

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ**

PROJE NO: 2015/24

**GERİDÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON
AGREGALARI, TABAN KÜLÜ VE
PERLİT KULLANILARAK İÇ
KÜRLEME METODU YARDIMI İLE
DUVAR MALZEMESİ ÜRETİMİ**

Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM

**KOCAELİ
2018**

İçindekiler

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
3.1. Kullanılan Malzemeler	8
3.1.1. Perlit.....	8
3.1.2. Taban külü.....	8
3.1.3. Geri dönüştürülmüş agrega	9
Yapılan bu çalışmada numune dökümünde önceden farklı çalışmalarda dökülmüş beton numuneleri kırılarak agrega haline getirilmiş ve tez çalışmasında kullanılmıştır. Agreganın özgül ağırlığı 2.5 gr/cm^3 olarak bulunmuştur. Aşağıda agreganın granülometrisi verilmiştir (Tablo 3.3).	9
3.1.4. Çimento	9
3.2. Taguchi Metodu	10
3.3. Varyans Analizi.....	10
H_0 : Ortalamalar arasında fark yoktur (faktörlerin etkisi yoktur). H_1 : En az iki ortalama arasında anlamlı bir farklılık vardır (faktörlerin etkisi vardır).	11
Tek yönlü varyans analizinde uygulama ve hataların kareleri toplamı hesaplanır ve ardından varyansları bulunur. F değeri de bulunan varyanslar aracılığıyla hesaplanır. Bu formüller (4.2, 4.3, 4.4) ile Tablo 3.5'deki tek yönlü varyans analizi tablosu hazırlanır. Aşağıda gerekli formüller verilmiştir (URL-2);	11
Uygulama kareler toplamı ve varyansı;.....	11
Hata kareler toplamı ve varyansı;.....	11
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER.....	12
4.1. Kompozit Malzeme Yapımı	12
4.2. Eğilme Dayanımı	14
4.3. Basınç dayanımı	16
4.4. Kuru Birim Ağırlık ve Su Emme	19
4.5. Kılcal Su Emme	22
4.6. Isı Yalıtımı	24
4.7. Deneysel Tasarım Analiz Sonuçları.....	26
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	28
TEŞEKKÜR.....	29
KAYNAKLAR.....	29

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 4.1: Hazırlanmış örnek numuneler	13
Şekil 4.2: Eğilme dayanımı bulunmak istenen 40x40x160 mm'lik	14
Şekil 4.3: Harç numunelerinin eğilme dayanımlarının grafiği	15
Şekil 4.4: Basınç dayanımı bulunmak istenen 40x40x160 mm lik bir numune örneğinin eğilme deneyiyle kırılmış parçasının cihaza yerleşimi	16
Şekil 4.5: Harç numunelerinin basınç dayanımlarının grafiği.....	17
Şekil 4.6: Harç numunelerinin basınç kaybı yüzdelerinin grafiği.....	18
Şekil 4.7: Harç numunelerinin kuru birim ağırlıklarının grafiği	19
Şekil 4.8: Harç numunelerinin ağırlık kaybı yüzdelerinin grafiği	20
Şekil 4.9: Harç numunelerinin ağırlıkça yüzde su emme değerlerinin grafiği	21
Şekil 4.10: Harç numunelerinin ağırlıkça yüzde kılcal su emme değerlerinin grafiği	23
Şekil 4.11: Hotbox metodu ile çalışan ısı yalıtım cihazı	24
Şekil 4.12: Harç numunelerinin ısıl iletkenlik katsayısı grafiği	25
Şekil 4.13: Her faktörün her seviyesi için ortalama S/G değeri ve her faktörün aralık değeri	26
Şekil 4.14: Her faktörün her seviyesi için ortalama S/G değeri ve her faktörün aralık değeri	27

TABLÖLAR LİSTESİ

<u>Tablo 3.1: Perlitin kimyasal ve fiziksel özellikleri</u>	8
<u>Tablo 3.2: Taban külünün kimyasal özellikleri</u>	8
<u>Tablo 3.3: Kırılarak geridönüştürülmüş olan agreganın granülometrisi</u>	9
<u>Tablo 3.4: Kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri</u>	9
<u>Tablo 3.5: Tek yönlü varyans analizi tablosu</u>	11
<u>Tablo 4.1: Taguchi deneyindeki parametre ve seviyeler</u>	12
<u>Tablo 4.2: L'16 deney deseni</u>	13
<u>Tablo 4.3: Eğilme dayanımı için Varyans (Anova) analizi sonuçları</u>	15
<u>Tablo 4.4: Basıncı dayanımı için Varyans (Anova) analizi sonuçları</u>	17
<u>Tablo 4.5: Basıncı kaybı için Varyans (Anova) analizi sonuçları</u>	18
<u>Tablo 4.6: Kuru birim ağırlık için Varyans (Anova) analizi sonuçları</u>	20
<u>Tablo 4.7: Ağırlık kaybı için Varyans (Anova) analizi sonuçları</u>	21
<u>Tablo 4.8: Su emme için Varyans (Anova) analizi sonuçları</u>	22
<u>Tablo 4.9: Kılcal Su Emme için Varyans (Anova) analizi sonuçları</u>	23
<u>Tablo 4.10: Kılcal Su Emme için Varyans (Anova) analizi sonuçları</u>	25

ÖZET

GERİDÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARI, TABAN KÜLÜ VE PERLİT KULLANILARAK İÇ KÜRLEME METODU YARDIMI İLE DUVAR MALZEMESİ ÜRETİMİ

Geri dönüştürülmüş ürünlerin önemi ve kullanımı Dünya’da ve ülkemizde giderek artmaktadır. Bu ürünlerin ülkemizde özellikle çok büyük çalışmalar yapılan inşaat sektöründe kullanımının yaygınlaşması çevresel ve ekonomik anlamda önemi büyüktür. Giderek artan atık ürünler çevre açısından büyük tehdit oluşturmakta, depolama alanlarına ihtiyaç duyulmakta, yok edilmesi zorlaşmakta ve bu sebeple firma ve ülke ekonomisine zarar vermektedir.

İnşaat Sektöründe en çok kullanılan malzemeler harçlardır. Harçlardan faydalanılarak hem beton, hem sıva, hem de duvar malzemelerinin üretimi mümkündür. Sıva ve duvar malzemelerinde betondan farklı olarak hafiflik ve yalıtım özelliği aranmaktadır. Ayrıca giderek artan öneme sahip yanmazlık da yeni tip yapı malzemelerinde aranan bir özelliktir.

Çalışmada geridönüşüm yanında, doğal kaynakların kullanımına da önem verilmiş, geridönüştürülmüş beton agregası ve taban külü gibi atık ürünlerinin yanında perlit gibi bir doğal agregadan da faydalanılmıştır. Bu malzemelerin tümü çok su emen malzemeler olması dolayısı ile iç kürlenme metodundan faydalanılmıştır. Ayrıca yanmazlığı yüksek olan bu agrega ürünlerinin yanında bağlayıcı olarak kalsiyum alüminatlı çimentodan faydalanılarak oluşturulan kompozitin yanmazlık özelliği geliştirilmiştir. Taguchi Metodu’ndan faydalanılarak oluşturulan deney desenine uygun değişik tipte deney dökümleri yapılmış; fiziksel ve mekanik deneyler olan eğilme ve basınç dayanımı, kuru birim ağırlık, su emme, kılcal su emme, sıcaklık dayanıklılığı, ısı yalıtımı testleri tamamlanmış ve maliyet hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Harç, geri dönüştürülmüş agrega, perlit, taban külü, kalsiyum alüminat çimentosu, fiziksel ve mekanik testler, Taguchi Metodu.

ABSTRACT

PRODUCTION OF WALL MATERIAL WITH RECYCLED CONCRETE AGGREGATES, BOTTOM ASH AND PERLITE USING INTERNAL CURING

The importance and use of recycled products is increasing in the world and in our country. The widespread use of these products especially in the construction sector, which is a very big task in our country, is an important environmental and economic aspect. Increasingly, waste products constitute major threats to the environment, there is a need to landfills, disposal difficult and therefore harm the company and the national economy.

Mortars are the most used materials in the construction sector. It is possible to produce concrete, plaster mortar and wall materials by making use of the mortar. Lightness and insulation properties are demanded in plaster and wall materials different from concrete. In addition, non-flammability, which has an increasingly preliminary importance, is a desirable feature in new type building materials.

In addition to recycling in work, the use of natural resources has also been emphasized. In addition to waste products such as recycled concrete aggregate and bottom ash have been utilized from natural aggregates such as perlite. Because all of these materials are highly water-absorbing materials, internal curing method was benefited. Beside these aggregate products, which are highly inflammable, the non-flammability properties of the composite are improved by using calcium aluminate cement as a binder. Various types of experimental castings were made according to the test pattern created by using Taguchi Method. Physical and mechanical tests such as bending and compressive strength, dry unit weight, water absorption, capillary water absorption, temperature stability, thermal insulation tests have been completed and the cost has been calculated.

Keywords: Mortar, recycled aggregate, perlite, bottom ash, calcium aluminate cement, physical and mechanical tests, Taguchi Method.

1.GİRİŞ

Kaynakların sınırlı olduğu, tüketimin hızla arttığı dünyamızda son yıllarda üzerinde en çok durulan konulardan birisi geri dönüşümdür. Birçok atık malzeme için geri dönüşüm yapılmakta, atıklar ham madde gibi kullanılarak yeni bir malzeme üretiminde kullanılmakta ve bu işleme "geri dönüşüm" denilmektedir [1]. Gelişen teknikler ve teknoloji ile birlikte yapılarda kullanılan malzemelerin uygulama amaçlarına hizmet etmesi istenmektedir. Geleneksel sıva ve harç yapımı günümüzde istenilen özelliklere cevap verememektedir. Yeni malzemelerin özellikle doğal ve/veya atık olanlarının daha çok kullanılarak sektöre kazandırılması niteliği arttıracaktır. Taban külü, perlit ve benzeri atıklar yapı malzemelerinin özelliklerinin iyileştirilmesinde, tasarrufun sağlanmasında, atık maddelerin doğaya zarar vermeden en verimli şekilde kullanılmasında büyük avantajlar sağlamaktadır [2].

Avrupa Birliği ülkelerinde yapı elemanlarının üretiminde toprak, su, mineral ve enerji gibi doğal kaynakların kullanımı azaltılmış ve buna bağlı olarak doğal ortamların korunması, biyolojik çeşitliliğin korunması, toksik yayınının ve arazi kullanımının azaltılması, sürdürülebilirlik ve çevreye saygılı yaklaşım çerçevesinde büyük önem kazanmıştır [3,4]. Kaynak israfını önleme ve hayat standartlarını yükseltme çabaları ile beraber gelişmiş ülkeler atıkların geri kazanılması ve tekrar kullanılması için yöntemler araştırmış ve geliştirmişlerdir. Ne yazık ki ülkemizde diğer gelişmiş ülkelere nazaran inşaat endüstrisinde geri dönüşüm miktarı çok azdır. Diğer ülkelerde ise asfalt, beton, agrega, ahşap vb yapı malzemeleri geri kazanılarak yeniden hammaddeye dönüştürülmekte ve hem ekonomiye hem de çevreye olan zararlı etkileri en aza indirilmektedir[1].

Beton inşaat sektöründe en çok kullanılan malzemedir. Avrupa hazır beton sektörü, 12.000'i aşkın faal tesiste yılda yaklaşık 300 milyon metreküp beton üretmektedir. Yıllık hazır beton tüketimi 0.3 - 1.40 metreküp/kişi seviyesindedir. Üretilen yaklaşık 720 milyon ton malzeme çevre açısından önemli sonuçlar doğurabilmektedir. Eski beton kırılarak agrega haline getirilebilir, dolgu ve zemin altı malzemesi başta olmak üzere birçok yerde tekrar kullanılabilir. Beton güçlü bir malzeme olması dolayısı ile geri dönüşüm sonucu iyi bir malzeme elde edilebilir. Amerika Birleşik Devletlerinde her yıl 200 mil beton yol kaplamasının geri dönüşümü yapılmakta ve 44 eyalette geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılmaktadır [1].

Ülkemizde özellikle depremlerde ya da kentsel dönüşümle yıkılan binalardan büyük miktarda çıkan beton atıkları, döküldükleri yerlerde büyük bir alan kaybı ve çevre sorununa yol açmaktadır [5]. Agrega, betonun %55-%80'ini oluşturur. Eğer alternatif agrega kaynakları bulunmazsa, beton endüstrisi dünyada her yıl giderek artan milyarlarca ton doğal agrega tüketecektir [6]. Dolayısıyla ham maddelerin azalması, artan nakliye ücretleri ve çevresel etkiler geri dönüşüm agregalarını kullanmayı gerekli hale getirmiştir [7].

Termik santraller bir diğer önemli miktarda atık agrega elde edilebilecek yerlerdir. Pulverize kömürün yanması sonucunda bir kısım ince malzeme bacada toplanır ve uçucu kül olarak isimlendirilir. Bir kısmı da fırın tabanına düşer ve uçucu küle nazaran daha iri yapılıdır. Bu malzemeler de taban külü olarak isimlendirilmektedir. Termik santrallerin toplam atıklarının %75-%80 uçucu kül olurken, geri kalan %25-%20'lik kısmı taban külüdür [8]. Uçucu kül birçok alanda kullanılırken taban külü mevcut iri daha az fayda veren yapısı nedeniyle kullanılmamaktadır. Türkiye'de termik santral taban külleri yıllardır kül dağları ve barajlarında depolanmaktadır. Depolama alanlarında biriken taban külleri; tarım alanlarına, su

kaynaklarına ve doğal çevreye ciddi zararlar vermektedir. Ancak karışımli harçların üzerine yapılan deneyler sonucunda taban külünün insan ve çevre sağlığı açısından zararlı olmadığı sonucuna varılmıştır[2].

Taban külleri, agrega, yol yapımı, yapı temeli, gürültü bariyeri, sanat malzemesi, yalıtım malzemeleri, dolgu malzemesi gibi pek çok alanda kullanılabilmektedir [9-11].

Taban küllerinin bazı tipleri küresel olup, silisli ve alüminli olan bileşimleri nedeniyle puzolanik aktiviteleri yüksektir. Küresel olmayan tipleri ise kömürden gelen yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller (kuvartz ve feldispatlar) ve gözenekli yapılardan (kil kalıntıları, yanmamış karbon) oluşmaktadır [11-21].

Geridönüştürülmüş malzemelerin yanında ülkemize has doğal malzemelerin kullanımının yaygınlaşması da büyük öneme sahiptir. Dünyadaki 7,7 milyar ton perlit rezervinin 5,7 milyar tonluk kısmı ülkemizdedir. Dünyada üretilen 1,8 milyon ton perlitin %60'ı sıva ve beton agregası olarak, %23'ü filtre malzemesi, %8'i yalıtım malzemesi imalinde, %4'ü ise tarım sektöründe kullanılmaktadır [22]. Dünya'da büyük oranda inşaat sektöründe kullanılan perlit ülkemizde daha çok tarımda kullanılan bir ürün olarak tanınmakta ve sektörel anlamda daha çok kullanımı gerekmektedir.

%75'lere varan oranda silis içeren perlit 750 ile 1200°C arası sıcaklıklarda patlatılarak genişletilmektedir. Perlitin hacmi 4-30 kat artarken, yoğunluğu da içine giren hava boşlukları nedeniyle büyük ölçüde düşer. Genleşmiş perlitin yoğunluğu 30-190 kg/m³ arasında değişmektedir ve gözenekli ve hafif yapısı sayesinde ısı iletkenlik katsayısı da 0.039-0.046 W/mK değerlerine düşmektedir [23-31]. Bu sayede ideal bir ısı yalıtımı malzemesine dönüşmektedir. Sahip olduğu bu özellikler ile inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmaktadır[25-27]. Perlit 5-70 kg/cm² gibi düşük bir basınç mukavemetine sahiptir. Bu yüzden tek başına taşıyıcı beton agregası olarak kullanılamamaktadır [32].

Çimentoda yüksek performans; genellikle yüksek mukavemetle ilişkilendirilir. Fakat beton ve harçlarda dayanıklılık, yapı güvenliğinin sürdürülebilirliği açısından gün geçtikçe daha fazla önemsenmeye başlanmıştır. Ayrıca çimento; kullanım alanı bakımından da bilinenden çok daha geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Kalsiyum alüminat çimentoları hammadde sürecinden üretim sürecine portland çimentolarından farklılık göstermektedir. Söz konusu farklılıkların sonucu olarak kalsiyum alüminat çimentoları; nihai dayanım, dayanım kazanma ve dayanıklılık parametrelerinde portland çimentolardan daha üstün sonuçlar verir ve bu nedenle özel çimentolardır. [33]. Kireçtaşı ile boksitin birlikte eriyinceye kadar ısıtılmasıyla Kalsiyum Alüminat Çimentosu elde edilmektedir. Acele yol tamirlerinde ve soğuk iklimlerde çabuk sertleştiği için tercih edilen bir çimento türüdür[34]. Alumina (Al₂O₃) miktarı % 40-80 olan alüminatlı çimento, alüminanın yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olmasından dolayı, özellikle refrakter uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır [35].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Lanzo'n ve Garcı'a-Ruiz (2008) [36], genleştirilmiş perlitin çimento harçlarındaki etkileri üzerine bir çalışma yapmışlardır Genleştirilmiş perlit normalden daha fazla su-çimento oranının çıkmasına neden olmuştur. Deneylerin sonucunda perlitin işlenebilme süresi ve su tutuculuk açısından olumlu, su emme, kılcal geçirimsizlik ve mekanik dayanımları açısından ise olumsuz etkisinin olduğu bulunmuştur.

Yılmazer ve Özdeniz (2005) [37] çalışmalarında; genleştirilmiş perlitli plakaların ses emmeleri üzerinde nem içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Bu plakalar ses yutmada kullanılmıştır ve bu çalışma için seçilen akustik parametre ses yutma katsayısı olmuştur. Yapılan deneyler sonucunda; plakaların ses yutma katsayılarının nem ile düştüğü ve kuru durumda %50 nem içeriği ile ciddi bir farkın olmadığı gösterilmiştir. Deneylerde farklı karışımlar da hazırlanarak deneylere tabi tutulmuştur ve bunun sonucunda sodyum silikatlı genleştirilmiş perlit parçacıkların nem direncini yükselttiği ve karışımlara mineral lif eklemenin plakaların dayanımlarını ve ses yutma katsayılarını artırdığı görülmüştür.

Sağöz (2007) [38], “Farklı Kür Şartlarının Doğal Perlit Agregalı Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi” adlı çalışmasında agrega olarak doğal perlit kullanılarak 350 kg/m³ ve 450 kg/m³ dozajda elde edilen betonların hava, su ve atmosferik buhar kürü şartlarında mekanik özellikleri araştırılmıştır. Su ve hava kürü numuneleri 7, 14 ve 28 günlük süreleri, buhar kürü numuneleri ise 65°C, 75°C ve 85°C ve aynı zamanda 6 saat, 12 saat ve 24 saatlik kür süreleri için incelenmiştir ve numunelere basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı deneyleri uygulanmıştır. Sonucunda ise doğal perlit agregası belirtilen dozajlar kullanılarak normal dayanımlı betonlar elde edilmiştir ve doğal perlit agregalı betonlarda hava ve su kürü için süre arttıkça basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerlerinin arttığı ve buhar kürü numunelerinin ise hem sıcaklık artışlarında hem de kür süresi uzadığında basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Demirboğa ve Gül (2003a) [39], hafif betonun ısı iletkenliği üzerinde uçucu kül, silis dumanı ve genleştirilmiş perlit agregasının etkilerini inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çimento miktarı %10, %20 ve %30 oranlarında silis dumanı ve uçucu kül ile değiştirilerek kullanılmıştır. En yüksek ısı iletkenliği kontrol numunelerinde 0.3178 W/mK olarak bulunmuştur. Silis dumanı ve uçucu kül

miktarının artması ısı iletkenliği azaltmıştır. Ayrıca genleştirilmiş perlit agregasının betonun ısı iletkenliğini %43.5 oranında azalttığı belirlenmiştir.

Demirboğa ve diğ. (2001) [40], pomza ve genleştirilmiş perlit agregasının farklı oranlarda kullanıldığı hafif betonlar üzerinde araştırma yapmışlardır. Çimento miktarı ile farklı miktarlarda (%10, 20, 30) silis dumanı ve uçucu külünü yer değiştirmişlerdir. Deneylerde hazırlanan bütün beton karışımlarının çökme değerleri 20 ± 5 mm olarak alınmıştır. Numuneler üzerinde işlenebilirlik, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ve kuru birim hacim ağırlığı testleri yapılmıştır. Deney sonuçlarında birim ağırlığın genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça 1154 kg/cm^3 'ten 735 kg/cm^3 'e kadar azaldığı tespit edilmiştir. Silis dumanı ve uçucu külün her ikisi de birim ağırlığı azaltmıştır. Ayrıca kür süresi arttıkça genleştirilmiş perlit agregasının etkisinin de arttığı görülmüştür.

Demirboğa ve Gül (2003b) [41] bir başka çalışmada, mineral katkılı genleştirilmiş perlit agregalı betonların basınç dayanımı ve ısı iletkenliklerini araştırmışlardır. Silis dumanı ve uçucu kül çimentoyla daha önceki çalışmalarda gibi %10, 20 ve 30 oranlarında değiştirilerek kullanılmıştır ve dozaj 200 kg/m^3 olarak alınmıştır. Deney sonuçlarında; silis dumanı ve uçucu kül miktarı arttıkça ısı iletkenliğinin de sırasıyla %14 ve %18 oranlarında azaldığı ve yoğunluğun da düştüğü belirtilmiştir. Silis dumanı kullanılan 7 günlük numunelerde basınç dayanımının azaldığı, fakat 28 günlük numunelerde basınç dayanımının arttığı ifade edilmiştir. Uçucu külün ise basınç dayanımını düşürdüğü gözlenmiştir.

Bilir (2010) [42] ise taban külünün (TK), uçucu külün (UK), granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) ve kiremit kırıklarının (KK) harçlarda ince agrega olarak kullanımının kuruma rötresi ve çatlaklarına etkisini araştıran bir çalışma sunmuştur. Bu çalışmada elastisite modülü, eğilme ve basınç dayanımı, serbest ve kısıtlanmış rötrenin incelenmesi için halka deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarında taban külü içeren harçlarda en uygun yer değiştirme oranı % 40 ile % 50 civarında bulunmuştur. Halka deneyi sonucu olan çatlak genişlikleri değerlendirildiğinde % 100 taban külü içeriğine kadar referans seriden daha az genişlikte çatlakların oluştuğu gözlenmiştir, çatlak gelişimi yavaşlamış ve çatlak oluşum zamanları da gecikmiştir.

Ölmez (2010) [2], tehlikeli atık yakma tesisi taban küllerinin beton hammaddesi olarak kullanılması ile bertaraf edilmesini araştıran bir çalışma yapmıştır. Çalışmada öncelikle beton kullanımına uygun hale getirilen taban külü belli oranlarda çimento ve agrega yerine kullanılarak beton karışımı hazırlanmıştır. Beton tazeyken sıcaklık, akışkanlık deneyleri yapılmış, daha sonra ise sertleşen betona kırılma, SEM Analizi (Scanning Electron Microscopy), X ışınları kırınım ile malzemelerin içerik analizi ve TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) testleri yapılmıştır. Deneylerin sonucunda; 28 gün sonunda tamamen sertleşen betonun dayanımının standart betondan daha az olduğu ifade edilmiştir. Taban külü çimento yerine kullanılarak hazırlanan betonun, dayanım gerektiren

yapılarda ve malzemelerde kullanılamayacağı belirtilmiştir. Fakat kül; agregaya yerine beton karışımına eklendiğinde, kullanımının dayanım açısından mümkün olduğu görülmüştür. Çalışmada yer alan tüm beton çeşitlerinin briket yapımında, grobeton dökümü ve karo taşı gibi malzemelerin hazırlanmasında kullanılabileceği, ayrıca taban külünün ekonomi sağladığı ve insan sağlığına zararı olmadığı da ifade edilmiştir.

Şengül ve diğ. (2011) [43] deneysel çalışmalarında hafif beton karışımlarında genleştirilmiş perlit doğal agregaya ile yer değiştirerek kullanmışlardır. Bütün karşımlarda su-çimento oranı sabit tutulmuştur. Sonuçlarda normal agregaya ile yer değiştirmiş genleştirilmiş perlitin termal iletkenliği azalttığı ve birim ağırlık ile termal iletkenlik arasında güçlü bir ilişkiye neden olduğu ortaya konulmuştur. Aynı zamanda bu yer değiştirmenin betonun birim ağırlığını önemli ölçüde düşürebildiği belirtilmiştir.

Doğan ve Şener (2004) [44], 10 katlı ve 40 daireli bir yapıda hafif malzeme kullanılarak sağlanacak sıva tasarrufunun 104 m³ olup, binada 230 tonluk hafiflik sağlanabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca normal betona göre pomza agregalı betonun 7 kat, perlit agregalı betonun ise 10 kat daha iyi yalıtkan olduğu belirtilmiştir. Üstelik pomza ve perlit yataklarının iyi bir bölgesel dağılıma sahip olduğu da vurgulanmıştır.

Topçu ve diğ.(2008) [45], genleştirilmiş perlitin hafif betonda ince agregaya ile uygun oranlarda yer değiştirerek olarak kullanılabileceğini, ayrıca daha çok genleştirilmiş agreganın daha az mukavemet verdiği ve daha iyi hafif beton özellikleri kazandırdığını belirtilmiştir.

Odabaş (2012) [46], bir çalışmada su emme ve genleştirilmiş perlitin kılcallık katsayısı değerini incelemiş ve genleştirilmiş perlitin yüksek su tutma kapasitesine bağlı olarak perlit miktarının artışıyla sıva karışımının su emme oranının da arttığını ifade etmiştir.

Çelik ve diğ. (2014) [47], bir hammadde olarak genleştirilmiş perlit agregası kullanarak duvar taşının yeniden üretilebilirliği üzerine bir araştırma yapmışlardır. Optimum karışım değerleri olarak; % 90 perlit, % 5 kömür tozu, % 5 karboksimetil selüloz, 1.0 su/çimento oranı bulunmuştur. En iyi termal iletkenlik ve ses izolasyonuna ise 90. Günde ulaşıldığı ifade edilmiştir.

Benk ve Çoban (2012) [48] çalışmalarında; pomza ve/veya genleştirilmiş perlit gibi hafif agregalardan, çimento ya da alçı türünde bağlayıcı kullanmaksızın, hafif, ısı yalıtımlı, su geçirmez ya da su itici malzemeler geliştirmişlerdir. Bir H₃PO₄ (veya NH₄NO₃) sertleşmiş melas bağlayıcı ile ek olarak %2,5 oranında boraks orta çekme dayanımı ile hafif, ısı yalıtımlı malzemeler için alternatif bir bağlayıcı olabileceğini ortaya koymuşlardır. 825°C'ye kadar sıcaklığa maruz bırakılmış tuğlalar ne mukavemet kaybetmiş ne de kazanmıştır. Bu nedenle melas bağlayıcısının çimento veya alçı yerine bir alternatif olabileceğini ifade etmişlerdir.

Bozkurt (2013) [49] çalışmasında; L25 ortogonal dizisi ile Taguchi yaklaşımını kullanarak beton performansında perlit tozu etkisini ve varyans analizi metodunu (ANOVA) kullanarak perlit tozu yüzdesi ve sıcaklık parametrelerinin basınç dayanımı ve ultrasonik ses hızı üzerinde bir öneme sahip olup olmadığını araştırmıştır. Ayrıca, daha düşük dayanım ve ultrasonik ses hızı değerleri verirken perlit tozu ile birleştirerek hem 28 günlükten 90 güne hem de 7 günlükten 90 güne beton numuneler üzerinde daha mukavemetli iyileştirmeler sağlanmıştır.

Jaturapitakkul ve diğ. (2004) [50], çalışmalarında çimento yerine % 15'ten % 50'ye kadar değişen oranlarda öğütülmüş taban külü kullanılarak ürettikleri betonların dayanımlarının kontrol betonu dayanımdan daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda %25 çimento ile yer değiştirmesi en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Bu nedenle yüksek inceliğe sahip taban küllerinin yüksek mukavemetli beton üretiminde yoğunlaştırılmış silis dumanı yerine kullanım için uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Kurama'ya (2007) göre [51], gazbeton üretimi esnasında numunelerde kuvars kumu yerine taban külü kullanılmış ve ultrases geçiş hızları azaldığı ve istenilen boşluklu yapı elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca basınç dayanımlarında da artan taban külü katkı oranları için 18 saatlik otoklav kür işlemi sonrası hafif beton örneklerinden elde edilen basınç ve eğilme dayanımlarında, referans örnek dikkate alınarak incelendiğinde % 50 katkı oranına kadar taban külünün gazbeton karışımında kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Shakir ve Mohammed (2013) [52], tuğla üretiminde kullanılan malzemeler üzerine derlediği çalışmalarında bertaraf edilebilir el değmemiş kaynakların üretim esnasında uygulama ve ayıklama sürecinden sebep kullanılmadığını ve farklı endüstriyel atıklara yönelmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle tuğla ana bileşeni olarak kullanılması için taban külü, uçucu kül, kiremit tozunu örnek vermişlerdir.

Chindaprasirt ve diğ. (2014) [53], hafif geçirgen beton yapmak için atık gazbeton bloktan geri dönüşümlü hafif agreganın kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca katkı maddesi olarak kullandıkları ince kum ve uçucu külün etkisini araştırmışlardır. İnce kum ve uçucu kül hafif geçirgen betonun toplam boşluk oranı ve su geçirimsizliğini düşürürken basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve aşınma direncini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

Taguchi Metodu, düşük maliyetli ve yüksek kaliteli ürün üretmede kullanılan önemli bir metottur. 1960'lı yıllarda Japonya'da 1980'li yıllardan süregelen ve ABD endüstrisinde başarıyla uygulanmaktadır. Bu metot, bütün ürünlerin istenilen hedefte üretilmesi gerektiğini

sağlamada, hedeften sapmayla birlikte kalite kayıplarının da başladığını ve bu kayıpların ancak iyi bir tasarım ile önlenebileceğini belirtir. Temeli istatistiksel deney tasarımına dayanan metodta birçok teknik geliştirilmiştir. Bu gelişmeler aşağıda özetlenmiştir.

Deneyisel Tasarım yöntemi İngiliz istatistikçi A. Ronald Fisher tarafından ilk defa 1920'li yıllarda tarım ürünlerinin verimliliğini artırmak için geliştirilmiştir. Fisher çalışmasında ürün verimine katkıda bulunan gübre tespitini bu yöntem ile araştırmıştır. Verimliliği aynı seviyede olan toprağı birkaç bloğa ayırmış ve ürün çeşitlerinin her birini bu bloklara rastgele yerleştirmiştir. İşte, Fisher'ın blok yöntemi ve bu bloklara rastgele yerleştirme yapması Deneyisel Tasarım yönteminin temelini oluşturmaktadır [54, 55].

Deneyisel Tasarımın gelişme sürecinde W. Edwards Deming Japonya'da, kalite ve verimliliği geliştirme felsefesi ve yöntemleri üzerine konferanslar vermiştir ve bu teknikler de Japon istatistikçiler tarafından hayata geçirilmiştir. Böylece düşük maliyette ve yüksek kalitede üretim sağlayabilmek için deneyisel tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Daha sonra Profesör Genichi Taguchi, hedeflenen kalitenin üretimden önce tasarım aşamasında sağlanabileceğini ifade etmiştir [55, 56].

Dr. Taguchi'nin geliştirmiş olduğu kalite sistemi 1950'li yıllarda savaş sonrası Japonya'nın telefon sistemi üzerinde uygulanmış ve son derece başarılı olmuştur [64, 65]. Deneyisel Tasarım tekniklerinin ABD'de kullanılmaya başlaması, 1980'lerin ilk yıllarında Taguchi'nin Amerika'da verdiği seminerlerden sonraya rastlamaktadır [57]. Metod maliyetleri en düşük seviyede tutup en az deney yapma prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem hem ürünlerin kalitesinin iyileşmesinde etkili olmaktadır; hem de kaliteye ulaşmada çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkanını vermektedir [58, 59]. Yöntem süreci etkileyen parametrelerden ve değişen seviyeleri düzenleyen ortogonal dizilerden oluşur. Faktöriyel tasarımdaki gibi tüm mümkün kombinasyonları test etmek yerine birkaç kombinasyonu test eder ve bu da pratiklik kazandırır [60]. En basit ortogonal dizi(düzen) 2^2 düzenidir. Bu düzende iki parametre ve bu etkenlerin iki seviyesi vardır. Yani, $2*2=4$ deney eşleştirmesi bulunmaktadır. 2^3 etkensel deney düzeninde ise 3 parametre ve bunların iki seviyeleri incelenmektedir. Burada $2*2*2=8$ deney yapılarak inceleme gerçekleştirilmektedir [61].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler

Yapılan deneysel çalışmada genişletilmiş perlit, taban külü, geri dönüştürülmüş agrega, kalsiyum alüminat çimentosu ve su kullanılmıştır. Aşağıda bu malzemelerin belli başlı özellikleri verilmiştir.

3.1.1. Perlit

Çalışmada, TAŞPER PERLİT SAN. ve TİC. LTD. ŞTİ.'nin Ege Bölgesi'nden temin ettiği genişletilmiş perlit kullanılmıştır (Tablo 3.1). Perlitin özgül ağırlığı 0.125 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Tablo 3.1: Perlitin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşim	% Ağırlık	Fiziksel Özellikler	Değer
SiO ₂	71,3	Tane Büyüklüğü	0-3 mm
Al ₂ O ₃	14,7	Gevşek Birim Ağırlık (kg/m ³)	50-80
Na ₂ O	6,1	Doğal Nem	Mask. % 0,5
K ₂ O	3,4	pH	6,5-8
CaO	1,2	Yumuşama Sıcaklığı	890-1100 °C
MgO	0,56	Erime Sıcaklığı	1280-1380 °C
Fe ₂ O ₃	0,43		

3.1.2. Taban külü

Bu çalışmada kullanılan taban küllerinin temin edildiği Çatalağzı Termik Santrali ÇATES, Zonguldak İli Çatalağzı Kasabası'nda yer almaktadır. Türkiye Taşkömürü Kurumu'na ait Zonguldak ve Çatalağzı Filtrelizasyon tesisleri ürünü olan yılda 1,5 milyon ton taşkömürü artığı yakılmaktadır. Taban külünün özgül ağırlığı 1.5 gr/cm³, gevşek birim ağırlığı 0.5 gr/cm³, sıkışık birim ağırlığı 0.9 gr/cm³'tür. Çalışmada kullanılan taban külü kimyasal analizi Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2: Taban külünün kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	% Ağırlık
SiO ₂	58
Al ₂ O ₃	22,91
Fe ₂ O ₃	3,97
K ₂ O	0,55
MgO	2
Na ₂ O	0,54
TiO ₂	1,37
CaO	4,2

P ₂ O ₅	0,2
SO ₃	3,8

3.1.3. Geri dönüştürülmüş agrega

Yapılan bu çalışmada numune dökümünde önceden farklı çalışmalarda dökülmüş beton numuneleri kırılarak agrega haline getirilmiş ve tez çalışmasında kullanılmıştır. Agreganın özgül ağırlığı 2.5 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Aşağıda agreganın granülometrisi verilmiştir (Tablo 3.3).

Tablo 3.3: Kırılarak geridönüştürülmüş olan agreganın granülometrisi.

Elekler	R.A Geçen(%)
8	100
4	55,67
2	29,88
1	18,83
0,5	10,85
0,25	4,76
0,15	4,51
0,063	1,06
0	0

3.1.4. Çimento

Deneylerde, ateşe dayanıklı çimento olarak bilinen Kalsiyum Alüminatlı Çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan bu çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri aşağıdaki Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4: Kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Bileşim	%	Fiziksel ve Mekanik özellikler	Değer
SiO	3,6	Özgül ağırlık	3,25 gr/cm ³
Al ₂ O ₃	39,8	Özgül yüzey	3000 cm ² /gr
Fe ₂ O ₃	17,05	Priz başlama	280 dk.
CaO	36,2	Priz bitiş	290 dk.
MgO	0,65	Hacim genleşmesi	1 mm
SO ₃	0,04	45µ da kalan	23%
Loss on Ignition	0,3	90µ da kalan	6,50%
Na ₂ Eq	0,16	6 saatlik basınç dayanımı	47
Chloride (Cl ⁻)	0,009	24 saatlik basınç dayanımı	70
S (Sulphur)	0,01		

3.2. Taguchi Metodu

Bu kısımda, deneyler için üretilen harç karışımlarının tespiti ile deneysel tasarım yönteminde kullanılan Taguchi Metodu ve izlenen yol açıklanmıştır. İstenen işlenebilme özelliğinde, yeterli dayanım ve dayanıklılıkta ekonomik betonun malzeme oranlarının tespiti amacıyla beton karışım hesabı yapılmıştır.

Bu çalışmada, deney sayısı en aza indirgenerek optimum harç malzemesi Taguchi deney tasarım tekniği kullanılarak belirlenmiştir. 4 parametre olarak İç kütleme malzemesi, Çimento miktarı, Perlit ve Sıcaklık faktörleri seçilmiştir ve 4 seviye üzerinde çalışılmıştır.

Fiziksel özellikler üzerindeki Sinyal/Gürültü (S/G) oranlarının etkisini gözlemlemek amacıyla aynı deney koşulları altında her bir test 3 defa tekrarlanmış ve rastgeleleştirme yöntemi uygulanmıştır.

Deney değerleri ve TAGUCHI METODU'dan sağlanan değerler arasındaki standart sapmayı hesaplamak için kayıp fonksiyon (üründen istenilen sonucu almama durumu, kalitesiz ürün, zarar) kullanılmıştır. Sinyal/Gürültü (S/G) oranları işte bu kayıp fonksiyondan dönüştürülür [62]. Deneyin karakteristiğine bağlı olarak üç çeşit S/G oranları mevcuttur. Bunlar; “Daha büyük daha iyidir”, “Daha küçük daha iyidir” ve “Nominal en İyidir”. En yaygın kullanılanları ise “Daha büyük daha iyidir” ve “Daha küçük daha iyidir” şeklindedir [63]. Bu çalışmada, “Daha büyük daha iyidir” performans özelliği basınç ve eğilme dayanımları için, “Daha küçük daha iyidir” ise kuru birim ağırlık, ısı iletkenlik katsayısı, su emme ve kılcal su emme için kullanılmıştır.

“Daha küçük daha iyidir” performans karakteristiğini belirlemek için; aşağıdaki S/G oranı formülü ile hesaplanır (4.1);

$$SN_i = -10 \log \left(\sum_{u=1}^{N_i} \frac{y_u^2}{N_i} \right) \quad (4.1)$$

i = Deney numarası

u = Deneme numarası

N_i = i Deneyi için deneme sayısı

y = Her bir gözlem değeri

Her deneyin S/G oranı hesaplandıktan sonra her bir faktör ve seviye için ortalama S/G oranı hesaplanır [60].

3.3. Varyans Analizi

Varyansları karşılaştırmak için kullanılan F testi, ikiden fazla ortalamayı karşılaştırmak için de kullanılır. Bu teste varyans analizi, ANOVA denir. İlk adımda H_0 ve H_1 hipotezleri tanımlanır ve ikinci adımda ise testin tahmini güven aralığı, önemlilik düzeyi α yüzdesi belirlenir.

H₀: Ortalamalar arasında fark yoktur (faktörlerin etkisi yoktur).

H₁: En az iki ortalama arasında anlamlı bir farklılık vardır (faktörlerin etkisi vardır).

Tek yönlü varyans analizinde uygulama ve hataların kareleri toplamı hesaplanır ve ardından varyansları bulunur. F değeri de bulunan varyanslar aracılığıyla hesaplanır. Bu formüller (4.2, 4.3, 4.4) ile Tablo 3.5'deki tek yönlü varyans analizi tablosu hazırlanır. Aşağıda gerekli formüller verilmiştir (URL-2);

Uygulama kareler toplamı ve varyansı;

$$SS_T = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X}_{GM})^2$$
$$df_T = k - 1$$
$$S_T^2 = \frac{SS_T}{df_T}$$
(4.2)

Hata kareler toplamı ve varyansı;

$$SS_E = \sum_{j=1}^{n_1} (X_{1j} - \bar{X}_1)^2 + \sum_{j=1}^{n_2} (X_{2j} - \bar{X}_2)^2 + \dots + \sum_{j=1}^{n_k} (X_{kj} - \bar{X}_k)^2$$
$$df_E = N - k$$
$$S_E^2 = \frac{SS_E}{df_E}$$
(4.3)

$$SS_{TOT} = SS_T + SS_E$$

$$df_{TOT} = N - 1$$

$\bar{X}_{GM}$: büyük ortalama

$\bar{X}_i$: grup ortalaması

df_T= Grupların serbestlik derecesi

df_E= Hatanın serbestlik derecesi

S_T²= Grupların varyansı (MST)

S_E²= Hataların varyansı (MSE)

N= Toplam grup büyüklüğü

n_i= Grup büyüklüğü

X_{kj}=k. gruptaki j.gözlem

SS_{TOT}=Karelerin toplamı

SS_T= Gruplar arası kareler toplamı

SS_E= Grup içi (hata) kareler toplamı

Tablo 3.5: Tek yönlü varyans analizi tablosu

Kaynak	SS	f	MS (S ²)	F _{hesaplanan}
Uygulama (T)	SS _T	k - 1	MST	MST/MSE
Hata (E)	SS _E	N - k	MSE	
Toplam	SS _{TOT}	N - 1		

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER

4.1. Kompozit Malzeme Yapımı

Bu araştırmada ısı iletkenlik katsayısı ölçümleri hariç 40x40x160 mm ve ısı iletkenlik katsayısı ölçümü için 50x300x300 mm boyutlarında dikdörtgen prizma harç numuneleri kullanılmıştır. Numunelerin hazırlanması aşamasında laboratuvar mikseri kullanılmış, karıştırıcıya önce katı haldeki malzemeler atılmış, daha sonra su ilave edilmiştir. Karışıma giren perlit ve taban külü malzemesi çok fazla su emdikleri ve su kontrolleri zor olduğu için, bu malzemeler kuru olarak karışımında yer almıştır.

Duruma göre ilave su miktarları da karışıma eklenmiştir. Isı iletkenlik numuneleri hazırlanırken karışım numune içinde 3 kez titreştirilerek vibrasyon yapılmıştır. Diğer deneylerdeki işlemlerde kullanılan 40x40x160 lık numunelerde de arada ve dökümün son aşamasında olmak üzere 2 kez vibrasyon yapılmıştır. Daha sonra yüzeyleri mala ve benzer aletler yardımıyla düzleştirilerek uygun hale getirilmiştir. Bağlayıcı oranlarının belirlenmesi için üretilen harç numuneleri 20±2 °C’de suda 28 gün kür edilmiştir.

İkinci hazırlık olarak deney sayılarının Taguchi metoduyla azaltma işlemi yapıldı. 4 faktör, 4 düzey olarak deney parametreleri belirlendi. Tablo 5’te bu gruplandırmalar görülmektedir.

Tablo 4.1: Taguchi deneyindeki parametre ve seviyeler

Parametreler	Seviyeler			
	1	2	3	4
İç kürleme Malzemesi	Perlit	Taban külü	R.A.	Hiçbiri
Çimentomiktarı (kg/m ³)	150 kg	175 kg	200 kg	225 kg
Perlit:Taban külü:R.A.	2:1:1	1:2:1	1:1:2	1:1:1
Sıcaklık	20	300	600	900

Bu plana göre Taguchi metoduyla deney çeşitliliği azaltıldı ve deney numuneleri Tablo 4.2’de görüldüğü gibi bulunmuştur. Deney sayısı en aza indirgenerek yeterli dayanım, su emme, hafiflik ve ısı yalıtımı sağlayacak optimum harç malzemesi Taguchi deney tasarım tekniği kullanılarak belirlenmiştir. . 4 parametre olarak İç kürleme malzemesi, Çimento miktarı, Perlit ve Sıcaklık faktörleri seçilmiştir ve 4 seviye üzerinde çalışılmıştır. Bu şekildeki parametre ve seviyelere göre normalde 4⁴=256 deney yerine görüldüğü gibi sadece 16 deney ile sonuca varılmıştır.

Tablo 4.2: L'16 deney deseni

Experiment	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3



Şekil 4.1: Hazırlanmış örnek numuneler

En uygun bağlayıcı oranının belirlenmesinde çimento, perlit ve taban külü içeren karışımlar hazırlanmıştır (Şekil 4.1). Bu elde edilen karışımlar ile eğilme, basınç testleriyle, kuru birim ağırlık, su emme ve yalıtım deneyleri ile birçok dizayna ait sonuçlar elde edilmiştir ve bizlere kıyaslama şansı sunulmuştur.

4.2. Eğilme Dayanımı

Eğilme; iki desteğe serbest olarak oturtulan, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının, yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değişmesidir.

Harç numunelerinin eğilme dayanımı deneyi 40x40x160 mm boyutundaki numuneler üzerinde TS EN 1015-11 standardına uygun olarak mesnet açıklığı 100 mm olacak şekilde numune ortasında tek noktadan 0,02 MPa/sn yükleme hızında gerçekleştirildi (Şekil 4.2). Elde edilen kırılma yükü aşağıdaki formülde yerine konarak, eğilme dayanımı üç numunenin ortalaması alınarak tespit edilmiştir (4.1.).

$$\sigma_e = 1,5 \times \frac{F \times L}{b \times d^2} \quad (4.1.)$$

σ_e = Eğilme Dayanımı (N/mm², MPa)

F=Kırılma anındaki yük (N)

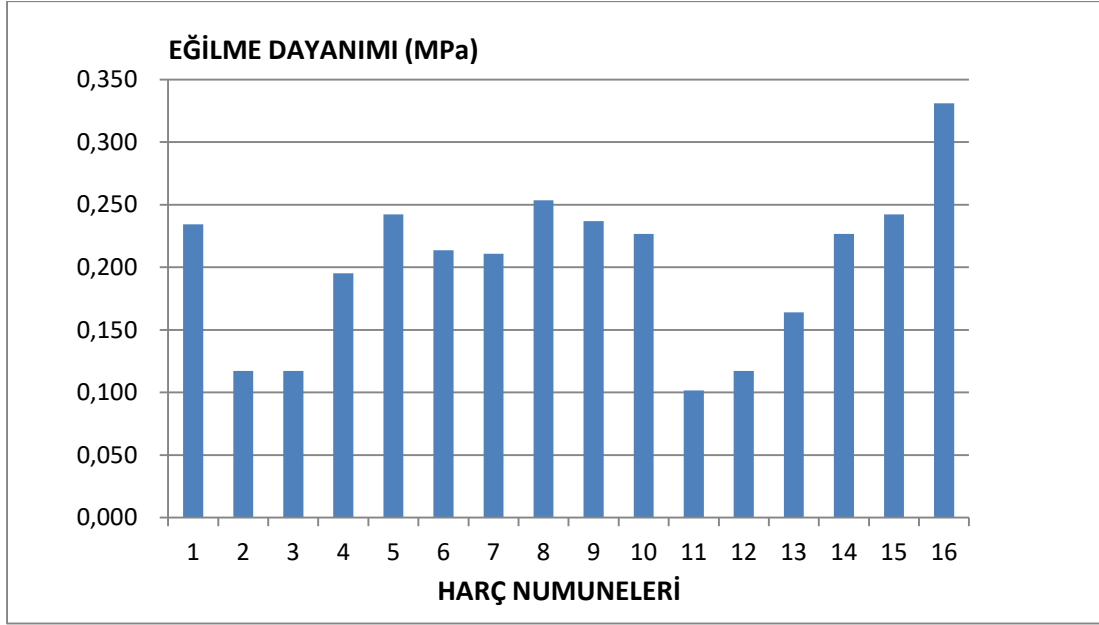
L=Mesnet açıklığı (mm)

b= Harç numunesinin genişliği (mm)

d=Harç numunesinin yüksekliği (mm)



Şekil 4.2: Eğilme dayanımı bulunmak istenen 40x40x160 mm’lik
bir numune örneğinin cihaza yerleşimi



Şekil 4.3: Harç numunelerinin eğilme dayanımlarının grafiği

Şekil 4.3’de görüldüğü üzere 16 no’lu numunelerin eğilme dayanımı ortalaması diğer numunelere göre daha fazladır. Bunu sağlayıcı olarak bu numunelerdeki su/çimento (S/Ç) oranının diğer numunelere göre dengede ve ya daha az seviyede olması ve kür malzemesi kullanılmaması gösterilebilir.

Tablo 4.3’deki F-Tablo değeri F dağılım tablosundan 2.87 bulunmuştur. Tablodan anlaşılabileceği üzere hiçbir faktörün F değeri F-Tablo değerinden büyük değildir. Bu sebeple $F < F_{\text{Tablo}}$ olduğundan H_0 kabul edilir ve dolayısıyla bu faktörlerin etkisinin olmadığı kabul edilir.

Tablo 4.3: Eğilme dayanımı için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SSA)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (VA)	F
A (İç kürleme Malzemesi)	0,055079	3	0,01836	2,789302
B (Çimento miktarı)	0,023912	3	0,007971	1,210948
C (agrega oranı)	0,010544	3	0,003515	0,533968
D(Sıcaklık)	0,036056	3	0,012019	1,825943
Hata	0,230376	35	0,006582	
T	0,355967	47		

4.3. Basınç dayanımı

Beton diğer birçok yapı malzemesi gibi basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük bir malzemedir. Bu sebeple betonun çok düşük olan çekme dayanımı genellikle dikkate alınmadığından, üzerinde durulan en önemli özellik basınç dayanımıdır. Harcın üretildiği yöntem, saklandığı ortamı, numunelerin farklı şekil ve boyutta olması, uygulanan deney yükünün hızındaki farklılık gibi birçok faktör, deney sonunda elde edilen basınç dayanımı değerinin farklı olabilmesine yol açmaktadır. Bu faktörlerin, elde edilen basınç dayanımı değeri üzerindeki etkisini bulabilmek için, standart deney yöntemi kullanılmaktadır. Başka bir ifadeyle, harç üzerinde yapılan bilimsel çalışmalarda genelde bu yöntem kullanılmaktadır. Harcın standart basınç dayanımı, suda saklanmış 28 günlük, 4x4x16 cm'lik prizmaların eğilme deneyine tabi tutulması sonucu elde edilen yarım prizmanın 4x4'lük kısmından kup olarak eksenel basınç altında kırılması sonucu elde edilen dayanım olarak tanımlanır.

Harç numunelerinin basınç dayanımları kırılan 40x40x160 mm boyutlarındaki eğilme numunelerinden elde edilen parçalar üzerinden TS EN 1015-11 standardına uygun olarak test edilmiştir. Eğilmede kırılan parçalar 40x40 mm boyutlarında iki plaka yardımı ile 0,1 MPa/sn yükleme hızı ile basınç altında kırıldıkları yükler tespit edilmiştir. Elde edilen bu yükler aşağıdaki formülde yerine konarak altı numunenin ortalaması alınarak basınç dayanımları hesaplanmıştır (4.2).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.2)$$

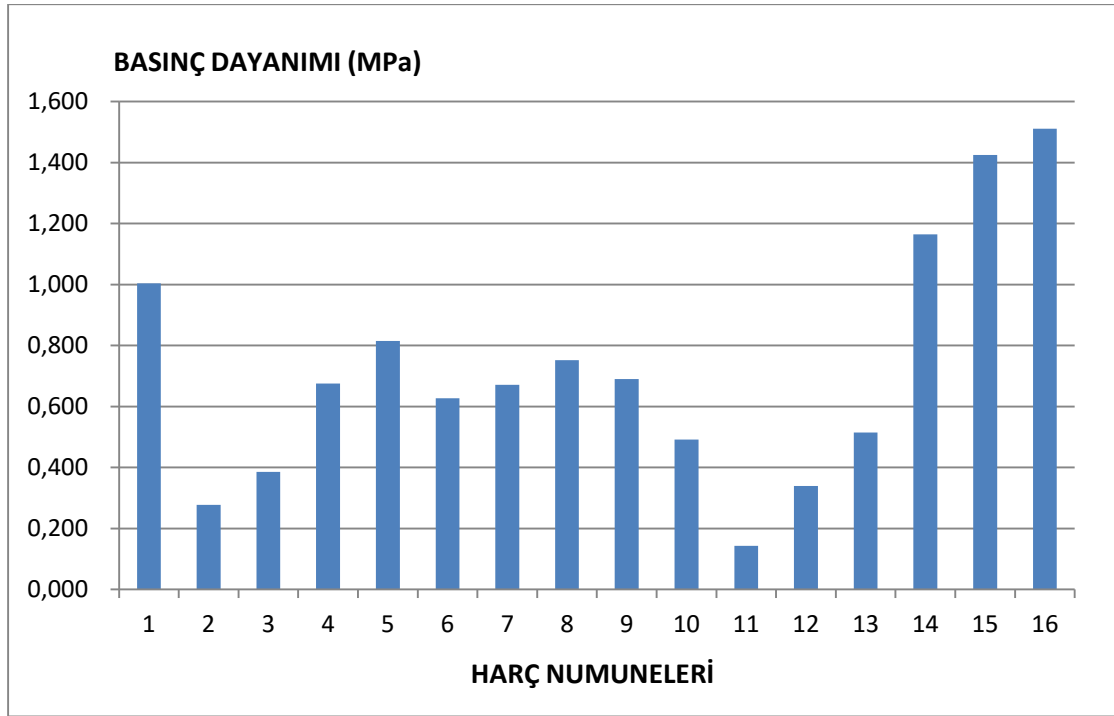
σ = Basınç dayanımı (N/mm², MPa)

F = Kırılma anındaki yük (N)

A = Basınç uygulanan yüzey alanı (mm²)



Şekil 4.4: Basınç dayanımı bulunmak istenen 40x40x160 mm lik bir numune örneğinin eğilme deneyiyle kırılmış parçasının cihaza yerleşimi



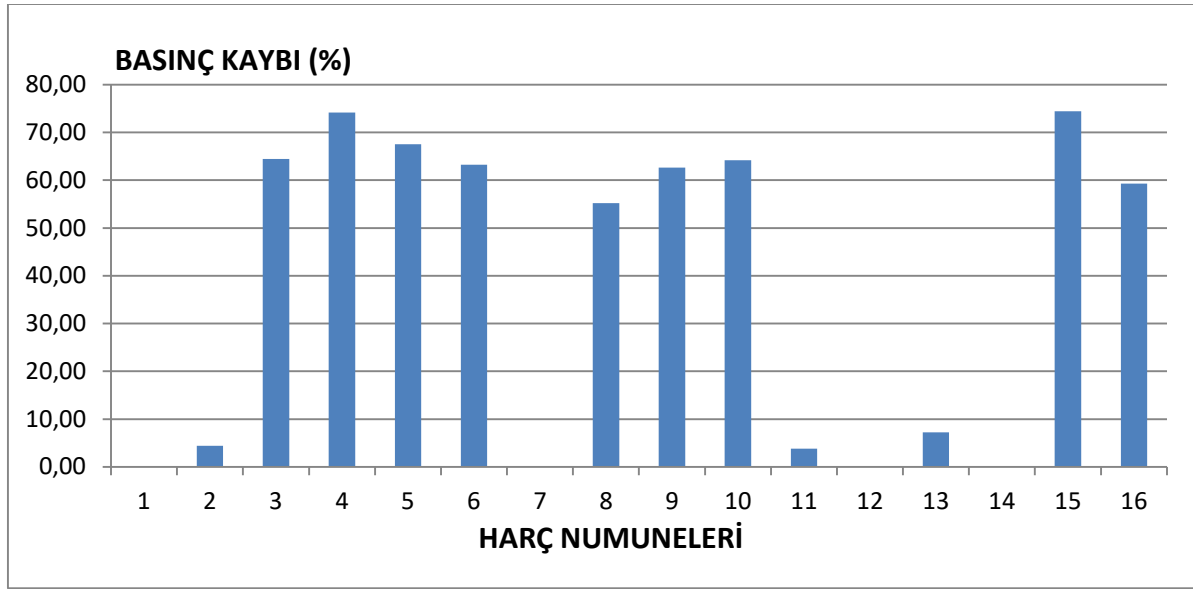
Şekil 4.5: Harç numunelerinin basınç dayanımlarının grafiği

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere eğilimde olduğu gibi yine 15 ve 16 no'lu numunelerin basınç dayanımı ortalamaları diğer numunelere göre daha fazladır.

Harcın basınç dayanımı için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.4'de verilmiştir. F-Tablo değeri 3 serbestlik derecesi ve 35 hata derecesi için F dağılım tablosundan 2,87 bulunmuştur. Tablodan anlaşılabacağı üzere iç kürleme malzemesi ve sıcaklık F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu iki parametre (faktör) için kurulan H_0 hipotezleri reddedilir, dolayısıyla basınç dayanımı için etkili parametreler olduğu anlaşılır. Çimento miktarı ve perlit için ise F değeri F-Tablo değerinden daha küçük olduğunda H_0 kabul edilir ve dolayısıyla bu faktörlerin etkisinin olmadığı kabul edilir.

Tablo 4.4: Basınç dayanımı için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SSA)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (VA)	F
A (İç kürleme Malzemesi)	3,5833277	3	1,194443	17,34015
B (Çimento miktarı)	0,2590282	3	0,086343	1,253469
C (agrega oranı)	0,3413277	3	0,113776	1,651726
D(Sıcaklık)	1,4287353	3	0,476245	6,913821
Hata	2,4109069	35	0,068883	
T	8,0233257	47		



Şekil 4.6: Harç numunelerinin basınç kaybı yüzdelerinin grafiği

Tabloda görüldüğü üzere basınç kaybı yüzdesi olarak 1, 7, 12 ve 14 nolu numunelerin basınç kaybı 0'dır yani yoktur. Buna etken olarak sıcaklık artışıyla basınç dayanımlarının düştüğü görülmektedir.

Harcın basınç kaybı için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.5'de verilmiştir. F-Tablo değeri 3 serbestlik derecesi ve 35 hata derecesi için F dağılım tablosundan 2,87 bulunmuştur. Tablodan anlaşılacağı üzere sadece sıcaklık F değeri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu parametre (faktör) için kurulan H_0 hipotezleri reddedilir, dolayısıyla basınç kaybı için etkili parametreler olduğu anlaşılır. İç kütleme malzemesi, çimento miktarı ve agrega oranı için ise F değeri F-Tablo değerinden daha küçük olduğunda H_0 kabul edilir ve dolayısıyla bu faktörlerin etkisinin olmadığı kabul edilir.

Tablo 4.5: Basınç kaybı için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SSA)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (VA)	F
A (İç kütleme Malzemesi)	1350,005	3	450,0017	0,845757
B (Çimento miktarı)	1524,438	3	508,1459	0,955036
C (agrega oranı)	1229,37	3	409,79	0,770181
D(Sıcaklık)	41573,1	3	13857,7	26,0449
Hata	18622,44	35	532,0697	
T	64299,36	47		

4.4. Kuru Birim Ağırlık ve Su Emme

ASTM C 67-08 standartları esas alınarak harç numunelerinin su emme ve kuru ağırlıkları hesaplanmıştır. Üretilen numuneler 24 saat suda bekletildikten sonra yüzeyleri bir bezle kurutularak hassas terazide doymuş kuru yüzey(DYK) ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra 24 saat 110 ± 5 °C’de değişmez kütleye ulaşmaya kadar kurutulduktan sonra terazide etüv kurusu halde ağırlıkları tartılmıştır. Elde edilen bu ağırlıklar aşağıdaki formüllerde yerlerine konularak harç numunelerinin su emmeleri ve kuru birim ağırlıkları hesaplanmıştır (4.3 ve 4.4).

Kuru birim ağırlık;

$$\Delta = \frac{W_k}{V} \quad (4.3)$$

Δ = Kuru birim ağırlık (gr/cm³)

W_k = Kuru ağırlık (gr)

V = Numune hacmi (cm³)

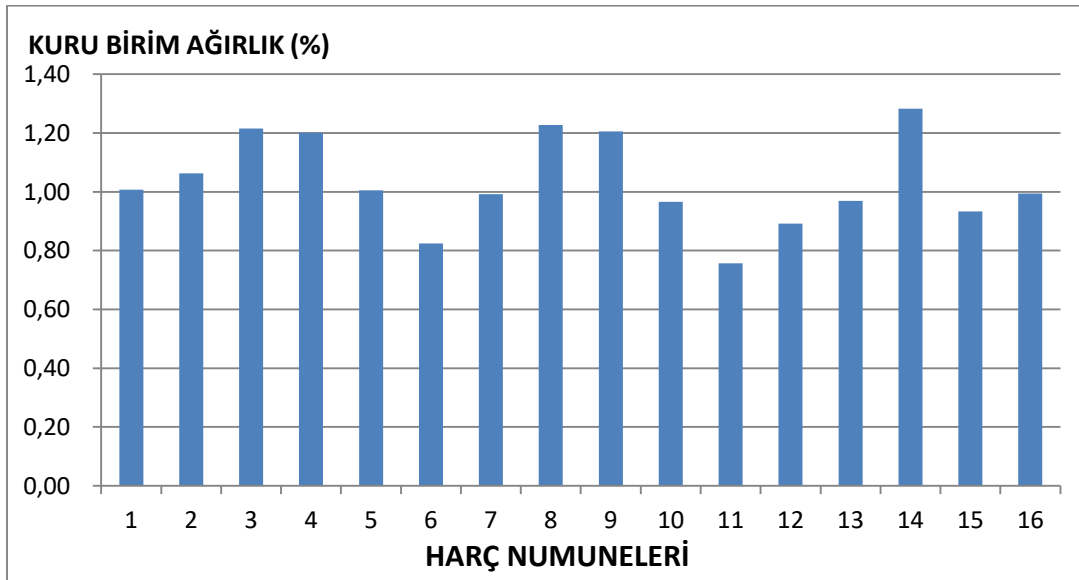
Ağırlıkça yüzde su emme oranı;

$$Sa = \frac{W_d - W_k}{W_k} \times 100 \quad (4.4)$$

Sa = Ağırlıkça yüzde su emme (%)

W_d = Doymuş kuru yüzey ağırlık (gr)

W_k = Kuru ağırlık (gr)



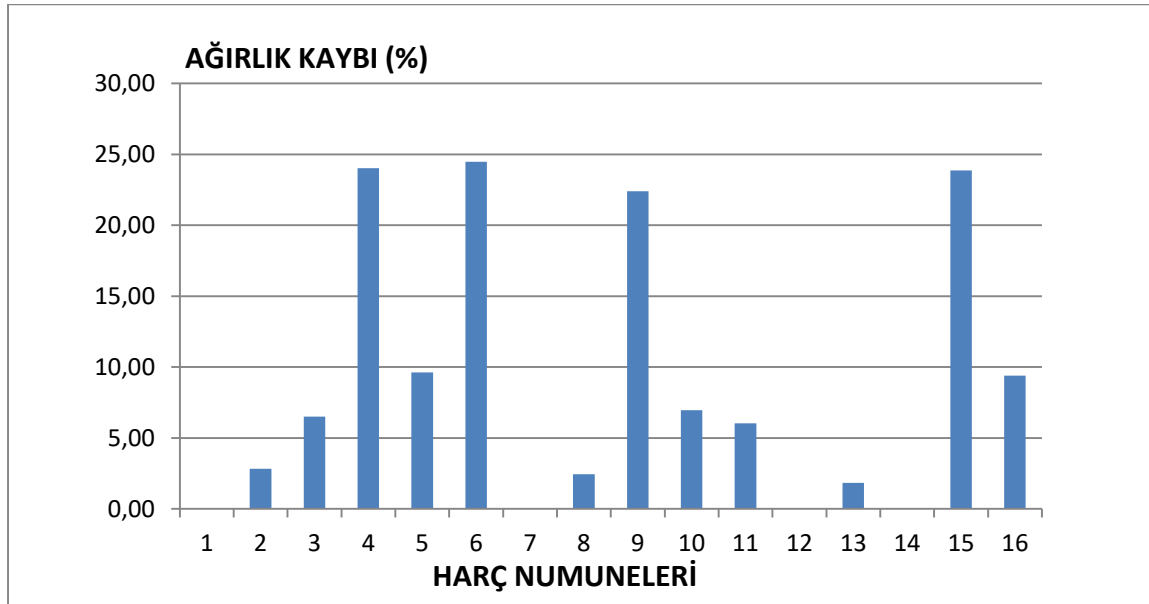
Şekil 4.7: Harç numunelerinin kuru birim ağırlıklarının grafiği

Şekil 4.7’de beklendiği gibi çimento dozajı arttıkça kuru ağırlık da artmaktadır. Burada değerin düşük olması avantaj olup, en iyi değeri 6 ve 11 nolu numuneler vermiştir.

Harcın kuru birim ağırlık için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.6’da verilmiştir. F-Tablo değeri 3 serbestlik derecesi ve 35 hata derecesi için F dağılım tablosundan 2,87 bulunmuştur. Tablodan anlaşılacağı üzere iç kürleme malzemesi, çimento miktarı ve agrega oranının F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu üç parametre (faktör) için kurulan Ho hipotezleri reddedilir, dolayısıyla kuru ağırlık için etkili parametreler olduğu anlaşılır. Sıcaklık için ise F değeri F-Tablo değerinden daha küçük olduğunda Ho kabul edilir ve dolayısıyla bu faktörün etkisi yoktur hipotezi kabul edilir.

Tablo 4.6: Kuru birim ağırlık için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SSA)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (VA)	F
A (İç kürleme Malzemesi)	0,173982	3	0,057994	16,48507
B (Çimento miktarı)	0,068301	3	0,022767	6,471615
C (agrega oranı)	0,747562	3	0,249187	70,83283
D(Sıcaklık)	0,013838	3	0,004613	1,31115
Hata	0,123129	35	0,003518	
T	1,12681	47		



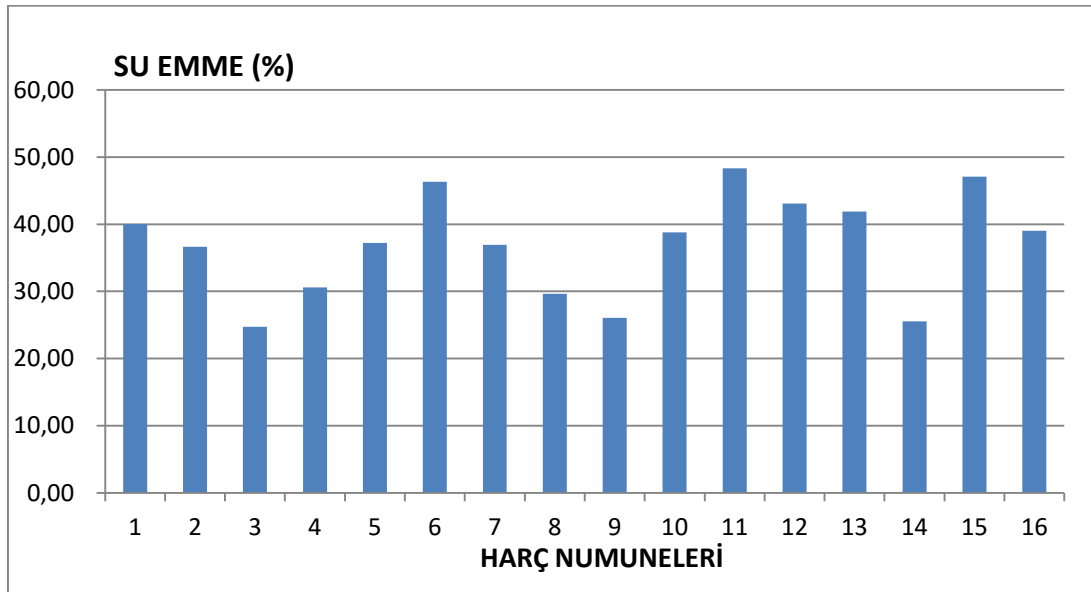
Şekil 4.8: Harç numunelerinin ağırlık kaybı yüzdelerinin grafiği

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere ağırlık kaybı yüzdesi olarak 1, 7, 12 ve 14 nolu numunelerin ağırlık kaybı 0’dır yani yoktur. Bu numuneler fırına konmamıştır ve Taguchi metoduna göre oda sıcaklığında değerlendirilmiştir.

Harcın ağırlık kaybı için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.7’de verilmiştir. F-Tablo değeri 3 serbestlik derecesi ve 35 hata derecesi için F dağılım tablosundan 2,87 bulunmuştur. Tablodan anlaşılaçağı üzere agrega oranı ve sıcaklık F değeri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu iki parametre (faktör) için kurulan Ho hipotezleri reddedilir, dolayısıyla basınç kaybı için etkili parametreler olduğu anlaşılır. İç kütleme malzemesi ve çimento miktarı için ise F değeri F-Tablo değerinden daha küçük olduğunda Ho kabul edilir ve dolayısıyla bu faktörlerin etkisinin olmadığı kabul edilir.

Tablo 4.7: Ağırlık kaybı için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SSA)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (VA)	F
A (İç kütleme Malzemesi)	3,857784	3	1,285928	0,61988
B (Çimento miktarı)	3,368246	3	1,122749	0,54122
C (agrega oranı)	32,79602	3	10,93201	5,26976
D(Sıcaklık)	3958,371	3	1319,457	636,0427
Hata	72,60676	35	2,074479	
T	4071	47		



Şekil 4.9: Harç numunelerinin ağırlıkça yüzde su emme değerlerinin grafiğı

Şekil 4.9’da en düşük ağırlıkça su emme miktarı 3. Numune için %24,72 olarak bulunmuştur. Yine 10 ve 14 numaralı deney numuneleri ona en yakın sonucu vermiştir. Boşluksuz ve su emmesi düşük olan malzemenin dayanımsal artışa yol açtığı bu sonuçlardan da net olarak görülmektedir.

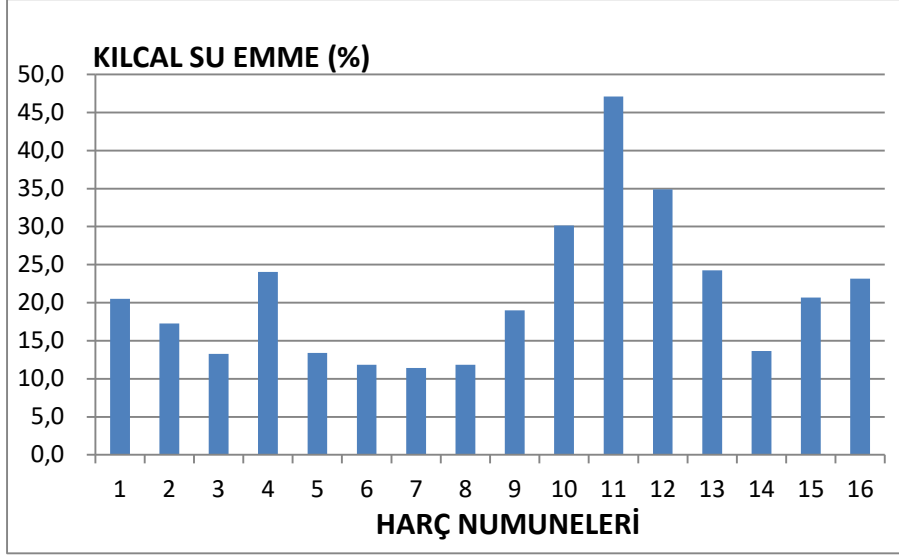
Harcın su emme için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir. F-Tablo değeri 3 serbestlik derecesi ve 35 hata derecesi için F dağılım tablosundan 2,87 bulunmuştur. Tablodan anlaşılabacağı üzere iç kürleme malzemesi ve agrega oranının F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu iki parametre (faktör) için kurulan H_0 hipotezleri reddedilir, dolayısıyla kuru ağırlık için etkili parametreler olduğu anlaşılır. Çimento miktarı ve sıcaklık için ise F değeri F-Tablo değerinden daha küçük olduğundan H_0 kabul edilir ve dolayısıyla bu faktörün etkisi yoktur hipotezi kabul edilir.

Tablo 4.8: Su emme için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SSA)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (VA)	F
A (İç kürleme Malzemesi)	268,3109	3	89,43696	6,202114
B (Çimento miktarı)	91,55358	3	30,51786	2,116298
C (agrega oranı)	2016,057	3	672,019	46,60197
D(Sıcaklık)	112,0323	3	37,34411	2,589672
Hata	504,714	35	14,4204	
T	2992,668	47		

4.5. Kılcal Su Emme

Kılcal su emme; malzemenin suya değen yüzünden zamanla emilen su miktarı ile belirlenir. Çok küçük çaplı boşluklar içinde kılcallık etkisi ile su yükselir. Düşey boruda suyun yükselme miktarı suyun yüzey gerilimi ile doğru, boru çapı ile ters orantılıdır. Küçüldükçe su daha yükseğe emilir. Karışımlar hazırlanıp kalıplara döküldükten sonra standartta belirtilen koşullar altında bekletilmiştir. Aynı numuneler TS EN 1015-18’e göre etüvde 24 saat 60 ± 5 °C’de kurutuldu. Etüvden çıktıktan sonra, numuneleri 40x40x80 mm’lik iki eşit parçaya bölündü, kuru ağırlıkları tartıldı ve kaydedildi. Kesilen yüzeyi su ile temas edecek şekilde suya oturtuldu. 90 dk. suda bekletildikten sonra ıslak yüzeyleri bir bezle kurutularak hassas terazide ağırlıkları tartılmıştır. Elde edilen bu ağırlıklar aşağıdaki formüllerde yerlerine konularak harç numunelerinin kılcal su emmeleri (%) hesaplanmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10: Harç numunelerinin ağırlıkça yüzde kılcal su emme değerlerinin grafiği

4.10’da en düşük ağırlıkça su emme miktarı 7. Numune için %11,4 olarak bulunmuştur. Yine 6 ve 8 numaralı deney numuneleri ona en yakın sonucu vermiştir. Boşluksuz ve su emmesi düşük olan malzemenin dayanımsal artışa yol açtığı bu sonuçlardan da net olarak görülmektedir. 11 numaralı numune en fazla su emme değerine sahip olmaktadır. Bu numune aynı zamanda en düşük ağırlığa sahip olan numune olduğundan bu sonuç sürpriz olmamıştır.

Harcın kılcal su emme için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.9’da verilmiştir. F-Tablo değeri 3 serbestlik derecesi ve 35 hata derecesi için F dağılım tablosundan 2,87 bulunmuştur. Tablodan anlaşılabacağı üzere iç kütleme malzemesi ve agrega oranının F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu iki parametre (faktör) için kurulan H_0 hipotezleri reddedilir dolayısıyla su emme için etkili parametreler olduğu anlaşılır.

Tablo 4.9: Kılcal Su Emme için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SSA)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (VA)	F
A (İç kütleme Malzemesi)	268,3109	3	89,43696	6,202114
B (Çimento miktarı)	91,55358	3	30,51786	2,116298
C (agrega oranı)	2016,057	3	672,019	46,60197
D(Sıcaklık)	112,0323	3	37,34411	2,589672
Hata	504,714	35	14,4204	
T	2992,668	47		

4.6. Isı Yalıtımı

Yapılarda ısı yalıtımı enerjiden tasarruf sağlayarak gaz ve toz emisyonunu azaltıp çevre kirliliğini önler. Duvar, ısı köprüleri, zemin ve tavan yüzey sıcaklıklarının iç konfora olduğu kadar yapı kabuğu üzerinde de önemli etkileri vardır. Yeterli yalıtım yaşam kalitesine katkıda bulunur ve bu sayede de bina dokusunun korunmasına yardımcı olur. Sağlıklı ve rahat bir yaşam sadece uygun ısı ve nem şartlarına sahip olan mekanlarda mümkün olabilir.

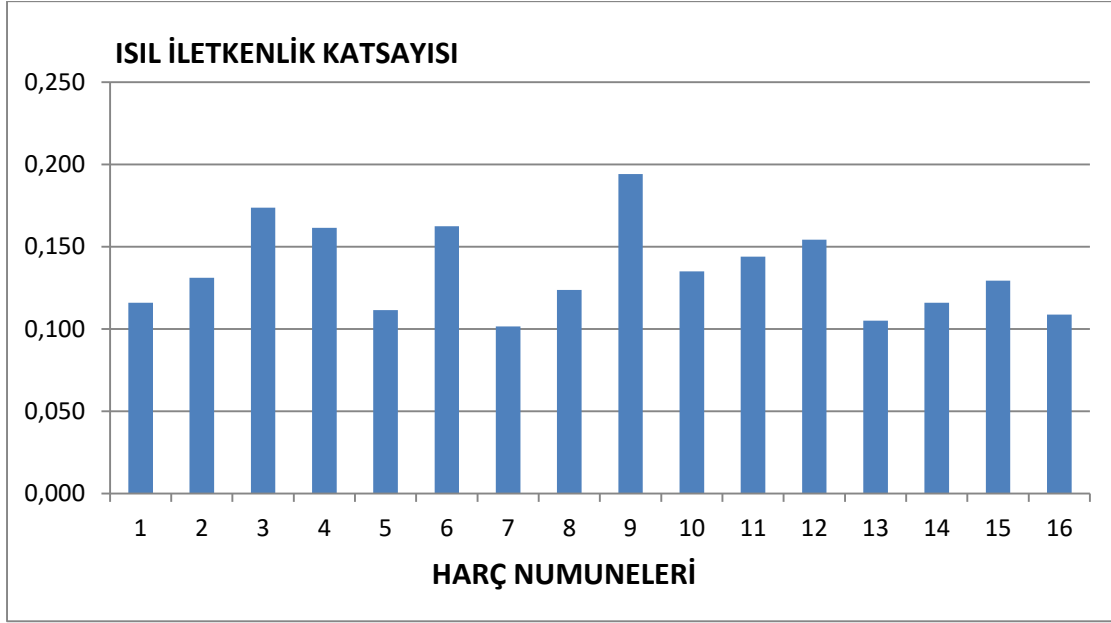
Eğer bir fayda-maliyet karşılaştırması yapılırsa, ısı yalıtımı hem ekolojik hem de ekonomik açıdan yararlıdır ayrıca çok kısa sürede geri kazanılan bir yatırımdır. Binalarda ısı yalıtım önlemleriyle, binanın durumuna bağlı olarak %20-%70 ısı tasarrufu sağlanabilmektedir. Isı tasarrufu, yakıt ve para tasarrufu demektir. Yakıta ödenen paranın büyük kısmının da ithal edilerek yurt dışına gittiği düşünülürse, yalıtım yoluyla yakıt tasarrufu, döviz tasarrufu anlamına da gelmektedir.

Yalıtıma harcanan paranın, kendisini genelde 4-6 yıl arasında amorti ettiği ön görülmektedir. Ayrıca binalarda ısı yalıtımını maddi boyutunun yanı sıra, iki önemli boyutu da bulunmaktadır. Daha az baca gazı ve daha az çevre kirliliği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte inşaatın fiziksel ve teknik prensiplerinin incelenmesi ve yüksek kalitede uygun yalıtım malzemesinin kullanımı önemlidir.



Şekil 4.11: Hotbox metodu ile çalışan ısı yalıtım cihazı

Şekil 4.11’de ise bilgisayarlı okuma yapılabilen Hotplate yöntemine göre çalışan cihaz görülmektedir. Bu cihazın iki plakası arasına plaka olarak yerleştirilen malzemenin λ değeri bilgisayar üzerinden okunabilmektedir.



Şekil 4.12: Harç numunelerinin ısı iletkenlik katsayısı grafiğı

Numunelerin λ değerlerine baktığımızda beklenildiğı gibi 0,1 W/mK civarı sonuçlar elde edilmiştir. 7, 13 ve 16 bu deneyde en iyi sonuçları veren numuneler olmuştur. Şekil 5.12’de en düşük iletkenlik katsayısı 7. Numune için 0,102 olarak bulunmuştur. Yine 13 ve 16 numaralı deney numuneleri ona en yakın sonucu vermiştir.

Harcın yalıtım için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.10’da verilmiştir. F-Tablo değeri 3 serbestlik derecesi ve 35 hata derecesi için F dağılım tablosundan 2,87 bulunmuştur. Tablodan anlaşılabacağı üzere iç kütleme malzemesi, agrega oranı ve sıcaklık F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu üç parametre (faktör) için kurulan H_0 hipotezleri reddedilir dolayısıyla yalıtım için etkili parametreler olduğı anlaşılr.

Tablo 4.10: Kılcal Su Emme için Varyans (Anova) analizi sonuçları

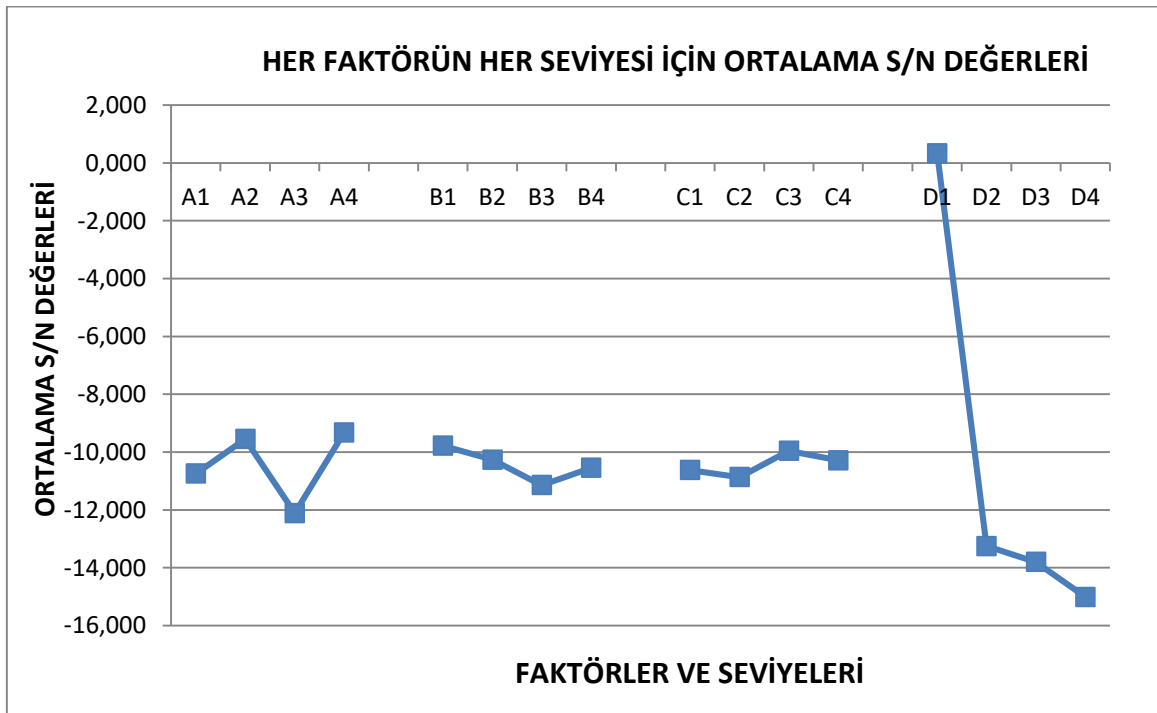
Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SSA)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (VA)	F
A (İç kütleme Malzemesi)	0,013234	3	0,0044112	44,42848
B (Çimento miktarı)	0,00024	3	8,008E-05	0,8065
C (agrega oranı)	0,004627	3	0,0015422	15,5322
D(Sıcaklık)	0,011787	3	0,0039291	39,57247
Hata	0,003475	35	9,929E-05	
T	0,033363	47		

4.7. Deneysel Tasarım Analiz Sonuçları

Taguchi deney tasarımı yönteminde yapılan çözümlemelerde; seçilen kalite özelliğinin en büyük en iyi, en küçük en iyi ve istenilen değer en iyi seçeneklerinden biri tercih edilerek yapılmaktadır. Taguchi yöntemi istatistiksel deney tasarımı kullanan ve en iyi deney takımının belirlenmesinde kalite karakteristiklerini (ortalama ve değişkenliği) eş zamanlı olarak dikkate alan, çeşitli durumlar için geliştirilen ve sinyal-gürültü (S/G, signal-to-noise) diye adlandırılan oranları kullanır. Bu üç tür çözümlemelerde amaç sinyal-gürültü oranını en üst seviyeye çıkarmaktır (maksimize etmektir). Bu durum, bir yandan sinyali arttırırken, diğer yandan da değişkenliği azaltmaktadır.

Bu çalışmada, “daha büyük daha iyidir” performans özelliği basınç ve eğilme dayanımları için, “daha küçük daha iyidir” ise basınç dayanımı kaybı, kuru birim ağırlık, ağırlık kaybı, su emme, kılcal su emme ve yalıtım için kullanılmıştır. Hepsini aynı seviyeye getirmek için S/G oranlarını bulunmuştur.

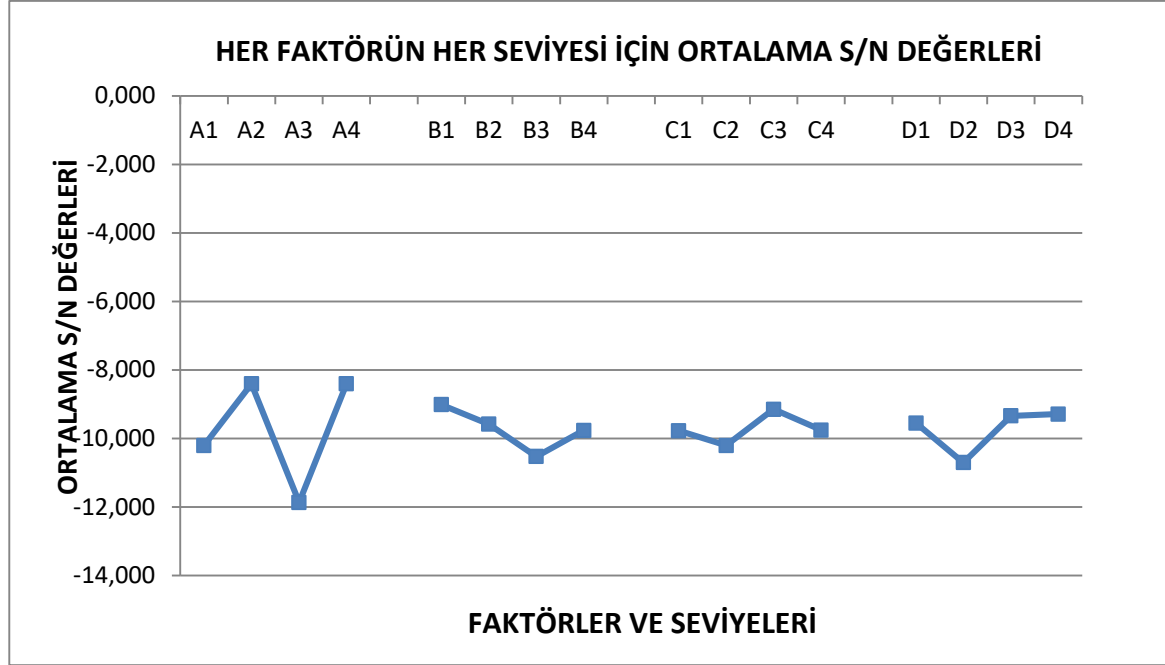
Ardından her faktörün her seviyesi için ortalama S/G değerleri hesaplandı. Parametremiz için büyük “aralık” değeri süreçteki en büyük etkiye sahip faktörü gösterir. Büyük S/G değeri küçük S/G değerinden çıkarılarak “aralık” bulunur.



Şekil 4.13: Her faktörün her seviyesi için ortalama S/G değeri ve her faktörün aralık değeri

Şekil 4.13'te tüm deneylerin her faktörleri için S/N değerlerine baktığımızda en uzak iki değerin karşılaştırılmasıyla en fazla etki eden faktörün açık bir şekilde sıcaklık olduğu görülmektedir. En iyi malzeme için en iyi seçim $A_4B_1C_3D_1$ kombinasyonudur. Bu seçime en yakın olarak 14 nolu kombinasyonu $A_4B_2C_3D_1$ seçebiliriz.

Genel sonuçlara baktığımızda ağırlık kaybı ve basınç kaybı yüzdeleri genel sonuçlara S/G oranları çok fazla olduğu için çok fazla derecede etki etmiştir. Bu sebeple bu iki deney olmadan da genel sonuçlara bakarsak şu sonuçlar elde edilir.



Şekil 4.14: Her faktörün her seviyesi için ortalama S/G değeri ve her faktörün aralık değeri

Şekil 4.14'ten deneylerin her faktörleri için S/N değerlerine baktığımızda en uzak iki değerin karşılaştırılmasıyla en fazla etki eden faktörün açık bir şekilde kür malzemesi olduğu görülmektedir. En iyi malzeme için en iyi seçim $A_2B_1C_3D_4$ kombinasyonudur. Bu seçime en yakın olarak 9 nolu kombinasyonu $A_3B_1C_3D_4$ seçebiliriz.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kullanılan dolgu malzemelerinin Türkiye'nin geri dönüşümlü yenilikçi malzeme olan taban külü ile doğal kaynağı olan perlit gibi ürünler olması kazanımlar ve yerel kaynakların kullanımına teşvik açısından önemlidir. Ülkemizde geri dönüştürülmüş beton malzemeler yeni malzeme üretimlerinde kullanılmamaktadır.

Atık malzemelerin tüketilmesi oldukça büyük bir çevre sorunu olup ürününün değerlendirecek olmasının yanında çevre kirliliğine yol açan bir madde de bertaraf edilmiş olacaktır.

Geliştirilecek ürün çimento sanayinde talep olmadığı için nadir üretilen alüminli çimentonun kullanımını yaygınlaştıracaktır. Bu ürünler ve üzerine ülkemizde çokça çalışma yapılmış olmasına rağmen kullanımı pek düşünülmeyen yine termik santral yan ürünü olan taban külü için önemli bir kullanım sahası oluşturulabilir, hatta bu sayede bu ürünlerin diğer alanlarda da kullanımları gündeme gelecektir.

Türkiye perlit dünya rezervinin önemli kısmına sahiptir ve bunlar volkanik kökenli oldukları için sıcaklığa dayanıklı malzemelerdir. Üretilecek yenilikçi prototipte kullanılan tüm ürünler yanmaz olup, sıcaklığa dirençlidirler. Türkiye'de bu tür malzemeler az önemsenen yangın bilincinin de artmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmada günümüzde en büyük sorunlardan biri olan çevre sorununun çözümüne katkıda bulunabilmek adına hem termik santral hem de atık yakma tesisi atığı olan taban külünün, dünyanın en önde gelen üreticilerinden olduğumuz perlitin ve beton atıklarının değerlendirilerek geri dönüştürülmüş agrega olarak inşaat sektörü alanında değerlendirilmesi ve geri dönüşümü sağlanmıştır. Deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Eğilme dayanımında; perlit geliştirildiğinde hacimce boşluklu bir yapı kazanmış ve bu durum mukavemetini negatif yönde etkilemiştir, fakat taban külü ile karıştırılarak kullanılmış olan perlit düşünülenin aksine mukavemet değerinde düşüşe sebep olmamıştır. Deney sonuçlarına göre su/çimento (S/Ç) oranının diğer numunelere göre dengede ve ya daha az seviyede olmasıyla birlikte; perlit/tabak külü (P/TK) oranının diğerlerine göre daha fazla olması sayesinde eğilme dayanımları daha yüksek çıkmıştır.
- Çimento miktarı aşağı yukarı sabit tutulduğunda P/TK oranının azalması ve S/Ç oranının artması basınç dayanımını artırmıştır. Hacimce boşluklu bir yapıya sahip olan perlit ve dayanım açısından istenilen özelliğe sahip olmayan taban külünün birlikte kullanılması basınç değerlerinde olumlu bir etki göstermiştir.
- Çimento miktarı sabitken S/Ç ve P/TK oranı oranlarındaki artış harcın kuru ağırlığını düşürmektedir. Perlitin boşluklu yapısı malzemeye hafiflik özelliği kazandırmıştır.

- Numunelerin su emme yüzdesi P/TK oranı içeriği arttıkça düşmüştür. Perlitin boşluklu yapısı malzemenin su emme özelliğini azaltarak olumlu bir katkı sağlamıştır.
- Çimento miktarı ile P/TK oranı içeriğinin artması kılcal su emme yüzdesinde azalmaya neden olmuştur. Perlitin boşluklu yapısı kılcal su emmede de olumlu yönde etki etmiştir.
- P/TK oranının ve S/Ç oranının artışı ile ısı iletkenlik katsayısı λ değerinde önemli bir düşüş olduğu görülmüştür. Perlitli ve taban küllü harç malzemesinin ısı yalıtım performans değerlerinin oldukça iyi olduğu anlaşılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince özellikle Taguchi Metodunun uygulanma ve değerlendirme aşamalarında her türlü desteği sağlayan Sayın Doç. Dr. Kasım BAYNAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Proje çalışmaları boyunca yazım, çalışma ve Taguchi değerlendirme konularında çalışan yüksek lisans öğrencim Onur FİDAN başta olmak üzere, yüksek lisans öğrencilerim Şeyma KESKİN ve Erman BABA'ya da çok teşekkür ederim.

Başta projemizi destekleyen Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine, o dönemde Rektör Yardımcısı hocamız Sayın Prof. Dr. Bekir ÇAKIR'a, Bilimsel Araştırmalar Şube Müdürü Yüksel GÜNAYDIN'a, laboratuvarımızın daha önceki geliştirme aşamalarında Rektör Yardımcılığı döneminde en büyük desteği veren hocamız Sayın Prof. Dr. Arif DEMİR'e de minnettar olduğumu da bildiririm.

KAYNAKLAR

1. Gürer, C., Akbulut, H., & Kürklü, G. (2004). İnşaat endüstrisinde geri dönüşüm ve bir hammadde kaynağı olarak farklı yapı malzemelerinin yeniden değerlendirilmesi. V. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu. İzmir.
2. Ölmez Ö., Tehlikeli Atık Yakma Tesisi Taban Küllerinin Beton Hammaddesi Olarak Kullanılması İle Bertaraf Edilmesinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
3. Canpolat F. K. Köse M. M., Sümer M., Yurdusev M. A., Use of Zeolite, Coal Bottom Ash and Fly Ash in Cement Production, Cement and Concrete Research, 2004, 34(1), 731-735.

4. Baker N. Steemers K. 2000, Energy and environment in architecture, 2nd ed. E & FN Spon, London and New York, 2000.
5. Savaş Ö, Atık Betonların Geri Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
6. Tu, T. Y., Chen, Y. Y., & Hwang, C. L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. Cement and concrete research, 36(5), 943-950.
7. Rakshvir, M., & Barai, S. V. (2006). Studies on recycled aggregates-based concrete. Waste Management & Research, 24(3), 225-233.
8. Mehtap. K. Concrete. Structure, Properties and Materials, 1rd ed, Incorporated Prentice-Hall, New Jersey USA, 1986.
9. Çobanlı M. R. Isı Direnci Yüksek Hafif Yapı Malzemesi Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1993.
10. Vikas R. N. Sanjith J. Ranjith A., Kiran B. M., Bottom Ash as Partial Sand Replacement in Concrete- A Review, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 2015, 12(2), 148-151.
11. Toprak M. U. Termik Santral Taban Küllerinden Alkali Aktivasyon ile Geopolimer Üretilmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2011.
12. Hurst J. V, Styron W. R. Fly Ash Beneficiation process, 1978, U. S. Patent No. 4,121,945., U.S. Patent and Trademark Office.
13. Bittner J. D. Dunn T. M., Hrach J., Frank J., Method and Apparatus for Separating of Unburned Carbon from Fly Ash, 2000, U. S. Patent No. 6,074,458., U.S. Patent and Trademark Office.
14. Kurama H. Kaya M., Usage of Coal Combustion Bottom Ash in Concrete Mixture, Construction and Building Materials, 2008, 22(9), 1922-1928.
15. Topçu İ.B. Kurama H. Karakurt C. Gazbeton Üretiminde Taban Külünün Kullanımı, Çimento ve Beton Dünyası, 2007, 68(1), 56-65.
16. Kara İ. Seyitömer Uçucu Külünün Farklı Yapı Malzemeleri Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2008.
17. Alataş T. Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1996.
18. Hewlett P. C. 2004, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4rd ed., Butterworth-Heinemann, England, 2004.

19. ACI Comittee 226, Use of Fly Ash in Concrete, ACI Materials Journal, 1987, 84(5), 381-409.
20. Tikalsky P. J. Carraquillo R. L, Influence of Fly Ash on Sulphate Resistance of Concrete, ACI Materials Journal, 1992, 89(1), 69-75.
21. Aruntaş H. Y. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2006, 21(1), 193-203.
22. Özel İhtisas Komisyonu, Onuncu Kalkınma Planı (2014-2018) Madencilik Politikaları Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 1rd ed, T.C. Kalkınma Bakanlığı KB: 2926-ÖİK: 753, Ankara, 2015
23. Büyükçulha I. 1987 Perlit Katkısının Pişmiş Toprak Malzemenin Mekanik ve Fiziksel Davranışlarına Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
24. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Metal Madenler Alt Komisyonu Bakır-Pirit Çalışma Grubu, 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 1rd ed., Devlet Planlama Teşkilatı DPT: 2627-ÖİK: 638, 2001.
25. Okuyucu E., Farklı Lif Katkılı Hafif Betonların Bazı Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2005.
26. Hodul, Y. (2009). Genleştirilmiş Perlit Üretimi Sanayii Profili, Sanayii ve Ticaret Bakanlığı, Sanayii Araştırma ve Geliştirme Genel Müdürlüğü, Ankara.
27. Akıncı, H. (2007). Today's thermal insulation materials applied, their properties, application techniques and cost analysts, Master Thesis, Department of Construction Education, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
28. MTA Genel Müdürlüğü, Türkiye Perlit Envanteri, 1rd ed., MTA Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, 1985.
29. Önem Y. Sanayi Madenleri, 2rd ed., Kozan Ofset, Ankara, 2000.
30. Yalgın S. 1983, İnşaat Sektöründe Genleşmiş Perlit Kullanımı, Etibank Matbaası, Ankara.
31. Tanaçan I. 1993, Hafif Duvar Tuğlası Üretiminde Perlit Ve Bazı Katkıların Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
32. Gökhan Ç. 1997, İnşaat Malzemesi Olarak Perlit, 1. Ulusal Perlit Kongresi, Ankara.
33. Melike Sucu, Tuğhan Delibaş, Kalsiyum Alüminat Çimentosu Bazlı Tamir Betonları, Hazır Beton Dergisi, Sayfa 94, Eylül 2015
34. <http://emlakansiklopedisi.com/wiki/aluminli-cimento>
35. CEN/TC 51 N 645, Report of CEN/TC 51 W6 6 T6 1: Calcium Aluminate Cement, Krakow. 2000.

36. Lanzo'n M., Garc'a-Ruiz P. A., Lightweight Cement Mortars: Advantages and Inconveniences of Expanded Perlite and Its Influence on Fresh and Hardened State and Durability, *Construction and Building Materials*, 2008, 22(8), 1798–1806.
37. Yılmaz S., Özdeniz M. B., The Effect of Moisture Content on Sound Absorption of Expanded Perlite Plates, *Building and Environment*, 2005, 40(3), 311–318.
38. Sağsöz A .E., Farklı Kür Şartlarının Doğal Perlit Agregalı Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2007.
39. Demirboğa R., Gül R., The Effects of Expanded Perlite Aggregate, Silica Fume and Fly Ash on The Thermal Conductivity of Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Research*, 2003 a, 33(5), 723-727.
40. Demirboğa R., Örüng I., Gül R., Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on The Compressive Strength of Low-Density Concretes, *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(11), 1627-1632.
41. Demirboğa R., Gül R., Thermal Conductivity and Compressive Strength of Expanded Perlite Aggregate Concrete With Mineral Admixtures, *Energy and Buildings*, 2003 b, 35(11), 1155-1159.
42. Bilir T., Harçlarda Endüstriyel Yan Ürün veya Atıkların İnce Agrega Olarak Kuruma Rötresi Çatlaklarına Etkisi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010, 283100.
43. Sengül O., Azizi S., Karaosmanoglu F., Tasdemir M. A., Effect of Expanded Perlite on The Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Lightweight Concrete, *Energy and Buildings*, 2011, 43(2), 671–676.
44. Doğan H., Şener F., Hafif Yapı Malzemeleri (Pomza – Perlit – Ytong - Gazbeton) Kullanımının Yaygınlaştırılmasına Yönelik Sonuç ve Öneriler, Jeoloji Mühendisleri Odası, [http://www.jmo.org.tr>resimler>ekler](http://www.jmo.org.tr/resimler>ekler), (Ziyaret Tarihi:15 Aralık 2015).
45. Topçu I. B., Isıkdağ B., Effect of Expanded Perlite Aggregate on the Properties of Lightweight Concrete, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 204(1), 34–38.
46. Odabaş E., Fosfojips ve Perlit Katkılı Sıvaların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Deneysel Tasarım Yöntemi ile İncelenmesi (an Examination of The Mechanic and Physical Properties of Phosphospho-Gypsum and Pearlite Mixed Plaster Through Experimental Design Method), Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2012.
47. Çelik A. G., Kılıç A. M., Akkurt F., Yapı Malzemesi Üretiminde Genleştirilmiş Perlit Agregası Kullanılabilirliğinin Araştırılması (Investigation of Availability of Expanded Perlite in the Production of Construction Material), *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi (Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University)*, 2014, 29(3), 451-458.

48. Benk A., Coban A., Possibility of Producing Lightweight, Heat Insulating Bricks From Pumice and H_3PO_4 or NH_4NO_3 Hardened Molasses Binder, *Ceramics International*, 2012, 38(3), 2283-2293.
49. Bozkurt N., The Effect of High Temperature on Concrete Containing Perlite Powder, *SDU International Technologic Science*, 2013, 5(1), 87-93.
50. Jaturapitakkul C., Kraiwood K., Vanchai S., Teerarach L., Use of Ground Coarse Fly Ash as a Replacement of Condensed Silica Fume in Producing Highstrength Concrete, *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(4), 549-555.
51. Kurama H., Kaya M., Usage of Coal Combustion Bottom Ash in Concrete Mixture, *Construction and Building Materials*, 2008, 22(9), 1922-1928.
52. Shakir A. A., Mohammed A. A., Manufacturing of Bricks in The Past in The Present and in The Future: A State of The Art Review, *International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS)*, 2013, 2(3), 145-156.
53. Chindaprasirt P., Nuaklong P., Zaetang Y., Sujumnongtokul P., Sata V., Mechanical and Thermal Properties of Recycling Lightweight Pervious Concrete, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(2), 443-450.
54. Montgomery D. C., *Design and Analysis of Experiment*, 7rd ed., John Wiley & Sons, Inc., Newyork, 2009.
55. Çebi C. H., Kutay F., Taguchi Metodu: Bir Uygulama, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi, 2003, 6(3-4), 7-17.
56. Taguchi G., *System of Experimental Design*, 1rd.ed., White Plains, Dearborn, 1991.
57. Şirvancı M., *Kalite İçin Deney Tasarımı*, 2rd ed., Literatür Yayınları, İstanbul, 1997.
58. Ross P. J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 1rd ed., McGraw-Hill, Newyork, 1989.
59. Canıyılmaz E., *Kalite Geliştirmede Taguchi Metodu ve Bir Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2001, 114660.
60. Fraley, S., Oom, M., Terrien, B., & Date, J. Z. (2006). Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays. The Michigan chemical process dynamic and controls open text book, USA, 2(3), 4.
61. Erbaş S. O., Olmuş H., *Deney Düzenleri ve İstatistik Analizi*, 1rd ed., Gazi Kitabevi, Ankara, 2006.
62. Tosun N., Ozler L., Optimisation for Hot Turning Operations with Multiple Performance Characteristics, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 23(11), 777-782.

63. Bozkurt N., The Effect of High Temperature on Concrete Containing Perlite Powder, SDU International Technologic Science, 2013, 5(1), 87-93.
64. Saat M., Kalite Denetiminde Taguchi Yaklaşımı, Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2000, 2(3), 97–108.
65. Peace G. S., Taguchi Methods: A Hands-On Approach, 1rd ed., Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1993

Internal Curing and Temperature Effect on Lightweight and Heat Insulated Mortar with Recycled Concrete Aggregate

S.T. YILDIRIM^{a,*}, K. BAYNAL^{b,c} AND O. FIDAN^a

^aKocaeli University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, 41380 Kocaeli, Turkey

^bKocaeli University, Engineering Faculty, Department of Industrial Engineering, 41380 Kocaeli, Turkey

^cKyrgyz-Turkish Manas Univ., Fac. of Economics and Manag., Dep. of Manag., Bishkek, Kyrgyzstan

One of the best methods of waste recycling in the construction sector is to employ it in concrete or mortar preparation. In this study, recycled concrete aggregate and bottom ash were used as aggregates in the mortar. Additionally, expanded perlite which is a material providing lightness, heat insulation and fire resistance, was also used as aggregate. Calcium aluminate cement was preferred as binder to improve fire resistance. Results were obtained and evaluated in terms of flexural and compressive strength, dry unit weight, water absorption, capillarity, thermal conductivity, thermal resistance and cost by following a Taguchi method to internal curing, cement quantity and aggregate ratio as parameters.

DOI: [10.12693/APhysPolA.135.865](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.135.865)

PACS/topics: mortar, recycled concrete aggregates, bottom ash, expanded perlite, calcium aluminate cement, Taguchi method

1. Introduction

The most frequently used material in the construction sector is mortar. The mortar is an advantageous material to produce concrete, plaster and some wall materials. The obtained insulation materials, different from concrete, is sought for lightness and insulation properties [1]. Moreover, fireproofing is also a desirable feature in new types of building materials [2]. For this purpose, basic mortar binders such as cement and lime can be used as well as products such as generalized perlite and thermal power plant waste [3]. The expanded perlite (P) is a favorable material in terms of water retention, a negative material in terms of water absorption, capillary, permeability and mechanical properties [4]. Especially in terms of the reduction of thermal conductivity, perlite is a material which is preferably used and can significantly reduce the value of thermal conductivity by reducing unit weight of mortar [5–7]. In addition, perlite is one of the preferred materials in making refractory material with calcium alumina cement (CAC), known as fireproof [8]. Bottom ash (BA), which is the waste from thermal power plants of still not sufficiently widespread use, is the material that can enhance heat insulation in mortars thanks to its lightweightness and hollow structure [9]. This material is harmless for health and is used as replacement to cement or aggregate in mortar. Although it has a negative effect on the strength, it can provide the economy in term of sustainability and recycling [10].

In experimental studies, it is possible to take advantage of the Taguchi method in order to reduce specimen numbers and achieve more precise, detailed and optimal results with fewer specimens. The method is based on the principle of minimal experimentation to keep the costs as low as possible. This method is effective in improving the quality of the products and provides better results with less experimentation [11, 12].

Besides the waste products such as recycled concrete aggregate (RA) and bottom ash, a natural, light and insulating aggregates, such as perlite, are also utilized in the study. All of these materials are strongly water-absorbing materials, so the internal curing (IC) method is utilized. Furthermore, these aggregate products, which are highly fireproof, have been developed as a binder by utilizing calcium alumina cement as a component of the composition. Different types of experimental castings were made according to the test pattern that was created according to the Taguchi method; physical and mechanical experiments, flexural and compressive strength, dry unit weight, water absorption, capillary water absorption, temperature resistance, heat insulation tests have been completed and cost calculated.

2. Experimental design

In the experimental study, calcium aluminate cement was used as a binder, and expanded perlite, bottom ash and recycled concrete aggregate as aggregate and filler material.

Some of the physical, chemical and mechanical properties of applied CAC, BA and P are given in Table I. The density of RCA was found as 2.4 g/cm³. Water absorption of RCA, BA and P were 5.6%, 123% and 32.4%, respectively. In Table II, granulometry of all aggregate

*corresponding author; e-mail: styildirim@kocaeli.edu.tr

materials and aggregate mixtures are given according to the rates used in the design of the Taguchi method (levels of parameter C).

Table III shows the specified parameters and levels for Taguchi method. According to the Taguchi method for 3 parameters and 4 levels, the optimal result among the $4^3 = 64$ possible designs were limited to 16 types of designs. L16' pattern was used in the study (Table IV). The parameter 4 (D) was only used to detect decrease in the compressive strength with the temperature effect and is shown in the dark color in Table III and Table IV. Parameter 4 was not used in tests except for decrease in compressive strength (%) and other test results were found based on 4 levels of the first 3 parameters in Table IV. The average values for all test results are shown in Table IV. All results except for the cost are given as average of three specimens.

Abundant water-absorbing materials; P, BA and RA were used as IC material in the first three levels of IC of the parameters (A), curing was not done in level 4. The second parameter (B), the dosage of cement, was determined as 150, 175, 200 and 225 kg for 1 m³ mortar.

The aggregates used in the C parameter was volumetric in the mixture. According to this, each aggregate rate of the first 3 levels was considered to be 2 times the others and P, BA and RA rates in the last level were taken as equal.

TABLE I

Chemical, physical and mechanical properties of cement, perlite and bottom ash.

Properties	Materials		
Chemical analysis	CAC	P	BA
SiO ₂	3.60	71.3	57.76
Al ₂ O ₃	39.8	14.7	23.32
Fe ₂ O ₃	17.05	0.43	7.52
CaO	36.2	1.20	2.06
MgO	0.65	0.56	1.72
SO ₃	0.04	–	0.38
TiO ₂	–	–	1.12
Na ₂ O	–	6.10	0.64
K ₂ O	–	3.40	1.99
loss on ignition	0.30	–	3.16

The granulometry of aggregate materials and their mixtures.

TABLE II

Sieve size [mm]	RA	BA	P	2P:1BA:1RA	1P:2BA:1RA	1P:1BA:2RA	1P:1BA:1RA
8	100	100	100	100	100	100	100
4	56	99	100	89	89	78	85
2	30	97	71	67	74	57	66
1	19	92	32	44	59	40	48
0.5	11	76	18	31	45	29	35
0.25	5	41	11	17	25	16	19
0.15	5	11	8	8	9	7	8
0.063	1	2	4	3	2	2	2
0	0	0	0	0	0	0	0

TABLE III

The specified parameters and levels for Taguchi method.

A — Internal curing, B — Cement dosage [kg/m³],

C — Aggregate ratio, D — Temperature [°C].

Parameters	Levels			
	1	2	3	4
A	P	BA	RA	–
B	150	175	200	225
C	2P:1BA:1RA	1P:2BA:1RA	1P:1BA:2RA	1P:1BA:1RA
D	20	300	600	900

D parameter shows the temperature levels of the furnace where the materials were exposed. Materials were in the room temperature in the first level and was not put into the furnace. At the other three levels, the materials were kept in the oven at a temperature of 300, 600 and 900 °C for 6 hours. The furnace temperatures were increased to 300, 600 and 900 °C after 1, 2 and 3 hours, respectively. After 6 hours of heating the specimens, the furnace was turned off. Then, the furnace lid was opened, and the specimens were kept until the cooling to the room temperature.

Flexural tests were carried out on prismatic specimens of 40 × 40 × 160 mm. Cube compressive strength was measured on 40 × 40 × 40 mm section of the divided prism used in the flexural test. In order to find a decrease in compressive strength with temperature, compressive strength test was performed on the same type of 50 × 50 × 50 mm specimens before firing and after firing, and loss percentage of the strength was calculated.

After 40 × 40 × 160 mm prismatic specimens were kept in drying oven for 24 hours, their dry density were determined as by proportioning the weight to volume ratio of the sample. According to EN 1015-18 [13], the oven dry prismatic were cut into two equal parts (40 × 40 × 80 mm) and the cut-off surfaces were contacted with water to determine the capillary water absorption percentage after 90 minutes. Square plates with dimensions of 330 × 330 × 50 mm were subjected to thermal conductivity test according to EN 12664 [14] and thermal conductivity coefficients were calculated. Considering the costs of aggregate and cement materials, only 1 m³ cost analysis was performed on the materials.

L16' experimental plan and results for Taguchi method.

TABLE IV

Experiment	Parameters and their levels				Compressive strength [MPa]	Flexural strength [MPa]	Decr. of comp. Str. [%]	Dry unit weighth [g/cm ³]	Water absorption [%]	Capillarity [%]	Thermal conduct. [W/m.K]	Cost [Euro/m ³]
	A	B	C	D								
1	1	1	1	1	0.31	0.23	1.01	1.01	40.0	20.5	0.12	18.7
2	1	2	2	2	0.44	0.12	1.06	1.06	36.7	17.3	0.13	12.9
3	1	3	3	3	0.36	0.12	1.21	1.21	24.7	13.3	0.17	13.6
4	1	4	4	4	0.68	0.20	1.20	1.20	30.6	24.0	0.16	16.5
5	2	1	2	3	0.58	0.24	1.01	1.01	37.2	13.4	0.11	12.1
6	2	2	1	4	0.63	0.21	0.82	0.82	46.3	11.9	0.16	19.4
7	2	3	4	1	0.67	0.21	0.99	0.99	36.9	11.4	0.10	15.8
8	2	4	3	2	0.75	0.25	1.23	1.23	29.6	11.9	0.12	14.4
9	3	1	3	4	0.60	0.24	1.21	1.21	26.0	19.0	0.19	12.1
10	3	2	4	3	0.49	0.23	0.97	0.97	38.8	30.2	0.14	15.0
11	3	3	1	2	0.25	0.1	0.76	0.76	48.3	47.1	0.14	20.1
12	3	4	2	1	0.47	0.12	0.89	0.89	43.1	34.9	0.15	14.4
13	4	1	4	2	0.51	0.16	0.97	0.97	41.9	24.2	0.11	14.3
14	4	2	3	1	0.74	0.23	1.28	1.28	25.5	13.7	0.12	12.8
15	4	3	2	4	0.90	0.24	0.93	0.93	47.1	20.7	0.13	13.6
16	4	4	1	3	1.16	0.33	0.99	0.99	39.0	23.2	0.11	20.7

3. Results and discussion

While it is aimed to obtain high values of compressive strength and flexural strength results from experiments, it is required to avoid small values of results because insignificant experiments are time-consuming and costly. S/N ratios were calculated for each experiment. According to the performance statistics calculated from the S/N ratios, each experiment was evaluated and optimum levels and optimal values in these levels were found (Table V). The overall evaluation was made by taking averages of 8 different criteria with high S/N ratios. Figure 1 gives the relationship between performance statistic parameters. It shows parameters and levels for S/N ratio values of each experiment.

- *Compressive strength.* Composite mortar material with the highest amount of CAC (225 kg/m³) without IC, in which BA is used more as aggregate has emerged as the combination that will achieve the highest performance. A-IC parameter is dominant, followed by B-Cement dosage and C-Aggregate ratio, respectively. The increase in cement amount increases strength.

- *Flexural strength.* The specimens without IC, the CAC dosage of 150 kg/m³, 2P:1BA:1RA as aggregate ratio gave the highest result. A, C, and B have been effective on this feature, respectively.

- *Decrease of compressive strength.* The optional temperature parameter has played the most important role in the decrease of compressive strength. However, it was analyzed how the other three parameters change because the temperature parameter is only used for this test. IC condition, the cement dosage (150 kg/m³) and the aggregate ratios (2P: 1BA: 1RA) are effective, respectively. Despite the weakest parameter, it is expected that the

Optimum levels obtained from parameters and optimal values in these levels.

TABLE V

Parameters		A	B	C
comp. strength	opt. level	4a	4b	2c
	opt. value	—	225	1P:2BA:1RA
flex. strength	opt. level	4a	1c	1b
	opt. value	—	150	2P:1BA:1RA
decr. of com. str.	opt. level	4a	1b	1c
	opt. value	—	150	2P:1BA:1RA
dry unit weighth	opt. level	3b	3c	1a
	opt. value	RA	200	2P:1BA:1RA
water absorption	opt. level	1b	4c	3a
	opt. value	P	225	1P:1BA:2RA
capillarity	opt. level	2a	2c	3b
	opt. value	BA	175	1P:1BA:2RA
thermal conduct.	opt. level	4a	1c	4b
	opt. value	—	150	1P:1BA:1RA
cost	opt. level	4c	1b	2a
	opt. value	—	150	1P:2BA:1RA
general	opt. level	4b	4c	1a
	opt. value	BA	225	2P:1BA:1RA

a — the most effective parameter, b — the second effective parameter, c — the third effective parameter

resistance of the composite mortar to the temperature increases with the increase of the P ratio. In addition, keeping CAC at the lowest level gives better result although it is fire resistant. Less use of the CAC has resulted in an increase in the spacing, which makes the material more resistant to heat.

- *Dry unit weight.* As expected, the increasing use of the lightest material P in mortar has had the greatest

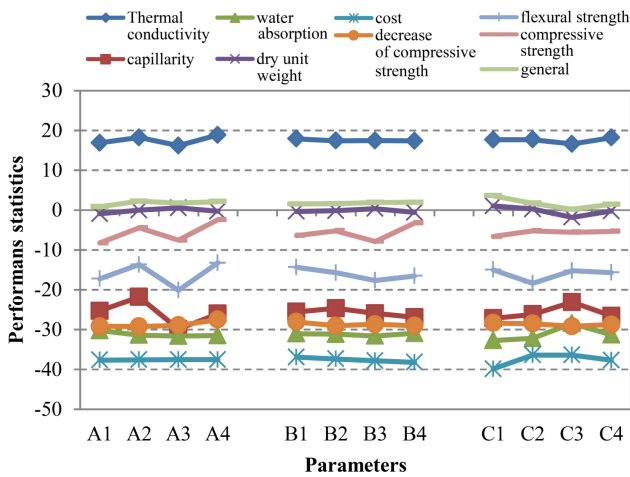


Fig. 1. Parameters and levels for S/N ratio values of each experiment.

impact on unit weight reducing the weight. After that, IC of RA and a 200 kg/m^3 cement dosage are effective on dry unit weight, respectively.

- *Water absorption.* The P material which has much water absorption, absorbs less mixture water when IC is done, so the water absorption rate of the composite decreases. At the same time, when RA having the least water absorption potential is used more than the other aggregates, the water absorption is decreased in the mortar and this is the most effective parameter. CAC reduced water absorption as it filled more voids at the highest dosage (225 kg/m^3).

- *Capillarity.* The effect of the IC material in the capillarity is very high and a lower capillarity value is achieved with BA. The second most effective parameter is the aggregates ratio, the best result is provided by the higher amount of RA absorbing less water. The lower amount of cement reduces the amount of capillary cracks by the formation of lower heat during the reaction.

- *Thermal conductivity.* Thermal conductivity decreases at the lowest amount of CAC and without IC. This is an expected result because the material that increases the thermal conductivity the most is cement. On the other hand, the lack of IC has a positive effect on the thermal conductivity reducing the amount of water in the internal micropores and it is the most effective parameter. The increase in BA here provides a better (less) thermal conductivity value. A similar finding is found in the study of Keskin and Yildirim (2016) and granulometric combination is effective [9].

- *Cost.* In the cost analysis, the aggregate ratio is the most effective parameter and the combination of high rate of free available RA in the mortar is successful. Here P is the most expensive of all materials. Cement dosage is successful in the lowest amount of cement dosage, 150 kg/m^3 because cement is an other expansive material in this composite. In addition, there is no IC effect.

- *General.* Aggregates ratio are the most effective and a high P ratio gives the most significant results. In addition, it is concluded that BA as IC material and highest dosage in the mortar of cement gives the best results.

4. Conclusion

Series of 16 specimens was subjected to the experiments. The results obtained for 4 levels of 3 parameters according to Taguchi method can be summarized as follows:

1. it has been found that IC does not have enough positive effect on mortars. It is thought that the cement type choice is quite effective. The process of obtaining the strength for CAC is fairly rapid. It is likely that water has had a negative effect rather than positive. It is thought that the IC water should have increased the amount of the mixing water. However, among these aggregates, BA, which on average absorb only 32.4% of the water, as compared to P and RA, should have had a better effect in the IC. As a matter of fact, it is the type of curing that gives the best result;
2. the increase in the amount of CAC has a positive effect because cement dosage in the mortars is kept low. Therefore, the increase in CAC is thought to have a positive effect in many experiments;
3. aggregate materials ratio, an important parameter, indicates that the materials used influence experimental performance in the direction of their own properties. As an example, it can be shown that the increase in the rate of RA, which absorbs less water, reduces water absorption and capillarity, or the increase in P, which is more resistant to temperature in the aggregate, reduces the decrease in strength at high temperatures. The high temperature performance of perlite and the use of CAC makes it possible to produce mortars up to 900°C . In addition, the presence of materials such as perlite and BA abolishes the need to use more CAC for increase of fire endurance.

In this study, CAC has a negative effect on IC but a positive effect on temperature durability due to the fact that it is a special type of cement. In addition, the amount and type of cement, admixtures, and pozzolana can be investigated. The aggregate materials used can be replaced or added with light materials such as pumice aggregates, which are highly preferred in the market.

Acknowledgments

The authors are grateful to "Kocaeli University Scientific Researches Project Organization" for supporting the study with a project (BAP-2015/24).

References

- [1] V. Corinaldesi, J. Donnini, A. Nardinocchi, *Con. Build. Mat.* **94**, 337 (2015).
- [2] S. Aydın, *Fire Saf. J.* **43**, 610 (2008).
- [3] S.T. Yildirim, E. Kiraz, *Cement Wapno Beton* **18**, 169 (2013), (in Polish).
- [4] M. Lanzo'n, P. A. Garc'a-Ruiz, *Con. Build. Mat.* **22**, 1798 (2008).
- [5] R. Demirboğa, R. Gül, *Cement Conc. Res.* **33**, 723 (2003).
- [6] R. Demirboğa, I. Örüng, R. Gül, *Cement Conc. Res.* **31**, 1672 (2001).
- [7] O. Sengül, S. Azizi, F. Karaosmanoglu, M.A. Tasdemir, *En. Build.* **43**, 671 (2011).
- [8] W. Zhang, W. Dai, X. Li, *Heat Treat.* **3**, 9 (2011).
- [9] F. Ş. Keskin, S.T. Yildirim, *El-Cez. J. Sci. Eng.* **3**, 91 (2016) (in Turkish).
- [10] Ö. Ölmez, M.Sc. Thesis, Hacettepe Univ., Nat. Appl. Sci. Inst., İstanbul 2010 (in Turkish).
- [11] E. Canıyılmaz, M.Sc Thesis, Gazi Univ., Nat. Appl. Sci. Inst., Ankara 2001 (in Turkish).
- [12] İ. Türkmen, R.Gül, C. Çelik, *Build. Env.* **43**, 1127 (2008).
- [13] EN 1015-18, *Methods of test mortar for masonry — Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, European Committee for Standardization, 2002.
- [14] EN 12664, *Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods*, European Committee for Standardization, 2002.