: Harç kalıpları ve harç numuneleri.

3.5 Harç Deneyleri

Harç deneyleri, nemi ve sıcaklığı klima ile ayarlanan %40-60 nem ve yaklaşık 20°C sıcaklıktaki Limak Balıkesir Çimento Fabrikası Beton laboratuvarında yapılmıştır.

3.5.1 Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Eğilmede çekme dayanımı deneyleri yapılırken 10 kN yükleme kapasitesinde 25 B&F Buehl Faubel marka dayanım cihazı kullanılarak, TS EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 2, 7, 28 ve 90 gün yaşlarındaki prizma numuneler deney cihazına konulurken, yan yüzeylerden biri üzerine ve eksenini mesnet silindirlerinin eksenine dik gelecek şekilde yerleştirilir. Yük, yükleyici silindir vasıtası ile numunenin karşı yan yüzünden dik olarak uygulanır ve düzgün bir şekilde prizma numune kırılıncaya kadar hız artırılır. Her harç grubundan 6 deney numunesi kırılıp aritmetik ortalamaları alınmış ve dayanım değeri olarak TS EN 196-1'e göre kaydedilmiştir [39].



Şekil 3.7: Eğilmede çekme dayanım cihazı.

3.5.2 Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi için, Atom Teknik marka beton test presi kullanılmış TS EN 196-1'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney, eğilmede çekme dayanımı deneyinden hemen sonra ikiye bölünmüş harç prizmaları üzerinde yapılmıştır.

Deney sonuçları 7. 28. ve 90. günlerde her harç grubu için 6 numune kırıldıktan sonra aritmetik ortalamalarının alınmasıyla TS EN 196-1'e göre belirlenmiştir [39].



Şekil 3.8: Basınç dayanım cihazı.

3.5.3 Donma-Çözülme Deneyi

Donma çözülme deneyi için, 28 gün bakımı yapılan harç numunelerine, -20 °C’de 4 saat donma işlemi uygulanmıştır. Sonrasında numuneler su içerisinde 4 saat bekletilerek çözümleri sağlanmış ve bu şekilde 25 döngü tamamlanmıştır. Her bir harç numunesine uygulanan donma-çözülme işlemleri öncesi ve sonrası basınç ve eğilmede çekme dayanım değerleri belirlenmiştir.

3.5.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi

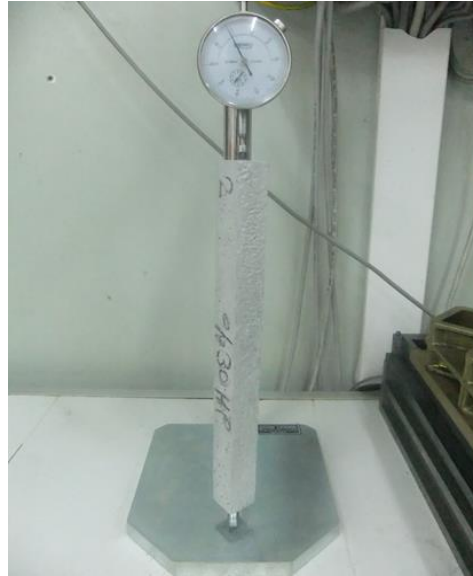
Yüksek sıcaklık deneyi, 28 gün bakımı yapılan harç numuneleri üzerinde 300 °C, 600 °C ve 900 °C’ lerde gerçekleştirilmiştir. Deney için NÜVE marka kül fırını kullanılmış, numuneler fırın içine yerleştirildikten sonra fırın çalıştırılmıştır. 2 saat fırında bekletilen numuneler daha sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Deney öncesinde ve sonrasında alınan numunelerin, basınç ve eğilmede çekme dayanım değerleri belirlenmiştir.

3.5.5 Rötre Deneyi

Rötre deneyi kontrol numunesi olan Portland imento, ve tüm perlit ikameli çimentolara (HP5, HP10, HP20, HP30, GP5, GP10, GP20, GP30) uygulanmıştır. Harç numunelerin hazırlanmasında 750 g imento, 1500 g standart kum ve vicat aletinden yararlanarak akma sağlayacak kadar su kullanılmıştır. Deney ASTM C 596-01 standardına göre, her harç grubu için 285x25x25 mm ebatlarında prizma şeklindeki ikili harç kalıplarıyla yapılmıştır [43].

Boy değişimlerini ölçebilmek için, harç dökümü esnasında prizma şeklindeki numunelerin kare yüzeylerine kalıpların yardımıyla birer adet pim konulmuştur. Numuneler kalıpla birlikte 24 saat \pm 30 dakika buhar krne tabi tutulduktan sonra, kalıptan çıkarılıp 48 saat kirece doygun suda bekletilmiştir. Toplam 72 saat \pm 30 dakika sonunda sudan çıkarılan numuneler, kurularak sıfır yaş komparatör okumaları yapıldıktan sonra havada bekletilmeye başlanmıştır. Bu numunelerin 4, 11, 18 ve 25 gün yaşlarındaki boy değişimleri belirlenmiştir [43,44].

Her harç grubu için hazırlanan 2 deney numunesinden elde edilen okuma değerleri ASTM C 157’de verilen formülde yerine konularak, rötre deneyinden sonra ölçüm yapılan yaşlarda her bir numunede oluşan birim deformasyonlar hesaplanmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır [44].



şekil 3.9: Rötre lm cihazı.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Kimyasal Kompozisyon

Ham perlit ve genişletilmiş perlit ve CEM I çimentosunun kimyasal analizleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilmiştir. Üretilen katkılı çimentolar ile Portland çimentosunun kimyasal analizleri, TS EN 197–1 “Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri” standardı sınır değerleri ile birlikte Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4.1: CEM I ve HP’lerin kimyasal analiz karşılaştırması.

Kimyasal Analiz (%)	CEM I	HP5	HP10	HP20	HP30	TS 197-1
SiO ₂	18,74	21,8	23,83	19,63	36,41	-
Al ₂ O ₃	5,14	5,57	2,90	5,25	7,72	-
SO ₃	2,99	2,78	2,68	2,90	1,87	≤ 5
K ₂ O	0,80	1,00	1,13	0,86	1,91	-
CaO	62,79	59,8	57,32	62,15	42,63	-
Fe ₂ O ₃	3,26	3,21	3,18	3,26	2,88	-
MgO	1,46	1,43	1,40	1,46	1,15	≤ 5
Na ₂ O	0,20	0,34	0,45	0,23	1,1	-
K.K.	4,08	3,88	3,82	3,97	3,93	≤ 5

Ham perlit ikameli çimentoların SiO₂, Al₂O₃ (HP5 hariç), K₂O ve Na₂O yüzdeleri CEM I çimentosuna göre daha yüksektir. HP’lerin SO₃, CaO, Fe₂O₃ (HP20 hariç) ve MgO yine (HP20 hariç) yüzdeleri CEM I çimentosuna göre daha düşüktür. HP’lerin kızdırma kaybı değerleri CEM I çimentosuna göre daha düşük çıkmıştır. Bu çalışmada hazırlanan HP’ler, kimyasal analiz bakımından TS EN 197–1 standardına uygundur.

Erdem de yaptığı çalışmada, kimsyal analizi sonuçlarına göre ham perlitin silika ve alümin oranlarında benzer sonuçları elde etmiştir [34].

Tablo 4.2: CEM I ve GP'lerin kimyasal analiz karşılaştırması.

Kimyasal Analiz (%)	CEM I	GP5	GP10	GP20	GP30	TS 197-1
SiO₂	18,74	21,67	24,83	30,79	35,56	-
Al₂O₃	5,14	5,60	6,02	6,86	7,57	-
SO₃	2,99	2,84	2,59	2,20	1,95	≤ 5
K₂O	0,80	1,00	1,21	1,61	1,89	-
CaO	62,79	59,62	55,81	49,42	44,08	-
Fe₂O₃	3,26	3,20	3,12	2,98	2,86	-
MgO	1,46	1,44	1,36	1,24	1,15	≤ 5
Na₂O	0,20	0,34	0,50	0,83	1,09	-
K.K.	4,08	4,09	3,96	4,28	3,77	≤ 5

Tablo 4.2. incelendiğinde geliştirilmiş perlit ikameli çimentoların SiO₂, Al₂O₃, K₂O ve Na₂O yüzdeleri CEM I çimentosuna göre daha yüksektir. GP'lerin SO₃, CaO, Fe₂O₃ ve MgO yüzdeleri CEM I çimentosuna göre daha düşüktür. Kızdırma kaybı değerlerinde, GP5 ve GP20'nin değerleri yüksek çıkarken, GP10 ve GP30'un kızdırma kaybı değerleri, CEM I çimentosuna göre daha düşük çıkmıştır. Bu çalışmada hazırlanan GP'ler, kimyasal analiz bakımından TS EN 197-1 standardına uygundur.

4.2 Standart Kıvam, Priz Süreleri ve Hacim Genleşmesi

Hazırlanan ikameli çimentolar ile CEM I çimento hamurlarının normal kıvam değerleri, priz süreleri ve hacim genleşmesi değerleri Tablo 4.3'te gösterilmiştir. HP'lerde perlit miktarı arttıkça normal kıvam suyu ihtiyacı azalırken, GP'lerde perlit miktarı arttıkça normal kıvam suyu ihtiyacı da artmaktadır. En fazla kıvam suyu ihtiyacı, GP30'da tespit edilmiştir.

Ayrıca, HP'lerin perlit miktarı arttıkça normal kıvam suyu ihtiyaçlarının kontrol çimentosundan daha az olduğu, GP'lerin ise perlit miktarı arttıkça normal kıvam suyu ihtiyaçlarının kontrol çimentosundan çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Ham perlit yapısı gereği bünyesinde su bulundurduğu için normal

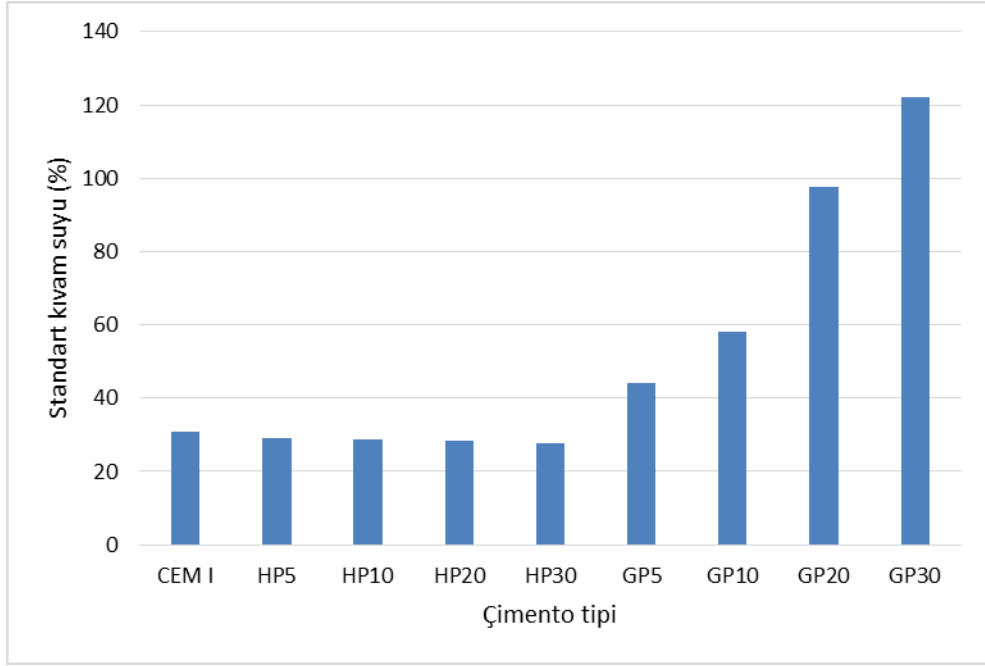
kıvam değerleri de ham perlit oranı arttıkça azalmaktadır. GP'lerin normal kıvam suyu ihtiyaçlarının çok yüksek miktarlarda çıkmasının sebebi olarak, geliştirilmiş perlitin üretim sırasında iç yapısında bulunan suyun buharlaşması sonucu genişerek çok hafif ve gözenekli bir yapıya dönüşmesinden dolayı çok su emdiği söylenebilir.

Bulgu da ham perlit katkılı çimentolarda perlit oranının artmasıyla normal kıvam değerlerinin de artış gösterdiğini belirtmiştir. Ama yine de perlit katkılı çimentoların normal kıvam değerlerinin kontrol çimentolarının değerlerinden daha düşük çıktığını belirtmiştir [31].

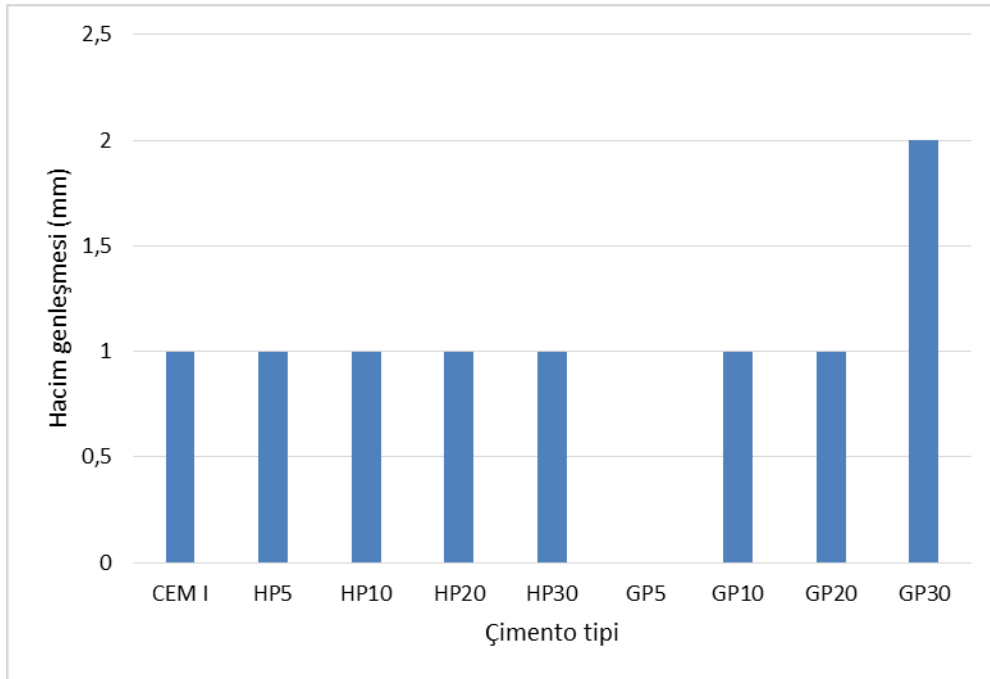
Tablo 4.3'te görüldüğü üzere, çimentoların perlit oranlarının artırılmasıyla çimento harçlarının prizlerini daha geç aldıkları belirlenmiştir. Özellikle GP harçlarının priz sürelerinin, HP'lere göre daha uzun olduğu görülmüştür. Ayrıca ilk ve son priz süreleri incelendiğinde, HP'lerin değerleri CEM I çimentosuna kıyasla düşük çıkmıştır. GP'lerin ise, priz süresi değerleri CEM I çimentosunu yakalamakta hatta geçmektedir. Hacim genişemesi değerleri incelendiğinde sonuçların TS EN 197-1'e uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 4.3: Normal kıvam, Priz süresi ve Hacim genişemesi değerleri.

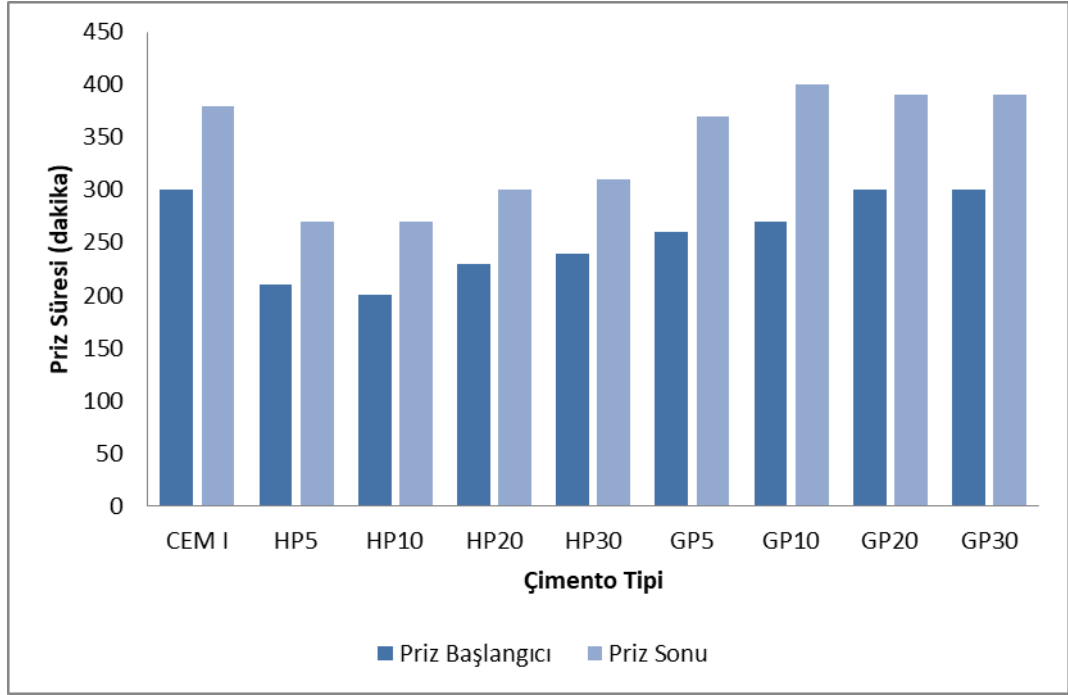
Çimento Tipi	Normal Kıvam (%)	Priz Süresi (dakika)		Hacim Genleşmesi (mm)
		Priz Başlangıcı	Priz Sonu	
CEMI	31	300	380	1
HP5	29	210	270	1
HP10	28,8	200	270	1
HP20	28,4	230	300	1
HP30	27,8	240	310	1
GP5	44	260	370	0
GP10	58	270	400	1
GP20	97,8	300	390	1
GP30	122	300	390	2
TS EN 197-1	-	≥ 60	≤ 600	≤ 10



Şekil 4.1: Çimentoların normal kıvam suyu değerleri.



Şekil 4.2: Çimentoların hacim genişmesi değerleri.



Şekil 4.3: Çimentoların priz süreleri değerleri.

4.3 Özgül Ağırlık, Özgül Yüzey (Blaine)

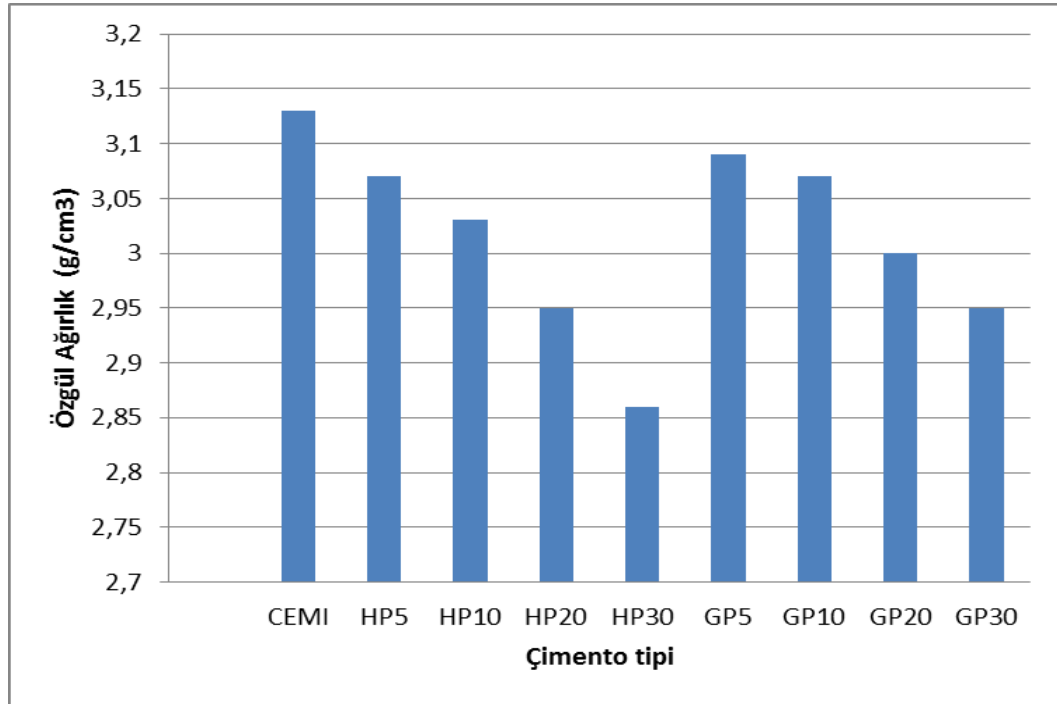
Hazırlanan ikameli çimentoların özgül ağırlık ve özgül yüzey değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir. HP ve GP'lerin özgül ağırlık değerleri, kontrol çimentosu olan CEM I'den daha düşük ölçülmüştür. Bunun nedeni ham perlit ($2,41 \text{ g/cm}^3$) ve genişletilmiş perlitin ($2,89 \text{ g/cm}^3$) özgül ağırlığının CEM I'in özgül ağırlığından daha düşük olmasıdır. Dolayısıyla perlit ikameli çimentoların da özgül ağırlıklarının düşük elde edilmesine neden olmaktadır. Özgül ağırlık değeri en düşük, HP 30'da görülmüştür. Özgül yüzey değerlerine bakıldığında, HP ve GP'lerdeki perlit miktarı arttıkça özgül yüzey değerlerinin de azaldığı görülmektedir.

Bulgu da yapmış olduğu çalışmada, ham perlit katkı oranı arttıkça katkılı çimentoların özgül ağırlık değerlerindeki düşüşün nedenini ham perlitin özgül ağırlık değerinin düşük olmasıyla ilişkilendirmiştir [31].

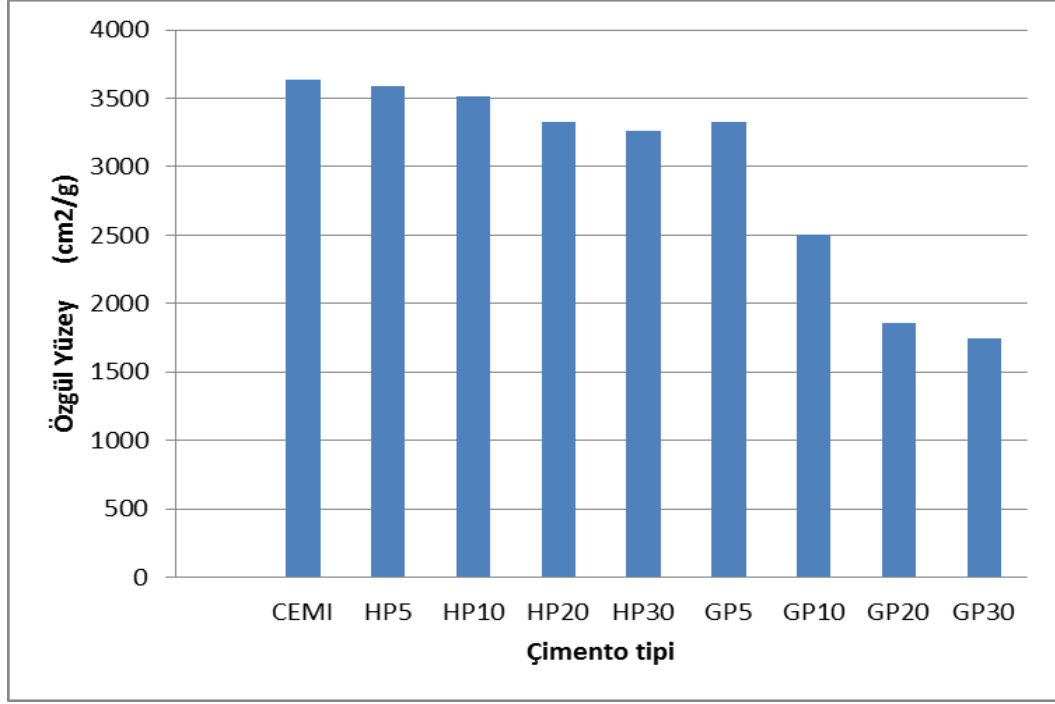
HP ve GP'lerin perlit miktarı-özgül ağırlık ilişkisi Şekil 4.4'te, perlit miktarı-özgül yüzey (blaine) ilişkisi ise Şekil 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.4: Özgül ağırlık ve Özgül yüzey değerleri.

Çimento Tipi	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Özgül Yüzey (cm ² /g)
CEMI	3,13	3634
HP5	3,07	3590
HP10	3,03	3510
HP20	2,95	3331
HP30	2,86	3263
GP5	3,09	3328
GP10	3,07	2501
GP20	3,00	1855
GP30	2,95	1743
TS EN 197-1	-	≥ 2800



Şekil 4.4: HP ve GP'lerin perlit miktarı-özlük ağırlık ilişkisi.



Şekil 4.5: HP ve GP’lerin perlit miktarı-ölgül yüzey (Blaine) ilişkisi.

4.4 Basınç Dayanımları

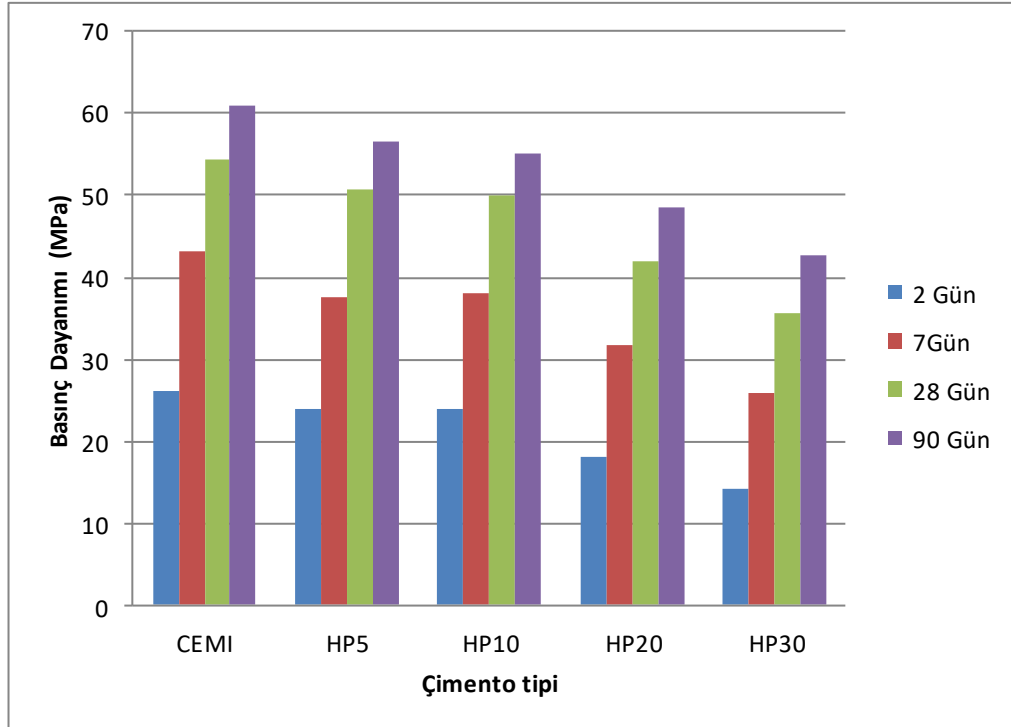
Deney sonuçları 7. 28. ve 90. günlerde her harç grubu için 6 numune kırıldıktan sonra aritmetik ortalamalarının alınmasıyla TS EN 196-1’e göre belirlenmiştir. Harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri Tablo 4.5’te, Ham perlit ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı-numune yaşı ilişkisi Şekil 4.5’te ve Genleştirilmiş perlit ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı-numune yaşı ilişkisi Şekil 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 incelendiğinde, HP ve GP harç numunelerinin tüm yaşlardaki basınç dayanımlarının, CEM I çimentosu ile üretilen numunelerin dayanım değerlerinden düşük olduğu gözlemlenmiştir. HP harç numunelerine oranla GP harç numunelerinin basınç dayanım değerleri çok daha düşüktür.

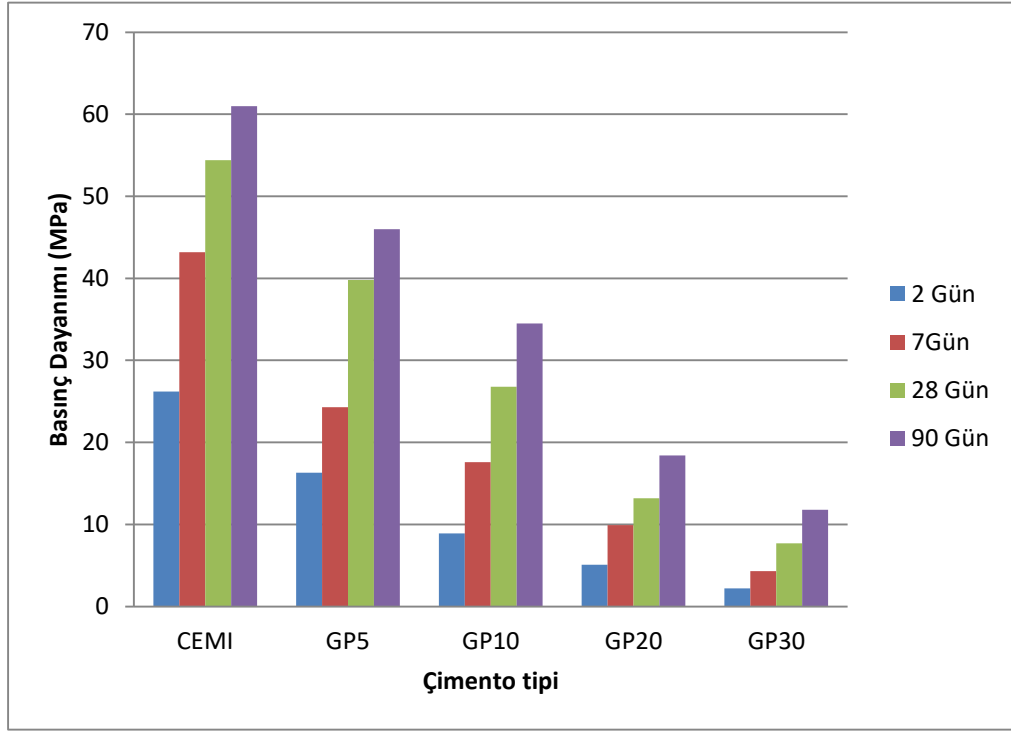
Ancak %5 ve %10 ham perlit ikameli çimentoların 28 günlük dayanım değerlerinin sırasıyla (50,80 MPa ve 50,10 MPa), CEM I 42,5 R çimentosunun minimum standart değeri olan 42,50 MPa değerinin üstünde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla %5 ve %10 oranında ham perlit ikamesiyle CEM I çimentosunun maliyetini düşürmek mümkün olacaktır.

Tablo 4.5: Harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri.

Çimento Tipi	Basınç Dayanımı (MPa)			
	2 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
CEMI	26,20	43,20	54,40	61,00
HP5	23,90	37,50	50,80	56,60
HP10	23,90	38,10	50,10	55,10
HP20	18,00	31,80	41,90	48,50
HP30	14,30	25,90	35,60	42,80
GP5	16,30	24,30	39,80	46,00
GP10	8,90	17,60	26,80	34,50
GP20	5,10	9,90	13,20	18,40
GP30	2,20	4,30	7,70	11,80



Şekil 4.6: Ham perlit ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı değerleri.



Şekil 4.7: Genleştirilmiş perlit ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı değerleri.

Sanchez ve arkadaşları da %5 ham perlit ikamesinin en iyi basınç dayanımı değerini verdiğini çalışmalarında belirtmişlerdir [36].

4.5 Eğilmede Çekme Dayanımları

Hazırlanan her harç grubundan 6 deney numunesi kırılıp aritmetik ortalamaları alınmış ve dayanım değeri olarak TS EN 196-1'e göre kaydedilmiştir. 20 °C' da 2, 7, 28 ve 90 gün bekletilen harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımı değerleri ölçülmüştür. Harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımı değerleri Tablo 4.6'de verilmiştir.

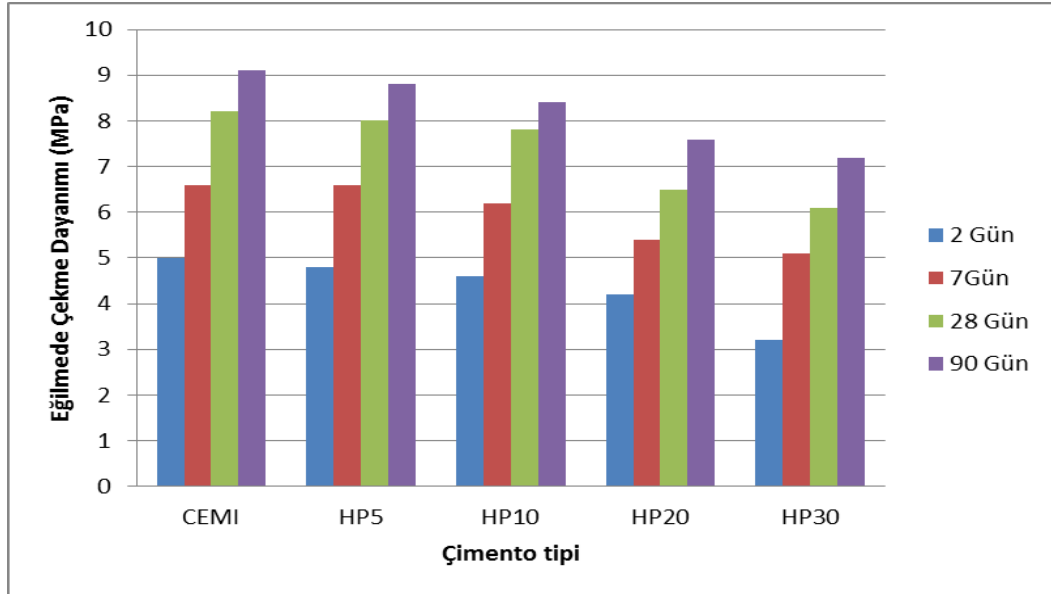
Tablo 4.6 incelendiğinde, HP ve GP harç numunelerinin tüm yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının, CEM I çimentosu ile üretilen numunelerin dayanım değerlerinden düşük olduğu gözlemlenmiştir. HP harç numunelerine oranla GP harç numunelerinin eğilmede çekme dayanım değerleri çok daha düşük olduğu tüm yaşlarda en düşük dayanım değerlerinin GP30'da görüldüğü tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarında görülen benzer ilişkinin %5 ve %10 ham perlit ikameli çimentoların

28 günlük eğilmede çekme dayanımları için de CEM I çimentosuna yakın olduğu söylenebilir.

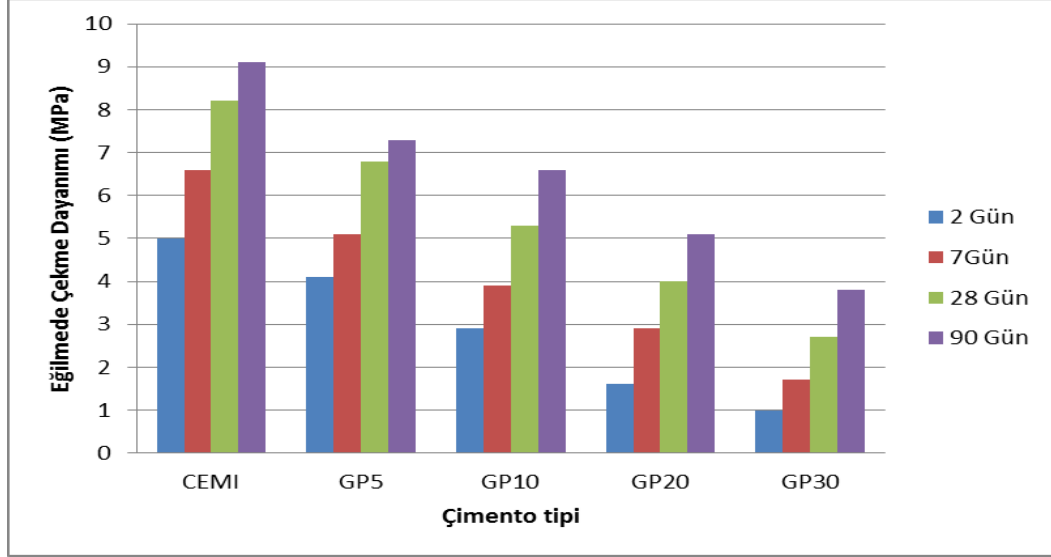
Tablo 4.6: Harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımı değerleri.

Çimento Tipi	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)			
	2 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
CEMI	5,0	6,6	8,2	9,1
HP5	4,8	6,6	8,0	8,8
HP10	4,6	6,2	7,8	8,4
HP20	4,2	5,4	6,5	7,6
HP30	3,2	5,1	6,1	7,2
GP5	4,1	5,1	6,8	7,3
GP10	2,9	3,9	5,3	6,6
GP20	1,6	2,9	4,0	5,1
GP30	1,0	1,7	2,7	3,8

En yüksek eğilmede çekme dayanımı değerleri ise, CEM I kontrol çimentosunu geçememekle birlikte HP5 ve HP10'da görülmüştür.



Şekil 4.8: HP'lerin eğilmede çekme dayanımı değerleri.



Şekil 4.9: GP'lerin eğilmede çekme dayanımı değerleri.

Sanchez ve arkadaşlarında da basınç dayanımı değerlerindeki benzer ilişki görülmüş ve %5 ham perlit ikamesinin en iyi eğilmede çekme dayanımı değerini verdiği belirtilmiştir [36].

4.6 Donma-Çözülme Etkisi

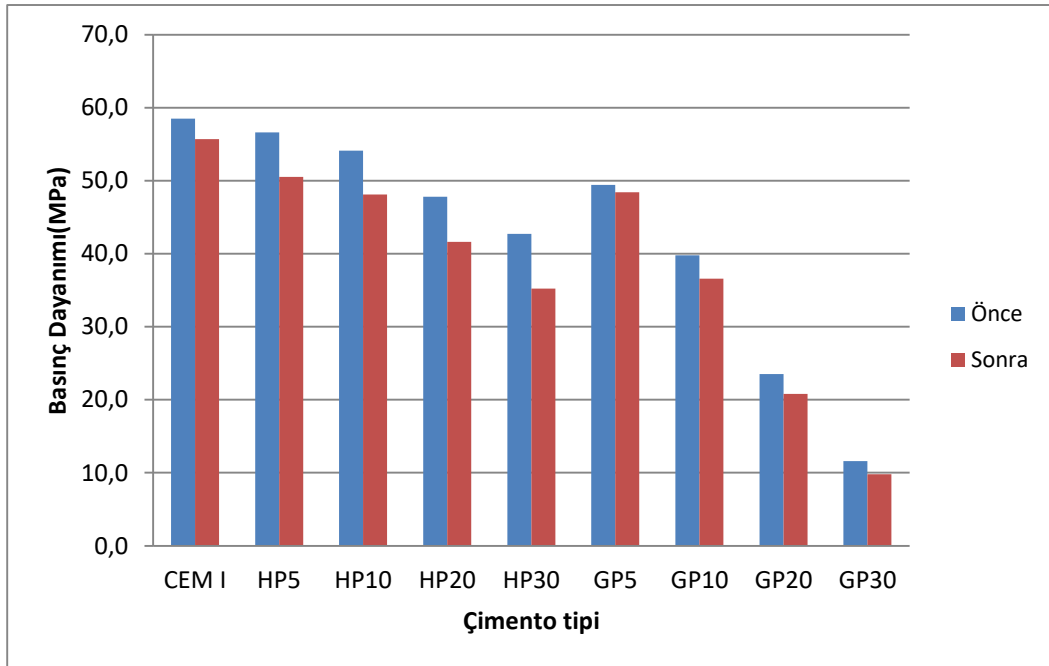
Donma-çözülme döngüleri öncesi ve sonrası harç numunelerine uygulanan basınç ve eğilmede çekme dayanımı deneyler sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7: Donma-Çözülme deney sonuçları.

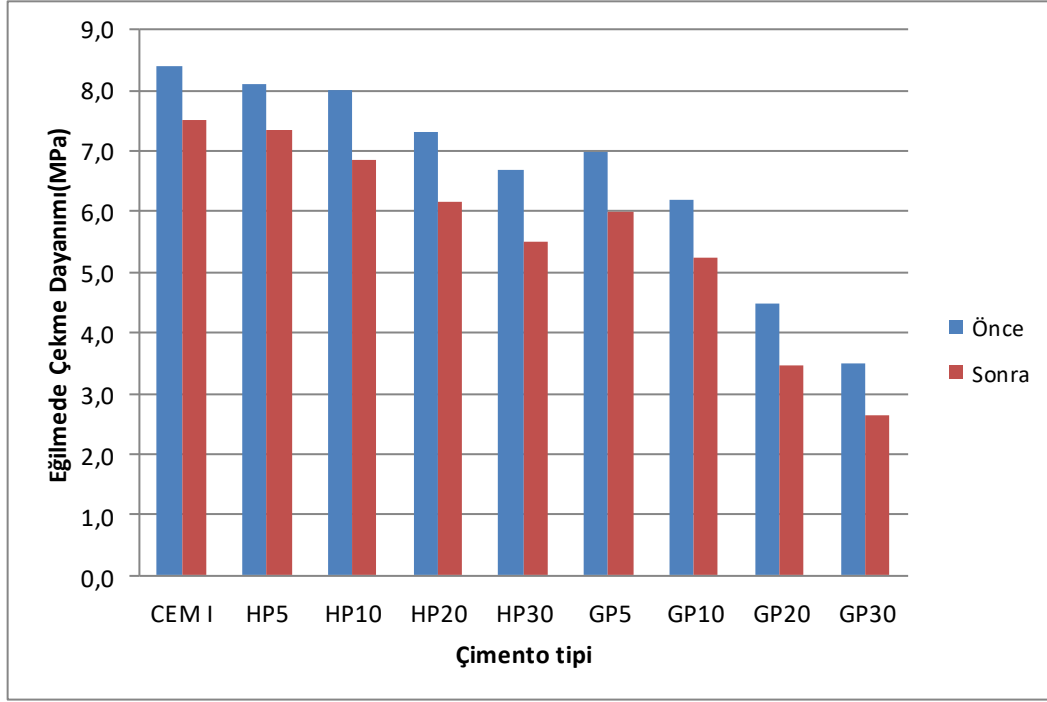
Çimento Tipi	Basınç Dayanımı (MPa)			Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)		
	Önce	Sonra	Fark(%)	Önce	Sonra	Fark(%)
CEMI	58,5	55,7	4,8	8,4	7,5	10,7
HP5	56,6	50,5	10,8	8,1	7,35	9,3
HP10	54,1	48,1	11,1	8,0	6,85	14,4
HP20	47,8	41,6	12,9	7,3	6,15	15,8
HP30	42,7	35,2	17,6	6,7	5,5	17,9
GP5	49,4	48,4	2,0	7,0	6,0	14,2
GP10	39,8	36,6	8,0	6,2	5,25	15,3
GP20	23,5	20,8	11,5	4,5	3,45	18,9
GP30	11,6	9,8	15,5	3,5	2,65	24,3

Tablo 4.7'deki basınç dayanımları incelendiğinde 25 donma-çözülme döngüsü sonunda numunelerin dayanım kaybına uğradıkları görülmüştür. CEM I çimento harcında ortaya çıkan basınç dayanımı azalması % 4.8 olurken, % 17.6 ile en fazla azalma oranı HP30'da belirlenmiştir. Basınç dayanımındaki en küçük azalma ise GP5 harcında % 2.0 olarak belirlenmiştir. Genleştirilmiş perlit ikameli harçların donma-çözülme etkisine olan direnci ham perlit ikameli olanlara göre dayanıklı çıkmıştır.

Eğilmede çekme dayanımlarına bakıldığında da, donma-çözülme döngüsü sonunda numunelerin dayanım kaybına uğradıkları görülmüştür. CEM I çimento harcında ki eğilmede çekme dayanımındaki azalma % 10.7 olurken, % 24.3 ile en fazla azalma oranı GP30'da belirlenmiştir. Bunun nedeni, genleştirilmiş perlitin karışım içerisinde daha çok hacim kaplayarak, donma sırasındaki hacim artışına karşı daha dayanıklı olması olarak ifade edilebilir.



Şekil 4.10: Donma-Çözülme etkisi altında basınç dayanımı değerleri.

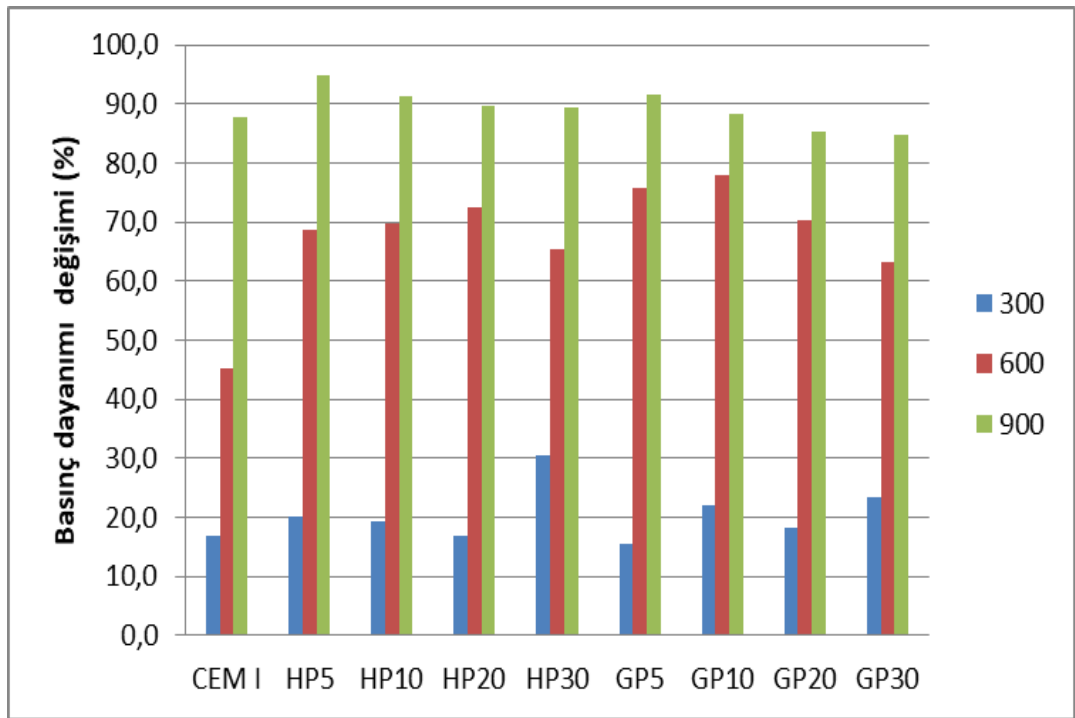


Şekil 4.11: Donma-Çözülme etkisi altında eğilmede çekme dayanımı değerleri.

4.7 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Standart kür koşullarında 28 gün süreyle kür edilen harç numuneleri sırasıyla 300 °C, 600 °C ve 900 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık deneyleri sonucunda numuneler üzerinde basınç ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisini belirleyebilmek için, aynı zamanda dışarıda bekletilen numuneler üzerinde de dayanım deneyleri yapılmış ve değişim % elde edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımındaki değişim yüzdeleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Genel olarak sonuçlar incelendiğinde, yüksek sıcaklık etkisi altında basınç dayanımındaki değişim miktarları ham ve genişletilmiş perlit ikameli çimentolarda yüksek çıkmıştır. 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerden HP20 ve GP5’nin basınç dayanımındaki değişimin Portland çimentosu ile benzer olduğu, 600 °C sıcaklıkta ise, katkıli çimentolarla Portland çimentosu arasındaki farkın çok olduğu görülmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde, dayanım kaybına uğradığı görülmüş ve basınç dayanımlarında en fazla kaybın HP30’da, eğilmede çekme dayanımında ise en fazla kaybın HP10’da olduğu belirlenmiştir. En iyi basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı değerlerinin ise HP5 ve HP10 harçlarında elde edildiği görülmektedir. Sıcaklık 900 °C’ye çıktığında ise numunelerin tamamen deformasyona uğradığını ve basınç dayanımı kayıplarının birbirine yakın olduğu söylenebilir. Benzer durum eğilmede çekme dayanımı değişimleri içinde söylenebilir.



Şekil 4.12: Yüksek Sıcaklık etkisinde basınç dayanımı değişimi (%).

Tablo 4.8: Yüksek Sıcaklık etkisinde (300 °C, 600 °C ve 900 °C) dayanım değişimi.

Çimento Tipi	SICAKLIK	Basınç Dayanımı (MPA)			Eğilmede Çekme Dayanımı (MPA)		
		Önce	Sonra	Fark(%)	Önce	Sonra	Fark(%)
CEM I	300°C	66,5	55,3	16,8	10,6	7,7	27,4
HP5		61,6	49,1	20,3	9,8	7,3	25,5
HP10		61,5	49,6	19,3	10,1	6,3	37,6
HP20		52,9	44	16,8	8,9	5,9	33,7
HP30		47,3	32,8	30,7	7,7	5,0	35,1
GP5		44,9	37,9	15,6	8,9	5,7	36,0
GP10		38	29,6	22,1	7,5	5,1	32,0
GP20		21,8	17,8	18,3	7,1	4,1	42,3
GP30		14,5	11,1	23,4	3,9	3,1	20,5
CEM I	600°C	65,3	35,7	45,3	10,5	5,5	47,6
HP5		60,4	18,9	68,7	9,8	1,1	88,8
HP10		59	17,8	69,8	9,9	0,9	90,9
HP20		54,5	15	72,5	8,4	0,8	90,5
HP30		47,4	16,4	65,4	7,6	0,6	92,1
GP5		45,5	11	75,8	8,3	1,7	79,5
GP10		36,9	8,1	78,0	7,7	0,8	89,6
GP20		22	6,5	70,5	6,8	0,6	91,2
GP30		13,9	5,1	63,3	3,8	0,4	89,5
CEM I	900°C	63,5	7,8	87,7	10,4	0,5	95,2
HP5		60,6	3,1	94,9	10,0	0,4	96,0
HP10		61,5	5,3	91,4	9,8	0,5	94,9
HP20		52,7	5,5	89,6	8,3	0,5	94,0
HP30		47,3	5	89,4	7,4	0,5	93,2
GP5		44,6	3,8	91,5	8,0	0,4	95,0
GP10		35,7	4,2	88,2	7,9	0,3	96,2
GP20		21,1	3,1	85,3	6,7	0,3	95,5
GP30		13,7	2,1	84,7	3,6	0,2	94,4

4.8 Rötire Deneyi

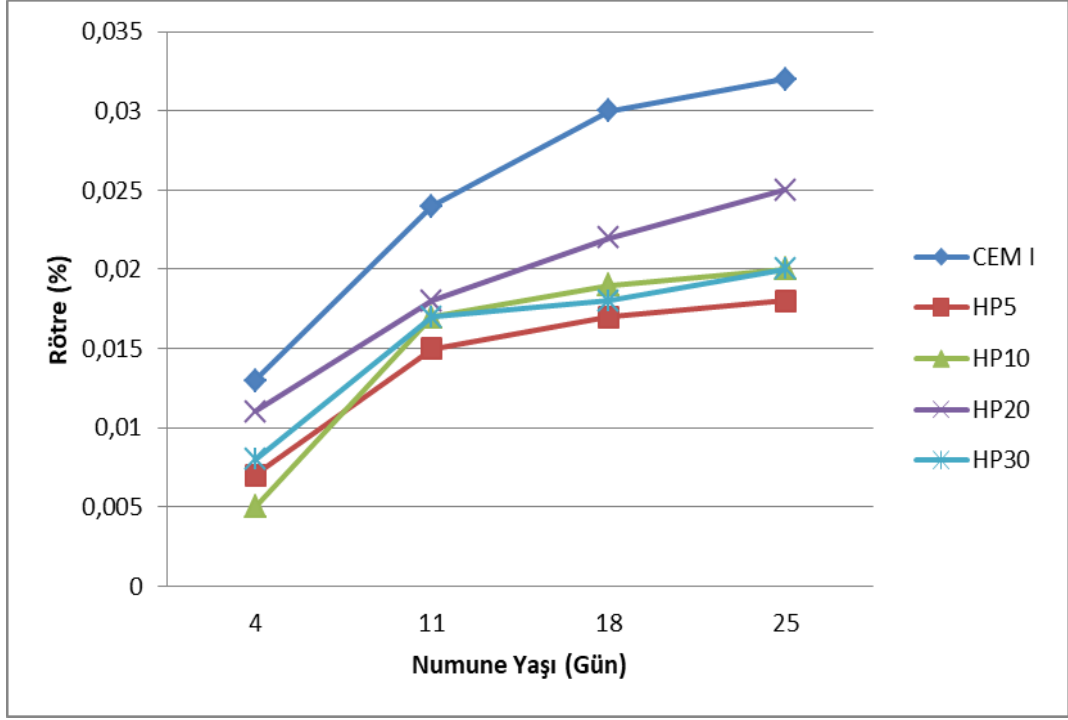
Rötire deneyi ASTM C 596 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney standardında belirtilen günler için boydaki değişim miktarları ölçülerek rötire değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.9’de verilmiştir. Ayrıca, rötire gelişimini daha iyi anlayabilmek için, rötirenin zamana, kullanılan perlit türüne ve perlit oranına bağlı olarak gelişimi Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de gösterilmiştir.

Tablo 4.9: Rötire deney sonuçları.

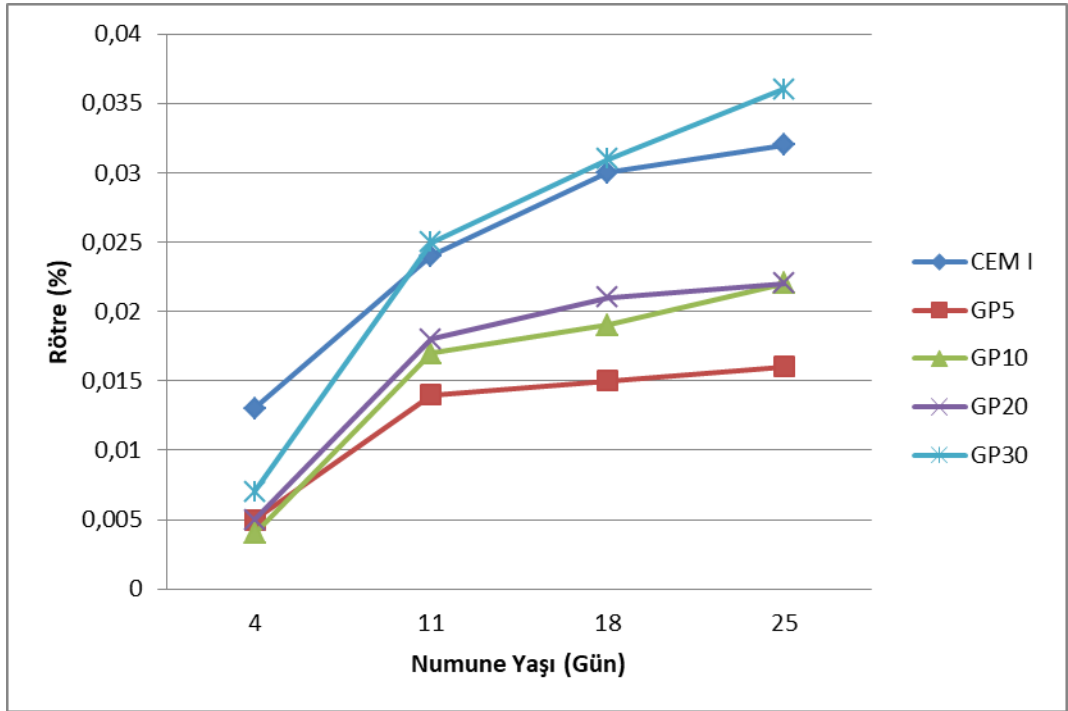
Çimento Tipi	Numune Yaşı (gün)			
	4	11	18	25
CEM I (%)	0,013	0,024	0,030	0,032
HP5 (%)	0,007	0,015	0,017	0,018
HP10 (%)	0,005	0,017	0,019	0,020
HP20 (%)	0,011	0,018	0,022	0,025
HP30 (%)	0,008	0,017	0,018	0,020
GP5 (%)	0,005	0,014	0,015	0,016
GP10 (%)	0,004	0,017	0,019	0,022
GP20 (%)	0,005	0,018	0,021	0,022
GP30 (%)	0,007	0,025	0,031	0,036

Deney sonuçları incelendiğinde, ham perlit ve geliştirilmiş perlit ikameli çimentoların rötire değerlerinin düşük çıktığı görülmektedir. Ham ve geliştirilmiş perlit ikamesinin Portland çimentosuna göre rötreyi olumlu şekilde etkilediğini (yani azalttığını) söylemek mümkündür. Bunun nedenini perlitin çimento içerisinde hacim artışı sağlayarak genişlemesi ve sonucunda rötire gelişimini azaltması olarak ifade edilebilir.

Bulgu da yapmış olduğu çalışmada, çimento harçlarındaki boy değişim değerlerinin ham perlit katkı oranı arttıkça azaldığını yani perlit katkılı çimentoların rötreyi olumlu yönde etkilediği yani azalttığını belirtmiştir [31].



Şekil 4.13: HP harçlarının rötre - numune yaşı ilişkisi.



Şekil 4.14: GP harçlarının rötre - numune yaşı ilişkisi.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, elde edilen verilere dayanarak aşağıdaki sonuçlara varmak mümkündür.

- Ham perlit ikamesi, HP çimentolarının normal kıvam suyu ihtiyaçlarını CEM I çimentosuna göre kullanılan perlit oranına bağlı olarak azaltırken, GP çimentolarında geliştirilmiş perlit oranının artışıyla normal kıvam suyu değerlerinin de çok arttığı gözlemlenmiştir.
- HP ve GP'lerde perlit oranlarının artırılmasıyla çimento harçlarının priz sürelerini daha geç aldıkları belirlenmiştir. Özellikle GP harçlarının priz sürelerinin, HP'lere göre daha uzun olduğu görülmüştür. Ayrıca ilk ve son priz süreleri incelendiğinde, HP'lerin değerleri CEM I çimentosuna kıyasla düşük çıkmıştır. GP'lerin ise, priz süresi değerleri CEM I çimentosunu yakalamakta hatta geçmektedir.
- Ham perlit ve geliştirilmiş perlit ikameli çimentolarda perlit miktarındaki artış özgül yüzey değerlerini azalmaktadır. En düşük özgül yüzey değerleri, GP10, GP20 ve GP30'da bulunmuştur.
- HP ve GP'lerin her ikisinde de çimento içerisinde perlit kullanılması, çimentoların eğilmede çekme dayanımlarını, perlit ikame oranındaki artışla ters orantılı olarak azaltmaktadır.
- HP ve GP harç numunelerinin tüm yaşlardaki basınç dayanımlarının, CEM I çimentosu ile üretilen numunelerin dayanım değerlerinden düşük olduğu gözlemlenmiştir. HP harç numunelerine oranla GP harç numunelerinin basınç dayanım değerleri çok daha düşüktür. En yüksek basınç dayanımı değerleri ise, CEM I kontrol çimentosunu geçememekle birlikte HP5 ve HP10'da görülmüştür.
- Donma-çözülme döngüleri sonunda da tüm numuneler dayanım kaybına uğramış ve CEM I çimentosuna en yakın dayanım değerleri yine HP5 ve HP10 numunelerinde görülmüştür.
- Standart kür koşullarında 28 gün süreyle kür edildikten sonra 300, 600 ve 900 °C'de yüksek sıcaklık deneyine maruz kalan numunelerin dayanım kaybına uğradıkları ve yine hemen hemen en yüksek dayanım değerlerini

CEM I çimentosundan sonra HP5 ve HP10 numunelerinde grldđđ belirlenmiştir.

- Rötre deney sonuçları, imento içerisinde ham perlit ve genleştirilmiş perlit kullanımının hemen hemen tüm yaşlarda çimentonun rtresini olumlu şekilde etkilediğini (yani azalttığını) göstermiştir.

CEM I Portland imentosu ve harç numunelerinin ikameli imento ve harç numunelerine göre hemen hemen tüm deneylerde daha yüksek performans gösterdiği grlmştir.

Genleştirilmiş perlit ikameli çimentolarla hazırlanan harçların su oranları, (imentoların normal kıvam ihtiyaı üzerinde etkili olan yüzdelerden yararlanılarak bulunan) ok yüksek değerlerde olması sebebiyle tüm deneylerdeki dayanım sonuçlarının çok düşük çıkmasına sebep olmuştur. Bu sebeple, genleştirilmiş perlitin puzolanik malzeme olarak kullanımının uygun olmadığı grlmştir.

Buna rağmen, çimentoda %5 ve %10 ham perlitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilceğini ve CEM I imentosunun maliyetini düşürmenin mümkün olabileceğini söyleyebiliriz.

Ham perlitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği hakkında genel bir yorum yapabilmek için, ham perlit kullanımı ile ilgili yapılacak benzeri çalışmalarda, ham perlit ikameli çimentoların inceliklerinin belirlenmesinde, ham perlitin öğütme süresi ve incelikleri için kontrol çimentosunun inceliğinin referans alınması uygun olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- [1] Bulut, Ü., “Perlitin Puzolanik Aktivitesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul, (2007).
- [2] Aruntaş, H.Y., “Diatomitlerin Çimentolu Sistemlerde Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (1996).
- [3] Nagataki, S., and Wu, C., “A Study Portland Incorporating Silica Fume And Blast Furnace Slag, Fly Ash, Slag, Silica Fume And Natural Puzzolan- Proceedings”, Fifth International Conference, SP:153-2, *American Concrete Institute*, 1051-1068, (1995).
- [4] Azizi, S., “Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2007).
- [5] Doğan, H., Şener, F., “Hafif Yapı Malzemeleri (Pomza - Perlit - Ytong - Gazbeton) Kullanımının Yaygınlaştırılmasına Yönelik Sonuç ve Öneriler”, *M.T.A. Haber Bülteni*, 1, 51-53, (2004).
- [6] D.P.T., “Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III (Pomza, Perlit, Vermikülit, Flogopit, Genleşen Killer)”, *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001-2005) Kalkınma Planı*, DPT: 2617 - ÖİK: 628, Ankara, (2001).
- [7] www.pertas.net/perlit.html , (10.03.2019).
- [8] M.T.A., “Türkiye Perlit Envanteri”, *Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü Yayınları*, 193, 1-8, Ankara, (1985).
- [9] TSE EN 14316-1, “Isı Yalıtım Malzemeleri-Binalar İçin-Genleştirilmiş Perlitten (EP) Yerinde Yapılan Isı Yalıtımı”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2006).

- [10] Yıldız, N., “Yalıtımda Doğal Çözüm: Perlit”, *Madencilik Türkiye Dergisi*, 39, (2014).
- [11] U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries 2009*, Virginia, U.S.A., (January 2009).
- [12] U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries 2019*, Virginia, U.S.A., (February 2019).
- [13] Gül, D., “Characterization and Expansion Behavior of Perlite”, Master of Science, *The Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology University*, Materials Science and Engineering, İzmir, (2016).
- [14] U.S. Geological Survey, *2014 Minerals Yearbook Turkey (Advance Release)*, U.S.A, (September 2016).
- [15] www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/2017-yili-dis-ticaret, (25.03.2019).
- [16] www.betonvecimento.com/cimento/cimento-2, (29.03.2019).
- [17] D.P.T., “Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayi Hammaddeleri IV (Çimento Hammaddeleri)”, *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001-2005) Kalkınma Planı*, DPT: 2611 - ÖİK: 625, Ankara, (2001).
- [18] Erdoğan, T.Y., “Beton”, *Odtü Yayıncılık*, Ankara, (2007).
- [19] Neville, A.M., “Properties of Concrete”, *Longman Scientific & Technical*, England, (1981).
- [20] TMMOB Maden Mühendisleri Odası, *Madencilik Sektörü Raporu*, (2005).
- [21] ASTM C 125, “Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates”, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, (1994).
- [22] ASTM C 618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete”, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, (1994).

- [23] Yeğinoğlu, A., Ertün, T., “Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, (2009).
- [24] TS EN 197-1, “Genel Çimentolar-Bölüm I: Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).
- [25] Vitruvius, P., “Ten Books on Architecture”, *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom, (1999).
- [26] Ulusu, H., “Erzincan ve Nevşehir Yöresi Pomzularının Çimentolu Sistemlerde Kullanılabilirliği”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, (2006).
- [27] Yıldırım, S.F., “Puzolanik Zeolitin Çimentoda Katkı Uygunluğunun Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antakya/Hatay, (2007).
- [28] Hossain, K. M. A., “Blended Cement Using Volcanic Ash and Pumice”, *Cement and Concrete Research*, 33, 1601-1605, (2003).
- [29] Dayı, M., “Doğal ve Yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, (2006).
- [30] Atan, M.C., “Using Cappadocia Tuff as a Natural Pozzolan in Cement Production”, Master of Science, *The Graduate School of Natural Applied Sciences of Middle East Technical University*, Civil Engineering, Ankara, (2015).
- [31] Bulgu, M., “Perlitin Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, (2003).
- [32] Taban, H., Gökçe, H.S., Abama, H.İ. “Ecological Effects of Natural Pozzolans Used Additive Material in Cement”, *Journal of Polytechnic*, 15, 185-190, (2012).

- [33] Erdem, T.K., Meral, C., Tokyay, M., Erdoğan, T.Y., “Use of Perlite as a Pozzolanic Addition in Producing Blended Cements”, *Cement and Concrete Composites*, 29, 13-21, (2007).
- [34] Erdem, T.K., “Investigation on the Pozzolanic Property of Perlite for Use in Producing Blended Cements”, Master of Science, *The Graduate Scholl of Natural and Applied Sciences of Middle East Tecnical University*, Civil Engineering, Ankara, (2005).
- [35] Chihaoui, R., Khelafi, H., Senhadji, Y., Mouli, M., “Potential Use of Natural Perlite Powder as a Pozzolanic Mineral Admixture in Portland Cement”, *Journal of Adhesion Science and Tecnology*, 30, 1930-1944, (2016).
- [36] Sanchez, M.A., Molina, W.M., García, H.L.C., Guzman, E.M.A., Acosta, A.A.T., and Ortega, J.M.C., “Properties of Portland Cement Mortar with Substitutions of Natural and Expanded Perlite”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62, 508-516, (2018).
- [37] Cobirzon, N., Balog, A.A., Moşanji, E., “Investigation of the Natural Pozzolans for Usage in Cement Industry”, *Procedia Technology*, 19, 506-511, (2015).
- [38] Ramezaniapour, A.A., Karein, S.M.M., Vosoughi, P., Pilvar, A., Isapour, S., Moodi, F., “Effects of Calcined Perlite Powder as a SCM on the Strength and Permeability of Concrete”, *Construction and Building Materials*, 66, 22-228, (2014).
- [39] TS EN 196-1, “Çimento Deneş Metotları-Bölüm I: Bileşim, Dayanım Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).
- [40] TS EN 196-2, “Çimento Deneş Metotları-Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).
- [41] TS EN 196-3, “Çimento Deneş Metotları-Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).
- [42] TS EN 196-6, “Çimento Deneş Metotları-Bölüm 6: İncelik Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).

- [43] ASTM C 596-01, “Test Method for Drying Shrinkage of Mortars Containing Cement”, *Annual Book of ASTM Standards*, Pennsylvania, (2002).
- [44] ASTM C 157/C 157M-99, “Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete”, *Annual Book of ASTM Standards*, Pennsylvania, (2002).