

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

**ALTİGEN ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN (1/2, 3/2)
ISING SİSTEMİNİ KULLANARAK MOLEKÜLER-
TEMELLİ MANYETİK MALZEMELERİN DİNAMİK
MANYETİK ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Mariya FADHIL IMRAN ALHAMERİ**

**Danışman
Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN**

Yüksek Lisans Tezi

**Temmuz 2021
KAYSERİ**

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

**ALTİGEN ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN (1/2, 3/2)
İSİNG SİSTEMİNİ KULLANARAK MOLEKÜLER-
TEMELLİ MANYETİK MALZEMELERİN DİNAMİK
MANYETİK ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Mariya FADHİL İMRAN ALHAMERİ**

**Danışman
Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN**

**Temmuz 2021
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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 belirtirim.

Mariya FADHIL IMRAN ALHAMERI

İmza

“Altıgen Örgü Üzerinde Karma Spin (1/2, 3/2) Ising Sistemini Kullanarak Moleküler-Temelli Manyetik Malzemelerin Dinamik Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Mariya FADHIL IMRAN ALHAMERI

Danışman

Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN

FİZİK ABD Başkanı

Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN *İmza*

TEŞEKKÜR

Bana çalışmalarım süresince her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, hayatım boyunca beni en iyi şekilde yetiştiren, bana maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan, her zaman yanımda olan başta annem Fatima ve ağabeylerime, yengelerime ve biricik oğlum Hüseyin'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Fizikte master ve doktora yapmamı teşvik eden ve bu teze başladığım zamanlarda kaybettiğim babam Avukat Fadhıl ALHAMERİ'yi rahmetle anıyor ve ona verdiğim sözü tutmanın huzurunu yaşıyorum. Bana tez çalışma konusunu veren ve çalışmalarımda en büyük desteği kendisinden gördüğüm, çalışmalarım süresince geniş bilgi birikimi, yol göstericiliği, tecrübesi ile destek ve yardımlarını esirgemeyen saygı değer hocam tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN'a ve saygıdeğer Prof. Dr. Mustafa KESKİN hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince 119F129 kodlu proje kapsamında sağladıkları destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Kurumuna (TUBİTAK) teşekkür ederim.

Mariya FADHİL IMRAN ALHAMERİ

Temmuz 2021, KAYSERİ

ALTİGEN ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN (1/2, 3/2) ISİNG SİSTEMİNİ KULLANARAK MOLEKÜLER-TEMELLİ MANYETİK MALZEMELERİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mariya FADHİL IMRAN ALHAMERİ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2021

Danışman: Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN

ÖZET

Öncelikle, yol ihtimaliyet yöntemini kullanarak, zamanla değişen manyetik alan altında karma spin (1/2, 3/2) Ising modelinin dinamik histerisiz özelliklerine etkileşme parametrelerinin etkilerini inceledik. Sonra, etkileşme parametrelerinin dinamik coersive alanlar ve dinamik remanent manyetizasyona etkisini araştırdık. Elde edilen sonuçların, MST (Melt spinning tekniği) ile üretilen bazı manyetik malzemeler ve bunların histerisiz özellikleri hakkında hem teorik hem de deneysel olarak bulunan sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir. İkinci olarak, temel fenomenolojisi ve arkasındaki mekanizma henüz tam manasıyla keşfedilmemiş olan dinamik faz geçişleri araştırılmıştır. Dinamik denklemlerin nümerik çözümleri, dinamik faz geçiş sıcaklıkları ve tabiatlarını (birinci dereceden veya ikinci dereceden) verir. Dört farklı düzlemde dinamik faz diyagramları oluşturulmuş ve bunların p , i , af temel fazları ve $i+af$, $p+i$ hibrid fazlarını sergilemelerinin yanısıra dinamik üçlü kritik nokta, dinamik üçlü nokta, dinamik kritik uç nokta, dinamik çift kritik uç nokta içerdiği görüldü. İlaveyen, etkileşme parametrelerine bağlı olarak re-entrant davranışı tespit edilmiştir. Ayrıca telafi davranışları incelendiğinde, sistemin zengin telafi davranışı sergilediği de bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Karma spin (1/2, 3/2) Ising modeli; Yol ihtimaliyet yöntemi; Dinamik faz geçişi; Dinamik faz diyagramı.

**INVESTIGATION OF DYNAMIC MAGNETIC PROPERTIES OF
MOLECULAR-BASED MAGNETIC MATERIALS USING THE MIXED SPIN
(1/2, 3/2) ISING SYSTEM ON HEXAGONAL LATTICE**

Mariya FADHIL IMRAN ALHAMERI

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, July 2021

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN

ABSTRACT

First, within the path probability method, the influences of the interaction parameters on the dynamic hysteresis properties of a mixed spin (1/2, 3/2) Ising model driven a time-varying magnetic field were investigated. We examined the effects of the interaction parameters on the dynamic hysteresis loops. Then, we investigated the impacts of the interaction parameters on the dynamic coercive fields and dynamic remanent magnetizations. Some of obtained results are in qualitatively good agreement with some theoretically reported studies as well as experimentally works in some magnetic materials and the hysteresis loops obtained within the melt spinning method. Second, we study the dynamic phase transitions (DPTs) that the mechanism behind them have not yet been discovered rigorously and their basic phenomenology is still undeveloped. Numerical solutions of the dynamic equations give DPT temperatures and the nature (a first- or second-order) of the DPTs. The dynamic phase diagrams were constructed in four different planes and display paramagnetic (*p*) phase, ferrimagnetic (*i*) phase, antiferromagnetic (*af*) phase and the *i+af* and *i+p* mixed or hybrid phases as well as the dynamic tricritical point and dynamic double critical end point, dynamic critical end point and dynamic triple point. Moreover, the reentrant behavior was observed that depending on the system parameters. We also examined the compensation behaviors and found that the system illustrates rich dynamic compensation behaviors.

Keywords: Mixed spin (1/2, 3/2) Ising model; Path probability method; Dynamic phase transition; Dynamic phase diagram; Reentrant behavior.

İÇİNDEKİLER

ALTİGEN ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN (1/2, 3/2) ISING SİSTEMİNİ KULLANARAK MOLEKÜLER-TEMELLİ MANYETİK MALZEMELERİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Ising Modeli	3
-------------------------	---

2. BÖLÜM

ALTİGEN ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN (1/2, 3/2) ISING SİSTEMİ VE DİNAMİK FAZ GEÇİŞLERİ İÇİN DÜZEN PARAMETRELERİ

2.1. Ardışık Altıgen Örgü Üzerinde Karma Spin (1/2, 3/2) Ising Modeli	8
2.2. YİY kullanarak Dinamik Manyetik Faz Geçişleri İçin Düzen Parametreleri .	12

3. BÖLÜM

MOLEKÜLER-TEMELLİ MANYETİK MALZEMELERİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

3.1. Histerisiz Eğrileri	19
3.1.1. Histerisiz Eğrilerine Sıcaklık Etkisi	19
3.1.2. Histerisiz Eğrilerine Frekans Etkisi	22
3.1.3. Histerisiz Eğrilerine k_2 Oran Sabiti Etkisi.....	23
3.1.4. Histerisiz Eğrilerine D Kristal Alan Sabiti Etkisi	25
3.1.5. Histerisiz Eğrilerine J_2 Bilineer Etkileşme Sabiti Etkisi.....	26
3.1.6. Histerisiz Eğrilerine J_3 Bilineer Etkileşme Sabiti Etkisi.....	27
3.2. Dinamik Manyetizasyon ve Faz Diyagramları	28

4. BÖLÜM

SONUÇ ve TARTIŞMA, ÖNERİLER

4.1. Sonuç ve Tartışma.....	38
4.2. Öneriler	40
KAYNAKÇA	42
ÖZGEÇMİŞ.....	46

KISALTMALAR

af	: Antiferromanyetik faz.
DEFT	: Dinamik Etkin Alan Teorisi.
DFG	: Dinamik Faz Geçişleri.
DOAT	: Dinamik Ortalama Alan Teorisi.
GFT	: Green Fonksiyonu Teknikleri.
H	: Manyetik Alan.
i	: Ferrimanyetik faz.
KDY	: Kümesel değişim yöntemi.
MC	: Monte Carlo.
MCS	: Monte Carlo Simülasyonu.
OAT	: Ortalama Alan Teorisi.
MST	: Melt- spinning tekniğindeki.
EAT	: Etkin Alan Teori.
p	: Paramanyetik faz.
RGT	: Renormalizasyon Grup Teorisi.
T	: Sıcaklık.
T_c	: İkinci derece faz geçiş sıcaklığı.
T_t	: Birinci derece faz geçiş sıcaklığı.
YİY	: Yol ihtimaliyet yöntemi.
z	: Spinler arasındaki en yakın komşu sayısı.

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. <i>A</i> Alt Örgüsü için etkileşimler.	14
Tablo 2.2. <i>B</i> Alt Örgüsü için etkileşimler.	15



ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 1.1. En yakın komşu spin sayısı kare örgü ve altıgen örgü için sırayla, $z = 4$ ve $z = 6$ 'dır..... 4
- Şekil 2.1. Müteakip tabakalı altıgen örgüler üzerinde spinlerin yerleşiminin taslağı. Örgü, σ (beyaz daireler) ve S (kırmızı daireler) spinlerinin birbirini takip eden tabakalara yerleşmesiyle oluşmuştur. Böylece model, A ve B gibi birbiri içine geçmiş iki alt örgülü Ising sistemi olarak ele alınabilir..... 8
- Şekil 3.1. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin sıcaklıkla değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_2 = 5.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$ olarak, $D = 0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $\omega = 0.30\pi$ alınmıştır..... 20
- Şekil 3.2. Şekil 3.1'deki durum için, faz geçiş sıcaklığı ve dinamik coersive alan ve dinamik remanent manyetizasyon. 21
- Şekil 3.3. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin frekansla değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_2 = 5.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$ olarak, $D = 0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $T = 2.0$ alınmıştır. 22
- Şekil 3.4. Şekil 3.3'deki durum için dinamik coersive alan ve dinamik remanent manyetizasyon..... 23
- Şekil 3.5. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin k_2 oran sabiti ile değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_2 = 5.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $\omega = 0.30\pi$ olarak, $D = 0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $T = 2.0$ alınmıştır..... 24
- Şekil 3.6. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin D kristal alan sabiti ile değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_2 = 5.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$, $\omega = 0.30\pi$ olarak, $H_0 = 1.50$ ve $T = 2.5$ alınmıştır..... 25
- Şekil 3.7. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin J_2 bilineer etkileşme sabiti ile değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$, $\omega = 0.30\pi$ olarak, $D = 0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $T = 2.0$ alınmıştır..... 26

- Şekil 3.8. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin J_2 bilineer etkileşme sabiti ile değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$, $\omega = 0.30\pi$ olarak, $D=0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $T=2.0$ alınmıştır..... 27
- Şekil 3.9. Dinamik faz geçiş sıcaklıkları ve tabiatları. Parametreler, $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$ olmak üzere, (a) $H_0 = 3.9$ ve $D = 3.0$. (b) $H_0 = 1.5$ ve $D = 3.0$. (c) $H_0 = 4.7$, $D = 3.0$ ve $M^A = 0.5$, $M^B = 0.5$. (c') Önceki şıkla aynı fakat $M^A = 0.5$, $M^B = 1.5$. (d) $H_0 = 1.0$, $D = 0.1$ ve $M^A = 0.5$, $M^B = 0.5$. (d') Önceki şıkla aynı fakat $M^A = 0.5$, $M^B = 1.5$ 29
- Şekil 3.10. (T, H_0) düzleminde faz diyagramı. Etkileşme parametreleri $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$ olmak üzere (a) $D = 3.0$, (b) $D = 3.5$, ve (c) $D = 4.0$ alınmıştır..... 31
- Şekil 3.11. (T, D) düzleminde faz diyagramı. Etkileşme parametreleri $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$ ve $H_0 = 0.1$ alınmıştır..... 32
- Şekil 3.12. $J_3 = 1.5$ olmak üzere muhtelif H_0 ve D değerleri için hesaplanan dinamik faz diyagramının (T, J_2) düzleminde görünüşü. $H_0 = 4.5$ değeri için (a) $D = 1.0$, (b) $D = 2.0$ (c) $D = 3.0$, (d) $D = 4.0$ ve (e) $H_0 = 5.0$, $D = 1.0$ 33
- Şekil 3.13. $J_2 = 0.5$ olmak üzere muhtelif H_0 ve D değerleri için hesaplanan dinamik faz diyagramının (T, J_3) düzleminde görünüşü. $H_0 = 1.0$ değeri için (a) $D = 4.0$, (b) $D = 6.0$ (c) $D = 8.0$ ve (d) $H_0 = 2.0$, $D = 9.0$ 35
- Şekil 3.14 (a)-(f) bulundu ki Neel sınıflandırmasına göre sistemin sırayla L-, N-, P-, Q-, R-, S-, ve W- tip davranış sergilediği tespit etmiş oldu..... 37

GİRİŞ

Moleküler-temelli manyetik malzemeler ve özellikle de ferrimanyetik malzemeler, ileri teknolojik uygulamalarda gün geçtikçe daha yoğun kullanıldıklarından dolayı bu malzemeler ve bunların faz davranışları günümüzde hem teorik hem de deneysel araştırmacıların üzerinde en fazla mesai harcadıkları araştırma konularından birisi olmuştur. Son yıllarda, manyetik malzemelerin teorik olarak incelenmesinde prototip modeller olarak tek-spin sistemlerinden ziyade karma-spin (yarım tamsayılı-tamsayılı, yarım tamsayılı-yarım tamsayılı ve tamsayılı-tamsayılı) sistemleri kullanılmaktadır. Manyetik malzemeler için en uygun ve yoğun kullanılan sistemler ise karma-spin $(1/2, 1)$; $(1/2, 3/2)$ ve $(2, 5/2)$ Ising sistemleridir. Ayrıca, karma-spin $(1/2, 2)$; $(1/2, 5/2)$; $(1, 3/2)$; $(1, 2)$; $(3/2, 5/2)$ gibi diğer karma-spin sistemleri de kullanılarak, manyetik malzemelerin denge özellikleri çok kapsamlıca incelenmiş ve günümüzde de incelenmektedir. Bu incelemeler, denge istatistiksel fizikte geliştirilen ve uygulanması çok iyi bilinen ortalama-alan teorisi (OAT), etkin-alan teorisi (EAT), renormalizasyon grup teorisi (RGT), Monte Carlo (MC) hesaplamaları ve bu belirtilen yöntemlerin farklı modifikasyonları kullanılarak yapılmış ve yapılmaktadır. Karma-spin sistemleri üzerine yoğun çalışmaların yapılmasının diğer bir önemli nedeni ise tek-spin sistemlerine göre daha az öteleme simetrisine sahip olmaları nedeniyle çok daha zengin faz diyagramları elde edilmesidir.

Karma spin sistemleri kullanılarak manyetik malzemelerin denge özellikleri genelde daha kapsamlı incelendiği halde, dinamik özellikleri üzerinde aynı oranda çalışmalar yapılamamıştır. Bunun en büyük sebebi ise dinamik inceleme hesaplamalarının daha zor oluşu ve dengesiz istatistiksel fizikte geliştirilen dinamik yöntemlerin veya modellemelerin tatminkâr olmayışdır. En fazla kullanılan yöntemler olarak ortalama alan teorisi temelli Glauber-tipi stokastik dinamik, kısaca dinamik ortalama alan teorisi (DOAT) diye adlandırılır, etkin-alan teorisi temelli Glauber-tipi stokastik dinamik, kısaca dinamik etkin-alan teorisi (DEAT) diye adlandırılır, yol ihtimaliyet yöntemi

(YİY) sayılabilir. Karma-spin sistemlerinin dinamikleri genelde DOAT ve DEFT yöntemleriyle incelenmiş olup YİY ile de birkaç çalışma mevcuttur [1, 2]. Oysa ki bu tezin yöntem bölümünde ayrıntılı olarak bahsedileceği üzere YİY ile çalışmak, DOAT ve DEFT ile çalışmaktan daha avantajlıdır. Çünkü DOAT ve DEFT tek oran sabiti içerdikleri halde YİY iki ve üç oran sabiti içermektedir. Oran sabitleri deneysel çalışmalarda soğuma oran katsayılarına tekabül ettiğinden, YİY ile elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla karşılaştırılması daha uygun ve deneyci araştırmacılara daha fazla yol gösterici olacaktır. Ayrıca, basit Hamiltonyenli sistemlerde bile YİY’nde düzen parametreleri (mıknatıslanma veya dipol, m ve kuadropol, q) çiftlenimli (coupling) gelmekte iken DOAT ve DEFT de gelmemektedir. Öte yandan spin korelasyonlarının hesaba katılmaması, YİY’nin DEFT ye göre bir eksikliğidir. Bu nedenle, hem teknolojik hem de akademik araştırmalar bakımından önemli olan karma-spin $(1/2, 1)$; $(1/2, 3/2)$ ve $(2, 5/2)$ Ising sistemleri kullanılarak manyetik malzemelerin dinamiklerinin YİY ile incelenmesi üzerine yapılacak çalışmalar literatürde önemli bir boşluğu dolduracağı gibi manyetik ve özellikle ferrimanyetik malzemeler üzerine çalışanlara da yol gösterici/ışık tutucu mahiyette olacaktır.

Moleküler-temelli manyetik malzemelerin dinamik özellikleri kapsamında, histerisiz ve telafi (compensation) davranışlarının araştırılması, hem teknolojik uygulamalar ve hem de akademik çalışmalar bakımından önemli konular içerisinde yer almaktadır. Ayrıca, faz geçiş sıcaklıklarının incelenmesi ve faz diyagramlarının elde edilmesi ise yoğun madde fiziği ve istatistiksel fiziğin önemli ve güncel konularından biridir. Sonuçlar, literatürdeki mevcut farklı yöntemlerle elde edilen sonuçlarla ve aynı zamanda bu karma-spin sistemlerinin karşılık geldiği sistemler veya benzer sistemlerle yapılan deneysel sonuçlarla da karşılaştırılacaktır. Böylece, hem YİY’in karma-spin sistemlerinin dinamiklerinin incelenmesindeki geçerliliği test edilmiş olacak hem de bu konuda çalışan deneysel araştırmacılara daha fazla yol gösterici potansiyelde olacaktır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1 Ising Modeli

Bir seyreltik gazın molekülleri arasındaki etkileşmeler gibi parçacıkları arasında zayıf etkileşmelerin olduğu sistemlerin incelenmesi bazı basitleştirmeler yapılarak kolayca yapılabilir. Öte yandan, parçacıklar arasında kuvvetli (şiddetli) etkileşmelerin cereyan ettiği sistemlerde ise basitleştirmeler yapmak artık mümkün değildir. Ferromanyetizma ve faz değişimleri buna iyi bir örnektir. Bu tür sistemlerin hassas bir şekilde incelenmesi son derece zor olmakla beraber kuvvetli etkileşimler nedeniyle ortaya çıkan fiziksel olayların temel noktalarını ortaya çıkaran çeşitli yaklaşımlar veya modeller tasarlanabilir. İşte bu kooperatif olayların açıklanması, basit bir ferromanyetizma modeli olan Ising modeliyle [3] sağlanır.

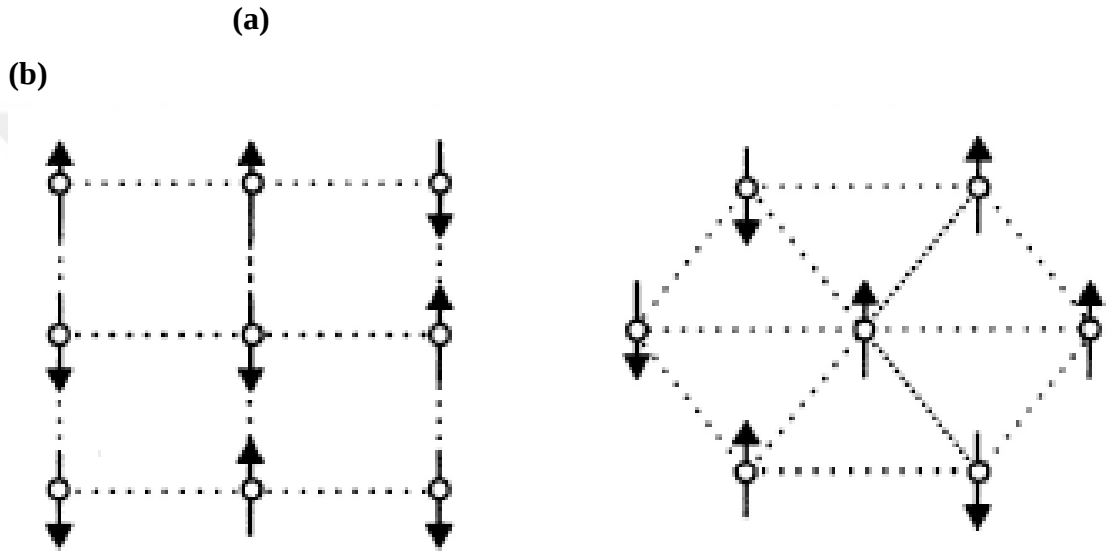
Ising modeli, Şekil 1.1’de olduğu gibi bir kristal örgü noktalarının μ_0 manyetik momentli birer atom tarafından işgal edildiğini kabul eder. Bu manyetik momentler Ising spini olarak adlandırılır. Herbir Ising spinin durumu 1 veya -1 değerini alan σ_j değişkeni ($j = 1, 2, \dots, N$; N toplam atom sayısıdır) ile temsil edilir. Kristaldeki komşu spinler arasında, paralel veya anti-paralel olmalarına bağlı olarak

$$J_{++} = J_{--} = -J, \quad J_{+-} = J$$

şeklinde bir J etkileşimi (becayış veya değiş-tokuş etkileşmesi) vardır. Böylece sistemin etkileşme enerjisi,

$$\mathcal{H} = -J \sum_{\langle ij \rangle} s_i s_j - H \mu_0 \sum_{i=1}^N s_i \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilir ki burada toplam, etkileşen komşu çiftler üzerinden alınır. Şekil 1.1 a ve b’de görüldüğü gibi, en yakın komşu spin sayısı kare örgü ve hegzagonal örgü için sırayla, $z = 4$ ve $z = 6$ ’dır. Denklem (1.1)’de J enerji boyutunda olup dipol-dipol etkileşmesinin şiddetini ve cinsini belirler. Eğer $J > 0$ ise, komşu spinler paralel olma eğilimindedirler, öyle ki ferromanyetizma meydana gelme ihtimali ortaya çıkar. Eğer $J < 0$ ise bu kez komşu spinler anti-paralel olma eğilimindedirler, öyle ki antiferromanyetizma meydana gelme ihtimali ortaya çıkacaktır.



Şekil 1.1. En yakın komşu spin sayısı kare örgü ve altıgen örgü için sırayla $z = 4$ ve $z = 6$ ’dır.

Ising modeli, manyetik sistemleri çözmek için ortaya atılmış fakat basit dönüşümlerle çok farklı sistemlere kolayca uygulanabilen ve günümüzde çok aktif olarak kullanılmakta olan bir modeldir.

Ising modelleri içinde en basit ve en yaygın olarak kullanılan model, spin-1/2 Ising modelidir. Ancak, ferrimanyetik yapıya sahip karmaşık bileşikler, seyreltik ferrimanyetik sistemler, yarı-iletken alaşımlar, amorf yapıya sahip alaşımlar, termomanyetik ve moleküler tabanlı kayıt sistemleri, moleküler tabanlı mıknatıslar, telafi sıcaklıklarının varlığı, ferrimanyetik düzenlilik ve düzenli-düzensiz faz geçişleri gibi daha karmaşık fiziksel sistemlerin termodinamik davranışlarının üzerlerinde çalışmak için daha yüksek spinli veya karma spin Ising sistemleri gibi daha fazla durumlu ve birden fazla düzen parametrelili bir model gerekmektedir. Dolayısıyla 1980’li

yıllarda, karma spin Ising sistemleri ile ilgili çalışmalara başlanmış ve bu spin sistemleri günümüzde de kullanılan ve kullanılmaya da devam edecek olan en önemli sistemler olmuşlardır.

Ising modelinin bu kısa genel tanımından sonra, gelecek kesimde, yani literatür çalışması kısmında karma spin sistemleri hakkında yapılmış olan çalışmalar hakkında kısaca bilgi verilecektir.

1.1. Literatür Çalışması ve Motivasyon

Karma (yarım tamsayılı-tamsayılı) spin $(1/2, 1)$; spin $(1, 3/2)$; spin $(1/2, 2)$; spin $(1, 5/2)$; spin $(3/2, 2)$; spin $(2, 5/2)$ Ising sistemleri ve karma (yarım tamsayılı-yarım tamsayılı) spin $(1/2, 3/2)$; spin $(1/2, 5/2)$; spin $(3/2, 5/2)$ Ising sistemleri; karma (tamsayılı-tamsayılı) spin $(1, 2)$ Ising sistemi, önemli karma spin sistemleri olarak karşımıza çıkar. Bu spin sistemlerinin kesin çözümleri, bal petegi örgüsü, karo fayans tipi örgü, dama örgüsü, Bethe örgüsü, iki-katlı Cayley ağacı ve dekore edilmiş düzlemsel örgülerde incelenmiştir. Yarım tamsayılı-yarım tamsayılı karma spin sistemleri, çoklu kritik davranış, manyetoelastik geçişler veya kararsızlık sergilemeleri nedeniyle üzerlerinde daha az çalışılmış olmakla birlikte bu özellikleri sebebiyle diğer karma spin sistemlerinden ayrılır. En iyi bilinen ve üzerinde en çok çalışılan yarım tamsayılı-yarım tamsayılı karma spin Ising sistemlerinden birisi karma spin $(1/2, 3/2)$ Ising modelidir ki bu tezde kullanacağımız modeldir. Elbette tezin özgünlüğü, giriş kısmında bahsedildiği üzere müteakip tabakalı altıgen örgü üzerinde Yol İhtimaliyet Metodu (YİY) kullanılacak olmasıdır. Ancak, karma spin $(1/2, 3/2)$ Ising modeli ve kullanılan yöntemler hakkında kısa bir literatür bilgisi vermek uygun olacaktır.

İlk olarak Bobák ve Jurcišin [4] EAT kullanarak karma spin $(1/2, 3/2)$ Ising modeli üzerinde çalışmışlar ve telafi (compensation) sıcaklığının spinlerin sadece büyüklüğüne değil örgünün yapısına da bağlı olduğunu göstermişlerdir. Bobák ve Jurcišin [5], bilineer ve kristal-alan etkileşim parametrelili yine seyreltik karma spin- $1/2$ ve spin- $3/2$ Ising modelini EAT kullanarak bal petegi örgüsünde incelemiş ve modelin ikili telafi noktasına sahip olduğunu göstermişlerdir. Moleküler temelli amorf V (TCNE)_x.Y (çözücü) manyetik bileşiğinin yaklaşık 400 K gibi bir sıcaklıkta spin- $1/2$ - $3/2$ ferrimanyetik yapı ve ferrimanyetik düzene sahip olduğu deneysel olarak tespit

edilmiştir [6-8]. Sistemin denge davranışları incelemesi EAT [9] ve MC yöntemi [10] ile kapsamlıca yapılmıştır. Kristal alan etkileşimli karma spin ($1/2$, $3/2$) enine Ising modelinin manyetik özellikleri, düzen parametrelerinin termal davranışını veren faz diyagramları, EAT kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir [11-13]. Karma spin ($1/2$, $3/2$) Ising modeli manyetizasyonunun termal davranışı, manyetik alınganlığı ve faz diyagramları gibi manyetik özellikleri yine EAT kullanılarak boyuna manyetik alan varlığında da araştırılmıştır [14]. Karma spin ($1/2$, $3/2$) Heisenberg ferrimanyetik sisteminde Green-fonksiyon tekniği kullanılarak en yakın ve ikinci en yakın spin etkileşimleri incelenmiştir [15]. Ayrıca, karma spin ($1/2$, $3/2$) Ising modelinin manyetik özellikleri Bethe kafesi [16], kare örgü [17], genişletilmiş Kagomé örgüsü [18], iki-katlı Cayley ağacı [19] ve bal peteği örgüsü [20] için incelenmiştir. Bunlara ilaveten seyreltilmiş karma spin- $1/2$ ve spin- $3/2$ modeli OAY ile de kapsamlıca çalışılmıştır [21]. Karma spin ($1/2$, $3/2$) Ising modelinin yine denge manyetik özellikleri, son zamanlarda Gençaslan ve Keskin [22] tarafından kümesel değişim metodu kullanılarak araştırılmıştır. Bunların yanısıra karma spin ($1/2$, $3/2$) Ising modeli, son yıllarda sistemlerin manyetik ve termal özelliklerini açıklamak için, EFT [23, 24] ve MCS ile [25, 26, 27] kullanılarak nanotüplere [23, 25] ve nanotellere [24, 26, 27] uygulanmıştır.

Karma spin ($1/2$, $3/2$) Ising modelinin denge manyetik özellikleri etraflıca incelenmiş olsa da sistemin dinamik (dengede olmayan) manyetik özellikleri tam manasıyla izah edilebilmiş değildir. Bu kapsamda ilk incelemelerden biri, Deviren ve arkadaşları [28] tarafından zamanla değişen manyetik alan varlığında kare örgü üzerinde GDY'na dayanan OAT ki genellikle DMFA olarak adlandırılan yaklaşımı kullanarak sistemin dinamik faz geçişleri üzerine yapılan çalışmadır. Bu çalışmayı Keskin ve arkadaşları [29], müteakip tabakalı altıgen örgü üzerine uygulayarak P ve L-tipi telafi davranışları da dâhil olmak üzere daha ilginç dinamik faz davranışları tespit etmişlerdir. Vatansever ve Polat [30], zamana bağlı manyetik alan varlığında sistemin dinamik faz sıcaklıklarını Dinamik Monte Carlo Simülasyonu (DMCS) ile incelemişlerdir. Son zamanlarda Gençaslan ve Keskin [31], sabit manyetik alanın varlığında ve yokluğunda sistemin manyetizasyonunun kararlı ve kararsız davranışlarını YİY ile incelemişlerdir.

Bu tezin giriş kısmında da belirtildiği üzere, manyetik malzemelerin teorik olarak incelenmesinde prototip modeller olarak karma-spin (yarım tamsayılı-tamsayılı, yarım

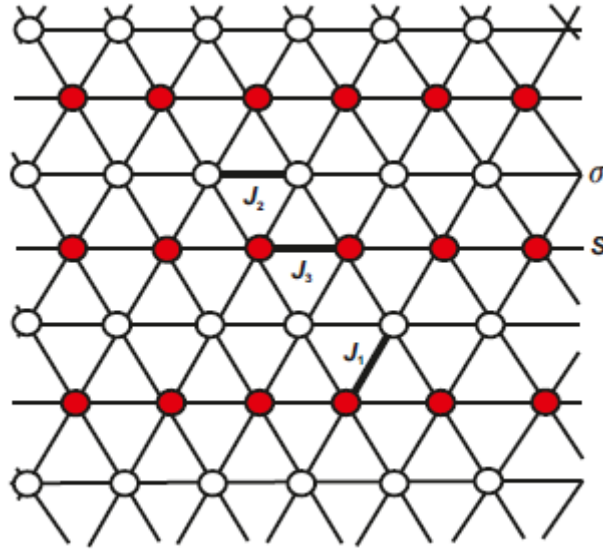
tamsayı-yarım tamsayı ve tamsayı-tamsayı) sistemleri kullanılmaktadır. Bunların içinde en iyi bilinen ve üzerinde en çok çalışılan yarım tamsayı-yarım tamsayı karma spin Ising sistemi, karma spin $(1/2, 3/2)$ Ising modelidir ki bu tezde, müteakip tabakalı altıgen örgü üzerine YİY uygulayarak sistemin dinamik manyetik özelliklerini inceleyeceğiz. Yukarıda literatür bilgisinde vurgulandığı gibi karma-spin sistemlerinin dinamikleri genelde DOAT ve DEFT yöntemleriyle incelenmekte iken YİY ile ancak birkaç çalışma mevcuttur [1, 2]. Oysa ki YİY iki veya üç oran sabiti içermesi DOAT ve DEFT'ye göre bir avantaj teşkil eder. Bu oran sabitleri, deneysel çalışmalarda soğuma oran katsayılarına tekabül ettiğinden, YİY ile elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla karşılaştırılması daha uygun ve deneyci araştırmacılara daha fazla yol gösterici olacaktır. Dolayısıyla bu tezde, zamanla değişen manyetik alan varlığında müteakip tabakalı altıgen örgü üzerinde karma spin $(1/2, 3/2)$ Ising modelinin dinamik manyetik özelliklerini incelemek için YİY tercih edilmiştir.

2. BÖLÜM

ALTIGEN ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN (1/2, 3/2) ISING SİSTEMİ VE DİNAMİK FAZ GEÇİŞLERİ İÇİN DÜZEN PARAMETRELERİ

2.1. Ardışık Altıgen Örgü Üzerinde Karma Spin (1/2, 3/2) Ising Modeli

Önceki bölümde, bu tezde kullanılacak olan karma spin (1/2, 3/2) Ising modeli hakkında detaylı literatür bilgisi verildi. O halde ilk sorulması gereken soru bu sistem nasıl tasavvur edilebilir ve sistemi meydana getiren parçacıklar nasıl bir etkileşim içerisinde olmalıdır? Bu kesimde, tezin ana omurgasını teşkil eden model tanıtılmış olacaktır. Sistemi teşkil eden spinli parçacıklar, müteakip altıgen örgü noktalarına öyle yerleşmişlerdir ki Şekil 2.1’de görüldüğü gibi müteakip tabakalı altıgen örgüleri oluştururlar.



Şekil 2.1. Müteakip tabakalı altıgen örgüler üzerinde spinlerin yerleşiminin taslağı. Örgü, σ (beyaz daireler) ve S (kırmızı daireler) spinlerinin birbirini takip eden tabakalara yerleşmesiyle oluşmuştur. Böylece model, A ve B gibi birbiri içine geçmiş iki alt örgülü Ising sistemi olarak ele alınabilir.

Bu tür çalışmalarda düzen parametrelerinin tanımı ve tasviri çok önemlidir. O halde, Müteakip tabakalı altıgen örgüler üzerinde karma spin (1/2, 3/2) Ising modeli için düzen parametreleri aşağıdaki gibidir:

a) A alt örgüsü için, yani σ_i^A spinleri için ortalama (dipol moment) mıknatıslanma

$$m^A = \langle \sigma_i^A \rangle \quad (2.1)$$

b) B alt örgüsü için, yani S_j^B spinleri için ortalama (dipol moment) mıknatıslanma

$$m^B = \langle S_j^B \rangle \quad (2.2)$$

c) B alt örgüsü için, yani S_j^B spinleri için ortalama kuadrupol moment

$$q^B = \langle (S_j^B)^2 \rangle - \frac{5}{4} \quad (2.3)$$

d) B alt örgüsü için, yani S_j^B spinleri için ortalama oktapolar moment

$$r^B = \frac{5}{3} \langle (S_j^B)^2 \rangle - \frac{41}{12} \langle S_j^B \rangle \quad (2.4)$$

şeklindedir. Öte yandan A ve B alt örgüleri için, herbir spin durumunun ortalaması ki bunlar iç değişkenler veya durum ya da nokta değişkenler olarak da adlandırılır, X_1^A , X_2^A iç değişkenleri sırayla $+\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$ değerlerini alırken X_1^B , X_2^B , X_3^B ve X_4^B iç değişkenleri sırayla $\frac{3}{2}$, $\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$ ve $-\frac{3}{2}$ değerlerini alırlar. Bu iç değişkenler normalizasyon şartına uyarlar, yani $\sum_{i=1}^2 X_i^A = 1$ ve $\sum_{j=1}^4 X_j^B = 1$ 'dir. Düzen parametreleri, normalizasyon şartlarının da kullanılmasıyla,

$$m^A = \langle s_i^A \rangle = X_1^A - X_2^A \quad (2.5)$$

$$m^B = \langle S_j^B \rangle = \frac{3}{2}(X_1^B - X_4^B) + \frac{1}{2}(X_2^B - X_3^B) \quad (2.6)$$

$$q^B = X_1^B - X_2^B - X_3^B + X_4^B \quad (2.7)$$

$$r^B = \frac{1}{2}(X_1^B - X_4^B) + \frac{3}{2}(X_3^B - X_2^B) \quad (2.8)$$

şeklinde iç değişkenler cinsinden yazılabilirler. Ayrıca iç değişkenleri, düzen parametrelerinin lineer kombinasyonu olarak da yani,

$$X_1^A = \frac{1}{2} + m^A \text{ ve } X_2^A = \frac{1}{2} - m^B \quad (2.9)$$

$$X_1^B = \frac{1}{4}(1 + q^B) + \frac{1}{10}(r^B + 3m^B), \quad (2.10a)$$

$$X_2^B = \frac{1}{4}(1 - q^B) + \frac{1}{10}(m^B - 3r^B), \quad (2.10b)$$

$$X_3^B = \frac{1}{4}(1 - q^B) + \frac{1}{10}(3r^B - m^B), \quad (2.10c)$$

$$X_4^B = \frac{1}{4}(1 + q^B) - \frac{1}{10}(r^B + 3m^B) \quad (2.10d)$$

olarak ifade edebiliriz.

Düzen parametreleri, müteakip tabakalı altıgen örgüler üzerinde karma spin (1/2, 3/2) Ising sistemi için üç farklı temel fazı tanımlamaktadır. Bu temel fazlar:

- 1) Paramanyetik faz (p): $m^A = m^B = 0$,
- 2) Antiferromanyetik faz (af): $m^A = -m^B$, ($m^A = \pm 1/2$ ve $m^B = \mp 1/2$)
- 3) Ferrimanyetik faz (i): $m^A \neq m^B \neq 0$, ($m^A = \pm 1/2$ ve $m^B = \mp 3/2$)

şeklindedir.

Müteakip tabakalı altıgen örgüler üzerinde karma spin (1/2, 3/2) Ising sistemi için Hamiltonyen ifademiz

$$\mathcal{H} = -J_1 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i^A \sigma_j^B - J_2 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i^A \sigma_j^A - J_3 \sum_{\langle ij \rangle} S_i^B S_j^B - D \sum_j (S_j^B)^2 - H \left(\sum_i \sigma_i^A + \sum_j S_j^B \right) \quad (2.11)$$

olacaktır ki burada J_1 , J_2 ve J_3 sırayla $\sigma_i^A - \sigma_j^B$, $\sigma_i^A - \sigma_i^A$ ve $S_j^B - S_j^B$ arasındaki bilineer etkileşme sabitleridir. Bu aşamada en yakın komşu çift sayılarının da belirtilmesi gerekir ki bu tezde altıgen örgü kullanılacağından J_1 için $z_1 = 4$, J_2 ve J_3 için ise $z_2 = z_3 = 2$ 'dir. Hamiltonyenimizde D , kristal alan etkileşmesi veya tek-iyon anizotropi sabiti ve H ise zamanla değişen salınımlı dış manyetik alan olup

$$H = H_0 \cos(\omega t) \quad (2.12)$$

formundadır ki H_0 salınımın genliği ve $\omega = 2\pi\nu$ ise açısal frekansıdır.

İlk etapta, uzunluğuna manyetik alan altında **altıgen örgü** üzerinde karma spin (1/2, 3/2) Ising ferromanyetik sistemini kümesel değişim metodu uygulayarak sistemin manyetik özelliklerini, düzen parametrelerinin yarı-kararlı, kararsız ve kararlı branşları tespit edilebilir. Bunun için ise

$$F = E - TS \quad (2.13)$$

formunda serbest enerjinin hesap edilmesi gerekir ki burada E , iç enerji; T , Sıcaklık ve S , entropidir. Toplam örgü noktası başına iç enerji,

$$\frac{E}{N} = -J_1 m^A m^B - J_2 m^A m^A - J_3 m^B m^B - Dq^B - Hm^A - Hm^B \quad (2.14)$$

olup iç değişkenler cinsinden ifade edilmelidir. Entropi için ağırlık faktörlerinin, yani

$$W^A = \frac{N^A!}{\prod_{i=1}^2 (X_i^A N^A)!} \quad \text{ve} \quad W^B = \frac{N^B!}{\prod_{j=1}^4 (X_j^B N^B)!} \quad (2.15)$$

ifadelerinin yazılıp $S = k \ln W$ entropi tanımı $\ln N! \cong N \ln N - N$ Stirling yaklaşımının kullanılmasıyla herbir alt örgü için entropiler,

$$S^A = -kN \sum_{i=1}^2 X_i^A \ln X_i^A \quad \text{ve} \quad S^B = -kN \sum_{j=1}^4 X_j^B \ln X_j^B \quad (2.16)$$

şeklinde bulunur. Böylece toplam örgü noktası başına serbest enerji,

$$f = \frac{F}{N} = (-J_1 m^A m^B - J_2 m^A m^A - J_3 m^B m^B - Dq^B - Hm^A - Hm^B) + \frac{1}{\beta} (X_1^A \ln X_1^A + X_2^A \ln X_2^A) + \frac{1}{\beta} (X_1^B \ln X_1^B + X_2^B \ln X_2^B + X_3^B \ln X_3^B + X_4^B \ln X_4^B) \quad (2.17)$$

olarak hesaplanır. Şimdi öz bağıllık denklemleri,

$$\frac{\partial f}{\partial X_i^A} = 0 \quad (i=1,2) \quad \text{ve} \quad \frac{\partial f}{\partial X_j^B} = 0 \quad (j=1,2,3,4) \quad (2.18)$$

kullanılmasıyla bulunur. Böylece, denge faz diyagramlarında kullanılacak denklemler,

$$\left. \begin{aligned} X_i^A &= \frac{1}{Z^A} e_i^A \\ e_i^A &= e^{-\frac{\beta}{N} \left(\frac{\partial E}{\partial X_i^A} \right)} \end{aligned} \right\} Z^A = \sum_{i=1}^2 e_i^A = e_1^A + e_2^A \quad (2.19)$$

$$\left. \begin{aligned} X_j^B &= \frac{1}{Z^B} e_j^B \\ e_j^B &= e^{-\frac{\beta}{N} \left(\frac{\partial E}{\partial X_j^B} \right)} \end{aligned} \right\} Z^B = \sum_{j=1}^4 e_j^B = e_1^B + e_2^B + e_3^B + e_4^B \quad (2.20)$$

olmak üzere (ki burada, $\beta = 1/k_B T$ ifadesinde Boltzman sabiti $k_B = 1$ alınacaktır),

$$m^A = \frac{1}{2} (X_1^A - X_2^A) = \frac{1}{2Z^A} (e_1^A - e_2^A) \quad (2.21)$$

$$m^B = \frac{3}{2} (X_1^B - X_4^B) + \frac{1}{2} (X_2^B - X_3^B) = \frac{1}{2Z^B} [3(e_1^B - e_4^B) + (e_2^B - e_3^B)] \quad (2.22)$$

$$q^B = (X_1^B - X_2^B - X_3^B + X_4^B) = \frac{1}{Z^B} (e_1^B - e_2^B - e_3^B + e_4^B) \quad (2.23)$$

$$r^B = \frac{1}{2} (X_1^B - X_4^B) + \frac{3}{2} (X_3^B - X_2^B) = \frac{1}{2Z^B} [(e_1^B - e_4^B) + 3(e_3^B - e_2^B)] \quad (2.24)$$

elde edilirler. Bu denklemlerde belirtmek gerekir ki Z^A ve Z^B , sırasıyla A alt örgüsü ve B alt örgüsü için bölüşüm fonksiyonlarıdır. Bu denklemlerin sayısal çözümleri ise uygun bir FORTRAN programı ile yapılarak sonuçların bir grafik çizim programına aktarılmasıyla denge faz diyagramları elde edilir.

2.2. YİY kullanarak Dinamik Manyetik Faz Geçişleri İçin Düzen

Parametreleri

Şimdi ise zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında bir **altıgen kristal örgüde** karma-spin (1/2, 3/2) Ising ferrimanyetik sisteminin dinamik faz geçişleri yol ihtimaliyet metodu ile incelemek için gerekli dinamik denklemleri elde edelim. Dinamik denklemleri elde etmek için Yol İhtimaliyet Yöntemini (YİY) kullanılacaktır. YİY’de iç değişkenlerin değişim oranı,

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{i \neq j} (\chi_{ji} - \chi_{ij}) \quad (2.25)$$

dir ki burada χ_{ij} , i durumundan j durumuna geçen sistem için yol ihtimaliyet oranı (yol ihtimaliyet fonksiyonu) olarak adlandırılır ve $\chi_{ij} = \chi_{ji}$ denge durumunu verir. Kikuchi [32], χ_{ij} için iki adet tarife tanımı yapmıştır ki biz bu tezde

$$\chi_{ij} = k_{ij} Z^{-1} X_i e^{-\frac{\beta}{N}(\frac{\partial E}{\partial X_j})}, \quad e_i = e^{-\frac{\beta}{N}(\frac{\partial E}{\partial X_i})}, \quad e_j = e^{-\frac{\beta}{N}(\frac{\partial E}{\partial X_j})} \quad (2.26)$$

ile verdiği tarife II'yi kullanacağız. Şimdi bu tarifeyi kullanarak düzen parametrelerinin zamanla değişimlerini bulalım. Şöyle ki

$$m^A = \frac{1}{2}(X_1^A - X_2^A)$$

olduğundan

$$\frac{dm^A}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{dX_1^A}{dt} - \frac{dX_2^A}{dt} \right) \quad (2.27)$$

hesaplanacaktır. Bunun için yol ihtimaliyet fonksiyonu ve etkileşimler yazılmalıdır. A alt örgüsü için Denklem (2.26) ile verilen tarife II'nin uygulanmasıyla, yani

$$\begin{aligned} \frac{dX_1^A}{dt} &= (\chi_{21} - \chi_{12}) \rightarrow Z^A \frac{dX_1^A}{dt} = k_{21} X_2^A e_1^A - k_{12} X_1^A e_2^A \\ \frac{dX_2^A}{dt} &= (\chi_{12} - \chi_{21}) \rightarrow Z^A \frac{dX_2^A}{dt} = k_{12} X_1^A e_2^A - k_{21} X_2^A e_1^A \end{aligned} \quad (2.28)$$

olup $k_{ij} = k_{ji}$ oran sabitleridir ve Tablo-2.1'de görüldüğü gibi $k_{12} = k_{21} = k_2$ 'dir.

Tablo 2.1. A Alt Örgüsü için etkileşimler.

		$X_1^A(\frac{1}{2})$	$X_2^A(-\frac{1}{2})$
A alt örgüsü	$X_1^A(\frac{1}{2})$		$k_2(k_{12})$
	$X_2^A(-\frac{1}{2})$	$k_2(k_{21})$	

Oran sabitleri,

$k_1 \equiv$ Parçacıkların örgü boyunca ötelenmesi (translation),

$k_2 \equiv$ Parçacıkların örgü konumundaki dönmesini (rotation),

$k_3 = \sqrt{k_1 k_2} \equiv$ Parçacığın aynı anda hem dönme hem de ötelenmesini

temsil eder ve genellikle $k_2 > k_1$ alınır. Böylece,

$$Z^A \frac{dm^A}{dt} = k_2 (X_2^A e_1^A - X_1^A e_2^A) \quad (2.29)$$

bulunur ve iç değişkenlerin de yerine yazılarak düzenlenmesiyle

$$\frac{dm^A}{dt} = -k_2 m^A + k_2 \frac{1}{2} \tanh\left[\frac{1}{2T} (J_1 z_1 m^B + 2J_2 z_2 m^A + H)\right] \quad (2.30)$$

halini alır. Salınımlı manyetik alanı $H = H_0 \cos(\omega t)$ alıp eşitliğin sol tarafını ω ve k ile çarpıp bölerek düzenleme yaparsak,

$$\Omega \frac{dm^A}{d\xi} = -\frac{k_2}{k} m^A + \frac{k_2}{k} \frac{1}{2} \tanh\left[\frac{1}{2T} (J_1 z_1 m^B + 2J_2 z_2 m^A + H_0 \cos(\xi))\right] \quad (2.31)$$

elde edilir ki burada $\Omega = \frac{\omega}{k}$, $\xi = \omega t$ ve $k = k_1/k_2$ 'dir. Benzer şekilde B alt örgüsü için de dinamik manyetizasyon, quadrupolar ve octupolar denklemleri elde edilir. Ancak bu kez etkileşme oran sabitleri Tablo-2.2'deki gibi olacaktır. Böylece,

$$m^B = \frac{3}{2} (X_1^B - X_4^B) + \frac{1}{2} (X_2^B - X_3^B)$$

$$q^B = (X_1^B - X_2^B - X_3^B + X_4^B)$$

$$r^B = \frac{1}{2}(X_1^B - X_4^B) + \frac{3}{2}(X_3^B - X_2^B)$$

olduğu için değişimleri,

$$\frac{dm^B}{dt} = \frac{3}{2} \left(\frac{dX_1^B}{dt} - \frac{dX_4^B}{dt} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{dX_2^B}{dt} - \frac{dX_3^B}{dt} \right) \quad (2.32)$$

$$\frac{dq^B}{dt} = \frac{dX_1^B}{dt} - \frac{dX_2^B}{dt} - \frac{dX_3^B}{dt} + \frac{dX_4^B}{dt} \quad (2.33)$$

$$\frac{dr^B}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{dX_1^B}{dt} - \frac{dX_4^B}{dt} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{dX_3^B}{dt} - \frac{dX_2^B}{dt} \right) \quad (2.34)$$

olacaktır ve

Tablo 2.2. B Alt Örgüsü için etkileşimler.

		$X_1^B \left(\frac{3}{2} \right)$	$X_2^B \left(\frac{1}{2} \right)$	$X_3^B \left(-\frac{1}{2} \right)$	$X_4^B \left(-\frac{3}{2} \right)$
B alt örgüsü	$X_1^B \left(\frac{3}{2} \right)$		$k_1(k_{12})$	$k_3(k_{13})$	$k_2(k_{14})$
	$X_2^B \left(\frac{1}{2} \right)$	$k_1(k_{21})$		$k_2(k_{23})$	$k_3(k_{24})$
	$X_3^B \left(-\frac{1}{2} \right)$	$k_3(k_{31})$	$k_2(k_{32})$		$k_1(k_{34})$
	$X_4^B \left(-\frac{3}{2} \right)$	$k_2(k_{41})$	$k_3(k_{42})$	$k_1(k_{43})$	

$$\begin{aligned}
 Z^B \frac{dX_1^B}{dt} &= k_1(X_2e_1 - X_1e_2) + k_2(X_4e_1 - X_1e_4) + k_3(X_3e_1 - X_1e_3) \\
 Z^B \frac{dX_2^B}{dt} &= k_1(X_1e_2 - X_2e_1) + k_2(X_3e_2 - X_2e_3) + k_3(X_4e_2 - X_2e_4) \\
 Z^B \frac{dX_3^B}{dt} &= k_1(X_4e_3 - X_3e_4) + k_2(X_2e_3 - X_3e_2) + k_3(X_1e_3 - X_3e_1) \\
 Z^B \frac{dX_4^B}{dt} &= k_1(X_3e_4 - X_4e_3) + k_2(X_1e_4 - X_4e_1) + k_3(X_2e_4 - X_4e_2)
 \end{aligned} \quad (2.35)$$

değişimlerinin yerlerine yazılıp düzenlenmesiyle, daha önce elde ettiğimiz A alt örgüsü için dinamik manyetizasyon denklemini de yazarsak topluca dinamik denklemlerimiz,

$$\Omega \frac{dm^A}{d\xi} = -\frac{k_2}{k} m^A + \frac{k_2}{k} \frac{1}{2} \tanh\left[\frac{1}{2T}(J_1 z_1 m^B + 2J_2 z_2 m^A + H_0 \cos(\xi))\right] \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \Omega \frac{dm^B}{dx} = & \left\{ -\frac{1}{5}[(2\sqrt{k_1 k_2} + 9k_2 - k_1) \cosh(a)e^c - (6\sqrt{k_1 k_2} + k_2 + 3k_1) \cosh(b)e^{-c}]m^B \right. \\ & + \frac{1}{2}[(2\sqrt{k_1 k_2} - k_2 - k_1) \sinh(b)e^{-c} - (2\sqrt{k_1 k_2} - 3k_2 + k_1) \sinh(a)]e^c]q^B \\ & + \frac{1}{5}[(2\sqrt{k_1 k_2} - 3k_2 + k_1) \cosh(b)e^{-c} - 3(2\sqrt{k_1 k_2} - k_2 - k_1) \cosh(a)e^c]r^B \\ & + \frac{1}{2}[(2\sqrt{k_1 k_2} + k_2 - k_1) \sinh(b)e^{-c} + (2\sqrt{k_1 k_2} + 3k_2 + k_1) \sinh(a)e^c] \} \\ & / 2k[\cosh(a)e^c + \cosh(b)e^{-c}], \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \Omega \frac{dq^B}{dx} = & \left\{ \frac{1}{5}(\sqrt{k_1 k_2} - k_1)[6 \sinh(b)e^{-c} - 2 \sinh(a)e^c]m^B \right. \\ & - (\sqrt{k_1 k_2} + k_1)[\cosh(a)e^c + \cosh(b)e^{-c}]q^B \\ & + \frac{2}{5}(\sqrt{k_1 k_2} - k_1)[3 \sinh(a)e^c + \sinh(b)e^{-c}]r^B \\ & + (\sqrt{k_1 k_2} + k_1)[\cosh(a)e^c - \cosh(b)e^{-c}] \} \\ & / 2k[\cosh(a)e^c + \cosh(b)e^{-c}], \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \Omega \frac{dr^B}{dx} = & \left\{ \frac{1}{5}[(\sqrt{k_1 k_2} - 3k_2 + 2k_1) \cosh(a)e^c + 3(\sqrt{k_1 k_2} + k_2 - 2k_1) \cosh(b)e^{-c}]m^B \right. \\ & + \frac{1}{2}[(\sqrt{k_1 k_2} + k_2 - 2k_1) \sinh(a)e^c - (\sqrt{k_1 k_2} - 3k_2 + 2k_1) \sinh(b)e^{-c}]q^B \\ & - \frac{1}{5}[(3\sqrt{k_1 k_2} + k_2 + 6k_1) \cosh(a)e^c - (\sqrt{k_1 k_2} - 9k_2 - 2k_1) \cosh(b)e^{-c}]r^B \\ & - \frac{1}{2}[(\sqrt{k_1 k_2} - k_2 - 2k_1) \sinh(a)e^c + (\sqrt{k_1 k_2} + 3k_2 + 2k_1) \sinh(b)e^{-c}] \} \\ & / 2k[\cosh(a)e^c + \cosh(b)e^{-c}], \end{aligned} \quad (2.38)$$

halinde elde edilirler ki (2.36)-(2.38)'de $a = \frac{3}{2}(J_1 z_1 m^A + 2J_3 z_3 m^B + H_0 \cos(\xi)) / T$, $b = \frac{1}{2}(J_1 z_1 m^A + 2J_3 z_3 m^B + H_0 \cos(\xi)) / T$, $c = D / T$, and $k = k_1 / k_2$ kullanılmıştır.

Bu tür dinamik sistem çözümleri genelde, Adams-Moulton kestirme düzeltme yöntemi, Runge-Kutta yöntemleri, Euler yöntemi vb. gibi nümerik yöntemler ile elde edilebilir. Bu tezde Adams-Moulton kestirme düzeltme yöntemi kullanılmıştır.

İkinci önemli basamak olarak, $M^{A,B}$ dinamik mıknatıslanma düzen parametrelerinin elde edilmesi ve sıcaklığa göre davranışlarının incelenmesidir. Dinamik düzen parametreleri,

$$M^{A,B} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m^{A,B}(\xi) d\xi, \quad (2.39)$$

şeklinde tanımlanır [33] ki burada $\xi = \omega t$ 'dir. Bu integraller, Adams-Moulton kestirme düzeltme yöntemi ve Romberg integrasyon yönteminin kullanılmasıyla çözülerek, dinamik düzen parametrelerinin sıcaklıkla olan değişimleri incelenir. Bu incelemeler sonucunda DFG sıcaklıkları tespit edilir. DFG sıcaklıkları kullanılarak her bir sistem için, farklı düzlemlerde dinamik faz diyagramları elde edilir.

Önemli bir manyetik özellik olan dinamik manyetik histerisiz (DMH) davranışlarını elde etmek için, dinamik histerisiz döngü alanı (loop area) tanımlanması gerekir ve bu ise

$$A = -\oint m^{A,B}(t) dH = H_0 \omega \oint m^{A,B}(t) \sin(\omega t) dt \quad (2.40)$$

şeklinde tanımlanır [34]. Son olarak, diğer bir önemli manyetik özellik olan dinamik telafi sıcaklığı davranışları ise

$$M^T = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{m^A(\xi) + m^B(\xi)}{2} \right) d\xi \quad (2.41)$$

integrali nümerik olarak çözülerek elde edilir. Burada M^T , toplam mıknatıslanmadır.

Gelecek bölümde, moleküler-temelli manyetik malzemelerin dinamik manyetik özelliklerinin incelenmesi kapsamında, zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında bir altıgen kristal örgüde karma-spin ($1/2$, $3/2$) Ising ferrimanyetik sisteminin dinamik faz geçişleri yol ihtimaliyet metodu ile bulduğumuz sonuçlar verilecektir. Bunlar, sistemin histerisiz davranışları, telafi (compensation) davranışları, dinamik faz geçişleri ve faz diyagramları başlıkları altında sunulacaktır.



3. BÖLÜM

MOLEKÜLER-TEMELLİ MANYETİK MALZEMELERİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

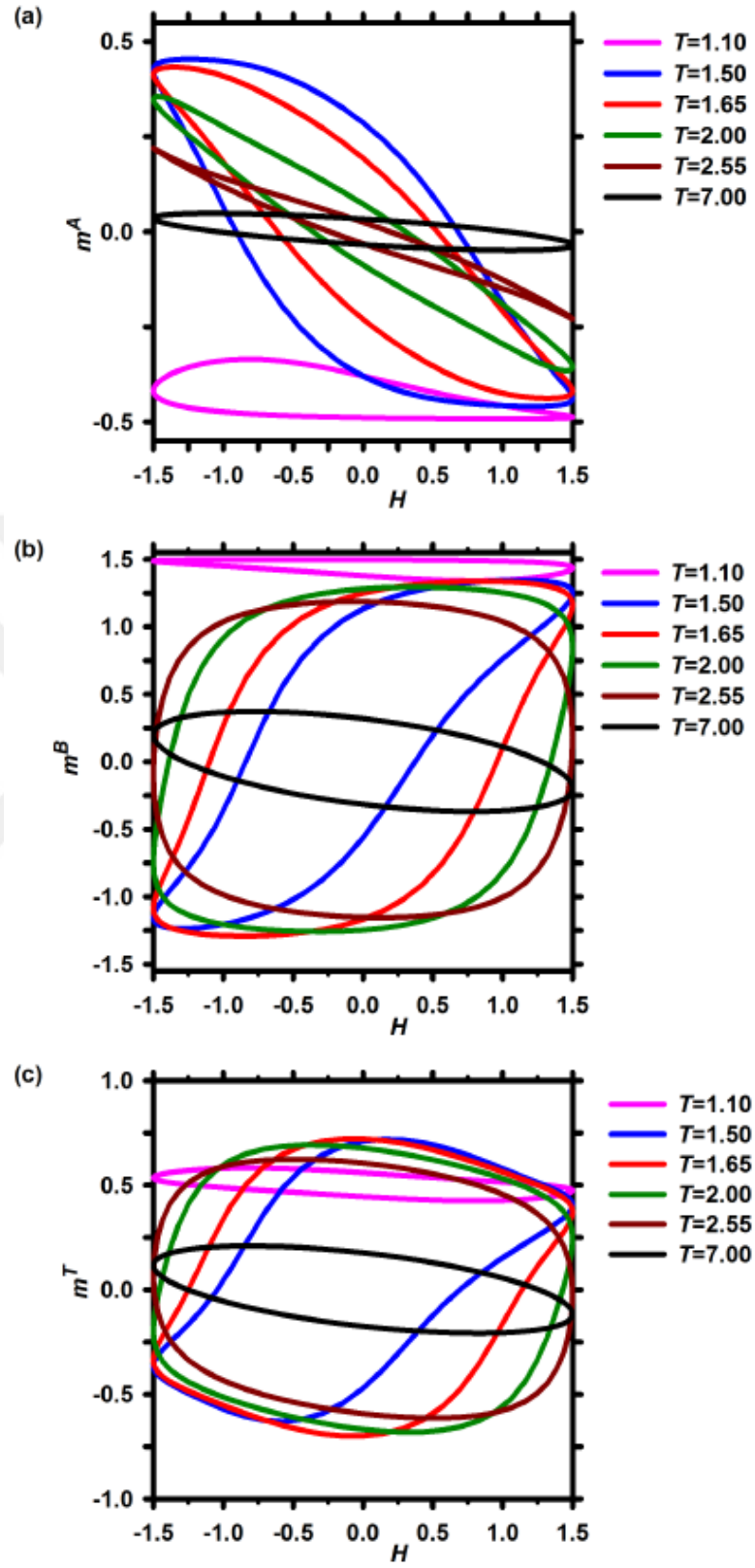
3.1. Histerisiz Eğrileri

Sistem parametrelerinin, zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında bir altıgen kristal örgüde karma-spin (1/2, 3/2) Ising modelinin YİY kullanılarak elde edilen dinamik histerisiz eğrilerine etkileri hesaplanmıştır. Dinamik histerisiz eğrilere sırayla sıcaklığın, açısal frekansın, oran sabitinin ve etkileşme sabitlerinin etkisi incelenip dinamik coersive ve dinamik remanent manyetizasyonlar da incelenmiştir.

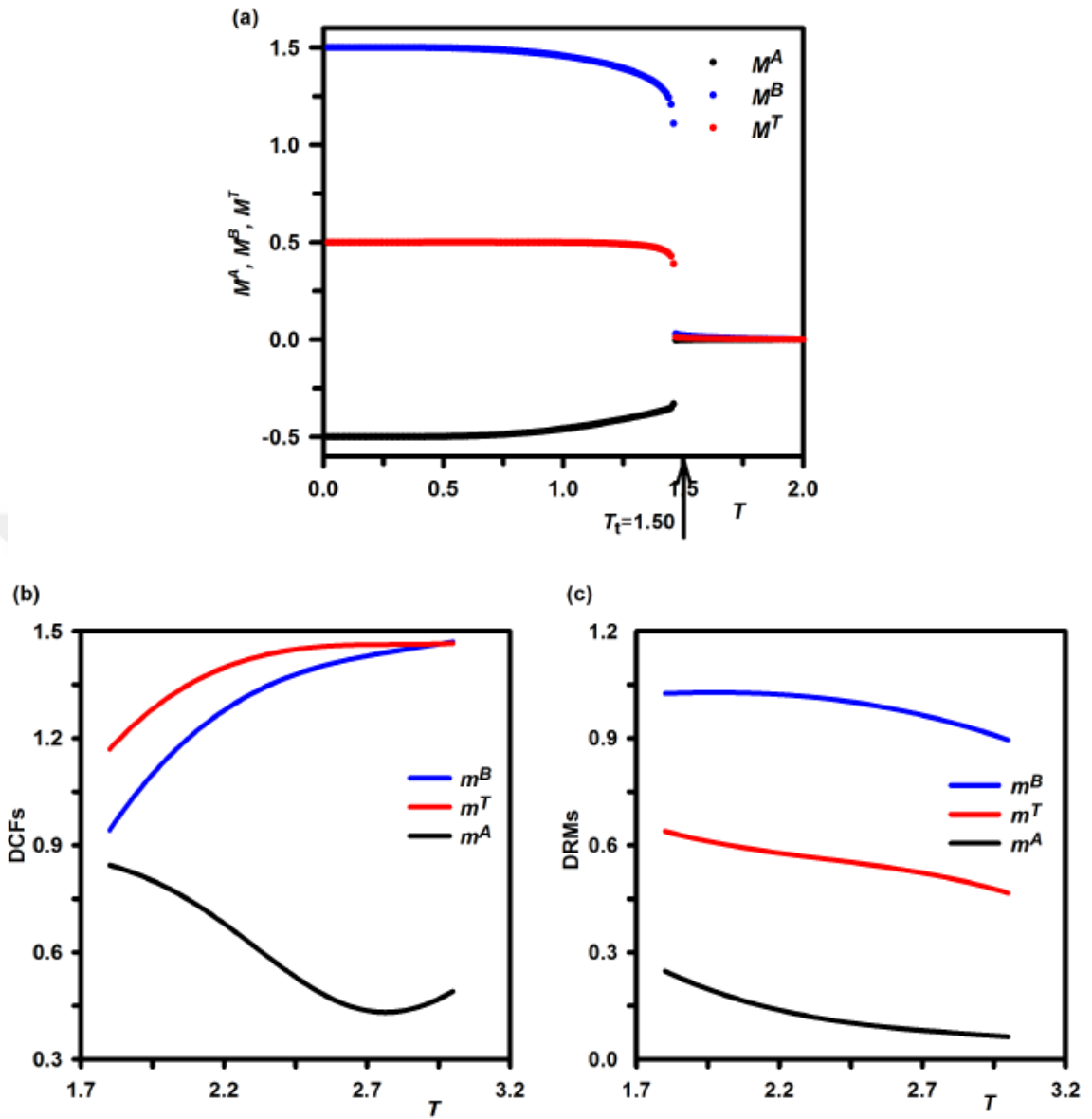
3.1.1. Histerisiz Eğrilerine Sıcaklık Etkisi

Bu kesimdeki hesaplamalarda, sırayla A alt örgüsü, B alt örgüsü ve toplam manyetizasyon yani m^A, m^B ve m^T için bilineer etkileşme sabitleri $J_1 = -1.0$, $J_2 = 5.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$ olarak, kristal alan sabiti $D = 0.25$, manyetik alanın genliği $H_0 = 1.50$ ve frekans $\omega = 0.30\pi$ olarak alınmış ve sekiz farklı sıcaklık için hesap yapılmıştır. Sonuçlar m^A, m^B ve m^T için ayrı şıklar halinde sunulmuştur.

Şekil 3.1’de dikkat edilirse m^A için döngü alanı (loop area) $T=1.50$ ’de maksimum olmakta, yani malzeme sert mıknatıs (hard magnet) özellik göstermekte ve artan sıcaklıkla döngü alanları azalmakta; malzeme yumuşak mıknatıs (soft magnet) özellik göstermektedir. $T=7.0$ ’den sonra döngü alanı çok az değişmektedir. m^B için durum tersidir; döngü alanı $T=1.50$ ’de minimumdur ve artan sıcaklıkla sert mıknatıslık özellik artmakta ancak $T=2.55$ ’den sonra döngü alanının azaldığı görülür.



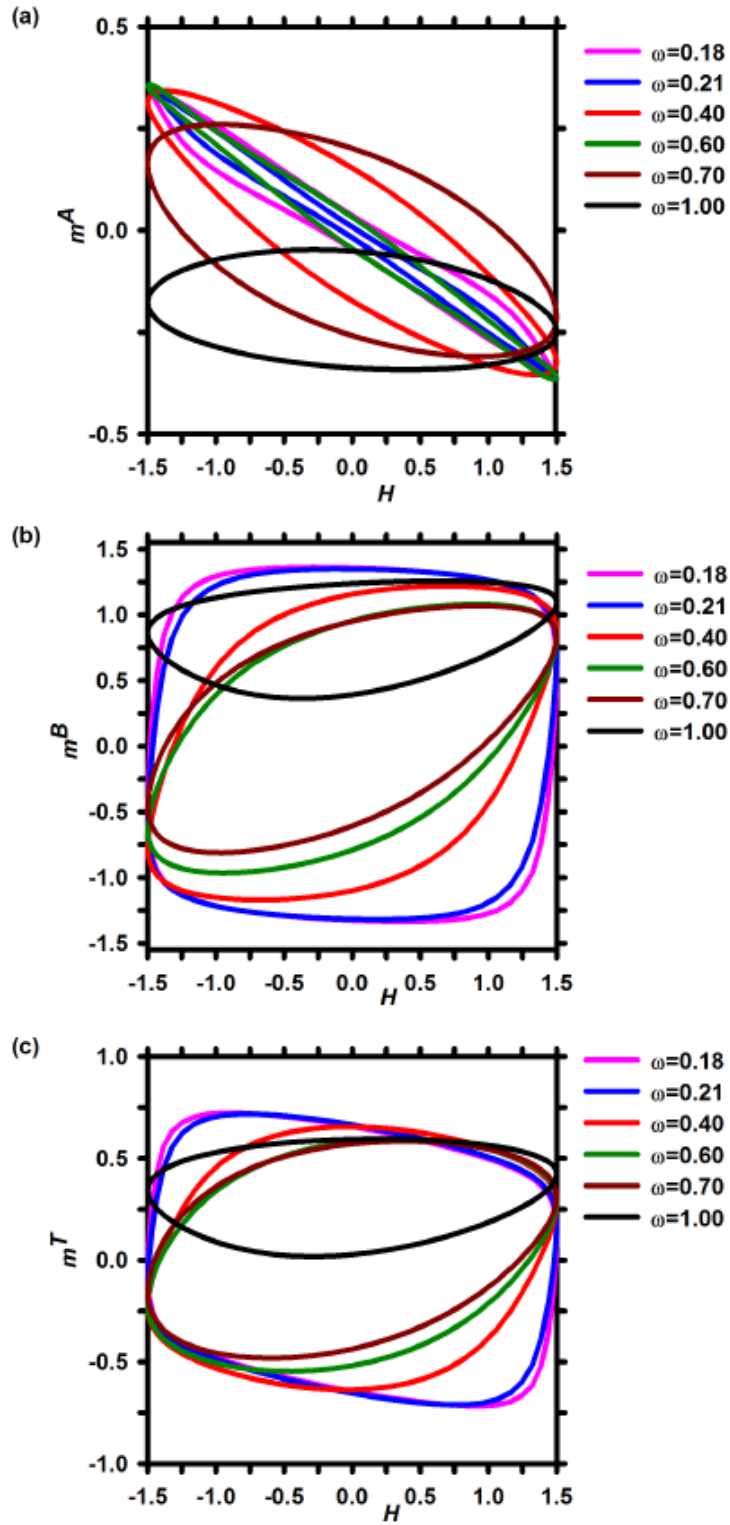
Şekil 3.1. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin sıcaklıkla değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_2 = 5.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$ olarak, $D = 0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $\omega = 0.30\pi$ alınmıştır.



Şekil 3.2. Şekil 3.1'deki durum için, faz geçiş sıcaklığı ve dinamik coersive alan ve dinamik remanent manyetizasyon.

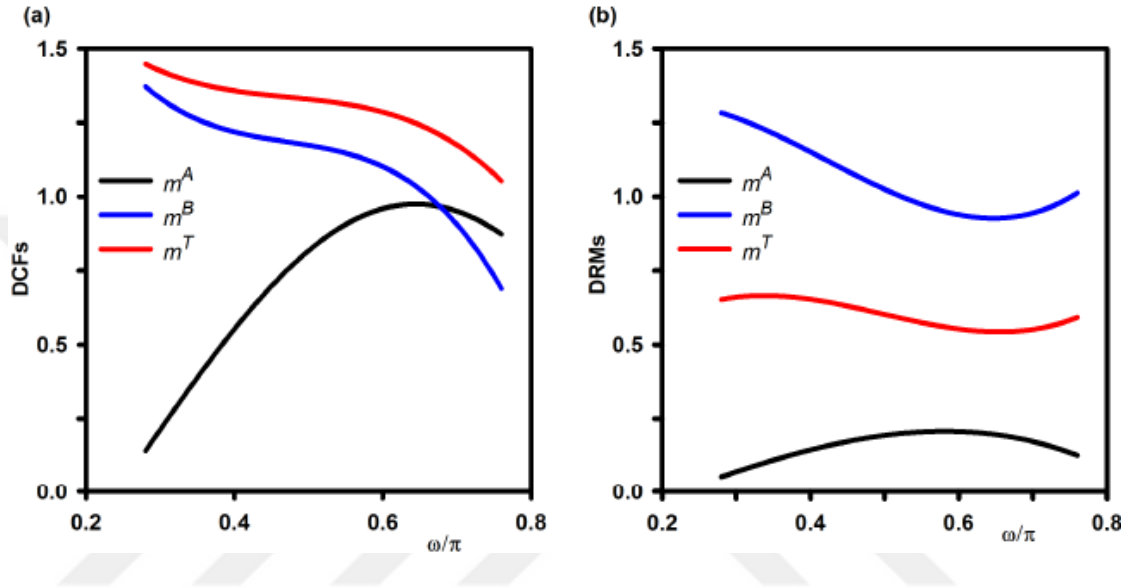
Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, m^A için döngü alanı T 'nin düşük değerleri için dar olmakta $T=1.50$ 'de döngü alanı maksimum olmakta ve sonra tedricen azalmaktayken m^B için $T=1.50$ 'de döngü alanı en az olmakta ve artan sıcaklıkla tedricen artmaktadır. Aslında bu durum sistemin $T=1.50$ 'de bir faz geçiş noktasına sahip olduğunu göstermektedir ki Şekil 3.2'den bu durum net bir şekilde görülmektedir.

3.1.2. Histerisiz Eğrilerine Frekans Etkisi



Şekil 3.3. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin frekansla değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_2 = 5.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$ olarak, $D = 0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $T = 2.0$ alınmıştır.

Şekil 3.3'e dikkat edilirse, düşük frekanslarda m^A için döngüler çift döngü veya ona yakın gibi ilginç özellikler gösterirken, m^B için düşük frekanslarda oldukça büyük döngü alanı gözlenmekte ve frekans artıkça da önce elips sonra da bu elips alanı küçülmektedir. Bu durum için coersive alan ve remanent manyetizasyon ise Şekil 3.4'te olduğu gibidir. Bu şekilde de görüldüğü gibi coersive alan ve remanent manyetizasyon



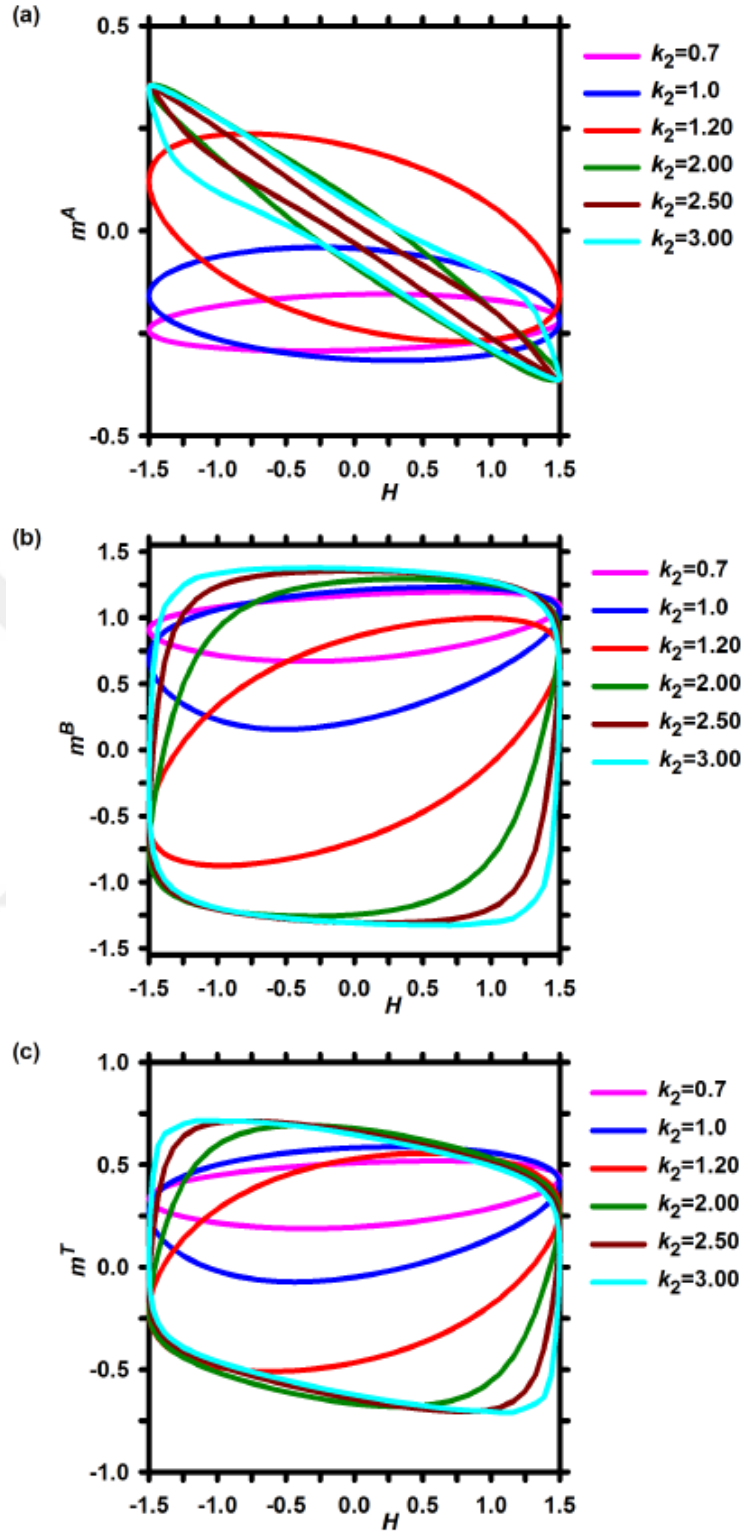
Şekil 3.4. Şekil 3.3'deki durum için dinamik coersive alan ve dinamik remanent manyetizasyon.

frekans yaklaşık 0.7 civarında iken en büyük olmakta ve azalan frekansla küçülmektedirler ki frekans 0.8'e yaklaşırken yok olmaktadır.

3.1.3. Histerisiz Eğrilerine k_2 Oran Sabiti Etkisi

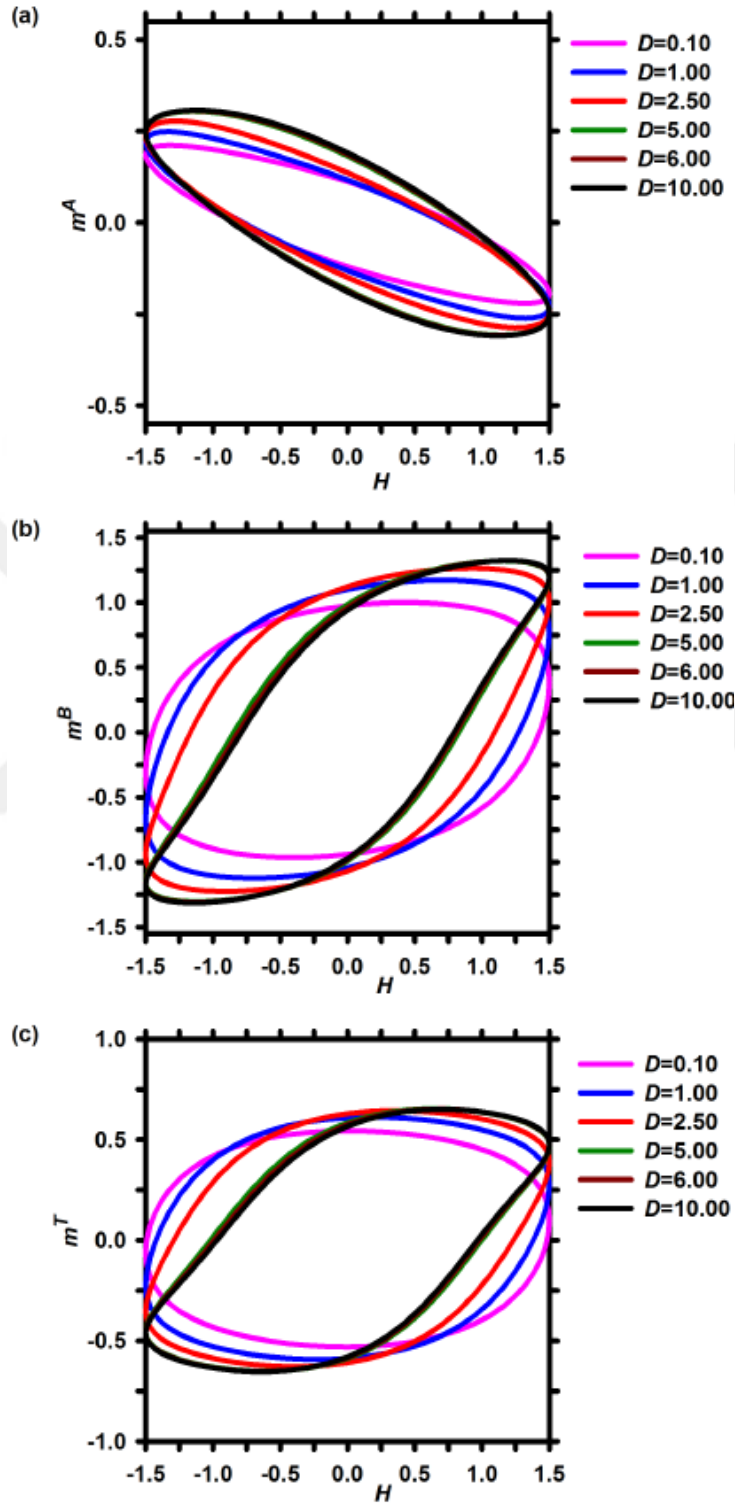
Histerisiz eğrilerine k_2 oran sabiti etkisini görmek için $J_1 = -1.0$, $J_2 = 5.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$ olarak alınmış ve $D = 0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $\omega = 0.30\pi$ ve $T = 2.0$ kullanılmış ve Şekil 3.5 teşkil edilmiştir.

Şekil 3.5 incelenirse, yüksek k_2 'lerde m^A için döngüler çift döngü veya çifte yakın gibi ilginç özellikler gösterdikten sonra azalan k_2 ile birlikte elips tipi döngüler oluşmaktadır. m^B için yüksek k_2 'lerde oldukça büyük ve diktörgen biçiminde döngü alanı gözlenmekte ve k_2 küçüldükçe de önce elips sonra da bu elips alanı küçülmektedir.



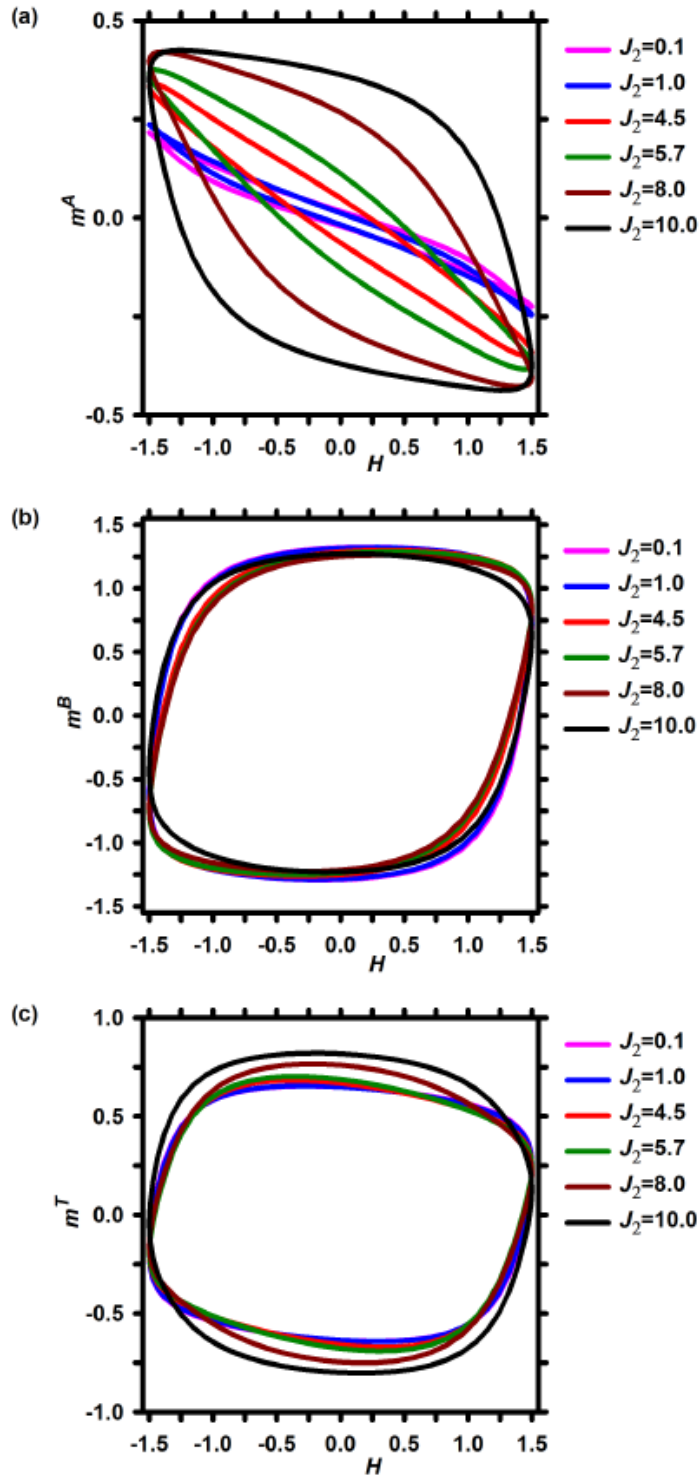
Şekil 3.5. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin k_2 oran sabiti ile değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_2 = 5.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $\omega = 0.30\pi$ olarak, $D = 0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $T = 2.0$ alınmıştır.

3.1.4. Histerisiz Eğrilerine D Kristal Alan Sabiti Etkisi



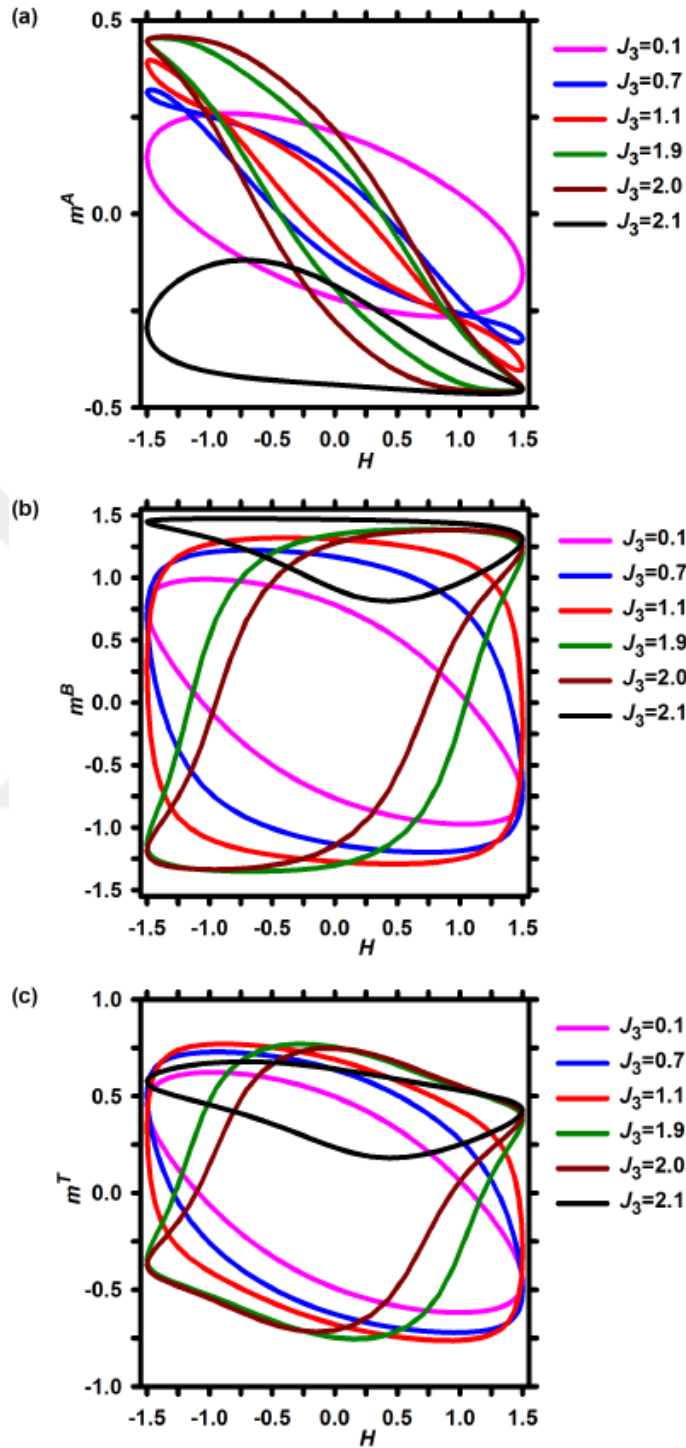
Şekil 3.6. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin D kristal alan sabiti ile değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_2 = 5.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$, $\omega = 0.30\pi$ olarak, $H_0 = 1.50$ ve $T = 2.5$ alınmıştır.

3.1.5. Histerisiz Eğrilerine J_2 Bilineer Etkileşme Sabiti Etkisi



Şekil 3.7. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin J_2 bilineer etkileşme sabiti ile değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$, $\omega = 0.30\pi$ olarak, $D=0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $T=2.0$ alınmıştır.

3.1.6. Histerisiz Eğrilerine J_3 Bilineer Etkileşme Sabiti Etkisi



Şekil 3.8. Dinamik manyetik histerisiz eğrilerinin J_2 bilineer etkileşme sabiti ile değişimi. $J_1 = -1.0$, $J_3 = 2.0$; $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$, $\omega = 0.30\pi$ olarak, $D=0.25$, $H_0 = 1.50$ ve $T=2.0$ alınmıştır.

3.2. Dinamik Manyetizasyon ve Faz Diyagramları

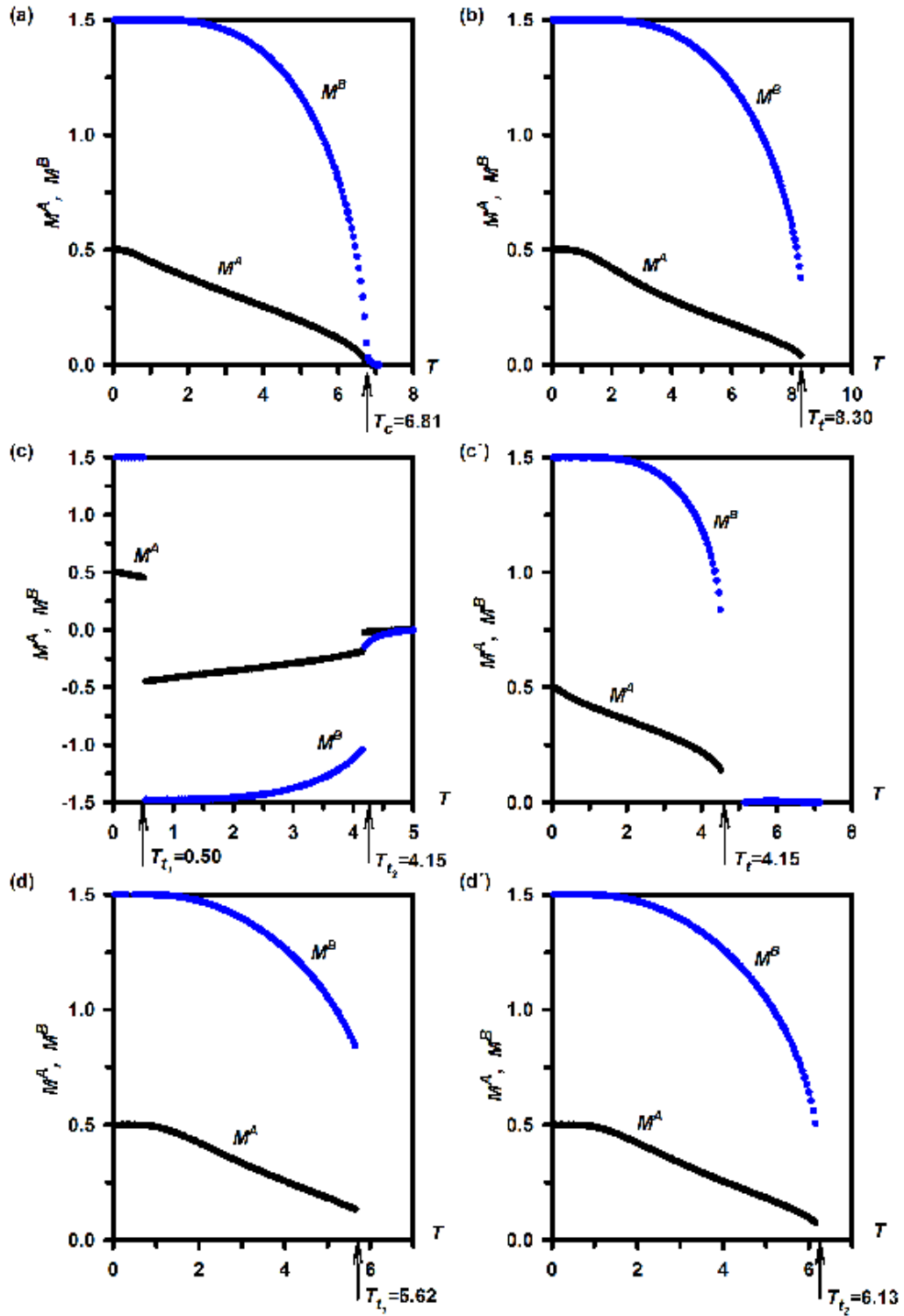
Nümerik hesaplamalarımızda bilineer etkileşim sabitlerinden J_1 'i, $J_1 = -1.0$; oran sabitlerini $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$; Boltzman sabitini $k_B = 1.0$ ve frekansı $\omega = 2\pi$ olarak sabit aldık.

M^A ve M^B dinamik mıknatıslanma düzen parametrelerinin sıcaklığa göre davranışları bu kesimde ele alındı ki Kesim 2.2'de dinamik mıknatıslanmalar,

$$M^{A,B} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m^{A,B}(\xi) d\xi \quad (2.39)$$

olarak verilmiş [33] ve buradaki $m^{A,B}(\xi)$ ise sırayla (2.31) ve (2.36)-(2.38) denklemleri ile elde edilmişti. Bu integraller, Adams-Moulton kestirme düzeltme yöntemi ve Romberg integrasyon yönteminin kullanılmasıyla çözüldü, dinamik düzen parametrelerinin sıcaklıkla olan değişimleri bulundu. Böylece, dinamik faz geçiş sıcaklıkları ve bunları birinci dereceden veya ikinci dereceden olup olmadıkları tespit edildi.

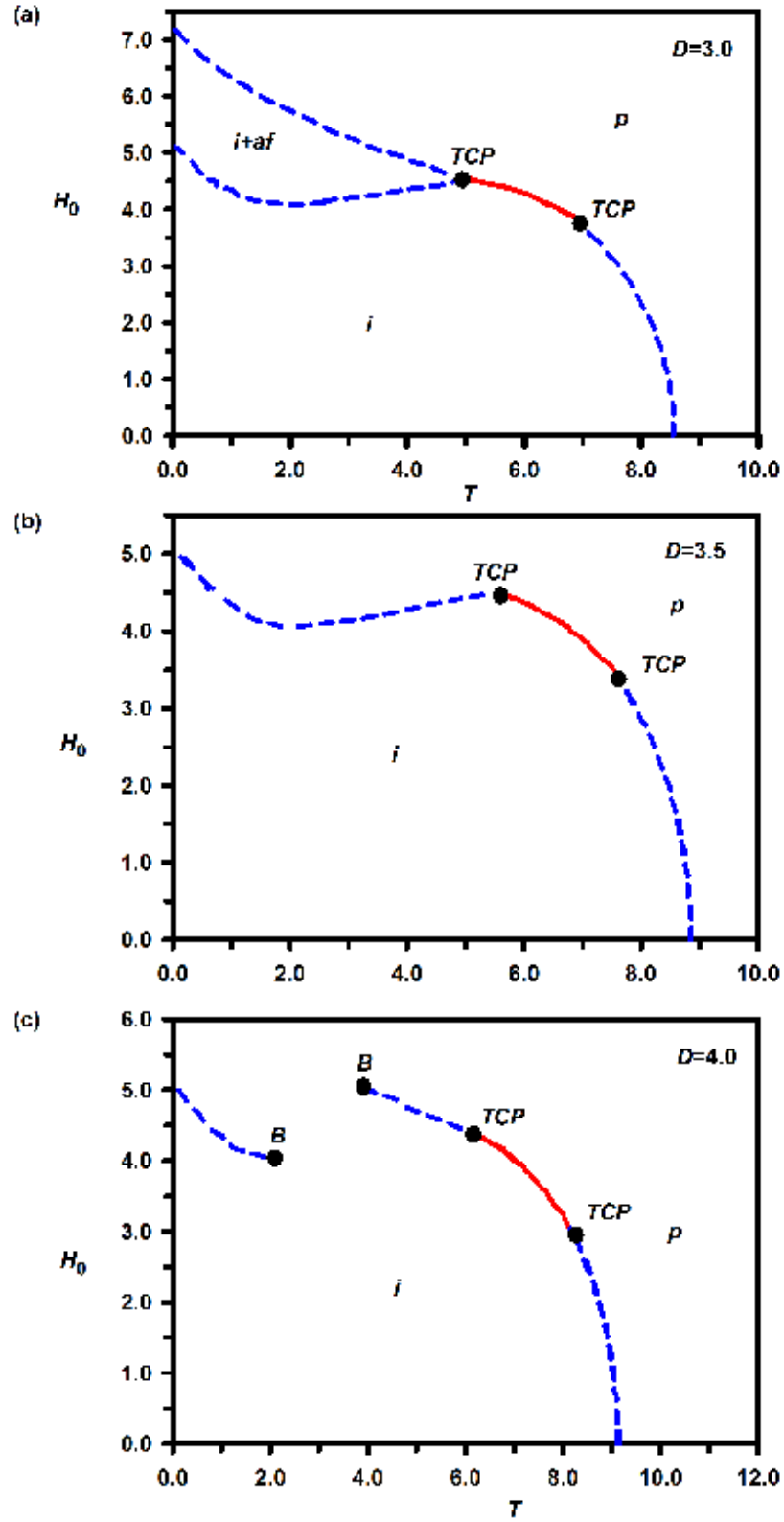
Denklem (2.39)'un çözülmesiyle bulunan sonuçlardan ilginç olan altı tanesi ile şekil 3.9 teşkil edilmiştir. Şekil 3.9 (a), $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$, $H_0 = 3.9$ ve $D = 3.0$ için elde edilmiş olup sistemin $T_c = 6.81$ 'de i (ferrimanyetik) fazdan p (paramanyetik) faza olan dinamik ikinci-dereceden bir faz geçişine sahip olduğu görülür. Zira, bu sıcaklıkta $M^{A,B}$ sıfıra gider ve artan sıcaklıkla birlikte sürekli sıfır olarak kalır. $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$, $H_0 = 1.5$ ve $D = 3.0$ için elde edilen Şekil 3.9 (b)'de sistemin $T = 8.30$ 'da birinci dereceden bir faz geçişine sahip olduğu görülmektedir. Çünkü $M^{A,B}$, kesikli olarak sıfıra gitmekte ki i fazdan p faza bir dinamik geçiş söz konusudur. Şekil 3.9 (c), $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$, $H_0 = 4.7$, $D = 3.0$ ve $M^A = 0.5$, $M^B = 0.5$ başlangıç değerleri kullanılarak elde edildi ki bu kez sistem birincisi $T_{c1} = 0.50$ 'de i fazdan af (antiferromanyetik) faza ve ikincisi $T_{c2} = 4.15$ 'de i fazdan p faza geçiş olmak üzere ardışık iki dinamik birinci dereceden faz geçişi sergilediği görülür. Öte yandan, Şekil 3.9 (c)'deki etkileşme parametrelerinin aynısı alıp sadece başlangıç değerlerini $M^A = 0.5$, $M^B = 1.5$ olarak değiştirdiğimiz takdirde Şekil 3.9 (c')'yü elde ederiz ki bu



Şekil 3.9. Dinamik faz geçiş sıcaklıkları ve tabiatları. Parametreler, $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$ olmak üzere, (a) $H_0 = 3.9$ ve $D = 3.0$. (b) $H_0 = 1.5$ ve $D = 3.0$. (c) $H_0 = 4.7$, $D = 3.0$ ve $M^A = 0.5, M^B = 0.5$. (c') Önceki şıkla aynı fakat $M^A = 0.5, M^B = 1.5$. (d) $H_0 = 1.0$, $D = 0.1$ ve $M^A = 0.5, M^B = 0.5$. (d') Önceki şıkla aynı fakat $M^A = 0.5, M^B = 1.5$.

durumda sistem $T_{t2} = 4.15$ 'de i fazdan p faza bir dinamik birinci dereceden faz geçişi gerçekleştirir. Bu son iki şekil birlikte değerlendirilirse sistemin $T_{t1} = 0.50$ ve $T_{t2} = 4.15$ aralığında $i+af$ formunda bir hibrit veya karma faza sahip olduğu anlaşılr. Ayrıca, $T_{t1} = 0.50$ 'in altında i faz, $T_{t2} = 4.15$ 'ün üstünde ise p faz görülür. Son olarak $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$, $H_0 = 1.0$, $D = 0.1$ ve $M^A = 0.5$, $M^B = 0.5$ başlangıç değerleri için elde edilen şekil 3.9 (d)'de $T_{t1} = 5.62$ noktasında i fazdan p faza dinamik faz geçişi meydana geldiği görülürken aynı parametreleri kullanıp fakat başlangıç değerlerini $M^A = 0.5$, $M^B = 1.5$ alıp şekil 3.9 (d') çizildiğinde i fazdan p faza dinamik faz geçişin $T_{t2} = 6.13$ noktasında meydana geldiği görülür. Yine bu son iki şekil birlikte değerlendirildiğinde sistemin $T_{t1} = 5.62$ ve $T_{t2} = 6.13$ arasında $p+i$ formunda bir hibrid fazın varlığı görülür ki $T_{t1} = 5.62$ altında i fazı, $T_{t2} = 6.13$ 'ün üzerinde ise p fazı teşekkül eder.

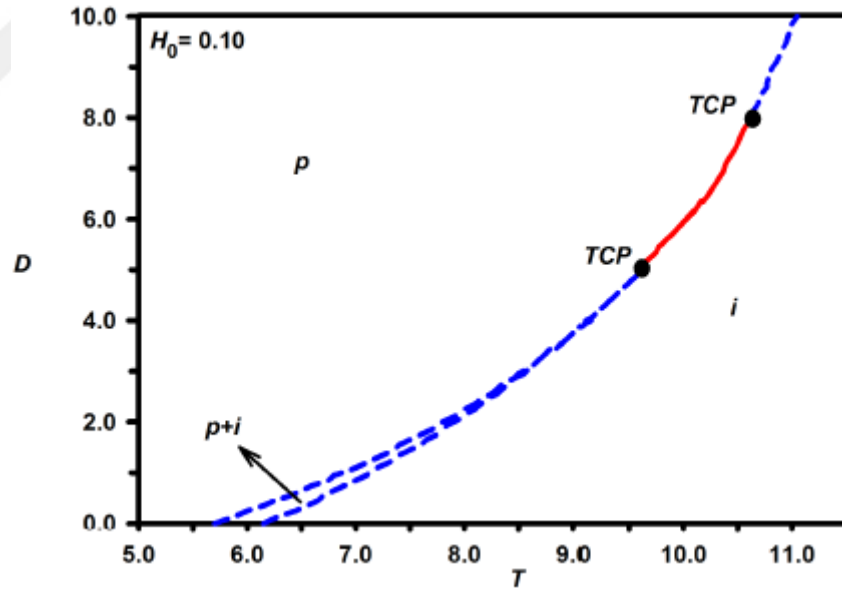
Dinamik faz geçiş sıcaklıklarını ve tabiatlarını belirlediğimiz için şimdi dinamik faz diyagramlarını oluşturabiliriz. Dinamik faz diyagramlarını (T, H_0) , (T, D) , (T, J_2) ve (T, J_3) düzlemleri olmak üzere dört farklı düzlemde oluşturduk ve şekil 3.10-13 ile sunduk. Şekil 3.10 (a) dinamik faz diyagramı $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$ ve $D = 3.0$ için (T, H_0) düzleminde elde edilmiştir. Bu faz diyagramında yüksek sıcaklıklarda ve dış manyetik alan genliğinde p fazı görülürken söz konusu parametrelerin düşük değerlerinde i fazı görülür. Dinamik i ve p fazı arasındaki sınır çizgisi H_0 'ın yüksek değerleri için ikinci dereceden gaz geçiş (İDFG) çizgisi ve H_0 'ın düşük değerleri için birinci dereceden gaz geçiş (BDFG) çizgisidir. Düşük sıcaklıklarda, i ve p 'nin mevcut olduğu bölgede, $i+af$ karma veya hibrit fazının yer aldığı bir H_0 değer aralığı vardır. Sistem ayrıca iki tane dinamik üçlü kritik nokta (ÜKN) sergiler. Bunlardan biri, $i+af$ hibrit fazı i ve p fazından ayıran iki BDFG çizgisini İDFG çizgisine bağlar. Diğeri nispeten küçük H_0 'da gerçekleşir ve İDFG çizgisini BDFG'ne bağlar. Yine $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$ alınıp bu kez $D = 3.5$ kullanıldığında elde edilen Şekil 3.10 (b)'ye dikkat edilirse $i+af$ hibrit fazının kaybolmasının yanı sıra H_0 'ın yüksek değerlerinde reentrant davranışı gözlenir. Aynı bilineer etkileşim sabitlerini kullanıp krsital alan sabiti D 'yi biraz daha artırdığımızda, yani $D = 4.0$ alındığında şekil 3.10 (c) elde edilir. Bu şekile



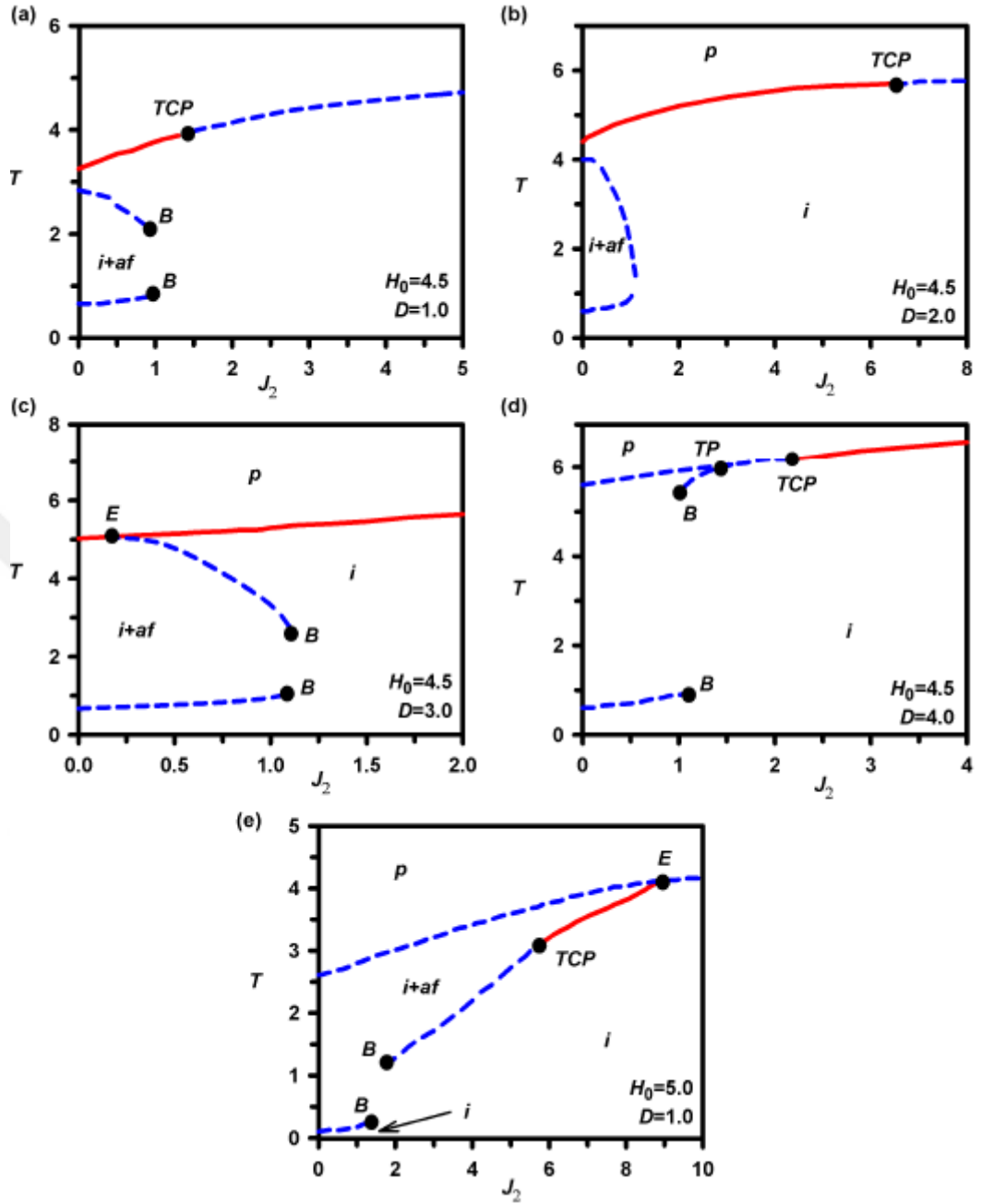
Şekil 3.10. (T, H_0) düzleminde faz diyagramı. Etkileşme parametreleri $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$ olmak üzere (a) $D = 3.0$, (b) $D = 3.5$, ve (c) $D = 4.0$ alınmıştır.

dikkat edildiğinde şekil 3.10 (c)'ye benzer ancak düşük sıcaklık bölgesindeki BDFG çizgisi iki parçaya bölünerek ortaya iki tane dinamik çift kritik uç nokta (B) çıkar. Bu ise yeni bir dinamik faz davranışıdır ve sadece bu sistemde gözlenmiştir.

Şekil 3.11, $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$ ve $H_0 = 0.1$ değerleri için hesaplanan ve (T, D) düzleminde ifade edilen dinamik faz diyagramıdır. Bu dinamik faz diyagramı p , i ve $p+i$ fazlarının yanısıra iki tane dinamik üçlü kritik nokta ihtiva eder. D 'nin küçük değerlerinde, p ve i dinamik fazlarını BDFG çizgisi ile ayıran bir $p+i$ hibrit fazı yer alır. D 'nin biraz artmasıyla, zaten dar olan $p+i$ hibrit fazı iyice daralır ve bunu sınırlayan iki BDFG çizgisi bir dinamik üçlü kritik nokta ile İDFG çizgisi ile birleşir. Yine D biraz daha büyüdüğünde İDFG çizgisi bir ikinci dinamik üçlü kritik nokta ile bir diğer BDFG çizgisine bağlanır. Burada şunu da belirtmekte fayda vardır ki H_0 'ın daha farklı değerleri için de hesaplama yapıldığında mevcut dinamik topolojik yapının pek değişmediği görülmüştür.



Şekil 3.11. (T, D) düzleminde faz diyagramı. Etkileşme parametreleri $J_2 = 0.5$, $J_3 = 1.5$ ve $H_0 = 0.1$ alınmıştır.



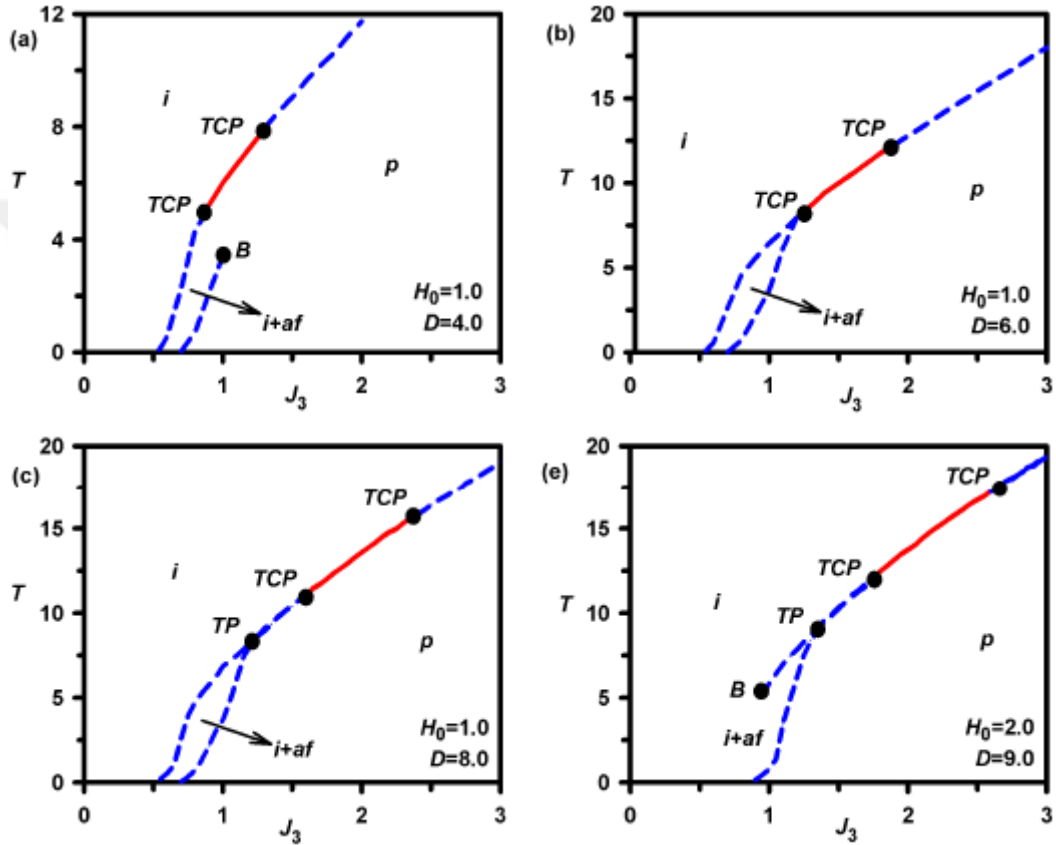
Şekil 3.12. $J_3 = 1.5$ olmak üzere muhtelif H_0 ve D değerleri için hesaplanan dinamik faz diyagramının (T, J_2) düzleminde görünüşü. $H_0 = 4.5$ değeri için (a) $D = 1.0$, (b) $D = 2.0$ (c) $D = 3.0$, (d) $D = 4.0$ ve (e) $H_0 = 5.0$, $D = 1.0$.

Şekil 3.12, $J_3 = 1.5$ olmak üzere muhtelif H_0 ve D değerleri için hesaplanan dinamik faz diyagramını (T, J_2) düzleminde ifade eder. Beş temel farklı topolojik dinamik faz diyagramı bulunmuştur. $H_0 = 4.5$ ve $D = 1.0$ için elde edilen Şekil 3.12 (a)'ya bakılırsa

dinamik faz diyagramının p , i ve $i+af$ fazlarını ve bir dinamik üçlü kritik nokta, iki tane de çift kritik uç nokta (B) içerdiği görülür. J_2 'ün küçük değerlerinde i temel fazı ve $i+af$ hibrid fazı arasındaki dinamik sınır BDFG çizgisi iken J_2 'ün büyük değerlerinde p ve i fazları arasındaki dinamik sınır İDFG çizgisidir. $H_0 = 4.5$ şeklinde aynı kalırken ve kristal alan sabiti $D = 2.0$ olarak artırıldığında bulunan şekil 3.12 (b) dinamik faz diyagramı, B 'nin kaybolması ve İDFG eğrisinin uzaması haricinde şekil 3.12 (a)'ya benzer. $D = 3.0$ olarak biraz daha artırılırsa elde edilen şekil 3.12 (c) dinamik faz diyagramı, p ve i fazları arasındaki BDFG çizgisinin mevcut olmaması ve dolayısıyla dinamik üçlü kritik noktanın kaybolması ve ayrıca J_2 'ün küçük, T 'nin büyük değerlerinde bir E kritik son noktanın ortaya çıkması dışında şekil 3.12 (a) gibidir. Kristal alan sabiti $D = 4.0$ olarak artırıldığında daha da artırıldığında hesaplanan şekil 3.12 (d) dinamik faz diyagramında, J_2 'ün küçük değerleri için BDFG ve J_2 'ün büyük değerleri için İDFG çizgilerini içerdiğini görürüz. Ayrıca, dinamik üçlü nokta (TP) gözlenir. Bu kez manyetik alan genliği artırılıp kristal alan sabiti düşük alınırsa, yani $H_0 = 5.0$ ve $D = 1.0$ değerleri kullanılırsa Şekil 3.12 (e) elde edilir. Bu dinamik faz diyagramında, T 'nin yüksek değerlerinde p fazı i faz ve $i+af$ 'dan ayıran sadece BDFG çizgisi vardır. J_2 'ün küçük değerleri için $i+af$ faz ve i fazı birbirinden ayıran dinamik sınır BDFG çizgisi iken J_2 'ün büyük değerleri için p fazı i fazdan ayıran dinamik sınır İDFG çizgisidir. Ayrıca dinamik üçlü kritik nokta, kritik son nokta ve iki tane de çift kritik son nokta bulunur.

Şekil 3.13 ise $J_2 = 0.5$ kullanılarak muhtelif H_0 ve D değerleri için (T, J_3) düzleminde sunulan üç adet dinamik faz diyagramından oluşur. Şekil 3.13 (a), $H_0 = 1.0$ ve $D = 4.0$ için hesaplanmıştır ve p , i ve $i+af$ fazları içermesinin yanısıra iki tane üçlü kritik nokta ve bir tane çift kritik nokta (B) ihtiva eder. p , i ve $i+af$ fazları arasındaki dinamik sınırlar BDFG eğrisidir. J_3 'ün küçük değerleri için p ve i fazları arasındaki sınır İDFG çizgisi iken J_3 'ün büyük değerleri için BDFG çizgisidir. $H_0 = 1.0$ ve $D = 6.0$ için elde edilen şekil 3.13 (b), çift kritik son noktanın kaybolması ve bu yüzden $i+af$ ve p fazları arasındaki BDFG çizgisinin bir dinamik üçlü kritika bağlanması dışında şekil 3.13 (a) ile aynıdır. Şekil 3.13 (c), $H_0 = 1.0$ ve $D = 8.0$ için çizilmiştir ki (b) şikkına benzemekle birlikte farkı, T 'nin küçük değerlerinde dinamik bir üçlü noktanın mevcut

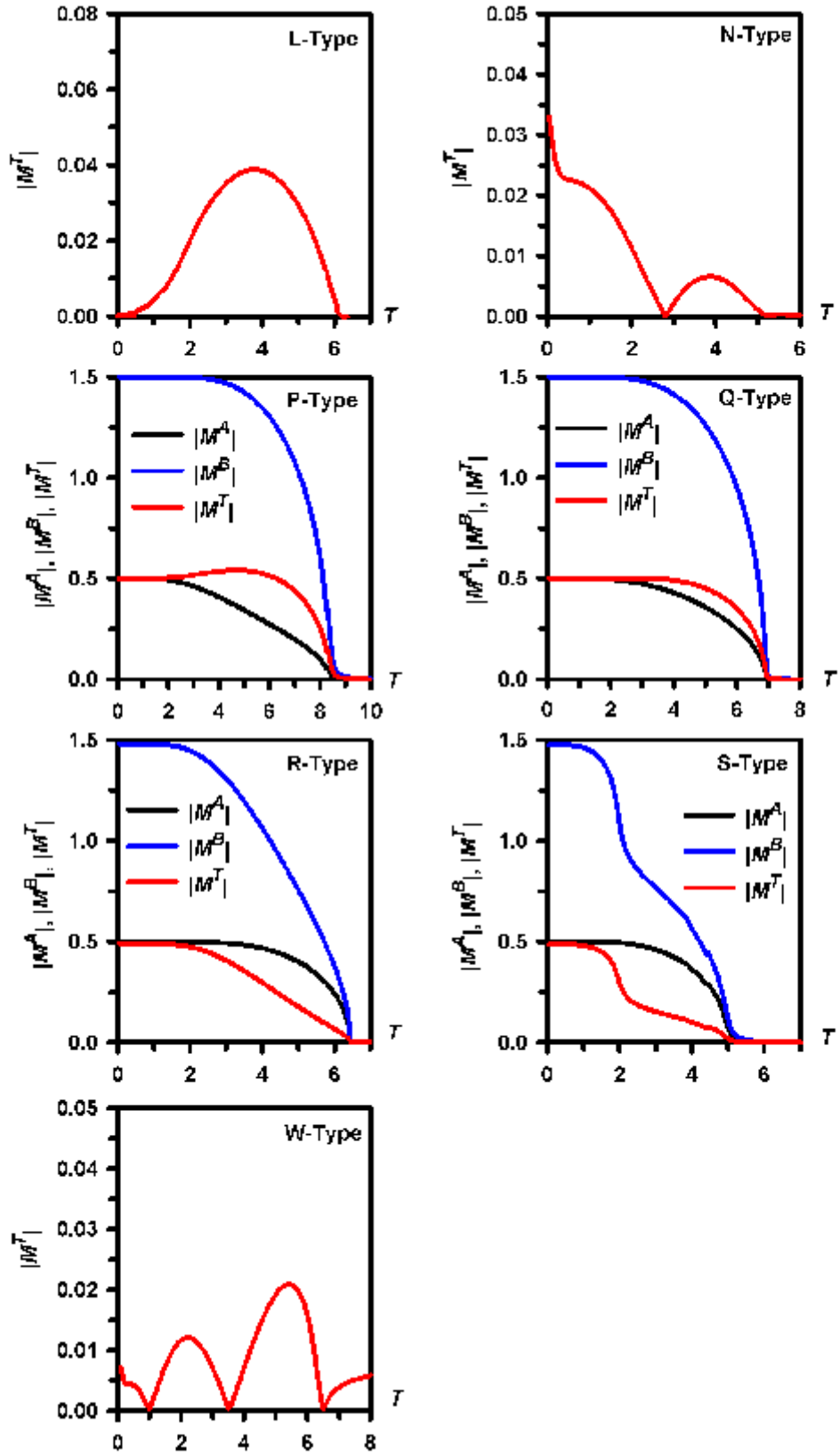
olmasıdır. (c) şikkına kadar sadece D 'yi artırmıştık, eğer $H_0 = 2.0$ ve $D = 9.0$ şeklinde her ikisini de artırırsak Şekil 3.13 (d) dinamik faz diyagramını elde ederiz ki J_3 ve T 'nin küçük değerleri için çift kritik son noktanın meydana gelmesi haricinde (c) şikkı ile aynı karakterde olduğu görülür.



Şekil 3.13. $J_2 = 0.5$ olmak üzere muhtelif H_0 ve D değerleri için hesaplanan dinamik faz diyagramının (T, J_3) düzleminde görünüşü. $H_0 = 1.0$ değeri için (a) $D = 4.0$, (b) $D = 6.0$ (c) $D = 8.0$ ve (d) $H_0 = 2.0$, $D = 9.0$.

Son olarak, ferrimanyetik materyallerin telafi davranışları manyeto-optik kayıt alanlarında önemli uygulamaları olduğu için sistemin telafi davranışı üzerinde de durduk. Telafi davranışları, toplam dinamik manyetizasyonun yani $M^T = (|M^A| + |M^B|)/2$ ifadesinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplanması ile elde edilir. Böylece şekil 3.14 (a)-(f) bulundu ki Neel sınıflandırmasına göre [35] sistemin sırayla L-, N-, P-, Q-, R-, S-, ve W- tipi davranış sergilediği tespit etmiş oldu. Burada (a), (b) ve (g) şıklarındaki tipler dar bir aralıkta gözlendiğinden $|M^A|$ ve $|M^B|$ davranışları ayrıca çizilmeyip sadece tipi gösteren $|M^T|$ verilmiştir.





Şekil 3.14. (a)-(f) bulundu ki Neel sınıflandırmasına göre sistemin sırayla L-, N-, P-, Q-, R-, S-, ve W- tip davranış sergilediği tespit etmiş oldu.

4. BÖLÜM

SONUÇ ve TARTIŞMA, ÖNERİLER

4.1. Sonuç ve Tartışma

Manyetik malzemelerin teorik olarak incelenmesinde prototip modeller olarak karma-spin (yarım tamsayılı-tamsayılı, yarım tamsayılı-yarım tamsayılı ve tamsayılı-tamsayılı) sistemleri kullanılmaktadır. Bunların içinde en iyi bilinen ve üzerinde en çok çalışılan yarım tamsayılı-yarım tamsayılı karma spin Ising sistemi, karma spin (1/2, 3/2) Ising modelidir ki bu tezde, müteakip tabakalı altıgen örgü üzerine YİY uygulayarak sistemin dinamik manyetik özellikleri incelendi. Karma-spin sistemlerinin dinamikleri genelde DOAT ve DEFT yöntemleriyle incelenmekte iken YİY ile ancak birkaç çalışma mevcuttur [1, 2]. Oysa ki YİY iki veya üç oran sabiti içermesi DOAT ve DEFT'ye göre bir avantaj teşkil eder. Bu oran sabitleri, deneysel çalışmalarda soğuma oran katsayılarına tekabül ettiğinden, YİY ile elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmalarla karşılaştırılması daha uygun olduğundan bu alanda çalışanlara daha fazla yol göstericidir. Dolayısıyla bu tezde, zamanla değişen manyetik alan varlığında müteakip tabakalı altıgen örgü üzerinde karma spin (1/2, 3/2) Ising modelinin dinamik manyetik özelliklerini incelemek için YİY tercih edilmiştir.

İlk olarak sıcaklık, açısal frekans, bilineer etkileşim sabitleri, kristal alan sabiti, oran sabitleri gibi etkileşme parametrelerinin dinamik histerisiz döngülere etkileri incelenmiştir. Daha sonra, etkileşme parametrelerinin dinamik coersive alan ve dinamik remanent manyetizasyona etkileri araştırılmıştır. Oran sabitlerinden k_2 , deneysel olarak soğutma katsayısına karşılık gelmektedir. Melt-spinning tekniğiyle (MST) yapılan hızlı katılaştırma deneylerindeki teker hızı gibi çoğu zaman yüksek soğutma katsayılarına çıkmak deneysel olarak mümkün olmayan çalışmalarda histerisiz davranışlarının nasıl

olabileceği hakkında deneycilere yol gösterici niteliktedir. Manyetik histerisiz özellikler, bilgi depolama aygıtları geliştirmede, AC indüktörler, yüksek frekans cihazları, manyetik kalkanlar, daimi mıknatıslar, manyetik yükselteçler, hard diskler, manyetik bantlar ve kredi kartları gibi ileri teknolojik uygulamalar açısından çok önemlidir. Tezin bu kısmında bulunan sonuçlar, MST ile üretilen bazı manyetik malzemeler ve bunların histerisiz özellikleri hakkında hem teorik hem de deneysel olarak bulunan sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu alanda hem deneysel hem de teorik çalışanlara ışık tutacağını ümit ederiz.

Manyetik malzemelerin, zamanla değişen manyetik alan varlığında müteakip tabakalı altıgen örgü üzerinde karma spin ($1/2$, $3/2$) Ising modelinde YİY kullanarak dinamik histerisiz özelliklerinin incelenmesi, bu tezin danışmanı Gençaslan'ın araştırmacı olduğu ve Keskin'in yönetici olduğu 119F129 nolu TUBİTAK projesi kapsamında yapılmış ve sonuçlar International Journal of Modern Physics B dergisine sunulmuş olup basım aşamasındadır [36]. Ancak, ele aldığımız sistemin manyetik dinamik özelliklerinin incelenmesindeki bütünlük bozulmasının düşüncesiyle bu tezde de ele alınmıştır.

Tezin diğer önemli ayağı, zamanla değişen manyetik alan varlığında müteakip tabakalı altıgen örgü üzerinde karma spin ($1/2$, $3/2$) Ising modelinde YİY kullanarak manyetik malzemeler için bir protip olarak dinamik faz geçiş sıcaklıklarının bulunması ve farklı sistem parametreleri uzayında faz diyagramlarının elde edilmesidir. Dinamik faz geçiş sıcaklıklarının arkasındaki mekanizma tam olarak keşfedilmediği ve temel fonomenolojisi tam manasıyla izah edilemediği için bu alandaki çalışma önemlidir. Dolayısıyla önce, sinüsel bir dış manyetik alan altındaki sistem için YİY kullanılarak dinamik denklemler elde edildi. Dinamik denklemlerin nümerik çözümleri yapılarak dinamik faz geçiş sıcaklıkları tespit edildi. Sonra da farklı düzlemlerde faz diyagramları oluşturuldu. Bu faz diyagramlarına bakıldığında p , i , af temel fazları ve $i+af$, $p+i$ hibrid fazlarını sergilediğinin yanısıra dinamik üçlü kritik nokta, dinamik üçlü nokta, dinamik kritik uç nokta, dinamik çift kritik uç nokta içerdiği görüldü. Sonuçların, bu konuda farklı metotlarla (T, H_0) , (T, D) düzlemlerinde hesaplanan birçok dinamik manyetik faz diyagramlarıyla uyum içinde oldukları görülürken bazı ilginç kritik olaylar veya manyetik davranışlar da tespit edilmiştir. Etkileşme parametrelerine bağlı olarak mesela

(T, H_0) düzleminde, 3.10 (b) gibi re-enrant davranışı tespit edilmiş, Şekil 3.10 (c) gibi yeni bir dinamik faz diyagramı bulunmuştur. Ayrıca dinamik faz diyagramları, (T, J_2) ve (T, J_3) düzlemlerinde de verilmiş ve bu düzlemlerde üç ilginç dinamik faz davranışı tespit edilmiştir.

Bu tezde son olarak zamanla değişen manyetik alan varlığında müteakip tabakalı altıgen örgü üzerinde karma spin $(1/2, 3/2)$ Ising modelinde YİY kullanarak manyetik malzemelerin telafi davranışları incelenmiştir. Sonuçlara bakıldığında, sistemin Néel sınıflandırmasına göre [35] sırayla L-, N-, P-, Q-, R-, S-, ve W- tipi davranış sergilediği görülmüştür.

Tezin zamanla değişen manyetik alan varlığında müteakip tabakalı altıgen örgü üzerinde karma spin $(1/2, 3/2)$ Ising modelinde YİY kullanarak manyetik malzemeler için bir protip olarak dinamik faz geçiş sıcaklıklarının bulunması ve farklı sistem parametreleri uzayında faz diyagramlarının elde edilmesi ile ilgili bulunan sonuçlar Alhameri, Gençaslan ve Keskin [37] tarafından makale haline getirilmiş ve Indian Journal of Physics dergisine sunulmuştur.

4.2. Öneriler

Karma spin sistemleri kullanılarak manyetik malzemelerin dinamik özelliklerinin incelenmesinde en fazla kullanılan yöntemler dinamik ortalama alan teorisi (DOAT), dinamik etkin-alan teorisi (DEAT) ve yol ihtimaliyet yöntemi (YİY) sayılabilir. Karma-spin sistemlerinin dinamikleri genelde DOAT ve DEFT yöntemleriyle incelenmiş olup YİY ile de birkaç çalışma mevcuttur [1, 2]. Oysa ki bu tezin yöntem bölümünde ayrıntılı olarak bahsedildiği üzere YİY ile çalışmak, DOAT ve DEFT ile çalışmaktan daha avantajlıdır. Çünkü DOAT ve DEFT tek oran sabiti içerdikleri halde YİY iki ve üç oran sabiti içermektedir. Oran sabitleri deneysel çalışmalarda soğuma oran katsayılarına tekabül ettiğinden, YİY ile elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla karşılaştırılması daha uygun ve deneyci araştırmacılara daha fazla yol göstericidir. Bu nedenle, hem teknolojik hem de akademik araştırmalar bakımından önemli olan karma-spin $(1/2, 1)$; $(1/2, 3/2)$ ve $(2, 5/2)$ Ising sistemleri kullanılarak manyetik malzemelerin dinamiklerinin YİY ile incelenmesi üzerine yapılacak çalışmalar literatürde önemli bir boşluğu

dolduracağı gibi manyetik ve özellikle ferrimanyetik malzemeler üzerine çalışanlara da yol gösterici/ışık tutucu mahiyette olacaktır.

Sonuç itibarıyla, bir öneri veya ileri çalışma konuları olarak daha farklı karma spin sistemleri için YİY kullanılarak sistemin dinamik manyetik özellikleri incelenebilir ve bu tezde olduğu gibi ilginç dinamik faz geçiş sıcaklıkları ve faz diyagramları elde edilebilir.

Moleküller-temelli manyetik malzemelerin dinamik özellikleri kapsamında, histerisiz ve telafi (compensation) davranışlarının araştırılması, hem teknolojik uygulamalar ve hem de akademik çalışmalar bakımından önemli konular içerisinde yer almaktadır. Ayrıca, faz geçiş sıcaklıklarının incelenmesi ve faz diyagramlarının elde edilmesi ise yoğun madde fiziği ve istatistiksel fiziğin önemli ve daima güncel konularından biridir. Sonuçlar, literatürdeki mevcut farklı yöntemlerle elde edilen sonuçlarla ve aynı zamanda bu karma-spin sistemlerinin karşılık geldiği sistemler veya benzer sistemlerle yapılan deneysel sonuçlarla da karşılaştırılacaktır. Böylece, hem YİY'in karma-spin sistemlerinin dinamiklerinin incelenmesindeki geçerliliği test edilmiş olacak hem de bu konuda çalışan deneysel araştırmacılara daha fazla yol gösterici potansiyelde olacağını ümit etmekteyiz.

KAYNAKÇA

1. Ekiz, C. and Keskin, M., 2003. Magnetic properties of the mixed spin-1/2 and spin-1 Ising ferromagnetic system, **Physica A**, 317, 517-534, 2003.
2. Ertaş, M. and Keskin, M., 2015. Dynamic phase transition properties for the mixed spin-(1/2,1) Ising model in an oscillating magnetic field, **Physica B**, 470-471, 76-81, 2015.
3. Ising, E., Beitrag zur Theorie des Ferro- und Paramagnetismus, Doktora Dissertation. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Hamburgischen Universität, Hamburg, 1924; Ising, E., Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus, **Z. Physik**, 31, 253-258, 1925.
4. Bobák, A. and Jurcisin, M., 1996. Ferrimagnetism in Diluted Mixed-Spin Two-Dimensional Ising Models, **J. Magn. Magn. Mater.**, 163, 292-298, 1996.
5. Bobák, A. and Jurcisin, M., 1997. Ferrimagnetism in Diluted Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Ising Systems, **Journal de Physique IV**, 7, 179-180, 1997.
6. Manriquez, J. M., et al., 1991. A Room Temperature Molecular/Organic-Based Magnet, *Science*, 252, 1415, 1991.
7. Morin, G., et al, 1993. Complex Ac Susceptibility Studies of the Disordered Molecular Based Magnets $V(TCN)X$: Role of Spinless Solvent, **J. Appl. Phys.**, 73, 5648-5650, 1993.
8. Du, G., et al., 1993. Anomalous Charge-Transport Phenomena in Molecular-Based Magnet $V(TCN)X \cdot Y(\text{Solvent})$, **J. Appl. Phys.**, 73, 6566-6568, 1993.
9. Benayad, N., et al., 1996. Mixed Spin-3/2 and Spin-1/2 Ising Models with Random Nearest-Neighbour Interactions, **Annalen Der Physik**, 5 (4), 387-398, 1996.
10. Buendia, G. M., Cardona, R., 1999. Monte Carlo Study of a Mixed Spin-3/2 and Spin-1/2 Ising Ferrimagnetic Model, **Phys. Rev. B**, 59, 6784-6789, 1999.
11. Benayad, N., Dakhama, A., Klümper, A., Zittartz, J., 1996. Magnetic Properties of a Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Transverse Ising model, **Zeitschrift Fur Physik B**, 101, 623-630, 1996.

12. Bobák, A., Horváth, D., 1999. 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.
13. Jiang, W., Wei, G.-Z., Xin, Z.-H., 2001. 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.
14. Wei, G.-Z., et al., 2004. Magnetic Properties of Mixed-Spin Ising Systems in a Longitudinal Magnetic Field, **J. Magn. Magn. Mater.**, 271, 246-253, 2004.
15. Li, J., Wei, G., Du, A., 2004. Green Function Study of a Mixed Spin-3/2 and Spin-1/2 Heisenberg Ferrimagnetic Model, **J. Magn. Magn. Mater.**, 269, 410-418, 2004.
16. Albayrak, E., Alçi., A., 2005. Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Blume-Capel Ising Ferrimagnetic System on the Bethe Lattice, **Physica A**, 345, 48-60, 2005.
17. Strecka, J., 2006. 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, 708-715, 2006.
18. Strecka, J., Canová, L., 2006. Non-Universal Critical Behaviour of a Mixed-Spin Ising Model on the Extended Kagome Lattice, **Condensed Matter Physics**, 9, 179-186, 2006.
19. Zhang, X., Kong, X.-M., 2006. 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.
20. Jascur, M., Strecka, J., 2005. 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, 393-412, 2005.
21. Mackowiak, J., 2007. Mean-Field Heat Capacity of Dilute Magnetic Alloys, Cond-Mat/0703146. 2007.
22. Gençaslan, M., Keskin, M., 2019. Metastable and Unstable States of the Mixed Spin (1/2, 3/2) Ising System in an External Longitudinal Magnetic, in: H. Çiftçi,

- Z. Alimgerey (Eds.), VIII. UMTEB International Congress on Vocational & Technical Sciences, Institute of Economic Development and Social Researches Publications, Turkey, pp. 93-104. 2019.
23. Taşkın, F., Canko, O., Erdinç, A., Yıldırım, A. F., 2014. Thermal and magnetic properties of a nanotube with spin- 1/2 core and spin- 3/2 shell structure **Physica A** 407 (2014) 287.
 24. Kantar, E. J. , 2015. Hexagonal-Type Ising Nanowire with Core/Shell Structure Designed with Half-Integer Spins: Compensation Behaviors and Phase Diagrams in the Temperature and Interaction Planes **Supercond Nov Magn** 28 (2015) 2865.
 25. Benhouria, I. Essaoudi, A. Ainane, R. Ahuja, F. Dujardin, 2014. Thermodynamic properties and hysteresis behaviors of a mixed spin-3/2 and spin-1/2 Ising double walled ferrielectric nanotubes: **A Monte Carlo study Superlattices and Microstructures**, 75 (2014) 761.
 26. Boughazi, B., Boughrara, M., Kerouad, M., J. 2014. Phase diagrams and magnetic properties of a cylindrical Ising nanowire: **Monte Carlo and effective field treatments** 363 (2014) 26.
 27. Boughazi, B., Boughrara, M., Kerouad, M., 2017. Phase diagrams and magnetic properties of ferromagnetic mixed spin-1/2 and spin-3/2 Ising nanowire **Physica A** 465 (2017) 628.
 28. Deviren, B. , Keskin, M. , Canko, O. , J. 2009. Kinetics of a mixed spin-1/2 and spin-3/2 Ising ferrimagnetic model. **J. Magn. Magn. Mater.** 321 (2009) 458.
 29. Keskin, M. , Deviren, B. , Canko, O. , 2009. Kinetics of a mixed spin-1/2 and spin-3/2 Ising ferrimagnetic model, **IEEE Transaction on Magnetism** 45 (2009) 2640.
 30. Vatansever, E. , Polat, H. , 2015. Nonequilibrium dynamics of a mixed spin-1/2 and spin-3/2 Ising ferrimagnetic system with a time dependent oscillating magnetic field source, **J. Magn. Magn. Mater.** 392 (2015) 42.
 31. Gençaslan, M. , Keskin, M. , 2020. Dynamic magnetic properties of the mixed

spin (1/2,3/2) Ising system in the presence of magnetic field within the path probability method **Physica A** 559 (2020) 125013.

32. Kikuchi, R., 1966. The Path Probability Method, **Suppl. Prog. Theor. Phys.** 35 (1966) 1.
33. Chakrabarti, K, Acharyya, M., 1999. Dynamic transitions and hysteresis, Rev. Mod. **Phys.** 71 (1999) 847.
34. Acharyya, M., 2005. Nonequilibrium phase transitions in model ferromagnets: a review Int. **J. Mod. Phys. C** 16 (2005) 1631.
35. Néel L., 1948. Propriétés magnetiques des ferrites-ferrimagnétisme et antiferromagnétisme *Annalen der Physik* **3** (1948) 137.
36. Gençaslan, M. Keskin, M. , 2021. Influences of the interaction parameters on the dynamic hysteresis of a mixed spin (1/2, 3/2) Ising model under the presence of an oscillating magnetic field, **Int. J. Modern Phys. B**, baskıda.
37. Alhameri, M., F., Gençaslan, M. ve Keskin, M., 2021. Dynamic phase transitions and compensation behaviors in a mixed spin (1/2, 3/2) Ising model on a hexagonal lattice by path probability method, **Indian Journal of Physics**, yayın için sunuldu.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: MARIYA FADHIL IMRAN AL HAMERI

Uyruğu: Irak Cumhuriyeti

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Babylon Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik / Irak	2008

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Kurum	Görev
2008	Karbala Üniversitesi	Laboratuvar süpervizörü
2014/2015	Yaratıcılık Şirketi	İnsan kaynakları yönetimi

YABANCI DİL

İngilizce

Arapça

Türkçe