KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PERLİT VE TABAN KÜLÜ KATKILI HARÇ ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHİ DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

FATMA ŞEYMA KESKİN

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PERLİT VE TABAN KÜLÜ KATKILI HARÇ ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHİ DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

FATMA ŞEYMA KESKİN

Yrd.Doç.Dr. Salih Taner YILDIRIM
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Doç.Dr. Metin İPEK
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv. .....

Doç.Dr. Kasım BAYNAL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....



Tezin Savunulduğu Tarih: 19.02.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince her türlü bilgisini ve tecrübesini paylaşan, her türlü desteği sağlayan, deney programlarını belirleyen, deney malzemelerinin ve araçlarının teminini sağlayan saygı değer hocam Yrd. Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Özellikle Taguchi Metodu ile yapılan deneysel çalışmaların değerlendirilmesi kapsamında oldukça büyük destek veren ve bilgisini esirgemeyen Doç. Dr. Kasım Baynal'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca maddi manevi yardımlarını esirgemeyen sevgili aileme ve laboratuar çalışmalarında bana yardımcı olan öğrenci arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Şubat - 2016 Fatma Şeyma KESKİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Perlit 3
1.1.1. Perlitin genel özellikleri 3
1.1.2. Perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri 4
1.1.2.1. Perlitin fiziksel yapısı 4
1.1.2.2. Perlitin kimyasal bileşimi 6
1.1.3. Perlit rezervleri ve kullanım alanları 8
1.2. Taban Külü 13
1.2.1. Taban külünün genel özellikleri 13
1.2.2. Taban külünün kimyasal bileşimi 14
1.2.3. Taban külünün elde edilmesi 15
2. KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 18
3. MATERYAL VE YÖNTEM 27
3.1. Kullanılan Malzemeler 27
3.1.1. Perlit 27
3.1.2. Taban külü 27
3.1.3. Çimento 29
3.2. Taguchi Metodu 29
3.3. Varyans Analizi 32
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER 35
4.1. Kıvam-Yayılma 38
4.2. Eğilme Dayanımı 41
4.3. Basınç Dayanımı 44
4.4. Kuru Birim Ağırlık ve Su Emme 48
4.5. Kılcal Su Emme 54
4.6. Isı Yalıtımı 57
4.7. Regresyon Analizi 62
4.8. Deneysel Tasarım Analiz Sonuçları 63
4.9. Maliyetler 65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 67
KAYNAKLAR 71
EKLER 78
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 80
ÖZGEÇMİŞ 81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kayaç haldeki perlit (A), ham perlit (B) ve genleştirilmiş perlit (C) görünümü 5
Şekil 3.1. Kullanılan perlitler ve taban külü malzemelerinin elek analizi 28
Şekil 4.1. Akma masasında kıvam ölçümünün yapılışı 36
Şekil 4.2. Harç numunelerinin kalıplara yerleştirilmesi 37
Şekil 4.3. Harç numunelerinin kıvam-yayılma değerleri grafiği 38
Şekil 4.4. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin kıvam yayılma değerine % etkisi 41
Şekil 4.5. Harç numunelerinin eğilme dayanımlarının grafiği 42
Şekil 4.6. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin eğilme dayanımına % etkisi 44
Şekil 4.7. Harç numunelerinin basınç dayanımlarının grafiği 46
Şekil 4.8. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin basınç dayanımına % etkisi 48
Şekil 4.9. Harç numunelerinin kuru ağırlıklarının grafiği 49
Şekil 4.10. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin kuru ağırlığa % etkisi 51
Şekil 4.11. Harç numunelerinin ağırlıkça yüzde su emme değerlerinin grafiği 52
Şekil 4.12. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin su emmeye % etkisi 54
Şekil 4.13. Harç numunelerinin ağırlıkça yüzde kılcal su emme değerlerinin grafiği 55
Şekil 4.14. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin kılcal su emmeye % etkisi 57
Şekil 4.15. Hotbox metodu ile çalışan ısı yalıtım cihazı 58
Şekil 4.16. Harç numunelerinin ısıl iletkenlik katsayısı değerlerinin grafiği 60
Şekil 4.17. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin ısı yalıtımına % etkisi 61
Şekil 4.18. Su emme ve ısıl iletkenlik katsayılarının, kuru birim ağırlık ile grafiksel ilişkileri 62
Şekil 4.19. Her faktörün her seviyesi için ortalama S/N değerleri 64
Şekil A.1. F Tablosu 79

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Ham perlitin fiziksel özellikleri 6
Tablo 1.2. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri..... 6
Tablo 1.3. Tipik bir perlit mineralini oluşturan bileşikler..... 7
Tablo 1.4. Dünya işlenmiş perlit üretimi ve rezervleri 9
Tablo 1.5. 1999-2004 Türkiye'de perlit üretim miktarı.....11
Tablo 1.6. 2001-2004 Türkiye'de perlit tüketim miktarı.....11
Tablo 1.7. 2001-2005 Türkiye'de perlit ihracat miktarı 11
Tablo 1.8. 2001-2005 Türkiye'de perlit ihracat miktarı değer olarak 12
Tablo 1.9. 2006-2013 dönemine ilişkin Türkiye'de perlit ihracat projeksiyonu miktarı 12
Tablo 1.10. 2006-2013 dönemine ilişkin Türkiye'de perlit üretim projeksiyonu miktarı 12
Tablo 1.11. Uçucu kül ve taban külünün kimyasal kompozisyonları.....14
Tablo 1.12. Türkiye'deki kömür ve linyit ile çalışan termik santraller 15
Tablo 3.1. Perlitin kimyasal özellikleri.....27
Tablo 3.2. Taban külünün kimyasal özellikleri 28
Tablo 3.3. Kullanılan perlitler ve taban külünün yoğunluk ve gevşek birim ağırlık değerleri.....28
Tablo 3.4. Çimentonun kimyasal özellikleri 29
Tablo 3.5. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.....29
Tablo 3.6. Tek yönlü varyans analizi tablosu.....34
Tablo 4.1. Deneylerde her grup için kullanılan malzeme ağırlıkları.....35
Tablo 4.2. Uygulamada kullanılan parametreler ve seviyeleri.....36
Tablo 4.3. Seçilen L9(27) deney planı.....36
Tablo 4.4. Harç numunelerinin kıvam-yayılma değerleri.....38
Tablo 4.5. Harç numunelerine ait kıvam-yayılma S/G oranları 39
Tablo 4.6. Kıvam-Yayılma için Varyans (Anova) analizi sonuçları 40
Tablo 4.7. Harç numunelerinin eğilme dayanımları.....42
Tablo 4.8. Harç numunelerine ait eğilme dayanımlarının S/G oranları.....43
Tablo 4.9. Eğilme dayanımı için Varyans (Anova) analizi sonuçları.....44
Tablo 4.10. Harç numunelerinin basınç dayanımları.....45
Tablo 4.11. Harç numunelerine ait basınç dayanımlarının S/G oranları 47
Tablo 4.12. Basınç dayanımı için Varyans (Anova) analizi sonuçları 47
Tablo 4.13. Harç numunelerinin kuru ağırlıkları ve bulunan kuru birim ağırlıkları 49

Tablo 4.14. Harç numunelerine ait kuru ağırlık S/G oranları 50
Tablo 4.15. Kuru ağırlık için Varyans (Anova) analizi sonuçları 51
Tablo 4.16. Harç numunelerinin su emme yüzdeleri.....52
Tablo 4.17. Harç numunelerine ait su emme S/G oranları.....53
Tablo 4.18. Su Emme için Varyans (Anova) analizi sonuçları 53
Tablo 4.19. Harç numunelerinin kılcal su emme yüzdeleri 55
Tablo 4.20. Harç numunelerine ait kılcal su emme S/G oranları 56
Tablo 4.21. Kılcal Su Emme için Varyans (Anova) analizi sonuçları.....57
Tablo 4.22. Harç numunelerinin yalıtım (λ) ve birim hacim ağırlık (g/cm^3) değerleri 59
Tablo 4.23. Harç numunelerine ait yalıtım S/G oranları.....60
Tablo 4.24. Yalıtım için Varyans (Anova) analizi sonuçları 61
Tablo 4.25. Sinyal-gürültü (S/G, signal-to-noise) tablosu 63
Tablo 4.26. Her faktörün her seviyesi için ortalama S/G değeri ve her faktörün aralık değeri 64
Tablo 4.27. 3 nolu deney kominasyonu olan $A_1B_3C_3$ 'e ait deney değerleri tablosu.....65
Tablo 4.28. Her bir deney numune tipinin ve malzemelerinin maliyet miktarı.....65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Basınç uygulanan yüzey alanı, (mm^2)
A	: Ölçme alanı, (m^2)
b	: Harç numunesinin genişliği, (mm)
c	: Kılcallık katsayısı, ($g/cm^2.dk^{0.5}$)
D	: Numune kalınlığı, (m)
D	: Harç numunesinin yüksekliği, (mm)
df_T	: Grupların serbestlik derecesi
df_E	: Hatanın serbestlik derecesi
E	: Salım faktörü, (0,9)
F	: Kırılma anındaki yük, (N)
F	: Cismin su ile temas eden yüzey alanı, (cm^2)
$F_{hesaplanan}$	: Bir faktörün F testi değeri
h_r	: Radyasyon katsayısı, (W/m^2K)
H_0	: 0 numaralı hipotez
H_1	: 1 numaralı hipotez
İ	: Deney numarası
L	: Mesnet açıklığı, (mm)
m	: Emilen su miktarı (g)
N	: Toplam grup büyüklüğü
N_i	: i Deneyi için deneme numarası
n_i	: Grup büyüklüğü
R	: Isıl direnç, (m^2K/W)
S_a	: Ağırlıkça yüzde su emme, (%)
S_T^2	: Grupların varyansı
S_E^2	: Hataların varyansı
SN_i	: Sinyal gürültü oranı, (dB)
SS_{TOT}	: Karelerin toplamı
SS_T	: Gruplar arası kareler toplamı
SS_E	: Grup içi (hata) kareler toplamı
U	: Deneme numarası
V	: Numune hacmi
t	: Zaman, (dk)
Tn	: Çevre sıcaklığı
T_a,	: Civardaki çevre sıcaklığı, (K veya ˚C)
T_r	: Deney numunesinde görülen ortalama radyant sıcaklık
T_s	: Deney numunesinin yüzey sıcaklığı, (K veya ˚C)
Q	: Ölçme kutusuna sağlanan güç
Wk	: Kuru ağırlık
Wd	: Doygun kuru yüzey ağırlık, (gr)
We	: Doygun kuru yüzey ağırlık, (gr)
y	: Her bir gözlem değeri
$\bar{y}$	: Gözlem ortalama değeri

α	: F testi önemlilik düzeyi
σ	: Basınç dayanımı, (N/mm^2, MPa)
σe	: Eğilmede çekme dayanımı, (N/mm^2, MPa)
Δ	: Kuru birim ağırlık, (gr/cm^3)
λ	: Isıl iletkenlik katsayısı
$\overline{X}_{GM}$	: Büyük ortalama
$\overline{X}_i$	: Grup ortalaması
X_{kj}	: k. gruptaki j.gözlem

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ACI	: American Concrete Institute (Amerika Beton Enstitüsü)
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
BM	: Birleşmiş Milletler
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
FOB	: Free on Board (Gemi Bordasında Teslim)
İMMİB	: İstanbul Maden Metal İhracatçı Birlikleri
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TCLP	: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (Toksisite Karakteristik Liç İşlemi)
TS	: Türk Standartları
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
US	: United States (Birleşmiş Milletler)
MSE	: Mean Square of Error (Ortalama Hata Karesi)
MST	: Mean Square of Treatments (Uygulama Hata Karesi)

PERLİT VE TABAN KÜLÜ KATKILI HARÇ ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHİ DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, harç içinde agrega olarak kullanılmak üzere perlit ve taban külünün kullanılabilirliği ve geri dönüşümü araştırılmıştır. Bu amaçla, deney sayısını azaltmak için bir L9(3^3) ortogonal dizi ile Taguchi metodu kullanılarak, perlit/taban külü oranı (P/TK), çimento ve su/çimento oranı (S/Ç) olarak adlandırılan üç kontrol faktörü ile basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kıvam-yayılma, kuru ağırlık, su emme, kılcal su emme ve ısı yalıtım değeri gibi harcın karakteristik performansını belirlemek adına bir deneysel çalışma ve istatistiksel analiz yürütülmüştür. Varyans analiz metodu (ANOVA) kullanılarak, bu üç kontrol faktörünün harcın karakteristik performansı üzerindeki önem seviyeleri belirlenmiştir.

Sonuç olarak, tek yönlü varyans analizine bağlı olarak, çimentonun diğer iki kontrol faktörden genel olarak daha etkili olduğu bulunmuştur. Ancak P/TK oranının kıvam-yayılmada %52 ile büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sinyal gürültü oranı (S/G) analizi sonucunda, harcın mümkün olan en iyi karışımı 1,5 S/Ç oranında hazırlanmış, 1,25 P/TK oranına ve 250 gr çimentoya sahip olan A_3 B_3 C_3 ile elde edilmiştir. Bu en iyi kombinasyona en yakın kombinasyon olan A_1 B_3 C_3'ün deney sonuçları göz önüne alındığında özellikle basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kılcal su emme ve su emme deneylerinde oldukça iyi performans sergilediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Harç Performansı, Perlit, Taban Külü, Taguchi Metodu, Varyans (ANOVA) Analizi.

INVESTIGATION OF THE MORTAR PROPERTIES WITH PERLITE AND BOTTOM ASH WITH TAGUCHI METHOD

ABSTRACT

In this study, utilization and recycling of perlite and bottom ash to be used as aggregate in the mortar was searched. For that purpose, an experimental study and statistical analysis, using the Taguchi method with an L9(3^3) orthogonal array to reduce the numbers of experiment, conducted to determine three control factors, namely perlite to bottom ash ratio (P/BA), cement and water to cement ratio (W/C), and the characteristic performance of mortar such as compressive strength, flexural strength, workability, dry weight, water absorption, capillarity and heat insulation values. By using analysis of variance (ANOVA) method, the level of significance of these three control factors on the characteristic performance of mortar was determined.

In conclusion, based on the one-way variance analysis, cement is found generally more efficient than the other two control factors, however P/ BA ratio was seen to have the greatest impact for consistency by 52%. As a result of analysis in signal to noise ratio (S/N), the best possible mix proportions of mortar were obtained for the A_3 B_3 C_3 which has 1,25 P/BA ratio and 250 kg/m^3 cement prepared at 1,5 W/C ratio. Considering the A_1 B_3 C_3 of test results, which is the nearest combination with the best combination showed reasonably well performance particularly in compressive strength, flexural strength, water absorption, capillarity.

Keywords: Performance of Mortar, Perlite, Bottom Ash, Taguchi Method, Variance (Anova) Analysis.

GİRİŞ

Gelişen teknikler ve teknoloji ile birlikte yapılarda kullanılan malzemelerin uygulama amaç ya da amaçlarına hizmet etmesi beklenmektedir. 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.

Dünyada değişik ülkelerde 7,7 milyar ton perlit rezervi vardır. Ülkemizde değişik genleşme oranlarına sahip 5,7 milyar tonluk büyük bir perlit potansiyeli bulunmaktadır (Kalkınma Bakanlığı, 2015). 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 tarımda kullanılmaktadır (Kalkınma Bakanlığı 2015). Bu bilgilerden de anlaşılacağı gibi inşaat endüstrisi perlit kullanılan sektörlerin başında gelmektedir ve atıkların çevre dostu malzemelere dönüştürülmesine yönelik yapılan çalışmalar da artış gözlenmektedir.

Perlit katkılı yapı malzemeleri enerji giderlerini azaltarak sera etkisi yaratan gaz atıklarının azaltılmasını sağlamakta ve bu sebeple çevre dostu malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Perlit katkılı harç kullanılan yapılarda, yapı içerisinden dış çevreye ısı kaybı büyük oranda azalacağı için enerji tasarrufu sağlanacak, böylece sürdürülebilirlik, ekonomi ve çevre yönünden ülkemiz olumlu etkilenecektir.

Uçucu kül ve cüruf birçok alanda kullanılırken taban külü mevcut yapısı ve içerdiği zararlı maddeler sebebiyle kullanılamamaktadır. Aynı zamanda çevre ve insan sağlığına olumsuz etkilere de sebebiyet vermektedir. 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 taban külü karışımlı harçların üzerine yapılan deneyler sonucunda insan ve çevre sağlığı açısından zararlı olmadığı sonucuna varılmıştır (Ölmez, 2010).

Taban külü, perlit ve benzeri atıklar yapı malzemelerinin özelliklerinin iyileştirilmesinde, tasarrufun sağlanmasında, atık maddelerin doğaya zarar vermeden en verimli şekilde kullanılmasında büyük avantajlar sağlamaktadır.

Betonarme yapıların ana malzemelerinden biri olan ve zamanla fiyatı artan çimentonun, çeşitli alternatif atık ve katkı maddeleri ile kullanım miktarı azaltılmakta ve aynı zamanda özellikleri de iyileştirilmektedir. Bu araştırmada genleştirilmiş perlit ve taban külü harç içerisine katılarak harcın performansı ve aynı zamanda Türkiye'deki perlit ve taban külü tüketiminin artırılması amaçlanmıştır. Farklı oranlarda karışımlar kullanılarak ve deneysel tasarım yönteminde Taguchi Metodu ile deney sayısı en aza indirgenerek, varyans analizi (ANOVA) yardımıyla yeterli dayanım, su emme, hafiflik ve ısı yalıtımı sağlayacak optimum harç malzemesi üretilmesi amaçlanmıştır. Üretilen harç numuneleri üzerinde eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme, kılcal su emme, kıvam-yayılma, ısı yalıtımı ve kuru birim ağırlık deneyleri gibi fiziksel ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Perlit

1.1.1. Perlitin genel özellikleri

Perlit ismi bazı perlit tiplerinin kırıldığı zaman inci parlaklığında küçük küreler elde edilmesi nedeni ile inci anlamına gelen perle kelimesinden türetilmiştir (Almanca'da Perlstein: inci taşı). Sözcük, hem ham perlit, hem de genleştirilmiş perlit için kullanılmaktadır (Neufert, 1983; Sağsöz, 2007).

Asidik karakterli volkanik bir cam olan perlitin çeşitli kayaçları renk ve yapı itibariyle birbirinden farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle perliti gözle tanımak oldukça zordur. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar değişiklik göstermektedir. Genleştiğinde ise ham perlitin rengi tamamen beyazlaşmaktadır (DPT, 2001).

Perlit cevheri ilk olarak 1836 yılında bulunmasına rağmen, ancak 1946 yılından sonra çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Genleştirme işleminden sonra kazandığı niteliklerden hafiflik ve ısı yalıtıcılık özellikleri dikkate alınarak ilk defa ABD'de beton ve sıva agregası olarak uygulamaya konulmuştur. Araştırma çalışmaları ise bu uygulamadan sonraki yıllarda başlamıştır. Aynı şekilde Rusya'da ise (1950'den sonra) araştırma ve uygulama çalışmaları neredeyse aynı yıllarda başlamıştır. Macaristan'da ise perlitin yapı malzemesi olarak kullanımına başlangıcı 1958 yılı olmuştur (Ujhelyi, 1979). Diğer ülkelerde de 1950'den sonra uygulamaya girmiştir. Genleştirilmiş perlitin inşaat alanında kullanılması ikinci dünya savaşından sonra başlamıştır (Cormon, 1973).

Perlitin oluşumu ile ilgili iki ayrı teori bulunmaktadır. Bates (1960) ve Richter (1961)'a göre, asidik karaktere sahip magmanın yüzeye çıktıktan sonra ani soğuması sırasında yüzeyden derine doğru oluşan kılcal çatlak ve yarıklara, atmosfer, deniz, göl vb. suları girerek perliti oluşturmaktadır. Membel (1968)'e göre ise, perlit SiO_2 bakımından zengin bir kayacın soğuyarak katılaşması sürecinde bünyesine su girmesi

ile oluşmaktadır (Neufert, 1983; Sağsöz, 2007). Perlitin en büyük avantajı genleştirilebilme özelliğine sahip olmasıdır. Bu işlem sırasında, yüksek sıcaklıkta (750–1200°C) birkaç saniyede kayaç içindeki su, su buharına dönüşerek genleşmeye neden olur ve yumuşayan tanecikler içinde sayısız hava boşluğu oluşur. Bu boşluklar perlitin hacmini 4–30 kat arttırırken, yoğunluğunu da büyük ölçüde düşürür. Bu özelliği sayesinde, perlitten istenilen tipte malzeme kısa sürede ve minimum enerji tüketimi ile üretilebilmektedir (Okuyucu, 2005).

Perlitin kullanıldığı başlıca sektörler; inşaat, sanayi ve tarım sektörleridir. MTA'nın raporlarında bildirilen 8 milyar ton civarındaki hafif agrega rezervlerinin büyük kısmı Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında bu kaynakların beton üretiminde kullanılarak değerlendirilmesi ve yeni üretilen betonların geleneksel betonlarla kıyaslandığında ısı iletkenliğinin daha düşük olacağı ve böylelikle yapı malzemesi sektöründe oldukça yarar sağlaması beklenmektedir (MTA, 1985).

Hafif yalıtımlı yapı malzemeleri kullanılarak binaların ısınma (soğutma) maliyetleri %50 oranında, ölü yükünü ise %67 oranında azaltmak mümkündür. Ayrıca, birim zamanda örülen duvar ve yapılan sıva miktarları fazla olduğundan işçilik maliyetleri düşüktür ve çevre dostu bir malzeme üretilmiş olur. Pomza, perlit, ytong, gazbeton, vermikülit ve benzeri hafif yapı malzemelerini ithal ederek kullanan İsveç, Norveç gibi soğuk ülkelerde bile bir konutun ısıtma maliyeti Türkiye'deki eşdeğer konutun ısıtma maliyetinin yarısından azdır. Bu çarpıcı örnek ısı ve enerji tasarrufu yönüyle de konunun önemini ortaya koymaktadır (Doğan ve Şener, 2004).

1.1.2. Perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

1.1.2.1. Perlitin fiziksel yapısı

Perlitin fiziksel yapısı, genel itibariyle konsantrik çatlaklar içeren, soğan kabuğu şekilli ufak parçalara ayrılmış cam halindedir. Gevşek, kolay kırılabilir ve el ile ufalanabilir nitelikte, kayaç görünümlü, kompakt, ince taneli, gözenekli, kum ve kum taşı yapısında özellikler taşır. Petrografik doku ile görünümlerine göre perlit, şu şekilde sınıflandırılabilir; taneli perlit, ponzalı perlit, konsantrik yapılı perlit, lifli perlit, feno kristalli perlit, kum halinde perlit; bezelye iriliğinden, portakal

büyüklüğüne kadar değişen perlit modülleri mevcuttur (MTA, 1985). Ham perlit, bünyesinde %2–5 arasında su içerir. Bu şekilde perlit %2'den az su içeren obsidyen (volkan camı) ve %5 üzerinde su içeren pekstayndan (katran taşı) ayrılmaktadır (Sağsöz, 2007).

Perlitte en önemli özelik su bulundurmasıdır ve içinde bulunan suyun tamamına bağlı su denir. Bu suyun %94–98 kadarı, ince kılcal sistemler tarafından tutulmakta olup serbest su niteliğindedir. Geri kalan %2–6 kadarı ise, perlitin %90–97'sini teşkil eden volkanik camın içine, perlit oluşurken moleküller halinde girmiş, yani perlit camıyla birleşmiştir, buna ise etkin su denilmektedir. Bu suyun oluşumundan ötürü cam kütle kristalleşememekte, perlit de kararlılığını korumaktadır (Önem, 2000).

Genleşmiş perlit şu şekilde elde edilmektedir; öncelikle ham perlite öğütme ve boyutlandırma işlemlerinin uygulanmasının ardından, ham perlit 400C°'ye kadar ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Ön ısıtmadan sonra ham perlit 750–1200C° arasında ani olarak ısıtıldığında bünyesinden çıkan buharın etkisiyle genleşerek camsı tanelerden oluşan bir köpük agregasına dönüşmektedir. İlk hacminin 20 katına kadar genleşebilen perlite, genleşmiş perlit denilmektedir (DPT, 2001). Kayaç haldeki perlit, ham perlit ve genleştirilmiş perlit Şekil 1.1'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, ham halinde grinin tonlarında renklere sahip olan perlit, genleştirildiğinde beyaz renk almaktadır (Pertas, 2005; Azizi, 2007).



Şekil 1.1. Kayaç haldeki perlit (A), ham perlit (B) ve genleştirilmiş perlitin (C) görünümü (Pertas, 2005; Azizi, 2007)

Ham perlit ile genleştirilmiş perlit farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Tablo 1.1 ve Tablo 1.2'de ham perlit ve genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri verilmektedir (DPT, 2001; Çiçek, 2002; TSE, 1982; Azizi, 2007).

Tablo 1.1. Ham perlitin fiziksel özellikleri (DPT, 2001; Çiçek, 2002; TSE, 1982; Azizi, 2007)

Renk	Siyah ve Grinin Tonları
Özgül Ağırlık (kg/m^3)	2200–2400
Birim Ağırlık (kg/m^3)	950–2700
Yumuşama Noktası (C°)	871–1093
Erime Noktası (C°)	1260–1343
Özgül Isı (kcal/kg C°)	0,20–0,23
Sertlik (Mohs)	5–6

Tablo 1.2. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri (DPT, 2001; Çiçek, 2002; TSE, 1982; Azizi, 2007)

Renk	Beyaz
Özgül Ağırlık (kg/m^3)	55–300
Birim Ağırlık (kg/m^3)	30–250
Erime Noktası (C°)	1300
Isıl İletkenliği (W/m·K)	0,04
Isıl Genleşme (m/m·K)	4×10^{-6}–11×10^{6}
Ateşe Karşı Dayanım	Yanmaz
Ses Yutma	0,60

1.1.2.2. Perlitin kimyasal bileşimi

Perlitin kimyasal bileşimi liyonit, liparit, riyodasit, kuvars-latit gibi volkanik kayalarınkine benzerdir. Amorf alüminyum silikat olan perlitin hacminin %90–97 kadarını cam, %3–10'unu kristalleşmiş mineraller (feldspat, biyotit) oluşturur. Çoğu kez volkanik camdan oluşan hamuru içinde mikrolitler ve fenokristaller ile sperolitler bulunur. X ışınları analizi ile perlitlerin en çok %4 oranında serbest silis içerdiği saptanmıştır (Tanaçan, 1993). Tablo 1.3'te tipik bir perlit mineralini oluşturan bileşikler verilmiştir (Yalgın, 1983; Toydemir, 1968; Sağsöz, 2007).

Tablo 1.3. Tipik bir perlit mineralini oluşturan bileşikler (Yalgın, 1983; Toydemir, 1968; Sağsöz, 2007)

Tipik Perlit Minerali	Ağırlıkça (%)
SiO_2	50–75
Al_2O_3	12–20
Fe_2O_3	2,2–3,2
CaO+MgO	0,6–3,4
Na_2O	1,8–5,4
K_2O	3,1–5,5
H_2O	2–5

Perlit 1200–1300°C'lerde eriyik haline geçmesine rağmen 1500–1600°C'lerde bile hala akışkanlığı az (vizkositesi yüksek) bir malzeme olması sebebiyle yangına karşı da koruyucu bir malzemedir. Böylelikle perlit katkısı malzemeye ısıl ve mekanik gerilmelerden doğabilecek kırılmalara karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlayabilmektedir (Tanaçan, 1993). Yanmazlık özelliğinin yanı sıra, yüksek ısılarda uzun süre bozulmadan dayanabilme ve ısı yalıtıcılık özellikleri bulunduğundan, yangından zarar görmesi istenmeyen önemli yapı elemanlarının korunmasında kullanılır. Uygun detayda düzenlenen koruyucu perlit katmanları 700°C ile 900°C arasındaki yangın sıcaklığında 4 saate kadar, taşıyıcı çelik elemanları koruyabilmektedir. Yanmazlık ve ısı yalıtım özelliğinden dolayı, metalurji alanında da kullanılmaktadır (Peryum, 2012).

Isı ve ses yalıtıcılık özelliği gözenekli bir yapının sonucu olarak beliren bir özelliktir. Kuru perlit dolgusunun 24°C'deki ısı iletkenlik hesap değeri, kuru birim hacim ağırlığına bağlı olarak**,** 32 kg/m^3 birim hacim ağırlığında 0,04 W/m·K, 180 kg/m^3 birim hacim ağırlığında 0,055 W/m·K**,** kadar farklılık göstermektedir. Aynı sıcaklıkta cam yünü 0,037 W/m·K ısı yalıtıcılığına sahiptir. Bu durumda perlitin yalıtıcılıkta oldukça iyi olduğu anlaşılmaktadır. Bu özelliğinden dolayı perlit, çimento ve alçı gibi bağlayıcılarla sıva, yalıtım betonu yapımında kullanılmakta ve ucuzluk, yanmazlık, bakteriyel etkilere sonsuz direnci özelliklerinden dolayı, diğer yalıtıcı malzemeler karşısında vazgeçilmez avantajlara sahip bulunmaktadır (Peryum, 2012).

Ses emicilik ve ses yalıtıcılık konusunda da perlit ve perlit ürünlerinin önemli avantajları vardır. 5 cm kalınlığındaki bir perlit gevşek dolgusu 13 dB düzeyinde ses

yalıtımı sağlar. Cam yünü ve genleştirilmiş polistren ile karşılaştırılırsa, aynı kalınlıktaki cam yünü için 12 dB, genleştirilmiş polistren için 13 dB' dir. Anlaşıldığı üzere perlit, ses geçirgenliğini önlemede, dolgusu alışılmış diğer malzemelere göre eşit performans vermenin dışında ucuzluk, dayanıklılık gibi özellikleriyle de üstünlük sağlayacak düzeydedir. Ayrıca büyük salonların perlitli sıvayla sıvanması duvarların ses yalıtımı özelliğini artırmakta, çınlamayı ve yankılanmayı ortadan kaldırarak akustik özelliklere önemli katkı sağlayabilmektedir (Peryum, 2012).

Perlit kararlı kimyasal yapısı nedeniyle, kimyasal reaksiyonlara girmeyen ve suda çözünmeyen bir maddedir ve bu özelliğinden dolayı çeşitli kimyasal maddelerle birlikte, onları etkilemeden kullanılabilmektedir. Bu çerçevede perlit dolgu maddesi, kimyasal madde taşıyıcısı, süzme yardımcı malzemesi, yalıtım maddesi olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Peryum, 2012).

1.1.3. Perlit rezervleri ve kullanım alanları

Dünyada değişik ülkelerde 7,7 milyar ton perlit rezervi vardır. 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 tarımda kullanılmaktadır. Ülkemizde değişik genleşme oranlarına sahip 5,7 milyar tonluk büyük bir perlit potansiyeli bulunmaktadır. Orta-iyi kalite perlit yataklarımız Ankara-Kızılcahamam, Çubuk, Çankırı-Orta, Balıkesir-Savaştepe ve Sındırgı, Bitlis-Tatvan, Erzincan-Mollaköy, Erzurum- Pasinler, İzmir-Bergama, Cumaovası, Dikili ve Foça, Kars-Sarıkamış, Nevşehir Acıgöl ve Derinkuyu, Van-Erciş ve Malatya-Pötürge'de bulunmaktadır. Son yıllarda tüvenan perlit üretimimiz 480 bin ton/yıl civarında seyretmektedir. İç talep darlığı nedeni ile üretilen perlit büyük oranda ihraç edilmektedir. Deprem kuşağı üzerinde yer alan ve karasal iklim koşullarının hakim olduğu ülkemizde perlitin önemi yeterli ölçüde anlaşılamamış olup, bu ürün inşaat sektöründe yeterli oranda kullanılmamaktadır. Perlitin kullanıldığı hafif yapı elemanları ve beton agregaları daha çok modern inşaat teknolojilerinin kullanıldığı birinci sınıf inşaatlarda tercih edilmektedir. Bu malzemelerin kullanıldığı inşaatlarda %17 demir tasarrufunun yanı sıra önemli düzeyde ses ve ısı izolasyonu sağlanmaktadır. İnşaat sektöründe bu malzemelerin kullanımı teşvik edilmeli ve/veya zorunlu kılınmalıdır (Kalkınma Bakanlığı, 2015).

2014 yılında, Birleşmiş Milletler (BM) ülkeleri için ham perlit yerli üretimi 24,2 milyon dolar değerinde ve 440,000 ton olarak tahmin edilmiştir. İşlenmiş ham perlit üretimi 27 ülkede 48 tesise genişletilmiştir ve yurtiçi tüketim 576,000 ton olarak gerçekleşmiştir. Uygulamalarda %51'i yapı inşaat malzemesi, %15'i dolgu maddesi, %14'ü bahçe agregası, %10'u ise filtre yardımcı malzemesi olarak kullanılmıştır. Geri kalanı ise çeşitli alanlarda, özel yalıtım ve filtre malzemelerinde kullanılmıştır. 2013 yılı raporları ile karşılaştırıldığında BM'de işlenmiş ham perlit satım ve kullanım miktarı %5 artış göstermiştir. İşlenmiş ham perlit kalitesi son yıllarda artmaktadır. Yeşil çatılarda bitki yetiştirme aracı olarak kullanılan perlit popüler bir trend haline gelmiştir ve yüzeye bitki örtüsü eklenirken bir çatı yalıtımı için benzersiz sürdürülebilir bir yol sunmaktadır (U.S. Department of Interior, 2015).

Bildirilen rakamlara göre dünyanın önde gelen üreticileri sırasıyla Yunanistan %38, Türkiye %21 ve Amerika Birleşik Devletleri %21 olarak listelenmiştir. Tablo 1.4'te dünya perlit üretim miktarı verilmiştir (U.S. Department of Interior, 2015).

Tablo 1.4. Dünya işlenmiş perlit üretimi ve rezervleri (U.S. Department of Interior, 2015)

Ülkeler	Üretim		Rezervler
	2013	2014*	
Birleşmiş Milletler	419	440	50,000
Yunanistan	760	800	50,000
Macaristan	72	70	-
İtalya	60	60	-
Japonya	190	200	-
Türkiye	400	450	-
Diğer Ülkeler	67	70	-
Dünyada Toplam (yuvarlatılmış)	1,970	2,090	-

*Tahmini 2014 yılı perlit üretimi

U.S. Department of Interior, Mineral Commodity Summaries 2015 raporuna göre ülkemizde 2013 yılı işlenmiş perlit miktarı 400,000 ton olarak gerçekleşmiştir. 2014 yılı ham perlit yerli üretimi ise 450,000 ton olarak tahmin edilmiştir. Dünya ve Türkiye'de perlitin kullanım alanları incelendiğinde toplam tüketimin yaklaşık %70'i inşaat sektörüne ait olduğu görülmektedir (Çiçek, 2002).

Dünyada inşaat üretim ürünlerinde kullanılan perlitin yaklaşık %70'inin izolasyon plakaları ile tavan döşemelerinde kullanıldığı belirtilmektedir (DPT, 2001).

Genleştirilmiş perlitin inşaatta kullanım alanları ise;

- perlitli sıva,
- perlit agregalı hafif yalıtım betonu (çimento veya alçı bağlayıcı),
- perlit agregalı hafif yapı elemanları (kiremit, boru yalıtımı vb.),
- ısı ve ses yalıtım betonu,
- ısı ve ses yalıtıcı yüzey panoları,
- çimento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan özel amaçla perlit betonları,
- çatı ve zeminde şekillendirilmiş yalıtım malzemeleri,
- yangına karşı özelikle çelik konstrüksiyonlarda yalıtım katı,
- hafif pişmiş toprak yapı tuğlası, gevşek dolgu malzemesi olarak (tavan araları zemin ve duvar boşluklarında yalıtım malzemesi olarak; silikonla özel bir işleme tabi tutularak köpük halinde) sıralanabilir (Odabaş, 2012).

Çeşitli genleşmiş perlitlerin kullanım alanları ise;

- (12-15) ve (4-12) Perlit; Beton imalatı karışımında kullanılan bir ürün olmakla birlikte düşük döşemelerde dolgu malzemesi olarak kullanılır.
- (0-8) Perlit; Beton yapı elemanları ve betonda kullanılabilen mukavemetli bir malzemedir.
- (0-4) Perlit; Kaba sıva duvar harcı beton yapı elemanları ve beton agregasında kullanılan bir üründür.
- (0-2) Perlit; İnce sıvada perdah olarak kullanılır. Yapı malzemeleri imalatında düzgün yüzeyler elde etmek için tercih edilen malzemelerdir.
- (600 Mikron) Perlit; Isı ve ses izolasyonunda ve tarımda kullanılan bir malzemedir (Uzay, 2008).

Türkiye'de üretilen perlit miktarları Tablo 1.5'te verilmiştir (Kalkınma Bakanlığı, 2015).

Tablo 1.5. 1999–2004 Türkiye'de perlit üretim miktarı (Kalkınma Bakanlığı, 2015)

Madencilik Sektörü Üretimi (Miktar Olarak) (1000 Ton)						
	Yıllar					
	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Perlit (Tüvenan)	7	63	315	343	330	366

Az hacimdeki düşük yoğunluğu, kimyasal sabitliği, düşük ısı ve ses geçirgenliği, ateşe karşı dayanıklılığı, yağ ve su tutma kapasitesi genleşmiş perlite ticari değer kazandıran önemli bazı fiziksel özellikleridir. Ülkemiz perlit bakımından zengin kaynak ve kapasiteye sahip olmasına rağmen yurtiçi talep çok sınırlı kalmıştır. Ülkemizde 2001–2004 yıllar arası perlit tüketim miktarları Tablo 1.6'da görülmektedir (Kalkınma Bakanlığı 2015).

Tablo 1.6. 2001–2004 Türkiye'de perlit tüketim miktarı (Kalkınma Bakanlığı, 2015)

Madencilik Sektörü Tüketimi (Miktar Olarak) (1000 Ton)					
	Yıllar				
	2001	2002	2003	2004	2005
Perlit (Tüvenan)	216	131	125	150	151

Perlit ihracatı miktar olarak Tablo 1.7'de gösterilmiştir (Kalkınma Bakanlığı, 2015).

Tablo 1.7. 2001–2005 Türkiye'de perlit ihracat miktarı (Kalkınma Bakanlığı, 2015)

Madencilik Sektörü İhracatı (Miktar Olarak) (1000 Ton)					
	Yıllar				
	2001	2002	2003	2004	2005
Perlit	99,7	212,1	204,8	216,0	254,2

Perlit ihracatı değer olarak Tablo 1.8'de gösterilmiştir (Kalkınma Bakanlığı, 2015).

Tablo 1.8. 2001–2005 Türkiye'de perlit ihracat miktarı değer olarak (Kalkınma Bakanlığı, 2015)

Madencilik Sektörü İhracatı (Değer Olarak) (FOB Cari Fiyatlarla Milyon Dolar)					
	Yıllar				
	2001	2002	2003	2004	2005
Perlit	2,8	5,6	6,0	7,1	8,8

İhracatta ise ülkemiz 2003 yılında 6 milyon dolar perlit ihracatı gerçekleştirmiştir. Bu rakam 2004 yılında 7 milyon dolara ulaşmıştır. 2004 yılı ihracatımızda İtalya (%25), İspanya (%15), Belçika (%17) ve Hindistan (%8) ilk sıralarda yer alan önemli pazarlarımız olmuştur (Uyanık, 2005). İstanbul Maden ve Metaller İhracatçı Birlikleri (İMMİB)'nin verilerine göre; 2005 yılında 251,122 ton perlit ihraç etmiş ve değeri 8,485,000 ABD dolarına yükselmiştir. 2001 yılı AB'de Maden Üretiminde dünya içinde ülkemiz %46,1 perlit üretimine sahiptir (Kalkınma Bakanlığı, 2015). Perlit sektörünün 2006–2013 dönemine ilişkin ihracat tahmin miktarı Tablo 1.9'da verilmiştir (Kalkınma Bakanlığı, 2015).

Tablo 1.9. 2006–2013 dönemine ilişkin Türkiye'de perlit ihracat projeksiyonu miktarı (Kalkınma Bakanlığı, 2015)

Madencilik Sektörü İhracat Projeksiyonu (Miktar Olarak) (1000 Ton)									
	Yıllar								Ortalama Yıllık Artış (%)
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Perlit	250	260	265	275	285	300	325	350	4,9

Perlit sektörünün 2006–2013 dönemine ilişkin üretim tahmin miktarı Tablo 1.10'da verilmiştir (Kalkınma Bakanlığı 2015).

Tablo 1.10. 2006–2013 dönemine ilişkin Türkiye'de perlit üretim projeksiyonu miktarı (Kalkınma Bakanlığı, 2015)

Madencilik Sektörü Üretim Projeksiyonu (Miktar Olarak) (1000 Ton)									
	Yıllar								Ortalama Yıllık Artış (%)
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Perlit (Tüvenan)	450	500	550	600	650	700	750	800	8,6

1.2. Taban Külü

1.2.1. Taban külünün genel özellikleri

Termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucunda gazlarla birlikte atmosfere sürüklenemeyerek fırın tabanına düşen uçucu küle nazaran daha iri taneli maddelere taban külü denir. Termik santrallerin toplam atıklarının %75–%80 uçucu kül olurken, geri kalan %25–%20'lik kısmı taban külüdür (Mehta, 1986). Bir de katı atıkların yakma yoluyla bertaraf edilmesi sonucu taban külleri ortaya çıkar (Erdoğan, 1993).

Taban külü kullanım alanları (Vigas ve diğ. 2015);

- Yol inşası
- Temel malzemesi
- Gürültü bariyerleri
- Agrega
- Sanat malzemeleri

Ayrıca çimento ile karıştırılarak yerel atık depo tesisi içerisinde zemini yalıtımlı yol yapımında kullanılabilir. Beton atık ve metaller ile kimyasal olarak birleşir ve izolasyon sağlar (Erdoğan, 1993). Fakat taban külleri ülkemizde sadece yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilmektedir (Toprak, 2011).

Taban küllerinin standart dışı kabul edilmektedir. Bunun sebebi; taban külü boyutlarının uçucu küllere nazaran daha iri olması ve karbon içermesidir. Yanmamış karbon oranının yüksek olması çoğunlukla yapı malzemelerinde kullanılmasını engellemektedir. Bu durumun sebebi; yanmamış karbon miktarının fazla olması çimento ve betonda su gereksinimini artırması, puzolanik özellik ve kaliteyi olumsuz etkilemesidir. Fakat ön zenginleştirme ile (yöntemlerden bir kaçı mekanik ayrıştırma, tane boyutu sınıflandırılması, ağırlık ayrıştırması, elektrostatik ayrıştırma) ile karbon uzaklaştırılmaktadır. Kazanılan karbon da termik santrallerde yeniden değerlendirilebilmektedir (Hurst ve diğ., US Patent No: 4.121.94; Bittner ve diğ., US Patent No: 6.074.458; Kurama ve Kaya, 2007; Topçu ve diğ., 2007; Kara, 2008).

1.2.2. Taban külünün kimyasal bileşimi

Taban küllerinin ve uçucu küllerin kimyasal yapılarında bulunan bileşikler kullanılan kömüre ve yanma sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Tablo 1.11'de uçucu kül ve taban küllerine ait kimyasal bileşimler karşılaştırmalı olarak verilmiştir ve incelendiğinde çoğunlukla SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ve MgO ve CaO (özellikle C sınıfı uçucu küllerde) bileşiklerinden oluşmakta olduğu anlaşılmaktadır (Alataş, 1996).

Tablo 1.11. Uçucu kül ve taban külünün kimyasal kompozisyonları (Alataş, 1996)

	Uçucu Kül		Taban Külü
	C Sınıfı	F Sınıfı	
CaO	%11,5–29,0	%0,7–6,7	%0–22
SiO_2	%23,1–50,5	%43,6–64,4	%21–60
Al_2O_3	%13,3–21,8	%19,6–30,1	%10–37
Fe_2O_3	%3,7–22,5	%3,8–30,1	%5–37
MgO	%1,5–7,5	%0,9–1,7	%0–4
SO_3	%0,3–1,9	%0,4–7,2	–

Bu bileşiklerden farklı olarak yanmamış karbon, titanyum, fosfor, berilyum ve mangan da az miktarda bulunabilmektedir (Hewlett, 2004; ACI Comittee 226, 1987).

Taban külleri hem küresel, hem de düzensiz şekilli taneler içermektedir. Küresel tanecikler camsı yapıya sahiptirler ve puzolanik aktiviteleri yüksektir. Küresel olmayan düzensiz şekilli tanecikler ise kömürden gelen yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller (kuvartz ve feldispatlar), gözenekli yapılardan (kil kalıntıları, yanmamış karbon) oluşmaktadır (Tikalsky and Carraqullo, 1992; Toprak, 2011).

Taban külleri genellikle silisli ve alüminli olan bileşimleri sebebiyle puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılmaları yararlı olmaktadırlar. Ayrıca ince ve küresel taneleri dolayısıyla taze betonda işlenebilmeyi artırırlar ve çimentonun hidratasyon ısısını da azaltırlar. Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kireçle taban külleri reaksiyona girer ve ilave bağlayıcı jel oluştururlar, çimento pastasındaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırırlar (Aruntaş, 2006). Yüksek silikalı külün çimento sanayinde kullanılabilmesi için ASTM standartlarına göre %6'dan az olması yeterlidir, fakat %4'ten az karbon içeriğine sahip olması gereklidir (ASTM C 618, 1998).

TS EN 450'ye göre taban küllerinin çimento ve betonda kullanılabilmesi için 45 µm elek altı miktarlarının %60'tan küçük olması gerektiği sebebiyle standart dışı oldukları kabul edilmektedir. Ayrıca standartta kabul edilebilmesi için SO_3, serbest kireç miktarları ve kızdırma kaybının sırası ile %5, %1 ve %5'ten küçük olması gereklidir. (TS EN 450, 1998)

1.2.3 Taban külünün elde edilmesi

Taban külleri termik santraller ve atık yakma tesislerinden elde edilirler. Türkiye'de bulunan 35 Kömür ve Linyit Santrallerinin toplam kurulu gücü 14,787.50 MW'dır. 2014 yılında Kömür ve Linyit Santralleri ile 73,051,070,896 kilovatsaat elektrik üretimi yapılmıştır. Bu santrallere ait bilgiler, alfabetik olarak Tablo 1.12'de verilmiştir (Enerji Atlası, 2014).

Tablo 1.12. Türkiye'deki kömür ve linyit ile çalışan termik santraller (Enerji Atlası, 2014)

No	Santral Adı	Yakıt Cinsi	Kurulu Güç (MW)	Bulunduğu İl
1	Zonguldak Eren (ZETES)	İthal Kömür	1,390	Zonguldak
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1,440	Kahramanmaraş
3	Afşin-Elbistan A	Linyit	1,355	Kahramanmaraş
4	18 Mart Çan Termik Santrali	Linyit	320	Çanakkale
5	Çatalağzı	Taş kömürü	300	Zonguldak
6	Çayırhan	Linyit	620	Ankara
7	Çolakoğlu	Taş kömürü	190	Kocaeli
8	Kangal	Linyit	457	Sivas
9	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
10	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
11	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
12	Soma A	Linyit	44	Manisa
13	Soma B	Linyit	990	Manisa
14	Sugözü-İskenderun	İthal kömür	1320	Adana
15	Tunçbilek	Linyit	365	Kütahya
16	Bekirli	İthal Kömür	1200	Çanakkale
17	Yatağan	Linyit	630	Muğla
18	Yeniköy	Linyit	420	Muğla
19	İskenderun Atlas	İthal Kömür	1200	Hatay
20	İÇDAŞ Biga	Kömür	405	Çanakkale
21	Aliağa	İthal Kömür	350	İzmir
22	Aksa Bolu Göynük	Linyit	135	Bolu

Tablo 1.12. (Devam) Türkiye'deki kömür ve linyit ile çalışan termik santraller

23	İskenderun Demir Çelik	Taş Kömürü	220	Hatay
24	Polat	Linyit	51	Kütahya
25	Kardemir	Kömür	35	Karabük
26	Eti Soda Kojenerasyon	Linyit	24	Ankara
27	Susurluk Şeker Fabrikası	Linyit	9,60	Balıkesir
28	Amasya Şeker Fabrikası	Linyit	7,76	Amasya
29	Kipaş Kağıt Fabrikası	İthal Kömür	7,60	Kahramanmaraş
30	Kahramanmaraş Kağıt	İthal Kömür	6,00	İstanbul
31	Aynes Gıda	Linyit	5,50	Denizli
32	Küçüker Tekstil	Linyit	5	Denizli
33	Kütahya Şeker Fabrikası	Linyit	4,57	Kütahya
34	Çankırı Tuz Fabrikası Kojenerasyon	Linyit	1,64	Çankırı
35	Göknur Gıda	İthal Kömür	1,55	Niğde

Ülkemizde kömürle çalışan termik santrallerin 13'ünde yanma sırasında yılda yaklaşık 15 milyon ton uçucu kül ve 4 milyon ton taban külü elde edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan küllerin temin edildiği Türkiye Taşkömürü Kurumu'na ait Zonguldak ve Çatalağzı Filtrelizasyon tesislerinde 1,5 milyon ton/yıl taşkömürü artığı yakılmaktadır. Yakma sonunda yüksek kül oranına sahip (%45–50) kömürden ortalama 650,000 ton/yıl kül açığa çıkmaktadır. Termik santralden çıkan karışımın yaklaşık %15'i cüruf ve %85'i külden oluşmaktadır (Özarslan ve diğ., 2005). Açığa çıkan külün ise bir kısmı satılarak ülke ekonomisine geri kazandırılır. Kül satışına 1999 yılında başlanmış olup, toplamda 715,650 ton kül satışı gerçekleştirilmiştir (URL-1). Taban külü yanma kazanının altında toplanır ve 250–7000 μm boyutlarındadır. Taban külünün özelikleri kömürün hangi tip olduğuna ve yakılma yöntemine göre farklılıklar göstermektedir (Aruntaş, 2006).

Taban külleri TS EN 450-1 standartına uygun olmadıkları için termik santral yakınlarında bulunan kül dağları veya barajlarında depolanmaktadırlar (Toprak, 2011). Kömürlü termik santrallerde enerji üretimi sırasında ortaya çıkan çok

miktardaki küller birçok çevresel problemlere neden olmakta ve yüksek depolama masraflarını da beraberinde getirmektedir (Buluş, 2003). Taban küllerinin atık kül dağları ve barajlarında depolanması; doğal hayat, bölgenin ekolojik durumu, tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi açısından istenmeyen sonuçlara sebebiyet vermektedir (Toprak, 2011).

Çevre kirliliğinin önemli başka sebeplerinden biri de tehlikeli atık tesislerindeki katı atıkların yakılması yoluyla bertaraf edilmesi sonucu çıkan taban küllerinden kaynaklanan kirliliktir. Buna bağlı olarak Ölmez'in (2010) taban külünün betonda çimento yerine kullanılmasıyla bertaraf edilmesinin insan ve çevre sağlığı açısından araştırdığı çalışmasında herhangi bir zararının bulunmadığı belirtilmiştir.

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 yayınımının ve arazi kullanımının azaltılması, sürdürülebilirlik ve çevreye saygılı yaklaşım çerçevesinde büyük önem kazanmıştır (Canpolat ve diğ., 2003; Baker and Steemers, 2000).

Çimento üretiminde, hammaddenin $1100^{o}C$'de yaklaşık 45 dakika pişmesi gerekmektedir ve pişirme sırasında kuru hammaddenin %45–65'i CO_2 ve su buharı şeklinde baca gazlarıyla beraber atmosfere atılmaktadır. 1 ton çimento için ise 185 kg kömür kullanılmaktadır ve yaklaşık bir ton CO_2 açığa çıkmaktadır (Gülen ve Yalap, 2003; Yeğinobalı, 2005).

2. KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde tez ile ilgili yapılmış olan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar özetlenecektir.

Lanzo´n ve Garcı´a-Ruiz (2008), genleştirilmiş perlitin çimento harçlarındaki etkileri üzerine bir çalışma yapmışlardır ve yaptıkları çalışmada perlitin karışım suyu, yoğunluk, kıvam, işlenebilirlik ve su tutuculuk gibi harçların taze haldeki parametreleri üzerinde sahip olduğu etkiyi incelemişlerdir. Genleştirilmiş perlit normalden daha fazla su-çimento oranın çıkmasına neden olmuştur. Ayrıca perlitin su emme, kılcal geçirimlilik ve mekanik dayanımlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneylerin sonucunda perlitin işlenebilme süresi ve su tutuculuk açısından olumlu, su emme, kılcal geçirimlilik ve mekanik dayanımları açısından ise olumsuz etkisinin olduğu bulunmuştur.

Yılmazer ve Özdeniz (2005) 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.

Okucu (1998), Bigadiç ve Turnatepe yörelerindeki volkanik zeolitik ve 38 perlitik volkanik tüflerinin çimento katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Söz konusu puzolanların fiziksel özeliklerinin belirlenebilmesi için: özgül ağırlık, dane boyutu, özgül yüzey (Blaine) ve öğütülebilirlik testi deneyleri; kimyasal özeliklerinin belirlenebilmesi için: çözünmeyen kalıntı, kızdırma kaybı ve kimyasal analiz deneyleri sonuç olarak da TS 25'e göre puzolanik aktivite deneyi yapılmıştır. %24-28-32 oranlarında katkılı çimentolar zeolitik ve perlitin tüf katkılı çimentoların ve

Portland çimentosunun dayanıklılık özeliklerini belirlemek amacıyla üretilmiştir. Sonrasında aynı klinkerden referans numunesi olarak çimento numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler için eğilmede çekme ve basınç deneyleri, priz başlama ve sona erme süreleri, normal kıvam tayini ve hacim genleşmesi tayini yapılmıştır. Numuneler 28 gün normal koşullarda su içinde, 28. günden sonra da 12 hafta su ve sülfat çözeltisinde kür edilmiştir. Deney sonuçlarına göre katkılar, portland çimentosuna göre sülfatlı ortamda harcın dayanıklılığını artırmıştır. Ayrıca zeolitik tüflerin kolay öğütülebilirliği yanında puzolanik aktivitelerinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Perlitik tüflerin de puzolanik aktivitelerinin yüksek olduğu fakat zor öğütülebildiği, 28. gün sonunda basınç dayanımının standartları aştığı ve zeolitik tüflere oranla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Çalışmada perlitik tüflerin kullanılabilir bir puzolan olmanın yanı sıra zeolitik tüflerle uygun oranlarda harmanlanarak kullanılması önerilmiştir.

Sağöz (2007), "Farklı Kür Şartlarının Doğal Perlit Agregalı Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi" adlı çalışmasında agrega olarak doğal perlit kullanılarak 350 kg/m^3 ve 450 kg/m^3 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^{o}C, 75^{o}C ve 85^{o}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.

Yıldırım ve diğ. (1993) ısı yalıtımını sağlayacak daha ekonomik ve fonksiyonel yapı malzemesi üretimini amaçladıkları çalışmalarında; beton karışımlarına ambalaj sanayinde kullanılan farklı oranlarda granül halinde genleştirilmiş polistren katmışlardır. Beton numunelerin ısı iletim katsayılarını, DIN 51046'ya göre ölçüm yaparak belirlemişlerdir. Deney sonucunda karışımlara katılan genleştirilmiş

polistren yüzdesi arttıkça beton numunelerin ısı iletkenlik katsayılarının azaldığı ve 0,355–0,587 W/m·K arasında değiştiği belirtilmiştir.

Demirboğa ve Gül (2003a), 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/m·K 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), pomza ve genleştirilmiş perlit agregasının farklı oranlarda (100:0, 80:20, 60:40 ve 40:60) 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) bir başka çalışmada, mineral katkılı genleştirilmiş perlit agregalı betonların basınç dayanımı ve ısı iletkenliklerini araştırmışlardır. Silis dumanı ve uçucu kül çimentoyla daha önceki çalışmalardaki 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 iletkenliğin 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.

Kula (2000) çalışmasında katkı maddesi olarak Kütahya-Emet-Hisarcık yöresindeki kolemanit atıkları ve Eskişehir-Kırka yöresindeki tinkal konsantratör atıkları, Kütahya Seyitömer Termik Santral atıları (uçucu kül ve taban külü) kullanılmıştır.

Bu katkı malzemeleri ikişerli varyasyonlarla denenmiştir. Priz süresi, hacim genleşmesi, basınç dayanımı, öğütme süresi gibi özellikler incelenmiştir. Kullanılan katkıların çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabileceği bulunmuştur. Klinkere göre diğer katkı maddelerinin daha kolay öğütüldüğü ve böylelikle bu katkı maddeleriyle %10'a varan enerji tasarrufu sağlanacağı bulunmuştur. Uçucu kül ve taban külü katkılı çimentoların basınç dayanım değerleri oldukça iyi olduğu, kolemanit konsantratör atığı ile taban külü katkılı harçların basınç dayanımlarının da beklenenin üzerinde olduğu belirtilmiştir.

Bilir (2010) ise taban külünün, uçucu külün, granüle yüksek fırın cürufunun ve kiremit kırıklarının 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 rötre deneyleri yapılmıştır. Kısıtlanmış rötrenin incelenebilmesi 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), 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; agrega 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 diğ. (2002), bir çalışmalarında genleştirilmiş perlitin hafif betonun termal iletkenliği etkisi üzerine araştırmışlardır. Sonucunda ısı yalıtım özelliklerinin iyileştiği, binalardaki ısı kaybının azaldığı ve enerji tüketiminin azaldığı görülmüştür. Böylelikle ısıtma ve soğutma maliyetinin düştüğünü vurgulanmıştır.

Bir başka çalışmada ise Doğan ve Şener (2004), 10 katlı ve 40 daireli bir yapıda hafif malzeme kullanılarak sağlanacak sıva tasarrufunun 104 m^3 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 vurgulamışlardır.

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

Abidi ve diğ. (2015) bir çalışmalarında alçı kompozit malzemenin ısı iletkenliği üzerinde perlit, vermikülit ve çimento etkisini kurmak için analitik ve sayısal modeller kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar, yalıtkanlık gibi daha iyi bir termal özellik perlit ilavesinin artması ile matris içinde gözeneklilik oranı tarafından sağlanabildiği ortaya koymuştur.

Demirboğa ve diğ. (2001) genişletilmiş perlit ve mineral katkılarla üretilen düşük yoğunluklu betonların basınç dayanımı ile ilgili bir araştırma yaptılar ve bu araştırmada kısmen agrega olarak pomza ile birlikte genişletilmiş perlit kullandılar. Araştırma sonucunda ise genleştirilmiş perlit oranının artmasıyla basınç dayanımının da arttığını belirtilmiştir.

Şengül ve diğ. (2011) deneysel çalışmalarında hafif beton karışımlarında genleştirilmiş perliti doğal agrega ile yer değiştirerek kullanmışlardır. Bütün karışımlarda su-çimento oranı sabit tutulmuştur. Sonuçlarda normal agrega 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.

Odabaş (2012), bir çalışmasında 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.

Bir başka çalışmada ise, Bulgu (2003), perlit ve çimento ile üretilen harçlarda, yüksek perlit oranı ile ihtiyaç duyulan su miktarının arttığını belirtmiştir.

Aşık (2006), bir tez çalışmasında doğal perlit agregası ile perlit tozu ilaveli yapısal hafif beton üzerinde çalışmıştır 28 günlük silindir basınç dayanımı 20–40 MPa arasında olan doğal perlit agregası ile üretilmiş yapısal hafif agregalı beton üretilebileceğini sonuçlarında belirtmiştir. Aynı şartlar altında, doğal perlit agregası yerine doğal bir puzolan olarak perlit tozu kullanımıyla aynı mukavemette beton üretilebileceğini de sonuçlarına eklemiştir.

Bir çalışmada, Çelik ve diğ. (2014), 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) 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 H_3PO_4 (veya NH_4NO_3) 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.

Ayberk (1995) yaptığı çalışmasında perlitin, yalıtım ve yangına dayanım özellikleri ile yapılarda farklı kullanımlarının olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda perlitin, yapı yükünü azaltması, alan kazandırması ve yakıt tasarrufu sağlaması ile yapı maliyetlerini de azalttığını ifade etmiştir.

Çobanlı (1993) bir tez çalışmasında; kil, genleştirilmiş perlit ve bor atığı ile üretilmiş paneller üzerine çalışmıştır. Çalışmanın sonucunda yüksek ısı yalıtımı, yangına ve donmaya dayanıklılığı yüksek numuneler üretilebildiğini tespit etmiştir.

Vikas ve diğ. (2015) taban külünün ince agrega ile kısmen yer değiştirmesi ile üretilen betonun özellikleri ile ilgili bir değerlendirme sunmuşlardır. Atıkların bertaraf edilmesi ve kaynakların korunması açısından çok önemli bir katkı olduğunu belirtmişlerdir. İnce agrega yerine kullanılmış taban küllü betonların eğilme ve basınç dayanımlarının normal betondan daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Ek olarak, taban külü içeriğinin yükselmesiyle su ihtiyacının bağlı olarak işlenebilirliğinde düştüğünü tespit etmişlerdir.

Bozkurt (2013) 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.

Khudır (2014) doktora çalışmasında; donma-çözülme çevrimlerinin jüt fiber, çelik fiber, kireç ve taban külü ile iyileştirilmiş ince daneli zeminin (düşük plastisiteli silt) serbest basınç dayanımı üzerine etkisini incelemiştir. Serbest basınç dayanım performansları ve maliyet-fayda avantajları beraber değerlendirildiğinde, stabilizörlerin etkin karışım oranları birbirlerinden bağımsız olarak kireç için %4, taban külü için %20, jüt füber için %0,75 ve çelik fiber için %0,25 olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda donma-çözülme direncine karşı kireç, taban külü, jüt fiber ve çelik fiber kullanmanın oldukça olumlu olduğu belirtilmiştir.

Kara (2008), uçucu kül ve taban küllerinin inşaat sektöründe kullanılabilirliğini araştırmış ve 7 farklı yapı malzemesi üretilmiştir. Elde edilen en iyi sonuçlara göre betonda %20 oranında sepere külün (Seperasyon tesislerinde ayrıştırılarak uygun niteliğe getirilmiş uçucu kül) kullanılması ile C25/30 betonu, %10 oranında öğütülmüş taban külünün çimentoda kullanılması ile CEM II/ AV Portland uçucu küllü çimento, kuvars kumu yerine %75 oranında taban külü kullanılması ile TS 453'e göre G4/0,7 sınıfı gazbeton, taban külü ve taban cürufu kullanılarak gazbloklar üretilmiştir. Üretilen bu gazblokların ısı yalıtımlarının yüksek, işçiliklerinin kolay ve maliyetlerinin düşük olması nedeniyle alternatif duvar elemanları olarak kullanılabilecekleri görülmüştür.

Jaturapitakkul ve diğ. (2004) 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, 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.

Akpınar ve Koçyiğit (2015) yapmış oldukları çalışmada hafif beton üretimi için kitre ve pomza agregası kullanılabilirliğini araştırılmışlardır. Sonuçlar üretilen malzeme örneklerinin, termal ve mekanik özelliklerine göre hafif beton sınıfında olduğunu göstermiştir. Kitre ve pomza ilave edilmiş hafif betonların yalıtım özelliklerinden sebep bina malzemelerinde kaplama ve ayırıcı olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

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

Chindaprasirt ve diğ. (2014) 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 geçirimliliğini düşürürken basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve aşınma direncini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler

Yapılan deneysel çalışmada iri perlit, ince perlit, perlit atığı, taban külü ve çimento kullanılmıştır. Çalışmada kum kullanılmamıştır. Aşağıda bu malzemelerin özellikleri verilmiştir.

3.1.1. Perlit

Gerçekleştirilen bu çalışmada, iri perlit, ince perlit, perlit atığı kullanılmıştır. Bu üç perlit çeşidinin granülometrik olarak ayarlanmış (%40'iri perlit, %30 ince perlit, %30 atık perlit) karışımı kullanılmıştır. Bergama Madencilik İnşaat Makine Perlit San. Tic. A.Ş.'nin Ege Bölgesi'nden temin ettiği genleştirilmiş perlit ve atığı kullanılmıştır. Tablo 3.1 kullanılan perlitin kimyasal özelliklerini verilmektedir.

Tablo 3.1. Perlitin kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	% Ağırlık
SiO_2	71,13
Al_2O_3	14,38
Fe_2O_3	1,41
K_2O	4,68
MgO	0,68
Na_2O	2,71
TiO_2	0,04
CaO	1,62
P_2O_5	0,05
SO_3	-

3.1.2. Taban külü

Bu çalışmada kullanılan taban küllerinin temin edildiği Çatalağzı Termik Santrali, Zonguldak İli Çatalağzı Kasabası'nda yer almaktadır. Türkiye Taşkömürü Kurumu'na ait Zonguldak ve Çatalağzı Filtreleme tesisleri ürünü olan 1,5 milyon ton/yıl taşkömürü artığı yakılmaktadır. Çalışmada kullanılan taban külü kimyasal

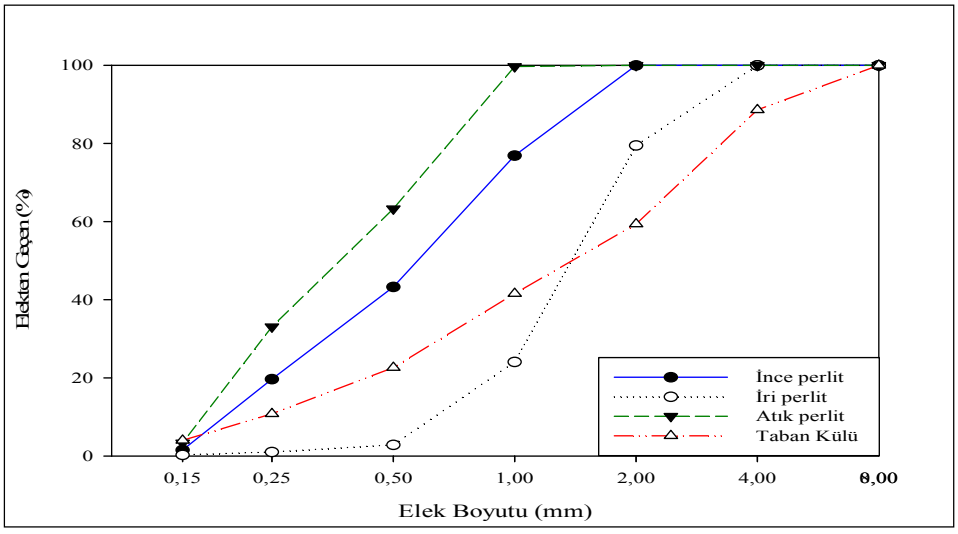
analizi Tablo 3.2'de gösterilmektedir. Kullanılan perlitler ve taban külünün özgül ağırlık ve gevşek birim ağırlık değerleri ise Tablo 3.3'te gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 3.1'de perlitlerin ve taban külünün elek analizi verilmiştir.

Tablo3.2. Taban külünün kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	% Ağırlık
SiO_2	58
Al_2O_3	22,91
Fe_2O_3	3,97
K_2O	0,55
MgO	2
Na_2O	0,54
TiO_2	1,37
CaO	4,2
P_2O_5	0,2
SO_3	58

Tablo 3.3. Kullanılan perlitler ve taban külünün yoğunluk ve gevşek birim ağırlık değerleri

Kullanılan Malzemeler	Özgül Ağırlık (kg/dm^3)	Gevşek Birim Ağırlık (kg/dm^3)
İri perlit	0,4	0,207
İnce perlit	0,14	0,067
Perlit Atığı	0,368	0,170
Taban Külü	1,5	0,503



Şekil 3.1. Kullanılan perlitler ve taban külü malzemelerinin elek analizi

3.1.3. Çimento

Çalışmada Nuh Çimento Sanayi A.Ş.'den TS EN 197-1'e uygun olarak üretilmiş CEM I 42,5R çimentosu alınarak kullanılmıştır. Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri görülmektedir.

Tablo 3.4. Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	% Ağırlık
SiO_2	20,50
Al_2O_3	4,65
Fe_2O_3	3,40
CaO	64,73
MgO	1,02
SO_3	2,71
Toplam Alkali	0,59
Klorür	0,0084
Çözünmeyen Kalıntı	0,60
Kızdırma Kaybı	2,15
Serbest Kireç	1,03

Tablo 3.5. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellikler	Değer	
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	3,13	
Donma Süresi	Başlangıç	Son
(Vicat, dakika)	153	188
Özgül Yüzey (cm^2/gr)	3596	
90 µ Elek Üstü (%)	0,2	
45 µ Elek Üstü (%)	12,8	
Hacim Sabitliği (mm)	2	
2 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	30,2	
7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	51,1	
28 Günlük Basınç Dayanımı(MPa)	62,2	

3.2. Taguchi Metodu

Bu bölümde, 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.

Deneysel Tasarım yöntemi İngiliz istatistikçisi 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 Deneysel Tasarım yönteminin temelini oluşturmaktadır. Bu yöntemin ardından da faktöriyel analiz kavramı doğmuştur (Montgomery, 1991; Hamzaçebi ve Kutay, 2003).

Deneysel 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 deneysel tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Daha sonra Profesör Genichi Taguchi, hedeflenen kalitenin üretimden önce tasarım aşamasında sağlanabileceğini ifade etmiştir (Taguchi, 1991; Hamzaçebi ve Kutay, 2003).

Dr. Taguchi'nin geliştirmiş olduğu kalite sistemi 1950'li yıllarda savaş sonrası Japonya'nın telefon sistemi üzerinde uygulanmış ve son derece başarılı olmuştur (Saat, 2000; Peace, 1993). Deneysel Tasarım tekniklerinin ABD'de kullanılmaya başlaması, 1980'lerin ilk yıllarında Taguchi'nin Amerika'da verdiği seminerlerden sonraya rastlamaktadır (Şirvancı, 1997).

Taguchi Yöntemi, maliyetleri en düşük seviyede tutup en az deney yapma prensibine dayanmaktadır (Taguchi, 1987). Bu yöntem hem ürünlerin kalitesinin iyileşmesinde etkili olur, hem de kaliteye ulaşmada çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkanını vermektedir (Ross, 1989; Canıyılmaz, 2001).

Taguchi metodu süreci etkileyen parametrelerden ve değişen seviyeleri düzenleyen ortagonal dizilerden oluşur. Faktöriyel tasarımdaki gibi tüm mümkün kombinasyonları test etmek yerine birkaç kombinasyonu test eder (Fraley ve diğ., 2007)

En basit ortagonal düzey 2^2 düzenidir. Bu düzende iki parametre ve bu etkenlerin iki seviyesi vardır. Yani 2x2=4 deney eşleştirmesi bulunmaktadır.

2^3 etkensel deney düzeninde ise 3 parametre ve bunların iki seviyeleri incelenmektedir. Burada 2x2x2=8 deney yapılarak inceleme gerçekleştirilmektedir (Erbaş ve Olmuş, 2006).

Bu çalışmada, deney sayısı en aza indirgenerek optimum harç malzemesi Taguchi deney tasarım tekniği kullanılarak belirlenmiştir. 3 parametre olarak Su/Çimento oranı (S/Ç), Çimento (Ç), Perlit/Taban Külü oranı (P/TK) faktörleri seçilmiştir ve 3 seviye üzerinde çalışılmıştır.

Fiziksel özellikler üzerindeki sinyal gürültü oranlarının etkisini gözlemlemek amacıyla aynı deney koşulları altında her bir test 3 defa tekrarlandı ve rastgeleleştirme yöntemi uygulandı.

Deney değerleri ve Taguchi metodundan sağlanan değerler arasındaki standart sapmayı hesaplamak için kayıp fonksiyon (üründen istenilen sonucu almama durumu, kalitesiz ürün, zarar) kullanıldı. Sinyal gürültü (S/G) oranları işte bu kayıp fonksiyondan dönüştürülür (Tosun ve Özler, 2004).

Deneyin karakteristiğine bağlı olarak çok çeşit S/G oranları mevcuttur. En yaygınları ise "Daha büyük daha iyidir", "Nominal daha iyidir" ve "Daha küçük daha iyidir" şeklindedir (Bozkurt, 2013).

Bu çalışmada, "Daha büyük daha iyidir" performans özelliği basınç ve eğilme dayanımları için, "Nominal daha iyidir" kıvam-yayılma için ve "Daha küçük daha iyidir" ise kuru birim ağırlık, ısıl iletkenlik katsayısı, su emme ve kılcal su emme için kullanıldı.

"Daha büyük daha iyidir" performans karakteristiğini belirlemek için; aşağıdaki S/G oranı formülü ile hesaplanır;

$$SN_i = -10 \log x \left[\frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} \frac{1}{y_u^2} \right] \quad (3.1)$$

"Daha küçük daha iyidir" performans karakteristiğini belirlemek için; aşağıdaki S/G oranı formülü ile hesaplanır;

$$SN_i = -10 \log x \left[\sum_{u=1}^{N_i} \frac{y_u^{\,2}}{N_i} \right] \quad (3.2)$$

"Nominal daha iyidir" performans karakteristiğini belirlemek için; aşağıdaki S/G oranı formülü ile hesaplanır;

$$SN_i = -10 \log x \left[\sum_{u=1}^{N_i} \frac{(y_u - \bar{y})^2}{N_i - 1} \right] \quad (3.3)$$

i : Deney numarası

u : Deneme numarası

N_i : i Deneyi için deneme numarası

y : Her bir gözlem değeri

$\bar{y}$: Gözlem ortalama değeri

Her deneyin sinyal gürültü oranı hesaplandıktan sonra her bir faktör ve seviye için ortalama sinyal gürültü oranı hesaplanır (Fraley ve diğ., 2007).

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. İkinci adımda testin tahmini güven aralığı, önemlilik düzeyi α yüzdesi belirlenir.

H_0: Ortalamalar arasında fark yoktur (faktörlerin etkisi yoktur).

H_1: 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 ile Tablo 3.6'daki tek yönlü varyans analizi tablosu hazırlanır. Aşağıda gerekli formüller verilmiştir (URL-2).

Uygulama kareler toplamı ve varyansı;

$$SS_T = \sum_{i=1}^{k} n_i \left(\overline{X}_i - \overline{X}_{GM}\right)^2 \tag{3.4}$$

$$df_T = k - 1 \tag{3.5}$$

$$S_T^2 = \frac{SS_T}{df_T} \tag{3.6}$$

Hata kareler toplamı ve varyansı;

$$SS_E = \sum_{j=1}^{n_1} \left(X_{1j} - \overline{X}_1\right)^2 + \sum_{j=1}^{n_2} \left(X_{2j} - \overline{X}_2\right)^2 + \cdots + \sum_{j=1}^{n_k} \left(X_{kj} - \overline{X}_k\right)^2 \tag{3.7}$$

$$df_E = N - k \tag{3.8}$$

$$S_E^2 = \frac{SS_E}{df_E} \tag{3.9}$$

$$S_{TOT} = SS_T + SS_E \tag{3.10}$$

$$df_{TOT} = N - 1 \tag{3.11}$$

$\overline{X}_{GM}$: Büyük ortalama

$\overline{X}_i$: Grup ortalaması

df_T : Grupların serbestlik derecesi

df_E : Hatanın serbestlik derecesi

S_T^2 : Grupların varyansı (MST)

S_E^2 : 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 3.6. Tek yönlü varyans analizi tablosu (URL-2)

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

Bu araştırmada ısıl iletkenlik katsayısı ölçümleri hariç 40x40x160 mm ve ısıl iletkenlik katsayısı ölçümü için 40x90x160 mm boyutlarında dikdörtgen prizma harç numuneleri kullanılmıştır. Bağlayıcı oranlarının belirlenmesi için üretilen harç numuneleri 20±2 ˚C'de suda 28 gün kür edilmiştir.

En uygun bağlayıcı oranının belirlenmesinde çimento, perlit ve taban külü içeren karışımlar hazırlanmıştır ve karışımlarda kum kullanılmamıştır (Tablo 4.1). Karışıma giren perlit ve taban külü malzemesi çok fazla su emdikleri ve su kontrolleri zor olduğu için, bu malzemeler kuru olarak karışımda yer almıştır. Bu durumda karışım suyunun çimentoya oranı (S/Ç) yüksek tutulmuştur. Deney sayısı en aza indirgenerek yeterli dayanım, su emme, hafiflik ve ısı yalıtımı sağlayacak optimum harç malzemesi Taguchi deney tasarım tekniği kullanılarak belirlenmiştir. 3 parametre; Su/Çimento oranı (S/Ç), Çimento, Perlit/Taban Külü oranı (P/TK) ve 3 seviye üzerinde çalışılmıştır (Tablo 4.2). 3^3 yani 27 deney yerine sadece 9 deney yapılmış ve L9 ortogonal düzeni kullanılmıştır (Tablo 4.3).

Tablo 4.1. Deneylerde her grup için kullanılan malzeme ağırlıkları

Grup No	Malzemeler (kg/m^3)					
	Çimento	İnce perlit	İri perlit	Atık perlit	Taban külü	Su
1	150	40,2	18,8	37,0	446,8	150,0
2	200	42,9	20,0	39,5	357,8	200,0
3	250	43,3	20,2	39,8	288,8	250,0
4	150	44,7	20,8	41,1	372,1	187,5
5	200	44,4	20,7	40,8	295,9	250,0
6	250	30,2	14,1	27,8	335,5	312,5
7	150	47,1	22,0	43,3	314,2	225,0
8	200	31,7	14,8	29,1	351,9	300,0
9	250	31,5	14,7	29,0	262,3	375,0

Tablo 4.2. Uygulamada kullanılan parametreler ve seviyeleri

Parametreler	Seviyeler		
	1	2	3
(A) S/Ç Oranı	1	1,25	1,5
(B) Çimento	150	200	250
(C) P/TK Oranı	0,75	1	1,25

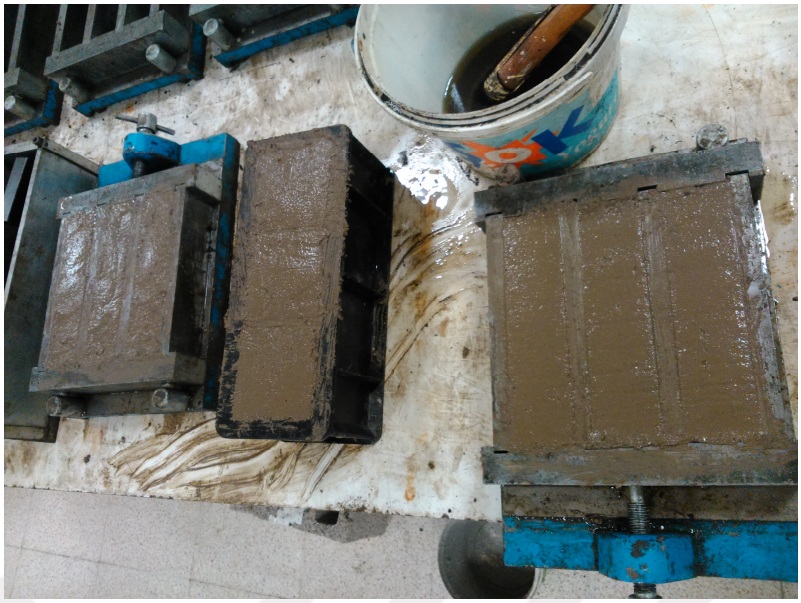
Tablo 4.3. Seçilen L9(27) deney planı

Deney Kombinasyonu	Parametreler ve Seviyeleri		
	S/Ç	Çimento	P/TK
1(1/150/0,75)	1	1	1
2(1/200/1)	1	2	2
3(1/250/1,25)	1	3	3
4(1,25/150/1)	2	1	2
5(1,25/200/1,25)	2	2	3
6(1,25/250/0,75)	2	3	1
7(1,5/150/1,25)	3	1	3
8(1,5/200/0,75)	3	2	1
9(1,5/250/1)	3	3	2

Deney seçimi rastgeleleştirme yöntemi kullanılarak 3 defa tekrarlandı. Bunun amacı ise fiziksel özellikler üzerindeki sinyal gürültü oranlarının etkisini gözlemlemektir. Üretim sürecinde taze harçlar laboratuvar mikserinde karıştırılmıştır ve Şekil 4.1'de gösterildiği gibi akma masasında kıvam ölçümü yapılmıştır.



Şekil 4.1. Akma masasında kıvam ölçümünün yapılışı



Şekil 4.2. Harç numunelerinin kalıplara yerleştirilmesi

Numunelerin hazırlanması aşamasında laboratuvar mikseri kullanılmış karıştırıcıya önce katı haldeki malzemeler atılmış, daha sonra su ilave edilmiştir. Taze karışım halindeyken yayılma tablasında harcın önce su oranına bakılmış, daha sonra iki aşama halinde Şekil 4.2'de gösterildiği gibi çelik kalıplara yerleştirilmiştir ve vibrasyon masasında titreşimle harç numunelerinin sıkışması sağlanmıştır.

Numuneler kalıplardan 24 saat sonra çıkarılmış ve 27 gün 20±2 ˚C suda bekletilerek kür uygulanmıştır. Bu şekilde üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki numunelerden 3 tanesi kısmı su emme, kılcal su emme ve kuru birim ağırlık deneylerine, diğer 3 tanesi de eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Eğilme deneyinde kırılan parçalar üzerinde 40x40 mm boyutlarındaki çelik plakalar yardımıyla 6 adet numune üzerinde basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Hotbox ısıl geçirgenlik cihazı için 3 adet 40x90x160 mm boyutlarında özel olarak hazırlanan dikdörtgen prizma harç numunesi ise diğer numunelerle aynı şekilde kür işleminden geçirilmiş ve ısıl iletkenlik deneyi için kullanılmıştır.

Üretilen numuneler üzerinde kıvam-yayılma, birim ağırlık, su emme, kılcal su emme, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ısı yalıtımı deneyleri gibi fiziksel ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir.

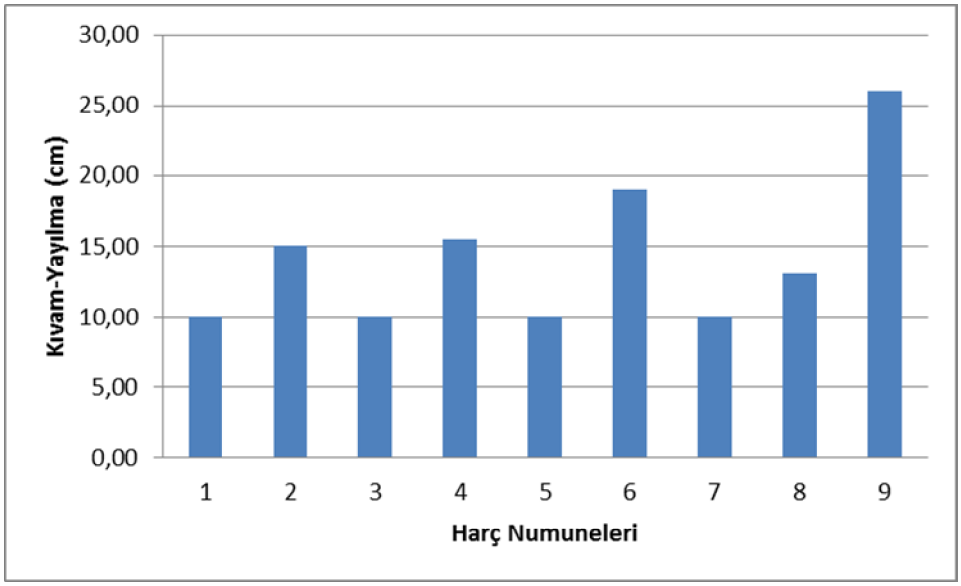
4.1. Kıvam-Yayılma

Kıvam deneyi, TS EN 1015-3 ve ASTM C 1437 standardına uygun olarak, yayılma tablası üzerine yeteri kadar numune harcı yerleştirilerek yapıldı. 15 saniye içinde 25 vuruş yaparak, harcın ne kadar yayıldığı gözlemlendi.

Tablo 4.4'te üçerli üretilen numunelerin kalıplara yerleştirilmeden önceki kıvam değerleri görülmektedir. Bu değerler kullanılarak Şekil 4.3'deki grafik oluşturulmuştur.

Tablo 4.4. Harç numunelerinin kıvam-yayılma değerleri

Deney Kombinasyonu	Kıvam-yayılma (cm)
1(1/150/0,75)	10,00
2(1/200/1)	15,00
3(1/250/1,25)	10,00
4(1,25/150/1)	15,50
5(1,25/200/1,25)	10,00
6(1,25/250/0,75)	19,00
7(1,5/150/1,25)	10,00
8(1,5/200/0,75)	13,00
9(1,5/250/1)	26,00



Şekil 4.3. Harç numunelerinin kıvam-yayılma değerleri grafiği

Harç malzemesinde yayılma değeri olarak 10 ile 20 cm arasındaki değerler uygun değerler olarak görülmektedir. Şekil 4.3'te 9 numaralı deney numunesinin kıvam-

yayılma değerinin diğerlerine nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Çimento ve S/Ç oranı artmasıyla kıvamda artış gözlenmiştir. Ancak P/TK oranı kıvam-yayılma değerini düşürmüştür. 1,5 S/Ç oranı, 250 kg/m^3 çimento ve P/TK oranı 1 olan içeriği ile 9 numaralı deney numunesi 26 cm yayılmaya sahiptir. 19 cm ile 6 numaralı numune istenilen kıvam miktarına en yakın değer olarak karşımıza çıkmıştır. Perlitin su emici özelliği dolayısıyla kıvam değeri perlit miktarı arttıkça azalmıştır. 9 numaralı deneyden ölçülen yüksek değer en yüksek miktarlarda su ve çimento kullanılmasından kaynaklanmaktadır. 26 cm değeri yayılma için oldukça yüksek bir değerdir ve olumlu görülmemektedir. Kıvam artışı istense de bu rakamın en fazla 15-20 cm aralığı ile sınırlı tutulmasında fayda vardır. Taban külü malzemesi puzolanik bir malzeme olması sebebiyle çimento ve perlit ile kimyasal bir reaksiyona girmesi ihtimali mevcuttur.

Fiziksel özellikler üzerindeki sinyal gürültü oranlarının etkisini gözlemlemek amacıyla aynı deney koşulları altında her bir test 3 defa tekrarlandı ve rastgeleleştirme yöntemi uygulandı. Taguchi metoduyla analiz edilmiş veriler optimum kriter üzerinden her parametrenin etkisini belirlemek içindir. Tablo 4.5'te kıvam-yayılmaya ait sinyal gürültü (S/G) oranları verilmiştir. Deneyin karakteristiğine bağlı olarak çeşitli S/G oranı formülleri mevcuttur. Kıvam-yayılma değerlerinin S/G oranı hesaplanırken nominal değer 17,5 cm alınmış ve kıvam-yayılma değeri "nominal daha iyidir" performans karakteristiğine göre S/G oranı Denklem (3.3) ile hesaplanmıştır.

Tablo 4.5. Harç numunelerine ait kıvam-yayılma S/G oranları

Deney Kombinasyonu	Kıvam-yayılma için S/G Oranları (dB)
1(1/150/0,75)	-19,262
2(1/200/1)	-9,720
3(1/250/1,25)	-19,262
4(1,25/150/1)	-7,782
5(1,25/200/1,25)	-19,262
6(1,25/250/0,75)	-5,283
7(1,5/150/1,25)	-19,252
8(1,5/200/0,75)	-14,825
9(1,5/250/1)	-20,349

Harcın kıvam-yayılma için yapılan varyans analizinin (ANOVA) sonuçları Tablo 4.6'da verilmiştir.

Yürütülen deneylerin önemlilik yüzdelerini belirlememek amacıyla tahmini güven aralığında %95 önem seviyesi ANOVA metodu uygulanarak kullanılmıştır. Bu durumda α, 0,05 olarak alınır. Harcın kıvam-yayılma için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.6'da verilmiştir. Tabloda gösterilen F değerleri bir faktörün F testi değeri olup $F_{hesaplanan}$ denir. MST, tek tek faktörlerin varyansı ve MSE ise hatanın varyansıdır. Faktörlerin varyansının hatanın varyansına oranından $F_{hesaplanan}$ elde edilir.

Hesaplamalarda Denklem (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11)'den faydalanılmıştır. Bulunan F değerleri, standart F testi tablolarındaki serbestlik dereceleri kullanılarak okunan F-Tablo değeri ile karşılaştırılır. Eğer bu değer tablodaki değerden büyükse yani;

$$F_{hesaplanan} > F_{tablo} \tag{4.1}$$

ise hesaplanan faktör önemlidir (Tanyıldız ve Coşkun 2013).

F-Tablo değeri 2 serbestlik derecesi ve 20 hata derecesi için F dağılım tablosundan 3,49 bulunmuştur ($F\text{-}Tablo_{2,20}$=3,49). Tablodan anlaşılacağı üzere S/Ç, P/TK ve çimento F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. Seçilen hipotezler ise şöyledir;

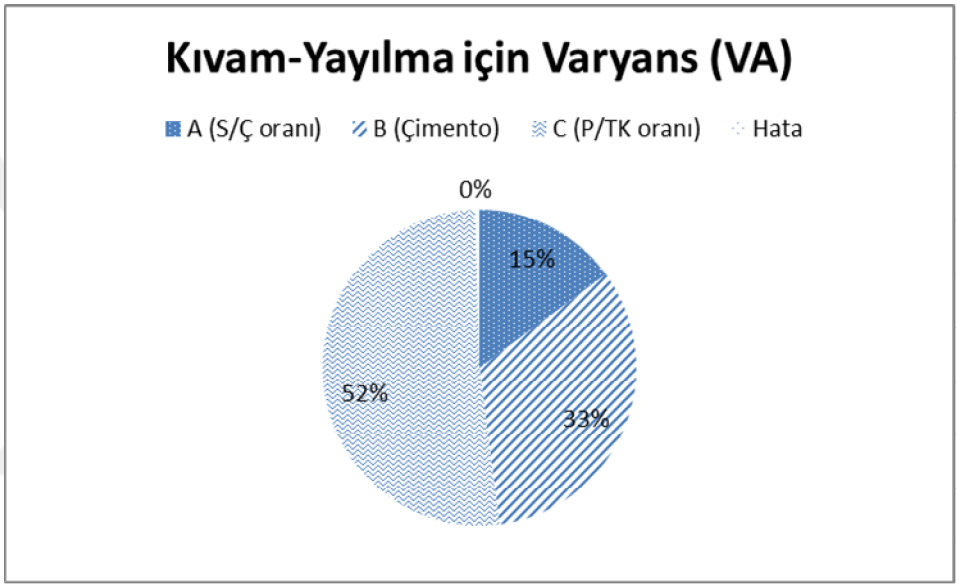
H_0: Parametre etkilerinin kalite karakteristiği üzerinde etkisi yoktur.
H_1: Parametre etkilerinin kalite karakteristiği üzerinde etkisi vardır.

Bu durumda bu üç parametre (faktör) için kurulan Ho hipotezleri reddedilir dolayısıyla kıvam-yayılma için etkili parametreler olduğu anlaşılır.

Tablo 4.6. Kıvam-Yayılma için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SS)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (MS)	F
A (S/Ç oranı)	102,1667	2	51,08333	33,8674
B (Çimento)	225,1667	2	112,5833	74,64088
C (P/TK oranı)	352,1667	2	176,0833	116,7403
Hata	30,16667	20	1,508333	
Toplam	709,6667	26		

Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin kıvam-yayılma % etkisi Şekil 4.4'te verilmiştir. Harç kıvam-yayılma miktarında %52 ile P/TK oranı en büyük etkiye sahiptir ve 3, 6, 9 numaralı numuneler incelendiğinde aynı miktar çimento kullanıldığında perlit miktarı arttıkça, perlitin su emmesi yüksek olduğu için kıvam azalmaktadır. %33 ile çimento oranının etkisi P/TK oranına göre daha düşük olmuş, 7, 8, 9 numaralı numuneler incelendiğinde çimento arttıkça kıvam azalmıştır. %15'lik S/Ç oranı düşük etkiye sahip olmakla beraber, oran düştükçe kıvam azalmıştır. Varyans hata oranı %1 ile yok denecek kadar az bulunmuştur.



Şekil 4.4. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin kıvam yayılma değerine % etkisi

4.2. Eğilme Dayanımı

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. Elde edilen kırılma yükü aşağıdaki Denklem (4.2)'de yerine konarak, eğilme dayanımı üç numunenin ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

$$\sigma_e = 1{,}5 \times \frac{F \times L}{b \times d} \tag{4.2}$$

σ_e= Eğilme Dayanımı, (N/mm^2, MPa)

F= Kırılma anındaki yük, (N)

L= Mesnet açıklığı, (mm)

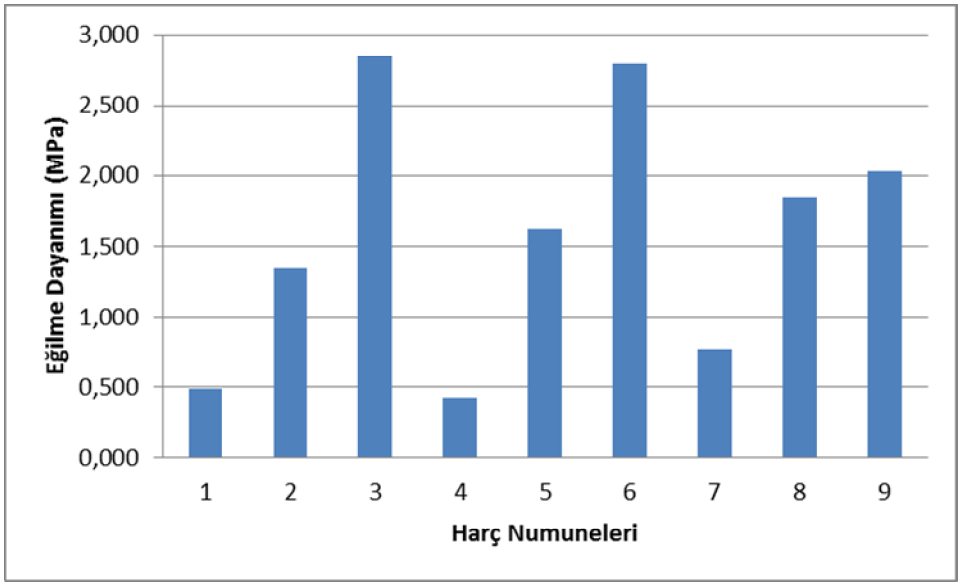
b= Harç numunesinin genişliği, (mm)

d= Harç numunesinin yüksekliği, (mm)

Tablo 4.7'de üçerli üretilmiş numunelerin 28 günlük kürden sonraki eğilme dayanımları görülmektedir. Bu dayanımlara göre Şekil 4.5'deki grafik oluşturulmuştur.

Tablo 4.7. Harç numunelerinin eğilme dayanımları

Eğilme Dayanımları (MPa)				
Deney Kombinasyonu	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
1(1/150/0,75)	0,750	0,234	0,469	0,484
2(1/200/1)	1,805	1,172	1,031	1,336
3(1/250/1,25)	2,578	3,047	2,906	2,844
4(1,25/150/1)	0,422	0,258	0,586	0,422
5(1,25/200/1,25)	1,313	2,156	1,383	1,617
6(1,25/250/0,75)	2,906	2,578	2,883	2,789
7(1,5/150/1,25)	0,539	0,914	0,844	0,766
8(1,5/200/0,75)	1,945	1,898	1,711	1,852
9(1,5/250/1)	2,203	1,898	1,992	2,031



Şekil 4.5. Harç numunelerinin eğilme dayanımlarının grafiği

Şekil 4.5'te 3. ve 6. deney numunelerinin eğilme mukavemetlerinin diğerlerine nazaran daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. Aynı miktar çimento kullanılmış

deney numunelerinin P/TK içeriğinin artması ve S/Ç oranının azalması eğilme dayanımını artırmıştır. Belirgin bir şekilde en iyi sonucu veren 3 numaralı deney numunesinin S/Ç oranı 1 olup, çimento miktarı 250 kg/m^3 ve perlit taban külü oranı (P/TK) 1,25 olarak alınmıştır. Numunenin eğilme dayanımı 2,84 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca 2,79 ile çok yakın bir eğilme dayanımı sonucu veren 6 numaralı numunenin S/Ç oranı 1,25 olup, çimento miktarı 250 kg/m^3 ve perlit taban külü oranı (P/TK) 0,75'dir. Burada S/Ç 0,25 oranında artırılıp ve P/TK oranı ise 0,50 oranında azaltıldığında 6 numaralı deneyde 0,05 MPa azalma gözlenmiştir. Eğilme deneyi sonuçlarında kalıplara yerleştirilirken uygulanan işçilik ve perlitin boşluklu kırılgan bir yapıya sahip olması etkili faktörlerdendir.

Taguchi metoduyla analiz edilmiş veriler optimum kriter üzerinden her parametrenin etkisini belirlemek içindir. Tablo 4.8'de eğilme dayanımına ait sinyal gürültü oranları verilmiştir. Eğilme dayanımı "daha büyük daha iyidir" performans karakteristiğinde olduğu için S/G oranı Denklem (3.1) ile hesaplanmıştır.

Tablo 4.8. Harç numunelerine ait eğilme dayanımlarının S/G oranları

Deney Kombinasyonu	Eğilme Dayanımı için S/G Oranları (dB)
1(1/150/0,75)	-9,126
2(1/200/1)	1,814
3(1/250/1,25)	9,013
4(1,25/150/1)	-8,954
5(1,25/200/1,25)	3,570
6(1,25/250/0,75)	8,870
7(1,5/150/1,25)	-3,041
8(1,5/200/0,75)	5,310
9(1,5/250/1)	6,106

Tablo 4.9'da ise ANOVA metodundan faydalanılarak çizilmiş eğilme dayanımına ait Varyans tablosu verilmiştir.

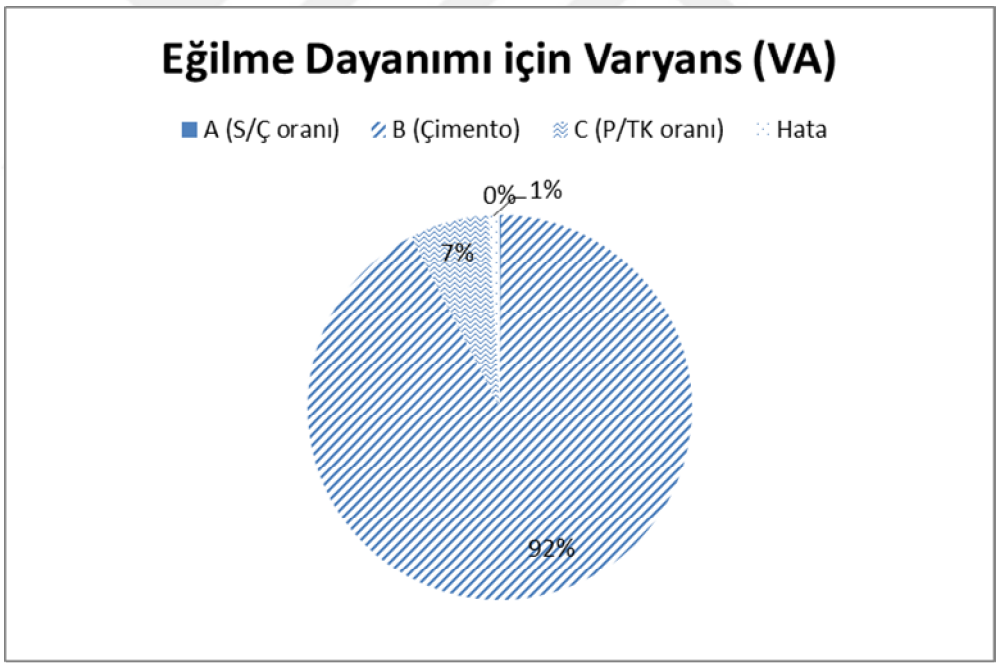
Tablo 4.9'daki F-Tablo değeri F dağılım tablosundan 3,49 bulunmuştur. Tablodan anlaşılacağı üzere P/TK ve çimento F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. H_0 hipotezimiz faktörlerin etkisinin olmadığıdır. Bu durumda bu iki parametre (faktör) için kurulan Ho hipotezleri reddedilir dolayısıyla eğilme dayanımı için etkili parametreler olduğu anlaşılır. S/Ç oranı için ise F değeri F-Tablo değerinden daha

küçük olduğunda Ho kabul edilir ve dolayısıyla S/Ç faktörünün etkisinin olmadığı kabul edilir.

Tablo 4.9. Eğilme dayanımı için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SS)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (MS)	F
A (S/Ç oranı)	0,019816	2	0,009908	0,107803
B (Çimento)	17,96562	2	8,982808	97,73614
C (P/TK oranı)	1,28715	2	0,643575	7,002324
Hata	1,838175	20	0,091909	
Toplam	21,11076	26		

Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin eğilme dayanımına % etkisi Şekil 4.6'da verilmiştir. Harç eğilme dayanımında %92 ile çimento en büyük etkiye sahiptir. %7 oranı ile P/TK oranının etkisi düşük olmuş, %1' lik S/Ç oranının etkisi olmamıştır. Varyans hata oranı %0 bulunmuştur.



Şekil 4.6. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin eğilme dayanımına % etkisi

4.3. Basınç Dayanımı

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 Denklem (4.3) ile hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{4.3}$$

$\sigma =$ Basınç dayanımı, (N/mm^2, MPa)

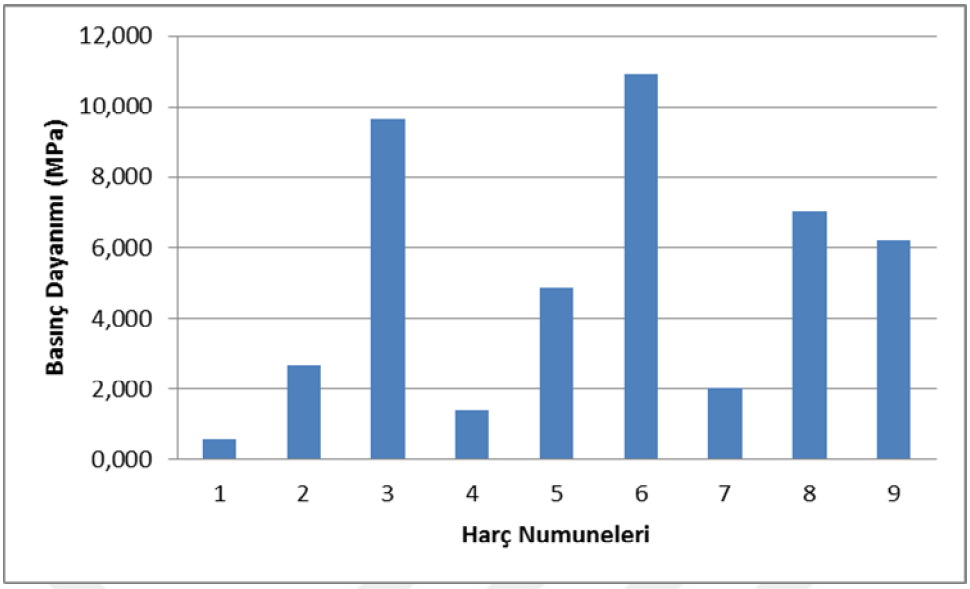
F= Kırılma anındaki yük, (N)

A= Basınç uygulanan yüzey alanı, (mm^2)

Tablo 4.10'da üçerli üretilen numunelerin 28 günlük kürden sonraki basınç dayanımları görülmektedir. Bu dayanımlara göre Şekil 4.7'deki grafik oluşturulmuştur.

Tablo 4.10. Harç numunelerinin basınç dayanımları

Basınç Dayanımları (MPa)				
Deney Kombinasyonu	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
1(1/150/0,75)	0,531	0,631	0,575	0,579
2(1/200/1)	2,763	2,681	2,581	2,675
3(1/250/1,25)	9,819	8,256	10,894	9,656
4(1,25/150/1)	1,313	1,200	1,669	1,394
5(1,25/200/1,25)	6,200	4,625	3,713	4,846
6(1,25/250/0,75)	11,475	9,531	11,763	10,923
7(1,5/150/1,25)	2,050	2,019	2,019	2,029
8(1,5/200/0,75)	7,113	6,956	6,975	7,015
9(1,5/250/1)	6,331	6,325	5,956	6,204



Şekil 4.7. Harç numunelerinin basınç dayanımlarının grafiği

Şekil 4.7'de 3 ve 6 deney numunelerinin basınç mukavemetlerinin diğerlerine nazaran daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. Aynı miktar çimento miktarına sahip numunelerde P/TK içeriğinin azalması ve S/Ç oranının artması basınç dayanımını artırmıştır. Belirgin bir şekilde en iyi sonucu veren 6 numaralı deney S/Ç oranı 1,25 olan, 250 kg/m^3 çimento miktarına sahip ve P/TK oranı 0,75'tir. Basınç dayanımı 10,92 MPa ile en yüksek değeri almıştır. Ayrıca 10,89 ile çok yakın bir eğilme dayanımı sonucu veren 3 numaralı numunenin S/Ç oranı 1 olup, çimento miktarı 250 kg/m^3 ve perlit taban külü oranı (P/TK) 1,25 olarak alınmıştır. S/Ç oranı 0.25 azalıp P/TK oranı 0,50 arttığında 6 ve 3 numaralı numuneler arasında 0,03 MPa azalma olmuştur. Karışımlarda kullanılan perlit genleştirilmiş perlit olması sebebiyle boşluklu bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla perlitteki bu boşluklu yapı perlite kırılgan bir özellik katmaktadır ve bu durum malzemenin basınç mukavemetini azalan yönde etkilemiştir.

Tablo 4.11'de basınç dayanımına ait sinyal gürültü oranları verilmiştir. Basınç dayanımı "daha büyük daha iyidir" performans karakteristiğinde olduğu için S/G oranı Denklem (3.1) ile hesaplanmıştır.

Tablo 4.11. Harç numunelerine ait basınç dayanımlarının S/G oranları

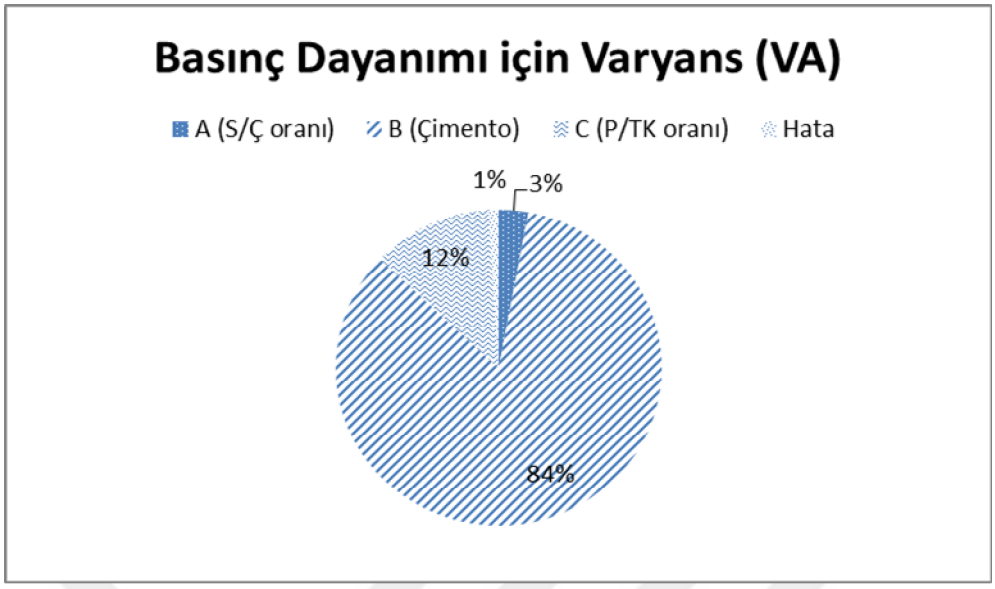
Deney Kombinasyonu	Basınç Dayanımı için S/G Oranları (dB)
1(1/150/0,75)	-4,808
2(1/200/1)	8,536
3(1/250/1,25)	19,525
4(1,25/150/1)	2,639
5(1,25/200/1,25)	13,148
6(1,25/250/0,75)	20,650
7(1,5/150/1,25)	6,146
8(1,5/200/0,75)	16,919
9(1,5/250/1)	15,842

Harcın basınç dayanımı için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.12'de verilmiştir. F-Tablo değeri 2 serbestlik derecesi ve 20 hata derecesi için F dağılım tablosundan 3,49 bulunmuştur. Tablodan anlaşılacağı üzere P/TK ve çimento F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu iki parametre (faktör) için kurulan Ho hipotezleri reddedilir, dolayısıyla basınç dayanımı için etkili parametreler olduğu anlaşılır. S/Ç oranı için ise F değeri F-Tablo değerinden daha küçük olduğunda Ho kabul edilir ve dolayısıyla S/Ç faktörünün etkisinin olmadığı kabul edilir.

Tablo 4.12. Basınç dayanımı için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SS)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (MS)	F
A (S/Ç oranı)	9,069916	2	4,534958	2,926437
B (Çimento)	259,9826	2	129,9913	83,88422
C (P/TK oranı)	37,02268	2	18,51134	11,94548
Hata	30,99303	20	1,549652	
Toplam	337,0683	26		

Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin basınç dayanımına % etkisi Şekil 4.8'de verilmiştir. Harç basınç dayanımında %84 ile çimento en büyük etkiye sahiptir. %12 oranı ile P/TK oranının etkisi düşük olmuş, %3' lük S/Ç oranının neredeyse etkisi olmamıştır. Varyans hata oranı %1 ile yok denecek kadar az bulunmuştur.



Şekil 4.8. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin basınç dayanımına % etkisi

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 doygun kuru yüzey ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra 24 saat 110 ± 5 ˚C'de değişmez kütleye ulaşıncaya 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 Denklem (4.4) ve (4.5) ile hesaplanmıştır.

Kuru birim ağırlık;

$$\Delta = \frac{W_k}{V} \tag{4.4}$$

Δ = Kuru birim ağırlık, (gr/cm^3)

W_k= Kuru ağırlık, (gr)

V = Numune hacmi, (cm^3)

Ağırlıkça yüzde su emme oranı;

$$S_a = \frac{W_d - W_k}{W_k} \times 100 \tag{4.5}$$

S_a= Ağırlıkça yüzde su emme, (%)

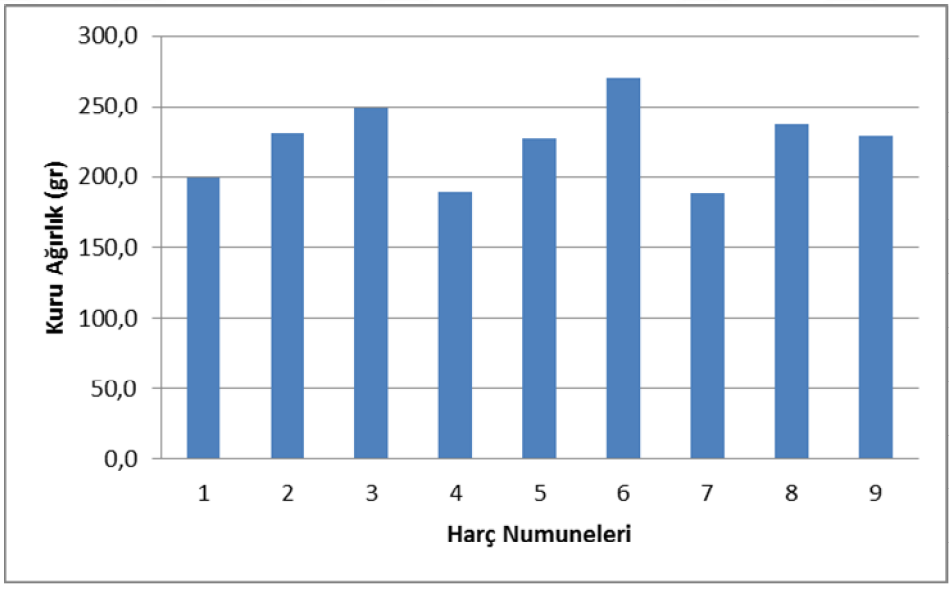
W_d= Doygun kuru yüzey ağırlık, (gr)

W_k= Kuru ağırlık, (gr)

Tablo 4.13'te üçerli üretilen numunelerin kuru ağırlıkları verilmiştir. Bu ağırlıklara göre Şekil 4.9'daki grafik oluşturulmuştur.

Tablo 4.13. Harç numunelerinin kuru ağırlıkları ve bulunan kuru birim ağırlıkları

Kuru Ağırlık (gr)					Kuru Birim Ağırlık (gr/cm^3)
Deney Kombinasyonu	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama	
1(1/150/0,75)	188,8	203,8	206,2	199,6	0,780
2(1/200/1)	210,8	241,8	241,3	231,3	0,904
3(1/250/1,25)	251,8	248,9	247,4	249,4	0,974
4(1,25/150/1)	191,0	188,1	189,9	189,7	0,741
5(1,25/200/1,25)	229,1	231,6	220,7	227,1	0,887
6(1,25/250/0,75)	270,9	270,9	268,3	270,0	1,055
7(1,5/150/1,25)	188,3	185,8	192,6	188,9	0,738
8(1,5/200/0,75)	237,2	240,4	235,3	237,6	0,928
9(1,5/250/1)	222,0	233,6	233,2	229,6	0,897



Şekil 4.9. Harç numunelerinin kuru ağırlıklarının grafiği

Şekil 4.9'da en düşük kuru ağırlık 7.numune için 188,9 gr olarak görülmektedir. Beklendiği gibi çimento dozajı arttıkça kuru ağırlık da artmaktadır ve 7. Numune için en düşük miktar olan 150 kg/m^3 çimento kullanılmıştır. Ayrıca perlit taban külü oranı

P/TK (1,25) ve su çimento oranı S/Ç (1,5) 7. Numune için en yüksek seviyededir. Bu durumda P/TK ve S/Ç oranlarının artması kuru ağırlığı düşürdüğü görülmektedir. 3 ve 6 numaralı deney numuneleri ise en ağır numunelerdir. S/Ç oranının 0,25 oranında artması ve P/TK oranının 0,50 oranında düşmesi 6. Numuneyi 20,6 gr ağırlaştırmıştır. Perlit genleşme sonucu 30 kata kadar boşluklu bir yapı kazanabilmesi sebebiyle malzemeye hafiflik verir ve bu özellik sebebiyle perlit miktarının arttığı malzemelerde ağırlıkta azalma gözlenmiştir.

Tablo 4.14'te kuru ağırlığa ait sinyal gürültü oranları verilmiştir. Kuru ağırlık "daha küçük daha iyidir" performans karakteristiğinde olduğu için S/G oranı Denklem (3.2) ile hesaplanmıştır.

Tablo 4.14. Harç numunelerine ait kuru ağırlık S/G oranları

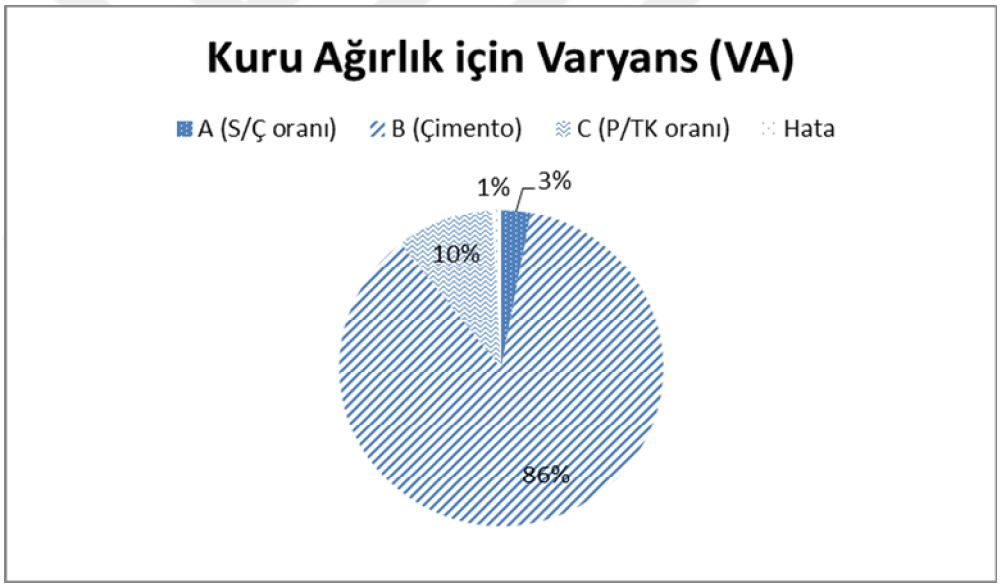
Deney Kombinasyonu	Kuru Ağırlık için S/G Oranları (dB)
1(1/150/0,75)	-46,010
2(1/200/1)	-47,301
3(1/250/1,25)	-47,937
4(1,25/150/1)	-45,560
5(1,25/200/1,25)	-47,127
6(1,25/250/0,75)	-48,628
7(1,5/150/1,25)	-45,526
8(1,5/200/0,75)	-47,519
9(1,5/250/1)	-47,222

Harcın kuru ağırlık için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.15'te verilmiştir. F-Tablo değeri 2 serbestlik derecesi ve 20 hata derecesi için F dağılım tablosundan 3,49 bulunmuştur. Tablodan anlaşılacağı üzere P/TK ve çimento F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu iki parametre (faktör) için kurulan Ho hipotezleri reddedilir, dolayısıyla kuru ağırlık için etkili parametreler olduğu anlaşılır. S/Ç oranı için ise F değeri F-Tablo değerinden daha küçük olduğunda Ho kabul edilir ve dolayısıyla S/Ç faktörünün etkisi yoktur hipotezi kabul edilir.

Tablo 4.15. Kuru ağırlık için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SS)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (MS)	F
A (S/Ç oranı)	522,6763	2	261,3381	3,270305
B (Çimento)	15295,46	2	7647,729	95,70131
C (P/TK oranı)	1729,245	2	864,6226	10,81962
Hata	1598,25	20	79,91248	
Toplam	19145,63	26		

Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin kuru ağırlığa % etkisi Şekil 4.10'da verilmiştir. Harç kuru ağırlığında %86 ile çimento en büyük etkiye sahiptir. %10 oranı ile P/TK oranının etkisi düşük olmuş, %3' lük S/Ç oranının neredeyse etkisi olmamıştır. Varyans hata oranı %1 ile yok denecek kadar az bulunmuştur.

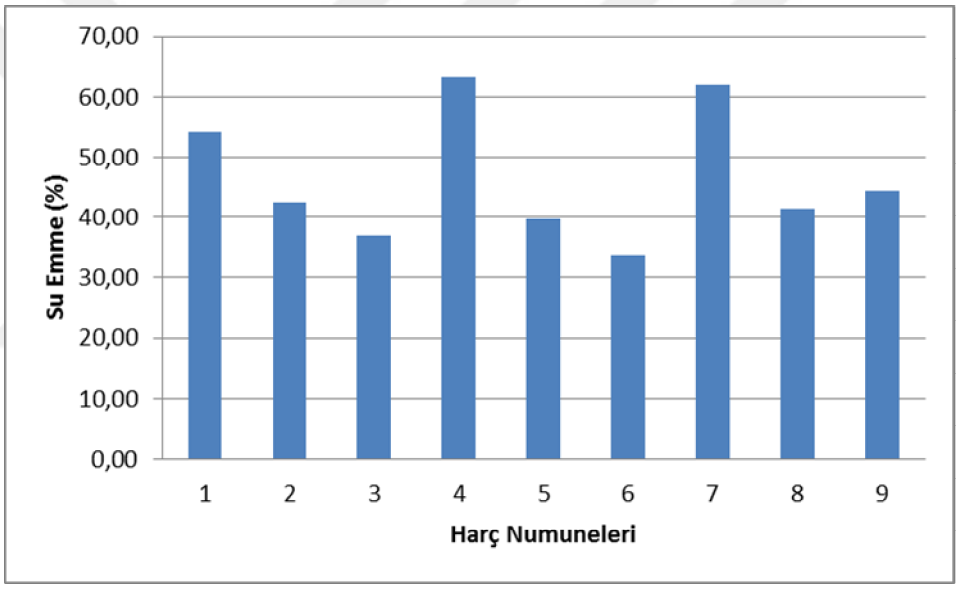


Şekil 4.10. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin kuru ağırlığa % etkisi

Tablo 4.16'da üçerli üretilen numunelerin su emme yüzdeleri verilmiştir. Bu ağırlıklara göre Şekil 4.11'deki grafik oluşturulmuştur.

Tablo 4.16. Harç numunelerinin su emme yüzdeleri

Su Emme (%)				
Deney Kombinasyonu	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
1(1/150/0,75)	60,54	51,57	50,24	54,12
2(1/200/1)	50,19	38,34	38,83	42,45
3(1/250/1,25)	35,39	37,24	38,04	36,89
4(1,25/150/1)	62,98	63,58	62,93	63,17
5(1,25/200/1,25)	38,80	38,51	42,09	39,80
6(1,25/250/0,75)	34,03	33,67	33,92	33,87
7(1,5/150/1,25)	61,71	65,45	58,52	61,89
8(1,5/200/0,75)	41,40	41,60	41,39	41,46
9(1,5/250/1)	46,98	43,28	42,67	44,31



Şekil 4.11. Harç numunelerinin ağırlıkça yüzde su emme değerlerinin grafiği

Şekil 4.11'de en düşük ağırlıkça su emme miktarı 6. Numune için %33,87 olarak bulunmuştur. Aynı miktar çimento kullanılan numuneler incelendiğinde P/TK içeriğinin azalması ve S/Ç oranının artması ağırlıkça su emme miktarını azaltmıştır. Belirgin bir şekilde en iyi sonucu veren 6 numaralı deney numunesi 1,25 S/Ç oranı, 250 kg/m^3 çimento ve 0,75 P/TK içeriğine sahiptir. Yine 3 numaralı deney numunesi ona en yakın sonucu vermiştir. Boşluksuz ve su emmesi düşük olan malzemenin dayanımsal artışa yol açtığı bu sonuçlardan da net olarak görülmektedir. 7 numaralı numune en fazla su emme değerine sahip olmaktadır. Bu numune aynı zamanda en düşük ağırlığa sahip olan numune olduğundan bu sonuç sürpriz olmamıştır. Tablo

4.17'de su emmeye ait sinyal gürültü oranları verilmiştir. Su emme "daha küçük daha iyidir" performans karakteristiğinde olduğu için S/G oranı Denklem (3.2) ile hesaplanmıştır.

Tablo 4.17. Harç numunelerine ait su emme S/G oranları

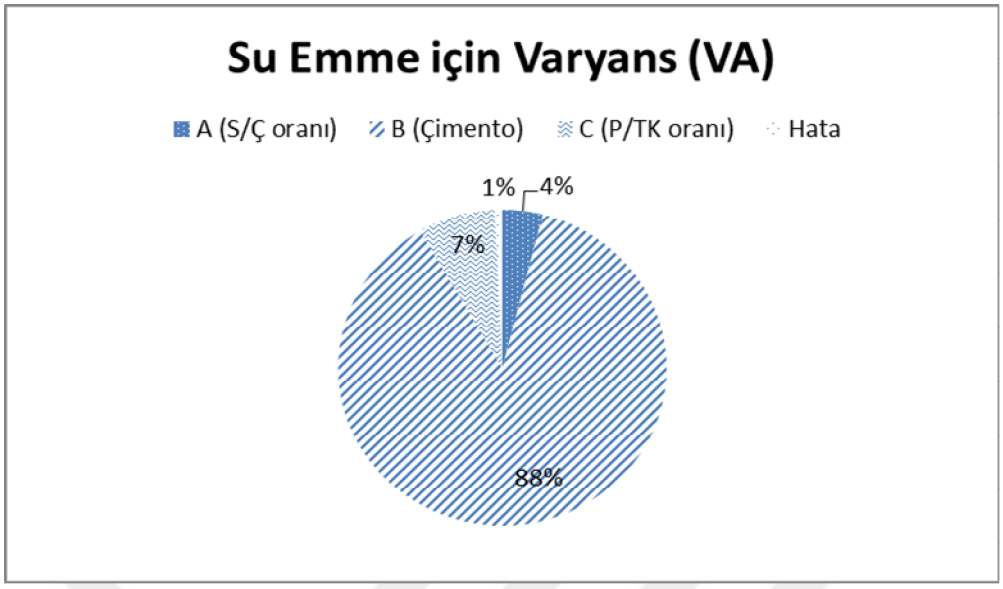
Deney Kombinasyonu	Su Emme için S/G Oranları (dB)
1(1/150/0,75)	-34,698
2(1/200/1)	-32,630
3(1/250/1,25)	-31,342
4(1,25/150/1)	-36,010
5(1,25/200/1,25)	-32,006
6(1,25/250/0,75)	-30,597
7(1,5/150/1,25)	-35,842
8(1,5/200/0,75)	-32,353
9(1,5/250/1)	-32,938

Harcın su emme için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.18'de verilmiştir. F-Tablo değeri 2 serbestlik derecesi ve 20 hata derecesi için F dağılım tablosundan 3,49 bulunmuştur. Tablodan anlaşılacağı üzere S/Ç, P/TK ve çimento F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu üç parametre (faktör) için kurulan Ho hipotezleri reddedilir dolayısıyla su emme için etkili parametreler olduğu anlaşılır.

Tablo 4.18. Su Emme için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SS)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (MS)	F
A (S/Ç oranı)	110,1144	2	55,0572	5,32365
B (Çimento)	2419,688	2	1209,844	116,9835
C (P/TK oranı)	210,4026	2	105,2013	10,17224
Hata	206,8401	20	10,342	
Toplam	2947,045	26		

Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin su emmeye % etkisi Şekil 4.12'de verilmiştir. Harç su emmesinde %88 ile çimento en büyük etkiye sahiptir. %7 oranı ile P/TK oranının etkisi düşük olmuş, %4' lük S/Ç oranının neredeyse etkisi olmamıştır. Varyans hata oranı %1 ile yok denecek kadar az bulunmuştur.



Şekil 4.12. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin su emmeye % etkisi

4.5. Kılcal Su Emme

Kılcal su emme deneyinde 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 4x4x8 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 ve kılcallık katsayıları Denklem (4.6) ve (4.7) ile hesaplanmıştır.

$$S_a = \frac{W_e - W_k}{W_k} \times 100 \qquad (4.6)$$

Sa= Ağırlıkça yüzde su emme, (%)

W_e= Doygun kuru yüzey ağırlık, (g)

W_k= Kuru ağırlık, (g)

$$m = \frac{c}{100} \times F \times \sqrt{t} \qquad (4.7)$$

F=Cismin su ile temas eden yüzey alanı, (cm^2)

m= Emilen su miktarı, (g)

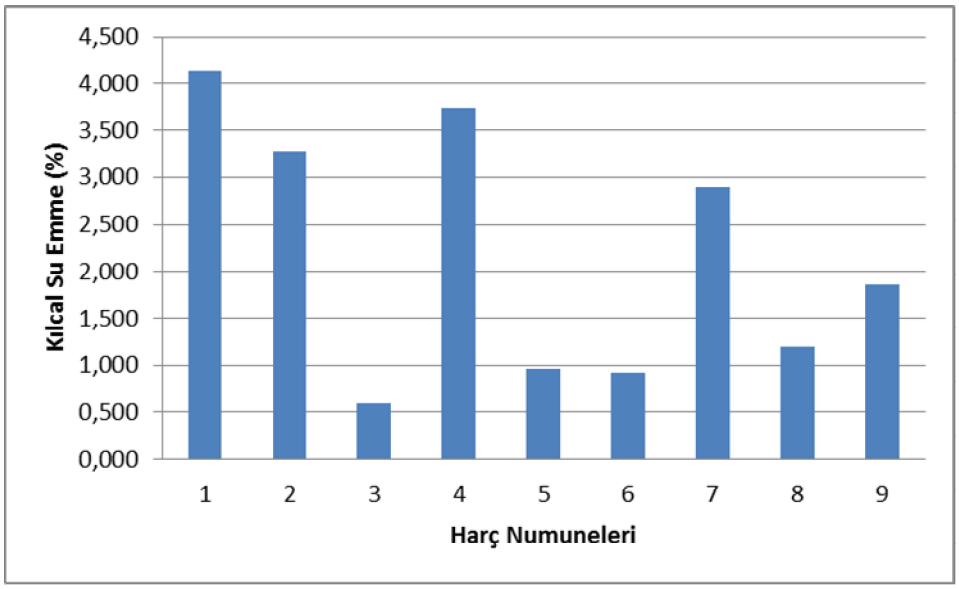
t= Zaman, (dk)

c=Kılcallık katsayısı, ($g/cm^2.dk^{0.5}$)

Tablo 4.19'da üçerli üretilen numunelerin kılcal su emme yüzdeleri ve kılcallık katsayıları verilmiştir. Bu ağırlıklara göre Şekil 5.13'teki grafik oluşturulmuştur.

Tablo 4.19. Harç numunelerinin kılcal su emme yüzdeleri

Kılcal Su Emme (%)					
Deney Kombinasyonu	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama	Kılcal. Kats. ($g/cm^2.dk^{0.5}$)
1(1/150/0,75)	4,270	4,020	4,100	4,130	$3{,}18x10^{-03}$
2(1/200/1)	3,840	3,860	2,110	3,270	$2{,}92X10^{-03}$
3(1/250/1,25)	0,570	0,580	0,620	0,590	$5{,}68X10^{-04}$
4(1,25/150/1)	4,110	3,550	3,540	3,733	$2{,}73X10^{-03}$
5(1,25/200/1,25)	1,200	0,630	1,070	0,967	$8{,}47X10^{-04}$
6(1,25/250/0,75)	0,910	0,820	1,020	0,917	$9{,}55X10^{-04}$
7(1,5/150/1,25)	2,850	2,850	3,000	2,900	$2{,}11X10^{-03}$
8(1,5/200/0,75)	1,000	1,170	1,410	1,193	$1{,}09X10^{-03}$
9(1,5/250/1)	1,730	1,940	1,920	1,863	$1{,}65X10^{-03}$



Şekil 4.13. Harç numunelerinin ağırlıkça yüzde kılcal su emme değerlerinin grafiği

Şekil 4.13'te en düşük ağırlıkça kılcal su emme miktarı 3. Numune için %0,59 olarak bulunmuştur. Aynı miktarda çimento kullanılmış numunelerde P/TK içeriğinin artması ve S/Ç oranının düşmesi ağırlıkça kılcal su emme miktarını azaltmıştır. Belirgin bir şekilde en iyi sonucu veren 3 numaralı deney numunesinin S/Ç oranı 1 olup, 250 kg/m^{3}çimento ve 1,25'lik oranda P/TK içeriğine sahiptir. Sonuçlar beklendiği gibi su emme sonuçlarına yakın olup, en az su emme oranına sahip 6 numaralı numune burada 3 numaralı numuneden daha fazla kılcallığa sahiptir. Perlitin genleşme sonrası kazandığı boşluklu yapı malzemenin kılcal su emmesinde etkili bir faktör olmuştur. Perlit miktarının artması kılcal su emme miktarının düşmesine neden olmuştur. Tablo 4.20'de kılcal su emmeye ait sinyal gürültü oranları verilmiştir. Kılcal su emme "daha küçük daha iyidir" performans karakteristiğinde olduğu için S/G oranı Denklem (3.2) ile hesaplanmıştır.

Tablo 4.20. Harç numunelerine ait kılcal su emme S/G oranları

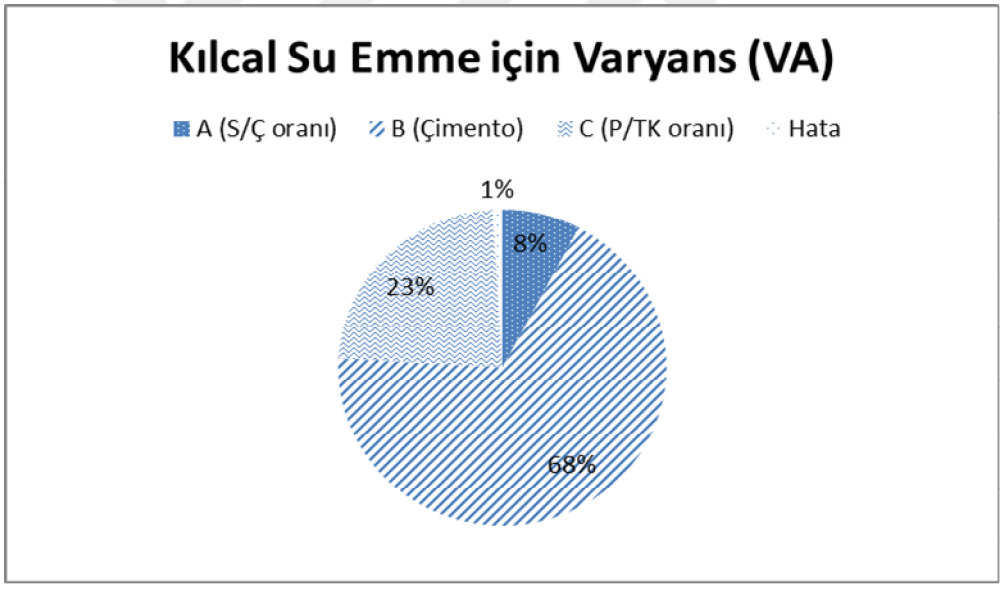
Deney Kombinasyonu	Kılcal Su Emme için S/G Oranları (dB)
1(1/150/0,75)	-12,322
2(1/200/1)	-10,556
3(1/250/1,25)	4,577
4(1,25/150/1)	-11,464
5(1,25/200/1,25)	0,026
6(1,25/250/0,75)	0,721
7(1,5/150/1,25)	-9,251
8(1,5/200/0,75)	-1,621
9(1,5/250/1)	-5,417

Harcın kılcal su emme için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.21'de verilmiştir. F-Tablo değeri 2 serbestlik derecesi ve 20 hata derecesi için F dağılım tablosundan 3,49 bulunmuştur. Tablodan anlaşılacağı üzere S/Ç, P/TK ve çimento F değerleri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu üç parametre (faktör) için kurulan Ho hipotezleri reddedilir dolayısıyla kılcal su emme için etkili parametreler olduğu anlaşılır.

Tablo 4.21. Kılcal Su Emme için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SS)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (MS)	F
A (S/Ç oranı)	3,294252	2	1,647126	8,011082
B (Çimento)	29,11647	2	14,55824	70,80651
C (P/TK oranı)	9,842585	2	4,921293	23,93556
Hata	4,112119	20	0,205606	
Toplam	46,36543	26		

Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin kılcal su emmeye % etkisi Şekil 4.14'de verilmiştir. Harç basınç dayanımında %68 ile çimento en büyük etkiye sahiptir. %23 oranı ile P/TK oranının etkisi diğer deneylere nazaran oldukça yüksek olmuştur. Buna göre P/TK azalırken kılcallık arttırmaktadır. %8' lik S/Ç oranının etkisi oldukça düşük oranda kalmıştır ve oran arttıkça kılcallık artmıştır. Varyans hata oranı %1 ile yok denecek kadar az bulunmuştur.



Şekil 4.14. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin kılcal su emmeye % etkisi

4.6. Isı Yalıtımı

TS EN ISO 8990'a göre deneyin yapıldığı Hotbox metodu ile çalışan cihaz sıcak hücre, soğuk hücre ve numune hücresi olmak üzere üç bölümden oluşur. Kullanılan cihazın fotoğrafı Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Sıcak hücrede ortam sıcaklığı, hücre iç sıcaklığı ve numune sıcaklığını ölçen termopiller mevcuttur. Orta hücre numune bölümüdür ve numune burada aparatları ile ısı geçirgenliği minimuma indirilerek

deneye hazır hale getirilir. Soğuk ve soğuk hücrede iç sıcaklık ve numune sıcaklığını ölçmeye yarayan termopiller vardır.



Şekil 4.15. Hotbox metodu ile çalışan ısı yalıtım cihazı

Deney esnasında her iki taraf da sıra ile çalıştırılarak, cihaz göstergeleri kararlı duruma gelene kadar beklenir. İstenen ölçüm değerleri alındıktan sonra aşağıdaki formüller yardımı ile ısı iletkenlik katsayısı Denklem (4.8), (4.9), (4.10), (4.11) ve (4.12) ile hesaplanır.

$$\lambda = \frac{D}{R} \tag{4.8}$$

λ = Isıl iletkenlik katsayısı, (W/m.K)

R= Isıl direnç, (m^2K/W)

D= Numune kalınlığı, (m)

$$R = \frac{A\left(T_{n_1} - T_{n_2}\right)}{Q} \tag{4.9}$$

A= Ölçme alanı, (m^2)

Q= Ölçme kutusuna sağlanan güç

T_n= Çevre sıcaklığı

$$T_n = \frac{T_a \frac{Q}{A} + E\, h_r \left(T_a - T_r^{'}\right) T_s}{\frac{Q}{A} + E\, h_r \left(T_a - T_r^{'}\right)} \tag{4.10}$$

T_a= Civardaki çevre sıcaklığı, (K veya ˚C)

T_r'= Deney numunesinde görülen ortalama radyant sıcaklık, (K veya ˚C)

T_s= Deney numunesinin yüzey sıcaklığı, (K veya ˚C)

E= Salım faktörü, (0,9)

h_r= Radyasyon katsayısı, (W/m^2K)

$$h_r = 4\sigma \times T_m^3 \tag{4.11}$$

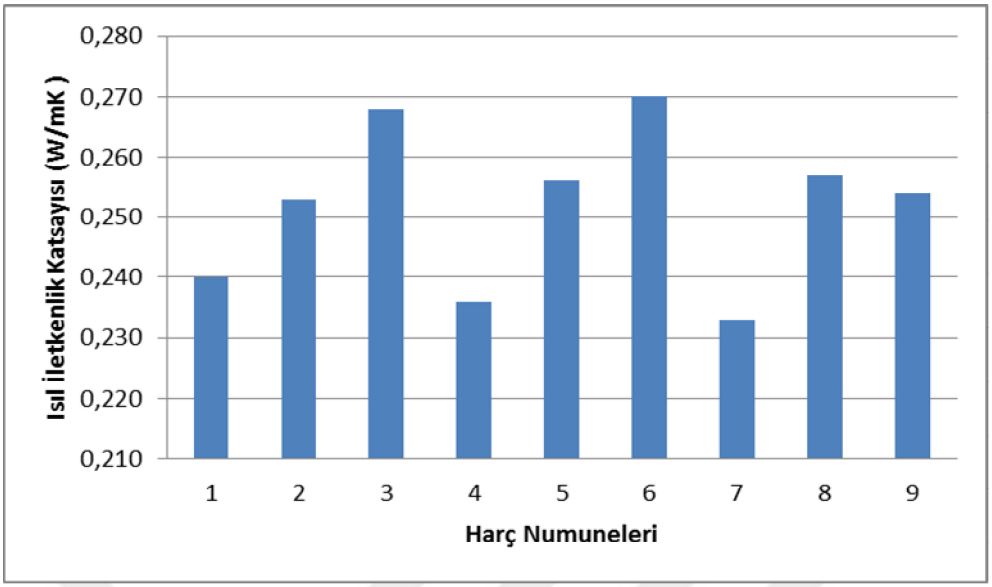
σ = Stefan Boltzman sabiti, [5,67 x 10^{-8} W/(m^2.K^4)]

$$T_m = \frac{T_{r_1} + T_{s_1}}{2} \tag{4.12}$$

Tablo 4.22'de üçerli üretilen numunelerin yalıtım değerleri verilmiştir. Bu değerlere göre Şekil 4.16'daki grafik oluşturulmuştur.

Tablo 4.22. Harç numunelerinin yalıtım (λ) ve birim hacim ağırlık (g/cm^3) değerleri

Yalıtım (W/m.K)					
Deney Kombinasyonu	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama	Kuru Birim Ağırlık (gr/cm^3)
1(1/150/0,75)	0,269	0,234	0,223	0,242	0,780
2(1/200/1)	0,245	0,238	0,277	0,253	0,904
3(1/250/1,25)	0,251	0,288	0,265	0,268	0,974
4(1,25/150/1)	0,215	0,239	0,254	0,236	0,741
5(1,25/200/1,25)	0,249	0,267	0,251	0,256	0,887
6(1,25/250/0,75)	0,271	0,248	0,298	0,272	1,055
7(1,5/150/1,25)	0,213	0,235	0,252	0,233	0,738
8(1,5/200/0,75)	0,260	0,251	0,259	0,257	0,928
9(1,5/250/1)	0,239	0,269	0,253	0,254	0,897



Şekil 4.16. Harç numunelerinin ısıl iletkenlik katsayısı değerlerinin grafiği

Şekil 4.16'da en düşük ağırlıkça yalıtım değeri miktarı 7. Numune için 0,233 W/m.K olarak bulunmuştur. 1, 4 ve 7 numaralı deneyler dikkate alındığında çimento miktarı sabitken P/TK içeriğinin ve S/Ç oranını arttığında yalıtım değeri miktarında önemli bir düşüş olduğu görülebilir. Belirgin bir şekilde en iyi sonucu veren 7 numaralı deney numunesi 1,5'lik S/Ç oranı, 150 kg/m^3 çimento ve 1,25'lik P/TK oranı içeriğine sahiptir. Nem alan perlitin ısıl iletkenlik değeri düşer bu sebeple perlit miktarı yalıtım değerinin düşmesinde etkili bir faktör olmuştur.

Tablo 4.23'te yalıtım değerlerine ait sinyal gürültü oranları verilmiştir. Yalıtım "daha küçük daha iyidir" performans karakteristiğinde olduğu için S/G oranı Denklem (3.2) ile hesaplanmıştır.

Tablo 4.23. Harç numunelerine ait yalıtım S/G oranları

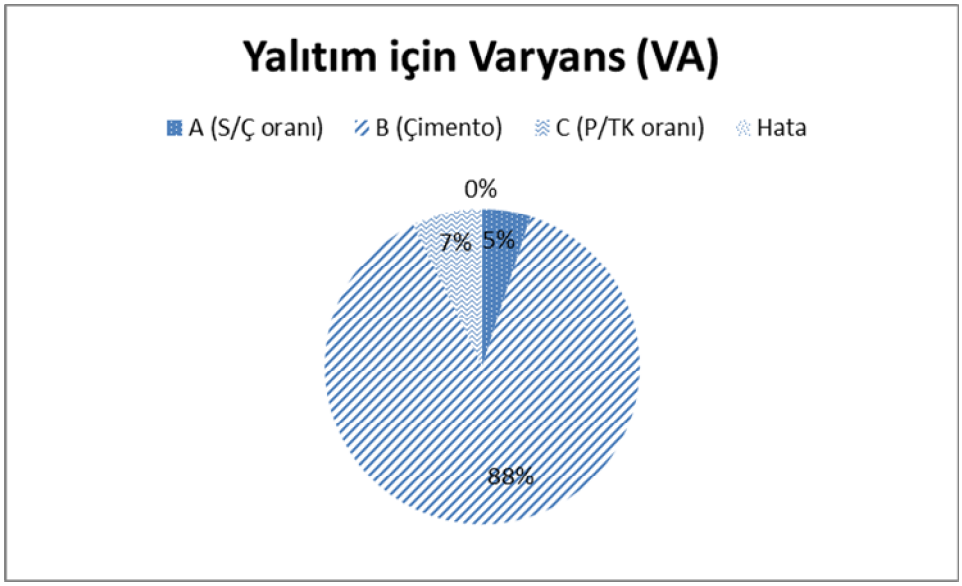
Deney Kombinasyonu	Yalıtım için S/G Oranları (dB)
1(1/150/0,75)	12,39578
2(1/200/1)	11,93759
3(1/250/1,25)	11,4373
4(1,25/150/1)	12,54176
5(1,25/200/1,25)	11,8352
6(1,25/250/0,75)	11,37272
7(1,5/150/1,25)	12,65288
8(1,5/200/0,75)	11,80134
9(1,5/250/1)	11,90333

Harcın yalıtım için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 4.24'te verilmiştir. F-Tablo değeri 2 serbestlik derecesi ve 20 hata derecesi için F dağılım tablosundan 3,49 bulunmuştur. Tablodan anlaşılacağı üzere çimento F değeri F-Tablo değerinden büyüktür. Bu durumda bu parametre (faktör) için kurulan Ho hipotezleri reddedilir dolayısıyla yalıtım için çimentonun etkili bir parametre olduğu anlaşılır.

Tablo 4.24. Yalıtım için Varyans (Anova) analizi sonuçları

Kontrol Faktörler	Kareler Toplamı (SS)	Serbestlik Derecesi (f)	Varyans (MS)	F
A (S/Ç oranı)	0,000267	2	0,000133	0,426916
B (Çimento)	0,00353	2	0,001765	5,645884
C (P/TK oranı)	0,000392	2	0,000196	0,627044
Hata	0,006252	20	0,000313	
Toplam	0,01044	26		

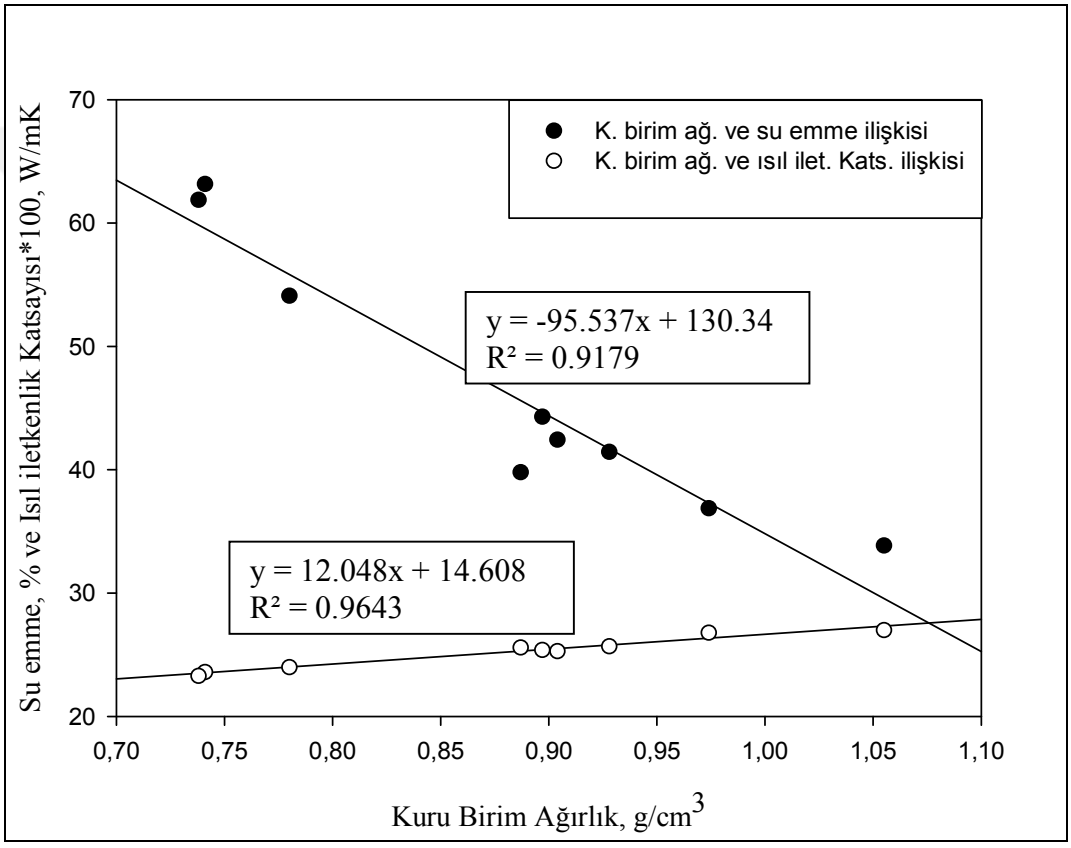
Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin yalıtıma % etkisi Şekil 4.17'de verilmiştir. Harç yalıtım değerinde %92 ile çimento en büyük etkiye sahiptir. %7 oranı ile P/TK oranının ve %5' lik S/Ç oranının etkisi etkisi düşük olmuştur. P/TK ve S/Ç oranı artışı yalıtımı olumsuz etkilemekte, fakat harçtaki çimento miktarı çok daha önemli olmaktadır. Varyans hata oranı %0 bulunmuştur.



Şekil 4.17. Varyans (Anova) analizi sonucuna göre deneysel parametrelerin ısı yalıtımına % etkisi

4.7. Regresyon Analizi

Yapılan deney sonuçlarının arasındaki ilişkiyi görebilmek ve aynı zamanda elde edilen sonuçları ispatlamak açısından regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi ile hem deneyler arasındaki ilişkilere bakılmış, hem de su emme ve ısıl iletkenlik katsayısı değerleri üzerinde etkin rolü olduğu düşünülen kuru birim ağırlık ile ilişkilerinin kuvvetli olup olmadığına bakılarak, grafiksel formüller elde edilmiştir.



Şekil 4.18. Su emme ve ısıl iletkenlik katsayılarının, kuru birim ağırlık ile grafiksel ilişkileri (Keskin ve Yıldırım, 2016)

Şekil 4.18'de görüldüğü gibi üretilen numunelerin kuru birim ağırlıkları ile su emme ve ısıl iletkenlik katsayısı (λ) arasında oldukça kuvvetli bir ilişki söz konusudur (Keskin ve Yıldırım, 2016). Grafikte net gösterebilmek ve su emme değerlerine yaklaşabilmek amacıyla ısıl iletkenlik katsayısı değerleri 100 kat arttırılmıştır. Kuru birim ağırlık artışı ile ısıl iletkenlik katsayısı doğru orantılı olarak artarken, su emme değerleri ters orantılı olarak düşmektedir. Kuru birim ağırlık artışı ile su emme değerleri daha fazla etkilenmektedir. Belirleme katsayısı (R^2) değerleri 1'e oldukça

yaklaştığından, kurulan ilişkiden elde edilen formüllerin güvenirliği de oldukça yüksektir ve sadece kuru birim ağırlık değerlerine bakılarak, su emme yüzdesi ve ısıl iletkenlik katsayısı hesaplanabilir.

4.8. 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 tasarımını 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 çözümlemede 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, "nominal daha iyidir" kıvam-yayılma için ve "daha küçük daha iyidir" ise kuru birim ağırlık, yalıtım, su emme ve kılcal su emme için kullanılmıştır. Hepsini aynı seviyeye getirmek için S/G oranlarını bulunmuştur. Tablo 4.25'te bu oranların değerleri tablo haline getirilerek verilmiştir.

Tablo 4.25. Sinyal-gürültü (S/G, signal-to-noise) tablosu

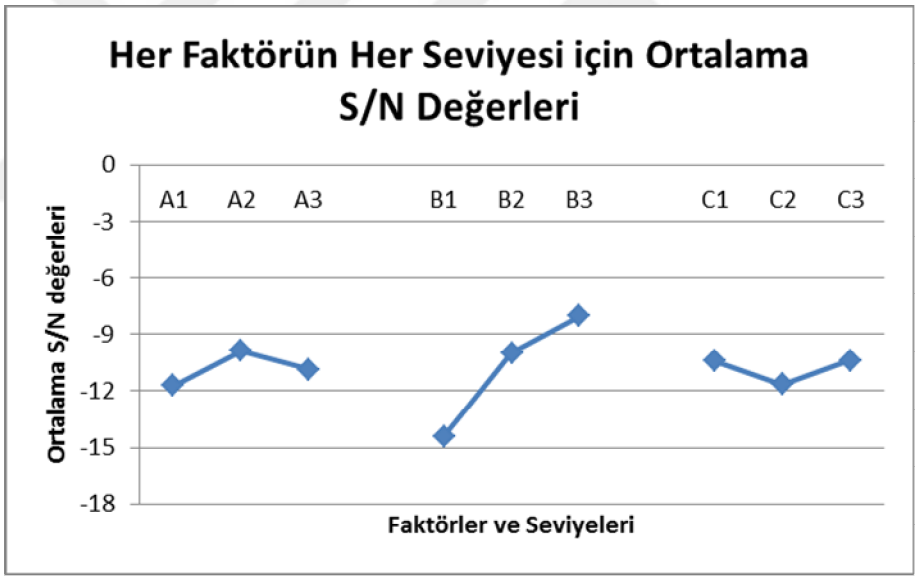
S/G değerleri								
Deney Kombinasyonu	Kuru Ağırlık	Kıvam-Yayılma	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Su Emme	Kılcal Su Emme	Isıl iletkenlik katsayısı	Ortalama S/G
1(1/150/0,75)	-46,010	-19,262	-4,808	-9,126	-34,698	-12,322	12,396	-16,261
2(1/200/1)	-47,301	-9,720	8,536	1,814	-32,630	-10,556	11,938	-11,131
3(1/250/1,25)	-47,937	-19,262	19,525	9,013	-31,342	4,577	11,437	-7,713
4(1,25/150/1)	-45,560	-7,782	2,639	-8,954	-36,010	-11,464	12,542	-13,513
5(1,25/200/1,25)	-47,127	-19,262	13,148	3,570	-32,006	0,026	11,835	-9,974
6(1,25/250/0,75)	-48,628	-5,283	20,650	8,870	-30,597	0,721	11,373	-6,128
7(1,5/150/1,25)	-45,526	-19,252	6,146	-3,041	-35,842	-9,251	12,653	-13,445
8(1,5/200/0,75)	-47,518	-14,825	16,919	5,310	-32,353	-1,621	11,801	-8,898
9(1,5/250/1)	-47,222	-20,349	15,842	6,106	-32,938	-5,417	11,903	-10,296

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. Tablo 4.26'da B'nin yani çimentonun etkisinin en fazla olduğu gösterilmiştir.

Tablo 4.26. Her faktörün her seviyesi için ortalama S/G değeri ve her faktörün aralık değeri

Seviyeler	A (S/Ç oranı)	B (Çimento)	C (P/TK oranı)
1	-11,702	-14,406	-10,429
2	-9,871	-10,001	-11,647
3	-10,880	-8,046	-10,377
Aralık	0,822	6,361	1,270

Tablo 4.26'dan yola çıkarak hazırladığımız harç numuneleri arasındaki en iyi kombinasyonu bulabilmek adına Şekil 4.19'daki grafikten faydalanılmıştır.



Şekil 4.19. Her faktörün her seviyesi için ortalama S/N değerleri

Şekil 4.19'da en büyüklenmiş (maksimize edilmiş) değerler görülmektedir. Dolayısıyla her faktörün her seviyesi için en yüksek değerler alındığında; A_2 B_3 C_3 bize en iyi kombinasyonu vermektedir. Bu durumda optimum kombinasyon için su çimento oranı (S/Ç) 1,25 oranında, çimento 250 kg/m^3 ve perlit taban külü oranı (P/TK) ise 1,25 oranında kullanılmalıdır. A_2 B_3 C_3 uyguladığımız deneyler arasında yoktur. Ancak bu kombinasyona en yakın deney numunesi 3 numaralı A_1 B_3 C_3 'tür. 3 numaralı numunenin deney sonuçlarına bakıldığında özellikle basınç, eğilme, kılcal

su emme ve su emme deneylerinde oldukça iyi performans sergilediği görülmüştür. Tablo 4.27'de numunenin deney sonuçlarında aldığı değerler verilmiştir.

Tablo 4.27. 3 nolu deney kombinasyonu olan $A_1 B_3 C_3$'e ait deney değerleri tablosu

Deney	Kuru Ağırlık (gr)	Kuru Birim Ağırlık (gr/cm^3)	Kıvam-Yayılma (cm)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Su Emme (%)	Kılcal Su Emme (%)	Isıl iletkenlik katsayısı (λ)
($A_1B_3C_3$)	249,4	0,974	10,00	9,656	2,844	36,89	0,590	0,268

4.9. Maliyetler

Tablo 4.28. Her bir deney numune tipinin ve malzemelerinin maliyet miktarı

Grup No	Maliyetler (TL)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Çimento	45	60	75	45	60	75	45	60	75
İnce perlit	20	21	22	22	22	15	24	16	16
İri perlit	27	29	29	30	30	20	31	21	21
Atık perlit	5	5	5	6	6	4	6	4	4
Taban külü	4	4	3	4	3	3	3	4	3
Toplam	101	119	134	106	120	117	109	104	118

Çimento: 15 TL/torba

Perlitler: 100 TL/m^3

Atık Perlit: 25 TL/m^3

Taban Külü: 10 TL/ton

Tablo 4.28'de her bir deneyde kullanılan malzemelerin ayrı ayrı maliyet değerleri ve her bir deney için toplam maliyet değerleri verilmiştir. Fiyatlara nakliye ücreti dahil değildir. Kullanılan malzemeler arasında perlit en yüksek fiyata sahipken, taban külü en düşük fiyattan satılmaktadır. Toplam maliyette en düşük maliyetle üretilen 1 numaralı deneydir.

İnce ve iri perlitin 44,3 kg/m^3 kadar en az miktarda ve atık perlitin de 27,8 kg/m^3 kadar en az miktarda kullanılmış olan deney 6 numaralı deneydir. 6 numaralı deney için toplam kullanılan perlit fiyatı 39 TL'dir. Taban külü kullanım miktarı ise 335,5 kg/m^3 'tür ve maliyeti 3 TL'dir. Çimento 250 kg/m^3 kullanılmıştır ve toplam maliyet miktarı ise 117 TL'dir. Aynı zamanda 6 numaralı deney optimum kombinasyon olan

A_2 B_3 C_3' e en yakın ikinci kombinasyondur. Üretilen harcın yeterli dayanım, su emme ve yalıtım deneylerinde oldukça iyi bir performans sergilemesinin yanı sıra düşük maliyette üretilmiş olması da büyük fayda sağlamıştır.

En yüksek miktarda perlit kullanılan deney numunesi ise 7 numaralı deneydir. İnce ve iri perlitten 69,1 kg/m^3 ve atık perlitten ise 43,3 kg/m^3 kullanılmıştır. Kullanılan perlitin toplam fiyatı ise 61 TL'dir. Taban külü ise 314,2 kg/m^3 kullanılmış ve 3 TL fiyatındadır. Çimento kullanım miktarı 150 kg/m^3 olup 45 TL harcanmıştır.

En az miktarda taban külü 262,3 kg/m^3 kadar 9 numaralı deneyde kullanılmıştır ve taban külü maliyeti 3 TL'dir. İnce ve iri perlit kullanım miktarı 46,2 kg/m^3 ve 37 TL'dir, atık perlit kullanım miktarı ise 29 kg/m^3 ve 4 TL'dir. Çimento 250 kg/m^3 kullanılmıştır. Numunenin toplam maliyeti 118 TL bulunmuştur.

En yüksek miktarda taban külü 1 numaralı deneyde kullanılmıştır. Taban külü kullanımı 446,8 kg/m^3'tür ve maliyeti 4 TL'dir. İnce ve iri perlit kullanımı 59 kg/m^3 ve atık perlit kullanımı 37 kg/m^3'tür. Çimento 150 kg/m^3 kullanılmıştır ve numunenin toplam maliyeti 101 TL'dir.

Perlitin birim fiyatının yüksek olmasına karşın taban külünün fiyatının düşük olması yapım maliyetini olumlu etkilemiştir. Bunun sebebi çimento kullanımını düşürüyor olmasıdır. Aynı zamanda üretilen harca yeterli dayanım, su emme, hafiflik ve yalıtım sağlayan optimum üretimin belirtilen maliyetlerde üretilmiş olması bir avantaj sağlamıştır. Uygulamada da yapı içinde sağlayacağı çeşitli yalıtım özellikleri sayesinde yıllık yakıt masraflarında ekonomik olacak ve enerji tasarrufu sağlayacaktır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada genleştirilmiş perlit, perlit atığı ve taban külünün harcın içinde agrega olarak kullanılarak harcın performansının artırılması amaçlanmıştır. Bu esnada Taguchi metodu ile deney sayısı en aza indirilmiş ve tek yönlü varyans analizi ile de parametrelerin önem ve etki yüzdeleri araştırılmıştır. Ardından yeterli dayanım, su emme, hafiflik ve yalıtım sağlayacak optimum harç malzemesi için faktörlerin olması gereken seviyeleri hesaplanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Eğilme dayanımında S/Ç oranı sabitken çimento oranı 150 kg/m^3'den 250 kg/m^3'ye artırıldığında ve P/TK oranı da 0,75'ten 1,25'e artırıldığında 0,48 MPa'dan 2,84 MPa'a büyük bir artış gözlenmiştir. Taguchi metodu ile bulunan optimum kombinasyona en yakın deney numunesi olan 3 numaralı A_1 B_3 C_3, eğilme dayanımında 2,84 MPa ile en iyi mukavemeti göstermiştir. İçeriğinde belirlediğimiz seviyelerin en düşük seviyesinde S/Ç, en yüksek seviyesinde de çimento ve P/TK oranı bulundurmaktadır. Eğilme dayanımında çimentonun %92 ve ardından %7 oranla P/TK oranının en büyük etkiye sahip olduğu varyans analizi ile bulunmuştur. Perlit genleştirildiğinde 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.
- Çimento miktarı sabit tutulduğunda P/TK oranının azalması ve S/Ç oranının artması basınç dayanımını artırmıştır. Burada normal bir çimento harcında dayanım düşüşüne sebep olan su, perlit ve taban külü gibi yüksek oranda su azaltan malzemelerin bulunduğu bir harçta tam tersi olumlu etki oluşturmuştur. 6 numaralı deney numunesinden sonra en iyi performansı 3 numaralı numune göstermiştir. P/TK oranının 0,50 oranında artması, S/Ç oranınınsa 0,25 oranında düşürülmesi numunenin küçük bir azalma ile 10,92 MPa'dan 9,66 MPa'a gibi az

bir miktar düşmesine sebebiyet vermiştir. Bu durumda P/TK oranının artırılmasının basınç dayanımında çok büyük kayıplara sebep olmadığı anlaşılmıştır. %84 oranla çimento, %12 oranla P/TK oranı ve %3 oranla S/Ç basınç dayanımında etki payına sahip olduğu görülmüştür. 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. Ayrıca en düşük seviyede çimento ve en yüksek seviyelerde P/TK oranı ve S/Ç kullanılan 7.numuneden en hafif sonuç alınmıştır. Optimum kombinasyona en yakın olan 3 numaralı numune ise istenilen kuru ağırlıkta iyi bir performans gösterememiştir. Yapılan varyans analizine göre %86 çimento, %10 P/TK ve %3 S/Ç etki oranına sahiptir. Perlitin boşluklu yapısı malzemeye hafiflik özelliği kazandırmıştır.
- Numunelerin su emme yüzdesi P/TK oranı içeriği arttıkça düşmüştür. En düşük ağırlıkça su emme miktarı 6. Numune için %33,87 iken 3. Numune için %36,89 olarak bulunmuştur. Su emmede faktörlerin önem yüzdeleri; çimento %88, P/TK oranı %7 ve S/Ç %4 olarak görülmüştür. Aynı zamanda çimento artışı, kuru birim ağırlık ve ısıl iletkenlik sayısında artışa neden olurken, su emme değerinin azalmasına neden olmaktadır. Perlitin boşluklu yapısı malzemenin su emme özelliğini azaltarak olumlu bir katkı sağlamıştır. Bilindiği gibi perlit çok su emen, hafif bir malzemedir. Su emme oranının artışı beklenen bir durumdur. Fakat kuru birim ağırlık ve ısıl iletkenlik katsayısının artışı beklenmeyen durumdur. Bu durum kullanılan perlit malzemesinin kuvvetli sıkıştırmadan kaynaklı olarak kırılmış olabileceği ihtimalini güçlendirmektedir. Perlit oldukça kırılgan yapılı, narin bir malzemedir, malzemenin kırılmış olması, boşluklarının kapanmasına neden olacaktır. Taban külü boşluklu, hafif ve perlite göre birim ağırlığı yüksek bir malzeme olmasına rağmen kırılgan değildir. Malzemelerin kırılma durumları yapılan deneyler esnasında da gözlemlenmiştir.
- Çimento miktarı ile P/TK oranı içeriğinin artması kılcal su emme yüzdesinde azalmaya neden olmuştur. Belirgin bir şekilde en düşük kılcal su emme miktarı optimum kombinasyona en yakın olan 3. numunede bulunmuştur. Varyans önem etkisi analizine göre P/TK oranı iyi bir performans göstermiş ve %23 kılcal su

emmede etkili olduğu hesaplanmıştır. Çimento ve S/Ç oranınınsa etkisi ise %68 ve %8'dir. Perlitin boşluklu yapısı kılcal su emmede de olumlu yönde etki etmiştir.

- Çimento ve S/Ç oranı artışı kıvam miktarını da artırmıştır, fakat P/TK oranı kıvam-yayılma değerini düşürmüştür. 3.numune için kıvam-yayılma değeri 10 cm olarak ölçülmüştür. Varyans analizinde P/TK oranı %52 ile en büyük etkiyi kıvam deneyinde göstermiştir. Perlit artışı, su emmesi fazla olan bir malzeme olduğundan, kıvam azalmasında oldukça etkindir. Bu deney için çimentonun %33, S/Ç oranının %15 etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Puzolanik özelliğe sahip olmasından ötürü taban külü perlit ve çimento ile kimyasal reaksiyona girme ihtimaline sebep olmuştur. Bu durum kıvam miktarını da etkileyen bir faktördür.
- P/TK oranının ve S/Ç oranının artışı ile ısıl iletkenlik katsayısı λ değerinde önemli bir düşüş olduğu görülmüştür. Yalıtımda en iyi performansı gösteren 7 numaralı numunenin λ değeri 0,233 W/m.K iken 3 numaralı numunenin 0,268 W/m.K olarak bulunmuştur. Yalıtımda en büyük etkiye önce %88 payla çimento ardından %7 ile P/TK ve en düşük etkiye %5 ile S/Ç sahip olduğu görülmüştür. Yalıtım değerlerinde bir harç için oldukça olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Çimento harcı ısı yalıtım katsayısının ortalama 1,4 W/m.K olduğu düşünülürse üretmiş olduğumuz perlitli ve taban küllü harç malzemesinin ısı yalıtım performans değerlerinin oldukça iyi olduğu anlaşılmıştır.
- Regresyon analizi sonucunda kuru birim ağırlıklar ile su emme ve ısıl iletkenlik katsayısı arasında önemli bir ilişki olduğu ispat edilmiştir. Kuru birim ağırlığın hesabı bilindiği zaman diğer hesaplamalar yapılan regresyon analizine göre, yüksek güvenirlikte formüller yardımı ile bulunabilir.
- Deney esnasında olabildiğince çok atık malzeme kullanılmasına özen gösterilmiş ve maliyetin düşürülmesi amaçlanmıştır. 1 numaralı deney en düşük maliyetle 101 TL'ye üretilirken 3 numaralı deney en yüksek maliyette 134 TL'ye üretilmiştir. Optimum kombinasyona en yakın ikinci deney olan 6 numaralı deney ise 117 TL ile oldukça iyi bir maliyette üretilmiştir. Kullanılan perlit, atık perlit, taban külü ve çimento miktarları ve maliyetleri sırasıyla 44,3 kg/m^3, 27,8 kg/m^3, 335,5 kg/m^3, 250 kg/m^3 ve 35 TL, 4 TL, 3 TL ve 75 TL'dir. Görüldüğü gibi çimento kullanımı düşerken atık malzeme kullanımı artmıştır. Perlitin birim fiyatının yüksek olmasına karşın taban külü ve atık perlitin fiyatının düşük olması yapım

maliyetini olumlu etkilemiştir. Ayrıca üretilen harca yeterli dayanım, su emme, hafiflik ve yalıtım gibi özellikler sağlıyor olması da diğer bir avantajıdır. Perlitli taban küllü harç yapıya uygulandığında sağlayacağı çeşitli yalıtım özellikleri sayesinde hem enerji tasarrufu sağlayacak hem de yıllık yakıt masraflarında ekonomik olacaktır.

- Taguchi methodu ve tek yönlü varyans analizleri sonucu elde ettiğimiz A_2 B_3 C_3 kombinasyonuna en yakın deney numunesi olan ve S/Ç oranı 1,25, çimento miktarı 250 kg/m^3 ve perlit taban külü oranı (P/TK) 1,25 içeriğine sahip 3 numaralı A_1 B_3 C_3'ün deney sonuçlarına bakıldığında özellikle basınç, eğilme, kılcal su emme ve su emme deneylerinde oldukça iyi performans sergilediği görülmüştür.
- Bu çalışmada günümüzün en büyük sorunlardan biri olan çevre sorununun çözümüne katkıda bulunabilmek adına hem termik santral hem de atık yakma tesisi atığı olan taban külünün ve dünyanın en önde gelen üreticilerinden olduğumuz perlitin, inşaat sektörü alanında değerlendirilmesi ve geri dönüşümü sağlanmıştır. Optimum parametreleri belirlemek için yararlandığımız Taguchi yöntemi sayesinde hem deney sayısı minimuma indirgenmiş hem de verimli bir çalışma sürdürülebilmiştir.

KAYNAKLAR

Abidi S., Nait-Ali B., Joliff Y., Favotto C., Impact of Perlite, Vermiculite and Cement on The Thermal Conductivity of a Plaster Composite Material: Experimental and Numerical Approaches, *Composites Part B:Engineering*, 2015, **68**(1), 392–400.

ACI Comittee 226, Use of Fly Ash in Concrete, *ACI Materials Journal*, 1987, **84**(5), 381-409.

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, 50970.

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

ASTM C 618-00, Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1998.

ASTM C 67-08, Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 2003.

Aşık M., Doğal Perlit Agregalı ve Öğütülmüş Perlit Katkılı Taşıyıcı Hafif Beton (Structural Lightweight Concrete With Natural Perlite Aggregate and Perlite Powder), Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006, 180901.

Ayberk M., Perlitin Yapı Gereci Olarak Kullanımı ve Yapı Maliyetine Etkisi, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 21-22 Nisan 1995.

Aytaç A., Yılmaz B., Deniz V., Lastik Kordu Üretiminde Büküm Yönünün Etkilerinin Taguchi ve Tam Etkensel Deney Tasarılarıyla İncelenmesi, *DEÜ İşletme Fakültesi Dergisi*, 2008**, 9**(1), 61-70.

Azizi S., Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 222254.

Baker N., Steemers K., 2000, *Energy and environment in architecture*, 2rd ed., E & FN Spon, London and New York, 2000.

Benk A., Coban A., Possibility of Producing Lightweight, Heat Insulating Bricks From Pumice and H3PO4 or NH4NO3 Hardened Molasses Binder, *Ceramics International*, 2012, **38**(3), 2283-2293.

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.

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*.

Bozkurt N., The Effect of High Temperature on Concrete Containing Perlite Powder, *SDU International Technologic Science*, 2013, **5**(1), 87-93.

Bulgu M., Perlitin Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003, 133308.

Buluş G., Değişik Bağlayıcı Maddeler Kullanılarak İyileştirilmiş Taban Küllerinin Mühendislik Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği, *56. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 14-20 Nisan 2003.

Canıyılmaz E., Kalite Geliştirmede Taguchi Metodu ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2001, 114660.

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.

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*, 2015, **40**(2),443–450.

Cormon P., *Betons Legers D'Aujourd'Hui*, 2rd ed., Eyrolles, Paris, 1973.

Çebi C.H., Kutay F., Taguchi Metodu: Bir Uygulama, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi*, 2003, **6**(3-4)**,** 7-17.

Çelik A. G., Kılıç A. M., Akkurt F., Yapı Malzemesi Üretiminde Genleştirilmiş Perlit Agregası Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2014, **29**(3), 451-458.

Çiçek Y.E., Pişmiş Toprak, Tuğla, Bimsbeton, Gazbeton ve Perlitli Yapı Malzemelerinin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002, 127045.

Kavak Akpinar E., Koçyigit F., Thermal and Mechanical Properties of Lightweight Concretes Produced with Pumice and Tragacanth, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2015, **30**(5), 534–553.

Çobanlı M. R., Isı Direnci Yüksek Hafif Yapı Malzemesi Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1993, 33648.

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.

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.

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.

Dereli M., Konutlarda Dış Sıva Hasarlarının Çözüm Yolları ve Alternatif Sıva Denemeleri (Konya Örneği), Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2004, 153760.

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, (Ziyaret Tarihi: 15 Aralık 2015).

Enerji Atlası, Türkiye'de ki Termik Santraller, enerji atlası http://www.enerjiatlasi.com/komur/, (Ziyaret Tarihi: 30 Aralık 2015).

Erbaş S. O., Olmuş H., *Deney Düzenleri ve İstatistik Analizi*, 1rd ed., Gazi Kitapevi, Ankara, 2006.

Fraley S., Oom M., Terrien B., Zalewski J., Design of Experiments Via Taguchi Methods: Orthogonal Arrays, Michigan Üniversitesi, https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/2006Text**,** (Ziyaret Tarihi: 08 Aralık 2015).

Gülen Ş., Yalap H., Çimento Sektörüne Genel Bir Bakış, *Madencilik Sektörü Paneli*, Ankara, Türkiye, 26 Mart 2003.

Hewlett P.C., 2004, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4rd ed., Butterworth-Heinemann, England, 2004.

Hurst J.V., Styron W.R., Fly Ash Beneficiation process, 1978, U. S. Patent No. 4,121,945., *U.S. Patent and Trademark Office*.

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 Concrate Research*, 2004, **34**(4), 549-555.

Kara İ., Seyitömer Uçucu Külünün Farklı Yapı Malzemeleri Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2008, 177222.

Keskin F.Ş., Yildirim, S.T., Taguchi Metoduyla Deneysel Tasarım Kullanarak Yalıtımlı Harç İçin Perlit ve Taban Külü Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi,* 2016, **3**(1), 91-102.

Khudır A., Donma Çözülme Çevrimlerinin Taban Külü, Kireç, Jüt Fiber ve Çelik Fiber ile İyileştirilmiş İnce Daneli Zeminin Dayanımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 2014, 373644.

Kula İ., Bor Endüstri Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2000, 104321.

Kurama H., Kaya M., Usage of Coal Combustion Bottom Ash in Concrete Mixture, *Construction and Building Matterials*, 2008, **22**(9), 1922-1928.

Lanzo´n M., Garcı´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.

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, 1-94, 2001.

Mehta P. K., *Concrete. Structure, Properties and Materials*, 1rd ed., Incorporated Prentice-Hall, New Jersey USA, 1986.

MTA Genel Müdürlüğü, *Türkiye Perlit Envanteri*, 1rd ed., MTA Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, 1985.

Montgomery D. C., *Design and Analysis of Experiment*, 7rd ed., John Wiley & Sons,Inc., New York, 2009.

Neufert E., *Neufert Yapı Tasarımı Temel Bilgileri*,Çeviri: Abdullah Erkan, 1rd ed., Güven Yayıncılık, İstanbul, 1983.

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, 324505.

Okucu A., Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1998, 68999.

Okuyucu E., Farklı Lif Katkılı Hafif Betonların Bazı Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2005, 170676.

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, 284673.

Önem Y., *Sanayi Madenleri*, 2rd ed., Kozan Ofset, Ankara, 2000.

Özarslan A., Geniş M., Alkılıç Ç., Acun D., Çatalağzı Termik Santralı Kül İletimTünelinde Tahkimat Uygulamalarının Değerlendirilmesi, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, İzmir, Türkiye, 9-11 Haziran 2005.

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.

Peace G. S., *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*, 1rd ed., Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1993.

Peryum, PerlitNedir?, Peryum, http://www.peryum.com.tr/index.php?pg=teknikbilgi_icerik&teknikbilgi_id=2&dil=tr, (Ziyaret tarihi: 25 Aralık 2015).

Pertaş, Perlit Madeni, Per & Taş, http://pertas.net/Perlit.html, (Ziyaret tarihi: 19 Haziran 2015).

Ross P. J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 1rd ed., McGraw-Hill, New York, 1989.

Saat M., Kalite Denetiminde Taguchi Yaklaşımı, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 2000, **2**(3), 97–108.

Sağsöz A .E., Farklı Kür Şartlarının Doğal Perlit Agregalı Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2007, 200793.

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.

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.

Şirvancı M., *Kalite İçin Deney Tasarımı*, 2rd ed., Literatür Yayınları, İstanbul, 1997.

Tanaçan L., Hafif Duvar Tuğlası Üretiminde Perlit ve Bazı Katkıların Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1993, 39460.

Taguchi G., *System of Experimental Design: Engineering Method to Optimize Quality and Minimize Costs*, 1rd ed., UNIPUB/Kraus International Publication, USA, 1987.

Taguchi G., *System of Experimental Design*, 1rd.ed., White Plains, Dearborn, 1991.

Tanyıldızı H., Coşkun A., Varyans (ANOVA) Analizi Yöntemi ile Silis Dumanı Katkılı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Deney Parametrelerinin Etkilerinin Belirlenmesi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2013, **29**(3), 227-233.

Tikalsky P. J., Carraqullo R. L, Influence of Fly Ash on Sulphade Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal*, 1992, **89**(1), 69-75.

Topçu I. B., Isıkdag B., Effect of Expanded Perlite Aggregate on the Properties of Lightweight Concrete, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **204**(1), 34–38.

Topçu İ.B., Kurama H., Karakurt C., Gazbeton Üretiminde Taban Külünün Kullanımı, *Çimento ve Beton Dünyası*, 2007, **68**(1), 56-65.

Toprak M. U., Termik Santral Taban Küllerinden Alkali Aktivasyon ile Geopolimer Üretilmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2011, 285352.

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.

Toydemir N., Pişmiş Toprak Taşıyıcı Döşeme Bloklarının Rasyonalizasyonu Üzerine Bir Deneme, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1968.

TS EN 450, Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Tarifler, Özellikler ve Kalite Konrol, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1998.

TS 3681, Genleştirilmiş Perlit Agregası, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1982.

TS EN 1015-3, Kagir Harcı – Deney Metodları – Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2000.

TS EN 1015-18, Kagir Harcı – Deney Yöntemleri – Bölüm 18: Sertleşmiş Harcın Kapiler Etkiden Kaynaklanan Su Emme Katsayısının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2004.

TS EN ISO 8990, Isı Yalıtımı- Kararlı Durum Isı İletim Özelliklerinin Tayini-Kalibre Edilmiş ve Mahfazalı Sıcak Kutu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

Ujhelyi, A., *Documentation on Perlite and Its İndustrial Uses*, 1rd ed., Hungarian Institute for Building Science, Budapest, Macaristan, 1979.

URL-1:http://www.catestermik.com/index/cates.html, (Ziyaret Tarihi: 25 Aralık 2015).

URL-2:http://www.baskent.edu.tr/~tkorkmaz/ISLE244/12.bolum-anova.doc, (Ziyaret Tarihi: 6 Ocak 2016).

U.S. Department of Interior U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries 2015 Report*, 1rd ed., U.S. Government Printing Office, Washington U.S.A., 2015.

Uyanık T., *Maden ve Mineraller*, 1rd ed., T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi, Ankara, 2005.

Uzay, Perlit Nedir?, Uzayperlit, http://www.uzayperlit.com/perlit.html, (Ziyaret tarihi: 25 Aralık 2015).

Yalgın S., *İnşaat Sektöründe Genleşmiş Perlit Kullanımı*, 1rd ed., Etibank Matb., Ankara, 1983.

Yeğinobalı A., Çimento ve Çimento Esaslı Malzemenin Geleceği, *Yapının Geleceğine Yön Veren Malzemeler ve Teknolojiler Semineri*, İstanbul, Türkiye, 6 Mayıs 2005.

Yıldırım M.Ş., Biçer Y., Yıldız C., Yalıtım Malzemesi Olarak Styropor İçeren Betonların Fiziksel Özellikleri Üzerine Bir İnceleme, *Isı Bilimi ve Tekniği 9. Ulusal Kongresi*, Elazığ, 20-22 Eylül 1993.

Yılmazer S., Özdeniz M.B., The Effect of Moisture Content on Sound Absorption of Expanded Perlite Plates, *Building and Environment*, 2005, **40**(3), 311–318.

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.

EKLER

Ek-A

F Tablosu (Devam)

Payda SD	α	Pay SD 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
11	0.25	1.47	1.58	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53	1.53	1.52	1.52	1.51
	0.10	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.23	2.21
	0.05	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79
	0.01	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.46	4.40
12	0.25	1.46	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.50	1.50	1.49
	0.10	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19	2.17	2.15
	0.05	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69
	0.01	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.22	4.16
13	0.25	1.45	1.55	1.55	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.49	1.48	1.47	1.47
	0.10	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.12	2.10
	0.05	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60
	0.01	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	4.02	3.96
14	0.25	1.44	1.53	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45
	0.10	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10	2.08	2.05
	0.05	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53
	0.01	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.86	3.80
15	0.25	1.43	1.52	1.52	1.51	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45	1.44	1.44
	0.10	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06	2.04	2.02
	0.05	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48
	0.01	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.73	3.67
16	0.25	1.42	1.51	1.51	1.50	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.44	1.43
	0.10	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	2.01	1.99
	0.05	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42
	0.01	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.62	3.55
17	0.25	1.42	1.51	1.50	1.49	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.42	1.41
	0.10	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.98	1.96
	0.05	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38
	0.01	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.52	3.46
18	0.25	1.41	1.50	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.41	1.40
	0.10	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98	1.96	1.93
	0.05	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34
	0.01	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.43	3.37
19	0.25	1.41	1.49	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.40	1.40
	0.10	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98	1.96	1.94	1.91
	0.05	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31
	0.01	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.36	3.30
20	0.25	1.40	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.39
	0.10	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96	1.94	1.92	1.89
	0.05	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.61	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28
	0.01	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.29	3.23

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Keskin F.Ş., Yıldırım S.T., Taguchi Metodu Yoluyla Deneysel Tasarım Kullanarak Yalıtımlı Harç İçin Perlit ve Taban Külü Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2016, **3**(1), 91-102.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Artvin'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Artvin'de, lise öğrenimini Kocaeli'nde tamamladı. 2008 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında mezun oldu. 2014 bahar döneminde Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans öğrenimine başladı ve tezini 2016 yılı Şubat ayında tamamladı.