



T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

TEK-DOMENLİ BİR NANOPARÇACIĞIN KUADRUPOL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

NAZLI DEMİRER

Temmuz 2015

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

TEK-DOMENLİ BİR NANOPARÇACIĞIN KUADRUPOL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

NAZLI DEMİRER

Yüksek Lisans Tezi

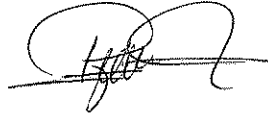
Danışman

Prof. Dr. Orhan YALÇIN

Temmuz 2015

Nazlı DEMİNER tarafından **Prof. Dr. Orhan YALÇIN** danışmanlığında hazırlanan “Tek-Domenli Bir Nanoparçacığın Kuadropol Özelliklerinin İncelenmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Rıza ERDEM Akdeniz Üniversitesi



Üye : Prof. Dr. Orhan YALÇIN Niğde Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Selva BÜYÜKAKKAŞ Niğde Üniversitesi



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../2015 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../2015 tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

....../....../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Nazlı DEMİRER

ÖZET

TEK-DOMENLİ BİR NANOPARÇACIĞIN KUADRUPOL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DEMİRER, Nazlı

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Orhan YALÇIN

Temmuz 2015, 55 sayfa

Bu tezde, $S=1$ Blume-Emery-Griffiths (BEG) modeli kullanılarak tek domenli çekirdek-yüzey tipi homojen ve kompozit nanoparçacığın (NP) kuadrupol özellikleri çift yaklaşım yöntemine dayalı olarak araştırıldı. Nanoparçacığın altıgen örgü üzerindeki çekirdek (C), ara yüzey (CS) ve yüzey (S) kesimleri için düzenlenen BEG Hamiltoniyeni yardımıyla bağ enerji parametreleri (ε_{ij}) ve bağ değişkenleri (P_{ij}) elde edildi. P_{ij} için öz uyumlu denklem sistemi çözülerek parçacığın kuadrupol düzeni (Q) hesaplandı. Mıknatıslanmanın (m) ve Q'nun sıcaklığa (T) bağıllığı, özellikle Q-T termal histerezis eğrileri incelendi. Q-D histerezis eğrileri de elde edilerek mıknatıslanma ve kuadrupol özelliklerinin karşılaştırılması yapıldı.

Anahtar Sözcükler: Homojen ve kompozit nanoparçacıklar, Kuadrupol özellik, Çift yaklaşım yöntemi, Kristal alan ve bikuadratik etkileşme

SUMMARY

INVESTIGATION OF QUADRUPOLEAR PROPERTIES OF A MONODOMAIN NANOPARTICLE

DEMİRER, Nazlı

Niğde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Orhan YALÇIN

July 2015, 55 pages

In this thesis, we have used $S = 1$ Blume-Emery-Griffiths (BEG) model to investigate the quadrupolar properties of a monodomain core-surface type homogeneous and composite nanoparticle (NP) based on pair approximation. We have obtained the bond energy parameters (ε_{ij}) and bond variables (P_{ij}) using the BEG Hamiltonian for the Core (C), core-surface (CS) and surface (S) parts of a NP on the hexagonal lattice. The self-consistent equations for the variables P_{ij} were solved to calculate the particle's quadrupolar order parameter (Q). Temperature (T) variations of the magnetization (m) and Q were investigated. Particularly, we have investigated Q - T hysteresis curves. Q - D hysteresis curves were also obtained and compared with those of m - T hysteresis curves.

Keywords: Homogeneous and composite nanoparticles, Quadrupole properties, Pair approximation methods, Crystal field and biquadratic effect

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca tezde yardım ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Orhan YALÇIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarında hiçbir destek ve yardımını esirgemeyen ve tez çalışmamla ilgili olarak vaktini ayırıp ilgi ve desteğini veren Songül ÖZÜM'e teşekkür ederim.

Ayrıca fiziksel yorum ve diğer katkılarından dolayı Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Rıza ERDEM'e teşekkür ederim.

Tez süresince desteğini esirgemeyen ve tez boyunca anlayışı için değerli eşim Burak GÜMÜŞ'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELERDİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xii
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II TEORİK BİLGİ.....	3
2.1 Manyetizasyon.....	3
2.1.1 Diyamanyetik malzemeler.....	3
2.1.2 Paramanyetik malzemeler.....	5
2.1.3 Ferrimanyetik malzemeler.....	6
2.1.4 Antiferromanyetik malzemeler.....	7
2.1.5 Ferromanyetik malzemeler.....	8
2.1.6 Birinci ve ikinci derece faz geçişleri.....	11
2.1.7 Martensitik ve östenitik fazlar.....	12
2.2 Nanoparçacıklar.....	14
2.3 Tek Domenli Nanoparçacıklar ve Nano Sistemlerdeki Yeri.....	14
BÖLÜM III TEORİK MODEL.....	15
3.1 Çekirdek/Yüzey Tipi Altıgen Nanoparçacığın Morfolojik Yapısı.....	15
3.2 Blume-Emery-Griffiths Modeli.....	17
3.3 Çift Yaklaşım Yöntemi.....	19
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA.....	22
4.1 Homojen Nanoparçacık İçin Mıknatıslanma/Kuadrupol ve Histerezis Eğrileri.....	22
4.2 Kompozit Nanoparçacık İçin Mıknatıslanma/Kuadrupol ve Histerezis Eğrileri.....	36
BÖLÜM V SONUÇ.....	49
KAYNAKLAR.....	51
ÖZ GEÇMİŞ.....	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Çekirdek-yüzey tipi altıgen nanoparçacıkların $S = 1$ Ising modeli için parçacık ve parçacık çifti sayıları ile bağ enerjileri	21
---	----

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Manyetiklik açıdan DM davranış sergileyen bir maddenin temsili manyetik moment dizilimleri.....	4
Şekil 2.2. DM özellik sergileyen bir maddenin $m-h$ grafiği.....	4
Şekil 2.3. Bir PM numunenin manyetik momentlerinin (a) dış manyetik alan yokken ve (b) dış manyetik alan varken temsili gösterimi.....	5
Şekil 2.4. PM davranış gösteren bir malzemenin temsili $m-h$ grafiği.....	5
Şekil 2.5. Ferrimanyetik davranış sergileyen bir maddenin manyetik momentlerin (a) dış manyetik alan yokken ve (b) dış manyetik alan varken temsili görünümü	6
Şekil 2.6. Ferrimanyetik davranış sergileyen bir maddenin temsili $m-h$ grafiği.....	7
Şekil 2.7. Bir AFM malzemenin dipol momentlerinin (a) dış manyetik alan yokken ve (b) dış manyetik alan varken temsili gösterimi.....	8
Şekil 2.8. Bir AFM malzemenin temsili $m-h$ grafiğinin görünümü.....	8
Şekil 2.9. Kalıcı manyetizasyona sahip FM bir maddenin manyetik dipol momentlerinin (a) dış manyetik alan yokken ve (b) dış manyetik alan varken temsili şekillenimi.....	9
Şekil 2.10. Kalıcı manyetizasyona sahip FM bir maddenin temsili $m-h$ eğrisi	10
Şekil 2.11. Bir FM numuneye ait temsili manyetik histerezis ($m-h$) eğrisi.....	10
Şekil 2.12. (a) Birinci-derece faz dönüşümü ve (b) ikinci-derece faz dönüşümü sergileyen manyetik malzemeler için $m-T$ grafiği.....	11
Şekil 2.13. Martensitik ve östenitik fazların sıcaklığa göre temsili (a) yapısal değişimi ve (b) bu geçiş karşılık gelen termal histerezis eğrisi	13
Şekil 2.14. Bir nanoparçacık için h_c 'nin büyüklüğe bağlı değişimi (sol grafik) ve manyetik histerezis eğrileri (sağ grafik).....	14
Şekil 3.1. Üç boyutta tek domenli bir manyetik nanoparçacığın kesiti. Noktalı çizgiler iki boyutta sonlu spin dizilerinden kabukları göstermektedir. NP yarıçapı (R) kabuk sayısına bağlı olarak artan bir durum olup parçacığın büyüklüğünü ifade eder.....	16

Şekil 3.2. İki boyutta dokuz kabuktan oluşan altıgen örgünün şematik gösterimi.....	16
Şekil 4.1. Homojen nanoparçacık için mıknatıslanma (siyah eğri) ve kuadrupol düzen parametresinin (kırmızı eğri) indirgenmiş sıcaklığa bağlı ($k_B T/J_0$) değişimi. $R=5, D=-0.25, K=-0.6, h=0.0, J_C=J_{CS}=J_S=J_0=1$	23
Şekil 4.2. Şekil 4.1 ile aynı fakat $D=-0.20$ alınmıştır.....	23
Şekil 4.3. Şekil 4.1 ile aynı fakat $D=-0.29$ alınmıştır.....	24
Şekil 4.4. Şekil 4.1 ile aynı fakat $D=-0.30$ alınmıştır.....	25
Şekil 4.5. Homojen nanoparçacık için (a) $m-T$ ve (b) $Q-T$ termal histerezis eğrileri. $R=5, K=-0.6, h=0.0, D=-0.27$	27
Şekil 4.6. Şekil 4.5 ile aynı fakat $D=-0.2690$ için elde edilmiştir.....	28
Şekil 4.7. Şekil 4.5 ile aynı fakat $D=-0.2675$ için elde edilmiştir.....	29
Şekil 4.8. Şekil 4.5 ile aynı fakat $D=-0.2650$ için elde edilmiştir.....	30
Şekil 4.9. Şekil 4.5 ile aynı fakat $D=-0.2620$ için elde edilmiştir.....	31
Şekil 4.10. $K=-0.6$ için yarıçapı $R=5$ olan homojen NP için $m-h$ histerezis eğrileri. (a) $D=-0.2, T=300$ (siyah eğri); $D=-0.3, T=800$ (kırmızı eğri), (b) $D=-2, T=800$ (mavi eğri), (c) $D=-0.45, T=100$ (yeşil eğri)	33
Şekil 4.11 $K=-0.6$ için yarıçapı $R=5$ olan homojen nanoparçacığa ait $Q-D$ histerezis eğrileri. (a) $T=150$ (siyah eğri); $T=800$ (kırmızı eğri), (b) $T=600$ (mavi eğri), (c) $T=100$ (yeşil eğri).....	35
Şekil 4.12. Kompozit nanoparçacık için mıknatıslanma (siyah eğri) ve kuadrupol düzen parametresinin (kırmızı eğri) indirgenmiş sıcaklığa bağlı ($k_B T/J_0$) değişimi. $R=5, D=0.1, K=-0.6, h=0.0, J_C=J_S=J_0=1, J_{CS}=-J_0=-1$	36
Şekil 4.13. Şekil 4.12 ile aynı fakat $D=0.05$ alınmıştır.....	37
Şekil 4.14. Kompozit nanoparçacık için manyetizasyon (siyah eğri) ve kuadrupol düzen parametresinin (kırmızı eğri) indirgenmiş sıcaklığa bağlı ($k_B T/J_0$) değişimi. $R=8, D=-0.14, K=-0.5, h=0.0, J_C=J_S=J_0=1, J_{CS}=-J_0=-1$	38
Şekil 4.15. Şekil 4.14 ile aynı fakat $D=-0.16$ alınmıştır	38
Şekil 4.16. Kompozit NP için (a) $m-T$ ve (b) $Q-T$ termal histerezis eğrileri. $R=5, K=-0.6, h=0.0, D=0.001, J_C=J_S=J_0=1$	40
Şekil 4.17. Şekil 4.16 ile aynı fakat $D=0.006$ için elde edildi.....	41

Şekil 4.18. Şekil 4.16 ile aynı fakat $D=0.007$ için elde edilmiştir.....	42
Şekil 4.19. Şekil 4.16 ile aynı fakat $D=0.009$ için elde edilmiştir.....	43
Şekil 4.20. Kompozit NP için (a) farklı D değerleri kullanılarak Q 'nun indirgenmiş sıcaklığa bağlı ($k_B T/J_0$) değişimi ve (b) (a) 'daki bazı kuadropol termal histerezis eğrisinin açık formu. $R=8$, $K=-0.5$, $h=0.0$, $J_C=J_S=J_0=1$, $J_{CS}=-J_0=-1$	45
Şekil 4.21. Şekil 4.10 ile aynı fakat kompozit NP için elde edilmiştir.	47
Şekil 4.22. Şekil. 4.11 ile aynı fakat yarıçapı $R=6$ olan kompozit NP için elde edilmiştir.....	48

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
Z	Bölüşüm Fonksiyonu
T_C	Kritik Sıcaklık
σ_i	Yüzey Spin Değeri
S_i	Çekirdek Spin Değeri
S_E	Entropi
S	Spin
Q	Kuadrupol Moment
R	Parçacık Yarıçapı
P_{ij}	Bağ Değişkeni
p_i	Spin Durum Değişkeni
m	Mıknatıslanma Değeri
m_r	Kalıcı Mıknatıslanma
m_s	Doyum Mıknatıslanması
k_B	Boltzmann Sabiti
K	Biküadratik Etkileşme Sabiti
J	Bilineer Etkileşme Sabiti
H	Hamiltoniyen
H_C	Çekirdek Hamiltoniyeni
H_{CS}	Ara Yüzey Hamiltoniyeni
H_S	Yüzey Hamiltoniyeni
h_C	Koersif Alan
h	Dış Manyetik Alan
γ	Örgü Koordinasyon Sayısı
Φ	Spin Başına Serbest Enerji
ε_{ij}	Bağ Enerjisi

<i>E</i>	İç Enerji
<i>D</i>	Tek İyon Anizotropisi

Kısaltmalar	Açıklama
AFM	Antiferromanyetik
AT	Östenitik Faz Geçişi
BEG	Blume-Emery-Griffiths
FM	Ferromanyetik
MT	Martensitik Faz Geçişi
NP	Nanoparçacık
PM	Paramanyetik
SP	Süperparamanyetik

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Giriş

Metrenin milyarda biri büyüklüğüne karşılık gelen ölçek, nanometre olarak adlandırılır. Nano rejim ise 1–100 nm arasındaki boyutlara karşılık gelir. Son yıllarda; Fizik, Kimya, Biyoloji, Biyotıp ve Spintronik gibi bilim dallarında ilgi çekici araştırma konularından birisi nanoparçacıklar (NP) olmuştur (Aktaş vd., 2003; Aktaş vd., 2006; Kartopu ve Yalçın, 2010; El-Sayed vd., 2010; Campbell vd., 2011; Yalçın vd., 2012). Nanoparçacıkları özellikle savunma sanayi, elektronik dünyası ve biyolojik uygulamalar için ilgi çekici kılan bu parçacıkların nano ölçekte yeni ve ilginç kuantum etkiler göstermesidir. Bu tür kuantum etkiler gösteren nanoparçacıklar optik bilgisayarlar, nanorobot montajı, manyetosensör, biyosensör, manyetoelektronik, veri depolama ortamları, bilgisayar hard diskleri, mikrodalga elektronik aletler gibi değişik teknolojilerdeki kullanımı son derece önemlidir. Nanoparçacıklar yeni nesil manyeto-elektronikteki ince film cihazları, spin vanaları, spin-transistörleri, spin bağımlı tünelleme cihazları ile yakından ilgilidir (Babin vd., 2003).

Etkileşmeyen ve tek domenden oluşan nanoparçacık üzerine ilk teorik çalışma 1948 yılında Stoner-Wohlfarth tarafından yapıldı (Stoner ve Wohlfarth, 1948). Daha sonra nano boyutlu parçacıkların klasik spin modeli ilk olarak Rego ve Figueiredo tarafından geliştirildi (Rego vd., 2001). Bir başka çalışmada da enine dış manyetik alan altındaki inceleme için ortalama alan ve etkin alan teorileri kullanıldı (Kaneyoshi, 2005). Bu teorik yöntemlerden başka Monte Carlo simülasyonu ile çekirdek-yüzey (C/S) tipi küresel ve kübik nanoparçacıkların sonlu ölçekleme çalışmaları yapılarak parçacıklarda yüzey etkileri araştırıldı (Iglesias ve Labarta, 2001; Iglesias vd., 2001; Leite ve Figueiredo, 2004; Zaim vd., 2009). Bu çalışmaların tamamı 1925 yılında Lenz'in öğrencisi Ising tarafından ortaya atılan $S = 1/2$ Ising modeline dayanmaktadır (Ising, 1925). Spin değeri $S = 1$ olan atomlardan oluşan nanoparçacığın manyetik özellikleri ise önce klasik yöntemlere dayalı olarak geliştirildi (Kokorina vd., 2007; Yalçın vd., 2007). Daha sonra, istatistik mekanikte $S = 1$ Ising sistemi ya da $S = 1$ Blume-Emery-

Griffiths (BEG) modeli (Blume vd., 1971) adıyla anılan teorik yaklaşım yakın zamanda Yalçın ve çalışma arkadaşları tarafından yapısal faz geçişlerinin etkin olarak görülebileceği C/S tipi NP sistemlerine uygulandı (Yalçın vd., 2014; Özüm vd., 2015; Yalçın vd., 2015). Bu vesile ile yapılan uygulamalar martensitik-östenitik faz geçişleri araştırmalarında önemli yere sahip olmuştur. Ayrıca, bu tür NP 'ların kuadrupol moment-tek iyon anizotropi histerezis ($Q-D$) eğrileri (Shapovalov ve Sayko, 2013) ve kuadrupol termal histerezis ($Q-T$) eğrileri son derece titizlikle elde edilebilecek yeni ve önemli bilgileri de içerdiği düşünülmektedir. Bu nedenle, tez çalışmamızda iki boyutta altıgen örgü yapısında tasarlanan C/S tipi NP sistemlerinin kuadrupol özellikleri BEG modeli ve çift yaklaşım yöntemi kullanılarak incelendi. Özellikle bu iki histerezis türü eğriler ve sistemde oluşabilecek martensitik (MT) ve östenitik (AT) faz geçişleri araştırıldı.

Bilindiği gibi BEG modeli üç durumlu ve iki düzen parametrelili bir sistemdir. Model Hamiltoniyeni bilineer (J) ve bikuadratik (K) etkileşme terimleri ile tek iyon anizotropi (D) terimi içerdiğinden literatürde zengin bir denge faz özelliklerine sahip sistemler arasında yer alır (Benyoussef vd., 1987; Koza vd., 1990; Hoston ve Berker, 1991; Netz ve Berker, 1993; Goveas ve Mukhopadhyay, 1997). Bu yönüyle model birçok araştırmacının ilgisini çekmesiyle birlikte modelin uygulama alanı da genişlemiştir (Lee ve Landau, 1979; Gu vd., 1992; Bolle, 2004; Burns vd., 2004; Zahraouy vd., 2006; Gauvin vd., 2010; Yang, 2010).

Bu kısa giriş bilgilerinden sonra, önce ikinci bölümde manyetik malzemelerin sınıflandırılması, manyetik nanoparçacıklar ve yapısal faz dönüşümleri (MT/AT) hakkında kısaca bilgi verilecektir. Üçüncü bölümde, tez çalışmasında kullanılabilecek teorik yaklaşım ana hatlarıyla açıklanacak ve altıgen örgülü C/S tipi nanoparçacığa uygulaması üzerinde durulacaktır. Dördüncü bölümde tez çalışmasında elde edilen grafiksel bulgular detaylandırılacak ve son olarak beşinci bölümde konu ile ilgili sonuç ve yorum verilecektir.

BÖLÜM II

TEORİK BİLGİ

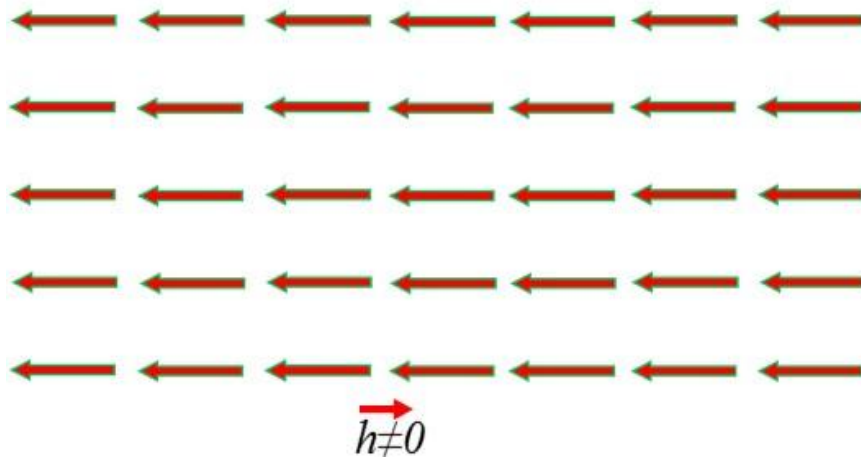
2.1 Manyetizasyon

Bir numunenin manyetizasyona sahip olması o malzemenin atomik açıdan manyetik özelliğinin olması anlamına gelir. Bir atomdaki elektronların yörünge ve spin hareketlerinin vektörel toplamına o atomun mıknatıslanması (veya manyetizasyonu) denir. Sadece spin hareketlerine bağlı mıknatıslanma göz önüne alınırsa atomun elektronunun enerji düzeyleri Pauli dışarlama ilkesine uyarak şekillenir. Bunun anlamı; dış manyetik alan altında elektronun alana paralel veya anti paralel olması demektir. Çekirdek manyetik dipol moment, elektronun dipol momentine göre çok küçük olduğu için numunelerin manyetizasyonu ile ilgili çalışmalarda genel olarak ihmal edilir. Ayrıca, bir numunenin etkin manyetizasyonu manyetik alanın yanında sıcaklık ve etkileşmelere de bağlıdır. Manyetizasyon bir numunenin mıknatıslanma özelliğinin ölçüsü olup dış manyetik alana (H) verilen tepki ile ölçülür. Bu ölçüye manyetik alınganlık/duygunluk denir ve χ ile gösterilir. Böylece bir numunenin manyetizasyonu manyetik alınganlık ve dış manyetik alana bağlı olarak $m = \chi H$ şeklinde ifade edilir. χ 'nin işareti ve alacağı değerler ile manyetik malzemelerin sınıflandırılması yapılır. Örneğin $\chi = 0$ ise numune manyetik malzeme değildir. $\chi < 0$ ise malzeme bir diyamanyetik (DM) malzemedir. Manyetik alınganlığın sıfırdan büyük olması durumunda ($\chi > 0$) ise malzemeler manyetiklik açısından paramanyetik (PM), ferrimanyetik, antiferromanyetik (AFM) veya ferromanyetik (FM) sistemlerden birine karşılık gelir. Bu durum kendi aralarında manyetizasyonun etkin değerlerine göre ayırt edilirler. DM, PM, ferrimanyetik, AFM ve FM sistemler aşağıda ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.

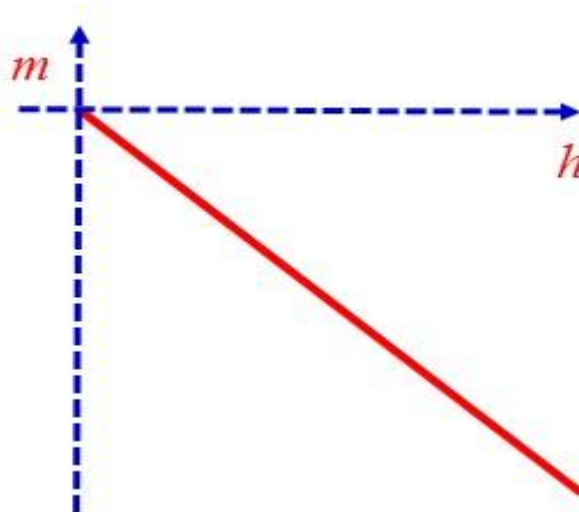
2.1.1 Diyamanyetik Malzemeler

Kalıcı ve net bir manyetik dipol moment, olmayan sistemlerdir. Ancak bir atoma dış manyetik alan uygulandığında o atomdaki elektronlar daha hızlı dönmeye başlar ve elektronun manyetik dipol moment, artar. Buradaki değişim de uygulanan dış manyetik

alana zıt yönde manyetik alan oluşturur ve bu uygulanan dış manyetik alan maddeyi küçükte olsa itme özelliğine sahip yapar. Bu tür davranış sergileyen numunelere “diyamanyetik madde” denir. Böylece diyamanyetik maddelerin alınganlığı da negatif olur. Bu tür maddelere kurşun, cıva, gümüş, bizmut ve bakır örnek olarak verilebilir. Bir diyamanyetik maddenin dış manyetik alan varlığında alana ters yöneliminin oluşumu Şekil 2.1 'de, $m-h$ grafiği Şekil 2.2 'de temsili olarak gösterildi. Şekil 2.1 'deki her bir ok işareti madde içindeki atomların manyetik dipol momentlerini göstermektedir.



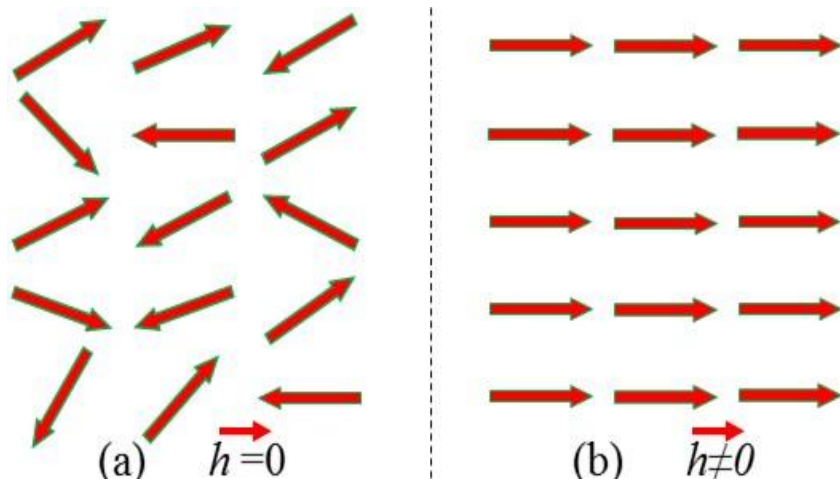
Şekil 2.1. Manyetik açıdan DM davranış sergileyen bir maddenin temsili manyetik moment dizilimleri



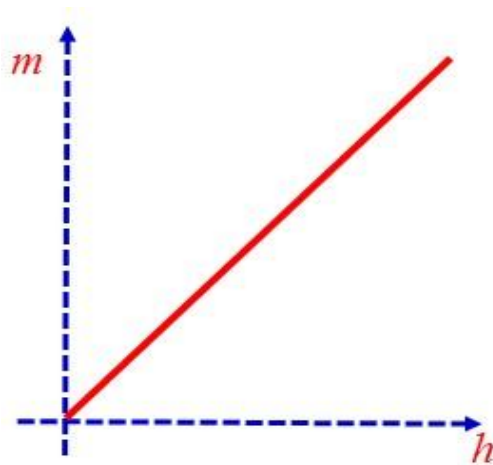
Şekil 2.2. DM özellik sergileyen bir maddenin temsili $m-h$ grafiği

2.1.2 Paramanyetik Malzemeler

Bir madde’de eşleşmemiş elektronları olan atomlar sıfırdan farklı bir manyetik dipol momente sahiptirler. Bu atomlar bir dış manyetik alana maruz kaldıklarında atomun sahip olduğu manyetik dipol momentler kısmen dış manyetik alan doğrultusuna yönelme eğilimine girerler. Bu tür numuneler “paramanyetik malzeme” olarak adlandırılırlar. Ancak, dış manyetik alan kaldırıldığında kalıcı mıknatıslanma göstermemeleri PM numunelerin ayırt edici özelliklerindendir. Böyle bir numunenin dış manyetik alanın yokluğunda ve varlığında temsili manyetik moment yönelimi Şekil 2.3’te, $m-h$ grafiği ise Şekil 2.4’de temsili olarak verildi.



Şekil 2.3. Bir PM numunenin manyetik momentlerinin (a) dış manyetik alan yokken ve (b) dış manyetik alan varken temsili gösterimi

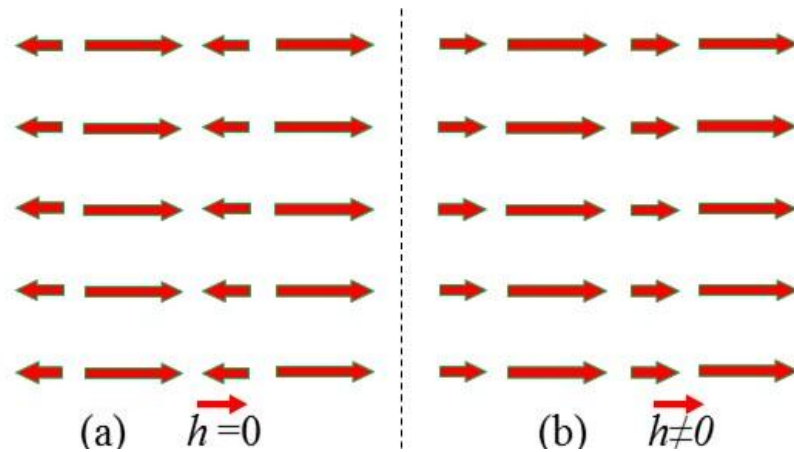


Şekil 2.4. PM davranış gösteren bir malzemenin temsili $m-h$ grafiği

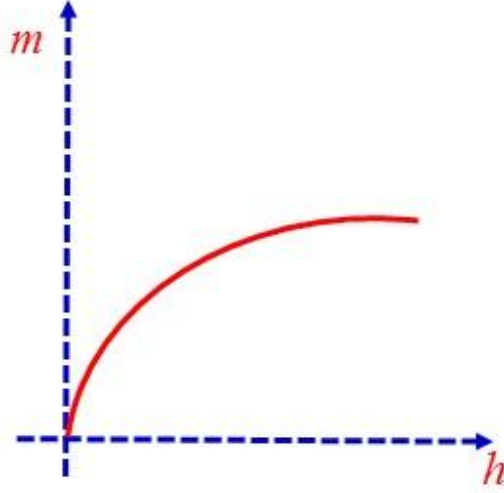
Bir PM maddenin manyetizasyon davranışının uygulanan dış manyetik alanla doğru, sıcaklıkla ters orantılı olduğu (yani $m = C(h/T)$) Pierre Curie tarafından gösterilmiştir. Bu nedenle, manyetizasyonun sıcaklıkla gelişen davranışlarında kritik sıcaklıklara genel olarak Curie sıcaklığı ismi verilir. Bu tür PM numuneler için dış manyetik alan olmadığında manyetizasyonun olmadığı görülür. Bu durum aslında net manyetik dipol momentlerin toplamı olarak anlaşılmalıdır. Yani vektörel toplam net manyetik dipol moment kalıcı bir manyetizasyon göstermez. Diğer bir ifadeyle manyetizasyonun sıfır olması, manyetik dipol momentlerin rastgele yönelmelerinin bir sonucudur.

2.1.3 Ferrimanyetik Malzemeler

PM bir madde’de manyetik dipoller aynı cins atomlardan kaynaklıdır. Manyetik dipol değerlerin farklı olduğu iki veya daha fazla farklı türden manyetik dipol momentlerin zıt yönde oluşması sonucu oluşan sistemlere “ferrimanyetik sistemler” denir. Bu nedenle dış manyetik alan olmadan da kalıcı bir manyetizasyon bulunur ancak bu değer net manyetizasyonu azaltacak yönde şekillenir. Ferrimanyetik maddelerin dış manyetik alan olmadan sahip oldukları kalıcı manyetizasyon ferromanyetik maddelerin kalıcı manyetizasyonuna göre daha ufaktır. Bir ferrimanyetik davranış sergileyen maddenin spin yönelimleri ve buna bağlı olarak oluşan $m-h$ grafiği sırasıyla Şekil 2.5 ’de ve Şekil 2.6 ’da temsili olarak gösterilmiştir.



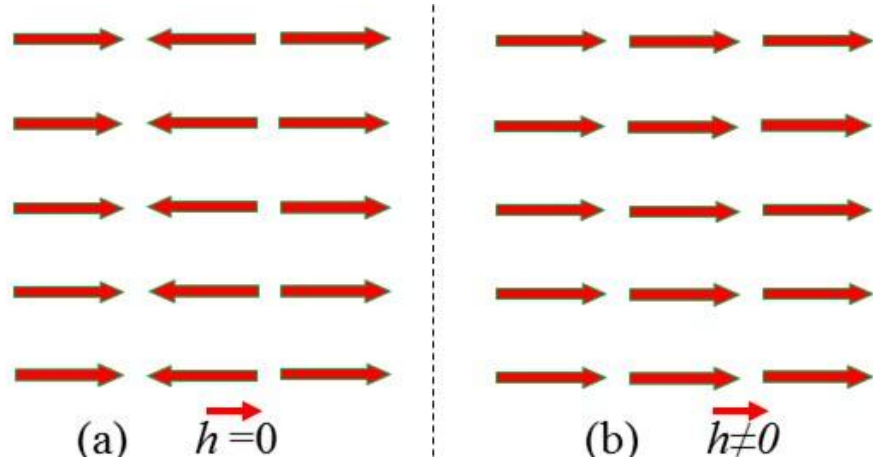
Şekil 2.5. Ferrimanyetik davranış sergileyen bir maddenin manyetik momentlerin (a) dış manyetik alan yokken ve (b) dış manyetik alan varken temsili görünümü



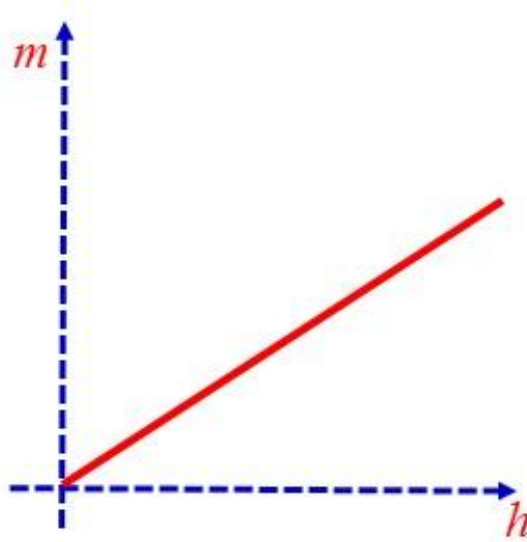
Şekil 2.6. Ferrimanyetik davranış sergileyen bir maddenin temsili $m-h$ grafiği

2.1.4 Antiferromanyetik Malzemeler

Ferrimanyetik sistemler iki ve daha fazla manyetik dipollerin farklı olduğu sistemler olarak görülebilir. Burada ise manyetik dipol değerleri ya da manyetizasyon değerleri aynı olan ancak dış bir manyetik alan altında zıt yönlere yönelmelerinden dolayı kalıcı mıknatıslanmaları olmayan maddelere “antiferromanyetik malzemeler” denir. Diğer bir bakışla; bazı sistemlerde değiş-tokuş etkileşmesi komşu atomların manyetik dipol momentlerinin zıt yönlü yönelmesine neden olur. İşte bu tür davranış “antiferromanyetizma” olarak adlandırılır. Ters yönelmiş bu tür momentler birbirlerinin etkisini neredeyse sıfırladığından malzeme diyamanyetik malzemeye benzer bir davranış sergiler ve manyetizasyon da azalır. Bu durum genelde karıştırılır ancak manyetik alınganlık ile paramanyetik ve AFM sistemler ayırt edilirler. Böyle bir sistemin temsili dipol moment dizilimleri Şekil 2.7 ’de, temsili $m-h$ grafiği ise Şekil 2.8 ’de gösterildi.



Şekil 2.7. Bir AFM malzemenin dipol momentlerinin (a) dış manyetik alan yokken ve (b) dış manyetik alan varken temsili gösterimi

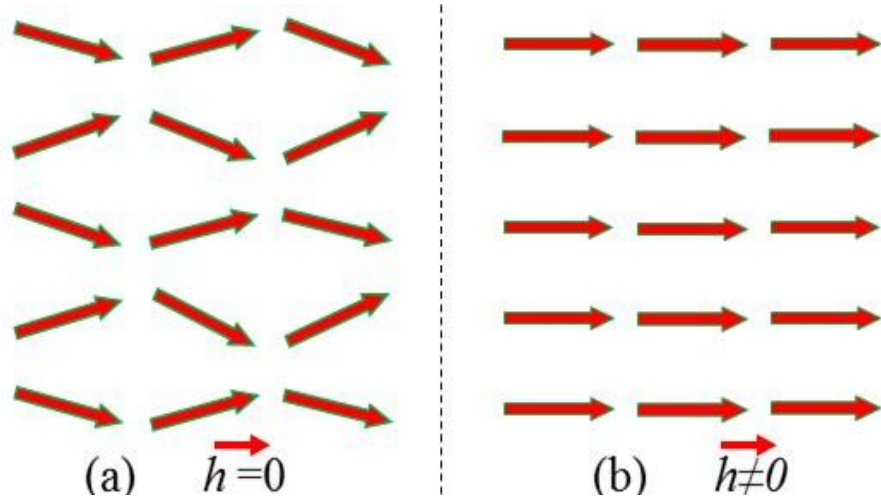


Şekil 2.8. Bir AFM malzemenin temsili $m - h$ grafiğinin görünümü

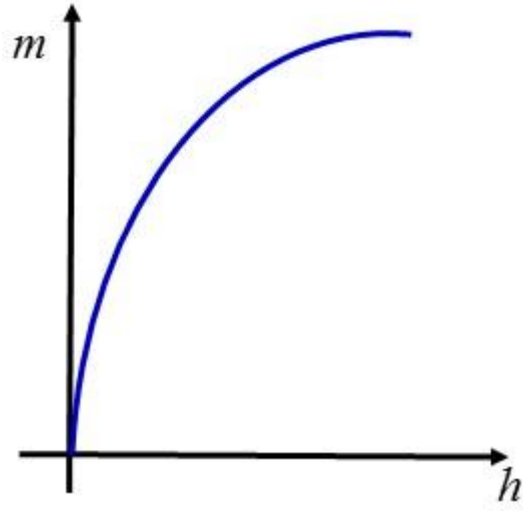
2.1.5 Ferromanyetik Malzemeler

Dış manyetik alan olmadan kalıcı manyetizasyona sahip olan maddelere ferromanyetik maddeler denir. Bu maddelerin kalıcı manyetizasyonları maddenin içinde bulunan iç manyetik alanlardan kaynaklanır. Diğer bir ifadeyle bu kalıcı manyetizasyon, maddelerin atomlarında bulunan çiftlenmemiş elektronların spinlerine dayanır. Bu elektronlar kendi aralarında etkileşmeye girerler. FM maddeler küçük bir dış manyetik

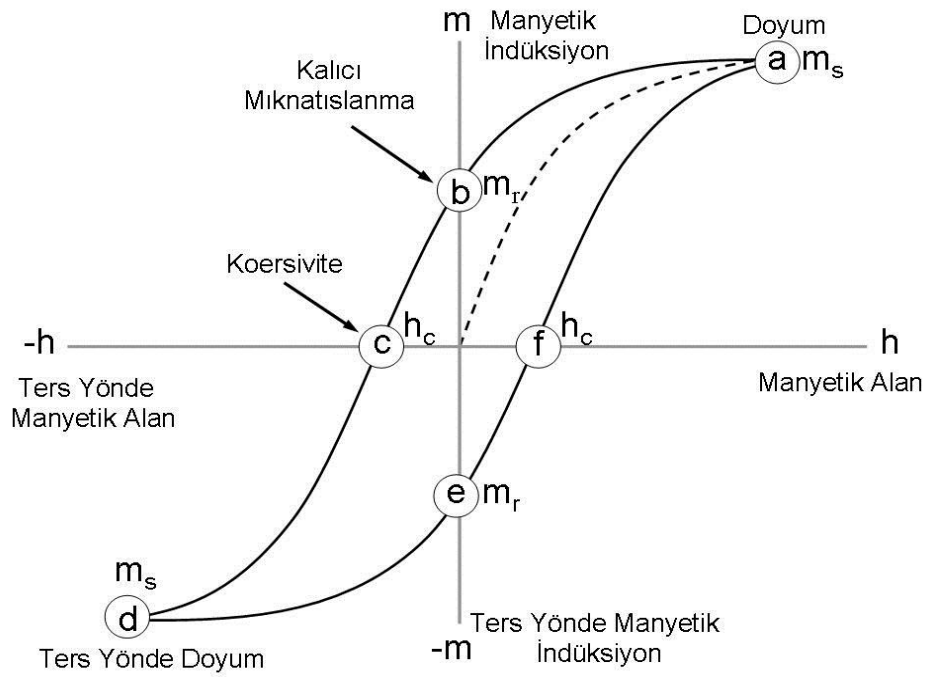
alandan bile etkilenirler. Manyetik açıdan en çok bilinen manyetik yapılar arasındaki sınıflandırmaların en başında gelirler. FM sistemlerde bulunan manyetik dipollerin dış manyetik alan varlığında ($h \neq 0$) ve yokluğundaki ($h = 0$) şekillenimleri Şekil 2.9 'da, $m-h$ grafiği ise Şekil 2.10 'da temsili olarak gösterildi. Ancak, bir FM numunenin manyetik histerezis eğrisi tam olarak dış manyetik alanın numuneye ters yönde de uygulanmasıyla ortaya çıkar. Bu tür bir histerezis eğrisi Şekil 2.12 'de açıklanmıştır. Eğriye göre, başlangıçta mıknatıslanması olmayan bir FM malzemeye pozitif yönde dış manyetik alan ($+h$) uygulandığında malzeme şekildeki “a” noktasında doyum mıknatıslanmasına (m_s) ulaşır. Azalan dış manyetik alanla birlikte madde önce m -ekseni üzerindeki “b” noktasında kalıcı bir manyetizasyona (m_r) sahip olur. Bu değer m_s değeri ile de bağlantılıdır. Daha sonra, m_r manyetizasyonu sıfırlamak için numuneye ters yönde manyetik alan ($-h$) uygulanır. m_r 'nin sıfırlandığı “c” noktasındaki manyetik alan (h_c) değerine “koersif alan” denir. Azalan dış alan sonunda malzemeyi “d” noktasında ters yönde bir doyum mıknatıslanmasına ($-m_s$) ulaştırır. Buradan sonra manyetik alan arttırılmak suretiyle (yani tersten giderek) mıknatıslanma sırasıyla “e” noktasında kalıcı mıknatıslanma ($-m_s$), “f” noktasında koersif alan ve yine “a” noktasında doyum manyetizasyonu elde edilir. Böylece, kapalı bir eğri olarak histerezis eğrisi ortaya çıkar.



Şekil 2.9. Kalıcı manyetizasyona sahip FM bir maddenin manyetik dipol momentlerinin (a) dış manyetik alan yokken ve (b) dış manyetik alan varken temsili şekillenimi



Şekil 2.10. Kalıcı manyetizasyona sahip FM bir maddenin temsili $m-h$ eğrisi

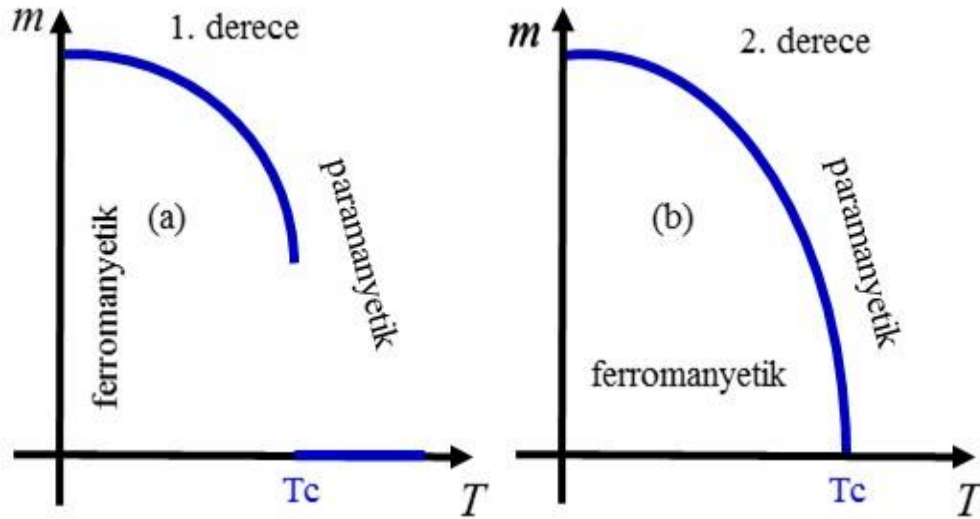


Şekil 2.11. Bir FM numuneye ait temsili manyetik histerezis ($m-h$) eğrisi

Benzer şekilde, kuadrupol düzeni ve tek iyon anizotropi ($Q-D$) histerezis eğrileri ise literatüre yeni giren son derece güncel bir çalışma alanıdır. Bu nedenle, mevcut bölümde bu eğri hakkında herhangi bir bilgi verilmedi. Tez çalışmamızda elde edilen yeni nesil $Q-D$ histerezis eğrileri homojen ve kompozit nanoparçacıkların araştırıldığı bölümlerde detaylıca açıklandı.

2.1.6 Birinci- ve İkinci-Derece Faz Geçişleri

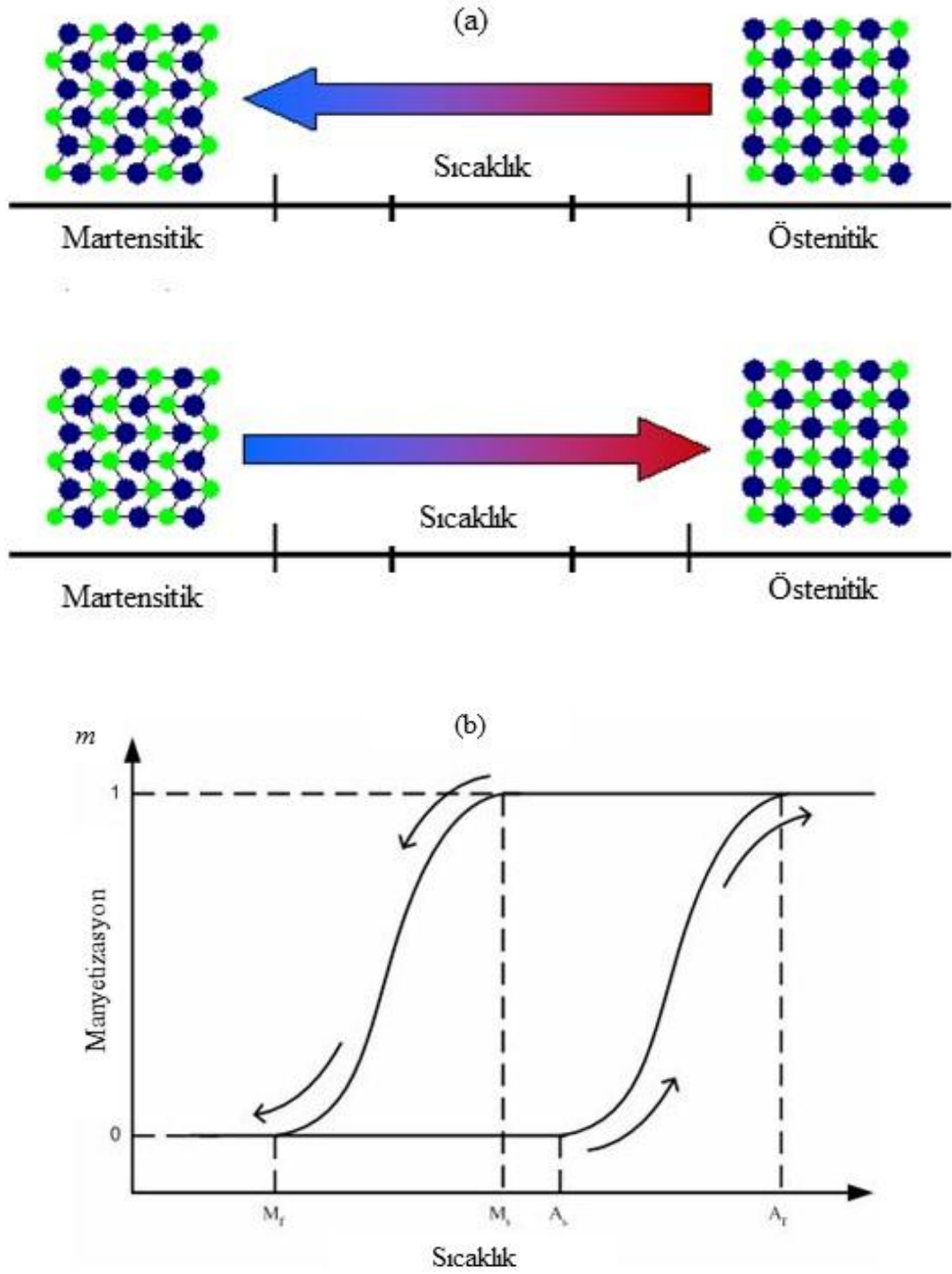
Manyetik sistemlerdeki faz geçişleri genelde manyetizasyonun sıcaklığa karşı gösterdiği durumlarda gözlenir. Bir manyetik malzeme artan sıcaklıkla birlikte manyetizasyon değeri sürekli bir azalmayla sıfırlanıyorsa ikinci-derece, bir noktada birden sıfıra atlırsa birinci-tür faz geçişi sergiler. Her iki durumda da manyetizasyonun sıfır olduğu değer Curie sıcaklık değeridir (T_c). Bu sıcaklığın üzerinde bütün manyetik sistemler PM fazda bulunurlar. Bu şartlar altında, bir manyetik sistemde FM fazdan PM faza birinci-derece ve ikinci-derece geçişinin temsili gösterimi Şekil 2.12 'de gösterildi.



Şekil 2.12. (a) Birinci-derece faz dönüşümü ve (b) ikinci-derece faz dönüşümü sergileyen manyetik malzemeler için $m-T$ grafiği

2.1.7 Martensitik ve Östenitik Fazlar

Fizik açısından en önemli durumlardan bir tanesi birinci-dereceden faz geçişini yapan maddelerin artan sıcaklıklarla birlikte yeni özellikler göstermesidir. Bunlardan birisi yüksek sıcaklıklarda görülen östenitik faz geçişi (AT) ve düşük sıcaklıklarda görülen martensitik faz geçişleridir (MT). Bu tür malzemelerin hacimsel olanları alışılan isimlerle şekil hafızalı alaşımlar olarak adlandırılır. Nano sistemlerde ise boyut ve kuantum etkilerden dolayı daha detaylı ve hayali denilebilecek ikincil bir östenitik ve martensitik fazlar da görülür. Bu yeni fazlar, ilk defa Yalçın ve arkadaşları tarafından nedenleriyle birlikte ortaya konmuştur (Yalçın vd., 2014; Özüm vd., 2014; Yalçın vd., 2015). Şekil hafızalı malzemeler alaşım açısından uygun sıcaklık ve mekanik işlemlere tabi tutulduğunda önceki şekline ve boyutuna dönebilmeyi öngörür. Nano sistemlerde şekil hafızalı malzemelerin en önde geleni nano parçacıklardır. Bunların en iyi kullanım alanı da cerrahi müdahaleye izin vermeyecek derecede alyuvar büyüklüğünde üretilen nano parçacıklardır. Bu nedenle burada martensitik ve östenitik fazlar da kısaca ifade edildi. Bunlara ek olarak ve alaşımlar için alışlagelen termal histerisis eğrileri de bulunmaktadır. Nano sistemlerdeki bu eğriler alaşımlardan farklı olarak çok küçük ölçekte birbirinden ayrılırlar ve artık termal histerezis eğriler gözlenmez. Bu durum da yine ilk defa Yalçın ve arkadaşları tarafından incelenmiştir (Yalçın vd., 2014; Özüm vd., 2014; Yalçın vd., 2015). Şekil 2.13 'de, martensitik ve östenitik fazların temsili gösterimi verilerek sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen yapısal değişim ve bunlara karşılık gelen termal histerezis eğrisi gösterilmiştir.



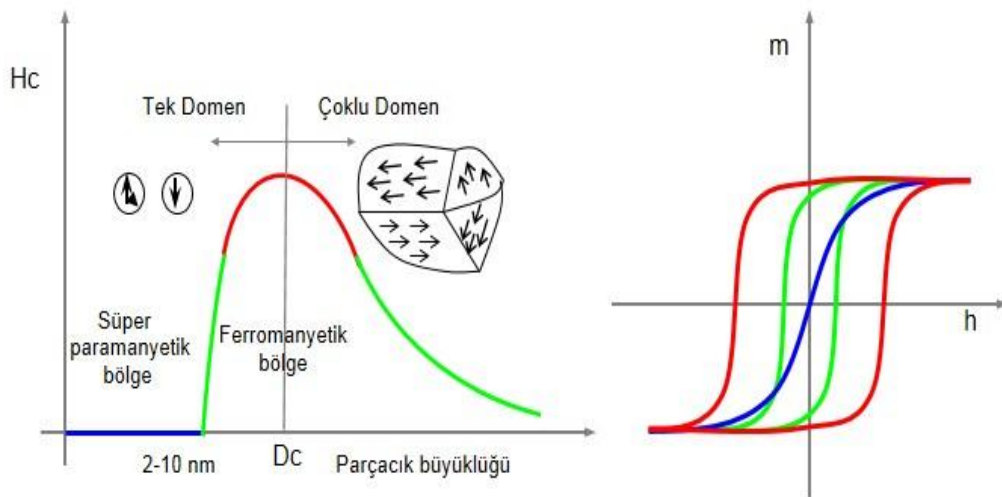
Şekil 2.13. Martensitik ve östenitik fazların sıcaklığa göre temsili (a) yapısal değişimi ve (b) bu geçişe karşılık gelen termal histerezis eğrisi

2.2 Nanoparçacıklar

Giriş kesiminde de kısaca ifade edildiği gibi, atom ve molekül topluluklarından oluşan, büyüklüğü aktif olarak 50 nm 'den daha küçük parçacıklara “nanoparçacıklar” denir. Nanoparçacıklar makro yapılara göre daha geniş yüzeye sahiptirler. Bu durum parçacığın etkileşme yüzeyi ve yüzey gerilimini artırır. Büyüklük ve kuantum etkilerden dolayı parçacıklar nano ölçeğe indikçe farklı davranışlar sergilerler. Nano ölçeklerde parçacıklar daha sert, daha hafif ve ısıya daha dayanıklı bir durumda olurlar. Bu nedenle nanoparçacıklar çok geniş yelpazede kullanım alanı bulmaktadır.

2.3 Tek Domen Nanoparçacıklar ve Nano Sistemlerdeki Yeri

Büyüklüğü 100 nm'nin altında olan parçacıklarda yüksek yüzey hacim oranı ile farklı fiziksel ve kimyasal özellikler görülür. Nanoparçacıklar, en yüksek koersif alana sahip oldukları durumda kritik büyüklüğe ulaşmıştır. Bu kritik büyüklük altında tek domenli, üzerinde ise çoklu domenli olurlar. Bu tür bir yapının hem koersif alanın büyüklüğüne karşı hem de bu durumlara karşı gelen manyetik histerezis eğrileri Şekil 2.14 'deki gibidir. Şekil'de mavi renkteki çizgi ve eğriler süperparamanyetik (SP), yeşil ve kırmızı eğriler FM duruma karşılık gelmektedir. Tek domen parçacığın koersif alanı artan parçacık büyüklüğü ile artış sergilemekte ve parçacık SP bölgeden FM bölgeye geçmektedir. Doyum mıknatıslanma değeri, parçacık boyutuna bağlıdır.



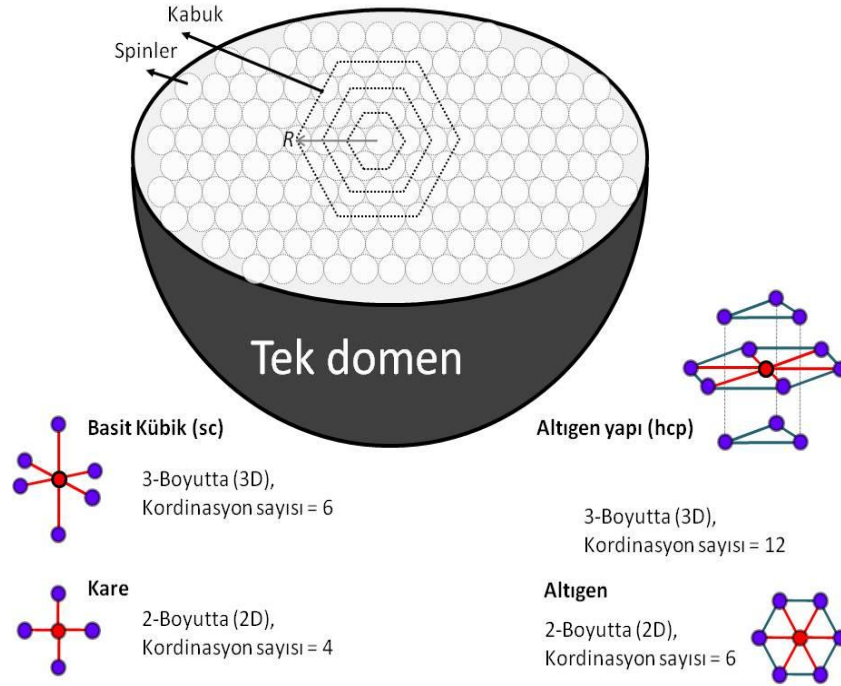
Şekil 2.14. Bir nanoparçacık için h_c 'nin büyüklüğe bağlı değişimi (sol grafik) ve manyetik histerezis eğrileri (sağ grafik)

BÖLÜM III

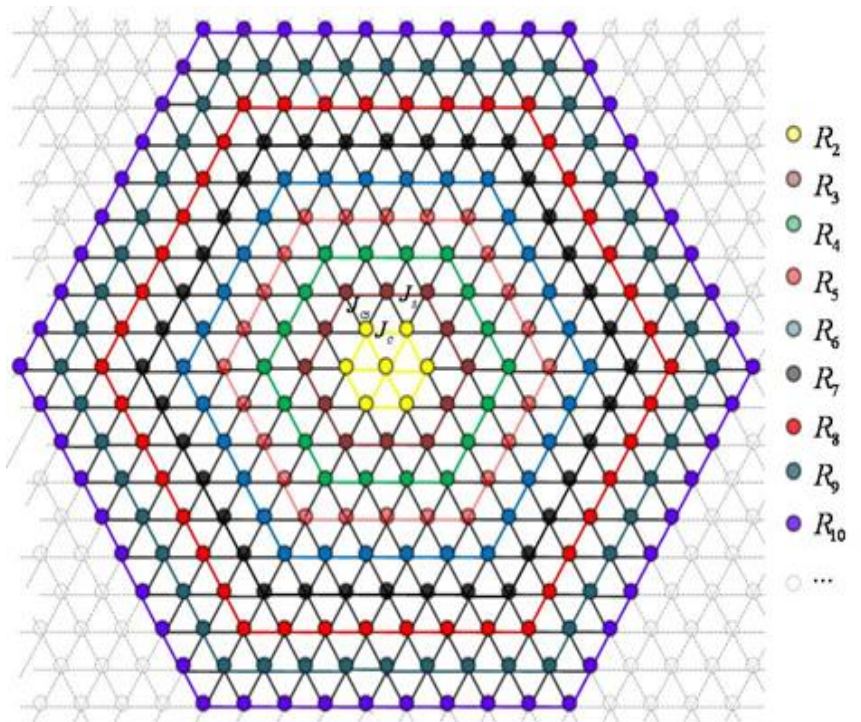
TEORİK MODEL

3.1 Çekirdek/Yüzey Tipi Altıgen Nanoparçacığın Morfolojik Yapısı

Bu tez çalışmasında tek domenli çekirdek-yüzey (C/S) tipi bir nanoparçacığın kuadrupol özellikleri incelendi. Bunun için bir nanoparçacığın üç boyuttaki kesiti Şekil 3.1 'de detaylıca gösterilmiştir. Bu tür nanoparçacıkların çekirdek (C) ve yüzey (S) kesimlerindeki atom (spin) dizilişleri şeklin altındaki üç boyutta basit kübik (sc) ve sıkı paketlenmiş altıgen yapı (hcp) olarak verilmiştir. Bunların iki boyuttaki karşılığı ise kare ve altıgen örgüler olarak bilinir. İki boyuttaki altıgen örgü tezde çalışılan yapı olup bir örgü noktasının en yakın komşu sayısı yani örgü koordinasyon sayısı 6 olarak alınır. Şekil 3.2 'den görüleceği üzere iki boyutta kabukların sayısı veya nanoparçacığın büyüklüğü parçacıktaki atom (ya da spin) sayısı ile orantılıdır. Kabukların sayısı nanoparçacığın yarıçapını (R) temsil etmektedir. İki boyutta altıgen örgüden oluşan nanoparçacık C, ara yüzey (CS) ve S olmak üzere üç bölgeden oluştuğu düşünülür (Rego ve Figueirido, 2001). Her bölgedeki atomlar, örgü yapısı gereği iç içe geçmiş eş merkezli kabukları oluşturur. Çekirdek, ara yüzey ve yüzey spin sayıları sırasıyla N_C , N_{CS} , N_S ile gösterilirse nanoparçacığı oluşturan toplam spin sayısı çekirdek ve yüzey spin sayılarının toplamı olup $N = N_C + N_S$ şeklinde yazılır.



Şekil 3.1. Üç boyutta tek domenli bir manyetik nanoparçacığın kesiti. Noktalı çizgiler iki boyutta sonlu spin dizilerinden kabukları göstermektedir. NP yarıçapı (R) kabuk sayısına bağlı olarak artan bir durum olup parçacığın büyüklüğünü ifade eder



Şekil 3.2. İki boyutta dokuz kabuktan oluşan altıgen örgünün şematik gösterimi

3.2. Blume-Emery-Griffiths Modeli

Bu kesimde, istatistik fizikte Blume-Emery-Griffiths (BEG) modeli olarak isimlendirilen bir örgü-spin modeli kısaca tanıtılacak ve C/S tipi nanoparçacıklara nasıl uygulandığı anlatılacaktır. BEG modeli, üç durumlu ve iki düzen parametrelili bir sistemdir (Blume vd., 1971). Modele göre, bir manyetik kristalin örgü noktalarına bir manyetik atom (ya da spin) yerleştirilir veya örgü noktası boş bırakılır. Dolu örgü noktalarının en yakın komşularıyla etkileştiği düşünülür. Atomların spin durumu, Ising modelinde (Ising, 1925) olduğu gibi, bir S_i değişkeni ile etiketlenir. Bu değişken spin yönelimine ve örgü noktalarının dolu/boş olmasına bağlı olarak üç değer alır. Şayet örgü noktası bir manyetik iyon tarafından işgal edilmiş ve spini yukarı doğru yönelmiş bir dış manyetik alana (h) paralel ise $S_i = +1$, anti paralel ise $S_i = -1$ seçilir. Örgü noktası boş durumda olursa $S_i = 0$ alınır. Bir i 'ninci ($i = +, 0, -$) spin durumunun olasılığı için p_i gösterimi kullanılır. Bu değişken takımı durum (ya da nokta) değişkenleri olarak ta adlandırılır. p_i 'ler $\sum_i p_i = 1$ normalizasyon şartına uyarlar. Ortaya çıkan fiziksel sisteme $S = 1$ Ising modeli de denir. Spin konfigürasyonu $\{S_i\}$ olan spin sisteminin Hamiltoniyeninde iki etkileşme terimi ve iki dış alan terimi bulunur. En basit şekliyle Hamiltoniyen şu şekilde yazılır:

$$H\{S_i\} = -J \sum_{\langle ij \rangle} S_i S_j - K \sum_{\langle ij \rangle} S_i^2 S_j^2 - D \sum_{\langle ij \rangle} (S_i^2 + S_j^2) - h \sum_{\langle ij \rangle} (S_i + S_j) \quad (3.1)$$

Burada $\langle ij \rangle$ en yakın komşu spin çifti üzerinden alınan toplamı ifade etmektedir. (3.1) 'deki J sabiti komşu örgü noktaları arasındaki bilineer (ya da dipol-dipol) etkileşme enerjisini gösterir. Sistem, $J < 0$ olduğunda FM özellik, $J > 0$ olma durumunda ise AFM özellik taşır. Burada K bikuadratik (ya da kuadrupol-kuadrupol) etkileşme enerjisi ve D tek iyon anizotropi sabitidir. Bu parametrelerin birimleri $k_B T$ (k_B Boltzmann sabiti ve T sıcaklıktır) enerji birimidir. Modeldeki birinci uzun menzil düzen parametresi ortalama mıknatıslanma (ya da dipol moment) $m \equiv \langle S_i \rangle$ olarak adlandırılır ve bir tarafa yönelmenin diğer tarafa yönelmeden fazla oluşunun bir ölçüsüdür. BEG modelinde mıknatıslanmaya ilave olarak kuadrupol düzeni ($Q \equiv \langle S_i^2 \rangle$)

olarak bilinen ikinci bir uzun menzil düzen parametresi daha vardır. Ayrıca, durum değişkenleri cinsinden mıknatıslanma $m = p_+ - p_-$ şeklinde, kuadrupol düzeni $Q = p_+ + p_-$ ile ifade edilir. Bu tezde, sadece kuadrupol düzen parametresi üzerinde durulacak ve sonuçlar mıknatıslanma için bulunan sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

Çekirdek/yüzey tipi bir nanoparçacık için (3.1) Hamiltoniyen ifadesi yukarıda tanımlanan C, CS ve S bölgeleri dikkate alınarak

$$H = H_C + H_{CS} + H_S \quad (3.2)$$

şeklinde yeniden yazılır. (3.2) 'deki terimler sırasıyla

$$\begin{aligned} H_C &= -J_C \sum_{\langle ij \rangle} S_i S_j - K_C \sum_{\langle ij \rangle} S_i^2 S_j^2 - D_C \sum_{\langle ij \rangle} (S_i^2 + S_j^2) - h \sum_{\langle ij \rangle} (S_i + S_j) \\ H_{CS} &= -J_{CS} \sum_{\langle ij \rangle} S_i \sigma_j - K_{CS} \sum_{\langle ij \rangle} S_i^2 \sigma_j^2 \\ H_S &= -J_S \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i \sigma_j - K_S \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i^2 \sigma_j^2 - D_S \sum_{\langle ij \rangle} (\sigma_i^2 + \sigma_j^2) - h \sum_{\langle ij \rangle} (\sigma_i + \sigma_j) \end{aligned} \quad (3.3)$$

şeklinde dir. (3.3) 'daki S_i ve σ_i değişkenleri sırasıyla çekirdek ve yüzey spinlerinin spin durumunu temsil eden değişkenlerdir. Bölgelerin bilineer etkileşme, bikuadratik etkileşme ve kristal alan sabitleri sırasıyla J_C , J_{CS} , J_S ; K_C , K_{CS} , K_S ; D_C , D_S ile gösterilmiştir. Şayet $J_C = J_{CS} = J_S$ ve $K_C = K_{CS} = K_S$ ise parçacık homojen nanoparçacık olarak bilinir. $J_C \neq J_{CS} \neq J_S$, $J_C = J_{CS} \neq J_S$, $J_C \neq J_{CS} = J_S$, $J_{CS} \neq J_C = J_S$ ve $K_C \neq K_{CS} \neq K_S$, $K_C = K_{CS} \neq K_S$, $K_C \neq K_{CS} = K_S$, $K_{CS} \neq K_C = K_S$ şartlardan en az bir tanesi geçerli olması durumunda ise parçacık kompozit nanoparçacık olarak adlandırılır: Bu çalışmada, basitlik olması bakımından homojen nanoparçacıklar için $J_C = J_{CS} = J_S = J_0 = 1$, kompozit nanoparçacıklar için $J_C = J_S = J_0 = 1$, $J_{CS} = -J_0 = -1$ seçilmiştir. Her iki durumda da $K_C = K_{CS} = K_S = K$ ve $D_C = D_S = D$ olarak alındı.

3.3 Çift Yaklaşım Yöntemi

Çift yaklaşım Yöntemine (Kikuchi, 1974) göre, spinler arası çiftlenim temel alınır. Bu nedenle, nokta değişkenlerin (p_i) yanı sıra, (P_{ij}) gibi yeni bir değişken takımı tanımlanır. Bunlara bağ değişkenleri adı verilir ve herhangi iki örgü noktasının (i, j) biri birlerine göre farklı spin durumlarının olasılığını ifade ederler. Bağ değişkenleri $\sum_{i,j=+,0,-} P_{ij} = 1$ normalizasyon şartını sağlarlar ve durum değişkenlerine $p_i = \sum_{j=+,0,-} P_{ij}$ ilişkisi ile bağlıdırlar. Etkileşme enerjisi (E) ve entropi (S_E) , P_{ij} değişkenleri kullanılarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$\beta E = N \frac{\gamma}{2} \sum_{i,j=+,0,-} \varepsilon_{ij} P_{ij} \quad (3.4)$$

$$S_E = Nk \left((\gamma - 1) \sum_{i,j=+,0,-} p_i \ln(p_i) - \frac{\gamma}{2} \sum_{i,j=+,0,-} P_{ij} \ln(P_{ij}) \right) \quad (3.5)$$

Burada $\beta = 1/k_B T$. (3.4) numaralı denklemdaki ε_{ij} gösterimi bağ enerjilerini ifade eder. Spin başına serbest enerji ifadesi (Φ) , aşağıda olduğu gibi yazılır:

$$\Phi = \frac{\beta F}{N} = \frac{\beta}{N} (E - TS_E) \quad (3.6)$$

Denge durumundaki sistem için lineer olmayan denklem sistemi $\partial \Phi / \partial P_{ij} = 0$ kullanılarak bulunur:

$$P_{ij} = \frac{1}{Z} (p_i p_j)^{\bar{\gamma}} e^{-\beta \varepsilon_{ij}} \equiv \frac{e_{ij}}{Z} \quad (3.7)$$

Burada Z bölüşüm fonksiyonu ve $\bar{\gamma} = (\gamma - 1) / \gamma$ olarak tanımlanır. Bölüşüm fonksiyonu da açık bir şekilde

$$Z = \exp(2\beta\lambda / \gamma) = \sum_{i,j=+,0,-} e_{ij} \quad (3.8)$$

şeklinde dir. (3.8) numaralı denklemde λ , normalizasyon şartında kullanılan ek bir terim olup sonucu etkilememektedir. (3.7) denklem sistemi, literatürde değişik Hamiltoniyenli spin modellerine kolayca uygulanarak bulk malzemelerin manyetik özellikleri ve denge faz geçişleri incelenmiştir (Keskin vd., 1986; Keskin vd., 2004).

Kesim (3.1) 'de tanımlanan nanoyapıların (3.7) denklem sistemi yardımıyla manyetik özelliklerinin veya yapısal faz geçişlerinin incelenebilmesi için (bulk sistemlerden farklı olarak) önce ε_{ij} bağ enerjileri için aşağıdaki tanım kullanılır (Yalçın vd. 2014):

$$\varepsilon_{ij} = N_p^C \varepsilon_{ij}^C + N_p^{CS} \varepsilon_{ij}^{CS} + N_p^S \varepsilon_{ij}^S \quad (3.9)$$

Burada N_p^C , N_p^{CS} , N_p^S sırasıyla çekirdek, ara yüzey ve yüzeyde bulunan spin çiftlerinin sayısını gösterir. Bunları spin sayıları ve örgü koordinasyon sayıları cinsinden şöyle yazabiliriz. $N_p^C = (N_C \gamma_C / 2) - N_{CS}$, $N_p^S = N_S \gamma_S / 2$ ve $N_p^{CS} = 2N_{CS} \gamma_{CS} / 2$. Şekil 3.2 'ye göre altıgen örgü için örgü koordinasyon sayıları $\gamma_C = 6$, $\gamma_{CS} = 2$, $\gamma_S = 2$ şeklindedir. Her bölgenin spin sayıları (N_C , N_{CS} , N_S), spin çifti sayıları (N_p^C , N_p^{CS} , N_p^S) ve bağ enerjileri (ε_{ij}^C , ε_{ij}^S , ε_{ij}^{CS}) Çizelge 3.1 'de detaylı olarak verilmiştir. Böylece, üç durum değişkeni bağ değişkenleri cinsinden $p_+ = P_{++} + P_{+0} + P_{+-}$, $p_0 = P_{0+} + P_{00} + P_{0-}$, $p_- = P_{-+} + P_{-0} + P_{--}$ şeklinde ifade edildiğinden parçacığın kuadrupol momenti $Q = p_+ + p_-$ kullanılarak kolayca hesaplanır. Bunun için önce Çizelge 3.1 'deki rakamlar eşitlik (3.9) 'da dikkate alınarak eşitlik (3.7) iterasyon tekniği ile nümerik olarak çözülür. Daha sonra, çözümler kuadrupol eğrileri ($Q-T$) ve histerezis döngüleri ($Q-D$) şeklinde elde edilir. Tez çalışmamızda varılan tüm sonuçlar Şekil 4.1 – Şekil 4.22 'de grafiksel olarak verilmiş olup gelecek kesimde ayrıntılı olarak tartışılacaktır. Ayrıca $Q-T$ ve $Q-D$ eğrilerinden bulunan sonuçlar daha önce $m = p_+ - p_-$ kullanılarak hesaplanan $m-T$ ve $m-h$ sonuçları (Yalçın vd. 2014) ile karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir.

Çizelge 3.1 Çekirdek-yüzey tipi altıgen nanoparçacıkların $S = 1$ Ising modeli için parçacık ve parçacık çifti sayıları ile bağ enerjileri

Parçacık Yarıçapı	R	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Parçacık ve Parçacık Çifti Sayıları (Yalçın vd., 2012)	N_C	7	19	37	61	91	127	169	217	271
	N_S	12	18	24	30	36	42	48	54	60
	N_{CS}	9	15	21	27	33	39	45	51	57
	N_P^C	12	42	90	156	240	342	462	600	756
	N_P^S	12	18	24	30	36	42	48	54	60
	N_P^{CS}	18	30	42	54	66	78	90	102	114
Bağ Enerjileri (Yalçın vd., 2014)	$\mathcal{E}_{++}$	$-J_C - K_C - 2D_C - 2h$				$-J_{CS} - K_{CS}$		$-J_S - K_S - 2D_S - 2h$		
	$\mathcal{E}_{+0}$	$-D_C - h$				0		$-D_S - h$		
	$\mathcal{E}_{+-}$	$+J_C - K_C - 2D_C$				$+J_{CS} - K_{CS}$		$+J_S - K_S - 2D_S$		
	$\mathcal{E}_{0+}$	$-D_C - h$				0		$-D_S - h$		
	$\mathcal{E}_{00}$	0				0		0		
	$\mathcal{E}_{0-}$	$-D_C + h$				0		$-D_S + h$		
	$\mathcal{E}_{-+}$	$+J_C - K_C - 2D_C$				$+J_{CS} - K_{CS}$		$+J_S - K_S - 2D_S$		
	$\mathcal{E}_{-0}$	$-D_C + h$				0		$-D_S + h$		
	$\mathcal{E}_{--}$	$-J_C - K_C - 2D_C + 2h$				$-J_{CS} - K_{CS}$		$-J_S - K_S - 2D_S + 2h$		

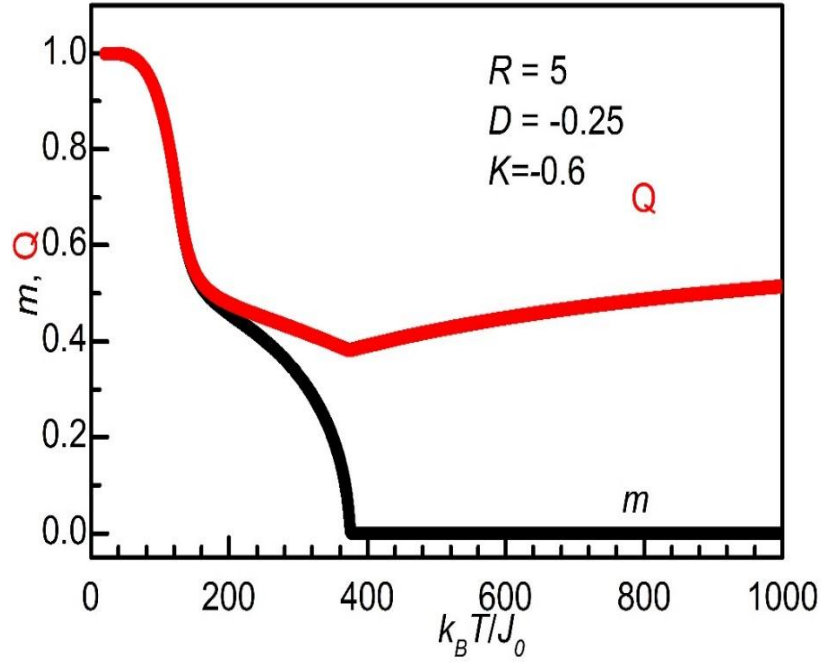
BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Homojen Nanoparçacık İçin Mıknatıslanma, Kuadrupol Düzen ve Histerezis Eğrileri

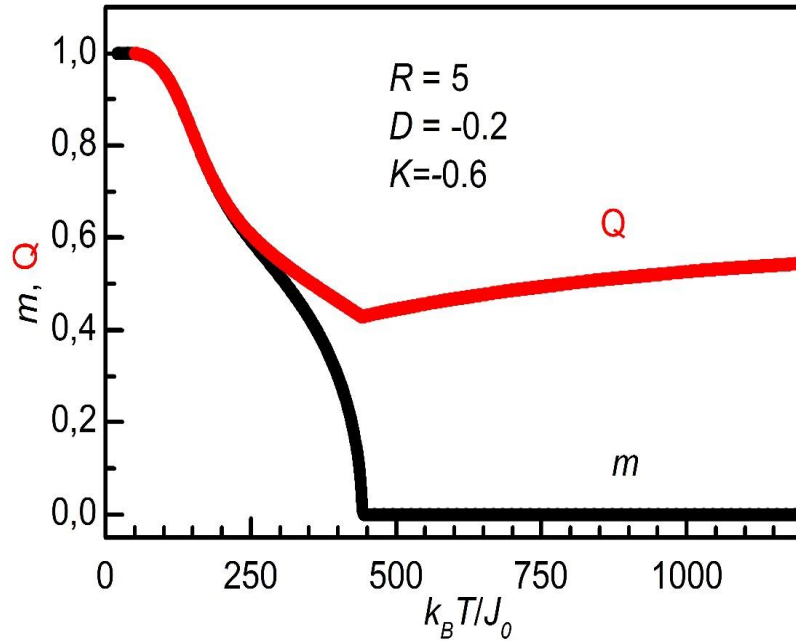
Şekil 4.1 'de altıgen örgü üzerinde tanımlanan ve parçacık yarıçapı $R=5$, tek iyon anizotropi sabiti $D=-0.25$, bikuadratik etkileşme enerjisi $K=-0.6$ olan tek domenli bir homojen nanoparçacığın manyetik alan yokluğunda ($h=0.0$) kuadrupol düzen (Q) ve mıknatıslanma (m) eğrilerinin indirgenmiş sıcaklığa ($k_B T/J_0$) göre değişimi görülmektedir. NP homojen olduğu için çekirdek, ara yüzey ve yüzey bilineer etkileşme sabiti değerleri $J_C = J_{CS} = J_S = J_0 = 1$ şeklinde seçildi. Burada artan sıcaklıkla birlikte manyetizasyon değeri $m=1.0$ 'den itibaren azalarak $200 k_B T/J_0$ civarında bir salınımdan geçtikten sonra yine azalmaya devam etmekte ve $400 k_B T/J_0$ civarında sistem faz dönüşümü geçirmektedir (siyah eğri). Bu sürekli azalmanın sifıra ulaştığı nokta Curie sıcaklığı olarak adlandırılır. Her bir sıcaklık değerine karşı bir mıknatıslanma değeri karşılık geldiği için seçilen D sabitinin değerine göre parçacık ikinci-derece faz dönüşümü sergilemiştir (Yalçın vd., 2014). Benzer şekilde, Q düzen parametresi de artan sıcaklıkla birlikte azalarak, manyetizasyonun sıfır olduğu Curie sıcaklığında minimum değere ulaşır ve bu değerden sonra $Q=0.5$ değerine doğru yumuşak bir artış eğilimi sergiler (kırmızı eğri). Bu durum Q 'nun tanımından kaynaklanmaktadır. Hem m 'nin hem de Q 'nun bu kritik değerleri Curie sıcaklık değerindeki davranışlarına göre şekillenir ve böylece sistem FM fazdan PM faza geçer.

Şekil 4.2 'de, farklı bir kristal alan değeri ($D=-0.20$) için aynı nanoparçacığın manyetizasyonu ve kuadrupol düzeni yine artan sıcaklıkla birlikte 1.0 'den başlayarak sürekli olarak azalır ve Şekil 4.1 'deki gibi hem manyetizasyon hem de Q ikinci-derece faz geçişi sergiler. Burada Şekil 4.1 'den farklı olarak artan kristal alan değeri ile Curie sıcaklığı da artar. Böylece kritik sıcaklık değerinin artmasının ikincil nedenlerden birisi tek iyon anizotropi değerindeki artıştır.



Şekil 4.1. Homojen nanoparçacık için mıknatıslanma (siyah eğri) ve kuadrupol düzen parametresinin (kırmızı eğri) indirgenmiş sıcaklığa bağlı ($k_B T / J_0$) değişimi.

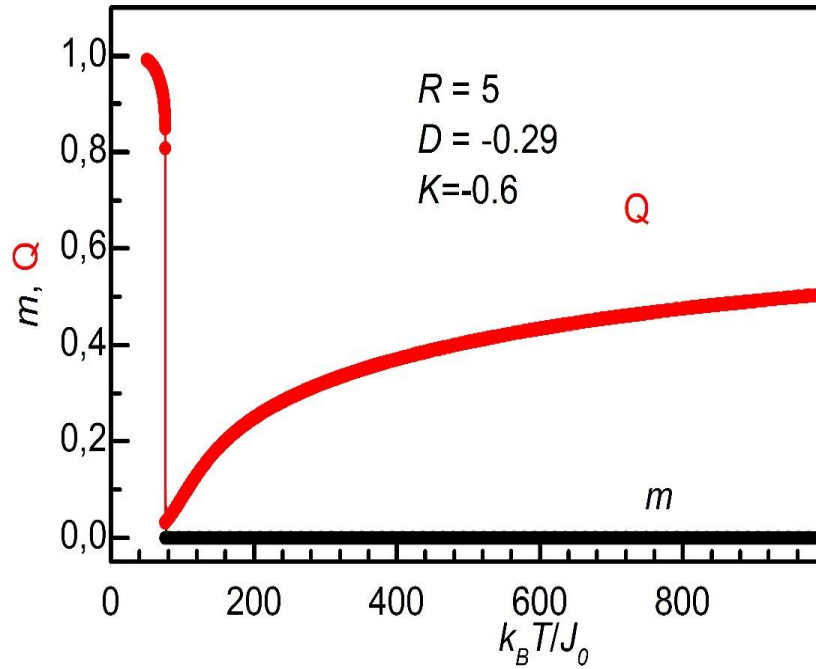
$$R = 5, D = -0.25, K = -0.6, h = 0.0, J_C = J_{CS} = J_S = J_0 = 1$$



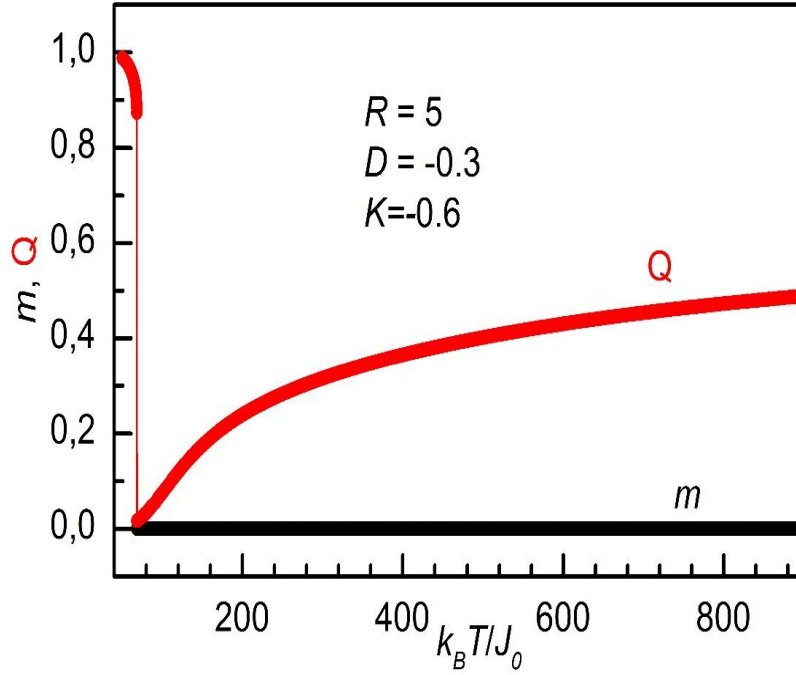
Şekil 4.2. Şekil 4.1 ile aynı fakat $D = -0.20$ alınmıştır

Şayet aynı NP sistemi için kristal alan değeri azaltılırsa ($D = -0.29$) manyetizasyon artan sıcaklıkla birlikte yine azalarak belirli bir sıcaklık değerinde sıfıra atlar ve kesikli

değişim meydana gelir (Şekil 4.3). Bir manyetik sistemde mıknatıslanma, sıcaklığa bağlı olarak kesikli bir değişim gösteriyorsa bu sistemin birinci-derece faz dönüşümü geçirdiği söylenir. Benzer şekilde, kuadrupol düzen parametresi de, mıknatıslanma eğrisi gibi, indirgenmiş sıcaklıkla ($k_B T/J_0$) azalır ve faz dönüşüm sıcaklığında birden sıfıra düşer. Kritik sıcaklıktan sonra manyetizasyon sıfırda kalmaya devam ederken, kuadrupol düzen $Q=0.5$ değerine doğru tekrar yükselme eğiliminde olur. Tek iyon anizotropi değeri azaltılmaya devam edilirse ($D=-0.30$) manyetizasyon ve kuadrupol düzenlerinin gösterdiği kritik sıcaklık değerleri de azalır (Şekil 4.4).



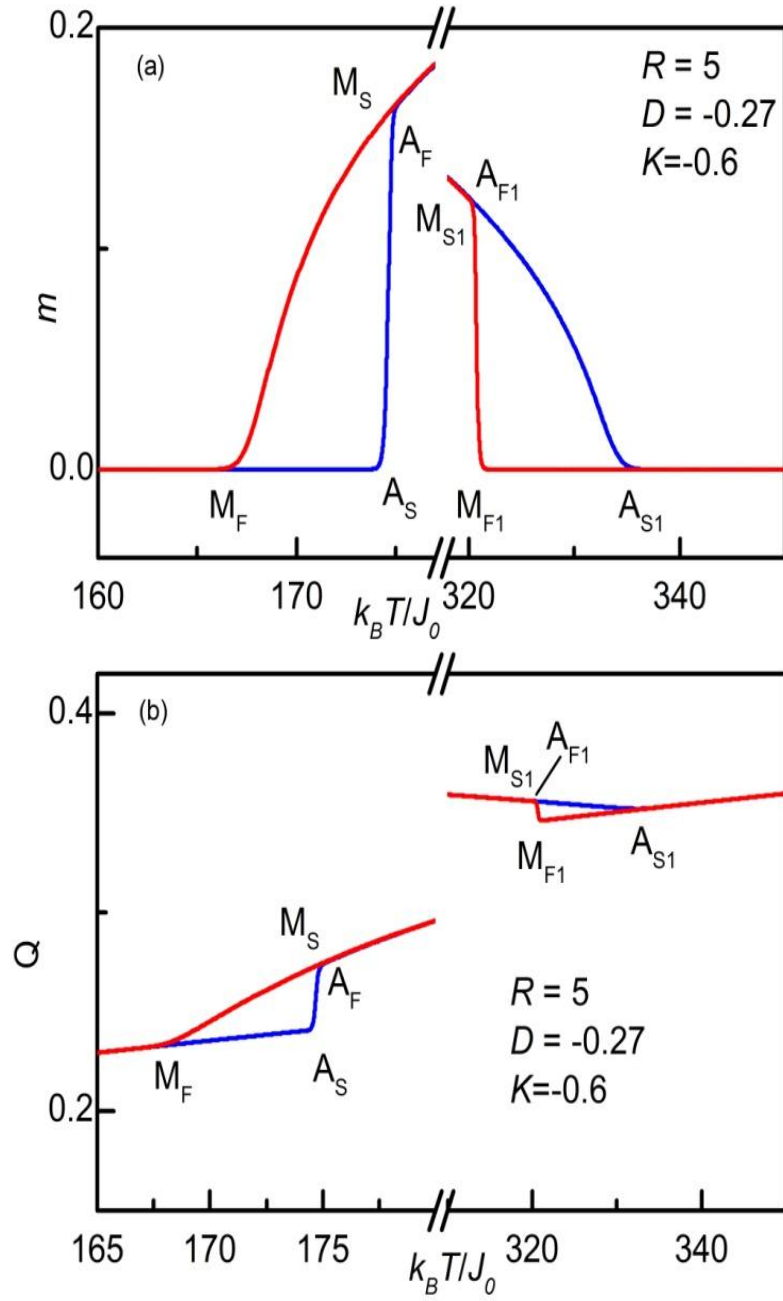
Şekil 4.3. Şekil 4.1 ile aynı fakat $D=-0.29$ alınmıştır



Şekil 4.4. Şekil 4.1 ile aynı fakat $D = -0.30$ alınmıştır

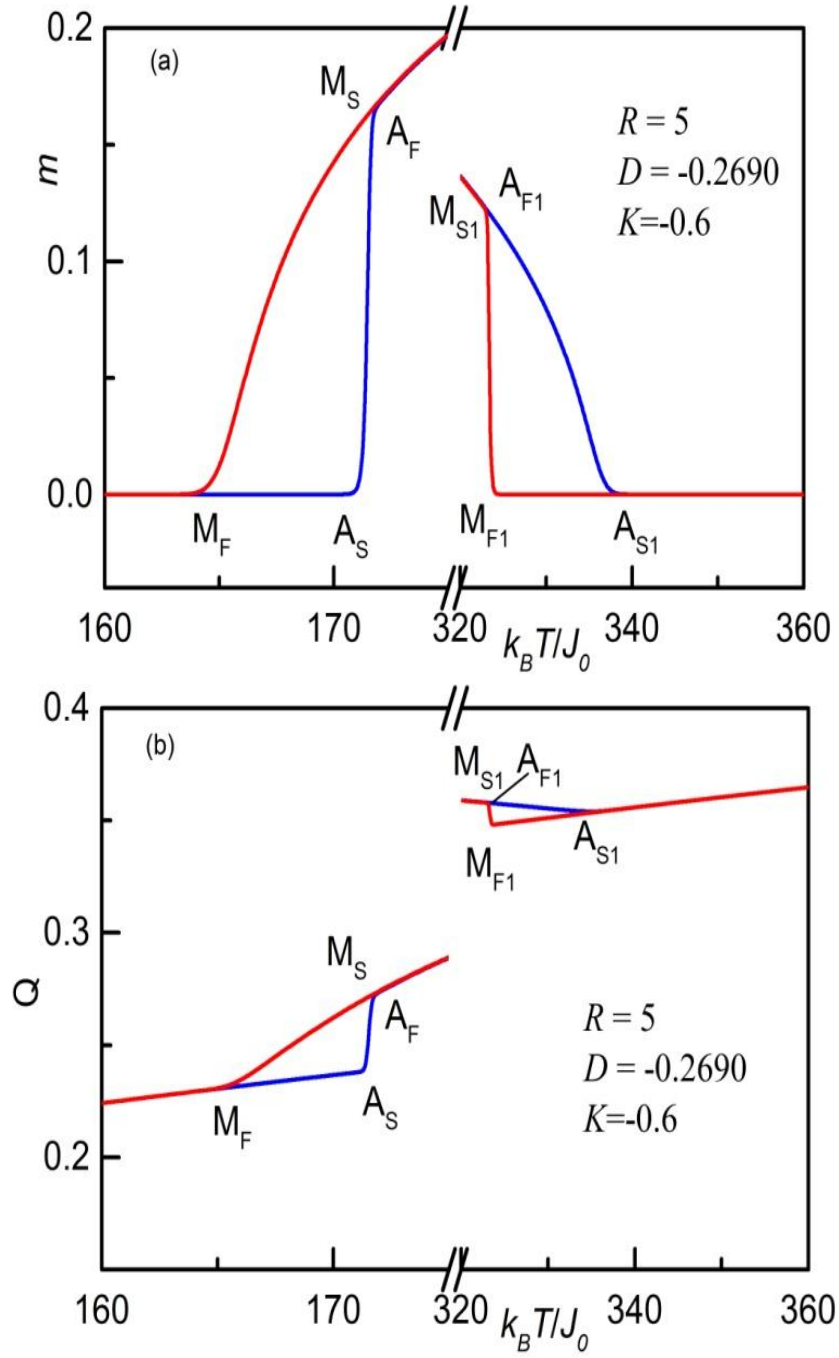
Bundan sonraki beş şekilde, homojen nanoparçacıkta ($R=5$, $K=-0.6$, $h=0.0$) meydana gelen yapısal faz geçişleri ve ortaya çıkan bazı Q - T termal histerezis eğrileri araştırıldı. Bu geçişler için bulunan karakteristik sıcaklıklar m - T termal histerezis eğrilerinki ile karşılaştırıldı. $D=-0.27$ için önce mıknatıslanmanın sıcaklığa bağlı gelişimi Şekil 4.5a 'da, sonra kuadrupol düzen parametresinin sıcaklığa göre değişimi ise Şekil 4.5b 'de verildi. Sıcaklık arttıkça martensitten (kırmızı eğri) östenite'ye (mavi eğri), sıcaklık azaldıkça östenitten martensit'e geçiş özelliği gözlemlendi (Yalçın vd., 2014; Yalçın vd., 2015). Her iki şekilde işaret edilen ve karakteristik sıcaklıklar olarak bilinen M_S ve M_F sıcaklıkları martensitik başlama ve bitiş sıcaklığını; A_S ve A_F östenitik başlama ve bitiş sıcaklıklarını göstermektedir. Artan sıcaklıkla birlikte manyetizasyonda A_S 'den A_F 'ye doğru keskin bir artış gözlenirken, A_{F1} 'den A_{S1} 'e doğru bir yumuşak azalma görülür. M_F , M_S , A_S ve A_F 'lerin ve M_{F1} , M_{S1} , A_{S1} ve A_{F1} 'lerin oluşturduğu kapalı eğrilere sırasıyla “ m - T termal histerezis döngüleri” ve “hayali m - T termal histerezis döngüleri” denir. Kuadrupol eğrilerinde de benzer yapısal faz geçişleri olduğu fakat Q - T termal histerezis eğrilerinin ve hayali Q - T termal histerezis eğrilerinin çok daha küçük bir alanda meydana geldiği anlaşılmıştır. Şekil 4.5 'daki eğriler, tek iyon anizotropi parametresi küçük bir miktar büyütülerek tekrar elde edildi ve Q - T histerezislerindeki

değişiklikler incelendi. $D = -0.2690, -0.2675, -0.2650, -0.2620$ değerleri için bulunan eğriler sırasıyla Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 'da gösterilmiştir. Şekillerden gözlenen sonuçlar genel görünüm itibariyle bir üstteki şekilde (Şekil 4.5) gözlenen davranışlar ile benzer özellikler taşımakta, D 'nin artmasıyla sadece daha dar bir sıcaklık aralığında termal histerezis eğrileri tamamlanmaktadır. Ayrıca, manyetizasyon ve kuadropol düzen değerlerinin artmasıyla birlikte termal histerezis ve hayali termal histerezis eğrileri düzgün bir şekilde daha yüksek sıcaklık değerlerine doğru kaymaktadır. Bu şekillere dikkat edildiğinde kuadropol özelliğın manyetizasyona göre daha dar bir bölgede duyarlı olduğu bulunur. Burada bir de şunu ifade etmek gerekir ki, hayali $m-T$ ve $Q-T$ termal eğriler daha yüksek sıcaklık bölgesinde gözlendiğı önemle vurgulanmalıdır. Çünkü bu eğriler makro sistemlerde gözlenmeyen bir durumdur. Ayrıca artan D değerlerinde bu eğrilerin belli bir düzende gözlenmesi nanoparçacıklarda bu eğrilerin kalıcı özelliğı olduğunu bize gösterir.

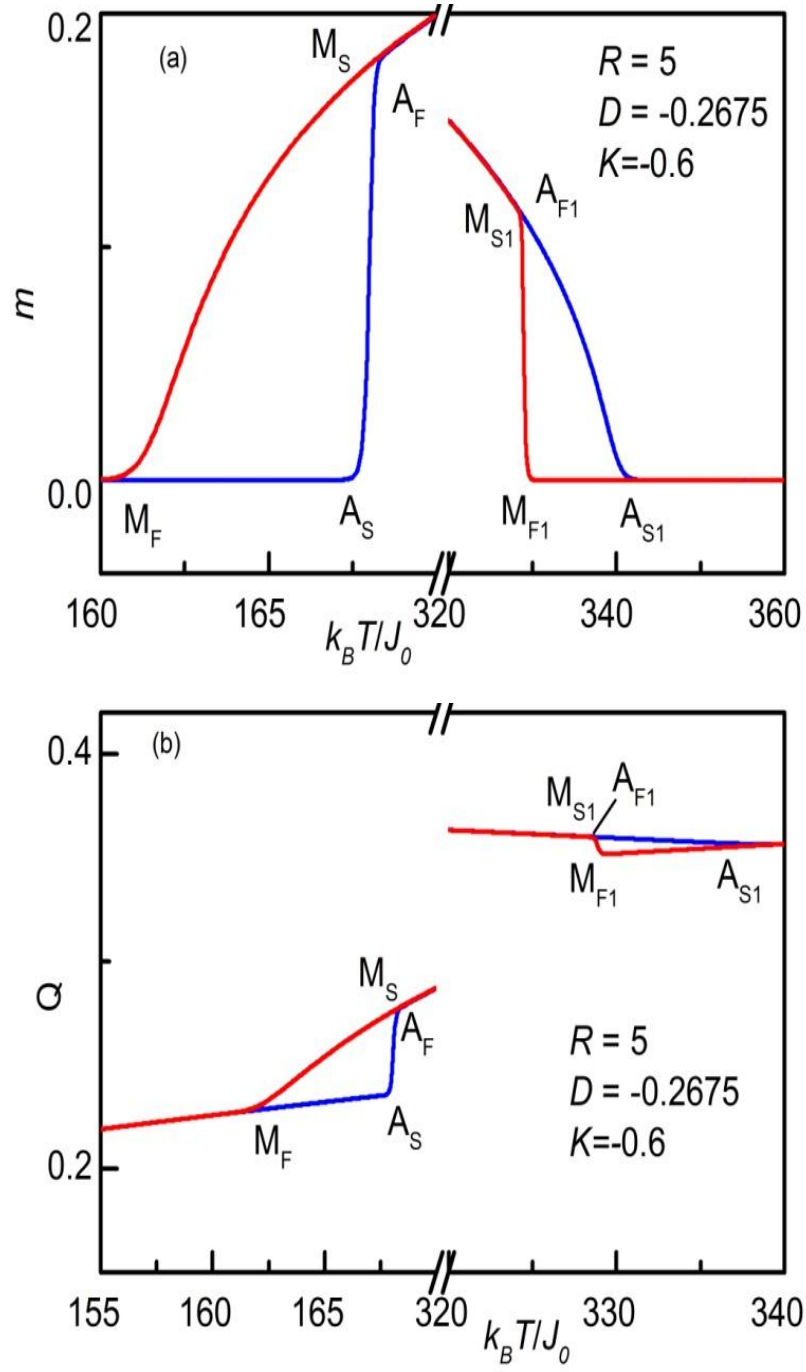


Şekil 4.5. Homojen nanoparçacık için (a) m - T ve (b) Q - T termal histerezis eğrileri.

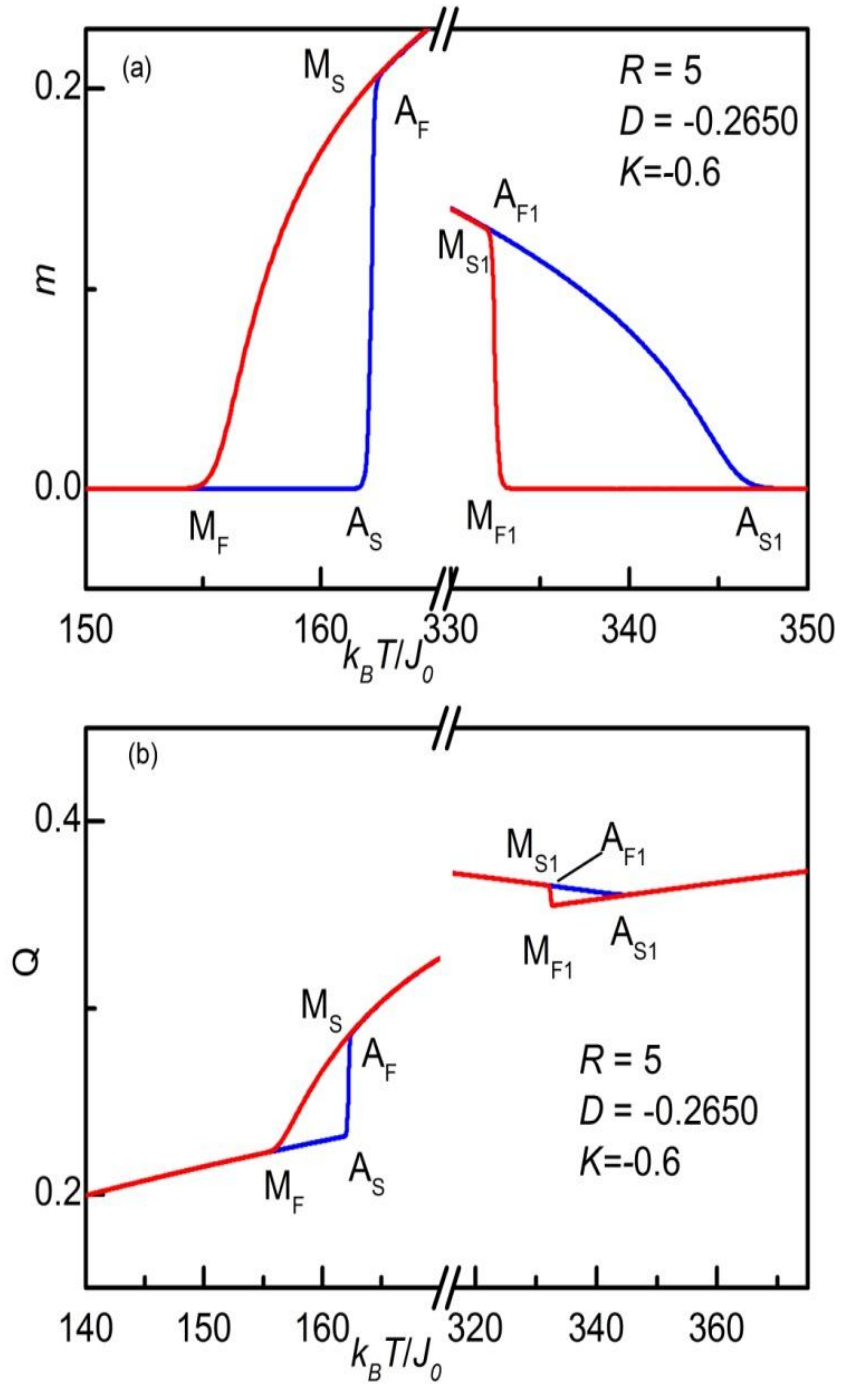
$R = 5$, $K = -0.6$, $h = 0.0$, $D = -0.27$



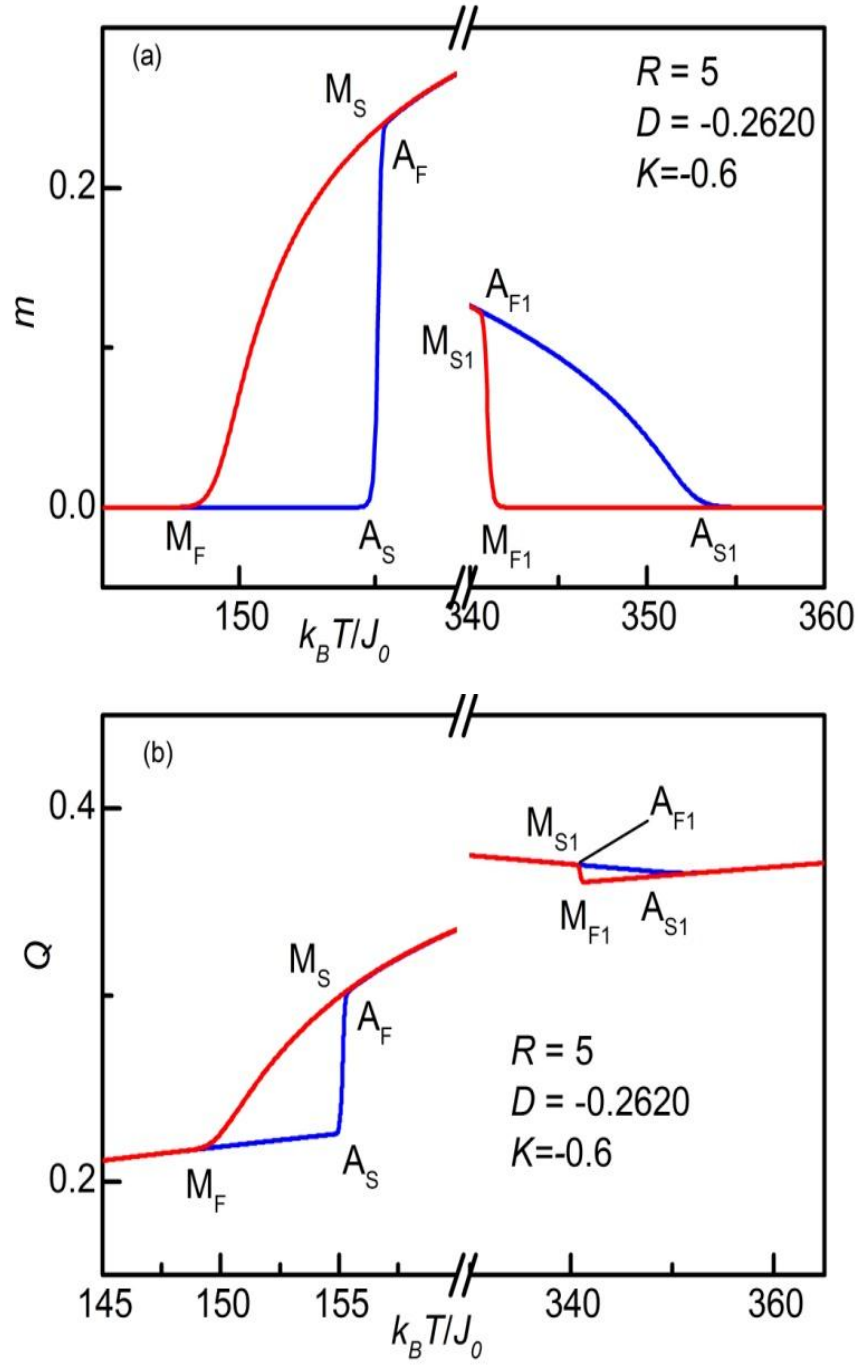
Şekil 4.6. Şekil 4.5 ile aynı fakat $D = -0.2690$ için elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Şekil 4.5 ile aynı fakat $D = -0.2675$ için elde edilmiştir.



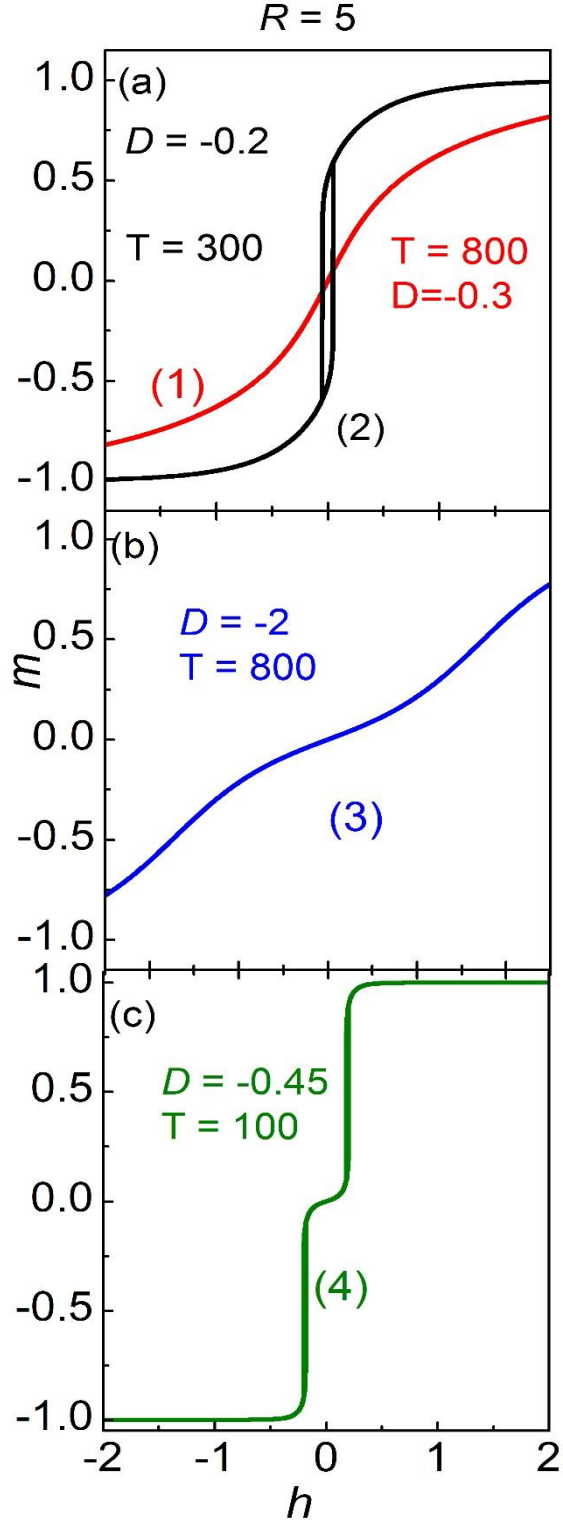
Şekil 4.8. Şekil 4.5 ile aynı fakat $D = -0.2650$ için elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Şekil 4.5 ile aynı fakat $D = -0.2620$ için elde edilmiştir.

Birinci-dereceden faz geçişleri maddelerin yapısal faz geçişi olarak bilinir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında teorik olarak irdelenen homojen nanoparçacıklar birinci-dereceden faz geçişi yaptıkları parametrelere bağlı olarak ta martensitik ve östenitik fazlar gösterebilir. Genelde sıcaklığın artması ve azalmasına bağlı olarak tek parça halinde gözlenen martensitik ve östenitik fazlara hep birlikte “termal histerezis eğrileri” denir. Sistem nano ölçekte olduğunda martensitik ve östenitik fazlar iki defa gözlenmektedir. Sıcaklık artarken gözlenen ilk durumlara martensitik ve östenitik, daha yüksek sıcaklıkta gözlenen durumlara ise hayali martensitik ve östenitik fazlar denir. Buradaki hayali fazlar hacimsel makro sistemlerde bulunmamaktadır. Bu durum nano ölçekte parçacıkların etkisinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca hem martensitik/östenitik hem de hayali martensitik/östenitik fazlar birinci-dereceden faz geçişinin olduğu kritik sıcaklıkların üzerinde meydana gelir. Bu nedenle, tez çalışmasında bu fazlar hem homojen hem de kompozit nanoparçacıklar için detaylıca verildi. Bu tür geçişler hem manyetizasyon hem de kuadrupol özelliklerinin sıcaklığa bağlı davranışlarından tespit edildi. Ancak kuadrupol özelliklerinden elde edilen eğriler daha dar bölgede bulundu.

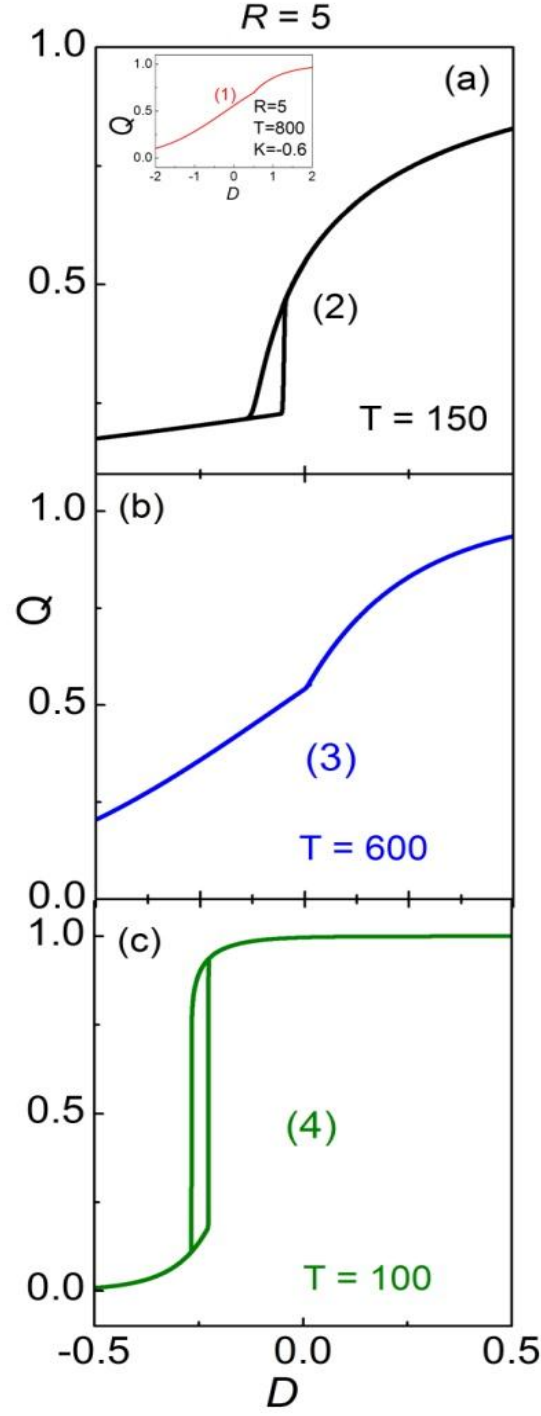
Şekil 4.10 'da altıgen örgüye sahip belli bir büyüklükteki ($R=5$) homojen NP için $K=-0.6$ alınarak elde edilen manyetik histerezis eğrileri görülmektedir. Genel görümüm olarak bu eğrilerde dört farklı histerezis eğri türleri vardır. Bunlar belirli bir sistematik halinde aşağıdaki gibi açıklanabilir. Şekil 4.10a 'da $D=-0.3$ ve $T=800$ değerinde kırmızı renkte gösterilen eğriye göre, mıknatıslanma artan ve azalan manyetik alanla birlikte aynı değeri alır ve böylece aynı eğri üzerinden gidip gelir (1 numara ile işaretlenen eğri). Bu durumdaki bir nanoparçacığın PM davranışta olduğu söylenir. Şayet daha düşük bir sıcaklık değeri ile daha yüksek bir kristal alan değeri seçilirse ($D=-0.2$ ve $T=300$) 2 numara ile işaretlenen siyah renkli kapalı eğri bulunur. Öncekinden farklı olarak, parçacık FM fazda kalıcı bir koersif alan değerine sahip olur. Şekil 4.10b 'ye göre sıcaklığın yüksek değerinde ($T=800$) kristal alan $D=-2$ olursa, histerezis tek bir eğri şeklinde iki bölgeden oluşan bir PM davranış gözlenir (mavi eğri). Buradan PM özelliğin yüksek sıcaklıktan, ikili davranışın ise tek iyon anizotropi parametresi D 'den kaynaklandığı belirlenir. Son olarak, FM karakterli iki farklı kapalı histerezis eğrisi ise $D=-0.45$ ve $T=100$ durumunda elde edilir (Şekil 4.10c 'deki yeşil renkli eğri). Burada düşük sıcaklıklı eğrinin iki farklı bölgede gözlenmesinin nedeni ise düşük kristal anizotropi parametresidir. Şekil 4.10 'da olduğu gibi, farklı parametreler



Şekil 4.10. $K = -0.6$ için yarıçapı $R = 5$ olan homojen NP için $m-h$ histerezis eğrileri. (a) $D = -0.2$, $T = 300$ (siyah eğri); $D = -0.3$, $T = 800$ (kırmızı eğri), (b) $D = -2$, $T = 800$ (mavi eğri), (c) $D = -0.45$, $T = 100$ (yeşil eğri)

altında dört farklı (1, 2, 3 ve 4) bölgeye ayrılan bir homojen NP için manyetik histerezis eğrilerinin diğer bütün değerleri için elde edilebilecek manyetik histerezis eğrileri bu dört eğriden birisine benzeyecektir. Bu benzeme ise fiziksel özelliklerin aynı olduğunun bir delilidir (Yalçın vd., 2014; Özüm vd., 2015).

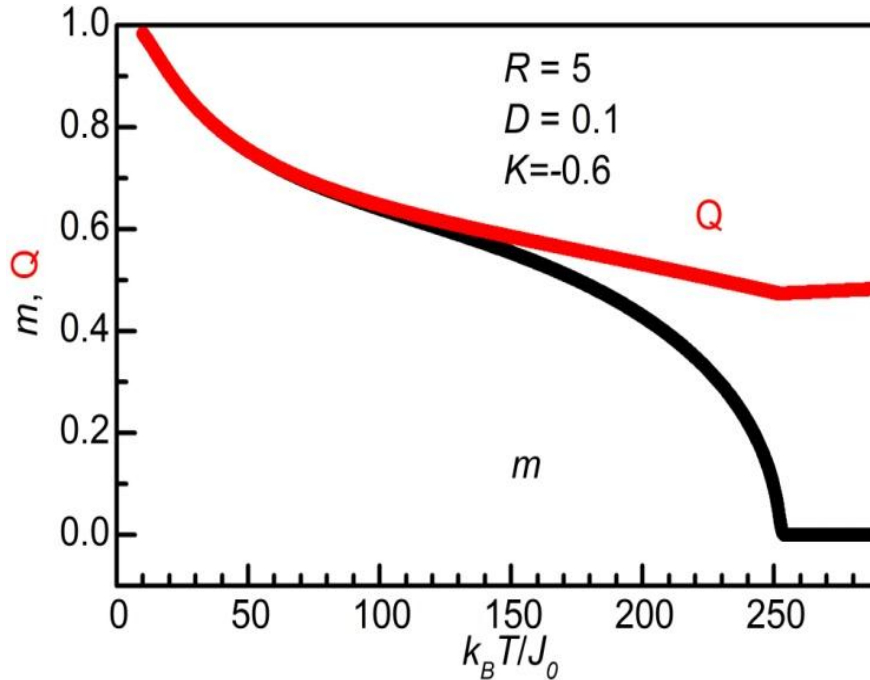
Benzer şekilde $R=5$ ve $K=-0.6$ için farklı sıcaklık değerleri kullanarak aynı nanoparçacığın kuadropol histerezis ($Q-D$) eğrileri Şekil 4.11 'deki gibi elde edilmiştir. Şekil 4.11a 'nın içindeki küçük şekle göre, bir yüksek sıcaklık ($T=800$) değerinde PM davranış sergilenir (birinci bölge). Düşük sıcaklık değerinde ($T=150$, ikinci bölge) ise FM davranış meydana gelir (Şekil 4.11a). Diğer taraftan, Şekil 4.11b 'de sıcaklığın yüksek değerinde ($T=600$ ve üçüncü bölge) nanoparçacığın PM davranışı iki farklı bölgeden kaynaklanır. Kuadropol düzeninin farklı D değerlerindeki davranışı $m-h$ eğrisine göre farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. D 'nin pozitif değerleri için $m-h$ eğrisindeki gibi alışılan eğri davranışı gözlenirken, negatif değerlerinde daha düz ve keskin bir davranış ortaya çıkar. Bu durum tek iyon anizotropinin negatif değerlerinde sistemi daha fazla etkilediği söylenebilir. Bunun en açık delili $Q-kT/J_0$ eğrilerinde birinci dereceden faz geçişi sonrası görülen martensitik ve östenitik fazların negatif D değerlerinde bulunmasıdır. Unutulmamalıdır ki buradaki negatif D değeri tez çalışmasında seçilen Hamiltoniyene göredir. $Q-D$ eğrisinde en ilginç durum Şekil 4.11c 'de bulundu. Burada ($T=100$, dördüncü bölge) homojen bir nanoparçacığın $Q-D$ eğrisi farklı davranış sergileyip $m-h$ eğrisinin benzer durumundakinden ayrılarak FM bir histerezis eğrisi sola doğru kayma gösterdi. Diğer bir ifadeyle negatif D bölgesine olan kayma $Q-D$ için değiş-tokuş etkileşmenin etkisinin kayması olarak bilinir. Bu tür eğri literatürde ilklerde yer almaktadır. Dolayısıyla böyle bir davranışın deneysel olarak belirlenmesi için elde edilebilmesinde tek aşamalı olmayan bir düzenek ile cihaz tasarımı yapılabilir. Böyle bir cihaz dış manyetik alan ve farklı D değerleri için kontrollü bir şekilde referans alınarak ölçüm tasarlanabilir.



Şekil 4.11. $K = -0.6$ için yarıçapı $R = 5$ olan homojen nanoparçacığa ait Q - D histerezis eğrileri. (a) $T = 150$ (siyah eğri); $T = 800$ (kırmızı eğri), (b) $T = 600$ (mavi eğri), (c) $T = 100$ (yeşil eğri)

4.2 Kompozit Nanoparçacık İçin Mıknatıslanma, Kuadrupol Düzen ve Histerezis Eğrileri

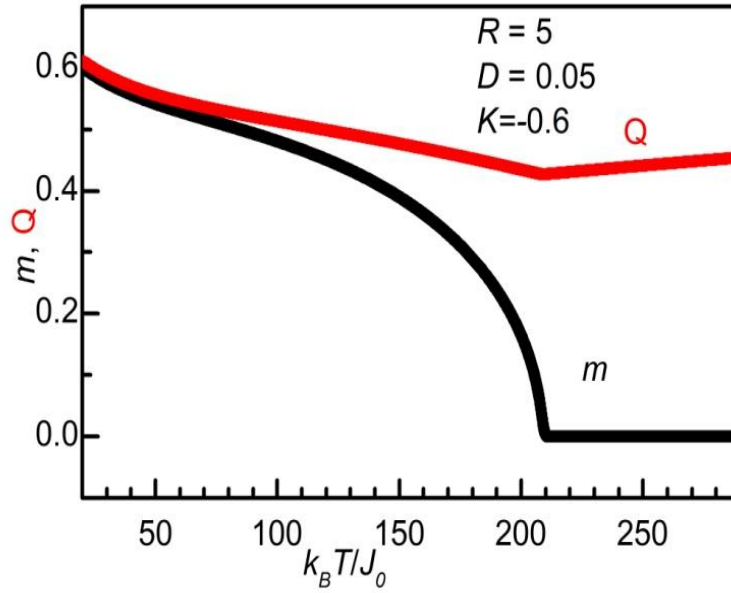
Yukarıda altıgen örgüde üzerinde tanımlanan büyüklüğü $R=5$, tek iyon anizotropi sabiti $D=0.1$, bikuadratik etkileşme enerjisi $K=-0.6$ olan tek domenli bir kompozit nanoparçacığın ($J_C = J_S = J_0 = 1$, $J_{CS} = -J_0 = -1$) manyetik alan yokluğunda ($h=0.0$) kuadrupol düzen (Q , kırmızı eğri) ve mıknatıslanma (m , siyah eğri) eğrilerinin indirgenmiş sıcaklığa ($k_B T/J_0$) göre değişimleri Şekil 4.12 'deki gibi elde edildi. Burada artan $k_B T/J_0$ ile birlikte hem manyetizasyon hem de kuadrupol düzen sürekli azalarak belirli bir sıcaklıkta sert geçiş gösterir. Manyetizasyon sert geçişini $m=0$ 'da, kuadrupol düzen ise $Q=0.5$ civarında yapar. Bu sert geçiş yapılan sıcaklık değeri ikinci-derece faz geçişinin olduğu Curie sıcaklık değeridir. Böylece kompozit NP Curie sıcaklığından değerinden önce FM, üzerinde ise PM fazda bulunur. Homojen (Şekil 4.1) ve kompozit (Şekil 4.12) nanoparçacıklar için elde edilen aynı R ve K (farklı D) değerlerindeki davranışta en belirgin özellik, kompozit nanoparçacığın ikinci-derece faz geçişinin olduğu Curie sıcaklık değerinin daha küçük olmasıdır.



Şekil 4.12. Kompozit nanoparçacık için mıknatıslanma (siyah eğri) ve kuadrupol düzen parametresinin (kırmızı eğri) indirgenmiş sıcaklığa bağlı ($k_B T/J_0$) değişimi.

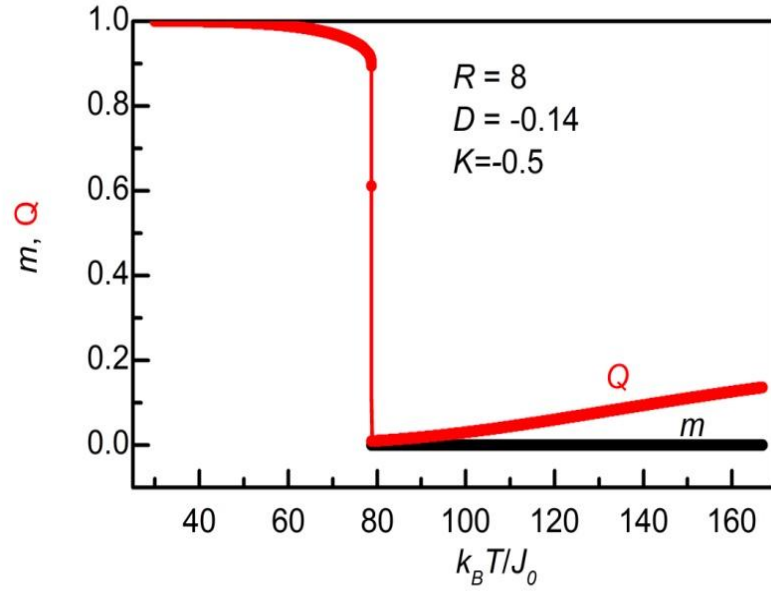
$$R = 5, D = 0.1, K = -0.6, h = 0.0, J_C = J_S = J_0 = 1, J_{CS} = -J_0 = -1$$

Şekil 4.13 'te, $D=0.05$ seçilerek aynı kompozit nanoparçacığın manyetizasyon ve kuadrupol düzen eğrileri sıcaklığa bağlı ($k_B T/J_0$) olarak gösterildi. Bir önceki şekilde olduğu gibi, artan $k_B T/J_0$ değeri ile manyetizasyon ve kuadrupol düzen değerleri azalarak belirli bir değerde Curie sıcaklığında ikinci-derece faz geçişi gözlemlendi. Burada Şekil 4.12 'den farklı olarak D değerinin daha küçük olması faz geçiş sıcaklığı da azalmıştır.

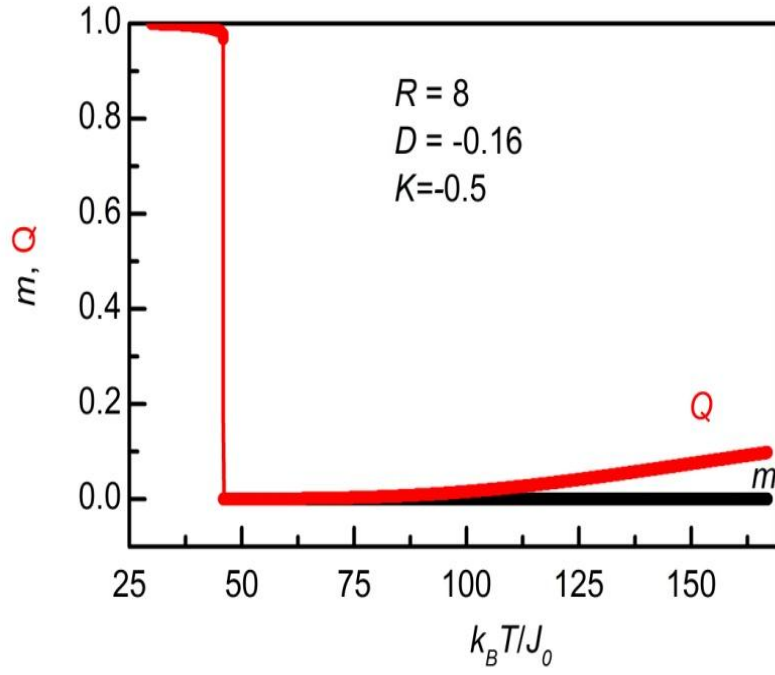


Şekil 4.13. Şekil 4.12 ile aynı fakat $D = 0.05$ alınmıştır

Diğer taraftan, buraya kadar olan incelemede kompozit nanoparçacıkların manyetizasyon ve kuadrupol eğrilerinde $R=5$ ve $K=-0.6$ için pozitif D değerlerinde birinci-dereceden faz geçişi oluşmamıştır. Şekil 4.14 ve 4.15 'te, $K=-0.5$ için negatif D değerlerinde birinci-derece faz geçişinin iyi gözlemlendiği daha büyük bir NP ($R=8$) alındı. Bu iki şekil arasında sadece D değerleri değiştirilmiştir. Şekil 4.14 'te $D=-0.14$, Şekil 4.14 'te $D=-0.16$ kullanıldı. Aralarındaki bu ufak değişikliklerle birinci-derece faz geçiş sıcaklığı da daha küçük değerlere doğru kayma oldu. Diğer bir ifadeyle D azaldıkça faz geçiş sıcaklık değerleri de azalmıştır. Bundan sonra, homojen Nanoparçacıklarda olduğu gibi, artan sıcaklıkla manyetizasyon sıfır değerinde sabit kalma eğiliminde iken, kuadrupol düzen ise 0.5 değerine ulaşmak için değişen sıcaklıkla birlikte yumuşak bir artma gösterdi.



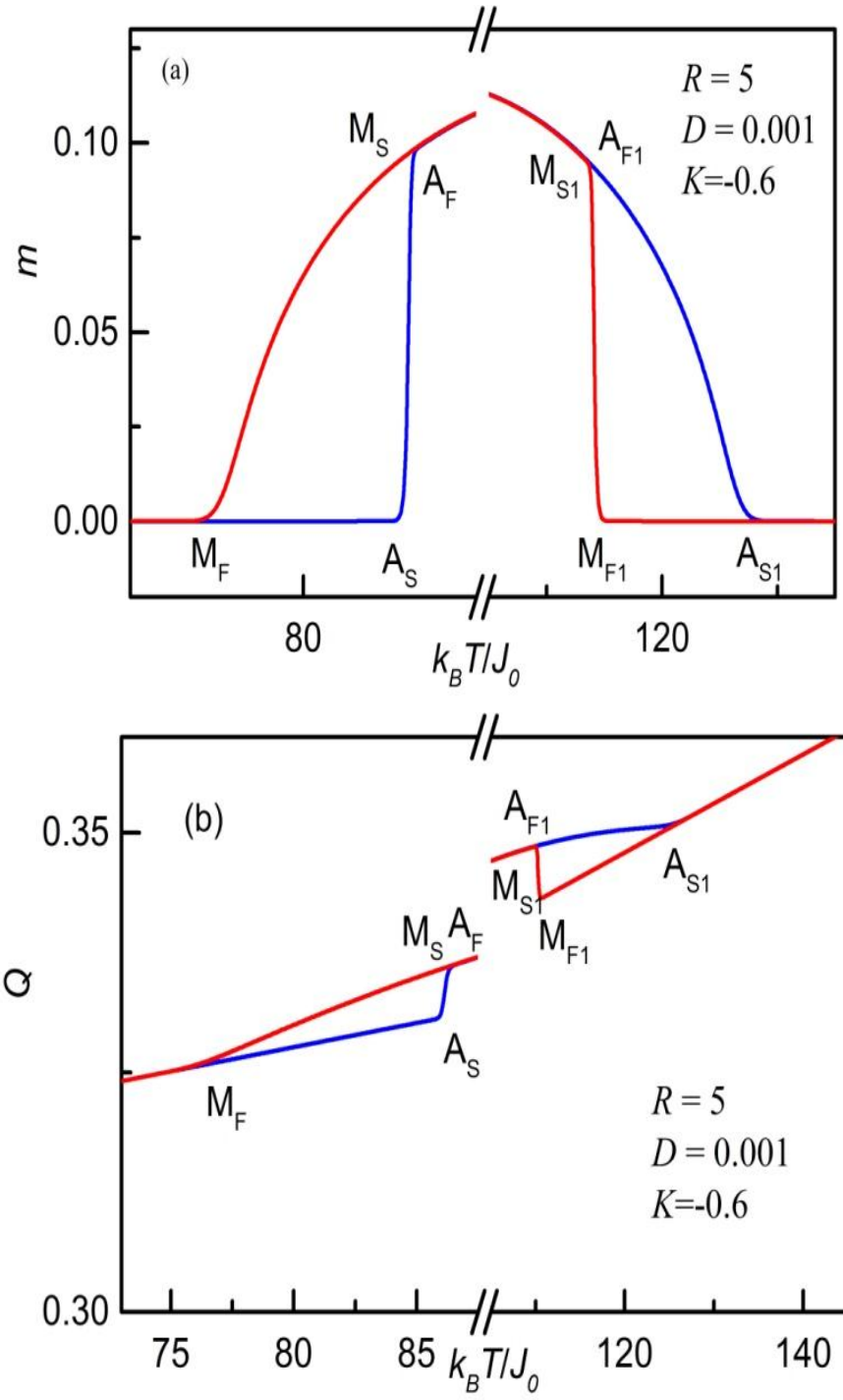
Şekil 4.14. Kompozit nanoparçacık için manyetizasyon (siyah eğri) ve kuadrupol düzen parametresinin (kırmızı eğri) indirgenmiş sıcaklığa bağlı ($k_B T / J_0$) değişimi.
 $R = 8, D = -0.14, K = -0.5, h = 0.0, J_C = J_S = J_0 = 1, J_{CS} = -J_0 = -1$



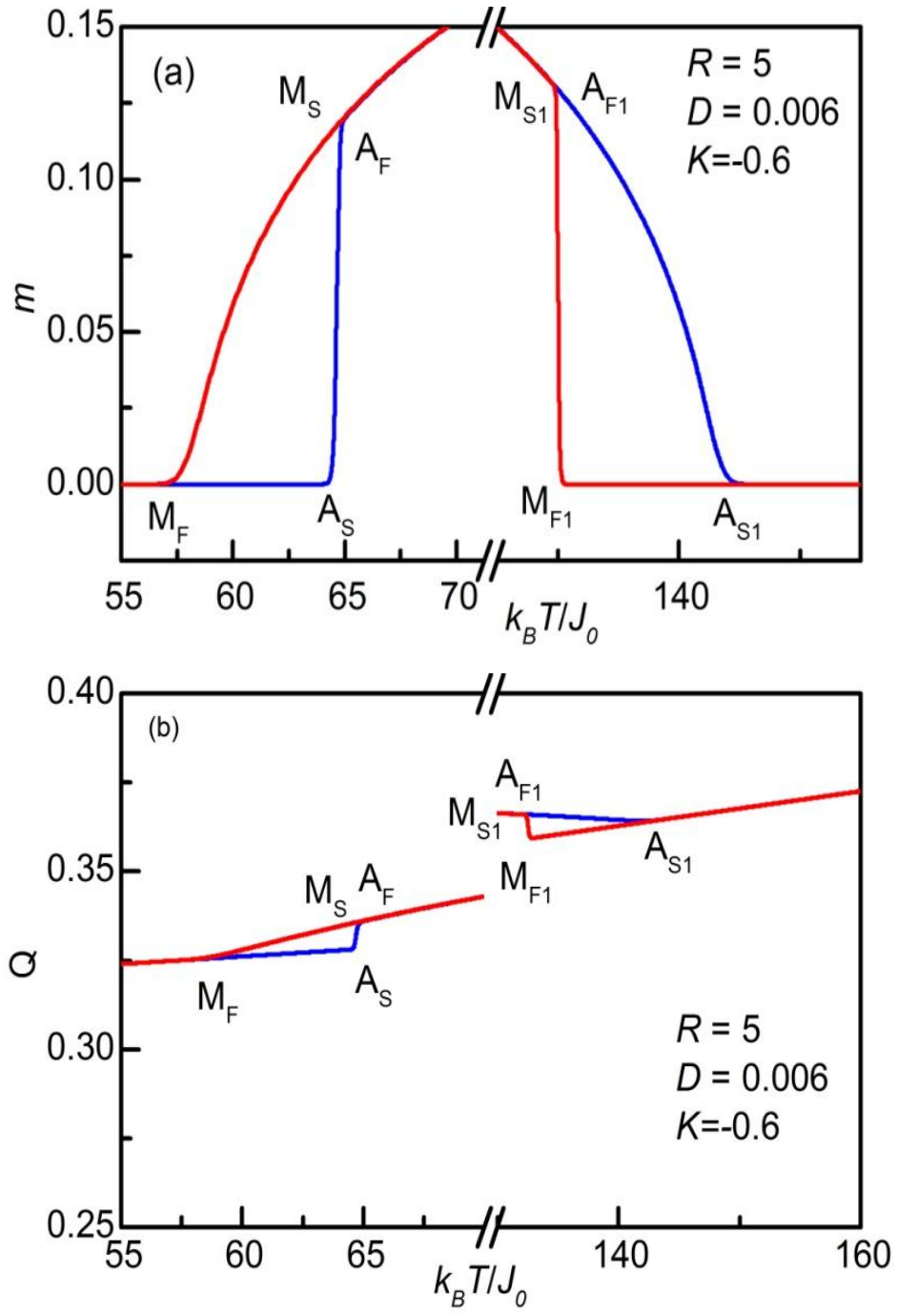
Şekil 4.15. Şekil 4.14 ile aynı fakat $D = -0.16$ alınmıştır

Homojen nanoparçacıklarda olduğu gibi, kompozit nanoparçacıklarda da martensitik ve östenitik fazlar birinci-derece faz geçişinin tamamlandığı geçiş sıcaklığının üzerinde görülür. Bu nedenle, bundan sonraki dört şekilde farklı D değerleri seçilmek suretiyle MT ve AT geçişlerinin oluşup oluşmadığı araştırıldı. İlk olarak, Şekil 4.16 'da bir kompozit NP ($J_C = J_S = J_0 = 1$, $J_{CS} = -J_0 = -1$) için $K = -0.6$, $R = 5$, $D = 0.001$ değerinde manyetizasyon (Şekil 4.16a) ve kuadrupol (Şekil 4.16b) eğrilerinin sıcaklığa bağlı ($k_B T/J_0$) değişimi elde edildi. Manyetizasyon ve kuadrupol özellikleri biri birleriyle karşılaştırıldığında kuadrupol özelliğin martensitik ve östenitik fazları daha dar bölgede gerçekleştiğinden sonuçların daha net görülebilmesi için iki farklı şekil üzerinde çalışılmıştır. Daha düşük sıcaklık bölgesinde elde edilen termal histerezis eğrisine karşın yüksek sıcaklık bölgesinde hayali termal histerezis eğrileri gözlemlendi. Ancak unutulmamalıdır ki nanoparçacıklar için elde edilen hayali termal histerezis eğrileri bir derece daha irdelenip araştırılmaya muhtaç bir konu olduğundan burada bu kadarlık bir açıklama yapıldı. Nanoparçacıkların yüzey/hacim oranı ve kuantum etkilerden dolayı her iki termal histerezis eğrilerinin de gerçek olabileceği durumla karşılaşıldı. Diğer bir ifadeyle bu durumun hem deneysel hem de teorik olarak birlikte çalışılması gereken bir çalışma olduğu ortaya çıktı. Yalçın ve ekibinin çalışmalarında (Yalçın vd., 2014), bu tezde de olduğu gibi daha çok martensitik ve östenitik fazların kaynağı ve kuadrupol etkileri üzerinde durulmuştur. Şekil 4.16b 'de kuadrupol özelliğin daha dar bölgede gözlenmesi bu durumun daha hassas olarak çalışılması gerektiğini göstermiştir. Bu nedenle, bundan sonraki şekillerde de farklı D değerleri için kuadrupol özelliklerin detaylı bir araştırılması yapıldı.

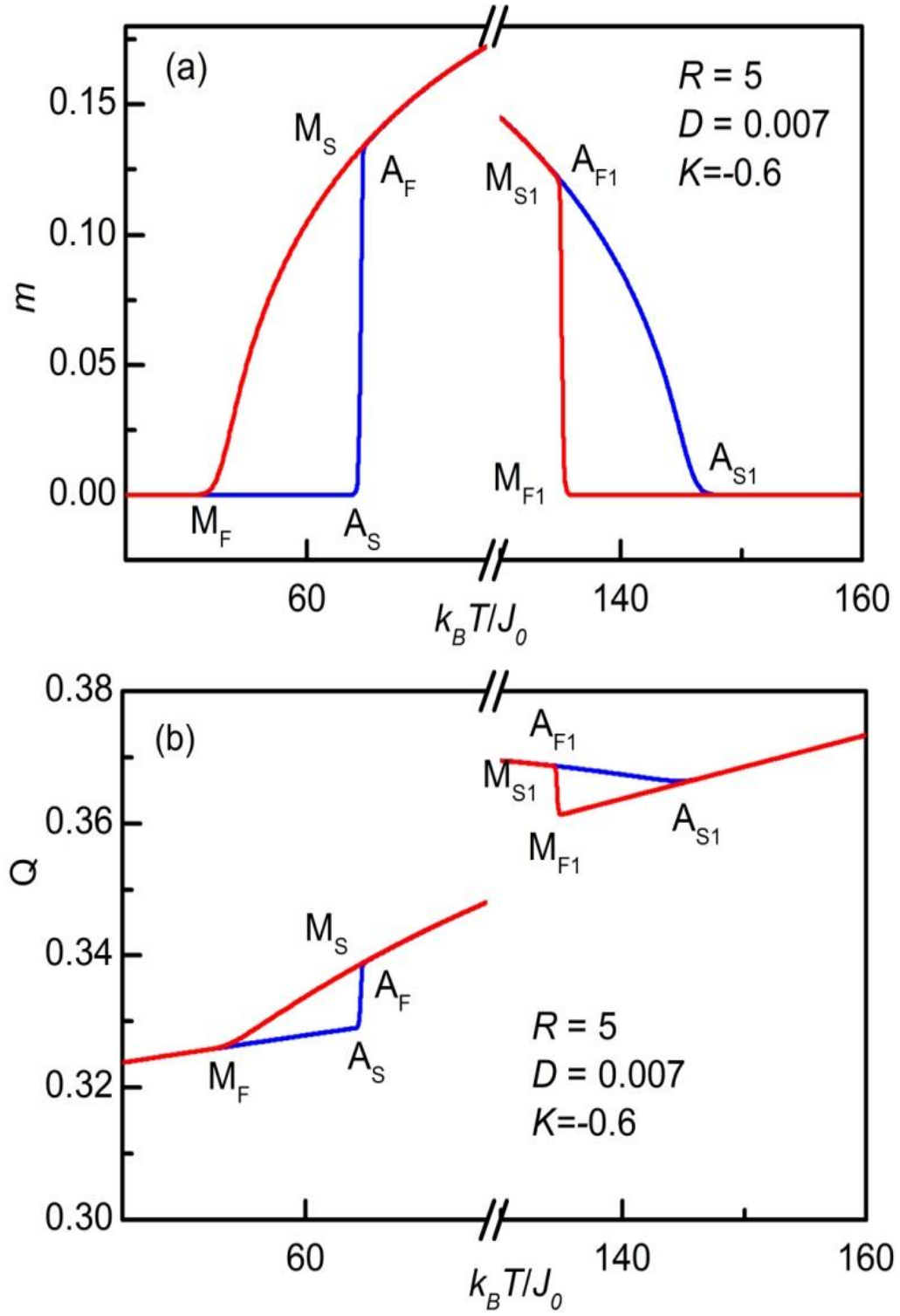
Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 'da D 'nin sırasıyla 0.006, 0.007 ve 0.009 gibi artan değerlerinde manyetizasyon ve kuadrupol düzeninin sıcaklığa göre davranışları detaylıca araştırıldı. Homojen nanoparçacıktan farklı olarak burada kompozit NP için oluşan termal histerezislerin pozitif D değerlerinde gözlenmesi daha dikkat çekici bir durumdur. Her üç şekilde de manyetizasyon ve kuadrupol düzen artan D değerlerine göre daha dar sıcaklık bölgesinde oluşmuştur. Dolayısıyla genel davranış olarak, artan D değeri ile birlikte termal histerezis eğrilerin birbirlerine yaklaşması hem homojen hem de kompozit NP için daha dar sıcaklık bölgesinde sıkışması doğal bir sonuçtur. Böylece kompozit NP için elde edilen termal histerezis eğrileri nanoparçacığı oluşturan atomların net manyetizasyonu ile ilgili bir durumdur.



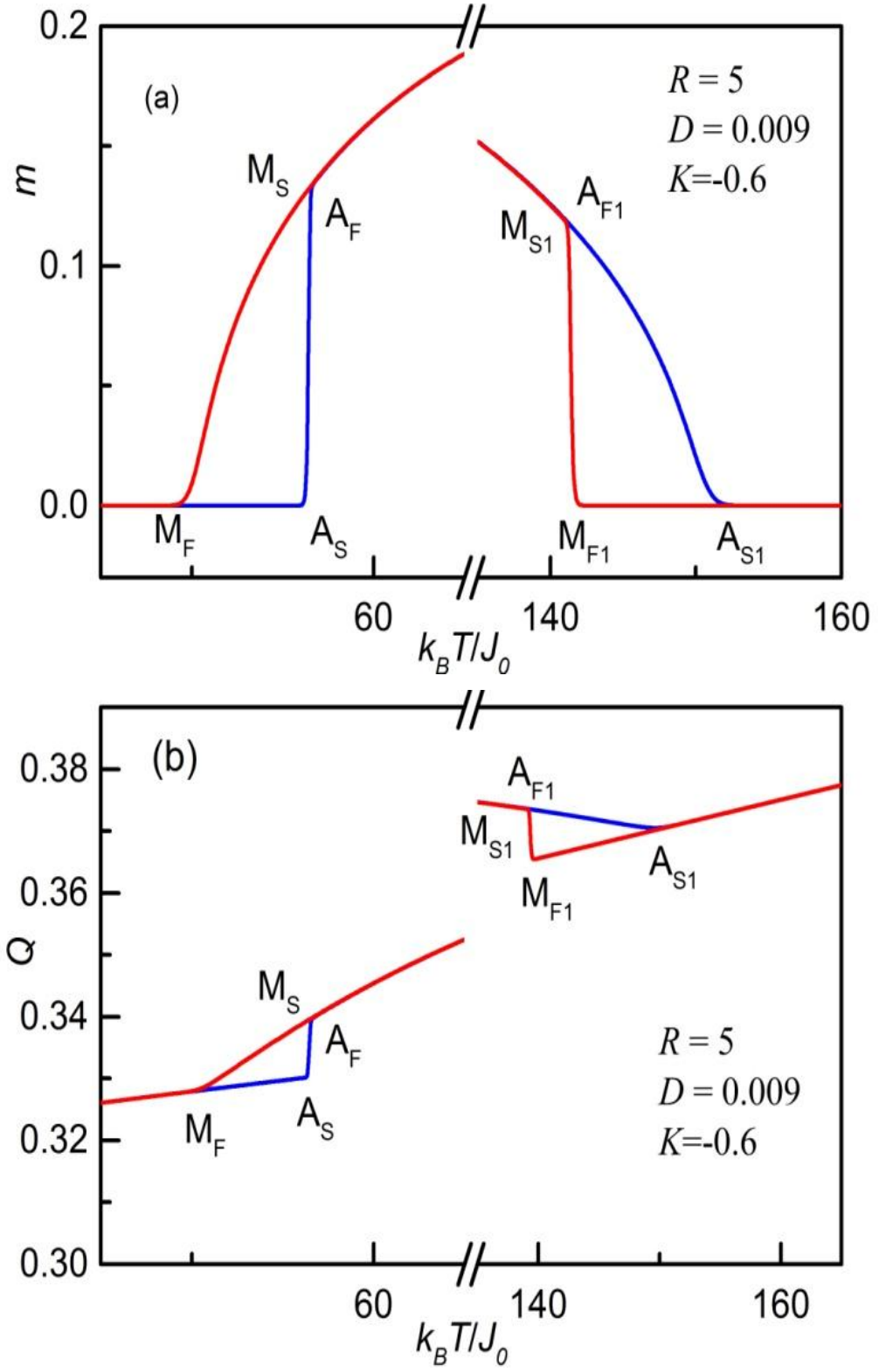
Şekil 4.16. Kompozit NP için (a) m - T ve (b) Q - T termal histerezis eğrileri.
 $R=5$, $K=-0.6$, $h=0.0$, $D=0.001$, $J_C=J_S=J_0=1$, $J_{CS}=-J_0=-1$



Şekil 4.17. Şekil 4.16 ile aynı fakat $D = 0.006$ için elde edildi.

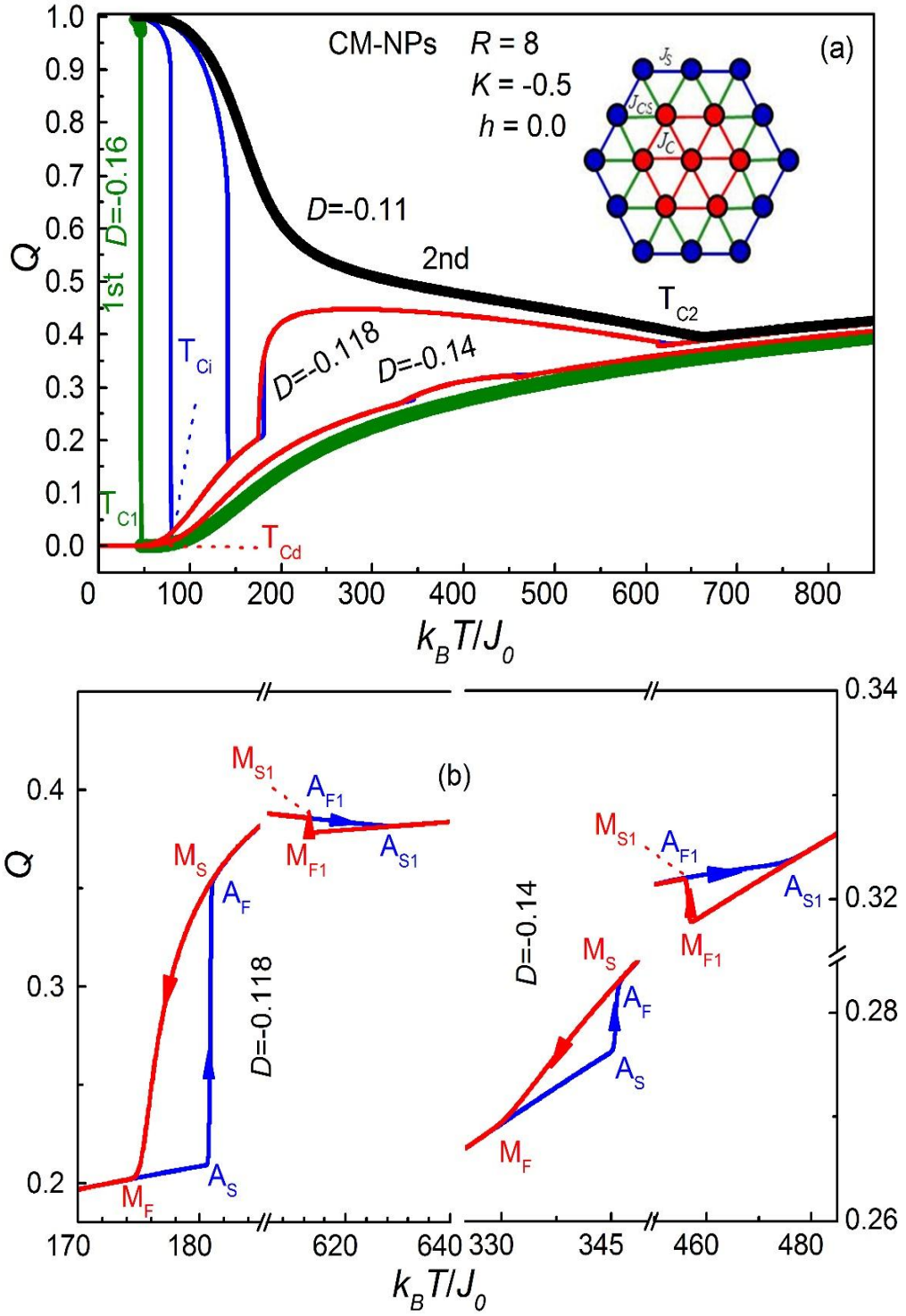


Şekil 4.18. Şekil 4.16 ile aynı fakat $D = 0.007$ için elde edilmiştir.



Şekil 4.19. Şekil 4.16 ile aynı fakat $D=0.009$ için elde edilmiştir

Bu tez çalışmasında esas olan durum kuadrupol özelliğın sıcaklıkla değışimi olduğundan, farklı D değęerlerinde dış manyetik alanın olmadığı altıgen örgülü kompozit NP için Q - T değışimleri bikuadratik etkileşme değeri ve parçacık yarıçapı değıştirilmek suretiyle genişletilmiştir (Şekil 4.20). Bu amaçla $K = -0.5$ ve $R = 8$ seçildi ve ortaya çıkan kuadrupol özellik birlikte tek grafik halinde Şekil 4.20a 'da sunuldu. Şekil 4.20a, kuadrupol özelliğın sıcaklıkla gelişimi farklı D değęerlerinde, ikinci- ve birinci-derece faz geçiş sıcaklıklarının da görüleceğı şekilde detaylıca düzenlendi. Bu şekilde ayrıca içerdeki altıgen yapı ile nanoparçacığı oluşturan atomların (Yalçın vd., 2015) detaylı bir dizilimi de yer almaktadır. Burada sistem ikinci-derece faz geçişinden birinci-derece faz dönüşümüne doğru bir değışim gösterirken, kritik sıcaklığın daha düşük değęerlere doğru kaydığı görülür. Birinci dereceden faz geçişinin gerçekteşmesi sonucu ise MT/AT geçişleri ile birlikte kuadrupol termal histerezisleri de oluşmuştur. Bulunan kuadrupol termal histerezis eğrilerin çok dar olması nedeniyle, bunlar Şekil 4.17b 'de detaylıca tekrar verildi. Dikkat edilmesi gereken önemli bir noktanın termal histerezis eğrileri hem negatif hem de pozitif D değęerinde elde ediliyor olmasıdır.



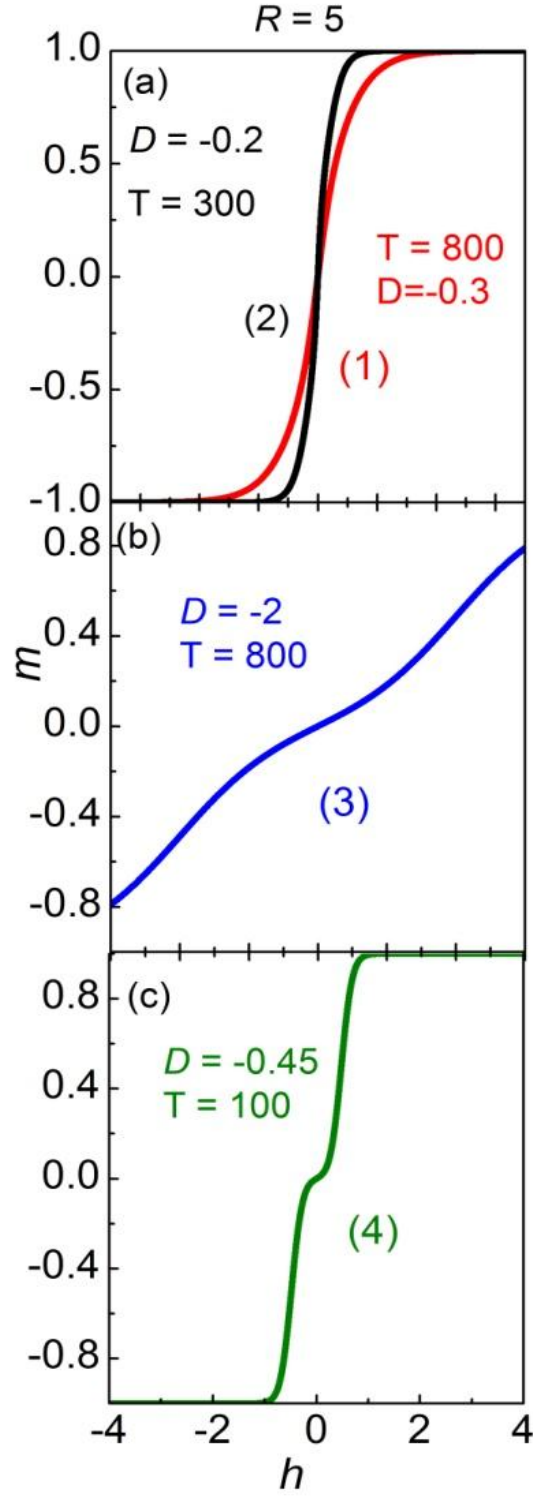
Şekil 4.20. Kompozit NP için (a) farklı D değerleri kullanılarak Q 'nun indirgenmiş sıcaklığa bağlı ($k_B T/J_0$) değişimi ve (b) (a) 'daki bazı kuadrupol termal histeresis eğrisinin açık formu. $R=8$, $K=-0.5$, $h=0.0$, $J_C = J_S = J_0 = 1$, $J_{CS} = -J_0 = -1$

Şekil 4.21 'de yarıçapı $R=5$ olan bir kompozit NP ($K=-0.6$) için manyetik histeresis ($m-h$) eğrileri verildi. Homojen NP için elde edilen manyetik histeresis eğrilerinde

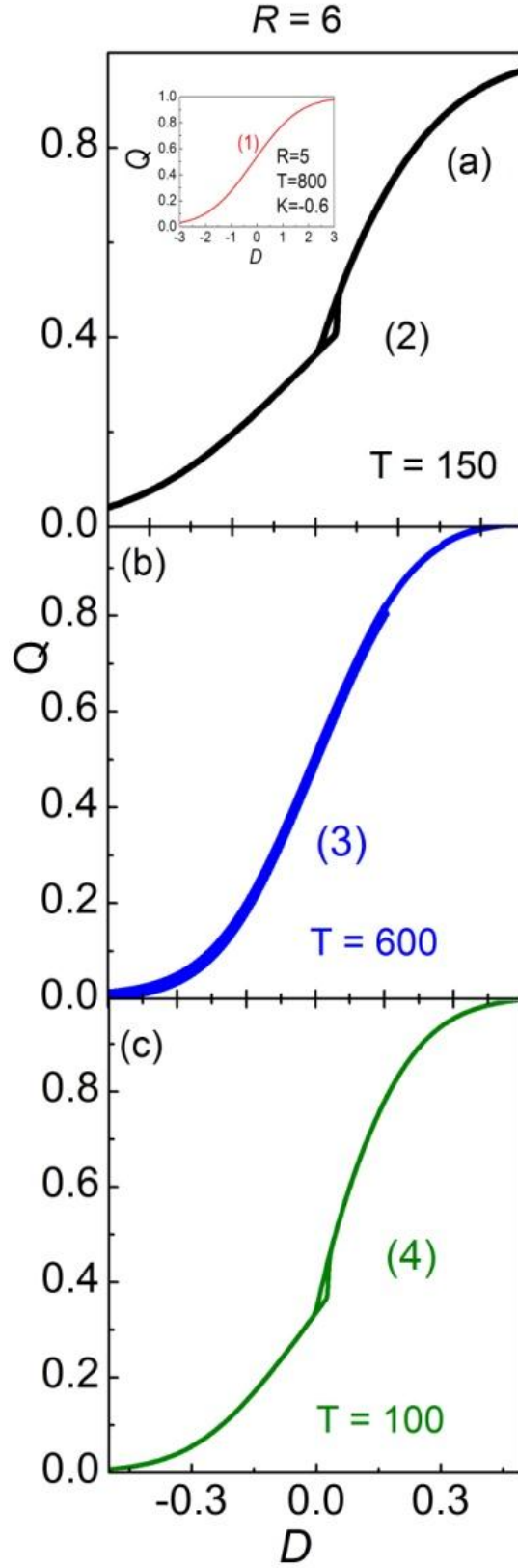
olduğu gibi, eğriler dört farklı ana bölgede meydana gelir. Bunlardan ilki yüksek sıcaklıktaki ($T=800$) $D=-0.3$ için çizilen 1 numaralı ve kırmızı renkli eğri PM davranışa karşılık gelir ve sıcaklık artışı/azalışı ile kendi üzerinden geçer (Şekil 4.21a). $D=-0.2$ kullanılarak çizilen 2 numaralı siyah renkli eğri düşük sıcaklıkta ($T=300$) çok az da olsa bir koersif alanın olduğu bir 2. bölge eğrisidir. Üçüncü bölgede ise $T=800$ ve $D=-2$ alınarak çizilen mavi renkli eğriye göre iki farklı PM davranış ortaya çıkar (Şekil 4.21b). Burada tek iyon anizotropi parametresinin 1 ve 2 numaralı bölgeden daha küçük ancak sıcaklığın 800 olduğu unutulmamalıdır. Son olarak, 4. bölgede ($T=100$, $D=-0.45$) iki farklı FM eğri bulundu (Şekil 4.21c).

Yarıçapı $R=6$ olan kompozit nanoparçacığın $Q-D$ histerezis eğrileri ise, Şekil 4.22 'de gösterildiği gibi elde edildi. Şekil 4.22a 'nın içindeki küçük şekilde yer alan kırmızı eğri yüksek sıcaklıktaki ($T=800$) histerezis eğrisi olup PM bir davranıştır. Yine Şekil 4.22a 'da, siyah renkteki kapalı $Q-D$ histerezis eğrisi küçük bir bölgede gözlemlendi ve bu bir FM davranış olarak görüldü. Bu eğrinin D 'nin sıfırdan küçük ve büyük kısımları birbirinden farklı olup bir asimetriklik söz konusudur. Bu durum literatürde yeni bir özellik olup halen çalışmalar devam etmektedir. Ancak şu açıkça söylenebilir; $Q-D$ histerezis eğrisi elde edilirken D 'nin işaretinin önemli olduğu anlaşıldı. Üçüncü bölgede ise ($T=600$, mavi eğri), $m-h$ 'den farklı olarak tek bir eğri davranışı devam etmektedir (Şekil 4.22b). Oysa $m-h$ 'de bu durum iki farklı PM eğri olarak bulunmuştu. Buradan çıkan sonuç şu ki; $Q-D$ histerezis eğrisinden çekirdek-yüzey tipi nanoparçacıkların bölgelerine dair bilgi ikincil derecede elde edilebilmektedir. Bu eğrilerde temel olan tek iyon anizotropi parametrelerinin değeridir. Son olarak, yeşil renkte elde edilen dördüncü bölgenin ($T=100$, yeşil eğri) davranışının Şekil 4.22a 'daki ikinci bölge eğrisine ($T=150$, siyah eğri) benzediği bulundu (Şekil 4.22c).

Burada sıcaklığın etken olduğu ve yakın değerlerin varlığı genel davranışı benzer kılmıştır. Oysa $m-h$ eğrisinde sıcaklık ta bir ayırt edici özellik olarak durmaktadır. Buradan çıkan sonuç ise $m-h$ eğrisindeki sınırları belli olan parametrelerin $Q-D$ 'de üzerinde bir miktar daha çalışılması gerektiğini göstermektedir. Bu hali ile bir yüksek lisans tezinden beklenen sonuçların elde edilmiş olduğu sonucuna varıldı.



Şekil 4.21. Şekil 4.10 ile aynı fakat kompozit NP için elde edilmiştir.



Şekil 4.22. Şekil. 4.11 ile aynı fakat yarıçapı $R = 6$ olan kompozit NP için elde edilmiştir.

BÖLÜM V

SONUÇ

Bu tez çalışmasında çekirdek-yüzey tipi homojen ve kompozit nanoparçacıkların kuadrupol düzen özellikleri detaylıca incelendi. Elde edilen sonuçların doğruluğunun kontrolü için öncelikli olarak çekirdek-yüzey tipi nanoparçacığın manyetik özellikleri daha önceki çalışmalardan ayrıştırılarak bulundu. Buradan elde edilen sonuçlar homojen ve kompozit nanoparçacıkların kuadrupol düzen özelliklerinin incelenmesine zemin oluşturması sağlandı.

Çekirdek yüzey tipi nanoparçacıklar öncelikli olarak tek bir domen şeklinde düşünülüp, yüzey atomları haricindeki bütün kısımların çekirdeği oluşturduğu tasarlandı. Bu bölgede kalan atomlar üç boyutta bilinen 14 Bravais örgülerinden birinde şekillenebilir. Bunların iki boyutta karşılığı ise 5 farklı Bravais örgüleridir. Genelde nanoparçacıklar en kolay ve ucuz tekniklerle elde edildiklerinde sıkı paket altıgen yapıda (hcp) şekillenirler. Bu tez çalışmasında modellenen nanoparçacıklar iki boyuta indirgenerek yorumlandığı için iki boyuttaki 5 farklı Bravais örgülerinden koordinasyon sayısı 6 olan altıgen şekil esas alındı. Bunun için üç boyutlu nanoparçacıkların kesitlerine karşılık gelen altıgen yapı kullanıldı.

Bu tür nanoparçacıkların modellenmesinde yeni nesil akıllı nanoparçacıkların kuadrupol düzen özellikleri detaylıca araştırılması için bir model Hamiltoniyen seçildi. Bu Hamiltoniyen’deki terimler; bilineer (J), bikuadratik (K) ve kristal alan (D) parametreleridir. Bunların her birisi çekirdek, yüzey ve çekirdek-yüzey (ara-yüzey) etkileşme parametrelerini içerecek şekilde üç farklı Hamiltoniyen oluşturularak yazıldı. Çekirdek-yüzey tipi nanoparçacıklarda dış manyetik alan, atomlarla yani spinlerle etkileştiği için ara bölgede bir Hamiltoniyen terimine katkı gelmez. Bu bölgede etkileşme çekirdek atomları ile yüzey atomları arasında gerçekleşir.

Tezin teorik kısmında detaylıca açıklandığı üzere nanoparçacıkların manyetizasyon ve kuadrupol düzen özelliklerini verecek ifadeler elde edildi. Bundan sonra bir algoritma oluşturuldu ve bir derleyiciye aktarıldı. Gerekli parametreler girilerek en mümkün ve en

anlamalı değerler kullanıldı. Buradan elde edilen sonuçlara göre özellikle manyetizasyon için elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu görüldü. Manyetizasyon ve kuadrupol düzen özelliklerin sıcaklıkla gelişiminden elde edilen faz geçiş sıcaklıklarında (Curie sıcaklığı) kompozit nanoparçacıkların homojen nanoparçacıkların Curie sıcaklığına göre daha düşük olduğu görüldü. Hem homojen hem de kompozit nanoparçacıkların birinci dereceden faz geçişlerinde yapısal geçişler olduğundan bu faz geçişi üzerinde artan sıcaklıkla birlikte yeni yapısal ve fiziksel özelliklerle karşılaşılabilir. Bu tez çalışmasında elde edilen ve birinci dereceden faz geçişinin üzerindeki sıcaklıklarda gözlenen martensitik ve östenitik fazlar birlikte değerlendirildiğinde termal histerezis eğrileri elde edildi. Homojen nanoparçacıklar için elde edilen termal histerezis eğrileri kompozit nanoparçacıklar için de elde edildi. Ancak kompozit nanoparçacıklar için elde edilen termal histerezis eğrileri homojen nanoparçacıklara göre daha büyük nanoparçacıklarda ancak g zlenebildi. Bu durum doğrudan sistemin net manyetizasyonu ile ilgili olmasının bir sonucudur.

Benzer bir durum kuadrupol düzen özelliklerin tek iyon anizotropi parametrelerinden elde edilen histerezis eğrilerinde de görüldü. $Q-D$ histerezis eğrileri yeni tür olan ve doğrudan deneysel bir ölçümle elde edilemeyecek pozisyonda olan bir sonuçtur. Yani $Q-D$ histerezis eğrileri daha dar bölgede, simetrik olmayan ve tek iyon anizotropi parametresinin (D) pozitif veya negatif olmasına göre şekillenen bir eğridir. Buradan elde edilen sonuç ise yapılacak teknolojik çalışmalarda kuadrupol düzene duyarlı bir araştırma olduğunda bu durumun tespitinin kolay olmayacağıdır. Bu tezde olduğu gibi yeni araştırmalara öncülük etmesi açısından kuadrupol düzen özelliklerin önemi ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

Aktaş, B., Tagirov, L. and Mikailov, F., “Nanostructures Magnetic Materials and Their Applications”, KluwerAcademic Publisher, Nato Science Series, **Mathematics Physics and Chemistry** 143, 2003.

Aktaş, B., Tagirov, L. and Mikailov, F., “Magnetic Nanostructures”, **Springer Series in materials science** 94, 2006.

Babin, V., Garstecki, P. And Holyst, R., “Multiple Photonic B and Gaps in the Structures Composed of Core-Shell Particles”, **J. Appl. Phys.** 94, 4244, 2003.

Benyoussef, A., Biaz, T., Saber, M. and Touzani, M., “The Spin-1 Ising Model with a Random Crystal Field: The Mean-Field Solution”, **J. Phys. C: Solid State Phys.** 20, 5349–5354, 1987.

Blume, M., Emery, V. J. and Griffiths, R. B., “Ising Model for the λ Transition and Phase Separation in He^3 - He^4 Mixtures”, **Phys. Rev. A** 4, 1071-1077, 1971.

Bolle, D., Busquets Blanca, J., Shimb, G. M. and Verbeirena, T., “The Blume–Emery–Griffiths Neural Network: Dynamics for Arbitrary Temperature”, **Physica A** 331, 319-350, 2004.

Burns, T. E., Dennison, J.R. and Kite, J., “Extended BEG Model of Monohalogenated Methanes Physisorbed on Ionic Crystals”, **Surface Science** 554, 211-221, 2004.

Campbell, J. L., Arora, J., Cowell, S. F., Garg, A. Eu, P., Bhargava, S. K. and Bansal, V., “Quasi-Cubic Magnetite/Silica Core-Shell Nanoparticles as Enhanced MRI Contrast Agents for Cancer Imaging”, **PLoS ONE** 6, e21857 (1) - e21857 (8), 2011.

El-Sayed, M. A. and Yoo, J. W., “Preparation of Cubic Pt Nanoparticles deposited on Alumina and their Application to Propene Hydrogenation”, *Chem C at Chem.* 2, 268–271, 2010.

Goveas, N. and Mukhopadhyay, G., “Study of Blume-Emery-Griffiths Model by a Modified Bethe-Peierls Method”, *Phys. Scripta* 56, 661–666, 1997.

Gauvin, L., Nadal, J. P. and Vannimenus, J., “Schelling Segregation in an Open City: A Kinetically Constrained Blume-Emery-Griffiths Spin-1 System”, *Phys. Rev. E* 81, 066120–1–9, 2010.

Gu, B. L., Ni, J. and Zhu, J. L., “Structure of the Alloy $(GaAs)_{1-x}Ge_{2x}$ and Its Electronic Properties”, *Phys. Rev. B* 45, 4071–4076, 1992.

Hoston, W. and Berker, A. N., “Multicritical Phase Diagrams of the Blume-Emery-Griffiths Model with Repulsive Biquadratic Coupling”, *Phys. Rev. Lett.* 67, 1027–1030, 1991.

Iglesias, O. and Labarta, A., “Finite-Size and Surface Effects in Maghemite Nanoparticles: Monte Carlo Simulations”, *Phys. Rev. B* 63, 184416 (1)–184416 (11), 2001.

Iglesias, O., Labarta, A. and Ritort, F., “Monte Carlo Study of the Finite-Size Effects on the Magnetization of Maghemite Small Particles”, *J. Appl. Phys.* 89, 7597–7599, 2001.

Ising, E., “Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus”, *Zeitschrift für Physik* 31, 253–258, 1925.

Kaneyoshi, T., “Phase Diagrams of a Nanoparticle Described by the Transverse Ising Model”, *Phys. Status Solidi B*, 242, 2938–2948, 2005.

Kartopu, G. and Yalçın, O., Electrodeposited Nanowires and their Applications, edited by N. Lupu), available from: <http://sciyo.com/articles/show/title/fabrication-and-applications-of-metal-nanowire-arrays-electrodeposited-in-ordered-porous-templates> **INTECH**, 2010.

Keskin, M. and Meijer, P. H. E., “Dynamics Of A Spin-1 Model With The Pair Correlation”, **J. Chem. Phys.** 85, 7324–7333, 1986.

Keskin, M. and Erdinç, A., “Multicritical phase diagrams of the Blume–Emery–Griffiths model with repulsive biquadratic coupling including metastable phases: the pair approximation and the path probability method with pair distribution”, **J. Magn. Magn. Mater.** 283, 392–408, 2004.

Kokorina, E. E. and Medvedev, M. V., “Magnetization Curves of Nanoparticle with Single-Ion Uniaxial Anisotropy”, **J. Magn. Magn. Mater.** 310, 2364–2366, 2007.

Koza, Z., Jasiukiewicz, C. and Pekalski, A., “Transfer Matrix Methods in the Blume-Emery-Griffiths Model”, **Physica A** 164, 191-206, 1990.

Lee, H. H. and Landau, D. P., “Phase Transitions in an Ising Model for Monolayers of Coadsorbed Atoms”, **Phys. Rev. B** 20, 2893–2900, 1979.

Leite, V. S. and Figueiredo, W., “Monte Carlo Simulations of Antiferromagnetic Small Particles”, **Brazilian J. Phys.** 34, 452–454, 2004.

Netz, R. R. and Berker, A. N., “Renormalization-Group Theory of an Internal Critical-End-Point Structure: The Blume-Emery-Griffiths Model with Biquadratic Repulsion”, **Phys. Rev. B** 47, 15019–15022, 1993

Özüm, S., Yalçın, O., Erdem, R., Bayrakdar, H., and Eker, H. N., “Martensitic and austenitic transformation in core-surface cubic nanoparticles”, **J. Magn. Magn. Mater.** 373, 217-221, 2015.

- Rego, L. G. C. and Figueiredo, W., “Magnetic Properties of Nanoparticles in the Bethe-Peierls Approximation”, **Phys. Rev. B** 64, 144424 (1)–144424 (7), 2001.
- Shapovalov, I. P., and Sayko, P. A., “Quadrupole hysteresis in uniaxial magnet with unity spin”, **J. Magn. Magn. Mater.** 348, 132–135, 2013.
- Stoner, E. C. and Wohlfarth, E. P., “A Mechanism of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Alloys”, **Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A** 240, 599–642, 1948.
- Yalcin, O., Erdem, R. and Demir, Z., “Magnetic Properties and Size Effects of Spin-1/2 and Spin-1 Models of Core-Surface Nanoparticles in Different Type Lattices”, **Smart Nanoparticles Technology** 541-560, 2012.
- Yalçın, O., Erdem, R. and Övünç, S., “Spin-1 Model of Noninteracting Nanoparticles”, **Acta Phys. Pol. A** 114, 835–844, 2008.
- Yalçın, O., Erdem, R. and Özüm, S., "Origin of the martensitic and austenitic phase transition in core-surface smart nanoparticles with size effects and hysteretic splitting" **J. Appl. Phys.** 115, 054316 (1)–054316 (7), 2014.
- Yalçın, O., Erdem, R., Özüm, S., and Demir, Z., “The phase diagrams with influence of biquadratic exchange coupling on martensitic–austenitic transformations for core–surface nanoparticles”, **J. Magn. Magn. Mater.** 389, 120-123, 2015.
- Yang, Y., “Blume-Emery-Griffiths Dynamics in Social Networks”, **Physics Procedia** 3, 1839-1844, 2010.
- Zahraouy, H. E., Bahmad, L. and Benyoussef, A., “Phase Diagrams of the Blume-Emery-Griffiths Thin Films”, **Brazilian J. Phys.** 36, 557-561, 2006.
- Zaim, A., Kerouad, M. and Amraoui, Y. E., “Magnetic Properties of Ferrimagnetic Core/Shell Nanoparticle Ising Model: A Monte Carlo Simulation Study”, **J. Magn. Magn. Mater.** 321, 1077–1083, 2009.

ÖZGEÇMİŞ

Nazlı DEMİRER 13.10.1987 tarihinde Niğde’de doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Niğde’de tamamladı. 2006 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünden 2011 yılında mezun oldu. Evli ve bir çocuk annesidir. 2011 yılında Niğde Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğretimine başladı. Halen Yüksek Lisans eğitime devam etmektedir.