

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**KARMA SPİN-3/2 VE SPİN-5/2 İSİNG SİSTEMİNİN DİNAMİK
MANYETİK ÖZELLİKLERİNİN GLAUBER GEÇİŞ ORANLARI
TEMELLİ ETKİN-ALAN TEORİSİ İLE İNCELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Ali YILMAZ**

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet ERTAŞ**

Yüksek Lisans Tezi

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi
Tarafından FYL-2017-7356 kodu ile desteklenmiştir.**

**Mart 2018
KAYSERİ**

Doç. Dr. Mehmet ERTAŞ danışmanlığında Ali YILMAZ tarafından hazırlanan “Karma Spin-3/2 ve Spin-5/2 Ising Sisteminin Dinamik Manyetik Özelliklerinin Glauber Geçiş Oranları Temelli Etkin-Alan Teorisi ile İncelenmesi” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

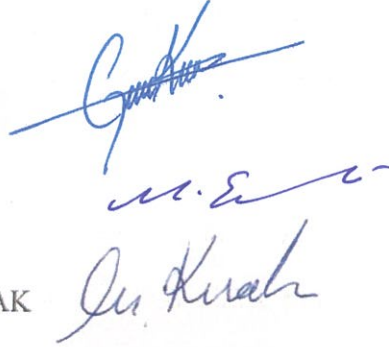
23.03.2018

JÜRİ:

Başkan: Doç. Dr. Gökhan KOÇAK

Üye : Doç. Dr. Mehmet ERTAŞ

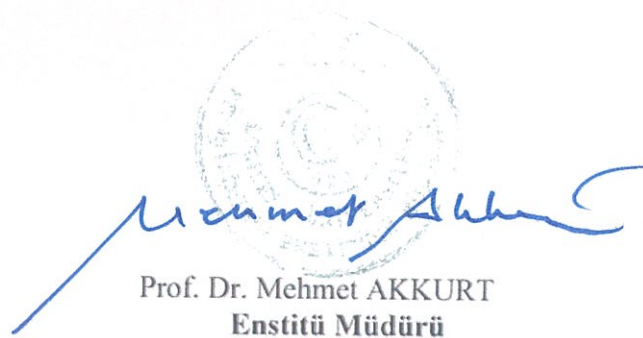
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muharrem KIRAK



ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 03/04/2018 tarih ve 2018/15-02 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

03 / 04 / 2018



Prof. Dr. Mehmet AKKURT
Enstitü Müdürü

“Karma Spin-3/2 ve Spin-5/2 Ising Sisteminin Dinamik Manyetik Özelliklerinin Glauber Geçiş Oranları Temelli Etkin-Alan Teorisi ile İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi 'ne uygun şekilde hazırlanmıştır.



Ali YILMAZ
Tezi Hazırlayan



Doç. Dr. Mehmet ERTAŞ
Danışman



Fizik Anabilim Dalı Başkanı
Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim.



Ali YILMAZ

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Bana bu tez çalışma konusunu veren ve çalışmalarım süresince fikir ve tecrübeleri ile bana büyük destek sağlayan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Mehmet ERTAŞ'a içtenlikle teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince FYL-2017-7356 kodlu proje kapsamında sağladıkları destekten dolayı Erciyes Üniversitesi Araştırma Fonuna teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman bana maddi ve manevi yönden destek olan aileme, canım annem Selma Yılmaz'a, kardeşim Zülal YILMAZ BALCI'ya ve Rafet YILMAZ'a teşekkür ederim.

Tanıdığım günden bu yana bana her türlü destek olan değerli kardeşim Nevşehir Üniversitesi Cumhuriyet Tarihi Anabilim Dalı yüksek lisans öğrencisi Bumin Kağan ÖZBEK'e teşekkür ederim.

Bu tez, eğitim hayatım boyunca hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, derdime ve mutluluğuma ortak olan çok kıymetli babam Ahmet YILMAZ'a ithafen yazılmıştır.

**KARMA SPİN-3/2 VE SPİN-5/2 İSİNG SİSTEMİNİN DİNAMİK MANYETİK
ÖZELLİKLERİNİN GLAUBER GEÇİŞ ORANLARI TEMELLİ ETKİN ALAN
TEORİSİ İLE İNCELENMESİ**

Ali YILMAZ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Mart 2018

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet ERTAŞ

KISA ÖZET

Kare örgü üzerinde yarım-tamsayı ($\sigma = 3/2$) yarım tamsayı ($S = 5/2$) spinlerden oluşan karma ferrimanyetik Ising modelinin dinamik manyetik histerik özellikleri dinamik etkin-alan teorisi (DEAT) kullanılarak çalışıldı. Dinamik manyetik histerezis eğrileri üzerine sıcaklığın, kristal alanın ve frekansın etkisi kapsamlıca tartışıldı. Sistemde yalnızca tekli histerezis davranış gözlemlendi. Elde edilen sonuçların bazı deneysel ve teorik çalışmalarla nicel olarak uyumlu olduğu görüldü. Bununla beraber, karma-spin ($3/2, 5/2$) Ising sisteminin artık mıknatıslanma ve zorlayıcı manyetik alan eğrileri elde edildi.

Anahtar Kelimeler: Karma-spin ($3/2, 5/2$) Ising modeli, Etkin-alan teorisi, Glauber-tipi stokastik dinamik, Dinamik histerezis eğrileri, Dinamik artık mıknatıslanma, Dinamik zorlayıcı manyetik alan.

THE DYNAMIC MAGNETIC PROPERTIES OF A MIXED SPIN-3/2 AND SPIN-5/2 ISING SYSTEM HAVE BEEN STUDIED BY USING EFFECTIVE-FIELD THEORY BASED ON GLAUBER TYPE STOCHASTIC DYNAMIC

Ali YILMAZ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M. Sc. Thesis, March 2018

Thesis Supervisor: Doç. Dr. Mehmet ERTAŞ

ABSTRACT

The dynamic magnetic hysteric properties of a mixed ferrimagnetic Ising model, consisting of the half-integer ($\sigma = 3/2$) and half-integer ($S = 5/2$) spins on square lattice, have been studied by using dynamic effective-field theory (DEFT). The effects of temperature, crystal-field and frequency on the dynamic magnetic hysteresis curves are discussed comprehensively. One hysteresis behavior is observed in the system. The obtained results are compared with some theoretical works and good overall agreement is observed. Moreover, dynamic remanent magnetization and coercive field of mixed-spin ($3/2, 5/2$) Ising system are obtained.

Keywords: Mixed-spin ($3/2, 5/2$) Ising system, Effective-field theory, Glauber-type stochastic dynamic, Dynamic hysteresis curves, Dynamic coercive fields, Dynamic remanent magnetizations

İÇİNDEKİLER

KARMA SPİN-3/2 VE SPİN-5/2 İSİNG SİSTEMİNİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELLİKLERİNİN GLAUBER GEÇİŞ ORANLARI TEMELLİ ETKİN-ALAN TEORİSİ İLE İNCELENMESİ

	<u>Sayfa</u>
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI.	ii
KABUL VE ONAY.	iii
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR.	iv
ÖZET.	v
ABSTRACT.	vi
İÇİNDEKİLER.	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.	ix
GİRİŞ.	1

1. BÖLÜM

MODELİN TANITIMI VE ETKİN-ALAN DİNAMİK DENKLEMLERİNİN ELDE EDİLMESİ

1.1. Modelin Tanıtımı.	9
1.2. Metot.	10

2. BÖLÜM

DİNAMİK HİSTERETİK ÖZELLİKLER

Dinamik Histerik Özellikler.	18
--	-----------

3. BÖLÜM

SONUÇ-TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Sonuç-Tartışma ve Öneriler.....	29
KAYNAKLAR.....	32
ÖZGEÇMİŞ.....	38

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 1.1. Karma spin ($3/2$, $5/2$) Ising sistemi İki iç içe geçmiş kare örgü üzerindeki spin düzenlemesinin taslağı. 9
- Şekil 2.1. Dinamik zorlayıcı alan (coercivity fields) ve dinamik artık mıknatıslanma..... 19
- Şekil 2.2. Kare örgü üzerinde karma spin ($3/2$, $5/2$) Ising modelinin farklı sıcaklıklar için ($T = 0.1, 5.0, 5.5, 7.0, 8.0, 9.0, 12$) dinamik histerezis alan eğrileri..... 21
- Şekil 2.3. Kare örgü üzerinde karma spin ($3/2$, $5/2$) Ising modelinin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin sıcaklığa bağlı davranışları. (a) zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields), (b) artık mıknatıslanma (remanent magnetizations)..... 22
- Şekil 2.4. Kare örgü üzerinde karma spin ($3/2$, $5/2$) Ising modelinin farklı kristal alan değerleri için ($D = 3.0, 1.0, 0.1, -0.5, -1.5, -2.0, -5.0$) dinamik histerezis alan eğrileri..... 24
- Şekil 2.5. Kare örgü üzerinde karma spin ($3/2$, $5/2$) Ising modelinin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin kristal alan etkileşim parametresine bağlı davranışları. **(a)** zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields), **(b)** artık mıknatıslanma (remanent magnetizations)..... 25
- Şekil 2.6. Kare örgü üzerinde karma spin ($3/2$, $5/2$) Ising modelinin farklı salınımlı dış manyetik alan değerleri için ($w = 0.04\pi, 0.06\pi, 0.1\pi, 0.5\pi$ ve 1.0π) dinamik histerezis alan eğrileri..... 26
- Şekil 2.7. Kare örgü üzerinde karma spin ($3/2$, $5/2$) Ising modelinin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin salınımlı dış manyetik alan frekansına bağlı davranışları. **(a)** zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields), **(b)** artık mıknatıslanma (remanent magnetizations)..... 27

GİRİŞ

Yoğun madde ve istatistik fiziğinde, aralarında kuvvetli bir etkileşen parçacıklardan oluşan istatistiksel sistemlerin incelenmesi, matematiksel birçok problemi içinde barındırmaktadır. Bu problemler, teorikçileri mevcut bu sistemlerin matematiksel basit yollarını bulmaya ve çalışmaya yönlendirmiştir. Bu problemlerin aşılabilmesi için günümüzde yaklaşık çözümlerin elde edilmesinde modern bilgisayardan faydalanılmaktadır. Matematiksel basitlik bu çözümlerde aranılan temel özelliklerden bir tanesidir. Farklı bir ifadeyle, aralarında kuvvetli bir şekilde etkileşen parçacıkların davranışını açıklayan matematiksel basit bir ifade bulmak çok önemlidir. İlki ve en başarılı olan model tek boyutta faz dönüşümünü açıklamak için Wilhelm Lenz [1] tarafından önerilmiş ve öğrencisi Ernest Ising [2-3] tarafından çözümleme yapılmıştır. Bu modelin adı Ising modelidir. Ising modeli, manyetik malzemelerin fiziksel özelliklerini (faz geçişlerini, faz diyagramlarını vb.) incelemek için geliştirilen yani manyetik sistemleri çözmek için ortaya atılan ve günümüzde çok aktif olarak kullanılmakta olan bir sistemdir. Ayrıca Ising modeli, örgü-gaz modeline benzeyen akışkanlar sistemindeki bir modeldir. Modelin kesin olarak iki boyutta çözümü Onsager [4] tarafından yapılmıştır. Ising modeli içerisinde yaygın olarak uygulanan en basit kullanılan model spin-1/2 modelidir. Ising sistemindeki bu model, gazların soğurulması, ikili sıvı veya gazların faz geçişleri, akışkan konsantrasyonu vb. gibi sistemlerin incelenmesinde kullanılmıştır. Fakat termodinamik davranışları spin-1/2 Ising modeli ile tanımlanamayan; He³-He⁴ gibi ikili sıvı karışımında, katı ortohidrojen, yarı iletken alaşımlar, seyreltik manyetik sistemler, re-entrant olaylar, düzenli-düzensiz faz geçişleri, manyetik düzenlilik gibi sistemleri incelemek için spin-1 Ising modeli ideal bir modeldir. Spin-1 modeli 1960'lı yıllarda ortaya atılmış ve hala da günümüze kadar devam eden en önemli modellerden birisidir. Bu model iki düzen parametrelili ve

üç durumlu bir sistemdir. En basit spin-1 Ising modeli, kristal-alan etkileşme (D) ve bilineer etkileşme (J) Hamiltonyenli spin-1 Ising modeli olup genelde bu model Blume-Capel (BC) modeli olarak tanımlanır. Bu model ilk olarak Blume [5] ve Capel [6-7] tarafından bağımsız olarak geliştirilmiştir. Diğer taraftan, en yakın komşu çifti keyfi bilineer (J), kristal alan (D) ve bikuadratik (K) etkileşme parametrelili spin-1 Ising modeli, Blume-Emery-Griffiths (BEG) modeli [8] olarak adlandırılır. BEG modeli ilk olarak $\text{He}^3\text{-He}^4$ karışımlarının termodinamik özelliklerinin araştırılması için kullanılmıştır. Bununla birlikte bu model, yarı-iletken alaşımlarda düzen, donma, faz diyagramlarındaki re-entrant olaylar, elektronik iletkenlik modelleri vb. gibi birçok fiziksel olayların araştırılmasında kullanılmış ve hala devam etmektedir. Yukarıdaki bahsedilen olayların incelenmesi ortalama alan yaklaşımı, renormalizasyon grup tekniği, etkin-alan teorisi, Monte-Carlo metodu, kümesel değişim metodu kullanılarak yapılmıştır. Yüksek spinli Ising modelleri termomanyetik ve moleküler tabanlı kayıt sistemlerini, telafi sıcaklıklarının varlığını, ferrimanyetik yapıya sahip karmaşık bileşikler, amorf yapıya sahip alaşımları, seyreltik ferrimanyetik sistemleri, moleküler tabanlı mıknatısları, yarı-iletken alaşımları, ferrimanyetik düzenlilik ve düzenli-düzensiz faz geçişleri benzeri daha karmaşık sistemlerde inceleme yapmak için kullanılmaktadır. Yüksek spinli Ising sistemleri içerisinde en önemli olanları spin-3/2, spin-2 ve spin-5/2 Ising sistemleridir. Nadir toprak bileşenlerinden olan DyVO_4 (Dysprosium Vanadate) elementi üzerinde yapılan deneylerde [9-13], DyVO_4 'ün 14K'de tetragonal yapıdan ortorombik yapıya kristalografik ve 3 K'de de manyetik olmakla beraber art arda iki faz geçişi verdiği gözlenmiştir. Bunun gibi sistemler ise, ilk olarak Sivardière ve Blume [14] tarafından önerilen dört durumlu spin-3/2 Ising modeliyle açıklanmaktadır. Sonrasında Krinsky ve Mukamel [15] spin-3/2 Ising modeli ile karbondioksit (C_2O), etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), ve su (H_2O)'dan meydana gelen sıvı karışımın açıklanabildiğini ve Sivardière [16] de spin-3/2 Ising modelinin çift spin-1/2 Ising modeline özdeş olduğunu göstermiştir. Bir diğer önemli yüksek spinli sistem, spin-2 Ising sistemidir. Spin-2 Ising modeli üzerine ilk çalışma, genelleştirilmiş Bethe yaklaşımı kullanarak, Oguchi ve Obokata tarafından yapıldı [17]. Bu model TmCd ve TmZn moleküllerinin faz dönüşümlerini göstermekte kullanılmıştır [18]. Ray ve Sivardière moleküler alan yaklaşımı ile spin-2 ikili-üçlü sistemini kullanmak suretiyle dipolar ve kuadrupolar düzen parametreleri üzerine çalışma yapmışlardır [19]. Iwashita ve arkadaşları [20], bikuadratik (K) etkileşme parametresinin negatif değerleri için,

dört-spin model yaklaşımını kullanarak, bilineer (J) ve bikuadratik (K) etkileşme parametrelili $S = 1, 3/2, 2$ ve 3 Ising sisteminin manyetik özelliklerini araştırdılar. Önemli bir diğer yüksek spinli sistem olan, spin-5/2 Ising modeline dair ilk çalışmayı ise çift yaklaşım için kümesel değişim yöntemi ile Tucker [21] tarafından yapılmıştır. Tucker çalışmasında, manyetizasyonun sadece termal değişimini araştırmıştır. Tucker'in çalışmasından bu yana, spin 5/2 Ising modellerinin çeşitli yönleri ortalama-alan yaklaşımı (OAY) [22], etkin-alan teorisi (EAT) [23] ve Renormalizasyon Grup (RG) [24] yöntemleriyle araştırılmıştır. Bu modeller Rb_2MnF_4 molekülünün faz dönüşümlerini açıklarken kullanılmıştır [25]. Bununla beraber son dönemlerde, karma-spin Ising sistemleri istatistiksel ve yoğun madde fiziğinde fazlaca çalışılan konulardan olmasının sebepleri ise: (i) Bunların, termomanyetik kayıt sistemlerinde teknolojik olarak potansiyel uygulamalarının varlığı [26]. (ii) Bu sistemler saf spin sistemlerine nispeten daha düşük öteleme simetrisine sahip olduklarından, saf spin sistemlerinde gözlemlenemeyen birçok yeni kritik olayların karma-spin sistemlerinde görülmesi. (iii) Bu sistemlerin, moleküler tabanlı manyetik malzemelerin incelenmesinde model oluşturabilmesi [27]. (iv) Belli şartlar altında bu sistemlerde kritik sıcaklıktan düşük bir sıcaklık değerinde toplam mıknatıslanmanın yok olduğu telafi sıcaklıklarının gözlenmesidir. Telafi sıcaklıklarının varlığı ise teknolojik uygulamalar için önemli bir özelliktir. Farklı spinlerden oluşan çok sayıda karma-spin Ising sistemi vardır.

Karma-spin sistemleri yarım tamsayılı- yarım tamsayılı, yarım tamsayılı-tamsayılı ve tamsayılı-tamsayılı spin sistemlerinden oluşabilir. Bu karma-spin sistemlerine örnek olarak, yarım tamsayılı- yarım tamsayılı karma-spin sistemlerine, karma-spin (1/2, 3/2), spin (1/2, 5/2), spin (3/2, 5/2) Ising sistemlerini, yarım tamsayılı-tamsayılı karma-spin sistemlerine karma-spin (1/2, 1), spin (1, 3/2), spin (1/2, 2) spin (1, 5/2), spin (3/2, 2) ve spin (2, 5/2) Ising sisemlerini, son olarak tamsayı-tamsayı karma-spin sistemlerine karma-spin (1, 2) Ising sistemini verebiliriz. Bu sistemlerin çözümleri kesin olarak, Bethe örgüsü, zar (dice) örgüsü, bal peteği örgüsü, banyo döşeme (bathroom tile) tipi örgü, iki-katlı Cayley ağacı ve dekore edilmiş düzlemsel örgüler için yapılmıştır. Bu karma-spin sistemlerinin denge faz geçişleri ve denge faz diyagramları, reentrant olaylar, krtitik üsteller, denge histerik özellikler, düzen parametrelerinin sıcaklıkla değişimi vb. gibi denge durumunun özellikleri denge istatistiksel fiziğinde geliştirilen ve iyi bilinen kapalı form yaklaşımları (Bragg-Williams, Bethe-Peierls (BP), kümesel

degisim, ortalama-alan yaklasigi (OAY) v.s.), seriye açılım, transfer matris (TM), etkin- alan teorisi (EAT), Monte Carlo (MC) hesaplamaları, renormalizasyon grup (RG) teknikleri v.b. gibi yöntemlerle incelenmiş ve incelenmeye devam edilmektedir. Bu karma-spin sistemlerinin denge durumunun özellikleri üzerine çok sayıda çalışma olmasına rağmen, dinamik faz geçiş (DFG) sıcaklıkları, dinamik faz diyagramları, dinamik telafi sıcaklıkları, dinamik reentrant olaylar, dinamik histerik özellikler vb. gibi dinamik manyetik özellikleri üzerine yapılan çalışma sayısı denge özellikleri üzerine yapılan çalışma sayısına oranla çok daha azdır.

Teorik yoğun madde fiziğinin en önemli aynı zamanda en zor problemlerinden birisi de fiziksel kooperatif olayların dinamik davranışlarının incelenmesidir. Bundan dolayı, yukarıda belirtildiği gibi, bu fiziksel kooperatif sistemlerin dinamik manyetik özellikleri üzerine çok daha az çalışma yapılmış olup, bu sistemlerin dinamik davranışları hakkında yapılacak çalışmalar zor olan konulara katkı sağlayacaktır. Dinamik davranışların en önemli problemleri arasında dinamik histerik davranışların (DHD) ve dinamik faz geçiş (DFG) sıcaklıklarının incelenmesi yer alır. Manyetik kayıt ortamı açısından histerik özellikler (dinamik histerezis alanı, dinamik coercivity ve dinamik artık mıknatıslanma) çok önemlidir. Gerçek manyetik kayıt ortamı kalite testleri histerezis tabanlı yöntemlerle yapılır. Bununla birlikte, manyetik histerik özellikler, ferromanyetik ince filmler için büyük bir öneme sahiptir. Diğer taraftan yukarıda da belirtildiği gibi dengesiz sistemlerdeki ilginç problemlerden birisi, dengesiz veya dinamik faz geçiş (DFG) sıcaklıklarının hesaplanması ve dinamik faz diyagramlarının elde edilmesidir. Dinamik faz geçişlerine sebep olan mekanizma kesin olarak keşfedilmediği gibi temel fenolojisi de halen çok az geliştirilebilmiştir ve bundan dolayı da üzerinde çok çalışılan ve çalışması gerekli olan konulardan birisi olmuştur. DFG için deneysel deliller çok ince ferromanyetik filmlerde, YBaCuO filmlerde, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ süper iletken bileşiğinde ve PEN (polietilen naftalin) nanobileşiklerinde gözlenmiştir. Ayrıca DFG'lerin evrenin ilk yaratılışının açıklanmasında rol oynayabileceği düşünülebilmektedir. Karma yarım tamsayı-yarım tamsayı spin sistemleri diğer karma-spin sistemleri ile karşılaştırıldığında çok ilginç yapıya sahip oldukları görülmüştür. Çünkü bu sistemler çoklu kritik davranış, değişkenlik (instability) veya manyeto elastik geçişler sergilemesi ve üzerinde az çalışılmış olmalarındandır [28]. Çok iyi bilinen ve üzerinde sürekli olarak çalışılan yarım

tamsayı-yarım tamsayı karma-spin Ising sistemlerinden birisi karma-spin ($1/2$, $3/2$) Ising modelidir. İlk olarak Bobák ve Jurcišin tarafından EAT kullanılarak çalışılan bu karma-spin ($1/2$, $3/2$) Ising modeli, telafi sıcaklığının sadece spinlerin büyüklüğüyle bağlantılı değil örgünün yapısıyla da bağlantılı olduğu gösterilmiştir [29]. Bobák ve Jurcišin EAT kullanarak bal petegi örgüsü üzerinde, bilinear ve kristal-alan etkileşim parametrelili seyreltik karma-spin ($1/2$, $3/2$) Ising modelini incelemiş ve modelin ikili telafi noktaya sahip olduğunu bulmuşlardır [30]. Farklı olarak bu karma-spin sisteminin denge davranışları MC yöntemi [31] ile detaylı bir şekilde çalışılmıştır. Enine Ising modelinin manyetik özellikleri, kristal-alan etkileşimli karma-spin ($1/2$, $3/2$), EAT kullanılarak detaylı biçimde araştırılmıştır [32-34]. Modelin düzen parametrelerinin termal davranışı incelenerek faz diyagramları bulunmuştur. Bu modelin manyetik özellikleri, boyuna manyetik alan varlığında EAT ile incelenmiştir [35]. Green-fonksiyon tekniği kullanılarak, karma-spin ($1/2$, $3/2$) Heisenberg ferrimanyetik sistemine göre en yakın ve ikinci en yakın spin etkileşimleri incelenmiştir [36]. Modelin manyetik özellikleri, iki-katlı Cayley ağacı [37], Kagomé [38], Bethe [39], bal petegi [40] ve kare merkezli (union jack) [41], örgüleri için incelenmiştir. Ek olarak OAY ile de seyreltik karma-spin- $1/2$ ve spin- $3/2$ modeli detaylı bir şekilde incelenmiştir [42]. Ayrıca deneysel olarak amorf V (TCNE) x .y (çözücü) organometalik bileşiğinin yaklaşık 400K gibi bir sıcaklıkta spin ($1/2$, $3/2$) ferrimanyetik yapı ve ferrimanyetik düzene sahip olduğu gözlenmiştir [43-45]. Görüldüğü gibi bu sistemin denge özellikleri kapsamlıca çalışılmıştır. Bununla birlikte bu karma-spin sisteminin dinamik manyetik özellikleri üzerine az da olsa bazı çalışmalar yapılmıştır. Karma spin ($1/2$, $3/2$) Ising sisteminin dinamik özellikleri üzerine ilk çalışma Deviren ve arkadaşları [46] tarafından yapılmıştır. Sistem iki alt-örgü mıknatıslanma düzen parametresi ile incelenmiştir. Sistemin dinamik faz diyagramları iki farklı düzlemde elde edilmiştir. Faz diyagramları, paramanyetik (p), ferromanyetik (f) ve ferrimanyetik (i) temel fazlarının yanı sıra $i + p$ ve $f + p$ karma fazlarını da içermektedir. Sistem aynı zamanda dinamik üçlü kritik davranış da sergilemektedir. Bu karma spin sisteminin üzerine ikinci çalışma yine Deviren ve arkadaşları [47] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, karma-spin ($1/2$, $3/2$) Ising sistemi birbirini takip eden tabakalı altıgen örgü üzerinde çözülüp, dinamik telafi sıcaklığının meydana gelip gelmediği incelenmiştir. Üzerinde çalışılan örgünün birbirini takip eden her tabakasında sırasıyla $\sigma = \pm 1/2$ ve $S = \pm 3/2$, $\pm 1/2$ spinli parçacıklar yer almaktadır ve tabakalar arasındaki bilinear etkileşim parametresi (J_{ab}) antiferromanyetik

alınmıştır. Dinamik alt-örgü mıknatıslanmalar (M_σ ve M_s) ile dinamik toplam mıknatıslanmanın (M_T) sıcaklığa göre davranışları kapsamlıca incelenmiş ve inceleme sonucu dinamik faz geçiş sıcakları ile dinamik telafi sıcaklıkları elde edilmiştir. Sistemin Hamiltoniyeninde bulunan, ilk tabakadaki spinlerin yine aynı tabakadaki en yakın komşu spinlerle bilineer etkileşim parametresi (J_a), ikinci tabakadaki spinler arasındaki bilineer etkileşim parametresi (J_b), kristal-alan etkileşim parametresi (Δ) ve uygulanan salınımlı dış manyetik alanı genliğinin (H_0) değerlerine bağlı olarak dinamik telafi sıcaklıkları ve faz diyagramları sunulmuştur. Faz diyagramları (J_a , T) ve ($-J_b$, T) düzlemlerinde sunulmuştur. Faz diyagramlarında, paramanyetik (p), antiferrmanyetik (af), ferrimanyetik (i) fazlarının yanında $af + p$, $i + p$ ve $i + af$ karma fazları elde edilmiştir.

Son yıllarda diğer bir yarım tamsayılı yarım-tamsayılı karma-spin sistemi olan, karma-spin ($1/2$, $5/2$) Ising sistemi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu tür karma-spin sistemlerine dair çalışmalar aşağıda belirtildiği gibidir. Bethe örgüsündeki karma-spin ($1/2$, $5/2$) sisteminin kesin çözümü kristal-alan etkisi göz önünde bulundurularak incelenmiş ve mıknatıslanma egrileri ile faz diyagramları verilmiştir [48]. Strecka [49], karma-spin ($1/2$, $5/2$) sisteminin banyo döşeme (bathroom tile) tipi örgü üzerindeki kesin çözümünü sağlamış ve faz diyagramını elde etmek için özellikle mıknatıslanmanın sıcaklığa göre değişimini incelemiştir. Matašovská ve Jašćur [50], dekore edilmiş düzlemsel örgülerde spin- $1/2$ Ising ve karma-spin-S modelinde kesin çözüme ulaşmak için genelleştirilmiş eşleştirme dönüşümünü kullanarak, telafi (kompeyseysin) ve reentrant davranışları incelemiştir. Bununla birlikte bu karma-spin sisteminin dinamik manyetik özellikleri üzerine az da olsa bazı çalışmalar yapılmıştır. Karma-spin ($1/2$, $5/2$) Ising sisteminin dinamik davranışı üzerine tek çalışma Deviren ve arkadaşları [51] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada karma-spin ($1/2$, $5/2$) Ising sistemi için dinamik faz diyagramları elde edilmiştir. Dinamik faz diyagramları (T , h) ve (d , T) düzlemlerinde elde edilmiş, burada d indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresidir. (T , h) düzleminde dört, (d , T) düzleminde ise beş farklı dinamik faz diyagramı elde edildi. Bu faz diyagramlarında ferrimanyetik ($1/2$, $3/2$), ferrimanyetik ($1/2$, $5/2$), ferromanyetik ($1/2$, $1/2$) ve paramanyetik (p) temel fazlarının yanında ferrimanyetik ($1/2$, $3/2$) + p , ferrimanyetik ($1/2$, $5/2$) + p ve ferromanyetik ($1/2$, $1/2$) + p karma fazları da elde edilmiştir.

Yüksek spin sistemlerinden oluşmuş olmasından dolayı karma-spin ($3/2$, $5/2$) Ising sistemi üzerine, diğer yarım-tamsayı yarım-tamsayı karma-spin Ising sistemlerine oranla daha az çalışılma yapılmıştır. Bu karma-spin ($3/2$, $5/2$) modelinin bazı biyolojik bileşiklerin doğasının anlaşılması için uygun olduğu bilinmektedir. Birçok deney, ferrisitokrom (ferricytochrome) e' olarak bilinen belirli tipteki ferric heme proteinin fazla bilinmeyen manyetik özelliklerin arkasında, karma-spin ($3/2$, $5/2$) atomlarının birleşiminin olduğu göstermektedir. Heme proteinleri, kan tarafından oksijen taşımada önemli bir rolü olmasının yanında optiksel iletişimdeki potansiyel uygulamalar ile yeni bio materyalleri tasarlamak için temel olan sentetik olarak kullanılmaktadır ve nano gözenekli geçirgen (nanoporous) katalik materyaller için de temel oluşturmaktadır. Bu karma-spin sisteminin denge davranışları üzerine azda olsa bazı çalışmalar yapılmıştır. Sistemin denge özellikleri üzerine ilk çalışma, sistemin iç enerjisi ve faz diyagramları bal peteği örgüsünde EAT kullanılarak incelenmiştir. Sistemin aynı zamanda Bethe örgüsündeki çözümü tekrarlama bağıntıları kullanılarak araştırılmış ve kristal alan değerlerine bağlı olarak bir ya da iki telafi sıcaklığı sergilediği bulunmuştur [52]. Ayrıca sistem birinci- ve ikinci-derece faz geçişleri sergilemesine rağmen üçlü kritik noktaya sahip değildir. Son yıllarda, iki katlı Cayley ağacı üzerinde karma-spin ($3/2$, $5/2$) Ising modeli tekrarlama bağıntıları cinsinden çalışılmış ve modelin birinci- ve ikinci-derece faz geçişleri sergiledikleri bulunmuştur [53]. Diğer taraftan bu karma-spin sisteminin dinamik özellikleri üzerine en iyi bilgilerimiz dâhilinde yalnızca bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, Keskin ve Deviren [54] sistemin dinamik faz geçiş sıcaklıklarını (DFG), dinamik faz diyagramlarını Glauber geçiş oranları temelli ortalama alan yaklaşımı (OAY) yani dinamik ortalama alan yaklaşımı (DOAY) kullanarak birbirini takip eden altıgen örgüler üzerinde kapsamlıca incelemiştir. Bu inceleme sonucunda sistemin dinamik faz diyagramları beş farklı düzlemde sunulmuştur. Bu faz diyagramlarının, Hamiltonyen parametrelerine bağlı olarak beş farklı temel faz ve üç farklı karma faz gösterdiği bulundu. Bununla birlikte sistemin manyetik kayıt ortamı gibi teknolojik uygulamaları açısından birçok öneme sahip olan dinamik histerik özellikleri (dinamik histerezis alanı, dinamik coercivity ve dinamik artık mıknatıslanma) üzerine herhangi bir çalışma yapılmamıştır.

Burada bu noktayı da belirtelim ki, OAY denge istatistiksel fiziğinde en eski ve en iyi bilinen yöntemlerden birisidir. Bu yöntemle, geçmişte olduğu gibi günümüzde de Ising

sistemlerinin termodinamik özellikleri, düzen parametrelerinin sıcaklıkla değişimi, kritik üsteller, reentrant olaylar, faz geçişleri ve faz diyagramları vb. incelenmeye devam edilmektedir. Bununla birlikte bu metot sistemlerdeki dalgalanmaların korelasyonlarını içermediğinden dolayı, şayet sistem birinci dereceden enerji kuyusuna gelirse, buradan en düşük enerjili duruma geçemeyecektir. Çünkü OAY’nda spin korelasyonlarının etkisi hesaplamalar içine girmemektedir. Bundan dolayı, DOAY ile elde edilen dinamik faz diyagramlarında bulunmuş olan bazı birinci-derece faz geçiş çizgileri ve dolayısıyla bazı özel noktalar, özellikle dinamik üçlü kritik nokta, dinamik çift kritik son nokta ve dinamik kritik son nokta gibi özel noktalar, muhtemelen DOAY’nın bir yapay sonucu olabilir.

Dinamik özelliklerinin az çalışılmış olması nedeniyle bu karma-spin sisteminin dinamik davranışının daha kapsamlı incelenmesi önem arz etmektedir. Dolayısıyla bu yüksek lisans tez kapsamında zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında Glauber geçiş oranları temelli etkin-alan teorisi yani dinamik etkin-alan teorisi (DEAT) kullanarak karma-spin ($3/2$, $5/2$) Ising sisteminin histerik özellikleri (dinamik histerezis alanı, dinamik coercivity ve dinamik artık mıknatıslanma) üzerine kristal alan etkileşme parametresi ve sıcaklığın etkisi kapsamlıca incelenecektir. Böylelikle elde edilecek sonuçların literatürdeki önemli eksiğe büyük bir katkı sağlayacağını ümit etmekteyiz.

Bu giriş bilgilerinden sonra, Bölüm 2’de karma-spin ($3/2$, $5/2$) Ising modelinin dinamik davranışı kare örgü üzerinde zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında Glauber-tipi stokastik dinamik kullanılarak incelendi. Kare örgü üzerinde bu karma-spin modelinin etkin-alan dinamik denklemleri Glauber geçiş oranları kullanılarak elde edildi. Sıcaklık, kristal alan ve frekans için dinamik manyetik histeresiz eğrileri elde edildi. Ayrıca sistemlerin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrileri sunulmuş ve sıcaklık, kristal alan ve frekans için tartışılmıştır. Son bölümde ise, yapılan çalışmalar özetlenerek elde edilen sonuçların tartışılması yapıldı.

1. BÖLÜM

MODELİN TANITIMI VE ETKİN-ALAN DİNAMİK DENKLEMLERİNİN ELDE EDİLMESİ

1.1. Modelin Tanıtımı

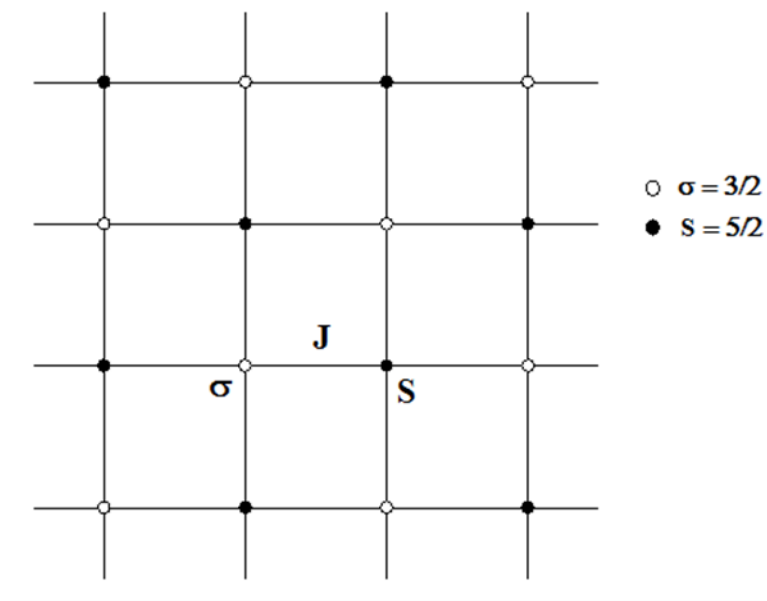
Bu bölümde zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında iç içe geçmiş kare örgüler üzerinde karma-spin ($3/2$, $5/2$) Ising modelinin tanıtımı yapılacak ve modelin dinamik davranışını veren etkin-alan dinamik denklemleri Glauber-tipi stokastik dinamik kullanılarak elde edilecektir. Bu çalışma sonucunda karma-spin ($3/2$, $5/2$) Ising sisteminin ilginç dinamik davranış sergilediği ve etkin-alan ile zengin histerezis davranışlar verdiği bulunmuştur. Etkin-alan metodu en iyi bilinen metotlardan biridir ve hala yaygın literatürde sürekli olarak kullanılmaktadır. Ayrıca etkin-alan teorisi kullanılarak spin operatörleri arasındaki kinematik eşitlikler daha doğru bir şekilde hesaplanabilir. Bu konudaki ilk sistematik yaklaşım Matsudaira [55] tarafından geliştirilmiştir. Diğer taraftan Ising spin sistemleri üzerindeki teorik çalışmalarda sık karşılaşılan polinom şeklindeki spin fonksiyonlarının açılımlarını kolaylaştırmak için Van der Waerden özdeşliği kullanılır. Dinamik bir model elde etmek için Hamiltonyen ifadesine ek olarak bir dış pertürbasyon öne sürülmesi gerekir. İhtimaliyet fonksiyonlarının ele alınması ile böyle bir model ileri sürülmüştür. Glauber [56], Ising sistemlerinin bir ısı banyosu ile temas halinde olduğunu ve spinlerin bir durumdan diğer bir duruma zamana bağlı olarak değiştiğini öngörmüştür. Glauber-tipi stokastik sürece göre, bir durumdan diğer duruma geçiş birim zamanda $1/\tau$ oranında değişmektedir. Dinamik etkin-alan denklemini elde etmek için Glauber geçiş oranları kullanılacaktır. Elde edilecek olan bu diferansiyel denklem Adams-Moulton kestirme ve düzeltme, Runge-Kutta, vb. gibi nümerik yöntemlerle çözülecek ve Ising sisteminin histerik özellikleri (dinamik histerezis alanı, dinamik coercivity ve dinamik artık

mıknatıslanma) üzerine kristal alan etkileşme parametresi, sıcaklığın ve salınımlı dış manyetik alan frekansının etkisi kapsamlıca tespit edilecektir.

1.2. Metot

Karma-spin (3/2, 5/2) Ising modeli A ve B gibi iki alt örgülü Ising model olup, A alt örgüsü $\sigma_i = \pm 3/2, \pm 1/2$ ve B alt örgüsü $S_j = \pm 5/2, \pm 3/2, \pm 1/2$ spin değerlerine sahiptir.

Sekil 2.1’de görüldüğü gibi her bir σ_i -spininin en yakın komsusu sadece S_j -spinidir.



Şekil 1.1 İki iç içe geçmiş kare örgü üzerindeki spin düzenlemesinin taslağı. Örgü A (içi boş daireler) ve B (içi dolu daireler) spinlerin örgüleri tarafından oluşturulmuştur.

Karma-spin (3/2, 5/2) Ising sistemi için aşağıdaki düzen parametreleri mevcuttur.

Bunlar;

- A alt örgüsü için ortalama mıknatıslanma (m_A): $m_A = \langle \sigma_i \rangle$,
- B alt örgüsü için ortalama mıknatıslanma (m_B): $m_B = \langle S_j \rangle$,
- A alt örgüsü için ortalama kuadrupol moment (q_A): $q_A \equiv (\langle \sigma_i \rangle)^2$
- B alt örgüsü için ortalama kuadrupol moment (q_B): $q_B \equiv (\langle S_j \rangle)^2$

olarak tanımlanır. Burada, ortalama mıknatıslanma ifadesi bir tarafa yönelimin diğer tarafa yöneliminden fazlalığını gösterir ve aynı zamanda dipol moment olarak da adlandırılır. Diğer taraftan ortalama kuadrupol moment ifadesi ise, ortalama mıknatıslanmanın karesi veya karesinin lineer bir fonksiyonudur.

Bu karma-spin sistemi için Hamiltonyen ifadesi,

$$\mathcal{H} = -J \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i S_j - D \left(\sum_i \sigma_i^2 + \sum_j S_j^2 \right) - h(t) \left(\sum_i \sigma_i + \sum_j S_j \right) \quad (1.1)$$

şeklindedir. Burada, $\langle ij \rangle$ toplamın en yakın komsu çiftler üzerinden alınacağını göstermektedir. J bilineer etkileşim parametresi, D, kristal alan etkileşmesi veya tek-iyon anizotropi sabiti ve son terim $h(t)$ ise zamanla değişen salınımlı dış manyetik alandır ve

$$h(t) = h_0 \cos(\omega t), \quad (1.2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada h_0 ve $\omega = 2\pi f$ sırasıyla salınımlı alanın genliği ve açısal frekansdır. Sistem T mutlak sıcaklıkta izotermal ısı banyosu ile temas halindedir.

Şimdi, zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında karma-spin (3/2, 5/2) için sistemin dinamik davranışını açıklayan etkin-alan dinamik denklemleri, kare örgü üzerinde elde edilecektir. Bu metod ilk kez Honmura ve Kaneyoshi [57] ile Kaneyoshi ve arkadaşları [58] tarafından tanımlandı. Korelasyon etkin-alan teorisinde, A ve B alt örgüler için ortalama mıknatıslanma ifadeleri,

$$m_A = \langle \sigma_i \rangle = \left[A'(\alpha) + B'(\alpha) \langle S_j \rangle + C'(\alpha) \langle S_j^2 \rangle + D'(\alpha) \langle S_j^3 \rangle + E'(\alpha) \langle S_j^4 \rangle + F'(\alpha) \langle S_j^5 \rangle \right]^4 F_1(x+h)|_{x=0}, \quad (1.3)$$

$$m_B = \langle S_j \rangle = \left[1 + K'(\alpha) \langle \sigma_i \rangle + L'(\alpha) \langle \sigma_i^2 \rangle + M'(\alpha) \langle \sigma_i^3 \rangle + N'(\alpha) \langle \sigma_i^4 \rangle \right]^4 G_1(x+h)|_{x=0}, \quad (1.4)$$

formunda verilir. Bu eşitlik Callen'nın 1963'te, spin-1/2 [59] için elde ettiği spin korelasyonunu ifade eden Callen eşitliği ifadesinin, karma-spin (3/2, 5/2) için genelleştirilmiş şeklidir. Burada $\langle \dots \rangle$ ifadesi kanonik küme ortalamasını göstermektedir. Spin-5/2 için Van der Waerden katsayıları,

$$A'(\alpha) = \frac{1}{128} \left[3 \cosh\left(\frac{5\alpha}{2}\right) - 25 \cosh\left(\frac{3\alpha}{2}\right) + 150 \cosh\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right], \quad (1.5)$$

$$B'(\alpha) = \frac{1}{960} \left[9 \sinh\left(\frac{5\alpha}{2}\right) - 125 \sinh\left(\frac{3\alpha}{2}\right) + 2250 \sinh\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right], \quad (1.6)$$

$$C'(\alpha) = \frac{1}{48} \left[-5 \cosh\left(\frac{5\alpha}{2}\right) + 39 \cosh\left(\frac{3\alpha}{2}\right) - 34 \cosh\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right], \quad (1.7)$$

$$D'(\alpha) = \frac{1}{24} \left[-\sinh\left(\frac{5\alpha}{2}\right) + 13 \sinh\left(\frac{3\alpha}{2}\right) - 34 \sinh\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right], \quad (1.8)$$

$$E'(\alpha) = \frac{1}{24} \left[\cosh\left(\frac{5\alpha}{2}\right) - 3 \cosh\left(\frac{3\alpha}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right], \quad (1.9)$$

$$F'(\alpha) = \frac{1}{60} \left[\sinh\left(\frac{5\alpha}{2}\right) - 5 \sinh\left(\frac{3\alpha}{2}\right) + 10 \sinh\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right], \quad (1.10)$$

şeklinde olup, spin-3/2 Van der Waerden katsayıları,

$$K'(\alpha) = \frac{1}{8} \left[9 \cosh\left(\frac{1}{2}\alpha\right) - \cosh\left(\frac{3}{2}\alpha\right) \right], \quad (1.11)$$

$$L'(\alpha) = \frac{1}{12} \left[27 \sinh\left(\frac{1}{2}\alpha\right) - \sinh\left(\frac{3}{2}\alpha\right) \right], \quad (1.12)$$

$$M'(\alpha) = -\frac{1}{2} \left[-\cosh\left(\frac{1}{2}\alpha\right) + \cosh\left(\frac{3}{2}\alpha\right) \right], \quad (1.13)$$

$$N'(\alpha) = \frac{1}{3} \left[-3 \sinh\left(\frac{1}{2}\alpha\right) + \sinh\left(\frac{3}{2}\alpha\right) \right]. \quad (1.14)$$

formundadır. Burada, $\alpha = J\nabla$, $\nabla = \partial/\partial x$ diferansiyel operatör göstermektedir. z en yakın komşu sayısıdır ve kare örgü için $z = 4$ alınır.

(1.3) ve (1.4) denklemlerinde, A örgüsü için $F_1(x)$ fonksiyonu ile B örgüsü için $G_1(x)$ fonksiyonu,

$$F_1(x+h) = \frac{1}{2} \frac{3 \sinh[3\beta(x+h)/2] + \sinh[\beta(x+h)/2] \exp(-2\beta D)}{\cosh[3\beta(x+h)/2] + \cosh[\beta(x+h)/2] \exp(-2\beta D)}, \quad (1.15)$$

$$G_1(x+h) = \frac{5 \sinh\left(\frac{5\beta}{2}(x+h)\right) + 3 \exp(-4\beta D) \sinh\left(\frac{3\beta}{2}(x+h)\right) + \exp(-6\beta D) \sinh\left(\frac{\beta}{2}(x+h)\right)}{2 \cosh\left(\frac{5\beta}{2}(x+h)\right) + 2 \exp(-4\beta D) \cosh\left(\frac{3\beta}{2}(x+h)\right) + 2 \exp(-6\beta D) \cosh\left(\frac{\beta}{2}(x+h)\right)}, \quad (1.16)$$

şeklinde tanımlanır [60]. Spin-3/2 ve spin-5/2 sistemleri için diğer düzen parametreleri sırasıyla,

$$\langle \sigma_i^2 \rangle = q_A = \left[A'(\alpha) + B'(\alpha) \langle S_j \rangle + C'(\alpha) \langle S_j^2 \rangle + D'(\alpha) \langle S_j^3 \rangle + E'(\alpha) \langle S_j^4 \rangle + F'(\alpha) \langle S_j^5 \rangle \right]^4 F_2(x+h)|_{x=0}, \quad (1.17)$$

$$\langle \sigma_i^3 \rangle = r_A = \left[A'(\alpha) + B'(\alpha) \langle S_j \rangle + C'(\alpha) \langle S_j^2 \rangle + D'(\alpha) \langle S_j^3 \rangle + E'(\alpha) \langle S_j^4 \rangle + F'(\alpha) \langle S_j^5 \rangle \right]^4 F_3(x+h)|_{x=0}, \quad (1.18)$$

$$\langle \sigma_i^4 \rangle = \nu_A = \left[A'(\alpha) + B'(\alpha) \langle S_j \rangle + C'(\alpha) \langle S_j^2 \rangle + D'(\alpha) \langle S_j^3 \rangle + E'(\alpha) \langle S_j^4 \rangle + F'(\alpha) \langle S_j^5 \rangle \right]^4 F_4(x+h)|_{x=0}, \quad (1.19)$$

ve

$$\langle S_j^2 \rangle = q_B = \left[1 + K'(\alpha) \langle \sigma_i \rangle + L'(\alpha) \langle \sigma_i^2 \rangle + M'(\alpha) \langle \sigma_i^3 \rangle + N'(\alpha) \langle \sigma_i^4 \rangle \right]^4 G_2(x+h)|_{x=0}, \quad (1.20)$$

$$\langle S_j^3 \rangle = r_B = \left[1 + K'(\alpha) \langle \sigma_i \rangle + L'(\alpha) \langle \sigma_i^2 \rangle + M'(\alpha) \langle \sigma_i^3 \rangle + N'(\alpha) \langle \sigma_i^4 \rangle \right]^4 G_3(x+h)|_{x=0}, \quad (1.21)$$

$$\langle S_j^4 \rangle = \nu_B = \left[1 + K'(\alpha) \langle \sigma_i \rangle + L'(\alpha) \langle \sigma_i^2 \rangle + M'(\alpha) \langle \sigma_i^3 \rangle + N'(\alpha) \langle \sigma_i^4 \rangle \right]^4 G_4(x+h)|_{x=0}, \quad (1.22)$$

$$\langle S_j^5 \rangle = w_B = \left[1 + K'(\alpha) \langle \sigma_i \rangle + L'(\alpha) \langle \sigma_i^2 \rangle + M'(\alpha) \langle \sigma_i^3 \rangle + N'(\alpha) \langle \sigma_i^4 \rangle \right]^4 G_5(x+h)|_{x=0}. \quad (1.23)$$

şeklinde elde edilir. r ve w düzen parametreleri ile q ve v düzen parametrelerinin termal davranışları birbirine benzerlik gösterir [61]. Karma-spin (3/2, 5/2) etkin-alan sisteminin Hamiltonyen ifadesi Eşitlik 1.1'de görüldüğü gibi bikuadratik etkileşme parametresi (K) içermediğinden q (veya v) bu tez çalışmasında incelenmedi.

Spin-3/2 sistemi için $F_k(x+h)$ ($n=2, 3$) ve spin-5/2 sistemi için $G_k(x+h)$ ($k=2, 3, 4, 5$) fonksiyonları şu şekilde tanımlanır:

$$F_2(x+h) = \frac{1}{2} \frac{9 \cosh[3\beta(x+h)/2] + \cosh[\beta(x+h)/2] \exp(-2\beta D)}{2 \cosh[3\beta(x+h)/2] + 2 \cosh[\beta(x+h)/2] \exp(-2\beta D)}, \quad (1.24)$$

$$F_3(x+h) = \frac{1}{2} \frac{27 \sinh\left[\frac{3\beta(x+h)}{2}\right] + \sinh\left[\frac{\beta(x+h)}{2}\right] \exp(-2\beta D)}{4 \cosh\left[\frac{3\beta(x+h)}{2}\right] + 4 \cosh\left[\frac{\beta(x+h)}{2}\right] \exp(-2\beta D)}, \quad (1.25)$$

ve

$$G_2(x+h) = \frac{25 \cosh\left(\frac{5\beta}{2}(x+h)\right) + 9 \exp(-4\beta D) \cosh\left(\frac{3\beta}{2}(x+h)\right) + \exp(-6\beta D) \cosh\left(\frac{\beta}{2}(x+h)\right)}{4 \cosh\left(\frac{5\beta}{2}(x+h)\right) + 4 \exp(-4\beta D) \cosh\left(\frac{3\beta}{2}(x+h)\right) + 4 \exp(-6\beta D) \cosh\left(\frac{\beta}{2}(x+h)\right)}, \quad (1.26)$$

$$G_3(y+h) = \frac{125 \sinh\left(\frac{5\beta}{2}(x+h)\right) + 27 \exp(-4\beta D) \cosh\left(\frac{3\beta}{2}(x+h)\right) + \exp(-6\beta D) \sinh\left(\frac{\beta}{2}(x+h)\right)}{8 \cosh\left(\frac{5\beta}{2}(x+h)\right) + 8 \exp(-4\beta D) \cosh\left(\frac{3\beta}{2}(x+h)\right) + 8 \exp(-6\beta D) \cosh\left(\frac{\beta}{2}(x+h)\right)}, \quad (1.27)$$

$$G_4(x+h) = \frac{625 \cosh\left(\frac{5\beta}{2}(x+h)\right) + 81 \exp(-4\beta D) \cosh\left(\frac{3\beta}{2}(x+h)\right) + \exp(-6\beta D) \cosh\left(\frac{\beta}{2}(x+h)\right)}{16 \cosh\left(\frac{5\beta}{2}(x+h)\right) + 16 \exp(-4\beta D) \cosh\left(\frac{3\beta}{2}(x+h)\right) + 16 \exp(-6\beta D) \cosh\left(\frac{\beta}{2}(x+h)\right)}, \quad (1.28)$$

$$G_5(y+h) = \frac{3125 \sinh\left(\frac{5\beta}{2}(x+h)\right) + 243 \exp(-4\beta D) \cosh\left(\frac{3\beta}{2}(x+h)\right) + \exp(-6\beta D) \cosh\left(\frac{\beta}{2}(x+h)\right)}{32 \cosh\left(\frac{5\beta}{2}(x+h)\right) + 32 \exp(-4\beta D) \cosh\left(\frac{3\beta}{2}(x+h)\right) + 32 \exp(-6\beta D) \cosh\left(\frac{\beta}{2}(x+h)\right)}. \quad (1.29)$$

burada, $\beta=1/k_B T$, k_B , Boltzmann sabitidir. Böylece bu tez çalışmasında yalnızca m düzen parametresinin termal davranışı incelendi. Eşitlikler (1.3) ve (1.4)'ün sağ tarafları açılırsa, alt örgü mıknatıslanmaları için,

$$\begin{aligned} m_A = & a_0 + a_1 m_B + a_2 m_B^2 + a_3 m_B^3 + a_4 m_B^4 + a_5 m_B^5 + a_6 m_B^6 \\ & + a_7 m_B^7 + a_8 m_B^8 + a_9 m_B^9 + a_{10} m_B^{10} + a_{11} m_B^{11} + a_{12} m_B^{12} \\ & + a_{13} m_B^{13} + a_{14} m_B^{14} + a_{15} m_B^{15} + a_{16} m_B^{16} + a_{17} m_B^{17} + a_{18} m_B^{18} \\ & + a_{19} m_B^{19} + a_{20} m_B^{20}. \end{aligned} \quad (1.30)$$

$$\begin{aligned} m_B = & b_0 + b_1 m_A + b_2 m_A^2 + b_3 m_A^3 + b_4 m_A^4 + b_5 m_A^5 + b_6 m_A^6 + b_7 m_A^7 \\ & + b_8 m_A^8 + b_9 m_A^9 + b_{10} m_A^{10} + b_{11} m_A^{11} + b_{12} m_A^{12}. \end{aligned} \quad (1.31)$$

ifadeleri elde edilir. Glauber-tipi stokastik dinamik kullanılırsa, özellikle de Glauber geçiş oranları kullanılırsa, etkin-alan dinamik denklemleri;

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} m_A = & -m_A + a_0 + a_1 m_B + a_2 m_B^2 + a_3 m_B^3 + a_4 m_B^4 + a_5 m_B^5 + a_6 m_B^6 + a_7 m_B^7 + a_8 m_B^8 + a_9 m_B^9 + a_{10} m_B^{10} \\ & + a_{11} m_B^{11} + a_{12} m_B^{12} + a_{13} m_B^{13} + a_{14} m_B^{14} + a_{15} m_B^{15} + a_{16} m_B^{16} + a_{17} m_B^{17} + a_{18} m_B^{18} + a_{19} m_B^{19} + a_{20} m_B^{20}. \end{aligned} \quad (1.32)$$

ve

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} m_B = & -m_B + b_0 + b_1 m_A + b_2 m_A^2 + b_3 m_A^3 + b_4 m_A^4 + b_5 m_A^5 + b_6 m_A^6 + b_7 m_A^7 + b_8 m_A^8 \\ & + b_9 m_A^9 + b_{10} m_A^{10} + b_{11} m_A^{11} + b_{12} m_A^{12}. \end{aligned} \quad (1.33)$$

olarak elde edilir. Burada a_i ($i= 0, 1, 2, \dots, 20$) katsayıları, diferansiyel operatör tekniği kullanılarak,

$$\begin{aligned} a_0 = & 1./4294967296(2673589236g(h)+81g(h-10J)-2700g(h-9J)+49950g(h-8J)- \\ & 576300g(h-7J)+4572925g(h-6J)-23752176g(h-5J)+75239400g(h-4J)-59476400g(h-3J)- \\ & 342915150g(h-2J)+1157549400g(h-J)+1157549400g(h+J)-342915150g(h+2J) \\ & 59476400g(h+3J)+75239400g(h+4J)-23752176g(h+5J)+4572925g(h+6J)- \\ & 576300g(h+7J)+49950g(h+8J)-2700g(h+9J)+81g(h+10J)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_1 = & 1./8053063680(-243g(h-10J)+9450g(h-9J)-232200g(h-8J)+3500550g(h-7J)- \\ & 36915425g(h-6J)+260628264g(h-5J)-1238698800g(h-4J)+3102663800g(h-3J)- \\ & 1437457950g(h-2J)-18688785300g(h-J)+18688785300g(h+J)+1437457950g(h+2J)- \\ & 3102663800g(h+3J)+1238698800g(h+4J)-260628264g(h+5J)+36915425g(h+6J)- \\ & 3500550g(h+7J)+232200g(h+8J)-9450g(h+9J)+243g(h+10J)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 = & -1./40265318400(353823653708g(h)+12771g(h-10J)-410400g(h-9J)+6595650g(h- \\ & 8J)-61661600g(h-7J)+303935975g(h-6J)-93856000g(h-5J)-9855917800g(h- \\ & 4J)+62364748800g(h-3J)-167366453450g(h-2J)-62208820800g(h-J)- \\ & 62208820800g(h+J)-167366453450g(h+2J)+62364748800g(h+3J)- \\ & 9855917800g(h+4J)-93856000g(h+5J)+303935975g(h+6J)- \\ & 61661600g(h+7J)+6595650g(h+8J)-410400g(h+9J)+12771g(h+10J)); \end{aligned}$$

$$a_3 = -1./452984832000(-240813g(h-10J)+9189450g(h-9J)-203110200g(h-8J)+2762336550g(h-7J)-24758562175g(h-6J)+141265358376g(h-5J)-433220408400g(h-4J)+114324193400g(h-3J)+4193376333150g(h-2J)-7572410802900g(h-2J)+7572410802900g(h+J)-4193376333150g(h+2J)-114324193400g(h+3J)+433220408400g(h+4J)-141265358376g(h+5J)+24758562175g(h+6J)-2762336550g(h+7J)+203110200g(h+8J)-9189450g(h+9J)+240813g(h+10J));$$

.

.

.

$$a_{17} = -1./663552000(-120g(h-10J)+5264g(h-9J)-67904g(h-8J)+465136g(h-7J)-2037416g(h-6J)+6207040g(h-5J)-13680512g(h-4J)+21998272g(h-3J)-24974768g(h-2J)+17107168g(h-J)-17107168g(h+J)+24974768g(h+2J)-21998272g(h+3J)+13680512g(h+4J)-6207040g(h+5J)+2037416g(h+6J)-465136g(h+7J)+67904g(h+8J)-5264g(h+9J)+120g(h+10J));$$

$$a_{18} = 1./82944000(-2440724g(h)+11g(h-10J)-128g(h-9J)+434g(h-9J)+1536g(h-7J)-21777g(h-6J)+110976g(h-5J)-361896g(h-4J)+855168g(h-3J)-1542138g(h-2J)+2178176g(h-J)+2178176g(h+J)-1542138g(h+2J)+855168g(h+3J)-361896g(h+4J)+110976g(h+5J)-21777g(h+6J)+1536g(h+7J)+434g(h+8J)-128g(h+9J)+11g(h+10J));$$

$$a_{19} = 1./207360000(-g(h-10J)+18g(h-9J)-152g(h-8J)+798g(h-7J)-2907g(h-6J)+7752g(h-5J)-15504g(h-4J)+23256g(h-3J)-25194g(h-2J)+16796g(h-J)-16796g(h+J)+25194g(h+2J)-23256g(h+3J)+15504g(h+4J)-7752g(h+5J)+2907g(h+6J)-798g(h+7J)+152g(h+8J)-18g(h+9J)+g(h+10J));$$

$$a_{20} = 1./207360000(184756g(h)+g(h-10J)-20g(h-9J)+190g(h-8J)-1140g(h-7J)+4845g(h-6J)-15504g(h-5J)+38760g(h-4J)-77520g(h-3J)+125970g(h-2J)-167960g(h-J)-167960g(h+J)+125970g(h+2J)-77520g(h+3J)+38760g(h+4J)-15504g(h+5J)+4845g(h+6J)-1140g(h+7J)+190g(h+8J)-20g(h+9J)+g(h+10J));$$

elde edilir. Benzer olarak, b_j ($j= 0, 1, 2, \dots, 12$) katsayıları, diferansiyel operatör tekniği kullanılarak,

$$b_0 = 1/65536(35484f(h) + f(h-6J) - 36f(h-5J) + 450f(h-4J) - 1940f(h-3J) - 1809f(h-2J) + 18360f(-J) + 18360f(J) - 1809f(h+2J) - 1940f(h+3J) + 450f(h+4J) - 36f(h+5J) + f(h+6J));$$

$$b_1 = 1/24576(-f(h-6J) + 54f(h-5J) - 972f(h-4J) + 6802f(h-3J) - 10341f(h-2J) - 45252f(-J) + 45252f(J) + 10341f(h+2J) - 6802f(h+3J) + 972f(h+4J) - 54f(h+5J) + f(h+6J));$$

$$b_2 = -1/24576(159932f(h) + 5f(h-6J) - 96f(h-5J) - 366f(h-4J) + 16224f(h-3J) - 79605f(h-2J) - 16128f(-J) - 16128f(J) - 79605f(h+2J) + 16224f(h+3J) - 366f(h+4J) - 96f(h+5J) + 5f(h+6J));$$

$$b_3 = -1/55296(-35f(h-6J) + 1422f(h-5J) - 16452f(h-4J) + 33946f(h-3J) + 296433f(h-2J) - 635796f(-J) + 635796f(J) - 296433f(h+2J) - 33946f(h+3J) + 16452f(h+4J) - 1422f(h+5J) + 35f(h+6J));$$

.

.

.

$$b_{10} = 1/2592(-16212f(h) + 25f(h-6J) - 144f(h-5J) + 90f(h-4J) + 1520f(h-3J) - 6345f(h-2J) + 12960f(-J) + 12960f(J) - 6345f(h+2J) + 1520f(h+3J) + 90f(h+4J) - 144f(h+5J) + 25f(h+6J));$$

$$b_{11} = 1/216(-f(h-6J) + 10f(h-5J) - 44f(h-4J) + 110f(h-3J) - 165f(h-2J) + 132f(-J) - 132f(J) + 165f(h+2J) - 110f(h+3J) + 44f(h+4J) - 10f(h+5J) + f(h+6J));$$

$$b_{12} = 1/1296(924f(h) + f(h-6J) - 12f(h-5J) + 66f(h-4J) - 220f(h-3J) + 495f(h-2J) - 792f(-J) - 792f(J) + 495f(h+2J) - 220f(h+3J) + 66f(h+4J) - 12f(h+5J) + f(h+6J));$$

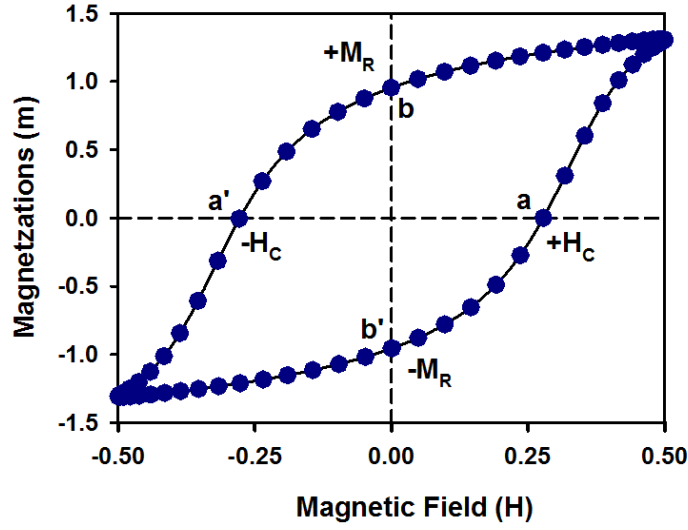
olarak elde edilir. Böylece sistemin etkin-alan dinamik denklemi elde edilmiş oldu. Gelecek kesimde, bu denklemin nümerik çözümleri yapılacak ve bu çözümler tartışılacaktır.

2. BÖLÜM

DİNAMİK HİSTERETİK ÖZELLİKLER

Bu kesimde önceki bölümde elde edilen (1.32) ve (1.33) diferansiyel denklemleri, Adams-Moulton kestirme ve düzeltme, Runge-Kutta, vb. gibi nümerik yöntemlerle çözüldü ve kare örgü üzerinde yarım-tamsayı ($\sigma = 3/2$) ve yarım-tamsayı ($S = 5/2$) ferromanyetik Ising modelinin dinamik histerik özellikleri (dinamik histerezis alanı, dinamik coercivity ve dinamik artık mıknatıslanma) üzerine kristal alan etkileşme parametresi, sıcaklığın ve salınımlı dış manyetik alan frekansının etkisi kapsamlıca tespit edildi. Bununla beraber karma-spin Ising sisteminin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanmasının (remanent magnetizations) sıcaklığa, kristal alana ve salınımlı dış manyetik alan frekansına bağlı davranışları da kapsamlıca incelendi. Burada şu noktayı da belirtelim ki son yıllarda farklı yapıdaki Ising sistemlerin manyetik histerik özellikleri kapsamlı bir şekilde çalışılmış [62-64] ve halen çalışılmaya devam edilmektedir.

Zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizaion) ferromanyetik/ferrimanyetik malzemelerde gözlemlenir. Zorlayıcı manyetik alan, artık (veya kalıcı) mıknatıslanmayı sıfır yapan manyetik alan değeridir. Artık mıknatıslanma ise, histerezis eğrisindeki mıknatıslanma eksenini kesen manyetik alan değerleri, manyetik şiddetin ($H = 0$) sıfıra indirildiği zamanki değerleridir. Bu değerlere malzemenin artık mıknatıslanması denir. Zorlayıcı alan ve artık mıknatıslanma değerleri Şekil 2.1'de gösterildi. Şekil 2.1'de a ve a' noktaları zorlayıcı manyetik alan değerlerini gösterirken, b ve b' noktaları artık mıknatıslanma değerlerini gösterir.

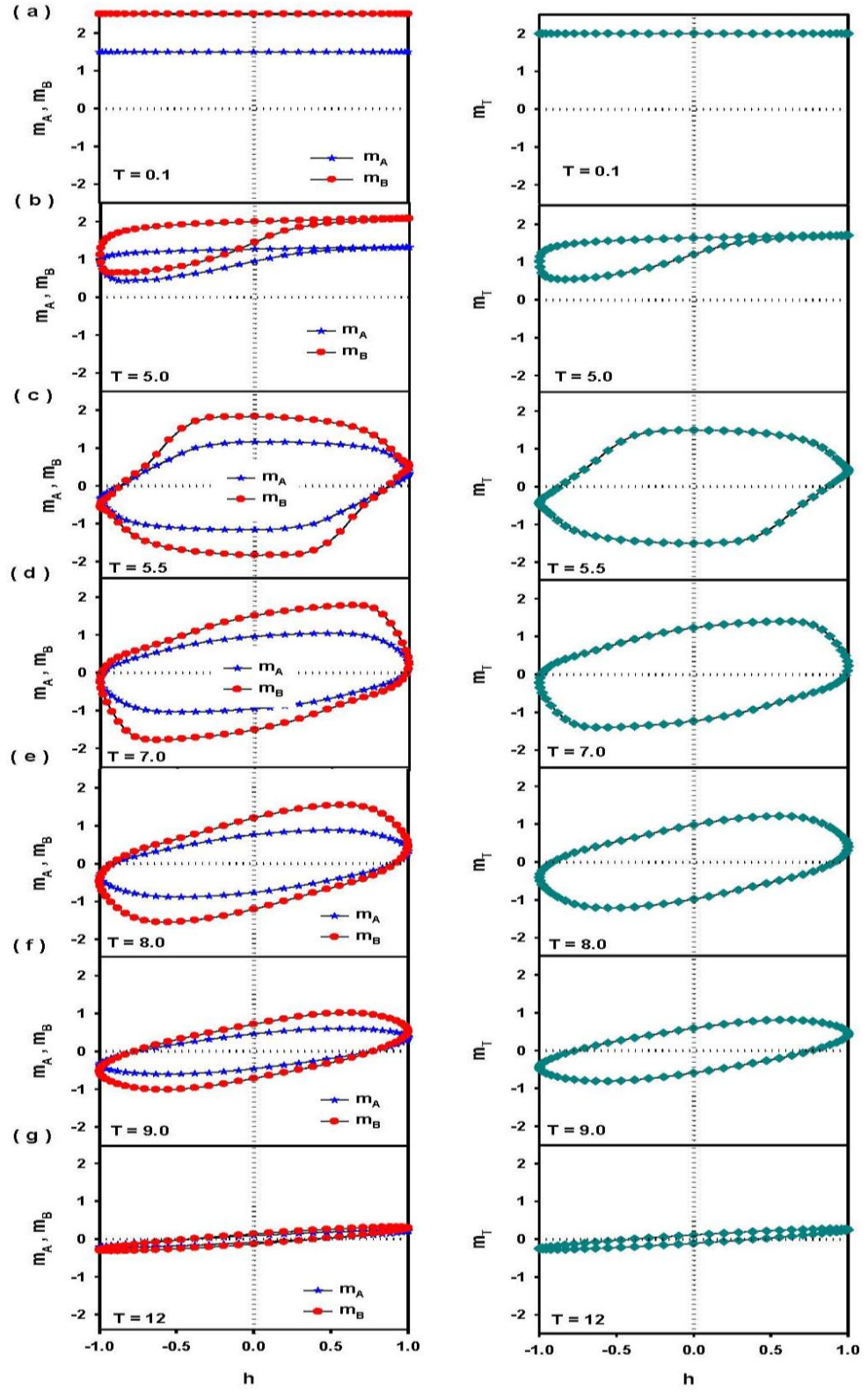


Şekil 2.1. Dinamik zorlayıcı alan (coercivity fields) ve dinamik artık mıknatıslanma. a ve a' noktaları zorlayıcı manyetik alan değerlerini gösterirken, b ve b' noktaları artık mıknatıslanma değerlerini gösterir.

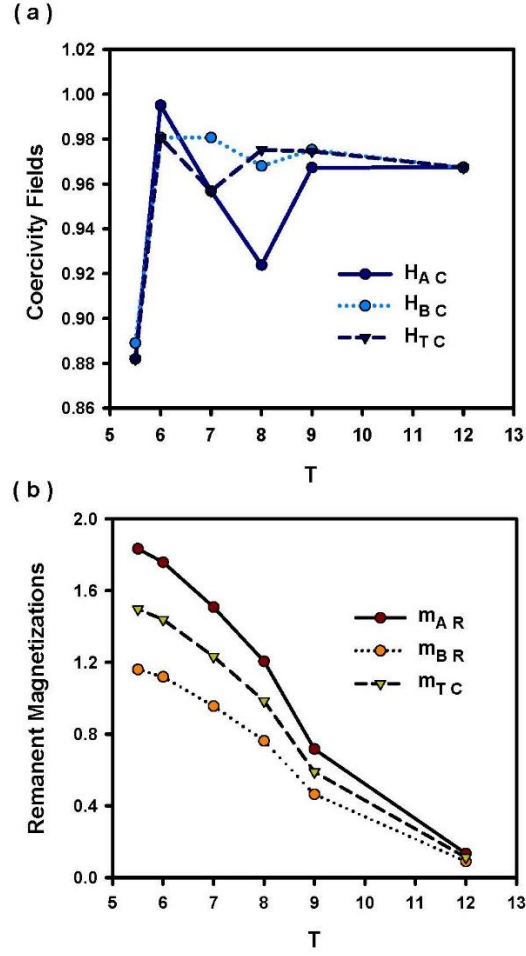
Dinamik histerezis alan üzerine sıcaklığın etkisi $J = 1.0$, $w = 0.05\pi$, $D = 0.1$ sabit değerleri ve $T = 0.1, 5.0, 5.5, 7.0, 8.0, 9.0, 12.0$ farklı sıcaklık değerleri için elde edilmiş ve Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bu şekillerde, m_A ve m_B sırasıyla alt örgü mıknatıslanmalarını gösterirken $m_T = \left(\frac{m_A + m_B}{2} \right)$ toplam mıknatıslanmayı

göstermektedir. Sıcaklığın artmasıyla dinamik manyetik histerezis eğrilerinin belirli bir kritik sıcaklık değerine kadar arttığı ve daha sonra azaldığı görülmektedir. Bu sonuç nicel olarak bazı teorik [65-67] ve deneysel çalışmalarda da gözlenmiştir [68]. Sıcaklığın çok küçük değerleri için dinamik manyetik histerezis eğrileri çok küçük olmakta ve sıcaklığın artmasıyla büyümekte olup bu durum kritik sıcaklık değerine kadar devam etmektedir. Kritik sıcaklıktan sonraki değerlerde ise dinamik manyetik histerezis eğrileri tekrar küçülmeğe ve kritik sıcaklığın çok çok büyük değerlerinde yok olmaktadır. Şekil 2.2 (a) ve Şekil 2.2 (b)'de anti-simetrik durum söz konusu olup bu durum ferromanyetik faza karşılık gelmektedir. Şekil 2.2 (c)-(g) simetrik durum söz konusu olup bu durum paramanyetik faza karşılık gelmektedir. Sistem yalnızca tekli histerezis davranış sergilemektedir. Elde edilen sonuçlar, sıcaklığın dinamik histerezis alan üzerine belirleyici bir etkisinin olduğunu göstermiştir.

Şekil 2.2’den hareketle karma-spin Ising sisteminin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin sıcaklığa bağlı davranışları $J = 1.0$, $w = 0.05\pi$, $D = 0.1$ ve yedi farklı sıcaklık değeri için elde edilmiş ve Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Şekil 2.3’de, $H_{A\ C}$ ve $m_{A\ R}$, A alt örgüsü için zorlayıcı manyetik alan ve artık mıknatıslanma değerlerini, $H_{B\ C}$ ve $m_{B\ R}$, B alt örgüsü için zorlayıcı manyetik alan ve artık mıknatıslanma değerlerini, $H_{T\ C}$ ve $m_{T\ R}$ toplam zorlayıcı manyetik alan ve artık mıknatıslanma değerlerini göstermektedir. Şekil 2.3 (a)’da sıcaklığın artmasıyla zorlayıcı manyetik alan eğrisi sıcaklığın belirli bir değerine kadar artmakta ve daha sonra yumuşak bir şekilde azalmaktadır. Şekil 2.3 (b)’de sıcaklığın artmasıyla artık mıknatıslanma azalmaktadır.



Şekil 2.2. Kare örgü üzerinde karma-spin (3/2, 5/2) Ising modelinin farklı sıcaklıklar için ($T = 0.1, 5.0, 5.5, 7.0, 8.0, 9.0, 12$) dinamik histerezis alan eğrileri.

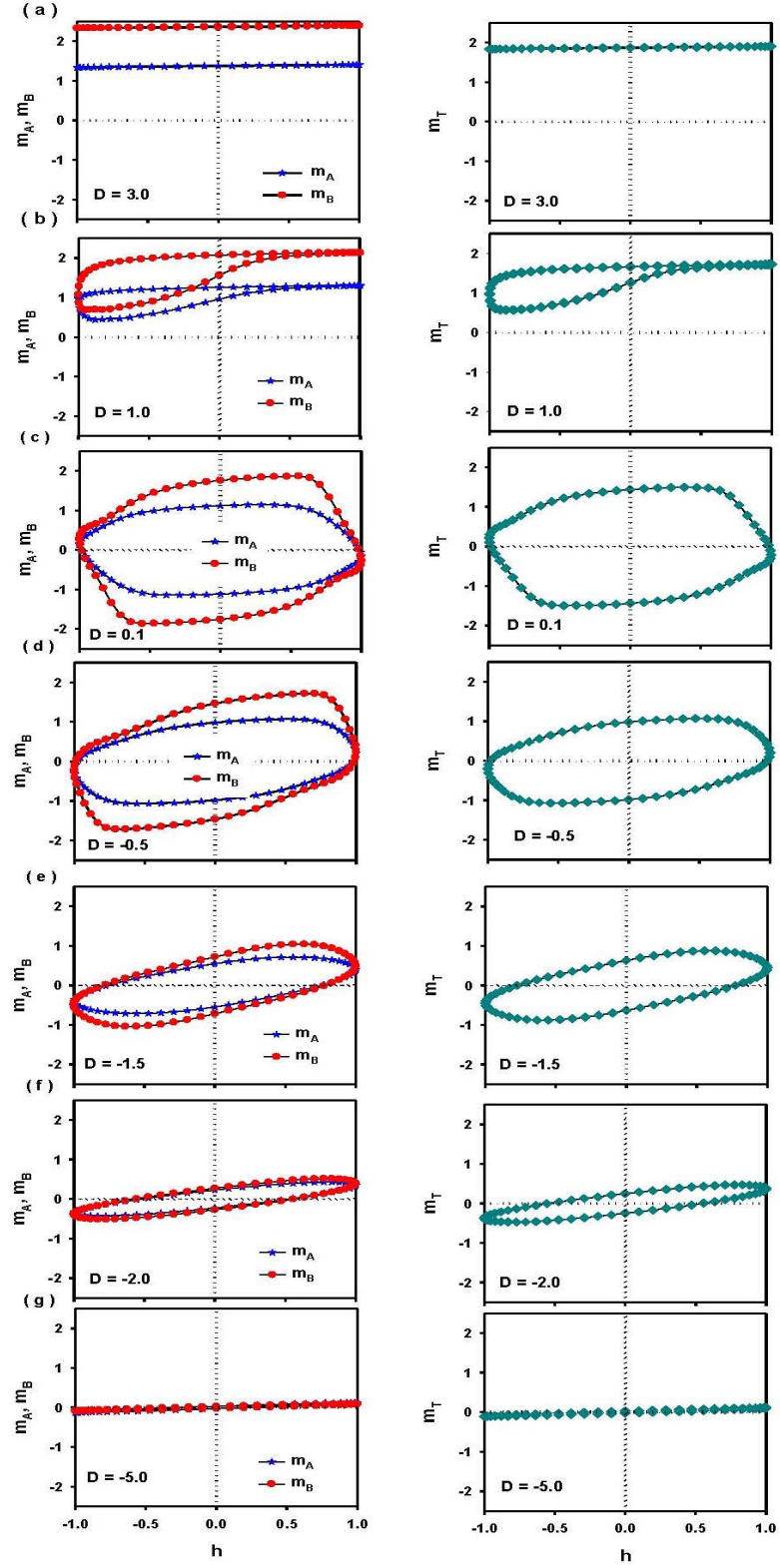


Şekil 2.3. Kare örgü üzerinde karma-spin (3/2, 5/2) Ising modelinin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin sıcaklığa bağlı davranışları. **(a)** zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields), **(b)** artık mıknatıslanma (remanent magnetizations)

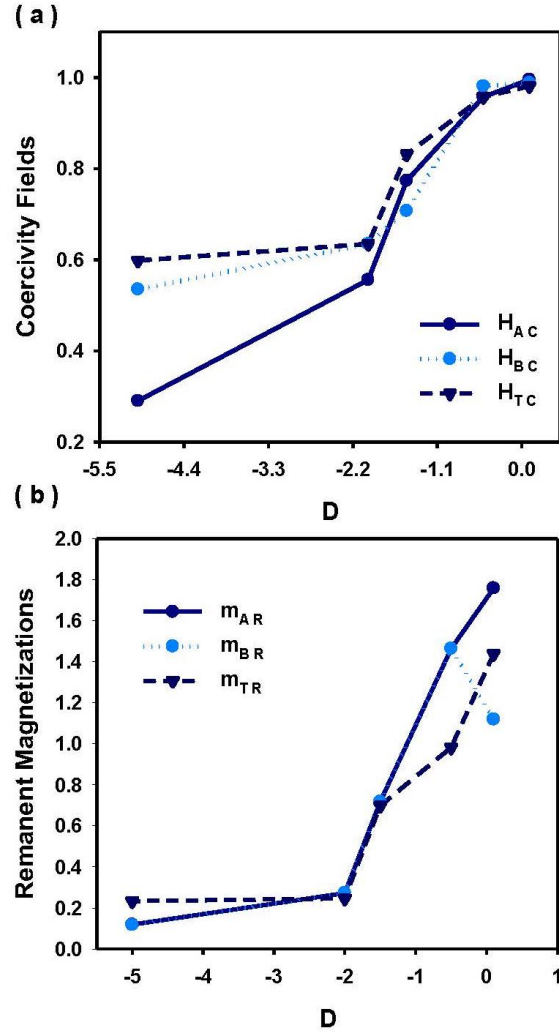
Şekil 2.4'te, kare örgü üzerinde karma-spin (3/2, 5/2) Ising sisteminin dinamik histerezis özellikleri üzerine kristal alan etkileşim parametresinin etkisi, $J = 1.0$, $h = 2.0$, $T = 6.0$, $w = 0.05 \pi$ ve $D = 3.0, 1.0, 0.1, -0.5, -1.5, -2.0, -5.0$ farklı kristal alan değerleri için incelenmiştir. Şekilden, kristal alanın artmasıyla histerezis alanların önce arttığı ve daha sonra azaldığı görülmektedir. Kristal alanın büyük değerlerinde karma-spin Ising sistemi antisimetrik davranış sergilerken, kristal alanın küçük değerlerinde simetrik davranış sergilemektedir. Sistem yalnızca tekli histerezis davranış sergilemektedir. Bu sonuç nicel olarak bazı teorik [69-71] ve deneysel çalışmalarda da gözlenmiştir [72].

Elde edilen sonuçlar, kristal alan etkileşme parametresinin dinamik histerezis alan üzerine belirleyici bir etkisinin olduğunu göstermiştir.

Şekil 2.4'ten hareketle sistemlerin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin kristal alana bağlı davranışları Şekil 2.4'te elde edilmiştir. Şekil 2.5 (a)'da, kristal alan arttıkça zorlayıcı manyetik alan kristal alanın belirli bir değerine kadar artmakta ve belirli bir kristal alan değerinde sabit değerine ulaşmaktadır. Şekil 2.5 (b)'de, A alt örgüsüne ait artık mıknatıslanma ($m_{A R}$) ile toplam artık mıknatıslanma ($m_{R T}$) eğrilerinin, kristal alanın artmasıyla arttığı görülmektedir. Diğer taraftan, kristal alanın artmasıyla, B alt örgüsüne ait artık mıknatıslanma ($m_{R B}$) eğrisinin önce arttığı daha sonra azaldığı görülmektedir.



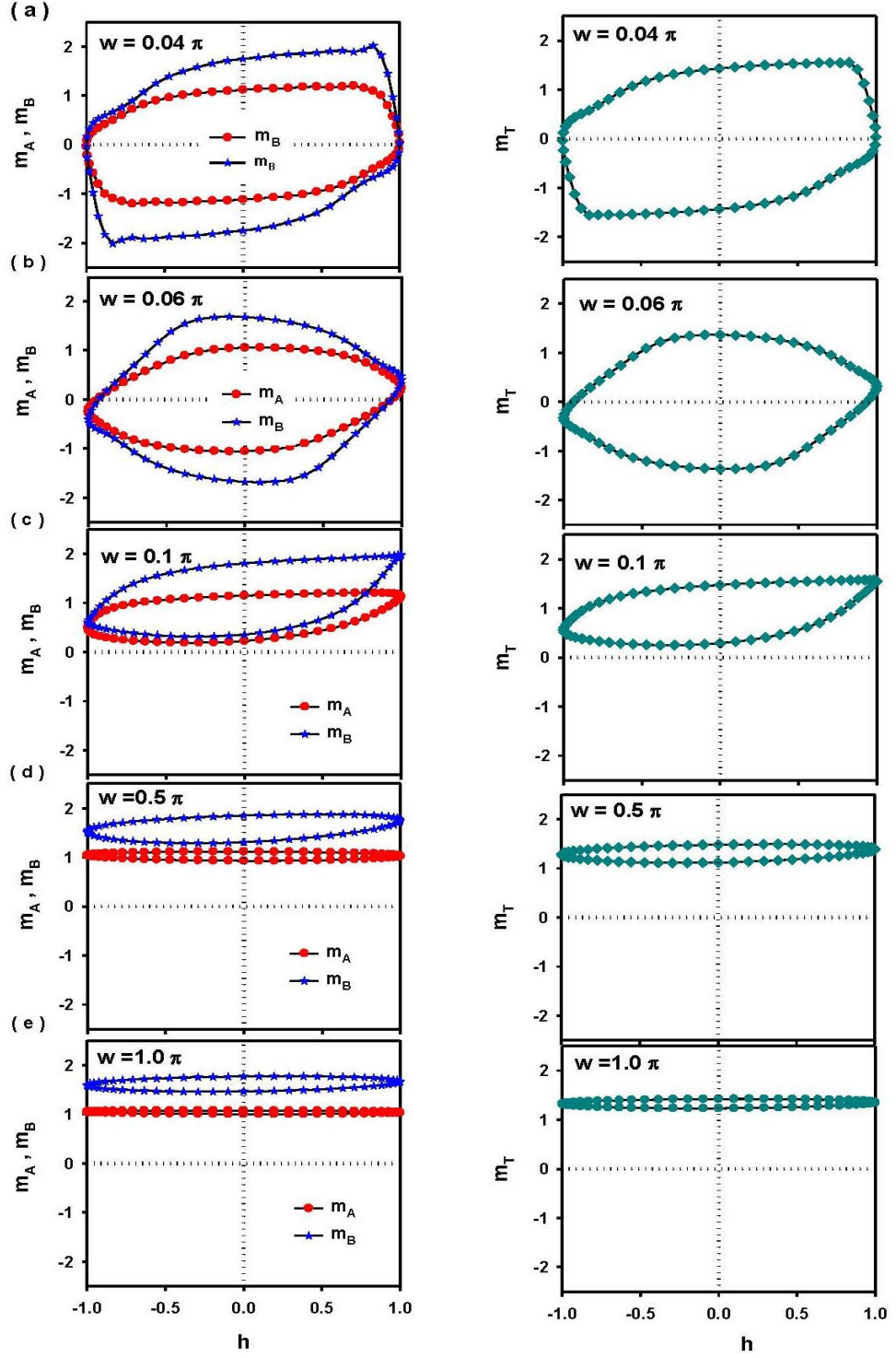
Şekil 2.4. Kare örgü üzerinde karma-spin (3/2, 5/2) Ising modelinin farklı kristal alan değerleri için ($D = 3.0, 1.0, 0.1, -0.5, -1.5, -2.0, -5.0$) dinamik histerezis alan eğrileri.



Şekil 2.5. Kare örgü üzerinde karma-spin (3/2, 5/2) Ising modelinin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin kristal alan etkileşim parametresine bağlı davranışları. **(a)** zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields), **(b)** artık mıknatıslanma (remanent magnetizations)

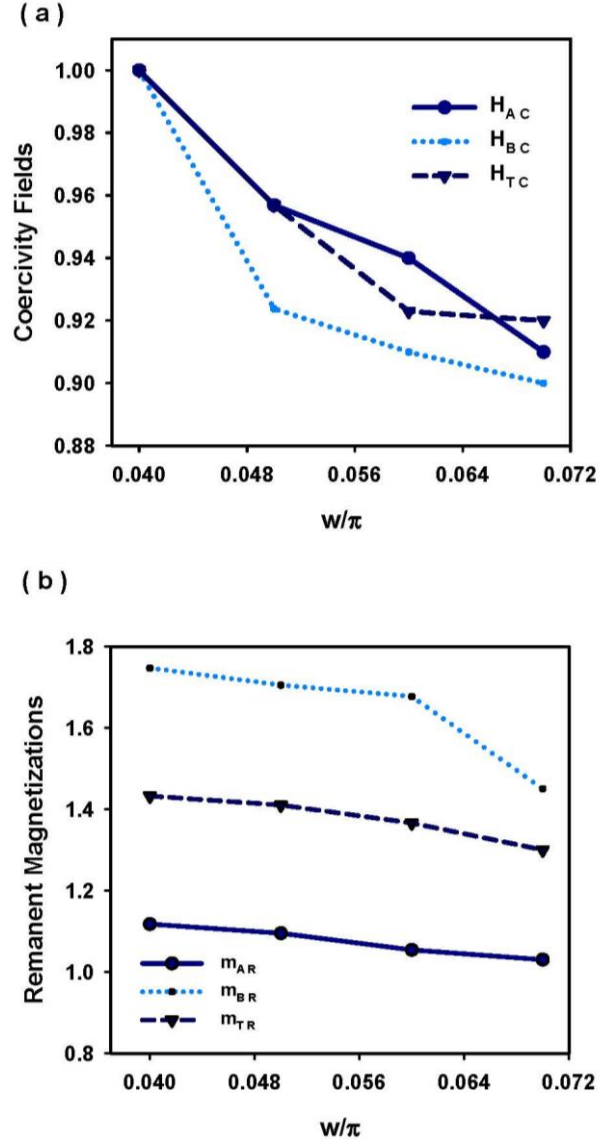
Son olarak, dinamik histerezis alan üzerine salınımlı dış manyetik alan frekansının etkisi araştırılmış ve sonuçlar Şekil 2.6'da gösterildi. Şekil 2.6, sabit $D = 0.1$ ve $T = 6.0$ değerleri ile beş farklı, $w = 0.04\pi, 0.06\pi, 0.1\pi, 0.5\pi$ ve 1.0π , salınımlı dış manyetik alan frekansı değerleri için elde edildi. Şekil 2.6'da, salınımlı dış manyetik alan frekans değerinin artmasıyla histerezis alan eğrisinin küçüldüğü görülmektedir. Küçük histerezis alan yumuşak mıknatıslanmalara karşı gelir. Frekansın küçük değerleri için sistem simetrik davranış sergilerken, frekansın büyük değerleri için antisimetrik

davranış sergilemektedir. Bu sonuçlar bazı teorik çalışmalar ile nicel olarak uyumludur [69, 71].



Şekil 2.6. Kare örgü üzerinde karma-spin $(3/2, 5/2)$ Ising modelinin farklı salınımlı dış manyetik alan değerleri için ($w = 0.04\pi, 0.06\pi, 0.1\pi, 0.5\pi$ ve 1.0π) dinamik histerezis alan eğrileri.

Şekil 2.6'dan hareketle sistemlerin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin salınımlı dış manyetik alana bağlı davranışları Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Şekil 2.7'den, salınımlı dış manyetik alan frekans değeri arttıkça zorlayıcı manyetik alan ve artık mıknatıslanma eğrilerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.7. Kare örgü üzerinde karma-spin ($3/2$, $5/2$) Ising modelinin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin salınımlı dış manyetik alan frekansına bağlı davranışları. **(a)** zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields), **(b)** artık mıknatıslanma (remanent magnetizations)

Bu bölümde elde edilen sonuçlar Computational Condensed Matter dergisinde yayınlanmıştır [73].

3. BÖLÜM

SONUÇ-TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, önemli yarım-tamsayılı yarım-tamsayılı karma-spin Ising sistemlerinden olan karma-spin (3/2, 5/2) Ising sisteminin dinamik histerik özellikleri (dinamik histerezis alanı, dinamik zorlayıcı alan ve dinamik artık mıknatıslanma) kare örgü üzerinde Glauber geçiş oranları temelli ekin-alan teorisi yani dinamik ekin-alan teorisi (DEAT) kullanarak incelendi. Yüksek spin sistemlerinden oluşmuş olmasından dolayı karma-spin (3/2, 5/2) Ising sistemi üzerine, diğer yarım-tamsayı yarım-tamsayı karma-spin Ising sistemlerine oranla daha az çalışılma yapılmıştır. Bu karma-spin (3/2, 5/2) modelinin bazı biyolojik bileşiklerin doğasının anlaşılması için uygun olduğu bilinmektedir. Birçok deney, ferrisitokrom (ferricytochrome) e' olarak bilinen belirli tipteki ferric heme proteininin fazla bilinmeyen manyetik özelliklerin arkasında, karma-spin (3/2, 5/2) atomlarının birleşiminin olduğu göstermektedir. Heme proteinleri, kan tarafından oksijen taşımada önemli bir rolü olmasının yanında optiksel iletişimdeki potansiyel uygulamalar ile yeni bio materyalleri tasarımılamak için temel olan sentetik olarak kullanılmaktadır ve nano gözenekli geçirgen (nanoporous) katalik materyaller için de temel oluşturmaktadır. Bu karma-spin sisteminin denge davranışları üzerine azda olsa bazı çalışmalar yapılmış ve bu konudaki çalışmalar halen devam etmektedir. Fakat, dengesiz yani dinamik davranışlar için yapılan çalışmalar sınırlı olup en iyi bilgilerimiz dahilinde yalnızca bir çalışma yapılmıştır [54]. Bu çalışmada dinamik faz geçiş sıcaklıkları (DFG), dinamik telafi sıcaklıkları ve dinamik faz diyagramları dinamik ortalama alan yaklaşımı (DOAY) ile elde edilmiştir. Bununla birlikte sistemin dinamik histerezis özellikleri (dinamik histerezis alan, dinamik zorlama alanı (coercivity field) ve dinamik artık mıknatıslanma (remanent magnetization) üzerine herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu tez çalışmasında sistemin dinamik histerik özellikleri bir spinin en yakın komşu spinler arasındaki korelasyonun etkisini hesaba katan ve DOAY'den daha

iyi sonuçlar veren Glauber geçiş oranları temelli korelasyonlu dinamik ekin-alan teorisi (DEAT) elde edilerek incelendi.

Giriş bilgilerinden sonra birinci bölümde, zamana bağlı salınımlı dış manyetik alanın varlığında keyfi bilineer ve kristal alan etkileşme parametresi Hamiltonyenli karma-spin ($3/2$, $5/2$) Ising sisteminin dinamik davranışını tanımlayan dinamik ekin-alan denklemleri iç içe geçmiş kare örgü üzerinde Glauber geçiş oranları temelli dinamik ekin-alan teorisi (DEAT) kullanılarak elde edildi. Elde edilen bu diferansiyel denklemler Adams-Moulton kestirme ve düzeltme, Runge-Kutta, vb gibi nümerik yöntemlerle çözüldü ve sonuçlar ikinci bölümde verildi.

Tezin son kısmında karma-spin ($3/2$, $5/2$) Ising sisteminin histerik özellikleri (dinamik histerezis alanı, dinamik coercivity ve dinamik artık mıknatıslanma) üzerine sıcaklığın, kristal alan etkileşme parametresinin ve salınımlı dış manyetik alan frekansının etkisi kapsamlıca tespit edildi. İlk olarak sıcaklığın etkisi araştırılmış ve Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Farklı sıcaklık değerleri için, sistemin yalnızca tekli histerezis davranış sergilediği gözlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda sistemin geniş bir alanla sert ferromanyetik özellik gösterdiği, kritik sıcaklık değerine yaklaştıkça histerezis alanı daha incelenip daha daraldığı ve yumuşak ferromanyetik özellik gösterdiği görülmüştür. Bu sonuç nicel olarak bazı teorik [65-67] ve deneysel çalışmalarda da gözlenmiştir [68]. Şekil 2.2’den hareketle karma-spin Ising sisteminin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin sıcaklığa bağlı davranışları elde edilmiş ve Şekil 2.3’de gösterilmiştir. İkinci olarak kristal alanın etkisi araştırılmış ve Şekil 2.4’te gösterilmiştir. Şekil 2.4’te kristal alanın artmasıyla histerezis alanların önce arttığı ve daha sonra azaldığı görülmüştür. Kristal alanın büyük değerlerinde karma-spin Ising sisteminin antisimetrik davranış sergilediği, kristal alanın küçük değerlerinde ise simetrik davranış sergilediği bulunmuştur. Kristal alanın farklı değerleri için sistemin yalnızca tekli histerezis davranış sergilediği görülmüştür. Bu sonuç nicel olarak bazı teorik [69-71] ve deneysel çalışmalarda da gözlenmiştir [72]. Şekil 2.4’ten hareketle sistemlerin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin kristal alana bağlı davranışları Şekil 2.5’te elde edilmiştir. Son olarak salınımlı dış manyetik alan frekansının etkisi araştırılmış ve Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Şekil 2.6’dan, salınımlı dış manyetik alan

frekans değeriyle histerezis alan eğrisinin küçüldüğü görülmektedir. Küçük histerezis alan yumuşak mıknatıslanmalara karşı gelir. Frekansın küçük değerleri için sistem simetrik davranış sergilerken, frekansın büyük değerleri için antisimetrik davranış sergilemektedir. Bu sonuçların bazı teorik çalışmalar ile nicel olarak uyumlu olduğu bulunmuştur [69, 71]. Şekil 2.6'dan hareketle sistemlerin zorlayıcı manyetik alan (coercivity fields) ve artık mıknatıslanma (remanent magnetizations) eğrilerinin salınımlı dış manyetik alana bağlı davranışları Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Burada bu noktayı da belirtelim ki, elde edilen sonuçlar, sıcaklığın, kristal alanın ve salınımlı dış manyetik alan frekansının dinamik histerezis alan üzerine belirleyici bir etkisinin olduğunu göstermiştir.

Bu tez çalışmamızın, karmaşık sistemlerin ve özellikle karma-spin sistemlerinin dinamiğinin daha duyarlı ve iyi sonuçlar veren, dinamik Monte Carlo (MC) hesaplamaları ve renormalizasyon (RG) teknikleri gibi yöntemlerle araştıran veya araştırarak bilim adamlarına temel oluşturma niteliğinde olması ümit etmekteyiz. Aynı zamanda, ileri teknoloji aletlerinin ve malzemelerinin yapılmasında veya geliştirilmesinde kullanılan önemli malzemelerden birisi olan manyetik, özellikle ferrimanyetik, malzemeleri deneysel ve teorik olarak inceleyen bilim adamlarına, elde edilecek sonuçların birçok noktadan ışık tutabilme potansiyelinde olması. Çünkü bu malzemeler genelde teorik olarak incelenmektedir. Ayrıca, karmaşık sistemlerin dinamiğini mikroskobik teorilerle inceleyen mikroskobik teorisini geliştirmeye çalışan bilim adamlarının araştırmalarına temel oluşturma potansiyelinde oluşu. Diğer bir ifade ile nano ölçekli manyetik malzemelerin yapılarının incelenmesi çalışmalarına taban oluşturma potansiyeline ışık tutacağına ümit etmekteyiz.

KAYNAKLAR

1. Lenz, W., "Beitrag zum Verstandnis der Magnetischen Erscheinungen in Festen Körpern", **Z. Physik.**, vol.21, pp. 613-615, 1920.
2. Ising, E., Beitrag zur Theorie des Ferro- und Paramagnetismus, Dostora Dissertation. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultat der Hamburgischen Universitat, Hamburg,1924.
3. Ising, E., "Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus", **Z. Physik**, vol.31, pp. 253-258, 1925.
4. Onsager, L., "Crystal Statistics. I.A. Two-Dimensional Model with an Order-Disorder Transition ", **Phys. Rev.**, vol.65, pp. 117-149, 1944.
5. Blume, M., " Theory of the first-order magnetic phase change in UO_2 ", **Phys. Rev.**, vol.141, pp. 517-524, 1966.
6. Capel, H.W., "On the possibility of first-order phase transitions in Ising systems of triplet ions with zero-field splitting", **Physica**, vol. 32, pp. 966-988, 1966.
7. Capel, H.W., "On the possibility of first-order phase transitions in Ising systems of triplet ions with zero-field splitting", **Physica**, **37**, pp. 423-441, 1967.
8. Blume, M., Emery, V. J. R. B. Griffiths, "Ising model for the λ transition and phase seperation in $\text{He}^3\text{-He}^4$ mixtures", **Phys. Rev. A**, **4**, pp. 1071-1077, 1971.
9. Cooke, A.H., "Crystal Statistics. I.A. Observation of a Magnetically Controllable Jahn Teller Distortion in Dysprosium Vanadate at Low Temperatures", **Solid State Commun.**, **8**, pp. 689-692, 1970.
10. Cooke, A.H., Martin, D. M., Wells, M. R., "The Specific Heat of Dysprosium Vanadate", **Solid State Commun.**, **9**, pp. 519-522, 1971.
11. Cooke, A.H., Martin, D. M., Wells, M. R., "Magnetic and Thermal Properties of Dysprosium Vanadate", **J. Phys.(Paris). Colloq.** **32**, C1, pp.488-489, 1971.
12. Will, G., Schafer, W., "The Magnetic Structure of Antiferromagnetic DyVO_4 ", **J. Phys. C: Solid State Phys.**, **4**, pp. 811-819, 1971.
13. Seyatat, M., et al., "Experimental Study of Magnetic and Crystallographic Transition in DyVO_4 ", **Phys. Lett.**, **34A**, pp. 361-362, 1971.
14. Sivardière, J., Blume, M., "Dipolar and Quadrupolar Ordering in Spin $S=3/2$ Ising Systems", **Phys. Rev. B**, **5**, pp. 1126-1134, 1972.
15. Krinsky, S., Mukamel, D., "Spin-3/2 Ising Model for Tricritical Points in Ternary

- Fluid Mixtures", **Phys. Rev. B**, **11**, pp. 399-410, 1975.
16. Sivardière, J., "Double Spin One-Half Lattice Gas Model", **Le Journal de Physique**, **37**, pp. 1267-1277, 1976.
 17. Obokata, T., Oguchi, T., "One-dimensional Ising model with general spin". **Journal of the Physical Society of Japan**, **25**: 322-325, 1968.
 18. Aleonard, R., Morin, P., "TmCd quadrupolar ordering and magnetic interactions". **Physical Review B**, **19**: 3868-3872, 1979.
 19. Ray, D., Sivardière J., "Dipolar and quadrupolar orderings in the Γ_3 - Γ_5 magnetic system". **Physical Review B**, **18**: 1401-1405, 1978.
 20. Iwashita, T., Satou, R., Imada, T., Idogaki, T., "Dimensional crossover behaviour of the zero-temperature magnetization for the selective magnetic dilution", **Physica B**, **284-288**: 1203-1204, 2000.
 21. Tucker, J. W., "Ising ferromagnet with biquadratic exchange interaction and uniaxial anisotropy". **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **71**: pp. 27-31, 1987.
 22. Plascak, J. A., Moreira, J. G., Barreto, F. C., "Mean-field solution of the general spin Blume-Capel model". **Physics Letters A**, **173**: pp. 360–364, 1993.
 23. Kaneyoshi, T., Jäschur, M., "Contribution to the theory of the spin-5/2 Blume-Capel model". **Physiscs Status Solidi B**, **175**: pp. 225–236, 1993.
 24. Song, W. J., Yang, C. Z., "Study of the critical-behavior for the S=5/2 transverse Ising-model in a random-field". **Physiscs Status Solidi B**, **185**: pp.227–233, 1994.
 25. Lee, Y. S., Greven, M., Wells, B. O., "Birgeneau, B. J., Shirane, G., Spin correlations in the two dimensional spin-5/2 Heisenberg antiferromagnet Rb₂MnF₄". **The European Physical Journal B**, **5**: 15–22, 1998.
 26. Mansuripur, M., "Magnetization Reversal, Coercivity, and the Process of Thermomagnetic Recording in Thin Films of Amorphous Rare Earth Transition Metal Alloys", **Journal of Applied Physics**, **61**, 1580-1587, 1987.
 27. Coronado, E., "Molecular Magnetism: From Molecular Assemblies to the Devices (NATO ASI Series E, Vol. 321), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.
 28. Li, P.F., Chen, Y.G., Chen, H., "Second- to First-Order Transition in Two Coupled Antiferromagnetic Rings", **Eur. Phys. J. B**, **51**, 473-476, 2006.

29. Bobák, A. and Juncisin, M., "Ferrimagnetism in Diluted Mixed-Spin Two-Dimensional Ising Models", **J. Magn. Magn. Mater.**, **163**, 292-298, 1996.
30. Bobák, A. and Juncisin, M., "Ferrimagnetism in Diluted Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Ising Systems" , **Journal de Physique IV**, **7**, 179-180, 1997.
31. Buendia, G. M., Cardona, R., "Monte Carlo Study of a Mixed Spin-3/2 and Spin-1/2 Ising Ferrimagnetic Model", **Phys. Rev. B**, **59**, 6784-6789, 1999.
32. Benayad, N., Dakhama, A., Klümper, A., Zittartz, J., "Magnetic Properties of a Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Transverse Ising model", **Zeitschrift Fur Physik B**, **101**, 623-630, 1996.
33. Bobák, A., Horváth, D., "Magnetic Properties of Diluted Mixed Spin-1/2 and Spin-s Ising Ferrimagnets with a Crystal Field", **Phys. Stat. Sol. b**, **213**, 459-470, 1999.
34. Jiang, W., Wei, G.-Z., Xin, Z.-H., "Magnetic Properties of a Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Transverse Ising Model with a Crystal Field" , **Physica A** **293**, 455-464, 2001.
35. Wei, G.-Z., et al, "Magnetic Properties of Mixed-Spin Ising Systems in a Longitudinal Magnetic Field", **J. Magn. Magn. Mater.**, **271**, 246-253, 2004.
36. Li, J., Wei, G., Du, A., "Green Function Study of a Mixed Spin-3/2 and Spin-1/2 Heisenberg Ferrimagnetic Model", **J. Magn. Magn. Mater.**, **269**, 410-418, 2004.
37. Zhang, X., Kong, X.-M., "Ferromagnetism in the Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Blume-Capel System on the Two-Fold Cayley Tree", **Physica A**, **369**, 589-598, 2006.
38. Strecka, J., Canová, L., "Non-Universal Critical Behaviour of a Mixed-Spin Ising Model on the Extended Kagome Lattice", **Condensed Matter Physics**, **9**, 179-186, 2006.
39. Albayrak, E., Alçi, A., "Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Blume-Capel Ising Ferrimagnetic System on the Bethe Lattice", **Physica A**, **345**, 48-60, 2005.
40. Jascur, M., Strecka, J., "Magnetic Properties of a Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Ising Model with an Uniaxial and Biaxial Crystal-Field Potential", **Physica A**, **358**, pp. 393-412, 2005.
41. Strecka, J., "Weak Universality, Bicritical Points and Reentrant Transitions in

- the Critical Behaviour of a Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Ising Model on the Union Jack (entered square) Lattice", **Physic. Stat. Sol. b**, **243**, pp.708-715, 2006.
42. Mackowiak, J., "Mean-Field Heat Capacity of Dilute Magnetic Alloys", Cond-Mat/0703146.
 43. Manriquez, J. M., "A Room Temperature Molecular/Organic-Based Magnet", **Science**, **252**, pp. 1415, 1991.
 44. Morin, G., "Complex Ac Susceptibility Studies of the Disordered Molecular Based Magnets V (TCNE)X: Role of Spinless Solvent", **J. Appl. Phys.**, **73**, pp. 5648-5650, 1993.
 45. Du, G., "Anomalous Charge-Transport Phenomena in Molecular-BasedMagnet V (TCNE)X.Y(Solvent) ", **J. Appl. Phys.**, **73**, pp. 6566-6568, 1993.
 46. Deviren B., Keskin M., Canko O., "Kinetics of a mixed spin-1/2 and spin-3/2 Ising ferrimagnetic model", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, vol.321, pp.458-466, 2009.
 47. Deviren B., Keskin M., Canko O, "Dynamic Compensation Temperature in the Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Ising Model in an Oscillating Field on Alternate Layers of Hexagonal Lattice", **IEEE Transactions on Magnetics**, vol.45, pp. 2640 – 2643, 2009
 48. Ekiz C. "Mixed Spin-1/2 and Spin-S Ising Ferrimagnets With A Crystal-Field", **Physica A: Statistical and Theoretical Physics**, **353**: 286-296, 2005
 49. Strečka, J., "Exact results of a mixed spin-1/2 and spin-s ising model on a bathroom tile (48) lattice: effect of uniaxial single-ion anisotropy", **Physica A**, **360**: 379, 2006.
 50. Matašovská, S., Jaščur M., "Reentrant transitions and multicomensation phenomena of the exactly solvable mixed spin-s and spin-1/2 Ising model on decorated planar lattice" , **Physica A**, **383**: 339-350, 2007.
 51. Deviren B., Keskin M., Canko O, "Dynamic phase transitions in the kinetic mixed spin-1/2 and spin-5/2 Ising model under a time-dependent oscillating magnetic field", **Phase Transitions A Multinational Journal**, vol. 83, pp.526–542, 2010.
 52. Albayrak E., Yiğit, A. "Mixed spin-3/2 and spin-5/2 Ising system on the Bethe lattice", **Physics Letters A**, **353**: 121-129, 2006.

53. Yessoufou, R. A., Amoussa, S. H., Hontinfinde, F., "Magnetic properties of the mixed spin-5/2 and spin-3/2 blume-capel Ising system on the two-fold cayley tree", **Central European Journal of Physics**, **7**: 555-567, 2009.
54. Deviren, B., Keskin, M., "Dynamic Phase Transitions and Compensation Temperatures in a Mixed Spin-3/2 and Spin-5/2 Ising System", **Journal of Statistical Physics**, **140**, 934-947, 2010.
55. Matsudaira, N., "Ising Ferromagnets with Random Impurities", **Journal of the Physical Society of Japan**, **35**, 1593, 1973.
56. Glauber, R.J., "Time-dependent statistics of the Ising model", **Journal of Mathematical Physics**, **4**: pp. 294-307, 1963.
57. Kaneyoshi, T., Fittipaldi, I.P., Honmura, R., Manabe, T., **Physical Review B**, **24**: pp. 481-484, 1981.
58. Callen, H.B., "A note on Green functions and the Ising model". **Physics Letters**, **4**: pp. 161-164, 1963.
59. Waerden, B., L., V., "Beweis einer baudetschen vermutung". **Nieuw Arch Wisk**, **15**: pp.212-216, 1927.
60. De La Espriella N., Buendía G.M., "Magnetic behavior of a mixed Ising 3/2 and 5/2 spin model", **J. Phys. Condens. Matter**, **23**.,pp. 176003, 2011.
61. Suzuki, M., Kubo, R., "Dynamics of the Ising model near the critical point". **Journal of the Physical Society of Japan** **24**: pp.51-60, 1968.
62. Kantar, E., Ertaş M., "Dynamic hysteresis behaviors in the kinetic Ising system on triangular lattice", **Phase Transitions**, **91**, pp. 370-381, 2018.
63. Kantar. E., "Magnetic hysteresis, compensation behaviors, and phase diagrams of bilayer honeycomb lattices", **Chinese Physics B**, vol. 24, no. 10, pp. 107501
64. Keskin. M., Kantar, E., "Influence of the Shape on Magnetic Properties of Ising Nanostructures", **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism**, vol. 30, no.7, pp. 1849–1857, 2017.
65. Deviren. B., Sener. Y., Keskin. M., "Dynamic magnetic properties of the kinetic cylindrical Ising nanotube", **Physica A**, vol.392, pp. 3969-3983, 2013
66. Yüksel. Y., "Monte Carlo simulations of dynamic phase transitions in ultrathin Blume-Capel films", **Phys. Lett.** **377** (38), pp.2494-2504, 2013

67. Aktaş, B.O., Akıncı. Ü., Polat. H., "Dynamic hysteretic features of Ising-type thin films", **Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys.** **90(1)**:012129, 2014
68. Suen J.S., Lee M.H., Teeter G., Eskine J.L., "Magnetic hysteresis dynamics of thin Co films on Cu(001) ",**Physical Review B**, vol.59, pp.4260, 1999
69. Ertaş M., Keskin M., "Dynamic Hysteresis Features In A Two-Dimensional Mixed Ising System", **Physics Letters a**, vol.379, pp.1576-1583, 2015.
70. Akıncı Ü., "Crystal field dilution in S-1 Blume Capel model: Hysteresis behaviors", **Phys. Lett. A**, vol.380,pp.1352-1357, 2016.
71. Ertaş M., "Hysteresis and Compensation Behaviors of Mixed Spin-1 and Spin-2 Hexagonal Ising Nanowire System", **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism**, vol.29, pp.1805-1812, 2016.
72. Dimian M., Andrei P., Mehta M., Idubor O.A., "Thermal relaxation in magnetic multi-layer materials with mixed hysteretic behavior", **Journal of Applied Physics** **117**, 17A745, 2015.
73. Ertaş M., Yılmaz A., "Dynamic magnetic properties of mixed half-integer ($\sigma = 3/2$) and half-integer ($S = 5/2$) spins: Dynamic Effectice-Field Theory", **Computational Condense Matter**, vol.14, pp.1-7, 2018.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Ali YILMAZ
 Uyuğu: Türkiye Cumhuriyeti (TC)
 Doğum Tarihi ve Yeri: 04.03.1988 / KAYSERİ
 Medeni Durumu: Bekar
 Telefon: 0507 4624398
 E-mail: aylmz.3866@gmail.com
 Yazışma Adresi: Hilal Mah. Balalan Çıkması No:27 Kocasinan/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik / KAYSERİ	2014
Lise	Boğazlıyan Lisesi / YOZGAT	2006

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans öğrenimi sırasında Computational Condensed Matter dergisinde yayınlanan bir adet makalesi vardır. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde düzenlenen 24. İstatistik Fizik Günleri (24. IFG) toplantısında bir adet bildiri sundu.

YABANCI DİL

İngilizce