

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİNETİK KARMA SPİN (1/2, 1) VE SPİN (3/2, 2)
FERRİMANYETİK SİSTEMLERİNDE MEYDANA GELEN
DİNAMİK FAZ GEÇİŞLERİ VE DİNAMİK FAZ
DİYAGRAMLARI**

**Tezi Hazırlayan
Yasin POLAT**

**Tezi Yöneten
Prof. Dr. Mustafa KESKİN**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2010
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİNETİK KARMA SPİN (1/2, 1) VE SPİN (3/2, 2)
FERRİMANYETİK SİSTEMLERİNDE MEYDANA GELEN
DİNAMİK FAZ GEÇİŞLERİ VE DİNAMİK FAZ
DİYAGRAMLARI**

**Tezi Hazırlayan
Yasin POLAT**

**Tezi Yöneten
Prof. Dr. Mustafa KESKİN**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Bu çalışma, TÜBİTAK – 107T533 kodlu proje
ve Erciyes Üniversitesi FBA-06-01 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Temmuz 2010
KAYSERİ**

Prof. Dr. Mustafa KESKİN danışmanlığında **Yasin POLAT** tarafından hazırlanan “**Kinetik Karma Spin (1/2, 1) ve Spin (3/2, 2) Ferrimanyetik Sistemlerinde Meydana Gelen Dinamik Faz Geçişleri ve Dinamik Faz Diyagramları**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

20. 07. 2010

JÜRİ:

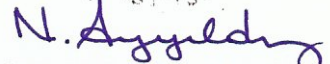
Başkan: Prof. Dr. Mustafa Keskin

Üye : Doç. Dr. Mustafa Gençaslan

Üye : Doç. Dr. Kazım Keşlioğlu

**ONAY:**

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 27/07/2010 tarih ve 2010/25-03 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

27.07/2010

Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamın tamamlanmasında emek ve yardımlarını esirgemeyen ve çalıőmalarım süresince değerli fikir ve tecrübeleri ile bana büyük destek sağlayan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mustafa KESKİN'e içtenlikle teşekkür ederim.

Çalıőmalarım sırasında birçok konuda yardımlarını gördüğüm Doç. Dr. Osman CANKO'ya ve çalışma arkadaşlarıma, Ersin KANTAR, Mehmet ERTAŞ, Mehmet BATI ve Bayram DEVİREN' e teşekkür ederim.

Tez alıőması esnasında 107T533 kodlu proje ile TÜBİTAK'a ve FBA-06-01 kodlu proje ile Erciyes Üniversitesi Araőtırma Fonuna sağladıkları destekten dolayı teşekkür ederim.

Çalıőmalarım süresince, bana maddi ve manevi yönden desteklerini hiç eksik etmeyen canım anneme, babama ve ablama en içten dileklerle teőekkürlerimi sunarım.

**KİNETİK KARMA SPİN (1/2, 1) VE SPİN (3/2, 2) FERRİMANYETİK
SİSTEMLERİNDE MEYDANA GELEN DİNAMİK FAZ GEÇİŞLERİ VE
DİNAMİK FAZ DİYAGRAMLARI**

Yasin POLAT

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2010

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa KESKİN

ÖZET

Zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında, kristal alan etkileşme parametrelili (D) karma spin (1/2, 1) ve spin (3/2, 2) Ising sistemlerinin dengesiz davranışları, Glauber-tipi stokastik dinamik kullanılarak incelendi. Glauber geçiş oranları kullanılarak her iki sistem için, ortalama-alan dinamik denklemleri elde edildi. Sistemlerdeki fazları elde etmek için ortalama düzen parametrelerinin zamanla değişimi incelendi. Ayrıca, dinamik faz geçiş sıcaklıklarını elde etmek ve dinamik faz geçişlerinin doğasını (birinci-ve ikinci-derece faz geçişi) karakterize etmek için, dinamik düzen parametrelerinin davranışı indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelendi. Dinamik faz diyagramları iki farklı düzlemde sunuldu. Karma spin (1/2, 1) sistemi için elde edilen dinamik faz diyagramları etkileşme parametrelerine bağlı olarak paramanyetik (p), ferrimagnetik (i) temel fazlarını ve i + p karma fazını içermektedir. Sistem ayrıca üçlü kritik nokta ve reentrant davranış da göstermektedir. Karma spin (3/2, 2) sistemi için elde edilen dinamik faz diyagramları etkileşme parametrelerine bağlı olarak paramanyetik (p) ve ferrimagnetik (i_1, i_2, i_3) temel fazlarını ve üç adet $i_1 + p, i_2 + p$ ve $i_3 + p$ karma fazlarını içermektedir. Bu faz diyagramlarının, indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresine kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu bulundu.

Anahtar Kelimeler: Karma spin (1/2, 1) Ising sistemi; Karma spin (3/2, 2) Ising sistemi; Glauber-tipi stokastik dinamik; Dinamik faz geçişleri; Dinamik faz diyagramları.

**DYNAMIC PHASE TRANSITIONS AND DYNAMIC PHASE DIAGRAMS IN
THE KINETIC MIXED SPIN (1/2, 1) AND SPIN (3/2, 2) FERRIMAGNETIC
SYSTEMS**

Yasin POLAT

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M. Sc. Thesis, July 2010

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Mustafa KESKIN

ABSTRACT

The nonequilibrium aspects of the mixed Ising systems with spins (1/2, 1) and spins (3/2, 2) with a crystal-field interaction (D) under the presence of a time-dependent oscillating external magnetic field are investigated by using the Glauber-type stochastic dynamic. The mean-field dynamic equations are obtained for both systems by employing the Glauber transition rates. The time variations of average order parameters are investigated to find the phases in the systems. The thermal behaviors of the dynamic order parameters as a function of the reduced temperature are also studied to obtain the dynamic phase transition temperatures and to characterize the nature (first- and second-order phase transition) of the dynamic phase transitions. The dynamic phase diagrams are presented in two different planes. The dynamic phase diagrams of the mixed spin (1/2, 1) system contain paramagnetic (p) and ferrimagnetic (i) fundamental phases and i + p mixed phase, depending on interaction parameters. The system also displays a tricritical and reentrant behavior. The dynamic phase diagrams of the mixed spin (3/2, 2) system contain paramagnetic (p) and ferrimagnetic (i_1, i_2, i_3) fundamental phases and three $i_1 + p$, $i_2 + p$ and $i_3 + p$ mixed phases, depending on the interaction parameters. It is found that dynamic phase diagrams strongly depend on the reduced crystal-field interaction parameter.

Keywords: Mixed spin (1/2, 1) Ising system; Mixed spin (3/2, 2) Ising system; Glauber-type stochastic dynamics; Dynamic phase transitions; Dynamic phase diagrams.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
2. BÖLÜM	
KARMA SPİN (1/2, 1) ISING SİSTEMİ.....	6
2.1 Modelin Tanıtımı.....	6
2.2 Glauber Dinamiği ve Ortalama-Alan Dinamik Denklemlerinin Elde Edilmesi.....	7
2.3. Dinamik Düzen Parametreleri ve Dinamik Faz Geçiş Noktaları.....	13
2.4 Dinamik Faz Diyagramları.....	19
2.5 (h - T) Düzleminde Dinamik Faz Diyagramları.....	19
2.6 (d- T) Düzleminde Dinamik Faz Diyagramları.....	23
3. BÖLÜM	
KARMA SPİN (3/2, 2) ISING SİSTEMİ	26
3.1 Modelin Tanıtımı.....	26
3.2 Ortalama-Alan Dinamik Denklemlerinin Elde Edilmesi.....	27
3.3 Dinamik Düzen Parametreleri ve Dinamik Faz Geçiş Noktaları.....	36
3.4 Dinamik Faz Diyagramları.....	43
3.5 (h - T) Düzleminde Dinamik Faz Diyagramları.....	43
3.6 (d- T) Düzleminde Dinamik Faz Diyagramları.....	47
4. BÖLÜM	
SONUÇ VE TARTIŞMA.....	53
KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	65

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 2.1. Karma spin $(1/2, 1)$ Ising sisteminde ortalama altörgü mıknaatıslanmalarının zamanla değişimi. **a)** Sistemde sadece paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($d = 0.25, h = 0.75$ ve $T = 0.5$). **b)** Sistemde sadece ferrimanyetik (i) faz mevcuttur, ($d = 0.25, h = 0.25, T = 0.25$). **c)** Sistemde hem ferrimanyetik (i) faz hem de paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($h = 0.25, d = 0.5, T = 0.1$). 15
- Şekil 2.2. Karma spin $(1/2, 1)$ Ising sisteminde dinamik mıknaatıslanmaların, M_A ve M_B , indirgenmiş sıcaklığa bağlı olarak davranışları. **a)** $d = 0.25$ ve $h = 0.075$ değerleri için sistemde ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir, ($T_C = 0.44$). **b)** Şekil 2.2 (a) ile aynı fakat $d = -0.375$ ve $h = 0.075$ değerleri için $T_C = 0.3025$. **c)** $d = -0.375$ ve $h = 0.075$ değerleri için sistemde bir biri ardına iki faz geçişi meydana gelmektedir: Birincisi, p fazından i fazına birinci-derece faz geçişi ($T_i = 0.0875$), ikincisi i fazından p fazına ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir, ($T_C = 0.3025$). 18
- Şekil 2.3. Karma spin $(1/2, 1)$ Ising sistemi için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramları. **a)** $d = 0.25$ için, **b)** $d = -0.375$ için, **c)** $d = -0.5$ için, **d)** $d = -0.55$ için, **e)** $d = -0.625$ için ve **f)** $d = -0.75$ için. Dinamik l kritik nokta içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. Kesikli ve sürekli çizgiler sırasıyla birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileridir. 22
- Şekil 2.4. Karma spin $(1/2, 1)$ Ising sistemi için (d, T) düzleminde dinamik faz diyagramları. Dinamik l kritik nokta içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. Kesikli ve sürekli çizgiler sırasıyla birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileridir. **a)** $h = 0.025$ için, **b)** $h = 0.5375$ için, **c)** $h = 0.5875$ için, **d)** $h = 0.625$ için, **e)** $h = 0.6875$ için ve **f)** $h = 0.75$ için. 25
- Şekil 3.1. Karma spin $(3/2, 2)$ Ising sisteminde ortalama altörgü mıknaatıslanmalarının zamanla değişimi **a)** Sistemde paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($d = 0.25, h = 1.25$ ve $T = 2.0$). **b)** Sistemde ferrimanyetik- 1 (i_1) faz mevcuttur, ($d = 0.25, h = 0.5, T = 1.0$). **c)** Sistemde ferrimanyetik- 2 (i_2) faz mevcuttur, ($d = -0.5, h = 0.375, T = 0.25$). **d)** Sistemde ferrimanyetik- 3 (i_3) faz mevcuttur, ($d = -0.625, h = 0.375, T = 0.375$). **e)** Sistemde ferrimanyetik- 1 (i_1) faz

ve paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($h = 1.25$, $d = 0.25$, $T = 0.625$). **f)** Sistemde ferrimanyetik- 2 (i_2) faz ve paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($h = 0.875$, $d = -0.5$, $T = 0.0375$). **g)** Sistemde ferrimanyetik- 3 (i_3) faz ve paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($h = 0.25$, $d = -1.0$, $T = 0.05$).

39

Şekil 3.2. Karma spin (3/2, 2) Ising sisteminde dinamik mıknatıslanmaların, M_A ve M_B , indirgenmiş sıcaklığa bağlı olarak davranışları. **a)** $d = 0.25$ ve $h = 0.5$ değerleri için sistemde ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir, ($T_C = 1.94$). **b)** $d = -1.0$ ve $h = 0.125$ değerleri için sistemde birinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir, ($T_t = 0.0975$). **c)** Şekil 3.2 (a) ile aynı fakat $d = -0.4375$ ve $h = 0.075$ değerleri için $T_C = 1.26$. **d)** $d = -0.4375$ ve $h = 0.075$ değerleri için sistemde bir biri ardına iki faz geçişi meydana gelmektedir: Birincisi, p fazından i fazına birinci-derece faz geçişi ($T_t = 0.085$), ikincisi i fazından p fazına ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir, ($T_C = 1.26$).

42

Şekil 3.3. Karma spin (3/2, 2) Ising sistemi için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramları. **a)** $d = 0.25$ için, **b)** $d = -0.25$ için, **c)** $d = -0.375$ için, **d)** $d = -0.4375$ için, **e)** $d = -0.5$ için, **f)** $d = -0.625$ için, **g)** $d = -0.6875$ için ve **h)** $d = -1.0$ için. Dinamik üçlü kritik nokta içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. Kesikli ve sürekli çizgiler sırasıyla birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileridir.

46

Şekil 3.4. Karma spin (3/2, 2) Ising sistemi için (d , T) düzleminde dinamik faz diyagramları. Kesikli ve sürekli çizgiler sırasıyla birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileridir. **a)** $h = 0.625$ için, **b)** $h = 0.75$ için ve **c)** $h = 0.875$ için.

50

Şekil 3.5. Şekil 3.4 ile aynı fakat sistem bir adet dinamik üçlü kritik nokta içerir ve bu nokta içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. **a)** $h = 0.25$ için, **b)** $h = 0.5$ için, **c)** $h = 1.0$ için, **d)** $h = 1.125$ için ve **e)** $h = 1.375$ için.

51

Şekil 3.6. Şekil 3.4 ile aynı fakat sistem iki adet dinamik üçlü kritik nokta içerir ve bu noktalar içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. $h = 1.25$ için.

52

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Son yıllarda karma spin sistemleri istatistik fizikte ve yoğun madde fiziğinde aktif olarak en çok çalışılan konuların başında gelmektedir. Nedeni ise: (i) Bu çalışmaların, termomanyetik kayıt sistemleri gibi önemli teknolojik uygulama alanları ile ilgili olması [1], (ii) Bu sistemlerin, tek spinli sistemlere göre daha az simetriye sahip olmaları, (iii) Bu sistemlerin, moleküler tabanlı manyetik malzemelerin anlaşılabilmesine model oluşturmalarıdır [2]. Karma spin sistemlerinin denge özellikleri, dengeli istatistik fizikte geliştirilen ve iyi bilinen kapalı form yaklaşımları (ortalama-alan (OA)), Bragg-Williams (BW), Bethe-Peierls (BP), kümesel değişim yaklaşımları, seriye açılım, transfer matris (TM), etkin alan teorisi (EAT), Monte Carlo (MC) hesaplamaları, renormalizasyon grup (RG) teknikleri v.b., yöntemlerle kapsamlıca incelenmiştir. Karma spin modelinin denge özelliklerinin anlaşılması için yeterli sayıda çalışma yapılmasına rağmen, dengesiz özellikleri için yeterli sayıda çalışma yapılmamıştır.

Karma (yarım tamsayı- yarım tamsayı) spin $(1/2, 3/2)$; spin $(1/2, 5/2)$; spin $(3/2, 5/2)$ Ising sistemleri; karma (yarım tamsayı- tamsayı) spin $(1/2, 1)$; spin $(1, 3/2)$; spin $(1, 5/2)$; spin $(3/2, 2)$ Ising sistemleri ve karma (tamsayı- tamsayı) spin $(1, 2)$ Ising sistemi önemli karma spin sistemlerindedir. Bu karma spin sistemlerinden, karma spin $(1/2, 1)$ ve spin $(1, 3/2)$ Ising sistemleri en fazla çalışılan sistemlerdir. Karma spin $(1/2, 1)$ Ising sistemi, üzerinde ilk çalışma yapılan bir sistem olup, aynı zamanda şimdiye kadar en kapsamlı incelenen sistemdir. Şimdiye kadar karma spin $(1/2, 1)$ Ising sisteminin dengeli ve dengesiz özellikleri incelenmiştir. Karma spin $(1/2, 1)$ Ising sisteminin dengeli davranışı, renormalizasyon grup (RG) teknikleri, yüksek sıcaklık seri

açılımı, serbest fermiyon yaklaşımı, etkin alan teorisi (EAT), ortalama-alan yaklaşımı (OAY), sonlu kümesel yaklaşımı, Monte-Carlo (MC) hesaplamaları ve transfer matris (TM) gibi istatistik fizikte iyi bilinen yöntemlerle incelenmiştir [3-11]. Sistemin kesin çözümü, bal peteği örgüsü [12,13], Bethe örgüsü [14-16], iki katlı Cayley ağacı [17] ve iki tabakalı Bethe örgüsünde [18-20] yapılmıştır.

Karma spin $(1/2, 1)$ sisteminin, dengeli davranışı kapsamlıca incelendiği gibi, dengesiz davranışları üzerine de dikkate değer çalışmalar yapılmıştır. Buendía ve Machado [21] zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında karma spin $(1/2, 1)$ Ising ferrimanyetik sistemini, dinamik ortalama-alan yaklaşımını kullanarak incelemiştir. Godoy ve Figueiredo, bilinear etkileşme Hamiltonyenli dengesiz spin $(1/2, 1)$ Ising sisteminin kararlı durumlarını, dinamik çift yaklaşık yöntemini [22], MC ve sonlu-boyut ölçüm methodunu [23], MC ve dinamik çift yaklaşım methodunu kullanarak incelediler [24] ve sistemin faz diyagramlarını elde ettiler. Godoy ve Figueiredo [25,26] kristal alan etkileşme parametresini içeren aynı modelin dinamiğini MC ve dinamik çift yaklaşık methodunu kullanarak incelediler. Godoy ve Figueiredo [22-26] yukarıda belirtilen çalışmalarının hiç birinde manyetik alan varlığını kullanmadılar. Ekiz ve Keskin [27], sistemin dinamiğini yol ihtimaliyet yöntemiyle inceleyerek, sistemde meydana gelen yarı kararlı ve kararsız durumların doğruluğunu manyetik alan varlığında ve yokluğunda, nokta dağılımlı çift yaklaşık yöntemini kullanarak kontrol etmişlerdir. Denge faz diyagramları yanı sıra yarı kararlı faz diyagramları da sunmuşlardır.

Karma spin $(3/2, 2)$ Ising sistemi ise, yine önemli karma sistemlerden birisidir. Bu sistemin dengeli davranışı üzerine iki tane dikkate değer çalışma yapılmıştır. Bobák ve Dely [28], karma spin $(3/2, 2)$ Ising sisteminin faz diyagramlarına tek-iyon anizotropisinin etkisini serbest enerji için Bogoliubov eşitsizliği temelinde ortalama-alan teorisini kullanarak incelemiştir. Albayrak [29], ise Bethe örgüsünde kesin tekrarlama bağıntılarını kullanarak bu karma spin sisteminin kritik ve telafi sıcaklıklarını elde etti. En iyi bilgilerimiz dâhilinde, karma spin $(3/2, 2)$ sisteminin dinamik davranışı, özellikle dinamik faz geçiş (DFG) sıcaklıklarının hesaplanması ve dinamik faz diyagramlarının elde edilmesi üzerine şu ana kadar çalışma yapılmamıştır.

Yukarıda belirtildiği gibi karma spin Ising sistemlerinin denge davranışları dengeli istatistik fizikte geliştirilen ve iyi bilinen yaklaşık yöntemlerle incelendiği halde, dengesiz davranışları üzerine son yıllarda çok az sayıda çalışma yapılmıştır. [21, 27, 30-32]. Dengesiz sistemlerdeki ilginç problemlerden birisi, dengesiz veya DFG sıcaklıklarının hesaplanması ve dinamik faz diyagramlarının elde edilmesidir. Dinamik faz geçişlerinin arkasındaki, yani sebep olan mekanizma kesin olarak keşfedilmediği gibi temel fenomenolojisi de halen çok az geliştirilebilmiştir ve bundan dolayı da üzerinde çok çalışılan ve çalışılması gerekli konulardan birisi olmuştur. Dinamik faz geçişleri ilk olarak Glauber-tipi stokastik dinamiği [33] kullanılarak, zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında kinetik spin-1/2 Ising modelinin kararlı durumları ortalama-alan yaklaşımı kullanılarak incelenmesi sonucu bulundu [34, 35]. Kinetik spin-1/2 Ising modelindeki dinamik faz geçişleri, dinamik ortalama-alan yaklaşık metoduyla [36, 37] ve dinamik Monte-Carlo hesaplamaları ile incelenmiştir [38-48]. Tutu ve Fujiwara [49] sistematik bir metod geliştirmişlerdir ve Landau tipi potansiyelleri olan sistemlerde DFG sıcaklıklarını ve dinamik faz diyagramlarını elde etmişlerdir. Tek boyutlu kinetik spin-1/2 Ising modelindeki dinamik faz geçişleri Glauber-metoduyla incelenmiştir [50]. Son yıllarda ise daha karmaşık sistemlerde, yani spin-1 [51, 52, 64, 68, 70], spin-3/2 [53- 56, 65, 66, 69] ve spin-2 [57, 67] Ising sistemleri için, DFG noktaları hesaplanması ve dinamik faz diyagramlarının elde edilmesi çalışmaları yapılmış ve yapılmaya da devam edilmektedir. DFG sıcaklıkları deneysel olarak ilk defa çok ince Co/Cu (001) ferromanyetik filmler [58, 59], ferroik (ferromanyetler, ferroelektrikler ve ferroelastikler) sistemlerde ve çok ince manyetik filmler de gözlenmiştir [60]. Bunlara ilaveten, dinamik faz geçişlerinin evrenin ilk oluşumunun açıklanmasında rol oynayabileceği de düşünülmektedir [61- 63].

Bu tez çalışmasında, karma spin (1/2, 1) ve spin (3/2, 2) Ising sistemlerinin dengesiz davranışları Glauber-tipi stokastik dinamik kullanılarak incelenecektir. Glauber geçiş oranları kullanılarak ortalama-alan dinamik denklemleri elde edilecektir. Sistemlerde mevcut olan fazları bulmak için ortalama düzen parametrelerinin zamana bağlı davranışları incelenecektir. Daha sonra, bir periyot içinde ortalama düzen parametrelerinin veya dinamik düzen parametrelerinin, indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak davranışları incelenerek DFG sıcaklıkları tespit edilecek ve dinamik faz geçişlerinin doğası (kesikli veya sürekli yani birinci- veya ikinci-derece faz

geçişleri) karakterize edilecektir. Daha sonra, sistemin dinamik faz diyagramları farklı düzlemlerde sunulacaktır. Bu noktayı belirtelim ki, bu yöntemle yukarıda belirtildiği gibi, karma spin $(1/2, 1)$ sistemi, ilk defa Buendía ve Machado [21] tarafından incelenmiştir. İndirgenmiş sıcaklık (T) ve indirgenmiş manyetik alan genliği (h) düzleminde iki farklı basit dinamik faz diyagramı elde edilmiştir. Tek-spinli sistemlerin dinamik faz diyagramları göz önüne alındıklarında, daha zengin ve çok daha değişik dinamik faz diyagramları elde edilmesi gerektiği kolayca anlaşılır. Dolayısıyla, bu çalışma eksik bir çalışmadır. Kaynak 21, dikkatli bir şekilde incelenirse, bu basit sistem için de daha zengin ve farklı dinamik faz diyagramları bulunması gerekli olduğu sonucuna varılır. Bu yüzden bu tez çalışmasında karma spin $(1/2, 1)$ Ising sisteminin çok daha kapsamlı bir şekilde incelemesi yapılacaktır. Karma spin $(3/2, 2)$ sisteminin, dinamik davranışı ise yukarıda belirttiğimiz gibi, en iyi bilgilerimiz dâhilinde şimdiye kadar yapılmamıştır. Dolayısıyla karma spin $(3/2, 2)$ sisteminin, dinamik davranışı Glauber-tipi stokastik dinamik kullanılarak kapsamlıca incelenecek ve yine bu sistemin dinamik faz diyagramları farklı düzlemlerde sunulacaktır.

Ayrıca, bu tezde ki amacımız yukarıda özetle belirtilen, ileri teknolojik uygulama potansiyellerine sahip malzemeleri incelemede ve akademik araştırmalar bakımından önemli ve aynı zamanda dinamik özellikleri incelenmemiş olan karma spin $(1/2, 1)$ ve $(3/2, 2)$ sistemlerinin dinamiğini kapsamlıca Glauber-tipi stokastik dinamikle incelemektir. Özellikle, DFG sıcaklıklarını hesaplayarak, indirgenmiş sıcaklık (T) ile indirgenmiş manyetik alan genliği (h) düzleminde, ayrıca indirgenmiş sıcaklık ile indirgenmiş etkileşim parametreleri düzleminde, yani (d, T) de, dinamik faz diyagramları elde etmektir. Böylece arkasındaki mekanizma kesin olarak bilinmeyen ve temel fenomenolojisi ise halen az geliştirilmiş olan ve hesaplanması çok daha karmaşık olan DFG noktalarını elde etmek gibi önemli bir konuya katkıda bulunmaktır. Aynı zamanda bu konuda yapılacak deneysel çalışmalara ışık tutmaktır. Bu tezin diğer iki önemli amacı: (1) Karma spin $(1/2, 1)$ ve $(3/2, 2)$ sistemlerinin veya benzer sistemlerin dinamiğini daha duyarlı sonuçlar veren dinamik Monte-Carlo hesaplamaları ve renormalizasyon grup teknikleri gibi yöntemlerle yapılacak araştırmalara temel oluşturmak. (2) Karmaşık sistemlerin dinamiğini mikroskobik teorilerle inceleyen veya mikroskobik teorisini geliştirmeye çalışan bilim adamlarının araştırmalarına temel oluşturmaktır.

Bu giriş bilgilerinden sonra, Bölüm 2’ de iki-altörgülü kinetik spin $(1/2, 1)$ Ising modelinin tanıtımı yapıldı ve master denklemden yola çıkılarak modelin dinamik davranışını açıklayan ortalama-alan dinamik denklemleri elde edildi. Önce sistemdeki fazları tespit etmek için ortalama-alan dinamik denklemleri Adams-Multon kestirme ve düzeltme yöntemi kullanılarak nümerik olarak çözüldü ve sistemdeki fazlar elde edildi. Sonra dinamik düzen parametrelerini veren denklemler tanımlandı ve bu denklemler Adams-Multon kestirme ve düzeltme yöntemi ve Romberg integrasyon metodları kullanılarak nümerik olarak çözüldü. Dinamik faz geçişlerinin doğası (sürekli ve süreksiz, yani birinci- ve ikinci-derece faz geçişleri) karakterize edildi ve dinamik faz geçiş noktaları tespit edildi. Daha sonra ise farklı indirgenmiş manyetik alan genliği (h) ve indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresi (d) için dinamik faz geçiş noktalarından faydalanılarak (T, h) ve (d, T) düzlemlerinde sistemin dinamik faz diyagramları sunuldu. Bölüm 3’ de ise karma spin $(1/2, 1)$ ’ de yapılan incelemeler ve hesaplamalar iki-altörgülü kinetik spin $(3/2, 2)$ Ising modeli içinde yapıldı. Son bölümde ise, yapılan çalışmalar özetlenerek elde edilen sonuçların tartışılması yapıldı.

2. BÖLÜM

KARMA SPİN (1/2, 1) ISING SİSTEMİ

2.1. Modelin Tanıtımı

Karma spin (1/2, 1) Ising modeli A ve B gibi iki alt örgülü Ising modelidir. Bu karma spin Ising modelinin üç tane düzen parametresi mevcuttur. Bunlar;

- 1) A alt örgüsü için ortalama mıknatıslanma (m_A); $m_A \equiv \langle \sigma_i^A \rangle$ olarak tanımlanır.
- 2) B alt örgüsü için ortalama mıknatıslanma (m_B); $m_B \equiv \langle S_j^B \rangle$ olarak tanımlanır.
- 3) B alt örgüsü için ortalama kuadrupol moment (q_B); $q_B \equiv \langle (S_j^B)^2 \rangle$ veya $q_B \equiv \langle 3(S_j^B)^2 - 2 \rangle$ olarak tanımlanır.

Burada, ortalama mıknatıslanma ifadesi bir tarafa yönelimin diğer tarafa yöneliminden fazlalığını gösterir ve dipol moment olarak da adlandırılır. Diğer taraftan ortalama kuadrupol moment ifadesi ise, ortalama mıknatıslanmanın karesi veya karesinin lineer bir fonksiyonudur. Ortalama kuadrupol momentin ikinci tanımı, sıcaklık sonsuza gittiğinde $q = 0$ olmasını sağlar ve biz hesaplamalarımızda bu tanımı kullanacağız.

Karma spin (1/2, 1) Ising modelinde A alt örgüsü, $\sigma_i^A = \pm 1/2$ ve B alt örgüsü, $S_j^B = \pm 1, 0$ spin değerlerine sahiptir. Bu karma spin Ising modelinin düzen parametreleri, iki farklı temel fazı tanımlar. Bunlar;

- i. Paramanyetik faz (p), $m_A = m_B = 0$
- ii. Ferrimanyetik faz (i), $m_A = 1/2$ ve $m_B = 1$

şeklindedir.

Karma spin (1/2, 1) sistemi için en genel Hamiltonyen ifadesi;

$$\mathcal{H} = -J \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i^A S_j^B - D \sum_j (3(S_j^B)^2 - 2) - H \left(\sum_i \sigma_i^A + \sum_j S_j^B \right), \quad (2.1)$$

şeklindedir. Burada, $\langle ij \rangle$, toplamın en yakın komşu çiftler üzerinden alınacağını gösterirken, J bilineer etkileşme sabiti ve D kristal-alan veya tek-iyon anizotropi etkileşme parametreleridir. H ise zamana bağlı salınımlı dış manyetik alandır ve

$$H(t) = H_0 \cos(wt), \quad (2.2)$$

şeklindedir. Burada H_0 ve w salınımlı dış manyetik alanın genliği ve açısal frekansdır ve $w = 2\pi\nu$ olarak tanımlanır.

2.2 Glauber Dinamiği ve Ortalama-Alan Dinamik Denklemlerinin Elde Edilmesi

Karma spin (1/2, 1) Ising sisteminin dinamik davranışını veren ortalama-alan dinamik denklemleri, Glauber dinamiği kullanılarak elde edilecektir. Glauber-tipi stokastik sürece göre [33], bir durumdan diğer duruma geçiş birim zamanda $1/\tau$ oranında değişmektedir. Herhangi bir i . spinin σ_i durumundan σ_i' durumuna birim zamandaki geçiş olasılığı ya da olasılık yoğunluğu, $W_i(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N)$ olarak ifade edilir. Böylece, sistemin herhangi bir t zamanında $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$ spin konfigürasyonuna sahip olduğu andaki ihtimaliyet fonksiyonu $P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t)$ ile tanımlanır. Bu ihtimaliyet fonksiyonunun zamanla değişimi, spinler ve ısı banyosu arasındaki etkileşmeyi tanımlayan master denklemi ile verilir. Sistemde, B altörgüsündeki spinlerin bir an için sabit kaldığı düşünülürse, A altörgüsü için master denklemi,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t) = & - \left(\sum_i W_i^A(\sigma_i) \right) P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_N; t) \\ & + \sum_i W_i^A(-\sigma_i) P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, -\sigma_i, \dots, \sigma_N; t), \end{aligned} \quad (2.3)$$

şeklinde yazılır. Burada $W_i^A(\sigma_i)$, i 'inci σ spinin σ_i durumundan $-\sigma_i$ durumuna birim zamanda geçme olasılığıdır. Denge durumunda,

$$\frac{d}{dt} P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t) = 0, \quad (2.4)$$

ve master denkleminde olasılık yoğunlukları oranı,

$$\frac{W_i^A(-\sigma_i)}{W_i^A(\sigma_i)} = \frac{P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, -\sigma_i, \dots, \sigma_N)}{P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_N)}, \quad (2.5)$$

olduğu kolayca görülebilir. Buradan

$$P^A(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_N) \propto \exp(-\beta \mathcal{H}), \quad (2.6)$$

ile tanımlanan genel kanonik dağılım ifadesinden, birim zamandaki geçiş olasılığı,

$$W_i^A(\sigma_i) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta \Delta E^A(\sigma_i))}{\sum_{\sigma_i} \exp(-\beta \Delta E^A(\sigma_i))} \quad (2.7)$$

şeklinde verilir. Burada $\beta = 1/k_B T$, k_B Boltzmann faktörü, \sum_{σ_i} ise toplamın $\sigma_i = \pm 1/2$,

üzerinden alınacağını göstermektedir. Eşitlik (2.1) ile verilen Hamiltonyen ifadesinden yararlanılarak,

$$\Delta E^A(\sigma_i) = 2\sigma_i (H + J \sum_j S_j) \quad (2.8)$$

şeklinde bulunur. Bulunan bu enerji değişimi ifadeleri (2.7) denkleminde yerine yazılırsa $W_i^A(\sigma_i)$ olasılık yoğunlukları;

$$W_i^A\left(-\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2\tau} \frac{\exp(-\beta x/2)}{\cosh(\beta x/2)}, \quad (2.9a)$$

$$W_i^A\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2\tau} \frac{\exp(\beta x/2)}{\cosh(\beta x/2)}, \quad (2.9b)$$

şeklinde elde edilir. Burada $x = J \sum_j S_j + H$ ile tanımlanır.

Master denkleminden yararlanılarak, A altörgüsü için genel ortalama-alan dinamik denklemi şu şekilde elde edilir:

$$\tau \frac{d}{dt} \langle \sigma_k \rangle = -\langle \sigma_k \rangle + \frac{1}{2} \tanh \left[\frac{\beta}{2} (x) \right]. \quad (2.10)$$

Ortalama-alan yaklaşımı kullanılarak (2.10) denklemi,

$$\tau \frac{d}{dt} \langle \sigma_i \rangle_A = -\langle \sigma_i \rangle_A + \frac{1}{2} \tanh \left[\frac{\beta}{2} (x_1) \right] \quad (2.11)$$

olarak yazılabilir. Burada $x_1 = Jz \langle S_j \rangle_B + H_0 \cos(\omega t)$. Elde edilen bu ortalama-alan dinamik denklemi,

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_A = -m_A + \frac{1}{2} \tanh \left[\frac{1}{2T} (m_B + h \cos(\xi)) \right] \quad (2.12)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada $m_A \equiv \langle \sigma_i \rangle_A$, $m_B \equiv \langle S_j \rangle_B$, $\xi = \omega t$, $T = (\beta Jz)^{-1}$, $H = H_0 \cos(\omega t)$, $h = H_0/Jz$ ve $\Omega = \tau \omega$ olarak tanımlanmıştır. T, h ve Ω boyutsuz parametrelerdir. Sistemimizde $\Omega = 2\pi$ ve $z = 4$ değerinde sabit olarak ele alınacaktır.

Bundan önceki hesaplamalara benzer olarak, A altörgüsündeki spinlerin bir an için sabit kaldığı düşünülerek, B altörgüsü için ortalama-alan dinamik denklemleri elde edilir. B alt örgüsü için master denklemi;

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P^B(S_1, S_2, \dots, S_N; t) = & - \sum_j \left(\sum_{S_j \neq S'_j} W_j^B(S_j \rightarrow S'_j) \right) P^B(S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_N; t) \\ & + \sum_j \left(\sum_{S_j \neq S'_j} W_j^B(S'_j \rightarrow S_j) P^B(S_1, S_2, \dots, S'_j, \dots, S_N; t) \right), \end{aligned} \quad (2.13)$$

şeklinde yazılır. Burada $W_j^B(S_j \rightarrow S'_j)$ ve $W_j^B(S'_j \rightarrow S_j)$ olasılık yoğunlukları veya geçiş yoğunlukları olarak tanımlanır. Genel kanonik dağılım ifadesinden;

$$P^B(S_1, S_2, \dots, S'_j, \dots, S_N) \propto \exp(-\beta \mathcal{H}), \quad (2.14)$$

yazılır. Burada $P^B(S_1, S_2, \dots, S'_j, \dots, S_N)$ sistem dengede iken $(S_1, S_2, \dots, S'_j, \dots, S_N)$ konfigürasyonunda spinlerin bulunma ihtimaliyetini gösterir. Sistem dengede iken, master denklemi ve kanonik dağılımın genel tanımı yardımıyla her bir spinin S_j durumundan S'_j durumuna birim zamanda geçiş olasılığı $W_j^B(S_j \rightarrow S'_j)$;

$$W_j^B(S_j \rightarrow S'_j) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta \Delta E^B(S_j \rightarrow S'_j))}{\sum_{S_j} \exp(-\beta \Delta E^B(S_j \rightarrow S'_j))}, \quad (2.15)$$

ile verilir. Burada $\beta = 1/k_B T$ 'dır ve k_B Boltzmann faktörüdür. Daha sonra Hamiltonyen ifadesinin kullanılması ile $\Delta E^B(S_j \rightarrow S'_j)$ değeri bulunur.

$$\Delta E^B(S_j \rightarrow S'_j) = -(S'_j - S_j) \left(J \sum_i \sigma_i + H \right) - \left[(S'_j)^2 - (S_j)^2 \right] D \quad (2.16)$$

$\Delta E^B(S_j \rightarrow S'_j)$ spinler arası geçişte sistemin enerjisindeki değişimdir. Burada $y = (J \sum_i \sigma_i + H)$ ile tanımlanırsa,

$$\Delta E^B(S_j \rightarrow S'_j) = -(S'_j - S_j)y - ((S'_j)^2 - (S_j)^2)D \quad (2.17)$$

olur. Şimdi S_j durumundan S'_j durumuna mümkün olan tüm enerji değişimlerini hesaplayabiliriz. Bulunan bu enerji değişimi ifadeleri (2.15) denkleminde yerine yazılarak tüm geçişler için olasılık yoğunluklarını şu şekilde hesaplayabiliriz,

$$W_j^B(1 \rightarrow 0) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta(y+D))}{1 + \exp(-\beta(y+D)) + \exp(-2\beta y)}, \quad (2.18a)$$

$$W_j^B(1 \rightarrow -1) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-2\beta y)}{1 + \exp(-\beta(y+D)) + \exp(-2\beta y)}, \quad (2.18b)$$

$$W_j^B(0 \rightarrow 1) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(y+D))}{1 + \exp(\beta(y+D)) + \exp(\beta(-y+D))}, \quad (2.18c)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(0 \rightarrow -1) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(-y+D))}{1 + \exp(\beta(y+D)) + \exp(\beta(-y+D))} \\ &= \frac{\exp(-2\beta y)}{1 + \exp(-\beta(y+D)) + \exp(-2\beta y)}, \end{aligned} \quad (2.18d)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(-1 \rightarrow 0) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(y-D))}{1 + \exp(\beta(y-D)) + \exp(2\beta y)} \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta(y+D))}{1 + \exp(-\beta(y+D)) + \exp(-2\beta y)}, \end{aligned} \quad (2.18e)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(-1 \rightarrow 1) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(2\beta y)}{1 + \exp(\beta(y-D)) + \exp(2\beta y)} \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(y+D))}{1 + \exp(\beta(y+D)) + \exp(\beta(-y+D))}, \end{aligned} \quad (2.18f)$$

$W_j^B(S_j \rightarrow S'_j)$ ifadesine baktığımızda olasılık yoğunluklarının S_j 'ye bağlı olmadığını görürüz. Bu bize $W_j^B(S_j \rightarrow S'_j) = W_j^B(S'_j)$ şeklinde yazabilmemizi sağlar. Böylece olasılık yoğunlukları,

$$W_j^B(0 \rightarrow 1) = W_j^B(-1 \rightarrow 1) = W_j^B(1) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta y)}{2 \cosh(\beta y) + \exp(-\beta D)}, \quad (2.19a)$$

$$W_j^B(1 \rightarrow 0) = W_j^B(-1 \rightarrow 0) = W_j^B(0) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta D)}{2 \cosh(\beta y) + \exp(-\beta D)}, \quad (2.19b)$$

$$W_j^B(1 \rightarrow -1) = W_j^B(0 \rightarrow -1) = W_j^B(-1) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta y)}{2 \cosh(\beta y) + \exp(-\beta D)}, \quad (2.19c)$$

şeklinde yazılabilir.

$W_j^B(S_j \rightarrow S'_j) = W_j^B(S'_j)$ olduğundan denklem 2.13 ile verilen master eşitliği,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P^B(S_1, S_2, \dots, S_N; t) = & - \sum_j \left(\sum_{S_j \neq S'_j} W_j^B(S'_j) \right) P^B(S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_N; t) \\ & + \sum_j W_j^B(S_j) \left(\sum_{S_j \neq S'_j} P^B(S_1, S_2, \dots, S'_j, \dots, S_N; t) \right), \end{aligned} \quad (2.20)$$

şekline dönüşür. Master denkleminde yararlanılarak, B altörgüsü için genel ortalama-alan dinamik denklemi şu şekilde elde edilir,

$$\tau \frac{d}{dt} \langle S_k \rangle = - \langle S_k \rangle + \frac{2 \sinh(\beta y)}{\exp(-\beta D) + 2 \cosh(\beta y)}. \quad (2.21)$$

Burada, $y = J \sum_i \sigma_i + H$. Ortalama-alan yaklaşımı kullanılarak (2.21) denklemi,

$$\tau \frac{d}{dt} \langle S_j \rangle_B = - \langle S_j \rangle_B + \frac{2 \sinh(\beta y_1)}{\exp(-\beta D) + 2 \cosh(\beta y_1)}, \quad (2.22)$$

olarak bulunur. Burada $y_1 = Jz \langle \sigma_i \rangle_A + H_0 \cos(\omega t)$. Elde edilen bu ortalama-alan dinamik denklemi,

$$\Omega \frac{dm_B}{d\xi} = -m_B + \frac{2 \sinh[(m_A + h \cos \xi) / T]}{2 \cosh[(m_A + h \cos \xi) / T] + \exp(-\beta d)}, \quad (2.23)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada $d = D/Jz$, olarak tanımlanmıştır ve boyutsuz parametredir.

2.3 Dinamik Düzen Parametreleri ve Dinamik Faz Geçiş Noktaları

Bu kesimde, öncelikle sistemde var olan fazları bulmak için (2.12) ve (2.23) ile verilen ortalama-alan dinamik denklemleri Adams-Moulton kestirme ve düzeltme yönteminin kullanılması ile nümerik olarak çözümlenerek ortalama düzen parametrelerinin zamana bağlı davranışları incelenecektir. Daha sonra, Adams-Moulton kestirme düzeltme ve Romberg integrasyon yöntemleri kullanılarak, bir periyot içinde ortalama düzen parametrelerinin veya dinamik düzen parametrelerinin davranışları indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelenecek. Bu inceleme sonucunda, dinamik faz geçiş sıcaklıkları tespit edilecek ve dinamik faz geçişlerinin doğası (süreksiz veya sürekli yani birinci- veya ikinci-derece faz geçişleri) karakterize edilecek.

Şimdi ilk olarak (2.12) ve (2.23) denklemlerinin çözümünü yapıp, sistemdeki mevcut fazları bulalım. Denklem (2.12) ve (2.23)'ün kararlı çözümleri 2π periyodu için ξ 'nin periyodik bir fonksiyonu olacaktır.

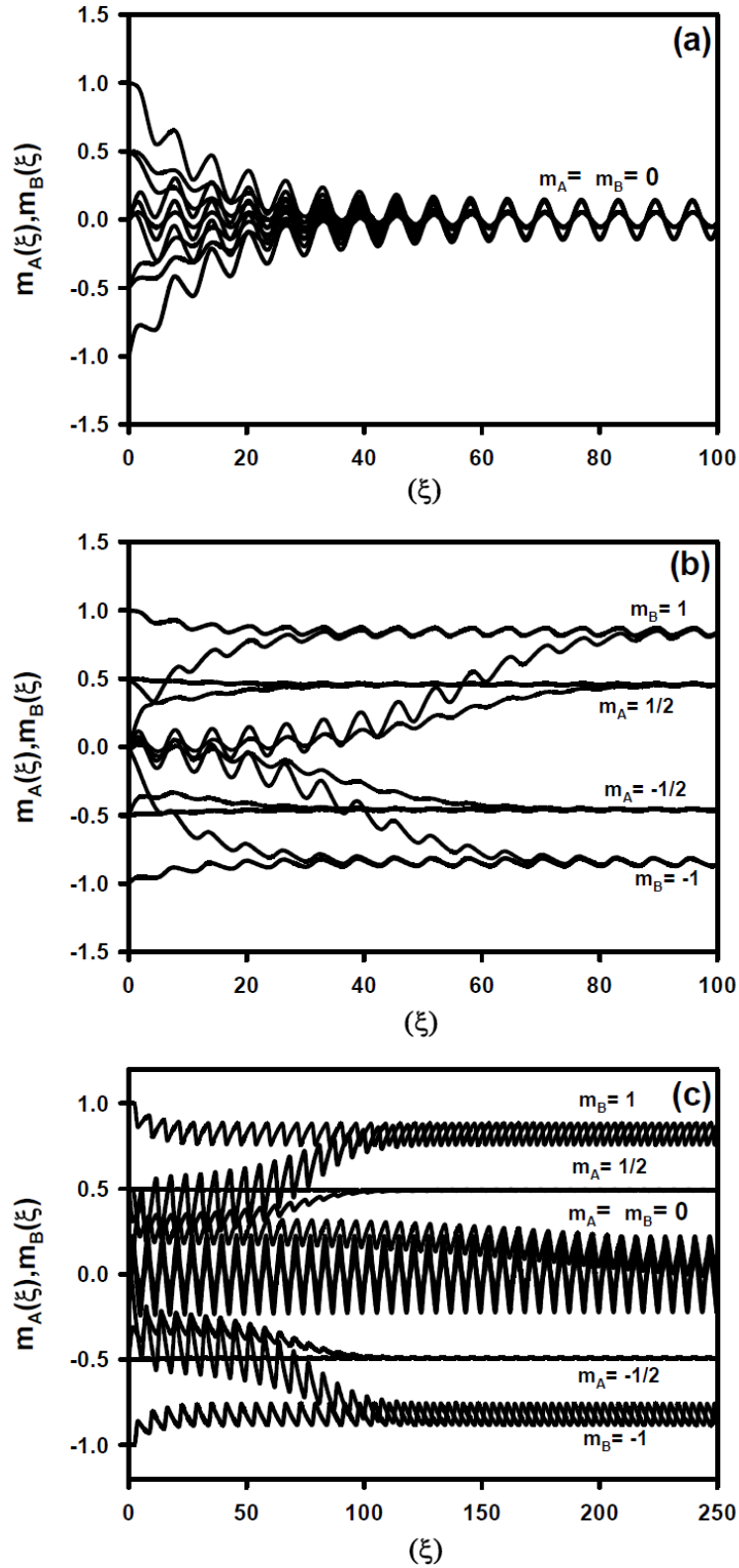
$$m_A(\xi + 2\pi) = m_A(\xi) \text{ ve } m_B(\xi + 2\pi) = m_B(\xi), \quad (2.24)$$

Böylece, çözümler sahip oldukları ya da olmadıkları özelliklerine göre iki tip çözümden biri olabilir.

$$m_A(\xi + \pi) = -m_A(\xi) \text{ ve } m_B(\xi + \pi) = -m_B(\xi). \quad (2.25)$$

Denklem (2.25)'in birinci tip çözümü, simetrik çözüm olarak adlandırılır ve bu paramanyetik (p) faza karşılık gelir. Bu çözümde, altörgü miknatislanmaları m_A ve m_B birbirine eşittir ($m_A = m_B$) ve sıfır değeri civarında salınarak, dış manyetik alana uyum gösterirler. İkinci tip çözüm denklem (2.25)'e uymaz ve simetrik olmayan çözüm olarak

adlandırılır ve bu çözüm ferrimanyetik (i) çözüme karşılık gelir. Bunun nedeni ise m_A ve m_B birbirine eşit değildir ($m_A \neq m_B$) ve sıfırdan farklı bir değer civarında yani m_A ve m_B sırasıyla $\pm 1/2$ ve ± 1 civarında salınırlar. Bu gerçekler açık bir şekilde Bölüm 2.2'de elde edilen, (2.12) ve (2.23) ile verilen ortalama-alan dinamik denklemlerinin nümerik olarak çözülmesiyle görülebilir. Bu dinamik denklemler, verilen parametreler ve başlangıç değerleri için Adams-Moulton kestirme ve düzeltme yöntemi kullanılarak çözüldü ve çözümler Şekil 2.1'de gösterildi. Şekil 2.1'de üç farklı çözüm görülmektedir. Sistemde, p ve i temel fazlarının ya da çözümlerinin yanı sıra bir tane karma faz mevcuttur. Karma faz, i ve p fazlarının bir arada bulunduğu $i + p$ karma fazıdır. Şekil 2.1 (a)'da yalnızca simetrik çözüm elde edilmiştir ve bundan dolayı sistemde sadece paramanyetik (p) faz mevcuttur. Çünkü m_A ve m_B birbirine eşit ve sıfır değeri etrafında salınmaktadırlar. Şekil 2.1 (b)'de yalnızca simetrik olmayan çözüm elde edilmiştir. Burada $m_A = \pm 1/2$ ve $m_B = \pm 1$ değerleri etrafında salınmaktadır ve bu ferrimanyetik (i) faza karşılık gelmektedir. Şekil 2.1 (c)'de görüldüğü gibi m_A ve m_B başlangıç değerlerine göre ya birbirine eşit ve sıfır değeri etrafında ya da birbirinden ve sıfırdan farklı bir değer etrafında salınmaktadır. m_A ve m_B 'nin birbirine eşit ve sıfır değeri etrafında salındığı durum paramanyetik faza, m_A ve m_B 'nin birbirinden ve sıfırdan farklı bir değer etrafında salındığı durum ise ferrimanyetik faza karşılık gelmektedir. Buradan sistemde $i + p$ karma fazının olduğu kolayca görülmektedir.



Şekil 2.1. Karma spin (1/2, 1) Ising sisteminde ortalama altörgü mıknaıslanmalarının zamanla değişimi. **a)** Sistemde sadece paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($d=0.25$, $h=0.75$ ve $T=0.5$). **b)** Sistemde sadece ferrimanyetik (i) faz mevcuttur, ($d=0.25$, $h=0.25$, $T=0.25$). **c)** Sistemde hem ferrimanyetik (i) faz hem de paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($h=0.25$, $d=0.5$, $T=0.1$).

Böylece, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi sistemde üç farklı faz mevcuttur. Bu fazlar, sırasıyla p, i ve i + p fazlarıdır. Bu üç fazın arasındaki dinamik faz sınırlarını belirleyebilmemiz için, dinamik faz geçiş (DFG) sıcaklıklarını hesaplamalıyız ve dinamik faz geçişlerinin doğasını (sürekli veya sürekli yani birinci- veya ikinci-derece faz geçişleri) karakterize etmeliyiz. Daha sonra bu DFG sıcaklıkları kullanılarak sistemin dinamik faz diyagramlarını sunabiliriz. DFG sıcaklıkları, bir periyot başına ortalama düzen parametrelerinin ya da dinamik düzen parametrelerinin davranışının indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelenmesiyle elde edilecektir.

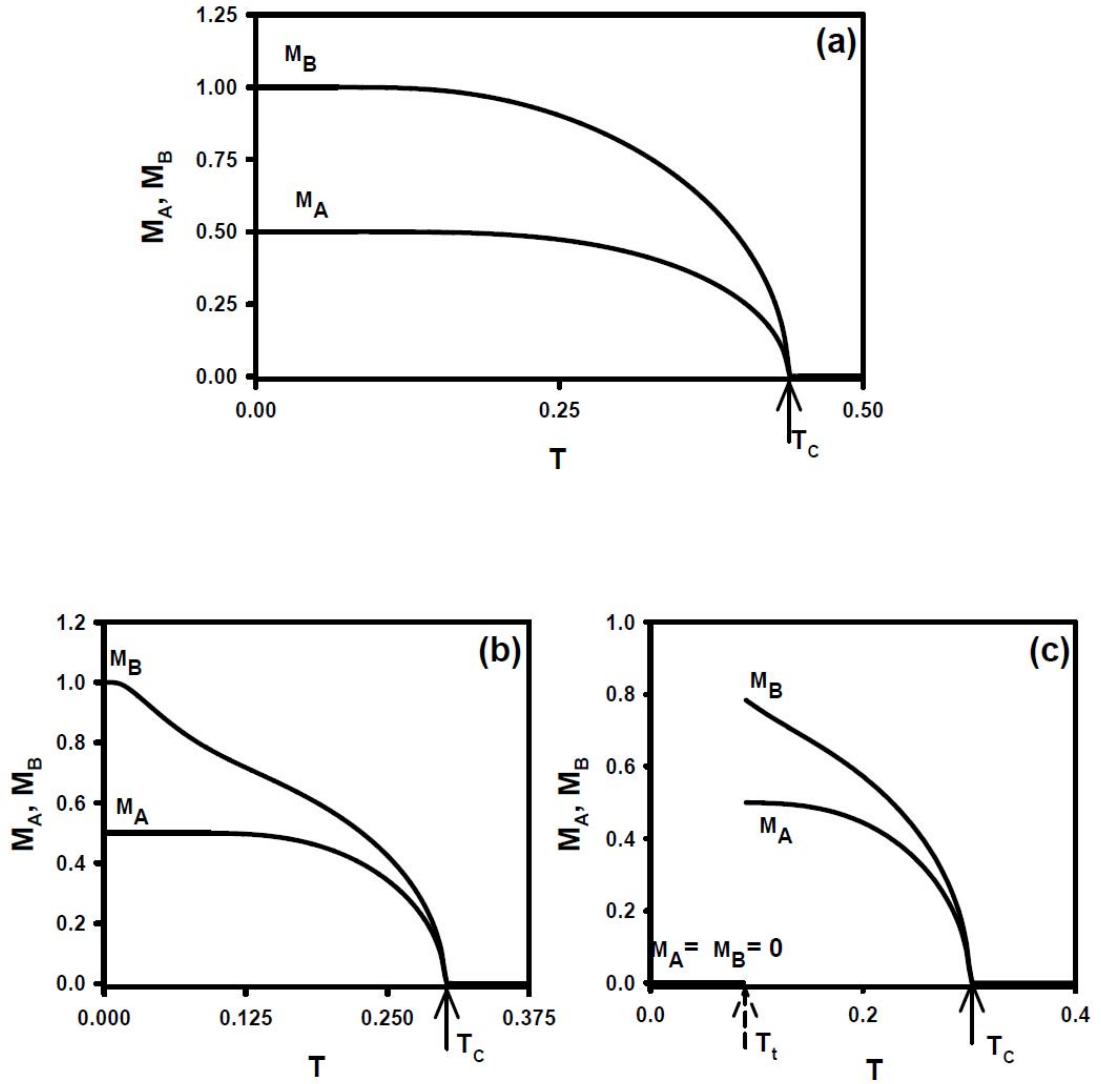
Dinamik düzen parametreleri veya dinamik altörgü mıknatıslanmaları (M_A , M_B)

$$M_A = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_A(\xi) d\xi, \quad M_B = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_B(\xi) d\xi, \quad (2.26)$$

şeklinde tanımlanır.

M_A ve M_B 'nin davranışı, indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak, h ve d 'nin birkaç değeri için Adams-Moulton kestirme ve düzeltme metodu ve Romberg integrasyon metodunun birleşimi kullanılarak incelendi ve üç faz arasındaki DFG noktalarının nasıl hesaplandığı ve dinamik faz sınırlarının nasıl elde edildiği gösterilmiş oldu. Bu incelemeler sonucu faz geçişlerinin karakteristikleri (birinci- veya ikinci-derece faz geçişleri) belirlendi ve DFG sıcaklıkları elde edildi. T_t ve T_C , sırasıyla M_A ve M_B için birinci- ve ikinci-derece faz geçiş sıcaklıklarını göstermektedir. Şekil 2.2. (a), $d = 0.25$ ve $h = 0.075$ değerleri için M_A ve M_B 'nin davranışlarını indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Bu şekilde, sıfır sıcaklıkta $M_A = 1/2$ ve $M_B = 1$ dir ve indirgenmiş sıcaklık artarken düzen parametreleri sürekli olarak azalarak, $T_C = 0.44$ değerinde sıfır olmaktadır ve böylece bu sıcaklıkta sistemde ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir. Bu durumda, dinamik faz geçişi i fazından p fazına olmaktadır ve çözüm M_A ve M_B 'nin başlangıç değerlerine bağlı değildir. Şekil 2.2 (b ve c), iki farklı başlangıç değeri için ve $d = 0.375$ ve $h = 0.075$ değerleri için, M_A ve M_B 'nin indirgenmiş sıcaklığa bağlı davranışlarını

göstermektedir. Şekil 2.2 (b) için başlangıç değerleri $M_A = 1/2$, $M_B = 1$ veya $M_A = 1/2$, $M_B = 0$ ve Şekil 2.2 (c) için başlangıç değeri $M_A = M_B = 0$ dir. Şekil 2.2 (b), Şekil 2.2 (a)'ya benzemektedir ve $T_C = 0.3025$ sıcaklığında ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir. Şekil 2.2 (c)'de, ise sistem bir biri ardına iki faz geçişi geçirmektedir. Bu geçişlerden birincisi p fazından ($M_A = M_B = 0$), i fazına ($M_A \neq M_B \neq 0$) birinci-dereceden faz geçişidir ($T_t = 0.0875$). İkincisi ise i fazından ($M_A \neq M_B \neq 0$), p fazına ($M_A = M_B = 0$), ikinci-derece faz geçişi ($T_C = 0.3025$) olur. Bu iki şekilden sistemde i + p karma fazının olduğu kolayca anlaşılır. Bu durum Şekil 2.2 (b ve c)'nin Şekil 2.3(b) ile karşılaştırılması sonucu açıkça görülebilir.



Şekil 2.2. Karma spin (1/2, 1) Ising sisteminde dinamik mıknatıslanmaların, M_A ve M_B , indirgenmiş sıcaklığa bağlı olarak davranışları. **a)** $d = 0.25$ ve $h = 0.075$ değerleri için sistemde ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir, ($T_C = 0.44$). **b)** Şekil 2.2 (a) ile aynı fakat $d = -0.375$ ve $h = 0.075$ değerleri için $T_C = 0.3025$. **c)** $d = -0.375$ ve $h = 0.075$ değerleri için sistemde bir biri ardına iki faz geçişi meydana gelmektedir: Birincisi, p fazından i fazına birinci-derece faz geçişi ($T_t = 0.0875$), ikincisi i fazından p fazına ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir, ($T_C = 0.3025$).

2.4 Dinamik Faz Diyagramları

Önceki kesimde DFG sıcaklıkları elde edildi. Bu kesimde ise, indirgenmiş kristal alan etkileşim parametresinin (d) farklı değerleri için (T, h) düzleminde ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin (h) farklı değerleri için (d, T) düzleminde dinamik faz diyagramlarını sunabiliriz. Bu faz diyagramlarında sürekli ve kesikli çizgiler sırasıyla ikinci- ve birinci-derece faz geçiş çizgilerini göstermektedir. Dinamik üçlü kritik nokta içi dolu dairelerle gösterilmiştir. (T, h) düzleminde farklı temel topolojide altı ve (d, T) düzleminde ise yine farklı temel topolojide altı dinamik faz diyagramı bulundu. Dinamik faz diyagramlarında, Z dinamik sıfır-sıcaklık kritik noktayı ve E dinamik kritik sonlu noktayı göstermektedir.

2.5 (T, h) Düzleminde Dinamik Faz Diyagramları

Bu kesimde, indirgenmiş kristal alan etkileşim parametresinin (d) farklı değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramları Şekil 2.3' de sunulacak ve sistemin d parametresine bağlılığı incelenecektir. Bu düzlemdeki dinamik faz diyagramları:

i) Şekil 2.3 (a), $d = 0.25$ değeri için (T, h) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Bu faz diyagramında, indirgenmiş yüksek sıcaklıkta (T) ve indirgenmiş yüksek manyetik alan genliğinde (h), paramanyetik (p) faz mevcuttur. h ve T' nin düşük değerlerinde ise ferrimanyetik (i) faz vardır. Bu iki bölge arasındaki dinamik faz sınırı, $i \rightarrow p$, ikinci-derece faz geçiş çizgisidir. İndirgenmiş sıcaklığın düşük ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin belirli değerlerinde, i ve p fazının birlikte bulunduğu $i + p$ karma fazı bulunmaktadır. $i + p$ karma fazı, i fazı ve p fazından birinci-derece faz geçiş çizgisiyle ayrılmıştır. Sistem aynı zamanda birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerini birleştiren yalnızca bir dinamik üçlü kritik noktaya sahiptir. Bu faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce kinetik spin-1/2 [34] (bu sistemde ferrimanyetik (i) faz yerine ferromanyetik (f) faz gelmektedir), spin-1 [64, 71] (bu çalışmalarda i fazının yerine f fazı gelmektedir), spin-3/2 [65, 66] (bu çalışmada i fazının yerine ferromanyetik-3/2 ($f_{3/2}$) fazı gelmektedir) ve spin-2 [57, 67, 72] (bu çalışmalarda i fazı yerine ferromanyetik-2 (f_2) fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir. Ayrıca bu faz diyagramı karma spin (1/2, 1) [21, 30], karma spin (1,

3/2) [31], karma spin (1/2, 3/2) [32] ve karma spin (1, 2) [73] Ising sistemlerinde de elde edilmiştir.

ii) Şekil 2.3 (b), $d = -0.375$ değeri için (T, h) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Bu faz diyagramı Şekil 2.3 (a)'ya benzemektedir, fakat Şekil 2.3 (a)'dan farklı olarak indirgenmiş sıcaklığın ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin düşük değerlerinde i + p karma fazı meydana gelmektedir. i + p karma fazı ile i fazı arasındaki dinamik faz sınırı, birinci-derece faz geçiş çizgisidir. Bu faz diyagramı tek spin Ising [57, 64, 71] (kaynak 57 ile verilen çalışmada i fazının yerine f_2 fazı, kaynak 64 ile verilen çalışmada i fazının yerine f fazı ve kaynak 71 ile verilen çalışmada ise i ve p fazlarının yerine f ve f_q fazları gelmektedir) ve karma spin [21, 30, 31, 73] (kaynak 31 ve 73 deki faz diyagramlarında i + p karma fazı yerine i + a karma fazı gelmiştir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir.

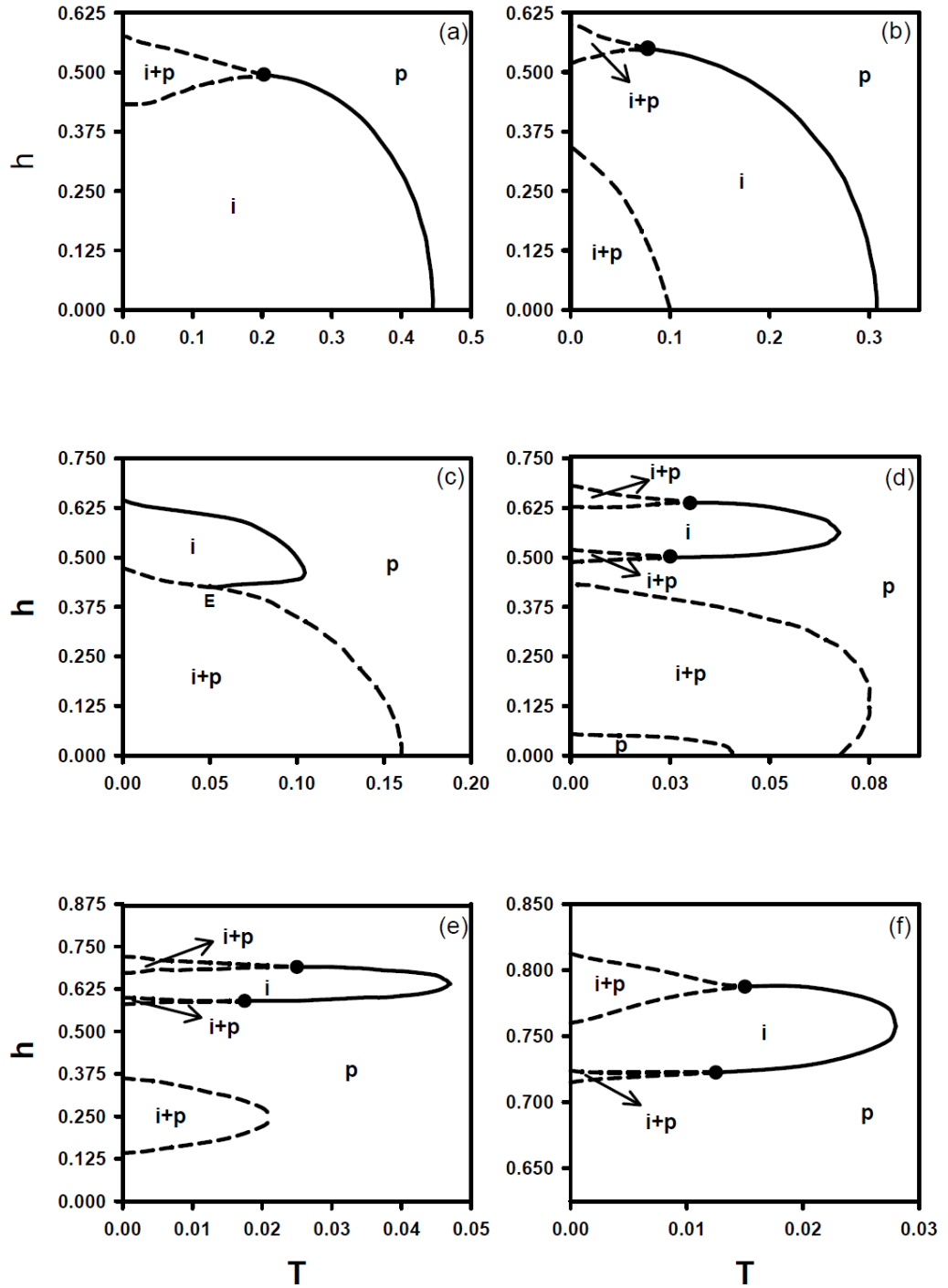
iii) Şekil 2.3 (c), $d = -0.5$ değeri için (T, h) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Sistemde p ve i fazlarının yanı sıra i + p karma fazı mevcuttur. i ve p temel fazları arasındaki dinamik faz sınırı ikinci-derece faz geçiş çizgisi, diğer fazlar arasındaki dinamik faz sınırı birinci-dereceden faz geçiş çizgisidir. Sistemde ayrıca bir tane dinamik kritik sonlu nokta (E) mevcuttur.

iv) Şekil 2.3 (d)'de, $d = -0.55$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı, i ve p temel fazlarının yanısıra i + p karma fazına ve iki adet dinamik üçlü kritik noktaya sahiptir. Burada, sadece i ve p fazları arasındaki dinamik faz sınırı ikinci-derece, diğer tüm fazlar arasındaki dinamik faz sınırı birinci-derece faz çizgisidir. İndirgenmiş sıcaklığın ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin düşük değerlerinde p fazı meydana gelmektedir. Ayrıca sistemde reentrant davranış da gözlenmektedir. Yani, sıcaklık artarken sistemde, önce p fazından i + p karma fazına daha sonra ise i + p karma fazından p fazına faz geçişi olmaktadır.

v) Şekil 2.3 (e)'de, $d = -0.625$ değeri için elde edilen faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı Şekil 2.3 (d)'ye şu iki fark dışında benzerdir. (1) Burada i + p karma faz bölgesi küçülmektedir.(2) İndirgenmiş sıcaklığın ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin çok düşük değerlerinde ki p bölgesi yok olmaktadır.

vi) Şekil 2.3 (f), $d = -0.75$ değeri için elde edilen faz diyagramını göstermektedir. Bu faz diyagramı Şekil 2.3 (e)'ye benzemektedir fakat indirgenmiş sıcaklığın ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin düşük değerlerinde bulunan i+p karma fazı artık sistemde görülmemektedir. Bu faz diyagramı kinetik spin-1 [64] (bu sistemde ferrimanyetik (i) faz yerine ferromanyetik (f) faz gelmektedir) ve karma spin (1/2, 1) [21] Ising sistemlerinde elde edilmiştir.

Modelinin faz diyagramları incelendiğinde, sistemin davranışının kuvvetli bir şekilde d parametresine bağlı olduğu açık olarak görülmektedir.



Şekil 2.3. Karma spin $(1/2, 1)$ Ising sistemi için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramları. **a)** $d = 0.25$ için, **b)** $d = -0.375$ için, **c)** $d = -0.5$ için, **d)** $d = -0.55$ için, **e)** $d = -0.625$ için ve **f)** $d = -0.75$ için. Dinamik üçlü kritik nokta içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. Kesikli ve sürekli çizgiler sırasıyla birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileridir.

2.6 (d, T) Düzleminde Dinamik Faz Diyagramları

Bu kesimde, bir önceki kesimde yapılan işlemlere benzer işlemler yapılacak ve elde edilen DFG noktalarından faydalanılarak farklı h değerleri için sistemin (d, T) düzleminde dinamik faz diyagramları sunulacaktır. Şekil 2.4, h 'nin farklı değerleri için (d, T) düzleminde dinamik faz diyagramlarını göstermektedir ve sistemde altı farklı temel topolojide dinamik faz diyagramı elde edilmiştir. Bu dinamik faz diyagramları:

i.) Şekil 2.4 (a), $h = 0.025$ değeri için (d, T) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Bu faz diyagramında, indirgenmiş sıcaklığın (T) belirli değerlerinde ve indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) belirli değerlerinde, çözümler paramanyetik (p), d 'nin yüksek değerlerinde ise çözümler ferrimanyetik (i) dir. Paramanyetik (p) bölge ile ferrimanyetik (i) bölge arasındaki dinamik faz sınırı, $i \rightarrow p$, ikinci-derece faz geçiş çizgisidir. İndirgenmiş sıcaklığın düşük ve indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) düşük değerlerinde, $i + p$ karma fazı bulunmaktadır. $i + p$ karma fazı, i fazı ve p fazından birinci-derece faz geçiş çizgisiyle ayrılmıştır. Sistem aynı zamanda her iki birinci-derece faz geçiş çizgisini birleştiren ve birinci-dereceden ikinci-dereceye faz geçişini gösteren yalnızca bir dinamik üçlü kritik nokta sergilemektedir. Bu faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce spin-1 [52] (bu sistemde ferrimanyetik (i) fazının yerine ferromanyetik (f) fazı gelmektedir), spin-3/2 [69] (bu sistemde $i + p$ karma fazının yerine $f_{3/2} + f_q$ karma fazı, i fazının yerine $f_{3/2}$ fazı gelmektedir) ve karma spin (1, 2) [73] (bu çalışmada $i + p$ karma fazının yerine $i+a$ karma fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir.

ii.) Şekil 2.4 (b)'de, $h = 0.5375$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramıdır. Bu faz diyagramı ilginç bir faz diyagramıdır, öyleki sistemde iki adet $i + p$ karma fazı mevcuttur. Paramanyetik (p) bölge ile ferrimanyetik (i) bölge arasındaki dinamik faz sınırı, $i \rightarrow p$, ikinci-derece faz geçiş çizgisidir. $i + p$ karma fazları ise i fazı ve p fazından birinci-derece faz geçiş çizgisiyle ayrılmıştır. Sistem aynı zamanda her iki birinci-derece faz geçiş çizgisini birleştiren ve birinci-dereceden ikinci-dereceye faz geçişini gösteren iki adet dinamik üçlü kritik nokta sergilemektedir.

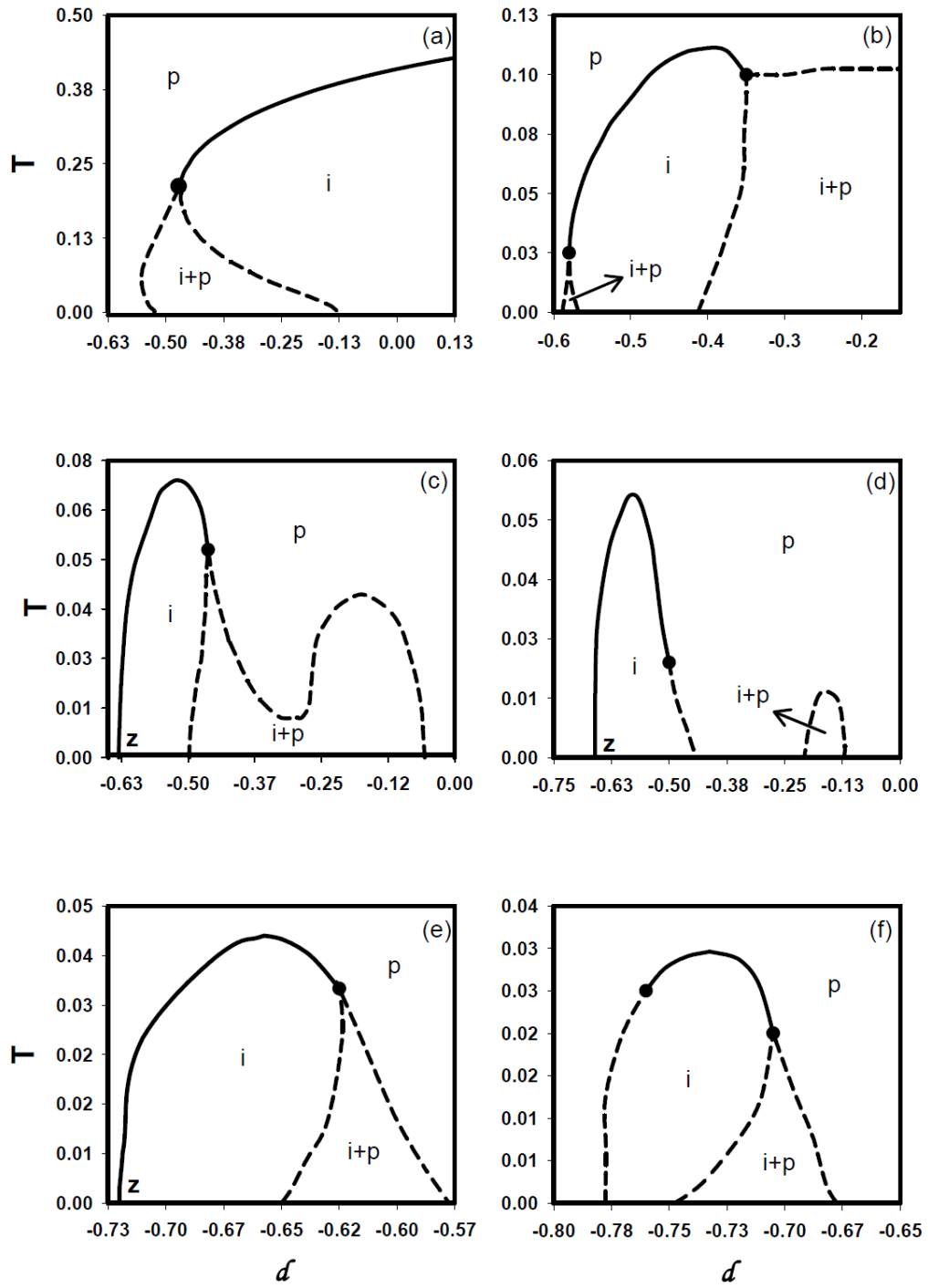
iii.) Şekil 2.4 (c)' de, $h = 0.5875$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı Şekil 2.4 (b)'ye şu iki fark dışında benzerdir. 1) İndirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) düşük değerlerindeki $i + p$ karma fazı artık sistemde görülmemektedir, dolayısı ile sistemde bir adet dinamik üçlü kritik nokta mevcuttur. 2) Dinamik sıfır-sıcaklık kritik (Z) nokta ortaya çıkmaktadır.

iv.) Şekil 2.4 (d)' de, $h = 0.625$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı Şekil 2.4 (c)'ye benzemektedir, fakat Şekil 2.4 (c)'den farklı olarak $i + p$ karma fazı küçülmekte ve farklı bir bölgede meydana gelmektedir.

v.) Şekil 2.4 (e)' de $h = 0.6875$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı da Şekil 2.4 (c) 'ye benzemektedir, fakat Şekil 2.4 (c)'den farklı olarak $i + p$ karma faz bölgesi küçülmektedir. Bu faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce spin-1 [52] (bu sistemde i fazı yerine f fazı gelmektedir) Ising sisteminde elde edilmiştir.

vi.) Şekil 2.4 (f)' de, $h = 0.75$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı Şekil 2.4 (e)'ye benzemekle birlikte Şekil 2.4 (e)'den farklı olarak sistemde iki adet dinamik üçlü kritik nokta mevcuttur. Ayrıca, sistemde dinamik sıfır-sıcaklık kritik noktası (Z) artık meydana gelmemektedir.

Kinetik karma spin ($1/2, 1$) Ising modelinin (d, T) düzleminde faz diyagramları incelendiğinde, sistemin davranışının kuvvetli bir şekilde h parametresine bağlı olduğu açık olarak görülmektedir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar Journal of the Korean Physical Society dergisinde yayımlanmıştır [30].



Şekil 2.4. Karma spin $(1/2, 1)$ Ising sistemi için (d, T) düzleminde dinamik faz diyagramları. Dinamik üçlü kritik nokta içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. Kesikli ve sürekli çizgiler sırasıyla birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileridir. **a)** $h = 0.025$ için, **b)** $h = 0.5375$ için, **c)** $h = 0.5875$ için, **d)** $h = 0.625$ için, **e)** $h = 0.6875$ için ve **f)** $h = 0.75$ için.

3. BÖLÜM

KARMA SPİN (3/2, 2) ISING SİSTEMİ

3.1. Modelin Tanıtımı

Karma spin (3/2, 2) Ising modeli, A ve B gibi iki alt örgülü Ising modeli olup, A alt örgüsü $\sigma_i^A = \pm 3/2, \pm 1/2$ ve B alt örgüsü $S_j^B = \pm 2, \pm 1, 0$ spin değerlerine sahiptir. Karma spin (3/2, 2) Ising modelinin dört tane düzen parametresi mevcuttur. Bunlar;

1) A alt örgüsü için ortalama mıknatıslanma (m_A); $m_A \equiv \langle \sigma_i^A \rangle$ olarak tanımlanır.

2) B alt örgüsü için ortalama mıknatıslanma (m_B); $m_B \equiv \langle S_j^B \rangle$ olarak tanımlanır.

3) A alt örgüsü için ortalama kuadropol moment (q_A); $q_A \equiv \langle (\sigma_i^A)^2 \rangle$ veya

$q_A \equiv \langle (\sigma_i^A)^2 - 5/4 \rangle$ olarak tanımlanır.

4) B alt örgüsü için ortalama kuadropol moment (q_B); $q_B \equiv \langle (S_j^B)^2 \rangle$ veya

$q_B \equiv \langle (S_j^B)^2 - 2 \rangle$ 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 kuadropol moment ifadesi ise, ortalama mıknatıslanmanın karesi veya karesinin lineer bir fonksiyonudur. Ortalama kuadropol momentin ikinci tanımı, sıcaklık sonsuza gittiğinde $q = 0$ olmasını sağlar. Karma spin (3/2, 2) Ising modelinin düzen parametreleri, dört farklı temel fazı tanımlar. Bunlar;

- i. Paramanyetik faz (p), $m_A = m_B = 0$
- ii. Ferrimanyetik - 1 (i_1), $m_A = 3/2$ ve $m_B = 2$
- iii. Ferrimanyetik - 2 (i_2), $m_A = 3/2$ ve $m_B = 1$
- iv. Ferrimanyetik - 3 (i_3), $m_A = 1/2$ ve $m_B = 1$

şeklindedir.

Karma spin (3/2, 2) sistemi için en genel Hamiltonyen ifadesi;

$$\mathcal{H} = -J \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i^A S_j^B - D \left(\sum_i [(\sigma_i^A)^2 - 5/4] + \sum_j [(S_j^B)^2 - 2] \right) - H \left(\sum_i \sigma_i^A + \sum_j S_j^B \right), \quad (3.1)$$

şeklindedir. Burada, $\langle ij \rangle$, toplamın en yakın komşu çiftler üzerinden alınacağını gösterirken, J bilineer etkileşme sabiti ve D kristal-alan veya tek-iyon anizotropi etkileşme parametreleridir. H ise zamana bağlı salınımlı dış manyetik alandır ve

$$H(t) = H_0 \cos(\omega t), \quad (3.2)$$

şeklindedir. Burada H_0 ve ω salınımlı dış manyetik alanın genliği ve açısal frekansdır ve $\omega = 2\pi\nu$ olarak tanımlanır.

3.2 Ortalama-Alan Dinamik Denklemlerinin Elde Edilmesi

Herhangi bir i . spinin σ_i durumundan σ_i' durumuna birim zamandaki geçiş olasılığı ya da olasılık yoğunluğu, $W_i(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N)$ olarak ifade edilir. Böylece, sistemin herhangi bir t zamanında $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$ spin konfigürasyonuna sahip olduğu andaki ihtimaliyet fonksiyonu $P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t)$ ile tanımlanmaktadır. Bu ihtimaliyet fonksiyonunun zamanla değişimi, spinler ve ısı banyosu arasındaki etkileşmeyi tanımlayan master denklemi ile verilir. Sistemde, B altörgüsündeki spinlerin bir an için sabit kaldığı düşünülürse, A altörgüsü için Master denklemi;

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t) = & - \sum_i \left(\sum_{\sigma_i \neq \sigma'_i} W_i^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) \right) P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_N; t) \\ & + \sum_i \left(\sum_{\sigma_i \neq \sigma'_i} W_i^A(\sigma'_i \rightarrow \sigma_i) P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma'_i, \dots, \sigma_N; t) \right), \end{aligned} \quad (3.3)$$

şeklinde yazılır. $W_i^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i)$ i. spinin σ_i durumundan σ'_i durumuna, $W_i^A(\sigma'_i \rightarrow \sigma_i)$ ise i. spinin σ'_i durumundan σ_i durumuna birim zamandaki geçiş olasılığıdır. Denge durumunda,

$$\frac{d}{dt} P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t) = 0, \quad (3.4)$$

olduğundan, denklem (3.3)'den sistemin denge durumu için olasılık yoğunlukları oranının

$$\frac{W_i^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i)}{W_i^A(\sigma'_i \rightarrow \sigma_i)} = \frac{P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma'_i, \dots, \sigma_N)}{P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_N)}, \quad (3.5)$$

olduğu kolayca görülebilir. Buradan

$$P^A(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_N) \propto \exp(-\beta \mathcal{H}), \quad (3.6)$$

ile tanımlanan genel kanonik dağılım ifadesinden, sistem dengede iken σ_i durumundan σ'_i durumuna birim zamandaki geçiş olasılığı,

$$W_i^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta \Delta E^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i))}{\sum_{\sigma'_i} \exp(-\beta \Delta E^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i))}, \quad (3.7)$$

şeklinde verilir. Burada $\beta = 1/k_B T$, k_B Boltzmann faktörü, $\sum_{\sigma'_i}$ ise toplamın $\sigma'_i = \pm 3/2, \pm 1/2$, üzerinden alınacağını göstermektedir. $\Delta E^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i)$, herhangi bir spinin σ_i

durumundan σ'_i durumuna geçişi sırasında sistemin enerjisindeki meydana gelen değişmedir ve Hamiltonyen ifadesinden yararlanarak,

$$\Delta E^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) = -(\sigma'_i - \sigma_i)(H + J \sum_j S_j) - [(\sigma'_i)^2 - (\sigma_i)^2] D \quad (3.8)$$

olarak elde edilir. Burada $y = H + J \sum_j S_j$ ile tanımlanırsa,

$$\Delta E^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) = -(\sigma'_i - \sigma_i)y - [(\sigma'_i)^2 - (\sigma_i)^2] D \quad (3.9)$$

şeklinde olur. Böylece, σ_i durumundan σ'_i durumuna mümkün olan tüm enerji değişimlerini hesaplayabiliriz. Bulunan bu enerji değişimi ifadeleri (3.7) denkleminde yerine yazılırsa her $\sigma_i \rightarrow \sigma'_i$ geçişi için olasılık yoğunlukları elde edilir. Bunlar:

$$W_i^A\left(\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{3}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(-\frac{3\beta y}{2}\right)}{2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) \exp(-2\beta D)} \quad (3.10a)$$

$$W_i^A\left(\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(\frac{\beta y}{2}\right) \exp(-2\beta D)}{2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) \exp(-2\beta D)} \quad (3.10b)$$

$$W_i^A\left(\frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(\frac{\beta y}{2}\right) \exp(-2\beta D)}{2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) \exp(-2\beta D)} \quad (3.10c)$$

$$W_i^A\left(\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(-\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(2\beta D)}{2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(2\beta D)} \quad (3.10d)$$

$$W_i^A\left(\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(-\frac{\beta y}{2}\right)}{2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(2\beta D)} \quad (3.10e)$$

$$W_i^A\left(\frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(2\beta D)}{2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(2\beta D)} \quad (3.10f)$$

$$W_i^A\left(-\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(-\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(2\beta D)}{2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(2\beta D)} \quad (3.10g)$$

$$W_i^A\left(-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(\frac{\beta y}{2}\right)}{2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(2\beta D)} \quad (3.10h)$$

$$W_i^A\left(-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(2\beta D)}{2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(2\beta D)} \quad (3.10i)$$

$$W_i^A\left(-\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(-\frac{\beta y}{2}\right) \exp(-2\beta D)}{2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(-2\beta D)} \quad (3.10j)$$

$$W_i^A\left(-\frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(\frac{\beta y}{2}\right) \exp(-2\beta D)}{2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(-2\beta D)} \quad (3.10k)$$

$$W_i^A\left(-\frac{3}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp\left(\frac{3\beta y}{2}\right)}{2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) \exp(-2\beta D)} \quad (3.10l)$$

$W_i^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i)$ ifadesine baktığımızda olasılık yoğunluklarının σ_i 'ya bağlı olmadığını görürüz ve $W_i^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) = W_i^A(\sigma'_i)$ şeklinde yazabiliriz. Böylece olasılık yoğunlukları,

$$\begin{aligned} W_i^A\left(\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{3}{2}\right) &= W_i^A\left(\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2}\right) = W_i^A\left(-\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2}\right) = W_i^A\left(-\frac{3}{2}\right) \\ &= \frac{1}{2\tau} \frac{\exp(-\beta D) \exp(-3\beta y/2)}{\exp(\beta D) \cosh(3\beta y/2) + \exp(-\beta D) \cosh(\beta y/2)}, \end{aligned} \quad (3.11a)$$

$$\begin{aligned} W_i^A\left(\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{1}{2}\right) &= W_i^A\left(\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2}\right) = W_i^A\left(-\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{1}{2}\right) = W_i^A\left(-\frac{1}{2}\right) \\ &= \frac{1}{2\tau} \frac{\exp(-\beta D) \exp(-\beta y/2)}{\exp(\beta D) \cosh(3\beta y/2) + \exp(-\beta D) \cosh(\beta y/2)}, \end{aligned} \quad (3.11b)$$

$$\begin{aligned} W_i^A\left(\frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) &= W_i^A\left(-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = W_i^A\left(-\frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = W_i^A\left(\frac{1}{2}\right) \\ &= \frac{1}{2\tau} \frac{\exp(-\beta D) \exp(\beta y/2)}{\exp(\beta D) \cosh(3\beta y/2) + \exp(-\beta D) \cosh(\beta y/2)}, \end{aligned} \quad (3.11c)$$

$$\begin{aligned} W_i^A\left(\frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) &= W_i^A\left(-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = W_i^A\left(-\frac{3}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = W_i^A\left(\frac{3}{2}\right) \\ &= \frac{1}{2\tau} \frac{\exp(\beta D) \exp(3\beta y/2)}{\exp(\beta D) \cosh(3\beta y/2) + \exp(-\beta D) \cosh(\beta y/2)}, \end{aligned} \quad (3.11d)$$

şeklinde yazılabilir.

$W_i^A(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) = W_i^A(\sigma'_i)$ olduğundan denklem 3.3 ile verilen master eşitliği,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t) &= - \sum_i \left(\sum_{\sigma_i \neq \sigma'_i} W_i^A(\sigma'_i) \right) P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_N; t) \\ &\quad + \sum_i W_i^A(\sigma_i) \left(\sum_{\sigma_i \neq \sigma'_i} P^A(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma'_i, \dots, \sigma_N; t) \right), \end{aligned} \quad (3.12)$$

şekline dönüşür. Master denkleminden yararlanılarak, A altörgüsü için genel ortalama-alan dinamik denklemi şu şekilde elde edilir:

$$\tau \frac{d}{dt} \langle \sigma_k \rangle_A = - \langle \sigma_k \rangle_A + \frac{3 \sinh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(\beta D) + \sinh\left(\frac{\beta y}{2}\right) \exp(-\beta D)}{2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) \exp(\beta D) + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) \exp(-\beta D)}. \quad (3.13)$$

Burada, $y = H + J \sum_j S_j$. Ortalama-alan yaklaşımı kullanılarak (3.10) denklemi,

$$\tau \frac{d}{dt} \langle \sigma_i \rangle_A = -\langle \sigma_i \rangle_A + \frac{3 \sinh\left(\frac{3\beta y_1}{2}\right) \exp(\beta D) + \sinh\left(\frac{\beta y_1}{2}\right) \exp(-\beta D)}{2 \cosh\left(\frac{3\beta y_1}{2}\right) \exp(\beta D) + 2 \cosh\left(\frac{\beta y_1}{2}\right) \exp(-\beta D)} \quad (3.14)$$

olarak yazılabilir. Burada $y_1 = Jz \langle S_j \rangle_B + H_0 \cos(\omega t)$. Elde edilen bu ortalama-alan dinamik denklemi,

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_A = -m_A + \frac{3 \sinh\left(\frac{3}{2T}(m_B + h \cos \xi)\right) \exp\left[\frac{d}{T}\right] + \sinh\left(\frac{1}{2T}(m_B + h \cos \xi)\right) \exp\left[-\frac{d}{T}\right]}{2 \cosh\left(\frac{3}{2T}(m_B + h \cos \xi)\right) \exp\left[\frac{d}{T}\right] + 2 \cosh\left(\frac{1}{2T}(m_B + h \cos \xi)\right) \exp\left[-\frac{d}{T}\right]} \quad (3.15)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada $m_A \equiv \langle \sigma_i \rangle_A$, $m_B \equiv \langle S_j \rangle_B$, $d = D/Jz$, $\xi = \omega t$, $T = (\beta Jz)^{-1}$, $H = H_0 \cos(\omega t)$, $h = H_0/Jz$ ve $\Omega = \tau \omega$ olarak tanımlanmıştır. T , h , d ve Ω boyutsuz parametrelerdir. Sistemimizde $\Omega = 2\pi$ ve $z = 4$ değerinde sabit olarak ele alınacaktır.

Bundan önceki hesaplamalara benzer olarak, Şimdi A altörgüsündeki spinlerin bir an için sabit kaldığını ve geçişlerin sadece, B altörgüsü üzerindeki spinlerin arasında olduğunu düşünelim ve B altörgüsü için ortalama-alan dinamik denklemlerini elde edelim. B altörgüsü için olasılık yoğunlukları,

$$W_j^B(2 \rightarrow 1) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta(a + 3D))}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-3\beta(a + D)) + \exp(-4\beta a)}, \quad (3.16a)$$

$$W_j^B(2 \rightarrow 0) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-2\beta(a + 2D))}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-3\beta(a + D)) + \exp(-4\beta a)}, \quad (3.16b)$$

$$W_j^B(2 \rightarrow -1) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-3\beta(a + D))}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-3\beta(a + D)) + \exp(-4\beta a)}, \quad (3.16c)$$

$$W_j^B(2 \rightarrow -2) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-4\beta a)}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-3\beta(a + D)) + \exp(-4\beta a)}, \quad (3.16d)$$

$$W_j^B(1 \rightarrow 2) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(a + 3D))}{1 + \exp(\beta(a + 3D)) + \exp(-\beta(a + D)) + \exp(-\beta 2a) + \exp(-\beta(3a - 3D))}, \quad (3.16e)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(1 \rightarrow 0) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta(a + D))}{1 + \exp(\beta(a + 3D)) + \exp(-\beta(a + D)) + \exp(-\beta 2a) + \exp(-\beta(3a - 3D))} \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-2\beta(a + 2D))}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-3\beta(a + D)) + \exp(-4\beta a)}, \end{aligned} \quad (3.16f)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(1 \rightarrow -1) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-2\beta a)}{1 + \exp(\beta(a + 3D)) + \exp(-\beta(a + D)) + \exp(-\beta 2a) + \exp(-\beta(3a - 3D))} \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-3\beta(a + D))}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-3\beta(a + D)) + \exp(-4\beta a)}, \end{aligned} \quad (3.16g)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(1 \rightarrow -2) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-3\beta(a - D))}{1 + \exp(\beta(a + 3D)) + \exp(-\beta(a + D)) + \exp(-\beta 2a) + \exp(-\beta(3a - 3D))} \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-4\beta a)}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-3\beta(a + D)) + \exp(-4\beta a)}, \end{aligned} \quad (3.16h)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(0 \rightarrow 2) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(2\beta(a + 2D))}{1 + \exp(2\beta(a + 2D)) + \exp(\beta(a + D)) + \exp(-\beta(a - D)) + \exp(-2\beta(a + 2D))} \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(a + 3D))}{1 + \exp(\beta(a + 3D)) + \exp(-\beta(a + D)) + \exp(-2\beta a) + \exp(-3\beta(a + D))}, \end{aligned} \quad (3.16i)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(0 \rightarrow 1) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(a + D))}{1 + \exp(2\beta(a + 2D)) + \exp(\beta(a + D)) + \exp(-\beta(a - D)) + \exp(-2\beta(a + 2D))} \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta(a + 3D))}{1 + \exp(\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a + D))}, \end{aligned} \quad (3.16j)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(0 \rightarrow -1) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta(a - D))}{1 + \exp(2\beta(a + 2D)) + \exp(\beta(a + D)) + \exp(-\beta(a - D)) + \exp(-2\beta(a + 2D))} \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-3\beta(a + D))}{1 + \exp(\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a + D))}, \end{aligned} \quad (3.16k)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(0 \rightarrow -2) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-2\beta(a - 2D))}{1 + \exp(2\beta(a + 2D)) + \exp(\beta(a + D)) + \exp(-\beta(a - D)) + \exp(-2\beta(a + 2D))} \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-4a)}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a + D))}, \end{aligned} \quad (3.16l)$$

$$\begin{aligned}
W_j^B(-1 \rightarrow 2) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(3\beta(a+D))}{1 + \exp(3\beta(a+D)) + \exp(2\beta a) + \exp(\beta(a-D)) + \exp(-\beta(a-3D))} \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(a+3D))}{1 + \exp(\beta(a+3D)) + \exp(-\beta(a+D)) + \exp(-2\beta a) + \exp(-3\beta(a-D))},
\end{aligned} \tag{3.16m}$$

$$\begin{aligned}
W_j^B(-1 \rightarrow 1) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(2\beta a)}{1 + \exp(3\beta(a+D)) + \exp(2\beta a) + \exp(\beta(a-D)) + \exp(-\beta(a-3D))} \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta(a+3D))}{1 + \exp(-\beta(a+3D)) + \exp(-2\beta(a+2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a+D))},
\end{aligned} \tag{3.16n}$$

$$\begin{aligned}
W_j^B(-1 \rightarrow 0) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(a-D))}{1 + \exp(3\beta(a+D)) + \exp(2\beta a) + \exp(\beta(a-D)) + \exp(-\beta(a-3D))} \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-2\beta(a+2D))}{1 + \exp(-\beta(a+3D)) + \exp(-2\beta(a+2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a+D))},
\end{aligned} \tag{3.16o}$$

$$\begin{aligned}
W_j^B(-1 \rightarrow -2) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta(a-3D))}{1 + \exp(3\beta(a+D)) + \exp(2\beta a) + \exp(\beta(a-D)) + \exp(-\beta(a-3D))} \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-4\beta a)}{1 + \exp(-\beta(a+3D)) + \exp(-2\beta(a+2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a+D))},
\end{aligned} \tag{3.16p}$$

$$\begin{aligned}
W_j^B(-2 \rightarrow 2) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(4\beta a)}{1 + \exp(4\beta a) + \exp(3\beta(a-D)) + \exp(2\beta(a-2D)) + \exp(\beta(a-3D))} \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(a+3D))}{1 + \exp(\beta(a+3D)) + \exp(\beta(a+D)) + \exp(-2\beta a) + \exp(-3\beta(a-D))},
\end{aligned} \tag{3.16r}$$

$$\begin{aligned}
W_j^B(-2 \rightarrow 1) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(3\beta(a-D))}{1 + \exp(4\beta a) + \exp(3\beta(a-D)) + \exp(2\beta(a-2D)) + \exp(\beta(a-3D))} \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta(a+3D))}{1 + \exp(-\beta(a+3D)) + \exp(-2\beta(a+2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a+D))},
\end{aligned} \tag{3.16s}$$

$$\begin{aligned}
W_j^B(-2 \rightarrow 0) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(2\beta(a-2D))}{1 + \exp(4\beta a) + \exp(3\beta(a-D)) + \exp(2\beta(a-2D)) + \exp(\beta(a-3D))} \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-2\beta(a+2D))}{1 + \exp(-\beta(a+3D)) + \exp(-2\beta(a+2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a+D))},
\end{aligned} \tag{3.16t}$$

$$\begin{aligned}
W_j^B(-2 \rightarrow -1) &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(a-3D))}{1 + \exp(4\beta a) + \exp(3\beta(a-D)) + \exp(2\beta(a-2D)) + \exp(\beta(a-3D))} \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-2\beta(a+2D))}{1 + \exp(-\beta(a+3D)) + \exp(-2\beta(a+2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a+D))},
\end{aligned} \tag{3.16u}$$

şekilinde elde edilir. $W_j^B(S_j \rightarrow S'_j)$ ifadesine baktığımızda olasılık yoğunluklarının S_j 'ye bağlı olmadığını görürüz ve $W_j^B(S_j \rightarrow S'_j) = W_j^B(S'_j)$ şeklinde yazabiliriz. Böylece olasılık yoğunlukları,

$$\begin{aligned} W_j^B(1 \rightarrow 2) &= W_j^B(0 \rightarrow 2) = W_j^B(-1 \rightarrow 2) = W_j^B(-2 \rightarrow 2) = W_j^B(2) \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(\beta(a + 3D))}{1 + \exp(\beta(a + 3D)) + \exp(-\beta(a + D)) + \exp(-2\beta a) + \exp(-3\beta(a - D))}, \end{aligned} \quad (3.17a)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(2 \rightarrow 1) &= W_j^B(0 \rightarrow 1) = W_j^B(-1 \rightarrow 1) = W_j^B(-2 \rightarrow 1) = W_j^B(1) \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta(a + 3D))}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a + D))}, \end{aligned} \quad (3.17b)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(2 \rightarrow 0) &= W_j^B(1 \rightarrow 0) = W_j^B(-1 \rightarrow 0) = W_j^B(-2 \rightarrow 0) = W_j^B(0) \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-2\beta(a + 2D))}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a + D))}, \end{aligned} \quad (3.17c)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(2 \rightarrow -1) &= W_j^B(1 \rightarrow -1) = W_j^B(0 \rightarrow -1) = W_j^B(-2 \rightarrow -1) = W_j^B(-1) \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-3\beta(a + D))}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a + D))}, \end{aligned} \quad (3.17d)$$

$$\begin{aligned} W_j^B(2 \rightarrow -2) &= W_j^B(1 \rightarrow -2) = W_j^B(0 \rightarrow -2) = W_j^B(-1 \rightarrow -2) = W_j^B(-2) \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-4\beta a)}{1 + \exp(-\beta(a + 3D)) + \exp(-2\beta(a + 2D)) + \exp(-4\beta a) + \exp(-3\beta(a + D))}, \end{aligned} \quad (3.17e)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $a = H + J \sum_i \sigma_i$ şeklinde tanımlanmıştır. Ortalama-alan yaklaşımı kullanılarak B altörgüsü için ortalama-alan dinamik denklemi,

$$\begin{aligned} \Omega \frac{dm_B}{d\xi} &= -m_B \\ &+ \frac{2 \exp[4d/T] \sinh[2(m_A + h \cos \xi)/T] + \exp[d/T] \sinh[(m_A + h \cos \xi)/T]}{\exp[4d/T] \cosh[2(m_A + h \cos \xi)/T] + \exp[d/T] \cosh[(m_A + h \cos \xi)/T] + 0.5}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

şeklinde de yazılabilir. Gelecek bölümde bu denklemlerin nümerik çözümleri yapılacak ve çözümler tartışılacak.

3.3. Dinamik Düzen Parametreleri ve Dinamik Faz Geçiş Noktaları

Bu kesimde, öncelikle sistemde var olan fazları bulmak için (3.15) ve (3.18) ile verilen ortalama-alan dinamik denklemlerini Adams-Moulton kestirme ve düzeltme yönteminin kullanılması ile nümerik olarak çözümlenerek ortalama düzen parametrelerinin zamana bağlı davranışları incelenecektir. Daha sonra, Adams-Moulton kestirme düzeltme ve Romberg integrasyon yöntemleri kullanılarak bir periyot içinde ortalama düzen parametrelerinin veya dinamik düzen parametrelerinin davranışları indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelenecek. Bu inceleme sonucunda, dinamik faz geçiş sıcaklıkları tespit edilecek ve dinamik faz geçişlerinin doğası (sürekli veya sürekli yani birinci- veya ikinci-derece faz geçişleri) karakterize edilecek.

Şimdi ilk olarak (3.15) ve (3.18) denklemlerinin çözümünü yapıp sistemdeki mevcut fazları bulalım. Denklem (3.15) ve (3.18)'in kararlı çözümleri 2π periyodu için ξ 'nin periyodik bir fonksiyonu olacaktır.

$$m_A(\xi + 2\pi) = m_A(\xi) \text{ ve } m_B(\xi + 2\pi) = m_B(\xi). \quad (3.19)$$

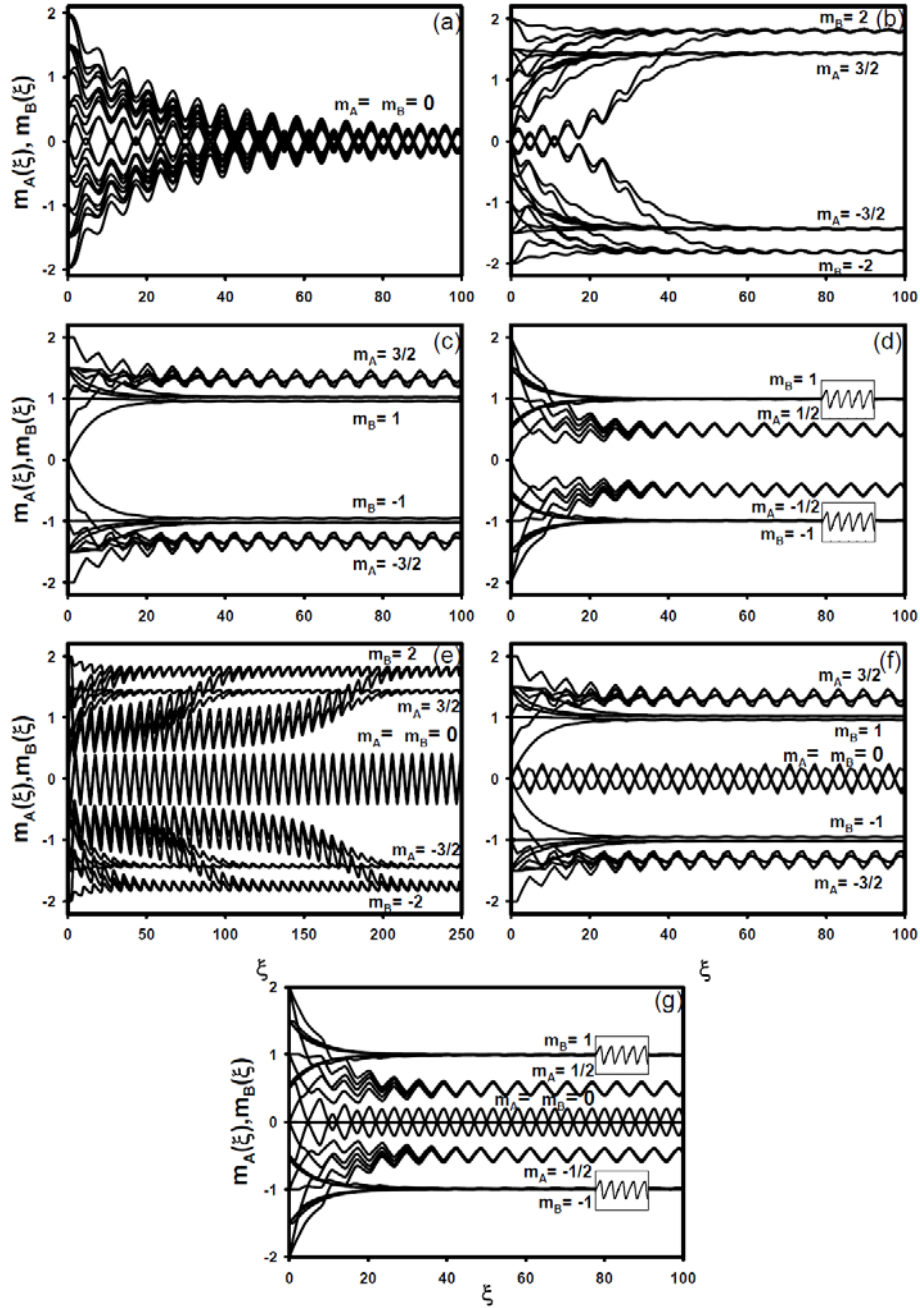
Böylece, çözümler sahip oldukları ya da olmadıkları özelliklerine göre iki tip çözümden biri olabilir.

$$m_A(\xi + \pi) = -m_A(\xi) \text{ ve } m_B(\xi + \pi) = -m_B(\xi). \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'nin birinci tip çözümü, simetrik çözüm olarak adlandırılır ve bu paramanyetik faza karşılık gelir. Bu çözümde, altörgü mıknatıslanmaları m_A ve m_B birbirine eşittir ($m_A = m_B$), sıfır değeri civarında salınır ve dış manyetik alana uyum gösterirler. İkinci tip çözüm, denklem (3.20)'ye uymaz ve simetrik olmayan çözüm olarak adlandırılır ve bu çözüm ferrimanyetik (i) çözüme karşılık gelir. Bunun nedeni ise m_A ve m_B birbirine eşit değildir ($m_A \neq m_B$) ve sıfırdan farklı bir değer civarında salınırlar. Eğer, $m_A = \pm 3/2$ ve $m_B = \pm 2$ etrafında salınıyorsa ferrimanyetik-1 (i_1) faz, $m_A = \pm 3/2$ ve $m_B = \pm 1$ etrafında salınıyorsa ferrimanyetik-2 (i_2) faz, $m_A = \pm 1/2$ ve $m_B = \pm 1$ etrafında salınıyorsa ferrimanyetik-3 (i_3) faz olarak adlandırılır. Bu durumda

ortalama düzen parametreleri dış manyetik alana uymazlar. Bu gerçekler açık bir şekilde Bölüm 3.2’de elde edilen (3.15) ve (3.18) ile verilen ortalama-alan dinamik denklemlerinin nümerik olarak çözülmesiyle görülebilir. Bu dinamik denklemler, verilen parametreler ve başlangıç değerleri için Adams-Moulton kestirme ve düzeltme yöntemi kullanılarak çözüldü ve çözümler Şekil 3.1’ de gösterildi. Şekil 3.1’ de yedi farklı çözüm görülmektedir. Sistemde, p , i_1 , i_2 ve i_3 temel fazlarının ya da çözümlerinin yanı sıra üç tane karma faz mevcuttur. Karma fazlar, i_1 ve p fazlarının bir arada bulunduğu $i_1 + p$ karma fazı; i_2 ve p fazlarının bir arada bulunduğu $i_2 + p$ karma fazı; i_3 ve p fazlarının bir arada bulunduğu $i_3 + p$ karma fazlarıdır. Şekil 3.1 (a)’da yalnızca simetrik çözüm elde edilmiştir ve bundan dolayı sistemde paramanyetik (p) faz mevcuttur. Burada m_A ve m_B birbirlerine eşit ve sıfır değeri etrafında salınmaktadırlar. Şekil 3.1 (b)’de yalnızca simetrik olmayan çözüm elde edilmiştir. Burada, $m_A = \pm 3/2$ ve $m_B = \pm 2$ değerleri etrafında salınmaktadırlar ve bu ferrimanyetik- 1 (i_1) faza karşılık gelmektedir. Şekil 3.1(c)’de yalnızca simetrik olmayan çözüm elde edilmiştir ve $m_A = \pm 3/2$ ve $m_B = \pm 1$ değerleri etrafında salınmaktadır. Bundan dolayı ferrimanyetik- 2 (i_2) faz vardır. Şekil 3.1(d)’de yalnızca simetrik olmayan çözüm elde edilmiştir. Burada $m_A = \pm 1/2$ ve $m_B = \pm 1$ değerleri etrafında salınmaktadırlar ve bu ferrimanyetik- 3 (i_3) faza karşılık gelmektedir. Şekil 3.1 (e)’de ise m_A ve m_B başlangıç değerlerine göre ya birbirlerine eşit ve sıfır değeri etrafında ya da birbirlerinden ve sıfırdan farklı bir değer etrafında salınmaktadır. m_A ve m_B ’nin birbirine eşit ve sıfır değeri etrafında salındığı durum paramanyetik faza, m_A ve m_B ’nin birbirinden ve sıfırdan farklı bir değer etrafında salındığı durum ise ferrimanyetik faza karşılık gelmektedir. Burada $m_A = \pm 3/2$ ve $m_B = \pm 2$ değerleri etrafında salınmaktadırlar ve bu ferrimanyetik- 1 (i_1) faza karşılık gelmektedir. Buradan sistemde $i_1 + p$ karma fazının olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 3.2 (f)’de görüldüğü gibi m_A ve m_B başlangıç değerlerine göre birbirine eşit ve sıfır değeri etrafında ya da birbirinden ve sıfırdan farklı bir değer etrafında salınmaktadır. m_A ve m_B ’nin birbirine eşit ve sıfır değeri etrafında salındığı durum paramanyetik faza, m_A ve m_B ’nin birbirinden ve sıfırdan farklı bir değer etrafında salındığı durum ise ferrimanyetik faza karşılık gelmektedir. Burada $m_A =$

$\pm 3/2$ ve $m_B = \pm 1$ değerleri etrafında salınmaktadırlar ve bu ferrimanyetik- 2 (i_2) faza karşılık gelmektedir. Buradan sistemde $i_2 + p$ karma fazının olduğu açıkça görölmektedir. Şekil 3.2 (g)'de göröldüğü gibi m_A ve m_B başlangıç değerlerine göre birbirine eşit ve sıfır değeri etrafında ya da birbirinden ve sıfırdan farklı bir değer etrafında salınmaktadırlar. m_A ve m_B 'nin birbirine eşit ve sıfır değeri etrafında salındığı durum paramanyetik faza, m_A ve m_B 'nin birbirinden ve sıfırdan farklı bir değer etrafında salındığı durum ise ferrimanyetik faza karşılık gelmektedir. Burada $m_A = \pm 1/2$ ve $m_B = \pm 1$ değerleri etrafında salınmaktadırlar ve bu ferrimanyetik- 3 (i_3) faza karşılık gelmektedir. Buradan sistemde $i_3 + p$ karma fazının olduğu açıkça görölmektedir.



Şekil 3.1. Karma spin $(3/2, 2)$ Ising sisteminde ortalama altörgü miktanslanmalarının zamanla değişimi **a)** Sistemde paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($d = 0.25$, $h = 1.25$ ve $T = 2.0$). **b)** Sistemde ferrimanyetik-1 (i_1) faz mevcuttur, ($d = 0.25$, $h = 0.5$, $T = 1.0$). **c)** Sistemde ferrimanyetik-2 (i_2) faz mevcuttur, ($d = -0.5$, $h = 0.375$, $T = 0.25$). **d)** Sistemde ferrimanyetik-3 (i_3) faz mevcuttur, ($d = -0.625$, $h = 0.375$, $T = 0.375$). **e)** Sistemde ferrimanyetik-1 (i_1) faz ve paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($h = 1.25$, $d = 0.25$, $T = 0.625$). **f)** Sistemde ferrimanyetik-2 (i_2) faz ve paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($h = 0.875$, $d = -0.5$, $T = 0.0375$). **g)** Sistemde ferrimanyetik-3 (i_3) faz ve paramanyetik (p) faz mevcuttur, ($h = 0.25$, $d = -1.0$, $T = 0.05$).

Böylece Şekil 3.1' den, sistemde yedi farklı faz mevcut olduğu görülmektedir. Bu fazlar, sırasıyla p , i_1 , i_2 , i_3 , $i_1 + p$, $i_2 + p$ ve $i_3 + p$ fazlarıdır. Bu yedi fazın arasındaki dinamik faz sınırlarını belirleyebilmemiz için, dinamik faz geçiş (DFG) sıcaklıklarını hesaplamalıyız ve dinamik faz geçişlerinin doğasını (sürekli veya sürekli yani birinci- veya ikinci-derece faz geçişleri) karakterize etmeliyiz. Daha sonra bu DFG sıcaklıklarını kullanarak sistemin dinamik faz diyagramları sunabiliriz. DFG sıcaklıkları, bir periyot içinde ortalama düzen parametrelerinin ya da dinamik düzen parametrelerinin davranışının indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelenmesiyle elde edilecektir.

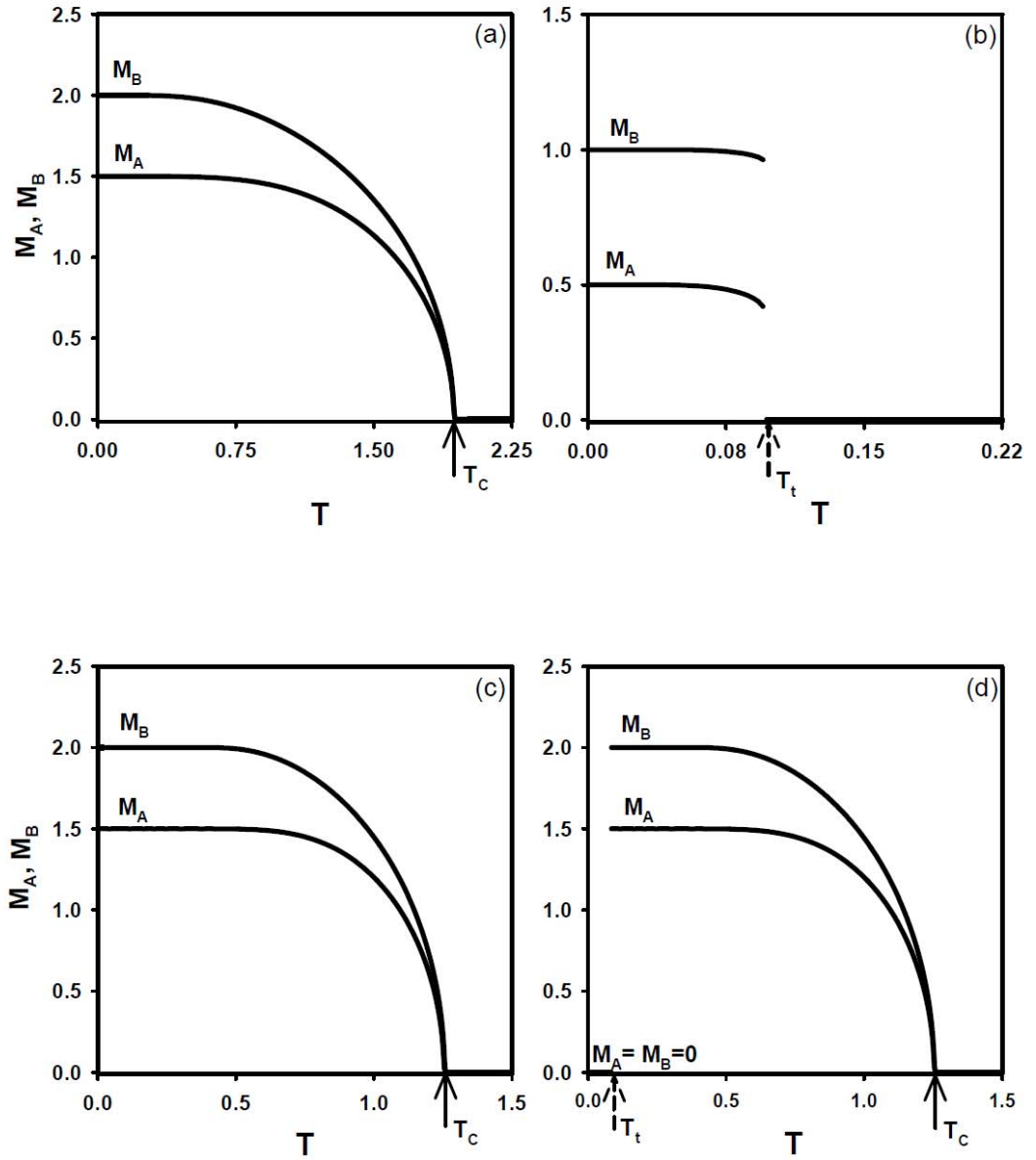
Dinamik düzen parametreleri veya dinamik altörgü miktanslanmaları (M_A , M_B)

$$M_A = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_A(\xi) d\xi, \quad M_B = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_B(\xi) d\xi, \quad (3.21)$$

şeklinde tanımlanır.

M_A ve M_B ' nin davranışı, indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak, h ve d ' nin birkaç değeri için Adams-Moulton kestirme ve düzeltme metodu ve Romberg integrasyon metodunun birleşimi kullanılarak incelendi ve yedi faz arasındaki DFG noktalarının nasıl hesaplandığı ve dinamik faz sınırların nasıl elde edildiği gösterilmiş oldu. Bu incelemeler sonucu faz geçişlerinin karakteristikleri (birinci- veya ikinci-derece faz geçişleri) belirlendi ve DFG sıcaklıkları elde edildi. T_t ve T_C , sırasıyla M_A ve M_B için birinci- ve ikinci-derece faz geçiş sıcaklıklarını göstermektedir. Şekil 3.2 (a), $d = 0.25$ ve $h = 0.5$ için M_A ve M_B ' nin davranışlarını indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Bu şekilde, sıfır sıcaklıkta $M_A = 3/2$ ve $M_B = 2$ ' dir ve indirgenmiş sıcaklık artarken dinamik düzen parametreleri sürekli olarak azalarak, $T_C = 1.94$ değerinde sıfır olmaktadır ve böylece sistemde ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir. Bu durumda, dinamik faz geçişi i_1 fazından p fazına olmaktadır ve çözüm M_A ve M_B ' nin başlangıç değerlerine bağlı değildir. Şekil 3.2 (b), $d = -1.0$ ve $h = 0.125$ için M_A ve M_B ' nin davranışlarını indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu

olarak göstermektedir. Bu şekilde, sıfır sıcaklıkta $M_A = 1/2$ ve $M_B = 1$ 'dir ve indirgenmiş sıcaklık artarken düzen parametreleri süreksiz olarak azalarak, $T_t = 0.0975$ değerinde sıfır olmaktadır ve böylece birinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir. Bu durumda, dinamik faz geçişi i_3 fazından p fazına olmaktadır ve çözüm M_A ve M_B 'nin başlangıç değerlerine bağlı değildir. Şekil 3.2 (c ve d), yedi farklı başlangıç değeri için ve $d = -0.4375$ ve $h = 0.075$ değerleri için M_A ve M_B 'nin indirgenmiş sıcaklığa bağlı davranışlarını göstermektedir. Şekil 3.2 (c) için başlangıç değerleri $M_A = 3/2, M_B = 2$; $M_A = 1/2, M_B = 2$; $M_A = 3/2, M_B = 1$; $M_A = 1/2, M_B = 1$; $M_A = 3/2, M_B = 0$; $M_A = 1/2, M_B = 0$, ve Şekil 3.2(d) için başlangıç değeri $M_A = M_B = 0$ olarak alınmıştır. Şekil 3.2 (c), Şekil 3.2 (a)'ya benzemektedir ve $T_C = 1.26$ değerinde meydana gelmektedir. Şekil 3.2 (d)'de, sistem bir biri ardına iki faz geçişi geçirmektedir. Bu geçişlerden birincisi p ($M_A = M_B = 0$) fazından, i_1 ($M_A = 3/2, M_B = 2$) fazına birinci-dereceden faz geçiştir ($T_t = 0.085$). İkincisi ise i_1 ($M_A = 3/2, M_B = 2$) fazından, p ($M_A = M_B = 0$) fazına ikinci-dereceden faz geçiştir ($T_C = 1.26$). Buradan sistemde $i_1 + p$ karma fazının olduğu anlaşılır ve bu durum Şekil 3.2 (c ve d)'nin Şekil 3.3(d) ile karşılaştırılması sonucu açıkça görülebilir.



Şekil 3.2. Karma spin $(3/2, 2)$ Ising sisteminde dinamik mıknatıslanmaların, M_A ve M_B , indirgenmiş sıcaklığa bağlı olarak davranışları. **a)** $d = 0.25$ ve $h = 0.5$ değerleri için sistemde ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir, ($T_C = 1.94$). **b)** $d = -1.0$ ve $h = 0.125$ değerleri için sistemde birinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir, ($T_t = 0.0975$). **c)** Şekil 3.2 (a) ile aynı fakat $d = -0.4375$ ve $h = 0.075$ değerleri için $T_C = 1.26$. **d)** $d = -0.4375$ ve $h = 0.075$ değerleri için sistemde bir biri ardına iki faz geçişi meydana gelmektedir: Birincisi, p fazından i fazına birinci-derece faz geçişi ($T_t = 0.085$), ikincisi i fazından p fazına ikinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir, ($T_C = 1.26$).

3.4 Dinamik Faz Diyagramları

Önceki kesimde DFG sıcaklıkları elde edildi. Bu kesimde ise, indirgenmiş kristal alan etkileşim parametresinin (d) farklı değerleri için (T, h) düzleminde ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin (h) farklı değerleri için (d, T) düzleminde dinamik faz diyagramlarını sunabiliriz. Bu faz diyagramlarında sürekli ve kesikli çizgiler sırasıyla ikinci- ve birinci-derece faz geçiş çizgilerini göstermektedir. (T, h) düzleminde farklı temel topolojide sekiz ve (d, T) düzleminde ise dokuz farklı temel topolojide dinamik faz diyagramı bulundu. Dinamik faz diyagramlarında; içi dolu daireler dinamik üçlü kritik noktayı, B dinamik çift kritik son noktayı, Z dinamik sıfır-sıcaklık kritik noktayı ve QP dinamik dördümlü noktayı göstermektedir.

3.5 (T, h) Düzleminde Dinamik Faz Diyagramları

Bu kesimde, indirgenmiş kristal alan etkileşim parametresinin (d) farklı değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramları sunulacak ve sistemin d parametresine bağlılığı incelenecektir. Bu düzlemdeki dinamik faz diyagramları:

i) Şekil 3.3 (a), $d = 0.25$ değeri için (T, h) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Bu faz diyagramında, indirgenmiş yüksek sıcaklıkta (T) ve indirgenmiş yüksek manyetik genliğinde (h) , paramanyetik (p) faz mevcuttur, h ve T 'nin düşük değerlerinde ise ferrimanyetik-1 (i_1) fazı vardır. Bu iki bölge arasındaki dinamik faz sınırı, $i_1 \rightarrow p$, ikinci-derece faz geçiş çizgisidir. İndirgenmiş sıcaklığın düşük ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin belirli değerlerinde i_1 ve p fazının birlikte bulunduğu $i_1 + p$ karma fazı bulunmaktadır. $i_1 + p$ karma fazı, i_1 ve p temel fazlarından birinci-derece faz geçiş çizgisiyle ayrılmıştır. Sistem aynı zamanda birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerini birleştiren yalnızca bir dinamik üçlü kritik noktaya sahiptir. Bu faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce kinetik spin-1/2 [34] (bu sistemde ferrimanyetik-1 (i_1) faz yerine ferromanyetik (f) faz gelmektedir), spin-1 [64, 71] (bu çalışmalarda i_1 fazının yerine f fazı gelmektedir), spin-3/2 [65, 66] (bu çalışmada i_1 fazının yerine ferromanyetik-3/2 ($f_{3/2}$) fazı gelmektedir) ve spin-2 [57, 67, 72] (bu çalışmalarda i_1 fazı yerine ferromanyetik-2 (f_2) fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir. Ayrıca bu faz diyagramı karma spin $(1/2, 1)$ [21, 30],

karma spin (1, 3/2) [31], karma spin (1/2, 3/2) [32] ve karma spin (1, 2) [73] Ising sistemlerinde de elde edilmiştir.

ii) Şekil 3.3 (b), $d = -0.25$ değeri için (T, h) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Bu faz diyagramı Şekil 3.3 (a)'ya benzemektedir, fakat Şekil 3.3 (a)'dan farklı olarak indirgenmiş sıcaklığın ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin düşük değerlerinde $i_1 + p$ karma fazı meydana gelmektedir. $i_1 + p$ karma fazı ile i_1 fazı arasındaki dinamik faz sınırı, birinci-derece faz geçiş çizgisidir. Bu faz diyagramı tek spin Ising [57, 64, 71] (kaynak 57 ile verilen çalışmada i_1 fazının yerine f_2 fazı, kaynak 64 ile verilen çalışmada i_1 fazının yerine f fazı ve kaynak 71 ile verilen çalışmada ise i_1 ve paramanyetik (p) fazlarının yerine ferromanyetik (f) ve ferrokuadrupolar (fq) fazları gelmektedir) ve karma spin [21, 30, 31, 73] (kaynak 31 ve 73 deki faz diyagramlarında $i + p$ karma fazı yerine $i + a$ karma fazı gelmiştir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir.

iii) Şekil 3.3 (c), $d = -0.375$ değeri için (T, h) düzleminde elde edilen faz diyagramını göstermektedir. Bu faz diyagramı Şekil 3.3 (b)'ye benzemekle birlikte Şekil 3.3 (b)'den farklı olarak indirgenmiş sıcaklığın düşük ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin belirli değerlerinde i_1 ve p fazının birlikte bulunduğu yeni bir $i_1 + p$ karma fazı meydana gelmektedir. Bu fazlar arasındaki dinamik faz sınırları, $i_1 + p \rightarrow p$ ve $i_1 + p \rightarrow i_1$ birinci-derece ve $i_1 \rightarrow p$ ikinci-derece faz geçiş çizgileridir. Sistemde ayrıca bir tane dinamik üçlü kritik nokta mevcuttur. Bu faz diyagramı spin-2 [57] (bu sistemde ferrimanyetik-1 (i_1) faz yerine ferromanyetik-2 (f_2) faz gelmektedir) Ising sisteminde elde edildi.

iv) Şekil 3.3 (d)'de $d = -0.4375$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı Şekil 3.3 (c)'ye benzemekle birlikte Şekil 3.3 (c)'den farklı olarak indirgenmiş sıcaklığın düşük ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin belirli değerlerinde ortaya çıkan üçüncü bir $i_1 + p$ karma faz bölgesi meydana gelmektedir.

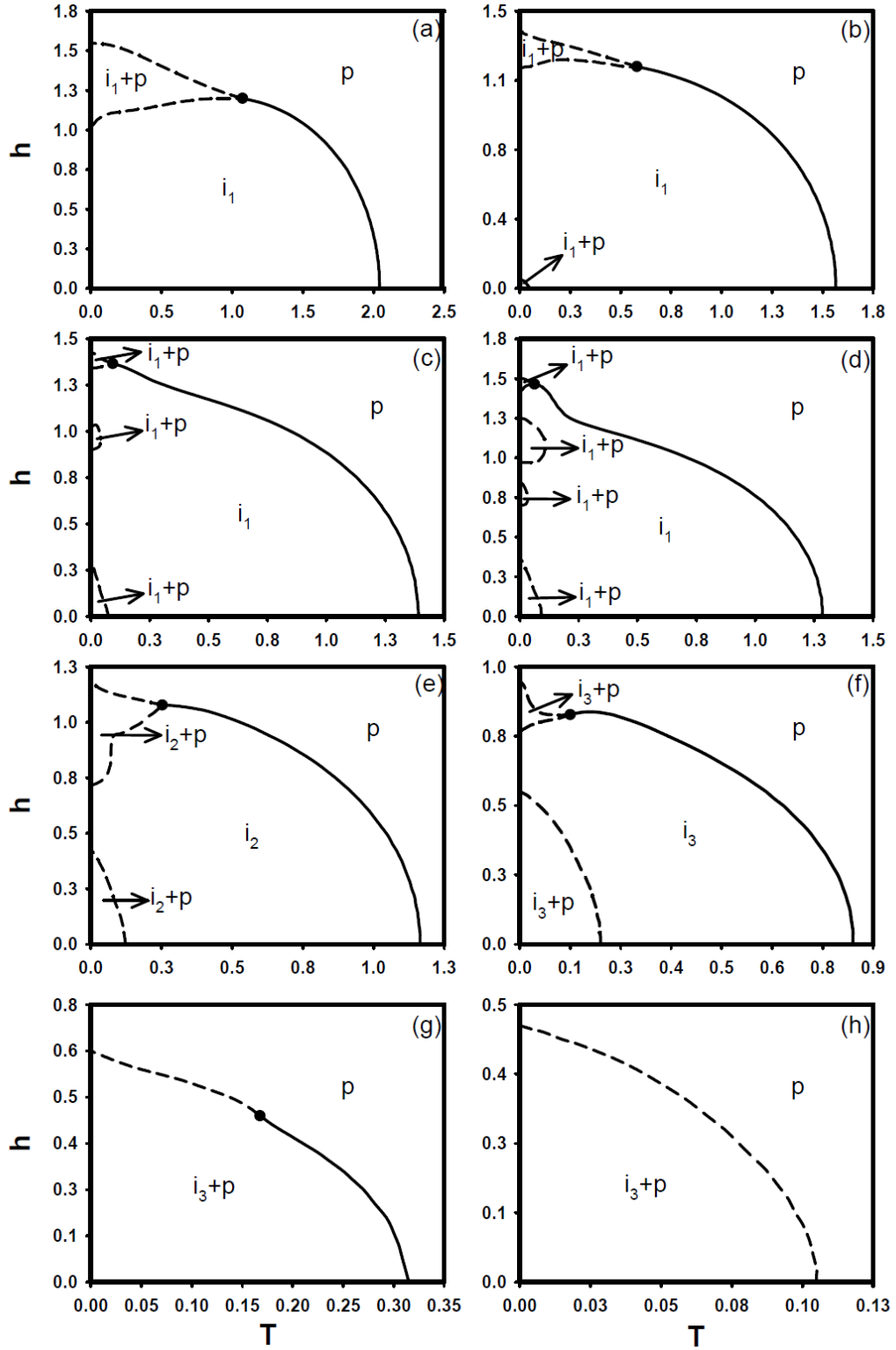
v) Şekil 3.3 (e)'de, $d = -0.5$ değerleri için elde edilen faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı Şekil 3.3 (b)'ye benzemektedir fakat i_1 temel fazı yerine i_2 temel fazı ortaya çıkmaktadır.

vi) Şekil 3.3 (f)'da, $d = -0.625$ değeri için elde edilen faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı Şekil 3.3 (e)'ye benzemektedir fakat i_2 temel fazı yerine i_3 temel fazı ortaya çıkmaktadır.

vii) Şekil 3.3 (g), $d = -0.6875$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Bu faz diyagramında p temel fazının yanı sıra i_3 ve p fazlarının bir arada olduğu $i_3 + p$ karma fazı mevcuttur. Bu karma fazlar arasındaki dinamik faz sınırı, üçlü kritik noktanın altındaki sıcaklıklarda birinci-derece ve üçlü kritik noktanın üstündeki sıcaklıklarda ikinci-derece faz geçiş çizgisidir. Bu faz diyagramı kinetik spin-1 [71] (bu sistemde ferrimanyetik-3 (i_3) faz yerine ferromanyetik (f) faz gelmektedir) ve karma spin (1, 2) [73] (bu çalışmada $i_3 + p$ karma fazının yerine $i+a+p$ karma fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir.

viii) Şekil 3.3 (h), $d = -1.0$ değeri için elde edilmiştir ve sistemde yalnızca p ve $i_3 + p$ fazları mevcuttur. Bu iki faz arasındaki dinamik faz sınırları birinci-derece faz geçiş çizgisidir. Bu faz diyagramı kinetik spin-1 [71] (bu sistemde ferrimanyetik-3 (i_3) faz yerine ferromanyetik (f) faz gelmektedir) ve spin-2 [57, 67, 72] (kaynak 57 ile verilen çalışmada i_3 fazının yerine ferromanyetik-1 (f_1) fazı, kaynak 67 ile verilen çalışmada $i_3 + p$ karma fazının yerine $f_2 + f_q$ karma fazı ve kaynak 72 ile verilen çalışmada ise i_3 fazının yerine f_1 fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir.

Kinetik karma spin (3/2, 2) Ising modelinin (T, h) düzleminde faz diyagramları incelendiğinde, sistemin davranışının kuvvetli bir şekilde d parametresine bağlı olduğu açık olarak görülmektedir.



Şekil 3.3. Karma spin $(3/2, 2)$ Ising sistemi için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramları. **a)** $d=0.25$ için, **b)** $d=-0.25$ için, **c)** $d=-0.375$ için, **d)** $d=-0.4375$ için, **e)** $d=-0.5$ için, **f)** $d=-0.625$ için, **g)** $d=-0.6875$ için ve **h)** $d=-1.0$ için. Dinamik üçlü kritik nokta içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. Kesikli ve sürekli çizgiler sırasıyla birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileridir.

3.6 (d, T) Düzleminde Dinamik Faz Diyagramları

Bu kesimde, bir önceki kesimde yapılan işlemlere benzer işlemler yapılacak ve elde edilen DFG noktalarından faydalanılarak farklı h değerleri için sistemin (d, T) düzleminde dinamik faz diyagramları sunulacaktır. Şekil 3.4-3.5-3.6, h ' nin farklı değerleri için (d, T) düzleminde dinamik faz diyagramlarını göstermektedir ve dokuz temel faz diyagramı elde edilmiştir. Sistemde hiç kritik nokta olmayan faz diyagramı Şekil 3.4, tek kritik nokta olan faz diyagramı Şekil 3.5, iki kritik nokta olan faz diyagramı Şekil 3.6' da gösterilmiştir. Bu faz diyagramlarında kesikli ve sürekli çizgiler sırasıyla birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerini göstermektedir. Dinamik üçlü kritik nokta içi dolu dairelerle gösterilmiştir.

i.) Şekil 3.4 (a), $h = 0.625$ değeri için (d, T) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Paramanyetik (p) faz ile ferrimanyetik-1 (i_1) fazı arasındaki dinamik faz sınırı, $i_1 \rightarrow p$, ikinci-derece faz geçiş çizgisidir ki bu çizgi sürekli olarak devam eder. İndirgenmiş sıcaklığın düşük değerinde, $i_3 + p$ karma fazı bulunmaktadır. $i_3 + p$ karma fazı, i_1 temel fazından birinci-derece faz geçiş çizgisiyle ayrılmıştır. Bununla birlikte sistemde bir tane dinamik sıfır-sıcaklık kritik nokta (Z) ve bir tane dinamik çift kritik son nokta (B) mevcuttur.

ii.) Şekil 3.4 (b), $h = 0.75$ değeri için (d, T) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Bu ilginç bir faz diyagramıdır, öyle ki sistemde bir tane dinamik dördümlü nokta (QP), bir tane dinamik çift kritik son nokta (B) ve bir tane dinamik sıfır-sıcaklık kritik nokta (Z) mevcuttur. Ayrıca sistemde i_1 ve p temel fazlarının yanı sıra, i_1 ve p temel fazlarının bir arada bulunduğu $i_1 + p$ karma fazı, i_2 ve p temel fazlarının bir arada bulunduğu $i_2 + p$ karma fazı, i_3 ve p temel fazlarının bir arada bulunduğu $i_3 + p$ karma fazları mevcuttur. Bu karma fazlar ile i_1 temel fazı arasındaki dinamik faz sınırı birinci-derece faz geçiş çizgisi, i_1 ve p temel fazları arasındaki dinamik faz sınırı ikinci-derece faz geçiş çizgisidir.

iii.) Şekil 3.4 (c), $h = 1.5$ değeri için (d, T) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Bu faz diyagramında p temel fazının yanı sıra $i_1 + p$ karma fazı mevcuttur. Bu fazlar arasındaki dinamik faz sınırı birinci-dereceden faz geçiş

çizgisidir. Bu yüzden sistemde dinamik üçlü kritik nokta mevcut değildir. Bu faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce izotropik BEG [68] (bu sistemde i_1 fazı yerine f fazı meydana gelmektedir) Ising sisteminde elde edilmiştir.

iv.) Şekil 3.5 (a), $h= 0.25$ değeri için (d , T) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. İndirgenmiş sıcaklığın (T) düşük ve indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) düşük değerlerinde, $i_2 + p$ karma fazı, indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin daha düşük değerlerinde, $i_3 + p$ karma fazı bulunmaktadır. Bu faz diyagramında i_1 ve p temel fazlarının yanısıra, T ve d ' nin düşük değerlerinde $i_2 + p$ ve $i_3 + p$ karma fazları mevcuttur. i_1 ve p temel fazları arasındaki dinamik faz sınırı ikinci-derece faz geçiş çizgisi, $i_2 + p$ ve $i_3 + p$ karma fazları i_1 ve p temel fazlarından birinci-derece faz geçiş çizgisiyle ayrılmaktadır. Sistem aynı zamanda her üç birinci-derece faz geçiş çizgisini birleştiren ve birinci-dereceden ikinci-dereceye faz geçişini gösteren yalnızca bir dinamik üçlü kritik nokta sergilemektedir.

v.) Şekil 3.5 (b), $h= 0.5$ değeri için (T , d) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramını göstermektedir. Bu faz diyagramı Şekil 3.5 (a)'ya benzemekle birlikte Şekil 3.5 (a)'dan farklı olarak $i_2 + p$ fazı kaybolmaktadır. Bu faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce spin-1 [52] (bu sistemde ferrimanyetik i_1 ve i_3 fazlarının yerine ferromanyetik (f) fazı gelmektedir), spin-3/2 [69] (bu sistemde $i_3 + p$ karma fazının yerine $f_{3/2+}$ f_q karma fazı, i_1 fazının yerine $f_{3/2}$ fazı gelmektedir) ve karma spin (1/2, 1) [30]; karma spin (1, 2) [73] (bu çalışmada i_3+p karma fazının yerine $i+a$ karma fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir.

vi.) Şekil 3.5 (c)' de, $h = 1.0$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı Şekil 3.5 (a)' ya benzemekle birlikte Şekil 3.5 (a)' dan farkı, $i_3 + p$ yerine $i_2 + p$, $i_2 + p$ yerine $i_1 + p$ karma fazları meydana gelmektedir.

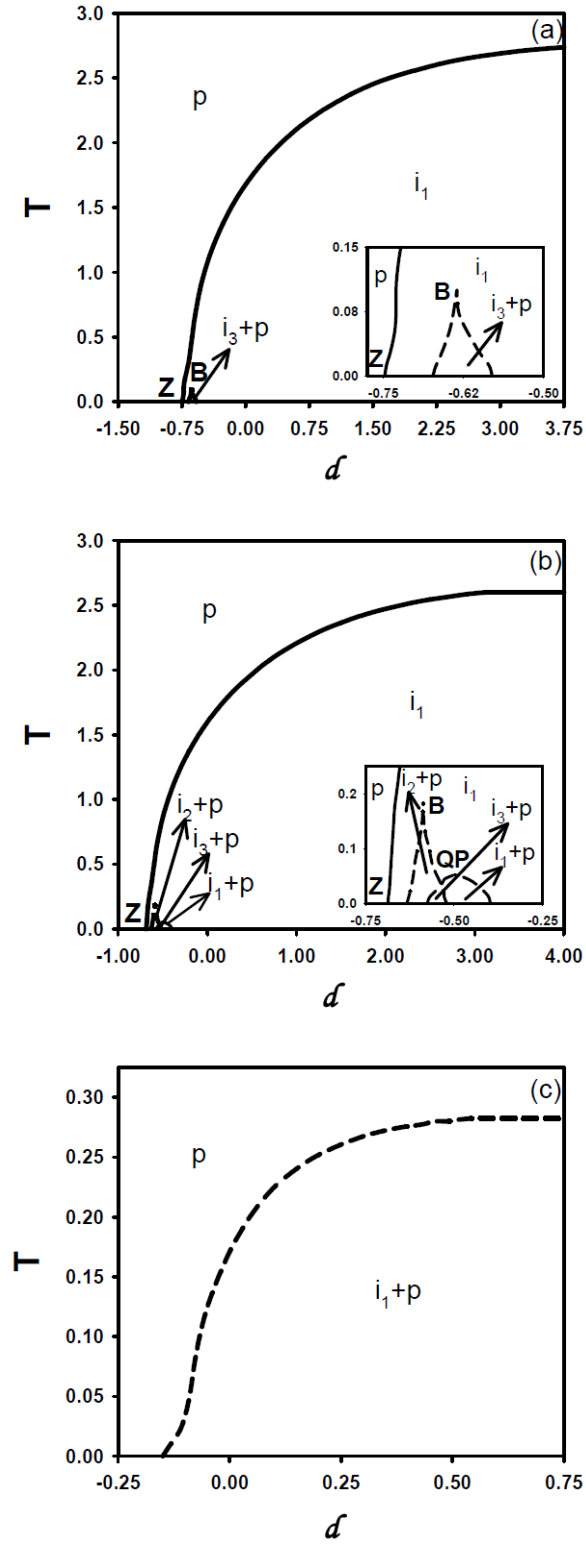
vii.) Şekil 3.5 (d)' de, $h = 1.125$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı Şekil 3.5 (b)'ye benzemekle birlikte aralarında iki temel fark vardır: (1) $i_3 + p$ karma fazı yerine $i_1 + p$ karma fazı meydana gelmektedir. (2) İndirgenmiş sıcaklığın (T) düşük değerlerinde ve indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) sıfır ve sıfırdan büyük değerlerinde $i_1 + p$ karma fazı meydana

gelmektedir. $i_1 + p$ karma fazları i_1 ve p temel fazlarından birinci-derece dinamik faz geçiş çizgisiyle ayrılmaktadır. i_1 ve p temel fazları arasındaki dinamik faz sınırı ise ikinci-derece faz geçiş çizgisidir.

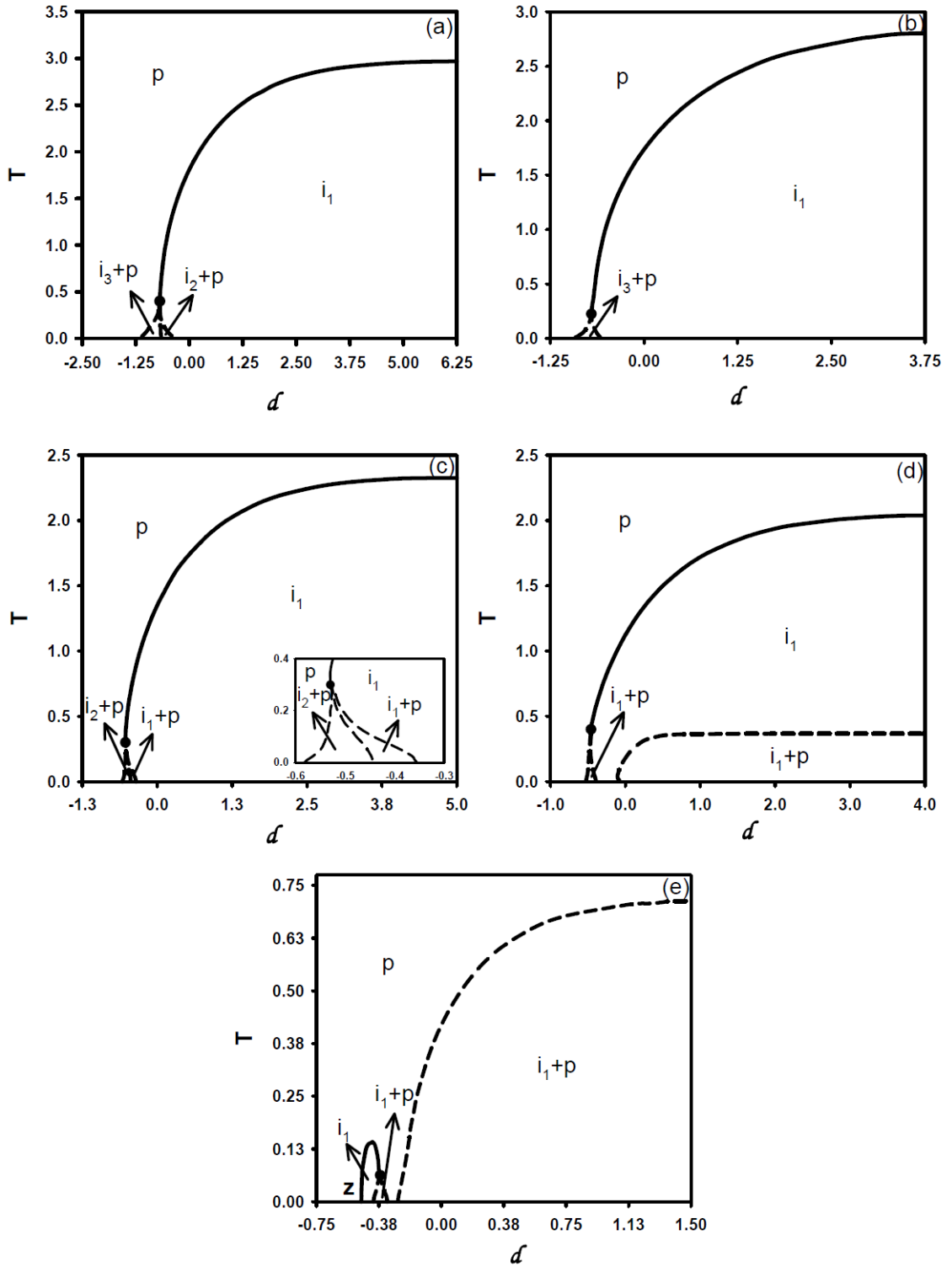
viii.) Şekil 3.5 (e)' de, $h = 1.375$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramında i_1 ve p temel fazlarının yanısıra sistemde iki farklı bölgede $i_1 + p$ karma fazı meydana gelmektedir. i_1 ve p temel fazları arasındaki dinamik faz sınırı ikinci-derece faz geçiş çizgisi, $i_1 + p$ karma fazı ile i_1 ve p temel fazları arasındaki dinamik faz sınırı birinci-derece faz geçiş çizgisidir. Bununla birlikte sistemde bir tane üçlü kritik nokta ve bir tane dinamik sıfır-sıcaklık kritik nokta (Z) mevcuttur.

ix.) Şekil 3.6' da, $h = 1.25$ değeri için elde edilen dinamik faz diyagramı sunulmuştur. Bu faz diyagramı Şekil 3.5 (d)'ye benzemekle birlikte aralarında iki temel fark mevcuttur: (1) $i_1 + p$ fazlarından biri kaybolmaktadır. (2) i_1 ve p temel fazları arasındaki dinamik faz sınırı indirgenmiş sıcaklığın (T) ve indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) çok yüksek ve çok düşük değerlerinde birinci-derece, T ve d^c nin çok yüksek ve çok düşük değerleri dışında ise ikinci-derece faz geçiş çizgisidir. Bu yüzden sistemde iki dinamik üçlü kritik nokta oluşmaktadır.

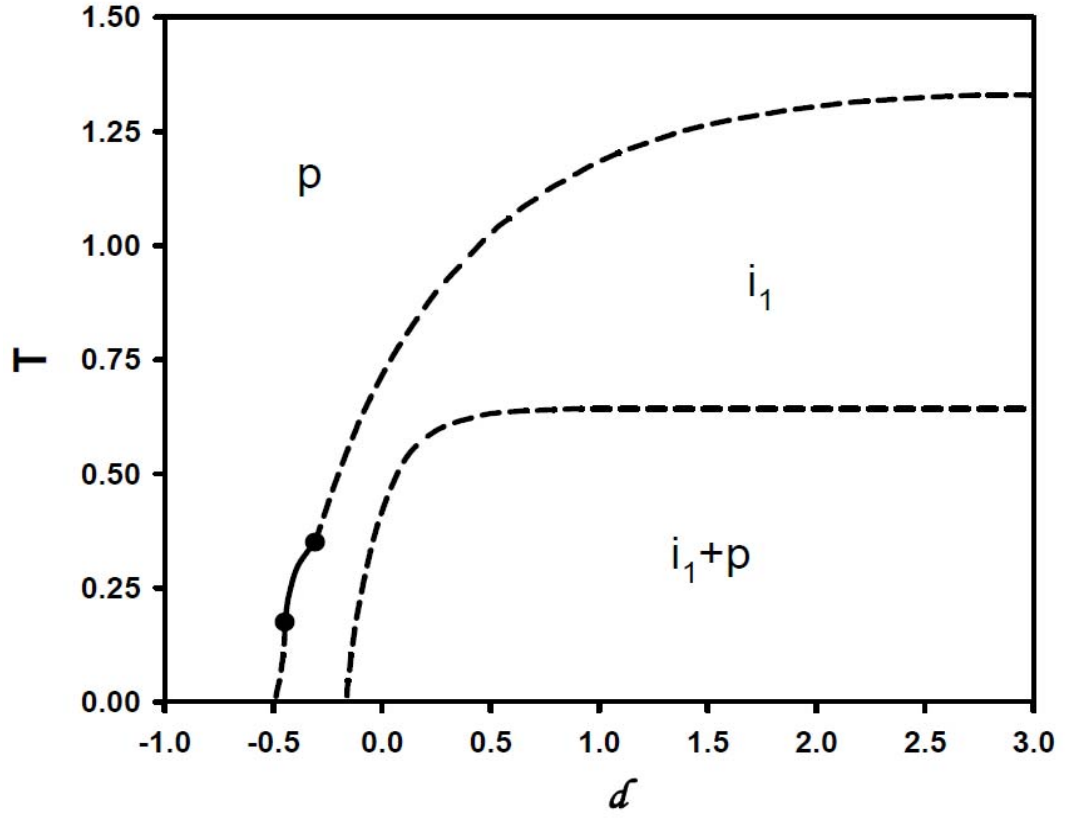
Kinetik karma spin (3/2, 2) Ising modelinin (d , T) düzleminde faz diyagramları incelendiğinde, sistemin davranışının kuvvetli bir şekilde h parametresine bağlı olduğu açık olarak görülmektedir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar Journal of Magnetism and Magnetic Materials dergisinde yayımlanmıştır [74].



Şekil 3.4. Karma spin $(3/2, 2)$ Ising sistemi için (d, T) düzleminde dinamik faz diyagramları. Kesikli ve sürekli çizgiler sırasıyla birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileridir. **a)** $h = 0.625$ için, **b)** $h = 0.75$ için ve **c)** $h = 0.875$ için.



Şekil 3.5. Şekil 3.4 ile aynı fakat sistem bir adet dinamik uçlu kritik nokta içerir ve bu nokta içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. **a)** $h = 0.25$ için, **b)** $h = 0.5$ için, **c)** $h = 1.0$ için, **d)** $h = 1.125$ için ve **e)** $h = 1.375$ için.



Şekil 3.6. Şekil 3.4 ile aynı fakat sistem iki adet dinamik üçlü kritik nokta içerir ve bu noktalar içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. $h = 1.25$ için.

4. BÖLÜM

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, zamana bağlı salınımlı dış manyetik alanın varlığında keyfi bilineer, bikuadratik ve kristal alan etkileşme Hamiltonyenli kinetik karma spin (1/2, 1) ve spin (3/2, 2) Ising modelleri Glauber-tipi stokhastik dinamik kullanılarak incelendi. Ortalama-alan dinamik denklemlerini elde etmek için Glauber geçiş oranları kullanıldı.

Karma spin (1/2, 1) Ising modeli için, öncelikle master denkleminin kullanılmasıyla sistemin dinamik davranışını açıklayan ortalama-alan dinamik denklemleri elde edildi. İlk olarak sistemde mevcut olan fazları elde etmek için indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) farklı değerlerine göre, ortalama mıknatıslanmaların zamana bağlı davranışları Adams-Moulton kestirme düzeltme yönteminin kullanılması ile incelendi ve sistemde iki adet temel faz ve bu temel fazların bir arada bulunduğu bir adet karma faz bulundu. Birinci tip çözüm, paramanyetik (p) faza karşılık gelir. Bu çözümde, alt örgü mıknatıslanmaları m_A ve m_B birbirine eşittir, $m_A(\xi)$ ve $m_B(\xi)$ sıfır değeri civarında salınır ve dış manyetik alana uyum gösterirler. İkinci tip çözüm ferrimanyetik (i) faza karşılık gelir. Bu fazda $m_A = \pm 1/2$ ve $m_B = \pm 1$ değerleri etrafında salınır. Bu durumda alt örgü mıknatıslanmaları dış manyetik alana uymazlar. Ayrıca, sistemde p ve i fazlarının yanında d' nin farklı değerlerine bağlı olarak i + p karma fazı bulundu. Temel fazlar ve karma fazlar Şekil 2. 1'de gösterildi. Daha sonra indirgenmiş manyetik alan genliği (h) ve indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) farklı değerleri için dinamik mıknatıslanmaların, indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak davranışları, Adams-Moulton kestirme düzeltme ve Romberg integrasyon yöntemleri kullanılarak, incelendi ve dinamik faz geçiş sıcaklıkları tespit edildi ve aynı zamanda dinamik faz geçişlerinin doğası (sürekli ve

kesikli) karakterize edildi. Dinamik mıknatıslanmaların sıcaklığa bağlı davranışları Şekil 2. 2' de verildi. Daha sonra sistemin dinamik faz diyagramları (T, h) ve (d, T) düzlemlerinde elde edildi ve sırasıyla Şekil 2. 3 ve Şekil 2. 4'de sunuldu. (T, h) ve (d, T) düzlemlerinde altı farklı temel topolojide dinamik faz diyagramı elde edildi. Ayrıca, dinamik faz diyagramlarında, dinamik üçlü kritik nokta, dinamik sıfır-sıcaklık kritik nokta (Z) ve dinamik kritik sonlu nokta (E) mevcuttur. Kinetik karma spin $(1/2, 1)$ Ising modelinin dinamik faz diyagramları incelendiğinde, sistemin davranışının kuvvetli bir şekilde h ve d parametrelerine bağlı olduğu açık olarak görülmektedir.

Karma spin $(1/2, 1)$ çalışmasında (T, h) ve (d, T) düzlemlerinde elde edilen dinamik faz diyagramlarının bir kısmı daha önce yapılan çalışmalarda elde edilmesine karşın bir kısmı bu tez çalışması kapsamında elde edilmiştir. (T, h) düzleminde elde edilen faz diyagramlarından, Şekil 2.3 (a)'daki faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce kinetik spin-1/2 [34] (bu sistemde ferrimanyetik (i) faz yerine ferromanyetik (f) faz gelmektedir), spin-1 [64, 71] (bu çalışmalarda i fazının yerine f fazı gelmektedir), spin-3/2 [65, 66] (bu çalışmada i fazının yerine ferromanyetik-3/2 ($f_{3/2}$) fazı gelmektedir) ve spin-2 [57, 67, 72] (bu çalışmalarda i fazı yerine ferromanyetik-2 (f_2) fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir. Ayrıca bu faz diyagramı karma spin $(1/2, 1)$ [21, 30], karma spin $(1, 3/2)$ [31], karma spin $(1/2, 3/2)$ [32], karma spin $(1, 2)$ [73] Ising sistemlerinde de elde edilmiştir. Şekil 2.3 (b)'deki faz diyagramı tek spin Ising [57, 64, 71] (kaynak 57 ile verilen çalışmada i fazının yerine f_2 fazı, kaynak 64 ile verilen çalışmada i fazının yerine f fazı ve kaynak 71 ile verilen çalışmada ise i ve p fazlarının yerine f ve f_q fazları gelmektedir) ve karma spin [21, 30, 31, 73] (kaynak 31 ve 73 deki faz diyagramlarında i + p karma fazı yerine i + a karma fazı gelmiştir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir. Şekil 2.3 (f)'deki faz diyagramı kinetik spin-1 [64] (bu sistemde ferrimanyetik (i) faz yerine ferromanyetik (f) faz gelmektedir) ve karma spin $(1/2, 1)$ [21] Ising sistemlerinde elde edilmiştir. Şekil 2.3 (c-e)'deki faz diyagramları ise ilk defa bu tez çalışması kapsamında elde edilmiştir. Diğer taraftan (d, T) düzleminde elde edilen faz diyagramlarından Şekil 2.4 (a)'daki faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce spin-1 [52] (bu sistemde ferrimanyetik (i) fazının yerine ferromanyetik (f) fazı gelmektedir), spin-3/2 [69] (bu sistemde i + p karma fazının yerine $f_{3/2} + f_q$ karma fazı, i fazının yerine $f_{3/2}$ fazı gelmektedir) ve karma spin $(1, 2)$ [73] (bu çalışmada i+p karma fazının yerine i+a karma fazı gelmektedir) Ising

sistemlerinde elde edilmiştir. Şekil 2.4 (e)'deki faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce spin-1 [52] (bu sistemde i fazı yerine f fazı gelmektedir) Ising sisteminde elde edilmiştir. Şekil 2.3 (b-d, f)'deki faz diyagramları ise ilk defa bu sistemde elde edilmiştir.

Karma spin $(3/2, 2)$ Ising modeli için master denkleminin kullanılmasıyla sistemin dinamik davranışını tanımlayan ortalama-alan dinamik denklemleri elde edildi. İlk olarak sistemde mevcut olan fazları elde etmek için indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) farklı değerlerine göre, ortalama mıknatıslanmaların zamana bağlı davranışları, Adams-Moulton kestirme düzeltme yönteminin kullanılması ile incelendi ve sistemde dört adet temel faz ve bu temel fazların bir arada bulunduğu üç adet karma faz bulundu. Birinci tip çözüm, paramanyetik (p) faza karşılık gelir. Bu çözümde, alt örgü mıknatıslanmaları m_A ve m_B birbirine eşittir $m_A(\xi)$ ve $m_B(\xi)$ sıfır değeri civarında salınır ve dış manyetik alana uyum gösterirler. İkinci tip çözüm ferrimanyetik (i) faza karşılık gelir. Bu fazda $m_A = \pm 3/2$ ve $m_B = \pm 2$ değerleri etrafında salınıyorsa ferrimanyetik-1 (i_1), $m_A = \pm 3/2$ ve $m_B = \pm 1$ değerleri etrafında salınıyorsa ferrimanyetik-2 (i_2), $m_A = \pm 1/2$ ve $m_B = \pm 1$ değerleri etrafında salınıyorsa ferrimanyetik-3 (i_3) fazı olarak adlandırılır. Bu durumda ortalama mıknatıslanmalar dış manyetik alana uymazlar. Sistemde p , i_1 , i_2 ve i_3 fazlarının yanında d 'nin farklı değerlerine bağlı olarak $i_1 + p$, $i_2 + p$ ve $i_3 + p$ karma fazları bulundu. Temel fazlar ve karma fazlar Şekil 3. 1'de gösterildi. Daha sonra, indirgenmiş manyetik alan genliği (h) ve indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) farklı değerleri için dinamik mıknatıslanmaların, indirgenmiş sıcaklığın bir fonksiyonu olarak davranışları, Adams-Moulton kestirme düzeltme ve Romberg integrasyon yöntemleri kullanılarak, incelendi ve dinamik faz geçiş sıcaklıkları tespit edildi ve aynı zamanda dinamik faz geçişlerinin doğası (sürekli ve kesikli) karakterize edildi. Dinamik mıknatıslanmaların indirgenmiş sıcaklığa bağlı davranışları Şekil 3. 2' de verildi. Daha sonra sistemin dinamik faz diyagramları (T, h) ve (d, T) düzlemlerinde, Şekil 3. 3 ve Şekil 3. 4-6'da sunuldu. (T, h) düzleminde sekiz ve (d, T) düzleminde dokuz tane farklı temel topolojide dinamik faz diyagramı elde edildi. Ayrıca, dinamik faz diyagramlarında, dinamik üçlü kritik nokta, B dinamik çift kritik son nokta, Z dinamik sıfır-sıcaklık kritik nokta ve QP dinamik dördümlü nokta mevcuttur. Kinetik karma spin $(3/2, 2)$ Ising modelinin dinamik faz

diyagramları incelendiğinde, sistemin davranışının kuvvetli bir şekilde h ve d parametrelerine bağlı olduğu açık olarak görülmektedir.

Karma spin $(3/2, 2)$ Ising modelinin (T, h) düzleminde elde edilen faz diyagramlarından, Şekil 3.3 (a)'daki faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce kinetik spin-1/2 [34] (bu sistemde ferrimanyetik-1 (i_1) faz yerine ferromanyetik (f) faz gelmektedir), spin-1 [64, 71] (bu çalışmalarda i_1 fazının yerine f fazı gelmektedir), spin-3/2 [65, 66] (bu çalışmada i_1 fazının yerine ferromanyetik-3/2 ($f_{3/2}$) fazı gelmektedir) ve spin-2 [57, 67, 72] (bu çalışmalarda i_1 fazı yerine ferromanyetik-2 (f_2) fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir. Ayrıca bu faz diyagramı karma spin $(1/2, 1)$ [21, 30], karma spin $(1, 3/2)$ [31], karma spin $(1/2, 3/2)$ [32], karma spin $(1, 2)$ [73] Ising sistemlerinde de elde edilmiştir. Şekil 3.3 (b)'deki faz diyagramı tek spin Ising [57, 64, 71] (kaynak 57 ile verilen çalışmada i_1 fazının yerine f_2 fazı, kaynak 64 ile verilen çalışmada i_1 fazının yerine f fazı ve kaynak 71 ile verilen çalışmada ise i_1 ve p fazlarının yerine f ve fq fazları gelmektedir) ve karma spin [21, 30, 31, 73] (kaynak 31 ve 73 deki faz diyagramlarında $i_1 + p$ karma fazı yerine $i + a$ karma fazı gelmiştir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir. Şekil 3.3 (c)'deki faz diyagramı spin-2 [57] (bu sistemde ferrimanyetik-1 (i_1) faz yerine ferromanyetik-2 (f_2) faz gelmektedir) Ising sisteminde elde edildi. Şekil 3.3 (g)'deki faz diyagramı kinetik spin-1 [71] (bu sistemde ferrimanyetik-3 (i_3) faz yerine ferromanyetik (f) faz gelmektedir) ve karma spin $(1, 2)$ [73] (bu çalışmada $i_3 + p$ karma fazının yerine $i + a + p$ karma fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir. Şekil 3.3 (h)'deki faz diyagramı kinetik spin-1 [71] (bu sistemde ferrimanyetik-3 (i_3) faz yerine ferromanyetik (f) faz gelmektedir) ve spin-2 [57, 67, 72] (kaynak 57 ile verilen çalışmada i_3 fazının yerine ferromanyetik-I (f_1) fazı, kaynak 67 ile verilen çalışmada $i_3 + p$ karma fazının yerine $f_2 + fq$ karma fazı ve kaynak 72 ile verilen çalışmada ise i_3 fazının yerine f_1 fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmiştir. Şekil 3.3.(d)'deki faz diyagramı ise ilk defa bu sistemde elde edilmiştir. Diğer taraftan (d, T) düzleminde elde edilen faz diyagramlarından Şekil 3.4 (c)'deki faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce izotropik BEG [68] (bu sistemde i_1 fazı yerine f fazı meydana gelmektedir) Ising sisteminde elde edilmiştir. Şekil 3.5 (b) 'deki faz diyagramına benzer faz diyagramı daha önce spin-1 [52] (bu sistemde ferrimanyetik i_1 ve i_3 fazlarının yerine ferromanyetik (f) fazı gelmektedir), spin-3/2 [69] (bu sistemde $i_3 + p$ karma fazının

yerine $f_{3/2}+$ fq karma fazı, i_1 fazının yerine $f_{3/2}$ fazı gelmektedir) ve karma spin $(1/2, 1)$ [30]; karma spin $(1, 2)$ [73] (bu çalışmada $i_3 + p$ karma fazının yerine $i + a$ karma fazı gelmektedir) Ising sistemlerinde elde edilmesine rağmen Şekil 3.4 (a ve b), Şekil 3.5 (a, c-e), Şekil 3.6' daki faz diyagramları ilk defa bu sistemde elde edilmiştir.

Son olarak, belirtmek gerekir ki, spin dalgalanmalarının ilişkileri (correlations) hesaplamalara katılmadığından dolayı dinamik ortalama-alan yaklaşıklığında (DOAY) bazı birinci-dereceden faz geçiş sıcaklıkları ve özel noktalar yapay birinci-dereceden faz geçiş sıcaklıkları ve yapay özel noktalar olabilir. Bu yüzden sistemlerimiz, dinamik Monte Carlo (DMC) simülasyonu gibi pek çok fiziksel sistemin dengesiz veya dinamik davranışlarını incelemeye başarılı bir şekilde kullanılmış ve kullanılmakta olan bir metotla daha kesin olarak incelenebilir. Bu yöntemle çok ayrıntılı hesaplamalar yapıldığından dolayı birinci-derece faz geçişleri ve özel noktalar dinamik ortalama-alan yaklaşıklığına (DOAY) göre çok daha hassas hesaplanabilir. Bu yüzden DFG çalışmaları, daha fazla bilgisayar zamanı ve kapasitesi isteyen dinamik Monte Carlo (DMC) hesaplamaları ile incelenmesi önem arz etmektedir. Bununla beraber bu çalışmamız DMC hesaplamalarına temel oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

1. 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.
2. Coronado, E., Dekhais, P., Gatteschi, D., Miller, J. S., *Molecular Magnetism: From Molecular Assemblies to the Devices* (NATO ASI Series E, Vol. 321), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996
3. Vieira, A. P., de Carvalho, J. X., Salinas, S. R., Phase diagram of a random-anisotropy mixed-spin Ising model, *Phys. Rev. B*, 63, 184415, 2001.
4. Kaneyoshi, T., Surface magnetism of a semi-infinite spin-1/2 Ising system with decorated spin-S atomson a surface, *Phys. Rev. B*, 55, 12497, 1997.
5. Albayrak, E., Keskin, M., Mixed spin-1/2 and spin-1 Blume-Capel Ising ferrimagnetic system on the Bethe lattice, *J. Magn. Magn. Mater.*, 261, 196, 2003.
6. Kasama, T., Muraoka, Y., Idogaki, T., Molecular field and Monte Carlo study for the mixed-spin axial next-nearest-neighbor Ising model, *Phys. Rev. B*, 73, 214411, 2006.
7. Belmamoun, Y., Kerouad, M., Phase transition and magnetic properties of a bond-diluted mixed spin-1 and spin-1/2 Ising model with the uniaxial and biaxial single-ion anisotropy, *Phys. Scr.*, 77, 1, 2008.
8. Schofield, S. L., Bowers, R. G., High-temperature series expansion analyses of mixed-spin Ising model, *J. Phys. A: Math. Gen.* 14, 2163, 1981.
9. Kaneyoshi, T., Theory of surface phase diagrams in semi-infinite mixed Ising alloys, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 56, 2886, 1987.
10. Plascak, J. A., Multicritical points in the ferromagnetic binary Ising model, *Physica A*, 198, 655, 1993.
11. Buendía, G. M., Novonty, M. A., Numerical study of a mixed Ising ferrimagnetic system, *J. Phys.: Condens. Matter*, 9, 5951, 1997.
12. Gonçalves, L. L., Uniaxial anisotropy effects in the Ising model: an exactly soluble model, *Phys. Scr.*, 32, 248, 1985.
13. Gonçalves, L.L., Uniaxial anisotropy effects in the Ising model: an exactly soluble model, *Phys. Scr.*, 33, 192, 1986.

14. Da Silva, N. R., Salinas, S. R., Mixed-spin Ising model on the Bethe lattice, *Phys. Rev. B*, 44, 852, 1991.
15. Albayrak, E., Exact calculation of the magnetic susceptibility and the specific heat of the mixed spin-1/2 and spin-1 system on the bethe lattice, *Int. J. Mod. Phys. B*, 18, 3959, 2004.
16. Ekiz, C., Erdem, R., Effect of crystal-field potential on compensation temperature of a mixed spin-1/2 and spin-1 Ising ferrimagnetic system, *Phys. Lett. A*, 352, 291, 2006.
17. Ekiz, C., Ferrimagnetism in the mixed spin Ising system on a two-fold Cayley tree, *J. Magn. Magn. Mater*, 293, 759, 2005.
18. Albayrak, E., Bulut, T., Yilmaz, S., Critical and compensation temperatures of the Ising bilayer system consisting of Spin-1/2 and Spin-1 atoms, *J. Stat. Phys.*, 127, 967, 2007.
19. Albayrak, E., Yilmaz, S., Spin-1/2 and spin-1 Ising model with crystal field on a bilayer Bethe lattice, *Physica A*, 387, 1173, 2008.
20. Ekiz, C., Influence of anisotropic crystal field on a ferrimagnetic mixed-spin bilayer system, *Physica A*, 387, 1185, 2008.
21. Buendía, G. M., Machado, E., Kinetics of a mixed Ising ferrimagnetic system, *Phys. Rev. E*, 58, 1260, 1998.
22. Godoy, M., Figueiredo, W., Mixed-spin Ising model with one- and two-spin competing dynamics, *Phys. Rev. E*, 61, 218, 2000.
23. Godoy, M., Figueiredo, W., Critical behavior of the mixed-spin Ising model with two competing dynamics, *Phys. Rev. E*, 65, 026111, 2002.
24. Godoy, M., Figueiredo, W., Nonequilibrium antiferromagnetic mixed-spin Ising model, *Phys. Rev. E*, 66, 036131, 2002.
25. Figueiredo, W., Godoy, M., Leite, V. S., Compensation temperature of the mixed-spin Ising model on the hexagonal lattice, *Braz. J. Phys.*, 34, 392-394, 2004.
26. Godoy, M., Figueiredo, W., Competing dynamics in the mixed-spin Ising model with crystal-field interaction, *Physica A*, 339, 392, 2004.
27. Ekiz, C., Keskin, M., Magnetic properties of the mixed spin-1/2 and spin-1 Ising ferromagnetic system, *Physica A*, 317, 517, 2003.

28. Bobák, A., Dely, J., Phase transitions and multicritical points in the mixed spin-3/2 and spin-2 Ising system with a single-ion anisotropy, *J. Magn. Magn. Mater.*, 310, 1419-1421, 2007.
29. Albayrak, E., The critical and compensation temperatures for the mixed spin-3/2 and spin-2 Ising model, *Physica B-Condensed Matter*, 391, 47-53, 2007.
30. Keskin M., Canko O., Polat Y., Dynamic phase transitions in the kinetic mixed spin-1/2 and spin-1 Ising ferrimagnetic system under time-dependent magnetic field, *J. Korean Phys. Soc.*, 53, 497, 2008.
31. M. Keskin, E. Kantar, O. Canko, Kinetics of a mixed spin-1 and spin-3/2 Ising system under a time-dependent oscillating magnetic field, *Phys. Rev. E*, 77, 051130, 2008.
32. Deviren, B., Keskin, M., Canko, O., Kinetics of a mixed spin-1/2 and spin-3/2 Ising ferrimagnetic model, *J. Magn. Magn. Mater.*, 321, 458-466, 2009.
33. Glauber, R.J., Time-dependent statistics of the Ising model. *Journal of Mathematical Physics*, 4, 294-307, 1963.
34. Tomé, T., Oliveira, M., Dynamic phase transition in the kinetic Ising model under a time-dependent oscillating field. *Physical Review A*, 41, 4251-4254, 1990.
35. Mendes, J.F.F., Lage, E.J.S., Dynamics of the infinite ranged Potts model, *Journal of Statistical Physics*, 64, 653-672, 1991.
36. Acharyya, M., Nonequilibrium phase transition in the kinetic Ising model: Critical slowing down and the specific-heat singularity. *Physical Review E*, 56, 2407-2411, 1997;
37. Chatterjee, A., Chakrabarti, B.K., Fluctuation cumulant behavior for the field-pulse-induced magnetization-reversal transition in Ising models. *Physical Review E*, 67, 046113-046117, 2003.
38. Sides, S.W., Rikvold, P.A., Novotny, M.A., Kinetic Ising model in an oscillating field: Finite-size scaling at the dynamic phase transition, *Physical Review Letters*, 81, 834-837, 1998.
39. Sides, S.W., Rikvold, P.A., Novotny, M.A., Kinetic Ising model in an oscillating field: Avrami theory for the hysteretic response and finite-size scaling for the dynamic phase transition, *Physical Review E*, 59, 2710-2729, 1999.

40. Korniss, G., White, C.J., Rikvold, P.A., Novotny, M.A., Dynamic phase transition, universality, and finite-size scaling in the two-dimensional kinetic Ising model in an oscillating field, *Phys. Rev. E*, 63, 016120-016124, 2001.
41. Korniss, G., Rikvold, P.A., Novotny, M.A., Absence of first-order transition and tricritical point in the dynamic phase diagram of a spatially extended bistable system in an oscillating field, *Physical Review E*, 66, 056127-056138, 2002.
42. Chakrabarti, B.K., Acharyya, M., Dynamic transitions and hysteresis, *Reviews of Modern Physics*, 71, 847-859, 1999.
43. Godoy, M., Figueiredo, W., Kinetic phase transition in the mixed-spin Ising model, *Brazilian Journal of Physics*, 34, 422-424, 2004.
44. Krawiecki, A., Dynamical phase transition in the Ising model on a scale-free network, *International Journal of Modern Physics B*, 19, 4769-4776, 2005.
45. Zimmer, M.F., Ising model in an oscillating magnetic field: Mean-field theory, *Physical Review E*, 47, 3950-3955, 1993.
46. Acharyya, M., Chakrabarti, B.K., Response of Ising systems to oscillating and pulsed fields: Hysteresis, ac, and pulse susceptibility, *Physical Review B*, 52, 6550-6568, 1995.
47. Acharyya, M., Nonequilibrium phase transition in the kinetic Ising model: Is the transition point the maximum lossy point, *Physical Review E*, 58, 179-186, 1998.
48. Fujisaka, H., Tutu, H., Rikvold, P.A., Dynamic phase transition in a time-dependent Ginzburg-Landau model in an oscillating field, *Physical Review E*, 63, 036109-036119, 2001.
49. Tutu, H., Fujiwara, N., Landau theory of dynamic phase transitions and systematic perturbation expansion method for getting phase diagrams, *Journal of the Physical Society of Japan*, 73, 2680-2696, 2004.
50. Khorrami, M., Aghamohammadi, A., Dynamical phase transition of a one-dimensional kinetic Ising model with boundaries, *Physical Review E*, 65, 056129-056133, 2002.
51. Keskin, M., Canko, O., Kantar, E., Dynamic dipole and quadrupole phase transitions in the kinetic spin-1 model, *International Journal of Modern Physics C*, 17, 1239-1255, 2006.

52. Keskin M., Canko O., Temizer Ü., Dynamic phase transition in the kinetic spin-1 Blume-Capel model: Phase diagrams in the temperature and crystal-field interaction plane, *Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP)*, 104, 936-942, 2007.
53. Keskin, M., Canko, O., Kırak, M., Dynamic dipole and quadruple phase transition in the kinetic spin-3/2 model, *Journal of Statistical Physics*, 127, 359-380, 2007.
54. Keskin, M., Canko, O., Deviren, B, Dynamic phase transition in the kinetic spin-3/2 Blume–Capel model: Phase diagrams in the temperature and crystal-field interaction plane, *J. Magn. Magn. Mater.*, 313, L1-L5, 2007.
55. Keskin M., Canko, O., Kırak, M., Phase diagrams of the kinetic metamagnetic spin-3/2 Blume–Capel model in an oscillating external field, *Physica Status Solidi (b)*, 244, 3775-3788, 2007.
56. Deviren, B., Keskin, M., Canko, O., Dynamic phase transition and multicritical dynamic phase diagrams of the kinetic spin-3/2 Blume-Emery-Griffiths model with repulsive biquadratic coupling under a time-dependent oscillating external field, *Computer Physics Communications*, 178, 420-437, 2008.
57. Keskin, M., Canko, O., Ertaş, M., Kinetics of the spin-2 Blume-Capel model under a time-dependent oscillating external field, *Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP)*, 105, 1190-1197, 2007.
58. Jiang, Q., Yang, H. N., Wang, G. C., Scaling and dynamics of low-frequency hysteresis loops in ultrathin Co films on a Cu (001) surface, *Physical Review B*, 52 14911-14916, 1995.
59. Jiang, Q., Yang, H. N., Wang, G. C., Field dependent resonance frequency of hysteresis loops in a few monolayer thick Co/Cu(001) films, *Journal of Applied Physics*, 79, 5122-5124, 1996.
60. Kleemann, W., Braun, T., Dec, J., Petravic, O., Dynamic phase transitions in ferroic systems with pinned domain walls, *Phase Transition*, 78, 811-816, 2005.
61. Kibble T. W. B., Topology of cosmic domains and strings, *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 9, 1387-1398, 1976.

62. Kibble T. W. B., Some implications of a cosmological phase transition, *Physics Reports*, 67, 183-199 1980.
63. Damski, B., Zurek, W.H., Dynamics of a quantum phase transition in a ferromagnetic Bose-Einstein condensate, *Physical Review Letters*, 99, 130402-130405, 2007.
64. Keskin, M., Canko, O., Temizer, Ü., Dynamic phase transition in the kinetic spin-1 Blume-Capel model under a time-dependent oscillating external field, *Physical Review E*, 72, 036125-036135, 2005.
65. Keskin, M., Canko, O., Deviren, B., Dynamic phase transition in the kinetic spin-3/2 Blume-Capel model under a time-dependent oscillating external field, *Physical Review E*, 74, 011110-011119, 2006.
66. Canko, O., Deviren, B., Keskin M., Dynamic phase transition in the spin-3/2 Blume-Emery-Griffiths model in an oscillating field, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 18, 6635-6653, 2006.
67. Ertaş, M., Canko, O., Keskin, M., Dynamic phase transition in the kinetic spin-2 Blume-Emery-Griffiths model in an oscillating field, *J. Magn. Magn. Mater.*, 320, 1765-1774, 2008.
68. Keskin M., Temizer Ü., Canko O., Kantar E., Dynamic phase transition in the kinetic Blume-Emery-Griffiths model: Phase diagrams in the temperature and interaction parameters planes, *Phase Transition*, 80, 855-866, 2007.
69. Keskin, M., Deviren, B., Canko, O., Kırak M., Dynamic phase transition in the kinetic spin-3/2 Blume-Emery-Griffiths model: Phase diagram in the temperature and interaction parameters planes, *Acta Physica Polonica B*, 38, 2445-2457, 2007.
70. Temizer, Ü., Kantar, E., Canko, O., Keskin, M., Multicritical dynamical phase diagrams of the kinetic Blume-Emery-Griffiths model with repulsive biquadratic coupling in an oscillating field, *J. Magn. Magn. Mater.*, 320, 17871801, 2008.
71. Canko, O., Temizer, Ü., Keskin, M., Dynamic phase transition in the kinetic blume-emery-griffiths model in an oscillating external field, *Int. Journal of Modern Phys. C*, 17, 1717- 1737, 2006.
72. Ertaş, M., Keskin, M., Canko, O., Dynamic phase transition and multicritical dynamic phase diagrams of the kinetic spin-2 Ising model with repulsive

- biquadratic coupling under a time-dependent oscillating external field, J. Korean Phys. Soc., 53, 1807- 1820, 2008.
73. Keskin, M., Ertaş, M., Canko, O., Dynamic phase transitions and dynamic phase diagrams in the kinetic mixed spin-1 and spin-2 Ising system in an oscillating magnetic field, Physica Scripta, 79, 025501, 2009.
74. Keskin M., Polat Y., Phase diagrams of a nonequilibrium mixed spin-3/2 and spin-2 Ising system in an oscillating magnetic field, J. Magn. Magn. Mater., 321, 3905, 2009.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: Yasin POLAT

Doğum yeri: Nevşehir

Doğum Tarihi: 09. 05. 1985

İlk ve orta öğrenimini Nevşehir'in Nar kasabasında tamamladı. Lise öğrenimini Nevşehir'de 2000 Evler Süper Lisesi'nde tamamladı. 2003 yılında Erciyes Üniversitesi Yozgat Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü kazandı. 2004 yılında Erciyes Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümüne yatay geçiş yaptı ve bu bölümü 2007 yılında bitirdi ve aynı yıl Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. "Journal of the Korean Physical Society" dergisinde ve "Journal of Magnetism and Magnetic Materials" dergisinde yayımlanan iki adet ve hazırlanmakta olan bir adet makalesi vardır. Ayrıca, Onyedinci İstatistik Fizik Günleri'nde bir tane bildiri sundu.

İletişim Bilgileri:

Adres: Nar Yeni Mah. Möhter yolu sok.- 4 No:5

Merkez/ NEVŞEHİR

Cep Tel: 0536 955 72 99

E Mail: yasinpolat2001@hotmail.com