

Perlit Ve Traverten Atıkları İle Üretilen Puzolanik Çimentoların Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation Of The Engineering Properties Of Puzolanic Cement Produced With Perlite And Travertine Wastes

Abdul Vahap KORKMAZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

Sorumlu yazar: avkorkmaz@aku.edu.tr

Özet

Endüstriyel atıkların çevreye olan zararları gözardı edilmeyecek derecede önemlidir. Ülkemizde bulunan traverten atıklarının değerlendirilmesi, hem çevre kirliliği hem de ülke ekonomisine katkısından dolayı, önemlidir. Dolayısıyla, traverten atıklarının; çimento üretiminde kullanımı ekonomiye önemli katkı sağlayacaktır. Öncelikle malzeme olarak kullanılabilirliği ortaya konulduktan sonra, atıklara yakın ortak alanda kurulacak olan tesisler ile atıklar hızlıca sektöre kaynak olarak dönebilecektir. Traverten atıkları ile üretilen çimentoların beton dayanım bakımından da iyi sonuçlar vermesi halinde; hiçbir maliyeti olmayan traverten atıklarıyla üretilecek olan çimento ve betonlar daha uygun fiyat ile kullanıma sokulabilir. Yapılan bu çalışmada Tokat-Turhal yöresindeki traverten fabrikası atıklarının çimentoya katkı maddesi olarak ilave edilmesi ve değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Traverten atığı ve perlit % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında çimento klinkerine katılarak hazırlanan çimentoların priz süresi, hacim genleşmesi, basınç dayanımı ve öğütme performansı gibi fiziksel özellikleri incelenerek TS 24 değerleri ile uyum halinde olduğu ve bu katkıların en fazla %20 oranına kadar çimentoya katılarak değerlendirilebileceği gözlemlendi. Hazırlanan katkılı çimentoların kimyasal analizleri XRF (XRyay Floresans) tekniği ile yapılp Türk Standartları'nın değerleri ile uyumlu olduğu belirlendi.

Anahtar Kelimeler: *Traverten, perlit, çimento, öğütme, dayanım, XRF.*

Abstract

The damages to the environment of industrial wastes are important to be ignored. Especially the evaluation of travertine wastes arising from the richness of groundwater in our country is important due to both environmental pollution and contribution to the national economy. Therefore, travertine wastes; its use in cement production will make a significant contribution to the economy. First of all, once the usability of the material has been demonstrated, the facilities to be established in the common area close to the wastes will be able to return wastes to the sector as a resource. If the cements produced with travertine wastes give good results in terms of concrete strength; cement and concrete to be produced with travertine wastes, which have no cost, can be put into use at a more affordable price. In this study, it is aimed to add and evaluate the wastes of travertine factory in Tokat-Turhal region as additive to cement. Traverten waste and perlite 5%, 10%, 15% and 20% of the cement prepared by adding the cement clinker setting time, volume expansion, compressive strength and grinding performance by examining the physical properties of the TS 24 values are in compliance with the maximum of 20% It can be evaluated by adding up to the cement. The chemical analyzes of the doped cements prepared by XRF (XRyay Fluorescence) technique were found to be consistent with the values of Turkish Standards.

Key Words: *Travertine, perlite, cement, grinding, strength, XRF.*

1.Giriş

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

Çevresel kaynakların korunmasına bağlı olarak endüstriyel atıkların, çimento ve betonda katkı veya ikame malzemesi olarak kullanılmasına ilişkin geçmişten günümüze birçok çalışma yapılmıştır. Bu atıklar içerisinde en yaygın olarak kullanılan malzemelerden biri de traverten atıklarıdır. Dünya’daki gelişmeler ve hızlı nüfus artışına paralel olarak daha fazla yapıya, bu yapılaşmaya paralel olarak da daha fazla betona ve dolayısı ile de çimentoya ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılarda malzemeleri birbirine bağlamak için dünya da en fazla kullanılan bağlayıcı malzeme çimentodur (Worrell ve diğ., 2000). Fazla miktarda enerji tüketimi ve atmosfere salmış olduğu CO₂ miktarı nedeniyle, dünyada tartışılan çözüm arayışının yoğun olduğu bir konudur. Bu yüzden beton ve çimento sektöründe puzolanik malzemeler kullanılarak, hem ekolojik dengeye hem de ekonomiye katkı sağlanmaktadır (Chen vd., 2010).

Hem doğal (zeolit, perlit, tras vb.) hem de yapay (uçucu kül, taban külü, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb.) puzolanik malzemeler uzun zamandır çimento ve betonda katkı veya ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır. Puzolanik katkıları, çimentoların performanslarının geliştirilmesinde birçok çalışmaya konu olmuştur. Puzolanlar; çimentoda ekonomiklik (Worrell ve diğ., 2000), permabiliteyi azaltması (Shiqun ve Della, 1986), alkali agrega gelişiminin kontrolü (Prigione, 1987), kimyasal direnç sağlaması (Saraswathy ve diğ., 2003), hafiflik (Khandaker ve Anwar, 2004; Aruntağ ve Tokyay, 1996), atıkların değerlendirilmesi (Fu ve diğ., 2002), betonun rötresini azaltması (Homwuttiwong ve Sirivivatnanon, 2004; Kanna ve diğ., 1998) ve mukavemetlerde artış (Pekmezci ve Akyüz, 2004; Turanlı ve diğ., 2004, Yılmaz ve diğ., 2007; Yılmaz ve Olgun, 2008) gibi avantajlar sağlaması nedeniyle

üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı bir alandır. Bu puzolanik malzemelerin arasında en çok kullanılanlardan biri de traverten atıkları ve perlittir (Aruntaş, 2006).

Perlit katkısı öğütme yardımcılarıyla birlikte kullanılarak öğütülen çimentodan yapılan betonların basınç dayanımlarındaki değişimin araştırılması gerekmektedir. Bu sayede artabilecek beton performansı ile çimentolarda klinker kullanım yüzdesi düşürülebilir yani katkılı çimento üretimi artırılabilir. Klinkerin nihai çimentoda daha az kullanılması ise birim çimento miktarı için daha az elektrik enerjisi, daha az fosil yakıt tüketimi, daha az kalsiyum karbonat kalsinasyonu dolayısıyla daha az CO₂ emisyonu anlamına gelmektedir. Ayrıca dünya perlit rezervinin büyük kısmına sahip olan ülkemizde ekonomik katma değeri yüksek alanlarda, perlit malzemesinin kullanımı sağlanmış olacaktır (Yazıcıoğlu, 2016).

1. Çimento Hammaddeleri ve Katkı Maddeleri

Çimento; CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi bileşenlerin uygun sıcaklıkta pişirilip isteğe göre katkı maddelerinin eklenip öğütülmesi sonucu meydana gelir. Bu mineralleri oluşturan hammaddeler; kalker, kil ve ayrıca bunların doğal orantılanmış hali olan marndır. Kireç taşından veya kalkerden çimento için gerekli olan kalsiyum karbonat elde edilir. Kilden ise silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksit gereksinimleri karşılanır. Eğer kilden alüminyum ve demir oksit ihtiyacı karşılanamıyorsa hammadde karışımı olan farine yeterli oranlarda kuvars ve demir mineralleri eklenir. Ayrıca bunların yanında istenilen özelliğe ve niteliğe göre çimentoya çeşitli hammaddeler ilave edilir. Bunlar puzolonik maddeler, demir ve alüminyum cevheri, doğal alçı ve yapay alçı olarak sıralayabiliriz (Heikal vd., 2000).

1.1. Perlit Katkısı

Ülkemizde önemli perlit rezervleri, tersiyer-erken orta kuvaterner yaşlı volkanik bölgelerde yoğunlaşmıştır. Genel olarak riyolitik volkanizmalarla ilgilidir. Türkiye'deki perlit oluşumları yüzeye oldukça yakın oluşumlar olduğundan (Perlit cevheri yataklarının derinliği 25-90 m arasındadır.) üretim zorluğu bulunmamaktadır. Aynı şekilde perlit kalitemizde oldukça iyidir. Tüm bu avantajlara rağmen rezerv payını üretime yansıtamamaktadır (Yu vd., 2003).

Perlit cevheri açık işletmecilik metodu ile genellikle patlatılarak yapılır. Daha sonra kırma, öğütme, sınıflandırma işlemlerini takiben genleştirme işlemi yapılmaktadır. Perlit madenciliği çoğunlukla yerleşim alanlarından uzak bölgelerde yapıldığından ve işgal ettiği alanların az olmasından dolayı ciddi bir sorun çıkarmaz. Terk edilen ocaklarda açıkta kalan posa malzemesinin de çevre sağlığı için bir problem yaratmadığı bilinmektedir. Aslında perlitin ocağının işlenmesi kimyasal işlem değil fiziksel işlemlerle sağlandığı için üretimden kaynaklanan atıklar bulunmamaktadır. Sadece kırma-eleme işlemleri esnasında çok toz çıkışı olabileceğinden bu ünitelerin bulunduğu yerlere toz tutma ekipmanları yerleştirilmektedir (MTA, 1985).

Ham perlit kimyasal bileşimi itibariyle silisli ve alüminyumlu bileşikler içerdiğinden kalsiyum esaslı bağlayıcılar ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik aktivite gösterir. Bu özelliği nedeniyle inşaat sektöründen ham perlit olarak talep gelmektedir. Doğal agrega olarak bulunan perlitin ülkemizde geniş rezervleri vardır (özellikle Erzincan, Nevşehir, Ankara civarındaki perlit yatakları) (Bulgu, 2003)

Nevşehir Bölgesi yaygın volkanizma ilde önemli pomza, perlit, kaolen ve kum çakıl yataklarının oluşumuna neden olmuştur. Perlit yatakları Acıgöl ilçesinde yer almakta olup, ilçedeki perlitlerin genleşme oranları 2,3 ile 16 arasında değişmektedir. Yatakların toplam rezervi 450 milyon ton civarındadır. Derinkuyu ilçesindeki sahalarındaki orta kaliteli perlitlerin genleşme oranı 3,2-4,5 arasında değişmekte olup, sahalarda toplam 320 milyon ton olarak jeolojik rezerv belirlenmiştir (MTA, 1985).

1.2. Traverten Atıkları

Traverten; kalsiyum karbonat (CaCO_3) veya kalsiyum bikarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) içerikli sızıntı suları veya kaynak sularının yeraltındaki kırık ve çatlaklarda, mağaralarda, fay hatlarında ve yeryüzünde, dış basıncın azalmasına bağlı olarak CO_2 basıncının düşmesi sonucu bu kaynak sularının hızlı bir çökelim göstermesiyle oluşan kimyasal sedimanter kayalardır. Travertenler ülkemizde yaygın olarak gözlenmektedir. Denizli- Pamukkale, Antalya, Adana, Mersin, Van-Başkale, Tokat (Turhal, Artova, Sulusaray), Sivas (Sıcak Çermik, Uyuz, Sarıkaya, Soğuk Çermik), Konya, Kayseri, Eskişehir, Erzurum-Hölenk, Bolu-Akkale travertenin gözlendiği yerlerden bazılarıdır. Şekil 1'de Türkiye haritası üzerinde travertenlerin gözlendiği alanlar verilmiştir (Çobanoğlu vd., 2014).



Şekil 1. Türkiye haritası üzerinde travertenlerin gözlendiği alanlar

Tokat bölgesinde bulunan traverten yatakları Türkiye'nin önde gelen traverten yataklarındandır. Bölgede traverteni işleyen birçok işletme tesisi bulunmaktadır. Bu tesisler traverteni bloklar halinde çıkartarak çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmak üzere gerekli kesim işlemlerinden geçirmektedir. Traverten ocaklarında sayalama ve fabrikada blok kesim

işlemleri sırasında blokların parçalanması, dağılması gibi sonuçlar sebebiyle kullanılmayan atık yığınları oluşmaktadır. Bu atıklar bir atık alanında depolanmakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Şekil 2’de traverten ve atık sahasının genel görünümü verilmiştir (Erkek ve Özdemir, 2011).



Şekil 2. Traverten sahasının genel görünümü

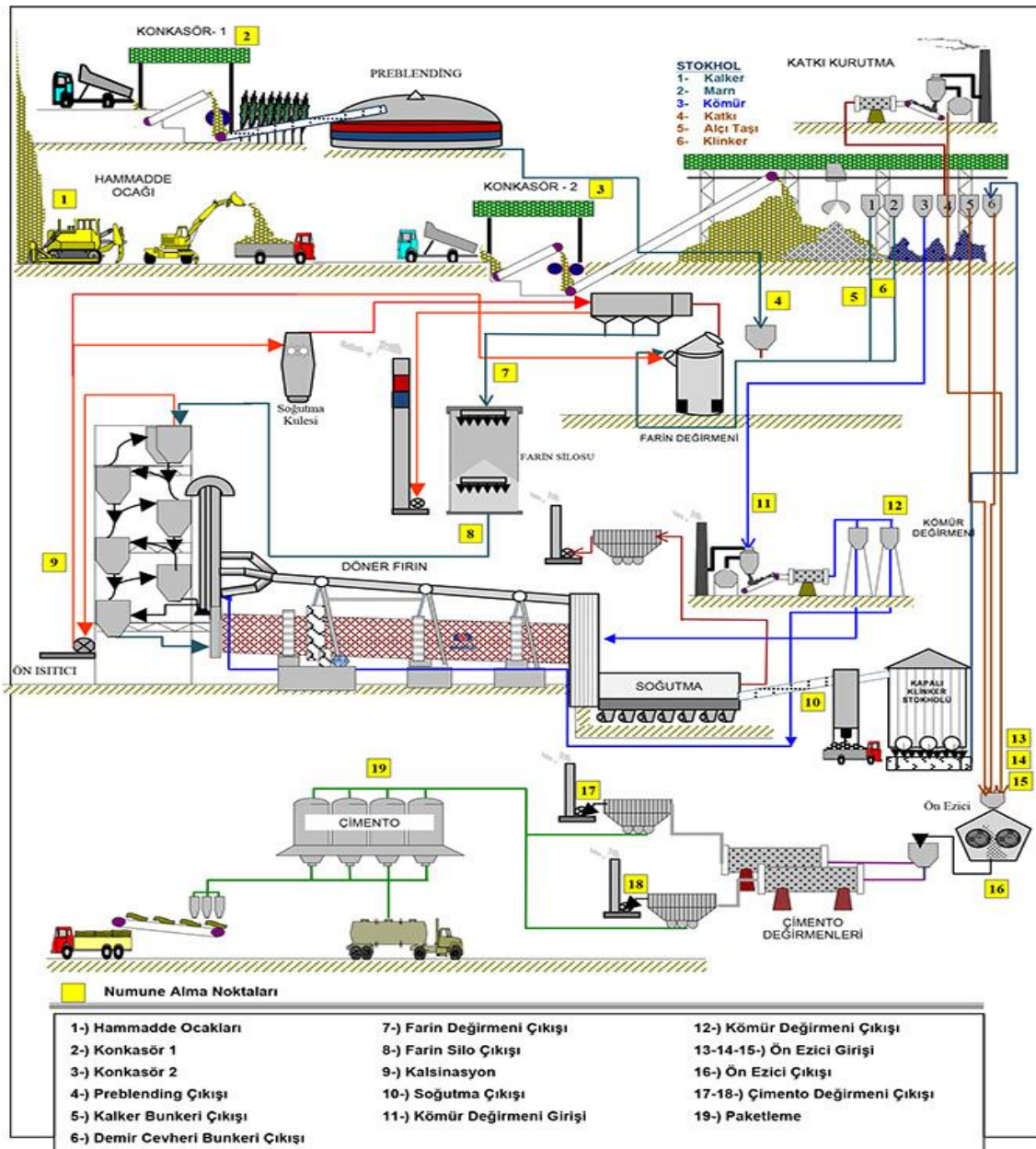
Her yıl tonlarca traverten atığı atık depolama alanlarında depolanmaktadır. Çimento üretiminde kullanılacak traverten atıklarının bölgeden temin edilebiliyor olması hem nakliye masrafları açısından daha ekonomik olacaktır hem de yerel bir malzeme endüstriyel anlamda değerlendirilmiş olacaktır. Bu sebeple bu bölgedeki traverten atıkları çalışma kapsamında çimento standart deneylerine tabi tutularak sınır değerlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilecektir (Mesci, 2013).

1.3. Çimento Üretimi

Genel olarak bağlayıcı maddeler, toz halinde, su ile reaksiyona giren, bir süre plastik davranış gösteren ve daha sonra katılaştıran malzemelerdir. Bağlayıcı malzemeler; hidrolik bağlayıcılar (havada ve suda katılaşabilen) ve hava bağlayıcılar (sadece havada katılaşabilen) olmak üzere ikiye ayrılır. Birinci gruba çimentoları, ikinci gruba ise sönmemiş kireci (CaO) örnek verebiliriz. Portland çimentosunun üretiminde iki ana hammadde kullanılır; kireçtaşı, marn gibi kalkerli malzemeler ve içerisinde önemli miktarda silis bulunan kil, seyl, sist, kum gibi malzemelerden oluşan killi malzemeler. Bu iki ana hammadde dışında çimento içerisinde ani prizi önlemek için % 3-6 arasında alçıtaşı ve doğal ya da yapay puzolanlar da (tras, tuf, uçucu kül, cüruf, vs) katılır (Şekil 3). Kalkerli malzemeler çimentonun yaklaşık $\frac{3}{4}$ 'nü geri kalanını da killi malzemeler oluşturur. Puzolanların kullanılması ile birlikte bu oranlar değişir (Neville, 1997).

Kalkerli ve killi hammaddeler uygun oranlarda bir arada öğütülür. Bu durumdaki hammaddeye Fransızca 'da un anlamına gelen farin denilir. Bu karışım kendi eksenine etrafında % 3 - 4 derece eğimle dönen fırınlarda 1350-1500 °C sıcaklıkta pişirilir. Hammadde, fırına su ile ıslatılarak çamur halinde ya da kuru olarak verilebilir. Kuru ya da ıslak süreç olarak adlandırılan bu üretim sistemlerinin birbirine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Döner fırında sıcaklık etkisiyle hammadde içerisindeki kalkerin ayrışması sonucu sönmemiş kireç

(CaO) ve kilin ayrışması sonucu da silisyum dioksit (SiO₂), alüminat (Al₂O₃) ve demiroksit (Fe₂O₃) meydana gelir. Fırın sonuna doğru sıcaklığın artması ile bu maddeler arasında meydana gelen reaksiyonlar sonucu klinker olarak adlandırılan ve yapısında çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran silikatlar ve alüminatlar bulunan bir malzeme meydana gelir. Döner fırından çıkan klinker soğutulduğunda henüz bağlayıcılık özelliği yoktur. Bu nedenle değirmenlerde öğütülerek toz haline getirilir. Öğütülme sırasında klinker içerisinde % 3 ile % 6 arasında alçıtaşı (CaSO₄. 2H₂O) eklenerek birlikte öğütülür. Alçıtaşı ilavesi çimentonun priz süresini düzenlemek amacıyla yapılır. Daha sonra tane boyutu 90 ile 6,5 mikron arasında değişen çimento elde edilir (Schneider, 2011).



Şekil 3. Çimento üretimi akış şeması

2. Materyal Ve Metot

2.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Çimento karışımlarının hazırlanmasında Portland çimentosu klinkeri, alçıtaşı (Sivas /Yıldızeli), traverten fabrikası atığı (Tokat/ Turhal), perlit (Nevşehir/Acıgöl), standart kum ve şebeke suyu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kum standart kumdur. Kimyasal madde olarak dilyum tetraborat (merck), lityum iyodür (merck), etilen glikol (merck), HCl (merck) Ca(OH)_2 ve CaCO_3 kullanılmıştır. Gerek kimyasal deney sonuçları gerekse mekanik dayanım, malzemenin ilgili standarda (TS 25) öngörülen sınırların üzerinde uygunluk gösterdiğini kanıtlamaktadır.

2.1.1 Portland çimentosu klinkeri

Çalışmalarda kullanılan Portland çimentosu klinkeri, Tokat Adoçim San. ve Tic. A.Ş. fabrikasından temin edilmiş olup XRF; (Atomika teknik panalytical axios modeli) metoduyla kimyasal analizi yapılarak deneylerde bu klinker kullanılmıştır. Kullanılan klinkerin yoğunluğu $3,17 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Klinker numunesinin kimyasal analiz sonucu tablo 2' de verilmiştir.

2.1.2 Alçıtaşı

Kullanılan alçıtaşı Adoçim Çimento San. ve Tic. A.Ş. Tokat fabrikasından temin edilmiş olup, kimyasal analizi yapılarak (XRF cihazı ile) kristal suyu miktarı belirlenmiştir. Alçıtaşı numunesinin kimyasal analiz sonucu tablo 3' de verilmiştir.

2.1.3 Doğal Perlit

Kullanılan doğal perlit malzemesi Nevşehir/Acıgöl'de bulunan perlit ocaklarından sağlanmıştır (Şekil 4). Deneylerde kullanılan doğal perlitin kimyasal ve fiziksel analizleri yapılarak özellikleri belirlenmiştir. Doğal perlit numunesinin kimyasal ve fiziksel analiz sonucu tablo 4' de verilmiştir.



Şekil 4. Perlit

2.1.4 Traverten Atığı

Kullanılan traverten atığı katkısı Tokat/Turhal traverten fabrikalarına ait ocakların atık sahalarından sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan traverten atığının kimyasal ve fiziksel analizleri yapılarak özellikleri belirlenmiştir. Traverten atığı numunesinin kimyasal ve fiziksel analiz sonucu tablo 5' de verilmiştir.

2.2. Çimentoların harç üretimi kür koşulları ve kodları

On altı farklı tipte harçlar ile çimento üretilmiştir ve kodlamalar yapılmıştır (Tablo 1). Harçlar TSE 24' e göre 4*4*16 cm lik kalıplarda 1 gün bekletilmiş ve 27 gün su içinde tutulmuştur. Harçlar oluştururken tüm harçlarda % 5 alçıtaşı kullanılmıştır.

Tablo 1. Katkılı çimentolar ve kodları

Çimento Kodları	Çimento				Traverten	
	Klinker	Alçıtaşı	Kalker	Puzolan	Atığı	Perlit
%	%	%	%	%	%	%
K1	85	5	5	5	0	0
K2	75	5	10	10	0	0
K3	65	5	15	15	0	0
K4	55	5	20	20	0	0
T1	85	5	0	5	5	0
T2	75	5	0	10	10	0
T3	65	5	0	15	15	0
T4	55	5	0	20	20	0
P1	85	5	0	0	5	5
P2	75	5	0	0	10	10
P3	65	5	0	0	15	15
P4	55	5	0	0	20	20
S1	90	5	0	0	0	5
S2	85	5	0	0	0	10
S3	80	5	0	0	0	15
S4	75	5	0	0	0	20

2.2. Yöntem

Puzolan olarak kullanılan malzemelerin özgül yüzeyleri (blaine), yoğunlukları, kimyasal bileşimleri ve mineralojik yapıları puzolanik aktivite üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çalışmada kullanılan tras ve perlitin puzolanik aktivitesine etki eden bu parametrelerin belirlenmesinde aşağıdaki yöntemler kullanılmıştır.

Tras ve perlit örneklerinin öncelikle fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Yoğunluklar TS EN 197-1, 2012' ye göre ve özgül yüzey (blaine) TS EN 196-6, 2010' a göre hesaplanmıştır. Tras ve perlitin kimyasal bileşimini belirlemek için X-Işını Kırınımı (XRF) analizi yapılmıştır. Tras ve perlitin puzolanik aktivitelerinin belirleme yöntemi, TS 25'e göre, kireç-puzolan

harçların basınç dayanımları ile belirlenen mekanik deney yöntemidir. Normal kıvam suyu ihtiyacı, priz süresi ve hacim sabitliği belirlemelerinde, farklı oranlarda (%20 ve %40) tras ve perlit içeren katkılı çimentoların ve Portland çimentosunun normal kıvam su ihtiyacı ve priz süreleri vikat cihazı ile, hacim genişmesi deneyleri ise Le Chatelier deney seti ile TS EN 196-3 (2017) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, deney serileri içinde öncelikle kendi aralarında daha sonra birbirleriyle olmak üzere karşılaştırılmıştır.

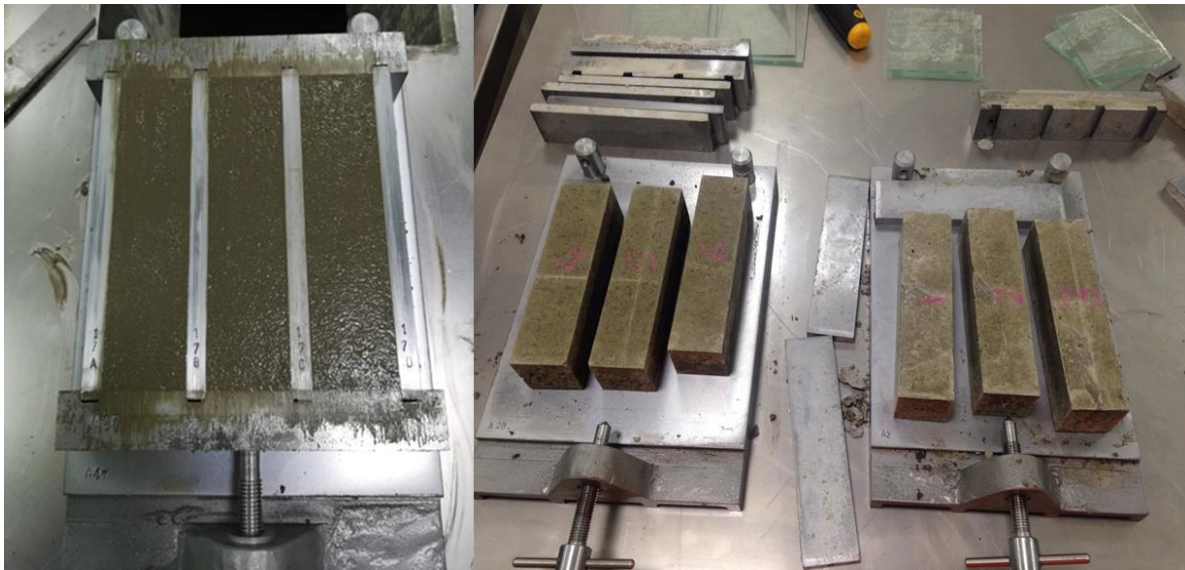
2.2.1. Puzolanik Aktivite Deneyleri Ve Numunelerin Hazırlanışı

Herhangi bir malzemenin puzolanik özelliğe sahip olduğunu anlamak için puzolanik aktivite deneyinin yapılması gerekmektedir. Puzolanik aktivite deneyleri mekanik olarak puzolan – çimento harçları üzerinde yapılan eğilme ve basınç dayanımı deneyleridir. Bu çalışmada TS 25'e göre yapılan aktivite deneyleri için kütlece % 75 Portland çimentosu + % 25 puzolanik malzeme kullanılarak farklı tipte çimento örnekleri hazırlanmış, örnekler üzerinde deneyler yapılarak puzolanların aktivitesi belirlenmiştir. TS 25'e göre hesaplanan malzeme miktarları ile puzolanlı harç numuneleri hazırlanmış ve harç numunelerine ait kalıpların üstü buharlaşmayı önleyecek şekilde temiz bir cam plaka ile kapatılmıştır. Puzolanlı harç numuneleri 24 saat (23±2)°C' lik oda sıcaklığında bekletildikten sonra numunelerin kalıpları sökülmeden (55±2) °C sıcaklıktaki bir etüv içerisinde 6 gün daha bekletilmiştir. Puzolanlı harç numuneleri etüvden çıkartılarak oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmış ve TS EN 196-1 (2016)'ya göre basınç dayanımı tayini deneyine tabi tutulmuştur (Bulut ve Tanaçan, 2011). Puzolanik aktivite, “aktivite indeksi” hesabı :

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = (A/B) \times 100 \quad (1)$$

A: Puzolanik harcın ortalama basınç dayanımı,

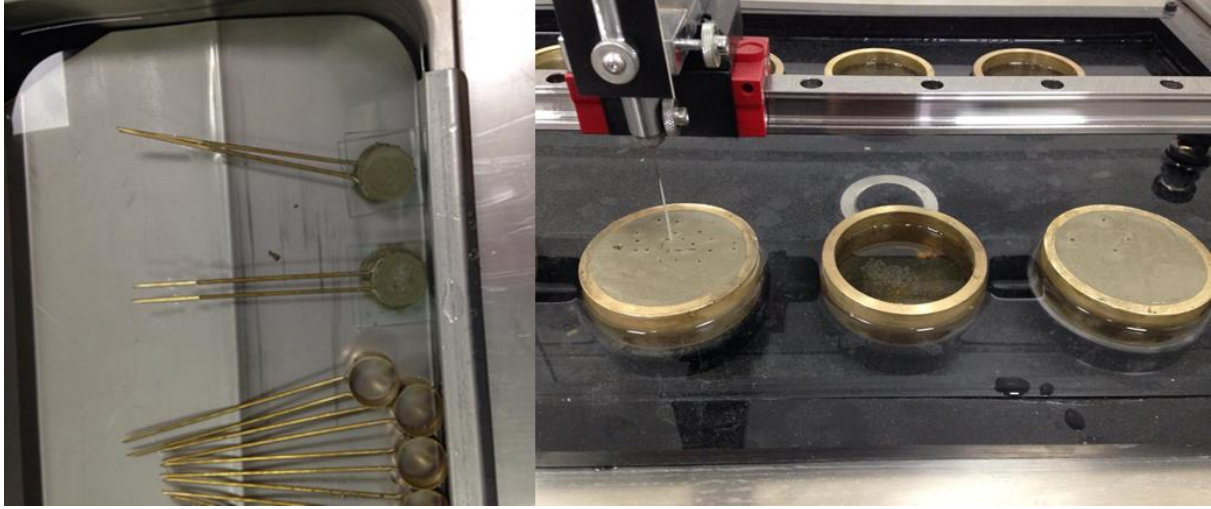
B: Kontrol harcın ortalama basınç dayanımı



Şekil 5. Harç numunelerinin hazırlanması

2.2.2. Çimento DeneYleri Ve Numunelerin Hazırlanışı

Tras ve perlitin farklı (%20 ve %40) oranlarda Portland çimentosu ile yer değiştirilerek elde edilen katkılı çimento numuneleri üzerinde normal kıvam suyu ihtiyacı, çimento harcı priz başlangıç ve bitiş süreleri ve hacim sabitliği deneYleri TS EN 196-3 (2017) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. Vicat aleti ve Le chateliere hacim genişleme tayini çalışmaları

2.2.3. X Işınları Floresans Spektrometresi Çalışma Prensibi, Örnek Hazırlanması Ve Analiz

Hazırlanan çimento numune türlerinin kimyasal bileşimini belirlemek için analitik bir teknik olan XRF yöntemi kullanılmıştır. Çalışma prensibi basitçe şu şekildedir; bir atomun iç yörüngesindeki elektronlar, X-ışınlarını üst bir enerji seviyesine çekerek bombardıman yoluyla uyarılırlar ama elektronun durumu kararsızdır. Bu kararsız durum daha fazla kalamayıp daha istikrarlı bir şekilde daha düşük yörüngelere gitmek isterler. Bu iniş esnasında her atom ikincil elektronlar spesifik karakteristik X ışını (floresan) yayarlar. Bu ışınlar analizör ile ayrılırlar. Ayrılan ışınlar ölçülerek elde edilen sonuçlar ile aynı anda ölçülen ışık miktarları nicel analizde kullanılan element miktarı ile orantılı şekildedir (Kaya, 2010).

Çimento klinkeri, tras ve alçı taşı eklenerek oluşturulan çimento numunelerinin kimyasal analizleri XRF metoduyla tespit edilmiştir. Tartılan 0,6 gram öğütölmüş numune, 0,03 gram lityum iyodür ve 4,6 gram dilityum tetraborat platin kroze içine yerleştirilmiştir. Bir spatula malzeme ile kroze içinde karıştırılarak homojen bir karışım haline getirilmiştir. Eritiş cihazı için hazırlanan kroze içerisindeki homojen malzeme tablet kalıba yerleştirilmiştir. Dört aşamalı çalışan eritiş cihazı ilk 10 dakika ısıtma, 5 dakika eritme, son 5 dakika soğutma ve boşaltma programlarında çalışır. Eritiş cihazında oluşturulan cam tabletler X-ışını floresans spektrometresinde, okutularak kimyasal içerik sonuçları bilgisayarda kayıt altına alınmıştır (TS EN 196-2, 2014).

2.2.4. Ham Maddelerin Kızdırma Kaybı Tayini:

Sabit tartıma getirilmiş krozeeye, rutubeti alınmış çimento numunesinden 0,0001 hassasiyetle 1,00 g (m_1) alınmıştır. $975^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki fırında 15 dakika kızdırılmıştır. Desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur ve tartılmıştır. Yeniden 5 dakika kızdırılarak oda sıcaklığına kadar soğutulup tekrar tartılmıştır. Bu işleme sabit tartıma (m_2) ulaşınca kadar devam edilmiştir (TS EN 196-2, 2014).

Hesaplama:

$$\text{Kızdırma kaybı} = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right] \times 1000 \quad (2)$$

m_1 : Deneysel numunesi kütlesi (g)

m_2 : Kızdırılmış deneysel numunesinin sabit tartıma geldikten sonraki kütlesi (g)

3. Bulgular

Ham maddelerin kimyasal içeriklerinin öğrenilmesi için XRF cihazında oksit oranları tespit edilmiştir. Ayrıca her bir ham madde için kızdırma kaybı analizi yapılarak sonuçları sırasıyla Tablo 2, 3, 4 ve 5’de verilmiştir (TS EN 196-2).

Tablo 2. Klinker numunesi kimyasal ve fiziksel analiz sonucu tablosu

İçerik	%	TS10156
SiO ₂	20,46	-
Al ₂ O ₃	4,92	-
Fe ₂ O ₃	3,68	-
CaO	65,94	-
MgO	1,26	< 5,0
Na ₂ O	0,38	< 3,50
K ₂ O	0,81	-
SO ₃	0,64	-
KK	0,28	-
Fiziksel Özellikler		
45µ elekte kalan	4,5	-
90 µm elekte kalan	1,1	<14,0
200 µm elekte kalan	0,1	< 1,0
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,18	-
Çimento Dayanımları		
2 günlük dayanım	24,6	
7 günlük dayanım	41,1	
28 günlük dayanım	48,5	

Tablo 3. Alçıtaşı numunesi kimyasal ve fiziksel analiz sonucu tablosu

İçerik	%
SiO ₂	0,81
Al ₂ O ₃	0,35
Fe ₂ O ₃	0,11
CaO	32,65
MgO	0,75
Na ₂ O	0,02
K ₂ O	0,05
SO ₃	42,54
KK	22,61
Blaine (cm ² /gr)	10225

Tablo 4. Traverten atığı numunesinin kimyasal ve fiziksel analiz sonucu tablosu

İçerik	%
SiO ₂	1,33
Al ₂ O ₃	0,38
Fe ₂ O ₃	0,22
CaO	55,17
MgO	0,29
Na ₂ O	0,02
K ₂ O	0,13
SO ₃	0,04
KK	42,42
Fiziksel Özellikler	
Blaine(cm ² /gr)	14620
Öğütme zamanı (dk)	42
45 µ elek üstü	12,7
90 µ elek üstü	0,2
200 µ elek üstü	0,1

Puzolanik katkıların (tras ve perlit) ve traverten atıklarının kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde içerdikleri MgO, Al₂O₃, SiO₂, CaO, Fe₂O₃, SO₃, K₂O gibi oksitlerin aynı zamanda çimentonun ve çimento üretiminde kullanılan diğer katkı maddelerinin de bileşimini oluşturduğu gözlenmektedir. Bu bileşenlerin Portland Çimentosuna ilave edildiğinde değerlerinin arttığı ancak sınır değerleri aşmadığı görülmüştür. Aynı şekilde klinker ve alçıtaşı kimyasal analiz sonuçlarının da verilen standartlara uygun olduğu saptanmıştır.

Tablo 5. Doğal perlit numunesi kimyasal ve fiziksel analiz sonucu tablosu

İçerik	%	TS 10156
SiO ₂	54,22	-
Al ₂ O ₃	19,32	-
Fe ₂ O ₃	8,13	-
CaO	7,33	-
MgO	2,61	< 5,0
Na ₂ O	0,42	< 3,50
K ₂ O	1,57	-
SO ₃	0,36	-
KK	4,96	-
Fiziksel Özellikler		
S+A+F	81,67	-
Puzolanik Aktivite (N/mm ²)	6,4	<14,0
Rutubet	1,3	< 1,0
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,19	-

Tablo 6. Çimento örneklerinin fiziksel özellikleri

Çimento Kodları	İncelik %			Özgül Yüzey (cm ² /gr)
	45 µelek üstü	90 µ elek üstü	200 µ elek üstü	
K1	4,4	0,2	0,1	3495
K2	4,7	0,4	0,1	3874
K3	6,1	0,5	0,1	4176
K4	7,6	0,6	0,1	4553
T1	4,6	0,3	0,1	3396
T2	5,1	0,5	0,1	3776
T3	7,2	0,6	0,1	4150
T4	8,2	0,6	0,1	4504
P1	5,6	0,4	0,1	3358
P2	6,3	0,5	0,1	3544
P3	8,6	0,7	0,1	4176
P4	9,1	0,8	0,1	4573
S1	4,2	0,5	0,1	3388
S2	5,8	0,6	0,1	3685
S3	6,8	0,7	0,1	4167
S4	8,4	0,8	0,1	4797

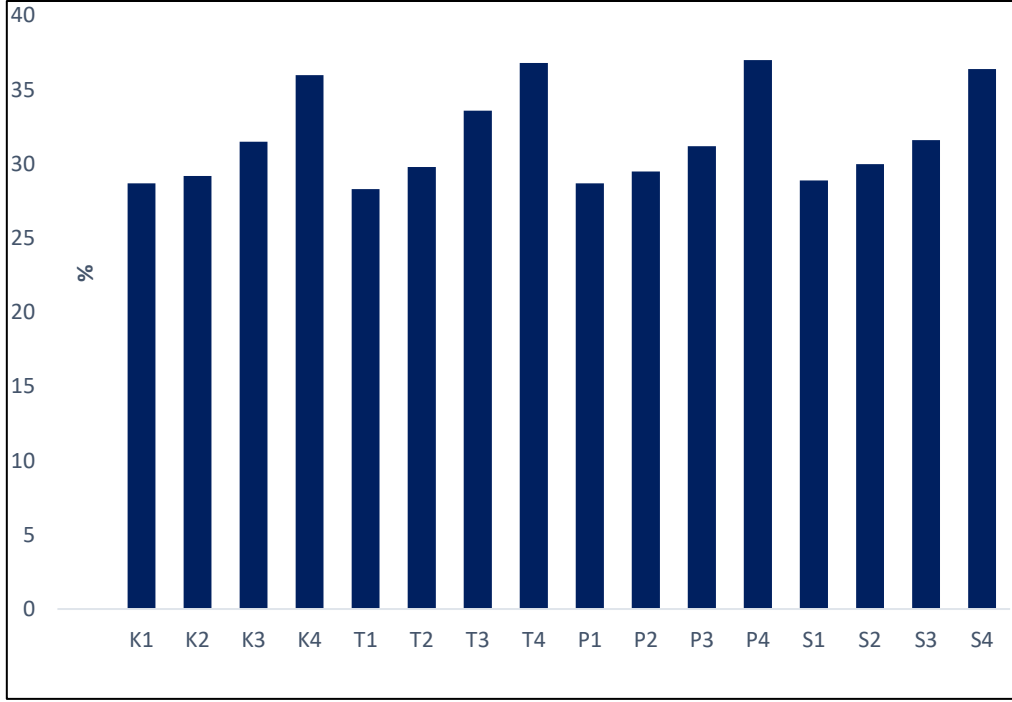
Çimento taneleri ne kadar küçükse incelik o kadar fazladır. Çimentolar çapı 90 mikron olan eleklerden elendiğinde elek üstünde kalan miktarın %14 den fazla olmaması istenir. Hazırlanan çimentoların özgül ağırlık ve elek analizi sonuçları da Türk standartlarına

uygunluk göstermektedir. Hidratasyon olayı sonunda, yüksek dayanımlar elde edilmesi çimento tanelerinin aktif olmalarına bağlıdır. Aktiflik çimentonun ince öğütülmesiyle gerçekleşir. Çimento ne kadar ince olursa o kadar çok su ihtiyacı olacaktır. Taneler incelidikçe daha büyük ısı açığa çıkacaktır. İnceliğin artması üretim maliyetlerini artırır, çimento özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Fakat betonun dayanımını artırır. Çimento inceliği arttıkça erken yaşta mukavemet artar. Su kasma olayı azalır fakat, rötrenin ve çatlamların artmasına neden olur. Ortam neminden çok etkilenir ve kolay bozulur. Priz süresi kısılacağından bunu önlemek için alçıtaşı miktarı artırılması gerekir.

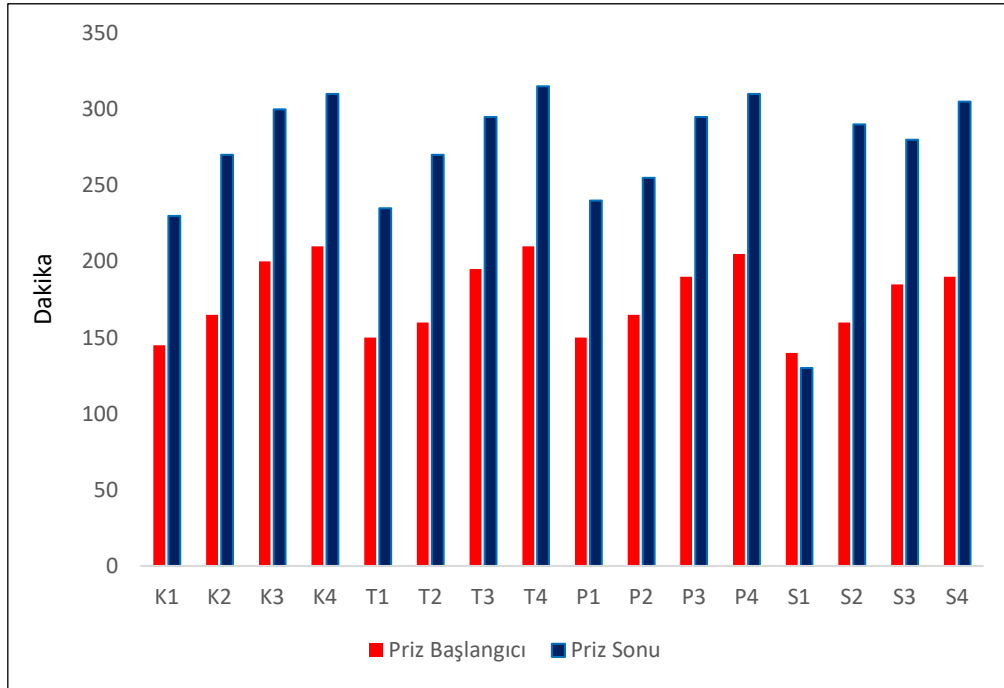
Tablo 7. Katkılı çimentolar priz süreleri tablosu

Çimento Kodları	Normal Kıvam Suyu (%)	Priz Süresi (dk)	
		Priz Başlangıcı	Priz Sonu
K1	28,5	150	230
K2	29,5	165	235
K3	31	175	260
K4	31,5	190	270
T1	32,75	202,5	285
T2	33,8	215,5	299,5
T3	34,8	228,5	314
T4	35,9	241,5	328,5
P1	36,9	254,5	343
P2	38	267,5	357,5
P3	39,5	280,5	372
P4	40,1	293,5	386,5
S1	41,1	306,5	401
S2	42,2	319,5	415,5
S3	43,2	332,5	430
S4	44,3	345,5	444,5

Çimentonun prizi su ile reaksiyona girmesi sonucu başlayan katılaşma olayıdır. Standartlara göre priz başlangıcı, 1 saatten az ve 10 saatten çok olmamalıdır. Daha erken veya geç priz alması istenirse katkı maddeleri kullanılabilir. Çimento sıcaklığı artarsa priz hızlanır. Sıcaklık düşerse priz süresi uzar, fazla su kullanma priz süresinin uzamasına sebep olur.

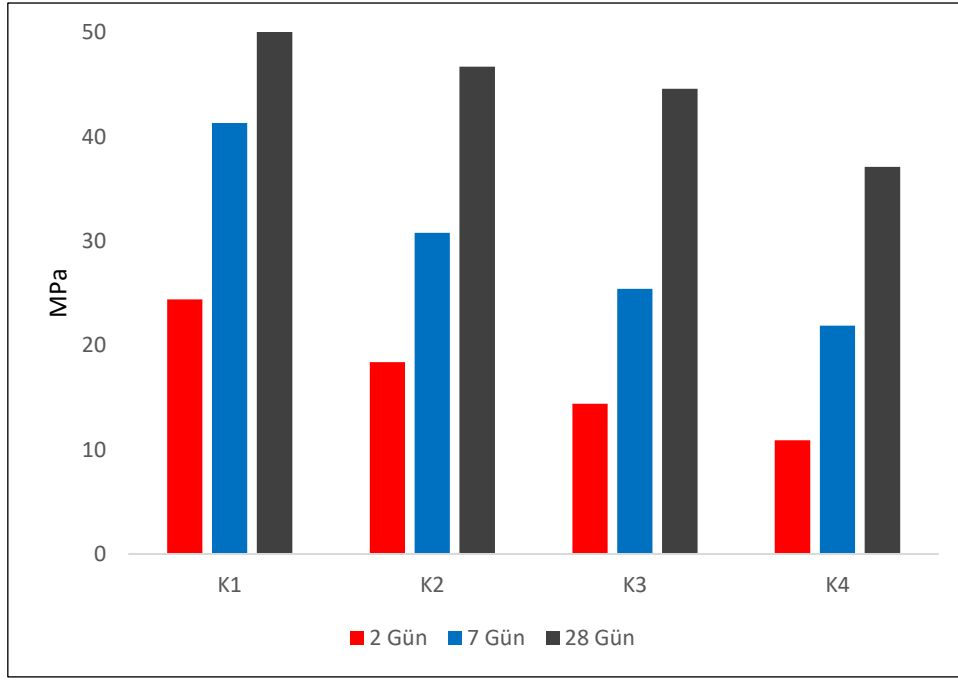


Şekil 7. Çimento örneklerinin su emme özellikleri

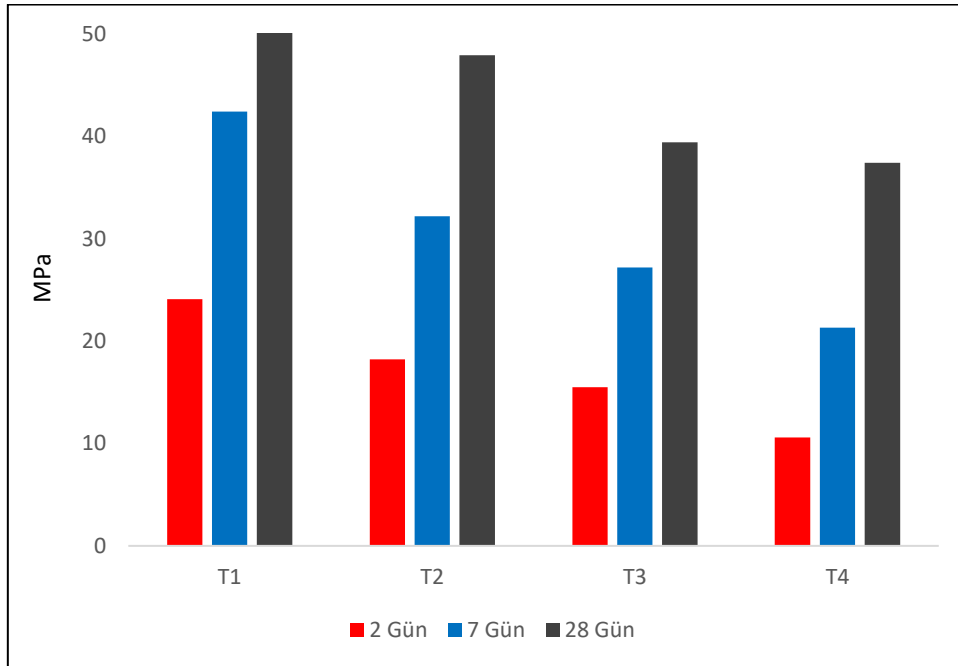


Şekil 8. Çimento örneklerinin priz süreleri eğrisi

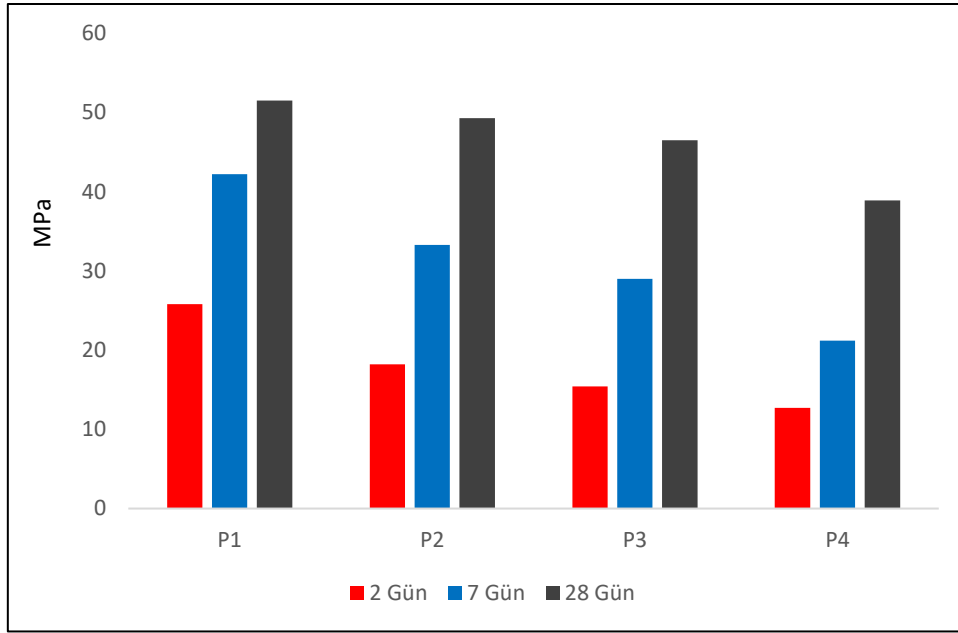
Portland Çimentosu klinkeri ile birlikte öğütülen atıkların katkı oranına paralel olarak özgül yüzeyleri) ve portland çimentosuna nazaran ihtiyaç gösterdikleri su miktarı artmıştır. Artan su miktarına bağlı olarak da çimento karışımlarının priz süreleri gecikmiştir. Fakat bütün bu artış ve gecikmeler standartlarda verilen sınır değerler arasındadır.



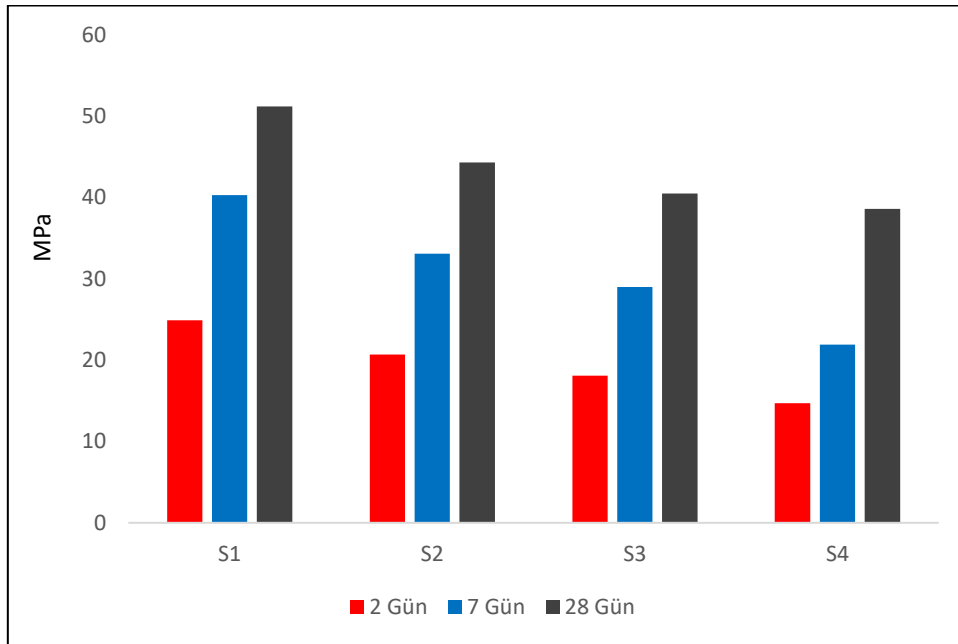
Şekil 9. K Tip çimento örneklerinin basınç dayanım eğrisi



Şekil 10. T Tip çimento örneklerinin basınç dayanım eğrisi



Şekil 11. P Tip çimento örneklerinin basınç dayanım eğrisi



Şekil 12. S Tip çimento örneklerinin basınç dayanım eğrisi

Katkılı numunelerin basınç dayanımı değerlerinin birbirine yakın olması ve katkı miktarının artması ile dayanım değerlerindeki fark daha belirgin hale gelmiştir. Perlitin puzolanik reaksiyonu yüksek miktarda silis (SiO_2) bileşeni ile çimentonun hidrasyonu sonucunda oluşan kirecin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve suyun arasında gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar sonucunda C-S-H jeli benzeri ürünler ortaya çıkar, bu jelleşme sürekli devam eder, çimento harcı mikro homojenlik kazanarak boşlukları azalır ve ileriki yaşlardaki dayanımı artar. Bu etki literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde görülebilmektedir

Traverten atığı katkılı çimento (T Tipi) karışımlarının mukavemet sonuçlarına bakıldığında traverten katkı oranı arttıkça dayanımın arttığı görülmüştür. Eğer gerekli miktar ayarlamaları yapılırsa traverten atığı katkısının katkılı çimentolarda etkin olabileceği görülmektedir. Ayrıca bu atıklar kullanıldığında çevreye verdikleri zararlar önlenecek ve ekonomimize yeniden kazandırılmış olacaktır.

Çimento harçlarının basınç dayanımı gelişimleri incelendiğinde, traverten atığı ve perlit ikame oranı %10'un üzerindeki tüm karışımlarda, dayanımların artarak azaldığı görülmektedir. Bu durum doğal puzolan olarak adlandırılan bu katkıların çimento harçlarının ilk günlerdeki dayanımını azaltması ve ileriki yaşlarda arttırması ile açıklanabilir. Kalker ikame oranı %5 olan örneklerde, erken dayanımda kontrol harcına kıyasla bir miktar dayanım artışı söz konusudur. Bu dayanım artışı kalker taneciklerinin kalsiyum hidroksit çökmesi için çekirdek oluşturarak hidrasyon gelişimini etkilemesine bağlanabilir.

4. Sonuç

Traverten atıklarının ve perlitin kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde içerdikleri MgO, Al₂O₃, SiO₂, CaO, Fe₂O₃, SO₃, K₂O gibi oksitlerin aynı zamanda çimentonun ve çimento üretiminde kullanılan diğer katkı maddelerinin de bileşimini oluşturduğu gözlenmektedir. Bu bileşenlerin Portland Çimentosuna ilave edildiğinde değerlerinin arttığı ancak sınır değerleri aşmadığı görülmüştür. Aynı şekilde klinker ve alçıtaşı kimyasal analiz sonuçlarının da verilen standartlara uygun olduğu saptanmıştır.

Portland Çimentosu klinkeri ile birlikte öğütülen perlitin ve traverten atıklarının katkı oranına paralel olarak (özellik yüzeyleri) ve portland çimentosuna nazaran ihtiyaç gösterdikleri su miktarı artmıştır. Artan su miktarına bağlı olarak da çimento karışımlarının priz süreleri gecikmiştir. Fakat bütün bu artış ve gecikmeler standartlarda verilen sınır değerler arasındadır. Hazırlanan çimentoların özgül ağırlık ve elek analizi sonuçları da Türk standartlarına uygunluk göstermektedir. Traverten atığı katkılı çimento ve doğal perlit katkılı çimento karışımlarının mukavemet sonuçlarına bakıldığında traverten atığı katkı oranı ve perlit katkı oranı arttıkça dayanımın azaldığı görülmüştür. Eğer gerekli miktar % 20 traverten atığı ve % 20 perlit hammadde katkılı çimento ayarlamaları yapılırsa traverten atığı katkısının ve doğal perlit katkısının katkılı çimentolarda etkin olabileceği görülebilir. Ayrıca traverten atıkları kullanıldığında çevreye verdikleri zararlar önlenecek ve ekonomimize yeniden kazandırılmış olacaktır. Mukavemet sonuçları öğütme süresi açısından değerlendirildiğinde normal Portland Çimentosu klinkerine göre daha kolay öğütüldüğünden öğütme süresi ve enerji tüketimi açısından tasarruf sağlayacağı açıktır.

Kaynaklar

Aruntaş, H. Y., 2006, Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193-203.

Bulut, Ülger ve Leyla Tanaçan, 2011, Perlitin Puzolanik Aktivitesi, *İTÜ Dergisi/A* 8.1.

Bulgu, M., 2003. Perlitin Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliği, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., and Jullien, A., 2010, Environmental impact of cement production, detail of the different processes and cement plant variability evaluation, *Journal of Cleaner Production*, 18(5), 478-485.

Çobanoğlu, İ., Çelik, S. B., Çam, O., Etiz, H., & Kurşun, M., 2014, Denizli bölgesi traverten artıklarının beton agregası olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 92-99.

Erkek, D., ve Özdemir, S., 2011, Mermer ve Traverten Sektörüne Küresel ve Bölgesel Yaklaşım, *Güney Ege Kalkınma Ajansı (GEKA)*.

Heikal, M., H. El-Didamony, and M. S. Morsy, 2000, Limestone-filled pozzolanic cement, *Cement and Concrete Research*, 30, 1827-1834.

Mesci, B. L., 2013, Özgün Niteliklere Sahip Travertenler ve Önemleri, Sivas Yöresi Travertenlerinden Örnekleri, *Geological Bulletin of Turkey*, 56(1).

MTA, 1985. Türkiye Perlit Envanteri, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, 193, 1-8, Ankara.

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., and Bolio, H., 2011, Sustainable cement production present and future, *Cement and concrete research*, 41(7), 642-650.

Neville, A. M., 1997, *Properties of Concrete*, Pitman Publishing, London.

Yazıcıoğlu, Ö. F., 2016, *Çimento ve Beton Endüstrisinin Sürdürülebilir Üretimlerinde Doğal Zeolit (Analsim)'in Puzolanik Katkı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*, Yüksek lisans tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yu, L.H., H. Ou, and Lee, L.L., 2003, Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 73-76.