



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**PETROL/DOĞALGAZ VE JEOTERMAL KUYULARI İÇİN ISI YALITIM
ÖZELLİKLERİ YÜKSEK ÇİMENTOLARIN GELİŞTİRİLMESİ**

SERDAR GÜNDÜZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MALZEME VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ağustos-2022

BATMAN

Her Hakkı Saklıdır

KABUL VE ONAY

X X X X

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Serdar GÜNDÜZ

Tarih: 05.08.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PETROL/DOĞALGAZ VE JEOTERMAL KUYULARI İÇİN ISI YALITIM ÖZELLİKLERİ YÜKSEK ÇİMENTOLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Serdar GÜNDÜZ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Malzeme ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sarper ÖZTÜRK

2022, 77 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Sarper ÖZTÜRK

Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK

Doç. Dr. Süha Orçun MERT

Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

Dünyada her yıl, petrol-doğalgaz ve jeotermal sondajları yapılarak milyonlarca metre küp enerji kaynağı elde edilmektedir. Çıkarılan bu kaynaklar, bir dizi işleminden geçirilip enerjinin farklı formlarına dönüştürülmektedir. Petrol-doğalgaz ve jeotermal kaynaklarının sondajları, üretimleri ve işlenmeleri ekonomik bakımdan yüksek olmasından dolayı sektörde faaliyet gösteren şirketlerle beraber enerji tüketen her sektör için maliyetin düşürülme hedefi son derece önem arz etmektedir.

Petrol yatakları akışkan özelliğine göre Newton ve nano-Newton olarak adlandırılır. Üretimleri ve sebep oldukları maliyetleri birbirinden farklıdır. Özellikle nano-Newton (ağır) petrollerin içerisinde, petrol rezervinin kimyasal özelliğine göre farklı oranlarda “parafin, asfalt ve katran” bulunur ve yüzeye doğru hareketleri sırasında ısı kayıplarından kaynaklı fiziksel değişimleri meydana gelir ve katılaştıkları durumda tıkanmalar görülür. Buna önlem olarak kuyu çimentolamada kullanılan çimentoların ısı yalıtım özelliklerinin artırılarak bu sorunların önüne geçilmesi hedeflenmektedir.

Bu tez kapsamında mevcut petrol-doğalgaz ve jeotermal sahalarında en yaygın olarak kullanılan G sınıfı çimento içerisine hacimce %5’ten %30’a kadar artan oranlarda perlit gibi ülkemizin kaynak bakımından büyük rezervlere sahip olduğu malzemelerin eklenmesiyle yeterli dayanım ve yüksek ısı yalıtımı özelliğine sahip çimentoların üretilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen ürünlerin mekanik ve ısıl özellikleri mevcut G tipi çimento ile karşılaştırılmıştır. Üretilen yeni tip çimentoların özelliklerinin API standartlarına uygun olması ve kuyu formasyonlarına uygulanabilirliğinin sağlanması amacıyla farklı oranlarda katkı maddeleri de ilave edilmiştir. Yapılan çalışmalarda ayrıca üretilen numunelerin içeriği, oranı, termofiziksel ve mekanik özelliklerinin arasındaki ilişkiler incelenmiş olup ilişkiler denklem ve grafiklerle verilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda hacimce % 30 perlit katkılı çimentonun ısıl iletkenlik katsayısının mevcut G tipi çimentoya göre % 62.37 daha az olduğu tespit edilmiştir.

Üretilen yeni çimento tiplerinin üretim aşamasındaki kuyularda kullanılmasıyla, mümkün mertebe destek amaçlı kullanılan ilave ekipman-operasyon giderleri ile harcanan zamanın azaltılması, ısı kayıplarının engellenmesi ve üretimin aksamasının önüne geçilerek maliyetlerinin azaltılması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: API standardı, doğalgaz, G sınıfı çimento, ısı yalıtım, jeotermal, kuyu çimentolama, perlit, petrol.

ABSTRACT

MS THESIS

DEVELOPMENT OF CEMENTS WITH HIGH THERMAL INSULATION PROPERTIES FOR OIL/NATURAL GAS AND GEOTHERMAL WELLS

Serdar GÜNDÜZ

INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS OF BATMAN UNIVERSITY

**THE DEGREE OF MASTER IN MATERIALS AND MANUFACTURING
ENGINEERING**

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Sarper ÖZTÜRK

2022, 77 Pages

Jury

Dr. Öğr. Üyesi Sarper ÖZTÜRK

Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK

Doç. Dr. Süha Orçun MERT

Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

Millions of cubic meters of energy resources are obtained by drilling oil-natural gas and geothermal drillings in the world every year. These extracted resources are processed through a series of processes and converted into different forms of energy. Since the drilling, production and processing of oil-natural gas and geothermal resources are economically high, the goal of reducing costs is extremely important for companies operating in the sector as well as for every sector that consumes energy.

Oil deposits are called Newtons and nano-Newtons according to their fluidity. Their production and the costs they cause are different from each other. Particularly, nano-Newtonian (heavy) oils contain "paraffin, asphalt and tar" in different proportions depending on the chemical properties of the oil reserve, and physical changes occur due to heat losses during their movement towards the surface and clogging occurs when solidified. As a precaution, it is aimed to prevent these problems by increasing the thermal insulation properties of cements used in well cementing.

Within the scope of this thesis, cements with sufficient strength and high thermal insulation properties are obtained by adding materials such as perlite, which is the most widely used in the existing petroleum-natural gas and geothermal fields, at rates ranging from 5% to 30% by volume, for which our country has large reserves in terms of resources. intended to be produced. The mechanical and thermal properties of the obtained products were compared with the existing G type cement. Additives were added in different proportions in order to ensure that the properties of the new type of cement produced comply with API standards and that they can be applied to well formations. In addition, the relations between the content, ratio, thermophysical and mechanical properties of the produced samples were examined and the relations were given with equations and graphs. As a result of the experimental studies, it has been determined that the thermal conductivity coefficient of the % 30 perlite added cement by volume is % 62.37 less than the existing G type cement.

By using the new cement types produced in the wells in the production phase, it is aimed to reduce the time spent with additional equipment-operation expenses used for support purposes as much as possible, to prevent job losses and to reduce costs by preventing production disruption.

Keywords: API standards, natural gas, G class cement, heat insulation, geothermal, perlite, petroleum, well cementing.



ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sarper ÖZTÜRK'e ve ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY'a teşekkür ederim.

Çalışmanın her aşamasında beni yüreklendiren, başta canım babam olmak üzere tüm aileme şükranlarımı sunarım.

Serdar GÜNDÜZ
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	ii
TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
1.GİRİŞ	1
1.1.Çimento.....	2
1.2. Petrol, Doğalgaz ve Jeotermal Sahalarında Kullanılan API Standartlarına uygun Çimento Sınıfları ve Özellikleri	2
1.3. Petrol, Doğalgaz ve Jeotermal Sahalarında Kullanılan API Standartlarına Uygun Çimentolara Eklenen Katkı Malzemeleri ve Özellikleri.....	4
1.3.1. Hızlandırıcılar	4
1.3.2. Geciktiriciler	5
1.3.3. Ağırlaştırıcılar	5
1.3.4. Sıvı Kaybı Katkı Maddeleri	5
1.3.5. Genişleticiler.....	5
1.3.6. Kayıp Dolaşım Katkı Maddeleri.....	6
1.3.7. Genleştiriciler.....	6
1.3.8. Dağıtıcılar	6
1.3.9. Köpük Önleyici Katkı Maddeleri	6
2. PETROL, DOĞALGAZ VE JEOTERMAL KUYULARINDA UYGULANAN ÇİMENTO OPERASYONLARI.....	7

2.1 Petrol, Doğalgaz ve Jeotermal Kuyularında Uygulanan Çimento Operasyonu Yöntemleri	7
2.1.1. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında uygulanan birincil çimentolama yöntemi	7
2.1.1.1 Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında uygulanan birincil çimentolama yönteminde tek kademe çimentolama	8
2.1.1.2. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında uygulanan birincil çimentolama yönteminde iki kademe çimentolama	10
2.1.1.3. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında sondaj boruları ve stinger ile muhafaza borusuna uygulanan çimentolama	11
2.1.1.4. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında küçük çapta borular ile muhafaza boruları arkasına giriş yaparak çimentolama	12
2.1.1.5. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında liner çimentolama	12
2.1.2. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında iyileştirici çimentolama	13
2.1.2.1. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında basınçla sıkıştırılan (squeeze) çimento	13
2.1.2.2. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında tapa çimento operasyonu	14
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	16
4. MATERYAL VE YÖNTEM	18
4.1. Yeni G Tipi Çimento Harcını Oluşturan Malzemeler	18
4.1.1. Çimento	18
4.1.2. Su	19
4.1.3. Mineral katkı malzemeleri	20
4.1.3.1. Perlit	20
4.1.3.2. Yüksek fırın cürufu	22
4.1.4. Kimyasal katkıları	23
4.1.4.1. Hava sürükleyici	23
4.1.4.2. Dağıtıcı (Dis-180)	24
4.1.4.3. Genişletici (Geo Ext-303)	24
4.1.4.4. Hızlandırıcı (Geo Acc-66)	25
4.2. Yeni Tip G Sınıfı Çimento Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Numune Hazırlanışı	26
4.2.1. Perlit gradasyonu ve fiziksel özellikleri	26
4.2.2. Yeni g sınıfı çimento harcının hazırlanması	29
4.3 Yeni G Sınıfı Numunelere Uygulanan Testler	35
4.3.1. Yeni çimento karışımlarına uygulanan testler	35
4.3.1.1. Yeni çimento karışımlarının birim ağırlığını belirleme amacıyla yapılan deney	36
4.3.1.2. Mini çökme yayılma (slump) deneyi	36
4.3.1.3. Vikat deneyi	37
4.3.1.3.1. Vikat kıvam tayini	37
4.3.2. Sertleşmiş numunelere uygulanan testler	40

4.3.2.1. Yığmsal yoğunluk, su emme ve gözeneklilik.....	40
4.3.2.2. Üç nokta eğme deneyi.....	42
4.3.2.3. Tek eksenli basınç dayanım testi (astm c39)	44
4.3.2.4. Isı iletkenlik, özgül ısı ve ısı yalıtım testleri	46
4.3.2.4.1. Isıl iletkenlik	46
4.3.2.4.2. Özgül ısı.....	47
4.3.2.4.3. Isıl yayılım	47
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	50
5.1. Taze Karışımların Özellikleri	50
5.2. Sertleşmiş Numune Özellikleri	51
5.2.1. Mekanik özellik test sonuçları	52
5.2.2. Isıl özellik test sonuçları	62
5.3. Analitik Analizler.....	64
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	70
KAYNAKÇA.....	72
ÖZGEÇMİŞ	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	:Isı yayılım katsayısı (m^2/s)
m	:Su emme kapasitesi (%)
t	:Zaman (s)
q	:Isı kazancı (W/m^2)
c_p	:Özgül ısı ($J/kg\ K$)
Q	:Isı geçişi (W)

Yunanca Semboller

α	:Yoğunluk (kg/m^3)
λ	:Isıl iletkenlik katsayısı ($W/m\ K$)
σ_c	:Basınç dayanımı
σ_t	:Üç nokta eğme dayanımı
ρ	:Yoğunluk (kg/m^3)
ϕ	:Porozite (%)

Kısaltmalar

API	:Amerikan petrol enstitüsü
ASTM	:Amerikan test ve malzeme topluluğu
CSH	:Kalsiyum silikat hidrat
GFC	:Fırın cürufu g sınıfı numune
GPA	:Genleştirilmiş perlit agregası
KGÇ	:Katkılı g sınıfı numune
R	:Referans numunesi
YFC	:Yüksek fırın cürufu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Tek kademe çimentolamada kullanılan kuyu operasyon ekipmanları (Suman ve Ellis, 1977) ..	9
Şekil 2. 2. Tek kademe çimentolamanın uygulama aşamaları (Renpu, 2011)	9
Şekil 2. 3. İki Kademe Çimentolamanın Uygulama Aşamaları (Klempa ve ark., 1996)	10
Şekil 2. 4. Stinger Kullanılarak Çimentolama Uygulaması (Drillingcourse, 2015)	11
Şekil 2. 5. Liner Çimento Operasyonu (Knowenergy, 2012)	13
Şekil 2. 6. Tapa Çimentolama Uygulaması (Oilngasdrilling, 2015).....	15
Şekil 4. 1. Yapılarını ve Birleşimlerini Bozmadan Hacimlerinin, Boylarının Arttırılmasıyla Elde Edilen Perlit.....	20
Şekil 4. 2. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu	23
Şekil 4. 3. Karışık Perlit Agreganın Gradasyon Eğrisi	27
Şekil 4. 4. Kalıpların Yağlanması	33
Şekil 4. 5. Numunelerin Hazırlanması	33
Şekil 4. 6. Numunenin Kalıba Doldurulması ve Şekil Verilmesi	34
Şekil 4. 7. Numunelerin Kür Havuzuna Yerleştirilmesi	34
Şekil 4. 8. Hazırlanan Örneklerin Etüvde Kurutulması ve Kürlenmesi	35
Şekil 4. 9. Mini Çökme Yayılma (Slump) Deney Cihazı	37
Şekil 4. 10. Vikat Sondası (MEB, 2011)	38
Şekil 4. 11. Vikat Cihazından Kıvam Tayini Ölçümü	39
Şekil 4. 12. Priz Bitiş Ölçümü	40
Şekil 4. 13. Arşimet Terazisi	41
Şekil 4. 14. Üç Nokta Eğme Deney Cihazına Numunenin Yerleştirilmesi.....	43
Şekil 4. 15. Üç Nokta Eğme Deneyi	43
Şekil 4. 16. Deney Sonuçlarının Raporlanması	44
Şekil 4. 17. Numunenin Basınç Deneyi Cihazına Yerleştirilmesi	45
Şekil 4. 18. Tek Eksenli Basınç Deneyi.....	45
Şekil 4. 19. Isıl Deneylerin Gerçekleştirilmesi	49
Şekil 5. 1. Etüvde Kürlenen Sertleşmiş Numunelerin Basınç Dayanımı Değerleri	53
Şekil 5. 2. Suda Kürlenen Sertleşmiş Numunelerin Basınç Dayanımı Değerleri	54
Şekil 5. 3. Referans numunesi için basma kuvveti-uzama.....	55
Şekil 5. 4. KGP30 Numunesi İçin Basma Kuvveti-Uzama Değişim Grafiği	55
Şekil 5. 5. Etüvde Kürlenen Numunelerin Üç Nokta Eğme Dayanımı Değerleri.....	56
Şekil 5. 6. Suda Kürlenen Numunelerin Üç Nokta Eğme Dayanımı Değerleri	57
Şekil 5. 7. Referans Numunesi İçin Üç Nokta Eğme Kuvveti- Uzama Değişim Grafiği.....	58
Şekil 5. 8. KGP30 Numunesi İçin Üç Nokta Eğme Kuvveti- Uzama Değişim Grafiği.....	58
Şekil 5. 9. Etüv ve Suda Kürlenen Sertleşmiş Numunelerin Basma-Eğme Dayanım Oranları	59
Şekil 5. 10. Sertleşmiş Numunelerin Kuru Yoğunluk Değerleri	60
Şekil 5. 11. Sertleşmiş Numunelerin Su Emme Değerleri	61

Şekil 5. 12. Sertleşmiş Numunelerin Porozite (Gözeneklilik) Değerleri	61
Şekil 5. 13. Sertleşmiş Numunelerin Isıl İletkenlik Özellikleri	62
Şekil 5. 14. Sertleşmiş Numunelerin Özgül Isı Değerleri.....	63
Şekil 5. 15. Sertleşmiş Numunelerin Isı Yayılım Değerleri	64
Şekil 5. 16. Tüm Numunelerin Etüv Basınç Dayanımı Ve Kuru Yoğunluk Arasındaki İlişki (Oktay ve ark., 2015).....	65
Şekil 5 17. Tüm Numunelerin Etüv Eğme Dayanımı ve Kuru Yoğunluk Arasındaki İlişki.....	66
Şekil 5. 18. Tüm Numunelerin Porozite ve Isıl İletkenlik Arasındaki İlişki.....	67
Şekil 5. 19. Tüm Numunelerin Isıl İletkenlik ve Kuru Yoğunluk Arasındaki İlişki.....	68
Şekil 5 20. Tüm Numunelerin Özgül Isı Ve Kuru Yoğunluk Arasındaki İlişki.....	68
Şekil 5. 21. Tüm numunelerin ısıl yayılım ve kuru yoğunluk arasındaki ilişki	69



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1. Çimentolama Operasyonlarında Kullanılan Çimento Sınıflarının Bileşenleri ve Özellikleri (Çimsa 2016)	4
Çizelge 2.1. Basınçla Sıkıştırılan Çimentonun Uygulanmasının Gerekli Olabileceği Durumlar (Jones Ve Watters 1977).....	14
Çizelge 4. 1. Çimentolama Operasyonunda Kullanılan Çimentonun Yaygın Fiziksel Nitelikleri (Çimsa 2016).....	18
Çizelge 4. 2. G Tipi Çimento Detaylı Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	18
Çizelge 4. 3. Genleşmiş Perlitin (GPA) Fiziksel Nitelikleri (DPT, 2001)	21
Çizelge 4. 4. Perlit Stoklarının Bazı Ülkelerdeki Durumu (Milyon Ton) (DPT, 2004).....	21
Çizelge 4. 5. Perlitin Kimyasal Nitelikleri.....	22
Çizelge 4. 6. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Bileşimi.....	23
Çizelge 4. 7. Hava Sürükleyici Katkısının Fiziksel Nitelikleri	24
Çizelge 4. 8. Genleştirilmiş Perlit Agregalarının Fiziksel Nitelikleri	27
Çizelge 4. 9. 1 M ³ Betonun Karışım Miktarları.....	31
Çizelge 4. 10. Bazı Malzemelerin Oda Sıcaklığında Isıl İletkenlik Katsayıları (Çengel, 2011).....	46
Çizelge 4. 11. Isıl Özelliklerin Tayini İçin Kullanılan TPS 500S Cihazının Ölçüm Aralıkları.....	48
Çizelge 5. 1. Üretilen Çimento Karışımlarının Çökme Yayılma Çapı ve Taze Yoğunluk Değerleri	51
Çizelge 5. 2. Üretilen Çimento Karışımlarının Priz Süreleri.....	51
Çizelge 5. 3. Sertleşmiş Numunelerin Mekanik ve Isıl Özellikleri.....	52

1.GİRİŞ

21. yüzyılda dünya üzerinde nüfus artışıyla beraber enerji ihtiyacının artması, yeraltı enerji kaynaklarına ulaşabilmek, üretiminin sürdürülebilirliğinin sağlanması toplumların gelişmesinin, söz sahibi olmasının anahtarı haline gelmiştir. Yeraltı enerji kaynaklarının ülkelerce verimli şekilde tüketilmesinin öneminin her geçen gün artmasının nedeni ekonomik açıdan kalkınmalarına büyük önem katmasıdır.

2018 yılı içinde tüketimde yararlanılan kaynaklar içinde petrolün payı % 32 ile ilk sırada olduğu görülmektedir. Petrolden sonra % 24'lük kısım ile kömür, % 23'lük kısım ile de doğalgaz sırasını almaktadır. 2050 yılı için enerji tüketiminin büyük bir bölümü yapılan tahminlere göre fosil yakıtlardan sağlanmaya devam edeceği düşünülmektedir (International Energy Outlook, 2019).

Yeraltı enerji kaynakları, rezervuara yapılan sondaj operasyonları yardımıyla yüzeye çıkarılabilmektedir. Üretim yapan kuyular, 100 yılı aşan sürelerde faaliyet gösterebilirler. Üretilmesi hedeflenen kaynakların maddi-manevi değeri, toplumların günlük yaşantısını devam ettirebilmesi açısından önem teşkil etmesi, kuyuların ömür sürelerinin önemine dikkat etmemiz gerektirdiği gerçeğini karşımıza çıkartmaktadır.

Günde 10000 varil ve hatta daha fazlasını üretebilen kuyuların mevcudiyetinin olması konunun önemini artırmaktadır. Sondaj operasyonunu tamamlayan kuyuların uzun süreli çalışabilmesi, kuyuyu korumak amaçlı indirilen muhafaza borularının uzun süre görevlerini yapabilmeleri, formasyon kaçaklarından zarar görmelerinin engellenmesi API standartlarına göre hazırlanan çimento yardımıyla sağlanmaktadır. Saha mühendislerinin çalışmalarında karşılaştıkları sorunların başında, yüzeye yakın alanlarda muhafaza borularının klor, hava gibi etkenlerden kaynaklı korozyona uğramaları sorunlarına sebep olmakta hatta sorunlara sebep kuyunun çalışma rejiminden çıkmasına neden olabilmektedir.

Operasyon sahalarında kuyulara kâfi çimentolama yapılsa da dış etkenlerden kaynaklı korozyonun oluşturduğu etki muhafaza borularında çürümelere ve çürümelerden kaynaklı kırılmalara neden olabilmektedir. Muhafaza borularının sorunsuz uzun müddet kullanılabilmesi amacıyla kullanılması düşünülen çimento sınıfının doğru ve iyi bir şekilde kullanılması gerekmektedir.

Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında kullanılan çimento, sondaj operasyonlarından üretim operasyonlarına kadar olan tüm aşamalarda dikkatle ve özenle

uygulanmalıdır. Formasyonların matkap aracılığıyla açılması ile çökmesini engellemek, kaynak derinliğine inebilmek amacıyla kuyuya muhafaza boruları indirilerek muhafaza borularının dış cidarı ile formasyon arasındaki mesafeye çimento operasyonu yapılır. Uygulama operasyonlarında ekiplerin planlı çalışmaları gerekmektedir, aksi taktirde saha mühendislerinin “workover operasyonu” olarak adlandırdıkları maliyetli çalışmalara hatta üretimde kayıp problemleriyle karşılaşılabilir (Radojevic ve Shafeyeva, 2006).

1.1.Çimento

Çimento; ince, yumuşak, toz gibi olan ve ince kum ile kaba çakılı birbirine bağlayarak beton oluşturmak için kullanılan bir malzemedir. Çimento, hidrolik bağlayıcı olarak kullanılan yapıştırıcıdır. Su eklendiği zaman sertleşir (Arun 2018). Çoğu alanda kullanıldığı gibi petrol, doğalgaz ve jeotermal sahalarında kullanılması önem arz eden bir malzemedir. Çıkartılması hedeflenen yeraltı kaynakların üretimi için açılan her bir kuyu için çimentolama operasyonu yapılmalıdır. Dikkat edilmesi gereken, uygulanacak çimento operasyonunun çimento sınıfı, çimento operasyon türü ve çimentolama operasyonudur.

1.2. Petrol, Doğalgaz ve Jeotermal Sahalarında Kullanılan API Standartlarına uygun Çimento Sınıfları ve Özellikleri

Amerikan Petrol Enstitüsü (API) tarafından; A, B, C, D, G, H olarak sınıflandırılmış petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyuları çimentoları, talepleri karşılamak amacıyla türetilmiştir. Türetilen çimento sınıfları ve özellikleri;

A sınıfı çimento

Yaklaşık 1828 metre (6000 ft) derinliğe kadar etkilidir ve kullanılabilme özelliğine sahiptir. Bu çimento sınıfı özel durumlar gerekmediği hallerde kullanılabilir. ASTM C 150 Tip-1'e benzer

B sınıfı çimento

Bu çimento türü de yaklaşık 1828 metre (6000 ft) derinliklerde kullanılmaktadır. Orta veya yüksek sülfat direnci gerektiği durumlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. ASTM C 150 Tip-2'ye benzer. Ayrıca hem MSR hem HSR sınıflarında mevcuttur.

(MSR ve HSR, Formasyon durumuna göre kullanılan G sınıfı çimentosunun 2 farklı tipidir).

C sınıfı çimento

Yaklaşık 1828 metre (6000 ft) derinliklerde kullanılmaktadır. Bu ürün, yüksek erken dayanım gerektiği durumlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu ürün de MSR ve HSR sınıflarında mevcuttur. Orta ila yüksek sülfat direncine sahiptir. ASTM C 150 Tip-3'e benzerdir.

D sınıfı çimento

1828-3048 metre (6000-10000 ft) derinliklerde uygulanmaktadır. Orta-yüksek sülfat direncine sahiptir. Orta derecede yüksek sıcaklık ve basınç altında uygulanması tavsiye edilmektedir.

E sınıfı çimento

3048-4267 metre (10000-14000 ft) arası derinliklerde uygulanabilmektedir. Orta-yüksek sülfat direncine sahiptir. Yüksek sıcaklık ve basınç altında uygulanması tavsiye edilmektedir.

F sınıfı çimento

3048-4867 metre (10000-16000 ft) arası derinliklerde uygulanabilmektedir. Orta-yüksek sülfat direncine sahiptir. Son derece yüksek sıcaklık ve basınç altında uygulanması tavsiye edilmektedir.

G sınıfı çimento

2438 metre (8000 ft) derinliğe kadar kullanılabilir. Çimentonun diğer mekanik özelliklerini iyileştirebilmek veya değiştirebilmek için hızlandırıcılar ve/veya geciktiriciler ile beraber kullanılabilir. Yüksek sülfat direncine sahiptir (Yüksek derecede sülfat içeren ortamlarda kullanılabilir). G sınıfı çimentoları temel kuyu çimentosu olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır. MSR ve HSR sınıfları mevcuttur. İnce taneli olduğu söylenebilir.

H sınıfı çimento

2438 metre (8000 ft) derinliğe kadar kullanılabilir. Çimentonun diğer mekanik özelliklerini iyileştirebilmek veya değiştirebilmek için hızlandırıcılar ve/veya

geciktiriciler ile beraber kullanılabilir. Orta derecede sülfat direncine sahiptir. H sınıfı çimentolarda G sınıfı çimentolar gibi temel kuyu çimentosu gibi kullanılmak üzere tasarlanmıştır. MSR ve HSR sınıfları mevcuttur. Kaba tanelidir.

Çizelge 1.1. Çimentolama operasyonlarında kullanılan çimento sınıflarının bileşenleri ve özellikleri (Çimsa, 2016)

API Çimento	Bileşenler (%)			
	C ₃ S (Alit)	C ₂ S (Belit)	C ₃ A (Alüminat)	C ₄ AF (Ferrit)
A	53	24	8+	8
B	47	32	5-	12
C	58	16	8	8
G&H	50	30	5	12

Özellik	Nasıl Elde Edilir?
Çok erken güç dayanımı	C ₃ S'in artmasıyla
Prizlenme geciktirmesi	C ₃ S ve C ₃ A'nın kontrolü ile
Düşük hidrasyon ısı	C ₃ S ve C ₃ A'nın limitlendirilmesi ile
Sülfata karşı dayanım	C ₃ A'nın mevcudiyeti ile

1.3. Petrol, Doğalgaz ve Jeotermal Sahalarında Kullanılan API Standartlarına Uygun Çimentolara Eklenen Katkı Malzemeleri ve Özellikleri

API tarafından belirlenen, çimento ölçütlerine uygun olarak kullanılan çimento katkı maddeleri, hızlandırıcılar, geciktiriciler, genişleticiler, sıvı kaybı maddeleri, dağıtıcıların farklı işlevleri vardır (Broni-Bediako ve ark., 2016). Geniş sınıflandırmanın her biri, çimento bulamacı tasarımı sırasında birbirleriyle bağlantılı işlevleri yerine getirmek için geliştirilmiş farklı katkı maddeleri kategorilerine sahiptir. Bununla birlikte, petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyusu çimentolama işlemleri için çimento harcı tasarımında yaygın olarak kullanılan her ana sınıfın altında bazı katkı maddeleri mevcuttur. Bunlar;

1.3.1. Hızlandırıcılar

Kalsiyum Klorür (CaCl₂), şüphesiz en verimli ve en ekonomik hızlandırıcı olarak belirlenmiştir (Broni-Bediako ve ark., 2016). Hızlandırıcı katkı maddesi olarak ayrıca Sodyum klorür (NaCl) maddesi de kullanılmaktadır. Sodyum klorür, düşük konsantrasyonlarda hafif bir hızlandırıcıdır ve yüksek konsantrasyonlarda geciktirici hale gelir ve ayrıca tüm konsantrasyonlarda hafif bir dağıtıcı görevi görür.

1.3.2. Geciktiriciler

Lignosülfonatlar, selüloz türevleri ve hidroksikarboksilik asitler sık kullanılan geciktirici katkı maddeleridir. Lignosülfonatlar, en yaygın olarak kullanılanlardır. Odun atığının işlenmesinden geri kazanılan, ligninden türetilen bir metalik sülfonat tuzudur. Selüloz türevleri olarak hidroksietil selüloz (HEC) ve karboksimetil hidroksietil selüloz (CMHEC), çimentolama operasyonlarının uygulamalarında kullanılan iki selüloz polimerdir. Hidroksikarboksilik asitler, yaygın olarak kullanılmakta olup, genellikle doğal olarak oluşan şekerlerden üretilir.

1.3.3. Ağırıştırıcılar

Hematit, ilmenit ve barit maddeleri yaygın olarak kullanılan ağırıştırıcı katkı maddeleridir. Hematit, en yaygın kullanılan ağırıştırıcı katkı maddesidir. Donuk metalik bir parlaklığa sahip, tuğla kırmızısı, doğal olarak oluşan bir mineraldir. Hematitin özgül ağırlığı, saflığına bağlı olarak 4.9 ila 5.3 gr/cm³ arasında değişir. İlmenit, bilinen diğer adıyla demir titanyum oksit, hematite göre bazı avantajları olmasına rağmen, hematit kadar yaygın olarak kullanılmamaktadır. İlmenit, yarı metalik bir parlaklığa sahip, doğal olarak oluşan siyahtan koyu kahverengimsi-siyah renkli bir mineraldir. Görünüşte manyetite benzer ancak yalnızca biraz manyetik bir karaktere sahiptir. Özgül ağırlığı saflığa bağlı olarak 4.5-5 gr/cm³ arasında değişir. Barit, yüksek yüzey alanı ve yüksek su talebi nedeniyle normalde çimentolamada ağırıştırıcı katkı maddesi olarak kullanılmaz. Yumuşak, açık gri, doğal olarak oluşan, metalik olmayan bir malzemedir. Özgül ağırlığı saflığa bağlı olarak 4-4.5 gr/cm³ arasında değişir.

1.3.4. Sıvı Kaybı Katkı Maddeleri

En yaygın sıvı kaybı katkı maddesi olarak hidroksietil selüloz (HEC) bazlı malzemeler, çeşitli çimento sistemlerinin sıvı kaybı kontrol özelliklerini geliştirmek için kullanılır ve çok çeşitli kuyu koşullarında etkilidir. Sıvı kaybı kontrolü için yaygın olarak 180°F (82°C)'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılır ve kullanılan yardımcı katkı maddelerine bağlı olarak yaklaşık 230°F (110°C) alt delik sirkülasyon sıcaklığı (BHCT)'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılabilir.

1.3.5. Genişleticiler

Bentonit, çimento bulamaç yoğunluğunu düşürmek için kullanılan en yaygın katkı maddesi türüdür. Bentonit, katıların ayrılmasını önlemek, serbest suyu azaltmak,

sıvı kaybını azaltmak ve bulamaç verimini artırmak için kullanılır. Ayrıca sodyum silikat katkı maddesi de genişletici katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Sodyum silikat, çimento bulamaçları için en yaygın kullanılan kimyasal sulandırıcıdır.

1.3.6. Kayıp Dolaşım Katkı Maddeleri

Gilsonit katkı maddesinin düşük özgül ağırlığı, kayıp dolaşımını kontrol etme yeteneğini geliştirmeye yardımcı olur. Bununla birlikte, bu özellik, katkı maddesinin, ince bulamaçların ve dağıtıcı içeren bulamaçların üstünden ayrılmasına da neden olabilir.

1.3.7. Genleştiriciler

Donmuş çimentonun dış boyutlarının yavaş büyümesini sağlar. Bulamacın dış boyutlarındaki bu küçük büyüme, çimentonun boruya ve formasyona daha iyi bağlanmasına neden olur. Bu uygulama için en yaygın katkı maddeleri kalsiyum sülföalüminat ve kalsiyum oksittir.

1.3.8. Dağıtıcılar

Dağıtıcı olarak kullanılan polinaptalen sülfonatlar (PNS) çimento partiküllerini bulamaçlarda dağıtmak için en yaygın kullanılan malzemelerdir. Kalsiyum ve/veya sodyum tuzu olarak mevcuttur ve hem katı hem de sıvı formda elde edilebilir.

1.3.9. Köpük Önleyici Katkı Maddeleri

Esas olarak poliglikol veya silikonlardan veya her ikisinin bir karışımından oluşur ve ayrıca ilave yüzey aktif maddeleri içerebilir. En ucuz ve en yaygın kullanılan köpük önleyici ajanlar polipropilen glikollerdir.

Katkı maddeleri, çimentonun performansını değiştirmek için temel çimento bulamaçlarına karıştırılan kimyasallar ve malzemelerdir. Temel çimentolarının doğası gereği ve kuyu ömrü boyunca çimento kılıfına getirilen talepler nedeniyle, çimentolama bulamacının performans özellikleri, her bir kuyunun kendine özgü ve benzersiz koşullarını ele alacak şekilde değiştirilir. Şu anda kullanılan katkı maddelerinin çoğu, kuyu çimentolama operasyonlarında kullanılmak üzere özel olarak formüle edilmiş organik, polimerik malzemelerdir [ASTM C494].

2. PETROL, DOĞALGAZ VE JEOTERMAL KUYULARINDA UYGULANAN ÇİMENTO OPERASYONLARI

Çimentonun dayanıklılığı ve uygulanma türünün düzgün yapılması muhafaza borularının dış etkenlerden korunmasından dolayı üretimin süresini arttıracak ve de formasyonlar arasında ki ilişkileri de önleyeceğinden önemlidir (Kurt, 2013). Muhafaza boruları ile formasyon arasındaki mesafelerin çimentolanmasıyla, sondaj operasyonları sırasında kullanılan sondaj çamuru kimyasallarının, sığ metrajlardaki yeraltı kaynak sularına zarar vermesini, farklı metrajlardaki formasyonlardan kuyuya su, gaz girişi sonucunda çamurun kirlenmesini ve muhafaza borularının korozyona uğramasını engellemektedir. Uygulanan çimento operasyonu, muhafaza boruları ile formasyon arasındaki mesafede oluşturduğu izolasyonu, çamurun kirlenmesini engellemede, muhafaza borularının deformasyona uğramalarını engellemesi bakımından dikkat edilmesi ve uygulama aşamasında özen gösterilmesi gerekmektedir (Knapp ve Ardmore, 1914).

2.1 Petrol, Doğalgaz ve Jeotermal Kuyularında Uygulanan Çimento Operasyonu Yöntemleri

Çimento, operasyonlarda muhafaza borusunun içinden basılarak formasyonla muhafaza borusunun dış cidarının arasından alınması sahalarında en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bir tanesi olmasına karşın bunun tersi de kırılğan veya çatlaklı formasyonlarda uygulanabilir. Kırılğan veya çatlaklı formasyonlara uygulanan bu yöntem *ters dolaşım yönteminde*, doğru çimentolama uygulaması veya homojen olması pek mümkün değildir. Çimento operasyonlarının hedefine ulaşabilmesi için; operasyon tekniği seçilmeli, kuyunun formasyon özelliklerine uygun çimento hazırlanarak testler yapılmalı, operasyon için donanımların belirlenerek hazırlanan çimento karışımının ötelenme hacimleri belirlenmeli, hedeflenen ile elde edilen sonuçlar incelenerek diğer uygulamalar için gerekli müdahalelerin yapılmasına dikkat edilmelidir (Crook, 2006).

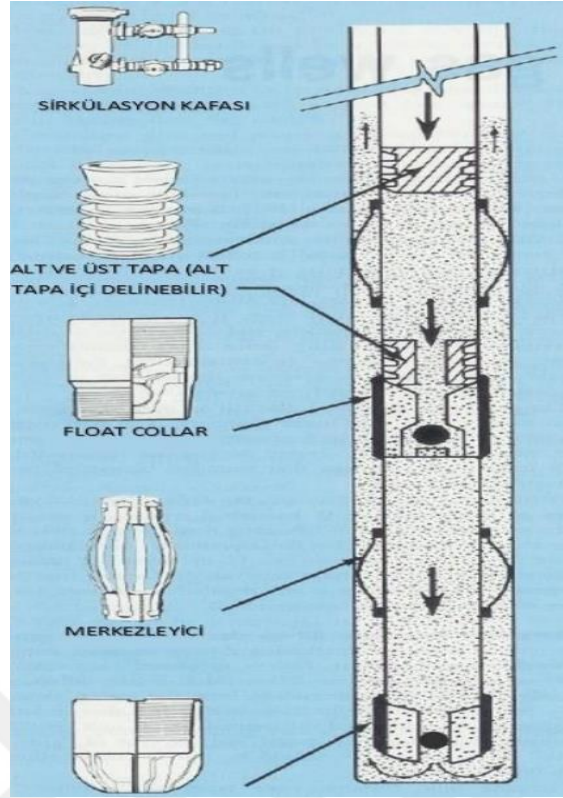
2.1.1. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında uygulanan birincil çimentolama yöntemi

Muhafaza borusunun dış cidarı ile anülüs arasına uygulanan işleme birincil çimento işlemi denir. Çimentolama operasyonu tamamlandıktan sonra çimento prizlenerek sertleşir ve geçirimsiz duruma ulaşarak kuyuda formasyonlar arası problemlerin önüne geçilir. Böylece, üretim hattı korunarak üretimin iyileştirilmesi

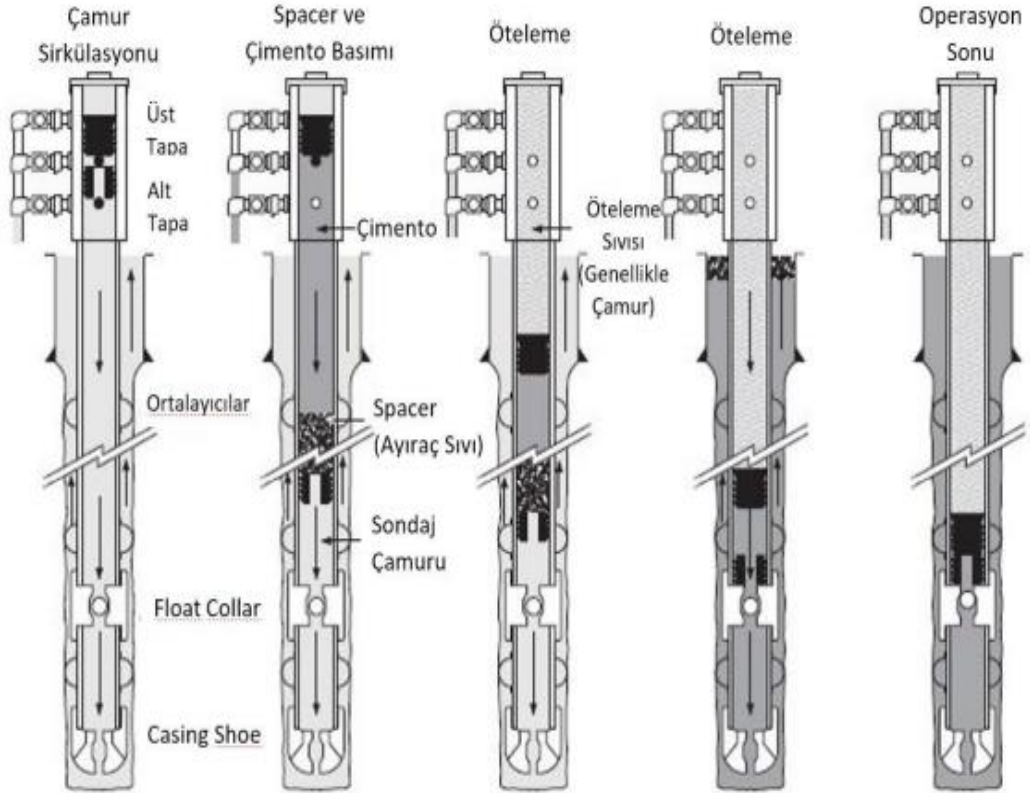
gerçekleştirilir. Ayrıca bu yöntem yeni sondajı yapılan bir kuyunun, kuyunun kalitesini ve ömrünü uzatacağından dikkat edilmesi gereken bir süreçtir. Formasyonlarda, korozyona sebep olan maddelerin yüksek miktarda olması ve yüksek sıcaklara çıkabilmelerinden dolayı, muhafaza borularının türü dikkate alınmadan birincil çimentolama operasyonlarının uygulanması aynı şekildedir. Daha açık bir ifade ile sıcaklık artması muhafaza borularının tipini değiştirir ama çimentolama yöntemini değiştirmez. Birincil çimentolama yönteminde, muhafaza borularının içinden laboratuvar ortamında yapılan deneyler sonucunda karar verilen API standartlarına uygun çimento sınıfı belli bir debiyle muhafaza borusunun içinden basılır. Çimentolama süreçleri kuyuların özelliklerine bağlı olarak, muhafaza borusunun dış cidarı ile anülüs arasından yüzeye gelene kadar bazen tek bazen de birden fazla operasyonla sürdürülür (Piot, 2006).

2.1.1.1 Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında uygulanan birincil çimentolama yönteminde tek kademe çimentolama

Muhafaza borusu çimentolama çalışmaları yaygın olmamakla beraber ikiden fazla aşamada uygulanabilir. Kondüktör, yüzey ve ara muhafaza borularına, aksi bir durum olmadığı müddetçe tek aşamada çimento operasyonu uygulanır (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2). Yapılan tek kademe çimentolama operasyonunda hazırlanan çimento alt ve üst tapa tecridi ile belli bir debiyle muhafaza borusundan yüzeye çıkana kadar basılarak prizlenmesi beklenir (Crook, 2006).



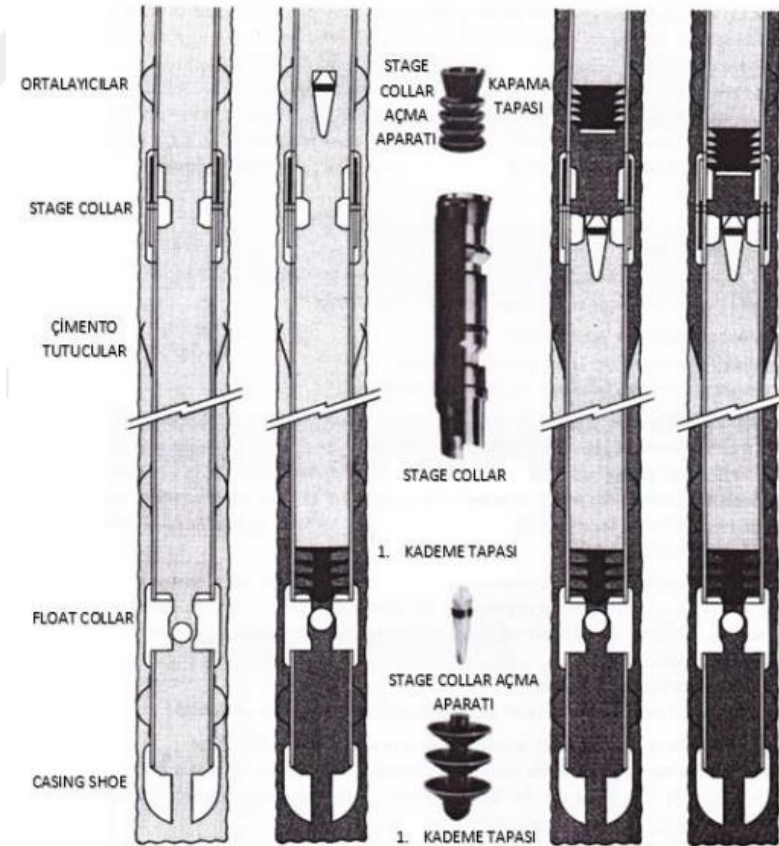
Şekil 2. 1. Tek kademe çimentolamada kullanılan kuyu operasyon ekipmanları (Suman ve Ellis, 1977)



Şekil 2. 2. Tek kademe çimentolamanın uygulama aşamaları (Renpu, 2011)

2.1.1.2. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında uygulanan birincil çimentolama yönteminde iki kademe çimentolama

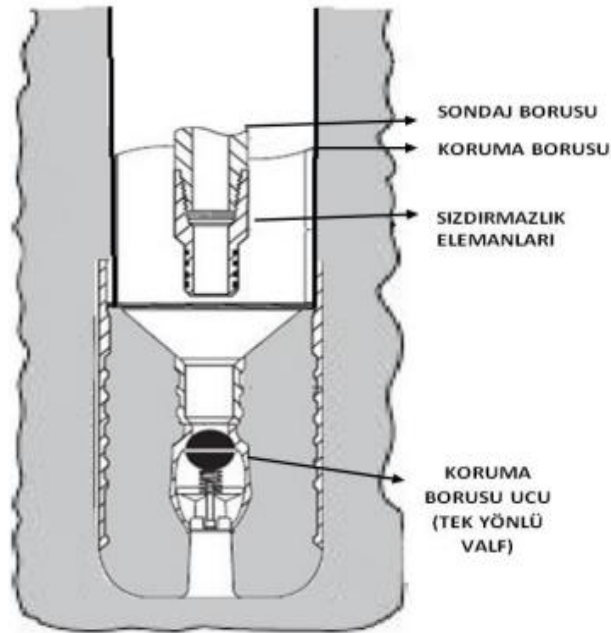
İki kademe çimentolama operasyonunda tek kademe çimentolama operasyonuna ilave işlem olarak muhafaza borusuna “kademe manşonu” monte edilir. Kademe manşonunun monte edilmesinin nedeni farklı malzemeler yardımıyla uygulamanın iki veya ikiden fazla aşamada operasyonun yapılmasına olanak sağlamasıdır (Şekil 2.3). Üzerinde dolaşım kanalları bulunan kademe manşonu, muhafaza borusuna kapalı halde bağlanarak borunun altında dolaşım yaptırılır. Birinci kademe operasyonunun amacı, kuyunun zemininden kademe manşonuna kadar muhafaza borularının dış cidarı ile formasyon duvarı arasındaki mesafenin çimentolanmasıdır. Yapılan bu ilk aşamanın ardından kademe manşonu, kuyu içine atılan “bomba” diye adlandırılan ağırlık yardımıyla açılır, kademe manşonuna gelen çimentonun prizlenmesine müsaade edilmeden kuyu dolaşıma alınır. Atılan bomba neticesinde oluşan etki kademe manşonu üzerinde bulunan dolaşım kanallarını açarken, hazırlanan çimento malzemesinin hidrolik açılan tipleri de bulunmaktadır (Piot ve Cuvillier, 2006).



Şekil 2. 3. İki kademe çimentolamanın uygulama aşamaları (Klempa ve ark., 1996)

2.1.1.3. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında sondaj boruları ve stinger ile muhafaza borusuna uygulanan çimentolama

Yüksek debilerde basılan çimento hacimleri, basım sürelerinin uzaması, tapanın sıkışması gibi problemlerin meydana gelmesi durumunda, yüzey muhafaza boruları stingerin kullanılmasıyla çimento operasyonu yapılır. Float collar (tek yönlü) manşonunun üstüne mandrel gövdesi bağlanmasının ardından muhafaza boruları kuyuya indirilerek askıya alınır (Şekil 2.4). Operasyonun devamında, sondaj borularının ucuna bağlanan mandrel-stinger kuyunun içine indirilerek mandrelinin gövdesine bağlanır. Uygulanacak operasyon için bu işlemin yalıtımlı bir birleşme olması çok önemlidir. İndirilen sondaj borularıyla kuyu dolaşıma geçerek sondaj borularının içinden vurulan akışkan muhafaza borularının arkasından alınır. Uygulama sonucunda elde edilen akışkan dolaşımının, sondaj borularıyla muhafaza boruları arasındaki alanda, düzeyinin aynı olduğuna operasyon süresince dikkat edilmelidir. Operasyon için hazırlanan çimento, sondaj borularından basılarak muhafaza borusunun arkasından yüzeye gelene kadar basımı devam eder ve ardından sondaj borularının hacmi kadar suyla çimento ötelenerek çalışma bitirilir. Bu süreçte tapan kullanılmaz (Drillingcourse, 2015).



Şekil 2. 4. Stinger kullanılarak çimentolama uygulaması (Drillingcourse, 2015)

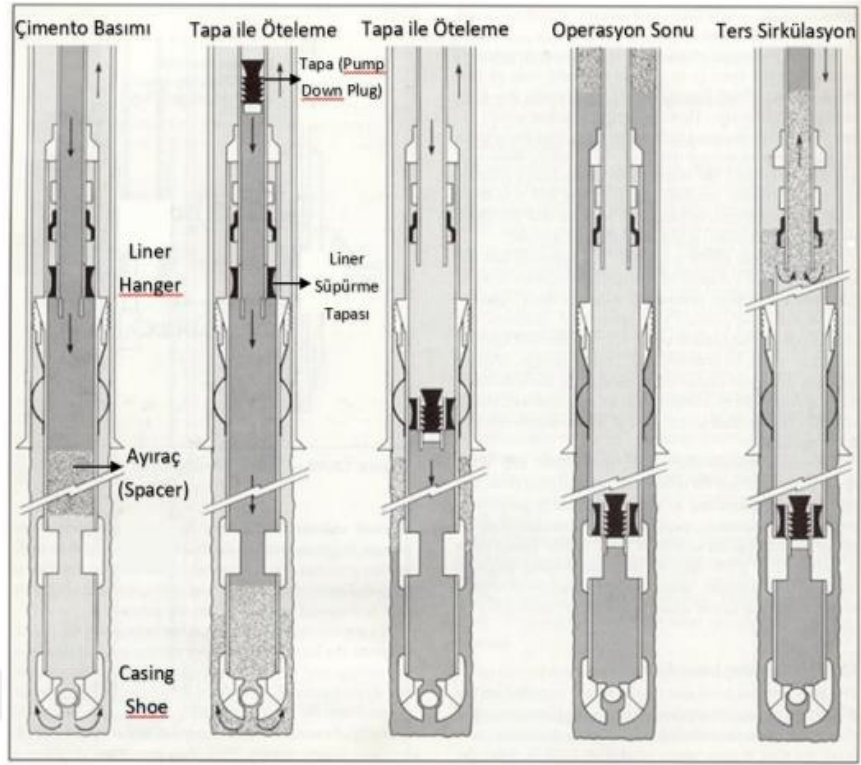
2.1.1.4. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında küçük çapta borular ile muhafaza boruları arkasına giriş yaparak çimentolama

Sahalarda büyük çaptaki muhafaza borularının çimento operasyonlarında sızıntı olduğunda, küçük çaptaki borular birbirine montaj edilerek muhafaza borularıyla formasyon arasına indirilebilecek en derin mesafeye kadar indirilerek çimento operasyonu yapılır. Sondaj çamuru veya suyla dolaşımın oluşması sağlanarak çimentolama operasyonuna başlanılır. Sızıntı miktarı net olarak bilinemediğinden yeteri ölçülerde uygulama sürdürülür ve sorun çözüldüyse küçük çaptaki borular kuyudan alınır.

2.1.1.5. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında liner çimentolama

Standart muhafaza borusunu tümüyle yüzeye getirtmeden bir önceki muhafaza burusunun içinde askıya alınarak yapılan muhafaza yöntemine “liner” denir (Şekil 2.5).

Kuyuya linerlar indirildiğinde, çoğu zaman formasyonla muhafaza boruları arasında dar bir mesafe kalır ve bu sebeple etkili sondaj çamuru kekinin temizlenmesi çok zor olur. Sondaj çamuru kekinin temizleyicilerini çok fazla kullanmak yapılması hedeflenen liner çimentolamada hidrostatik dengesinin bozulmasına sebep olabilir. Dar mesafenin kalmasından kaynaklı çimento uygulamalarında, muhafaza borularının merkeze gelememesinden dolayı sondaj çamuru kekinin temizlenme işleminin yapılması zorlaşmasından dolayı ortalayıcıların operasyonlarda başarıları önemlidir ve bu sebeple ortalayıcıların tasarımı önemlidir. Muhafaza borularının çimento operasyonu esnasında dönüşünü sağlamak, operasyonun başarısına tesir eden en tehlikeli başlangıcıdır. Ortalayıcıların dizaynı ilk dönüşsel torkunu başardıktan sonra iyi bir çimentolama operasyonu için kuyu hazır hale gelmesi ile mümkündür (Rabia ve Piot, 2001, 2006).



Şekil 2. 5. Liner çimento operasyonu (Knowenergy, 2012)

2.1.2. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında iyileştirici çimentolama

Sondaj operasyonundan çimento operasyonuna kadar yapılan tüm işlemlerin düzgün organize edilmesiyle, tasarımın eksiksiz yapılmasıyla iyileştirici çimentolama operasyonundan mümkün mertebe kaçınılabılır. İyileştirici çimentolamanın yapımının istenmemesinin nedeni, ilk olarak uygulanan birincil çimento operasyonunun ve de yapılan kuyu planlarındaki çalışmaların düzgün yapılmamasının sonucudur. Genelde iyileştirici çimentolama operasyonu birincil çimentolama operasyonundan daha kompleks hale geldiğinden, bu operasyonda birincil çimentolama operasyonundaki gibi teorik bilgiye ve uygulama tecrübesine ihtiyaç duyulur. İyileştirici çimentolama operasyonları basınçla sıkıştırılan ve tapa çimentolama uygulamaları olarak iki grupta incelenmektedir (Jones ve Watters, 1977).

2.1.2.1. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında basınçla sıkıştırılan (squeeze) çimento

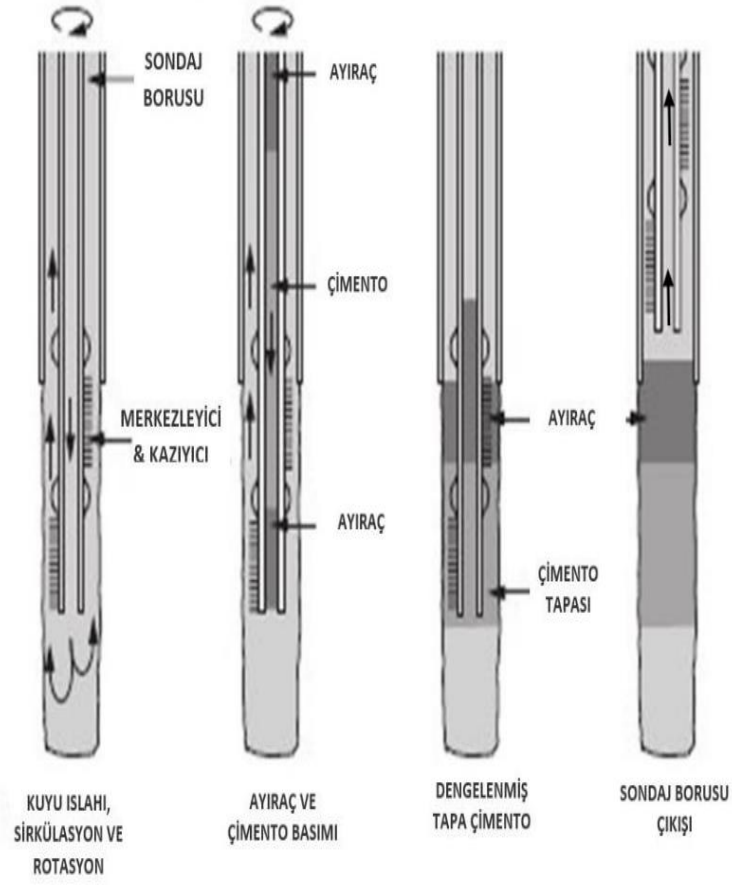
Kuyuya vurulmak üzere hazırlanan çimentonun, istenildiği gibi hedeflenen bölgelere uygulanması işlemine basınçla sıkıştırılan çimentolama denir. Kâfi hidrolik basınçta hazırlanan çimentodan su ayrılır ve çimentonun prizlenerek istenilen noktayı yalıtması sağlanır (Jones ve Watters, 1977).

Çizelge 2.1. Basınçla sıkıştırılan çimentonun uygulanmasının gerekli olabileceği durumlar (Jones ve Watters, 1977)

Önceki operasyonlardan kaynaklı hatayı düzeltmek
- Zayıf koruma borusu ucu ve civarını tamir etmek - Çimentolanmış koruma borusu anülüsüne gaz girişini engellemek, - Koruma borusu-çimento ya da çimento-formasyon arası mikro boşlukları gidermek.
Formasyonları izole etmek
- Üretim bölgelerinin geçici izolasyonu - Üretim kapasitesi olmayan bölgelerin izolasyonu, - Çimentolama ve tamamlama operasyonu sırasında oluşan sirkülasyon kaybı bölgelerin izolasyonu.
Formasyon karakterlerini değiştirmek için
- Su-petrol oranını düşürmek için, - Petrol-gaz oranını değiştirmek için.
Koruma borusu problemlerinin giderilmesi
- Yırtılmış, ayrılmış koruma borularının ve sızdıran bağlantı noktalarının tamiri, - Koruma borusu indirilme sırasında meydana gelen yırtılmalar - Korozyona uğramış koruma borularının tamiri.

2.1.2.2. Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında tapa çimento operasyonu

Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyularında tapa çimento operasyonunda sondaj veya üretim borularını çimento yapılması düşünülen metrajın tabanına indirilerek tabandan çimento hacim hesabı yapılarak çimento dengelenerek basılır ve genellikle borular çimentonun içinden çıkarılıp çimento prizlenme süreci için beklenilir (Şekil 2.6).



Şekil 2. 6. Tapa çimentolama uygulaması (Oilngasdrilling, 2015)

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bowen ve Novell (1952) perlit agregalarının “SiO₂:Na₂O” yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırarak derecesi 3.22 olan Na₂(SiO₂)_nO (sodyum silikat) birleştiricilerle birlikte elde ettikleri malzemelerin mekanik niteliklerini araştırmışlardır. Elde ettikleri veriler, ürettikleri malzemelerin eğilme dayanımlarının 2.758 MPa’ın üstünde ve basınçlarının dayanımları ise 5.51 MPa’ın üstünde olan hafiflikteki yalıtımlı malzemeler elde etmişlerdir.

Gerow ve Weidman (1972) yaptıkları çalışmalarından bir tanesinde yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırarak perlit agregalarını birleştirici olarak asfalt emülsiyonlarını kullanarak tecrit ürün elde etmişlerdir. Elde ettikleri tecrit malzemelerinin basınçlarının dayanımları 0.827 MPa’ın üstünde olduğunu yaptıkları çalışmalar sonucunda göstermişleridir.

Demirboğa ve arkadaşları (2001) çeşitli nitelikteki, yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlit agregalarını işlenmemiş perlitli agregalarla hafif betona katılarak kullanılmasını incelemişlerdir. İşlenmemiş perlitli agreganın yerine hacim oranı % 10 olan üç çeşit birbirine benzemeyen, yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlitli agregadan yedi farklı numune türetmişlerdir. Bu numunelerin 28 günlük basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı ve su absorbe oran testlerini yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, elverişli nitelikteki yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlitli agreganın kullanılması perlitli agregalı hafif betonlarda fiziksel ve mekanik niteliklerinin tesirli olduğunu bildirmişlerdir.

Perlit tozunu, çimentodaki tesirini araştırarak, çeşitli numuneler elde edilerek basınç dayanım sonucuna bağlı olarak indisleri belirlemişlerdir. Perlitin ince oluşu, perlitin karışma oranı, eklenen suyun oranı, kaba ve ince agregaların oranları ve akışkanlığı sağlayan malzemelerin kararsız gibi kullanıldığı bu araştırmada 3, 28, ve 91 gün basınç dayanım testleri uygulanarak not edilmiştir. Elde edilen verilerden çıkarılan sonuç, perlit tozu, çimentolar için iyi bir katkı maddesidir (Yu ve ark., 2003).

Pomza ve yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlit agregasını çeşitli miktarlarda kullanılan hafif betonlarda çeşitli oranlarda eklenen silis dumanını ve uçucu küllerin etkisini incelemişlerdir (Demirboğa ve ark., 2001). Ürettikleri malzemelerde ağırlıkları, yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlitin oranını fazlalaştırdıkça hafif

betonlarda birim ağırlıklarının 1154 kg/m^3 'ten 735 kg/m^3 'e düşmüştür. Silis dumanının ve de uçucu külün birim ağırlıkları düşmüştür. Kürlenme süresini arttırdıkça yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlit agregası tesirini arttırmıştır (Karakoç ve Demirboğa, 2008).

Karakoç ve Demirboğa (2008), hafif agregası gibi çalışmalarında kullandıkları, yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlit agregalarını yüksek dayanımlı betonların niteliklerine tesirlerini incelemişlerdir. Isıl iletkenliklerinin süreye dayalı ıslak ve kuru kürlenme tesirleri incelenerek; kontrol amaçlı % 0, % 7,5, % 15, % 22,5 ve % 30 olarak değişik, yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlit agregası miktarını betonlarda uygulamışlardır. İçeriğinde yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlitli agregası, hafif betonların basınç dayanımlarını, ısı iletkenliklerini, ultrasonik ses geçiş hızlarını ve etüv kurusu yoğunluklarının nitelikleri, yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlit agregası miktarının çoğalmasıyla düştüğü gözlemlenmiştir.

Şengül ve arkadaşları (2011), yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlitin hafif betonun mekanik nitelikleri ve ısı iletkenliğindeki tesirlerini araştırmak için çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları laboratuvar deneylerinde, ham agregayı kısmi yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlit ile değiştirip yeni numuneler hazırlamış ve sonuç olarak elde ettikleri yeni durumdaki hafif beton ağırlıklarının $700\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ arasında değiştiğini görmüşlerdir. Elde edilen numunelerin, basınç dayanımlarını, elastisite modüllerini, su absorbe ve kılcal katsayıları incelendi. Yapılan deneyler sonucunda malzemelerin ısı iletkenlikleri de incelenmiştir. Yapılan deneylerin sonuçlarında, perlitin terkinin çoğalmasıyla basınç dayanımlarının ve elastisite modüllerinin azaldığı, yüksek perlit içeriğiyle su absorbe ve absorpsiyon katsayıları önemli miktarda arttığını gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, perlitin betona uygulanmasıyla ısı iletkenliğinin büyük oranda arttığı ve ısı iletkenlikle birim ağırlıklarında sağlam ilişkiler elde edildiğini bildirmişlerdir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Yeni G Tipi Çimento Harcını Oluşturan Malzemeler

4.1.1. Çimento

Sahalarda G sınıfı çimento API çimento sınıfları içinde en çok kullanılmaktadır ve içerisinde çoğunluğunu klinker ve az miktarda jips bulundurmaktadır (Ramazanoğlu, 2014; Çimsa, 2016). Petrol-doğalgaz ve jeotermal sahalarında kullanılan G sınıfı çimento türüne eklenen katkı maddeleri, petrol-doğalgaz ve jeotermal kuyusu çimento operasyonlarında önemli rol oynamaktadır. Herhangi bir çimentolama işi için uygun çimento bulamacını formüle etme girişiminde, doğru katkı maddesi seçilmeli ve doğru miktar eklenmelidir.

Çizelge 4. 1. Çimentolama operasyonunda kullanılan çimentonun yaygın fiziksel nitelikleri (Çimsa, 2016)

Fiziksel Özellikleri	US Birim Sistemi	SI Birim Sistemi
38°C, 8 Saat Kürleme Sonucu Dayanım	Min 300 Psi	Min 2.1 Mpa
60°C, 8 Saat Kürleme Sonucu Dayanım	Min 1500 Psi	Min 10.3 Mpa
Serbest Su İçeriği	Maks % 5.9	Maks % 5.9
Maksimum Kıvam (15-30 Dakika Arasında)	Maks 30 Bc	Maks 30 Bc
Koyulaşma Zamanı (Thickening Time)	90-120 Dk	90-120 Dk

Çizelge 4. 2. G Tipi çimento detaylı kimyasal ve fiziksel özellikleri (Michaux ve ark., 1990)

Kimyasal Analiz %	Analiz sonuçları	Standart No TS EN ISO 10426-1 MART 2010
SiO ₂	19.88	
Al ₂ O ₃	3.85	
Fe ₂ O ₃	4.57	
CaO	62.65	
MgO	3.61	Max % 6.0
SO ₃	2.74	Max % 3.0
K ₂ O	0.62	
Na ₂ O	0.16	
Cl ⁻	0.0059	
Cr ⁺⁶ (ppm)	17.20	
Serbest CaO	0.29	
Kızdırma Kaybı	0.57	Max % 3.0
Çözünmeyen Kalıntı	0.2	Max % 0.75
Na ₂ OEq (Na ₂ O+0,658*K ₂ O)	0.57	Max % 0.75
C ₃ S	63.72	Min % 48.0 Max % 65.0
C ₃ A	2.47	Max % 3.0
C ₄ AF	13.90	

2C ₃ A+C ₄ AF	18.84	Max % 24.0
Fiziksel ve Mekaniksel Analiz	Analiz Sonuçları	Standart Değerler
		TS EN ISO 10426-1 MART 2010
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3.20	
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	3319	
45 µ elek üstü (%)	5.8	
90 µ elek üstü (%)	0.6	
Karışım Suyu, Çimentonun Kütlece Yüzdesi Olarak	44.0	%44
Serbest Akışkan İçeriği (%)	4.1	Max % 5.9
Koyulaşma Zamanı (Thickening Time) (dakika)	104	Min 90 Max 120 (for 100 Bc)
Maksimum Kıvam (Bc)	15.0	Max 30
Basınç Dayanımı Testi (Mpa)		
Atmosferik Basıncıta 38°C'de 8 saat kürleme sonucu Basınç Dayanımı (Mpa)	4.2	Min 2.1 Mpa
Atmosferik Basıncıta 60°C'de 8 saat kürleme sonucu Basınç Dayanımı (Mpa)	13.3	Min 10.3 Mpa

4.1.2. Su

Su karışımının, betonun elde edilmesinde iki ciddi görevi bulunmaktadır;

- Kuru halde bulunan çimentonun ve agreganın uygulanabilir ve plastikli yapıya dönüştürmek.
- Kuru çimentoyla kimyasal tepkimeye girerek plastikli yapıyı sertleştirir.

Yoğunluğu, metreküpe eklenen suyun oranına tabidir. Daha önceden de bahsettiğimiz gibi betonun direnci, suyla çimentonun miktarına tabidir. Bundan dolayı, çimentoya çok miktarda su eklemek mukavemeti yok edecektir.

Beton yapımında kullanılan tüm sular yaygın olarak içilebilen özellikleri taşırlar. Lakin beton yapımında kullanılması düşünülen suların içilebilme özelliğinin olma şartı yoktur. Beton yapımına başlamadan önce yapılması gereken çalışmalar, içilmesi mümkün olmayan sularla oldukça kaliteli betonlarda elde edilebilmektedir. Buna ilave, çimento yapımı için eklenen suyun terkinde bulunabilen asit, tuz, şeker, yağ ve sanayi-lağım atıklar çimento harcı yapımında istenmeyecek problemler oluşturabilir. Karıştırılacak suyun incelemelerle tayin edilmesi ve keyfiyetinin düzenli olarak kontrol edilmesi çok önemlidir. Hazırlanacak olan çimento harcı içeriğinde çimentoyla tepkimeye giremeyen artık suların bırakacakları boşluklarla sadece dayanımını

düşürmemektedir. Oluşan deliklerin içine süzülen sakıncalı maddeler (sülfat, klor gibi) betona ciddi zararlar verir ve betonun ömrünü kısaltır.

4.1.3. Mineral katkı malzemeleri

4.1.3.1. Perlit

Tez çalışmamda, esas agrega ekseri çimento harcına ve yalıtım ürünlerine uygulanan perlit, asidik tabiatlı volkanik cam malzemesi olarak ısı ile yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırılabilme niteliğine sahip, hafif ve gözenekli yapıya geçebilen kütledir. Perlit ifadesini hem işlenmemiş perlit hem de yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerinin, boylarının arttırılmasıyla üretilen malzemelerde kullanabiliriz. İşlenmemiş perlit, şeffaf açık griden parlak siyah renge kadar farklı çeşitleri bulunabilmektedir. Yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerinin, boylarının arttırılmasıyla işlenmemiş perlitin rengi tümüyle beyaza dönmektedir (Oktay, 2017) (Şekil 4.1).



Şekil 4. 1. Yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerinin, boylarının arttırılmasıyla elde edilen perlit

Perlit, suyla birleştiğinde kimyasal reaksiyona uğraması sonucunda camı silikanın yapısındaki %2-5 arasındaki birleşik durumunda kapsadığı su en önemli özelliğidir ve birleşik durumunda kapsadığı su perlitte kararlılığı sağlar (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001). Boyutlandırma ve öğütme operasyonlarından sonra işlenmemiş perlit, 400°C sıcaklığa ulaşınca kadar ilk ısıtmaya alınır. İlk ısıtma tamamlandıktan sonra işlenmemiş perlit 750-1200 °C arasındaki sıcaklıklarda birden ısıtılma tutulduğunda bünyesindeki buharın çıkmasıyla yapıları ve birleşimleri bozulmadan hacimlerinin ve boylarının arttırılmasıyla cama benzeyen tanelerin oluşarak

köpük agregaya dönüşür. İşlenmemiş perlitin hacmi 20 kat kadar genişleyebilir. Elde edilen bu ürün genişmiş perlit olarak adlandırılır (Mindess ve Young, 1981). Genleşmiş perlitin (GPA) umumi olarak fiziksel nitelikleri aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 4. 3. Genleşmiş perlitin agregasının (GPA) fiziksel nitelikleri (DPT, 2001)

Renk	Beyaz
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.2-2.4
Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	30-190
Porozite	%90
Özgül Isı (kCal/kg °C)	0.20-0.23
Sertlik (Mohs Skalası)	5.5-7.0
Erime Noktası (°C)	1300
Isıl İletkenlik (W/mK)	0.039-0.046
Isıl Genleşme (mm/m °C)	0.004-0.011
Ses Yalıtım	0.60
Ateşe Karşı Dayanım	Yanmaz

Perlit yatakları dünyada, volkanik nesil içine yerleşen alanlarda bulunmaktadır. Dünya görünür rezervi 700 milyon tonu geçmektedir. Aşağıdaki çizelgede ülkelerin görünür perlit yataklarının stokları milyon ton olarak verilmiştir.

Çizelge 4. 4. Perlit stoklarının bazı ülkelerdeki durumu (DPT, 2004).

Ülke	Görünen rezervler (milyon ton)	Toplam rezervler (milyon ton)
ABD	50	200
Türkiye	30	5700
Yunanistan	50	300
Diğer	600	1500
Dünya toplam	730	7700

Çizelge 4.4'te belirtildiği üzere ülkeler geneli toplam stoklar (belli + beklenen + olası) 7.700 milyon tondur; bu stokların 5.700 milyon tonu yani yaklaşık %74'ü

Türkiye’dedir. Bundan dolayı borla beraber perlitin de kullanım alanları bakımından genişletilmelidir (Kalaycı, 2016).

Tezde kullanılan değişik çaplarda ve yoğunluklarda yapılarını ve birleşimlerini bozmadan hacimlerini, boylarını arttırdıkları perlit “İnper Perlit A.Ş.” den tedarik edildi. Aşağıdaki çizelgede (Çizelge 4.5) perlitin kimyasal bileşiminin incelemesi bulunmaktadır.

Çizelge 4. 5. Perlitin kimyasal nitelikleri

Kimyasal bileşik	GPA (%)
SiO ₂	71-75
Al ₂ O ₃	12-16
Fe ₂ O ₃	-
CaO	0.2-0.5
Na ₂ O	2.9-4
K ₂ O	-

4.1.3.2. Yüksek fırın cürufu

Demir-çelik işletmelerindeki yüksek sıcaklıklara çıkan ocaklarda demiri üretirken oluşan yan ürüne “yüksek fırın cürufu” denir. Demir-çelik işletmelerinde demiri üretirken, demir cevherini, kireç taşını ve kok kömürünü hammadde gibi kullanırlar. Demir-çelik işletmelerinde demirin üretimi esnasında demir cevheri, oksidi, silis, kükürt, alümin benzeri maddeleri de içerir. Yüksek ocaklardaki yöntemin sonucunda demir cevheri, oksidi, silis, kükürt, alümin benzeri maddeleri ayrılır. Bu işlemlerin süreçlerinde kok kömürü ihtiyaç duyulan yakıtı tedarik ederken kireçtaşı ise yardımcı hammadde gibi vazifesini sürdürür.

Yüksek sıcaklıklı ocaklar devamlı hammaddelerle beslenerek sıcaklıklarını 1600°C’ye çıkarırlar. Ulaştıkları yüksek sıcaklıklar sonucunda çözünen malzemelerin üstünde cüruf, altında pik demiri oluşacak figürde ocağın altında toplanırlar. Çözünen cüruf ve demir birbirlerinden bağımsız bir şekilde boşaltılır. Yüksek fırın cürufu takribi 1500°C olduğundan elde edildikten sonra soğutma işlemi uygulanır, bu uygulanan işlem elde edilen malzemenin niteliğini, kullanım alanını belirler. Bu tezde, yapılarda genel olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır (Erdoğan, 2004). Aşağıda öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi (Çizelge 4.6) ve fiziksel görünümü (Şekil 4.2) verilmiştir.

Çizelge 4. 6. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi (Kosmatka ve ark., 2003)

Kimyasal Bileşim	Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂ (%)	35.00
Al ₂ O ₃ (%)	12.00
Fe ₂ O ₃ (%)	1.00
CaO (%)	40.00
SO ₃ (%)	9.00
Na ₂ O (%)	0.30
K ₂ O (%)	0.40
Kızdırma Kaybı (%)	1.00
Özgül Yüzey Alanı (cm ² /g)	4000-5000
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.94



Şekil 4. 2. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu

4.1.4. Kimyasal katkıları

4.1.4.1. Hava sürükleyici

Sertleşmiş çimento harcı örneklerinin yalıtım niteliklerini fazlalaştırmak amacıyla çimento harcı içinde oluşan boşluk miktarının (hacminin) fazla olması lazımdır. Bu durumu elde edebilmek için agreganın içinde boşluk olmalı ve de harç çok küçük çapta gözeneklere sahip olmalıdır. Hava sürükleyici “Mikro hava 200” olarak

bilinen çimento harcı katkı maddesi, harcın içine havayı kontrollü bir şekilde sürükler ve harcın içinde kalıcı, küçük ve optimum olarak birbirinden ayrılmış mikro düzeyde hava gözenekleri oluşturan hava sürükleyici katkı maddesidir. Ayrıca, hava sürükleyici “Mikro hava 200” içeriğinde amonyum tuz ve yağ alkolü bulundurur. Kullanılmakta olan katkı maddesinin fiziksel nitelikleri aşağıda, Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4. 7. Hava sürükleyici katkısının fiziksel nitelikleri (Oktay, 2017)

Özellik	Nitelik/Nicelik
Kimyasal bileşen	Alkol yağı ve amonyum tuzu
Yoğunluk (g/cm ³), 20°C	1.00 - 1.02
Alkalın içeriği (%)	< 10
Renk	Amber
Hali	Sıvı

4.1.4.2. Dağıtıcı (Dis-180)

Sürtünmeyi azaltan katkı maddeleri olarak da bilinen dağıtıcılar (dispersantlar), çimento bulamacının akış özelliklerini iyileştirmek için eklenir (Bett, 2010; Anonim, 2009). Özellikle, aşırı yüksek viskoziteyi ve bazı bulamaçların jelleşme eğilimini dengelemek için kullanılırlar (Nguyen, 1996). Dağıtıcılar, yüksek yoğunluklu bulamaçlar için sıvı kaybı kontrolü sağlamaya yardımcı olur. Ayrıca gerektiğinde düşük pompalama hızında türbülanslı akış oluşturmaya yardımcı olurlar (Adams ve Charrier, 1985). Yüksek konsantrasyonlu çimento süspansiyonlarını stabilize etmek için yaygın olarak dağıtıcı olarak kullanılır. Dağıtıcı, çimento harcının su içeriğinin, pompalanmasını zorlaştırmadan düşürülmesine izin verir. Doğru konsantrasyonda, dağıtıcılar çimento homojenliğini iyileştirir ve geçirgenliğini düşürür. Bununla birlikte, aşırı dozda dağıtıcı, çimento bulamacında faz ayrılmasına neden olabilir, bu da çimento partiküllerinin çözeltilerden çökelmesine ve serbest sıvı oluşumuna neden olur. Farklı isimlerde ve özelliklerde dağıtıcılar bulunmaktadır. Amfoterik polikarboksilat bazlı (APC) dispersant ve geleneksel sülfonatlı aseton formaldehit polikondensat bazlı (SAF) gibi çeşitleri vardır. En yaygın dispersant, Polisülfonatlı Naftalin (PNS) olarak da anılan Polinaptalen Sülfonat'ın (PNS) sodyum tuzudur (Cowan ve Eoff, 1993; Anonim, 2014).

4.1.4.3. Genişletici (Geo Ext-303)

Birçok formasyon, yüksek yoğunluklu bulamaçların uzun çimento sütunlarını desteklemeyecektir. Bu bulamaç ağırlıklarının, düşük kırılma gradyanına sahip

formasyonları korumak için veya ekonomik amaçlarla azaltılması gerekir. Çimento bulamaçlarının ağırlığını azaltmak için genişleticiler kullanılır (Samsuri ve ark., 2001). Genişleticiler aynı zamanda su absorbe edici veya hafif inert malzemeler olarak da bilinir (Anonim, 2009) ve bulamaç yoğunluğunu azaltmak ve çimento bulamacı verimini artırmak için kullanılan malzemelerdir. Hidratasyon ve puzolanik reaksiyon sırasında çimento ve çimento genişleticilerdeki pH seviyesi, puzolanik materyallerin çözünmesi ve ilave CSH'nin reformasyonu için çok önemlidir. Uygun olmayan kürlemenin CSH'nin süzülmesine katkıda bulunduğu durumlarda, genellikle sertleşmiş çimento harcının basınç dayanımında bir azalma olur. Bulamaç yoğunluğunun azaltılması, zayıf ve kırılgan formasyonların veya tükenmiş rezervuarların çimentolanması sırasında hidrostatik basıncı azaltır (Shadizadeh ve ark., 2010). Bu, zayıf formasyon ve kayıp sirkülasyonunun bozulmasını önlemeye yardımcı olur (Nguyen, 1996). Genişleticiler ayrıca çimentolama işlemi için gereken çimento miktarını azaltır ve çimentodan daha ucuz oldukları için önemli ölçüde tasarruf sağlar (Michaux ve ark., 1990). Genişleticiler, karışımı hafifletmek ve katıların ayrışmasını önlemek için bulamaca daha fazla su eklenmesine izin vererek çalışır. Bu katkı maddeleri çimento harcının prizlenme süresini, basınç dayanımlarını ve su kaybını değiştirir (Anonim, 1995). Bulamaç yoğunluğunun azaltılması ile nihai basınç dayanımı azalır ve prizlenme süresi artar (Anonim, 2009).

4.1.4.4. Hızlandırıcı (Geo Acc-66)

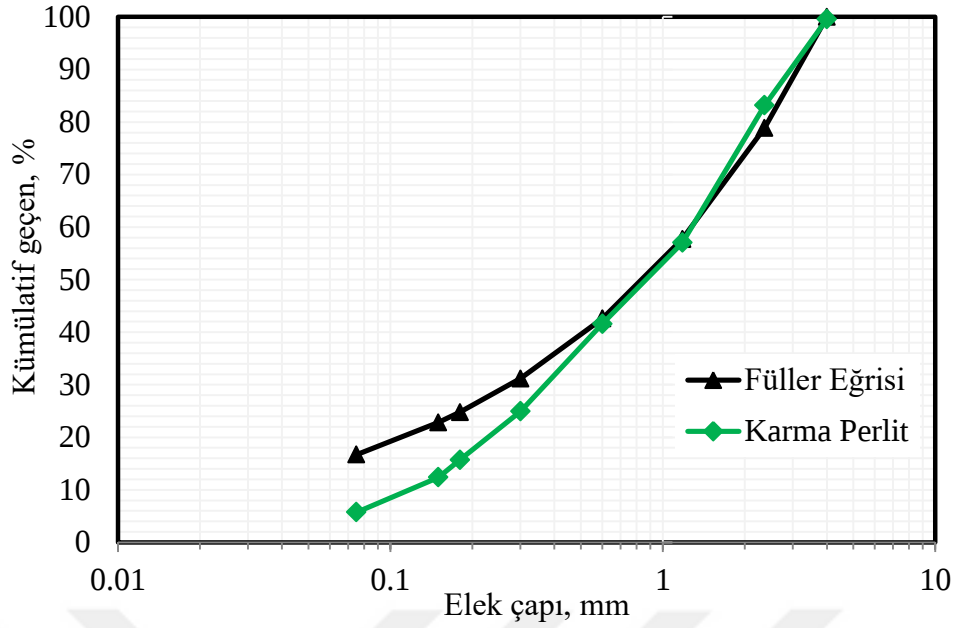
Michaux ve ark., (1990) ile Roshan ve Asef (2010) priz hızlandırıcı katkıları ile ilgili, *“malzemelerin karılma işleminin tamamlanmasıyla plastik bir beton elde edildiği andan, taze betonun katılaşmaya başladığı ana kadar geçen sürenin kısılmasına neden olan katkılardır”* tanımını yapmışlardır. İstisnai bir durum olarak bilinen soğuk havalarda, çimento harcı hidrat haline istendiğinden yavaş geçer, prizlenme zamanı istendiğinden çok olur ve ilk günlerde dayanımı istendiğinden az olur. Priz hızlandırmak için kullanılan katkı malzemeleri, bu tip problemlerin en aza indirilmesi için kullanılır (Pang ve ark., 2013). Düşük sıcaklık koşullarında (soğuk bölgelerde veya açık deniz kuyularında yüzey kaplaması gibi) petrol kuyularının çimentolanması zordur çünkü çimentonun yavaş hidrasyon hızı, uzun priz süreleri ve yavaş mukavemet gelişimi ile sonuçlanır (Reinas ve ark., 2011).

Hızlandırıcı, çimento ile su arasındaki normal reaksiyon hızını hızlandırmak için kullanılan, çimentonun kalınlaşma süresini kısaltan, çimentonun erken dayanımını artıran ve pahalı teçhizat süresinden tasarruf sağlayan kimyasal bir katkı maddesidir. Sıcaklığın düşük olduğu sığ kuyularda kullanılan çimento bulamaçları, sondaj işlemine devam edilebilmeden önce hızlandırıcıların “Çimentoda Bekleme (WOC)” süresini kısaltmasını gerektirir (Rike, 1973; Nguyen, 1996). Daha derin kuyularda daha yüksek sıcaklıklar donma sürecini destekler ve hızlandırıcılar gerekli olmayabilir. Özellikle açık deniz kuyuları için çok maliyetli olabilen WOC süresini azaltmak için, çimentonun daha hızlı mukavemet kazanmasına yardımcı olmak için hızlandırıcılar kullanılabilir (Michaux, 1990). Hızlandırıcılar, çimentonun nihai basınç dayanımını arttırmaz, ancak hızlı dayanım gelişimini destekler (Anonim, 2014; Lake, 2006).

4.2. Yeni Tip G Sınıfı Çimento Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Numune Hazırlanışı

4.2.1. Perlit gradasyonu ve fiziksel özellikleri

Karışık perlit agrega gradasyonunun eğrisi; 4 mm (5 numara), 2.36 mm (8 numara), 1.18 mm (16 numara), 0.6 mm (30 numara), 0.3 mm (50 numara), 0.18 mm (80 numara), 0.15 mm (100 numara) ve 0.075 mm (200 numara) eleklerle elde edilerek Fuller parabolüyle karşılaştırması yapılmıştır. Karışık agregalarda kullanılması hedeflenen altı değişik yığının karışımları bir araya getirilerek aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (De Schutter, 1993)



Şekil 4. 3. Karışık perlit agreganın gradasyon eğrisi

Perlit agregalarının fiziksel özellik deneyleri yapılmadan önce numuneler su ile temizlenmiş ve içerisinde zararlı organik madde olup olmadığına TS 1744-1 (2000)' e göre karar verilmiştir. Agregaların çimento oluşumu içerisinde homojen dağılabilmeleri için TS EN 933-8'de belirtilen miktarlarda agregaya yığınları seçilerek, agregaya dağılımları "Fuller Parabolü"ne olabildiğince yakın vaziyete getirilmesi hedeflenmiştir.

TS 1097-3 standardına uygun olarak ağırlık miktarları belirlenen ve kombinezon hazırlanarak elde edilen karışımlar için agregaya gevşek yoğunluğu $115,85 \text{ kg/m}^3$ olarak tespit edilmiştir. Daha sonra her aralıkta ve farklı boyutlardaki perlit agregalarının kuru özgül ağırlığı, doymun kuru yüzey (DKY) özgül ağırlığı ve su emme kapasite deneyleri TS EN 1097-6' ya uygun olarak cam fanus kullanılarak tespit edilmiştir. Belirlenen ölçülerde hazırlanan yığından alınan üç farklı ince agregaya numunesi etüvde 105 ± 3 °C'de değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutularak, numunelerin kuru ağırlığı (M_1) %0.01 hassasiyetle tartım alınabilen teraziyle tayin edilmiştir. Bu işlemin devamında numuneler 24 saat suyun içerisinde bekletildikten sonra doymun kuru yüzey haline getirilir ve tekrar hassas terazi ile ağırlığı bulunur (M_2). Daha sonra cam fanus suyla doldurularak, fanusun içerisinde hava kabarcıkları kalmayacak şekilde fanusun ağzı kapatılarak tartılır (M_3). Deneyin son aşamasında, cam fanusta bulunan suyun yarısı alınarak, önceden doymun kuru yüzey vaziyetine gelen numune fanusa yerleştirilir. Fanusun hepsi suyla doldurulur, fanusun içerisinde hava kabarcıkları kalmayacak şekilde fanusun ağzı kapatılarak tartılır (M_4).

Yapılan bu deneyler sonunda, üç numune için ortalamaları alınır ve aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$\rho_k = M_1 / (M_2 + M_4 - M_3) \quad (4.1)$$

$$\rho_d = M_2 / (M_2 + M_4 - M_3) \quad (4.2)$$

$$m = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100 \quad (4.3)$$

Burada;

ρ_k : İnce agreganın kuru özgül ağırlığı (kg/m^3)

ρ_d : İnce agreganın DKY özgül ağırlığı (kg/m^3)

m : İnce agreganın su emme oranıdır (%).

Fazla su emme kapasitesine sahip genişletilmiş perlitin mevcut karışımının su miktarına etkisi çok olduğu ve bundan dolayı etkili su/çimento oranını değiştirmesini önlemek amacıyla hazırlanan karışımlara eklenmeden önce 30 dakika suyun içinde bekletilmiştir. (Şengül ve ark., 2011)

Bu kaynak sende var kaynaklara ekleme sadece gösterimi ver

Perlit agregasının belirlenen tüm fiziksel özellikleri ile beraber Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4. 8. Genleştirilmiş perlit agregalarının fiziksel nitelikleri

Agrega tipi	Elek aralığı (mm)						
	8-16	4-8	2-4	1-2	0.5-1	0.25-0.5	0-0.25
DKY özgül ağırlığı		0.215	0.262	0.267	0.269	0.276	0.291
GPA Su emme kapasitesi (%)		97.10	62.45	137.63	182.43	216.44	260.62
Yarım saat su emme (%)		180.65	189.06	205.60	240.99	271.96	327.46

4.2.2. Yeni g sınıfı çimento harcının hazırlanması

Numune karışımını, yeni ve katılaştırılmış durumlardan, daha önce belirlenen niteliklere malik numune yapımı için komponentlerin ve miktarlarının tam seçimi olarak tanımlayabiliriz. Çimento karışımlarının hesaplanması ve imalatı çoklu evrelerden oluşmaktadır. İlk evrede, yeni karışımın birim ağırlığı, ısı iletkenliğiyle yüksek işlenebilmesi, dayanımı ve gözenekliliği gibi niteliklerinin kazandırılması maksadıyla harç için su/çimento miktarını, akışkanlığını sağlayacak katkı maddesiyle hava sürükleyici katkı maddesinin oranının belirlenmesi için literatürde çok fazla çalışma yapılmıştır. Bundan dolayı, daha önce bahsettiğimiz dayanımı en yüksek G sınıfı çimento karışımlarının hazırlanması için dikkat edilmesi gereken kıstaslara uyan su/çimento miktarının hesaplanmasıdır. Çalışma için gerekli literatür araştırmasında, g sınıfı çimento, ısı yalıtım malzemesi, yüksek fırın cürufu, hava sürükleyici katkı maddesi, ve diğer katkı malzemelerinin uygulama miktarları da belirlenmiştir. Yapılan çalışmada ve birçok deneme sonunda elde edilmesi hedeflenen yeni G sınıfı harcın etkili su/çimento oranı 0.28 ve çimento miktarı 1 metreküp için 400 kg olarak belirlenmiştir. Üretilen perlit katkılı karışımlarda toplam karışım hacminin sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında genleştirilmiş perlit agregası ikame edilerek hafif çimento numuneleri üretilmiştir. Referans karışım dışındaki tüm katkılı çimento karışımlarına çimento ağırlığının %20'si kadar yüksek fırın cürufu katkısı ile belirli oranlarda; akışkanlaştırıcı, hızlandırıcı, genişletici ve hava sürükleyici katkı malzemeleri eklenmiştir. Çimentoda istenilen kıvamın sağlanabilmesi ve kullanılacak suyun azaltılması amacıyla karışımlarda kullanılan akışkanlaştırıcı katkı malzemesi, yüzdesel perlit katkı oranının artmasına ters orantılı olarak azaltılmıştır. Bunun sebebi ise bu tür karışımların yüksek miktarda su ihtiva etmesinden kaynaklı az miktar akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanımı ile hedeflenen kıvama ulaşılmış olmasında kaynaklanmaktadır.

Karışım oranlarının belirlenmesi aşamasında yapılan hesaplamalarda öncelikle 1 metreküp hacim için gerekli olan miktarlar (kg) belirlenmiş olup kullanılacak kalıp hacmi ve üretilcek numune miktarı temel alınarak üretimde kullanılacak çimento, katkı ve su miktarları aşağıda verilen formüller yardımıyla belirlenmiştir.

$$V_c = \frac{W_c}{\delta_c} + \frac{W_f}{\delta_f} + \frac{W_s}{\delta_s} + h + k \quad (4.4)$$

$$W_s = (E/B) \times B \quad (4.5)$$

$$G_i = (1 - V_c) \times P_i \times \delta_i \quad (4.6)$$

Burada;

V_c : 1 metreküp karışımdaki perlit dışındaki kalan toplam hacim, m^3

B : 1 metreküp karışımdaki bağlayıcı malzeme ağırlığı, kg

W_s : 1 metreküp karışımdaki suyun ağırlığı, kg

E/B : Etkin su/bağlayıcı oranı

h : 1 metreküp karışımdaki hava hacmi, m^3

k : 1 metreküp karışımdaki katkı maddesi hacmi, m^3

δ_c : Çimentonun özgül ağırlığı, kg/m^3

δ_f : Fırın cürufunun özgül ağırlığı, kg/m^3

δ_s : Suyun özgül ağırlığı, kg/m^3

P_i : Seçilen perlit hacimce yüzdesi, %

G_i : 1 metreküp karışımdaki perlit ağırlığı, kg

δ_i : (i) Perlit katkısının özgül ağırlığı, kg/m^3 olarak verilmiştir.

Çizelge 4. 9. 1 Metreküp çimento harcının karışım miktarları

Numune	R	GFC	KGÇ	KGP5	KGP10	KGP15	KGP20	KGP25	KGP30
S/Ç Oranı	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Perlit (kg)				35.3	62.5	84.2	101.8	116.6	128.8
Su (kg)	472.6	467.1	453.9	388.1	343.5	308.5	279.7	256	235.8
Çimento (kg)	1687.8	1334.6	1296.9	1108.8	981.4	881.5	799.1	731.4	673.7
Dis 180 (kg)			6.5	4.2	3.7	2.2	2	0.9	0.8
Geo Acc (kg)			6.5	5.5	4.9	4.4	4	3.7	3.4
Geo Ext (kg)			6.5	5.5	4.9	4.4	4	3.7	3.4
Hava sürükleyici (kg)			4.9	4.2	3.7	3.3	3	2.7	2.5
Fırın Cürufu (kg)		333.6	324.2	277.2	245.4	220.4	199.8	182.9	168.4
Taze Karışımın Ağırlığı	512.0	512.0	518.0	527.8	538.0	547.8	558	567.8	578
Kuru Yoğunluk (kg/m³)	1687.76	1668.21	1645.46	1440.65	1306.45	1200.47	1113.6	1041.79	981.02
Taze Karışımın Yoğunluğu (kg/m³)	2160.34	2135.31	2099.38	1828.72	1649.96	1509.01	1393.27	1297.78	1216.81
30 dk. Su Emme (gr)				80.6	142.7	192.4	232.6	266.3	294.3

Karışımlar sırasıyla normal G tipi çimento ile üretilen çimento harcı, Referans (R), yüksek fırın cürufu G sınıfı çimento ile üretilen harç (R+FC), katkılı G sınıfı çimentolu harç (KGÇ) ve perlitli katkılı G sınıfı çimento ile üretilen harç (KGP) olarak üretilmiş olup, yanlarındaki sayılar (5, 10, 15, 20, 25, 30) değiştirme yüzde oranlarını gösterir. Çimento harçlarının, laboratuvar ortamında hazırlanma sıraları aşağıda belirtildiği gibi gerçekleşmiştir:

İlk olarak KGP, belirlenen su absorbe etme miktarına ulaşana kadar (perlit su) ıslatıldı. İkinci aşamada, çimento ve katkı malzemeleri, kullanılacak suyun üçte biriyle harmanlandı. Daha sonra çimento harcı, üçte ikisi kalan suyla birlikte harmanlandı. Son aşamada ise karışım homojen olana kadar harmanlamaya devam edildi.

Hazırlanan karışım 20 lt'lik küçük düşey eksenli karıştırma kabında, zorlamalı beton karıştırıcıyla homojen hale gelene kadar karıştırılarak elde edilen harçların, tüm deneyler için 4 x 4 x 16 cm boyutlarında her seriye ait altışar adet kare prizma numuneler hazırlandı. Böylece yapılması hedeflenen dokuz seri için toplam 54 adet çimento numunesi hazırlandı. Deney sonuçlarının kabul edilebilmeleri için numunelerin kalıplara muntazam dolmaları gerektiğinden harçlar iki tabaka şeklinde döküldü ve akıbetinde sarsma tablası yardımıyla vibrasyon uygulandı. Şekil 4.4, 4.5, ve 4.6'da gösterildiği gibi çimento harçları, yağlanan kalıplara döküldü ve yirmi dört saat müddetince 20-24°C arası sıcaklıklarda dinlendirildi.



Şekil 4. 4. Kalıpların yağlanması



Şekil 4. 5. Numunelerin hazırlanması



Şekil 4. 6. Numunenin kalıba doldurulması ve şekil verilmesi

Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarıldı ve her seriye ait toplam altı numunenin üç tanesi, Şekil 4.7’de gösterilen 22 ± 3 °C’de kirece doyurulmuş suyun içerisinde yerleştirildi. Yerleştirilen kür havuzunda yirmi sekiz gün bekletildi.



Şekil 4. 7. Numunelerin kür havuzuna yerleştirilmesi

Her seriye ait geri kalan üçer adet numune ise, hazırlanmış numunelerin içindeki su oranının %10 ve altına ininceye (bu işlem genelde on (10) saat kurutulma işlemine sokularak yapılır fakat bu işlemde bazı malzemeler için farklı süreler uygulanabilir) kadar 68 °C’de %40 ila %60 bağıl nem aralığında etüvde kurutuldu (Şekil 4.8).



Şekil 4. 8. Hazırlanan örneklerin etüvde kurutulması ve kürlenmesi

4.3 Yeni G Sınıfı Numunelere Uygulanan Testler

Yeni ve katılaşmış çimento karışımlarının özelliklerini elde etmek için yapılacak testler ayrı ayrı verilecektir. Uygulanacak testler ayrı ayrı incelenecektir.

4.3.1. Yeni çimento karışımlarına uygulanan testler

Harcın hazırlanması sırasında katılaşmamış çimento karışımına uygulanan testlerdir:

- i. Taze çimento birim ağırlık deneyi
- ii. Mini çökme yayılma deneyi
- iii. Vikat kıvam ve priz süresi deneyi

Deneylerin detayları aşağıda anlatılmaktadır.

4.3.1.1. Yeni çimento karışımlarının birim ağırlığını belirleme amacıyla yapılan deney

Taze karışım üstünde yeni birim ağırlığı belirlemek için, yapılan harçtan elde edilen örnekler sarsma tablasıyla vibrasyona tabi tutulduktan sonra numune kalıplarına dökülerek yüzeyleri düzeltme aparatı yardımıyla düzeltildikten sonra kalıp etrafı temizlenmiş ve hassas teraziyle tartılarak İkinci aşamada, kalıp etrafı temizlendikten sonra hassas teraziyle tartılarak TS 12350'e uygun olarak ölçülen yeni karışımın birim ağırlığı hesaplanmıştır.

4.3.1.2. Mini çökme yayılma (slump) deneyi

Mini çökme yayılma (slump) deneyi ASTM C230/C 230M 'a göre taze çimento karışımlarının kıvamının belirlenmesi için yapılmaktadır. Yeni çimento karışım, üst çapının 7 cm, alt çapının 10 cm, yüksekliğinin 5 cm ve kalınlığının da 0,5 cm olan bir kesik huni şeklindeki kaba iki tabaka halinde ve takriben huninin yarı yüksekliğine dolduracak şekilde yerleştirildi. Tabakalar, 16 mm çapına ve 30 cm uzunluğuna sahip şişleme çubuğuyla 25 kere yanlardan merkeze doğru dairesel ve düşey biçimde şişlendi. Sonraki işlemde kesik huniyi yavaş bir şekilde dikey doğrultuda yukarı doğru çıkartıp deney cihazının kolu dairesel olarak 25 defa çevrildi. Yayılma miktarını ölçmek için yayılan taze çimento karışımının çapı üç farklı konumdan ölçüldü. En sonunda ölçülen üç değerın ortalaması çökme değeri olarak Çizelge 5.1'de gösterildiği gibi (cm) cinsinden belirlendi.



Şekil 4. 9. Mini çökme yayılma (slump) deney cihazı

4.3.1.3. Vikat deneyi

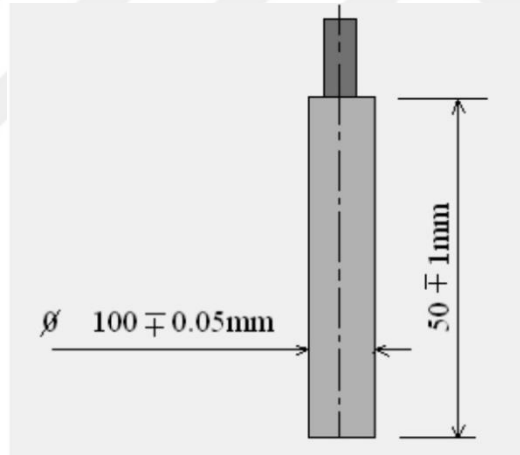
Vikat deneyi, vikat cihazı ile yapılmakta olup hem kıvam hem priz süresini belirlememizi sağlar. (AASHTO T129; AASHTO T131 ASTM C187; EN 196-3)

4.3.1.3.1. Vikat kıvam tayini

Vikat kıvam deneyi için sonda kullanılır. Sonda, 50 ± 1 mm etkili uzunluğuna 10 ± 0.05 mm çapına sahip, dik silindir biçimde korozyon oluşumuna dayanabilen metallerle yapılmalıdır. Hareket eden parçaların toplam kütleleri ise 300 ± 1 gr olarak ayarlanmıştır. Hareketlerinin mümkün mertebe sürtünme oluşturmamaları için 90 derecelik düşey açıyla ve eksenlerinin de sondanın eksenineyle çakışmaması gerekmektedir. Yapılan deneyde, çimento pastası içerisine koyulan vikat kalıbı sert plastikten yapılmıştır. Vikat kalıbının derinliğini 40 ± 0.2 mm; üst iç çapını 70 ± 5 mm ve alt iç çapını 80 ± 5 mm olarak hazırlanan kesik koni şeklinde olmalıdır. Çalışmada kullanılmış olan cam plaka genişliğinin vikat kalıbına uygun ve kalınlığı ise 2.5 mm'den küçük olmamalıdır. Kıvam tayin deneyi, 20 ± 2 °C sıcaklığa ve bağıl neminin de 65 olduğu odanın içinde yapıldı. Halkanın iç, camın üst yüzeyleri madeni yağla yağlandı. Hazırlanan çimento harcının karıştırılma işlemi bitince, en fazla bir dakika içinde vikat halkasının içerisine

yerleştirildi. Hazırlanan numune herhangi sıkıştırılma ya da vibrasyon işlemi uygulanmadan vakit kaybetmeden yerleştirildi. Kullanılan kalıp üzerine taşmış olan numunenin fazla gelen kısmı düzeltme ekipmanıyla yavaş bir şekilde testere hareketiyle hem düzeltildi hem de halkanın üst kenarıyla aynı seviyeye getirildi.

Hazırlanan vikat halkasının ortasından numunenin üstüne degecek şekilde sonda ucu indirilerek sonda bırakıldı. Özgün ağırlığıyla hazırlanan numunenin içerisine sondanın girmesi sağlandı. Hazırlanan normal kıvamlı numunede kullanılan su kâfiyse sondanın otuz saniye içerisinde cam levhaya 5-7 mm kalana dek inmesi gerekmektedir. Şayet 7 mm'den fazla kalırsa su oranı yeterli değildir. Şayet 5 mm'nin altına inerse kullandığımız suyun oranı çoktur ve suyun oranını düşürmemiz gerektirmektedir. Farklı oranlardaki suyla işlemler tekrarlanarak gerekli suyun oranı belirlendi. Yapılan çalışmada farklı oranlarda sulu numuneler, sondanın ve taban plakasının aralarındaki mesafeleri 6 ± 1 mm olana dek tekrarlandı. Standart kıvam için gereken su oranı %0,5 olarak belirlendi.



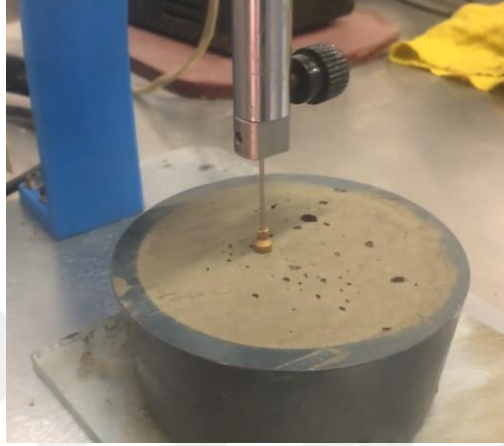
Şekil 4. 10. Vikat sondası (MEB, 2011)



Şekil 4. 11. Vikat cihazından kıvam tayini ölçümü

Daha sonra vikat cihazına vikat iğnesi takılarak prizlenme deneyleri yapıldı. İğne, numuneye ulaşana kadar yavaş bir şekilde indirildi. Vikat cihazının düşey ekseninde hareket edebilen parçasının yavaş inmesini sağlamak amacıyla 1-2 saniye kadar iğne sabit tutuldu. Hareketli ekipmanlar daha sonra aniden serbest bırakıldı ve iğnenin dik olarak hazırlanan numunenin içerisine girmesi sağlandı. İğne hazırlanan numuneye tamamen batması veya iğne serbest bırakıldıktan yarım dakika geçince (hangisi daha önce olmuşsa) taksimatlı göstergeye bakılarak veriler okundu. Bu değer, taban plakasıyla iğne ucu arasında olan mesafeyi verdi ve hazırlanan numunenin kırılma işleminin sona erdiği (sıfır anı) süreden başlayarak beraber kaydedilmiştir. İğnenin aynı numuneye batırılma işlemi, iğnenin pastaya batırıldığı noktalar arasındaki veya kalıp kenarından en az 10 mm mesafe olacak şekilde ve 10 dakikalık uygun zaman aralıklarıyla tekrarlandı. İğne her seferinde hamurun değişik alanlarına batırıldı. Numune, iğnenin batırılma zamanları arasında rutubet odasında veya rutubet dolabında tutuldu. Her batırılma işleminden sonra vikat iğnesi temizlendi. Sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından itibaren iğne ile taban plakası arasındaki mesafe 4 ± 1 mm oluncaya kadar geçen süre en yakın beş dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedildi.

Taban plakası üzerinde bulunan priz başlangıç süresi tayini için kullanılmış olan dolu kalıp priz sonu süresinin belirlenmesi için ters çevrilir. Böylece priz sonu süresinin tayini, çimento harcının başlangıçta taban plakası ile temas eden yüzeyi üzerinde yapılır. İğnenin ilk 0.05 mm kadar battığı an ile sıfır olarak kabul edilen zaman, en yakın 15 dakikaya yuvarlatılarak priz sonu süresi olarak kaydedildi. İğne, küçük batmaların doğru şekilde gözlenebilmesini kolaylaştırmak için, iğne bağlantı halkası cihaza tutturuldu.



Şekil 4. 12. Priz bitiş ölçümü

4.3.2. Sertleşmiş numunelere uygulanan testler

Priz alıp sertleşmiş olan numunelere uygulanan testleri kapsamaktadır:

- i. Arşimet deneyi
- ii. Üç nokta eğme deneyi
- iii. Tek eksenli basınç deneyi
- iv. Isıl iletkenlik, özgül ısı ve ısı yayılım testleri

Deneylerin detayları aşağıda anlatılmaktadır.

4.3.2.1. Yığinsal yoğunluk, su emme ve gözeneklilik

ASTM C138 (2001) ve ASTM C 948 (2000)'de belirtilen standartlara göre hazırlanan her seriye ait 4x4x16 cm boyutlarındaki altışar adet kare prizma numunelerin kür havuzunda 28 gün bekledikten sonra üçer adetinin her biri kür havuzundan çıkarıldıktan hemen sonra Şekil 4.13'da görülen kafes örgülü Arşimet terazisine konuldu.



Şekil 4. 13. Arşimet terazisi

Numune su dolu kovanın içine su yüzeyinden en az 5cm daha aşağıda kalacak şekilde daldırıldı ve en az 10 defa su içerisine daldırılıp çıkartıldı. Belli aralıklarla çalkalama yoluyla numunedeki hapsolmuş hava uzaklaştırıldı ve kefes hariç numune kütlesi 0.1 gram hassasiyetle tartıldı (M_{ds}). Daha sonra tel sepetten çıkarılan numune nemli bez ile silinerek bekletilmeksizin havadaki kütlesi tartıldı (M_{dh}) ve numune etüvde 105 ± 3 °C’de değişmez kütleye gelinceye kadar kurutuldu, desikatörde soğutuldu ve böylece numune kütlesi 0.1 gram hassasiyetle tartılarak bulundu (M_k). Son olarak numunelerin boyutları kumpasla birkaç kez 0.1 mm hassasiyetle ölçülerek ortalama değerler bulundu ve bu değerlerden numune hacmi (V) hesaplandı. En sonunda beş numunenin ortalaması alınarak aşağıdaki gibi hesaplamalar yapılır.

$$m = \frac{(M_{dh} - M_k)}{M_k} \times 100 \quad (4.7)$$

$$V = \frac{M_{dh} - M_{ds}}{\rho_s} \quad (4.8)$$

$$V_b = \frac{M_{dh} - M_k}{\rho_s} \quad (4.9)$$

$$\phi = \frac{V_b}{V} \times 100 \quad (4.10)$$

$$\rho_k = \frac{M_k}{V} \quad (4.11)$$

Burada;

V_b : Açık boşlukların hacmi, m^3

ρ_k : Numunenin kuru özgül ağırlığı, kg/m^3

V : Katı kısım (görünür) hacmi, m^3

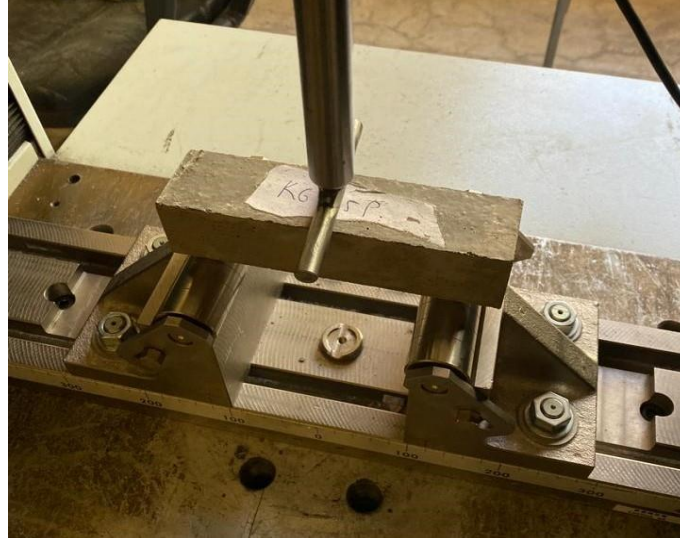
ϕ : Etkin porozite, %

m : Numunenin su emme kapasitesi, %

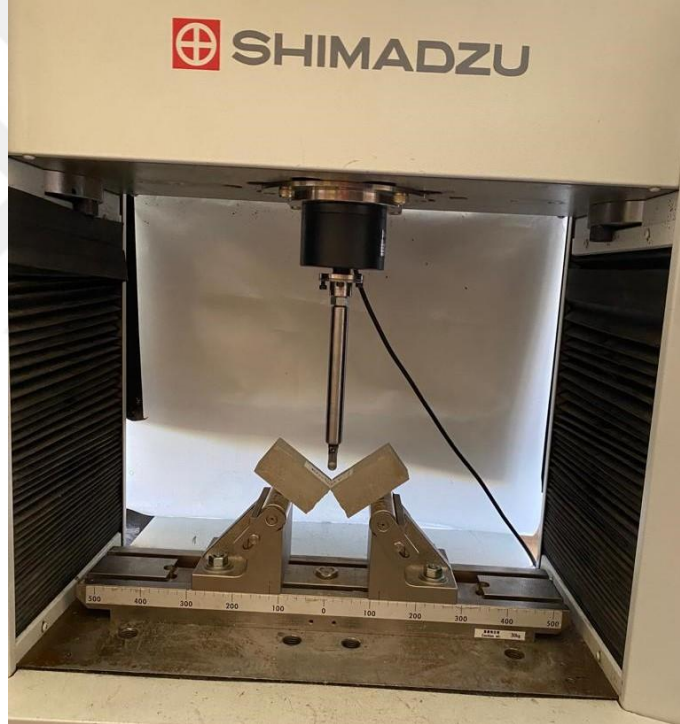
ρ_s : Suyun yoğunluğu olup genel olarak 1000 kg/m^3 alınır.

4.3.2.2. Üç nokta eğme deneyi

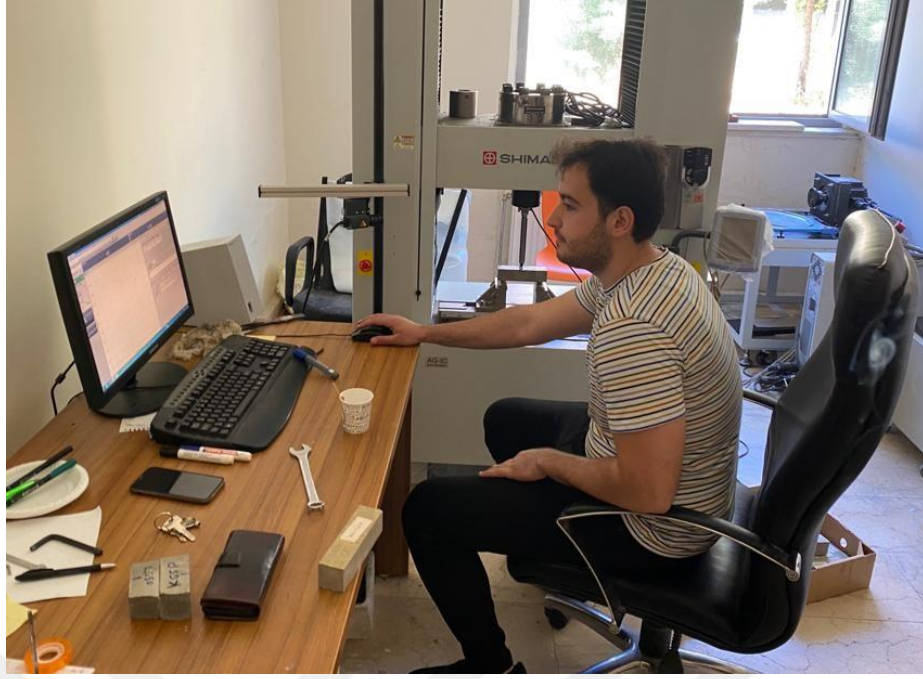
Her seriye ait $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ boyutlarındaki altışar adet kare prizma numuneden üç tanesi 28 gün boyunca $22 \pm 3^\circ \text{C}$ 'deki kirece doymun suda bekletildi. Geri kalan üçer adet numune ise malzeme içerisindeki su içeriği %10'un altına düşene kadar (genel olarak 10 saat kurutma yapılmış olup bazı malzemelerde bu süre farklıdır) 68°C 'de %40 ila %60 bağıl nem arasında etüvde kurutma işlemi yapıldıktan sonra üç nokta eğme testine tabi tutuldular. Numunelerin üç nokta eğme testi 250 kN kapasiteli Shimadzu AG-IC tipi universal test cihazında üç nokta eğme aparatı ile gerçekleştirilmiştir. ASTM C 203 (1999) standardına göre yapılmıştır. Yükleme 17.78 N/sn hızla yapılmıştır. Cihaz ekranından numunenin boyutları girilip, yükleme hızı ayarlandıktan sonra test başlatılmış ve numunelerin kırıldığı anda ulaşılan en büyük yük ve dayanım değerleri okunmuş olup elde edilen her seriye ait tüm değerlerin ortalaması alınarak deney tamamlanmıştır.



Şekil 4. 14. Üç nokta eğme deney cihazına numunenin yerleştirilmesi



Şekil 4. 15. Üç nokta eğme deneyi



Şekil 4. 16. Deney sonuçlarının raporlanması

4.3.2.3. Tek eksenli basınç dayanım testi (ASTM C39)

Her seriye ait 4x4x16 cm boyutlarındaki altışar adet kare prizma numuneden üç tanesi 28 gün boyunca $22\pm3^{\circ}\text{C}$ 'deki kirece doymun suda bekletildi. Geri kalan üçer adet numune ise malzeme içerisindeki su seviyesi %10'un altına düşene kadar (genel olarak 10 saat kurutma yapılmış olup bazı malzemelerde bu süre farklıdır) 68°C 'de %40 ila %60 bağıl nem arasında etüvde kurutma işlemi yapıldıktan sonra tek eksenli basınç dayanım testine tabi tutuldu. Tek eksenli basınç deneyi de yine Shimadzu AG-IC tipi üniversal test cihazında TS EN 12390-1 standartına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiş olup numuneler, 40x40 mm kare prizma şeklindeki iki metal plaka arasına yerleştirilerek gerçekleştirildi. Yükleme 0.5 MPa/sn hızla yapılmıştır. Cihaz ekranından numunenin boyutları girilip, yükleme hızı ayarlandıktan sonra test başlatılmış ve numunelerin kırıldığı anda ulaşılan en büyük yük (kN) ve dayanım (MPa) olarak okunmuştur. Test sonucunda elde edilen her seriye ait tüm değerlerin ortalaması alınarak deney tamamlanmıştır.



Şekil 4. 17. Numunenin basınç deneyi cihazına yerleştirilmesi



Şekil 4. 18. Tek eksenli basınç deneyi

4.3.2.4. Isı iletkenlik, özgül ısı ve ısı yalıtım testleri

Seçilen 4×4×16 cm boyutundaki etüv kurusu numuneler TS EN 12667 (2003)'ye göre ısı özellik testleri yapılmıştır. TPS 500S cihazı, yalıtım numunesinin ısı iletkenliğini, özgül ısı kapasitesini ve ısı yayılımını ölçmek için kullanılmıştır. TPS 500S cihazı hem sıvıların hem de katıların ısıl özelliğini ölçen bir cihazdır. Ölçüm için her bir numunenin beş farklı noktadan ısıl özellikleri tespit edilerek ortalamaları alınıp test sonuçlandırılmıştır.

4.3.2.4.1. Isıl iletkenlik

Isıl iletkenlik malzemenin ısıyı iletme kabiliyetinin ölçüsüdür. Yüksek ısı iletkenlik değeri o malzemenin ısıl iletken olduğunu, düşük ısıl iletkenlik değeri için ise o malzemenin ısıl yalıtkan olduğu anlamına gelmektedir (Çengel ve ark., 2011). Çizelge 4.10'de, bilinen bazı maddelerin oda sıcaklığı koşullarında ısıl iletkenlik değerleri verilmiştir. Bu değerlerde görüldüğü üzere hava (durgun hava) çok üstün yalıtım özelliğine sahiptir. Bu özellik dikkate alınarak tabloda mevcut olan ağaç, üretan, strafor, gibi malzemeler üretilmiştir. Dikkat edilecek olursa havaya çok yakın ısıl iletkenliği bulunan üretan olup üretanın kapalı gözenek boşluğu % 95'in üzerindedir. Günümüz yalıtım malzemelerinin büyük bir kısmı kapalı veya açık gözenekli durgun hava sistemini kullanmaktadır (Çengel ve ark., 2011).

Çizelge 4. 10. Bazı malzemelerin oda sıcaklığında ısıl iletkenlik katsayıları (Çengel ve ark., 2011)

Madde	λ (W/mK)
Gümüş	429
Altın	317
Demir	80.2
Elmas	2300
Bakır	401
Alüminyum	237
Tuğla	0.72
Ahşap (meşe)	0.17
Hava (gaz)	0.026
Üretan, sert köpük	0.026
Yumuşak kauçuk	0.13
Helyum (gaz)	0.152

4.3.2.4.2. Özgül ısı

Malzemeler için çok önemli bir diğer özellik ise özgül ısıdır. Özgül ısı bir maddenin birim kütesinin sıcaklığını bir derece artırmak için gerekli olan enerji olarak ifade edilmektedir. Bu enerji aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır:

$$Q = mc_p \Delta T \quad (4.12)$$

Burada;

Q : Özgül ısı (J)

m : Kütle (kg)

c_p : Sabit basınçta öz ısı (kJ/kg.°C , kJ/kg.K)

ΔT : Sıcaklık farkı (°C, K)

İki tür özgül ısı vardır. Sabit hacimde ve sabit basınçta özgül ısı olarak ifade edilmektedir. Gazlarda iki değer arasındaki fark gaz sabitine eşit olup sıvı ve katılar için ise özgül ısı birbirine eşittir (Çengel ve ark., 2011). Eşitlik 4.12 dikkate alındığında birim kütlede yüksek ısıya sahip malzemeler ısıyı bünyelerinde depolar bundan dolayı verilen birim ısı enerjisinde düşük sıcaklık farkına neden olduğundan özgül ısı, yalıtkan malzemeler için önemli bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır.

4.3.2.4.3. Isıl yayılım

Zamana bağlı ısı iletim çözümlemesinde ortaya çıkan başka bir malzeme özelliği, bir malzeme içerisinde ısının ne kadar hızlı yayıldığını gösteren ısıl yayılım katsayısıdır ve:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (4.13)$$

Burada;

a : Isıl yayılım (m^2/s)

λ : Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)

$\rho.c_p$: Birim hacim başına ısı depolama kapasitesi (kJ/m³K)

Biçiminde ifade edilir. Malzeme içinde iletilen ısının malzemenin birim hacmi başına depoladığı ısıya oranı, bir malzemenin ısıl yayılım katsayısını verir. Isının ortam

içindeki hızının yüksek olması için ısı yayılımında yüksek olması gerekmektedir. Küçük ısı yayılım değeri ise malzemenin ısıya karşı tembel olduğu ve ısının küçük bir miktarının daha ileri iletildiği anlamına gelir (Çengel ve ark., 2011).

Isı yayılım değerinin küçük olması malzemenin ısıya karşı tembel olduğunu ısının az bir miktarının daha ileri iletildiği sonucunu çıkarır (Çengel ve ark., 2011). Yüksek ısı yayılım özelliği gösteren malzemelerin her ne kadar ısı iletkenlik katsayısı düşük olsa da, ısı yalıtkanlık noktasında dezavantajlar bulunmaktadır. Bu açıdan hem düşük ısı iletkenlik hem de düşük ısı yayılım değerler taşıması bir yalıtım malzemesinden beklenen özelliklerdir (Çengel ve ark., 2011).

Çizelge 4. 11. Isı özelliklerin tayini için kullanılan tps 500s cihazının ölçüm aralıkları

Ölçüm Doğruluğu	Ölçüm aralığı
Isı iletkenlik katsayısı	Standart izotropik yöntem kullanılarak 0.03-6 W/mK Döşeme veya tek boyutlu yöntemler kullanılarak 5-200 W/mK
Isı yayılma	Standart izotropik yöntem kullanılarak 0.02-40 mm ² /s Döşeme veya tek boyutlu yöntemler kullanılarak 2-100 mm ² /s
Özgül ısı kapasitesi	0.1-4.5 MJ/m ³ K
Ölçüm süresi	2.5-2560 sn.
En büyük örnek boyutu	Sınırsız
En küçük örnek boyutu	Toplu test için 3 mm x 8 mm çap veya kare. Plak testi 0.1 mm x 12 mm çap veya için kare. Tek boyutlu testler için 10 mm x 5 mm çap veya kare.



Şekil 4. 19. Isıl deneylerin gerçekleştirilmesi

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Taze Karışımların Özellikleri

Üretilen tüm çimento karışımlarının çökme yayılma çapı ve taze yoğunluk değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. G sınıfı çimento tiplerinin karışım işlemi tamamlandıktan hemen sonra ASTM C 230'da belirtilen hususlar dikkate alınarak yayılma tablası üzerinden değerler üç farklı noktadan ölçülerek elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Üretilen numunelerin taze yoğunluk değerleri ise kalıplara dökülen karışımların taze ağırlıklarının kalıp hacmine bölünmesiyle tespit edilmiştir. Üretilen karışımlarda genleştirilmiş perlit kullanımına bağlı olarak taze yoğunluk değerlerinde azalış eğilimi olduğu ve çökme yayılma çapı değerlerinde artış eğilimi olduğu görülmektedir. Karışımlarda genleştirilmiş perlit katkılarının belirli oranlarda kullanılmasıyla maksimum ve minimum çökme için 25.4 – 17.3 cm ve taze yoğunluk için 2160.34 – 1216.81 kg/m³ arasında değerler aldığı tespit edilmiştir. En düşük taze yoğunluk 1216.81 kg/m³ ve en yüksek çökme değeri 25.4 olarak tespit edilmiştir. Değerler incelendiğinde akışkanlaştırıcı ve genleştirici gibi katkıların G sınıfı çimentoda kullanılmasıyla taze yoğunluk değerlerinin azaldığı ve çökme yayılma çapının arttığı tespit edilmiştir. Bu katkıların eklenmesiyle çimentonun işlenebilirliğini arttığı görülmüştür. Yüksek fırın cürufunun çimentoya eklenmesi taze yoğunluğunu düşürmesine karşın yayılma çapı değerini düşürerek çimentonun işlenebilirliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Bunun sebebi fırın cürufunun G sınıfı çimentoya göre daha yüksek özgül yüzeye sahip olmasından kaynaklandığı görülmüştür. GFC çimento tipinin referans çimentoya göre daha düşük taze yoğunluk değerine sahip olmasını sebebi ise fırın cürufunun özgül ağırlığının G sınıfı çimentonun özgül ağırlığından daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm karışım tiplerinde genleştirilmiş perlit agrega yüzdesinin artması ile artma eğilimi gösterdiği, buna karşın taze yoğunluk değerlerinin ise azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni, daha hafif genleştirilmiş perlit agregasının karışımdaki miktarının artmasıyla numune içerisindeki boşluk ve gözeneklilik artmış, bunun sonucunda taze yoğunluk azalmış ve böylelikle harç boşluklarda daha rahat hareket ettiğinden aynı kuvvet ile daha yüksek işlenebilirlik ve çökme yayılma çapı değerlerine ulaşılmıştır. İşlenebilirliğin belli oranlarda tutulması için genleştirilmiş perlit agrega kullanımının arttığı karışımlarda akışkanlaştırıcı kullanım miktarı azaltılmıştır. GFC karışımı dışında çalışmamızda üretilen tüm çimento tiplerinin çökme yayılma çapı değerleri mevcut sahalarda kullanılan G sınıfı

çimentoların belirtilen çökme yayılma çapı değerleri sınırlarında olup mevcut çimentolama teçhizatları ile birlikte kullanılabileceği görülmüştür.

Çizelge 5. 1. Üretilen çimento karışımlarının çökme yayılma çapı ve taze yoğunluk değerleri

Karışım	Çökme Yayılma Çapı (cm)	Taze Yoğunluk (kg/m ³)
R	20.5	2160.34
GFC	17.3	2135.31
KGÇ	24.1	2099.38
KGP5	21.6	1828.72
KGP10	23.1	1649.96
KGP15	23.4	1509.01
KGP20	24.3	1393.27
KGP25	24.6	1297.78
KGP30	25.4	1216.81

Üretilmesi hedeflenen G sınıfı harç tiplerini priz başlama süresinin tayini testleri TS EN 196-3'e göre belirlenen hususlar dikkate alınarak vikat test ekipmanı yardımıyla tespit edilmiştir. Verilen standarda göre belirlenen harç tiplerinin kıvam tayini yapıldıktan sonra priz başlama süreleri ölçülmüş ve değerler Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. Üretilen referans numunesinin priz başlama süresi 105 dk olup mevcut API standartında verilen uygun priz başlama süreleri sınırlarında olduğu görülmüştür. Bununla birlikte G sınıfı harcına yüksek fırın cürufu mineral katkısı ve (Geo ACC.) hızlandırıcı katkısının ikamesiyle priz başlama süresinin oldukça kısaldığı ve 44 dk'ya kadar düştüğü tespit edilmiştir.

Çizelge 5. 2. Üretilen çimento karışımlarının priz süreleri

Karışım	Priz Süresi (dk)
R	105
GFC	91
KGÇ	44

5.2. Sertleşmiş Numune Özellikleri

Üretilen numunelerin sertleşmiş çimento özelliklerinden basınç dayanım, yarmada çekme dayanım, yığinsal yoğunluk, su emme kapasitesi, gözeneklilik (porozite) ve ultrasonik ses hızı testleri mekanik özellikler olarak; ısı iletkenlik, özgül ısı ve ısı yayılım testleri ise ısı özellikler olarak tanımlanmış olup test sonuçları

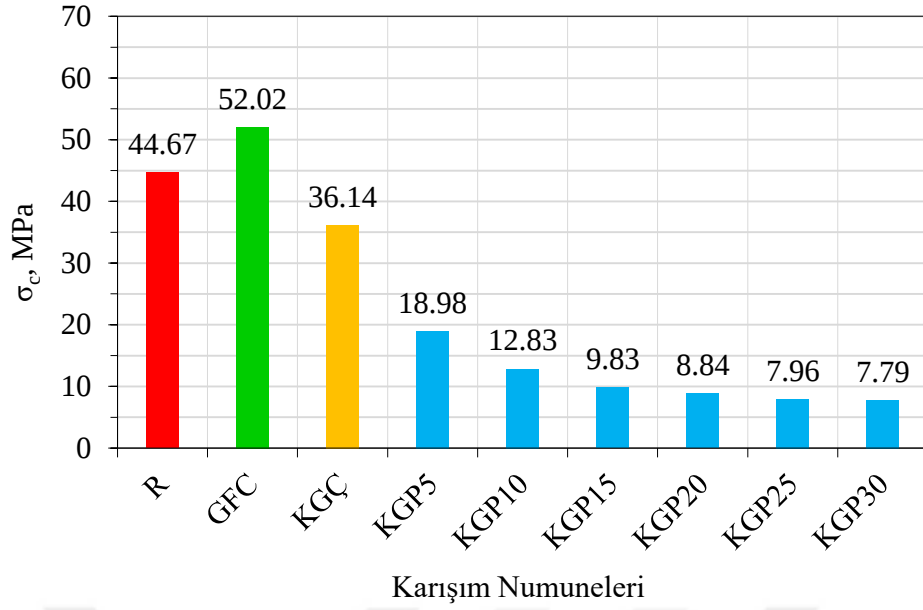
Çizelge 5.4'de gösterilmiştir. Testler yapılırken dayanım testleri hava-kuru numuneler üzerinde, ısı ve ses özellikleri su neminin deney sonuçlarını etkilememesi için etüv kuru numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5. 3. Sertleşmiş numunelerin mekanik ve ısı özellikleri

Karışım	Etüv		Su		ϕ (%)	m (%)	λ (W/m.K)	ρ_k (kg/m ³)	c_p (J/kg.K)	α (m ² /s)
	σ_c (Mpa)	σ_t (Mpa)	σ_c (Mpa)	σ_t (Mpa)						
R	44.67	3.21	66.99	2.01	25.97	15.06	0.800	1718.51	935.11	4.98×10^{-7}
GFC	52.02	4.93	70.89	3.16	23.86	14.98	0.695	1628.39	941.20	4.53×10^{-7}
KGÇ	36.14	4.33	50.62	2.36	24.31	16.72	0.659	1453.57	951.44	4.77×10^{-7}
KGP5	18.98	4.26	33.91	2.30	24.40	20.46	0.453	1166.07	954.52	4.07×10^{-7}
KGP10	12.83	3.42	25.48	2.06	25.85	24.64	0.401	1071.76	962.26	3.88×10^{-7}
KGP15	9.83	3.15	20.10	1.57	26.82	27.01	0.384	997.42	984.70	3.91×10^{-7}
KGP20	8.84	3.08	17.35	1.46	27.74	29.79	0.353	959.52	985.13	3.73×10^{-7}
KGP25	7.96	2.96	16.10	1.26	28.91	30.13	0.333	876.84	989.41	3.84×10^{-7}
KGP30	7.79	2.96	14.94	1.13	30.27	34.64	0.301	845.97	995.94	3.57×10^{-7}

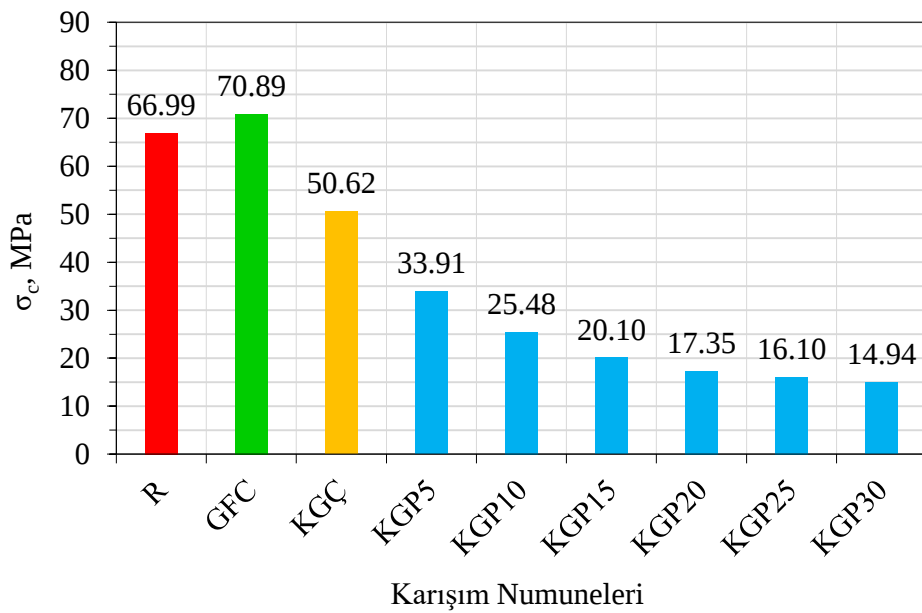
5.2.1. Mekanik özellik test sonuçları

Şekil 5.1’de etüvde kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre test edilen numunelerin basınç dayanımları (σ_c) 7.79 MPa ile 52.02 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlit bazında sonuçlara baktığımızda; % 5’ten % 30’a kadar artan değerlerde genleştirilmiş perlit agregası mevcut G sınıfı çimento ile yer değiştirdiğinde referans (katkısız G sınıfı çimento karışımı) çimento harcına göre basınç dayanımında % 55.27 ile % 82.56 arasında azalma; meydana gelmiştir. Bu azalmalar genel olarak genleştirilmiş perlit agregasının mevcut G sınıfı çimentoya göre gözenekli ve zayıf yapıda olmalarından kaynaklanmaktadır. Numune içindeki boşluk miktarı arttıkça basınç dayanımında düşüş meydana gelmektedir.



Şekil 5. 1. Etüvde kürlenmiş sertleşmiş numunelerin basınç dayanımı değerleri

Etüvde kürlenmiş GFC numunesinin basınç dayanımında referans numuneye göre %16.45 oranında artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi mineral katkı olan yüksek fırın cürufunun, numunenin geçirgenlik ve dayanım gibi karakteristik özelliklerini geliştirmesidir. Öte yandan KGÇ numunesini ele aldığımızda, referans numuneye göre %19.09 oranında düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebi mevcut G sınıfı çimento yerine kullanılan katkı malzemeleri olan dağıtıcı, genişletici ve hızlandırıcının numunenin basınç dayanımını düşürmesidir. Basınç dayanımının sadece % 19,09 oranında düşmesinin sebebi KGÇ numunesi içeriğinde yüksek fırın cürufu olmasıdır.

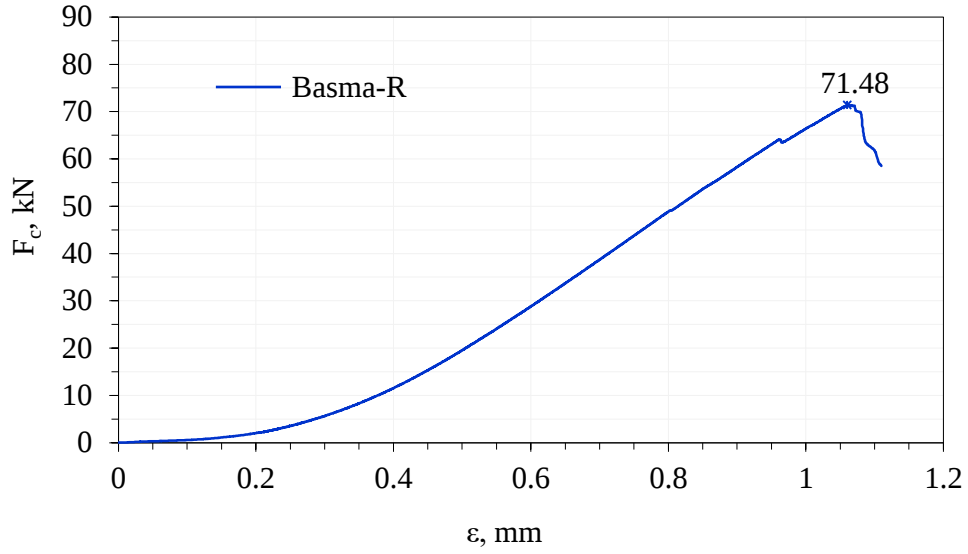


Şekil 5. 2. Suda kürlen en sertleşmiş numunelerin basınç dayanımı değ erleri

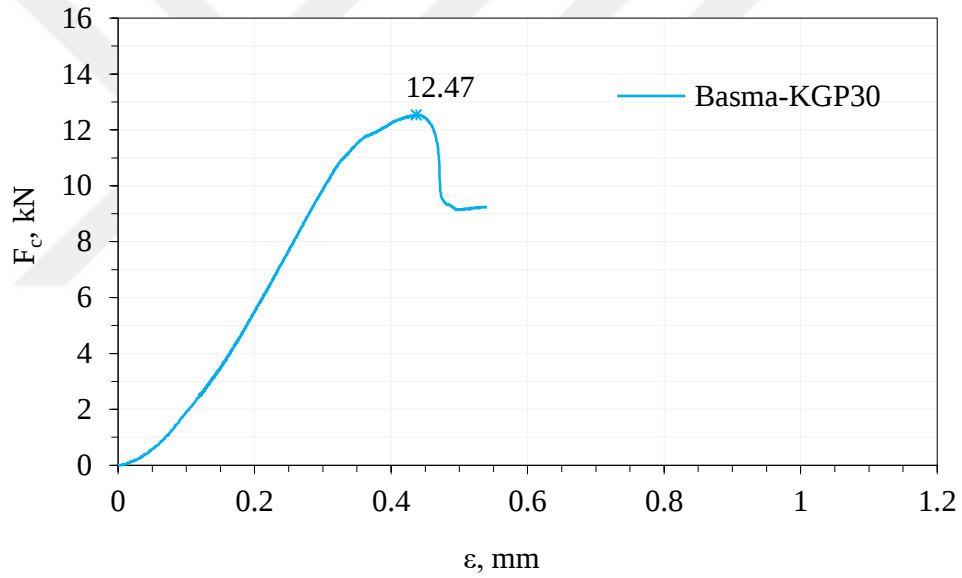
Şekil 5.2’ de suda kürlen en numunelerin basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre test edilen numunelerin basınç dayanımları 70.89 MPa ila 14.94 MPa arasında değ iştiğı gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlit bazında sonuçlara baktığımızda; % 5’ten % 30’a kadar artan değ erde genleştirilmiş perlit agregası mevcut G sınıfı çimento ile yer değ iştirdiğinde referans numuneye göre basınç dayanımında % 49.38 ila % 77.69 arasında azalma; meydana gelmiştir. Bu azalmalar genel olarak genleştirilmiş perlit agregasının mevcut G sınıfı çimento göre gözenekli ve zayıf yapıda olmalarından kaynaklanmaktadır. Numune içindeki boşluk miktarı artıkça basınç dayanımında düşüş meydana gelmektedir.

Suda kürlen en GFC ve KGÇ numunelerinin basınç dayanımlarında referans numuneye göre sırasıyla %5.82 artış ve %24.43 azalma meydana gelmiştir. Öte taraftan suda kürlen en R, GFC, KGÇ, KGP5, KGP10, KGP15, KGP20, KGP25 ve KGP30 numuneleri, etüvde kürlen en aynı karışımındaki numunelere göre basınç dayanımları sırasıyla %49.96, %36.27, %40.06, %78.66, %98.59, %104.47, %96.26, %102.26 ve %91.78 oranında artış göstermiştir. Bunun sebebi numuneler suda kürlen me esnasında hidrasyon sürecinin devam etmesinden ve oluşan hidrasyon ürünlerinden dolayı porozitenin düşmesinden kaynaklanır Etüvde kürlen en numuneler ise içeriğinde barındırdıkları suyu kısmen de olsa kaybetmiş ve dolayısıyla daha gözenekli olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.3 ve 5.4’te Referans ve KGP30 numunelerinin dayanabileceğı maksimum basma kuvveti esnasında uzama miktarları verilmiştir. Referans numunede 71.48 kN basma kuvveti anında 1.06 mm uzama meydana gelmiştir. KGP30 numunesinde ise 12.47 kN basma kuvveti anında 0.43 mm uzaman meydana gelmiştir. KGP30 numunesi Referans numunesi %82.55 oranında daha düşük basma kuvveti anında %59.43 oranında daha az bir uzama göstermiştir. Bunun sebebi numuneye eklenen genleştirilmiş perlit içerisindeki havanın sertleşmiş çimento harcını daha sünek bir hale getirmesidir.

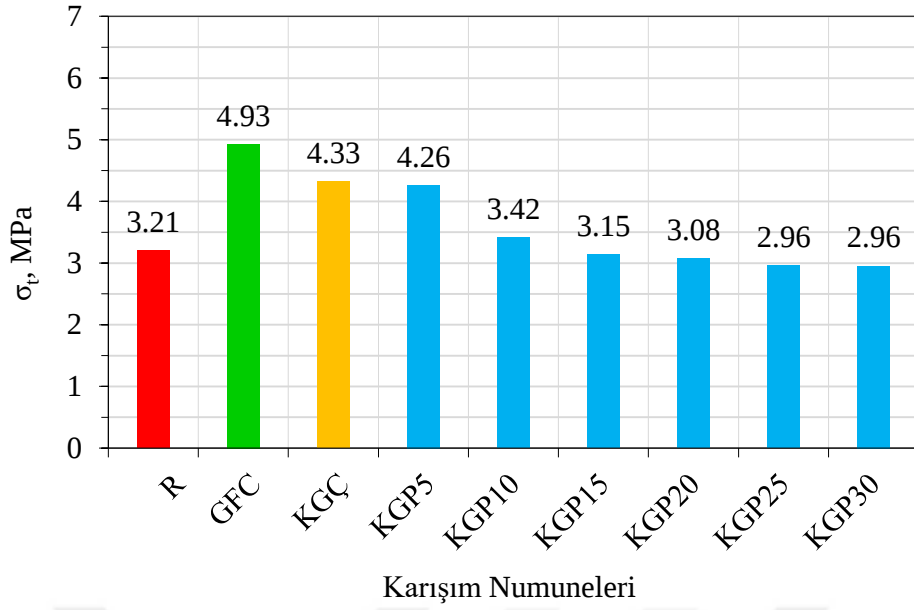


Şekil 5. 3. Referans numunesi için basma kuvveti-uzama



Şekil 5. 4. KGP30 numunesi için basma kuvveti-uzama değişim grafiği

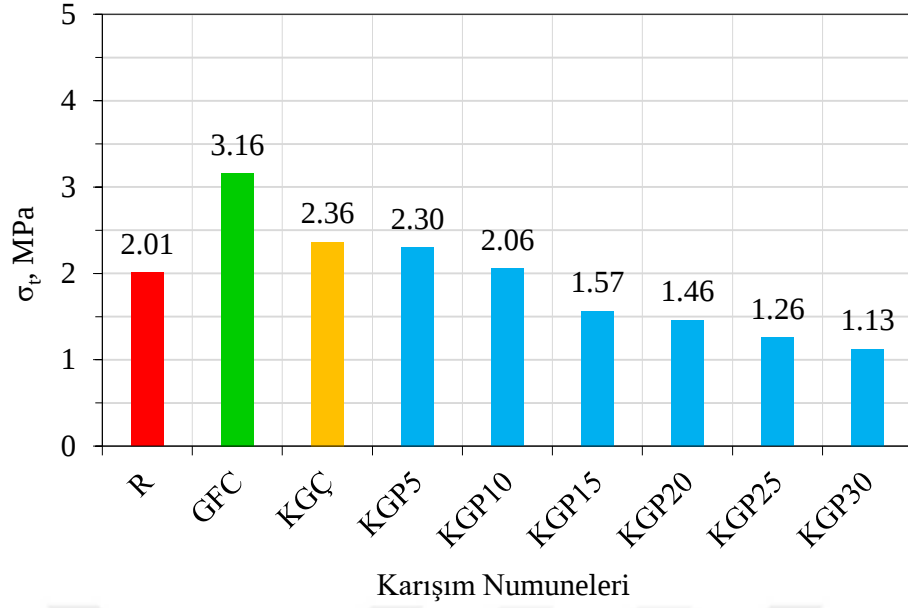
Şekil 5.5'te etüvde kürlenmiş numunelerin üç nokta eğme dayanımı sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre test edilen numunelerin üç nokta eğme dayanımları 4.93 MPa ile 2.96 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlit bazında sonuçlara baktığımızda; %5'ten %30'a kadar artan değerlerde genleştirilmiş perlit agregası mevcut G sınıfı çimento ile yer değiştirdiğinde referans numuneye göre üç nokta eğme dayanımında %32,71 artış ile %7,78 azalma arasında meydana gelmiştir.



Şekil 5. 5. Etüvde kürlenen numunelerin üç nokta eğme dayanımı değerleri

Etüvde kürlenen GFC ve KGÇ numunelerinin üç nokta eğme dayanımlarında referans numuneye göre sırasıyla %53.58 ve %34.89 artış meydana gelmiştir. Basınç dayanımı ile üç nokta eğme dayanımı doğru orantılı olduğundan GFC numunesinin referans numuneye göre üç nokta eğme dayanımının yüksek çıkması yine yüksek fırın cürufunun, numunenin dayanım ve geçirgenlik gibi karakteristik özelliklerini iyileştirmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.6'da suda kürlenen numunelerin üç nokta eğme dayanımı sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre test edilen numunelerin üç nokta eğme dayanımları 3.16 MPa ila 1.13 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

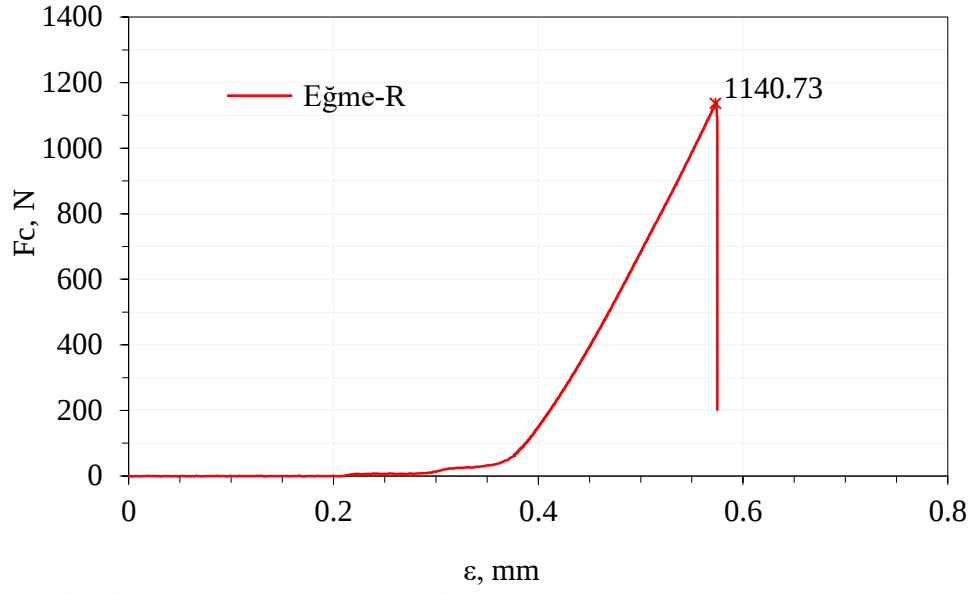


Şekil 5. 6. Suda kürlenmiş numunelerin üç nokta eğme dayanımı değerleri

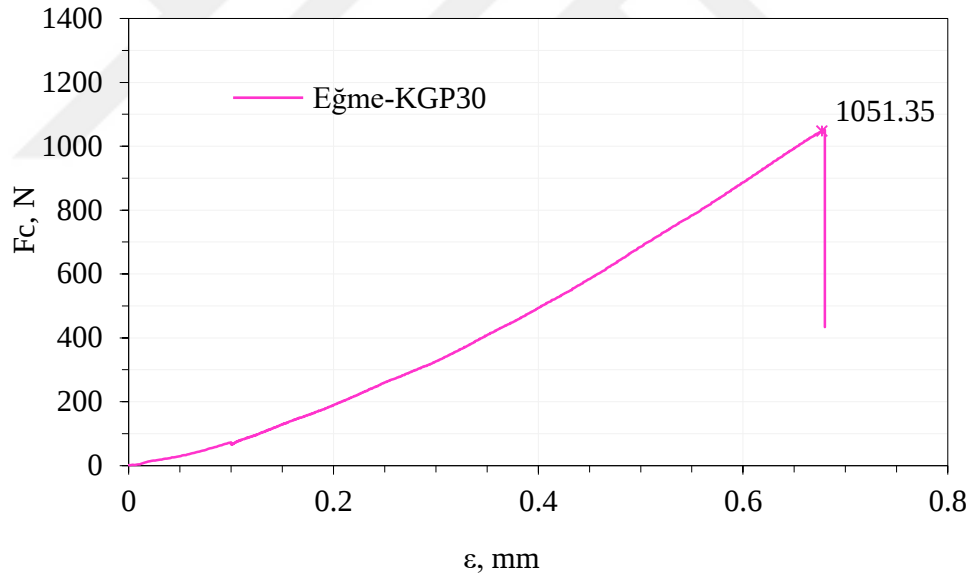
Genleştirilmiş perlit bazında sonuçlara baktığımızda; % 5'ten % 30'a kadar artan değerlerde genleştirilmiş perlit agregası mevcut G sınıfı çimento ile yer değiştirdiğinde referans numuneye göre üç nokta eğme dayanımında % 14.42 artış ila % 43.78 azalma arasında meydana gelmiştir. Suda kürlenmiş GFC ve KGÇ numunelerinin üç nokta eğme dayanımlarında referans numuneye göre sırasıyla %57.21 ve %17.41 artış meydana gelmiştir.

Suda kürlenmiş R, GFC, KGÇ, KGP5, KGP10, KGP15, KGP20, KGP25 ve KGP30 numuneleri, etüvde kürlenmiş aynı karışımdaki numunelere göre üç nokta eğme dayanımları sırasıyla %37.38, %35.90, %45.49, %46, %39.76, %50.15, %52.59, %57.43 ve %61.82 oranında azalış göstermiştir.

Şekil 5.7 ve 5.8'de Referans ve KGP30 numunelerinin dayanabileceği maksimum üç nokta eğme kuvveti esnasında uzama miktarları verilmiştir. Referans numunede 1140.73 N basma kuvveti altında 0.573 mm uzama meydana gelmiştir. KGP30 numunesinde ise 1051.35 N basma kuvveti altında 0.677 mm uzaman meydana gelmiştir. KGP30 numunesi referans numunesinden % 7.83 oranında daha düşük basma kuvveti altında % 18.15 oranında daha fazla bir uzama göstermiştir. Bunun sebebi çimento harcına eklenen genleştirilmiş perlit içerisindeki havanın numuneyi daha sünek bir hale getirmesidir.

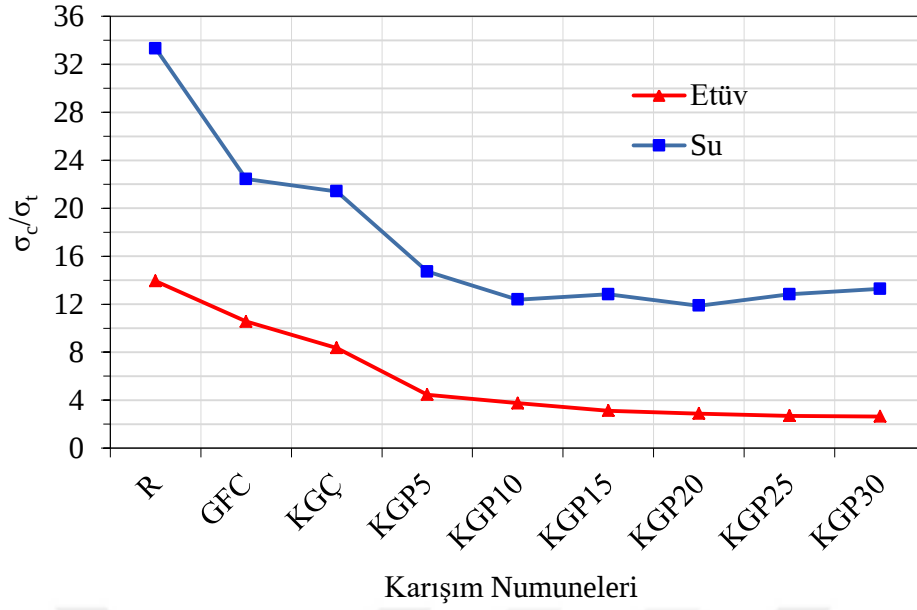


Şekil 5. 7. Referans numunesi için üç nokta eğme kuvveti- uzama değişim grafiği



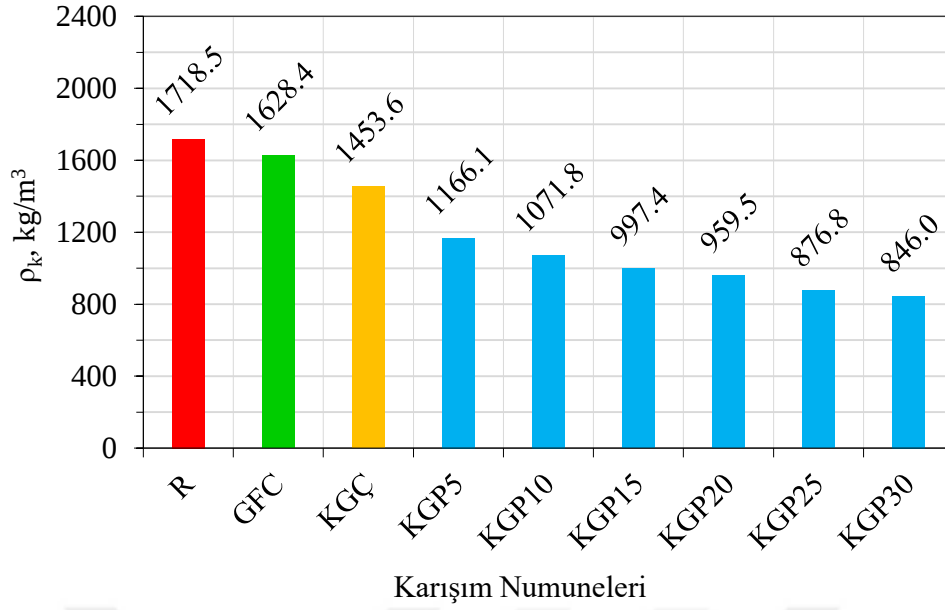
Şekil 5. 8. KGP30 numunesi için üç nokta eğme kuvveti- uzama değişim grafiği

Şekil 5.9’da etüv ve suda kürlenmiş sertleşmiş numunelerin basma-eğme dayanım oranları verilmiştir. Suda kürlenmiş Referans numunesinin üç nokta eğme dayanımı, basınç dayanımının % 3’üne tekabül ederken, % 5’ten % 30’a kadar artan değerlerde genişletilmiş perlit agregası bazında baktığımız eğme dayanımı % 6.78 ila % 8.41 arasında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. 9. Etüv ve suda kürlenmiş sertleşmiş numunelerin basma-eğme dayanım oranları

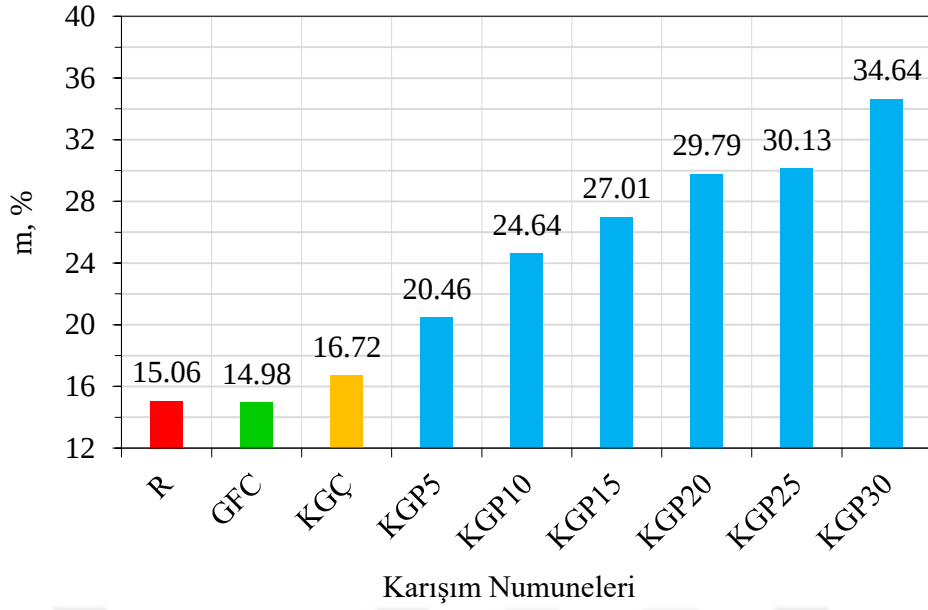
Şekil 5.10’da sertleşmiş numunelerin kuru yoğunluk değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre test edilen numunelerin kuru yoğunlukları 1718.5 kg/m^3 ile 846 kg/m^3 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlit bazında sonuçlara baktığımızda; % 5’ten % 30’a kadar artan değerlerde genleştirilmiş perlit agregası mevcut G sınıfı çimento ile yer değiştirdiğinde referans numuneye göre kuru yoğunluklarında % 32.14 ile % 50.77 arasında azalma meydana gelmiştir. GFC ve KGÇ numunelerinin kuru yoğunluklarında, referans numuneye göre sırasıyla % 5.24 ve % 15.41 oranında düşüşler meydana gelmiştir. Kuru yoğunluktaki bu azalmalar genel olarak genleştirilmiş perlit agregasının mevcut G sınıfı çimentoya göre daha hafif ve gözenekli yapıda olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu gibi düşüşler numunenin performansı açısından çok büyük öneme sahiptir. Çünkü numune içerisinde kullanılan hafif agrega malzemeleri, numunenin sünekliğini artırarak enerjiyi yutabilme kapasitesinin artırılmasını sağlamaktadır.



Şekil 5. 10. Sertleşmiş numunelerin kuru yoğunluk değerleri

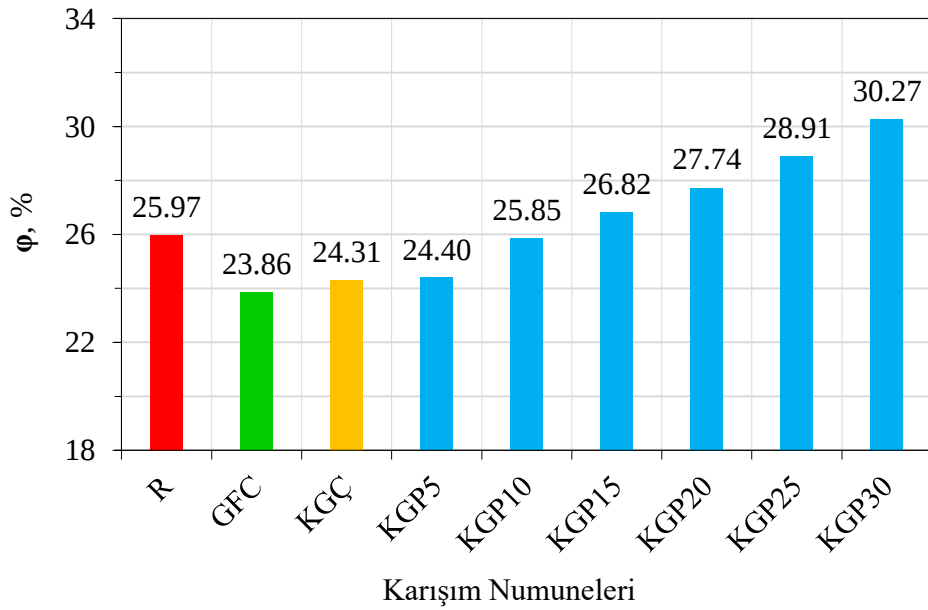
Şekil 5.11’de numunelerin su emme kapasite değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre test edilen numunelerin su emme kapasiteleri %14.98 ila %34.64 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlit bazında sonuçlara baktığımızda; %5’ten %30’a kadar artan değerlerde genleştirilmiş perlit agregası mevcut G sınıfı çimento ile yer değiştirdiğinde referans numuneye göre su emme kapasitelerinde %35.85 ila %130.01 arasında artış meydana gelmiştir.

Perlit agregası numune içerisine eklendikçe su emme kapasite değerleri artmış ve doğal olarak numunenin yoğunluk değerlerini düşürmüştür. Çünkü genleştirilmiş perlit, gözenekli ve hafif yapısıyla daha önce de belirtildiği gibi kendi ağırlığının % 300’una kadar su emme kapasitesine sahip olması büyük ölçüde kendisiyle oluşturulan numunenin su emme kapasite değerlerini doğrudan etkilemiştir. Bununla birlikte referans numunesi GFC numunesine göre su emme kapasitesi 1.01 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. KGÇ numunesinin ise referans numuneye göre 1.11 kat daha fazla su emdiği gözlenmiştir.



Şekil 5. 11. Sertleşmiş numunelerin su emme değerleri

Şekil 5.12’de numunelerin 28. gün sonunda gözeneklilik (porozite) değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre test edilen numunelerin gözeneklilikleri % 23.86 ile % 30.27 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlit bazında sonuçlara baktığımızda; % 5’ten % 30’a kadar artan değerlerde genleştirilmiş perlit agregası mevcut G sınıfı çimento ile yer değiştirdiğinde referans numuneye göre gözenekliliklerinde % 6.39 azalma ile % 16.55 artma arasında meydana gelmiştir.

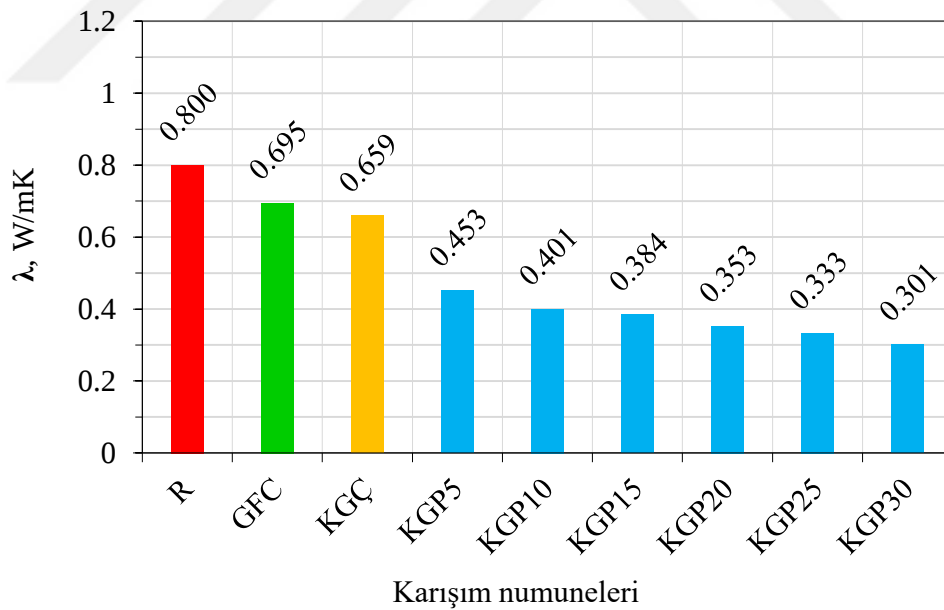


Şekil 5. 12. Sertleşmiş numunelerin porozite (gözeneklilik) değerleri

GFC ve KGÇ numunelerinin porozite değerlerinde referans numunesine göre sırasıyla % 8.12 ve % 6.39 oranında azalış meydana gelmiştir. Bunun sebebi mineral katkı olan yüksek fırın cürufunun, numunenin geçirgenlik ve dayanım gibi karakteristik özelliklerini geliştirmesidir. Öte yandan KGÇ numunesi, katkı malzemesi olarak çok düşük miktarda genişletici kullanılması bile Şekil 5.12’de gözüktüğü gibi poroziteyi artırmıştır.

5.2.2. Isıl özellik test sonuçları

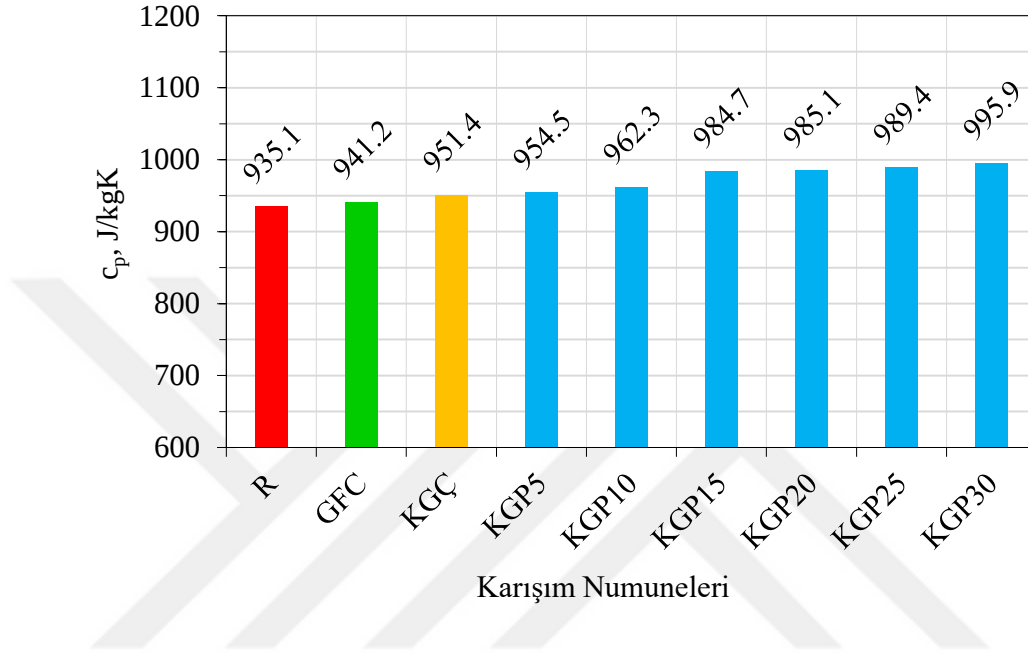
Şekil 5.13 ve 5.14’te etüvden çıkartılan numunelerin ısı iletkenlik ve özgül ısı değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre test edilen numunelerin ısı iletkenlikleri 0.800 W/mK ile 0.301 W/mK arasında ve özgül ısı değerleri ise 935.1 J/kgK ile 995.9 J/kgK arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlit bazında sonuçlara baktığımızda; % 5’ten % 30’a kadar artan değerlerde genleştirilmiş perlit agregası mevcut G sınıfı çimento ile yer değiştirdiğinde referans numuneye ısı iletkenliklerinde % 43.38 ila % 62.37 azalma, özgül ısı değerlerinde % 2.07 ila % 6.50 arasında artma meydana gelmiştir.



Şekil 5. 13. Sertleşmiş numunelerin ısı iletkenlik özellikleri

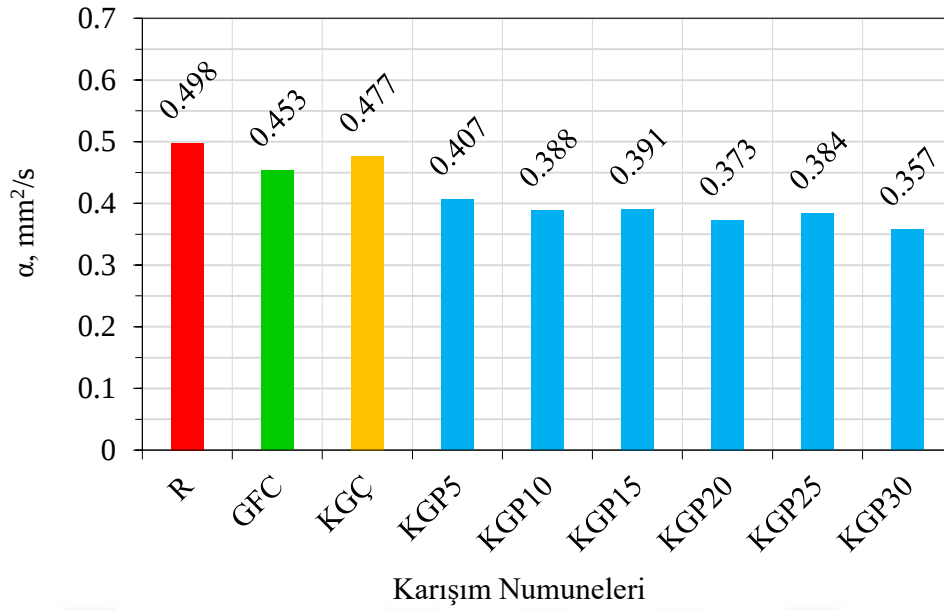
GFC ve KGÇ numunelerinin ısı iletkenlik değerleri referans numuneye göre sırasıyla %13.13 ve %17.62 oranında düşüş; özgül ısı değerlerinde ise sırasıyla %0.65 ve %1.74 oranında artışlar meydana gelmiştir. Bunun ilk sebebi yüksek fırın cürufunun ısı iletkenlik değerinin G sınıfı çimentodan daha düşük olmasıdır. Numune içerisinde

mevcut G sınıfı çimento yerine genişletilmiş perlit miktarı arttıkça boşluk artmış ve boşluk miktarı veya gözenekliliğin artması ile doğrudan durgun hava miktarı arttığından numunelerin ısı iletkenlik değeri azalmış ve özgül ısı değeri artmıştır. (Şekil 5.14).



Şekil 5. 14. Sertleşmiş numunelerin özgül ısı değeri

Isıl yayılım hızı (α), bir malzemenin ısı iletkenliğinin yoğunluk ve özgül ısısının çarpımına, yani kısaca yoğunluğun ısı kapasiteye oranıdır. Bununla birlikte, genel anlamda ısı yayılım ile ısı iletkenlik değeri neredeyse doğrudan orantılı olduğu görülür. Bu çıkarımın Şekil 5.15'te görüldüğü gibi doğru olduğu kanısına varılmıştır ki ısı yayılımının ve ısı iletkenlik değeri birbirine yakın oranda değişmiştir. Genleştirilmiş perlit agrega oranının numune içerisinde artmasıyla gözeneklilik artmış bu ise ısı yayılımı azaltmıştır.



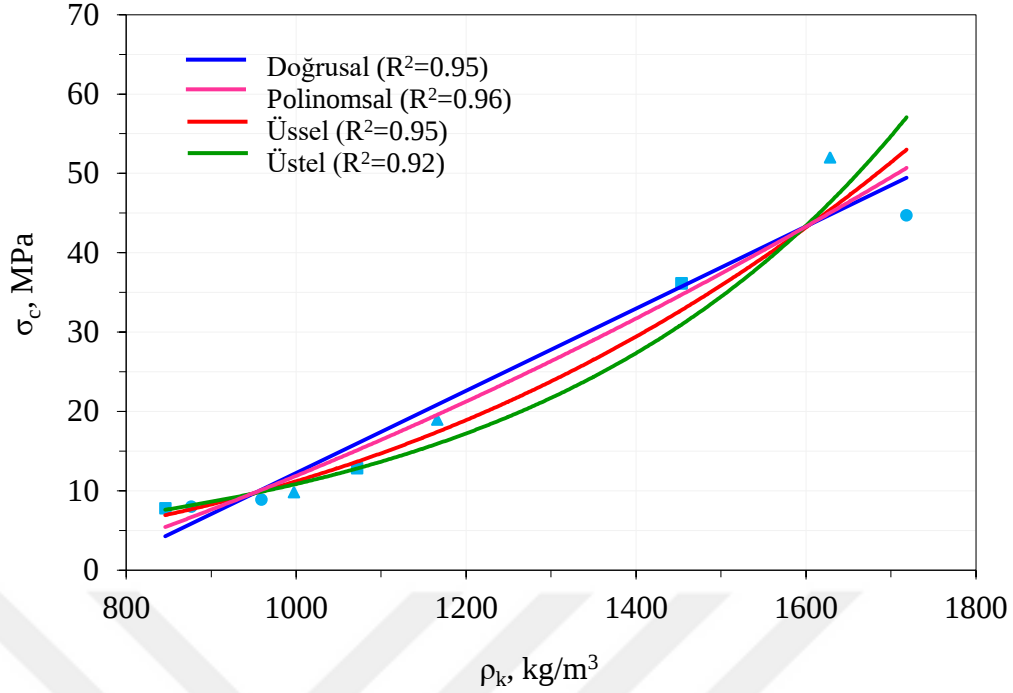
Şekil 5. 15. Sertleşmiş numunelerin ısı yayılım değerleri

Hacimce %5'ten %30'a kadar artan değerlerde genişletilmiş perlit agregası mevcut G sınıfı çimento yerine ikame edildiğinde ısı yayılım değerlerinde sırasıyla %18.27 ila %28.31 arasında azalma meydana gelmiştir. GFC ve KGÇ numunelerinin ısı yayılım değerlerinde ise referans numuneye göre sırasıyla % 9.03 ve % 4.21 oranında düşüş meydana gelmiştir.

5.3. Analitik Analizler

Aşağıdaki analizlerin amacı, numunelerde test edilen termofiziksel parametrelerin analitiksel olarak karşılaştırılıp aralarında doğrudan bir ilişki olup olmadığını ortaya çıkarmaktır. İlişkisi incelenecek olan özelliklerin aralığını geniş tutarak tüm numuneleri kapsayabilmesi için katkılı veya katkısız tüm numuneler bu analizde beraber kullanılmıştır. Bu analizler, Microsoft Excel kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bir veri kümesinde regresyon modelinin doğruluğu, çoklu belirleme katsayısının (R) karesi hesaplanarak ispat edilir. R^2 ne kadar bir değerine yakınsa o veri kümesine ait en uygun model tespit edilmiş olur. Bu amaçla parametreler arasında en uygun eğri olarak üstel eğri seçilmiş olup şekiller üzerinde " R^2 " değerleri formülleriyle beraber gösterilmiştir. Şekil 5.16'da üretilen numunelerin basınç dayanım ve kuru yoğunluk değerleri arasındaki ilişkiyi gösterilmektedir.



Şekil 5.16. Tüm numunelerin etüv basınç dayanımı ve kuru yoğunluk arasındaki ilişki (Oktay ve ark., 2015)

Regresyon analizi sonucunda elde edilen denklem, test edilen aralıktaki basınç dayanım (σ_c) değerlerine karşılık gelmekte ve kuru yığınsal yoğunluğun (ρ) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

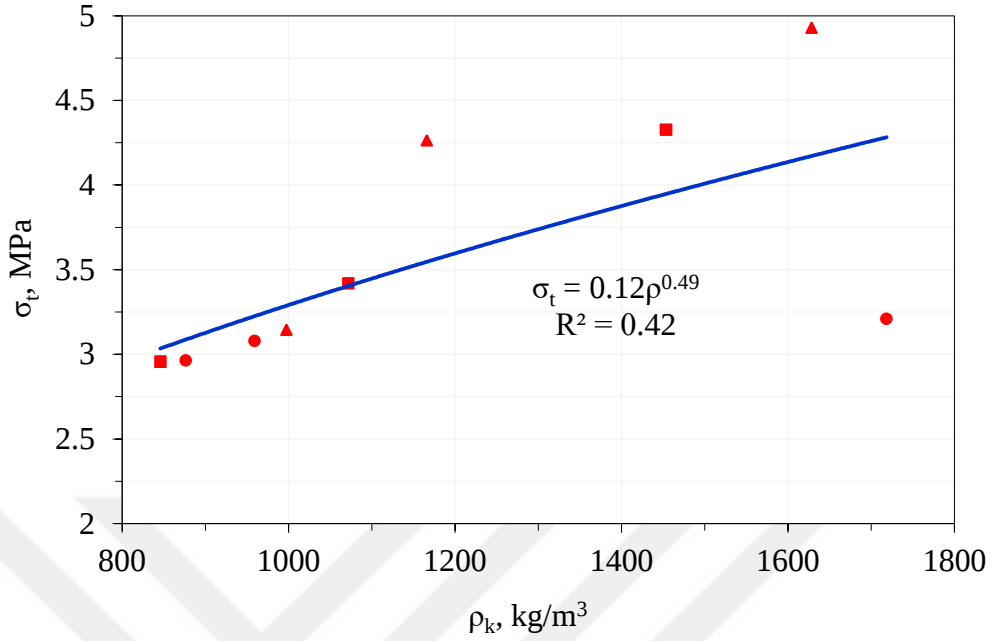
$$\sigma_c = 3E-08\rho^{2.87} \quad (5.1)$$

Her bir değer için eğilim çizgileri ifade edilmiş olup en yüksek R^2 değeri ikinci dereceden polinomsal eğilim çizgisinden elde edilmiştir. Eğilim çizgilerinin R^2 değerleri birbirlerine yakın olup literatür incelendiğinde üssel eğilim çizgilerin bu tür çalışmalar da daha yaygın olduğu görüldüğünden ifadeler üssel olarak verilmiştir.

Bu eşitlik, kullanılan numunelerin kuru yoğunluğunun test edilen aralık dahilinde olması koşuluyla geliştirilmiş perlit esaslı yalıtım malzemelerinin basınç dayanımlarının tahmininde yararlı olabilir. Bununla birlikte, test edilen aralığın dışına çıkan farklı içerikli malzemeler için bu denklem dikkatle kullanılmalıdır.

Şekil 5.17’de üretilen numunelerin üç nokta eğme dayanımı ve kuru yoğunluk değerleri arasındaki ilişkiyi gösterilmektedir. Regresyon analizi sonucunda elde edilen denklem, test edilen aralıktaki eğme dayanımı (σ_t) değerlerine karşılık gelmekte ve kuru yığınsal yoğunluğun (ρ) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\sigma_t = 0.12\rho^{0.49} \quad (5.2)$$

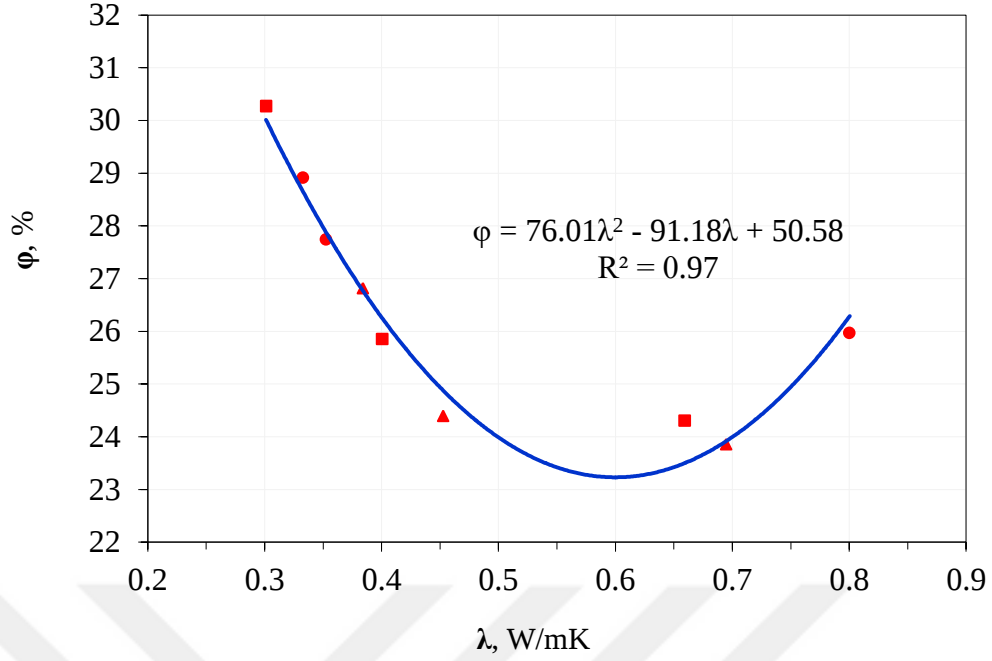


Şekil 5.17. Tüm numunelerin etüv eğme dayanımı ve kuru yoğunluk arasındaki ilişki

0.42'lik R^2 değerlerine sahip numuneler için sonuçların bileşimine dayanarak eğme dayanımı ve kuru yoğunluk arasındaki doğrudan bir ilişki olmadığı ispat edilmiştir. Bu eşitlik, kullanılan numunelerin kuru yoğunluğunun test edilen aralık dahilinde olması koşuluyla genişletilmiş perlit esaslı yalıtım malzemelerinin üç nokta eğme dayanımlarının tahmininde doğru sonuçlar vermez.

Şekil 5.18'de üretilen numunelerin porozite ve ısı iletkenlik değerleri arasındaki ilişkiyi gösterilmektedir. Regresyon analizi sonucunda elde edilen denklem, test edilen aralıktaki porozite (ϕ) değerlerine karşılık gelmekte ve ısı iletkenlik (λ) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\phi = 76.01\lambda^2 - 91.18\lambda + 50.58 \quad (5.3)$$

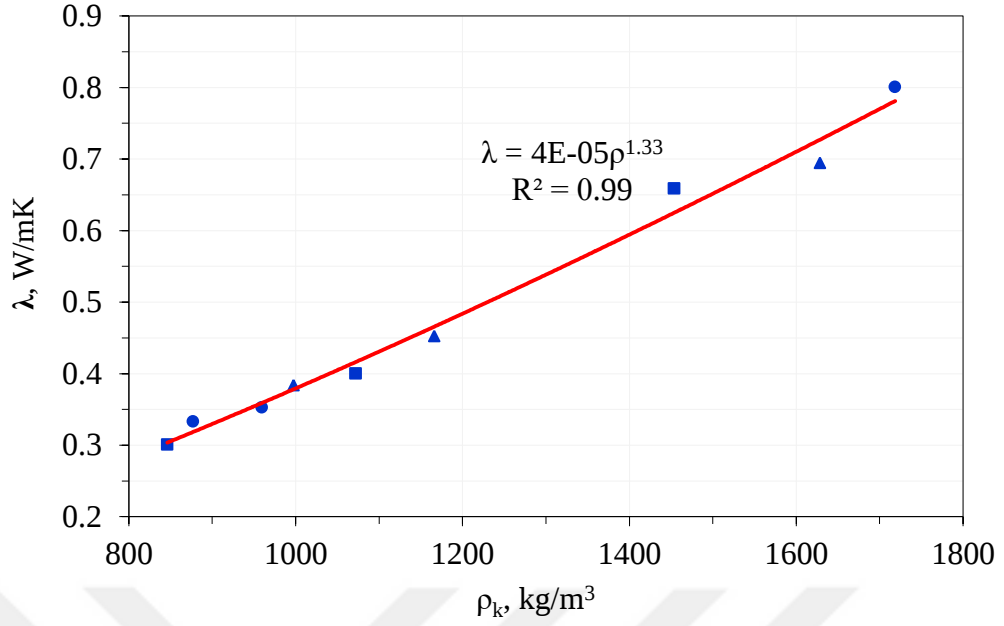


Şekil 5. 18. Tüm numunelerin porozite ve ısı iletkenlik arasındaki ilişki

Bu eşitlik, kullanılan numunelerin ısı iletkenliği test edilen aralık dahilinde olması koşuluyla genişletilmiş perlit esaslı yalıtım malzemelerinin porozitelerinin tahmininde yararlı olabilir. Bununla birlikte, test edilen aralığın dışına çıkan farklı içerikli malzemeler için bu denklem dikkatle kullanılmalıdır.

Genleştirilmiş perlit vasıtasıyla numunelerin gözeneklilik değerlerinin artmasıyla yoğunluğundaki azalma ısı iletkenliğinin azalmasıyla ilişkilidir. Şekil 5.19'dan, tüm numunelerin etüv kuru yoğunluğunu ısı iletkenlikleri ile ilişkilendirdiğimizde daha önceki bahsettiğimiz durum ortaya çıkmaktadır. Tüm numunelerin yoğunluk ile ısı iletkenlik için eğrileri çizilmiş olup ilişki $R^2 = 0.99$ ile üstel bir eğri ile temsil edilmiştir. Daha sonra aşağıdaki gibi yoğunluğa bağlı bir fonksiyon ile bu ilişki gösterilmiştir:

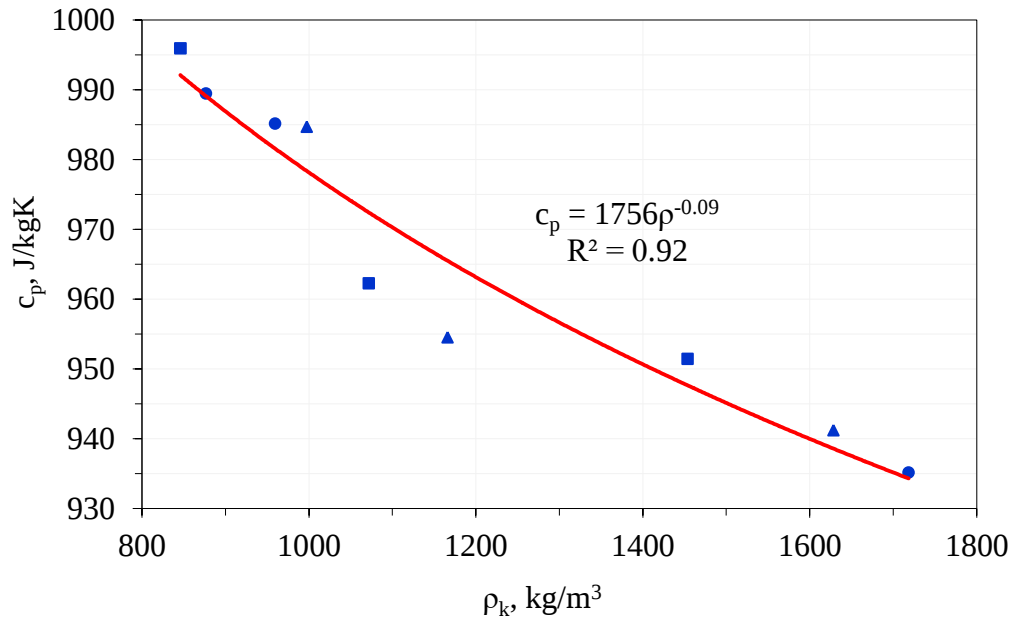
$$\lambda = 4E-05\rho^{1.33} \quad (5.4)$$



Şekil 5. 19. Tüm numunelerin ısı iletkenlik ve kuru yoğunluk arasındaki ilişki

Şekil 5.20’de özgül ısı ile yoğunluk arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Buradan anlaşılacağı gibi daha düşük yoğunluğa sahip malzemelerin daha yüksek özgül ısı ve daha yüksek yoğunluklu malzemelerin daha düşük özgül ısıya sahip olduğu gözlemlenebilir. Bu ilişkiyi tanımlayan ifade aşağıda verilmiştir:

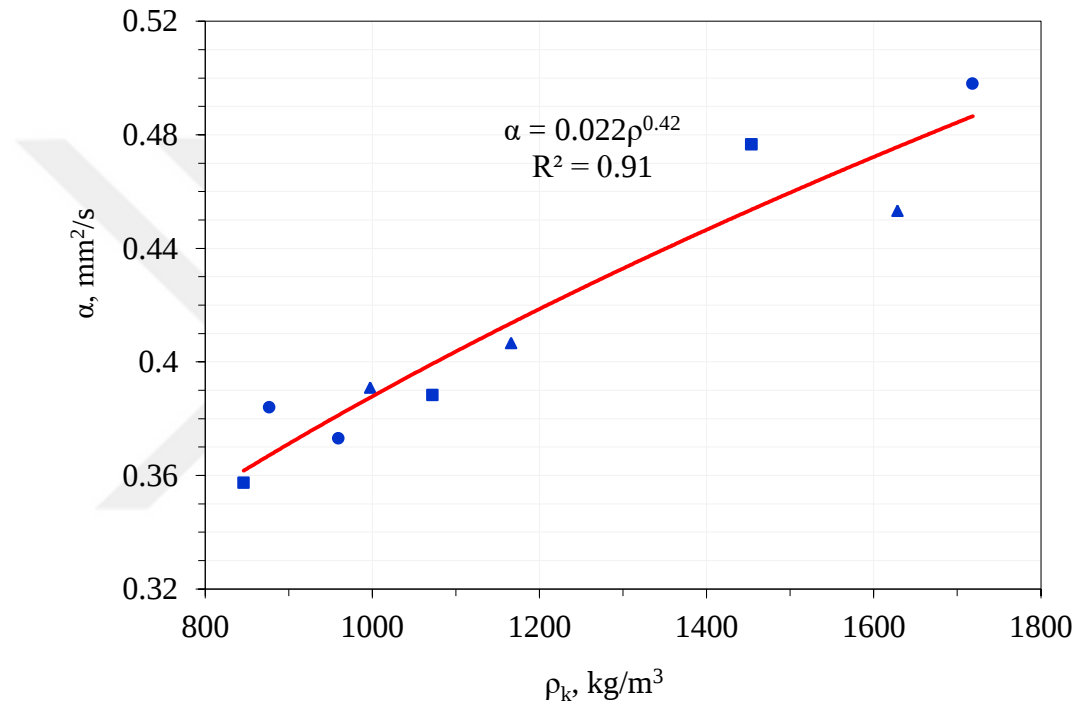
$$c_p = 1756\rho^{-0.09} \quad (5.5)$$



Şekil 5. 20. Tüm numunelerin özgül ısı ve kuru yoğunluk arasındaki ilişki

Isıl yayılım ve kuru yoğunluk arasındaki ilişki Şekil 5.21'da gösterilmektedir. Buradan, yoğunluğun arttıkça ısı yayılımının arttığı ve ısı yayılım ile yoğunluk arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, kuru yoğunluk ile ısı yayılım değerlerinin malzemelerin ısı iletkenliği üzerinde büyük bir etkinliğe sahip olduğu bilinmektedir. $R^2 = 0.91$ eşitliği numunelerin ısı yayılım değerleri için optimize edilmiş üstel modeli temsil etmektedir.

$$\alpha = 0.022\rho^{0.42} \quad (5.6)$$



Şekil 5. 21. Tüm numunelerin ısı yayılım ve kuru yoğunluk arasındaki ilişki

Bu istatistiksel yaklaşım, beklenildiği gibi kuru yoğunluk ve ısı özellikler arasında çok önemli ilişkiler olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen ifadelerin (denklemlerin) kullanılmasıyla, test edilen aralıklardaki herhangi bir özelliği belli olan yeni tip numunelerin diğer önemli özellikleri kolaylıkla tespit edilebilecektir. Böylece yoğunluk gibi basit, çabuk ve ekonomik bir yöntemle elde edilen bir özelliğin, verilen denklemler kullanılarak diğer bilinmeyen tüm özelliklerin hesaplanması sayesinde zaman ve para israfından tasarruf edilebileceği ön görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, petrol/doğalgaz ve jeotermal kuyularda yalıtımlı yeni tip g sınıfı çimento harcı geliştirilmesi hedeflenmiştir. Deneysel ve teorik olarak birçok çalışmayı içeren bu tezde, sırasıyla şu sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Üretilen taze çimento karışımlarında tüm ince agregaların belirli oranlarda kullanılmasıyla maksimum ve minimum çökme için 25.4 – 17.3 cm ve taze yoğunluk için 2160.34 kg/m³ – 1216.81 kg/m³ arasında değerler aldığı tespit edilmiştir.
2. Test edilen numunelerin basınç dayanımları 7.79 MPa ile 70.89 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan üretilen numunenin kürlenme koşulu da numune dayanımını önemli şekilde etkilemiştir. Suda kürlen numunelerin basınç dayanımlarında etüvde kürlen numunelere göre % 36.27 ile % 104.47 arasında oranlarda artış gözlenmiştir. Bununla birlikte yüksek fırın cürufunun kullanımının, referans numuneye göre daha yüksek dayanıma eriştiği gözlenmiştir.
3. Bu çalışmada üretilen yeni tip g sınıfı çimento harçlarından etüvde kürlen KGP5 ve KGP10 numunelerinin basınç dayanımları (σ_c), API standartlarında basınç dayanımı için minimum değer kabul edilen 10.3 MPa'dan daha yüksektir. Bununla birlikte suda kürlen tüm yalıtımlı numuneleri minimum değer kabul edilen 10.3 MPa'dan daha yüksektir. Bahsedilen çimento reçeteleri Petrol/doğalgaz ve jeotermal kuyularda kuyu çimentolama operasyonlarında rahatlıkla kullanılabilirler.
4. Test edilen numunelerin üç nokta eğme dayanımları 1.13 MPa ile 4.93 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre, geliştirilmiş perlit agregalı çimento harçlarının üç nokta eğme dayanımları göz önünde bulundurulduğunda etüvde kürlen numunelerin, suda kürlen numunelerden daha yüksek eğme dayanımlarına sahip olduğu gözlenmiştir.
5. Test edilen numunelerin kuru yoğunlukları 1718.5 kg/m³ ile 846 kg/m³ arasında, su emme kapasiteleri %14.98 ile %34.64 arasında, gözeneklilik değerleri % 23.86 ile % 30.27 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlit numune içerisine eklendikçe gözeneklilik artmış dolayısıyla su emme kapasite değerleri de artmış ve doğrudan numunenin yoğunluk değerlerini düşürmüştür.
6. Test edilen numunelerin ısı iletkenlikleri 0.301 W/mK ile 0.800 W/mK arasında, özgül ısı değerleri 935.1 J/kgK ile 995.9 J/kgK arasında ısı yayılım değerleri 0.357 mm²/s ile 0.498 mm²/s arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Numune içerisinde normal çimento yerine geliştirilmiş perlit miktarı arttıkça boşluk artmış ve doğrudan

gözeneklilik artmıştır. Böylece durgun hava miktarı arttığından numunenin özgül ısı değerleri artmış, ısı iletkenlik ve ısı yayılım değerleri azalmıştır. Bununla birlikte yüksek fırın cürufu ile üretilen numunede ısı iletkenlik azalmış, özgül ısı değeri artmıştır. Bununla birlikte GFC ve KGÇ numunelerinde de aynı sonuçlar görülmüştür.

7. Test edilen numunelerin termofiziksel parametreleri çoklu regresyon analizine tabi tutularak incelenmiş ve beklenildiği gibi kuru yoğunluk ve ısı özellikleri arasında çok önemli ilişkiler olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen ifadelerin (denklemlerin) kullanılmasıyla, test edilen aralıklardaki herhangi bir özelliği belli olan yapı malzemelerinin diğer önemli özellikleri kolaylıkla tespit edilebilecektir. Böylece yoğunluk gibi basit, çabuk ve ekonomik bir yöntemle elde edilen bir özelliğin, verilen denklemler kullanılarak diğer bilinmeyen tüm özelliklerin hesaplanması sayesinde zaman ve para israfından tasarruf edilebileceği ön görülmektedir.

8. Düşük ısı yayılım ve iletkenliğe sahip ve ülkemizin de dünya rezervinin yaklaşık %74'ünü barındırdığı yalıtım malzemesi olan perlitin, petrol/doğalgaz ve jeotermal kuyuların çimentolanma işleminde kullanılması ile yalıtımı sağlayarak kuyunun verimini artırmanın yanı sıra devamında ihtiyaç duyulacak ek işlemlerin de önüne geçerek maliyetleri düşüreceği sonucuna varılmaktadır.

9. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda %30'a kadar genişletilmiş perlit kullanımı araştırılmış olup daha yüksek oranlarda (%40, %50) perlit kullanımının da kuyu çimentoda kullanılabilirliğinin araştırılması ileriki çalışmalarda öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- AASHTO T 129, 2006, Standart Method Of Test For Amount Of Water Required For Normal Consistency Of Hydraulic Cement Paste. *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington D.C.
- AASHTO T 131, 2020, Standart Method Of Test For Time Of Setting Of Hydraulic Cement By Vicat Needle. *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington D.C.
- Adams N, Charrier T (1985) Drilling Engineering: A Complete Well Planning Approach Penn Well Publishing Company. *Tulsa Oklahoma USA* 297-303.
- Anonymous,1995, Casing and Cementing Drilling Engineering. Workbook Baker Hughes INTEQ 2: 12.
- Anonymous,2009, Drilling Engineering Lecture Notes on Cementing *Institute of Petroleum Engineering*. Herriot Watt University 1-40.
- Anonymous,2014, Well Engineering Shell Intensive Training Programme 1-46
- Arun, H. S. (2018). *Sürdürülebilir çimento sektörü eğilimlerine dayalı performans kriterlerinin belirlenmesi ve karşılaştırılması* (Master's thesis, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- ASTM C138, 2001, Standard Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content ,Gravimetric, of Concrete, *United States: ASTM International*.
- ASTM C150/C150M, 2018, Standart Specification For Portland Cement, *ASTM International*.
- ASTM C187, 2004, Standart Test Method For Normal Consistency Of Hydraulic Cement, *ASTM International*.
- ASTM C230/C230M-08, 2008, Standart Specification For Flow Table For Use In Tests Of Hydraulic Cement, *ASTM International*.
- ASTM C494/C494M-15a, 2016, Standart Specification For Chemical Admixtures For Concrete, *ASTM International*.
- ASTM, C203–99, 1999, Standard Test Methods for Breaking Load and Flexural Properties of Block-Type Thermal Insulation. *ASTM International: West Conshohocken, PA*.
- ASTM, C39, 2001, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, *ASTM International*.

- ASTM, C948, 2000, Test Method for Dry and Wet Bulk Density. *Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete*, The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Bett EK (2010) Geothermal Well Cementing Materials and Placement techniques Geothermal Training Programme-Report 10: 99-130.
- Bowen, O. G., ve Novell E. W., 1952, Building material and process of making same. *U.S. Patent No: 2,583,292*.
- BP Statistical Review of World Energy. 2015. British Petroleum (BP), London, UK.
- Broni-Bediako, E., Joel, O. F., & Ofori-Sarpong, G. (2016). Oil well cement additives: a review of the common types. *Oil Gas Res*, 2(1), 1-7.
- Cowan, K. M., & Eoff, L. (1993, March). Surfactants: additives to improve the performance properties of cements. In *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. OnePetro.
- Crook, R. 2006. Cementing. Lake, LW., Mitchell, RF. Petroleum Engineering Handbook, *Society of Petroleum Engineers*, 369-370, Oxford.
- Çengel, Y. A., Tanyıldızı, V., & Dağtekin, İ. ,2011,. *Isı ve kütle transferi*. Güven Kitabevi.
- De Schutter, G., & Taerwe, L. (1993). Random particle model for concrete based on Delaunay triangulation. *Materials and Structures*, 26(2), 67-73.
- Demirboğa, R., Örüng, İ., & Gül, R. (2001). Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1627-1632.
- DPT, 2001, Devlet Planlama Teşkilatı Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel ihtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri I Çalışma Grubu Raporu, Ankara.
- DPT, 2004, Yapı Malzemeleri III Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer, 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı ÖİK Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyon Raporu, s.24-49.
- DrillingCourse. 2015. Cementing Job Types. Erişim: <http://www.drillingcourse.com/2015/12/cementing-job-types.html>. [Erişim Tarihi: 4 Ağustos 2022].
- International Energy Outlook 2019. Energy Information Administration.. Highlights.
- Erdoğan, T. Y., “Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri” , THBB Yayınları, 2004.
- Gerow, S. A., & Weidman, V. W., 1972, *U.S. Patent No. 3,658,564*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

- Jones, R., Watters, LT. 1977. Remedial Cementing. Economides, JM., Watters LT., Dunn-Norman, S., The Petroleum Well Construction, John Wiley and Sons, 408-420, ABD.
- Kalaycı, F. (2016). Perlit Esaslı Isı Yalıtım Malzemesi Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kahramanmaraş).
- Karakoç, M. B., & Demirboğa, R. (2008, September). Thermo-mechanical properties of HSC made with expanded perlite aggregate. In *Proceedings* (pp. 195-199).
- Klempa, M., Bujok, P., Kovar, L., Struna, J., Pinka, J. 1996. Fundamentals of Onshore Drilling. Erişim: <http://geologie.vsb.cz/DRILLING/drilling/theory.html>. [Erişim Tarihi: 4 Ağustos 2022].
- Knapp, I. N. (1915). Cementing Oil and Gas Wells. *Transactions of the AIME*, 48(01), 651-675.
- Knowenergy. 2012. Primary Cementing – Cementation I. Erişim: <http://www.knowenergysolutions.com/2012/06/cementation-primary-secondary/>. [Erişim Tarihi: 4 Ağustos 2022].
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, P., & William, C. (2003). Design and Control of Concrete Mixtures, Portland Cement Association Publication, 1. Baskı, Skokie, IL United States.
- Kurt, B. 2013. Güneydoğu Anadolu Bölgesindeki Petrol Kuyularında Yapılan Çimentolama Operasyonları. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 23-35.
- Lake, L. W. (2006). Petroleum Engineering Handbook. Richardson. Society of Petroleum Engineers, 411-455.
- MEB, 2011, Milli Eğitim Bakanlığı İnşaat Teknolojisi, Çimento Kıvam ve Priz Süresi Tayini, Öğrenme Faaliyeti 1, Ankara.
- Michaux, M., Nelson, E. B., & Vidik, B. (1990). Chemistry and characterization of portland cement in well cementing. *Nelson Elsevier Science Publishers Amsterdam*, 8-25.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (1981). Concrete Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ, 481.
- Meyer, C., Pang, X., Darbe, R., Darbe, R., & Funkhouser, G. P. (2013). Modeling the effect of curing temperature and pressure on cement hydration kinetics. *ACI Mater. J*, 110, 137-148.
- Nguyen JP (1996) Oil and Gas Field Development Techniques *Instiut Francais du Petrole* Editions Techno Paris Francis 187-192.
- Oilgasdrilling. 2015. Cement Plug – Oil & Gas Drilling Engineering I. Erişim: <http://www.oilgasdrilling.com/cement-plug.html>. [Erişim Tarihi: 4 Ağustos 2022].

- Oktaý, H., Yumrutaş, R., & Akpolat, A. (2015). Mechanical and thermophysical properties of lightweight aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 96, 217-225.
- Oktaý, H., 2017, Yalıtım özelliği yüksek yapı malzemelerinin geliştirilmesi ve ısı performanslarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman.
- Piot, B. 2006. *Primary Cement Job Design*. Nelson, EB., Guillot, D. Well Cementing. Schlumberber, 435-458, ABD.
- Piot, B., Cuvillier, G. 2006. *Primary Cementing Techniques*, Nelson, EB., Guillot, D. Well Cementing. Schlumberber, 459-501, ABD.
- Rabia, H. 2001. Cementing of Liners - Cementing. *Well Engineering and Construction*. Entrac Consulting, 166-170, UK.
- Rabia, H. (2002). *Well engineering & construction* (pp. 288-289). London: Entrac Consulting Limited.
- Radojevic, D. Z., & Shafeyeva, Y. (2006, October). Primary cementing in permafrost conditions-a process. In *SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. OnePetro.
- Reinås, L., Hodne, H., & Turkel, M. A. (2011, October). Hindered Strength Development in Oil Well Cement due to Low Curing Temperature. In *SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition*. OnePetro.
- Rike, J. L. (1973, September). Obtaining Successful Squeeze-Cementing Results. In *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. OnePetro.
- Roshan H, Asef MR (2010) Characteristics of Oil Well Cement Slurry Using CMC. *Journal of Society of Petroleum Engineers Drilling and Completion SPE* 25: 328-335.
- Samsuri, A., Junin, R., & Osman, A. M. (2001, April). The utilization of Malaysian local bentonite as an extender and free water controller in oil-well cement technology. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. OnePetro.
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., & Tasdemir, M. A. (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 671-676.
- Shadizadeh, S. R., Kholghi, M., & SALEHI, K. M. (2010). Experimental investigation of silica fume as a cement extender for liner cementing in Iranian Oil/Gas Wells.
- Suman, G. O., & Ellis, R. C. (1977). *World Oil's: Cementing oil and gas wells; including casing handling procedures*. NA.
- TS 1097-3,1998, *Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm, 3*.
- TS 1097-3,1998, *Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm, 6*.

- TS EN 1097-6,2000, *Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm, 6.*
- TS EN 12350 *Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri Bölüm, 3.*
- TS EN 12350-6, 2000, *Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm, 6.*
- TS EN 12390-1, 2002, *Beton–Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil. Boyut ve diğer Özellikleri, Türk Standardları Enstitüsü.*
- TS EN 12667, 2003, *Yapı malzemeleri ve mamullerinin ısı performans-Mahfazalı sıcak plaka ve ısı akış sayacı metotlarıyla ısı direncin tayini, s. 151.*
- TS EN 196-3 *Çimento Deney Metodları Bölüm 3.*
- TS EN 933-8, 2015, *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 8: İnce tanelerin tayini- Kum eşdeğeri tayini, Türk Standartları Enstitüsü.*
- TS EN ISO 10426 *Petrol ve Doğalgaz Sanayi Kuyu Çimentolaması İçin Çimentolar ve Malzemeler.*
- Wan, R. (2011). *Advanced well completion engineering.* Gulf professional publishing.
- Yu, L. H., Ou, H., & Lee, L. L. (2003). Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 73-76.