

OPEN JOURNAL OF

NAN



ISSN:2147-0081

Volume:6, Issue: 1, Year: 2021

A JOURNAL ABOUT  
NANOSCIENCE

## Open Journal of Nano

### Editor in Chief

Dr. Mustafa CAN, Sakarya University of Applied Sciences, Turkey  
mustafacan@subu.edu.tr

### Editors

Dr. Kamal YUSOH, University Malaysia Pahang, Malaysia

University Malaysia Pahang

Dr. Mustafa Zahid YILDIZ, Sakarya University of Applied Sciences, Turkey  
mustafayildiz@sakarya.edu.tr

Dr. Tetiana TEPLA, Lviv Polytechnic National University, Ukraine  
tetiana.l.tepla@lpnu.ua

Dr. Tuğrul ÇETİNKAYA, Sakarya University, Turkey  
tcetinkaya@sakarya.edu.tr

Dr. Erol ALVER, Hitit University, Turkey  
erolalver@hitit.edu.tr

Dr. Hasan HACIFAZLIOLU, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Turkey  
hasanh@istanbul.edu.tr

Dr. Mithat ÇELEBİ, Yalova University, Turkey  
mithat.celebi@yalova.edu.tr

Dr. Harun GÜL, Sakarya University of Applied Sciences, Turkey  
harungul@subu.edu.tr

Dr. Zafer Ömer ÖZDEMİR, University of Health Sciences, Turkey  
ozdemirz@gmail.com

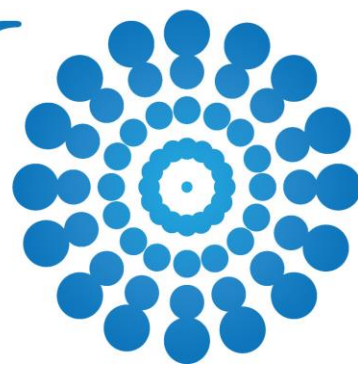
Dr. Numan GÖZÜBENLİ, Harran University, Turkey  
gnuman@harran.edu.t

### Support

Halid ÖZGÜR, FreshForty Media, Turkey  
halid@freshforty.media

OPEN JOURNAL OF

NIAN



## Contents

**Volume: 6, Issue: 1, Year: 2021**

**Hydrogen Storage Methods**

(Review)

1-10

Cihan KOŞAR

**Recovery of Palladium from Spent Plating Solutions Using Zinc Powder**

(Research Article)

11-20

Furgan DEMİRKIRAN , Mustafa AKÇİL

**Effects of Metallurgical Silicon Carbide and Ferro Silica Additives on**

**Materials in Gray Cast Iron Production**

(Research Article)

21-35

Mehmet Cemil PEKŞEN

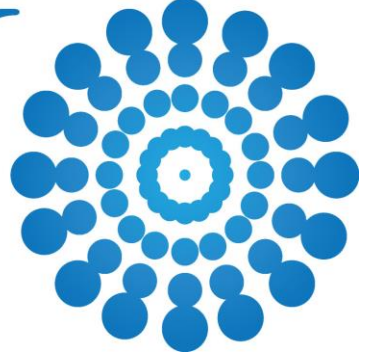
**Determination of Optimum Insulation Thickness of Building Exterior Wall for**

**Gumushane Province Based on Life Cycle Cost Analysis**

(Research Article)

36-46

Meryem TERHAN



## İçindekiler

**Cilt: 6, Sayı: 1, Yıl: 2021**

**Hidrojen Depolama Yöntemleri**  
(Derleme)

Cihan KOŞAR  
1-10

**Atık Paladyum Kaplama Çözeltilerinden Paladyum Geri Kazanımı**  
(Araştırma Makalesi)

Furgan DEMİRKIRAN , Mustafa AKÇİL  
11-20

**Gri Dökme Demir Üretiminde Metalürjik Silisyum Karbür Ve Ferro Silis Katkılarının**  
**Malzeme Üzerindeki Etkileri**  
(Araştırma Makalesi)

Mehmet Cemil PEKŞEN  
21-35

**Gümüşhane İli İçin Bina Dış Duvarı Optimum Yalıtım Kalınlığının Yaşam Döngüsü**  
**Maliyet Analizine Göre Belirlenmesi**  
(Araştırma Makalesi)

Meryem TERHAN  
36-46

## Hydrogen Storage Methods

<sup>1</sup>Cihan Koşar 

<sup>1</sup> Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya, Turkey  
Corresponding author, e-mail: cihankosar@gmail.com

Submission Date: 17.05.2021

Acceptation Date: 07.07.2021

**Abstract** - With the developing technology, the energy need of the world is increasing day by day. Oil and natural gas reserves, which are widely used today, are running out with each passing day. In the next 35 years, it is estimated that oil will not meet the world's energy needs. Various researches are carried out to meet the increasing energy and fuel needs. Among these researches, the fuel with the highest potential to meet the energy needs of the world in the future is hydrogen. Because in fuel cell cells operating with hydrogen, unlike internal combustion engines, no carbon, nitrogen or sulfur oxide is released to the nature. This situation highlights hydrogen as the fuel of the future.

**Keywords:** Hydrogen, Hydrogen storage, Energy storage

## Hidrojen Depolama Yöntemleri

**Öz** - Gelişen teknolojiyle birlikte dünyanın enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan petrol ve doğalgaz rezervleri her geçen gün tükenmektedir. Önümüzdeki 35 yıl içerisinde petrolün dünya enerji ihtiyacını karşılayamaz seviyeye gelmesi tahmin edilmektedir. Artan enerji ve yakıt ihtiyacının karşılanabilmesi için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar arasında gelecekte dünyanın enerji ihtiyacını karşılayabilme konusunda potansiyeli en yüksek olan yakıt hidrojenidir. Çünkü hidrojen ile çalışan yakıt pili hücrelerinde, içten yanmalı motorların aksine doğaya herhangi bir karbon, nitrojen veya sülfür oksit salınmamaktadır. Bu durum hidrojeni geleceğin yakıtı olarak öne çıkarmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Hidrojen, Hidrojen depolama, Enerji depolama

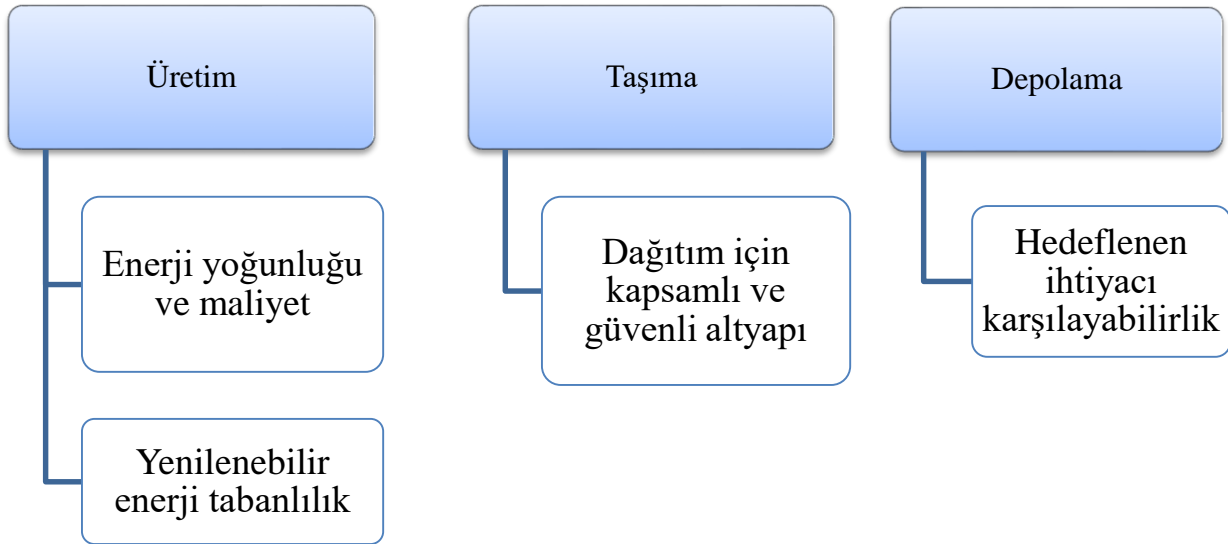
### 1. Giriş

Hidrojen, Yunanca su yapan anlamına gelen “İdrogono” kelimesinden türemiştir. Sembölü H ve atom sayısı 1 olan bir ametaldir. Standart sıcaklık ve basınç altında renksiz, kokusuz, metalik olmayan, tatsız, oldukça yanıcı ve H<sub>2</sub> olarak bulunan bir gazdır. Hidrojen havadan 14,4 kat daha hafif ve tamamen zehirsiz bir gazdır. Hidrojen, bilinen evrenin kütlelerinin %75'ini oluşturur ve evrende en bol miktarda bulunan elementtir. Hidrojen, enerji verimliliği oldukça yüksek ve doğa dostu bir yakıt kaynağıdır.

2015 yılı itibariyle, dünyanın enerji ihtiyacının % 80'inden fazlası fosil yakıt kaynaklarından sağlanıyor. Fosil yakıtlar, ulaştırma sektöründeki aşırı kullanımı nedeniyle insanoğlunun dayandığı en kritik enerji kaynağıdır ve tahminlere göre yirmi birinci yüzyılın sonundan çok önce tükenmesi

beklenmektedir[1][2]. Bunun yanı sıra fosil yakıtların kullanımı kaynaklı hava kirliliği ve petrol sızıntıları gibi sorunlar ayrıca ele alınması gereken ciddi bir durumdur. Fosil yakıtların yanması doğaya karbon, nitrojen veya sülfür oksit salınımına ve hava kirliliğine sebep olmaktadır. Hava kirliliği tüm canlı yaşamı tehdit ettiği gibi özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde insan sağlığını da tehdit etmektedir. Öte yandan, büyük ölçekli petrol sızıntıları, su yaşamında on yıllarca süren yıkıcı etkilere sebep olabilmektedir[3].

Hidrojen, petrolün yerini alacak güçlü adaylardan biri olarak kabul edilir. Hidrojen, petrol gibi bir enerji kaynağı değil, bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen dünyada direkt olarak kullanılabilir halde bulunmaz, ancak başka kaynaklar kullanılarak üretilir. Şu anda, hidrojenin önemli bir kısmı metandan buhar metan reformu (SMR) işlemi yoluyla üretilmektedir. Hidrojen üretiminin diğer yöntemlerinden biri su elektrolizidir. Hidrojen üretildikten sonra, son kullanıcıya veya dağıtım tesisine taşınması gerekir ve son olarak hidrojenin daha sonra kullanılmak üzere depolanması gerekir. Bu üç aşama - hidrojenin üretimi, taşınması ve depolanması - hep birlikte hidrojen ekonomisi (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**) olarak adlandırılır[4].



Şekil 1. Hidrojen Ekonomisi[4]

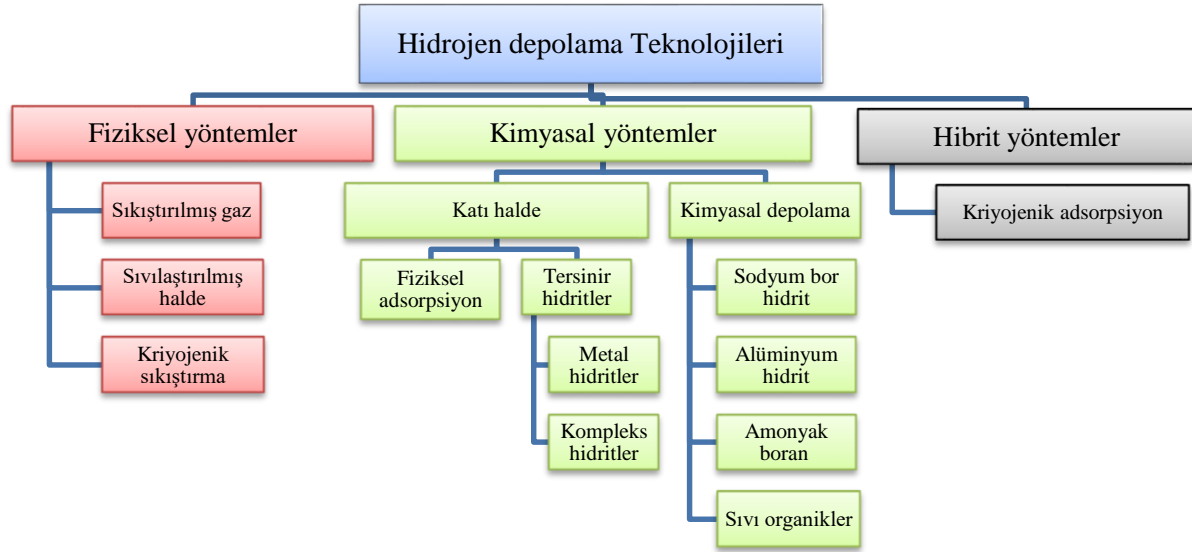
Kütle bazında hidrojen, benzinin enerji içeriğinin yaklaşık üç katına sahiptir. Hidrojen 120 MJ/kg, iken benzin 44 MJ/kg enerji içeriğine sahiptir. Hacim bazında ise durum tersinedir; sıvı hidrojenin yoğunluğu 8 MJ/L iken benzinin yoğunluğu 32 MJ/L'dir.

Hidrojen, günümüzde en verimli (% 83) ve uygun maliyetli (0.75 \$/kg hidrojen) seçenek olan SMR işlemi ile üretilmektedir. Diğer bir hidrojen üretim yöntemi olan yenilenebilir enerji tabanlı üretim yöntemi fotokatalitik su ayırma % 10-14 verimliliğe sahiptir ve 4,98 \$/kg hidrojen maliyeti ile henüz SMR ile rekabet edebilir durumda değildir[5]. Hidrojenin taşınması kapsamlı bir dağıtım ağı gerektirir. Hidrojen, boru hatları, tüp römorkları, gaz formunda silindirler ile ve sıvı formda kriyojenik tanklarla taşınabilir. Hidrojen yüksek enerji kapasitesine sahip olmasına karşın düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Sıkıştırma ve sıvılaştırma enerji yoğunluğunu artırabilir, fakat bu işlem oldukça maliyetlidir[6]. Hidrojenin ucuz ve güvenli şekilde depolanması günümüzün önemli bir sorunudur. Özellikle yakıt pili ile çalışan elektrikli araçlarda hidrojenin depo edilmesi oldukça zordur. Günümüz itibarıyla, DOE(U.S. Department of Energy) 2020 hedeflerini[7] karşılayabilecek bir hidrojen depolama teknolojisi yoktur.

Hidrojen depolama teknolojileri, sıkıştırılmış hidrojen depolama, sıvılaştırılmış hidrojen depolama, katı hal hidrojen depolama ve kimyasal hidrojen depolama olarak gruplandırılabilir. Bu yöntemler arasında sıkıştırılmış hidrojen depolama teknolojisi en efektif teknolojidir[4].

## 2. Malzeme ve Yöntem

Mevcut yakıtlar içerisinde kalorisi en yüksek yakıt olan hidrojendir. Hidrojenin hafif bir element olması ve 1 gram hidrojen gazının normal atmosfer basıncında yaklaşık 11 litrelik bir hacim kaplaması hidrojen depolamanın zorluğunu arttırmaktadır[8]. Günümüzde yüksek miktarlarda hidrojen depolamak için hala uygun bir yöntem bulunamamış olması, hidrojen depolama çalışmalarının önemini arttırmaktadır. Çeşitli hidrojen depolama teknolojileri **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** de verilmiştir.



Hidrojenin depolama yöntemlerine göre enerji yoğunlukları değişkenlik göstermektedir. Farklı

Şekil 2 Hidrojen depolama teknolojileri[4]

depolama şekillerine göre depolanabilecek hidrojen miktarı ve enerji yoğunlukları Tablo 1. ' de verilmiştir. Görüldüğü üzere birim hacimde depolanabilecek hidrojen açısından hibrit depolama yöntemi diğer yöntemlere oranla oldukça üstündür.

**Tablo 1.** Hidrojen depolama teknolojilerin güncel durumları[9]

Depolama Türü	Depolama Şekli	Gravimetrik Kapasite (wt.%)	Volumetrik kapasite (g/L)
Fiziksel	Sıkıştırılmış (350bar)	2,8 - 3,8	16 - 18
	Sıkıştırılmış (700bar)	2,6 - 4,4	19 - 25
	Sıvı	4,8 - 6,8	31 - 39
Kimyasal	Kompleks hidrit	1,9 - 2,5	16 - 28
	Karbon(poroz)	2,9 - 3,1	13 - 15
	Kimyasal hidrit	2,6 - 3,5	22 - 29
Hibrit	Kriyojenik Sıkıştırılmış	5,0 - 5,8	28 - 38
Hedef	2020	5,2	40
	Nihai	7	70

## 2.1. Fiziksel Hidrojen Depolama Yöntemleri

### 2.1.1. Sıkıştırılmış Gaz Halinde Depolama

Hidrojen gazının 1 gramı atmosferik basınç altında 11 litre hacim kaplamaktadır. Bu sebepten dolayı hidrojeni gaz olarak depolamak çok büyük hacimler ve basınçlar gerektirmektedir. Hidrojen, genellikle 50 litrelik silindirik tanklarda 200-250 barlık basınç altında depolanmaktadır (bu basınç değeri 600-700 bar'a kadar çıkabilir). Hidrojen çok hafif olduğundan dolayı hacimsel enerji yoğunluğu oldukça düşüktür. Bunun haricinde, yüksek basınç nedeniyle depolama tankları çok ağır olmaktadır. Bu durum, hidrojenin taşınmasını olumsuz etkilediği gibi hidrojenden alınacak olan verimi de düşürmektedir. [8][10]. Çelik tanklar kullanılarak elde edilebilen gravimetrik yoğunluk % 1,5 civarındadır. Hacimsel yoğunluk ise 10–12 kg / m<sup>3</sup> tür [11]. Kompozit tanklar ile bu oranlar Tablo 1'de belirtilen seviyelere çıkarılmaktadır.

Hidrojen yakıtlı araç, benzinli / dizel motorlu araçlarda olduğu gibi 500 km menzile sahip olmalıdır. Bu menzile ulaşabilmek için, araç boyutuna bağlı olarak tank içerisinde 4-7 kg hidrojen depolanması gerekir. Sıkıştırılmış gaz halinde hidrojen depolama yöntemi şu ana kadar otomotiv endüstrisi tarafından ticari olarak benimsenen tek yöntemdir [12].

Sıkıştırılmış gaz halindeki hidrojen depolamanın dezavantajlarından biri, sıkıştırma işi sırasında harcanan enerjidir. Hidrojeni 35 MPa' da depolamak için hidrojenin %12'si harcanır. 70 MPa' lık tanklarda bu oran %15' e kadar çıkmaktadır. Sıkıştırma esnasında, sıcaklığı ve basıncı güvenli seviyelerde tutmak ve mümkün olduğunca çok hidrojen depolamak için hidrojen tankının soğutulması gerekir. Soğutma işlemi de enerji sarfiyatını artıracaktır. Hem sıkıştırma hem de soğutmanın enerji sarfiyatı dikkate alındığında, sıkıştırma maliyetinin hidrojen sıvılaştırma maliyetinden daha yüksek olacağı tahmin edilmektedir [4][13].

### 2.1.2. Sıvılaştırılmış Halde Depolama

Diğer fiziksel depolama yöntemi, sıvılaştırılmış hidrojen depolamadır. Tablo 1'de gösterildiği gibi, sıkıştırılmış gaz halinde depolamaya kıyasla bu yöntem kullanılarak yüksek gravimetrik ve hacimsel yoğunluk elde edilebilir. Sıvılaştırılmış hidrojen depolama tankı basıncı, sıkıştırılmış hidrojen depolamaya kıyasla çok daha düşüktür (<1 MPa). Bu da sıkıştırılmış hidrojen depolamada kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit tank maliyetini ortadan kaldırır. Öte yandan, sıvılaştırma için gerekli enerji ve kaynama kayıpları bu depolama yönteminin dezavantajlarıdır [4].

Sıvı hidrojen 71 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahiptir. Hidrojeni sıvı hale getirip depolayabilmek için -253°C' ye soğutmak gerekir. Mevcut teknolojiyle hidrojeni -253°C' ye soğutup depolamak oldukça maliyetli ve uzun zaman almaktadır. Ayrıca sıvı depolarının çok iyi ısı yalıtımına sahip olması gerekmektedir. Ayrıca depolama tankı ile sıvı hidrojenin ağırlık oranı %26 civarındadır. Sıvı hidrojen günümüzde uzay teknolojisi ve yüksek enerjili nükleer fizik uygulamalarında kullanılmaktadır. [8]

### 2.1.3. Kriyojenik Sıkıştırma ile Hidrojen Depolama (Cryo-Compressed)

Kriyojenik sıkıştırılmış hidrojen depolaması, hidrojeni yüksek basınçlarda ve kriyojenik sıcaklıklarda (yani -140°C ve altı sıcaklıklar) depolamaya dayanır. Bu yöntem, sıkıştırılmış gaz ve sıvılaştırılmış hidrojen depolama teknolojilerinin en kritik dezavantajlarının üstesinden gelir. Sıkıştırılmış hidrojen depolamasının eksikliklerinden biri, yüksek basınçlarda (yani 70 MPa) bile hidrojenin düşük gravimetrik ve hacimsel yoğunluğudur.

Sıvılaştırılmış hidrojen depolaması düşünüldüğünde, hidrojenin kaynama kaybı da önemli bir konudur. Sıvı hidrojen tankları düşük basınçlı tanklardır ve maksimum çalışma basıncı 1 MPa civarındadır; dolayısıyla, sıvı hidrojen tanklarının en fazla birkaç günlük bir uyku süresi vardır. Yüksek basınç kabiliyetine sahip kriyojenik tanklar kullanılarak uyku süresi önemli ölçüde artırılabilir [14].



Kriyojenik basınçlı tank tasarımında iç kap, tipik olarak sıkıştırılmış gazların depolanması için kullanılan, alüminyum astarlı, karbon elyafla sarılmış bir basınçlı kaptır. Bu kap, kaba ısı transferini en aza indiren ve paslanmaz çelikten bir dış kılıfla dolu bir vakum boşluğu ile çevrilidir. Dış tank 129 cm uzunluğunda ve 58 cm çapındadır.[14] Kriyojenik sıkıştırılmalı hidrojen depolaması, mevcut yöntemler arasında en yüksek gravimetrik ve hacimsel yoğunluğa sahiptir(bkz. Tablo 1). Buna ek olarak, sıvılaştırılmış hidrojen depolamasının önemli bir eksikliği olan kaynama kayıplarını önemli ölçüde azaltır. Bu nedenle kriyojenik sıkıştırılmalı hidrojen depolama, gelecek vaat eden bir hidrojen depolama teknolojisi olarak kabul edilir[4].

## 2.2. Kimyasal Hidrojen Depolama Yöntemleri

### 2.2.1. Katı Halde Hidrojen Depolama

Katı halde hidrojen depolama yöntemleri, hidrojen ile depolama malzemesi arasındaki etkileşimin gücüne, yani tersinir hidrüllere (güçlü etkileşimlere dayalı) ve fiziksel adsorpsiyon malzemelerine (zayıf etkileşimlere dayalı) dayalı olarak ikiye ayrılabilir. Ayrıca tersinir hidritler kendi aralarında metal hidritler ve kompleks hidritler olarak ikiye ayrılabilir.

#### Fiziksel Adsorpsiyon

Fiziksel adsorpsiyon yöntemi bazı kaynaklarda karbon nanotüplerde hidrojen depolama olarak anılmaktadır. Poroz malzemeler, düzenli (yani zeolitler) ve amorf (yani aktif karbon) yapıları sahip çok çeşitli organik ve inorganik malzemelerdir. Poroz malzemeler, tersinirlik, ümit verici gravimetrik depolama kapasitesi ve hızlı soğurma kinetikleri nedeniyle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Hidrojenin fiziksel adsorpsiyon ile depolanması olayı, zayıf van der Waals kuvvetlerine dayanan adsorpsiyon yoluyla poroz malzeme yüzeyiyle etkileşimi sonucu depolanması şeklinde olur. Gözenekli malzemelerin hidrojen depolama kapasitesini belirleyen en önemli parametreler yüzey alanı, gözenek hacmi, gözenek boyutu ve adsorpsiyon entalpisidir[4].

Fiziksel adsorpsiyon, aktif karbon, karbon nanofiberler ve karbon nanotüpler şeklinde yapılabilmektedir. Aktif karbon, oldukça yüksek gözenek yapısına sahip karbonlu malzemeler olarak tanımlanabilmektedir. Hidrojen, yüksek gözenek hacmine sahip aktif karbonun mikro gözenekleri arasında depolanmaktadır. Fakat bu gözeneklerde depolama için yüksek basınç gereklidir.

Karbon nanofiberler, belirli bir yönde yerleştirilmiş grafit parçalardan oluşmaktadır. Boyları 5-100 µm ve çapları 5-500 nm arasında değişmektedir. Karbon nanotüplerin enerji depolamada kullanılmasını düşündüren temel avantajları boyutlarının küçük olması, düzgün yüzey topolojisi ve mükemmel yüzey özellikleridir. Özellikle hidrojen depolama konusunda karbon nanotüplerin kapiler etkilerin yardımı ile iç boşluklarında sıvı veya gaz halde hidrojeni depolayabileceği düşünülmektedir[15].

#### Metal Hidritler

Metal hidritler, hidrojen molekülünün metal yüzey üzerinde ayrışması ve ardından hidrojen atomlarının kristal kafese göç etmesi ile oluşur[16]. Metal hidritlerin başlıca dezavantajları, düşük gravimetrik yoğunlukları, yüksek çalışma sıcaklıklarıdır. Metal hidritler arasında  $MgH_2$ , yüksek gravimetrik kapasitesinden (ağırlıkça% 7,6) dolayı büyük ilgi görmüştür.  $MgH_2$ 'deki kimyasal bağ hem iyonik hem de kovalent karakter gösterir. Bu nedenle,  $MgH_2$  oldukça yüksek bir çalışma sıcaklığına sahiptir (bkz. Tablo 2) [17].

Metaller	Hidritler	Kapasite (wt.%)	1 bar H <sub>2</sub> için sıcaklık (°C)
LaNi <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	1,37	12
FeTi	FeTiH <sub>2</sub>	1,89	-8
Mg <sub>2</sub> Ni	Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	3,59	255
ZrMn <sub>2</sub>	ZrMn <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,77	440
Mg	MgH <sub>2</sub>	7,60	279

**Tablo 2** En çok çalışılan metal hidritlerin bazı özellikleri[18]

### Kompleks Hidritler

Kompleks hidritler(alanatlar), yüksek hidrojen içeriklerine rağmen geri dönüşümlü olmadıkları düşünüldüğünden hidrojen depolaması için kullanılmamıştır. 1997'de Bogdanovic ve Schwickardı'nın keşfi NaAlH<sub>4</sub>'ün geçiş metali bazlı katalizörlerin eklenmesiyle dehidre edilebilir olduğunu keşfetmişlerdir. Borohidritler, Li-N tabanlı ve magnezyum bazlı nanokompozitler, hidrojen depolama araştırmalarının en aktif alanıdır[4]. Özellikle son 10 yıldır depolama kapasitelerinin yüksek olması sebebi ile alüminyum ve bor içeren kompleks hidritler yoğun olarak çalışılmaktadır. Çalışmalar ağırlıklı olarak sodyum alüminyum hidrit üzerinde yoğunlaşmakla beraber Na<sub>2</sub>LiAlH<sub>6</sub> gibi daha kompleks alanatları konu alan çalışmalarda da mevcuttur[19].

#### 2.2.2. Kimyasal Olarak Hidrojen Depolama

Kimyasal hidrojen depolama yöntemleri sodyum borohidrit(NaBH<sub>4</sub>), alüminyum hidrit(AlH<sub>3</sub>), amonyak boran(NH<sub>3</sub> - BH<sub>3</sub>) ve sıvı organikler olarak dört kısma ayrılabilir. Kimyasal hidrojen depolama yöntemleri katı halde depolama yöntemlerinin aksine tersinir değildir.

#### Sodyum Borohidrit

Sodyum borohidrit (NaBH<sub>4</sub>), hidroliz reaksiyonu yoluyla hidrojeni serbest bırakır. Reaksiyonda görüldüğü gibi hidrojenin yarısı sudan gelir:



NaBH<sub>4</sub>, ağırlıkça ve hacimce yüksek seviyede hidrojen depolama yoğunluğuna sahiptir. Tablo 3'te ağırlıkça depolama yöntemleri ve hacimsel depolama verimi açısından NaBH<sub>4</sub>, sıvı H<sub>2</sub> ve sıkıştırılmış H<sub>2</sub> karşılaştırılmaktadır. NaBH<sub>4</sub>'ün diğer yöntemlere kıyasla daha avantajlı olduğu açıkça görülmektedir.

**Tablo 3** H<sub>2</sub> hacimsel depolama verimliliği karşılaştırılması[20].

Depolama Metodu	Depolama Özellikleri	Hacimsel Depolama Verimi
NaBH <sub>4</sub>	Ağırlıkça %30'luk çözelti	~ 63 g H <sub>2</sub> /L
Sıvı H <sub>2</sub>	Kriyojenik	~ 71 g H <sub>2</sub> /L
Sıkıştırılmış H <sub>2</sub>	5000 psi	~ 23 g H <sub>2</sub> /L
	10000 psi	~ 39 g H <sub>2</sub> /L

$\text{NaBH}_4$  teorik olarak ağırlıkça % 10,8 hidrojen depolama kapasitesine sahiptir. Pratikte ağırlıkça % 2,9–7,5 arasında olduğu bilinmektedir.  $\text{NaBH}_4 - \text{H}_2\text{O}$  sistemiyle ilişkili iki ana sorun vardır Birincisi,  $\text{NaBH}_4$  ve  $\text{NaBO}_2$ 'nin sudaki düşük çözünürlüğünden dolayı depolanacak fazla su miktarıdır. İkincisi ise, yavaş reaksiyon hızıdır[21].

### Alüminyum Hidrit

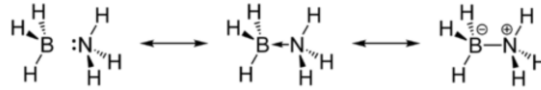
Alüminyum hidrit, hidrojen yakıtlı araçlarda hidrojenin depolanması için tartışılmıştır. 148g/L'ye karşılık gelen  $\text{AlH}_3$ , ağırlıkça %10'a kadar hidrojen içerir. Ancak,  $\text{AlH}_3$  geri dönüşümlü bir hidrojen depolayıcısı değildir[22].  $\text{AlH}_3$  az miktarda ısı girişi ( $\sim 7 \text{ kJ / mol}$ ) ile aşağıdaki endotermik reaksiyona göre hidrojen salgılar:



$\text{AlH}_3$ 'ün ana sorunu rejenerasyondur.  $\text{AlH}_3$ 'ün doğrudan rejenerasyonu oda sıcaklığında ciddi basınçlar ( $\sim 700 \text{ MPa}$ ) gerektirir[23].

### Amonyak Boran

Amonyak boran (AB), yanıcı olmayan ve patlayıcı olmayan beyaz katı bir kristaldir. AB Kütlece %19,6 hidrojen içermektedir. Suda çözünürlüğü yüksektir ve sulu çözeltilerde uzun süre kararlıdır. Toksik olmaması ve molekül ağırlığının ( $30,87\text{g/mol}$ ) düşük olmasından dolayı katı hidrojen depolama malzemesi olarak tercih edilmiştir. Oda sıcaklığında uygun katalizör ile 1mol AB'den 3mol  $\text{H}_2(\text{g})$  açığa çıkar. AB'den hidrojen farklı yöntemlerle açığa çıkarılabilir. Bun yöntemler; termoliz, dehidrojenlenme ve solvoliz (hidroliz ve metanoliz) yöntemleridir[24][25].



Şekil 3 Amonyak boran kompleksinin molekül yapısı[24]

### Sıvı Organikler

Hidrojeni ortam koşullarında depolamak için başka bir yöntem Sıvı Organik Hidrojen Taşıyıcılarıdır (LOHC). Bir hidrojen taşıyıcı olarak katı yerine sıvı kullanımının önemli avantajları vardır. Birincisi, mevcut altyapıları kullanarak son kullanıcılara kolaylıkla ulaştırılabilmesidir. İkincisi, gereken miktar kadar ısıtılıp reaksiyon odasına pompalanabilmesidir. Bu şekilde, hidrojen depolama malzemesinin tamamını ısıtmaya gerek kalmaz.

Tipik bir LOHC teorik olarak ağırlıkça % 6-8 hidrojen depolama kapasitesine sahiptir. Düşük depolama kapasitesi nedeniyle LOHC hidrojen depolama için nispeten daha az çalışılmış bir alandır[4]. Bir LOHC içindeki hidrojenin depolanması genel olarak karbon çift bağlarının tersine çevrilebilir hidrojenasyonuna ve dehidrojenasyonuna dayanır. Hidrojenasyon işlemi sırasında çift sınırlar hidrojen ile doyurulur. Bu süreç ekzotermiktir. Ayrıca yüksek sıcaklık ve basınçlarda gerçekleşmektedir. Dehidrojenasyon işlemi ise tam tersi ve endotermik reaksiyondur[26].

## 2.3.Hibrit Yöntemler

### 2.3.1. Kriyojenik Adsorpsiyon

Kriyojenik adsorpsiyon, hem fiziksel hem kimyasal bir yöntemdir[4]. Kriyojenik adsorpsiyonlu hidrojen depolama, hidrojeni poroz bir materyalde kriyojenik sıcaklıklarda ve yüksek basınç altında depolama prensibine dayanır. Sistemin hidrojen depolama kapasitesi, gözenekli malzemenin adsorpsiyon kabiliyetine bağlıdır. Bunun yanında yüzey alanı, gözenek hacmi ve adsorpsiyon ısısı, kriyojenik adsorpsiyon sistemlerinin depolama kapasitesini maksimize etmek için belirleyici faktörlerdir[27].

## 3. Sonuç

Tüm bu uygulamalarda hidrojenin verimli, kolay ve güvenilir şekilde depolanması büyük önem taşımaktadır. Hidrojen üretiminin mevcut koşullarda pahalı olması, depolama maliyetlerinin düşük olmasını gerektirmektedir. Mevcut alternatiflerin fiziksel veya kimyasal yöntemlerden hangi yönde gelişeceği her bir yöntemde oluşacak teknolojik gelişmelere bağlı olarak, maliyet ve kapasite temelli, şekillenmesi beklenmektedir.

Hidrojen depolama yöntemlerinde ABD Enerji Bakanlığı(DOE)'nin hedefleri şu şekildedir.

1.5 kWh/kg sistem (4.5 wt.% hidrojen)

1.0 kWh/L sistem (0.030 kg hidrojen/L)

\$10/kWh (\$333/kg depolanmış hidrojen kapasitesi)

Hidrojenin gaz veya sıvı olarak depolanması, taşınması veya kullanımını mümkünse olsa da gaz fazında depolama çok büyük hacimler gerektirmektedir. Sıkıştırma nedeniyle depolanan hidrojen enerjisinin % 15'ine kadarı sıkıştırma için harcanır. Ayrıca yüksek basınçlı depolama tankına ihtiyaç duyulur ve bu tanklar çok maliyetli olan dokuma karbon nanoliflerden imal edilmektedir. Bu da hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının düşünüldüğü cihaz ve taşıtların anormal ölçülerde olmasına yol açmaktadır.

Sıvı olarak depolama hem çok yüksek basınç hem de yüksek maliyet ortaya çıkarmaktadır. Depolanan hidrojen enerjisinin % 30'u sıvılaştırma için harcanır. Çevreden ısı geçişini en aza indirmek için sıvı hidrojen tankı çok iyi yalıtılmalıdır.

Katı hal hidrojen depolama yöntemlerinin hidrojen depolama kapasitesi diğer depolama yöntemlerine kıyasla nispeten düşük kalmaktadır.

Tüm bu yöntemlere oranla hibrit hidrojen depolama yöntemleri en verimli depolama yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. ABD Enerji Bakanlığı(DOE)'nin 2020 hedeflerine en yakın hidrojen depolama teknolojisi hibrit hidrojen depolama yöntemidir. Hibrit hidrojen depolama yöntemleri, her bir yöntemin ayrı ayrı eksikliklerinin üstesinden gelmek üzere tasarlanmaktadır. Bu sebepten dolayı hibrit hidrojen depolama teknolojilerinin önümüzdeki yıllarda daha da gelişmesi beklenmektedir.

## Referanslar

- [1] R. P. Oliveira, N. R. Singh, F. Ribeiro, W. N. Delgass, and R. Agrawal, "Sustainable fuel for the Brazilian transportation sector," *AIChE Annu. Meet. Conf. Proc.*, vol. 2007, 2008.
- [2] R. A. Kerr, "Peak oil production may already be here," *Science (80-. )*, vol. 331, no. 6024, pp. 1510–1511, 2011, doi: 10.1126/science.331.6024.1510.
- [3] I. A. Mendelssohn *et al.*, "Oil impacts on coastal wetlands: Implications for the Mississippi River delta ecosystem after the deepwater horizon oil spill," *Bioscience*, vol. 62, no. 6, pp. 562–574, 2012, doi: 10.1525/bio.2012.62.6.7.
- [4] D. E. Demirocak, "Hydrogen Storage Technologies," *Nanostructured Mater. Next-Generation Energy Storage Convers. Hydrog. Prod. Storage, Util.*, pp. 117–142, 2017, doi: 10.1007/978-3-662-53514-1.
- [5] H. F. Abbas and W. M. A. Wan Daud, "Hydrogen production by methane decomposition: A review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1160–1190, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.036.
- [6] R. Gerboni and E. Salvador, "Hydrogen transportation systems: Elements of risk analysis," *Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2223–2229, 2009, doi: 10.1016/j.energy.2008.12.018.
- [7] "DOE Technical Targets for Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Vehicles." [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-onboard-hydrogen-storage-light-duty-vehicles>. [Accessed: 08-Nov-2020].
- [8] P. Sabaz, "Hidrojen depolama için mandalina kabuğundan aktif karbon üretimi," 2018.
- [9] "Status of hydrogen storage technologies." [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/status-hydrogen-storage-technologies>. [Accessed: 08-Nov-2020].
- [10] I. Ar, M. cengi. Taplamacıoğlu, and F. Ar, "Hidrojen Depolama Amacıyla Kimyasal Yöntemle Metal Hidrat Sentezi," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [11] B. P. Tarasov, M. V. Lototskii, and V. A. Yartys', "Problem of hydrogen storage and prospective uses of hydrides for hydrogen accumulation," *Russ. J. Gen. Chem.*, vol. 77, no. 4, pp. 694–711, 2007, doi: 10.1134/S1070363207040329.
- [12] C. W. Hamilton, R. T. Baker, A. Staubitz, and I. Manners, "B–N compounds for chemical hydrogen storage," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 38, no. 1, pp. 279–293, 2009, doi: 10.1039/b800312m.
- [13] L. Zhou, "Progress and problems in hydrogen storage methods," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 9, no. 4, pp. 395–408, 2005, doi: 10.1016/j.rser.2004.05.005.
- [14] S. M. Aceves *et al.*, "High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1219–1226, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.069.
- [15] A. Şenyer, "Metal katkılı karbon nanotüplerde hidrojen adsorpsiyonu," 2013.
- [16] D. Chandra, J. J. Reilly, and R. Chellappa, "Metal Hydrides for Vehicular Applications: The State of the Art," no. February, 2006.
- [17] T. Noritake *et al.*, "Chemical bonding of hydrogen in MgH<sub>2</sub>," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 11, pp. 2008–2010, 2002, doi: 10.1063/1.1506007.
- [18] G. Principi, F. Agresti, A. Maddalena, and S. Lo Russo, "The problem of solid state hydrogen storage," *Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2087–2091, 2009, doi: 10.1016/j.energy.2008.08.027.

- [19] M. Güvendiren and T. Öztürk, “Enerji kaynağı olarak hidrojen ve hidrojen depolama.”
- [20] A. Yılmaz and S. Şevik, “Sodyum Borhidrür (  $\text{NaBH}_4$  ) Destekli Bir Hidrojen / Hava PEM Yakıt Hücresi İle Elektrik Üretiminin Deneysel Analizi,” vol. 7, no. 2, pp. 216–227, 2017.
- [21] U. B. Demirci, O. Akdim, J. Andrieux, J. Hannauer, R. Chamoun, and P. Miele, “Sodium Borohydride Hydrolysis as Hydrogen Generator : Issues , State of the Art and Applicability Upstream from a Fuel Cell,” no. 3, pp. 335–350, 2010, doi: 10.1002/fuce.200800171.
- [22] J. Graetz, J. Reilly, G. Sandrock, J. Johnson, W. M. Zhou, and J. Wegrzyn, “Aluminum Hydride,  $\text{AlH}_3$ , As a Hydrogen Storage Compound,” 2006.
- [23] J. Graetz, “2009 Renewable Energy issue energy research New approaches to hydrogen storage,” no. 1, 2009, doi: 10.1039/b718842k.
- [24] K. Güngörmez, “Amonyak Boran’ın dehidrojenlenmesi için oldukça aktif ve ekonomik bir katalizör olarak indirgenmiş grafen oksit desteklenmiş  $\text{Cu}_3\text{Pd}$  alaşım nanopartikülleri,” 2015.
- [25] A. Staubitz, A. P. M. Robertson, and I. Manners, “Ammonia-Borane and related compounds as dihydrogen sources,” *Chem. Rev.*, vol. 110, no. 7, pp. 4079–4124, 2010, doi: 10.1021/cr100088b.
- [26] M. Niermann, A. Beckendorff, M. Kaltschmitt, and K. Bonhoff, “Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 13, pp. 6631–6654, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.199.
- [27] H. Frost, T. Düren, and R. Q. Snurr, “Effects of Surface Area, Free Volume, and Heat of Adsorption on Hydrogen Uptake in Metal–Organic Frameworks,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 110, no. 19, pp. 9565–9570, 2006, doi: 10.1021/jp060433+.

## Recovery of Palladium from Spent Plating Solutions Using Zinc Powder

\*<sup>1</sup>Furgan Demirkıran , <sup>1</sup>Mustafa Akçıl

<sup>1</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Met. and Mat. Eng., Sakarya,  
Turkey.

Corresponding author e-mail\*: <mailto:mfd@mc365.com.tr>

Submission Date: 26.05.2021

Acceptation Date: 23.09.2021

**Abstract-** The palladium plating solution is used to decorate various jewelry products such as rings, earrings, bracelets, and necklaces. The solution with 2g/L palladium is sold as a commercial product. These baths are usually amine-based baths. This study aims to recover and purify the palladium metal from the waste palladium plating solution by selecting suitable parameters with high efficiency in an environmentally friendly, cheap, simple, and industrial application. Pure zinc powder was used as the cementator for the recovery of metallic palladium from palladium plating solutions in the form of an amine-palladium complex. In the case hardening experiments, the amount of cementator, reaction time, and temperature were examined as test parameters. Palladium analyzes were performed with ICP-OES; in addition, XRF and SEM analyses were also performed to characterize the palladium produced due to the cementation experiments. As a result of the experiments, palladium metal was obtained from plating solutions containing palladium with high purity by cementation. The product obtained can be turned into a palladium plating solution again by refining. Although there exists various information in the literature about the recovery of zinc and palladium used in the cementation process, the information on the cementation conditions is minimal. Within the framework of this study, it is aimed to contribute to the literature by illuminating the missing points about palladium chemistry. The palladium plating solution is used to decorate various jewelry products such as rings, earrings, bracelets, and necklaces. The solution with 2g/L palladium is sold as a commercial product. These baths are usually amine-based baths. This study aims to recover and purify the palladium metal from the waste palladium plating solution by selecting suitable parameters with high efficiency in an environmentally friendly, cheap, simple, and industrial application. Pure zinc powder was used as the cementator for the recovery of metallic palladium from palladium plating solutions in the form of an amine-palladium complex. In the case hardening experiments, the amount of cementator, reaction time, and temperature were examined as test parameters. Palladium analyzes were performed with ICP-OES; in addition, XRF and SEM analyses were also performed to characterize the palladium produced due to the cementation experiments. As a result of the experiments, palladium metal was obtained from plating solutions containing palladium with high purity by cementation. The product obtained can be turned into a palladium plating solution again by refining. Although there exists various information in the literature about the recovery of zinc and palladium used in the cementation process, the information on the cementation conditions is minimal. Within the framework of this study, it is aimed to contribute to the literature by illuminating the missing points about palladium chemistry.

**Keywords:** Cementation, Palladium plating solution, XRF, ICP-OES

## Atık Paladyum Kaplama Çözeltilerinden Paladyum Geri Kazanımı

**Öz-** Paladyum kaplama çözeltisi yüzük, küpe, bileklik ve kolye gibi çeşitli takı ürünlerinin dekoratif amaçlarla kaplanmasında kullanılmaktadır. Ticari bir ürün olarak satılan bu çözelti; içerisinde 2g/L paladyum olacak şekilde kullanılmaktadır. Bu banyolar, genellikle amin bazlı banyolardır. Gerçekleştirilen bu çalışmada; atık paladyum kaplama çözeltisinden paladyum metalinin yüksek verimlerle uygun parametreler seçilerek, çevre dostu, ucuz, basit ve endüstriyel uygulamalarda yer alabilecek şekilde geri kazanılması ve saflaştırılması amaçlanmaktadır. Amin-paladyum kompleksi halinde bulunan paladyum kaplama çözeltilerinden metalik paladyum geri kazanımı için sementatör olarak saf çinko tozu kullanılmıştır. Sementasyon deneylerinde, sementatör miktarı, reaksiyon süresi ve sıcaklık deney parametreleri olarak incelenmiştir. Paladyum analizleri ICP-OES ile yapılmış olup aynı zamanda sementasyon deneyleri sonucunda üretilen paladyumu karakterize etmek için XRF ve SEM analizleri de yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda paladyum ihtiva eden kaplama çözeltilerinden paladyum metali sementasyon yoluyla yüksek saflıkta elde edilmiştir. Elde edilen bu ürün rafinasyon işlemi yapılarak tekrar paladyum kaplama çözeltisi haline getirilebilir. Sementasyon işleminde kullanılan çinko ile paladyum geri kazanımı hakkında literatürde çeşitli bilgiler bulunmasına rağmen sementasyon şartları hakkındaki bilgi son derece sınırlıdır. Gerçekleştirilen bu çalışma çerçevesinde paladyum kimyası hakkında eksik hususları aydınlatmak suretiyle literatüre katkı sağlanması hedeflenmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Sementasyon, Paladyum kaplama çözeltisi, XRF, ICP-OES

### 1. Giriş

Gelişen teknoloji ve metalurjik proseslerle birlikte platin grubu metallerin kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Kullanım ömrünü tamamlayarak atık sınıfına giren ve platin grubu metalleri içeren malzemelerin geri dönüşümü, değerli metallerin diğer metallerde bulunmayan kendilerine özgü üstün özelliklerinden, doğada az bulunurluklarından ve bunların sonucu olarak da yüksek fiyatlarından dolayı büyük önem teşkil etmektedir. Platin grubu metallerinin geri kazanımını gerçekleştiren işletme sayısının dünyada çok az olmasının yanı sıra, bu konuyla ilgili akademik çalışma da oldukça sınırlıdır.

Platin grubu metallerinden olan paladyum atom numarası 46 olan, yumuşak ve sünek bir metaldir. En sık rastlanan valans değerlikleri 0, +1, +2 ve +4'tür. Normal sıcaklıklarda oksidasyon direnci yüksek olan paladyum, özellikle hidrojenleşme ve oksidasyon reaksiyonlarında çok yüksek katalitik aktiviteye sahiptir. Bu bağlamda paladyumu ilginç kılan özelliklerden birisi de katalizör endüstrisinde kullanılmasını mümkün kılan, oda sıcaklığında hidrojeni kendi hacminin 900 kat fazlasına kadar soğurma yeteneğidir [1-3].

Paladyumun en yaygın kullanıldığı sektör otomobil katalizörleridir. Otomobil katalizörlerinde dünyadaki paladyum talebi 1993 yılında 23,5 tonken 2007 yılında 126 tona ulaşmıştır [4]. Elektronik endüstrisinde yaygınca kullanılan paladyum; diyot, transistör, mikroçip, karma devreler, yarıiletken bellekler gibi hemen hemen bütün elektronik parçalarda kullanılmaktadır. Tek tek bakıldığında miktarı her birinde çok az olsa da toplamda önemli bir miktar paladyumun elektronik sektöründe kendine yer bulduğu görülmektedir. Tüm bunların dışında bu çalışmanın da konusunu oluşturan dekoratif ve endüstriyel kaplama solüsyonlarında da paladyum kullanılmaktadır. Bu açıdan bakıldığında paladyum kuyum sektöründe de yoğun olarak kullanılmaktadır.

Paladyum geri kazanım yöntemlerine bakıldığında çözeltilerden metalik paladyum çöktürmeye yönelik redüktanlar [5] ve saflaştırma ve zenginleştirme amaçlı solvent ekstraksiyon prosesleri [6,7] kullanıldığı görülmüştür. Ancak bu prosesler şimdilik laboratuvar/pilot ölçekte denenmekte olup endüstriyel uygulamalar henüz geliştirmeye açık bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır, bu tür endüstriyel çalışmalar varsa da günümüzde ticari sır olarak saklı tutulmaktadır.



Platin grubu metalleri içinde en pahalı metallere biri olan paladyumun ülkemizde atık banyolarından geri kazanımının çok az olma nedeni teknolojik yetersizlikler ve paladyum kimyası alanındaki bilgi eksikliğidir. Paladyum geri kazanımı ülkemizde ve dünyada çok az sayıda firma tarafından yapılabilmektedir. Paladyum üretimi, işlenmesi ve atıklarının geri dönüşümü çok zor ve karmaşık olması ve paladyumun en pahalı metaller arasında olmasından dolayı yapılan çalışmalar firmalar tarafından gizli tutulmaktadır [8,9].

Bu çalışma kapsamında, atık kaplama çözeltilerinden paladyum geri kazanımına yönelik çalışmalar ve tatbik edilen deney serileri, metallerin sementasyon yoluyla geri kazanımı esasına dayanmaktadır. Yapılan çalışmada sementatör olarak ince taneli çinko kullanılmıştır. Sementasyon işlemi için incelenen parametreler sementatör miktarı, çözelti sıcaklığı, karıştırma zamanı ve karıştırma hızıdır. Deneyler sonucunda bu değişkenler arasından optimum şartlara sahip değişkenler belirlenmiştir.

## 2. Malzeme ve Yöntem

Deneyel çalışmalarda, tetraamin paladyum klorür  $[Pd(NH_3)_4][Cl_2]$  içerikli atık paladyum kaplama çözeltisi Kuyumcukent'te bulunan Say Ramat Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. Temin edilen atık kaplama çözeltisi homojen olarak karıştırılıp 10 litrelik bidonlarda saklanmıştır. Deneylerde kullanılan atık kaplama çözeltisinin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Atık paladyum kaplama çözeltisinin bileşimi

Elementler	Konsantrasyon (ppm)	Elementler	Konsantrasyon (ppm)
<b>Pd</b>	735,6	<b>Co</b>	0,141
<b>Fe</b>	10,21	<b>Ni</b>	0,368
<b>Na</b>	3,44	<b>Cu</b>	0,078
<b>Mg</b>	2,552	<b>Cr</b>	0,455
<b>Al</b>	0,62	<b>Mn</b>	0,027
<b>K</b>	0,184	<b>Zn</b>	1,023
<b>Si</b>	N/D*	<b>Pb</b>	N/D*
<b>Ca</b>	0,14	<b>Ce</b>	N/D*
<b>Ti</b>	2,577	<b>Pt</b>	N/D*
<b>V</b>	0,089	<b>Rh</b>	N/D*

\*Tayin edilemedi

Paladyum geri kazanımında sementatör olarak mikronize çinko tozu ( $<45\mu m$ , Merck, Almanya) kullanılmıştır. Deney serilerinde sementatör olarak kullanılan çinkonun tartımı Mettler Toledo marka XB 220A SCS model terazide, sementasyon deneyleri ise Mikrotest MCS 30 marka sıcaklık kontrollü çalkalamalı su banyosunda gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarını sağlıklı bir şekilde değerlendirebilmek ve olası deney hatalarının önüne geçmek amacıyla her bir deney şahitli (aynı numuneden hazırlanıp deney sonuçlarında bağıl farkın %5'in altında olması halinde ortalamalarının alınması) bir şekilde plastik falkon tüp (metal-free, Perkin Elmer, ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bağıl farkın %5'in üzerinde olması durumunda ilgili deney tekrarlanmıştır. Belirlenen deney parametrelerine uygun olarak hazırlanan numuneler çalkalamalı su banyosuna falkon tüp içerisinde yerleştirilip sementasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalkalamalı banyo işleminden sonra katı-sıvı ayrımı yapılan numunelere pH ölçümü (WTW pH 3110, Almanya) ve paladyum iyon konsantrasyonu ölçümü Perkin Elmer Avio 200 İndüktif Eşleşmiş Plazma- Optik Emisyon Spektrometresi ile yapılmıştır.

Çöktürülen paladyumun yüzde (%) cinsinden ifadesi aşağıda verilen matematiksel eşitlikle hesaplanmıştır:

$$\% \text{ Geri Kazanım} = ((C_i - C_f) / C_i) * 100 \quad (1)$$

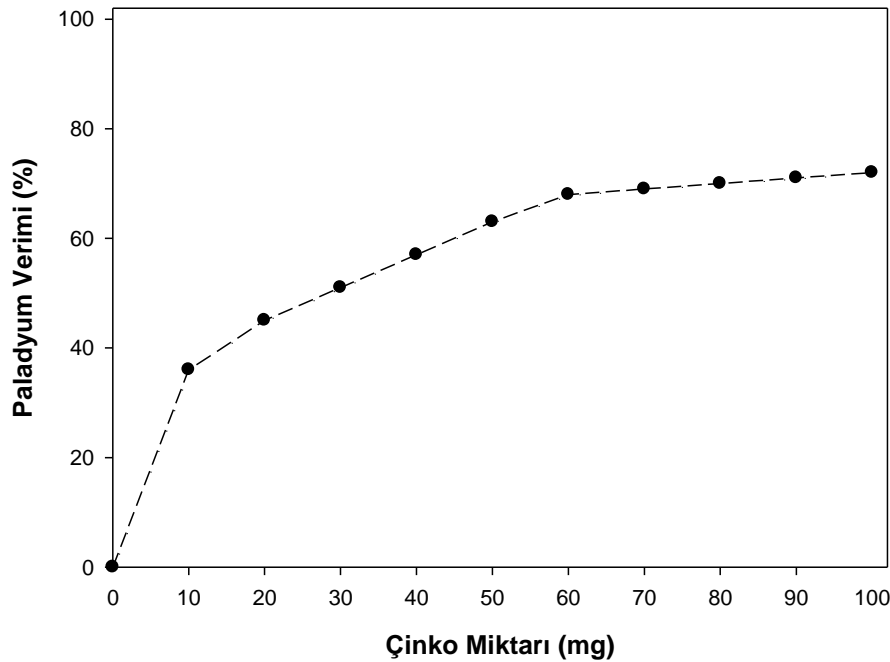
Burada  $C_i$  başlangıç paladyum konsantrasyonu (735,6 ppm),  $C_f$  ise deney sonrası çözeltide kalan paladyumu ifade etmektedir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Malzeme ve yöntem bölümünde belirtilen prosedür, tüm deney serilerinde farklı sıcaklık, süre ve değişen sementatör (çinko) miktarlarında tekrarlı olarak sementasyon serileri uygulanmış ve bu değerlerin ortalamaları alınarak ilgili tablolar ve grafikler oluşturulmuştur.

#### 3.1 Çinko (sementatör) miktarının etkisi

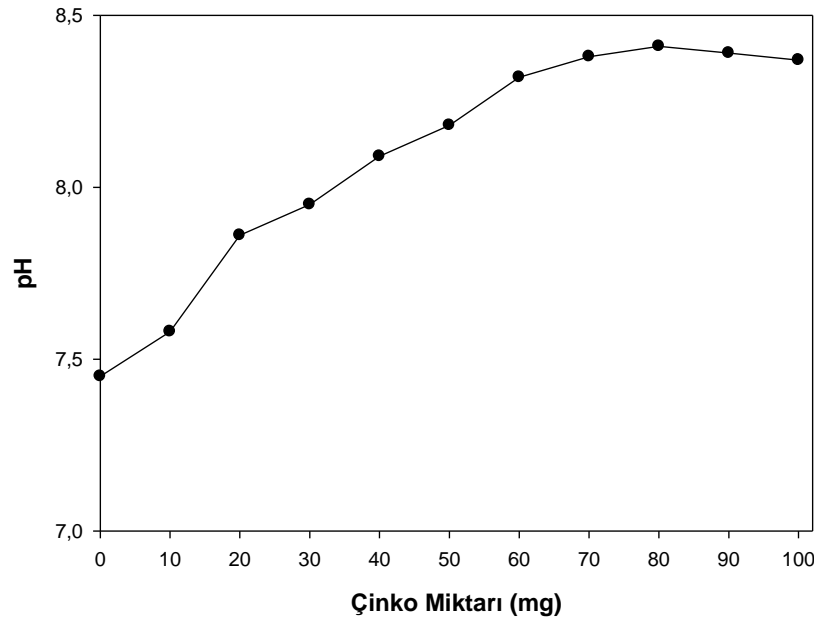
Bu deney serisinde; Pd (II) iyonlarının klorlu ortamda oda sıcaklığında (25°C) çeşitli miktarlardaki çinko tozu sementatörü ile (10-100 mg) indirgeme gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında elde edilen deney sonuçları Şekil-1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çinko (Zn) miktarının paladyum redükleme yüzdesine etkisi (10 mL, 25°C, 200 devir/dak., 60 dak.)

60 dakika boyunca farklı miktarlarda sementatör kullanılarak yapılan sementasyon işlemi sonucunda çinko miktarının artırılması ile sementasyon veriminin arttığı görülmüştür. Çözeltide bulunan kompleks paladyum iyonlarının daha fazla miktarda çinko ile teması reaksiyonu kinetik olarak hızlandırmaktadır. İdeal şartlarda stokiyometrik miktarda eklenecek sementatörün (Zn) çözeltideki tüm Pd iyonlarını çöktürmesi beklenmektedir fakat çöktürme süresinin kinetik faktörlere bağlı olması ve sementatörün (Zn) bir kısmı çözeltilinin bazik karakterli olmasından ve amin grubu içermesinden dolayı harcanarak yer değiştirme reaksiyonu göstererek çinko amin kompleksi oluşturarak pH'ın artmasına yol açmıştır .

Şekil-2'de artan sementatör miktarı ile pH değişimi grafiği yer almaktadır. Grafikten de görüldüğü üzere çinko miktarındaki artışla birlikte kaplama çözeltilisinin pH (7,45) değeri yükselmektedir. Ortamda bulunan paladyum-amin kompleksinin çinko ile yer değiştirmesi sonucunda pH değerinin artma eğiliminde olduğu gözükmektedir.



Şekil 2. Çinko (Zn) miktarının çözelti pH'ına etkisi (10 mL, 25°C, 200 devir/dak., 60 dak.)

Tablo-2'de sementasyon işleminde eklenen farklı miktarda çinkonun sementasyon için kullanılan, reaksiyona girmeyen ve amonyak tarafından tüketilen miktarları verilmiştir.

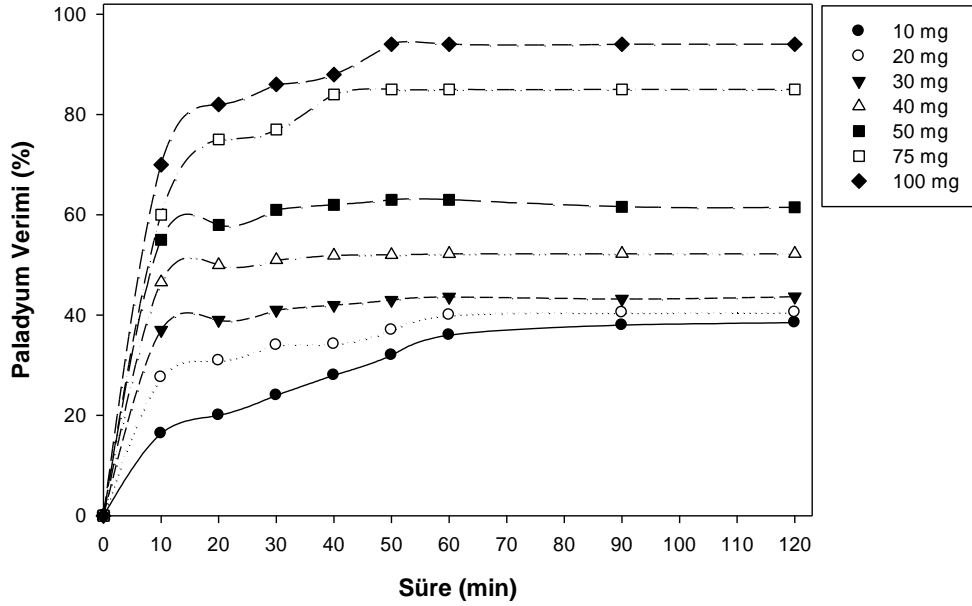
Tablo 2. Sementasyon işleminde Zn tüketimi ( 10 mL, 25°C, 200 devir/dak., 60 dak.)

Çinko Miktarı (mg)	Used for Pd Cementation (mg)	Consumed by Ammonia (mg)	Unreacted Zinc (mg)	Final pH
10	1,62	5,01	3,37	7.58
20	2,62	5,05	12,33	7.86
30	3,52	5,36	21,12	7.95
40	3,97	6,03	30	8.09
50	4,42	6,30	39,28	8.18
75	4,47	6,45	64,08	8.4
100	4,50	6,61	88.89	8.37

Tablo-2'den görüleceği üzere her reaksiyonda yaklaşık 6 mg çinko 1 saatlik reaksiyon süresinde çözeltideki amonyak tarafından tüketilmektedir. Sementasyon için kullanılan çinko miktarı artırıldığında (20 mg ve fazlası) paladyum iyonları ile çinko metalinin etkileşimi arttığından dolayı paladyum çökme veriminin arttığı görülmüştür. Oda sıcaklığında sementasyon veriminin düşük olduğu ayrıca dikkat çeken başka bir detaydır. Tam çökmenin sağlandığından emin olmak için reaksiyon sıcaklığının artırılması gerekmektedir.

### 3.2 Reaksiyon süresinin etkisi

Bu deney serisinde; reaksiyon süresinin sementasyon verimine etkisi incelenmiştir. Pd iyonları sabit sıcaklıkta, 10 mL çözelti hacminde, 200 devir/dk da çalkalanmasını kapsayan deney grubunda, süre ve değişen çinko miktarına bağlı olarak sementasyon verimi Şekil-3'de incelenmiştir.

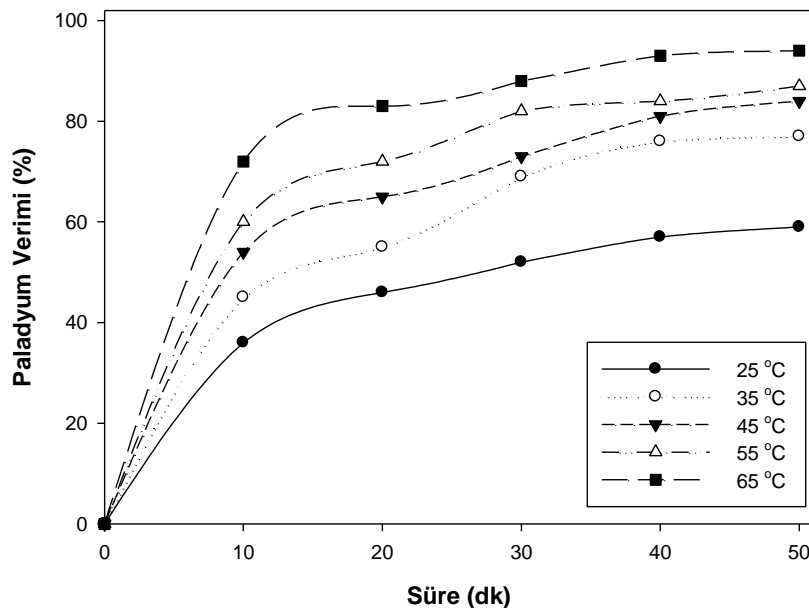


Şekil 3. Değişen süre ve çinko (Zn) miktarının sementasyon verimine etkisi (10 mL, 25°C, 200 devir/dak.)

10 mg Zn ile 10 dakikada Pd indirgeme verimi %18 civarında elde edilirken reaksiyon süresi 60 dakikaya çıkarıldığında Pd indirgeme verimi %35 üzerine çıkmaktadır. Şekil-3'den de görüleceği üzere indirgeyici miktarının artışı ile reaksiyon süresi arasında ters bir etki olduğu tespit edilmiştir. 100 mg Zn kullanıldığında 30 ile 60 dakika reaksiyon sürelerinde verim sadece %8 civarında değişmektedir. Sürenin az miktarda indirgeyici kullanımlarında daha etkili bir parametre olduğu görülmüştür. Ayrıca, Zn'nin çözeltiliye ilave edilmesi ile reaksiyon hemen başlamaktadır, fakat bu reaksiyonun dengeye ulaşması biraz zaman almaktadır. Bu sürenin yaklaşık olarak eklenen indirgeyici miktarına da bağlı olarak yaklaşık 40 dakika olduğu ilgili şekilden görülmektedir.

### 3.2 Reaksiyon sıcaklığının etkisi

Sementasyon işleminde reaksiyon sıcaklığının Pd indirgeme verimine etkisini incelemek amacıyla 25-65°C sıcaklıkları arasında deneyler yapılmıştır. Şekil-4'e bakıldığında reaksiyon sıcaklığının artmasının Pd-Zn sementasyon verimi üzerinde pozitif etkisi olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Değişen süre ve sıcaklığın sementasyon verimine etkisi (10 mL çözelti, 200 devir/dak.)

Termodinamik olarak kendiliğinden gerçekleşen (kimyasal kontrollü) reaksiyonlarda sıcaklığın pozitif etki gösterdiği gözlemlenmektedir [10-12]. Sıcaklığın olumlu etkisinin daha belirgin olduğunu gösterebilmek için sementatör miktarı 20 mg olarak belirlenmiştir. Oda sıcaklığında 50 dakika reaksiyon süresinde %58 civarında verim elde edilirken sıcaklığın sadece 10°C arttırılması ile benzer verim 20 dakikada elde edilebilmektedir. Artan sıcaklık ile azalan reaksiyon süresi doğru orantılı olarak değişmektedir [13,14]. Şekilden görüleceği üzere sıcaklığın 25°C den 65°C ye yükseltilmesi ile 50 dakikada 20 mg indirgeyici kullanılarak verim %95 ve üzerinde elde edilmektedir.

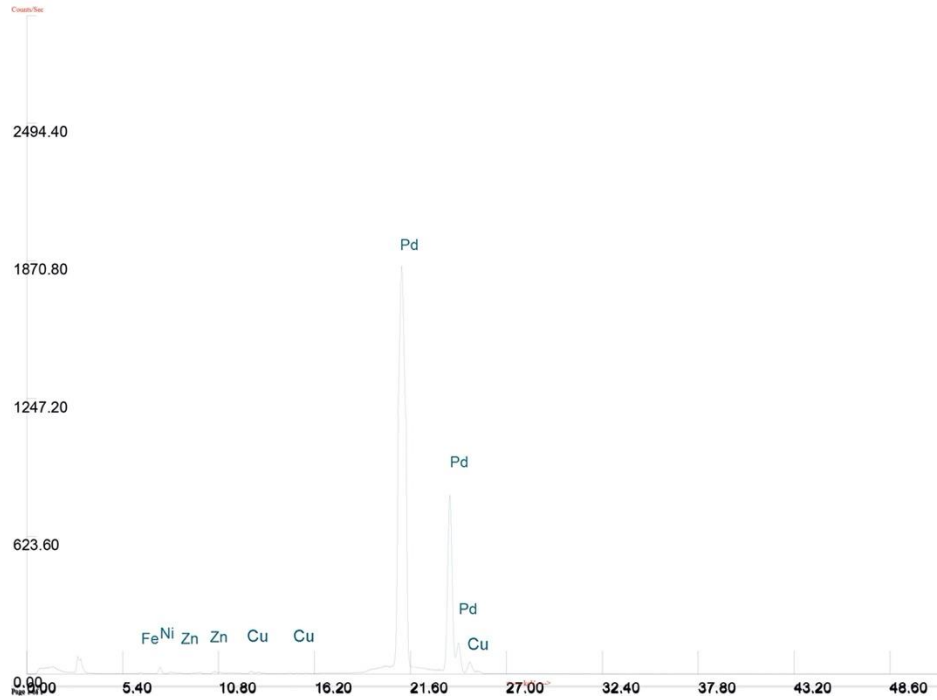
### 3.3 Karakterizasyon

Çinko ile sementasyon deneyleri sonucunda elde edilen Pd tozunun kimyasal analizi sonucu Tablo-3'de verilmiştir. Sementasyon sonucu elde edilen Pd tozu yapısında kalan fazla çinkonun uzaklaştırılması amacıyla 1M HCl ile 1 saat süresince oda sıcaklığında yıkanmıştır.

**Tablo 3.** Sementasyon sonrası elde edilen Pd'nin analizi

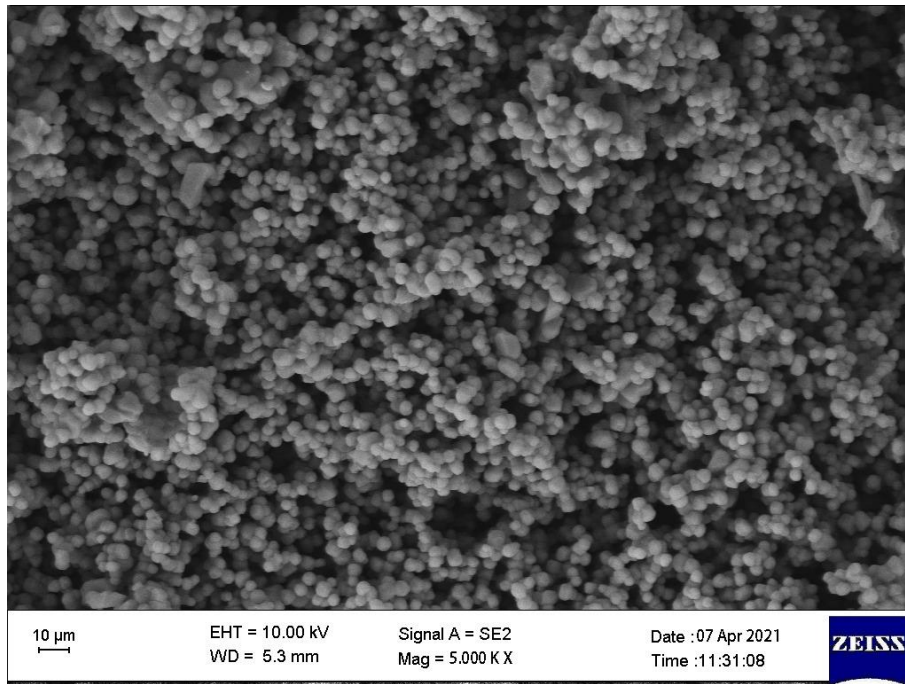
Elementler	Konsantrasyon
Pd	%98,42
Fe	%0,23
Ti	%0,13
Ni	%0,36
Cu	%0,17
Cr	%0,12
Zn	%0,57

Yıkayıp kurutulan Pd tozunun kimyasal analizi ICP-OES ile yapılmıştır. Ayrıca elde edilen Pd tozu X-ışınları floresans spektrometresi (XRF) ile de karakterize edilmiştir. Şekil-5'de Pd tozunun XRF paterni verilmiştir.



Şekil 5. Paladyum tozunun XRF paterni

Elde edilen paladyum siyahının morfolojik yapısı taramalı elektron mikroskopu (SEM) yardımıyla tespit edilmiştir. Paladyum siyahının SEM görüntüsü Şekil-6'da verilmiştir.



Şekil 6. Paladyum tozunun Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüsü

Metalik Pd tozuna ait SEM görüntüsünde partiküller küresel şekle sahip oldukları görülmektedir fakat bu küresel parçacıklar yoğunlukla aglomere olmuş şekilde durmaktadırlar.

#### 4. Sonuç

Ülkemiz için teknolojik ve ekonomik alanlarda paladyum ihtiva eden atıkların değerlendirilmesi ve geri kazanımı oldukça büyük önem arz etmektedir. Yapılan literatür araştırmasında, paladyum geri kazanım yöntemleri konusunda kısıtlı sayıda çalışma bulunduğu görülmüştür.

Yapılan bu çalışmada piyasadan temin edilen (Say Ramat Ltd. Şti.) atık paladyum çözeltilisine çinko ile uygulanan sementasyon işlemlerinde çeşitli parametrelerin sementasyon verimine etkileri incelenip optimum şartlar belirlenmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında çinko tozu miktarının sementasyona etkisini incelemek için yapılan deneylerde oda sıcaklığında ulaşılan en yüksek verim %70 civarlarında iken, çözeltilinin sıcaklığı 65°C'ye yükseltildiğinde verim %93'lere kadar çıkmaktadır. Tüm bunların dışında sementasyon işleminde değişen sürelerde işlem yapıldığında ise 40 mg çinko tozu kullanıldığında 10 dakikada sementasyon verimi %70 seviyesinde iken işlem 1 saat sürdürüldüğünde ise verim %90'ın üzerine çıkmıştır.

Ayrıca yüksek sementasyon verimi elde etmede sıcaklığın pozitif etkisi yapılan farklı sıcaklık deneyleri ile ispatlanmıştır.

Sementasyon işlemi sonrasında çöktürülen Pd tozları karakterizasyonu için numunelere XRF ve SEM analizi yapılmıştır. Bu analizler sonucunda üretilen Pd tozunun saflığı %98,42 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, tatbik edilen deneylerin sonucunda ulaşılan sonuçların bilimsel literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

#### Referanslar

- [1] Güven, A., 2002. Atık Rodyum Kaplama Çözeltilerinden Rodyum Geri Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Straschil, H.K. and Cohn, J.G., 1980. Platinum Group Metals, Alloys and Compounds in ECT 2nd Edition, 861-878.
- [3] Kerr J. A., 2000. CRC Handbook of Chemistry and Physics 1999-2000 : A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 81st edition, 2000.
- [4] PGM market report: Feb 2021., 2021. Focus on Catalysts, 2021(4), 2.
- [5] Kaikake, K., Baba, Y., 2001. Selective extraction of palladium (II) with theophylline derivatives, Analytical Sciences, 17, 411-415, Miyazaki, Japan.
- [6] Bernfeld, G., 1985. Technology of the Platinum Group Metals, Gmelin Handbook, 1, 1-21.
- [7] Bernardis, F.L., Grant, R.A., Sherrington., 2005. A review of methods of separation of the platinum-group metals through their chloro- complexes, Reactive&Functional Polymers, 65, 205-217.
- [8] Iavicoli, I., Fontana, L., Bergamaschi, A., 2011. Palladium: Exposure, Uses and Human Health Effects, Elsevier, 307-3014.
- [9] Rao, C.R.M. and Reddi, G.S., 2000. Platinum Group Metals (PGM); occurrence, use and recent trends in their determination, Trends in Analytical Chemistry, 565-585.
- [10] Bor, F. Y., 1989. Ekstraktif Metalurji Prensipleri II, 526-527.
- [11] Petrucci, R. H. and Harwood, W. S., 1993. General Chemistry Principles and Modern Applications, 6th Edition, MacMillan, New York.

[12] Gaita, R., and Al-Bazi S.J., 1995. "An ion-exchange method for selective separation of palladium, platinum and rhodium from solutions obtained by leaching automotive catalytic converters," *Talanta*, Vol. 42, pp. 249–255.

[13] Jia, Y.F., Steele, C.J., Hayward, I.P., and Thomas, K.M., 1998. "Mechanism of adsorption of gold and silver species on activated carbons," *Carbon*, Vol. 36, pp. 1299–1308.

[14] Svehla, G., 1996. *Vogel's Qualitative Inorganic Analysis*. 7. baskı, Longman press, New York.



## Effects of Metallurgical Silicon Carbide and Ferro Silica Additives on Materials in Gray Cast Iron Production

<sup>1,2</sup> Mehmet Cemil Pekşen 

<sup>1</sup>Department of Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya University of Applied Sciences, 54050, Sakarya, Turkey

<sup>2</sup> EKU Fren ve Döküm San. A.Ş., 41420, Turkey, Kocaeli.  
Corresponding author, e-mail: pekşenmehmetcemil@gmail.com

Submission Date: 10.05.2021      Acceptation Date: 01.10.2021

**Abstract** - In this study, it was investigated that changes in the mechanical and metallurgical properties of the materials could be brought about by using two different variables such as Fe-Si and Met-SiC in the production of lamellar graphite cast iron. Experimental studies of the samples prepared by using these two parameters have been carried out and it has been found out that which parameters are more advantageous in the terms of properties of materials (mechanical and metallurgical) in production of lamellar graphitic cast iron. As a result of the mechanical experiments, it was observed that Fe-Si samples were more stable than Met-SiC samples. In the hardness measurements, while the average hardness value in Fe-Si samples was 287.5 HB, the average value was measured as 252.5 HB in the samples belonging to Met-SiC. As can be seen, there is a 13.8% increase in hardness. The arithmetic averages were calculated according to the tensile test results, and it was determined as A.O=286.6 N/mm<sup>2</sup> for Fe-Si and A.O=250 N/mm<sup>2</sup> for Met-SiC. Fe-Si samples have higher tensile strength. As a result of the metallurgical control, it was observed that the distribution of lamellar graphites in the microstructure of the Fe-Si samples was more homogeneous and in the desired size based on the microstructure images. This is the most important factor affecting the mechanical properties. When the waste rate is calculated in the study carried out under the name of "trial" within the company, the 10% wastage rate decreased to 1.5%.

**Keywords:** Silicon Carbide, silica, cast iron, graphite.

## Gri Dökme Demir Üretiminde Metalürjik Silisyum Karbür Ve Ferro Silis Katkılarının Malzeme Üzerindeki Etkileri

**Özet** - Bu çalışmada Fe-Si ve Met-SiC gibi iki farklı değişkenin lamel grafitli dökme demir üretiminde kullanılması ile malzemelerin mekanik, metalürjik özelliklerinde ne gibi değişiklikler meydana getirebileceği araştırılmıştır. Bu iki parametre kullanılarak hazırlanan numunelerin deneysel çalışmaları yapılarak, lamel grafitli dökme demir üretiminde hangi parametrenin diğerine göre malzemenin özellikleri (mekanik ve metalürjik) açısından daha avantajlı olacağını sonuçlarına ulaşılmıştır. Yapılan mekanik deneyler sonucunda Fe-Si' ye ait numunelerin Met-SiC numunelerine göre daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik ölçümlerinde Fe-Si' ye ait numunelerde ortalama sertlik değeri 287,5 HB iken Met-SiC' e ait numunelerde ise ortalama değer 252,5 HB olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi %13,8 lik bir sertlik artışı mevcuttur. Çekme deney sonuçlarına göre aritmetik ortalamalar hesaplanmış Fe-Si için A.O=286,6 N/mm<sup>2</sup>, Met-SiC için ise A.O=250 N/mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Fe-Si numunelerinin çekme dayanımı daha yüksektir. Metalürjik kontrol sonucunda mikroyapı görüntülerinden yola çıkarak Fe-Si' ye ait numunelerin mikroyapısında ki lamel grafitlerin dağılımının daha homojen ve istenilen boyutta olduğu görülmüştür. Bu durum mekanik özellikleri etkileyen en önemli unsurdur. Firma bünyesinde "deneme" adıyla yapılan çalışmada fire oranı hesaplandığında, %10 oranındaki fire oranı %1,5 seviyelerine inmiştir.

**Anahtar kelimeler:** silisyum karbür, ferro silis, dökme demir, grafit.

## 1. Giriş

Dökme demir, %2.11 ile %6.67 arası karbon içeren demir-karbon alaşımlarına verdiğimiz genel bir isimdir [1]. Bildiğiniz gibi çelikler de demirin karbonla alaşımlanması sonucunda elde ediliyor, fakat dökme demirden farklı olarak çelikler çok daha düşük miktarda karbon içeriyorlar (%2.11'den daha az).

Dökme demirler her ne kadar demirin karbonla alaşımlanmasıyla elde ediliyor olsalar da, sanayide üretilen dökme demirlere baktığımızda, alaşım içinde karbona ek olarak mutlaka yaklaşık %1 ila %3 arasında silisyum olduğunu görüyoruz. Bu açıdan bakıldığında, sanayide üretilen dökme demirleri Fe-C-Si (demir, karbon ve silisyum) alaşımları olarak değerlendirmemizin daha doğru olacağını söyleyebiliriz. Karbon ve silisyuma ek olarak, dökme demirlerde sıklıkla gördüğümüz diğer elementler arasında mangany ve az miktarda da olsa fosfor ve kükürtü de gösterebiliriz.

Dökme demirler çok geniş bir aralıkta değişen mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma direnci, korozyon direnci ve diğer özelliklere sahip olabilirler [6,7]. Özet olarak dökme demir grubunun çok değişik mühendislik özellikleri sağlaması, bu malzemenin kullanış sahasının genişliğine devamlılığına neden olmaktadır.

Bu çalışmada; Gri dökme demirlerin üretiminde kullanılan malzemelerden olan M-SiC (metalürjik silisyum karbür) yerine Ferro Silisyum kullanılmasıyla ortaya çıkan kalite özellikleri araştırılmıştır. SiC ve Fe-Si kullanılmasıyla; Dökülen malzemelerin iç yapısının kararlılığı, Malzemelerin mekanik açıdan göstermiş oldukları performanslar incelenecektir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmamda kamyon, kamyonet ve tır gibi taşıma araçlarında kullanılan kampananın kum kalıba döküm yöntemleri ile birlikte farklı ergitme ocaklarında hazırlanan Fe-Si ve Met-SiC'lü alaşımlı dökme demirlerin göstermiş olduğu mekanik ve metalürjik özelliklerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Dökümhane şartlarında yapılan bu çalışmamda döküm proses yöntemleri ayrıntılı bir biçimde ele alınıp irdelenmiştir. Ergitme ocaklarında ergitme metod kartlarına göre, Fe-Si şarjıyla hazırlanan sıvı metal (Fe-Si) döküme hazır derecelere ve çekme, sertlik ve mikroyapı numunesi için prosesde bulunan 3588 kampanası dökümü üzerinden yapılmıştır ve Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 3588 kampana görüntüsü

Otomatik kalıplama hattında basılan derecelere istenilen sıcaklıklarda sıvı metalin dökülmesi ile kum kalıp hat üzerinde ilerleyerek içerisindeki malzeme soğumaya bırakılır. Soğumanın gerçekleşmesini sağlayacak kadar hat üzerinde devam eden kalıplar, kalıp kumunun bozulması için sarsak kısımdan geçerek yüzey temizleme hattına devam eder.

Yüzey temizleme hattındaki kancalara asılan kampanalar 8 adet tribün yardımıyla parça üzerindeki kumun tamamen temizlenmesi sağlanır. Bu aşamada eğer tamamen temizlenmeyen kampanalar varsa bu aşama tekrar yapılır. Yüzey temizlemeden çıkan kampanalar taşlama ve boyama için devam eder.

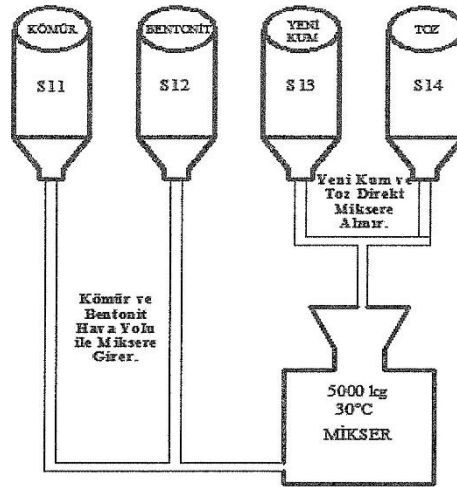


Şekil 2. Yüzey temizleme

Yüzey temizlemeden sonra sıcaklığı 50 derece civarına düşen ürünler dökümde oluşan çapaklardan temizlenmek için taşlama bölümüne alınır. Taşlamadan çıkan ürün müşterinin isteğine göre boyama hattına alınır ve otomatik boyama makinesiyle boyanır. Dökümhane prosesini tamamlayan kampanalar talaşlı imalat kısmına geçer. Şekil 2'de yüzey temizleme işlemi yapılan kampanalar görülmektedir. Bu aşamadan sonra setlik, mikroyapı ve çekme testi için 1 adet kampana prosedüre uygun olarak kesilmek üzere laboratuvara gelir ve burada testleri yapılır.

### 2.1. Döküm kumunun hazırlanması

Dökümde en çok rastlanan hata kalıpta oluşur ki bu hatalarda kumun bileşimine bağlıdır. Kumun hammaddeleri her zaman istenilen seviyede tutulmalıdır bu yüzden sürekli analiz edilmelidir. EKU' da sistemdeki kum eklemeler yapılarak tekrar işleme alınır. Kalıp kumu bentonit, silis kumu ve kömür tozundan oluşmaktadır. EKU' da kalıp kumunun %70'i silis kumu, 949'u bentonit, %6'sı kömür tozu, %4'ü nem ve %11 'i de kildir. Kum silosunun çizimi Şekil 3'de görülmektedir.



NOT: Karışımlar önemli olup modela göre dereceler

Şekil 3. Kum silosu akışı

EKU' da kalıp kumu toplanarak tekrar sisteme katılır. Bunun sağlanabilmesi için mevcut sitemde üç grup besleme bandı bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla mikser besleme bantları, pres besleme bantlar ve atık, bypass bantlarıdır. Sarsaklardan ve atık kumun toplandığı farklı yerlerden bantlar kumu kum bypass hattından geçerek eleğe gönderir daha önce sarsaktan atık hattına alınırken içindeki metal parçaları mıknatıs yardımıyla alınan kumu elekten de geçirerek istenmeyen malzemeler kumdan ayıklanır. Daha sonra kum, mikser besleme bantlarına iletir. Mikserde hammadde dengeleme işlemi yapılır.

Laboratuvarda yapılan deneylerde ne kadar hammadde eklenmesi gerektiği oranlayarak bulunur ve kuma bu oran . eklenip ölçülerek mikserde karıştırılır. Eklenen ürünlerle geri beslenen kum mikserde karıştırılır. Mikser PLC kontrolüyle çalışır. Bir mikser her vardiyada üretim planına göre ortalama 100 mikser kum hazırlar. Her mikser tek seferde 5200 kg kalıp kumunu 150 saniyelik süreçte hazırlayabilmektedir. Bu süreçte sisteme ortalama 80 — 100 litre su verir.

Laboratuvar da yapılan nem ölçümü için kum cihazın kapağı açılarak hazneye dökülür. Cihaz kapağı kapatılıp start verilir. 105 °C dereceye ısınır ve cihaz testi bittiğinde kendiliğinden durur. İlk ağırlık- son ağırlık hesabı yapıp, çıkan değer % cinsinden kaydedilir. Çıkan değere göre kum için aksiyon alınır. Ek olarak basma ve kesme testleri her saat başı kontrol etmek için yapılır. Basma ve kesme testi için kum hazne dolana kadar doldurulur. Tamamen dolan hazne Şekil 4'deki bobin yapma aparatı konularak sıkıştırılır.

Test için hazır hale gelen kum George Fisher marka (bknz. Şekil 5) kesme-basma cihazına yerleştirilir. Sabit hızda döndürülen kolla yarı otomatik olarak sonucu gösterge ekranında gözlemlenir.



Şekil 4. Bobin yapma aparatı.



Şekil 5. Basma Kesme test cihazı.

Sistem kumunun gaz geçirgenliği değerinin belirlenmesi için ise Şekil 6.'da görülen George Fisher gaz geçirgenliği test cihazından yararlanır. İlk olarak bobin yapma aparatı sıkıştırılır daha sonra sıkışan kumun cm<sup>2</sup> den geçen gaz miktarına bakılır.



Şekil 6. Gaz geçirgenliği test cihazı.

## 2.2. Kalıp hazırlama

Metallerin ergitilmesiyle aynı anda kum kalıpların yapılması başlar. Fakat daha önce kalıplar ürüne göre metalin kalıbın her yerine akması için yollar olan yolluklar da, hesaba katılarak hesaplanır. Ardından bu tasarım modelleme atölyesine gönderilir ve model arabasına takılmak üzere bir model oluşturulur. Modellerden bir üst, biri alt kalıp olmak üzere tasarlanmıştır. Yapılan modeller ayrıca macunlanarak düzeltilir. Bu modeller makinenin ayrı olan arabalarına takılır. Bu noktada kalıplama makineleri devreye girer.



Şekil 7. Savelli kalıp hattı.



Şekil 8. GF kalıp hattı.

EKU' da kum kalıpları farklı iki makinede oluşturulur; Savelli ve George Fischer sırası ile Şekil 7 ve Şekil 8'de görülmektedir. Fakat ikisinin de işleyişi aynıdır. Aralarındaki fark Savelli otomatik kalıplama hattının saatte 200 ürün üretebilmesi ve boyutlarının 800\*1400\*200/350 mm olması nedeniyle tek dökümde iki kampana kalıplayabilmesidir. GF otomatik kalıplama hattı ise saatte 87 ürün üretebilir ve 700\*700\*200/300 mm ölçülerindedir. Prosesin işleyişi Savelli otomatik kalıplama hattına (Şekil 9'da) göre anlatılsa da ikisinin de mantığı aynıdır ve işleyişte küçük farklılıklar vardır.

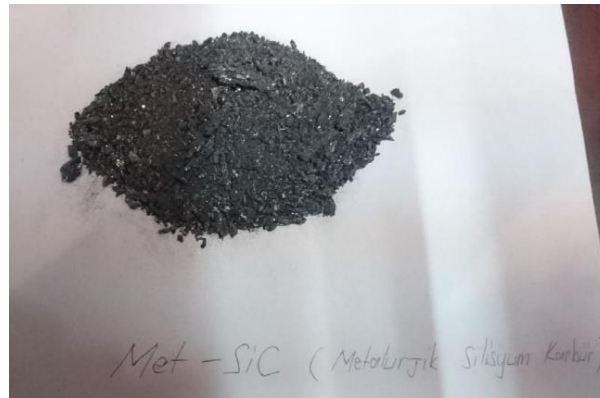


Şekil 9. Savelli kalıp hattı.

### 2.3. Ergitme ocaklarında sıvı metalin hazırlanması

Sıvı metalin hazırlanması için 9 tonluk 1, 2, 3 ve 4 nolu indüksiyon ocaklarında yararlanılmıştır. Aynı gün içerisinde 1 ve 2. Ocakta SiC, 3 ve 4 nolu ocakta Fe-Si denemesi yapılmıştır. Bu denemeler prosese tam olarak uygun şekilde hazırlanmış ve deneme formu doldurularak dökülmüştür.

**Met-SiC ile sıvı metalin hazırlanışı:** Tablo 1 ve Şekil 10'da metalürjik silisyum karbür bileşimi ve görünümü verilmiştir.



Şekil 10. Met-SiC (metalürjik silisyum karbür)

**Tablo 1.** Met-SiC kimyasal bileşimi

Kimyasal	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Free Carbon
Element	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Free Carbon
%	91.2	0.43	0.52	2.49	0.07	0.39	2.49

Met- SiC % 90'lik saflıktadır. Saf SiC İçerisinde %66 Si, %25,20 C bulunmaktadır. Met-SiC içerisinde kullanılabilen;

Si miktarı:  $90 \times 66 / 100 = \%59,4$

C miktarı:  $90 \times 25.2 / 100 = \%22,68$

**Tablo 2.** Ocak şarj reçetesi

Şarj edilen malzemeler	Kg	%C	%Si
Pik	3100	4	0,7
Hurda	3000	0.05	0.09
Talaş	1500	3.45	1.95
Yolluk	1500	3.45	1.95

Ocağa eklenecek malzemelerin bileşimi Tablo 2'de verilmiştir. Şarj edilen malzemelerin C ve Si etkileri;

Pik

$$C \longrightarrow 3100 \times 4.0 / 9100 = \%1.96$$

$$Si \longrightarrow 3100 \times 0.7 / 9100 = \%0.24$$

Hurda

$$C \longrightarrow 3000 \times 0.05 / 9100 = \%0.016$$

$$Si \longrightarrow 3000 \times 0.09 / 9100 = \%0.03$$

Talaş ve Yolluk

$$C \longrightarrow 3000 \times 3.45 / 9100 = \%1.15$$

$$Si \longrightarrow 3000 \times 1.95 / 9100 = \% 0.65$$

İlave edilecek C ve Si miktarları ise;

$$3.41 - (1.36 + 0.016 + 1.15) = \% 0.874$$

$$0.874 \times 9100 / 90 = 90 \text{ kg C}$$

$$1.95 - (0.24 + 0.03 + 0.65) = 1,03$$

$$1.03 \times 9100 / 90 = 105 \text{ kg SiC}$$

Yukarıdaki hesaplamalardan sonra Met- SiC ile hazırlanacak olan sıvı metal için ergitme ocağına 3100 kg pik, 3000 kg hurda çelik sac, 3000 kg talaş ve yolluk, 105 kg SiC, 90 kg C şarjı yapılarak sıvı metalin istenilen kimyasal analizi yakalanmaya çalışılmıştır. Cürufu alınan sıvı metal ergitme ocağından 1500 kg'lık döküm potasına aktarılır. Aktarma esnasında pota sıvı metal miktarının %0,2'si kadar Silisyum esaslı SB5 aşılama malzeme, pota içerisinde homojen bir şekilde eritilir. Sıvı metal daha sonra derecelere boşaltılır. Şekil 11'de aşılama yönetimine ait fotoğraf görülmektedir.



Şekil 11. Pota aşılama yöntemi

**Fe-Si ile sıvı metalin hazırlanışı:** Fe-Si %75 saflıktadır. Tipik bileşimi Tablo 3’de verilmiştir. Ocağa şarj edilecek malzemelerin listesi ise Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 3. Fe-Si kimyasal analizi

Element	C	Si	Al	S	P
%	0.15 max	75	1-1.5	0.03 max	0.03 max

Tablo 4. Ocak şarj reçetesi

Şarj edilen malzemeler	Kg	%C	%Si
Pik	3100	4	0,7
Hurda	3000	0.05	0.09
Talaş	1500	3.45	1.95
Yolluk	1500	3.45	1.95

Şarj edilen malzemelerin C ve Si etkileri;

<u>Pik</u>	<u>Hurda</u>
$C \longrightarrow 3100 \times 4.0 / 9100 = \%1.96$	$C \longrightarrow 3000 \times 0.05 / 9100 = \%0.016$
$Si \longrightarrow 3100 \times 0.7 / 9100 = \%0.24$	$Si \longrightarrow 3000 \times 0.09 / 9100 = \%0.03$
<u>Talaş ve Yolluk</u>	
$C \longrightarrow 3000 \times 3.45 / 9100 = \%1.15$	
$Si \longrightarrow 3000 \times 1.95 / 9100 = \% 0.65$	

İlave edilecek C ve Si miktarları;

$3.41 - (1.36 + 0.016 + 1.15) = 0.874$	$1.95 - (0.24 + 0.03 + 0.65) = 1.03$
$0.874 \times 9100 / 90 = 90 \text{ kg C}$	$1.03 \times 9100 / 75 = 125 \text{ kg Fe-Si}$

Yukarıdaki hesaplamalardan sonra Fe-Si ile hazırlanacak olan sıvı metal için ergitme ocağına 3100 kg pik, 3000 kg hurda çelik sac, 3000 kg talaş ve yolluk, 125 kg Fe-Si, 90 kg C şarjı yapılarak sıvı metalin istenilen kimyasal analizi yakalanmaya çalışılmıştır. Cürufu alınan sıvı metal ergitme ocağından 1500 kg'lık döküm potasına aktarılır. Aktarma esnasında pota sıvı metal miktarının %0,2'si kadar Silisyum esaslı SB5 aşıluyıcı malzeme, pota içerisinde homojen bir şekilde eritilir. Sıvı metal daha sonra derecelere boşaltılır.

**Yüzey temizleme, Taşlama ve Boyama:** Makine içerisinde 4 sağda 4 solda toplam 8 motor bulunan ve bu motorlara bağlı pervanelerin döndürülmesiyle kancalara asılı parçaların bu pervaneler arasından geçerken metal granüllerin parça yüzeyine çarptırılmasıyla temizleme işlemi yapılır. Metal granüller parçalara çarptırılarak üzerlerindeki çapak ve fazlalık parçalarından arındırılır. Parçaların içeride durma süresi 30 dakikadır. Eğer bu süre uzarsa parçalar erimeye başlarlar. Şekil 12'de bu işlem esnasındaki ürünler görülmektedir.



Şekil 12. Yüzey temizleme

Yüzey temizlemeden sonra sıcaklığı 50 derece civarına düşen ürünler dökümde oluşan çapaklardan temizlenmek için taşlama bölümüne alınır. Şekil 13'de taşlama hattı görülmektedir. Bu çapaklar tornada tezgâha bağlamada problem yaratabilmektedir. Taşlamadan çıkan ürün müşterinin isteğine göre boyama hattına alınır ve otomatik boyama makinesiyle boyanır. Fabrikanın sunduğu renk seçenekleri siyah, koyu gri ve acık gridir. Daha sonra kuruma hattına aktırılan ürünler yaklaşık 15 dakika bu hatta ilerleyerek kurutulurlar. Buradan tekrar paletlere istiflenip talaşlı imalatın yarı mamul bölgesine yerleştirilirler.



Şekil 13. Taşlama hattı



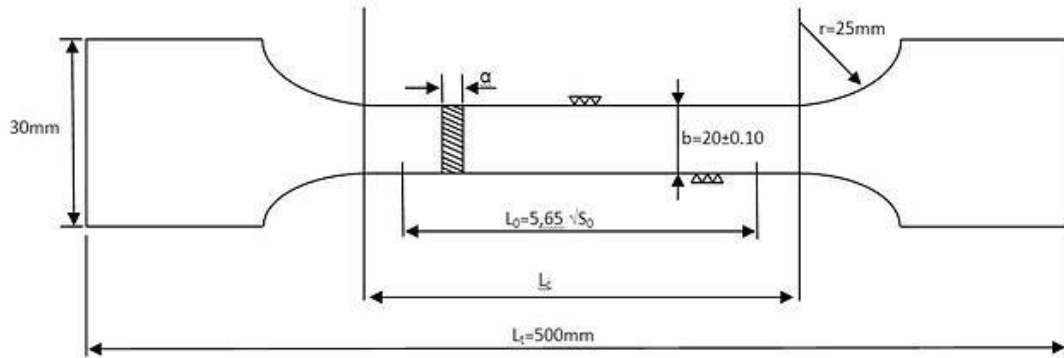
## 2.4. Deney numunelerinin hazırlanması

Deney numunelerin hazırlanması için özel bir işlem uygulanmamıştır. Bunun nedeni, hâlihazırda deneme döküm adıyla üretilen 3588 kampanasına uygulanan testlerle talep edilen testlerin aynı olmasıdır.



Şekil 14. Çekme ve mikro yapı için numune alma

**Çekme numunesinin hazırlanması:** Numunelerinin EN 1561 standardına uygun olarak testinin yapılması ve mukavemet değerlerinin hesaplanması amacıyla yapılan işlemdir. Nihai halini almış numunelerin bu cihazda test edilerek mukavemet değerleri rapora işlenir. Şekil 15’de hazırlanan çekme test numunesinin özellikleri çizilmiştir.



Şekil 15. Standart çekme testi numunesi

Bu test, nihai ürünler için aksi belirtilmediği sürece kampanadan ve diskten talimatta belirtilen yerden alınır. Cihaz mekanik bölüm ve elektronik bölüm ile iki ana bölümden oluşur. Mekanik bölüm de üst çenesi sabit, alt çenesi hidrolik yardımıyla aşağı yukarı hareket eden mekanik kısmı vardır. Elektronik bölümünde çekme testi değerlerini ve grafiklerini listeleyen bilgisayar mevcuttur. Şekilde 16’da çekme numunesi hazırlanması ve Şekil 17’de hazırlanmış numune görülmektedir.



Şekil 16. Torna da işlenen çekme çubuğu



Şekil 17. Çekme çubuğu

**Mikroyapı numunelerinin hazırlanması:** Malzemelerin dış özelliklerinin yanında kimyasal karakterlerini bilmek de mühendislik için çok önemli bir değere sahiptir. Metalografik incelemede seçilen numunenin bir değer taşıyabilmesi için bu numunenin gerek fiziksel özellik ve gerekse kimyasal bileşim yönünden esas malzemeyi tam olarak temsil etmesi gerekir. Bu nedenle, numune alınması işin temelidir. Numunenin nereden alınacağı tespit edildikten sonra sulu kesme cihazı ile kesilir. Prensip olarak, numuneyi alırken yüzeyde en az plastik şekil değiştiren ve en az ısı meydana getiren kesme yöntemi seçilmelidir. Çünkü bütün gayretler, orijinal malzeme iç yapısının mikroskop altında görülebilmesi içindir. Şekil 18’de kesme cihazı görülmektedir.



Şekil 18. Kesme takımı

Zımparalama işlemi kabadan inceye doğru sırayla yapılmalıdır. İşletmede işin hızlı olması için bir ince gruptan birde kaba zımpara gruptan zımpara seçilerek zımpara yapılır (Şekil 19 ve Şekil 20).



Şekil 19. Zımparalama makinesi



Şekil 20. Parlatma makinesi



Şekil 21. Nikon ışık mikroskobu

Dağlama ayırıcı ile parlanmış numunenin belirli bir süre teması pamukla sürtünme veya numunenin çözelti içerisine daldırılması ile olur. Bu işlem oda sıcaklığında uygulanacağı gibi, oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda da yapılabilir. Dağlama işleminden sonra, numunenin tane yapısını incelemek için optik mikroskop cihazı kullanılır. Şekil 21’de kullanılan Nikon marka mikroskop görülmektedir. Ayrıca tane boyutu ve faz analizi yapılmaktadır.

**Brinell sertlik deneyi:** Sertlik deneyi ölçüsel olarak kritik bir ölçüye sahip değildir. Sertlik testi son kontrol de kampana üzerinde yapılır. Tahribatsız bir şekilde prosese devam eder. Şekil 22'de Brinell sertlik ölçüm düzeneği ve cihazı görülmektedir.



Şekil 22. Brinell sertlik ölçme cihazı

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

#### 3.1. Kimyasal analiz incelemesi

Ferro silisyum (Fe-Si) ile şarj edilen ocağın kimyasal analizi Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Fe-Si ile şarj edilen ocağın kimyasal bileşimi

Kimyasal element	C	Si	Mn	S	Cr	Cu	P
%	3,41	1,93	0,641	0,082	0,220	0,071	0,052

Sıvı metal ergitme ocağından potaya aktarıldığı esnada potanın içerisinde %0,2'lük Si ve Ba esaslı aşırı takviyesi yapılır. Bu aşırı takviyesinin amacı; sıvı metalin akışkanlığının artırılmasının yanında bu sıvı metalden alınacak numunenin mikro yapısında homojenliği sağlamaktır. Yani homojenlikten kasıt mikroyapı içerisindeki lamellerin dağılımının homojenliğidir ki bu özellikte malzemenin mekanik özelliklerine büyük fayda sağlamaktadır.

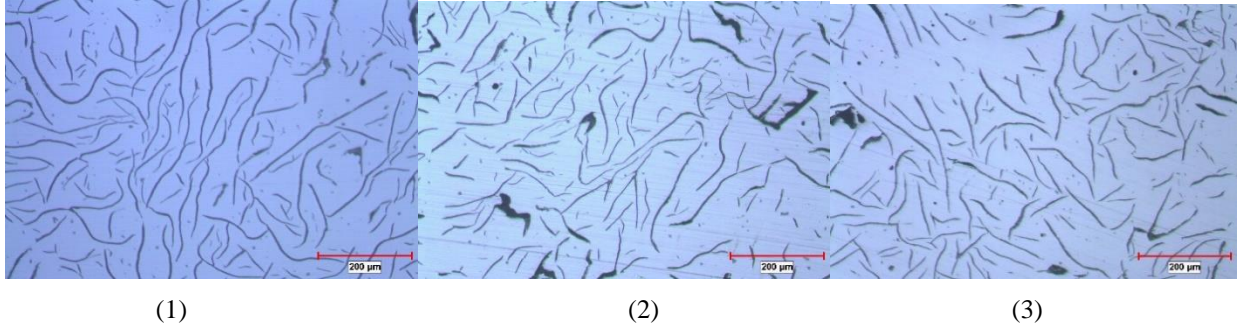
Tablo 6. SiC ile şarj edilen ocağın kimyasal bileşimi

Kimyasal element	C	Si	Mn	S	Cr	Cu	P
%	3,41	1,95	0,639	0,082	0,185	0,077	0,05

Aynı şekilde ergitme ocağından potaya sıvı metal aktarımı esnasında 1 tonluk potaya %0,2 lük Si ve Ba esaslı aşırı girilmiştir. SiC ile şarj edilen ocağın kimyasal analizi Tablo 6'de verilmiştir. Bu kısımda dikkat edilmesi gereken husus aşının pota içerisinde iyi bir şekilde erimesinin sağlanmasıdır aksi takdirde istenilmeyen hatalarla karşılaşabiliriz.

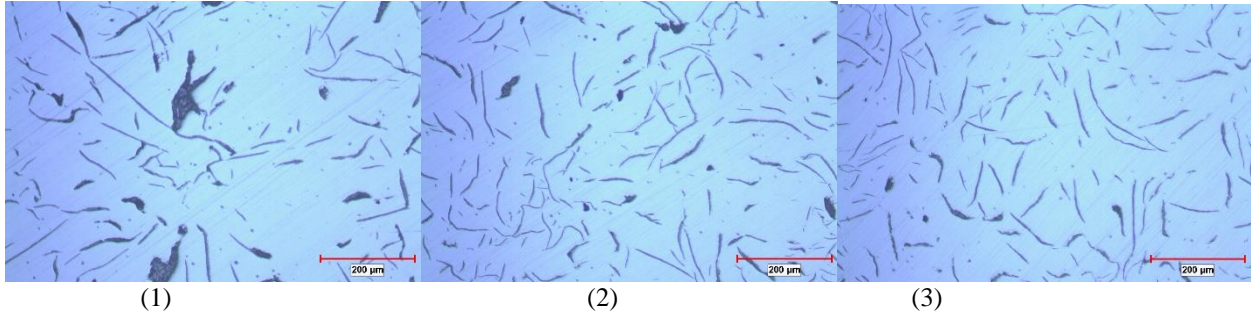
### 3.2. Mikroyapıların incelenmesi

Fe- Si ile hazırlanan numunelere ait mikroyapı görüntülerine Şekil 23’de yer verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere lameller olabildiğince homojen dağılarak istenilen A tipi grafitler elde edilmiştir.



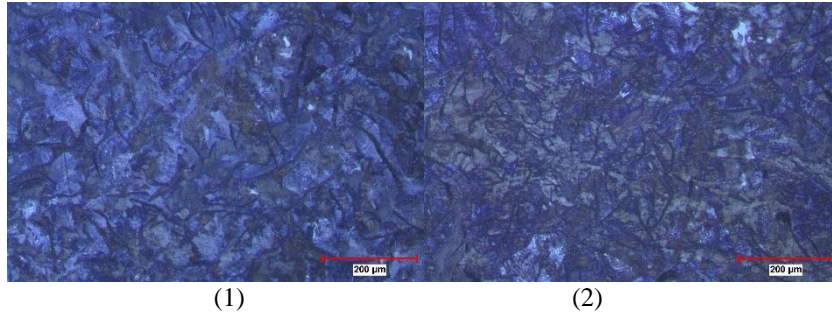
Şekil 23. Fe-Si ile şarj edilen ürünün mikroyapı görüntüleri

Şekil 24’de ise Metalurjik silisyum karbür (Met-SiC) ile hazırlanmış numunelere ait mikroyapı resimlerine yer verilmiştir.



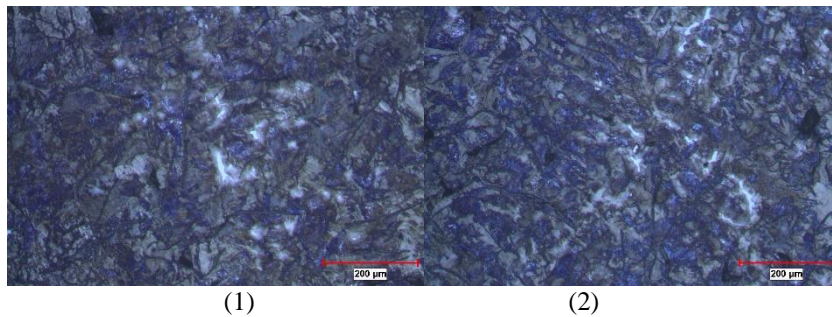
Şekil 24. Met-SiC ile şarj edilen ürünün mikroyapı görüntüleri

Yukarıdaki mikroyapılarda görüldüğü üzere çoğunlukla A tipi grafit olmasına rağmen mikroyapıda bulunan karbürler kalıntı olarak görülmüştür [3,8]. Bunun en önemli sebeplerinden biri SiC’ün yüksek sıcaklıklarda bile tam olarak ergimemesinden kaynaklanmaktadır [9,10].



Şekil 25. Fe-Si ile şarj edilen ürünün dağlanmış mikroyapı görüntüleri

Şekil 25’de Fe-Si katkılı dağlanmış mikroyapılarda görüldüğü gibi karbürler minimum seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

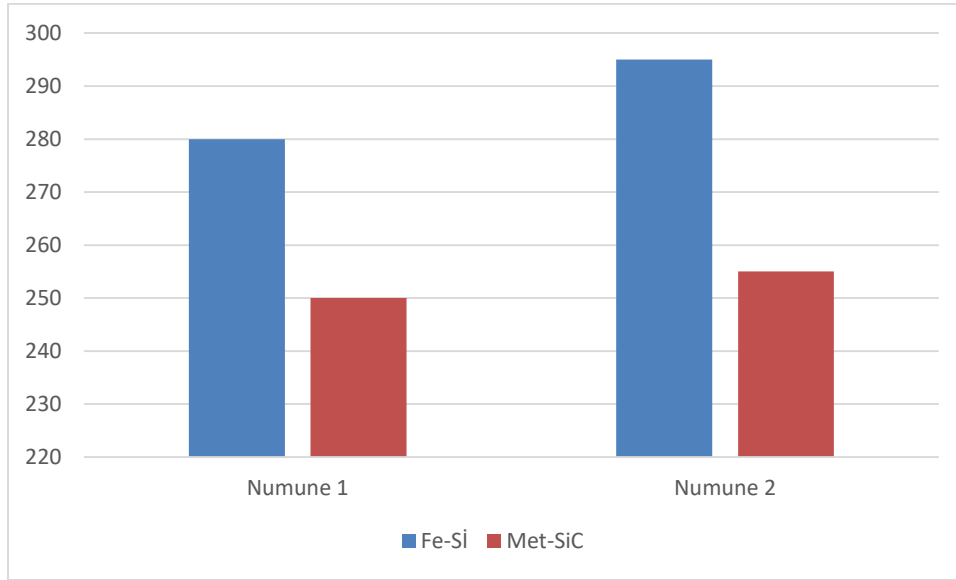


Şekil 26. SiC ile şarj edilen ürünün dağlanmış mikroyapı görüntüleri

Şekil 26'da SiC katkıli mikroyapılarda görüldüğü üzere, karbürlerin gereğinden fazla olması mekanik açıdan olumsuzluk teşkil etmektedir[10].

### 3.3. Sertlik sonuçları

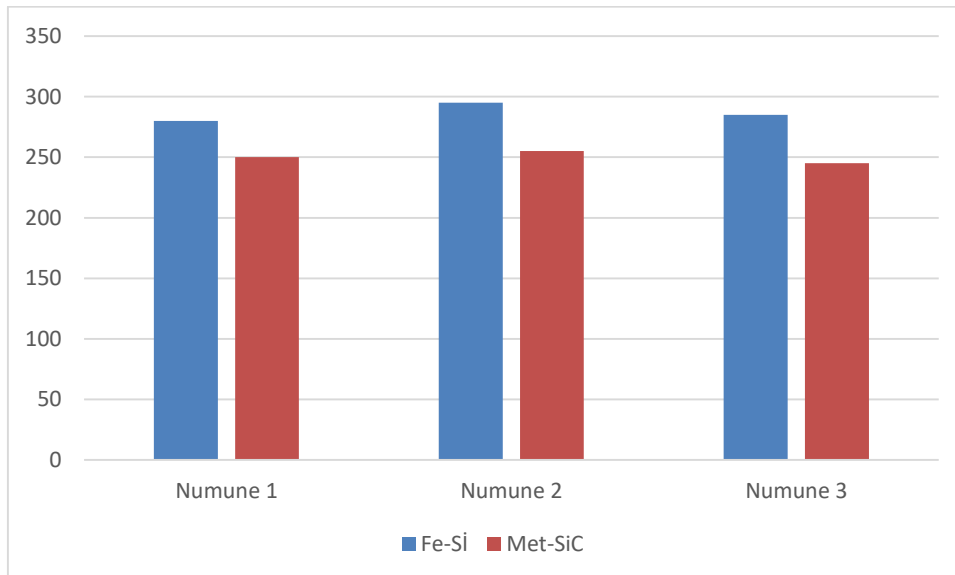
Bilindiği üzere, dökme demirlerin mekanik özellikleri, grafit morfolojisine, (şekil, dağılım, miktar ve boyuta) ve matris yapılarına (ferrit, perlit) bağlıdır. Araştırmalar sonucu grafit morfolojisindeki düzenli dağılımın sertlik değerini arttırdığını göstermektedir. Şekil 27'de Brinell sertlik sonuçları görülmektedir.



Şekil 27. Brinell sertlik sonuçları

### 3.4. Çekme Sonuçları

Şekil 28'de ki grafikten yola çıkarak Fe-Si numunelerinin Met-SiC numunelerine göre daha mukavemetli bir tavır sergilemiş olduğunu görmekteyiz.



Şekil 28. Çekme testi sonuçları.

### 3.5. Fire oranları

Çalışmamı yaptığım “EKU Fren ve Döküm San. Aş.” de deneme adı altında dökümünü gerçekleştirdiğimiz 3588 kodlu kampana üzerinden fire sayıları hesaplanmış ve bu sayılardan fire oranları hesaplanarak Fe-Si ve Met-SiC farkları da burada karşılaştırılmıştır. Tablo 7’de fire sayıları ve Tablo 8’de fire yüzdeleri görülmektedir.

**Tablo 7.** Denemelerin Fire adetleri.

Hata Tipleri	Fe-Si katkılı	Met-SiC katkılı
Mikro Çekinti Hatası	1	9
Cüruf Hatası	-	2
Salgılı Hatası	-	1
Kum düşme hatası	1	-

Bu denemelerde 120 adet ürün dökülmüştür. Bu dökümlerden çıkan fire oranları Şekil 8’de gösterilmiştir.

Hata Tipleri	Fe-Si katkılı	Met-SiC katkılı
Mikro Çekinti Hatası	0,6	7,5
Cüruf Hatası	-	1,6
Salgılı Hatası	-	0,8
Kum düşme hatası	0,6	-

**Tablo 8.** Denemelerin Fire oranları

## 4. Sonuçlar ve Öneriler

Yapılan mekanik deneyler sonucunda Fe-Si’ ye ait numunelerin Met-SiC numunelerine göre daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik ölçümlerinde Fe-Si’ ye ait numunelerde ortalama sertlik değeri 287,5 HB iken Met-SiC’ e ait numunelerde ise ortalama değer 252,5 HB olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi %13,8 lik bir sertlik artışı mevcuttur.

Çekme deney sonuçlarına göre aritmetik ortalamalar hesaplanmış Fe-Si için  $A.O=286,6 \text{ N/mm}^2$ , Met-SiC için ise  $A.O=250 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. Fe-Si numunelerinin çekme dayanımı daha yüksektir.

Metalurjik kontrol sonucunda mikroyapı görüntülerinden yola çıkarak Fe-Si’ ye ait numunelerin mikroyapısındaki lamel grafitlerin dağılımının daha homojen ve istenilen boyutta olduğu görülmüştür. Met-SiC’ e ait mikroyapı görüntülerinde dağınık dağılımın yanı sıra kararsız bir yapı hakimdir. Bu durum mekanik özellikleri etkileyen en önemli unsurdur.

Firma içerisinde deneme yapılan ürün adıyla fire oranı hesaplandığında, %10 oranındaki fire oranı %1,5 seviyelerine inmiştir. Met-SiC ekonomik anlamda Fe-Si’ a göre daha avantajlıdır. Ancak malzemelerin mekanik davranışlarına baktığımız zaman Fe-Si’ a ait numunelerin daha kararlı olduğunu görmekteyiz. Met-SiC, Fe-Si ‘ye göre ekonomik anlamda daha avantajlı ancak Met-SiC’ü eritebilmek için çok yüksek güçlere çıkmak gerekmektedir. Yüksek güçlere çıkmak demek elektrik maliyetinin artması demektir. Yüksek sıcaklıklar zamanla ocak içerisindeki refrakteri yıpratarak refrakter ömrünü kısaltacaktır bu durum hem tehlikeli hem de ekonomik anlamda firmayı zarar uğratabilecek bir husustur. Ayrıca fire oranlarında deneme ürünü olan 3588 kampanasında çekinti hataları Met-SiC kaynaklı olduğu öngörülmüş ve bu çekinti hataları Fe-Si kullanımı ile minimum seviyelere düşmüştür.

Met-SiC hassas olmayan parçaların üretiminde kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklara çıkılmadan da dökülebilen malzemeler için Met-SiC bire birdir. Ancak hassas parçalarda Fe-Si kullanılmalıdır. Çünkü bu parçaların işlenebilme kabiliyeti, sertliği, çekme mukavemeti oldukça önemlidir.

**Peer-review:** Externally peer - reviewed.


**Conflict of Interest:** No conflict of interest was declared by the authors.

**Financial Disclosure:** Bu çalışmayı yapmam da emeği olan EKU Fren ve Döküm Sanayii A.Ş. firmasına teşekkürlerimi sunarım.

## References

- [1] M. Chisamera, I. Riposan, S. Stan, C.B. Albu, C. Brezeanu, Comparison of Oxy-Sulfide Alloy Tablets and Ca-Bearing FeSi75 for Late Inoculation of Low Sulfur Grey Irons, AFS Trans. 023 (2007).
- [2] Şenol ÖZTÜRK, Küresel grafitli dökme demirlerin karakterizasyonu, Sakarya Üniversitesi, 2004.
- [3] L.C. KUMRUOĞLU, Lamel grafitli ve küresel grafitli dökme demirlerde karbon eşdeğerinin mekanik özellikler ve mikroyapıya etkisinin incelenmesi, Sakarya Üniversitesi, 2003.
- [4] Komisyon, Küresel Grafitli Dökme Demir, Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2011.
- [5] O. Aranke, W. Algenaid, S. Awe, S. Joshi, Coatings for automotive gray cast iron brake discs: A review, Coatings. 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/coatings9090552>.
- [6] D.A. Hope, Cutting fluids - pet or pest?. A review of staining and corrosion tendencies and effects on machine tool paints and seals, Tribol. Int. 10 (1977). [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(77\)90148-7](https://doi.org/10.1016/0301-679X(77)90148-7).
- [7] Elkem, Graphite Structures in Cast Irons Graphite Distribution in Grey Cast Iron, Distribution. (2004) 5211–5211.
- [8] Gray Iron Castings, in: Casting, 2018. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v15.a0005323>.
- [9] Komisyon, Gri (Esmer) Dökme Demir, Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2011.
- [10] Nurettin Burak ŞEN, Lamel grafitli dökme demirlerin üretiminde metalurjik silisyum karbür ve ferro silisyum katkılarının malzeme üzerindeki mekanik, metalurjik ve ekonomik etkisinin araştırılması, Necmettin Erbakan Üniversitesi, 2018.

## Determination of Optimum Insulation Thickness of Building Exterior Wall for Gumushane Province Based on Life Cycle Cost Analysis

<sup>1</sup>Meryem Terhan 

<sup>1</sup>Gumushane University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, Gumushane, Turkey.

Corresponding author, e-mail: meryem.terhan@gumushane.edu.tr

Submission Date: 23.09.2021

Acceptation Date: 06.11.2021

**Abstract** - This study is aimed to determine the optimum insulation thickness for the exterior wall in buildings for Gümüşhane Province depending on different fuel types and insulation materials. XPS, EPS, rock wool, glass wool as an insulation material on the outer wall and natural gas, coal and fuel oil as fuel are considered in the study. IZODER TS825 calculation program and Life-Cycle Cost Analysis was used for specific heat loss, annual energy requirement calculations and economic analysis. Fuel costs, energy savings values, payback periods and optimum insulation thicknesses have been calculated depending on the various insulation materials and fuel types. According to the results of the study, the optimum insulation thickness for the exterior wall in buildings, annual energy saving and payback periods have respectively calculated as 0.03-0.09 m, 7.21-22.93 \$/m<sup>2</sup>. year and 0.29-0.75.

**Keywords:** Energy Efficiency in Buildings, Energy savings, Optimum insulation thickness, Life-Cycle Cost Analysis, Exterior Wall

### Gümüşhane İli İçin Bina Dış Duvarı Optimum Yalıtım Kalınlığının Yaşam Döngüsü Maliyet Analizine Göre Belirlenmesi

**Öz** - Bu çalışma Gümüşhane ilindeki bina dış duvarı için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesini amaçlamaktadır. Dış duvarda yalıtım malzemesi olarak XPS, EPS, taşyünü, cam yünü ve yakıt olarak doğalgaz, kömür ve fuel-oil ele alınmıştır. Özgül ısı kaybı ve yıllık enerji ihtiyacı hesaplamalarında İZODER TS825 hesap programı ve ekonomik analiz için Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi kullanılmıştır. Çeşitli yalıtım malzemeleri ve yakıt tipleri ile farklı dış duvar konfigürasyonları için yakıt maliyetleri, enerji tasarruf değerleri, geri ödeme süreleri ve optimum yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre binalarda dış duvar optimum yalıtım kalınlıkları, yıllık enerji tasarrufu ve geri ödeme süreleri sırasıyla 0,03-0,10 m, 7,20-39,80 \$/m<sup>2</sup>. yıl ve 0,18-0,75 yıl arasında hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Binalarda Enerji Verimliliği, Enerji tasarrufu, Optimum Yalıtım Kalınlığı, Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi, Dış Duvar



## 1. Giriş

Hızlı nüfus artışı ve sanayideki gelişmelerle bağlantılı olarak dünyada ve ülkemizde enerjiye olan ihtiyaç artmaktadır. Mevcut enerji kaynaklarının kısıtlı olması ve enerji ihtiyacının sürekli artışı enerji verimliliği kavramını ortaya çıkarmıştır [1]. Ülkemizde binalarda kullanılan enerji, toplam tüketilen enerji miktarının %33'üne karşılık gelmektedir. Enerji tüketiminin önemli bir payını oluşturan konut sektörü, enerjinin daha verimli kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi önemlidir. Enerji verimliliği ise konutlarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin düşüşüne neden olmadan enerji tüketiminin azaltılmasıdır [2-3]. TÜİK'in (Türkiye İstatistik Kurumu) 2000 yılı bina sayımına göre, konut, ticari ve kamu binalarının alanı 913 milyon m<sup>2</sup> olup, bunun yaklaşık 400 milyon m<sup>2</sup>'si ısıtılmaktadır [4]. Türkiye'de konutlarda tüketilen enerjinin %80'i ısıtma ve soğutma amacıyla kullanılmaktadır. Bu nedenle ısı yalıtım uygulamalarıyla tüketilen yüksek miktarda enerjiden büyük bir oranda tasarruf sağlanabilir [5]. Bina tipine ve çevre koşullarına göre değişmekle birlikte genellikle binalarda zemin döşemesinden % 15, pencerelerden % 25, tavandan % 20, bina girişindeki alanlardan % 25, çatıdan % 25, tavan arasından % 20 oranında ısı kayıpları meydana gelmektedir [6]. Binalarda uygun ısı yalıtımı ile harcanan yakıt ihtiyacı %25 ile % 50 oranında azaltılabilir [7].

Binalarda toplam ısı kaybının ortalama % 25-40'ı dış duvar yüzeyinden kaynaklanmaktadır.. Yapı fiziği bakımından en ideal yöntem olan dıştan yalıtım uygulamalarında özellikle sert özellik gösteren XPS, EPS, poliüretan, taş yünü ve cam köpüğü gibi ısı yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır [8].

Binalarda yalıtım, ısı kayıplarını azaltır, yakıt tasarrufuna neden olur ve çevre kirliliğinin azalmasına katkı sağlar. Uygun yalıtım malzemesinin seçimi, yalıtım malzemesinin kalınlığına, maliyetine ve ısıl iletkenlik katsayısına olduğu kadar bölgenin iklim koşullarına da bağlıdır. Yalıtım malzemesinin kalınlığının artması ile elde edilecek yakıt tasarrufu ile yalıtım malzemesinin maliyetini arasında bir optimum nokta belirlenmesi gerekir. Bu nokta optimum yalıtım kalınlığını göstermektedir [9-15].

Literatürde, binalarda dış duvarda optimum yalıtım kalınlığını belirlemek için bir çok çalışma mevcuttur. Yu vd. [16] yaptıkları çalışmada, Çin'deki dört şehir (Shanghai, Changsha, Shaoguan and Chengdu) ve beş farklı yalıtım malzemesi (ekspande polistiren, ekstrüde polistiren, poliüretan köpük, perlit ve polivinil klorür) için yaşam döngüsü maliyet analizi ile soğutma ve ısıtma derece gün analizi kullanılarak tipik konutların duvarları için optimum yalıtım kalınlığını hesaplamışlardır. Optimum yalıtım kalınlığı 0,053-0,236 m ve geri ödeme süresi 1,9-4,7 yıl, enerji tasarrufu ise 32,0-54,80 \$/m<sup>2</sup> arasında bulunmuştur. Uçar vd. [17], Adana, İstanbul, Elazığ ve Van illeri için bina dış duvarlarında ekstrüde polistiren yalıtım malzemesinin kömür yakıt için optimum kalınlığını belirlenmesi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada, optimum yalıtım kalınlıkları 3,2 ile 12 cm arasında, enerji tasarrufu 2,63 ile 4,35 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 1,7 ile 2,7 yıl arasında hesaplanmıştır. Kaynaklı vd. [18], Antalya ili için, yalıtım malzemesinin 10 yıllık ekonomik ömrü boyunca enerji maliyetini minimize eden optimum ısı yalıtım kalınlığını belirlemişlerdir. Hesaplamalar, ısıtma ve soğutma derece-gün sayılarına ve yıllık ısıtma, soğutma enerji ihtiyaçlarına göre yapılmıştır. Dış duvar için optimum yalıtım kalınlığı, ısıtma ve soğutma sezonu için sırasıyla 2,6 cm ve 1,2 cm olarak hesaplanırken yıllık toplam enerji ihtiyacı dikkate alındığında ise 3,7 cm olarak bulunmuştur. Yakıt olarak doğal gaz ve elektrik, yalıtım malzemesi olarak polistiren kullanılmış olup analizler farklı derece-gün sayıları için genişletilmiştir. Dongmei vd. [19], Çin'de farklı iklimlerdeki binalarda kullanılan yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı üzerine dış duvar yalıtım kalınlığını incelemişlerdir. Çin'deki üç farklı iklimdeki Guangzhou, Shangay ve Pekin şehirleri için dış duvar

farklı yalıtım kalınlıklarında dört farklı yön için yıllık ısıtma ve soğutma enerji kullanımı hesaplanmıştır. Yıllık ısıtma ve soğutma enerji kullanımının enerji kazanç oranı ile enerji tasarruf potansiyeli üzerine dış duvar yalıtım kalınlığı belirlenmiştir. Çay ve Gürel [20], Türkiye’de dört farklı iklim bölgesindeki dört farklı şehir; İzmir, Zonguldak, Konya ve Sivas için dış duvarların on yıllık ömürde; ömür maliyet analizine dayanan optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri ödeme süresini araştırmışlardır. Ek olarak CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> emisyonları üzerine yalıtım kalınlığının etkisi analiz etmişlerdir. Ekstrüde polistiren yalıtım malzemesi kullanıldığı zaman; yalıtım kalınlığı 0,045 ile 0,195 m, enerji tasarrufu 13,26 ile 248,9 \$/m<sup>2</sup>, geri dönüş periyodu 1.19 ile 1.97 yıl hesaplanmıştır. Optimum yalıtım kalınlığı kullanıldığı zaman, farklı şehir, yakıt tipi ve yalıtım malzemesine bağlı olarak % 62 ile % 92 azalmıştır. Optimum yalıtım kalınlığı hesabı yapılırken derece gün yöntemi kullanılmıştır. Yakıt olarak kömür, doğal gaz, fuel-oil, LPG ve elektrik, yalıtım malzemesi olarak ekstrüde polistiren, taş yünü, ekspande polistiren ve poliüretan köpük kullanılmıştır. Kürekçi [21], Türkiye’de bulunan 81 farklı il için dış duvar optimum yalıtım kalınlığı hesaplanmıştır. Ayrıca optimum yalıtım kalınlığına etki eden dört ayrı yakıt (doğalgaz, kömür, sıvılaştırılmış petrol gazı ve fuel-oil) ve beş ayrı yalıtım malzemesi (genleştirilmiş polistiren, cam yünü, taş yünü, poliüretan ve ekstrüde polistiren) farklı şehirlere göre incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada Gümüşhane ilindeki dört katlı yaklaşık 400 m<sup>2</sup> oturma alanlı bir kamu binasının dış duvarında farklı yalıtım malzemelerine bağlı olarak optimum yalıtım kalınlıkları doğalgaz, kömür ve fuel-oil yakıt için incelenmiştir. Binanın ısıtma enerjisi ihtiyacı ve özgül ısı kaybı hesapları İZODER TS825 programı yardımıyla yapılmıştır.

Yalıtım malzemesi olarak bina dış duvarı için cam yünü, taş yünü, XPS ve EPS seçilmiştir. Farklı dış duvar konfigürasyonları (20 cm’lik gaz beton, 20 cm ve 13,5 cm tuğlalı dış duvar ) ve dıştan yalıtım analiz edilmiştir. Farklı kalınlıklardaki yalıtım malzemeleri için ısı kayıp oranları, yakıt tüketim miktarları, yalıtım malzemesinin ve yakıt maliyetleri hesaplanarak optimum yalıtım kalınlıkları elde edilmiştir. Ekonomik analiz metodu olarak Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi kullanılmıştır.

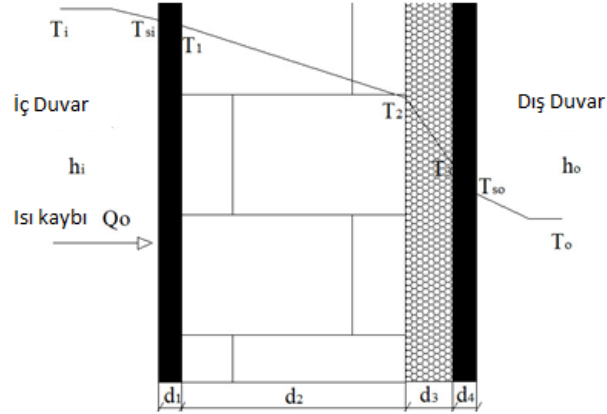
## 2. Araştırma Bulguları

Binalarda ısı kayıpları genellikle taban, tavan, dış duvar yüzeyi, dış yüzey üzerindeki pencere ve kapılarda oluşmaktadır. Yapılan çalışmalarda en fazla kayıp dış duvarda meydana geldiği belirlenmiştir. Binalarda dış duvar yapı malzemeleri ve kalınlıklarında oluşan ısı geçişi Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu çalışmada üç farklı duvar konfigürasyonu incelenmiştir. Dıştan yalıtımlı ve iki farklı tuğla kalınlığı (13,5 cm ve 20 cm) ile gaz betonlu (20 cm) dış duvar için optimum yalıtım kalınlığı araştırılmıştır.

Dış duvar içerisindeki yalıtım malzemesi haricindeki malzemelerin kalınlıkları ve ısıl iletkenlik değerleri gibi fiziksel özellikleri verilmiştir (Tablo 1). Yalıtımsız dış duvarın direnç değerleri R<sub>dd-ün</sub> 13,5 cm kalınlığındaki tuğlalı dıştan yalıtımlı duvar (Tip 1) için 0,6363 m<sup>2</sup>.K/W; 20 cm kalınlığındaki tuğlalı dıştan yalıtımlı duvar (Tip 2) için ise 0,8332 m<sup>2</sup>.K/W ve 20 cm gaz betonlu dıştan yalıtımlı duvar (Tip 3) için ise 2,021 m<sup>2</sup>.K/W olarak hesaplanmıştır.

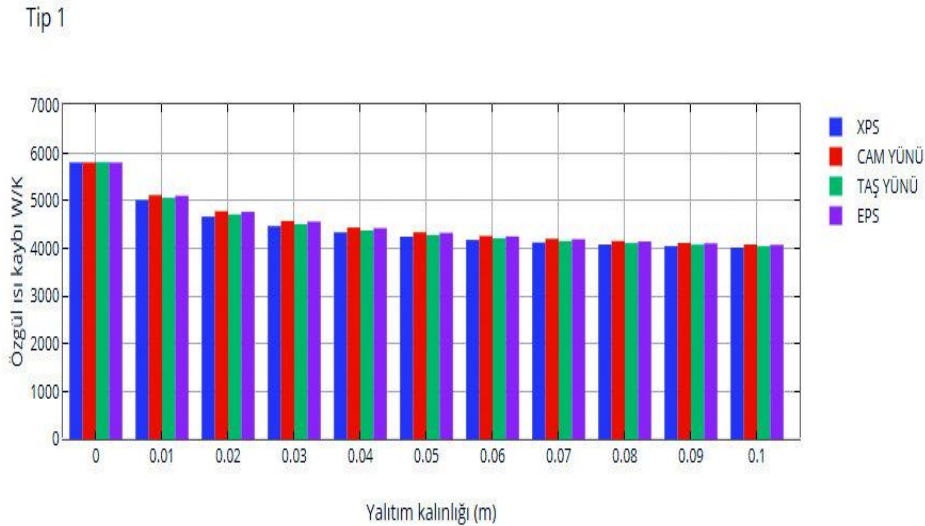
Binanın ısıtma enerjisi ihtiyacı ve özgül ısı kaybı hesapları İZODER TS825 programı yardımıyla yapılmıştır. Ele alınan binanın Tip 1 dış duvarında yalıtım kullanılmadan toplam özgül ısı kaybı

5802,89 W/K iken Tip 2 dış duvarda yalıtımsız özgül ısı kaybı 5.564,71 W/K ve Tip 3 dış duvarda yalıtımsız ısı kaybı 5.174,13 W/K olarak hesaplanmıştır.



Şekil 1. Dış duvardan iletim ve taşınım yoluyla ısı geçişi

Tip 1 için yalıtımsız dış duvardan ısı kayıp oranı % 36, tavadan ısı kaybı % 4, tabandan ısı kaybı % 3, pencere ve kapılardan ısı kaybı % 7 ve havalandırma yoluyla ısı kaybı ise % 50'dir. Tip 2 dış duvar tipi için diğer kayıplar değişmemekle birlikte yalıtımsız dış duvardan ısı kayıp oranı % 33 ve havalandırma yoluyla ısı kayıp oranı ise % 53'tür. Tip 3 için yalıtımsız dış duvar ısı kayıp oranı % , havalandırma ve sızıntı yoluyla ısı kaybı % 57, pencere ve kapılardan ısı kaybı % 8, tabandan ısı kaybı % 3 ve tavadan ısı kayıp oranı ise % 5 olarak bulunmuştur. Tip 1 dış duvarlı bina için farklı yalıtım malzemeleri kalınlıklarına bağlı olarak binadan olan toplam özgül ısı kayıp değerlerin değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Tip 1 için yalıtım kalınlığına bağlı olarak özgül ısı kayıp değerleri

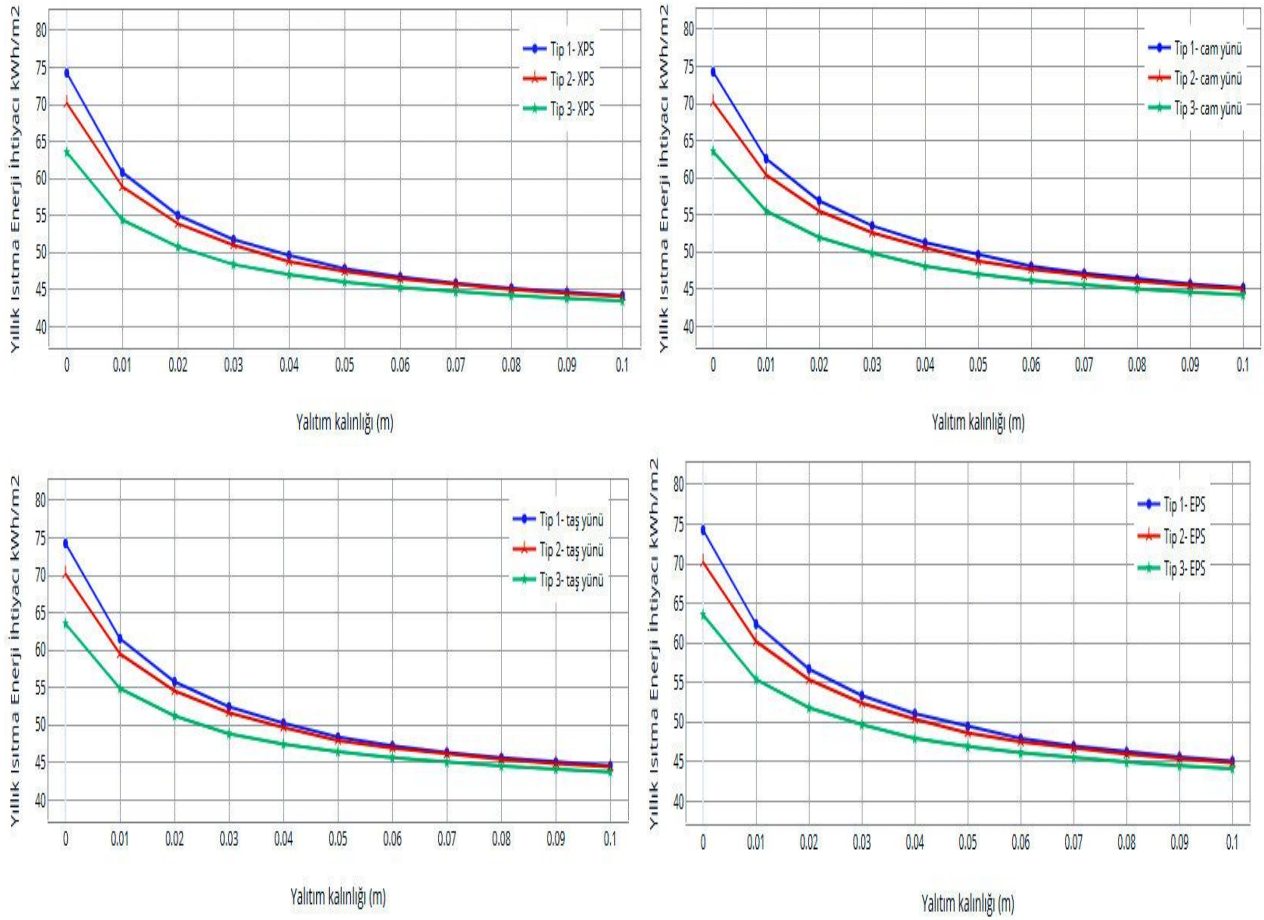
**Tablo 1.** Yalıtımsız dış duvardaki malzemelerin kalınlıkları ve fiziksel özellikleri

Duvar Tipi	Duvar yapısı	Kalınlık d (m)	Isıl iletkenliği k (W/m.K)	R=1/U (m <sup>2</sup> .K/W)
Tip 1	İç sıva	0,02	0,7	0,0286
	Tuğla	0,135	0,33	0,4091
	Dış sıva	0,02	0,7	0,0286
	R <sub>dd-un</sub>			0,6363
Tip 2	İç sıva	0,02	0,7	0,0286
	Tuğla	0,20	0,33	0,6061
	Dış sıva	0,02	0,7	0,0286
	R <sub>dd-un</sub>			0,8332
Tip 3	Alçı sıva	0,02	0,7	0,0286
	Gaz beton	0,20	0,11	1,8181
	Dış cephe kaplaması	0,01	2,3	0,0043
	R <sub>dd-un</sub>			2,021

Tip 1 dış duvar için özgül ısı kayıp değeri, Tip 2'den daha yüksek değerde olup bunun sebebi tuğla kalınlığının ve dolayısıyla toplam ısıl direncin daha küçük değerde olmasıdır. Ayrıca, XPS yalıtım malzemeli dış duvarın özgül ısı kaybı değeri diğer yalıtım malzemelerine göre düşük ısıl iletkenliği nedeniyle en düşük değerdedir. Cam yünü malzemeli dış duvar için ısı kayıp değerleri ise en yüksektir. Dış duvardan olan ısı kayıp oranları farklı ısı yalıtım kalınlıklarına bağlı olarak her üç duvar tipi için % 7-27 arasında değişmektedir. Gümüşhane ili için hesaplanan yıllık ısıtma enerjisi ihtiyaçları ise yalıtımsız Tip 1 dış duvarlı bina için 74,26 kWh/m<sup>2</sup>, yalıtımsız Tip 2 dış duvarlı bina için ise 70,18 kWh/m<sup>2</sup> ve yalıtımsız Tip 3 dış duvarlı bina için ise 63,54 kWh/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. 0,05 m kalınlığında yalıtımlı tüm duvar tipleri için yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı yalıtım malzemesi XPS ise 47,08 kWh/m<sup>2</sup>, cam yünü 48,47 kWh/m<sup>2</sup>, taş yünü 47,58 kWh/m<sup>2</sup> ve EPS ise 48,31 kWh/m<sup>2</sup> olup tüm yalıtım malzemeleri ve duvar tipleri için dış duvardan kaynaklanan ısı kayıp oranı ise % 10-15 arasında değişmektedir.

Farklı yalıtım malzemeleri ve tüm dış duvar konfigürasyonları için artan yalıtım kalınlığına bağlı olarak yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Artan yalıtım kalınlığına bağlı olarak yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı azalırken, belli bir kalınlıktan sonra ısıtma enerjisi ihtiyacı birbirine oldukça yakın değerde bulunmaktadır. Bu kalınlık değerinden sonra yalıtım kalınlığının artması, ısıtma enerjisi ihtiyacına katkı sağlamamakla birlikte yalıtım maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca tuğlalı dış duvar konfigürasyonları için 0,03 m yalıtım kalınlığına kadar enerji ihtiyacı hızlı bir şekilde azalırken daha sonraki yalıtım kalınlık değerlerinde azalma düşmektedir. 0,03 m yalıtım kalınlığı için yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı, Tip 1'de farklı yalıtım malzemelerine göre % 23,35-25,88; Tip 2'de % 20,86-23,19 ve Tip 3'de ise % 21,59-23,85 oranında azalmaktadır.

Ekonomik analiz metodu olarak Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi kullanılmıştır. Analizde kullanılan veriler Tablo 2'de gösterilmiş olup üç farklı yakıt tipi ve 4 farklı yalıtım malzemesi için 10 yıllık ekonomik ömür süresince elde edilecek enerji tasarrufu, geri ödeme süresi ve optimum yalıtım kalınlıkları % 13 faiz oranı ve % 12 enflasyon oranı için incelenmiştir. Analizde yakıt olarak doğalgaz, fuel oil ve kömür kullanılmış olup alt ısıl değerleri sırasıyla 34485 kJ/m<sup>3</sup>, 40546 kJ/kg ve 25080 kJ/kg ve ısıtma sisteminde kullanılan yakıt tipine bağlı olarak ısıtma verimi sırasıyla % 90, % 80 ve % 65 alınmıştır.



Şekil 3. Tüm duvar konfigürasyonları için yalıtım kalınlığı ile yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacının değişimi

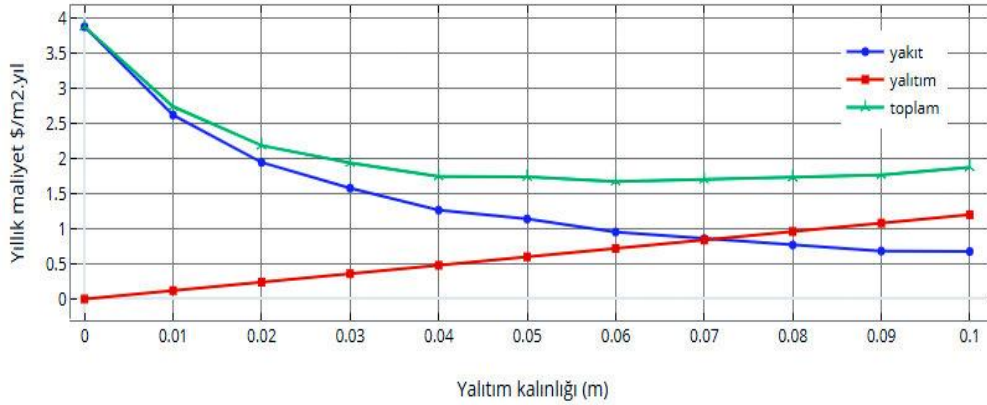
Artan yalıtım kalınlığıyla birlikte yalıtım malzemesinin maliyeti artarken, bina dış kabuğundan meydana gelen ısı kayıpları azalır. Bunun sonucunda istenilen mahal konfor şartlarına ulaşmak için daha az yakıt tüketilir. Yakıt tüketiminin azalmasıyla birlikte artan yalıtım maliyetine karşın yakıt maliyeti düşer. Yakıt maliyeti ve yalıtım maliyetinin toplamı olan toplam maliyet belli bir yalıtım kalınlığına kadar en düşük değerini alır ve bu noktadan sonra tekrar artmaya başlar. Bu noktaya denk gelen yalıtım kalınlığı optimum yalıtım kalınlığını gösterir. Şekil 4'te Tip 2 dış duvar tipi, kömür yakıtlı ısıtma sistemi ve EPS yalıtım malzemesi için yıllık yakıt maliyeti, yalıtım maliyeti ve toplam maliyetin yalıtım kalınlığına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi optimum yalıtım kalınlığı 0,06 m olduğu açıkça görülmektedir. Bu noktadan sonra yalıtım malzemesinin kalınlığının artması ekonomik olmamaktadır.

Tip 1 duvar tipinde optimum yalıtım kalınlıkları daha büyük, Tip 3'te ise en düşük değerdedir. Bunun sebebi Tip 1'deki tuğlanın kalınlığının düşük, iletkenlik katsayısının gaz betona göre yüksek olması ve dolayısıyla ısıl direncin düşük ve ısı kayıplarının yüksek olmasıdır. Ayrıca optimum yalıtım kalınlığı, XPS malzeme için en düşük, cam yününde en yüksek değeri almaktadır. Yakıt cinsine göre değerlendirsek fuel oil için optimum yalıtım kalınlıkları maksimum, doğalgaz için minimumdur. Doğalgazın en yüksek ısıtma verimine sahip yakıt olması, nispeten alt ısıl değerin yüksek olması bu durumda etkilidir. Kömür yakıt, diğerlerine göre ısıtma verimi düşük, alt ısıl değeri de en düşük olmasına rağmen yakıt maliyeti düşük olması nedeniyle ikinci sırada yer almaktadır.

**Tablo 2.** Ekonomik analizde kullanılan veriler

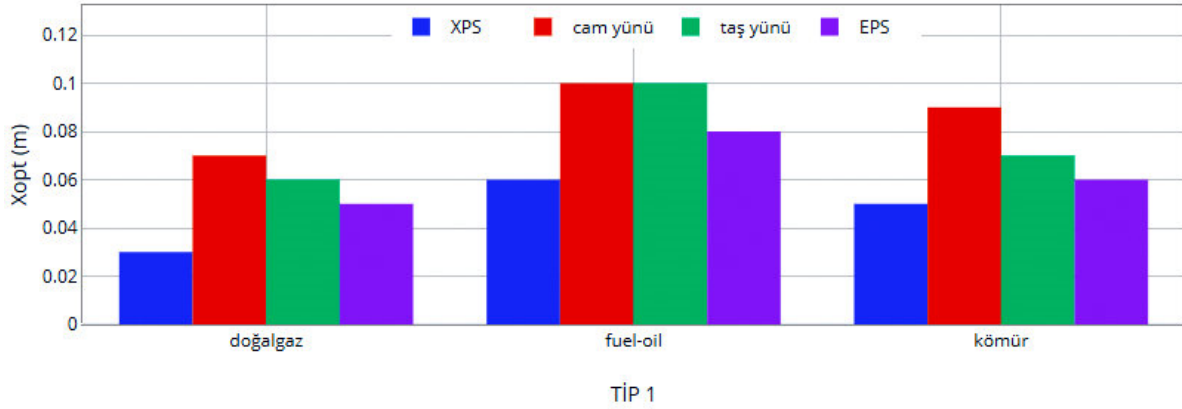
Isıtma derece gün (Gümüşhane) (HDD)	2790			
	XPS	EPS	Taş yünü	Cam yünü
Yalıtım malzemeleri	XPS	EPS	Taş yünü	Cam yünü
Birim fiyat (\$/m <sup>3</sup> )	180	120	95	75
k <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> .K)	0,032	0,039	0,035	0,040
Yakıt	Doğalgaz	Fuel-oil	Kömür	
Yakıt birim fiyat (\$/m <sup>3</sup> )	0,385	0,766	0,273	
H <sub>u</sub> kJ/m <sup>3</sup> , kJ/kg	34.485	40.546	25.080	
Isıtma verimi (%)	90	80	65	
Faiz oranı, I, %	13			
Enflasyon oranı, d, %	12			
Ekonomik ömür, N, yıl	10			

Gümüşhane ili için optimum yalıtım kalınlıkları, farklı yakıt ve duvar tipi ile çeşitli yalıtım malzemelerine göre 0,03-0,10 m arasında değişmektedir. Şekil 5'te Tip 1 dış duvar tipi için optimum yalıtım kalınlıkları yakıt tipi ve yalıtım malzeme çeşitlerine göre verilmiştir. Yıllık enerji tasarrufu değerleri ise artan yalıtım kalınlığına bağlı olarak artış gösterirken optimum yalıtım kalınlığı değerinde maksimum olmaktadır. Sonraki kalınlık değerlerinde azalma eğilimi görülmektedir. En yüksek enerji tasarruf değerleri Tip 1 dış duvar ve fuel-oil yakıtta en düşük değerleri ise doğalgaz yakıt ve Tip 3 dış duvarda elde edilmiştir. Tip 1 dış duvarda ısı kaybı diğer dış duvar çeşitlerine göre yüksek değerde olduğundan yalıtımla elde edilen enerji tasarrufu en yüksek değerdedir.



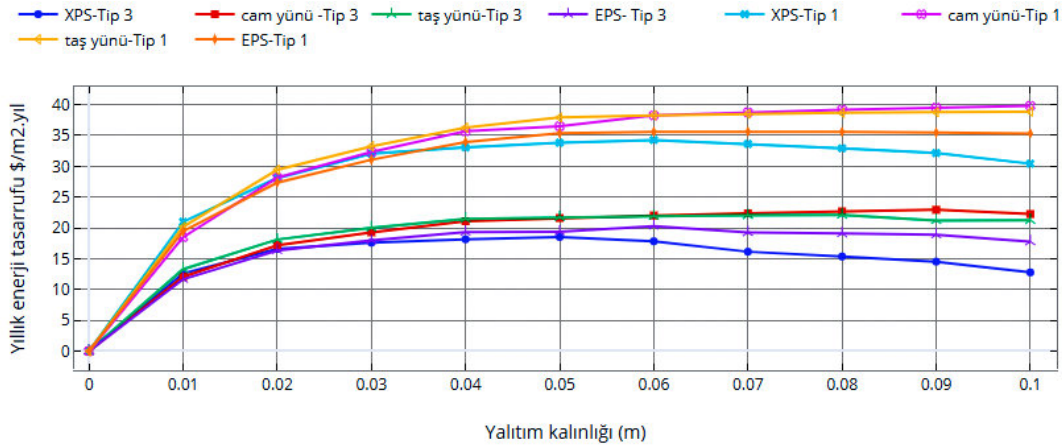
**Şekil 4.** Kömür, Tip 2 dış duvar ve EPS yalıtım malzemesi için yıllık maliyetlerin değişimi

Fuel-oil yakıtın alt ısıl değerinin diğer yakıtlara göre daha yüksek olması ve ısıtma veriminin de nispeten yüksek bir değerde olması enerji tasarrufu değerlerini artırmaktadır. Ayrıca en yüksek enerji tasarrufu değerleri tüm yakıt ve duvar tipleri için düşük maliyeti sebebiyle cam yünü ve taş yünü yalıtım malzemesinde, en düşük enerji tasarruf değerleri ise yüksek maliyeti nedeniyle XPS malzemesinde gözlenmiştir. Taş yünü ısı yalıtım malzemesi de EPS'ye göre daha yüksek enerji tasarruf değerlerine sahiptir. Şekil 6'da yıllık enerji tasarrufu değerlerinin Tip 1 ve Tip 3 dış duvar, fuel-oil yakıt tipi için yalıtım kalınlığı ve yalıtım malzemelerine göre değişimi verilmiştir.



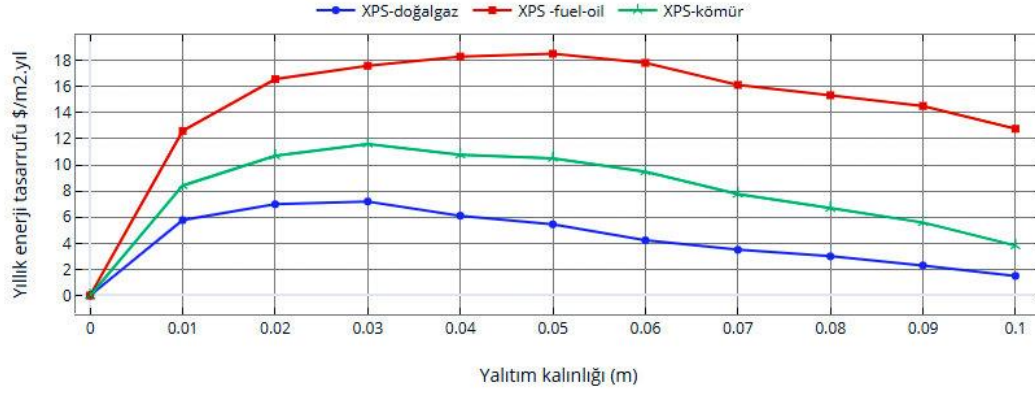
Şekil 5. Tip 1 dış duvar tipi için hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları

XPS ısı yalıtım malzemesi ve Tip 3 dış duvar tipi için yıllık enerji tasarruf değerlerinin yalıtım kalınlığına ve yakıt cinsine göre değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir. Enerji tasarruf değerinin maksimum olduğu noktaya karşılık gelen yalıtım kalınlığı değeri optimum yalıtım kalınlığını vermektedir. Yakıt tipine göre en düşük enerji tasarrufu doğalgaz yakıtta, en yüksek enerji tasarrufu ise fuel-oil yakıtta elde edilmektedir. Tüm yakıt, duvar tipi ve yalıtım malzemelerine göre Gümüşhane ili için optimum yalıtım kalınlığında yıllık net enerji tasarruf değerleri 7,20-39,80 \$/m<sup>2</sup>.yıl arasında değişmektedir.



Şekil 6. Tip 1, Tip 3 ve fuel-oil yakıt için yıllık enerji tasarruf değerlerinin yalıtım kalınlığı ve yalıtım malzemesine göre değişimi

Geri ödeme süreleri, optimum yalıtım kalınlıkları ve net yıllık enerji tasarruf değerleri yakıt tipi, yalıtım malzemesi çeşidi ve farklı dış duvar konfigürasyonları için Tablo 3’te verilmiştir. Geri ödeme süreleri Tip 1 duvar tipinde en düşük, Tip 3 duvar tipi için en yüksek değerdedir. Ayrıca, XPS ve EPS yalıtım malzemeleri için maksimum, cam yünü ve taş yünü için minimumdur. XPS malzeme için daha düşük yalıtım kalınlıkları optimumken, cam yünü için yüksek ısı iletkenlik nedeniyle optimum yalıtım kalınlık değerleri artmaktadır. Farklı yalıtım malzemeleri ve yakıt ile duvar tipleri için geri ödeme süreleri 0,18-0,75 yıl arasında olup oldukça kısadır. Bu da binalara optimum yalıtım kalınlığında yalıtım yapılmasının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Araştırma sonuçları, Kürekçi [21] çalışmasındaki sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7. XPS ve Tip 3 dış duvar için yakıt tiplerine göre yıllık enerji tasarruf değerleri

Tablo 3. Duvar ve yakıt tipleri için farklı yalıtım malzemelerinin optimum yalıtım kalınlıkları, geri ödeme süreleri ve yıllık net enerji tasarruf değerleri

		XPS	Cam yünü	Taş yünü	EPS		
Tip 1	Xopt (m)	0,03	0,07	0,06	0,05	Doğalgaz	
	GÖS (yıl)	0,37	0,25	0,24	0,38		
	NET (\$/m².yıl)	14,26	17,84	23,54	15,72		
	Xopt (m)	0,06	0,10	0,10	0,08	Fuel-oil	
		GÖS (yıl)	0,32	0,19	0,24		0,30
		NET (\$/m².yıl)	34,26	39,80	38,85		35,58
	Xopt (m)	0,05	0,09	0,07	0,06	Kömür	
		GÖS (yıl)	0,51	0,26	0,26		0,26
		NET (\$/m².yıl)	21,36	26,05	25,36		23,32
Tip 2	Xopt (m)	0,03	0,07	0,05	0,04	Doğalgaz	
	GÖS (yıl)	0,49	0,36	0,34	0,39		
	NET (\$/m².yıl)	11,04	14,95	13,80	12,30		
	Xopt (m)	0,05	0,08	0,08	0,06	Fuel-oil	
		GÖS (yıl)	0,33	0,18	0,21		0,25
		NET (\$/m².yıl)	27,45	32,71	30,88		29,23
	Xopt (m)	0,04	0,08	0,07	0,06	Kömür	
		GÖS (yıl)	0,42	0,28	0,32		0,39
		NET (\$/m².yıl)	16,96	21,45	20,80		18,63
Tip 3	Xopt (m)	0,03	0,05	0,04	0,04	Doğalgaz	
	GÖS (yıl)	0,75	0,39	0,40	0,61		
	NET (\$/m².yıl)	7,20	9,56	9,46	7,86		
	Xopt (m)	0,05	0,08	0,08	0,06	Fuel-oil	
		GÖS (yıl)	0,49	0,29	0,34		0,36
		NET (\$/m².yıl)	18,52	22,93	22,09		20,30
	Xopt (m)	0,03	0,08	0,05	0,06	Kömür	
		GÖS (yıl)	0,46	0,47	0,34		0,59
		NET (\$/m².yıl)	11,62	14,33	14,02		12,30



#### 4. Sonuçlar

Bu alışma, Gümüşhane ilindeki binaların dış duvarı için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesini amaçlamaktadır. Farklı dış duvar konfigürasyonları, 20 cm gaz betonlu, 20 cm ve 13,5 cm tuğlalı dıştan yalıtımlı dış duvar tipleri için optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Farklı dış duvar konfigürasyonlarının çalışma kapsamında birlikte değerlendirmesi ve optimum yalıtım kalınlığı hesabında sadece ısı kayıplarının değeril aynı zamanda iç ısı kazançları ile güneş enerjisi kazançlarının da dahil edilmesi literatüre katkıları arasındadır. Dış duvarda yalıtım malzemesi olarak XPS, EPS, taşyünü, cam yn ve yakıt olarak doğalgaz, kömür ve fuel-oil ele alınmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, tüm dış duvar konfigürasyonları için yalıtımsız dış duvardan olan ısı kayıp oranı ortalama % 32'dir. Gümüşhane ili için hesaplanan yıllık ısıtma enerjisi ihtiyaçları ise yalıtımsız tüm dış duvar tipleri için ortalama 69,32 kWh/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Tip 1 duvar tipinde optimum yalıtım kalınlıkları daha büyük, Tip 3'te ise en düşük değerdedir. Bunun sebebi Tip 1'deki tuğlanın kalınlığının düşük, iletkenlik katsayısının gaz betona göre yüksek olması ve dolayısıyla ısıl direncin düşük ve ısı kayıplarının yüksek olmasıdır. Ayrıca optimum yalıtım kalınlığı, XPS malzeme için en düşük, cam ynnde en yüksek değer almaktadır. Yakıt cinsine göre ele alındığında fuel oil için optimum yalıtım kalınlıkları maksimum, doğalgaz için minimumdur. Gümüşhane ili için optimum yalıtım kalınlıkları, farklı yakıt ve duvar tipi ile çeşitli yalıtım malzemelerine göre 0,03-0,10 m arasında değerışmektedir.

En yüksek enerji tasarruf değerleri Tip 1 dış duvar ve fuel-oil yakıtta en düşük değerleri ise doğalgaz yakıt ve Tip 3 dış duvarda elde edilmiştir. Ayrıca en yüksek enerji tasarrufu değerleri tüm yakıt ve duvar tipleri için düşük maliyeti sebebiyle cam yn ve taş yünü yalıtım malzemesinde, en düşük enerji tasarruf değerleri ise yüksek maliyeti nedeniyle XPS malzemesinde gözlenmiştir. Taş yünü ısı yalıtım malzemesi de EPS'ye göre daha yüksek enerji tasarruf değerlerine sahiptir. Tüm yakıt, duvar tipi ve yalıtım malzemelerine göre Gümüşhane ili için optimum yalıtım kalınlığında yıllık net enerji tasarruf değerleri 7,20-39,80 \$/m<sup>2</sup>.yıl arasında değerışmektedir. Geri deme süreleri Tip 1 duvar tipinde en düşük, Tip 3 duvar tipi için en yüksek değerdedir. Ayrıca, XPS ve EPS yalıtım malzemeleri için maksimum, cam yn ve taş yünü için minimumdur. Farklı yalıtım malzemeleri ve yakıt ile duvar tipleri için geri ödeme süreleri 0,18-0,75 yıl arasında olup oldukça kısadır. Bunun nedeni, optimum yalıtım kalınlığı hesabında sadece ısı kayıplarının değeril aynı zamanda iç ısı kazançları ve güneş enerjisi kazançlarının da birlikte değerlendirilmesidir.

#### Referanslar

- [1] Comakli, K. ve Terhan, M. (2011). Sıcak su üretimim için baca gazı atık enerjinin kullanımı. Tesisat Mühendisliği Dergisi, 124, 43-51.
- [2] Kon, O. ve Yüksel, B. (2016). Farklı amaçlarla kullanılan binaların çatı, döşeme ve dış duvarları için llerek hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 36(1), 17-27.
- [3] Comakli, K. ve Terhan, M. (2016). Energy and economic analysis of heat recovery from boiler exhaust flue gas. International Journal of Energy and Power Engineering, 10(4),450-458.
- [4] Keskin, T. (2010). Türkiye'nin ulusal iklim değerikliği eylem planının geliştirilmesi projesi, Binalar sektörü mevcut durum değerlendirmesi raporu. Erişim adresi <http://docplayer.biz.tr/201403-Binalar-sektoru-mevcut-durum-degerlendirmesi-raporu.html>
- [5] Gürel, A. E. ve Daşdemir, A. (2011). Türkiye'nin dört farklı iklim bölgesinde ısıtma ve soğutma yükleri için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri

Enstitüsü Dergisi, 27 (4), 346-352.

- [6] Uzun, İ. (2013). Yönetmelikler ışığında ısı yalıtımı ve uygulamaları. EPSDER, İstanbul.
- [7] Kaya, D. ve Öztürk, H. (2014). Isı yalıtımı ile enerji tasarrufu, Sanayide enerji yönetimi ve enerji verimliliği. Umuttepe Yayınevi, Kocaeli.
- [8] Yaman, Ö., Şengül, Ö., Selçuk, H., Çalığış, O., Kara, İ., Erdem, Ş., ve Özgür, D. (2015). Binalarda ısı yalıtımı ve ısı yalıtım malzemeleri. İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 487(4), 62-75.
- [9] Başoğul, Y., Demircan, C. and Keçebaş, A. (2016). Determination of optimum insulation thickness for environmental impact reduction of pipe insulation. Applied Thermal Engineering, 101, 121-130.
- [10] Keçebaş, A. (2012). Determination of insulation thickness by means of exergy analysis in pipe insulation, Energy Conversion and Management, 58, 76-83.
- [11] Kayfeci, M. (2014). Determination of energy saving and optimum insulation thicknesses of the heating piping systems for different insulation materials, Energy and Buildings, 69, 278-284.
- [12] Keçebaş, A., Alkan, M. A. and Bayhan, M. (2011). Thermo-economic analysis of pipe insulation for district heating piping systems. Applied Thermal Engineering, 31, 3929-3937.
- [13] Keçebaş, A. (2015). Determination of optimum insulation thickness in pipe for exergetic life cycle assessment, Energy Conversion and Management, 105, 826-835.
- [14] İlhan, U. (2018). Optimum insulation thickness for pipes in district heating systems, Journal of Mechanical and Energy Engineering, 42, 225-232.
- [15] Zhang, L., Wang, Z., Yang, X. Jin, L., Zhang, Q. and Hu, W. (2017). Thermo-economic analysis for directly-buried pipes insulation of district heating piping systems. Energy Procedia, 105, 3369-3376.
- [16] Yu, J., Yang C., Tian L. and Liao, D. (2009). A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China, Applied Energy, 86(11), 2520-2529.
- [17] Uçar, A., İnalli, M. and Balo, F. (2011). Application of three different methods for determination of optimum insulation thickness in external walls, Environmental Progress and Sustainable Energy, 30(4), 709-719.
- [18] Kaynaklı, Ö., Mutlu, M. ve Kılıç, M. (2012). Bina duvarlarına uygulanan ısı yalıtım kalınlığının enerji maliyeti odaklı optimizasyonu, Tesisat Mühendisliği, 126, 48-54.
- [19] Dongmei, P., Mingyin C., Shiming D. and Zhongping, L. (2012). The effects of external wall insulation thickness on annual cooling and heating energy uses under different climates, Applied Energy, 97(C), 313-318.
- [20] Çay, Y. and Gürel, A. E. (2013). Determination of optimum insulation thickness, energy savings, and environmental impact for different climatic regions of Turkey, Environmental Progress and Sustainable Energy, 32, 365-372.
- [21] Kurekci, N. A. (2016), Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers, Energy and Buildings, 118, 197-213.