



**TEL PATLATMA YÖNTEMİ İLE
NANOTANECİK SENTEZİ**

Betül SOSLU

Yüksek Lisans Tezi

Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK

Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı

Nanomalzeme Bilim Dalı

2019

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEL PATLATMA YÖNTEMİ İLE NANOTANECİK SENTEZİ

Betül SOSLU

**NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI
Nanomalzeme Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

TEL PATLATMA YÖNTEMİ İLE NANOTANECİK SENTEZİ

Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK danışmanlığında, Betül SOSLU tarafından hazırlanan bu çalışma 23/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanomalzeme ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı – Nanomalzeme Bilim Dalı'nda Yüksek tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;
Enstitü Yönetim Kurulu 23/01/2019 Tarih ve 04/27 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TEL PATLATMA YÖNTEMİ İLE NANOTANECİK SENTEZİ

Betül SOSLU

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı
Nanomalzeme Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK

Tez kapsamında yüksek gerilim ile elektriksel bir patlama oluşturularak nanotanecek üretimi hedeflenmiştir. Patlama deneyi önce POWERSIM simülasyon programında devrenin girişine $V_{pp} = 400V$ gerilim değeri uygulanarak simüle edilmiştir ve çıkışta 8000V gerilim oluştuğu görülmüştür. Simülasyon yaparak kullandığımız deney düzeneğiyle istediğimiz gerilim değerlerine ulaşılabildiği görülmüştür.

Patlama için gerekli olan gerilim değerine ulaşmak için ayarlanabilir gerilim katlayıcı devre kullanılmıştır. Deney esnasında devrenin girişinden trafo ile 300V a yükseltilmiş şehir şebekesi uygulanarak devrenin çıkışından büyüklüğü 6000V olan gerilim değeri elde edilmiş ve tel patlatılmıştır. Patlamalar hava ortamında gerçekleştirilmiş ve deney sonucunda elde edilen tanecik boyutları SEM cihazında kontrol edilmiştir. SEM görüntülerinden yüksek gerilim altında tel patlatma yöntemi ile nanoboyutlarda taneciklerin elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca nanoyapı morfolojisinin patlatma parametrelerine bağlı olduğu da tespit edilmiştir.

2019, 48 sayfa

Anahtar Kelimeler: elektriksel tel patlatma, nanotanecek, nanoteknoloji, gerilim katlayıcı devre, elektropatlama

ABSTRACT

Master Thesis

NANOPARTICLE SYNTHESIS WITH EXPLODING WIRE METHOD

Betül SOSLU

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Nanoscience and Nanoengineering
Department of Nanomaterials

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK

Within the scope of this thesis, nanoparticle production is targeted by creating an wire explosion with high voltage. The wire explosion was first simulated using POWERSIM simulation program by applying the voltage value to the input of the circuit and 8000V voltage was generated at the output. Simulation results showed that the desired voltage values can be achieved with the experimental setup we use.

Adjustable voltage multiplier circuit is used to reach the required voltage value for the explosion. During the experiment, the voltage of the city grid, which is connected to the input of the transformer, has been increased to 300V by transformer. At the output of the multiplier circuit, the voltage value of 6000V was obtained and the wire was exploded. The explosions were carried out in air and the particle size obtained from the SEM images. It was observed from the SEM images that nanoparticles could be produced by wire exploding method under high voltage. In addition, it was determined that the nanostructure morphology was dependent on the wire exploding parameters.

2019, 48 pages

Keywords: electrical wire exploding, nanoparticle, nanotechnology, voltage multiplier circuit

TEŞEKKÜR

Sunduğum bu Yüksek Lisans Tez Çalışması, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanomalzeme Bilim Dalında hazırlanmıştır.

Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olduğunu hissettirip desteklerini esirgemeyen, tecrübe ve bilgi birikimlerini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde görev yapan öğretim üyesi hocalarıma, Sayın Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL ve Sayın Prof. Dr. Tevhit KARACALI’ya teşekkür ederim.

Her zaman maddi manevi yanımda olan değerli ailem ve yüksek lisansa başladığımda hayatta olan mezuniyetimi dört gözle bekleyen rahmetli babaannem Sayın Saniye SOSLU’ya sonsuz teşekkür ederim. İlk günden beri beni bir an olsun yalnız bırakmayan Sayın Elektronik Haberleşme Mühendisi Ayşe BAĞIRAN ve Sayın Elektrik Elektronik Mühendisi Ayça BAKIR’a, desteklerinden dolayı Sayın Elektrik Elektronik Mühendisi Erhan BAYRAK ve Sayın Elektrik Elektronik Mühendisi Ahmet ÖZMEN’e teşekkür ederim.

Ocak, 2019

Betül SOSLU

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Nanoteknoloji	1
1.2. Nanoteknoloji'nin Tarihçesi.....	1
1.3. Nanotanecik.....	3
1.3.1. Nanotanecik sentezi önemi.....	4
1.4. Elektropatlama Metodu İle Nanotanecik Üretme.....	4
1.5. Elektropatlama Metodunun Avantajları	5
1.6. Elektropatlama Metodu Kullanım Alanları	6
2. KURAMSAL TEMELLER.....	7
2.1. Nanotanecik Üretim Yöntemleri	7
2.1.1. Aşağıdan yukarıya yaklaşımı	7
2.1.2. Yukarıdan aşağıya yaklaşımı.....	14
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	18
3.1. Elektropatlama Metodu	18
3.1.1. Elektropatlama metoduyla taneciklerin oluşum süreci	18
3.1.2. Elektropatlama metoduyla elde edilen taneciklerin genel özellikleri	19
3.1.3. Bu yöntemle üretilecek taneciklerin özelliklerinin bağlı olduğu parametreler	19
3.2. Elektropatlama Yöntemi İçin Önerilen Deney Düzenegi.....	20
3.2.1. Giriş geriliminin ayarlanması.....	20
3.2.2. Gerilim katlayıcı (çoklayıcı) devre.....	22
3.3. Altı Kat Gerilim Katlayıcı Devre Simülasyonu	23
3.3.1. Deneyde kullandığımız giriş gerilimini 20 kat katlayıcı devre	26
3.3.2. Tez çalışmasında kullanılan gerilim katlayıcı devrenin simülasyonu	26

4. ARAŞTIRMA BULGULARI	30
4.1. Elektrik Teli Patlamasıyla Nanotanecik Oluşum Mekanizması.....	31
4.2. Modelleme Çalışmaları	34
4.2.1. İnce telin buharlaşma enerjisi.....	34
4.2.2. Alaşım nanotaneciklerin boyuta bağlı erimesi	34
4.3. Deney Düzenegi	36
4.4. Deney Sonuçları	37
5. SONUÇLAR.....	44
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	49

KISALTMALAR DİZİNİ

h_g	Malzemenin Buharlaşmasının Gizli Isısı
h_m	Erimenin Gizli Isısı
C_s	Patlayan Telin Kapasitesi
E_0	Malzemenin Atom Başına Uyum Enerjisi
E_p	Mol Başına Uyum Enerjisi
W_s	Alaşımın Süblimleşme Enerjisi
t_H	Isınma Süresi
ϕ	Malzemenin Direnci
$a \hat{a}$	Tel Malzemenin Süblimasyon Enerjisi
A/cm^2	Amper/Santimeetrekare
AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i>
C	Kapasitans
CalTech	Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü
d	Atom Çapı
D	Diyot
D	Nanotanecik Çapı
e	<i>Tel Malzemenin Süblimasyon Enerjisi</i>
EDS	<i>Enerji Dağılım Spektroskopisi</i>
EUV	Extreme Ultraviolet
F	<i>Farad</i>
F	Farad
H	Henry
h	Spesifik Akım Hareketi
I	Akım
j	Akım Yoğunluğu
K	Kelvin
K/s	<i>Kelvin/Saniye</i>
kJ/mol	kilojoule/mol
kWh/kg	<i>KiloWattSaat/Kilogram</i>

L	İndüktivite
m/s	Metre/Saniye
MBE	Molecular Beam Epitaxy
<i>n</i>	<i>Nano</i>
Pa	Paskal
R	Direnç
r	Telin Yarıçapı
RHEED	<i>Reflection High-Energy Electron Diffraction</i>
S	Anahtar
SEM	Scanning Electron Microscope
STM	Scanning Tunnelling Microscope
T	Anlık Sıcaklık
U	Şarj Gerilimi
USP	<i>Ultrasonik Sprey Piroliz</i>
V	Volt
W	Enerji
A	Avagadro Sayısı
<i>k</i>	Spesifik Isı Oranı
ρ	Malzemenin Yoğunluğu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Nanoboyutta tanecik üretiminde kullanılan başlıca yöntemler	7
Şekil 2.2. Asal gaz yönteminin şematik olarak gösterimi.....	8
Şekil 2.3. Alev sentezinde kullanılan sistemin şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.4. Kimyasal buharlaştırma yöntemi için kullanılan reaktörün şematik gösterimi	10
Şekil 2.5. Esas büyüme kaynakları, kapaklar, ısı akı detektörü ve yapının büyümesi boyunca görüntülenmesi için RHEED sistemini gösteren basit MBE odasının üstten görüntüsü	11
Şekil 2.6. Atom tabaka çökmesi.....	11
Şekil 2.7. Sol-jel teknolojisi ve bu teknolojiyle üretilebilecek malzemelerin gösterimi	13
Şekil 2.8. USP yönteminin şematik görünümü.....	14
Şekil 2.9. Mekanik aşındırma ile taneciklerin küçültülmesi	15
Şekil 2.10. Deneysel kurulumun prensip şeması	16
Şekil 2.11. Elektropatlama metoduyla metal oluşum sistemi.....	17
Şekil 3.1. Önerilen Elektropatlama deney düzeneği.....	20
Şekil 3.2. Tez çalışmasında kullanılan trafo	21
Şekil 3.3. Altı kat gerilim katlayıcı devre şeması	22
Şekil 3.4. Gerilim katlayıcı basit devresi	24
Şekil 3.5. Şekil 3.4'deki gerilim katlayıcı devrenin gerilim grafikleri	24
Şekil 3.6. Gerilim katlayıcı devrede kullanılan diyot Single 30A 2200V DNA30ER2200IY	25
Şekil 3.7. Gerilim katlayıcı devrede kullanılan kondansatör $C_n=40 \mu$, $U_n=1250 \text{ V}$	25
Şekil 3.8. Deney düzeneğinin güç kısmı.....	26
Şekil 3.9. Elektropatlama metodunun giriş gerilimi 400V olan uygulama devresi	27
Şekil 3.10. Şekil 3.9'a ait devrenin ölçüm sonuçları	28
Şekil 3.11. Şekil 3.10'daki devrenin giriş-çıkış grafiği	29
Şekil 4.1. Temel devre düzeneği.....	30
Şekil 4.2. Deney düzeneği trafo bağlantıları.....	36

Şekil 4.3. Gerilim katlayıcı devre deney düzeneği	37
Şekil 4.4. Deney düzeneği patlama ortamı	37
Şekil 4.5. Uygulanan deney düzeneği.....	37
Şekil 4.6. Patlamanın anlık görüntüleri.....	38
Şekil 4.7. SEM Görüntülerinin alındığı bakır levha	38
Şekil 4.8. 1 numaralı bölgeye ait SEM görüntüleri	39
Şekil 4.9. 2 numaralı bölgeye ait SEM görüntüleri	40
Şekil 4.10. 1 numaralı bölgeden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizi için belirlenen nokta	41
Şekil 4.11. 1 numaralı bölgede tespit edilen elementlerin yoğunluk grafiği	41
Şekil 4.12. 2 numaralı bölgeden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizi için belirlenen nokta	42
Şekil 4.13. 2 numaralı bölgede tespit edilen elementlerin yoğunluk grafiği	42
Şekil 4.14. SEM görüntüsündeki taneciklerin tanecik sayısı-boyut grafiği	43
Şekil 4.15. SEM görüntüsündeki taneciklerin tanecik sayısı-boyut grafiği	43
Şekil 4.16. SEM görüntüsündeki taneciklerin tanecik sayısı-boyut grafiği	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Deney düzeneğine ait gerilim değerleri.....	21
Çizelge 4.1. Tez çalışmasına ait devre parametreleri	31



1. GİRİŞ

1.1. Nanoteknoloji

“Nano” Yunanca ve Latince cüce anlamında kullanılan bir sözcüktür. Aynı zamanda bir birimin milyarda biri anlamında da kullanılmaktadır. Tanımdan da anlaşılacağı üzere, nano diye adlandırdığımız ölçü birimi bir metrenin milyarda biri veya bir milimetrenin milyonda biridir (Kostak 2007).

Nanoteknoloji ise, boyutsal anlamda 100nm veya altındaki büyüklüklerde yer alan ve hacimsel malzemelere oranla üstün özellikler gösteren malzemelerin üretim, tasarım, özellik geliştirme ve kullanım alanlarını tanımlayan nanomalzemeler üzerine kurulu bilim dalıdır. Nanomalzemelerin; nanokristal, nanopaçacık, nanotüp, nanotel, nanoçubuk, nano ince film gibi birçok çeşidi vardır.

Malzeme boyutu nanoboyuta indiğinde malzemelerin özellikleri klasik fizik kurallarından ziyade kuantum fiziği kurallarına göre değişim göstermektedir. Buna örnek olarak hacimsel karbonla karbon nanotüp arasındaki mukavemet farkı gösterilebilir. Karbon nanotüp hacimsel kablonun gösteremeyeceği bir mukavemet olan çelikten 100 kat daha fazla mukavemet gösterebilmektedir. Bu gibi nanoyapıların üstünlüklerini gösteren durumlar birçok nanoteknoloji uygulamalarında görülmektedir (Rao *et al.* 2005; Çıracı 2006; Lines 2008).

1.2. Nanoteknoloji’nin Tarihçesi

Nanoteknoloji alanındaki çalışmalar, o zaman her ne kadar nanoteknoloji çalışmaları olduğu bilinmese de Faraday’a kadar dayanmaktadır. 19. Yüzyılın ortalarında yaptığı çalışmalarında malzemelerin boyutlarının küçüldükçe ne gibi değişikliklere uğradığını gözlemlemiştir. Bu alanda Faraday’ın yaptığı çalışmalarının en ünlüsü: boyutları

küçüldükçe renk değişikliği gösteren altın partiküllerin incelendiği kolloidal altın çözeltileridir (Aşık 2012).

Nanobilim ve nanoteknolojideki sistematik çalışmalar, 29 Aralık 1959'da Kaliforniya Teknoloji Enstitüsünde (CalTech) gerçekleştirilen Amerikan Fizik Derneği toplantısında fizikçi Richard Feynman tarafından "There's plenty of room at the bottom" başlıklı bir konuşma ile başlamıştır. Feynman çalışmasında, bilgisayarların boyutlarının küçültülmesi, tekil atomların hareket ettirilmesi ve küçük boyutların incelenmesi için üretilecek makineler hakkında teorik bilgiler sunmuştur. Başlangıçta teoriden ibaret olan bu çalışma zamanla pek çok bilim adamına ilham kaynağı olmuştur (James *et al.* 2017).

1974 yılında Tokyo Bilim Üniversitesi'nde görev yapan Norio Taniguchi "Temel Nano-Teknoloji Konseptleri" adlı makalesinde ilk kez nanoteknoloji kelimesini kullanarak literatüre bu terimi kazandırmıştır.

1980'lerden önce bu kadar küçük malzemelerin incelenmesini sağlayacak uygun mikroskoplar yoktu. 80'lerden sonra bu konuda çalışmalar hız kazanmış, 1981 yılında geliştirilen tarama tünelli mikroskobu (Scanning Tunneling Microscope STM) 1986'da Nobel Fizik ödülünü almıştır. 1986 yılında üretilen Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) da nanoteknoloji çalışmalarının başlamasına öncü olmuşlardır. Bu çalışmalarla nanoboyutların karakterizasyonu daha verimli ve hızlı bir şekilde yapılabilmiş, nanoteknoloji asıl önemini ve ivmesini kazanmıştır (Celep 2007).

1980'lerin sonlarına doğru nanoteknoloji üzerine ilk basılı eserler verilmeye başlanmıştır. Eric Drexler'in 1986 yılında yayınlanan "Engines of Creation" adlı kitabı ve 1989 yılında yayına başlayan "Nanotechnology" isimli dergi bu eserlere örnek verilebilir.

Tuomo Suntolo (1996), ilk fonksiyonel nanoteknoloji ürünü olan “tek atom kalınlığında ince film kaplama” isimli makalesini yayınlamıştır. Bu çalışma Finlandiya’da Tuomo Suntolo’nun teorik fikirleri destekleyici çalışması olarak bilinmektedir.

1996’da 1nm büyüklüğündeki fulleren Nobel Kimya ödülünü almış, fulleren molekülünün esnetilmiş hali olan karbon nanotüplerde nanomalzemeye olan ilgiyi bir kez daha artırmıştır.

1999 yılında ABD’de Bill Clinton hükümetinin, nanoteknoloji alanında yürütülen çalışmaları geliştirme ve ticarileştirme amacı taşıyan ilk resmi hükümet programı Ulusal Nanoteknoloji Adımı (National Nanotechnology Initiative), nanoteknoloji çalışmalarında yarışı başlatmıştır.

2001 yılında Avrupa Birliği çevre programı için nanoteknolojinin de dahil edilmesi ile bu süreç devam etmiştir. Daha sonraki yıllarda ise Japonya, Tayvan, Singapur, Çin, İsrail ve İsviçre gibi ülkelerde hükümet programlarında değişiklikler yaparak nanoteknolojinin yönetsel düzeyde gelişmesi konusunda adımlar atmışlardır (Aşık 2012; Duran 2015).

1.3. Nanotanecik

Nanotanecik: boyutları 1 ile 100 nm arasında değişen taneciklere verilen isimdir. 1 nanometre ise atomun yaklaşık 8-10 katı bir boyuttur (Taşkın 2013). Nanoyapılı tanecikler nanoteknolojinin temelini oluşturmaktadır (Miller *et al.* 2004; Rao *et al.* 2005). Bu tanecikler daha büyük boyutlu taneciklere göre daha farklı ve üstün kabul edilen özellikler göstermektedir. Bu özellikler sayesinde nanotaneciklerin başta elektrik-elektronik, otomotiv, biomedikal ve kimya sektörleri olmak üzere pek çok alanda kullanıldığı görülmektedir (Liveri 2006).

Günümüzde nanotaneciklerin bu kadar çekici olmasının bilinen nedenleri; taneciklerin kuantum boyut etkileri, elektronik yapısının boyut bağımlılığı, yüzey atomlarının benzersiz karakteri ve yüksek yüzey hacim oranıdır (Liveri 2006).

1.3.1. Nanotanecik sentezi önemi

Nanotanecik sentezi birçok teknolojik ve farmakolojik ürünlerin hazırlanmasına imkân sağlamaktadır. Bu ürünler; yüksek aktiviteli katalizörler, süperiletkenler, aşınmaya karşı katkılar, yüzey aktif maddeler, ilaç taşıyıcılar, özel teşhis aletleri, optik uygulamalar için özel teknolojik malzemeler olarak sıralanabilir. Aynı zamanda nanotanecik sentezi, malzemelerin nanoboyut kontrolü seviyesinde nanotaşıyıcılar, nanosensörler, nanomakinalar ve yüksek yoğunluklu veri depolama hücreleri gibi kendine özgü işlevselliğe sahip minyatürleştirilmiş aygıtların gerçekleştirilmesine de izin vermektedir (Goldstain 1997; Liveri 2006).

Tüm bunlar bize nanoyapılı malzemelerin ve cihazların tasarlanmasını, üretimini ve işlevsel olarak kullanımını kapsayan nanoteknoloji alanındaki yeni gelişmeler için atlanamayacak ilk adımın nanotanecik üretimi olduğunu göstermektedir (Gürmen vd 2008).

1.4. Elektropatlama Metodu İle Nanotanecik Üretme

Metal bir tel veya folyoyu buharlaştırmak için elektrik boşaltımının kullanıldığı çalışmalar ilk olarak 18. yüzyılda kayıtlara geçmiştir. Tıp ve jeoloji gibi çeşitli disiplinlerin yanı sıra elektriği de araştıran Hollandalı filozof Martin van Marum (1750-1837) ince bir teli kondansatörün ilkel şekli olan leyden pillerinin deşarjını kullanarak ısıtıp eritmeyi başarmıştır. Benjamin Franklin de (1706-1790) folyoyu patlatmak için leyden pili kullanmış ve patlama esnasında kâğıdı patlama ortamına çok yakın yerleştirerek karton silüetleri altın ve gümüş ile kaplamıştır. Patlayan tel olgusunu ilk yorumlayan kişi ise Franklin'in enstruman yapımcısı olan İngiliz arkadaşı Edward Nairne'dir (1726-1806) (Hansen 2011).

Patlayan tel olgusu bu çalışmaları izleyen 200 yılda da büyük merak uyandırmış ve 1950’lerde yoğun bir araştırma konusu olmuştur (Hansen 2011).

Patlayıcı tel yöntemiyle tanecik üretmek için sistematik araştırmalar ilk olarak 70’li yıllarda Rusya’da başlamıştır. Daha sonra Ukrayna, Almanya, Japonya, Hindistan, Kore gibi ölkelerdeki şirketler tarafından da geniş çaplı araştırmalar devam etmiştir (Sedoi and Yavorovsky 2008).

1.5. Elektropatlama Metodunun Avantajları

Bu tez çalışmasında elektropatlama ile nanotanecik üretimi yönteminin kullanmasının sebeplerinden ilki, elde edilecek ürünlerin özelliklerinin elektriksel parametreler aracılığıyla ayarlanabilmesi kolaylığını sağlamasıdır. Telin elektrik akımı tarafından direkt olarak ısıtılmasıyla yüksek ısıtma hızı ($> 10^7$ K/s) ve düşük enerji tüketimi (<10 kWh/kg) sağlanmaktadır. Bu durumun kablolarda adyabatik enerji iletimini meydana getirmesi de bu yöntemin tercih edilme sebeplerindendir. Adyabatik tanım olarak termodinamikte çalışma akışkanında ısı ve kütle kaybının veya kazancının olmadığı haldeki süreçtir. Aynı zamanda bu yöntem evre açısından zararsızdır: nanotanecik üretiminin işlemi kapalı odada yapıldığı için hiçbir teknolojik emisyon yoktur (Nazarenko 2007).

Özetle bu yöntemle, diğer yöntemlerle elde edilen taneciklere kıyasla iç gerilimleri ve yüzey enerjileri daha fazla olan, daha büyük kimyasal ve metalürjik reaktiviteye sahip, gerekli koşullar sağlandığında kendi kendilerine sinterlenebilen, boyutları 10-100 nm arasında değişen tanecikler üretilebilmektedir (Sen 2005; Luther 2007; Yazıcı2009).

Tüm bu sebepler göz önünde bulundurularak tez çalışmasında bu yöntem tercih edilmiştir.

1.6. Elektropatlama Metodu Kullanım Alanları

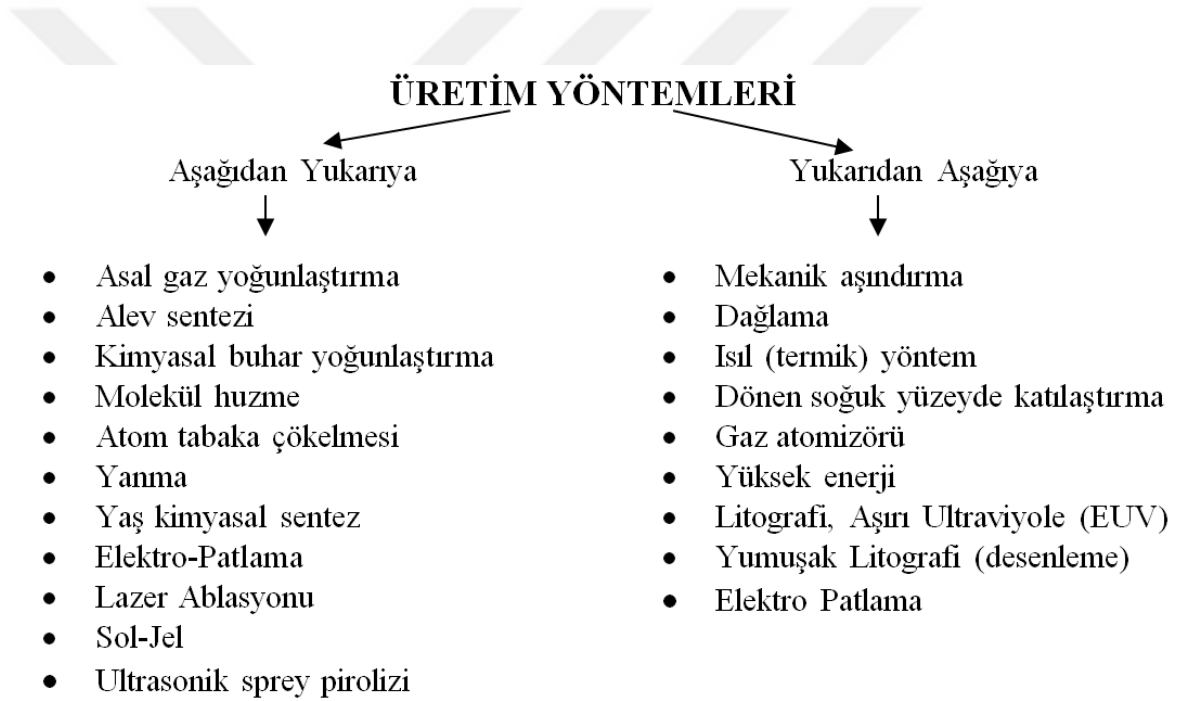
Nanomalzemeler tıptan kozmetiğe, hava araçlarından gıda sektörüne, boyadan zırh malzemelerine kadar geniş ve sürekli büyüyen bir yelpazede kullanılmaktadırlar. Yapı sektörü, tekstil, enerji, otomotiv, elektronik, havacılık nanomalzemelerin bir başka kullanım alanlarıdır. Bununla beraber üretim yöntemlerine göre de kullanım alanları özelleşebilmektedir (Işık 2009).

Günümüzde patlayan teller öncelikle enerji araştırmalarında kullanılmaktadır (Hansen 2011). Elektropatlama metodu endüstriyel yağ içindeki bakır tellere uygulandığında yağdaki sürtünme katsayısının %40 kadar düştüğü görülmektedir (Nazarenko 2007). Elektropatlama metodu saf su içindeki alüminyuma uygulandığında ise, reaksiyon ürünü olarak, özel katkılar olmaksızın dönüşüm oranı %100'e yakın hidrojen elde edilmektedir (Nazarenko 2007). Bu yöntem aynı zamanda nükleer mühimmatlarda, yüksek yoğunluklu ışık kaynağında ve metal nanotanecikler üretmek için kullanılmaktadır (James and Shaji 2017).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Nanotanecek Üretim Yöntemleri

Günümüzde nanotanecek üretebilmek için birçok yöntem kullanılmaktadır. Wolfgang çalışmasında yöntemleri genel olarak kabul edilen yukarıdan aşağıya (top down) ve aşağıdan yukarıya (bottom up) yaklaşımları üzerinden sıralamıştır (Wolfgang 2007). Şekil 2.1’de nanotanecek üretim yöntemleri gösterilmektedir.



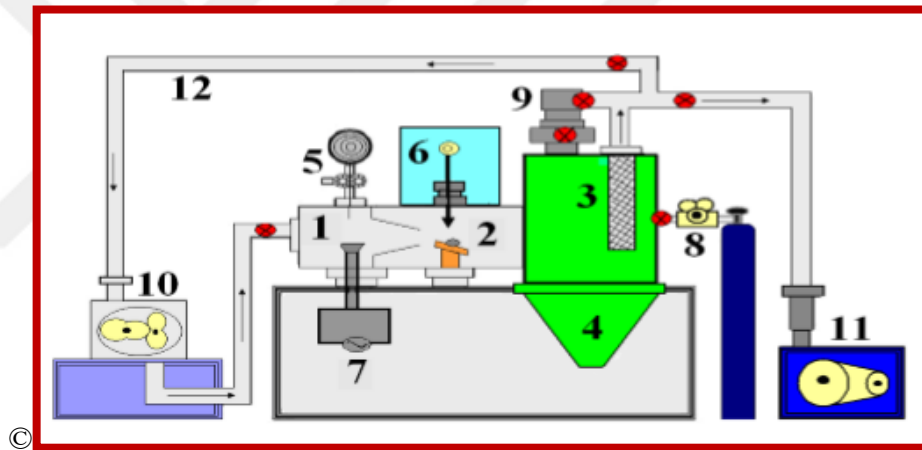
Şekil 2.1. Nanoboyutta tanecik üretiminde kullanılan başlıca yöntemler (Ateş ve Bahçeci 2015)

2.1.1. Aşağıdan yukarıya yaklaşımı

Aşağıdan yukarıya yaklaşımı, atomları ve molekülleri tek tek işleyip nanoyapı meydana getiren bir nanoteknoloji imalatı yöntemidir. Doğadaki yapılar da bu mantıkla meydana geldiği için bu yaklaşım genellikle organik malzemelerde görülür. Bu yaklaşım ilk

bakışta daha çok biyonano çalışmalarının konusu gibi görünse de nanomalzeme üretimi için önemli bir yöntemdir (Sen 2005; Yazıcı 2009; Ateş ve Bahçeci 2015).

Asal gaz yoğunlaştırma yöntemi: Başlangıç malzemesini temiz helyum atmosferinde buharlaştırıp, oluşan bu buharın tekrar soğutulması işlemine dayanır. Kontrollü bir şekilde malzeme üretimine imkan sağladığı için de oldukça sık kullanılan bir nanotanecek üretim yöntemidir (Sen 2005; Ward *et al.* 2007; Ateş ve Bahçeci 2015). Bu metodu kullanarak nanotanecek üretilmesi ilk olarak 1984 yılında Birringger ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir (Türker 2002). Şekil 2.2’de Asal gaz yoğunlaştırma yöntemi için kullanılan düzenek gösterilmektedir.

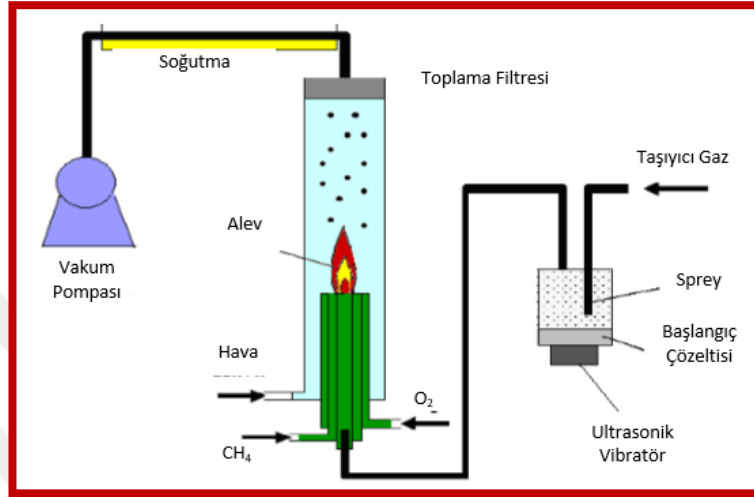


Şekil 2.2. Asal gaz yönteminin şematik olarak gösterimi

(1) buharlaşma kayıkçığı, (2) lazer ablasyon hedefi, (3) paslanmaz çelik filtre, (4) taneciklerin toplanması için huni, (5) tel besleme ünitesi, (6) lazer kaynağı, (7) güç kaynağı, (8) asal gaz silindiri, (9) turbo pompa, (10) havalandırma kaynağı, (11) mekanik pompa ve (12) gaz dolaşım hattı (Ceylan, 2007; Yazıcı, 2009).

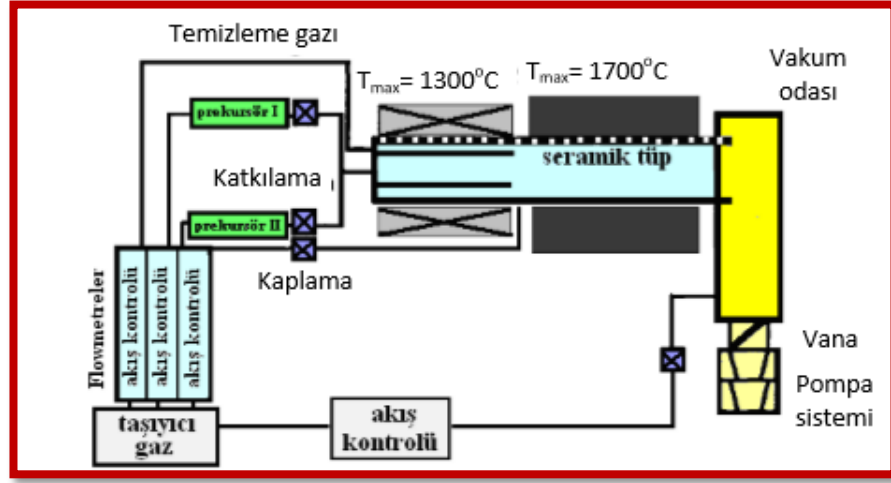
Alev Sentezi: Bu yöntem üretim maliyeti en düşük ve en az enerji ihtiyacı duyan yöntemdir. Bu avantajlarının yanı sıra karışık bir kimyasal reaksiyon akışı ve birçok parametrenin kontrolünü gerektirmesi gibi dezavantajları da vardır (Randy and Gordon 2003; Qin *et al.* 2005; Yazıcı 2009).

Strobel ve arkadaşları (2003) ve Li ve arkadaşları (2003), nano borik asit üretiminde alev sentezi yöntemini kullanmışlardır (Strobel *et al.* 2003; Li *et al.* 2003). Alev sentezi için kullanılan sistem Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Alev sentezinde kullanılan sistemin şematik gösterimi (Tsai *et al.* 2004; Cameron and Mitchell 2007).

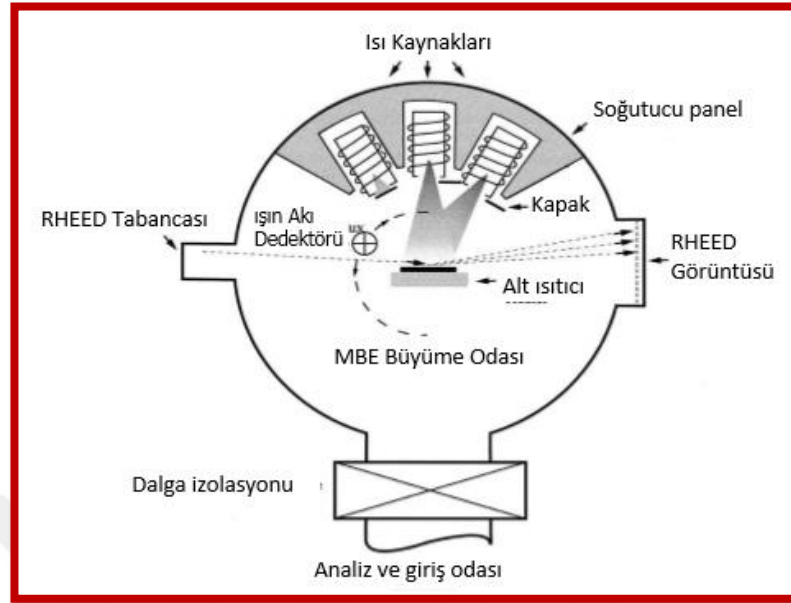
Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma: Yüksek sıcaklık altında gaz fazında olan malzemenin bir plaka veya katalizör üzerinde nanomalzemeye dönüştürülmesi işlemidir. Bu yöntem hemen hemen her türlü malzemeye uygulanabildiği için günümüzde giderek önem kazanmıştır. Kimyasal buhar yoğunlaştırma yöntemi ilk olarak 1994'de Almanya'da geliştirilmiştir (Gürmen vd 2008). Şekil 2.4'te kimyasal buharlaştırma yöntemi için kullanılan reaktörün şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. Kimyasal buharlaştırma yöntemi için kullanılan reaktörün şematik gösterimi (Hahn 1997; Yazıcı 2009)

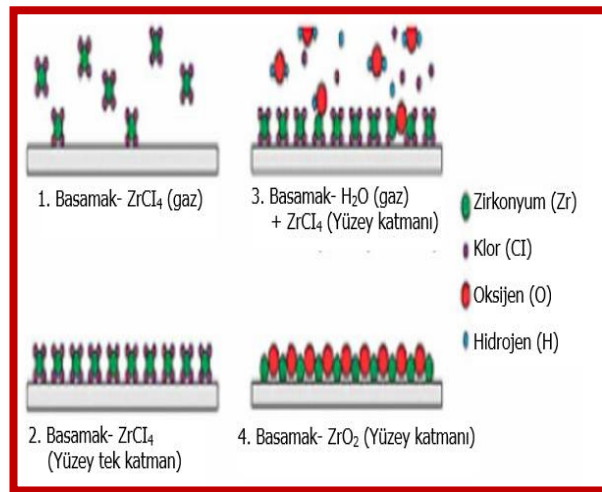
Moleküler Huzme (ışın) Epitaksi: Metaller, yarı iletkenler ve oksitler gibi ince epitaksiyel filmlerin büyütülmesi yöntemidir ve ilk olarak birleşik yarıiletkenlere uygulanmıştır. Büyütülen bu malzemelerin elektronik endüstrisindeki öneminden dolayı da yaygın bir şekilde kullanılan bir yöntemdir (Arthur 2002).

Moleküler huzme epitaksi ilk kez 1970’li yıllarda geliştirilmeye başlandı (Lines 2008; Ateş 2015). Ülkemizde ise bu sistem ilk olarak, Gazi Üniversitesi Fizik Bölümünde Yarıiletken Malzeme ve Teknolojileri Araştırma Birimi’nde kurulmuştur (Kınacı 2009). Moleküler huzme epitaksi yönteminin sistemi Şekil 2.5’te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Esas büyüme kaynakları, kapaklar, ışın akı detektörü ve yapının büyümesi boyunca görüntülenmesi için RHEED sistemini gösteren basit MBE odasının üstten görüntüsü (Ceylan *et al.* 2007).

Atom Tabaka Çökeltmesi: Hazırlanmış yüzey üzerinde her defasında bir molekül kalınlığında film tabakası oluşturmak için yüzeye buharlaştırılmış malzemenin çökeltilmesi işlemidir (Ateş ve Bahçeci 2015). Şekil 2.6’da atom tabaka çökeltmesi işlemi gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Atom tabaka çökeltmesi (Ateş ve Bahçeci 2015).

Yanma: Her malzemeyi uygun şartlarda yanmaya maruz bırakarak nanoboyutlarda malzeme üretme işlemidir. Nanokompozit malzemelerdeki çok damarlı nanotüplerin oluşturulmasında da bu yöntem kullanılmıştır (Ateş ve Bahçeci 2015).

Yaş Kimyasal Sentez: Başlangıç malzemesi, kolloidlerde ya da çözeltilerde özel yöntemler kullanılarak işlenmesidir. Jel-işleme ve çöktürme metotları yaş kimyasal yöntemlerden bazılarıdır (Luther 2006; Menceoğlu ve Kırca 2008).

Elektro-Patlama: Yüksek akım uygulanarak yüksek sıcaklık değerlerine ulaşma ile metalik teller oluşturulabilen bir plazma yöntemidir. Sadece belirli malzemelerin belli kullanım alanları için uygulanabilmesi, oldukça yavaş ve pahalı olması gibi dezavantajları vardır (Willems and van der Willenberg 2005; Luther 2006; Nascimento 2007).

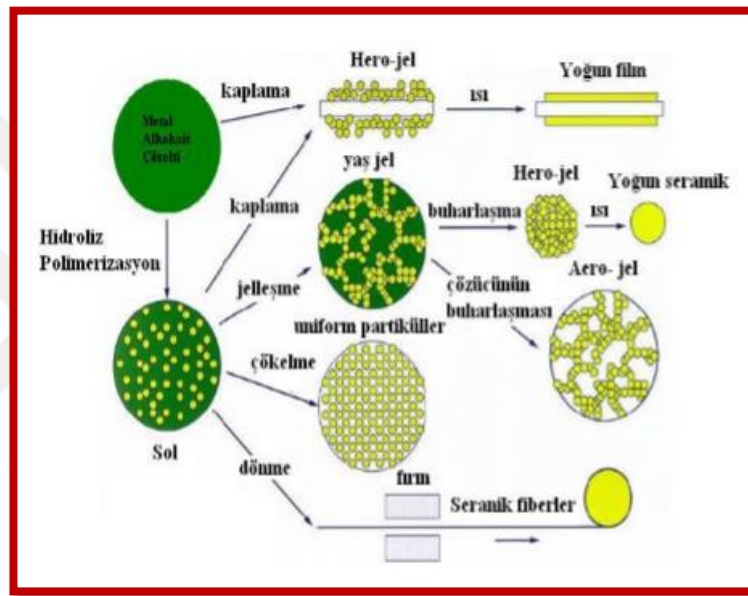
Lazer Ablasyonu: Katıların gaz veya vakum altında lazer ablasyonu ile nanotaniciklere dönüştürülmesi yöntemidir. Enerji dönüşümü eksikliği nedeniyle oldukça pahalı ve kimyasal yöntemlere oranla çöktürme hızı düşük bir yöntemdir (Dolgaev 2002).

2013 yılında Godin ve arkadaşları, Bessel-girdap hüzmeleri kullanarak cam üzerinde bulunan tek katman Grafen üzerinde 650 nm çapında diskler elde etmişlerdir (Arlt and Dholaki 2000).

Sol-jel Yöntemi: Metal alkoksit ve inorganik tuz gibi başlangıç çözeltilerin hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonlarına dayanmaktadır. Bu yöntemin, minerallerden ve kimyasallardan istenilen boyutta ve şekilde malzemelerin kontrollü olarak üretilebilmesi gibi avantajlarının olmasının yanı sıra az verimli çalışması, pahalı ve zahmetli olması gibi dezavantajları da mevcuttur (Lee *et al.* 2004; Attar *et al.* 2007; Yazıcı 2009).

1800'lerin ortalarından beri var olduğu bilinen sol- jel teknolojisi, inorganik polimerlerin ve organik-inorganik hibrit materyallerin sentezinde çok yönlü bir yaklaşım sağlamaktadır (Li *et al.* 2004).

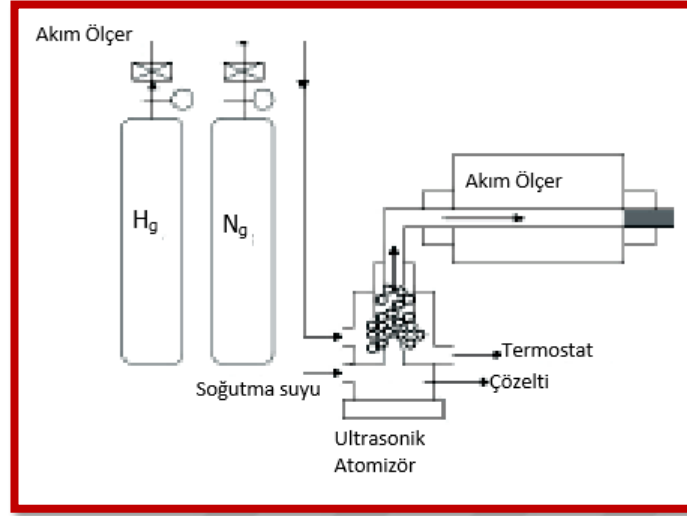
Şekil 2.7'de Sol-jel teknolojisi ve bu teknolojiyle üretilebilecek malzemeler gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Sol-jel teknolojisi ve bu teknolojiyle üretilebilecek malzemelerin gösterimi (Yazıcı 2009; Chen and Soutar 2009).

Ultrasonik Sprey Piroliz Yöntemi (USP): Birbirinden ayrı damlacıkların aerosol formunda başlangıç çözeltisinden oluşumu, ısı parçalanmanın gerçekleşmesi ve faz değişiminin kontrol edilmesi işlemlerini kapsamaktadır. Bu yöntem nanotanecek üretim teknolojisi açısından küresel ve aglomere olmamış, çok geniş bir aralıkta değişen kimyasal bileşime, boyuta ve morfolojiye sahip nano boyutlu taneciklerin üretilebildiği bir yöntemdir (Gürmen *et al.* 2006; Gürmen vd 2008).

Henry ve arkadaşları, sulu nitrat çözeltilerinden MgO altlıklar üzerine $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ve $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ince filmleri spre piroliz yöntemi ile hazırlamışlardır (Henry *et al.* 1989). Şekil 2.8'de, USP yönteminin şematik görünümü verilmiştir.

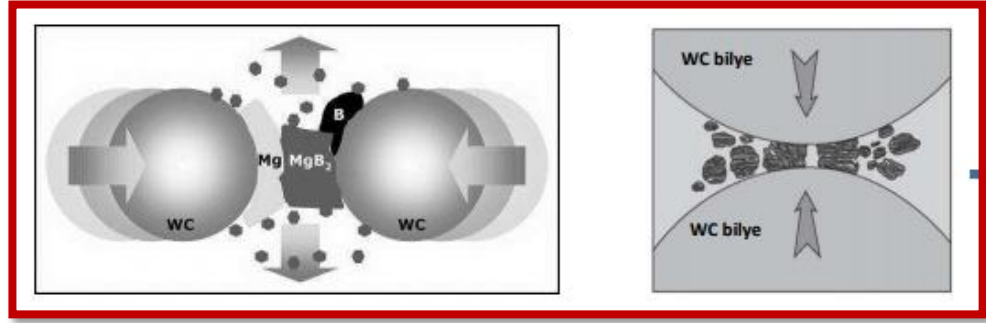


Şekil 2.8. USP yönteminin şematik görünümü (Türkoğlu 2011).

2.1.2. Yukarıdan aşağıya yaklaşımı

Yukarıdan-aşağıya yaklaşımı, makineler, asitler ve benzeri mekanik ve kimyasal yöntemler kullanılarak nanoyapıların fabrikasyonunu ve imal edilmesini kapsayan yaklaşımdır. Hacimsel malzemelerden nanotanecik üretilirken kullanılan; yüksek enerjili bilyeli öğütme, mekano-kimyasal işlemler, dağlama, elektro patlatma, sonikasyon, püskürtme ve lazer ablasyonu, litografi (baskı)yöntemleri, kimyasal, ısı ve doğal yöntemleridir (Koch 2003; Ateş ve Bahçeci 2015).

Mekanik Aşındırma: Mekanik öğütücülerle boyut küçültme işleminin temelinde numuneye, öğütücü ortam ve numune arasındaki çarpışmalar sonucu enerji uygulamasına dayanan yöntemdir (Sarıtış vd 2007). Şekil 2.9’da mekanik aşındırma ile taneciklerin küçültülmesi gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Mekanik aşındırma ile taneciklerin küçültülmesi (Suryanarayana 2001).

Dağlama: Hidroflorik asit gibi kuvvetli asitler kullanılarak düz yüzeyler üzerinde düzenli nanometre boyutlarında yapılar oluşturabilen özellikle mikro-elektromekanik sistemlerde kullanılan başlıca yöntemlerden biridir (Mantey *et al.* 2010).

Isıl Yöntem: İlaveten belirlenmiş sıcaklık değerini klasik ısı işlemleriyle uygulayarak nanotanecik üretme yöntemidir (Ateş ve Bahçeci 2015).

Dönen Soğuk Yüzeyde Katılaşma Yöntemi: Ergitilen malzemeyi bir nozul vasıtasıyla dönen soğuk bir yüzeye yüksek hızla püskürtüp ani soğutma ile katılaştırarak nanotanecik elde etme yöntemidir (Ateş 2015).

Gaz Atomizasyonu: Yüksek hızlardaki asal gazın, metal eriyik hüzmesine püskürtülmesiyle meydana gelecek çarpışma sonucu nanoboyutta metal nanotanecikler oluşturma yöntemidir (Saritaş vd 2007; Ateş ve Bahçeci 2015).

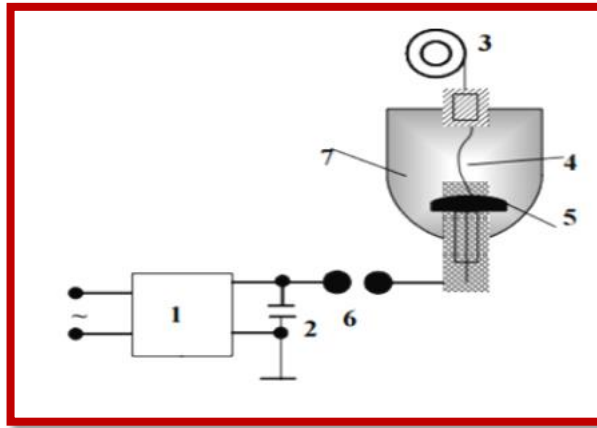
Yüksek Enerji Yöntemi: Yüksek akım arkı, lazer ve güneş enerjisi altında buharlaştırmada, sırasıyla yüksek elektrik akımı, monokromatik radyasyon ve güneş radyasyonu katı bir plakaya yönlendirilerek nanotanecikler elde etme yöntemidir (Anonim 2015).

Litografi, Aşırı Ultraviyole Litografi (EUV): Yeni nesil mikro elektronik endüstrisi için endüstriyel şirket birlikleri ve kamu fon programları tarafından geliştirilmesi

desteklenen ve 13 nm’de EUV litografisiyle, 45 nm ve altında tanecik boyutu elde edilmesini sağlayan yöntemdir (Luther 2006; Menceoğlu ve Kırca 2008).

Yumuşak Litografi: Bu yöntemde elastomerden oluşan bir damga, tabaka üzerine baskı yapıldığında, kendiliğinden düzenlenebilen ve tek bir katman oluşturabilen bir mürekkeple kaplanır ve bu tek katman daha sonra, oyma ya da yüzey reaksiyonu gibi işlemlerde maske işlevi görür. Damganın kendisi, bir kalıptan litografiyle şekillendirilerek dökülür ve elektron ışınlarıyla oyma gibi yüksek-çözünürlük teknikleri kullanılarak, 10 nm kadar küçük taneciklere dönüşebilir (Luther 2006; Menceoğlu ve Kırca 2008).

Elektropatlama: Bu yöntemi, soy ya da reaktif gaz ortamında, çok yüksek sıcaklıkta ve çok kısa zamanda, ince metal tel içinde çok yüksek akım oluşturularak nanotanecik üretme yöntemidir. Bu yöntemle üretilcek saf metaller havadaki oksijene maruz bırakıldığında tutuşmaya neden oldukları için, genellikle argon gazı veya damıtılmış suda gibi atıl bir ortam kullanılmaktadır (Nazarenko and Ilyin 2008). Şekil 2.10’da elektropatlama yönteminin deney düzeneği gösterilmiştir.



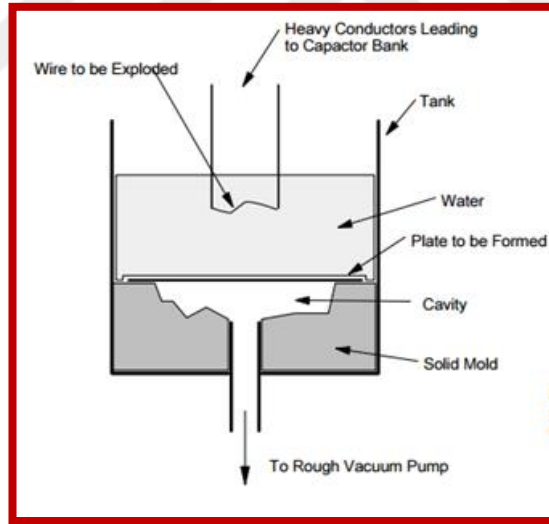
Şekil 2.10. Deneysel kurulumun prensip şeması

1 - yüksek gerilim güç kaynağı, 2kapasitör pil, 3 telli besleme ünitesi, 4 - patlayan tel, 5 - yüksek voltaj elektrodu, 6 – komütatör(Anonim, 2013), 7 - patlama odası ile doldurma (Nazarenko and Ilyin 2008)

Sıvı ortamındaki deneylerde $d = 0.25$ mm ve uzunluk $l = 40-200$ mm olan alüminyum teller kullanılmıştır. Kabloların elektriksel olarak patlaması, hemen

arkasında biriken kondansatör enerjisinin patlamadan önce tel tarafından tüketildiği bir ark aşamasına sahip "hızlı" patlama veya sonsuz akımı duraklatma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Elektro patlama metodunda enerji parametreleri, şarj geriliminin değişimi ve patlayan tellerin geometrik karakteristikleri ile düzenlenmiştir. Teldeki (e) belirli elektrik enerjisi girişi 0.4'den 1.8'e (e: tel malzemenin süblimasyon enerjisi) değiştirilmiştir. Ark sathının enerjisi ($\hat{a}$) - (0.7-1.7). Elektrik devresinin parametreleri: kapasitans $C = 2.25 \mu\text{F}$; Şarj gerilimi $U = 15, 30 \text{ kV}$; İndüktivite $L = 0.8 \mu\text{H}$ (Nazarenko and Ilyin 2008).

Şekil 2.11'de Patlayan tel metoduyla metal tanecik elde etmek için kullanılan bir başka deney düzeneği gösterilmektedir. Bu düzeneğe, patlama sonucu oluşacak taneciklerin sıvı ortamında soğuyarak birbirlerine yapışmadan kabın dibinde biriktirilmesi ve bir vakum pompası yardımıyla ortamdaki uzaklaştırılması için kullanılmaktadır.



Şekil 2.11. Elektropatlama metoduyla metal oluşum sistemi (Hansen 2011).

Bu yöntemin detayları tezin bir sonraki bölümünde detaylı olarak anlatılmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Elektropatlama Metodu

Soy ya da reaktif gaz ortamında, çok yüksek sıcaklıkta, yüksek akım yoğunluğunda ve oldukça kısa zamanda, ince metal bir telden nanotanecik üretme yöntemine elektropatlama metodu denir. Patlatılacak tel genelde altın, demir, alüminyum veya platin seçilmektedir ve genellikle telin çapı 0.5 mm'den azdır. Bu yöntemde, oluşan yüksek akımın etkisiyle tel önce plazma haline geçmekte ve zamanla sıkışmaktadır. Bu akım telin 100000 °K'e kadar ısınmasına ve teldeki direncin neredeyse sonsuz değere yaklaşmasına neden olmaktadır. Bu süreçte akım yoğunluğu 10^4 - 10^6 A/cm² civarında bir değer alır ve telde yaklaşık 25kWh/kg'lık bir enerji tüketimi görülmektedir. Telin üzerindeki direncin artması akımın durmasına ve elektromanyetik alanın kaybolmasının neden olmaktadır. Aşırı ısınan metal plazma hızla genişlerken, etrafındaki iyonize olmuş gaz ortamında şok dalgası oluşturmaktadır. Bu şok dalgasının etkisiyle telin patlama hızı 10^6 - 10^8 m/s kadar ulaşabilmektedir. Gerçekleşen bu patlama sonucunda oluşan tanecik boyutları nanometre seviyelerine kadar düşmektedir (Jerrin *et al.* 2017).

Elektropatlama metodu ile üretilecek saf metal tanecikler havadaki oksijene maruz bırakıldığında tutuşmaya neden olmaktadır. Bu durumun oluşmaması için elektropatlama çalışmalarında genellikle argon gazı veya damıtılmış su gibi atıl bir ortam kullanılmaktadır. (Ateş ve Bahçeci 2015; Jerrin *et al.* 2017).

Yapılan bu tez çalışmasında bu durum öngörülerek korunaklı bir pleksi cam patlama ortamı tercih edilmektedir

3.1.1. Elektropatlama metoduyla taneciklerin oluşum süreci

Bir telin elektropatlama metoduyla nanotaneciklere dönüşmesi aşağıdaki adımlar sonucu meydana gelir.

- 1-Tele verilen ani akım, omik ısınma etkisiyle metali eritene kadar ısıtmaktadır. Eriyen metal “undloid” adı verilen kırık bir dizi kusurlu sarmalı meydana getirir. Oluşan bu sarmal yapı, sıvı haline gelmiş metalden akımın akmasını engeller.
- 2-Sıvı hale geçen metal bir süre sonra buhar haline geçer. Oluşan bu metal buhar, daha düşük dirençli bir yola dönüşerek daha hızlı akım akışı sağlar.
- 3-Hızlı akım akışının etkisiyle arklar meydana gelir. Bu arklar ise ortamın plazmaya dönüşmesine neden olur.
- 4-Oluşan plazma serbestçe hareket edebilen şok dalgaları meydana getirir.
- 5- Bu şok dalgalarıyla birlikte elektromanyetik bir ışıyım görülür.
- 6-Son olarak şok dalgası sıvı gaz ve plazma halindeki metali iterek bir patlamaya sebep olur. Bu patlamanın etkisiyle tel kopar ve nanotaneciklere dönüşür (Jerrin *et al.* 2017).

3.1.2. Elektropatlama metoduyla elde edilen taneciklerin genel özellikleri

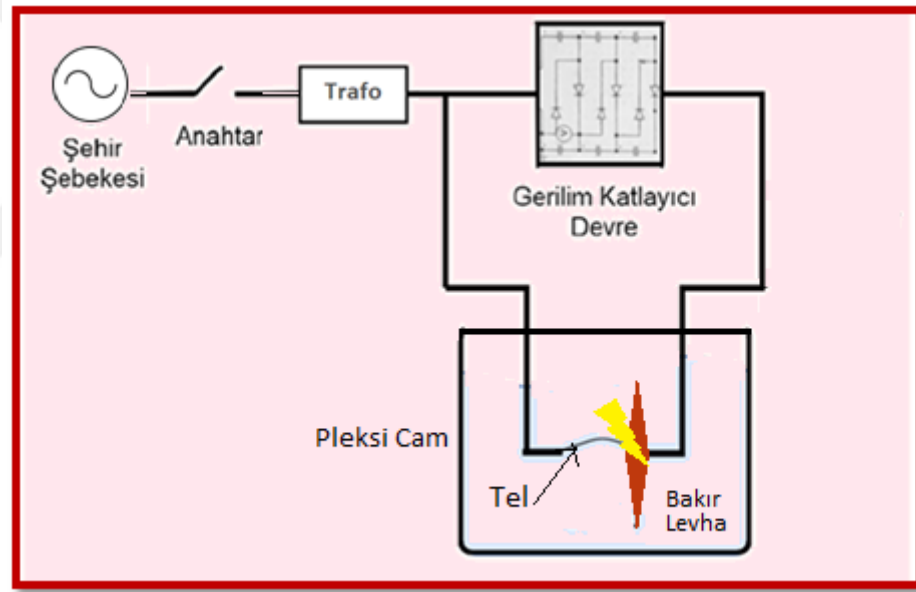
Elektropatlama metoduyla elde edilen nanotaneciklerin en belirgin özelliği; bu yöntemle elde edilen taneciklerin diğer yöntemlerle elde edilen taneciklere kıyasla daha büyük kimyasal ve metalürjik reaktiviteye sahip olmasıdır. Ayrıca şekillerinin küresel olmasından dolayı oda sıcaklığında oksidasyona ve sinterlenmeye karşı kararlıdırlar ve ısıtılmaları halinde yüksek difüzyon aktivitesi kazanabilirler (Ateş ve Bahçeci 2015).

3.1.3. Bu yöntemle üretilecek taneciklerin özelliklerinin bağlı olduğu parametreler

Bu yöntemin yüksek basınç, yüksek gerilim ve yüksek sıcaklık gibi koşulları, nanotaneciklerin birçok üstün özellik kazanmasına neden olur. Nanotaneciklerin oluşmasını etkileyen en önemli etkenler telin fiziksel özellikleri ve patlamanın gerçekleşmesini sağlayan elektriksel koşullardır. Telin fiziksel özelliklerine bağlı koşullar; telin uzunluğu, çapı, tel metalin geometrik ve mikro yapısı olarak belirtilebilir. Elektriksel parametrelere bağlı koşullar ise; patlama öncesinde telde tüketilen enerji, ark aşamasındaki enerji, enerji giriş hızı veya güç yoğunluğu şeklinde sıralanabilir (Nazarenko 2007).

3.2. Elektropatlama Yöntemi İçin Önerilen Deney Düzeneği

Bu tez kapsamında önerilen deney düzeneği şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Önerilen yöntem üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan ilki trafodur ve önerilen sisteme şehir şebekesinden gelen 220V’luk gerilimin büyüklüğünü istenilen değere çıkararak gerilim katlayıcı devreyi beslediğimiz bileşendir. İkincisi trafonun sekonderinden gelen gerilimin teli patlatacak seviyedeki yüksek gerilim değerine çıkarılmasını sağlayan gerilim katlayıcı devredir. Üçüncüsü ise patlamanın gerçekleşeceği izole pleksi cam ortamıdır. Bu bileşenler aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.



Şekil 3.1. Önerilen Elektropatlama deney düzeneği

3.2.1. Giriş geriliminin ayarlanması

Deney düzeneğinde trafo girişinden verilen 220V şehir şebekesini 300V, 350V, 400V, 450V değerlerine kadar yükseltmek için kullanılmıştır. Böylece gerilim katlayıcı devrenin çıkışından 6000 ile 9000V arasında değişen 4 farklı değer elde edilebilmektedir. Bahsedilen değerler aşağıdaki Çizelge 3.1’de ayrıntısıyla verilmiştir. Kullandığımız trafonun görseli ise Şekil 3.2’deki gibidir.

Çizelge 3.1. Deney düzeneğine ait gerilim değerleri

Trafonun Primerine Uygulanacak Gerilim Değeri (prizden alınan şebeke gerilimi) (AC)	Trafonun Sekonderinden Alınacak Gerilim Değerleri (AC)	Gerilim Katlayıcı Devrenin Çıkışından Elde Edilecek Gerilim Değerleri (DC)
220V	300V	6000V
220V	350V	7000V
220V	400V	8000V
220V	450V	9000V

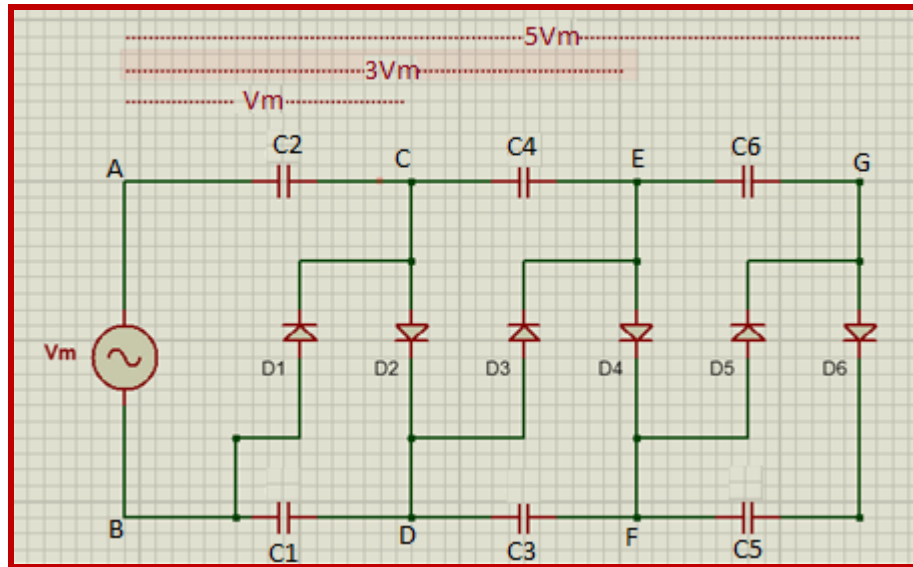


Şekil 3.2. Tez çalışmasında kullanılan trafo

3.2.2. Gerilim katlayıcı (çoklayıcı) devre

Gerilim katlayıcı devre kondansatörler ve diyotların kaskat bağlanmasıyla oluşan bir elektrik devresidir. Devre çalışırken diyotlar tıkama ve iletim konumlarına geçmekte ve bu şekilde kondansatörlerin dolup boşalması sağlanmaktadır. Alınan herhangi iki uç arasındaki gerilim değeri, giriş geriliminin o aralıktaki kondansatör sayısı kadar katlanmış değerine eşittir. Bu devreler genellikle yüksek gerilim ve çok küçük akım gerektiren devrelerde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında gerilim katlayıcı devre kullanılmasıdaki amaç, şehir şebekesinden yüksek gerilim elde edilmesi ve bu yüksek gerilimin, patlatılan telin üzerinden, kondansatörlerin dolma-boşalma mantığıyla bir anda geçmesi sağlanarak telin patlatılmasıdır.

Gerilim katlayıcı devrenin çalışma mantığının daha iyi anlaşılması için Şekil 3.3'deki giriş gerilimi V_m olan basit bir 6 kat gerilim katlayıcı devre oluşturulmuştur. Bu devrenin çalışma prensibi aşağıdaki gibi açıklanabilir.



Şekil 3.3. Altı kat gerilim katlayıcı devre şeması

- İlk olarak B girişini pozitif baz alınırsa D1 diyotu üzerinden C2 kondansatörü giriş gerilimi V_m kadar şarj olacaktır.

- İkinci alternansta A girişini pozitif olur ve devre C2-D2-C1 üzerinden tamamlanır. Daha önceden V_m kadar şarj olan C2 kondansatörü C1 üzerinden deşarj olmak isteyip ikinci bir kaynak görevi yapar ve C1 kondansatörü $2 V_m$ kadar şarj olur.
- Üçüncü alternansta B girişi tekrar pozitif olur, C2 tekrar D1 diyotu üzerinden V_m kadar şarj olur. Daha önceden $2 V_m$ kadar şarjlı olan C1 kondansatörü D3 diyotu üzerinden deşarj olarak C4 kondansatörünü $2 V_m$ kadar şarj eder. İkinci bir pozitif alternansta B-F noktaları arasındaki gerilim, kaynak D1 üzerinden kısa devre olduğu için sadece C1 ve C3 kondansatörlerinin toplam değeri olan $4 V_m$ kadar olacaktır (Anonim 2014).

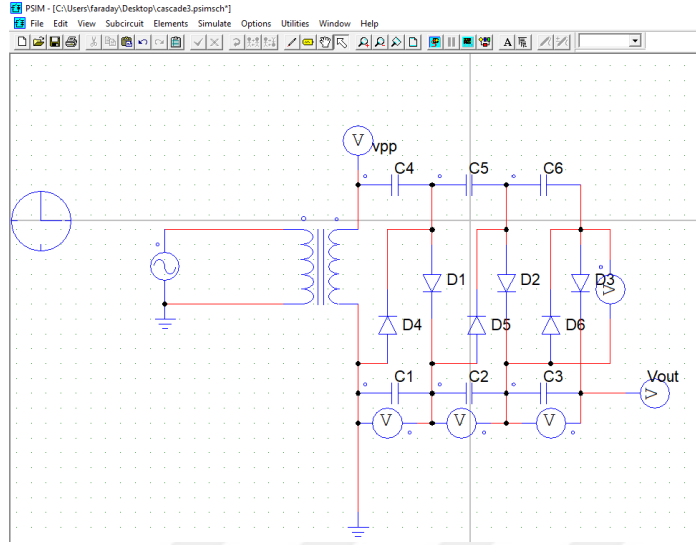
Benzer şekilde devreye eklenecek yeni kondansatör ve diyotlar yardımıyla giriş gerilimi katlanarak istenilen seviyelere çıkarılması mümkün olmaktadır. Şekil 3.3’de verilen devremin simülasyon sonuçları aşağıdaki gibidir.

3.3. Altı Kat Gerilim Katlayıcı Devre Simülasyonu

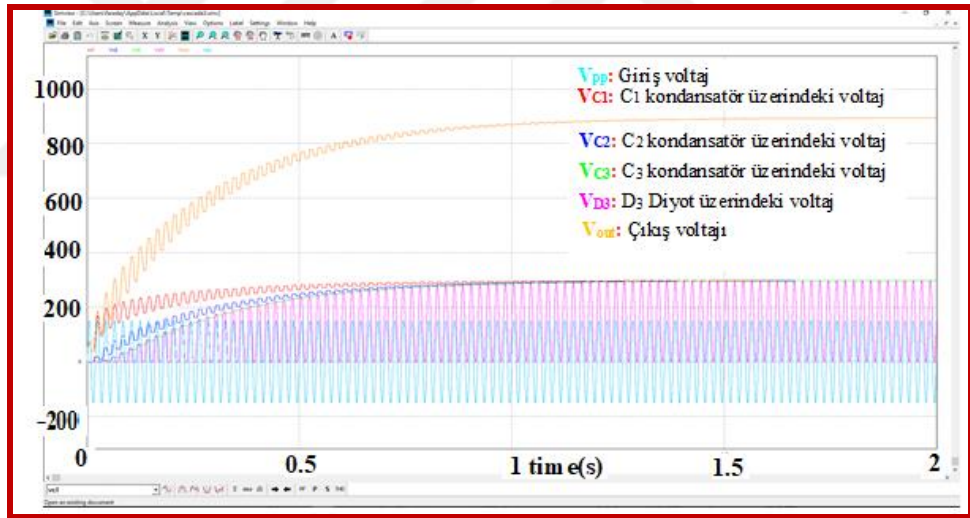
Bu tez çalışmasında güç kısmının simülasyonunu Powersim (PSIM) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu programı tercih etmemizin nedeni, programın her bir devre elemanını matematiksel olarak tanımlandıktan sonra pratiğe yakın sonuçlar vermesidir.

Şekil 3.4’de giriş gerilimi 100V olan altı kat gerilim katlayıcı devrenin Powersim programında çizilmiş şematiği gösterilmektedir. Şekil 3.5 ise devredeki belirli noktalardan alınan gerilim değerlerinin grafiksel ifadesi görülmektedir. Buradan da anlaşıldığı gibi C4 kondansatörü hariç diğer tüm kondansatörlerde giriş geriliminin (100V) yaklaşık iki katı (200V) kadar bir gerilim değeri görülürken, diyotlarda ise giriş geriliminin tersi yönünde ve yaklaşık iki katı (200V) bir gerilim değeri görülmektedir.



Şekil 3.4. Gerilim katlayıcı basit devresi

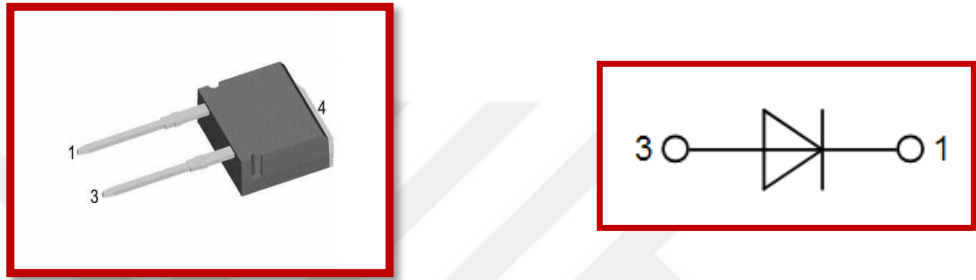


Şekil 3.5. Şekil 3.4'deki gerilim katlayıcı devrenin gerilim grafikleri

Bu simülsasyon çalışması ve çeşitli teorik çalışmalar sonrasında, tez kapsamında kullandığımız asıl gerilim katlayıcı devrenin devre elemanları ve parametreleri aşağıdaki gibi seçilmiştir.

Diyot: Devrede ki görevi akımın bir yönde akmasına imkân vererek oluşturduğu iletim ve tıkama durumlarında, kondansatörlerin katlanarak dolmasını sağlamaktır. Gerilim katlayıcı devrede diyotlar tıkama durumlarında giriş geriliminin yaklaşık 2 katı kadar

bir gerilim değerine ulaşmaktadır. Deneyde trafo gerilim değerlerini 300-450V arasında çeşitli değerlere dönüştürmektedir. Diyotun delinmeden çalışabilmesi için girişten verilecek maksimum 450V un iki katı olan 900Vtan daha yüksek ters dayanma gerilimine sahip bir diyot seçilmesine karar verilmiştir. Seçilen 2200V ve 30A'lık diyot (Single 30A 2200V DNA30ER2200IY) Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Burada 3 numaralı bacak anot,1 numaralı bacak katottur.



Şekil 3.6. Gerilim katlayıcı devrede kullanılan diyot Single 30A 2200V DNA30ER2200IY

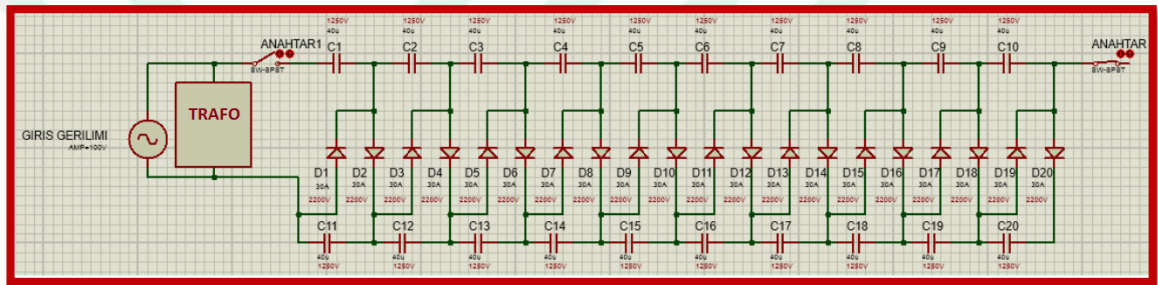
Kondansatör: gerilim katlayıcı devrede ki kondansatörler gerilimi depolayarak çıkıştan yüksek değerde gerilim elde etmemizi sağlamaktadır. Girişten uygulanan gerilim değerleri 300-450V arasında değişmektedir. Kondansatörlere düşecek gerilim değeri giriş geriliminin yaklaşık iki katı olacağından burada en yüksek değer olan 450 V un iki katı olan 900V değeri referans alınarak, kondansatörler 1250V gerilim değerinde seçilmiştir. Devrede kullanılan kondansatörler Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Gerilim katlayıcı devrede kullanılan kondansatör $C_n=40 \mu$, $U_n=1250 V$

3.3.1. Deneyde kullandığımız giriş gerilimini 20 kat katlayıcı devre

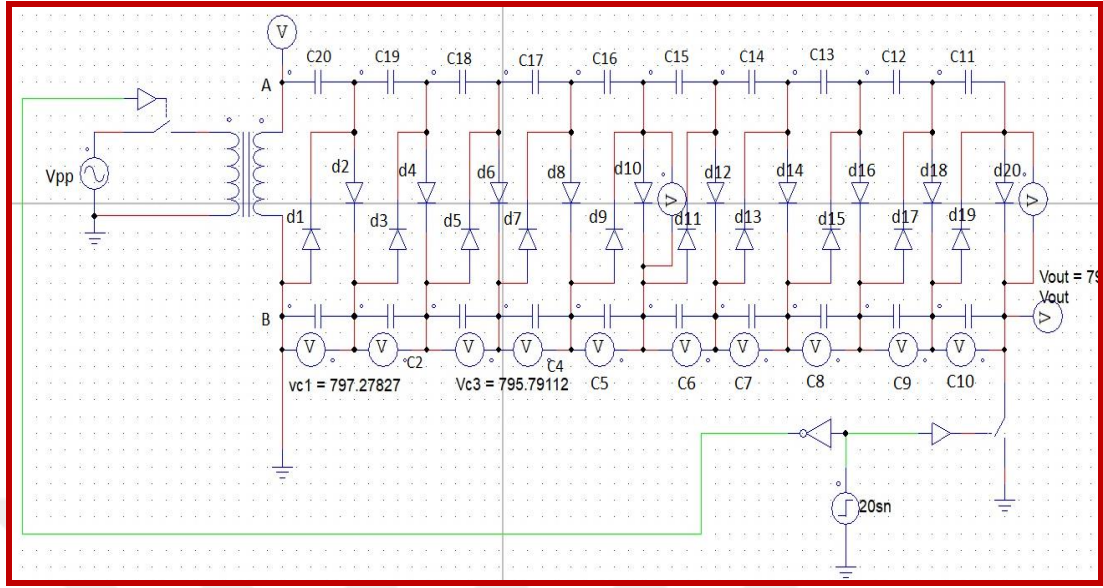
Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda kondansatörlere (ilk kondansatör hariç) giriş gerilimin yaklaşık 2 katı kadar bir gerilim, diyotlara ise yine giriş geriliminin yaklaşık 2 katı kadar ters bir gerilim değeri olduğunu görülmüştür. Tüm bunları göz önünde bulundurularak kondansatörler $C=1250V, 40 \mu F$ diyotlar 30A, 2200V giriş gerilimini ise 400V seçilmiştir. Şekil 3.8 deneyde kullandığımız katlayıcı devrenin şematik gösterimidir.



Şekil 3.8. Deney düzeneğinin güç kısmı

3.3.2. Tez çalışmasında kullanılan gerilim katlayıcı devrenin simülasyonu

Şekilde bir anda boşalarak teli patlatacak olan kondansatörlerin dolması için kullanılan gerilim katlayıcı devre anlatılmaktadır. Yapılan çalışmanın uygulama devresi Şekil 3.9'daki gibidir.

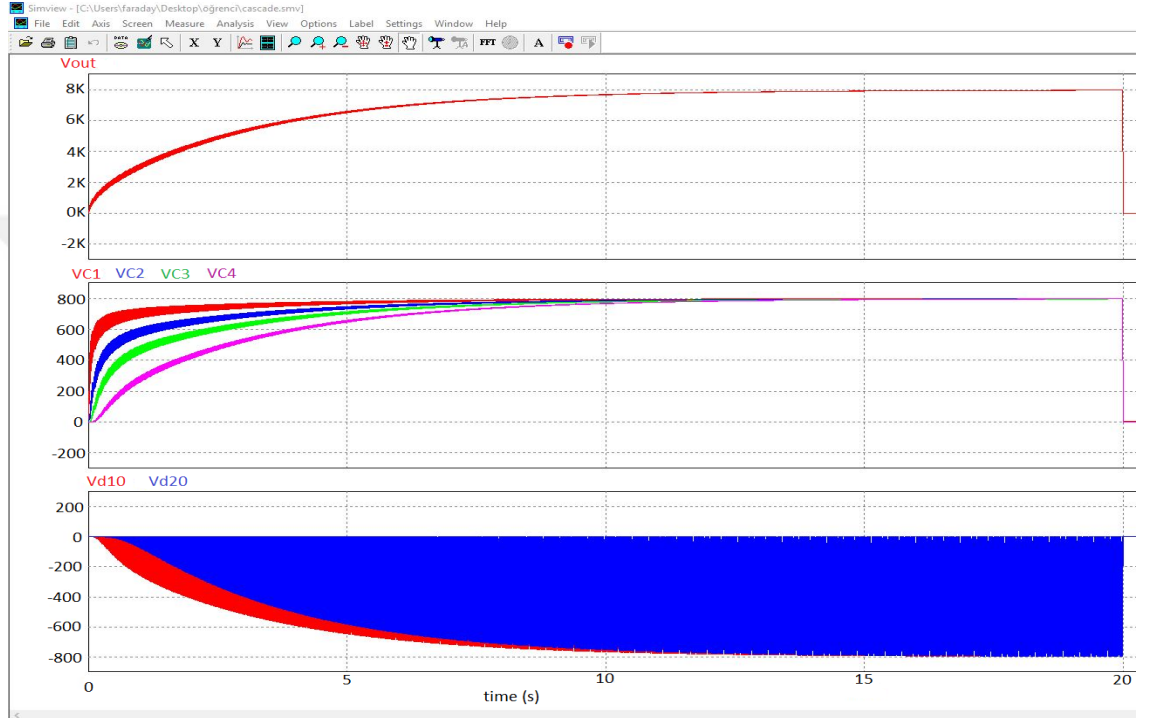


Şekil 3.9. Elektropatlama metodunun giriş gerilimi 400V olan uygulama devresi

Bu simülasyon çalışmasında telin patlaması için gerekli olan gerilim değeri 8000V olarak seçildi. Devrenin çıkışında 8000V elde etmek için devrenin girişine 400V gerilim değeri uygulamıştır. Bu gerilim değeri çıkışta kondansatör sayısı kadar katlanarak yaklaşık 8000V'a ulaşmaktadır. Devrenin çeşitli yerlerine bağlanan voltmetrelerle bu bölgelerdeki gerilim değerleri incelenmiştir.

Şekilde girişten devreye yaklaşık AC 283V (rms: 400V) uygulandığında B alternansında 1 numaralı diyot (d_1) iletim durumuna geçerek 20 numaralı kondansatörü (C_{20}) giriş gerilimi (400V) kadar şarj etmektedir. İkinci durumda devre B alternansına geçtiğinde diyot1(D_1) tıkama durumuna, diyot2 (D_2) iletim durumuna geçmektedir. Bu durumunda kondansatör 1de (C_1), giriş gerilimi ve C_{20} 'nin etkisiyle girişin yaklaşık iki katı olan 797.3V değeri okunmaktadır. Bu adımdan sonra işleyiş kendini tekrar ederken C_{20} 'nin dışındaki tüm kondansatörler çeşitli kayıplara uğrayarak yaklaşık 800V gerilim değerlerine şarj olmaktadır. Devrenin çıkışından ise giriş geriliminin 20 katı değerine çok yakın bir değer olan 7969.0V elde edilmektedir. Bu kayıpların nedeni diyotların mevcut iç dirençleri ile açıklanabilir. Devre katlandıkça diyot sayısı ile paralel olarak kondansatörlerdeki ve çıkışın gerilimindeki azalma da belirginleşmektedir. Yapılan simülasyon çalışmasında devrenin 20. saniyeden itibaren kısa devre konumuna geçtiği

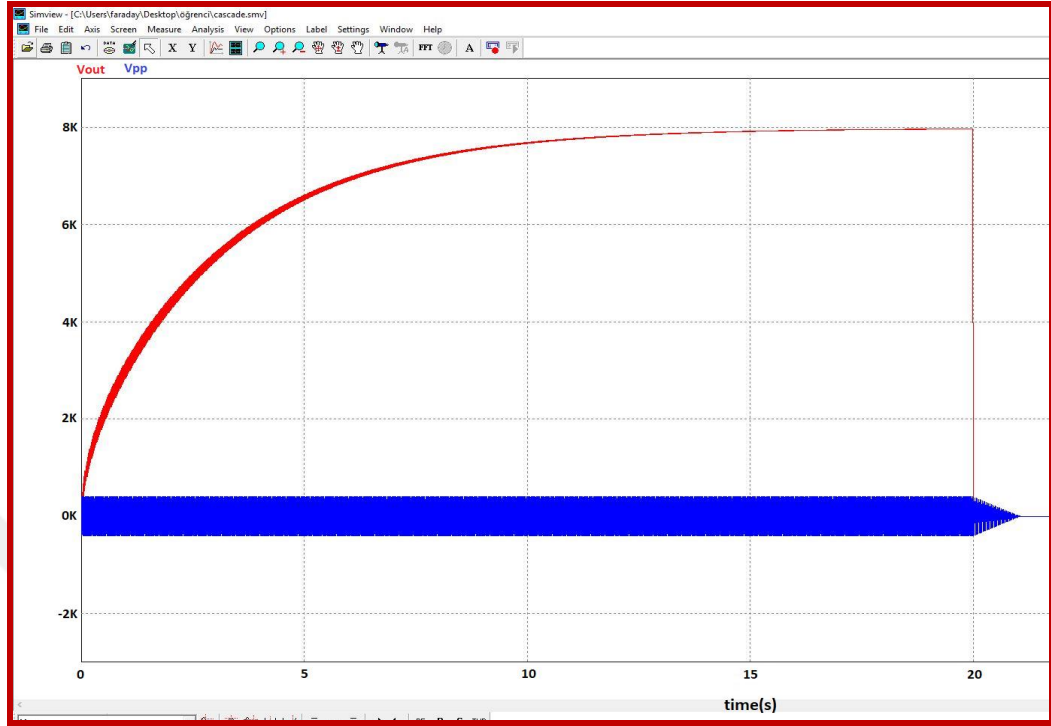
görülmektedir. Bu durum pratikte telin patlama durumunun modellenmiş halini temsil etmektedir. Şekil C ye ait simülasyon çalışmasının çıkış gerilimi (V_{out}), bazı kondansatörlere ait gerilim değerleri ($V_{c1}, V_{c2}, V_{c3}, V_{c4}$) ve bazı diyotlara (V_{d10}, V_{D20}) ait gerilim değerlerinin grafikleri Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Şekil 3.9'a ait devrenin ölçüm sonuçları

Yapılan simülasyon çalışmasının V_{pp} - V_{out} ölçüm grafikleri Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Burada 10. Saniyeden itibaren sistem artık kararlı bir şekilde çalışmaya başladığı görülmektedir.

Simülasyonun 10. saniyesinden sonraki sonuçlar incelendiğinde; şekilde girişten yaklaşık $V_{pp} = 400V$ AC ($V_{rms} = 283V$) gerilim uygulandığında kondansatörlerde V_{pp} 'nin yaklaşık iki katı ($\sim 800V$) bir gerilim değerine, diyotların ise V_{rms} yaklaşık iki katı ama bu kez test yönlü bir gerilim değerine ($\sim -800V$) ulaştığı görülmektedir. Çıkış gerilimi kaskat çalışma mantığıyla kondansatör sayısı kadar katlanarak V_{pp} geriliminin 20 katı olan 8000V değerine yaklaşmıştır. Bu simülasyon çalışmasıyla tez çalışmasında kullanılan deney düzeneği için bu değerlerin uygun olduğu görülmüştür.

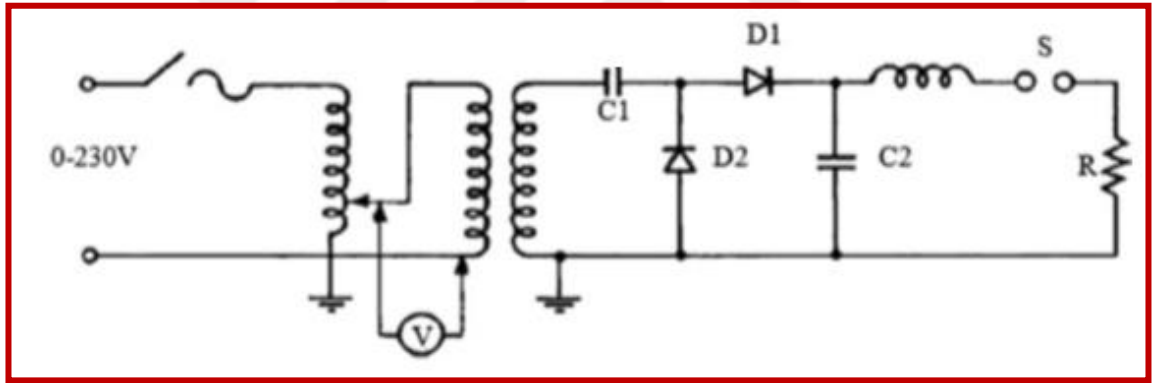


Şekil 3.11. Şekil 3.10'daki devrenin giriş-çıkış grafiği

Anahtarlama çalışmasında, kaskat devrenin girişini besleyen kısımda anahtar ve patlamanın gerçekleşeceği tele giden kablodaki anahtarlar birbirlerine senkronize edildi ve aynı anda anahtarlama yapıldı. Böylece devrenin girişi beslemeyi keserken akımın yönü de patlayacak tele çevrilmiş oldu. Bu sistem kondansatörler kısa devre durumunda iken devrenin beslenmeye devam etmesiyle oluşabilecek durumun yok edildi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tel patlaması için temel elektrik devresi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Kondansatörü istenen gerilim büyüklüğüne şarj etmek için gerilim katlayıcı devre kullanılır. Devre, t süresi içinde maksimum iletilen enerjisi $W = V \times I \times t$ olan bir RLC devresi gibi çalışır, burada V , ince iletken tel boyunca gerilimdir ve I , patlama anında akan akımdır. Kapasitörde depolanan enerji $W = (1/2)CV^2$ 'dir, burada C kapasitanstır. Gerilim, anahtar S kapatıldığında ince patlayan tel üzerinde belirir ve sonuçta ince tel Joule ısınmasıyla erir ve akım artar. Anahtar S , basit bir anahtardır, L kapasitörün iç indüktansının katkısıdır ve R patlayan ince telin direncidir. Şekil 4.1'de temel devre düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Temel devre düzeneği (Kumar 2017)

Elektrik teli patlama prosesinde tanecik büyüklüğünü etkileyen faktörler arasında, temel elektrik devresinin kapasitansı ve endüktansı, şarj voltajının polaritesi, patlayan telin uzunluğu ve çapı, patlayan telin erime sıcaklığı, patlayan kabloun uzunluğu, ısı iletkenlik ve hava ortamının bozulma dayanımı ve deney ortamının hava basıncı vardır. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneğinin devre parametreleri Çizelge 4.1'de açıklanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan tel (KanthalD-FeCrAl alaşımı), 100 kPa'lık oda basınçlarına sahip bir hava ortamında patlatılmıştır. Tel patlama ile nanotanecik oluşumu temelde adyabatik bir süreçtir. Çok miktarda Joule ısıtması, ince telin erimesine, ardından buharlaşmaya ve ardından iyonlaşmaya neden olur. Patlama

sırasındaki plazma, patlama odası gazı ile etkileşime girdikten sonra genişir ve yoğunlaşır ve son olarak nanotanecikler oluşur. Çizelge 4.1’de tez çalışmasında kullanılan devrenin parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tez çalışmasına ait devre parametreleri

Parametreler	Değerler
Telin kullanıldığı malzeme	KanthalD (FeCrAl alaşımı)
Telin uzunluğu	12 cm
Telin çapı	2mm
Ortam	Hava
Şarj gerilimi	6 Kv
Kapasite	40 μF – 1250V
Diyot	30 A – 2200 V
Trafo	220V: 300,350,400,450V – 100VA

4.1. Elektrik Teli Patlamasıyla Nanotanecik Oluşum Mekanizması

Mekanizma Deneysel kurulum üç işlevsel bölümden oluşur: (i) şarj ünitesi, (ii) boşaltma ünitesi ve (iii) tel patlama ünitesi. Şarj ünitesi, temel olarak yüksek enerji kapasitörler ve diyotlardan oluşan bir DC kaynağıdır. Boşaltma ünitesi basit anahtar (S) içerir ve tel patlama ünitesi, şeffaf pleksi malzemeden yapılmış kapalı bir patlama odasının içine yerleştirilmiş patlayan tel R'yi içerir.

Aşama 1: Kapasitör, gerilim katlayıcı devre kullanılarak istenen gerilimde şarj edilir. Anahtarın (S) kapatılmasında (Şekil 4.1’de), kapasitör voltajı, ince patlayan tel (R) boyunca görülür ve büyüklüğü RLC devresi tarafından kontrol edilen akımı yükseltir. Akımdaki artış, sonunda telin erimesini ve buharlaşmasını sağlayan telin Joule ısınmasına neden olur. Devredeki direnç ve endüktans, devre içindeki akımın büyüklüğünü belirler. Genel olarak, RLC devre tepkileri alt sönümlü, kritik sönümlü ve aşırı sönümlü olarak bölünebilir. Bu çalışmada, devre parametreleri,

$$\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC} \quad (4.1)$$

olan alt sönümlü bir RLC devresinin durumunu karşılamaktadır (Kumar *et al.* 2017)

Devrede akım denklem (4.2)'deki gibi yazılabilir.

$$i(t) = \left(\frac{E \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right)}{\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}} \right) \sin \left\{ \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t \right\} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2, düşük enerji giriş zamanı için düşük L/C oranına sahip bir kondansatörün tercih edildiğini göstermektedir. Denklem 4.2'deki üstel terim olmasaydı akım dalga biçimi mükemmel bir şekilde sinüzoidal olurdu.

Aşama 2: İnce iletkenin uzunluğunu ve çapını uygun bir şekilde seçmek gerekir. Böylece patlayan tel üzerinde biriken enerji, teli tamamen buharlaştırmak için yeterli olacaktır. Ayrıca, telin çapı, akım yoğunluğunun telin yarıçapı boyunca uniform dağılması şartına göre seçilmelidir. Yüksek akım patlayan telden boşaldığında, Joule ısınması nedeniyle telin sıcaklığı artar, ardından erimeyle ve nihayetinde tel faz sıvıdan gaza değişmeden önce kızdırma sıcaklıklarının kaynama sıcaklığına ulaşır. Malzemenin ısıtma aşamasındaki direnci, girilen enerjiden hesaplanır. Spesifik akım hareketi (h) Denklem 4.3'de tanımlanmıştır.

$$h = \int j^2 dt \approx j^2 t \quad (4.3)$$

Daha sonra, $t_H = h/j^2$ 'nin ısınma süresi ve sabit bir akım yoğunluğunda, verilen enerji $W_h = \phi h/\rho$ 'dir. Ayrıca, W_h 'nin büyüklüğü denklem 4'te verilen akım yoğunluğuna bağlıdır.

$$\frac{dW_h}{dt} = \frac{\phi}{\rho} j^2 \quad (4.4)$$

Burada j teldeki akım yoğunluğu, ϕ malzemenin direncidir ve ρ malzemenin yoğunluğudur. Bu tel çapının ve akım yoğunluğunun tel patlamasındaki ana parametreler olduğunu gösterir.

Basit anahtar S kapalı olduğunda, devreye verilen akım I nedeniyle yarıçap boyunca yarıçapa bağlı bir manyetik basınç $p(r)$ Denklem 4.5'te tanımlanmıştır.

$$p(r) = p_c \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \quad (4.5)$$

Burada p_c kablo boyunca geçen akımla ilgili olan merkezi manyetik basınçtır. Denklem 6'da merkezi manyetik basınç tanımlanmıştır.

$$p_c = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 a^2}$$

Burada μ_0 manyetik geçirgenliktir. Manyetik basınç, telin yarıçapı ile ters orantılıdır. Bu nedenle, yüzey katmanı ilk olarak buharlaşır ve patlamadan önce plazma oluşturur. Elektrik iletimi buhar optik olarak kalınlaşıncaya ve yüzeyden radyasyon yayılana kadar devam eder. Bu aşamada kısmen ya da tamamen iyonlaştırılmış bir plazma sütunu oluşur ve bu plazma sütunu hidrodinamik dengesizliğe neden olur. Patlayan telin tüm boyutundaki akım yoğunluğunun sabit olduğu varsayılmaktadır.

Aşama 3: Tel tamamen buharlaştığında, hava ile genleşen plazma arasındaki sıcaklıktaki büyük fark nedeniyle hava ortamında plazma genleşmeye başlar. Metalik buhar tanecikleri, oda sıcaklığında olan hava ile çarpışır. Sonuç olarak, buhar parçacıklarının sıcaklığı hızla metalin kaynama sıcaklığından çok daha düşük bir değere düşer. Sonunda, plazma geniş itici gücünü kaybeder. Bu nedenle, düşük bir patlama odası basıncı, büyük miktarda plazma genleşmesine izin verir. Bu, tanecik büyümesi sırasında malzemenin düşük bir konsantrasyonda olmasına neden olur ve bu durum da nanotaneciklerin üretilmesine neden olur.

4.2. Modelleme Çalışmaları

4.2.1. İnce telin buharlaşma enerjisi

İnce telin buharlaşma enerjisi ve ince telin üzerinde biriken enerji miktarı, tel patlamasından oluşan nanotaneciklerin boyutunu etkiler. Oldukça küçük tanecikler üretmek için kabloya süblimleşme enerjisinden çok daha fazla enerji verilmesi gerekir. Tel üzerindeki enerji birikimi, malzemenin buharlaşma enerjisine bağlı olarak voltaj ve akım dalga formlarının ölçümünden hesaplanabilir. Malzemenin buharlaşma enerjisi Denklem 4.7’de gösterilmektedir.

$$W_s = C_s \Delta T_m + h_m + C_l \Delta T + h_g \quad (4.7)$$

Burada $\Delta T_m = T_m - T_0$, $\Delta T = T - T_m$, T_m telin erime sıcaklığı, T_0 telin ilk sıcaklığı, T anlık sıcaklık, C_s patlayan telin kapasitesi, h_m erimenin gizli ısıdır, C_l erimiş metalin ısı kapasitesi ve h_g tel malzemenin buharlaşmasının gizli ısıdır. İletkende biriken enerji, $W = (1/2)CV^2$ 'dir; burada C, kapasitans ve V gerilimdir. Burada parçacık boyutu, metaldeki ısı artışı ile önemli ölçüde azalır. Spesifik ısı oranı $k = W/W_s$ denklemi ile ifade edilmektedir. Bu çalışmada, k 'nin değeri 1 ila 3 arasında değişmektedir. Alaşımın süblimleşme enerjisi (W_s) olup birimi kJ/mol 'dür.

4.2.2. Alaşım nanotaneciklerin boyuta bağlı erimesi

Nanoyapıların erime sıcaklığı tanecik boyutuna bağlıdır. Nanoyapıların erime noktası, kristal boyutunun azalmasıyla azalır. Bu sebeple, nanotaneciklerin boyuta bağlı erime davranışları için fiziksel bir açıklama yapmak çok önemlidir. Bu amaçla uyum enerjisine bağlı bir model kabul edilmiştir. Toplam n tane atoma ve N tane yüzey atomuna sahip olan bir nanotanecik için toplam uyum enerjisi E_{top} Denklem 4.8’de verilmiştir.

$$E_{top} = E_0(n - N) + E_0 \frac{N}{2} \quad (4.8)$$

Burada E_0 malzemenin atom başına uyum enerjisidir. Mol başına uyum enerjisi E_p Denklem 4.9'da verilmiştir.

$$E_p = E_a \left(1 - \frac{N}{2n}\right) \quad (4.9)$$

Burada alaşımın uyum enerjisi $E_a = AE_0$ ve A Avagadro sayısıdır. Bir malzemenin erime sıcaklığı, uyum enerjisinin doğrusal fonksiyonudur. Nanomalzemenin uyum enerjisi N/n 'nin bir fonksiyonu olduğu için erime sıcaklığı T_{nano} benzer bir bağıntıyla denklem 10'da verilmiştir.

$$T_{nano} = T_a \left(1 - \frac{N}{2n}\right) \quad (4.10)$$

Burada T_a , alaşımın erime noktasıdır., d çapındaki atomları içeren bir D çapına sahip olan bir nanotanecik için, küresel bir nanotaneciklerin N/n değeri, Denklem 4.11'de verilmiştir.

$$\frac{N}{n} = \frac{4d}{D} \quad (4.11)$$

Küresel bir nanotanecik için boyuta bağlı erime sıcaklığı T_{nano} Denklem 12'deki gibi yazılabilir.

$$T_{nano} = T_a \left(1 - \frac{2d}{D}\right) \quad (4.12)$$

4.3. Deney Düzenegi

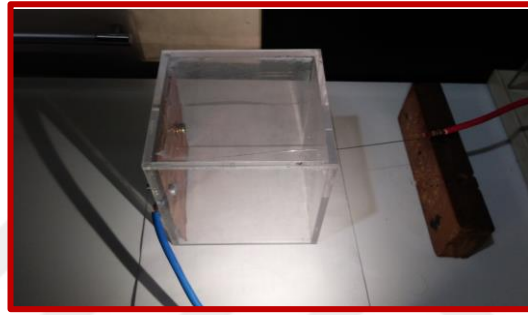
Düzenek temelde trafo, gerilim katlayıcı devre ve patlama haznesinden oluşmaktadır. Şehir şebekesinden beslenen primeri 220V AC, sekonderi 300-350-400-450V AC olan trafonun 220:300 dönüşüm oranı seçilerek gerilim katlama devresi girişine sekonder uçları bağlanmıştır. Bu bağlantı Şekil 4.2’de gösterildiği gibidir. Gerilim katlama devresi çıkışından 6000V DC gerilim elde edilmiştir. Bu devre Şekil 4.3’te verilmiştir. Patlama olayı ortamdan izole edilmesi için pleksi cam bir haznede gerçekleştirilmiştir. Katlayıcı devrenin negatif polariteli ucu pleksi camın içine yerleştirilmiş olan bakır levhaya monte edilmiştir. Patlatılan tel katlama devresi çıkışı pozitif polarite ucuna bağlanmıştır ve cam ortamına küçük bir boşluktan sürülerek bakır levhaya Şekil 4.4’deki gibi yaklaştırılmıştır. Deney düzeneğinin tamamı Şekil 4.5’de gösterilmektedir. Levha ile patlatılan tel arasındaki mesafe ark oluşturacak şekilde denklem 4.13’deki gibi hesaplanarak belirlenmiştir. Patlatma işlemi bakır levha üzerinde silüetler belirene kadar devam etmiştir. İşlem bittiğinde ise devrenin enerjisi kesilip, kondansatörlerin deşarj edilmesi için katlayıcı devrenin çıkış uçları kısa devre edilmiştir.



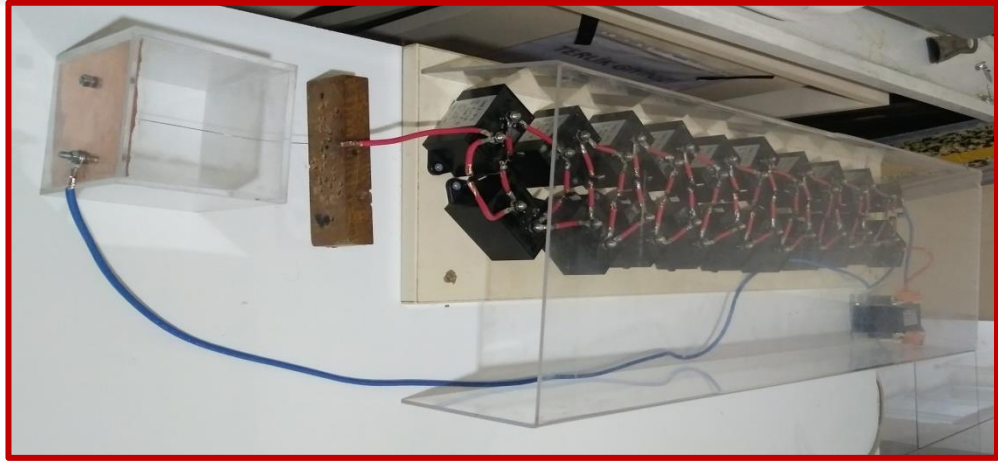
Şekil 4.2. Deney düzeneği trafo bağlantıları



Şekil 4.3. Gerilim katlayıcı devre deney düzeneği



Şekil 4.4. Deney düzeneği patlama ortamı

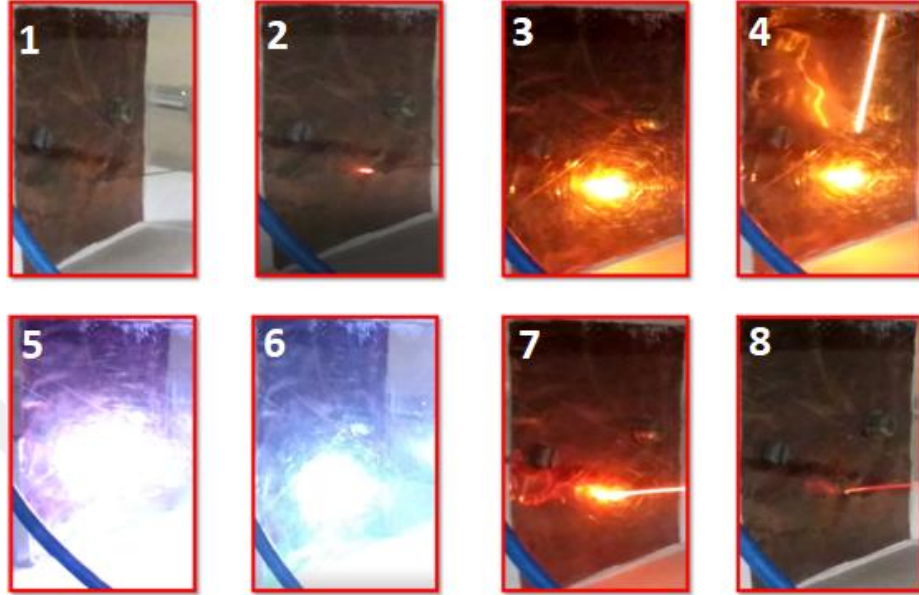


Şekil 4.5. Uygulanan deney düzeneği

4.4. Deney Sonuçları

Telin üzerine boşalan ani gerilimin telde yüksek bir akım akmasına neden olmaktadır. Bu akımın etkisiyle tel hızla ısınarak süblimleşmeye uğramaktadır. Bu da KanthalD tel ve bakır levha arasında bir plazma ortamı oluşmaktadır. Plazma ile oluşan arkın neden

olduğu patlamanın başlangıçtan sona doğru sırasıyla görüntüleri Şekil 4.6’da verilmektedir.



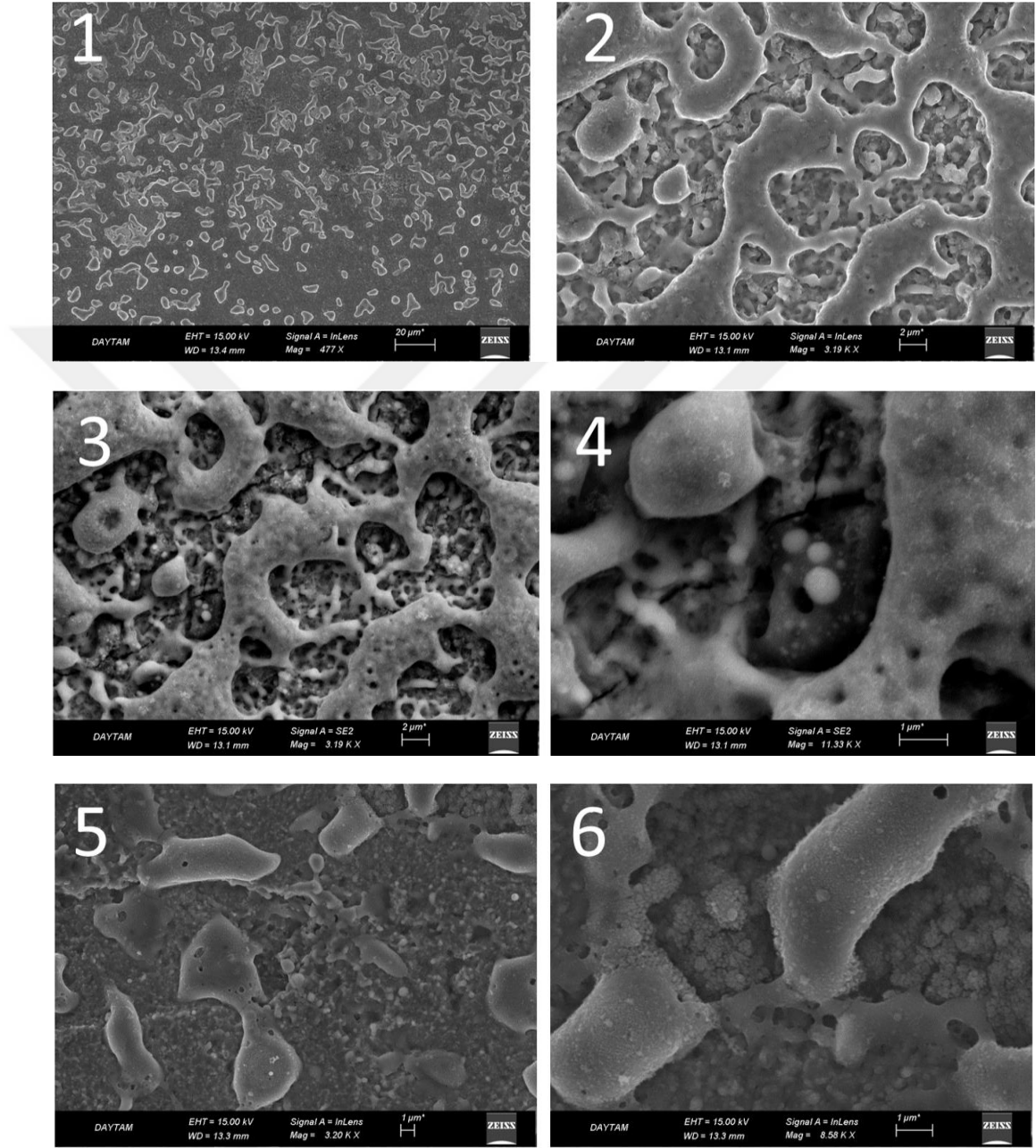
Şekil 4.6. Patlamanın anlık görüntüleri

Patlayan tel deneyinde patlama ortamındaki bakır levhada birtakım deformasyonlar ve silüetler gözlemlenmiştir. Bu bakır levha Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazıyla incelenmiştir. Levhanın Şekil 4.7’de gösterilen 1 ve 2 numaralı bölgelerinde numunenin elementel kompozisyonunu tanımlamak için Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) analizi yapılmıştır.



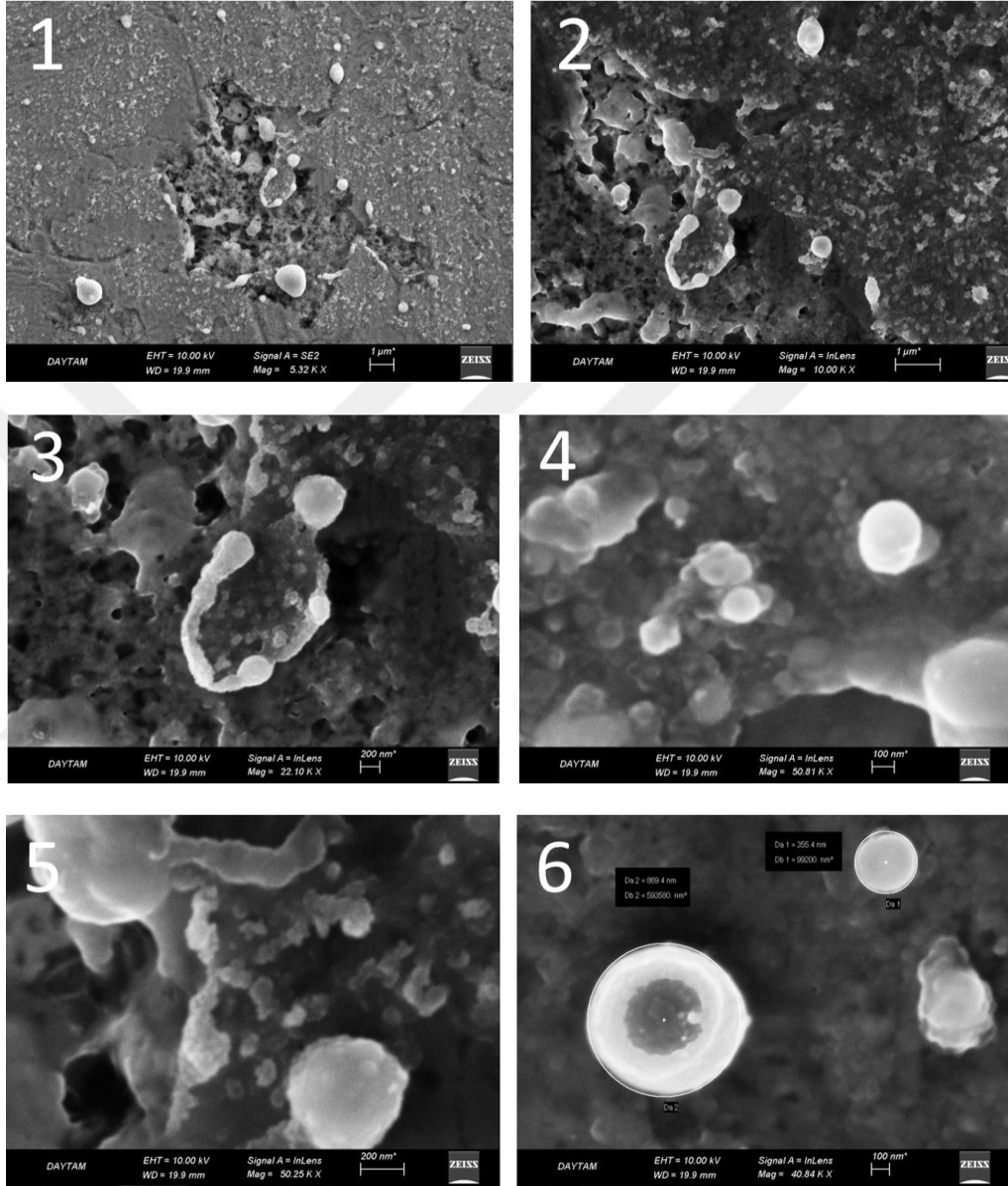
Şekil 4.7. SEM Görüntülerinin alındığı bakır levha

1 numaralı bölgeye ait görüntüler yaklaştırma sırasıyla Şekil 4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.8. 1 numaralı bölgeye ait SEM görüntüleri

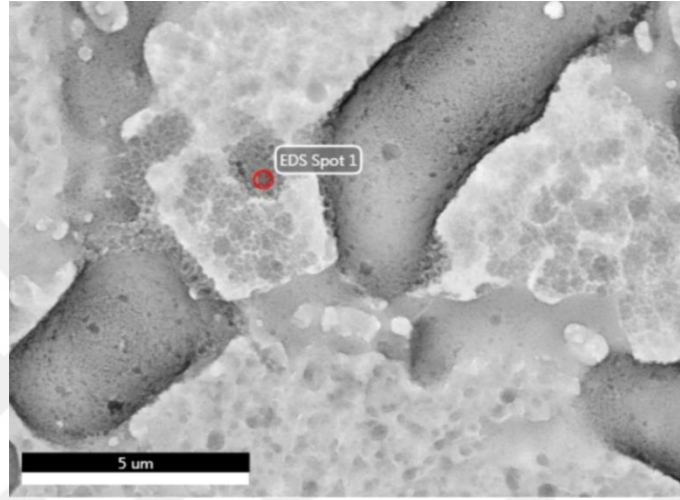
2 numaralı bölgeye ait görüntüler yaklaştırma sırasıyla Şekil 4.9’da verilmektedir.



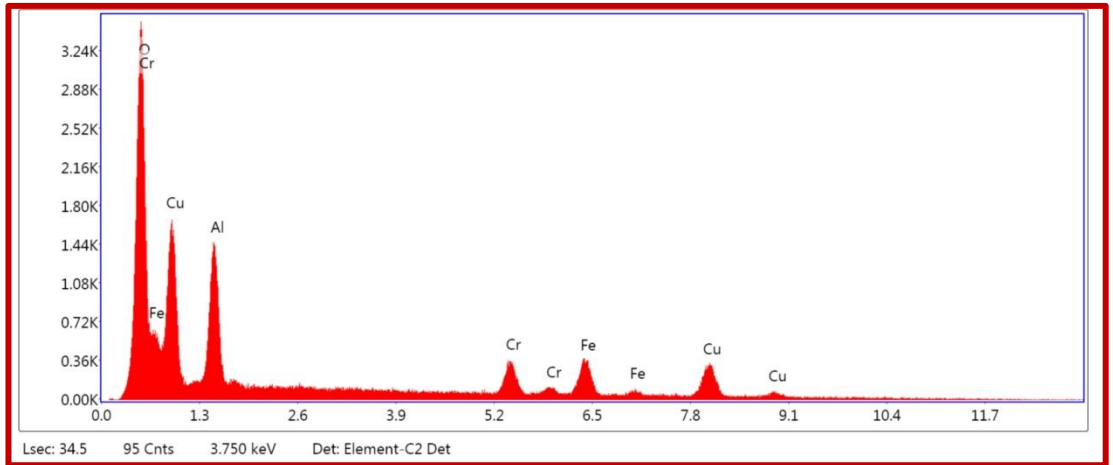
Şekil 4.9. 2 numaralı bölgeye ait SEM görüntüleri

Yapılan analizde levhanın üzerinde patlattığımız tel alaşımında bulunan Al, Cr, Fe taneciklerine ve levhadan kopan Cu taneciklere rastlanmıştır. Bu taneciklerin boyutları $\sim 0-250$ nm arasında değişmektedir. Boyutlarda meydana gelen bu farklılıkların sebebi patlatmak için alaşım seçilmesi ve alaşıma ait metal bileşenlerin farklı uyum enerjilerine sahip olması şeklinde açıklanabilir. Şekil 4.10 1 numaralı bölgeden alınan SEM

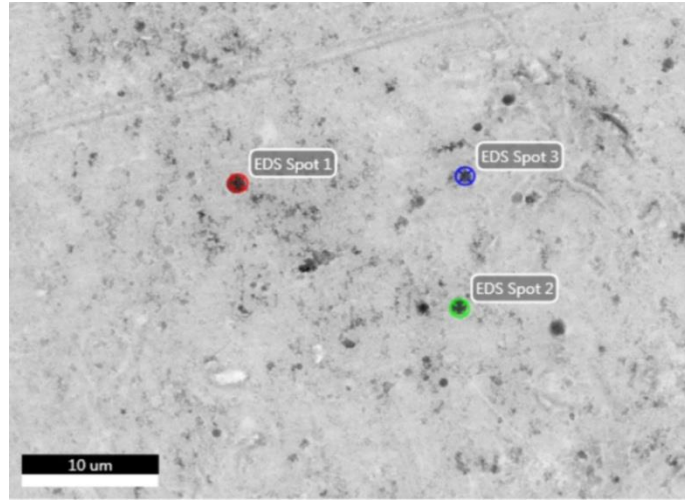
görüntülerini, Şekil 4.11 ise bu bölgeye ait seçilen noktanın EDS analizi sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.12 2 numaralı bölgeden alınan SEM görüntülerini, Şekil 4.13 ise 2 numaralı bölgeden yapılan EDS analizi sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara göre analizde tespit edilen Al, Cr, Fe ve Cu taneciklerinin yoğunlukları ve bu elementlerin tespit edildiği karakteristik x-ışınları belirtilmiştir.



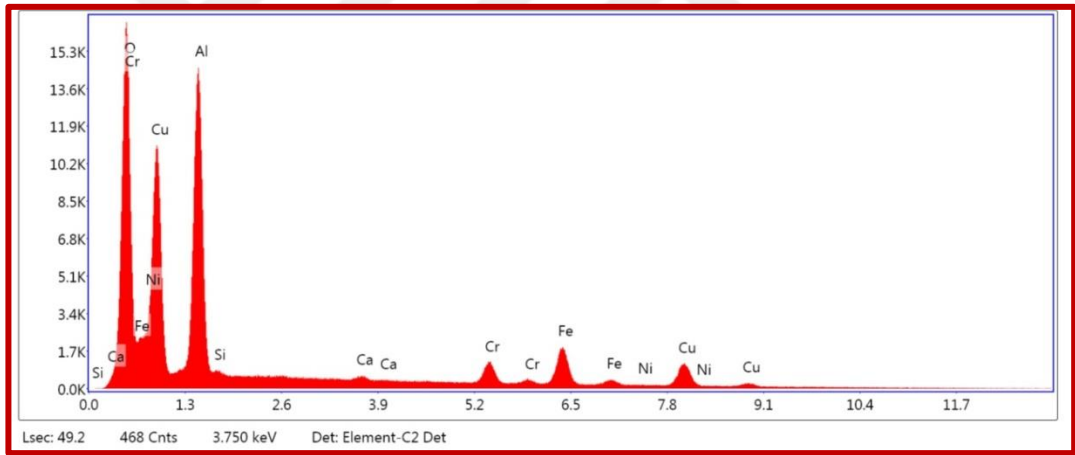
Şekil 4.10.1 numaralı bölgeden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizi için belirlenen nokta



Şekil 4.11. 1 numaralı bölgede tespit edilen elementlerin yoğunluk grafiği

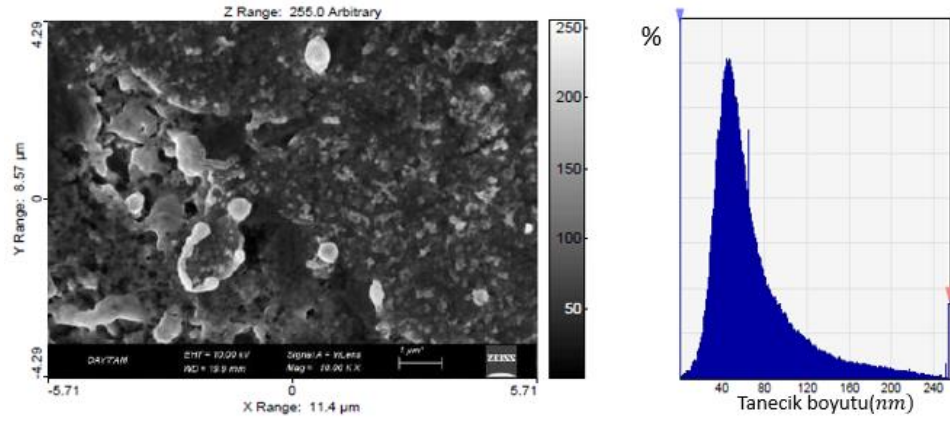


Şekil 4.12. 2 numaralı bölgeden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizi için belirlenen nokta

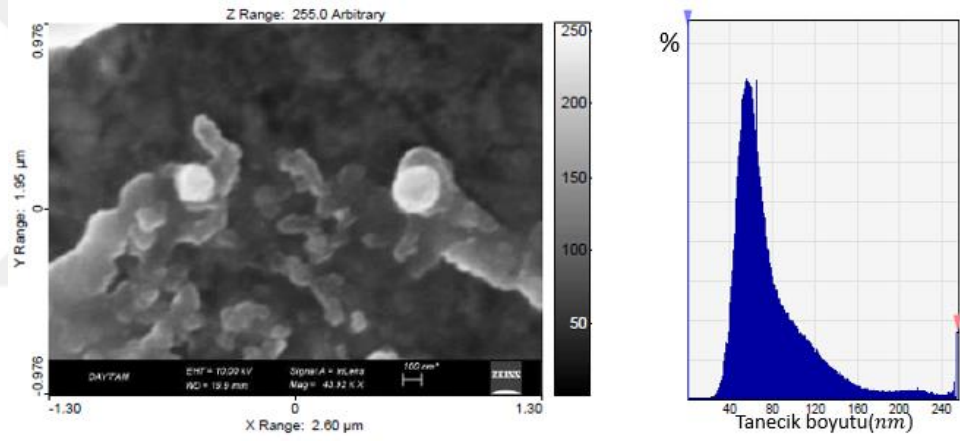


Şekil 4.13. 2 numaralı bölgede tespit edilen elementlerin yoğunluk grafiği

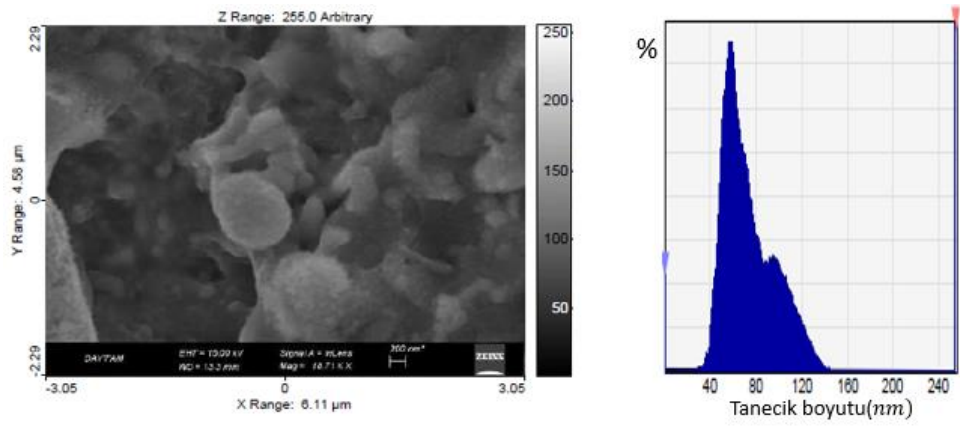
Patlama numunesinden alınan SEM görüntüleri, SPIP programıyla (programın DEMO sürümüyle) analiz edilmiştir. Görüntüde tespit edilen taneciklerin boyutları ve görüntüdeki yüzdeleri arasındaki ilişki Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.14. SEM görüntüsündeki taneciklerin tanecik sayısı-boyut grafiği



Şekil 4.15. SEM görüntüsündeki taneciklerin tanecik sayısı-boyut grafiği



Şekil 4.16. SEM görüntüsündeki taneciklerin tanecik sayısı-boyut grafiği

5. SONUÇLAR

Tel patlama işlemindeki tanecik büyüklüğü tel üzerinde biriken enerji ve telin aşırı ısınması olmak üzere temel olarak iki faktöre bağlıdır: İletkenin aşırı ısınması ile, tel patlama tekniğindeki tanecik boyutu önemli ölçüde azalır. Bu tez çalışmasında elektropatlama devresi 6000-7000-8000-9000V gerilimlerinde Powersim simülasyon programı ile simüle edilmiş olup, 6000V çıkış gerilimi ile, ince KanthalD tel patlatılarak deneysel çalışma yapılmıştır. Deney sonucunda nanotanecikler sentezlemiş ve patlayan tel üzerinde biriken enerjideki artışın tanecik boyutunu düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

Akım telden geçtiğinde Joule ısıtması nedeniyle tel ısınır ve sonuç olarak manyetohidrodinamik kararsızlık noktasında patlar. Patlatıldığında metalik buhar, ortamdaki hava ortamına doğru genişleyerek reaktif olmayan bir karışım oluşturur. Kararsız gaz-buhar karışımı, hava atomlarının ve buharın sert küre çarpışması ile termal dengeyi sağlamaya çalışır. Patlama esnasında süblimleşerek gaz haline geçen tanecikler termal dengeye ulaştığında tekrar katı bir hal alan nanotaneciklere dönüşmektedir. Patlama esnasında bakır plakaya yapışan bu tanecikler SEM cihazı ile plaka üzerinden görüntülenmiştir. Bu görüntüler üzerinde EDS analizi yapılmıştır. EDS analizinde KanthalD tel alaşımında bulunan Fe (%71-74-7), Al (%4.8), Cr (%20.5-23.5) atomları tespit edilmiştir. Nokta analiz sonuçlarına göre ise KanthalD tel alaşımına ait boyutları 0-250nm arasında değişen nanotanecikler tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasında gerilim katlayıcı devre kullanılarak elektriksel parametremleri değiştirmek ve böylece istenilen boyutlarda nanotanecik üretmek mümkün olabildiği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2010. <http://nanoteknolojinedir.com/upload/files/201303190540Nanoteknoloji-ve-uygulamalari.pdf>, 2 Mayıs 2015
- Anonim, 2013. <http://www.nedir.com/kom%C3%BCtat%C3%B6r>, 5 Haziran, 2017.
- Anonim, 2014. <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/pratik-gerilim-coklayici-devreler-ve-prensipleri/11746#ad-image-4>.
- Arlt, J. And Dholakia, K., 2000. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon. *Optics Communications*. 177(1-6), 297-301.
- Arthur, J. R., 2002. Molecular beam epitaxy. *Surface science*. 500(1-3), 189-217.
- Aşık, B., 2012. Ultrasonik sprej piroliz (usp) yöntemi ile nano yapıli kurşun oksit üretimi ve karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ateş, H., 2015. Nano parçacıklar ve nano teller. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(1), 437-442.
- Ateş, H., 2015. Nano Parçacıklar ve Nano Teller. *GU J SciPart:C*. 3(1), 437-442.
- Ateş, H., ve Bahçeci, E., 2015. Nano Malzemeler için Üretim Yöntemleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(2), 483-499.
- Attar, A. S., Mirdamadi, S., Hajiesmaeilbaigi, F., and Ghamsari, M. S., 2007. Growth of TiO₂ nanorods by sol-gel template process. *Journal of Materials Science and Technology*. 23(5), 611-613.
- Cameron, N., and Mitchell, M. E. (Eds.), 2007. *Nanoscale: issues and perspectives for the nano century*. John Wiley & Sons.
- Celep, Ş., 2007. Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 171.
- Ceylan, A., Rumaiz, A. K., and IsmatShah, S., 2007. Inert gas condensation of evaporated Ni and laserablated CoO. *Journal of applied physics*. 101(9), 094302.
- Chen, M., Xie, Y., Lu, J., Xiong, Y., Zhang, S., Qian, Y., and Liu, X., 2002. Synthesis of rod-, twinrod-, and tetrapod-shaped Cd S nano crystals using a highly oriented solvo thermal recrystallization technique. *Journal of Materials Chemistry*. 12(3), 748-753.
- Chen, Q., and Soutar, A. M., 2009. Progress on nanoceramics by sol gel process. In *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications. 391, 79-95.
- Cho, A. and Arthur, J., 1975. Molecular Beam Epitaxy. *Solid-State Chem*. 10(2): 157-192.
- Cho, J. R., 1971. Film deposition by Molecular-beam techniques. *Journal of Vacuum Science and Technology*. 8(5), 31-38.
- Çıracı, S., Süzer, Ş. Erdemir, A., Dağ, Ö., Bengü, E., Bayındır, M., İlday, Ö., Senger, T., Dana, A., Aydınli, A., Gemici, Z., Yılgör, İ., Özgür, H., Yeşilyurt, Ö., Durgun, E., Kocabaş, A., Köylü Ö., ve Gürsen, İ., 2006. Türkiye'de nanoteknoloji. *Bilim ve Teknik Dergisi-Yeni Ufuklara*, 469, 1-23.
- Dictionary of nanotechnology. Mechanical alloying. http://www.nanodic.com/nanofabrication/Mechanical_alloying.htm.

- Dolgaev, I., Simakin, A., V., Voronov, V., V., Shafeev, G., A., Bozon-Verduraz, F., 2002. Nanoparticles Produced by Laser Ablation of Solids in Liquid Environment. *Applied Surface Science*.186(1-4), 546-551.
- Duran, T., 2015. Nanoteknoloji ve uygulama alanları. <http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/78947/32671/nanoteknoloji.pdf>(10.07.2017)
- Feynman, R. P., 1959. There's plenty of room at the bottom. *Miniaturization*. 282-296.
- Godin, T., Wetzel, B., Sylvestre, T., Larger, L., Kudlinski, A., Mussot, A., and Dudley, J. M., 2013. Real time noise and wavelength correlations in octave-spanning supercontinuum generation. *Optics express*, 21(15), 18452-18460.
- Goldstain, A., 1997. *Handbook of Nanophase Materials*, Marcel DekkerInc, 371 p, New York, USA.
- Gürmen, S., ve Metalurjisi, Ü., 2009. Ultrasonik Sprey Piroлиз Tekniğiyle Küresel Gümüş Nano-partiküllerinin Üretimi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gürmen, S., Ebin, B., ve İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 2008. Nanopartiküller ve Üretim Yöntemleri – 1. Metalurji Dergisi. 150, 31-38.
- Gürmen, S., Ebin, B., ve İTÜ, M., 2008. Nanopartiküller ve üretim yöntemleri-1. Metalurji Dergisi. 150, 31-38.
- Gürmen, S., Stopić, S., and Friedrich, B., 2006. Synthesis of nano sized spherical cobalt powder by ultrasonic spray pyrolysis. *Materials Research Bulletin*. 41(10), 1882-1890.
- Hahn, H., 1997. Gasphasesynthesis of nanocrystall in ematerials. *Nanostructured Materials*. 9(1-8), 3-12.
- Hansen, S.P., 2011. *Exploding Wires: Principles, Apparatus, and Experiments*. The Bell Jar http://www.belljar.net/Exploding_Wires.pdf (23.05.2017).
- Henry, R. L., Cukauskas, E. J., Qadri, S. B., Singer, A. H., and Campisi, G. G., 1989. Thin filmgrowth of oxide superconductor materials. *IEEE Transactions on Magnetism*. 25(2),2352-2355.
- Işık, M., İ., 2009. Alev Sentezi İle Nano-Borik Asit Üretimi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jerrin, J., Jivimon, K. S., and Kohil, K. S., 2017. Synthesis and Characterization of NanoCopper Particles. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 5 (4). 1443-1451.
- Kınacı, B., 2009. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ Çoklu Kuantum Kuyu Yapısının Mbe Tekniği İle Büyütülmesi: Yapısal, Optik Ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. GaziÜniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Koch, C. C., 2003. Top-down synthesis of nanostructured materials: Mechanical and thermal processing methods. *Reviews on Advanced Materials Science*. 5(2), 91-99.
- Kostak, F., 2007, Nano Teknoloji. <http://www.etikadanismanlik.com/fky2.htm> (17.10.2017)
- Kumar, L. S., Chakravarthi, S. R., Sarathi, R., and Jayaganthan, R., 2017. Thermodynamic modeling and characterizations of Al nanoparticles produced by electrical wire explosion process. *Journal of Materials Research*, 32(4), 897-909.

- Lee J.-S., Soon S., Lee C.-W., Yu J.-H., Choa Y.- H. and Oh S.-T., 2004. Hollow Nanoparticles of Iron Oxide Synthesized by Chemical Vapor Condensation. *Journal of Nanoparticle Research*. 6, 627–631.
- Li W., Fries D.P., and Malik, A., 2004. Sol–gel stationary phases for capillary electro chromatography. *Journal of Chromatography A*. 1044, 23–52.
- Li, Y., Ruoff, R. S., and Chang, R. P., 2003. Boric acid nanotubes, nanotips, nanorods, microtubes, and microtips. *Chemistry of materials*, 15(17), 3276–3285.
- Lines, M. G., 2008. Nanomaterials for practical functional uses. *Journal of Alloys and Compounds*, 1-2, 242–245.
- Liveri, V. T., 2006. *Controlled Synthesis of Nanoparticles in Microheterogeneous Systems*, Springer Science & Business Media, Inc., 167 p, New York, USA.
- Luther, W. <http://www.nanosafe.org/node/277> . 17 Mayıs 2016.
- Luther, W., 2006. International Strategy and Foresight Report on Nanoscience and Nanotechnology. Tunus.
- Luther, W., 2006. International strategy and foresight report on nanoscience and nanotechnology. Technical Report. Tunus.
- Mantey, K., Shams, S., Nayfeh, M. H., Nayfeh, O., Alhoshan, M., and Alrokayan, S., 2010. Synthesis of wire like silicon nanostructures by dispersion of silicon on insulator using electro less etching. *Journal of Applied Physics*. 108(12), 124321.
- Menceloğlu, Y. Z., ve Kırca, M. B., 2008. Nanoteknoloji ve Türkiye. TÜSİAD. T/2008-11, 474.
- Miller, J. C., Serrato, R., Represas Cardenas, J. M. And Kundahl, G., 2004. *The Handbook of Nanotechnology*, John Wiley&Sons, Inc., 1683, Hoboken, New Jersey.
- Nascimento, J., <http://ciencia.me/nanotecnologia/nanomateriais/?lang=tr>. 30.04.2017
- Nazarenko, O. B., and Ilyin, A. P., 2008. Nano Powders Production by Electrical Explosion of Wires: Environmental Applications. Aswan, Egypt.
- Nazarenko, O., 2007. Nanopowders produced by electrical explosion of wires. *Proceedings of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6)*.
- Qin, X., Ju, Y., Bernhard, S., and Yao, N., 2005. Flame synthesis of Y_2O_3 : Eu nanophosphors using ethanol as precursor solvents. *Journal of materials research*. 20(11), 2960–2968.
- Randy, V. W., and Gordon, M. B., 2003. Flame Synthesis of Single-Walled Carbon Nanotubes and Nanofibers. NASA/CP-212376/REV1. 73–76.
- Rao, C. N., Müller, A., and Cheetham, A. K., 2005. *Nanomaterials. Chemistry of Nanomaterials - Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, 1. 1–11.
- Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N., 2007. Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri. *Türk Toz Metalurjisi Yayınları*, 5, 2–34.
- Sedoi, V. S., and Yavorovsky, N. A., 2008. Controlled synthesis of nanopowders via electrical explosion of wires. In *Strategic Technologies, 2008. IFOST 2008. Third International Forum on*. IEEE. 220–225.
- Sen, P., 2005. Nanometre scale surface modification in a needle–plate exploding system. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 17(35), 5327–5334.

- Strobel, R., Stark, W. J., Mädler, L., Pratsinis, S. E., and Baiker, A., 2003. Flame-made platinum/alumina: structural properties and catalytic behaviour in enantio selective hydrogenation. *Journal of Catalysis*, 213(2), 296-304.
- Suntola, T., 1996. Surface chemistry of materials deposition at atomic layer level. *Applied Surface Science*. 100, 391-398.
- Suryanarayana, C., 2001. Mechanical alloying and milling. *Progress in materials science*. 46(12), 1-184.
- Taşkın, S., 2013. Nano teknolojinedir. <http://www.fizikmakaleleri.com/2013/09/nanoteknoloji.html> (01.01.2017).
- Tsai, S. C., Song, Y. L., Tsai, C. S., Yang, C. C., Chiu, W. Y., and Lin, H. M., 2004. Ultrasonic spray pyrolysis for nanoparticles synthesis. *Journal of materials science*, 39(11), 3647-3657.
- Türker, M., 2002. Asal gaz yoğunlaştırma metodu ile nanoboyutlu Ag tozlarının üretimi ve özelliklerinin değerlendirilmesi. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 26(2002), 147-154.
- Türkoğlu, S., 2011. Ultrasonik Sprey Piroliz (Usp) Yöntemi ile $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\gamma}$ Süperiletken Filmlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu. İnönü Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Wang, Z. H., Choi, C. J., Kim, J. C., Kim, B. K., and Zhang, Z. D., 2003. Characterization of Fe-Co alloyed nanoparticles synthesized by chemical vapor condensation. *Materials letters*. 57(22-23), 3560-3564.
- Ward, M. B., Brydson, R., and Cochrane, R. F., 2006. Mn nanoparticles produced by inert gas condensation. In *Journal of Physics: Conference Series*. 26(1), 296-299.
- Willems and van der Willenberg (W & W), 2005. NRM Nanoroad map Project: Road map Report on Nanoparticles, November.
- Wolfgang, L., 2007. Bottom-up Methods for Making Nanotechnology Products. <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=1079> (22.06.2017).
- Yazıcı, E., 2009. Ultrasonik sprej piroliz tekniğiyle küresel gümüş nano-parçacıklarının üretimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

1990’da Erzurum’da doğdu. İlköğrenimimi ve ortaöğrenimimi Erzurum’da tamamladı. 2009 yılında başladığım Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümünden 2011’de Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümüne geçiş yaptı ve 2014’de mezun oldu. 2015’de Atatürk Üniversitesi Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı - Nanomalzeme Bilim Dalında lisansüstü eğitim için hak kazandı. 2015 yılında MEB’de ücretli İngilizce öğretmenliği yaptı. 2016’da saha mühendisliği yapmaya başladı ve hâlen bu görevi sürdürmektedir.