

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

**Yüksek Lisans Tezi**

**FARKLI ÖRGÜ YAPILARI ÜZERİNDE KARMA SPİN-1  
VE SPİN-5/2 ISING SİSTEMİNİN DİNAMİK MANYETİK  
ÖZELLİKLERİ**

**Leyla DEMİR**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Ümüt TEMİZER**

**Yozgat 2018**



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

**Yüksek Lisans Tezi**

**FARKLI ÖRGÜ YAPILARI ÜZERİNDE KARMA SPİN-1  
VE SPİN-5/2 ISING SİSTEMİNİN DİNAMİK MANYETİK  
ÖZELLİKLERİ**

**Leyla DEMİR**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Ümüt TEMİZER**

**Bu çalışma, Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi  
tarafından 6601-FBE/17-113 kodu ile desteklenmiştir.**

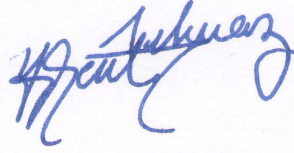
**Yozgat 2018**

T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün Fizik Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 70110514004 numaralı öğrencisi Leyla DEMİR 'in hazırladığı “**FARKLI ÖRGÜ YAPILARI ÜZERİNDE KARMA SPİN-1 VE SPİN-5/2 ISING SİSTEMİNİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELLİKLERİ**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 16/03/2018 Cuma günü saat 10:30'da yapılmış, tezin onayına oy birliği ile karar verilmiştir.

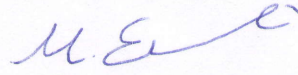
**Başkan** : Prof. Dr. Sait YILMAZ



**Jüri Üyesi (Danışman)** : Doç. Dr. Ümüt TEMİZER



**Jüri Üyesi** : Doç. Dr. Mehmet ERTAŞ



**ONAY:**

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 22.03./18. tarih ve 11... sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

22.03.18

  
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL  
Müdür

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR LİSTESİ.....	x
<b>1.GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. İKİ TABAKALI KARE ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN-1 VE SPİN-5/2 ISING SİSTEMİNİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELLİKLERİ .....</b>	<b>5</b>
2.2. Modelin Formülasyonu.....	6
2.3. Nümerik Sonuçlar.....	15
2.3.1. İki Tabakalı Kare Örgü İçin Sistemde Mevcut Olan Fazların Elde Edilmesi .....	15
2.3.2. İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Fazlar Arasındaki Dinamik Faz Geçiş Sıcaklıklarının Hesaplanması .....	19
2.3.3. Dinamik Faz Diyagramları .....	22
2.3.3.1 FM/FM Etkileşmesi İçin Sistemin Dinamik Faz Diyagramları.....	22
2.3.3.2. FM/AFM Etkileşmesi İçin Sistemin Dinamik Faz Diyagramları.....	27
2.3.3.3. AFM/AFM Etkileşmesi İçin Sistemin Dinamik Faz Diyagramları.....	30
2.3.3.4. Dinamik Faz Diyagramları Üzerinde Salınımlı Alan Frekansının Etkisi .....	33
<b>3. İKİ TABAKALI BAL PETEĞİ ÖRGÜSÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN-1 VE SPİN-5/2 ISING SİSTEMİNİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>35</b>
3.1. Modelin Tanımlanması ve Formülasyonu.....	35
3.2. Nümerik Sonuçlar .....	37
3.2.1. Dinamik Faz Diyagramları.....	38
3.2.1.1. $J_3 > 0$ için Elde Edilen Dinamik Faz Diyagramları .....	38
3.2.1.2. $J_3 < 0$ için Elde Edilen Dinamik Faz Diyagramları .....	41
<b>4. SONUÇ VE TARTIŞMA .....</b>	<b>45</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>48</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>53</b>

# FARKLI ÖRGÜ YAPILARI ÜZERİNDE KARMA SPİN-1 VE SPİN-5/2 ISING SİSTEMİNİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELLİKLERİ

**Leyla DEMİR**

**Bozok Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**2018; Sayfa:53**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ümüt TEMİZER**

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, karma spin-1 ve spin-5/2 Ising sisteminin dinamik manyetik özellikleri iki tabakalı kare örgü ve AB istiflenmiş geometrili iki tabakalı bal peteği örgüsü üzerinde Glauber geçiş oranları temelli ortalama-alan yaklaşımı stokastik dinamik kullanılarak ayrıntılı olarak incelendi. İlk olarak sistemin dinamik davranışını tanımlayan diferansiyel denklemler, Master denklemi ve Glauber geçiş oranları kullanılarak elde edildi. Bu denklemler nümerik olarak çözüldü ve ortalama mıknatıslanmaların zamanın bir fonksiyonu olarak davranışının incelenmesiyle sistemde mevcut olan fazlar bulundu. Daha sonra, dinamik mıknatıslanmaların, sıcaklığa bağlı davranışı incelendi ve sistemde mevcut olan fazlar arasındaki dinamik faz geçiş sıcaklıkları tespit edildi. Her iki örgü sistemi için, dinamik faz diyagramları sistemdeki fiziksel parametrelerin farklı değerleri için birçok farklı düzlem üzerinde sunuldu. Son olarak, dinamik faz diyagramları üzerine salınımlı alan frekansının etkisi incelendi ve dinamik faz diyagramlarının frekansa çok güçlü bir şekilde bağlı olduğu görüldü.

**Anahtar Kelimeler:** Karma Spin-1 ve Spin-5/2 Ising Sistemi, Master Denklemi, Glauber Dinamiği, Dinamik Faz Geçiş Sıcaklıkları, Dinamik Faz Diyagramları.

# **DYNAMIC MAGNETIC FEATURES OF THE MIXED SPIN-1 AND SPIN-5/2 ISING SYSTEM ON THE DIFFERENT LATTICE STRUCTURES**

**Leyla DEMİR**

**Bozok University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics  
Master of Science Thesis**

**2018; Page:53**

**Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ümüt TEMİZER**

## **ABSTRACT**

In this thesis study, the dynamic magnetic properties of the mixed spin-1 and spin-5/2 Ising system on the bilayer square lattice and bilayer honeycomb lattice with AB stacking geometry are investigated in detail by using the Glauber-type stochastic dynamics based on the mean-field approximation. Firstly, the differential equations which is describing the dynamic behavior of the system are obtained by making use of the Master equation and Glauber transition rates. These equations are solved numerically and the phases existing in the sytem are found by investigating of the average magnetizations as a function of time. Then, the temperature-dependence behaviors of the dynamic magnetizations are studied and the dynamic phase transition temperatures among the existing phases are determined. For both lattice systems, the dynamic phase diagrams are presented on many different planes for various values of the physical parameters in the system. Finally, the effect of the oscillating field frequency on the dynamic phase diagrams is investigated and it is found that the dynamic phase diagrams strongly depends on the frequency.

**Anahtar Kelimeler:** Mixed Spin-1 and Spin-5/2 Ising System, Master Equation, Glauber Dynamics, Dynamic Phase Transition Temperatures, Dynamic Phase Diagrams.

## TEŞEKKÜR

Tez alıőmamda bana yardımcı olan değerli hocam Do. Dr. Ümüt TEMİZER'e teşekkür ederim.

alıőmamızı 6601-FBE/17-113 kodlu proje ile destekleyen Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederim.

Tez alıőmamda manevi desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Ayőe ARAZ, Sezer SEVEN ve kardeőim gibi sevdiğim Baver GÜZEL'e ok teşekkür ederim.





## ŞEKİLLER LİSTESİ

**Sayfa**

**Şekil 2.1:** İki Tabakalı Kare Örgü İçin Spinlerin Yerleşim Taslağı. .... 5

**Şekil 2.2:** Ortalama Altörgü Miknatislanmalarının ( $m_1^A(\xi)$ ,  $m_1^B(\xi)$ ,  $m_2^A(\xi)$ ,  $m_2^B(\xi)$ ) Zamanla Değişimleri ve Sistemdeki Mevcut Olan Bazı Fazların Gösterimi. **a)** Paramanyetik (p) Temel Fazı. ( $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = -3.0$ ,  $d = -3.0$ ,  $h = 2.0$  ve  $T = 1.2$ ) **b)** Temel Fazların İkili Kombinasyonu Olan f+nm Karma Faz Bölgesi. ( $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = 1.0$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = -3.0$ ,  $h = 1.0$ , ve  $T = 0.5$ ) **c)** Temel Fazların Üçlü Kombinasyonu Olan af+c+p Karma Faz Bölgesi. ( $J_1 = -1.0$ ,  $J_2/J_1 = -0.2$ ,  $J_3/J_1 = -5.0$ ,  $d = 2.5$ ,  $h = 4.0$  ve  $T = 0.1$ ). .... 18

**Şekil 2.3:** Dinamik Alt Örgü Miknatislanmalarının ( $M_1^{A,B}$  ve  $M_2^{A,B}$ ) Sıcaklığın Bir Fonksiyonu Olarak Davranışları.  $T_c$  ve  $T_t$  sırasıyla birinci ve ikinci derece faz geçiş sıcaklıklarıdır. **a)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = 1.0$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = -3.0$ ,  $h = 1.7$  **b)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = -3.0$ ,  $d = -1.0$  ve  $h = 0.1$ ,  $M_1^A = M_1^B = 1.0$ ;  $M_2^A = M_2^B = -0.5$  **c)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = -3.0$ ,  $d = -1.0$ ,  $h = 0.1$ ,  $M_1^A = -M_1^B = 1.0$ ;  $-M_2^A = M_2^B = 2.5$  **d)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = -3.0$ ,  $d = -3.0$ ,  $h = 0.1$ ,  $M_1^A = M_1^B = 1.0$ ;  $M_2^A = M_2^B = -0.5$  **e)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = -3.0$ ,  $d = -3.0$ ,  $h = 0.1$ ,  $M_1^A = M_1^B = 0.0$ ;  $M_2^A = M_2^B = 0.5$  **f)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = -3.0$ ,  $d = -3.0$ ,  $h = 0.1$ ,  $M_1^A = M_1^B = 0.0$ ;  $M_2^A = M_2^B = 1.5$ . .... 21

**Şekil 2.4:** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde FM/FM Etkileşmesi İçin (T,h) Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_2/J_1 = 3.0$ ,  $J_3/J_1 = -1.0$ ,  $d = -6.5$ , **b)**  $J_2/J_1 = 1.1$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = -2.95$ , **c)**  $J_2/J_1 = 1.7$ ,  $J_3/J_1 = 1.1$ ,  $d = -0.5$ , **d)**  $J_2/J_1 = 1.0$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = -3.0$ , **e)**  $J_2/J_1 = 1.2$ ,  $J_3/J_1 = 0.3$ ,  $d = -2.0$ , **f)**  $J_2/J_1 = 1.5$ ,  $J_3/J_1 = 5.0$ ,  $d = -2.7$ , **g)**  $J_2/J_1 = 1.1$ ,  $J_3/J_1 = 0.1$ ,  $d = -2.5$ , **h)**  $J_2/J_1 = 1.4$ ,  $J_3/J_1 = -0.1$ ,  $d = -1.5$ , **i)**  $J_2/J_1 = 1.0$ ,  $J_3/J_1 = 0.01$ ,  $d = -0.1$ , **j)**  $J_2/J_1 = 1.6$ ,  $J_3/J_1 = -0.5$ ,  $d = -0.5$ , **k)**  $J_2/J_1 = 1.0$ ,  $J_3/J_1 = -1.0$ ,  $d = 5.0$ , **l)**  $J_2/J_1 = 1.2$ ,  $J_3/J_1 = 0.3$ ,  $d = 2.0$ , **m)**  $J_2/J_1 = 1.5$ ,  $J_3/J_1 = -1.0$ ,  $d = -2.9$ . .... 24

**Şekil 2.5:** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde FM/ FM Etkileşmesi İçin Farklı Düzlemlerde Dinamik Faz Diyagramları. **a)** ( $J_2/J_1$ , T) düzleminde,  $J_3/J_1 = 1.1$ ,  $h = 0.1$  ve  $d = -0.5$ , **b)** ( $J_3/J_1$ , T) düzleminde,  $J_2/J_1 = 1.4$ ,  $h = 0.1$  ve  $d = -1.5$ , **c)** ( $J_2/J_1$ , h) düzleminde,  $J_3/J_1 = 2.3$ ,  $T = 0.5$  ve  $d = 4.0$ , **d)** ( $J_3/J_1$ , h) düzleminde,  $J_2/J_1 = 0.5$ ,  $T = 0.5$  ve  $d = 5.0$ , **e)** (d, T) düzleminde,  $J_2/J_1 = 1.1$ ,  $J_3/J_1 = 0.1$  ve  $h = 0.1$ . .... 26

**Şekil 2.6:** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde FM/ AFM Etkileşmesi İçin (T, h) Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = -1.0$ ,  $d = -1.0$ , **b)**  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = -3.0$ ,  $d = -3.0$ , **c)**  $J_2/J_1 = -0.1$ ,  $J_3/J_1 = -1.0$ ,  $d = -1.0$ , **d)**  $J_2/J_1 = -0.1$ ,  $J_3/J_1 = -5.0$ ,  $d = -0.1$ , **e)**  $J_2/J_1 = -0.1$ ,  $J_3/J_1 = -10.0$ ,  $d = -0.1$ , **f)**  $J_2/J_1 = -1.9$ ,  $J_3/J_1 = -6.1$ ,  $d = -2.1$ , **g)**  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = -3.0$ ,  $d = -1.0$ , **h)**  $J_2/J_1 = -1.5$ ,  $J_3/J_1 = 6.0$ ,  $d = 7.0$ , **i)**  $J_2/J_1 = -2.0$ ,  $J_3/J_1 = 5.8$ ,  $d = -2.0$ , **j)**  $J_2/J_1 = -1.5$ ,  $J_3/J_1 = 4.5$ ,  $d = -3.0$

**k)**  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = 12.0$ ,  $d = -8.0$ , **l)**  $J_2/J_1 = -0.1$ ,  $J_3/J_1 = 0.63$ ,  $d = 1.5$ , **m)**  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = 10.0$ , **n)**  $J_2/J_1 = -0.5$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = 5.0$ .....**28**

**Şekil 2.7:** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde FM/AFM Etkileşmesi İçin Farklı Düzlemlerde Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $(J_2/J_1, T)$  düzleminde,  $J_3/J_1 = -4.0$ ,  $h = 2.0$  ve  $d = 0.5$ , **b)**  $(J_3/J_1, T)$  düzleminde,  $J_2/J_1 = -0.1$ ,  $h = 0.5$  ve  $d = -1.0$ , **c)**  $(J_2/J_1, h)$  düzleminde,  $J_3/J_1 = -3.0$ ,  $T = 0.5$  ve  $d = -0.1$ , **d)**  $(J_3/J_1, h)$  düzleminde,  $J_2/J_1 = -0.3$ ,  $T = 0.5$  ve  $d = -1.0$  **e)**  $(d, T)$  düzleminde,  $J_2/J_1 = -0.1$ ,  $J_3/J_1 = -10.0$  ve  $h = 0.1$ ..... **29**

**Şekil 2.8.** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde AFM/AFM Etkileşmesi İçin  $(T, h)$  Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_2/J_1 = -1.5$ ,  $J_3/J_1 = -4.0$ ,  $d = -7.1$ , **b)**  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = -0.5$ , **c)**  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = -3.0$ , **d)**  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = 3.0$ , **e)**  $J_2/J_1 = -0.8$ ,  $J_3/J_1 = 5.0$ ,  $d = 2.5$ , **f)**  $J_2/J_1 = -0.2$ ,  $J_3/J_1 = -5.0$ ,  $d = 2.5$ , **g)**  $J_2/J_1 = -0.8$ ,  $J_3/J_1 = -1.0$ ,  $d = -2.5$ .....**31**

**Şekil 2.9:** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde AFM/AFM Etkileşmesi İçin Farklı Düzlemlerde Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $(J_2/J_1, T)$  düzleminde,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $h = 2.0$  ve  $d = 2.5$  **b)**  $(J_3/J_1, T)$  düzleminde,  $J_2/J_1 = -0.3$ ,  $h = 4.0$  ve  $d = 3.0$ , **c)**  $(J_2/J_1, h)$  düzleminde,  $J_3/J_1 = 2.3$ ,  $T = 0.5$  ve  $d = 4.0$ , **d)**  $(J_3/J_1, h)$  düzleminde;  $J_2/J_1 = -0.5$ ,  $T = 0.5$  ve  $d = 2.0$ , **e)**  $(d, T)$  düzleminde,  $J_2/J_1 = -1.0$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$  ve  $h = 0.5$  ..... **32**

**Şekil 2.10:** FM/FM, AFM/FM ve AFM/AFM Etkileşmeleri için  $(w/2\pi, T)$  Düzleminde Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = 1.0$ ,  $J_3/J_1 = -1.0$ ,  $d = -1.0$  ve  $h = 0.5$ , **b)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = -0.5$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = 1.0$  ve  $h = 0.1$ , **c)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/J_1 = -0.2$ ,  $J_3/J_1 = 1.0$ ,  $d = 2.5$  ve  $h = 4.0$ ..... **34**

**Şekil 3.1:** AB İstiflenmiş Geometrilik İki Tabakalı Bal Peteği Örgüsü İçin Spinlerin Yerleşim Taslağı. .... **35**

**Şekil 3.2:** İki Tabakalı Bal Peteği Örgüsü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde  $J_3 > 0$  için;  $(T, h)$  Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_1 = -1.0$ ,  $J_2 = -0.5$ ,  $J_3 = 0.5$ ,  $d = 1.5$ , **b)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2 = 1.0$ ,  $J_3 = 0.5$ ,  $d = -2.5$ , **c)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2 = 1.1$ ,  $J_3 = 0.1$ ,  $d = -2.5$ , **d)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2 = 1.4$ ,  $J_3 = 0.1$ ,  $d = -0.5$ , **e)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2 = 1.0$ ,  $J_3 = 2.5$ ,  $d = -1.0$ , **f)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2 = 2.0$ ,  $J_3 = 0.5$ ,  $d = -1.0$ ..... **40**

**Şekil 3.3:** İki Tabakalı Bal peteği Örgüsü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde  $J_3 > 0$  için; Farklı Düzlemlerde Elde Edilen Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2 = 1.0$ ,  $J_3 = 1.0$ ,  $h = 0.5$ , **b)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_3 = 1.3$ ,  $d = 0.5$ ,  $h = 0.4$ , **c)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2 = 1.0$ ,  $J_3 = 4.0$ ,  $T = 0.1$ , **d)**  $J_1 = 1.0$ ,  $J_3 = 0.8$ ,  $d = -0.5$ ,  $T = 0.5$ .....**41**

**Şekil 3.4.** İki Tabakalı Balpeteği Örgüsü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde  $J_3 < 0$  için  $(T, h)$  Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları. **a)**

$J_1=1.0, J_2=0.2, J_3=-0.7, d=0.5$ , **b)**  $J_1=-1.0, J_2=-1.2, J_3=-1.0, d=-0.6$ , **c)**  
 $J_1=1.0, J_2=-0.2, J_3=-1.0, d=0.5$ , **d)**  $J_1=1.0, J_2=1.0, J_3=-0.1, d=1.0$ .....**43**

**Şekil 3.5.** İki Tabakalı Balpeteği Örgüsü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde  $J_3 < 0$  için Farklı Düzlemlerde Elde Edilen Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_1=1.0, J_2=0.8, J_3=-1.0, h=0.5$ , **b)**  $J_1=1.0, J_2=-1.0, J_3=-1.0, T=0.5$ , **c)**  $J_1=1.0, J_3=-0.3, h=1.0, d=0.5$ , **d)**  $J_1=1.0, J_3=-0.5, d=0.1, T=0.2$ .  
.....**44**



## TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

<b>Tablo 2.1</b> Sistemdeki Mevcut Fazlara Ait Spin Yönelimleri .....	<b>17</b>
---	-----------



## KISALTMALAR LİSTESİ

P	: Paramanyetik Faz
af	: Antiferromanyetik Faz
c	: Telafi Fazı
sf	: Yüzey Ferromanyetik Fazı
m	: Karma Faz
f	: Ferromanyetik Fazı
DFG	: Dinamik Faz Geçişi
H	: Manyetik Alan
T	: Sıcaklık
J	: Bilineer Etkileşme Parametresi
D	: Kristal-Alan Etkileşmesi veya Tek-İyon Anizotropi Sabiti
TP	: Dinamik Üçlü Nokta
QP	: Dinamik Dörtlü Nokta
B	: Dinamik Çift Kritik Son Nokta
Z	: Dinamik Sıfır Sıcaklık Kritik Nokta
E	: Dinamik Kritik Nokta
M	: Dinamik Çoklu Kritik nokta
OAY	: Ortalama-Alan Yaklaşımı
DMH	: Dinamik Manyetik Histeresis

MC : Monte-Carlo

EAT : Etkin-Alan Teorisi

RG : Renormalizasyon Grup



## 1.GİRİŞ

Son yıllarda, çok katlı manyetik yapılarda, çok ince filmlerde ve süper örgülerde meydana gelen kritik olayların incelenmesi, bu yapıların teknolojik önemlerinden dolayı oldukça ilgi çekmiştir [1]. Bu sistemler, iki ve üç katlı yapılar arasında köprü oluşturduğu için hem deneysel hem de teorik açıdan oldukça ilginçtir. Genel olarak, bu yapıların manyetik özellikleri tek tabakalı yapılara göre oldukça farklıdır. Bu farklılık çok büyük manyetik direnç [2,3], yüzey manyetik anizotropi [4], genişletilmiş yüzey manyetik moment [5,6] ve yüzey manyetik elastik çiftlenim [7,8] gibi ilginç manyetik özelliklerin oluşmasına neden olmaktadır. Deneysel olarak, Fe/Ni [9-11], ve Fe/Co [12], Ni/Au [13], Co/Cu/ Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> [14], gibi çok katlı yapıların manyetik özelliklerini incelemek için birçok çalışma yapılmıştır. La<sub>2/3</sub>Ca<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> ferromanyetik-yalıtkan-süperiletken yapısı üzerine inceleme, manyetik alanların, filmlerin düzlemlerine paralel olarak uygulanması vasıtasıyla yapılmıştır [15]. Pan ve ark. [16], grup-IV elementlerinin ve onların bileşiklerinin tek tabakalı ve iki tabakalı bal peteği yapılarının yapısal, titreşimsel ve elektronik özelliklerini incelemek için Pseüdo potansiyel metodunu kullanmışlardır. Huang ve ark. [17], mıknatıslanma ayarlanma mekanizması ve değiş-tokuş çiftlenim etkisini incelemek için farklı demir kalınlıklarından oluşan iki katlı FePt/Fe yapısını incelemiştir. Son zamanlarda Fm/TbFe (Fm=Fe, Py mıknatıslanma oranı yüksek nikel demir alaşımı, FeCo) iki katlı yapısının mıknatıslanma ve mıknatıssal büzülme özellikleri Li tarafından incelenmiştir [18].

Çok katlı yapıların ya da ince filmlerin, termodinamik özelliklerinin ve bu malzemelerde meydana gelen faz geçişlerinin teorik olarak incelenmesi için Ising modeli gibi modeller kesin gözlenebilir nicelikleri hesaplamamız açısından oldukça faydalıdır. Çok katlı manyetik sistemlerle ilgili yapılan teorik çalışmaların çoğu, yalnızca spin-1/2 manyetik iyonundan oluşan Ising veya Heisenberg modelleriyle sınırlandırılmıştır. Teorik olarak, yalnızca spin-1/2 iyonlarından oluşan ince filmler veya çok katlı sistemlerin denge davranışları, ortalama alan yaklaşımı (OAY) [19-21], Monte-Carlo (MC) simülasyonu [22-26], Renormalizasyon Grup (RG) hesaplamaları [27-29], Etkin Alan Teorisi (EAT) [30-31], transfer matris metodu [32], iki örgü kümesel yaklaşımı [33-34], spin salınımı teorisi [35], lineer küme

yaklaşımı [36], yüksek sıcaklık seri yaklaşımı [37], Green fonksiyonu teorisi ve kuantum MC hesaplaması [38] gibi çeşitli teknikler kullanılarak incelenmiştir. Buna ilaveten, yalnızca spin-1/2 iyonundan oluşan Ising ince filmlerin denge davranışı Bethe örgüsü [39] ve Husimi ağacı [40-41] üzerinde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Burada şu noktayı belirtmeliyiz ki yalnızca spin-1/2 iyonu üzerine yapılan incelemeler çok yüzeyseldir. Çok katlı manyetik sistemleri daha iyi anlamak ve incelemek için daha yüksek spinli veya karma-spinli sistemleri kullanmak faydalı olacaktır. Spinlerin farklı tiplerinden oluşan çok katlı manyetik yapılar daima ilgi çekici olmuştur. Böyle sistemler, katlı karma-spin Ising sistemleri olarak adlandırılırlar. Bu sistemler üzerinde yapılan çalışmaların çoğu basitlikten dolayı karma spin-1/2 ve spin-S ( $S > 1/2$ ) Ising sistemleri üzerine yapılmıştır [42-57]. Her iki spininde yüksek değerli olduğu katlı karma-spin Ising sistemleri üzerine yapılan çalışma sayısı daha azdır. Bu sistemlerin denge davranışları, karma-spin (1, 3/2) [58-60], karma-spin (1, 2) [61], karma-spin (3/2, 2) [62], karma-spin (3/2, 5/2) [63] ve karma-spin (2, 5/2) [64] sistemleri için farklı teknikler kullanılarak incelenmiştir.

Karma-spin Ising sistemlerinin dengeli davranışları ayrıntılı olarak incelenmesine rağmen bu sistemlerin dengesiz yani dinamik davranışları üzerine daha az sayıda çalışma mevcuttur. Tek tabakalı örgü yapısı için, karma-spin (1/2, 1) [65-73], karma-spin (1/2, 3/2) [74-75], karma-spin (1, 3/2) [76-77], karma-spin (3/2, 2) [78], karma-spin (3/2, 5/2) [79] ve karma-spin (2, 5/2) [80] Ising sistemlerinin dinamik davranışları, dinamik zincir yaklaşımı, dinamik MC simülasyonu, nokta dağılımlı zincir yaklaşımı ve Glauber geçiş oranları temelli ortalama-alan yaklaşımı stokastik dinamik [81] kullanılarak detaylı olarak incelenmiştir. Diğer taraftan çok katlı örgü yapısı için karma-spin Ising sistemlerinin dengesiz davranışları üzerine çok sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Ertaş ve ark. [82-83], karma-spin (2, 5/2) Ising sisteminin dinamik manyetik özelliklerini iki tabakalı bal peteği [82] ve iki tabakalı kare örgü [83] üzerinde Glauber geçiş oranları temelli ortalama-alan yaklaşımı stokastik dinamiği kullanarak incelediler. Son zamanlarda Temizer ve ark. [84], spin-3/2 ve spin-2 iyonlarından oluşan karma Ising iki tabakalı sisteminin dengede olmayan davranışını Glauber geçiş oranları temelli ortalama-alan yaklaşımı stokastik dinamiği kullanarak incelediler. Bu karma-spin Ising sistemleri, dinamik üçlü kritik



nokta [85], reentrant davranış [86], telafi davranışı [87] ve histeresis davranışı [88] gibi zengin kritik davranışlar sergilemektedirler.

Diğer taraftan manyetik çok katlı yapıların ve ince filmlerin manyetik özelliklerini açıklamak için en çok kullanılan karma-spin Ising sistemlerinden biriyse karma-spin  $(1, 5/2)$  Ising sistemidir. Moleküler karma spin ferromanyetik malzeme olan  $\text{MnNi}(\text{NO}_2)_4$  (etilediamine), spin-1 ve spin-5/2 iyonlarının bileşiminden oluşan kuasi-tek boyutlu malzeme olarak bilinmektedir [89]. Bu sistemin denge özellikleri farklı bir kaç teknik kullanılarak incelenmiştir [90-92]. Deviren ve ark. [90], karma-spin  $(1, 5/2)$  Ising sisteminin denge özelliklerini düzlemsel bir dış manyetik alanın varlığında ve yokluğunda kare ve balpeteği örgüleri üzerinde korelasyonlu EAT yardımıyla incelemiştir. Yessoufou ve ark. [91], bilinear, bikuadratik ve kristal alan etkileşmeli karma-spin  $(1, 5/2)$  Ising sistemini Bethe örgüsü üzerinde kesin tekrarlamaya bağıntılarını kullanarak incelemiştir. Yiğit ve Albayrak [92], Bethe örgüsü üzerinde tekrarlamaya bağıntılarını kullanarak sistemi ele almışlar ve eşit ve eşit olmayan kristal alanların faz diyagramları üzerini etkisini ayrıntılı olarak incelemiştir. Karma-spin  $(1, 5/2)$  Ising sisteminin dengesiz davranışları için ise yalnızca birkaç çalışma bulunmaktadır. Keskin ve ark. [93] ve Özkılıç ve Temizer [94], sistemin dinamik manyetik davranışını, OAY temelli Glauber-tipi stokastik dinamiği kullanarak farklı örgüler üzerinde incelemiştir. Son zamanlarda, Batı ve Ertaş [95] iki boyutta karma-spin  $(1, 5/2)$  Ising sisteminin dinamik manyetik histeresis (DMH) özelliklerini kare örgü üzerinde incelemişler ve histeresis davranışının fiziksel parametrelerin değerlerine güçlü bir şekilde bağlı olduğunu bulmuşlardır. Burada şu noktayı önemle belirtmeliyiz ki karma-spin  $(1, 5/2)$  Ising sisteminin dengesiz davranışı şu ana kadar sadece tek tabakalı örgüler için analiz edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, zamanla değişen salınımlı bir dış manyetik alanın varlığında, karma-spin  $(1, 5/2)$  Ising sisteminin dinamik davranışı iki tabakalı kare örgü ve AB istiflenmiş geometrili iki tabakalı bal peteği örgüsü üzerinde Glauber-tipi stokastik temelli OAY, yani dinamik ortalama alan yaklaşımı kullanılarak incelenecektir. Sistemin dinamik davranışının kesin açıklamasını veren ortalama-alan dinamik diferansiyel denklemleri Master denkleminin kullanılmasıyla elde edilecektir. Bu

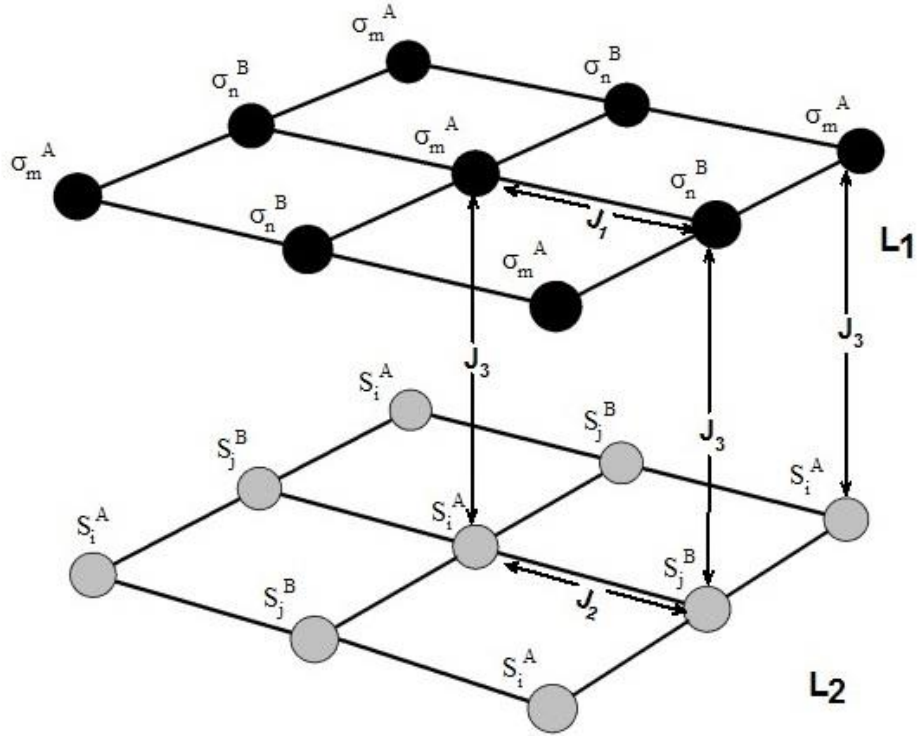
denklemler bilgisayar ortamında nümerik olarak çözülecek ve sistemde farklı özellikler incelenecektir. İlk olarak ortalama alt örgü mıknatıslanmaları zamanın bir fonksiyonu olarak incelenecek ve sistemde mevcut olan fazlar bulunacaktır. Daha sonra, dinamik mıknatıslanmaların termal davranışlarının incelenmesiyle fazlar arasındaki dinamik faz geçiş (DFG) sıcaklıkları elde edilecektir. Her iki örgü sistemi için yapılacak olan bu incelemeler sonucu, dinamik faz diyagramları farklı fiziksel parametre değerleri için farklı düzlemler üzerinde sunulacaktır. Son olarak, sınımlı dış manyetik alan frekansının dinamik faz diyagramları üzerine etkisi de detaylı olarak incelenecektir.



## 2. İKİ TABAKALI KARE ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN-1 VE SPİN-5/2 ISING SİSTEMİNİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELLİKLERİ

### 2.1. İki Tabakalı Kare Örgü İçin Modelin Tanımlanması

İki tabakalı kare örgü, tek tabakalı kare örgü yapısının genişletilmiş halidir. Buna göre iki tabakalı kare örgü,  $L_1$  ve  $L_2$  kare örgülerinin iki özdeş tabakasının birbirine paralel olarak yerleştirilmesiyle oluşur. İki tabakalı kare örgünün şematik gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir. Sistem, örgü noktalarına  $\sigma$  ve  $S$  spinlerinin yerleştirilmesiyle oluşmuş karma Ising ferromanyetik bir sistemdir. Spinlerin iki farklı tipi Ising değişkenleri ile tanımlanır ve  $L_1$  örgüsü üzerinde  $\sigma = \pm 1, 0$  ve  $L_2$  örgüsü üzerinde ise  $S = \pm 5/2, \pm 3/2, \pm 1/2$  değerlerini alır.



Şekil 2.1. İki Tabakalı Kare Örgü İçin Spinlerin Yerleşim Taslağı.

En yakın komşu ve kristal-alan etkileşmeli, salınımlı bir dış manyetik alanın varlığında karma spin-1 ve spin-5/2 Ising sistemi için Hamiltonyen ifadesi;

$$\begin{aligned}
H = & -J_1 \sum_{\langle mn \rangle} \sigma_m^A \sigma_n^B - J_2 \sum_{\langle ij \rangle} S_i^A S_j^B - J_3 \left( \sum_{\langle mi \rangle} \sigma_m^A S_i^A + \sum_{\langle nj \rangle} \sigma_n^B S_j^B \right) \\
& -D \left( \sum_m (\sigma_m^A)^2 + \sum_n (\sigma_n^B)^2 + \sum_i (S_i^A)^2 + \sum_j (S_j^B)^2 \right) \\
& -h(t) \left( \sum_m \sigma_m^A + \sum_n \sigma_n^B + \sum_i S_i^A + \sum_j S_j^B \right) \tag{2.1}
\end{aligned}$$

Şeklinde yazılabilir. Hamiltonyen, sistemdeki tüm etkileşimleri açıklayan en genel enerji ifadesidir. Burada,  $\langle mn \rangle$ ,  $\langle ij \rangle$ ,  $\langle mi \rangle$  ve  $\langle nj \rangle$  terimleri, örgü içinde toplamın tüm en yakın komşu çiftler üzerinde alınacağını gösterir.  $J_1$ ,  $J_2$  ve  $J_3$  en yakın komşu spinler arasındaki değiş-tokuş parametresidir.  $D$ ,  $i$  ve  $m$  örgüleri üzerindeki tek iyon anizotropi sabiti veya kristal-alan etkileşmesidir.  $h(t)$  ise  $i$  ve  $m$  örgüleri üzerindeki sinüzoidal dış manyetik alanı göstermektedir ve

$$h(t) = h_0 \cos(\omega t) \tag{2.2}$$

Şeklinde dir. Burada,  $h_0$  salınım alanının genliği,  $\omega = 2\pi f$  ise salınımlı alanının açısal frekansıdır. Sistem, mutlak sıcaklıkta bir izotermal ısı banyosu ile temas halinde bulunmaktadır.

## 2.2. Modelin Formülasyonu

Bu kesimde, iki tabakalı kare örgü üzerinde karma spin-1 ve spin-5/2 Ising sisteminin dengesiz (dinamik) davranışını kesin olarak açıklayan dinamik diferansiyel denklemler Glauber-tipi stokastik temelli OAY kullanılarak elde edilecektir. Glauber-tipi stokastik dinamik süreçte, temel olarak ihtimaliyet fonksiyonlarının spinlerin zamanla aldığı duruma göre değiştiği görülmüştür. Tüm oluşabilecek ihtimaliyetler için sistemin zamanla değişim süreci Master denkleminin kullanılmasıyla tespit edilir.

Burada şu noktayı belirtmeliyiz ki, ele aldığımız sistem iki alt örgülü bir sistemdir. Yani, sistemin kesin dinamik açıklamasını veren denklemler,  $L_1$  tabakası üzerindeki A ve B alt örgüleri ( $\sigma_m^A$  ve  $\sigma_n^B$ ) ve  $L_2$  tabakası üzerindeki A ve B alt örgüleri ( $S_i^A$  ve  $S_j^B$ ) için elde edilmelidir. Buna göre gerekli nümerik çözümlere ulaşabilmek için 4 (dört) adet dinamik diferansiyel denklem elde edilmesi gerektiği açıktır. Biz burada bu denklemlerden bir tanesinin ayrıntılı olarak elde edilmesini vereceğiz.

Örnek olarak,  $L_1$  tabakasında A alt örgüsü üzerinde  $\sigma$  spinlerinin bir an için sabit olduğu düşünülürse,  $L_2$  tabakasındaki B alt örgüsü üzerinde  $S_i^B$  spinleri için Master denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_1^B(S_1^B, S_2^B, \dots, S_N^B; t) = \\ - \sum_i \left( \sum_{S_i^B \neq S_{i'}^B} W_i^B(S_i^B \rightarrow S_{i'}^B) \right) P_1^B(S_1^B, S_2^B, \dots, S_i^B, \dots, S_N^B; t) \\ - \sum_i \left( \sum_{S_i^B \neq S_{i'}^B} W_i^B(S_{i'}^B \rightarrow S_i^B) \right) P_1^B(S_1^B, S_2^B, \dots, S_i^B, \dots, S_N^B; t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Burada,  $P_1^B(S_1^B, S_2^B, \dots, S_i^B, \dots, S_N^B; t)$  spinlerin herhangi bir zamanda sahip olduğu konfigürasyonu gösteren ihtimaliyet ifadesidir.  $W_i^B(S_i^B \rightarrow S_{i'}^B)$  ise A alt örgüsü üzerindeki  $\sigma$  spinleri sabitken birim zamanda herhangi bir spinin  $S_i^B$  den  $S_{i'}^B$  durumuna geçiş ihtimaliyetidir. Sistemin dinamik durum özellikleri ve genel kanonik dağılım ifadesi kullanılarak her bir spinin  $S_i^B$  durumundan  $S_{i'}^B$  durumuna geçiş ihtimaliyeti;

$$W_i^B(S_i^B \rightarrow S_{i'}^B) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta \Delta E^B(S_i^B \rightarrow S_{i'}^B))}{\sum_{S_{i'}^B} \exp(-\beta \Delta E^B(S_i^B \rightarrow S_{i'}^B))} \quad (2.4)$$

ile verilir. Burada  $\beta = 1/k_B T$  şeklinde olup  $k_B$  boltzman sabitidir. Toplam  $S_{i'}^B$  'nin

beş mümkün değeri olan  $\pm 5/2$ ,  $\pm 3/2$  ve  $\pm 1/2$  değerleri üzerinden alınmaktadır.  $\tau$  ise herhangi bir spinin spin  $S_i^B$  durumundan  $S_{i'}^B$  durumuna geçişi esnasındaki zaman sürecini belirlemektedir.  $\Delta E^B$  ise herhangi bir  $S_i^B$  spininin  $S_{i'}^B$  durumuna geçtiği zamanda sistemin enerjisinde meydana gelen enerji değişimini gösterir. Hamiltonyen denkleminde faydalanarak,

$$\Delta E^B(S_i^B \rightarrow S_{i'}^B) = -(S_{i'}^B - S_i^B)y - ((S_{i'}^B)^2 - (S_i^B)^2)D \quad (2.5)$$

Şeklinde bulunur. Burada  $y$  ifadesi,  $y = -J_1 \sum_n \sigma_n^B + J_3 \sum_i S_i^A + h(t)$  şeklindedir. Bu ifade yardımıyla  $L_2$  tabakası üzerinde spinlerin  $S_i^B$  durumundan  $S_{i'}^B$  durumuna geçişi esnasında sistemin enerjisinde meydana gelen enerji değişimleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\Delta E^B\left(\frac{5}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = -\left(\frac{1}{2} - \frac{5}{2}\right)y - \left(\left(\frac{1}{2}\right)^2 - \left(\frac{5}{2}\right)^2\right) = 2y + 6D \quad (2.6)$$

$$\Delta E^B\left(-\frac{5}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = -\left(\frac{1}{2} + \frac{5}{2}\right)y - \left(\left(\frac{1}{2}\right)^2 - \left(-\frac{5}{2}\right)^2\right) = -3y + 6D \quad (2.7)$$

$$\Delta E^B\left(-\frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = -\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2}\right)y - \left(\left(\frac{1}{2}\right)^2 - \left(-\frac{3}{2}\right)^2\right) = -2y + 2D \quad (2.8)$$

$$\Delta E^B\left(\frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = -\left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2}\right)y - \left(\left(\frac{1}{2}\right)^2 - \left(\frac{3}{2}\right)^2\right) = y + 2D \quad (2.9)$$

$$\Delta E^B\left(-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = -\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right)y - \left(\left(\frac{1}{2}\right)^2 - \left(-\frac{1}{2}\right)^2\right) = -y \quad (2.10)$$

$$\Delta E^B\left(\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}\right) = -\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right)y - \left(\left(\frac{1}{2}\right)^2 - \left(\frac{1}{2}\right)^2\right) = 0 \quad (2.11)$$

$$\Delta E^B\left(\frac{5}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = -\left(\frac{3}{2} - \frac{5}{2}\right)y - \left(\left(\frac{3}{2}\right)^2 - \left(\frac{5}{2}\right)^2\right) = y + 4D \quad (2.12)$$

$$\Delta E^B\left(\frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = -\left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2}\right)y - \left(\left(\frac{3}{2}\right)^2 - \left(\frac{1}{2}\right)^2\right) = -y - 2D \quad (2.13)$$

$$\Delta E^B\left(-\frac{5}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = -\left(\frac{3}{2} + \frac{5}{2}\right)y - \left(\left(\frac{3}{2}\right)^2 - \left(-\frac{5}{2}\right)^2\right) = -4y + 4D \quad (2.14)$$

$$\Delta E^B\left(-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = -\left(\frac{3}{2} + \frac{1}{2}\right)y - \left(\left(\frac{3}{2}\right)^2 - \left(-\frac{1}{2}\right)^2\right) = -2y - 2D \quad (2.15)$$

$$\Delta E^B\left(-\frac{3}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = -\left(\frac{3}{2} + \frac{3}{2}\right)y - \left(\left(\frac{3}{2}\right)^2 - \left(-\frac{3}{2}\right)^2\right) = -3y \quad (2.16)$$

$$\Delta E^B\left(\frac{3}{2} \rightarrow \frac{3}{2}\right) = -\left(\frac{3}{2} - \frac{3}{2}\right)y - \left(\left(\frac{3}{2}\right)^2 - \left(-\frac{3}{2}\right)^2\right) = 0 \quad (2.17)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = - \left( \frac{5}{2} - \frac{1}{2} \right) y - \left( \left( \frac{5}{2} \right)^2 - \left( \frac{1}{2} \right)^2 \right) = -2y - 6D \quad (2.18)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = - \left( \frac{5}{2} - \frac{3}{2} \right) y - \left( \left( \frac{5}{2} \right)^2 - \left( \frac{3}{2} \right)^2 \right) = -y - 4D \quad (2.19)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = - \left( \frac{5}{2} + \frac{1}{2} \right) y - \left( \left( \frac{5}{2} \right)^2 - \left( -\frac{1}{2} \right)^2 \right) = -3y - 6D \quad (2.20)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = - \left( \frac{5}{2} + \frac{3}{2} \right) y - \left( \left( \frac{5}{2} \right)^2 - \left( -\frac{3}{2} \right)^2 \right) = -4y - 4D \quad (2.21)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = - \left( \frac{5}{2} + \frac{5}{2} \right) y - \left( \left( \frac{5}{2} \right)^2 - \left( -\frac{5}{2} \right)^2 \right) = -5y \quad (2.22)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = - \left( \frac{5}{2} - \frac{5}{2} \right) y - \left( \left( \frac{5}{2} \right)^2 - \left( \frac{5}{2} \right)^2 \right) = 0 \quad (2.23)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = - \left( -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{1}{2} \right)^2 - \left( \frac{1}{2} \right)^2 \right) = y \quad (2.24)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = - \left( -\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{1}{2} \right)^2 - \left( \frac{3}{2} \right)^2 \right) = 2y + 2D \quad (2.25)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = - \left( -\frac{1}{2} - \frac{5}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{1}{2} \right)^2 - \left( \frac{5}{2} \right)^2 \right) = 3y + 6D \quad (2.26)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = - \left( -\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{1}{2} \right)^2 - \left( -\frac{3}{2} \right)^2 \right) = -y + 2D \quad (2.27)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = - \left( -\frac{1}{2} + \frac{5}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{1}{2} \right)^2 - \left( \frac{3}{2} \right)^2 \right) = -2y + 2D \quad (2.28)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = - \left( -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{1}{2} \right)^2 - \left( -\frac{1}{2} \right)^2 \right) = 0 \quad (2.29)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = - \left( -\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{3}{2} \right)^2 - \left( \frac{1}{2} \right)^2 \right) = 2y - 2D \quad (2.30)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = - \left( -\frac{3}{2} - \frac{3}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{3}{2} \right)^2 - \left( \frac{3}{2} \right)^2 \right) = 3y \quad (2.31)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = - \left( -\frac{3}{2} - \frac{5}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{3}{2} \right)^2 - \left( \frac{5}{2} \right)^2 \right) = 4y + 4D \quad (2.32)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = - \left( -\frac{3}{2} + \frac{1}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{3}{2} \right)^2 - \left( -\frac{1}{2} \right)^2 \right) = y - 2D \quad (2.33)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = - \left( -\frac{3}{2} + \frac{5}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{3}{2} \right)^2 - \left( -\frac{5}{2} \right)^2 \right) = -y + 4D \quad (2.34)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = - \left( -\frac{3}{2} + \frac{3}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{3}{2} \right)^2 - \left( -\frac{3}{2} \right)^2 \right) = 0 \quad (2.35)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = - \left( -\frac{5}{2} - \frac{1}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{5}{2} \right)^2 - \left( \frac{1}{2} \right)^2 \right) = 3y - 6D \quad (2.36)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = - \left( -\frac{5}{2} - \frac{3}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{5}{2} \right)^2 - \left( \frac{3}{2} \right)^2 \right) = 4y - 4D \quad (2.37)$$

$$\Delta E^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = - \left( -\frac{5}{2} - \frac{5}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{5}{2} \right)^2 - \left( \frac{5}{2} \right)^2 \right) = 5y \quad (2.38)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = - \left( -\frac{5}{2} + \frac{1}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{5}{2} \right)^2 - \left( -\frac{1}{2} \right)^2 \right) = 2y - 6D \quad (2.39)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = - \left( -\frac{5}{2} + \frac{3}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{5}{2} \right)^2 - \left( -\frac{3}{2} \right)^2 \right) = y - 4D \quad (2.40)$$

$$\Delta E^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = - \left( -\frac{5}{2} + \frac{5}{2} \right) y - \left( \left( -\frac{5}{2} \right)^2 - \left( -\frac{5}{2} \right)^2 \right) = 0 \quad (2.41)$$

Bulunan tüm bu enerji ifadeleri (2.4)'te verilen denklemde yerine yazılırsa  $L_2$  tabakasında B alt örgüsü üzerindeki spinler için  $S_i^B$  durumundan  $S_i^B$  durumuna tüm geçiş ihtimaliyetleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) &= W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) \\ &= W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{e^{\left(\frac{\beta y}{2}\right)} \cdot e^{(-4\beta D)}}{2 \cosh\left(\frac{5\beta y}{2}\right) e^{(2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) e^{(-2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) e^{(-4\beta D)}} \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) &= W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) \\ &= W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) \\ &= \frac{1}{\tau} \frac{e^{\left(-\frac{\beta y}{2}\right)} \cdot e^{(-4\beta D)}}{2 \cosh\left(\frac{5\beta y}{2}\right) e^{(2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) e^{(-2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) e^{(-4\beta D)}} \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right)$$



$$\begin{aligned}
&= W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right) \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{e^{\left(\frac{3\beta y}{2}\right)} \cdot e^{(-2\beta D)}}{2 \cosh\left(\frac{5\beta y}{2}\right) e^{(2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) e^{(-2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) e^{(-4\beta D)}}
\end{aligned} \tag{2.44}$$

$$\begin{aligned}
W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) &= W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) \\
&= W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{e^{\left(-\frac{3\beta y}{2}\right)} \cdot e^{(-2\beta D)}}{2 \cosh\left(\frac{5\beta y}{2}\right) e^{(2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) e^{(-2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) e^{(-4\beta D)}}
\end{aligned} \tag{2.45}$$

$$\begin{aligned}
W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) &= W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) \\
&= W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{e^{\left(\frac{5\beta y}{2}\right)} \cdot e^{(2\beta D)}}{2 \cosh\left(\frac{5\beta y}{2}\right) e^{(2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) e^{(-2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) e^{(-4\beta D)}}
\end{aligned} \tag{2.46}$$

$$\begin{aligned}
W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) &= W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) \\
&= W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) \\
&= \frac{1}{\tau} \frac{e^{\left(-\frac{5\beta y}{2}\right)} \cdot e^{(2\beta D)}}{2 \cosh\left(\frac{5\beta y}{2}\right) e^{(2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) e^{(-2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) e^{(-4\beta D)}}
\end{aligned} \tag{2.47}$$

$$W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right) = 0 \tag{2.48}$$

$$W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) = 0 \tag{2.49}$$

$$W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = 0 \tag{2.50}$$

$$W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = 0 \quad (2.51)$$

$$W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = 0 \quad (2.52)$$

$$W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = 0 \quad (2.53)$$

Bu ifadeler incelenirse  $W_i^B (S_i^B \rightarrow S_{i'}^B)$  geçiş ihtimaliyetinin spinin başlangıçtaki durumundan bağımsız olduğu ve tamamen spinin geçiş yaptığı duruma bağlı olduğunu görebiliriz. Buna göre ifademiz,

$$W_i^B (S_i^B \rightarrow S_{i'}^B) = W_i^B (S_{i'}^B)$$

Şeklinde yazılabilir. Bu durumda,

$$\begin{aligned} W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) &= W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) \\ &= W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{1}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) &= W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) \\ &= W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{1}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$\begin{aligned} W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right) &= W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right) \\ &= W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow \frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{3}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) &= W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) \\ &= W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{3}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned}
W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) &= W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) \\
&= W_i^B \left( -\frac{5}{2} \rightarrow \frac{5}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{5}{2} \right), \tag{2.58}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_i^B \left( \frac{5}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) &= W_i^B \left( \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = W_i^B \left( \frac{3}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) \\
&= W_i^B \left( -\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{5}{2} \right) = W_i^B \left( -\frac{5}{2} \right), \tag{2.59}
\end{aligned}$$

Olduğu net bir şekilde görülür ve Master denklemi aşağıda verilen formata dönüşür.

$$\begin{aligned}
&\frac{d}{dt} P_1^B(S_1^B, S_2^B, \dots, S_N^B; t) \\
&= - \sum_i \left( \sum_{S_i^B \neq S_i^{B'}} W_i^B(S_i^{B'}) \right) P_1^B(S_1^B, S_2^B, \dots, S_i^B, \dots, S_N^B; t) \\
&+ \sum_i \left( \sum_{S_i^B \neq S_i^{B'}} W_i^B(S_i^B) \right) P_1^B(S_1^B, S_2^B, \dots, S_i^{B'}, \dots, S_N^B; t) \tag{2.60}
\end{aligned}$$

Buna göre (2.42)-(2.59) denklemleri (2.60)' da yerine yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned}
&\sum_i S_i^B W_i^B(S_i^B) = \\
&\frac{1}{\tau} \frac{5e^{(2\beta D)} \cdot \sinh\left(\frac{5\beta y}{2}\right) + 3e^{(-2\beta D)} \sinh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) + e^{(-4\beta D)} \sinh\left(\frac{\beta y}{2}\right)}{2 \cosh\left(\frac{5\beta y}{2}\right) e^{(2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{3\beta y}{2}\right) e^{(-2\beta D)} + 2 \cosh\left(\frac{\beta y}{2}\right) e^{(-4\beta D)}} \tag{2.61}
\end{aligned}$$

Modelde ortalama-alan temelli bir yaklaşım kullanıldığı için bu diferansiyel denklem aşağıdaki formda yazılabilir.

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_2^A = -m_2^A + \frac{1}{\tau} \frac{5e^{\left(\frac{2d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{5}{2} \frac{a_3}{T}\right) + 3e^{\left(-\frac{2d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{3}{2} \frac{a_3}{T}\right) + e^{\left(-\frac{4d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{1}{2} \frac{a_3}{T}\right)}{2e^{\left(\frac{2d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{5}{2} \frac{a_3}{T}\right) + 2e^{\left(-\frac{2d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{3}{2} \frac{a_3}{T}\right) + 2e^{\left(-\frac{4d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{1}{2} \frac{a_3}{T}\right)} \quad (2.62)$$

Burada  $L_2$  tabakası üzerinde B alt örgüsü için sistemin dinamik davranışını açıklayan diferansiyel denklem elde edilmiştir. Benzer olarak  $L_1$  ve  $L_2$  tabakaları üzerinde A ve B alt örgülerine ait diğer dinamik diferansiyel denklemler ise aşağıdaki gibidir.

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_1^A = -m_1^A + \frac{2 \sinh\left(\frac{a_1}{T}\right)}{2 \cosh\left(\frac{a_1}{T}\right) + \exp\left(-\frac{d}{T}\right)} \quad (2.63)$$

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_1^B = -m_1^B + \frac{2 \sinh\left(\frac{a_2}{T}\right)}{2 \cosh\left(\frac{a_2}{T}\right) + \exp\left(-\frac{d}{T}\right)} \quad (2.64)$$

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_2^B = -m_2^B + \frac{1}{\tau} \frac{5e^{\left(\frac{2d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{5}{2} \frac{a_4}{T}\right) + 3e^{\left(-\frac{2d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{3}{2} \frac{a_4}{T}\right) + e^{\left(-\frac{4d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{1}{2} \frac{a_4}{T}\right)}{2e^{\left(\frac{2d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{5}{2} \frac{a_4}{T}\right) + 2e^{\left(-\frac{2d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{3}{2} \frac{a_4}{T}\right) + 2e^{\left(-\frac{4d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{1}{2} \frac{a_4}{T}\right)} \quad (2.65)$$

Yukarıdaki diferansiyel denklemlerde,  $m_1^A = \langle \sigma_m^A \rangle$ ,  $m_1^B = \langle \sigma_n^B \rangle$ ,  $m_2^A = \langle S_1^A \rangle$ ,  $m_2^B = \langle S_j^B \rangle$ ,  $\xi = wt$ ,  $h = h_0/J_1$ ,  $a_1 = \left( zm_1^B + \frac{J_3}{J_1} m_2^A + h \cos(\xi) \right)$ ,  $d = D/J_1$ ,  $\Omega = \tau w$ ,  $T = (\beta J_1)^{-1}$ ,  $a_2 = \left( zm_1^A + \frac{J_3}{J_1} m_2^B + h \cos(\xi) \right)$ ,  $a_3 = \left( \frac{J_2}{J_1} zm_2^B + \frac{J_3}{J_1} m_1^A + h \cos(\xi) \right)$ ,  $a_4 = \left( \frac{J_2}{J_1} zm_2^A + \frac{J_3}{J_1} m_1^B + h \cos(\xi) \right)$  olarak alınmıştır.

Denklem (2.62)- (2.65)'in çözümü ve tartışması gelecek bölümde verilecektir.

## 2.3. Nümerik Sonuçlar

### 2.3.1. İki Tabakalı Kare Örgü İçin Sistemde Mevcut Olan Fazların Elde Edilmesi

Bu kesimde, (2.62)-(2.65) ile verilen dinamik ortalama-alan denklemlerinin çözülmesiyle, sistemin dinamik manyetik özellikleri ayrıntılı olarak incelenecektir. Burada şu noktayı belirtmeliyiz ki (2.62)-(2.65) ile verilen dinamik diferansiyel denklemlerin analitik çözümü bulunmadığından bu denklemler farklı nümerik metotlar kullanılarak çözülecektir. İlk olarak, (2.62)-(2.65) denklemleri Adams-Moulton kestirme ve düzeltme yöntemi kullanılarak çözüldü. Sıcaklık, dış manyetik alan, kristal-alan ve değiş-tokuş etkileşmelerinin farklı değerleri için sistemdeki mevcut olan fazlar ortalama alt örgü mıknatıslanmalarının ( $m_1^A(\xi)$ ,  $m_1^B(\xi)$ ,  $m_2^A(\xi)$ ,  $m_2^B(\xi)$ ) zamanın bir fonksiyonu olarak incelenmesiyle elde edildi. Burada elde edilen çözümler (2.62)-(2.65) denklemlerin kararlı çözümleridir ve bu çözümler  $\xi = wt$  ifadesine göre  $2\pi$  periyodu için daima kararlı periyodik fonksiyona sahiptir. ( $m^{A,B}(\xi + 2\pi) = m^{A,B}(\xi)$ ). (2.62)-(2.65) denklemlerinin aşağıdaki özelliğe uyup uymadığına göre sistemde üç tip çözüm elde edildi.

$$m_1^A(\xi + \pi) = -m_1^A(\xi), m_1^B(\xi + \pi) = -m_1^B(\xi) \quad (2.66)$$

$$m_2^A(\xi + \pi) = -m_2^A(\xi), m_2^B(\xi + \pi) = -m_2^B(\xi) \quad (2.67)$$

**Tip-1:** İlk tip çözümde elde edilen sonuçlar denklem (2.66) ve (2.67)'ye uyar ve bu çözümler düzensiz veya paramanyetik (p) faza karşılık gelmektedir. Bu durumda sistem kararlı olduğu anda ortalama alt örgü mıknatıslanmaları birbirine eşit, ( $m_1^A(\xi) = m_1^B(\xi) = m_2^A(\xi) = m_2^B(\xi)$ ) ve sıfır değeri civarında salınırlar.

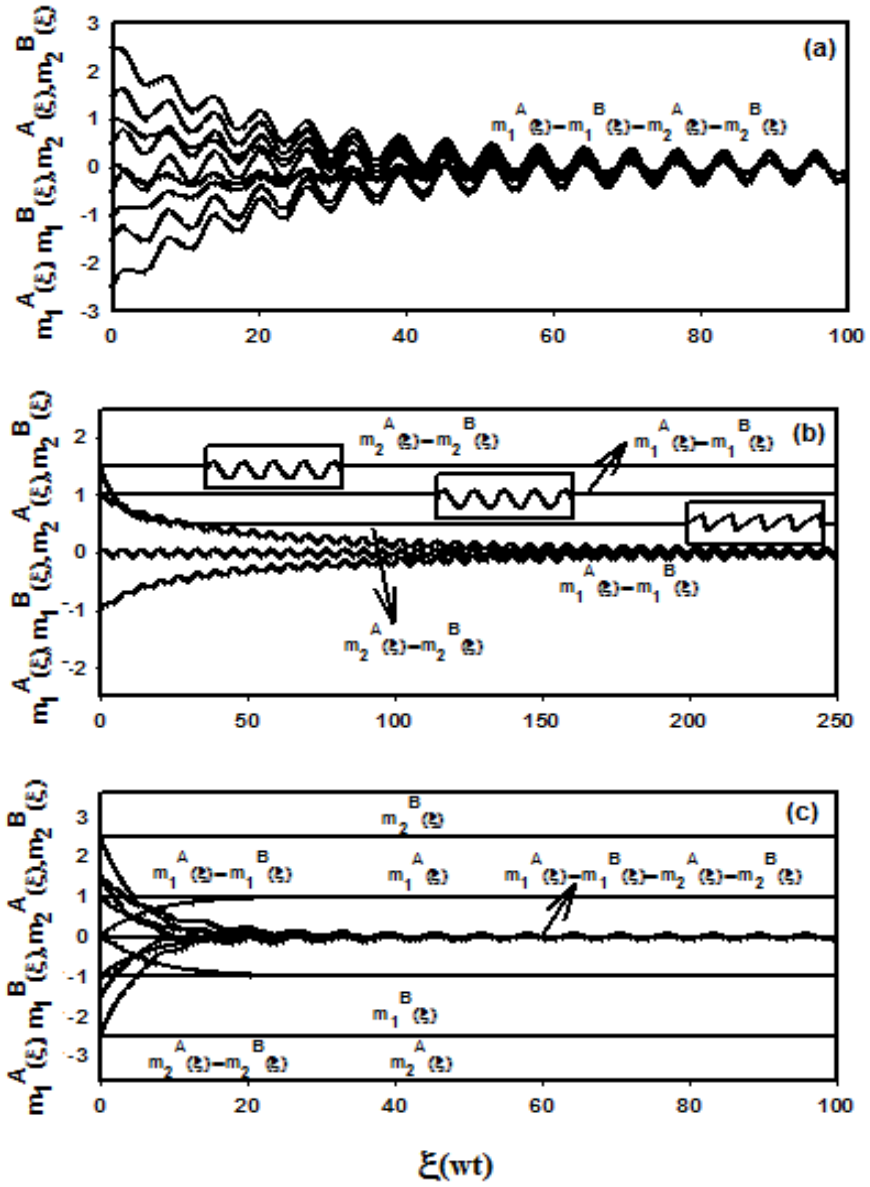
**Tip-2:** İkinci tip çözümde, (2.62)-(2.65) ile verilen denklemlerin çözümü denklem (2.66)'ya uyarken (2.67)'ye uymaz ve bu çözüm nonmanyetik (nm) yani manyetik olmayan faza karşılık gelir. Bu durumda,  $m_1^A(\xi) = m_1^B(\xi)$  sıfır değeri etrafında salınırken,  $m_2^A(\xi) = m_2^B(\xi)$  ise  $\pm 5/2$ ,  $\pm 3/2$ , ve  $\pm 1/2$  değerleri etrafında salınım gösterir.

**Tip-3:** Üçüncü tip çözümde ise (2.62)-(2.65) ile verilen denklemlerin çözümü (2.66) ve (2.67) denklemlerine uymaz ve bu çözüm simetrik olmayan çözüm olarak isimlendirilir. Bu tip çözüm, farklı simetrik beş faza karşılık gelmektedir. Ortalama alt örgü mıknatıslanmalarının salındığı değerlere göre bu temel fazlar şu şekilde sınıflandırılır. Eğer,  $m_1^A(\xi) = m_1^B(\xi)$ , 1 değeri etrafında salınırken  $m_2^A(\xi) = m_2^B(\xi) + 5/2, +3/2$  veya  $+1/2$  değerleri etrafında salınıyorsa bu çözüm ferromanyetik (f) faza karşılık gelir. Eğer  $m_1^A(\xi) = -m_1^B(\xi)$ , 1 değeri etrafında salınırken  $-m_2^A(\xi) = m_2^B(\xi) + 5/2, +3/2$  veya  $+1/2$  değerleri etrafında salınıyorsa elde edilen çözüm antiferromanyetik (af) faz olarak isimlendirilir. Eğer,  $m_1^A(\xi) = m_1^B(\xi)$ , 1 değeri etrafında salınırken  $-m_2^A(\xi) = -m_2^B(\xi) + 5/2, +3/2$  veya  $+1/2$  değerleri etrafında salınıyorsa sistemde compensated (c) yani telafi fazı mevcuttur. Eğer  $m_1^A(\xi) = -m_1^B(\xi)$ , 1 değeri etrafında salınırken  $m_2^A(\xi) = -m_2^B(\xi) + 5/2, +3/2$  veya  $+1/2$  değerleri etrafında salınıyorsa sistemde mixed (m) yani karma faz elde edilmiş demektir. Son olarak, eğer  $m_1^A(\xi) = m_1^B(\xi)$ , 1 değeri etrafında salınırken,  $-m_2^A(\xi) = m_2^B(\xi) + 5/2, +3/2$  veya  $+1/2$  değerleri etrafında salınıyorsa elde edilen faz surface ferromanyetik (sf) yani yüzey ferromanyetik faz olarak isimlendirilmektedir. Tablo 2.1' de tüm fazlara ait spin yönelimleri verilmiştir.

**Tablo 2.1.** Sistemdeki Mevcut Fazlara Ait Spin Yönelimleri

Fazlar	$m_1^A$	$m_1^B$	$m_2^A$	$m_2^B$
Paramanyetik (p)	0	0	0	0
Nonmanyetik (nm)	0	0	↑	↑
Compensated (c)	↑	↑	↓	↓
Ferromanyetik (f)	↑	↑	↑	↑
Antiferromanyetik (af)	↑	↓	↓	↑
Mixed (m)	↑	↓	↑	↓
Surface ferromanyetik (sf)	↑	↑	↓	↑

Yukarıda bahsedilen temel fazlar, sistemde tek başına bulunabilecekleri gibi temel fazların ikili, üçlü veya dördü kombinasyonları olarak karma faz bölgeleri şeklinde farklı fiziksel parametre değerleri için sistemde görülebilirler. Bu sistemde, 7 temel faza ek olarak bu temel fazların ikili kombinasyonundan oluşan 12 ((nm+p), (f+nm), (f+p), (c+nm), (c+f), (c+p), (af+c), (af+p), (f+m), (m+p), (f+sf), (m+sf)), üçlü kombinasyonundan oluşan 8 ((m+nm+p), (af+m+p), (af+c+p), (f+m+p), (f+m+sf), (f+nm+p), (c+nm+p), (c+f+nm)) ve dördü kombinasyonundan oluşan 1 (f+m+sf+p) olmak üzere toplam 21 karma faz bölgesi elde edilmiştir. Elde edilen bu çözümlerden p temel fazı ile f+nm ve af+c+p karma fazlarının nasıl oluştuğu Şekil 2.2' de gösterilmiştir. Şekilleri incelediğimizde, Şekil 2.2(a)'da p temel fazı, Şekil 2.2(b)'de f ve nm fazlarının ikili kombinasyonu olan f+nm karma fazı, Şekil 2.3(c)'de ise af, c ve p temel fazlarının üçlü kombinasyonu olan af+c+p fazının nasıl oluştuğu açıkça görülmektedir.



**Şekil 2.2.** Ortalama Altörgü Miknatıslanmalarının ( $m_1^A(\xi)$ ,  $m_1^B(\xi)$ ,  $m_2^A(\xi)$ ,  $m_2^B(\xi)$ ) Zamanla Değişimleri ve Sistemdeki Mevcut Olan Bazı Fazların Gösterimi. **a)** Paramanyetik (p) Temel Fazı. ( $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/|J_1| = -1.0$ ,  $J_3/|J_1| = -3.0$ ,  $d = -3.0$ ,  $h = 2.0$  ve  $T = 1.2$ ) **b)** Temel Fazların İkili Kombinasyonu Olan  $f+nm$  Karma Faz Bölgesi. ( $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/|J_1| = 1.0$ ,  $J_3/|J_1| = 1.0$ ,  $d = -3.0$ ,  $h = 1.0$ , ve  $T = 0.5$ ) **c)** Temel Fazların Üçlü Kombinasyonu Olan  $af+c+p$  Karma Faz Bölgesi. ( $J_1 = -1.0$ ,  $J_2/|J_1| = -0.2$ ,  $J_3/|J_1| = -5.0$ ,  $d = 2.5$ ,  $h = 4.0$  ve  $T = 0.1$ ).



### 2.3.2. İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Fazlar Arasındaki Dinamik Faz Geçiş Sıcaklıklarının Hesaplanması

Bir önceki kesimde, sistemin dinamik davranışlarının kesin açıklamasını yapan dinamik diferansiyel denklemler kullanılarak ortalama alt örgü mıknatıslanmalarının zamanın fonksiyonu olarak davranışı incelendi ve sistemde gözükten temel fazlar ve bu temel fazların farklı kombinasyonlarından oluşan karma faz bölgeleri tespit edildi. Bu kesimde, temel faz ve karma faz bölgelerinin arasındaki dinamik faz geçiş (DFG) sıcaklıkları Adams-Moulton kestirme ve düzeltme yöntemi ve Romberg integrasyon yöntemi kullanılarak farklı fiziksel parametre değerleri için hesaplanacaktır. Bunun için salınımlı alanın tam bir periyodu üzerinde ortalama alt örgü mıknatıslanmaları tanımlanmalıdır. Bir periyot içinde ortalama alt örgü mıknatıslanmaları yani dinamik alt örgü mıknatıslanmaları  $M_1^{A,B}$  ve  $M_2^{A,B}$  olarak gösterilir ve aşağıdaki şekilde ve tanımlanır.

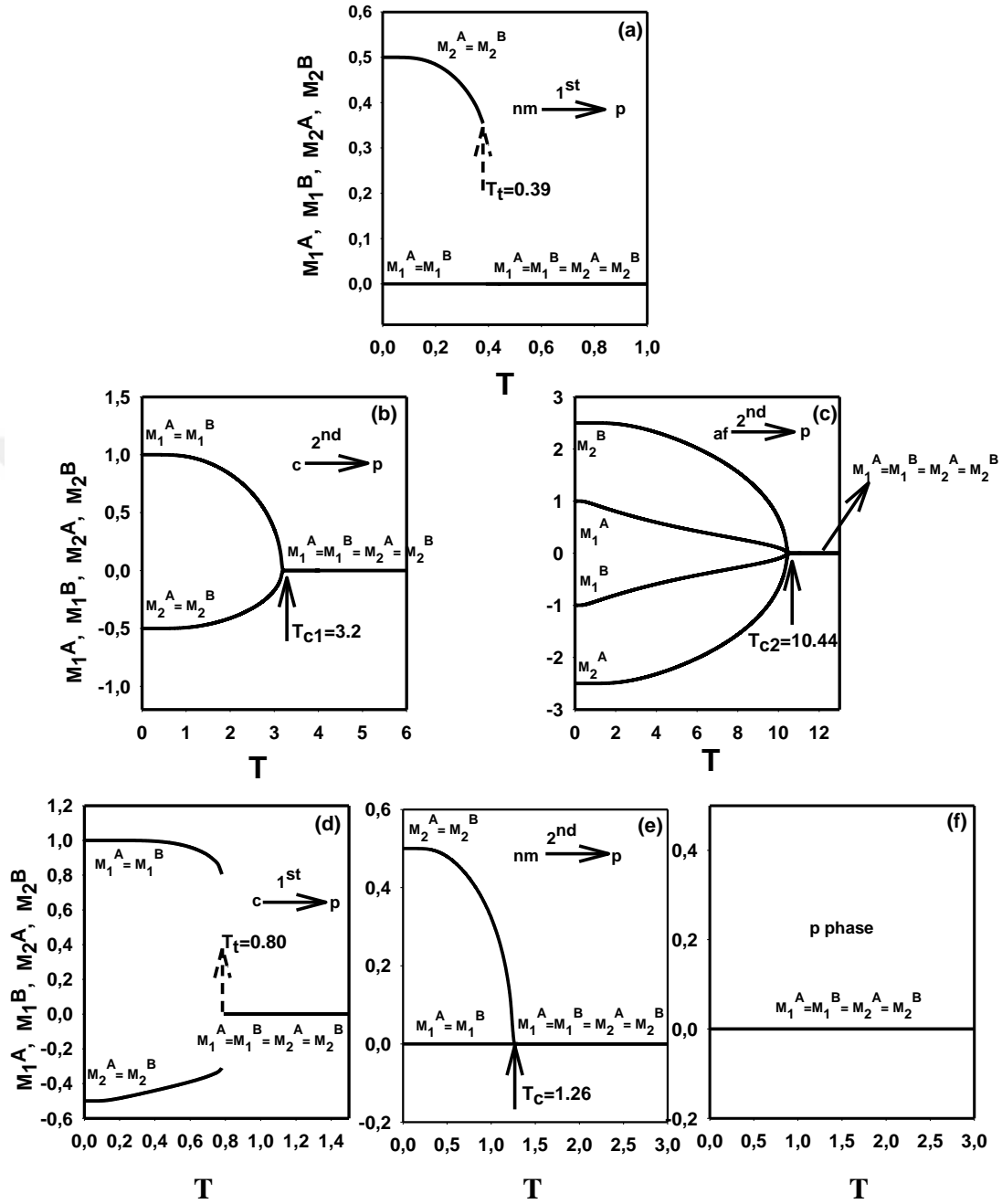
$$M_1^A = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_1^A(\xi) d\xi, \quad M_1^B = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_1^B(\xi) d\xi, \quad (2.68)$$

$$M_2^A = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_2^A(\xi) d\xi, \quad M_2^B = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_2^B(\xi) d\xi \quad (2.69)$$

Dinamik alt örgü mıknatıslarının sıcaklığa bağlı davranışlarının incelenmesi, bize sistemde var olan fazlar arasındaki DFG sıcaklıklarını verecektir. Bu inceleme ayrıca DFG sıcaklıklarının doğasını (birinci-derece veya ikinci-derece faz geçişi) bulmamızı sağlayacaktır. Dinamik alt örgü mıknatıslanmalarının sıcaklığın bir fonksiyonu olarak davranışı incelendi ve DFG sıcaklıklarının nasıl hesaplandığı 6 açıklayıcı örnek ile Şekil 2.3' de verilmiştir.

Şekil 2.3(a)'da  $M_1^{A,B}$  ve  $M_2^{A,B}$ 'nin sıcaklığa bağlı davranışları  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/|J_1| = 1.0$ ,  $J_3/|J_1| = 1.0$ ,  $d = -3.0$  ve  $h = 1.7$  değerleri için gösterilmiştir. Bu fiziksel parametre değerleri için sıfır sıcaklığında sistemde nm fazı mevcuttur. Sıcaklığın belirli bir değerinde dinamik alt örgü mıknatıslanmaları için bir süreksizlik meydana gelir. Bu noktada, sistem birinci-derece bir faz geçişi ile nm fazından p fazına geçer.  $T_c = 0.39$  değeri birinci-derece faz geçiş sıcaklığını göstermektedir. Bu fiziksel parametre

değerleri için fazlar arasında meydana gelen dinamik faz geçişi, diferansiyel denklemlerin çözümü esnasında kullanılan dinamik miknatıslanmaların başlangıç değerlerine bağlı değildir. Şekil 2.3(b) ve Şekil 2.3(c),  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/|J_1| = -1.0$ ,  $J_3/|J_1| = -3.0$ ,  $d = -1.0$  ve  $h = 0.1$  fiziksel parametre değerleri ile için elde edilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi bu parametre değerleri için iki farklı çözüm elde edilmiştir. Bunun sebebi elde edilen çözümün  $M_1^{A,B}$  ve  $M_2^{A,B}$ 'nin başlangıç değerine bağlı olmasıdır.  $M_1^A = M_1^B = 1.0$ ;  $M_2^A = M_2^B = -0.5$  başlangıç değerleri için elde edilen çözüm Şekil 2.3(b)'de gösterilmiştir. Burada, sıfır sıcaklıkta  $M_1^A = M_1^B = 1.0$  ve  $M_2^A = M_2^B = -0.5$  değerindedir ve sistemde c fazı bulunmaktadır. Sıcaklığın artan değerleri ile  $M_1^{A,B}$  ve  $M_2^{A,B}$  sürekli olarak sıfıra gider ve  $T_{c1} = 3.2$  değerinde c fazından p fazına ikinci-derece bir faz geçiş olur.  $M_1^A = -M_1^B = 1.0$  ve  $-M_2^A = M_2^B = 2.5$  başlangıç değerleri için Şekil 2.3(c)'de elde edilen çözümde ise sistemde sıfır sıcaklıkta af temel fazı bulunmaktadır ve sıcaklığın artmasıyla Şekil 2.3(b)'ye benzer olarak  $T_{c2} = 10.44$  değerinde af fazından p fazına ikinci-derece bir faz geçişi olur. Bunun sonucu olarak, sistemde  $T_{c1} = 3.2$ 'ye kadar af+c karma fazı,  $T_{c2} = 10.44$ 'ye kadar ise af+p karma fazı mevcuttur. Daha yüksek sıcaklık değerlerinde sistemde sadece p fazı bulunmaktadır. Bu iki şekil bize, ikinci-derece faz geçişinin oluşumunu ve temel fazların ikili kombinasyonu olan karma faz bölgesinin nasıl oluştuğunu açıkça göstermektedir. Şekil 2.3(d), Şekil 2.3(e) ve Şekil 2.3(f) ise  $J_1 = 1.0$ ,  $J_2/|J_1| = -1.0$ ,  $J_3/|J_1| = -3.0$ ,  $d = -3.0$ ,  $h = 0.1$  değerleri için elde edilmiştir. Burada bu parametre değerleri için elde edilen çözüm üç farklı başlangıç değerine bağlıdır. Bu üç şekil bize, hem aynı fiziksel parametre değerleri için aynı anda birinci ve ikinci-derece faz geçişinin nasıl meydana gelebileceğini hem de temel fazların ikili ve üçlü kombinasyonlarından oluşan karma fazların aynı anda nasıl bulunduğunu açıkça göstermektedir. Şekil 2.3(d)'ye baktığımızda  $T_i = 0.80$ 'de sistem c fazından p fazına birinci-derece bir faz geçişiyle geçer. Şekil 2.3(e)'de yalnızca ikinci-derece bir faz geçişi meydana gelmektedir ve bu faz geçişi  $T_c = 1.26$ 'da nm fazından p fazına. Şekil 2.3(f)'de ise açıkça gözükmektedir ki, tüm sıcaklık değerleri için dinamik miknatıslanmalar daima sıfıra eşittir ve sistemde herhangi bir faz geçişi olmamaktadır. Bu durum p fazının sistemde daima mevcut olduğunu göstermektedir. Şekil 2.3(d), Şekil 2.3(e) ve Şekil 2.3(f)'den  $T_i = 0.80$  değerine kadar c+nm+p fazının,  $T_c = 1.26$ 'ya kadarsa nm+p karma fazının sistemde meydana geldiği gözükmektedir.



**Şekil 2.3.** Dinamik Alt Örgü Mıknatıslanmalarının ( $M_1^{A,B}$  ve  $M_2^{A,B}$ ) Sıcaklığın Bir Fonksiyonu Olarak Davranışları.  $T_c$  ve  $T_t$  sırasıyla birinci ve ikinci derece faz geçiş sıcaklıklarıdır. **a)**  $J_1 = 1.0, J_2/|J_1| = 1.0, J_3/|J_1| = 1.0, d = -3.0, h = 1.7$ , **b)**  $J_1 = 1.0, J_2/|J_1| = -1.0, J_3/|J_1| = -3.0, d = -1.0$  ve  $h = 0.1, M_1^A = M_1^B = 1.0; M_2^A = M_2^B = -0.5$ , **c)**  $J_1 = 1.0, J_2/|J_1| = -1.0, J_3/|J_1| = -3.0, d = -1.0, h = 0.1, M_1^A = -M_1^B = 1.0; -M_2^A = M_2^B = 2.5$ , **d)**  $J_1 = 1.0, J_2/|J_1| = -1.0, J_3/|J_1| = -3.0, d = -3.0, h = 0.1, M_1^A = M_1^B = 1.0; M_2^A = M_2^B = -0.5$ , **e)**  $J_1 = 1.0, J_2/|J_1| = -1.0, J_3/|J_1| = -3.0, d = -3.0, h = 0.1, M_1^A = M_1^B = 0.0; M_2^A = M_2^B = 0.5$ , **f)**  $J_1 = 1.0, J_2/|J_1| = -1.0, J_3/|J_1| = -3.0, d = -3.0, h = 0.1, M_1^A = M_1^B = 0.0; M_2^A = M_2^B = 1.5$ .

### 2.3.3. Dinamik Faz Diyagramları

Daha önceki kesimlerde, sistemde mevcut olan fazlar ve bu fazlar arasındaki dinamik faz geçiş sıcaklıkları elde edilmişti. Bu kesimde, tüm bu elde edilen sonuçlardan yararlanılarak, iki katlı kare üzerinde karma spin-1 ve spin-5/2 Ising sisteminin dinamik üçlü kritik davranışının yanı sıra dinamik faz diyagramları sunulacaktır.

Dinamik faz diyagramları, ferromanyetik-ferromanyetik (FM/FM), ferromanyetik-antiferromanyetik (FM/AFM) ve antiferromanyetik-antiferromanyetik (AFM/AFM) etkileşmeler için farklı düzlemler üzerinde elde edilmiş ve Şekil (2.4)-(2.9)'da sunulmuştur. Buna ilaveten, salınımlı alan frekansının dinamik faz diyagramları üzerindeki etkisi de detaylı bir şekilde incelenmiş ve  $(w/2\pi, T)$  düzleminde üç farklı dinamik faz diyagramı daha elde edilmiş ve bu dinamik faz diyagramları Şekil 2.10'da verilmiştir. Bu dinamik faz diyagramlarında, kesikli ve sürekli çizgiler sırasıyla birinci-derece ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerini göstermektedir. İçi dolu daire sembolü, dinamik üçlü kritik noktayı ifade etmektedir.

#### 2.3.3.1 FM/FM Etkileşmesi İçin Sistemin Dinamik Faz Diyagramları

İlk olarak, karma spin-1 ve spin-5/2 Ising sisteminin dinamik faz diyagramları FM/FM etkileşmesi ( $J_1 > 0, J_2 > 0$ ) için  $(T, h)$  düzleminde elde edilmiş ve Hamiltonyen parametrelerinin farklı değerleri için Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Bu faz diyagramları elde edilirken,  $J_1 = w/2\pi = 1.0$  olarak sabit alınmıştır. Bu dinamik faz diyagramları incelendiğinde aşağıda belirtilen ilginç özellikler gözlenmiştir.

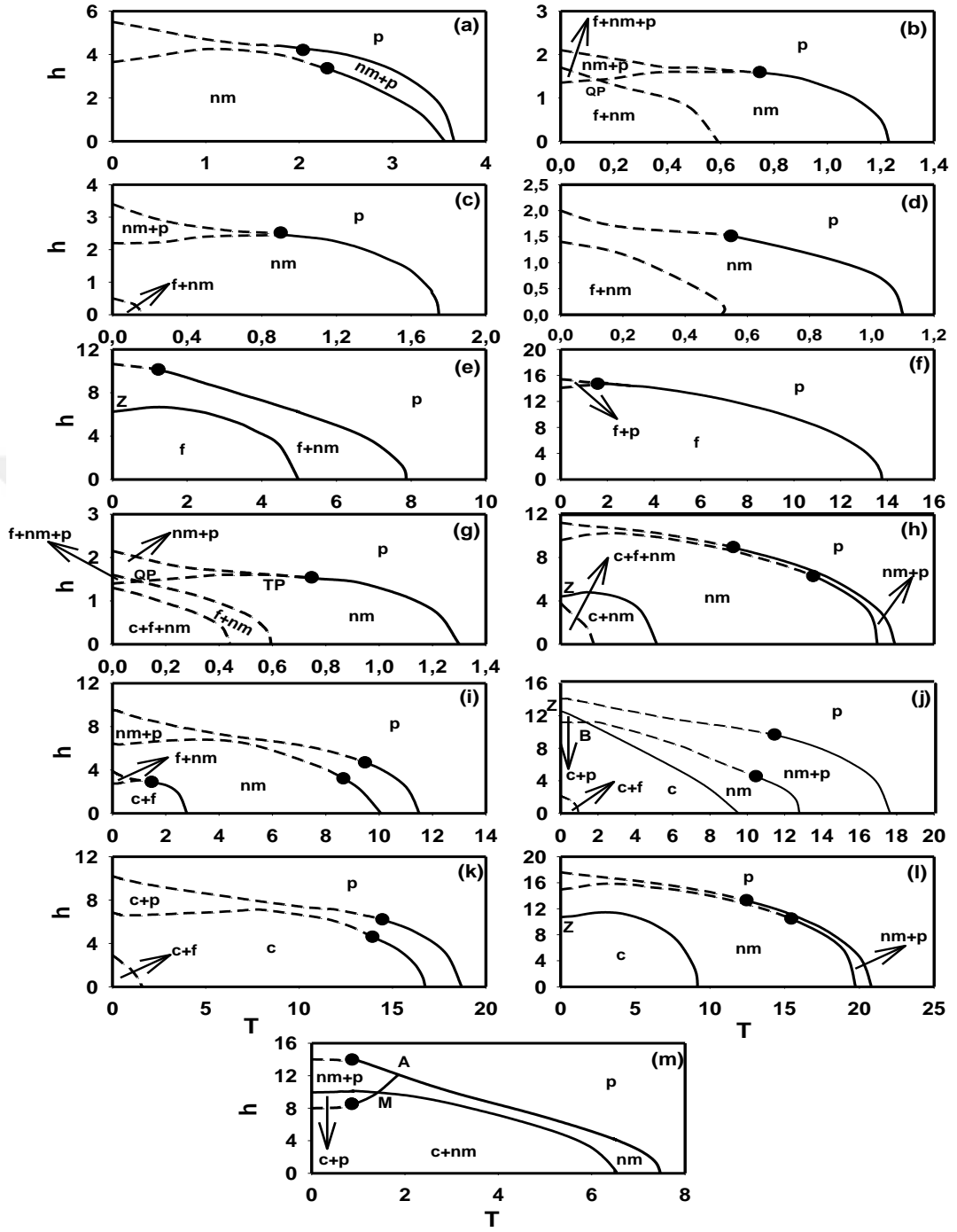
- 1) Dinamik faz diyagramları, bir, iki veya üç dinamik üçlü kritik nokta sergilemektedir.
- 2) Dinamik faz diyagramları, p, c, f, nm temel fazlarının yanı sıra c+f, c+p, c+nm, f+nm, f+p, nm+p, c+f+nm ve f+nm+p karma faz bölgelerine sahiptir.
- 3) Şekil 2.4(g)'de üç tane birinci-derece faz geçiş çizgisinin keştiği yerde dinamik üçlü nokta (TP) meydana gelmektedir.
- 4) Şekil 2.4(b) ve Şekil 2.4(g)'de dört birinci-derece faz geçiş çizgisinin birleştiği yerde dinamik dördü nokta (QP) mevcuttur.
- 5) Şekil 2.4(m)'de dört ikinci-derece faz geçiş çizgisinin birleştiği yerde dinamik çoklu kritik nokta (M) gözükmektedir.

6) Şekil 2.4(e), Şekil 2.4(h), Şekil 2.4(j) ve Şekil 2.4(l)'de dinamik sıfır-sıcaklık kritik nokta (Z) meydana gelmiştir. Bu nokta sıfır sıcaklıkta spinlerin salınımından kaynaklanmaktadır.

7) Manyetik alanın yüksek değerleri için Şekil 2.4(j)'de, birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerinin birbirini kestiği noktada, dinamik çift kritik son nokta (B) oluşmaktadır.

8) Genel olarak, birinci-derece faz geçiş çizgileri düşük sıcaklıkta, ikinci-derece faz geçiş çizgileri ise yüksek sıcaklıkta meydana gelmektedir.

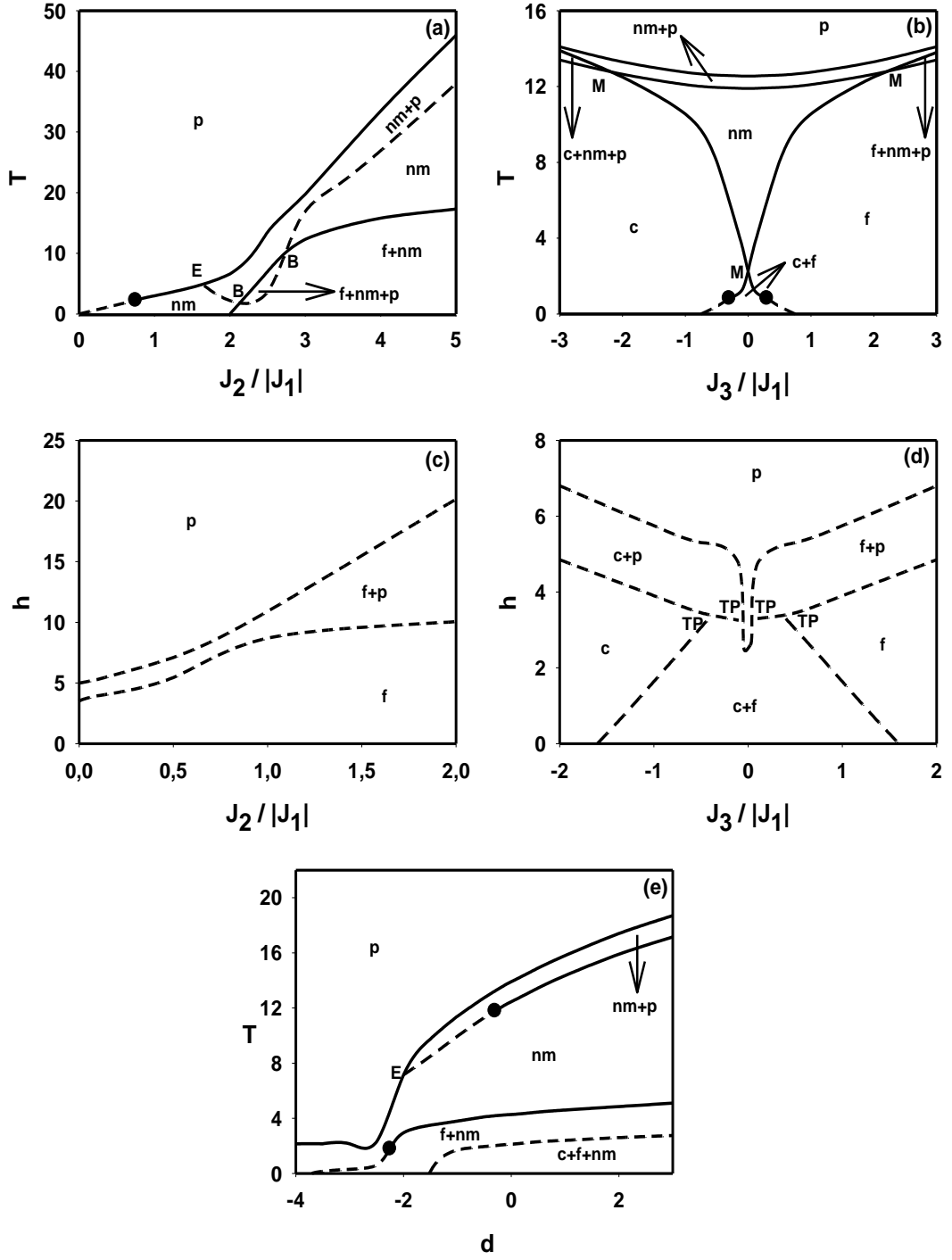




**Şekil 2.4.** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde FM/FM Etkileşmesi İçin  $(T, h)$  Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları.  
**a)**  $J_2/J_1=3.0, J_3/J_1=-1.0, d=-6.5$ , **b)**  $J_2/J_1=1.1, J_3/J_1=1.0, d=-2.95$ , **c)**  $J_2/J_1=1.7, J_3/J_1=1.1, d=-0.5$ , **d)**  $J_2/J_1=1.0, J_3/J_1=1.0, d=-3.0$ , **e)**  $J_2/J_1=1.2, J_3/J_1=0.3, d=-2.0$ , **f)**  $J_2/J_1=1.5, J_3/J_1=5.0, d=-2.7$ , **g)**  $J_2/J_1=1.1, J_3/J_1=0.1, d=-2.5$ , **h)**  $J_2/J_1=1.4, J_3/J_1=-0.1, d=-1.5$ , **i)**  $J_2/J_1=1.0, J_3/J_1=0.01, d=-0.1$ , **j)**  $J_2/J_1=1.6, J_3/J_1=-0.5, d=-0.5$ , **k)**  $J_2/J_1=1.0, J_3/J_1=-1.0, d=5.0$ , **l)**  $J_2/J_1=1.2, J_3/J_1=0.3, d=2.0$ , **m)**  $J_2/J_1=1.5, J_3/J_1=-1.0, d=-2.9$ .

FM/FM etkileşmesi için, dinamik faz diyagramları  $(T, h)$  düzleminin yanısıra,  $(J_2/|J_1|, T)$ ,  $(J_3/|J_1|, T)$ ,  $(J_2/|J_1|, h)$ ,  $(J_3/|J_1|, h)$  ve  $(d, T)$  düzlemlerinde de elde edildi. Bu düzlemlerde elde edilen dinamik faz diyagramlarının birçoğu  $(T, h)$  düzleminde elde edildiği için burada her bir düzlem için sadece bir ilginç dinamik faz diyagramı, Şekil 2.5’de verildi. Bu dinamik faz diyagramlarından aşağıdaki temel sonuçlar tespit edildi.

- 1) Şekil 2.5(a), Şekil 2.5(b) ve Şekil 2.5(e)’de bir veya iki adet dinamik kritik üçlü nokta olduğu gözlenmektedir.
- 2)  $(J_2/|J_1|, h)$  ve  $(J_3/|J_1|, h)$  düzlemlerindeki faz diyagramlarında, fazlar arasındaki tüm dinamik faz sınırları, birinci-derece faz geçiş çizgileridir. Bundan dolayı sistemde dinamik üçlü kritik nokta gözlenmemektedir.
- 3)  $(J_3/|J_1|, h)$  düzlemindeki dinamik faz diyagramı dört tane dinamik TP sergilemektedir.
- 4) Yalnızca Şekil 2.5(b)’de dinamik M görülmektedir.
- 5) Şekil 2.5(a) ve Şekil 2.5(e),  $d$ ’nin negatif değerlerinde yeni bir kritik nokta içermektedir. Birinci-derece faz geçiş çizgisinin ikinci-derece faz geçiş çizgisinin üzerinde bittiği bu nokta dinamik kritik son nokta (E) olarak adlandırılır. Şekil 2.5(a)’da ayrıca iki adet dinamik B mevcuttur.



**Şekil 2.5.** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde FM/FM Etkileşmesi İçin Farklı Düzlemlerde Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $(J_2/|J_1|, T)$  düzleminde,  $J_3/|J_1|=1.1$ ,  $h=0.1$  ve  $d=-0.5$ , **b)**  $(J_3/|J_1|, T)$  düzleminde,  $J_2/|J_1|=1.4$ ,  $h=0.1$  ve  $d=-1.5$ , **c)**  $(J_2/|J_1|, h)$  düzleminde,  $J_3/|J_1|=2.3$ ,  $T=0.5$  ve  $d=4.0$ , **d)**  $(J_3/|J_1|, h)$  düzleminde,  $J_2/|J_1|=0.5$ ,  $T=0.5$  ve  $d=5.0$ , **e)**  $(d, T)$  düzleminde,  $J_2/|J_1|=1.1$ ,  $J_3/|J_1|=0.1$  ve  $h=0.1$ .



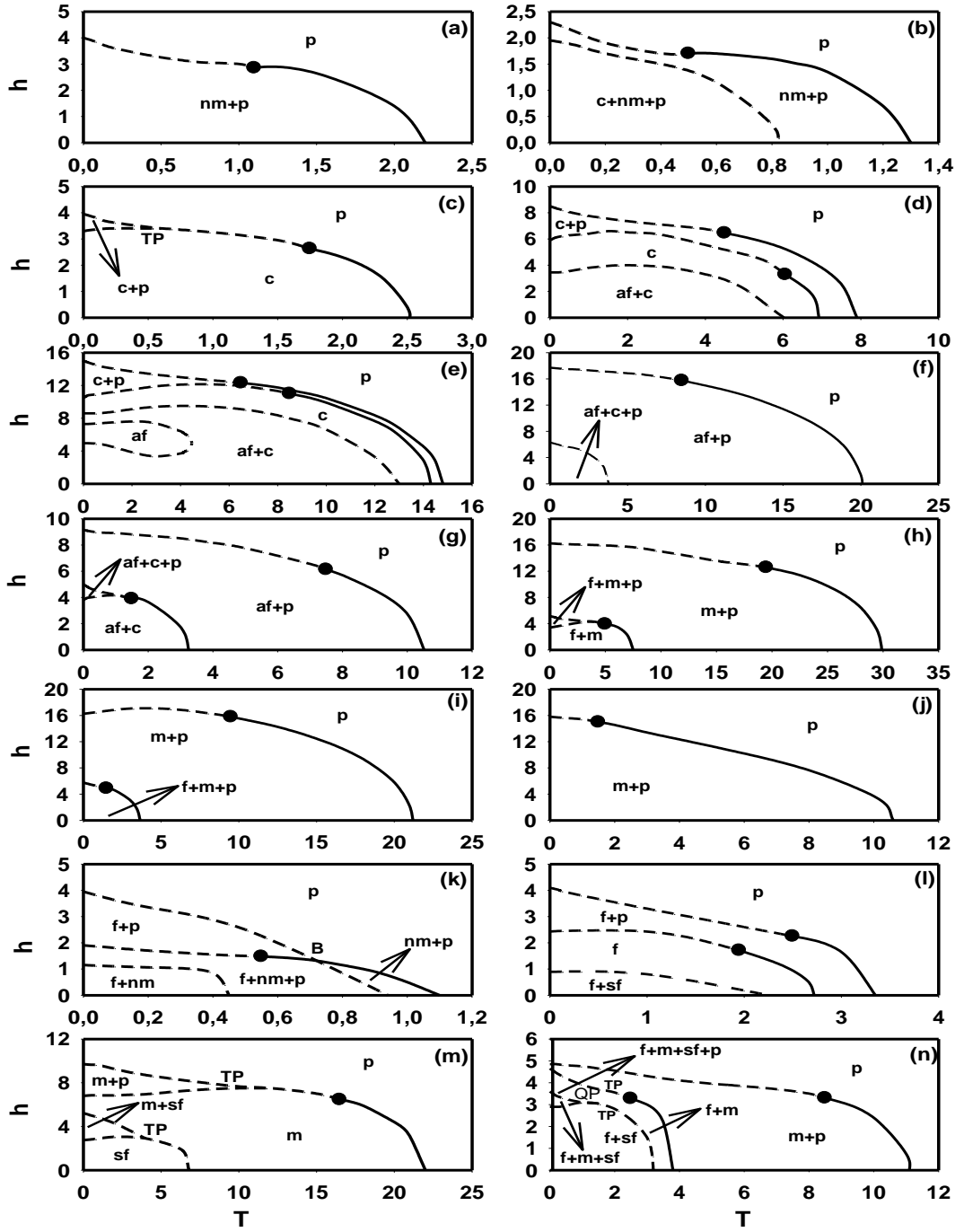
### 2.3.3.2. FM/AFM Etkileşmesi İçin Sistemin Dinamik Faz Diyagramları

Bu kesimde, dinamik faz diyagramları FM/AFM etkileşmesi ( $J_1 > 0$ ,  $J_2 < 0$ ) için elde edilmiş ve Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de sunulmuştur. Bu faz diyagramlarında da,  $J_1 = w/2\pi = 1.0$  olarak sabit alınmıştır.

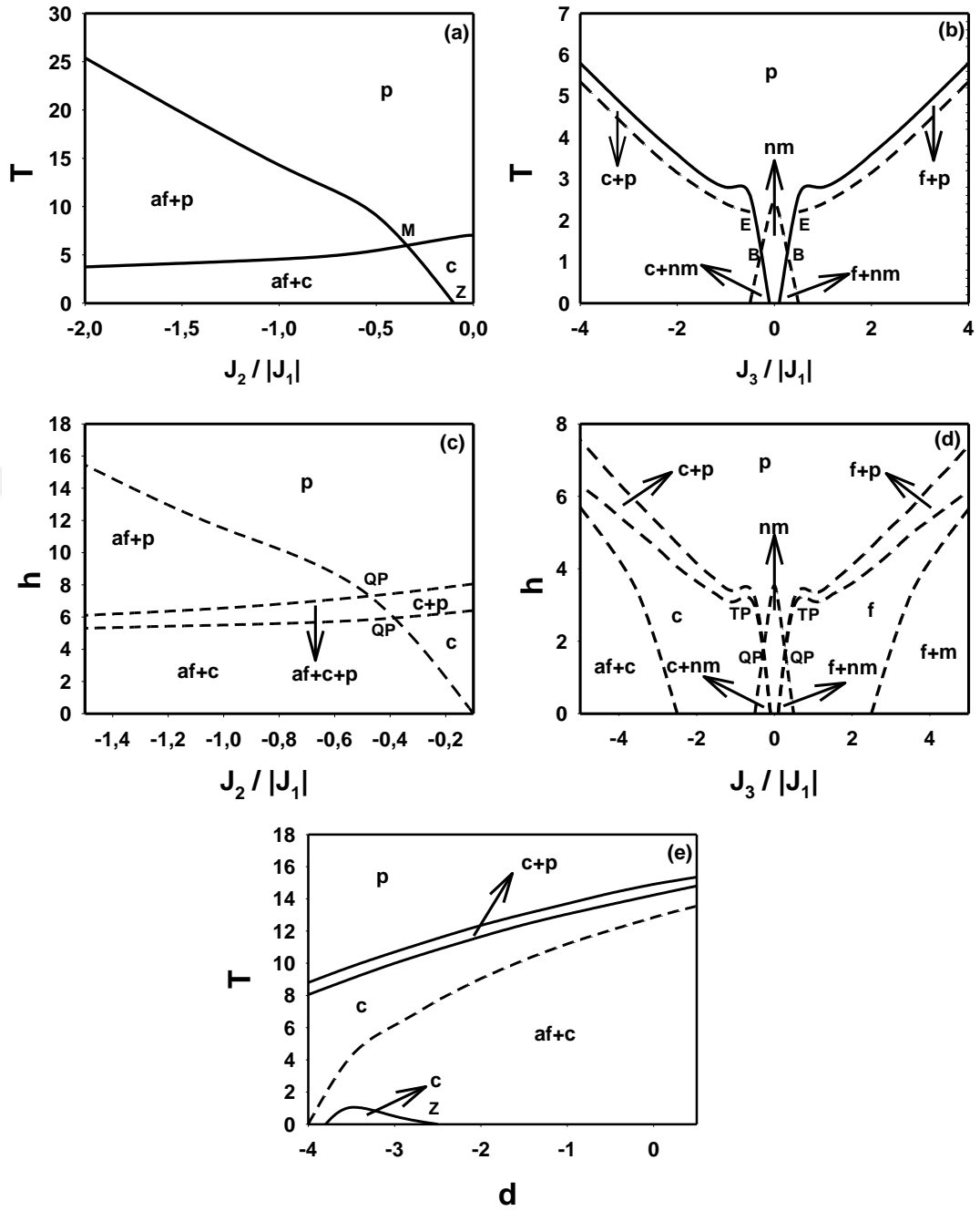
(T, h) düzleminde 14 farklı tipte dinamik faz diyagramı elde edilmiştir. Elde edilen bu dinamik faz diyagramları Şekil 2.6 ‘da verilmiştir. Bu faz diyagramları bir veya iki dinamik üçlü kritik noktaya sahiptir. Bu dinamik faz diyagramlarında, yedi temel faz (p, c, f, nm, af, m ve sf) ve 16 karma faz (nm+p, c+p, af+c, af+p, f+m, m+p, f+nm, f+p, f+sf, m+sf, c+nm+p, af+c+p, f+m+p, f+nm+p, f+m+sf ve f+m+sf+p) bölgesi olduğu görülmektedir. Özel noktalardan, dinamik TP Şekil 2.6(c), Şekil 2.6(m) ve Şekil 2.6(n)’de, dinamik B ise yalnızca Şekil 2.6(k)’da görülmektedir.

FM/AFM etkileşmesi için ( $J_2/|J_1|$ , T), ( $J_3/|J_1|$ , T), ( $J_2/|J_1|$ , h), ( $J_3/|J_1|$ , h) ve (d, T) düzlemlerinde bir açıklayıcı dinamik faz diyagramı Şekil 2.7’de sunulmuştur. Bu faz diyagramlarından aşağıdaki sonuçlar gözlenmiştir.

- 1) Bu faz diyagramlarında, dinamik üçlü kritik nokta bulunmamaktadır.
- 2) Yalnızca Şekil 2.7(d)’de dinamik TP sergilenmektedir.
- 3) Şekil 2.7(c) ve Şekil 2.7(d)’de sistemde dinamik QP görülmektedir.
- 4) Şekil 2.7(b)’de düşük sıcaklık değerleri için hem dinamik B, hem de dinamik E meydana gelmektedir.
- 5) Şekil 2.7(a)’da  $J_2/|J_1|$ ’in yüksek değerleri için sistemde dinamik M oluşmaktadır.
- 6) ( $J_2/|J_1|$ , h) ve ( $J_3/|J_1|$ , h) düzlemlerinde fazlar arasındaki tüm dinamik faz sınırları birinci-derecedir.
- 7) ( $J_2/|J_1|$ , T) düzleminde fazlar arasındaki tüm dinamik faz sınırları ikinci-derecedir.
- 8) Şekil 2.7(a) ve Şekil 2.7(e)’de Z noktası görülmektedir.



**Şekil 2.6.** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde FM/AFM Etkileşmesi İçin  $(T, h)$  Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_2/|J_1| = -1.0$ ,  $J_3/|J_1| = -1.0$ ,  $d = -1.0$ , **b)**  $J_2/|J_1| = -1.0$ ,  $J_3/|J_1| = -3.0$ ,  $d = -3.0$ , **c)**  $J_2/|J_1| = -0.1$ ,  $J_3/|J_1| = -1.0$ ,  $d = -1.0$ , **d)**  $J_2/|J_1| = -0.1$ ,  $J_3/|J_1| = -5.0$ ,  $d = -0.1$ , **e)**  $J_2/|J_1| = -0.1$ ,  $J_3/|J_1| = -10.0$ ,  $d = -0.1$ , **f)**  $J_2/|J_1| = -1.9$ ,  $J_3/|J_1| = -6.1$ ,  $d = -2.1$ , **g)**  $J_2/|J_1| = -1.0$ ,  $J_3/|J_1| = -3.0$ ,  $d = -1.0$ , **h)**  $J_2/|J_1| = -1.5$ ,  $J_3/|J_1| = 6.0$ ,  $d = 7.0$ , **i)**  $J_2/|J_1| = -2.0$ ,  $J_3/|J_1| = 5.8$ ,  $d = -2.0$ , **j)**  $J_2/|J_1| = -1.5$ ,  $J_3/|J_1| = 4.5$ ,  $d = -3.0$ , **k)**  $J_2/|J_1| = -1.0$ ,  $J_3/|J_1| = 12.0$ ,  $d = -8.0$ , **l)**  $J_2/|J_1| = -0.1$ ,  $J_3/|J_1| = 0.63$ ,  $d = 1.5$ , **m)**  $J_2/|J_1| = -1.0$ ,  $J_3/|J_1| = 1.0$ ,  $d = 10.0$ , **n)**  $J_2/|J_1| = -0.5$ ,  $J_3/|J_1| = 1.0$ ,  $d = 5.0$ .



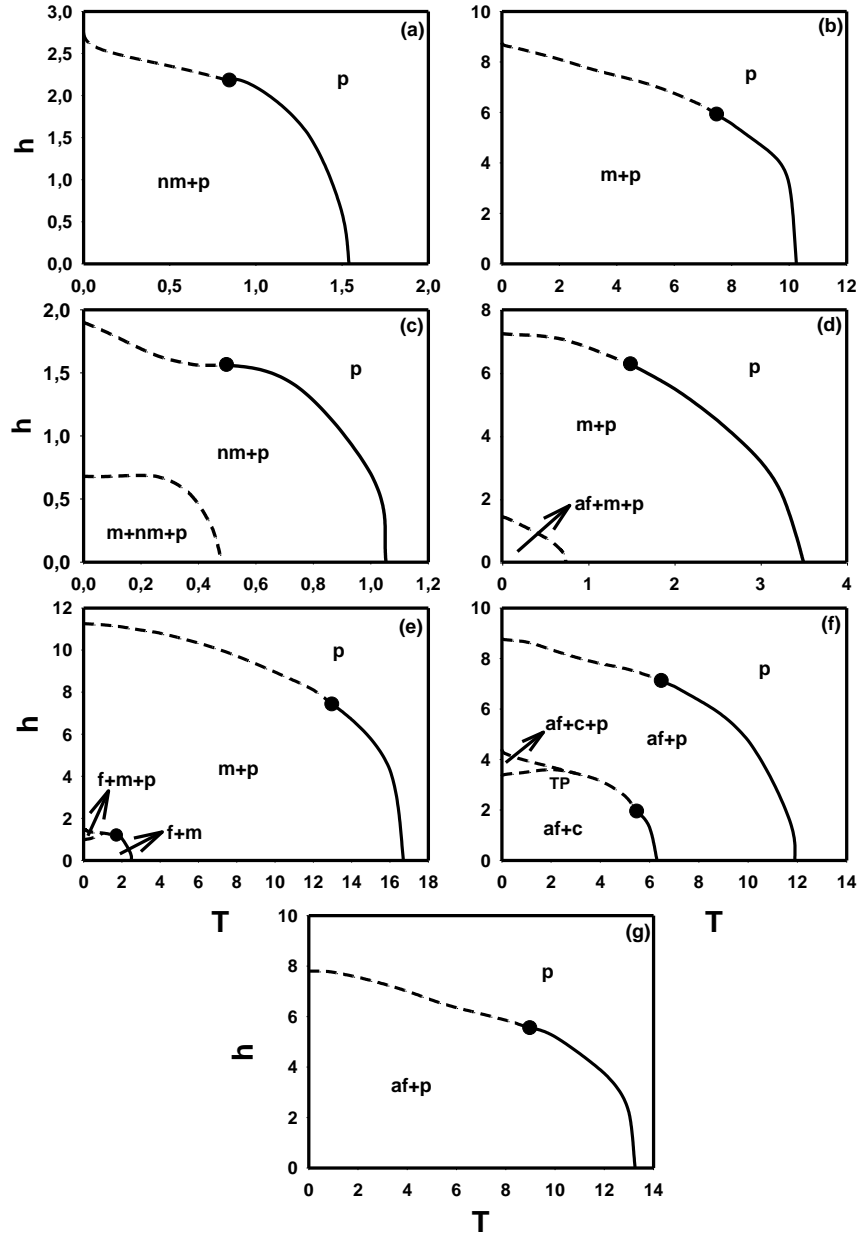
**Şekil 2.7.** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde FM/AFM Etkileşmesi İçin Farklı Düzlemlerde Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $(J_2/|J_1|, T)$  düzleminde,  $J_3/|J_1| = -4.0$ ,  $h = 2.0$  ve  $d = 0.5$ , **b)**  $(J_3/|J_1|, T)$  düzleminde,  $J_2/|J_1| = -0.1$ ,  $h = 0.5$  ve  $d = -1.0$ , **c)**  $(J_2/|J_1|, h)$  düzleminde,  $J_3/|J_1| = -3.0$ ,  $T = 0.5$  ve  $d = -0.1$ , **d)**  $(J_3/|J_1|, h)$  düzleminde,  $J_2/|J_1| = -0.3$ ,  $T = 0.5$  ve  $d = -1.0$ , **e)**  $(d, T)$  düzleminde,  $J_2/|J_1| = -0.1$ ,  $J_3/|J_1| = -10.0$  ve  $h = 0.1$ .

### 2.3.3.3. AFM/AFM Etkileşmesi İçin Sistemin Dinamik Faz Diyagramları

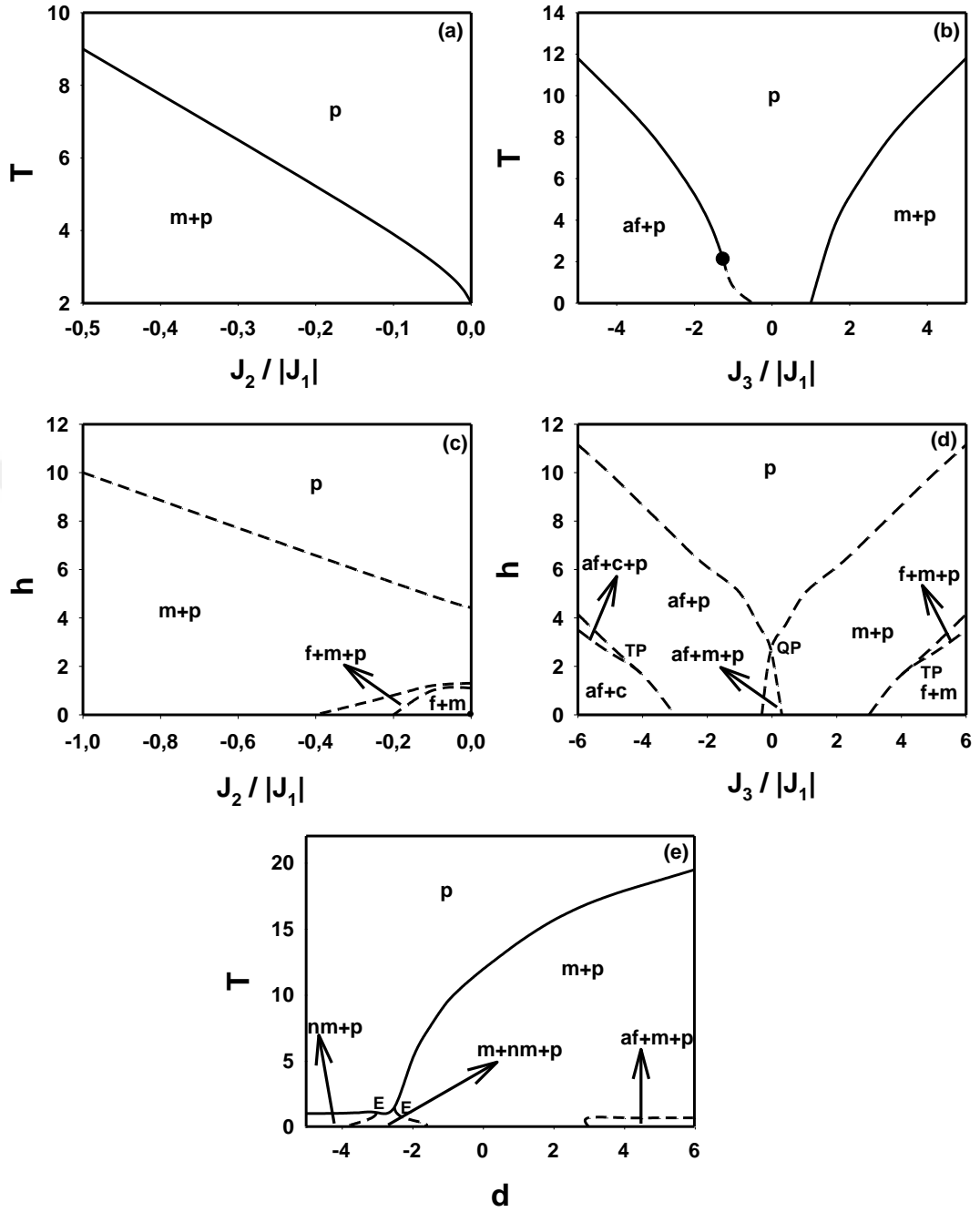
Son olarak, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da gösterildiği gibi AFM/AFM etkileşmesi için dinamik faz diyagramları farklı düzlemler üzerinde hesaplandı. Bu faz diyagramları elde edilirken,  $J_1=-1.0$  ve  $w/2\pi =1.0$  olarak sabit alınmıştır. Şekil 2.8'de (T, h) düzleminde p temel fazının yanı sıra, 9 karma faz (nm+p, af+c, af+p, f+m, m+p, m+nm+p, af+m+p, f+m+p ve af+c+p) bölgesi sistemde mevcuttur. Dinamik faz diyagramları bir veya iki dinamik üçlü kritik nokta sergilemektedir. Özel dinamik noktalardan sadece dinamik TP, Şekil 2.8(f)'de meydana gelmiştir.

Şekil 2.9'da ise AFM/AFM etkileşmesi için  $(J_2/|J_1|, T)$ ,  $(J_3/|J_1|, T)$ ,  $(J_2/|J_1|, h)$ ,  $(J_3/|J_1|, h)$  ve  $(d, T)$  düzlemlerinde dinamik faz diyagramları verildi. Bu faz diyagramlarında aşağıdaki sonuçlar gözlemlendi.

- 1) Yalnızca Şekil 2.9(b) dinamik üçlü kritik noktaya sahiptir.
- 2) Şekil 2.9(d), manyetik alanın düşük değerleri için dinamik TP ve dinamik QP içermektedir.
- 3) Şekil 2.9(e)'de sıcaklığın çok düşük değerleri için iki adet dinamik E mevcuttur.
- 4) Şekil 2.9(a)'da fazlar arasındaki tüm dinamik faz sınırları ikinci-derece iken, Şekil 2.9(c) ve Şekil 2.9(d)'de birinci-derecedir.



**Şekil 2.8.** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde AFM/AFM Etkileşmesi İçin  $(T, h)$  Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_2/|J_1|=-1.5$ ,  $J_3/|J_1|=-4.0$ ,  $d=-7.1$ , **b)**  $J_2/|J_1|=-1.0$ ,  $J_3/|J_1|=1.0$ ,  $d=-0.5$ , **c)**  $J_2/|J_1|=-1.0$ ,  $J_3/|J_1|=1.0$ ,  $d=-3.0$ , **d)**  $J_2/|J_1|=-1.0$ ,  $J_3/|J_1|=1.0$ ,  $d=3.0$ , **e)**  $J_2/|J_1|=-0.8$ ,  $J_3/|J_1|=5.0$ ,  $d=2.5$ , **f)**  $J_2/|J_1|=-0.2$ ,  $J_3/|J_1|=-5.0$ ,  $d=2.5$ , **g)**  $J_2/|J_1|=-0.8$ ,  $J_3/|J_1|=-1.0$ ,  $d=-2.5$ .

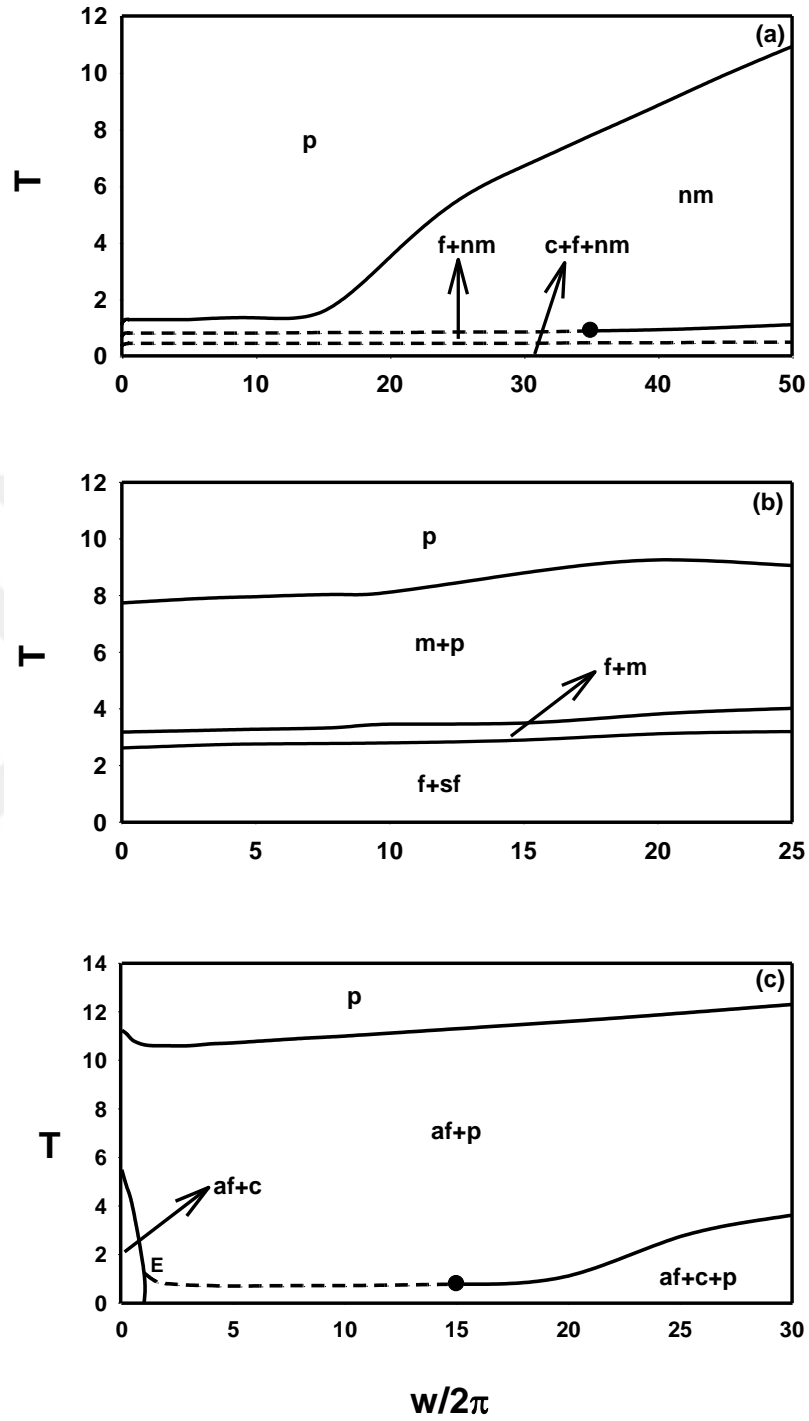


**Şekil 2.9.** İki Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma Spin-(1, 5/2) Ising Sisteminde AFM/AFM Etkileşmesi İçin Farklı Düzlemlerde Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $(J_2/|J_1|, T)$  düzleminde,  $J_3/|J_1|=1.0$ ,  $h=2.0$  ve  $d=2.5$ , **b)**  $(J_3/|J_1|, T)$  düzleminde,  $J_2/|J_1|=-0.3$ ,  $h=4.0$  ve  $d=3.0$ , **c)**  $(J_2/|J_1|, h)$  düzleminde  $J_3/|J_1|=2.3$ ,  $T=0.5$  ve  $d=4.0$ , **d)**  $(J_3/|J_1|, h)$  düzleminde;  $J_2/|J_1|=-0.5$ ,  $T=0.5$  ve  $d=2.0$ , **e)**  $(d, T)$  düzleminde,  $J_2/|J_1|=-1.0$ ,  $J_3/|J_1|=1.0$  ve  $h=0.5$ .

#### 2.3.3.4. Dinamik Faz Diyagramları Üzerinde Salınlı Alan Frekansının Etkisi

Bu kesimde, sistemin dinamik faz diyagramları üzerine salınlı alan frekansının etkisini görmek için  $(w/2\pi, T)$  düzleminde FM/FM, FM/AFM ve AFM/AFM etkileşmelerinin her biri için bir adet dinamik faz diyagramı elde edildi ve bu dinamik faz diyagramları Şekil 2.10'da sunuldu. Bu şekillerden aşağıdaki önemli sonuçlar tespit edildi.

- 1) Şekil 2.10(a) ve Şekil 2.10(c)'de görüldüğü gibi, FM/FM ve AFM/AFM etkileşmeleri için sıcaklığın çok düşük değerlerinde birinci-derece faz geçişi meydana gelmektedir.
- 2) Şekil 2.10(b)'de tüm faz geçiş çizgileri ikinci-derecedir ve bu nedenle sistemde dinamik üçlü kritik nokta oluşmamaktadır.
- 3) Şekil 2.10(a) ve Şekil 2.10(c)'de  $w/2\pi$ 'nin yüksek değerleri için dinamik üçlü kritik nokta meydana gelmektedir.
- 4) Tüm şekillerde  $w/2\pi$ 'nin tüm değerleri ve sıcaklığın düşük değerleri için sistemde karma faz bölgeleri daima mevcuttur.
- 5) Şekil 2.10(c),  $w/2\pi$  ve  $T$ 'nin düşük değerleri için dinamik E sergilemektedir.



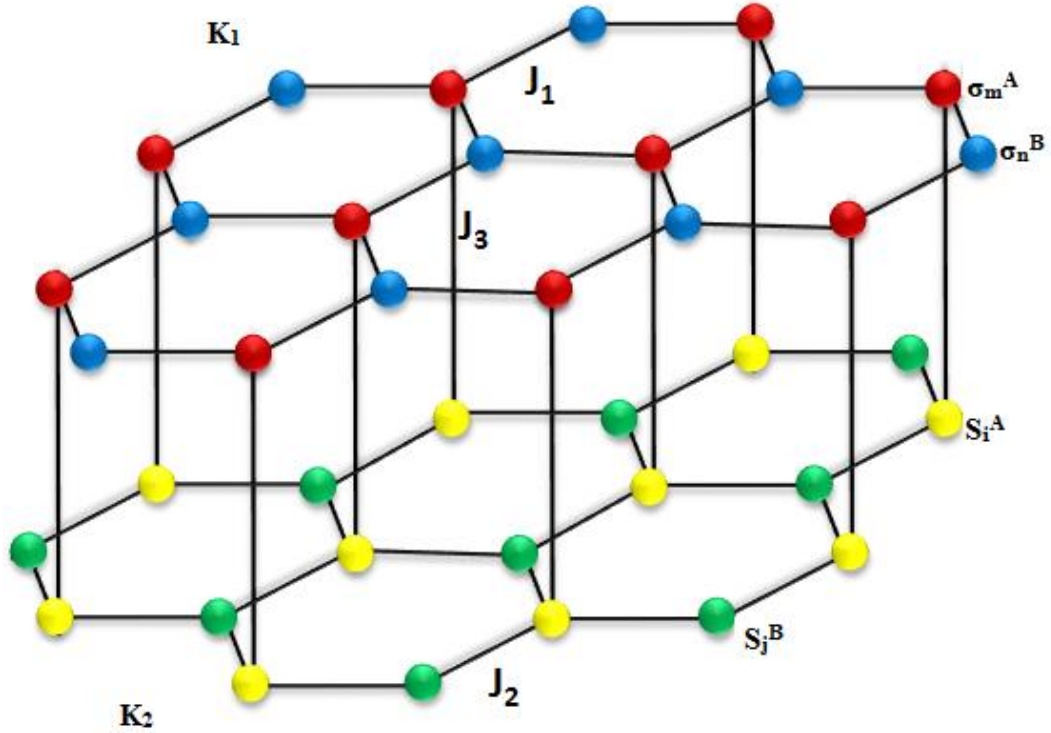
**Şekil 2.10.** FM/FM, AFM/FM ve AFM/AFM Etkileşmeleri için  $(w/2\pi, T)$  Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_1=1.0, J_2/|J_1|=1.0, J_3/|J_1|=-1.0, d=-1.0$  ve  $h=0.5$ , **b)**  $J_1=1.0, J_2/|J_1|=-0.5, J_3/|J_1|=1.0, d=1.0$  ve  $h=0.1$ , **c)**  $J_1=-1.0, J_2/|J_1|=-0.2, J_3/|J_1|=1.0, d=2.5$  ve  $h=4.0$ .



### 3. İKİ TABAKALI BAL PETEĞİ ÖRGÜSÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN-1 VE SPİN-5/2 ISING SİSTEMİNİN DİNAMİK MANYETİK ÖZELLİKLERİ

#### 3.1. Modelin Tanımlanması ve Formülasyonu

Burada ele alacağımız model, AB istiflenmiş geometrili iki tabakalı bal peteği örgüsüdür. İki tabakalı kare örgü modeline benzer şekilde, bu model de tek tabakalı bal peteği örgü versiyonunun genişletilmiş hali olup Şekil 3.1’de görüldüğü gibi  $K_1$  ve  $K_2$  örgülerinin iki özdeş tabakasının birbirine paralel olarak yerleştirilmesiyle oluşur. Her iki tabaka da  $N$  tane örgü noktasına sahiptir ve her bir örgü noktasında spinler en yakın komşularıyla (NN) etkileşirler ve örgü noktalarında  $i, j, m$  ve  $n$  ile etiketlenirler. Sistem, örgü noktalarına  $\sigma$  ve  $S$  spinlerinin yerleştirilmesiyle oluşmuş karma Ising ferromanyetik bir sistemdir.  $K_1$  örgüsü üzerinde  $\sigma = \pm 1, 0$  ve  $K_2$  örgüsü üzerinde  $S = \pm 5/2, \pm 3/2, \pm 1/2$  değerlerini alır.



Şekil 3.1. AB İstiflenmiş Geometrili İki Tabakalı Bal Peteği Örgüsü İçin Spinlerin Yerleşim Taslağı.

AB istiflenmiş geometrili iki tabakalı bal peteği örgüsü üzerinde, en yakın komşu etkileşmeli, kristal alan etkileşmeli ve zamanla değişen manyetik alanın varlığında karma spin-1 ve spin-5/2 Ising sistemi için Hamiltonyen ifadesi,

$$\begin{aligned}
H = & -J_1 \sum_{\langle mn \rangle} \sigma_m^A \sigma_n^B - J_2 \sum_{\langle ij \rangle} S_i^A S_j^B - J_3 \sum_{\langle mi \rangle} \sigma_m^A S_i^A \\
& -D \left( \sum_m (\sigma_m^A)^2 + \sum_n (\sigma_n^B)^2 + \sum_i (S_i^A)^2 + \sum_j (S_j^B)^2 \right) \\
& -h(t) \left( \sum_m \sigma_m^A + \sum_n \sigma_n^B + \sum_i S_i^A + \sum_j S_j^B \right)
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Şeklinde dir. Burada dikkat edilmelidir ki örgüler arası etkileşmeyi temsil eden  $J_3$  bilineer etkileşme parametresi sadece A alt örgüsü üzerinden toplama dahil edilmektedir. B alt örgüsü üzerinden ise toplam alınmamaktadır. Bu AB istiflenmiş geometri yapısından kaynaklanmaktadır.

Sistemin dinamik olarak tam açıklamasını veren dinamik-diferansiyel denklemler bir önceki sisteme benzer olarak, Master denklemi ve Glauber geçiş ihtimaliyet ifadeleri kullanılarak elde edilir. İki tabakalı kare örgü için denklemlerin elde edilmesi çok ayrıntılı olarak anlatıldığı için burada denklemlerin nasıl elde edildiği ile ilgili işlemler verilmeyecektir. AB istiflenmiş geometrili iki tabakalı bal peteği örgüsü üzerinde iki alt örgülü karma spin-1 ve spin-5/2 Ising sisteminin kesin dinamik davranışını açıklayan denklemler;

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_1^A = -m_1^A + \frac{2 \sinh\left(\frac{a_1}{T}\right)}{2 \cosh\left(\frac{a_1}{T}\right) + \exp\left(-\frac{d}{T}\right)} \tag{3.2}$$

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_1^B = -m_1^B + \frac{2 \sinh\left(\frac{a_2}{T}\right)}{2 \cosh\left(\frac{a_2}{T}\right) + \exp\left(-\frac{d}{T}\right)} \tag{3.3}$$

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_2^A = -m_2^A + \frac{1}{\tau} \frac{5e^{\left(\frac{2d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{5}{2} \frac{a_3}{T}\right) + 3e^{\left(-\frac{2d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{3}{2} \frac{a_3}{T}\right) + e^{\left(-\frac{4d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{1}{2} \frac{a_3}{T}\right)}{2e^{\left(\frac{2d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{5}{2} \frac{a_3}{T}\right) + 2e^{\left(-\frac{2d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{3}{2} \frac{a_3}{T}\right) + 2e^{\left(-\frac{4d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{1}{2} \frac{a_3}{T}\right)} \quad (3.4)$$

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_2^B = -m_2^B + \frac{1}{\tau} \frac{5e^{\left(\frac{2d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{5}{2} \frac{a_4}{T}\right) + 3e^{\left(-\frac{2d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{3}{2} \frac{a_4}{T}\right) + e^{\left(-\frac{4d}{T}\right)} \sinh\left(\frac{1}{2} \frac{a_4}{T}\right)}{2e^{\left(\frac{2d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{5}{2} \frac{a_4}{T}\right) + 2e^{\left(-\frac{2d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{3}{2} \frac{a_4}{T}\right) + 2e^{\left(-\frac{4d}{T}\right)} \cosh\left(\frac{1}{2} \frac{a_4}{T}\right)} \quad (3.5)$$

olarak elde edilir. Burada,  $m_1^A = \langle \sigma_m^A \rangle$ ,  $m_1^B = \langle \sigma_n^B \rangle$ ,  $m_2^A = \langle S_i^A \rangle$ ,  $m_2^B = \langle S_j^B \rangle$ ,  $\xi = \omega t$ ,  $h = h_0/J_1$ ,  $d = D/J_1$ ,  $\Omega = \tau\omega$ ,  $T = (\beta J_1)^{-1}$ ,  $a_1 = \left( z m_1^B + \frac{J_3}{J_1} m_2^A + h \cos(\xi) \right)$ ,  $a_2 = \left( z m_1^A + h \cos(\xi) \right)$ ,  $a_3 = \left( \frac{J_2}{J_1} z m_2^B + \frac{J_3}{J_1} m_1^A + h \cos(\xi) \right)$  ve  $a_4 = \left( \frac{J_2}{J_1} z m_2^A + h \cos(\xi) \right)$  olarak alınmıştır. Burada ele aldığımız sistemde,  $a_2$  ve  $a_4$  ifadelerinde, örgüler arası etkileşme parametresi olan  $J_3$ 'ün olmadığını görmekteyiz. Bu durum AB istiflenmiş geometrili örgü yapısından kaynaklanmaktadır ve bu durum iki tabakalı kare örgü ile AB istiflenmiş geometrili iki tabakalı balpeteği örgülerinin en önemli farkını belirtmektedir. Ayrıca iki tabakalı kare örgü yapısı için en yakın komşu sayısı  $z=4$  iken, AB istiflenmiş geometrili iki tabakalı balpeteği örgü yapısı için  $z=3$ 'tür. Elde edilen bu denklemler nümerik olarak çözümlenebilir denklemlerdir. Elde edilen nümerik sonuçlar ile ilgili tartışmalar gelecek bölümde verilmiştir.

### 3.2. Nümerik Sonuçlar

Bölüm 2.3.1 ve 2.3.2'de, sistemin dinamik davranışının açıklamasını yapan diferansiyel denklemlerin nümerik olarak çözülmesiyle sistemde mevcut olan fazların ve bu fazlar arasındaki dinamik faz sınırlarının nasıl hesaplandığı gerekli şekillerle ayrıntılı olarak anlatılmıştı. Elde edilen fazlar ve bu fazların arasındaki dinamik faz sınırları ile ilgili hesaplamalar benzer olduğu için bu kesimde sadece Denklem (3.2)-(3.5)'in nümerik olarak çözülmesi sonucu elde edilen dinamik faz

diyagramları sunulacaktır. Burada şu noktayı belirtmeliyiz ki; dinamik faz diyagramları örgüler arası etkileşme parametresi olan  $J_3$ 'ün pozitif ( $J_3 > 0$ ) ve negatif ( $J_3 < 0$ ) değerleri için  $(T, h)$ ,  $(d, T)$ ,  $(J_2/|J_1|, T)$ ,  $(J_2/|J_1|, h)$  ve  $(d, h)$  düzlemlerinde sunulmuştur.

### 3.2.1. Dinamik Faz Diyagramları

#### 3.2.1.1. $J_3 > 0$ için Elde Edilen Dinamik Faz Diyagramları

Bu kesimde, istiflenmiş geometrikl karma spin-1 ve spin-5/2 Ising sisteminde örgüler arası etkileşme parametresi  $J_3$ 'ün pozitif ( $J_3 > 0$ ) ve Hamiltonyen parametrelerinin farklı değerleri için farklı düzlemlerde elde edilen faz diyagramları Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de sunulmuştur. Bu faz diyagramlarında dinamik üçlü kritik nokta, içi dolu küre sembolü ile ifade edilmiştir.

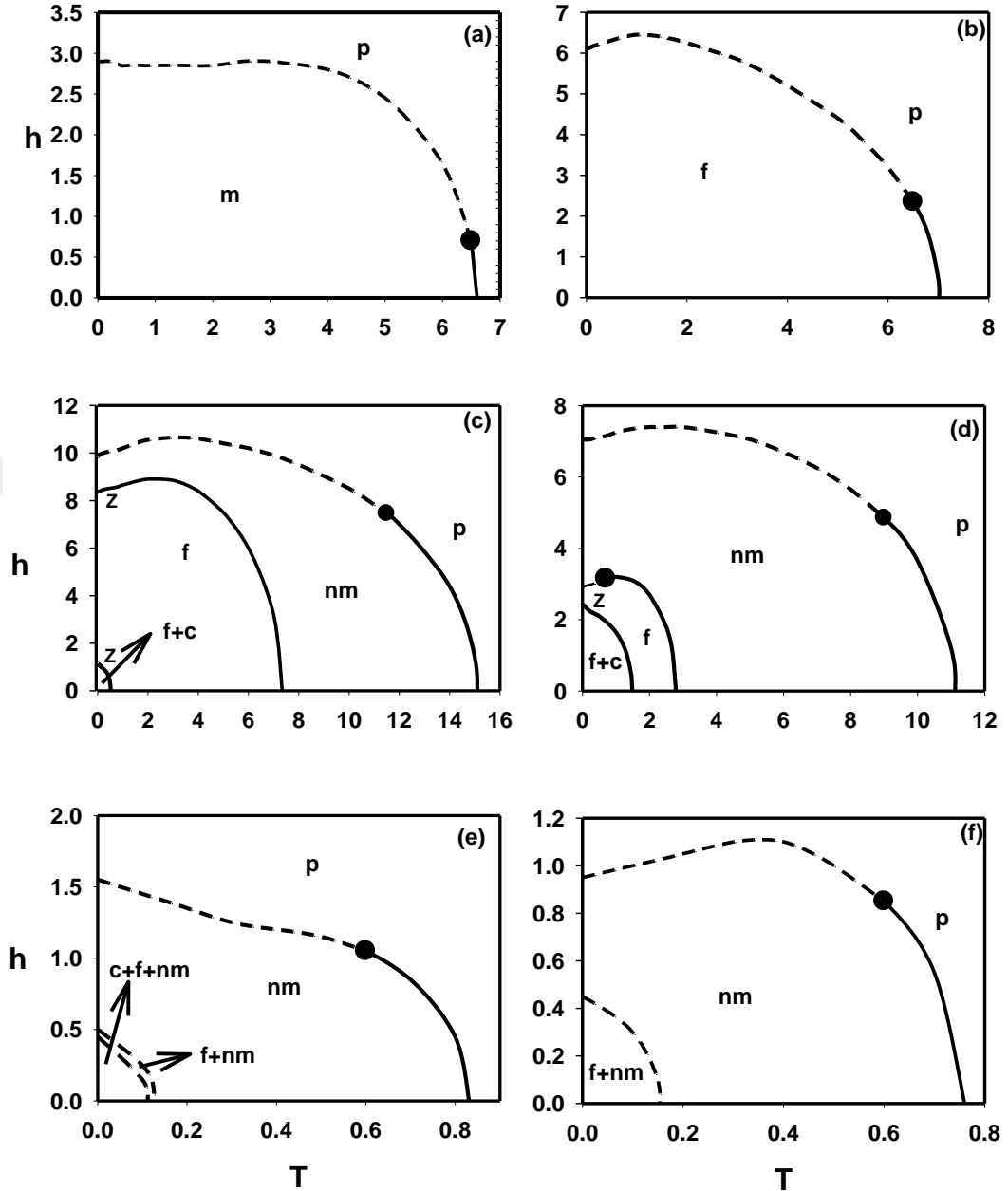
$J_3 > 0$  için  $(T, h)$  düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramları Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu dinamik faz diyagramlarından aşağıdaki temel sonuçlar gözlenmektedir.

- 1) Sistemde  $p$ ,  $c$ ,  $f$ ,  $m$  ve  $nm$  temel fazlarının yanısıra,  $f+c$ ,  $f+nm$  ve  $f+c+nm$  karma faz bölgeleri görülmektedir.
- 2) Şekil 3.2 (d) iki tane dinamik üçlü kritik nokta içerirken, diğer faz diyagramları bir tane dinamik üçlü kritik nokta sergilerler.
- 3) Karma faz bölgeleri genellikle düşük sıcaklık ve düşük manyetik alan değerlerinde sistemde mevcuttur.
- 4) Şekil 3.2 (d)'de bir tane dinamik Z meydana gelirken, Şekil 3.2 (c)'de iki tane dinamik Z meydana gelmiştir.
- 5) Şekil 3.2(b)-(d) ve Şekil 3.2 (f)'de sistemde dinamik re-entrant davranış görülmektedir. Bu durumda sıcaklık artarken sistem önce düzensiz fazdan düzenli faza geçer sonra ise tekrar düzensiz faz meydana gelir.

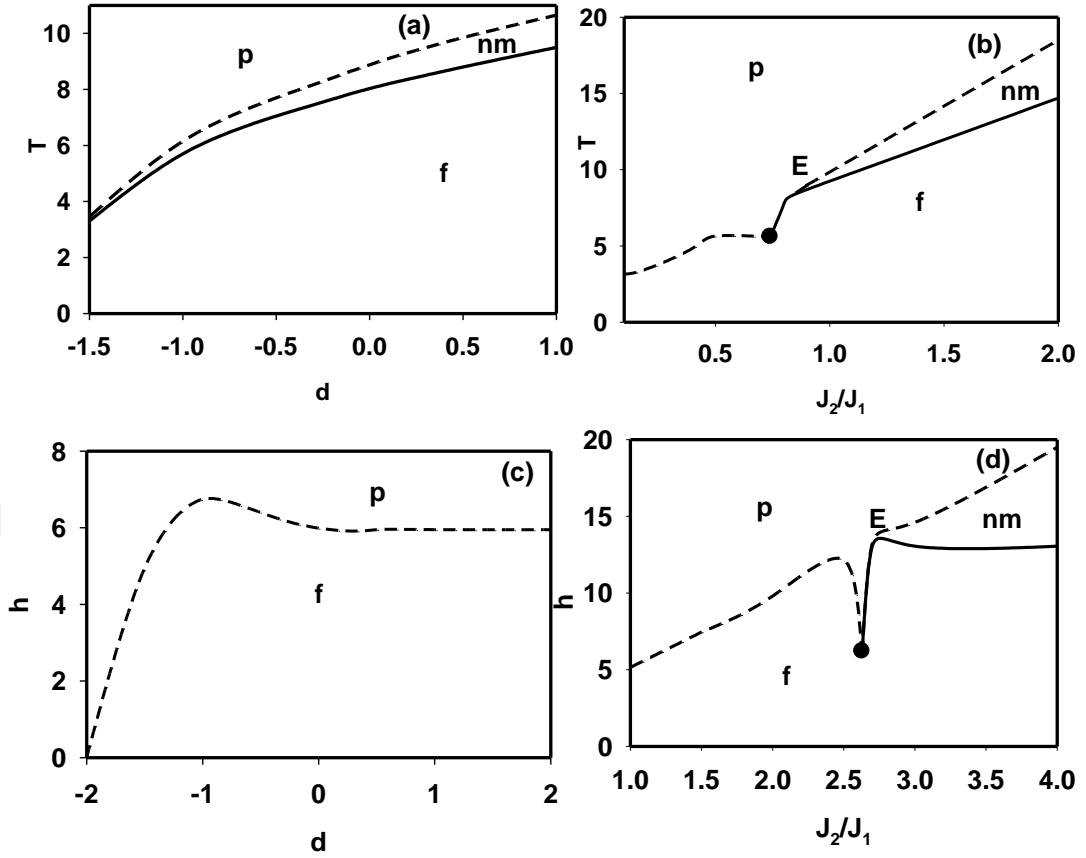
$J_3 > 0$  için,  $(d, T)$ ,  $(J_2/|J_1|, T)$ ,  $(d, h)$  ve  $(J_2/|J_1|, h)$  düzlemlerinde elde edilen bir açıklayıcı dinamik faz diyagramı ise Şekil 3.3'de sunulmuştur. Bu faz diyagramlarından aşağıdaki temel sonuçlar gözlenmiştir.

- 1) Yalnızca,  $(J_2/|J_1|, T)$  ve  $(J_2/|J_1|, h)$  düzlemlerinde elde edilen dinamik faz diyagramlarında dinamik üçlü kritik nokta ve dinamik E bulunmaktadır.
- 2) Elde edilen bu dinamik faz diyagramları karma faz bölgesi içermemektedir.
- 3)  $(d, h)$  düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramında tüm dinamik faz sınırları birinci-derecedir.
- 4) Dinamik üçlü kritik nokta  $J_2/|J_1|$ 'in düşük değerlerinde oluşmaktadır.





**Şekil 3.2.** İki Tabakalı Bal Peteği Örgüsü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde  $J_3 > 0$  için;  $(T, h)$  Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_1 = -1.0, J_2 = -0.5, J_3 = 0.5, d = 1.5$ , **b)**  $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.5, d = -2.5$ , **c)**  $J_1 = 1.0, J_2 = 1.1, J_3 = 0.1, d = -2.5$ , **d)**  $J_1 = 1.0, J_2 = 1.4, J_3 = 0.1, d = -0.5$ , **e)**  $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 2.5, d = -1.0$ , **f)**  $J_1 = 1.0, J_2 = 2.0, J_3 = 0.5, d = -1.0$ .



**Şekil 3.3.** İki Tabakalı Bal Peteği Örgüsü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde  $J_3 > 0$  için Farklı Düzlemlerde Elde Edilen Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_1=1.0, J_2=1.0, J_3=1.0, h=0.5$ , **b)**  $J_1=1.0, J_3=1.3, d=0.5, h=0.4$ , **c)**  $J_1=1.0, J_2=1.0, J_3=4.0, T=0.1$ , **d)**  $J_1=1.0, J_3=0.8, d=-0.5, T=0.5$ .

### 3.2.1.2. $J_3 < 0$ için Elde Edilen Dinamik Faz Diyagramları

Son olarak, istiflenmiş geometri karmaspin-1 ve spin-5/2 Ising sisteminde örgüler arası etkileşme parametresi  $J_3$ 'ün negatif ( $J_3 < 0$ ) değerleri için farklı düzlemlerde elde edilen faz diyagramları Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de sunulmuştur.

$J_3 < 0$  için ( $T, h$ ) düzleminde elde edilen dinamik faz diyagramları Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Bu dinamik faz diyagramlarından aşağıdaki ilginç sonuçlar çıkarılabilir.

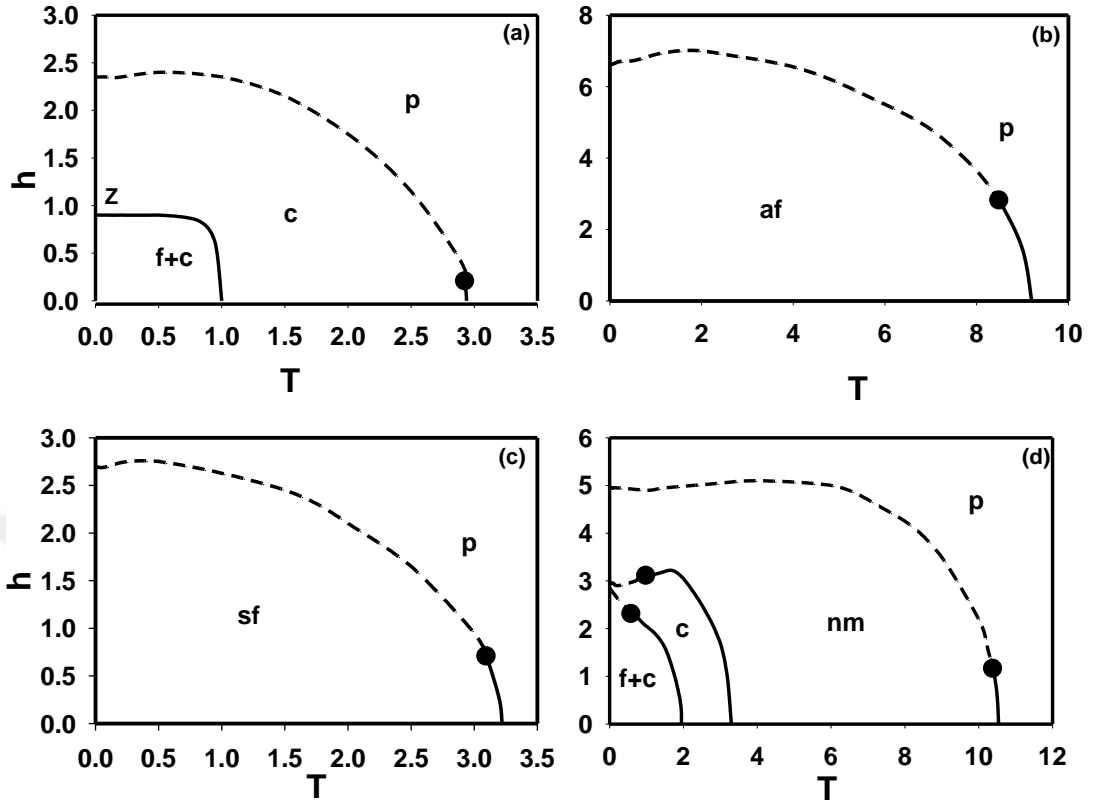
- 1) Sistemde beş temel faz (af, c, nm, sf ve p) bulunmakla birlikte yalnızca c ve f fazlarının birarada bulunduğu c+f karma faz bölgesi bulunmaktadır.

- 2)  $f+c$  karma faz bölgesi sıcaklığın ve manyetik alanın düşük değerlerinde oluşmaktadır.
- 3) Şekil 3.4 (a)-(c), bir adet dinamik üçlü kritik nokta içerirken, Şekil 3.4 (d) üç adet dinamik üçlü kritik nokta içermektedir.
- 4) Şekil 3.4 (d) dışındaki dinamik faz diyagramlarında dinamik üçlü kritik nokta sıcaklığın yüksek manyetik alanın düşük değerlerinde meydana gelmektedir.
- 5) Özel nokta olarak sadece dinamik Z, Şekil 3. 4 (a)'da gözlemlenmiştir.
- 6) Şekil 3.4 (b) ve (c)'de re-entrant davranış görülmektedir.

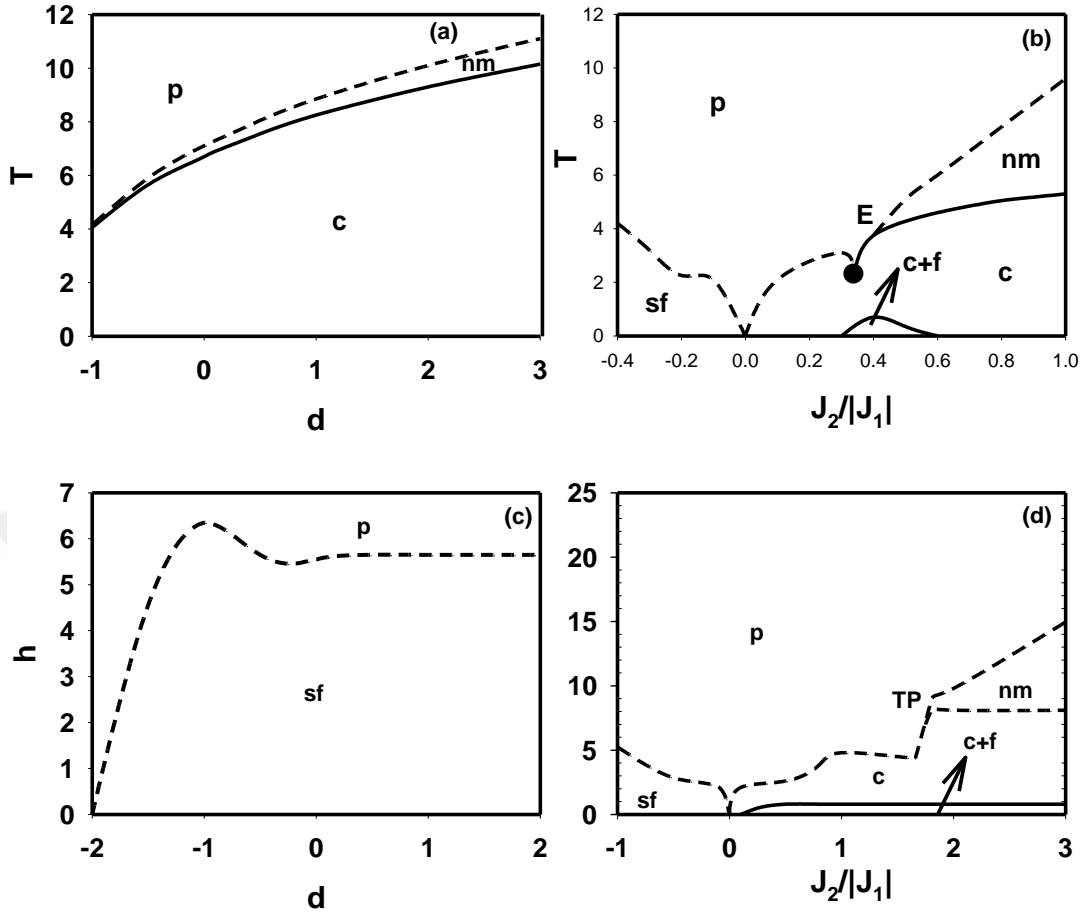
$J_3 < 0$  için,  $(d, T)$ ,  $(J_2/|J_1|, T)$ ,  $(d, h)$  ve  $(J_2/|J_1|, h)$  düzlemlerin de elde edilen bir açıklayıcı dinamik faz diyagramı ise Şekil 3.5'de verilmiştir. Bu dinamik faz diyagramlarından şu temel sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Yalnızca Şekil 3.5 (c) dinamik üçlü kritik nokta içermektedir.
- 2) Şekil 3.5 (a) ve Şekil 3.5 (c)'de karma faz bölgesi bulunmamaktadır.
- 3) Karma faz bölgesi sıcaklığın çok düşük değerlerinde oluşmaktadır.
- 4)  $(J_2/|J_1|, T)$  ve  $(J_2/|J_1|, h)$  düzlemlerinde yüksek sıcaklık değerlerinde dinamik E meydana gelmektedir.
- 5) Yalnızca  $(J_2/|J_1|, h)$  düzleminde dinamik TP mevcuttur.
- 6)  $(d, h)$  düzlemindeki dinamik faz diyagramında fazlar arasındaki dinamik faz sınırları birinci-derecedir.





**Şekil 3.4.** İki Tabakalı Bal Peteği Örgüsü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde  $J_3 < 0$  için  $(T, h)$  Düzlemindeki Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_1=1.0, J_2=0.2, J_3=-0.7, d=0.5$ , **b)**  $J_1=-1.0, J_2=-1.2, J_3=-1.0, d=-0.6$ , **c)**  $J_1=1.0, J_2=-0.2, J_3=-1.0, d=0.5$ , **d)**  $J_1=1.0, J_2=1.0, J_3=-0.1, d=1.0$ .



**Şekil 3.5.** İki Katlı Bal Peteği Örgüsü Üzerinde Karma-Spin (1, 5/2) Ising Sisteminde  $J_3 < 0$  için Farklı Düzlemlerde Elde Edilen Dinamik Faz Diyagramları. **a)**  $J_1=1.0$ ,  $J_2=0.8$ ,  $J_3=-1.0$ ,  $h=0.5$ , **b)**  $J_1=1.0$ ,  $J_2=-1.0$ ,  $J_3=-1.0$ ,  $T=0.5$ , **c)**  $J_1=1.0$ ,  $J_3=-0.3$ ,  $h=1.0$ ,  $d=0.5$ , **d)**  $J_1=1.0$ ,  $J_3=-0.5$ ,  $d=0.1$ ,  $T=0.2$ .

#### 4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, zamanla değişen sinüzoidal manyetik alanın varlığında karma spin-1 ve spin-5/2 Ising sisteminin dinamik (dengesiz) manyetik özellikleri iki tabakalı kare örgü ve istiflenmiş geometri iki tabakalı bal peteği örgüsü üzerinde Glauber-tipi stokastik dinamik temelli Ortalama-Alan yaklaşımı kullanılarak ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sistemin dengesiz davranışının kesin açıklamasını veren diferansiyel denklemler Glauber geçiş oranları ve Master denklemi yardımıyla elde edilmiştir. Elde edilen bu denklemlerin analitik çözümleri bulunmadığından farklı nümerik programlar eşliğinde bilgisayar ortamında çözüm yapılmıştır. Her iki örgü sistemi içinde sistemde mevcut olan fazları bulmak için ortalama alt örgü mıknatıslanmalarının zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi incelenmiştir. Bu fazlar elde edildikten sonra en önemli problem farklı fiziksel parametre değerleri için bu fazlar arasındaki dinamik faz geçiş (DFG) sıcaklıklarının hesaplanmasıdır. Bunun için dinamik mıknatıslanmaların sıcaklığa bağlı davranışları incelenmiştir ve bu inceleme sonucu fazlar arasındaki DFG sıcaklıkları hesaplanmıştır. Ayrıca bu incelemeyle faz geçişlerinin nasıl bir karakterde olduğu (birinci-derece faz geçişi ya da ikinci-derece faz geçişi) görülmüştür. Mevcut fazlar elde edildikten ve bu fazlar arasındaki DFG sıcaklıkları hesaplandıktan sonra sistemin dinamik faz diyagramları her iki örgü sistemi için farklı düzlemler üzerinde hesaplanmıştır.

İlk olarak karma spin-1 ve spin-5/2 Ising sisteminin dinamik davranışı iki tabakalı kare örgü üzerinde incelenmiştir. Ortalama alt örgü mıknatıslanmalarının zamanla değişiminin incelenmesiyle sistemde paramanyetik (p), ferromanyetik (f), antiferromanyetik (af), telafi (c), yüzey ferromanyetik (sf), manyetik olmayan (nm) ve karma (m) temel fazları elde edildi. Bu temel fazlar sistemde tek başına bulunabilecekleri gibi ikili, üçlü veya dörtlü kombinasyonlar şeklinde de sistemde gözükmetedirler. İki katlı kare örgü üzerinde, nm+p, f+nm, f+p, c+nm, c+f, c+p, af+c, af+p, f+m, m+p, f+sf, m+sf, m+nm+p, af+m+p, af+c+p, f+m+p, f+m+sf, f+nm+p, c+nm+p, c+f+nm ve f+m+sf+p karma faz bölgeleri elde edilmiştir. Daha sonra temel faz ve karma faz bölgeleri arasındaki DFG sıcaklıkları hesaplanmış ve bunun yardımıyla dinamik faz diyagramları, ferromanyetik-ferromanyetik (FM/FM), ferromanyetik-antiferromanyetik (FM/AFM) ve antiferromanyetik-antiferromanyetik

(AFM/AFM) etkileşme durumları için  $(T, h)$ ,  $(d, T)$ ,  $(J_2/|J_1|, T)$ ,  $(J_2/|J_1|, h)$ ,  $(J_3/|J_1|, T)$ ,  $(J_3/|J_1|, h)$  ve  $(d, h)$  düzlemlerinde sunulmuştur. Faz diyagramları incelendiğinde açıkça görülmektedir ki sf fazı yalnızca FM/AFM ve AFM/AFM etkileşmesi için görülmektedir. Bunun yanı sıra iki katlı kare örgü için birçok özel nokta mevcuttur. Birinci ve ikinci derece faz geçişlerinin birleştiği yerde, dinamik üçlü kritik nokta  $(T, h)$  düzleminde elde edilen tüm faz diyagramlarında mutlaka görülmektedir. Diğer taraftan üçlü noktanın bulunmadığı dinamik faz diyagramları  $(T, h)$  dışındaki farklı düzlemlerde elde edilmiştir. Bu dinamik faz diyagramlarında fazlar arasındaki dinamik faz sınırları, ya tamamen birinci-derece ya da tamamen ikinci-derece şeklindedir. Ayrıca dinamik faz diyagramlarında dinamik üçlü nokta (TP), dinamik dördümlü nokta (QP), dinamik çift kritik son nokta (B), dinamik kritik son nokta (E), dinamik çoklu kritik nokta (M) ve dinamik sıfır-sıcaklık kritik nokta (Z) meydana gelmiştir. Son olarak bu örgü yapısı için salınımlı alan frekansının dinamik faz diyagramları üzerine etkisi incelenmiş ve  $(w/2\pi, T)$  düzleminde dinamik faz diyagramları elde edilmiştir. Bu dinamik faz diyagramlarında, birinci derece faz geçiş çizgileri genellikle çok düşük sıcaklık değerlerinde görülmektedir. Ayrıca karma faz bölgeleri genellikle sıcaklığın düşük  $w/2\pi$ 'nin tüm değerlerinde meydana gelmektedir.

İkinci sistem olarak karma spin-1 ve karma spin-5/2 Ising sisteminin dinamik davranışı AB istiflenmiş geometriye iki tabakalı bal peteği örgüsü üzerinde incelenmiştir. Yine sistemin dinamik açıklamasını veren diferansiyel denklemler elde edilmiş ve bu denklemlerin çözülmesiyle sistemdeki fazlar ve fazlar arasındaki DFG sıcaklıkları bulunmuştur. Bu örgü yapısı için af, c, f, m, nm, sf ve p temel fazları elde edilmiş ancak sadece bu fazların bir arada bulunduğu üç tane karma faz bölgesi bulunmuştur. Bu karma faz bölgeleri  $c+f$ ,  $f+nm$  ve  $f+c+nm$  şeklindedir. Dinamik faz diyagramları, örgüler arası etkileşmenin pozitif ( $J_3>0$ ) ve negatif ( $J_3<0$ ) olduğu durumlar için  $(T, h)$ ,  $(d, T)$ ,  $(J_2/|J_1|, T)$ ,  $(J_2/|J_1|, h)$  ve  $(d, h)$  düzlemleri üzerinde hesaplanmıştır.  $(T, h)$  düzleminde ( $J_3>0$ ) için altı adet, ( $J_3<0$ ) için dört adet dinamik faz diyagramı bulunmuştur.  $(T, h)$  düzleminde ( $J_3>0$ ) için; tüm faz diyagramları dinamik üçlü kritik nokta sergilerken, bu düzlemde başka özel bir nokta görülmemiştir. Karma faz bölgeleri genellikle düşük sıcaklık değerlerinde oluşmuştur. ( $J_3<0$ ) durumu için ise;  $(T, h)$  düzlemindeki dinamik faz diyagramları bir

veya iki adet dinamik üçlü kritik nokta göstermektedir.  $(J_2/|J_1|, T)$  ve  $(J_2/|J_1|, h)$  düzlemlerinde elde edilen diyagramlarda ise dinamik üçlü nokta (TP) ve dinamik kritik son nokta (E) olduğu görülmüştür.

Son olarak şu noktayı belirtmeliyiz ki; katlı örgü yapıları üzerinde karma spinli ( $S>1$ ) sistemlerin dengesiz yani dinamik özelliklerinin incelenmesi oldukça ilginç bir problemdir. Bu çalışmada kullandığımız dinamik model ortalama-alan yaklaşımı temelli olduğu için bazı kısıtlamalar içermektedir. Örneğin, spin salınmlarının korelasyonu gibi bazı sınırlandırmalar bazı birinci-derece faz geçiş çizgilerinin ve bazı kritik noktaların yüzeysel olarak hesaplanmasına neden olmaktadır. Yine de kullandığımız model katlı yapılarda karma spinli sistemlerin dinamik faz diyagramlarının hesaplanması için bir başlangıç olma niteliği taşımaktadır. Teorik olarak, dinamik MC yaklaşımı veya dinamik EAT gibi modeller kullanılarak bu sistemler için daha hassas hesaplamalar yapılabilir. Yine bu çalışmanın amorf filmler, ultra ince manyetik filmler manyetik çok katlı yapılar nanokompozitler ve ferroik sistemler gibi yapıların dinamik olarak incelenmesi üzerine deneysel çalışmalar yapan araştırmacılar için iyi bir yol gösterici olacağını ümit etmekteyiz.

## KAYNAKLAR

1. Elmers, H.J., Condensed Matter Physics; Statistical Physics; Atomic, Molecular and Optical Phys.B, 9, 3115-3180, 1995.
2. Baibich, M.N., Broto, J.M., Fert, A., Nguyen Van Dau, F., Petroff, F., Etienne, P., Creuzet, G., Friederich, A., Chazelas, J., Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *phys.Rev.Lett.* 61, 2472-2475, 1988.
3. Binasch, G., Grünberg, P., Saurenbach, F., Zinn, W., Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange, *phys. Rev.B*, 39, 4828-4830, 1989.
4. Sayama, J., Asahi, T., Mizutani, K., Osaka, T., *j.phys.D:Appl. Electrochemical Nanotechnologies*, *phys.* 37, L1-L4, 2004.
5. Wu, R., Freeman, A.J., Structural and magnetic properties of Fe/Ni(111), *phys. Rev.B*, 45, 7205-7210, 1992.
6. Donath, M., Magnetic order and electronic structure in thin films, *J.phys.: Condens. Matter.* 11,9421-9436, 1999.
7. Sun, S.W., Handley, R.C.O., Surface magnetoelastic coupling, *Phys. Rev. Lett.* 66, 2798-2801, 1991.
8. Bochi, G., Song, O., Handley, R.C.O., Surface magnetoelastic coupling coefficients of single-crystal fcc Co thin films, *Phys. Rev. B*, 50, 2043-2046, 1994.
9. Edelstein, A.S., Kim, C., Qadri, S.B., Kim, K.H., Browning, V., Yu, H.Y., Maruyama, B., Everett, R.K., Magnetic coupling in high moment f.c.c. Fe/Ni multilayers, *Solid State Commun.* 76, 1379-1382, 1990.
10. Jennett, N.M., Dingley, D.J., Structure and magnetism of Ni<sub>n</sub>/Fe<sub>n</sub> multilayers, *J. Magn. Magn. Mater.* 93, 471-476, 1991.
11. Colombo, E., Donzelli, O., Fratucello, G.B., Ronconi, F., Static magnetization direction in fcc (111) Fe/Ni multilayers, *J. Magn. Magn. Mater.* 104, 1857-1858, 1992.
12. Krishnan, R., Gupta, H.O, Lassri, H., Sella, C., Kaabouchi, M., Structural and magnetic properties of Fe/Ni and Fe/Co multilayers, *J. Appl. Phys.* 70, 6421-6423, 1991.
13. Bayreuther, G., Bensch, F., Kottler, V., Quantum oscillations of properties in magnetic multilayers (invited), *J. Appl.Phys.* 79, 4509-4514, 1996.
14. Chou, K.W., Puzic, A., Stoll, H., Schütz, G., Waeyenberge, B.V., Tyliszczak, T., Rott, K., Reiss, G., Brückl, H., Neudecker, I., Weiss, D., Back, C.H., Vortex dynamics in coupled ferromagnetic multilayer structures, *J. Appl. Phys.* 99, 08F305-08F307, 2006.
15. Yaswant, G., Prajapat, C.L., Ravikumar, G., Soltan, S., Christiani, G., Habermeier, H.U., Magnetic response of ferromagnet–superconductor bilayer *J. Magn. Magn. Mater.* 324, 1406-1409, 2012.
16. Pan., L, Li, H.J., Wen, Y.W., Tan, X.J., Lv, H.Y., Shi, J., Tang, X.F., First-principles study of monolayer and bilayer honeycomb structures of group-IV elements and their binary compounds, *Phys. Lett. A* 375, 614-619, 2011.
17. Huang, L.S., Hu, J.F., Chen, J.S., Critical Fe thickness for effective coercivity reduction in FePt/Fe exchange-coupled bilayer, *J.Magn. Magn. Mater.* 324, 1242-1247, 2012.

18. Li, J., Magnetostriction of FM/TbFe (FM=Fe, Py-permalloy, FeCo) coupled bilayer, *J. Magn. Magn. Mater.* 324, 1512-1515, 2012.
19. Mills, D.L., Surface Effects in Magnetic Crystals near the Ordering Temperature, *Phys. Rev. B*, 3, 3887-3895, 1971.
20. Lubensky, T.C., Rubin, M.H., Critical phenomena in semi-infinite systems. II. Mean-field theory, *Phys. Rev. B*, 12, 3885-3901, 1975.
21. Bahmad, L., Benyoussef, A., Ez-Zahraouy, H., Surface coupling effect on wetting and layering transitions, *Surf. Sci.* 536, 114-120, 2003.
22. Binder, K., Hohenberg, P.C., Surface effects on magnetic phase transitions, *Phys. Rev. B*, 9, 2194-2214, 1974.
23. Binder, K., Landau, D.P., Crossover Scaling and Critical Behavior at the "Surface-Bulk" Multicritical Point, *Phys. Rev. Lett.* 52, 318-321, 1984.
24. Landau, D.P., Binder, K., Critical behavior of the surface-layer magnetization at the extraordinary transition in the three-dimensional Ising model, *Phys. Rev. B*, 41, 4786-4788, 1990.
25. Ez-Zahraouy, H., Bahmad, L., Benyoussef, A., A Monte Carlo study of random surface field effect on layering transitions, *Phys. A*, 358, 86-92, 2005.
26. Sandvik, A.W., Multicritical Point in a Diluted Bilayer Heisenberg Quantum Antiferromagnet, *Phys. Rev. Lett.* 89, 177201-177204, 2002.
27. Burkhardt, T.W., Eisenriegler, E., Renormalization-group approach to the Ising model with a free surface, *Phys. Rev. B*, 16, 3213-3222, 1977.
28. Švrakić, N.M., Wortis, M., Renormalization-group calculation of the critical properties of a free magnetic surface, *Phys. Rev. B*, 15, 396-402, 1977.
29. Jiang, Q., Li, Z.Y., Mean-field renormalization-group study of surface magnetism, *J. Magn. Magn. Mater.* 80, 178-182, 1989.
30. Kaneyoshi, T., Tamura, I., Sarmento, E.F., Surface magnetic properties of the Ising model with a diluted free surface, *Phys. Rev. B*, 28, 6491-6498, 1983.
31. Kaneyoshi, T., Shin, S., Critical Properties of a Spin-1/2 Ising Bilayer System in a Transverse Field, *Phys. Status Solidi, B*, 218, 537-544, 2000.
32. Wosiek, J., Locating analytically critical temperatures in some statistical systems, *Phys. Rev. B*, 49, 15023-15026, 1994.
33. Bobák, A., Jaščur, M., A New Type of Effective Field Theory for Ising Model with Spin  $-1/2$ , *Phys. Status Solidi, B*, 135, K9-K12, 1986.
34. Jaščur, M., Bobák, A., Application of the two-site cluster approximation to the semi-infinite Ising model, *Phys. Rev. B*, 45, 9722-9727, 1992.
35. Bennemann, K.H., Falicov, L.M., Moran Lopez(Eds), L.L., L.M. Falicov, J.L. Morán-López (Eds.), *Magnetic Properties of Low Dimensional Systems*, Springer, Newyork, 1986.
36. Wiatrowski, G., Bayreuther, G., Pruegl, K., Multicompensation effects in multilayers, *J. Magn. Magn. Mater.* 196, 26-28, 1999.
37. Oitmaa, J., Enting, I.G., Critical behaviour of a two-layer Ising system, *J. Phys. A: Math. Gen.* 8, 1097-1114, 1975.
38. Henning, S., Körmann, F., Kienert, J., Nolting, W., Schwieger, S., Green function theory versus quantum Monte Carlo calculations for thin magnetic films, *Phys. Rev. B*, 75, 214401-214408, 2007.
39. Hu, C.-K., Izmailian, N.Sh., Oganessian, K.B., Exact phase diagrams for an Ising model on a two-layer Bethe lattice, *Phys. Rev. E*, 59, 6489-6496, 1999.

40. Monroe, J.L., The bilayer Ising model and a generalized Husimi tree approximation, *Phys. A*, 335, 563-576, 2004.
41. Monroe, J.L., Behavior of the critical temperature of Ising thin films with variable surface magnetic moments, *Phys. Rev. E*, 71, 017105-017108, 2005.
42. Kaneyoshi, T., Jaščur, M., Magnetic properties of a ferromagnetic or ferrimagnetic bilayer system, *Phys. A*, 195, 474-496, 1993.
43. Kaneyoshi, T., Jaščur, M., Compensation temperatures of ferrimagnetic bilayer systems, *J. Magn. Magn. Mater.* 118, 17-27, 1993.
44. Kaneyoshi, T., The relation between compensation temperature and anisotropy in a ferrimagnetic bilayer system with disordered interfaces, *Solid State Commun.* 93, 691-695, 1995.
45. Jaščur, M., Kaneyoshi, T., Specific heat of a ferromagnetic or ferrimagnetic bilayer system, *J. Magn. Magn. Mater.* 140, 488-490, 1995.
46. Wiatrowski, G., Compensation effect and interface delocalization of tricritical phenomenon in antiferromagnetically coupled bilayer system  $A(nA)/B(nB)(SA=12 \text{ and } SB=1)$ , *J. Magn. Magn. Mater.* 212, 29-39, 2000.
47. Jiang, W., Wei, G., Effects of biaxial crystal-field on a ferrimagnetic bilayer system, *Phys. B*, 362, 236-242, 2005.
48. Jiang, W., Wei, G., Du, A., A ferromagnetic or ferrimagnetic bilayer system with a transverse crystal field, *J. Magn. Magn. Mater.* 250, 49-56, 2002.
49. Du, A., Liu, H.J., Wang, B., Magnetic properties in the Ising-mixed spin-12-spin-1 superlattice, *Phys. A*, 342, 583-596, 2004.
50. Htoutou, K., Ainane, A., Saber, M., The transverse crystal-field effects of the mixed spin Ising bilayer system, *J. Magn. Magn. Mater.* 269, 245-258, 2004.
51. Du, A., Ma, Y., Wu, Z.-H., Magnetization and magnetic susceptibility of the Ising ferromagnetic/antiferromagnetic superlattice, *J. Magn. Magn. Mater.* 305, 233-239, 2006.
52. Bengrine, M., Benyoussef, A., El Kenz, A., Loulidi, M., Mhirech, F., Phase diagrams of a ferromagnetic amorphous bilayer system, *J. Magn. Magn. Mater.* 183, 334-344, 1998.
53. Strečka, J., Jaščur, M., Effect of uniaxial and biaxial crystal-field potential on magnetic properties of a mixed spin-1/2 and spin-1 Ising model on the honeycomb lattice, *Phys. Rev. B*, 70, 014404-014414, 2004.
54. Strečka, J., Exact results of a mixed spin-1/2 and spin-S Ising model on a bathroom tile (4-8) lattice: Effect of uniaxial single-ion anisotropy, *Phys. A*, 360, 379-390, 2006.
55. Oitmaa, J., Ferrimagnetism and the existence of compensation points in layered mixed spin (12,1) Ising models, *Phys. Rev. B*, 72, 224404-224408, 2005.
56. Ekiz, C., Influence of anisotropic crystal field on a ferrimagnetic mixed-spin bilayer system, *Phys. A*, 387, 1185-1199, 2008.
57. Kplé, J., Avoisevou, Y.H., Hontinfinde, F., The mixed spin-1/2 and spin-1 Ising system on a two-layer Bethe lattice, *Cent. Eur. J. Phys.* 11, 1567-1579, 2013.
58. Albayrak, E., Yilmaz, S., The spin-1 and spin-3/2 model on a bilayer Bethe lattice with crystal field, *J. Phys. Condens. Matter*, 19, 376212-376231, 2007.
59. Albayrak, E., Bulut, T., The Bethe lattice treatment of an Ising bilayer model consisting of spin-1 and spin-3/2, *Phys. B*, 400, 124-133, 2007.



60. Deviren, B., Akbudak, S., Keskin, M., Mixed spin-1 and spin-3/2 Ising system with two alternative layers of a honeycomb lattice within the effective-field theory, *Solid State Commun.* 151, 193-198, 2011.
61. Zhang, Q., Wei, G., Xin, Z., Liang, Y., Effective-field theory and Monte Carlo study of a layered mixed spin-1 and spin-2 Ising system on honeycomb lattice, *J. Magn. Magn. Mater.* 280, 14-22, 2004.
62. Deviren, B., Polat, Y., Keskin, M., Phase diagrams in mixed spin-3/2 and spin-2 Ising system with two alternative layers within the effective-field theory, *Chin. Phys. B*, 20, 060507-060519, 2011.
63. Zhang, Q., Wei, G., Gu, Y., The study of the phase diagram and internal energy of the mixed spin-3/2 and spin-5/2 ferrimagnetic Ising system with interlayer coupling by effective-field theory; a simple approach of calculating internal energy, *Phys. Status Solid, B*, 242, 924-932, 2005.
64. Nakamura, Y., Existence of a compensation temperature of a mixed spin-2 and spin-5/2 Ising ferrimagnetic system on a layered honeycomb lattice, *Phys. Rev. B*, 62, 11742-11746, 2000.
65. Buendia, G.M., Machado, E., Kinetics of a mixed Ising ferrimagnetic system, *Phys. Rev. E*, 58, 1260-1265, 1998.
66. Godoy, M., Figueiredo, W., Mixed-spin Ising model with one- and two-spin competing dynamics, *Phys. Rev. E*, 61, 218-222, 2000.
67. Godoy, M., Figueiredo, W., Critical behavior of the mixed-spin Ising model with two competing dynamics, *Phys. Rev. E*, 65, 026111-026118, 2002.
68. Godoy, M., Figueiredo, W., Nonequilibrium antiferromagnetic mixed-spin Ising model, *Phys. Rev. E*, 66, 036131-36136, 2002.
69. Ekiz, C., Keskin, M., Magnetic properties of the mixed spin-12 and spin-1 Ising ferromagnetic system, *Phys. A*, 317, 517-534, 2003.
70. Godoy, M., Figueiredo, W., Competing dynamics in the mixed-spin Ising model with crystal-field interaction, *Phys. A*, 339, 392-402, 2004.
71. Godoy, M., Leite, V.S., Figueiredo, W., Mixed-spin Ising model and compensation temperature, *Phys. Rev. B*, 69, 054428-054434, 2004.
72. Buendia, G.M., Machado, E., Magnetic behavior of a mixed Ising ferrimagnetic model in an oscillating magnetic field, *Phys. Rev. B*, 61, 14686-14690, 2000.
73. Keskin, M., Ertaş, M., Mixed-Spin Ising Model in an Oscillating Magnetic Field and Compensation Temperature, *J. Stat. Phys.* 139, 333-344, 2010.
74. Devire, 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.
75. Devire, B., Keskin, M., Canko, O., Dynamic Compensation Temperature in the Mixed Spin-1/2 and Spin-3/2 Ising Model in an Oscillating Field on Alternate Layers of Hexagonal Lattice, *IEEE Trans. Magn.* 45, 2640-2643, 2009.
76. Keskin, M., Kantar, E., Canko, O., Kinetics of a mixed spin-1 and spin-3/2 Ising system under a time-dependent oscillating magnetic field, *Phys. Rev. E*, 77, 051130-051138, 2008.
77. Keskin, M., Kantar, E., Dynamic compensation temperatures in a mixed spin-1 and spin-3/2 Ising system under a time-dependent oscillating magnetic field, *J. Magn. Magn. Mater.* 322, 2789-2796, 2010.

78. 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, 3905-3912, 2009.
79. Deviren, B., Keskin, M., Dynamic Phase Transitions and Compensation Temperatures in a Mixed Spin-3/2 and Spin-5/2 Ising System, *J. Stat. Phys.* 140, 934-947, 2010.
80. Keskin, M., Ertaş, M., Existence of a dynamic compensation temperature of a mixed spin-2 and spin-5/2 Ising ferrimagnetic system in an oscillating field, *Phys. Rev. E*, 80, 061140-061150, 2009.
81. Glauber, R.J., Time-Dependent Statistics of the Ising Model, *J. Math. Phys.* 4, 294-307, 1963.
82. Ertaş, M., Keskin, M., Deviren, B., Dynamic magnetic properties in the kinetic mixed spin-2 and spin-5/2 Ising model under a time-dependent magnetic field, *Physica A*, 391, 1038-1047, 2012.
83. Ertaş, M., Keskin, M., Dynamic magnetic behavior of the mixed-spin bilayer system in an oscillating field within the mean-field theory, *Phys. Lett. A*, 376, 2455-2466, 2012.
84. Temizer, Ü., Tülek, M., Yazar, S., Dynamic phase diagrams of the mixed Ising bilayer system consisting of spin-3/2 and spin-2, *Phys. A*, 415, 156-171, 2004.
85. Temizer, Ü., Dynamic magnetic properties of the mixed spin-1 and spin-3/2 Ising system on a two-layer square lattice. *J. Magn. Magn. Mater.* 372, 47-58, 2014.
86. Ertaş, M., The dynamic magnetic behaviors of the Blume-Capel Ising bilayer system. *Mod. Phys. Lett. B* 29, 2455-2466, 2016.
87. Feraoun, A., Zaim, A., Kerouad, A., Phase diagrams of a finite superlattice with two disordered interfaces: Monte Carlo simulation. *J. Magn. Magn. Mater.* 394, 354-360, 2015.
88. Albayrak, E., The hysteresis loops of FM/AFM two-layer Bethe lattice. *Phase Trans.* 82, 541-550, 2009.
89. Fukushima, N., Honecker, A., Wessel S., Brenig, W., Thermodynamic properties of ferromagnetic mixed-spin chain systems. *Phys. Rev. B*, 69, 174430, 2004.
90. Deviren, B., Batı, M., Keskin, M., The effective-field study of a mixed spin-1 and spin-5/2 Ising ferrimagnetic system. *Phys. Scripta* 79, 065006, 2009.
91. Yessoufou, R.A., Bekhechi, S., Hontinfinde, F., Numerical study of the mixed spin-1 and spin-5/2 Ising ferrimagnetic system. *Eur. Phys. J. B* 81, 137-146, 2011.
92. Yiğit, A., Albayrak, E., Critical properties of mixed spin-1 and spin-5/2 with equal and unequal crystal fields. *Chin. Phys. B* 21, 020511, 2012.
93. Keskin, M., Canko, O., Batı, M., Dynamic phase diagrams of a mixed spin-1 and spin-5/2 Ising system in an oscillating magnetic field. *J. Kor. Phys. Soc* 55, 1344-1356, 2009.
94. Özkılıç, A., Temizer, Ü., Dynamic phase transitions and compensation temperatures in the mixed spin-1 and spin-5/2 Ising system on alternate layers of a hexagonal lattice. *J. Magn. Magn. Mater.* 330, 55-65, 2013.
95. Batı, M., Ertaş, M., Dynamic magnetic hysteresis properties in a two-dimensional mixed Ising system designed with integer and half-integer spins. *J. Supercond. Nov. Magn.* 29, 2835-2841, 2016.

## ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Erzurum'da doğmuş olan Leyla DEMİR, ilköğrenimini Erzurum'da Paşalı ilköğretim Okulunda, orta öğrenimini ve Lise öğrenimini İnegöl'de sırasıyla Dumlupınar Orta Okulu ve Nuh Mehmet Küçük Çalık Lisesinde tamamlamış olup, 2008 yılında Bozok Üniversitesinde Fizik Bölümünü kazanmış, 2013 yılında mezun olmuştur. 2015 yılında yüksek lisansına Bozok Üniversitesinde başlamıştır. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism dergisinde yayınlanmış 1 (bir) adet makalesi mevcuttur.

### İletişim Bilgileri

E-posta: rock25metal92@gmail.com