

# SiO<sub>2</sub> kaplı kübik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparçacıkların sentezlenmesi ve karakterizasyonu

Mustafa COŞKUN<sup>1,\*</sup>, Senem ÇİTOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü,, 06800, Beytepe, Ankara

<sup>2</sup> Hacettepe Üniversitesi, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı, 06800, Beytepe, Ankara

Geliş Tarihi (Received Date): 13.06.2017

Kabul Tarihi (Accepted Date): 28.09.2017

## Özet

Bu çalışmada, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparçacıkları, kimyasal yöntemle kübik şekilde sentezlenmiştir. Nanoparçacıkların kristal yapıları XRD spektroskopisi ve yüzey morfolojileri ise Geçirimli Elektron Mikroskopu (TEM) çalışmalarıyla belirlenmiştir. Sentezlenen Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparçacıkları SiO<sub>2</sub> ile kaplanarak, kaplamanın bu nanoparçacıkların yapısal ve magnetik özellikleri üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Sentezlenen magnetik nanoparçacıkların ısı soğurumundan sorumlu olan ve RF magnetik alan şiddeti, parçacık boyut dağılımı, anizotropi katsayısı, doyum magnetizasyonu, yüzey işlemi, parçacık yoğunluğu gibi parametreleri içeren histeresis mekanizmalarının incelenmesi için magnetizasyon ölçümleri yapılmıştır. Örneklerin magneto-ısıllık özellikleri Öz güç-soğurma hızı (SAR) değerleri ölçülerek belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Magnetik nanoparçacık, magnetik nanoparçacık hipertermi, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>.

## Synthesis and characterization of SiO<sub>2</sub> coated cubic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles

### Abstract

In this work, Cubic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles were prepared by chemical methods. The crystal structures and surface morphologies had confirmed by XRD spectroscopy and TEM studies. Synthesized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles were coated with SiO<sub>2</sub>. The effects of SiO<sub>2</sub> coating on the structural and magnetic properties of the synthesized nanoparticles were investigated. Magnetic hysteresis properties of the nanoparticles studied using VSM techniques. Hysteresis mechanisms (including relevant parameters such as the

\* Mustafa COŞKUN, mcoskun@hacettepe.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-9479-4363>  
Senem ÇİTOĞLU, senemcitoglu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6244-9469>

*amplitude of alternating magnetic field, particle size distribution, anisotropy constant, saturation magnetization, surface treatment, the concentrations of particles) responsible for heat dissipation in the synthesized systems of nanoparticles. Magneto-thermal properties were determined by measuring SAR values.*

**Keywords:** *Magnetic nanoparticles, magnetic nanoparticles hyperthermia, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>.*

## 1. Giriş

Magnetik nanoparçacıkların çok geniş alanlarda kullanım olanağı sunması yapılan araştırmaların ve bu konuya yönelen araştırmacıların sayısını her geçen gün arttırmaktadır. Yapılan araştırmalar, en genel hali ile, magnetik akışkanlar [1], magnetik katalizörler [2], biyoteknoloji/biyomedikal [3], magnetik rezonans görüntüleme [4, 5], bilgi depolama [6], çevresel temizlik [7, 8] konuları üzerine yoğunlaşmıştır.

Günümüzde kanser tedavisi için cerrahi, kemoterapi ve radyoterapi gibi birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu uygulamaların en büyük dezavantajı kanserli dokunun yanında sağlıklı dokuya da eş değerde zarar vermesi ve çoğu zaman kanserin yayılmasını önleyemeyişidir [9]. Bu nedenle, özellikle son yıllarda daha etkin ve hedef yönelik tedavi şekilleri üzerinde çalışılmaktadır. Bunlar arasında en umut verici olanı kanserli hücreleri ısıtarak yok etme temeline dayanan hipertermi yöntemidir [9]. Bu yöntemin temeli magnetik malzemelerin RF alan altında gösterdikleri ısıl özelliktir. Hipertermi yöntemi ile tümörlü dokunun sıcaklık seviyesinin 42-48 °C civarına çıkarılarak kanser hücreleri yok edilir. Normal doku hücreleri yüksek sıcaklıkları kısmi olarak tolere edebilmelerine rağmen, kanser hücreleri yüksek sıcaklıklarda büyük hasarlar görebilmekte ve ölebilmektedirler. Kanserli hücreler 43 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ölürken normal hücreler bu sıcaklıklara dayanabilmektedir.

Son yıllarda magnetik nanoparçacıklar üzerinde yapılan çalışmalar, magnetik nanoparçacıklar kullanılarak elde edilen nanoakışkanların yüksek kararlılık ve biyo-uygunlukta olduğunu göstermiştir. Bu durum magnetik nanoakışkanların tıp alanında kullanım olasılığını arttırmaktadır.

Nanoparçacıkların ısı üretim mekanizmaları, dışarıdan uygulanan magnetik alanın frekansına ve uygulanan magnetik alan şiddetine bağımlılık göstermektedir. Fakat yüksek alan ve frekans değerlerine çıkılmasında biyolojik açıdan pek çok sınırlama mevcuttur. Yüksek frekans değerlerinde (GHz) gönderilen sinyalin biyolojik yapılar açısından giriciliği çok düşüktür. Bu nedenle de sinyalin büyük çoğunluğu sağlam doku tarafından soğrulacak ve sonuç olarak tümörlü dokuya ulaşamayacaktır. Aynı zamanda yüksek frekans değerleri özellikle sinir sistemi başta olmak üzere hasta üzerinde eddy akımlarının oluşması gibi birçok yan etkiye sebep olmaktadır. Yapılan çalışmalar, biyolojik uygulamalar açısından frekans ve magnetik alan değerinin çarpımının  $5 \times 10^9$  A/m.s değerinin altında olması gerektiğini göstermiştir [10].

Buna göre biyolojik sınırlamaların izin verdiği frekans ve alan değerlerinde ısı üretiminin maksimum olması nanoparçacıkların ısı üretim hızına bağlıdır. Bu da üretilen nanoparçacıkların magnetik özeliğinin, kristal yapısının, tanecik boyutunun ve dağılımının ancak optimum koşullarda olması durumunda gerçekleşebileceğinin göstergesidir. Hipertermi için magnetik nanoparçacıkların kullanılabilmesi için, bazı

durumlarda toksik olmaları nedeniyle yüzeylerinin biyo-uygun malzemeler ile kaplanması gerekebilmektedir.

## 2. Deneysel çalışmalar

### 2.1. Kübik $Fe_3O_4$ nanoparçacıkların kimyasal yöntem kullanılarak sentezlenmesi

Bu sentez işleminde Martinez-Baubeta ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları çalışma temel alınmıştır [11]. Örneklerin hazırlanmasında izole edilmiş Schlenk sisteminden, 15 dakika süre ile azot gazı geçirilerek içeride bulunan oksijen gazı dışarıya atıldı. Daha sonra 3 boyunlu baloncuğun içine 0,353 g (1mmol) demir (III) asetilat ( $Fe(acac)_3$ ), 0,688g (4mmol) dekanolik asit ve 25 ml benzil eter konuldu. 30 dakika vakumlanan sistemin içerisine tekrar argon gazı verildi. Ardından çözelti sıcaklığı 2.6 °C/dak ısıtma hızı ile 200 °C'ye çıkarılmıştır. Argon gaz akışı altında 2 saat bu sıcaklıkta beklendikten sonra, 6 °C/dak hız ile sıcaklık 290 °C'ye çıkarılarak 1 saat beklenmiştir. Çözelti oda sıcaklığına soğutulduktan sonra aseton ile 3 defa yıkanarak 8000 rpm sentrifüj ile ayrılmıştır.

### 2.2. Kübik ve oleik asit kaplı $Fe_3O_4$ nanoparçacıklarının $SiO_2$ ile kaplanması

Lee ve arkadaşlarının 2006 yılında FePt nanoparçacıkları  $SiO_2$  ile kaplama için kullandıkları mikro emülsiyon yöntemi temel alınarak, kübik  $Fe_3O_4$  nanoparçacıkların yüzeylerinin  $SiO_2$  ile kaplanması işlemi gerçekleştirildi [12].

Dekanoik asitle kaplanmış olarak sentezlenen nanoparçacıklar; yağ içinde su mikroemülsiyon yönteminde olduğu gibi, tetraetil ortosilikatın (TEOS) baz katalizi sonucunda  $SiO_2$ 'ye dönüşümü yardımı ile  $SiO_2$  ile kaplandı. İlk olarak, 8 ml Igepal® CO-520 (Sigma-Aldrich) yüzey aktif kimyasalı [ $(C_2H_4O)_n \cdot C_{15}H_{24}O$ ,  $n \approx 5$ ] ile 175 ml siklohegzan (Sigma-Aldrich, % 98) 250 ml'lik erlenmayer kabında karıştırıldıktan sonra, 20 dakika süreyle ultrasonik temizleyicide tutuldu ve ardından magnetik karıştırıcı ile yarım saat süreyle karıştırıldı. Daha sonra konsantrasyonu 1 mg/ml olacak şekilde ayrı olarak hazırlanan 25 ml  $Fe_3O_4$  nanoparçacık ve siklohegzan karışımı çözeltiye damla damla ilave edildi. 4 saat boyunca karıştırılan çözeltiye, %30' luk  $NH_4OH$  sulu çözeltisinden 1.5 ml damla damla eklendi. 10 dakika beklendikten sonra 1.50 ml TEOS çözeltiye eklenerek 72 saat boyunca polimerleşmenin gerçekleşmesi için magnetik karıştırıcı yardımıyla çözelti karıştırıldı. Daha sonra 50 ml metanol eklenerek oluşan nanoparçacıkların çökmeleri sağlandı. 8000 devir/dak hızda 30 dakika süre ile santrifüjden geçirilerek ayrılan nanoparçacıkların yüzey aktif ve diğer kimyasallardan tamamen temizlenmesi için 3 defa etanol ile yıkandıktan sonra her seferinde yine 6000 devir/dak hızda 10 dakika süre ile santrifüj edilip ayrıştırıldıktan sonra kuru azot ile kurutuldu.

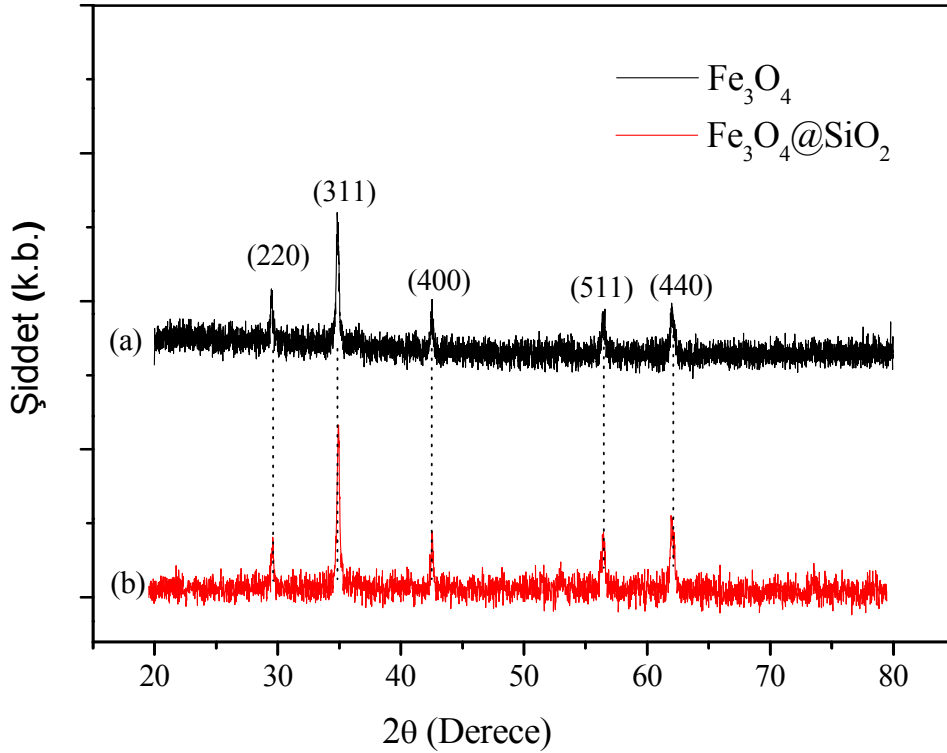
### 2.3. Nanoparçacıkların XRD bulguları

Sentezlenen nanoparçacıkların kristal yapıları dalgaboyu  $\lambda = 0.154$  nm olan (Cu- $K_{\alpha}$ ) X-ışını üreten Rigaku model XRD cihazı kullanılarak analiz edildi. Bu sistemde ölçümler 20° ile 80° aralığında 0.02° çözünürlük ile 120 dakika sürekli spektrum alınarak elde edildi.

Kurutulmuş toz halindeki  $Fe_3O_4$  örneği için elde edilen XRD desenleri ve belirgin düzlem indisleri Şekil 1a'da verilmiştir.

XRD desenlerinin nicel analizleri “X-Powder<sup>®</sup>” programı ve International Centre for Diffraction Data’s Powder Diffraction File (PDF) ’dan sağlanan standart kırınım desenleri ile örnek desenlerinin karşılaştırılması ile gerçekleştirildi. XRD desenlerinde görüldüğü gibi  $Fe_3O_4$  yapısındaki spinel yapılar için bulunan karakteristik pik pozisyonları tüm örnek türleri için hemen hemen aynıdır. XRD desenleri incelendiğinde,  $Fe_3O_4$  örneklerinin saf oldukları, başka deyimle belirgin olan yabancı bir faz içermedikleri anlaşılmıştır.

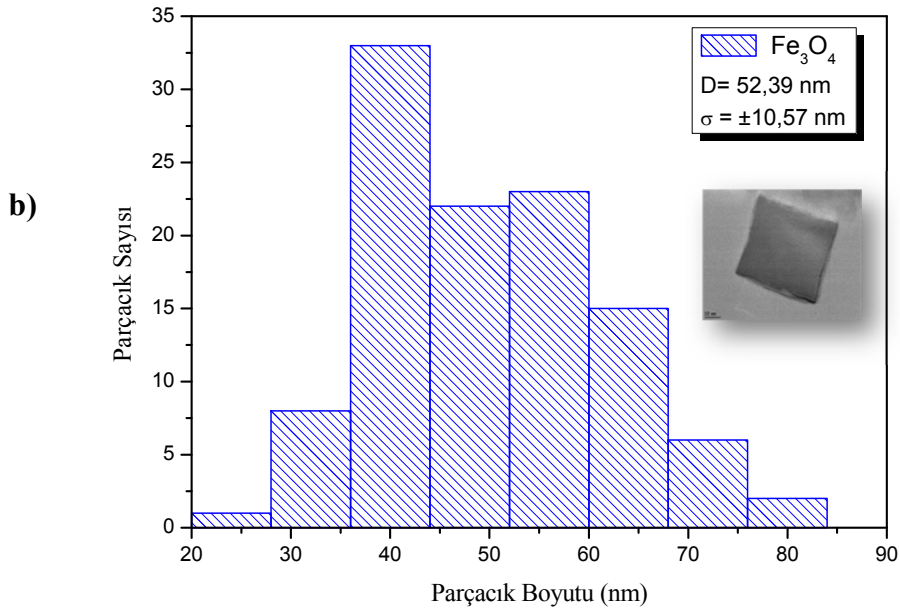
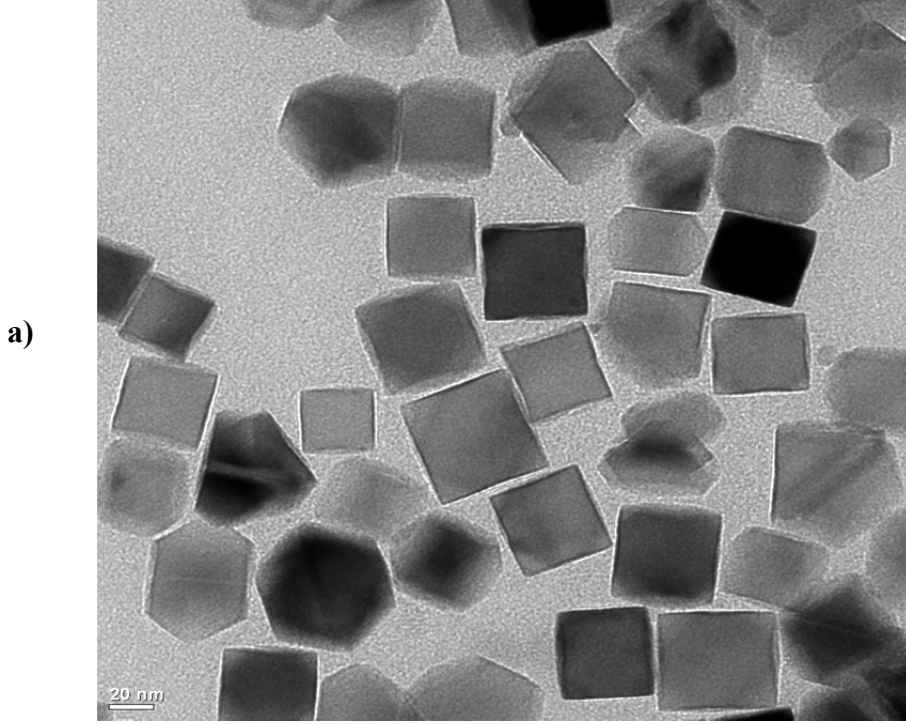
Şekil 1b’de yaklaşık 6.5 nm kalınlığında  $SiO_2$  ile kaplanmış kübik  $Fe_3O_4$  örneklerinin XRD deseni verilmiştir.  $SiO_2$  kaplanan  $Fe_3O_4$  örneğinde kütle bazında  $Fe_3O_4/SiO_2$  oranı yaklaşık 2 (~%70  $Fe_3O_4$ ) olduğu için  $Fe_3O_4$  pikleri belirgin olarak gözlemlenebilmektedir.



Şekil 1. Dekanoik asit kaplı (a) ve 6.5 nm kalınlığında  $SiO_2$  kaplı (b)  $Fe_3O_4$  örneği için elde edilen XRD deseni

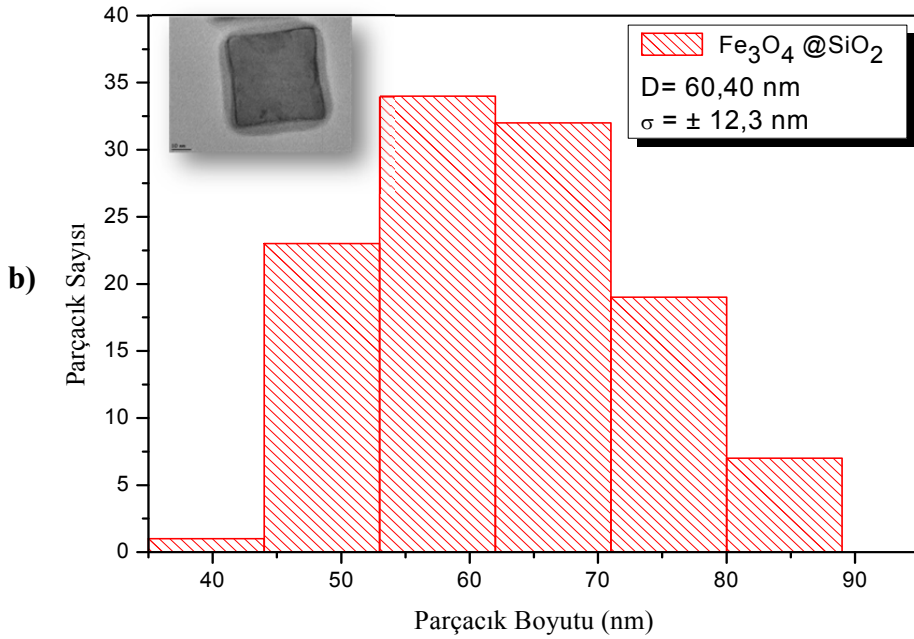
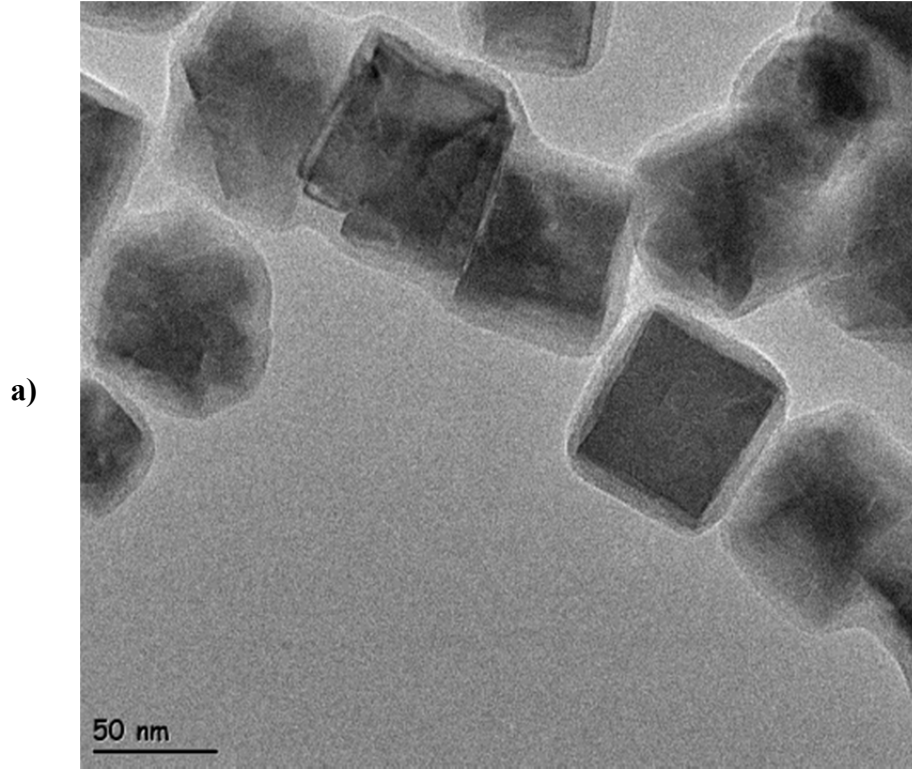
#### 2.4. Nanoparçacıkların Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) ölçümleri

Kübik  $Fe_3O_4$  örneği için elde edilen TEM görüntüsü Şekil 2a’da verilmiştir. Parçacıkların TEM resimlerinin Image-J programı ile analizleri sonucunda elde edilen parçacık büyüklüğü dağılımı Şekil 2b’de verilmiştir. Ayrıca lognormal dağılım fonksiyonuna benzetişim yapılarak elde edilen ortalama parçacık büyüklükleri ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan kübik nanoparçacıkların  $52.4 \pm 10.6$  nm boyutunda olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> örneğinin; a) TEM görüntüsü, b) TEM parçacık büyüklüğü dağılımı

SiO<sub>2</sub> kaplanan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> örneği için elde edilen TEM görüntüleri ve parçacık büyüklüğü dağılımları Şekil 3a ve 3b'de verilmiştir. TEM görüntülerinden kübik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> örneklerinin yüzeylerinin neredeyse aynı kalınlıkta SiO<sub>2</sub> ile kaplandığı anlaşılmaktadır. SiO<sub>2</sub> kaplı parçacık büyüklüğü 60.4±12.3 nm olarak belirlenmiştir. Image-J programı kullanılarak yapılan incelemede Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparçacıklarının 1.5 ml TEOS kullanılarak kaplanması ile 6.5 nm kalınlığında SiO<sub>2</sub> ile kaplandığı gözlenmiştir.



Şekil 3. SiO<sub>2</sub> kaplı kübik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> örneği için; a) TEM görüntüsü, b) TEM parçacık büyüklüğü dağılımı

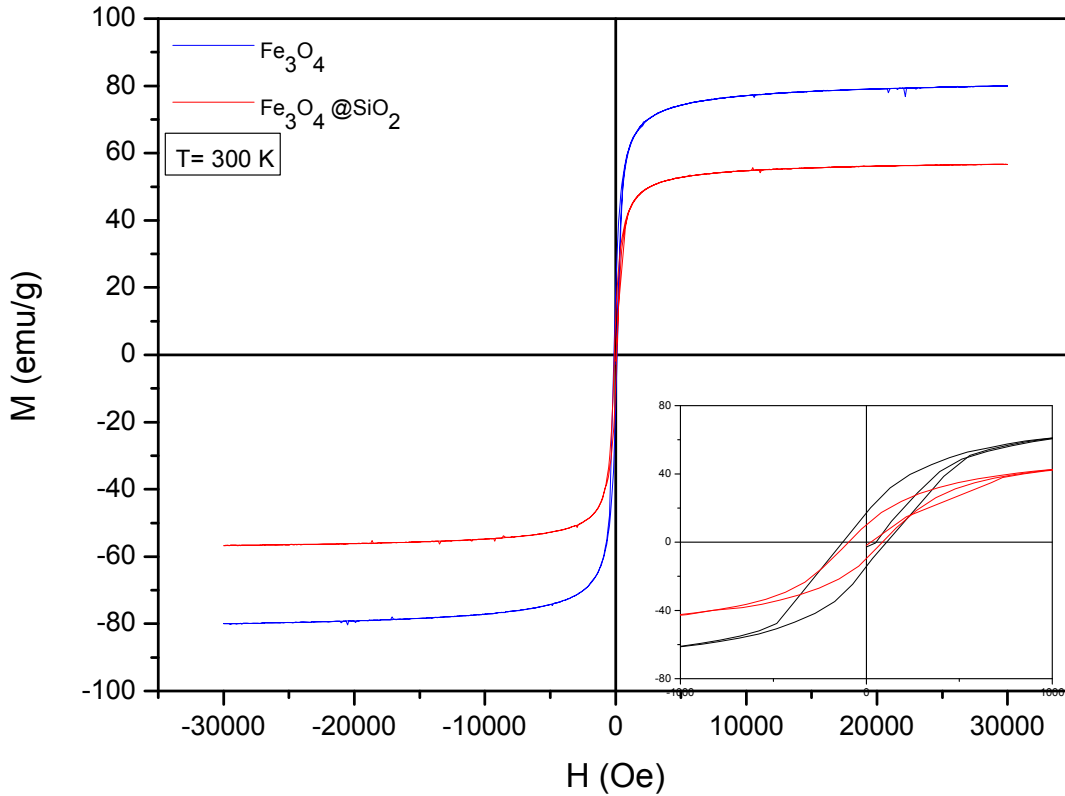
### 2.5. Nanoparçacıkların magnetizasyon bulguları

Örneklerin magnetizasyon ölçümleri 5K - 300K sıcaklık aralığında ve maksimum  $\pm 9$  T magnetik alanına çıkabilen Quantum Design PPMS (Physical Property Measurement System, Fiziksel Özellikler Ölçüm Sistemi) sisteminin VSM (Vibratıon sample magnetometer, titreşimli örnek magnetometresi) kısmı kullanılarak yapıldı. Örnekler, yaklaşık 1.5-4.0 mg arasında değişen oranlarda, kapton<sup>®</sup> bandın içerisine sıkı biçimde

konularak,  $\pm 0.1\mu\text{g}$  hassasiyete sahip terazide tartıldıktan sonra, VSM sisteminde bulunan örnek tutucusuna yerleştirilerek ölçümler alındı.

Örneklerin 300 K sıcaklığında  $\pm 3$  T magnetik alan aralığında histerezis eğrileri (M-H eğrileri) elde edildi. Kullanılan örneğin kütlesi dikkate alınarak kütle bazında normalizasyon yapılarak, magnetizasyon değerleri emu/g cinsinden hesaplandı. 300K sıcaklığındaki hem dekanonik asit hem de  $\text{SiO}_2$  kaplı  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  örnekleri için histerezis eğrisi Şekil 4’de verilmiştir. Dekanonik asit kaplı örneğin doyum magnetizasyon değeri  $M_s = 79$  emu/g ve koersivite  $H_c = 170$  Oe olarak bulunmuştur.

1.5 ml TEOS kullanılarak  $\text{SiO}_2$  kaplanan örnek için ise doyum magnetizasyon değeri  $M_s = 56$  emu/g ve koersivite  $H_c = 350$  Oe ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde,  $\text{SiO}_2$  kaplanması ile örneğin koersivite değeri neredeyse 2 katına çıkarken, örnek miktarının bir kısmının (% 70 gibi) magnetik özellik göstermesi nedeniyle doyum magnetizasyon değerinde belirgin azalmaların ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 4. Dekanonik asit ve  $\text{SiO}_2$  kaplı kübik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  örneğinin 300K’de ölçülen histerezis eğrileri.

## 2.6. $\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanoparçacıklarının magneto-ısı bulguları

Yapısal, ısı ve magnetik özellikleri incelenen  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparçacıklardan dekanonik asit kaplı olanlar 1 ml hekzan, silika kaplı olanlar ise 1 ml saf su ile karıştırıldı. Bu karışım 30 saniye süre ile ultra-sonik karıştırıcı ile homojen hale getirildi. Bu şekilde hazırlanan örnekler Magneto-Isıl ölçüm düzeneğinin bobini merkezine yerleştirilmeden önce örneğin sıcaklığının sabitlenmesi beklendi. Bu arada ölçüm düzeneğindeki güç kaynağından sağlanan gücün de doyum değerine ulaşması sağlandı. Bu koşullar sağlanınca örnek tutucusuna yerleştirilerek, bilgisayarlı sistemde ölçüm alınmaya



başlandı. Bu ölçümlerde bobinin örnek üzerine uyguladığı magnetik alan 64 kA/m ve rezonans frekansı 303 kHz olmuştur.

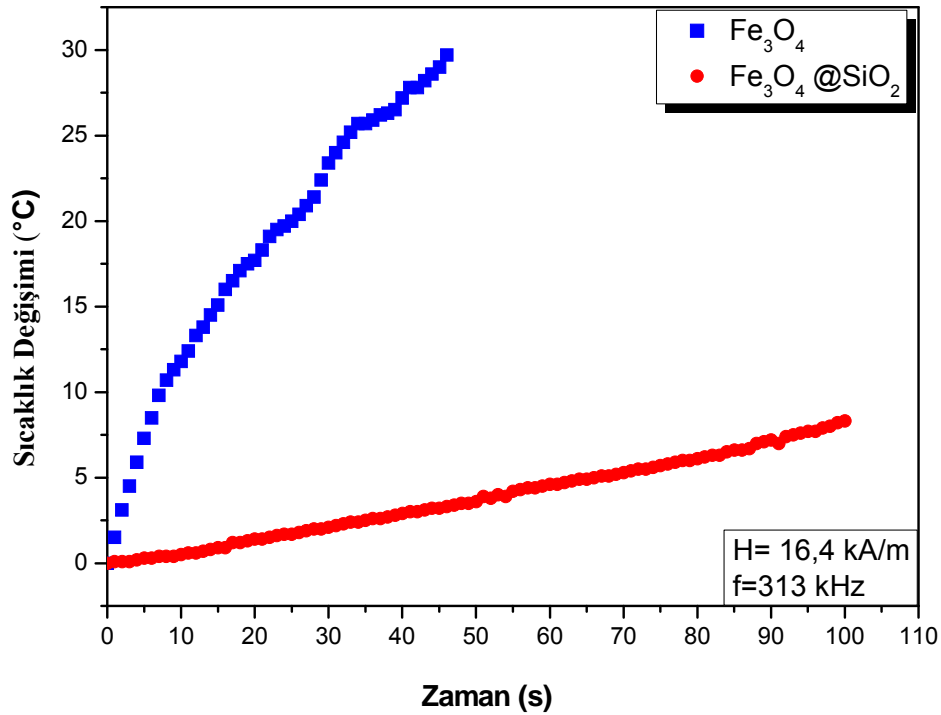
Öz güç-soğurma hızı (SAR);

$$SAR = \frac{\sum_i c_i m_i}{m_{mag}} |d(\Delta T)/dt|_{t \rightarrow 0} \quad (1)$$

Burada yer alan  $c_i$  nanoakışkanın içindeki malzemelerin ısı sığalarını,  $m_i$  bu malzemelerin her birinin kütlelerini,  $m_{mag}$  nanoakışkan içerisindeki magnetik malzeme(leri)nin kütlesi ve

$$|d(\Delta T)/dt|_{t \rightarrow 0} \quad (2)$$

çizilen  $\Delta T(t)$  grafiğinin doğrusal olduğu bölgedeki ( $t \rightarrow 0$ ) eğimini temsil eder.



Şekil 5. SiO<sub>2</sub> ve dekanolik asit kaplı kübik nanoparçacıkların RF alan altında ısıl davranışı.

Hem SiO<sub>2</sub> hem de kaplı olmayan örnekler için elde edilen magneto-ısıllı ölçümler Şekil 5'da görülmektedir. Bu grafikteki verilere uyarlanan ısınma eğrilerinin  $t \rightarrow 0$  koşulundaki eğimleri bulunarak yapılan hesaplamalar ve saptanan SAR değerleri Dekanoik asit kaplı örnek için 249 W/g ve SiO<sub>2</sub> kaplı olan örnek için 39 W/g olarak bulunmuştur. Bu hesaplamalarda Silika özısıısı 703 J/(kg K) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> özısıısı 599 J/(kg K), su özısıısı 4181.8 J/(kg K) ve hekzan özısıısı 2260 J/(kg K) olarak alınmıştır. Suyun yoğunluğu 998.2071 kg/m<sup>3</sup> hekzanın yoğunluğu 654.8 kg/m<sup>3</sup> ve suyun viskozitesi 1.002 mP s, hekzanın viskozitesi 0.294 mP s değerleri kullanılmıştır.



### 3. Sonuçlar ve tartışma

Kimyasal yöntem kullanılarak hazırlanan kübik  $Fe_3O_4$  nanoparçacıkların ısı ve magnetik özellikleri değişik teknikler yardımı ile incelenmiş ve karakterizasyonları yapılmıştır. TEOS kullanılarak söz konusu  $Fe_3O_4$  nanoparçacıklarının yüzeyleri  $SiO_2$  ile kaplanmasının magnetik özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir.

XRD grafikleri; sentezlenen nanoparçacıkların  $Fe_3O_4$ 'e özgü spinel faza sahip olduklarını başka belirgin bir kristal yapının bulunmadığını göstermiştir.

Sentezlenen  $Fe_3O_4$  nanoparçacıklarının morfolojileri ve büyüklükleri yüksek çözünürlüklü TEM görüntüleri alınarak incelendi.  $Fe_3O_4$  örneklerinin yaklaşık 52 nm büyüklüğündeki nanoparçacıklardan oluştuğu; parçacık dağılımının ise 40-60 nm aralığında kaldığı çizilen histogram grafiklerinden belirlendi. 1.5 ml TEOS kullanılarak  $SiO_2$  ile kaplanan örneklerin TEM görüntülerinden, parçacıkların oldukça homojen bir biçimde  $SiO_2$  ile kaplandığı ve kenar uzunluklarının 65-66 nm olduğu bulundu. Nanoparçacıkların histogram grafikleri yardımı ile 6.5 nm kalınlıkta  $SiO_2$  ile kaplanmış olduğu belirlendi.

SAR ölçümlerinden dekanolik asit kaplı kübik yapı için elde edilen sonuç literatürde verilen değerler (literatür  $SAR_{kübik}=320W/g$ , 20 nm kenar uzunluklu kübik  $Fe_3O_4$ ) ile uyumludur [11]. Literatürde kübük nanoparçacıkların küresel nanoparçacıklara oranla daha yüksek SAR değerine sahip olduğu belirtilmiştir [11]. SAR değerleri  $SiO_2$  kaplama ile azalmaktadır.  $SiO_2$  kaplamanın yüksek frekanslarda eddy akımının azaltmada etkili olabileceği literatürde bildirilmiştir [13]. Ayrıca,  $SiO_2$  kaplamanın yüzey morfolojisini de değiştirerek anizotropiyi etkinleştirdiği söylenebilir. Sentezlenen örneklerin  $SiO_2$  ile kaplanması sonucunda SAR değerinde neredeyse 7 kat düşüş meydana geldiği görülmektedir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde 40-50 nm boyutunda sentezlenen kübük nanoparçacıkların hem  $SiO_2$  kaplı hem de dekanolik asit kaplı olmaları durumunda hipertermi uygulamalarında kullanım için ideal aday örnekler olabilecekleri belirlenmiştir.

### Teşekkür

Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi (proje numarası: 2014-616) tarafından desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- [1] Chikazumi, S., Taketomi, S., Ukita, M., Mizukami, M., Miyajima, H., Setogawa, M., ve Kurihara, Y., Physics of magnetic fluids. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 65, 2-3, 245-251, (1987).
- [2] Lu, A. H., Schmidt, W., Matoussevitch, N., Bönnemann, H., Spliethoff, B., Tesche, B., Bill, E., Kiefer, W. ve Schüth, F., Nanoengineering of a magnetically separable hydrogenation catalyst. **Angewandte Chemie**, 116, 33, 4403-4406, (2004).

- [3] Gupta, A.K., ve Gupta, M., Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. **Biomaterials**, 26, 18, 3995-4021, (2005).
- [4] Mornet, S., Vasseur, S., Grasset, F., Veverka, P., Goglio, G., Demourgues, A., ve Duguet, E., Magnetic nanoparticle design for medical applications. **Progress in Solid State Chemistry**, 34, 2, 237-247, (2006).
- [5] Li, Z., Wei, L., Gao, M. Y., ve Lei, H, One Pot Reaction to Synthesize Biocompatible Magnetite Nanoparticles. **Advanced Materials**, 17, 8, 1001-1005, (2005).
- [6] Hyeon, T., Chemical synthesis of magnetic nanoparticles. **Chemical Communications**, 8, 927-934, (2003).
- [7] Elliott, D.W., ve Zhang, W.X., Field assessment of nanoscale bimetallic particles for groundwater treatment. **Environmental Science ve Technology**, 35, 24, 4922-4926, (2001).
- [8] Takafuji, M., Ide, S., Ihara, H., ve Xu, Z., Preparation of poly (1-vinylimidazole)-grafted magnetic nanoparticles and their application for removal of metal ions. **Chemistry of materials**, 16, 10, 1977-1983, (2004).
- [9] American Cancer Society  
[http://www.cancer.org/docroot/ETO/content/ETO\\_1\\_2X\\_Chemotherapy\\_What\\_It\\_Is\\_How\\_It\\_Helps.asp](http://www.cancer.org/docroot/ETO/content/ETO_1_2X_Chemotherapy_What_It_Is_How_It_Helps.asp). (12.06.2017).
- [10] Hergt, R., Andra, W., d'Ambly, C.G., Hilger, I., Kaiser, W.A., Richter, U., ve Schmidt, H.G., Physical limits of hyperthermia using magnetite fine particles. **IEEE Transactions on Magnetics**, 34, 5, 3745-3754, (1998).
- [11] Martinez-Boubeta, C., Simeonidis, K., Makridis, A., Angelakeris, M., Iglesias, O., Guardia, P., ve Saghi, Z., Learning from Nature to Improve the Heat Generation of Iron-Oxide Nanoparticles for Magnetic Hyperthermia Applications. **Scientific Reports**, 3, (2013).
- [12] Lee, D.C., Mikulec, F.V., Pelaez, J.M., Koo, B., ve Korgel, B.A., Synthesis and magnetic properties of silica-coated FePt nanocrystals. **The Journal of Physical Chemistry B**, 110, 23, 11160-11166, (2006).
- [13] Nguyen, Q., Chinnasamy, C.N., Yoon, S.D., Sivasubramanian, S., Sakai, T., Baraskar, A., ve Harris, V.G., Functionalization of FeCo alloy nanoparticles with highly dielectric amorphous oxide coatings. **Journal of Applied Physics**, 103(7), 07D532, (2008).