

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

ÜÇ-TABAKALI KARE ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN-
(1/2, 1, 1/2) ISING MODELİNİN DİNAMİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hazırlayan
Ali KOZAN

Danışman
Prof. Dr. Mehmet ERTAŞ

Yüksek Lisans Tezi

Ağustos 2024
KAYSERİ

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

ÜÇ-TABAKALI KARE ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN-
(1/2, 1, 1/2) ISING MODELİNİN DİNAMİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Ali KOZAN

Danışman
Prof. Dr. Mehmet ERTAŞ

Ağustos 2024
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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

Ali KOZAN

İmza

“Üç-Tabakalı Kare Örgü Üzerinde Karma Spin-(1/2, 1, 1/2) Ising Modelinin Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Ali KOZAN

İmza

Danışman

Prof. Dr. Mehmet ERTAŞ

Fizik Ana Bilim Dalı Başkanı

Prof. Dr. Enise AYYILDIZ

İmza

TEŞEKKÜR

Bana bu tez çalıŐma konusunu veren ve çalıŐmalarım sűresince fikir ve tecrűbeleri ile bana maddi ve manevi anlamda bűyűk destek saėlayan saygıdeėer hocam Prof. Dr. Mehmet ERTAŐ'a,

Hayatım boyunca her zaman destek olan aileme, rahmetli annem Őerife KOZAN'a, babam Bayram KOZAN'a, eŐim Asiye KOZAN'a ve yine annemle aynı adı taŐıyan canım kızım Őerife KOZAN' a,

Sonsuz teŐekkűrlerimi ve Őűkranlarımı sunarım.

Ali KOZAN

Ağustos 2024, KAYSERİ

ÜÇ-TABAKALI KARE ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN-(1/2, 1, 1/2) ISING MODELİNİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ali KOZAN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2024
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet ERTAŞ

ÖZET

Zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında üç-tabakalı kare örgü üzerinde karma spin-(1/2, 1, 1/2) Ising modelinin dinamik faz diyagramları üzerine Hamiltonyen parametrelerinin etkisi Glauber geçiş oranları temelli ortalama alan yaklaşımı ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sandviçlenmiş üç katmanın üst ve alt katmanları S veya α -spinlerden ($S=\alpha=\pm 1/2$) oluşurken, orta katman σ -spinlerden ($\sigma=\pm 1$) oluşur. Öncelikle kinetik sistemin fazlarını elde etmek için ortalama alt örgü mıknatıslanmalarının zamana bağlı davranışlarını araştırıldı. Daha sonra, dinamik faz geçişlerini (DFG) elde etmek ve DFG'lerin tipini belirlemek için dinamik alt örgü mıknatıslanmalarının termal davranışı incelendi. Kinetik sistem hem birinci hem de ikinci dereceden faz geçişlerini gösterdi. Manyetik alanın genlik ve sıcaklık düzleminde dinamik faz diyagramları sunuldu. Kinetik sistem, Hamilton parametrelerine güçlü bir şekilde bağlı olan zengin dinamik faz diyagramları gösterdi.

Anahtar Kelimeler: Karma-spin Ising modeli, Ortalama-alan yaklaşımı, Glauber-tipi stokastik dinamik, Dinamik faz diyagramları.

**INVESTIGATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF MIXED SPIN-(1/2, 1, 1/2)
ISING MODEL ON TRILAYER SQUARE LATTICE**

Ali KOZAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M. Sc. Thesis, August 2024

Thesis Supervisor: Professor Doctor Mehmet ERTAŞ

ABSTRACT

Magnetic properties of the kinetic Ising system on sandwiched trilayer with square lattices are studied employing the mean-field theory based on Glauber-type stochastic dynamics. The top and bottom layers of sandwiched trilayer are composed of S or α -spins ($S=\alpha=\pm 1/2$), while the middle layer is composed of σ -spins ($\sigma = \pm 1$). First, we investigate the time-dependence behavior of order parameters to obtain the kinetic system's phases. After that, the thermal behavior of dynamic sublattice magnetizations is studied to obtain the dynamic phase transitions (DPTs) and to determine the type of DPTs. The kinetic system shows both first and second-order phase transitions. In the plane of the magnetic field's amplitude and temperature, we present the dynamic phase diagrams. The kinetic system shows rich dynamic phase diagrams, which are strongly dependent on Hamiltonian parameters.

Keywords: Mixed-spin Ising system, Mean-field theory, Glauber-type stochastic dynamic, Dynamic phase diagrams

İÇİNDEKİLER

ÜÇ-TABAKALI KARE ÖRGÜ ÜZERİNDE KARMA SPİN-(1/2, 1, 1/2) ISING MODELİNİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

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

1. BÖLÜM

MODEL VE ÜÇ TABAKALI SANDVİÇ YAPILI ISING SİSTEMİNİN DİNAMİK ORTALAMA ALAN DENKLEMLERİ

1.1. Model.....	13
1.2. Dinamik Ortalama Alan Denklemleri.....	14

2. BÖLÜM

NÜMERİK SONUÇLAR

2.1. Dinamik Fazlar.....	19
2.2. Dinamik Faz Geçiş Sıcaklıkları.....	24
2.3. Dinamik Faz Diyagramları.....	29
2.3.1. $J_1, J_2, J_3 > 0$ Durumu İçin Dinamik Faz Diyagramları.....	29
2.3.2. $J_1 < 0, J_2 > 0, J_3 > 0$ Durumu İçin Dinamik Faz Diyagramları.....	35
2.3.3. $J_1 > 0, J_2 < 0, J_3 < 0$ ve $J_1 < 0, J_2 < 0, J_3 < 0$ Durumları İçin Dinamik Faz Diyagramı.....	40

3. BÖLÜM
SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

KAYNAKÇA.....	45
EKLER.....	64
EK 1.....	64
ÖZGEÇMİŞ	65



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1(a). Temel fazlar ve özellikleri.....	24
Tablo 1(b). Karma fazlar ve özellikleri.....	24



ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 2.1. Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapısının şematik gösterimi. Birinci tabakadaki (G_1) spinlerin bilineer etkileşim parametresi J_1 , ikinci tabakadaki (G_2) spinlerin bilineer etkileşim parametresi J_2 , üçüncü tabakadaki (G_3) spinlerin bilineer etkileşim parametresi J_1 , bir ile ikinci ve ikinci ile üçüncü tabakadaki karşılıklı spinlerin etkileşim parametresi ise J_3 ile gösterilmiştir..... 13
- Şekil 3.1. Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin ortalama alt örgü mıknatıslanmaları m_{1A} , m_{2B} ve m_{3A} 'ün zamana bağlı değişimi. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = 1.0$, $h = 3.2$, $T = 2.5$ değerleri için sistemde paramanyetik (P) faz mevcuttur..... 21
- Şekil 3.2. Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin ortalama alt örgü mıknatıslanmaları m_{1A} , m_{2B} ve m_{3A} 'ün zamana bağlı değişimi. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = -1.5$, $h = 0.5$, $T = 0.95$ değerleri için sistemde I temel fazı mevcuttur. 22
- Şekil 3.3. Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin ortalama alt örgü mıknatıslanmaları m_{1A} , m_{2B} ve m_{3A} 'ün zamana bağlı değişimi. $J_1 = 1.0$, $J_2 = -1.0$, $J_3 = -3.0$, $d = -0.1$, $h = 0.36$, $T = 0.34$ değerleri için sistemde II temel fazı mevcuttur. 22
- Şekil 3.4. Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin ortalama alt örgü mıknatıslanmaları m_{1A} , m_{2B} ve m_{3A} 'ün zamana bağlı değişimi. $J_1 = 0.1$, $J_2 = -1.0$, $J_3 = -0.1$, $d = -0.1$, $h = 0.06$, $T = 0.1$ değerleri için sistemde III temel fazı mevcuttur..... 23
- Şekil 3.5. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = 1.0$, $h = 0.1$ değerleri ve iki farklı başlangıç değeri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin dinamik mıknatıslanmaları M_{1A} , M_{2B} , M_{3A} ve M_{tn} sıcaklığa bağlı değişimi. 27
- Şekil 3.6. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = -3.0$, $h = 0.05$, değerleri ve üç farklı başlangıç değeri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin dinamik mıknatıslanmaları M_{1A} , M_{2B} , M_{3A} ve M_{tn} sıcaklığa bağlı değişimi. 28

Şekil 3.7. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = 1.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	30
Şekil 3.8. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -1.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	30
Şekil 3.9. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -1.5$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	31
Şekil 3.10. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -2.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	32
Şekil 3.11. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -3.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	33
Şekil 3.12. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -4.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	34
Şekil 3.13. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -7.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	34
Şekil 3.14. $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7, d = -1.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	35
Şekil 3.15. $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7, d = -1.5$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	36
Şekil 3.16. $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7, d = -1.75$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	37
Şekil 3.17. $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7, d = -2.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.	38

- Şekil 3.18. $J_1 = -0.1$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.7$, $d = -2.25$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı..... 39
- Şekil 3.19. $J_1 = -0.1$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.7$, $d = -2.5$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı. 39
- Şekil 3.20. (a) $J_1 = 0.1$, $J_2 = -1.0$, $J_3 = -0.1$, $d = -0.1$ değerleri için (b) $J_1 = -0.1$, $J_2 = -1.0$, $J_3 = -0.1$, $d = -0.1$ üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı. 41

GİRİŞ

Manyetik maddeler ve manyetizma, geçmişten günümüze insanoğlunun günlük hayatını kolaylaştıracak birçok aletlerin yapımında ve kullanımında yer alan bilimin mühim konularından biridir. Son yıllarda da ileri teknolojik aletlerin ve malzemelerin yapımında tercih edilen bir alan haline gelmiştir. Bu sebepten birçok uygulama ve araştırma alanlarının ilgi odağı olan manyetizma, fizik ve fen bilimlerinin de önemli alanlarına konu olmuştur. Özellikle istatistik ve yoğun madde fiziğinde aralarında kuvvetli bir şekilde etkileşim içerisinde olan sistemlerin anlamlandırılması ve beraberinde getirdiği birçok matematiksel problemlerin çözümlenmesi bakımından istatistiksel mekaniğin temel konuları arasında yer alan manyetik etkileşimler, iki kısımda incelenebilir. Bunlardan biri manyetik momente sahip atomların veya tek başına elektronun sadece dış manyetik alanla etkileşim içerisinde olduğu ideal sistemlerdir. Parçacıklar arasındaki etkileşimler ideal sistemlerde ihmal edildiği için temel olarak bir tek parçacığın davranışı şeklinde düşünülür. Curie kanununa uyan paramanyetik bir madde ideal spin sistemine, Boyle Charles kanunu ile durum denklemi tanımlanan gaz, ideal gaz sistemine örnek verilebilir. Parçacıkları arasındaki kuvvetli etkileşimlere rağmen, Harmonik olarak titreşen bir örgünün, normal kipler veya fononların mevcudiyeti karşısında sistemi ideal olarak inceleyebiliriz. Temel olarak bu kısım esasen çalışılan sistemdeki her bir parçacığın makroskopik durumu yani sistemin bütünü ile uyumlu olduğu başka bir ifade ile dengeli sistemleri, araştırma konusu edinen kısımdır. Daha çok dengeli istatistik mekaniğin; gerçekte sağlam temeller üzerinde kurulmuş Gibbs dağılım teorisinin dengeli sistemlerin, irdelenmesinde karşımıza çıkar. İkinci kısım ise parçacık, enerji, olasılık gibi fiziksel niceliklerin dengede olmadığı, başka deyişle kooperatif sistemler olarak da adlandırılan parçacıklar arasındaki etkileşimlerin kati olarak ihmal edilmediği durumları konu edinen, sistemlerin ve ihtiva ettikleri parçacıkların birbirleri ile olan etkileşimlerini araştıran bu bölümü Gibbs

dağılım teorisi ile çalışmak ve tanımlamak olanaksızdır. Bu sistemler genellikle faz geçişi ile ifade edilen ve numunenin evvelinde ihtiva etmediği yeni özellikler ve düzenleme kazandığı, başka bir deyişle dinamik yapılardır. Bu yapılara sıcaklığı Curie sıcaklığının (T) altındaki sıcaklıklara indirilen paramanyetik maddenin ferromanyetik olması ile ideal bir gazın basıncın yükseltilmesi veya sıcaklığın düşürülmesi sonucu sıvı hale yoğunlaşması örnek verilebilir. Bu tür dengede olmayan düzensiz karmaşık sistemlerin ve barındırdıkları parçacıklar ile etkileşmelerini anlamlandırabilmek için oldukça zor ve çözülmesi güç matematiksel problemler ile karşılaşmaktadır. Bilim insanları bu gibi karmaşık sistemleri açıklamak ve çözümlmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Curie [1] ve Hopkinson [2] katıların manyetik özelliklerini araştırdığı ilk ampirik çalışmalarından birkaç sene sonra manyetik sistemleri açıklama doğrultusunda teorik çalışmalar başlamıştır. İlk teorik çalışma ideal sistem olan ve temel olarak üç başlıkta derleyebileceğimiz. (i) alınganlığı sıcaklıkla ters orantılı olarak değişen yani Curie kanununa uyan birçok hidratlı (sulu) metalik tuzların. (ii) pratik olarak yüzlerce derece boyunca alınganlığın sıcaklıktan bağımsız olan metallerin ve (iii) Curie noktasının üzerindeki ferromanyetik elementlerin oluşturduğu paramanyetik maddeleri açıklamak için Langevin [3, 4] tarafından yapılmıştır. Langevin paramanyetizmanın doğru bir yorumunu yapmış ve bir dış manyetik alan varlığında paramanyetik bir maddenin ortalama mıknatıslanması ile sıcaklık arasındaki bağıntıyı bulmuştur. İki sene sonra da Fransız fizikçi Weiss [5, 6] kooperatif sistem olarak ele alınan ve dış manyetik alanın yokluğunda bile kendiliğinden mıknatıslanmaya sahip olan demir, nikel, cobalt ve bazı nadir toprak elementlerinin oluşturduğu ferromanyetik maddeleri açıklayan modelini önerdi. Weiss, teorisinde atom veya molekül üzerine uygulanan etkin alanın mıknatıslanmanın şiddetiyle orantılı yapay bir iç moleküler alandan kaynaklandığını benimsemiştir. Weiss teorisi, kritik veya Curie sıcaklığının altında ferromanyetizmanın görüleceğini ve manyetik alınganlığın ise Curie-Weiss kanunu ile ifade edileceğini göstermiştir. Manyetik alınganlık bu kurama göre tam kritik sıcaklıkta sonsuza gitmektedir [7, 8]. Bu teorik çalışmaların asıl gayesi çalışılan dinamik sistemi açıklayabilecek matematiksel kolaylıklar içinde bulundurmasıdır. Bahse konu çalışmalardan en yaygın, kullanışlı, başarılı olanları ve günümüzde ferromanyetizmayı açıklamak için de yararlanılan iki teori oldukça sık kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi Wilhelm Lenz [9] tarafından önerilen ve öğrencisi Ernest Ising [10, 11] tarafından ferromanyetik faz dönüşümünü tek boyutta açıklayarak çözüme

kavuşturduğu Ising modelidir. Kristaldeki sabit örgü noktalarında, pozitif (yukarı) veya negatif (aşağı) yönde iki yönelime sahip çubuklar şeklinde manyetik momentlerin olduğu varsayımı klasik olarak ele alınmış, akışkanlar sistemindeki örgü gaz modelini anımsatan manyetik bir modelledir. Sıklıkla kullanılan ikinci model ise üç boyutta kuantum mekaniksel spin matrisleri şeklinde incelenen Heisenberg [12] modelidir. Bu modelde sistemin enerjisi üç bileşenin skaler çarpımı ile ifade edilir. Burada x ve y bileşeni ihmal edilirse Ising modeline, z bileşeni ihmal edilirse XY modeline dönüşür. XY modeli tek boyutta teorik olarak tam çözülebildiğinden dikkat çekicidir, ancak gerçekte XY modeli ile gösterilebilecek fiziksel bir sistem henüz keşfedilmemiştir. Ising modeli bir yönde kuvvetli anizotropiye sahip gerçek fiziksel sistemlere karşılık gelmektedir. Ayrıca transfer matris metoduyla tek boyutlu örgü için Ising modeli tam olarak çözüldüğünde, sıfırdan farklı sıcaklık değerlerinde faz geçişi gözlemlenmemiştir [13-16]. İki boyutlu örgü için Ising modelinin kritik sıcaklığı önce Kramer ve Wannier [17] tarafından hesaplanmış ve daha sonra da tam çözümü Onsager [18] tarafından yapılmıştır. Fakat ne Ising modelinin ne de Heisenberg modelinin üç boyutlu sistemler için henüz kesin çözümü bulunamamıştır. Ising tarafından tanımlanan ve iki durumlu yapıya sahip olan bu model spin-1/2 Ising modeli olarak da isimlendirilmektedir. Spin-1/2 Ising modeli, akışkan konsantrasyonu, periyodik düzenlenme, manyetik moment, gazların soğurulması, elektrik polarizasyonu, çiftlenmiş elektron genliği, ikili sıvı veya gazların faz geçişleri, ikili alaşımlardaki düzenli-düzensiz faz geçişleri, vb. gibi iki durumlu ve tek düzen parametrelili kooperatif sistemlerin tetkikinde kullanılmaktadır [19, 20].

Ancak fiziksel sistemlerin çoğu tek düzen parametresi ile tanımlanamaz. Bu tür sistemleri açıklamak için en az üç durum ve iki düzen parametresi içeren modellemelere gereksinim duyulmaktadır ki en bilinen örneği Hamiltonyeni kristal alan etkileşim parametresi (D) ile bilineer etkileşim parametresini (J) ihtiva eden spin-1 Ising modeli olup, bu model Blume-Capel (BC) modeli olarak isimlendirilmektedir. Bahse konu bu sistem ilk olarak Blume [21] ve Capel [22, 23] tarafından birbirinden bağımsız olarak ifade edilmiştir. Termomanyetik ve moleküler tabanlı kayıt sistemleri, telafi sıcaklıkları, faz dönüşümleri, ferrimanyetik yapıya sahip karmaşık sistemler, manyetik alaşımlar, ferrimanyetik sistemler, moleküler tabanlı mıknatıslar, yarı-iletken alaşımlar, ferrimanyetik düzenlilik ve düzenli-düzensiz faz geçişleri gibi daha karmaşık fiziksel yapıların termodinamik özelliklerini açıklamak için spin-1 Ising modeli gibi çok

durumlu ve birden fazla düzen parametresi içeren yüksek spinli veya karma spin Ising sistemlere ihtiyaç vardır. Gelişen deneysel metotlar, bu sistemlerin hassas çalışmalarına, termodinamik ile manyetik özelliklerin de daha verimli araştırılmasına imkân sunmaktadır. Son yıllarda manyetik filmler üzerine yapılan ampirik araştırmalar ile beraber teorik çalışmaların ve yeni yöntemlerin geliştirilmesi, manyetizmayı açıklayabilmemizde önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, karma spin Ising sistemleri manyetizmadaki cezbedici gelişmeler ile günümüzde de halen sıklıkla tercih edilmekte ve güncelliğini korumaktadır. Ayrıca geliştirilen Ising sistemleri ile birlikte iki ve çok-tabakalı sistemlerin ve süper kafeslerin fiziksel davranışları üzerine yapılan araştırmaların sayısında ciddi manada ilerleme kaydedilmiştir. Ising modelleri ile ultra ince filmler, çok-tabakalı sistemler ve benzer manyetik filmler ile alakalı yapılmış çok sayıda teorik ve deneysel çalışma mevcuttur [24]. Farklı manyetik maddelerin çok-tabakalı bir şekilde üretilmesi ile çeşitli uygulamalarda yeni manyetik maddelerin yapımında, düzeltilmesinde ve bilgi depolanmasında yüksek teknolojik olanaklar sunmaktadır [25]. Üretilen bu maddeler dikkat çekici önem arz eden manyetik davranışlar sergiler ki bunlara dev manyetorezistans [26], yüzey manyetik anizotropisi [27], yüzey manyetik moment artışı [28] ve manyeto-elastik etkileşimi [29,30] misal gösterilebilir. İki-tabakalı Ising modelinin son yıllarda araştırmalara konu olarak en çok tercih edilmesinin nedeni ultra ince manyetik filmler için yapılan deneye dayalı çalışmalarda ve teknolojik uygulamalarda önemli derecede yer almasından kaynaklanmaktadır [31-38]. Çünkü geliştirilen mikroskobik teknikler ve yüzey-kuvvet sistemleri deneye dayalı çalışmalara kaynak teşkil etmiştir. Özetle son zamanlarda, belli koşullara bağlı olarak toplam mıknatıslanmanın sıfırlandığı yani yok olduğu kritik sıcaklıktan daha düşük bir değer olan telafi sıcaklığının gözlenmesi ki bu sıcaklık değerinin teknolojik çalışmalar için önem arz etmesi, moleküler tabanlı manyetik malzemelerin çözümlenmesinde bir model olması, saf spin sistemlerine kıyasla daha düşük öteleme simetrisine sahip olduklarından birçok yeni ilginç kritik olguların gözlemlenmesi ve termomanyetik kayıt sistemlerinin oldukça potansiyel teknolojik uygulamalarının varlığı gibi nedenlerden dolayı, karma spin Ising sistemleri en çok tercih edilen, araştırılan ve çalışılan yoğun madde ve istatistiksel fizik konularının başında gelir [39].

İki spinli karma-spin sistemlerinin denge halindeki davranışları, kritik üsteller, reentrant olgular, düzen parametrelerinin sıcaklıkla değişimi, denge faz diyagramları, faz geçişleri vb. olgular, denge istatistiksel mekaniğinde sıklıkla kullanılan kapalı form yaklaşımları Bethe kafesinde iterasyon tekniği, bağ operatörü ortalama-alan yöntemi, modife edilmiş spin dalga yöntemi, spin dalgalanma teorisi, renormalizasyon grup (RG) teorisi, ortalama alan yaklaşımı (OAY), etkin alan teorisi (EAT), Monte Carlo simülasyon yöntemi (MC), ve çift yaklaşımlı kümesel değişim metodu vb. gibi metotlarla pek çok araştırmacı tarafından çalışmış ve halen çalışılmaya da devam edilmektedir. Bazı önemli iki spinli karma spin sistemleri, spin $(1/2, 1)$; spin $(1/2, 3/2)$; spin $(1/2, 2)$; spin $(1/2, 5/2)$; spin $(1, 3/2)$; spin $(1, 2)$; spin $(1, 5/2)$; spin $(2, 3/2)$ ve spin $(2, 5/2)$ Ising sistemleri şeklinde sayılabilir. Belirtilen karma spin sistemlerinin kati sonuçları, Bethe örgüsü, iki-katlı Cayley ağacı, bal peteği örgüsü, zar (dice) örgüsü, dekore edilmiş düzlemsel örgü ve banyo döşeme (bathroom tile) tipi örgülerde elde edilmiştir.

İki spinli karma spin Ising sistemlerinin en basiti ve sıklıkla çalışılan modeli spin $(1/2, 1)$ Ising modelidir ki en çok tercih edilen modellerin başında gelir. Bu model serbest-yarım tamsayıli yaklaşımı [40], Monte Carlo (MC) hesaplamaları [41, 42], renormalizasyon grup (RG) tekniği [43], yüksek sıcaklık seri açılım [44], Bethe-Peierls (BP) yöntemi [45,46], etkin alan teoremi (EAT) [47–50], transfer matris (TM) yöntemi [51], OAY [52, 53], kümesel-değişim yaklaşığı [54, 55] ile çalışılmıştır. Model, Bethe [56, 57], zar (diced) [58] ve bal peteği [59] örgüleri için detaylıca incelenmiştir. Ayrıca EAT ile seyreltik karma spin $(1/2, 1)$ Ising modelinin manyetik özellikleri detaylıca çalışılmıştır [60–62]. Sonlu küme yaklaşımı [63], yol-integral gösterimli çift model yaklaşığı [64], ortalama-alan RG yöntemi [65], öteleme alanın varlığında, model EAT [66–68] ile de araştırılmıştır. Bunlara ek olarak, EAT ile enine alan varlığında seyreltik karma spin $(1/2, 1)$ Ising modelinin kapsamlıca çözümleri yapılmıştır [69, 70].

En çok bilinen ve aktif bir şekilde çalışılan iki spinli karma spin Ising sistemlerinden bir diğeri de karma spin $(1/2, 3/2)$ Ising modelidir. Bu model ile ilgili akademik manada ilk çalışmalar Bobák ve Jurčičin tarafından EAT ile çalışılmış ve örgünün yapısına bağlı olarak telafi sıcaklığının değişiminin sadece spinlerin büyüklüğüne bağlı bir olgu olmadığı görülmüştür [71]. Bobák ve Jurčičin EAT kullanarak bal peteği örgüsünde bilinear ve kristal-alan etkileşim parametrelili seyreltik karma spin- $1/2$ ve spin- $3/2$ Ising modelini çalışmışlar ve neticesinde ikili telafi noktası ihtiva ettiğini gözlemlemişlerdir

[72]. Bu spin sisteminin denge özellikleri EAT [73] ve MC yöntemi [74] ile ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Ayrıca kristal-alan etkileşimli karma spin ($1/2$, $3/2$) enine Ising modelinin manyetik davranışları, EAT kullanılarak kapsamlıca çalışılmıştır [75–77]. Sistemin faz diyagramları, düzen parametrelerinin ısısal özellikleri araştırılarak elde edilmiştir. Aynı zamanda sistemin boyuna manyetik alan varlığında da, bu modelin manyetik nitelikleri (manyetizasyonun termal davranışı, manyetik alınganlığı ve faz diyagramları) EAT ile çalışılmıştır [78]. Heisenberg ferrimanyetik karma spin ($1/2$, $3/2$) sisteminin en yakın ve ikinci en yakın spin etkileşimlerini araştırmak için Green-fonksiyon tekniği tercih edilmiştir [79]. Sistemin manyetik davranışları bal peteği [80], kare merkezli (union jack) [81], iki-katlı Cayley ağacı [82], Kagomé [83] ve Bethe [84] örgüleri için araştırılmıştır. Bunlara ek olarak seyreltik karma spin- $1/2$ ve spin- $3/2$ modeli OAY kullanılarak ayrıntılı bir şekilde çalışılmıştır [85]. Denel olarak amorf V (T CNE) $x.y$ (çözücü) organometalik bileşiğinin yaklaşık 400K gibi bir sıcaklıkta spin- $1/2$ - $3/2$ ferrimanyetik yapı ve ferrimanyetik bir düzen ihtiva ettiği müşahade edilmiştir [86–88].

Diğer bir iki spinli karma-spin sistemi de iki spinli karma-spin ($1/2$, 2) Ising modeli olup ilk olarak dört-spin model [89] ve çift model [90] formlarıyla çalışılmıştır. Bu karma-spin modelinin dekore edilmiş düzlemsel örgü için kati çözümleri bulunmuş ve modelin termodinamik davranışları irdelenmiştir [91]. Ayrıca, Bethe örgüsündeki kati çözümleri de tespit edilerek, kritik özellikler gözlemlenmiş ve modelin faz diyagramları ifade edilmiştir [92].

Başka bir iki spinli karma-spin modeli de karma-spin ($1/2$, $5/2$) sistemi olup, Strečka [93], karma spin- $1/2$ ve spin- $5/2$ modelinin banyo döşeme (bathroom tile) yapısındaki kati çözümleri ve sıcaklığa bağlı miknatislanmanın nasıl değiştiği ile faz diyagramlarını ifade etmiştir. Bethe örgüsündeki kati çözümler, kristal-alan etkisi ile çalışılarak miknatislanma eğrileri ve faz diyagramları elde edilmiştir [94].

Bir diğer iki spinli karma spin modeli olan karma spin (1 , $3/2$) sisteminin de özellikleri yeteri kadar araştırılmıştır. Bu sistem demir-nitrit (Fe_4N) bileşiğinin karakteristik özelliklerini belirlemek üzere MC hesaplamaları karma spin-1 ve spin- $3/2$ modelleri özel olarak kullanılarak çalışılmıştır [95, 98]. EAT ile seyreltik karma spin (1 , $3/2$) Ising modelinin farklı düzlemlere karşılık gelen faz diyagramları gözlemlenmiştir. Bahse

konu model kümesel değişim yönteminin çift yaklaşığıyla [99], MC hesaplamalarıyla [100] ve EAT [101] ile birlikte farklı kristal alanlarda OAY [102] kullanılarak düzen parametrelerinin sıcaklığa bağlı davranışları ayrıntılı şekilde çalışılmış ve faz diyagramları elde edilmiştir. Sitemin kati çözümleri; dekorasyon dönüşüm tekniği ile manyetik alınganlığın ve ısı sığasının sıcaklığa bağlı özellikleri ile birlikte taban-durum faz diyagramları incelenmiştir [103]. Aynı teknik kullanılarak basit kübik örgü için kesin çözümlenmeleri ile beraber faz diyagramları detaylıca belirlenmiştir [104]. Ayrıca son zamanlarda sistemin Bethe örgüsü üzerindeki uygulamaları araştırılmış [105,106] ve demir nitrür sistemi çalışılarak manyetik davranışları incelenmiştir [107].

Diğer bir iki spinli karma-spin Ising modeli de karma-spin (1, 2) Ising sistemi olup, bu sistemin denge faz diyagramları üzerine yapılan akademik anlamda ilk araştırmalar, Weng ve Li [108] tarafından ayırık yol integral temsilli (discretized path-integral representation) çift yaklaşıım yöntemi ile çalışılmıştır. Çeşitli yüksek spin etkileşmeleri için dört-spin model formu ile karma-spin (1, 2) Ising modelinin mıknatıslanmasının sıcaklığa bağlılığını Iwashita ve arkadaşları [109], tarafından ifade edilmiştir. Zhang ve arkadaşları [110] ise bal peteği örgü tabakasında, MC ve EAT formlarından faydalanarak, karma-spin (1, 2) Ising modelinin manyetik davranışlarını gözlemlenmişlerdir. Tekrarlama bağıntılarını kullanarak karma-spin (1, 2) Ising sisteminin kritik özelliklerini Albayrak ve Yiğit [111] çalışmışlardır. Son yıllarda ise OAY ve MC hesaplamalarından faydalanılarak, farklı anizotropik spin (1, 2) Ising sisteminin manyetik davranışları Wei ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [112]. Manyetik alan varlığında ve yokluğunda bu karma-spin(1, 2) Ising modelinin manyetik davranışlarını (mıknatıslanma, manyetik alınganlık, iç enerji, ısı sığası) Deviren ve arkadaşları [113] EAT kullanarak bal peteği ve kare örgüler üzerinde çalışarak, modelin faz diyagramlarını bulmuşlardır. Ayrıca Deviren ve arkadaşları, karma-spin (1, 5/2) [114] ve karma-spin (3/2, 2) [115] sistemlerinin denge davranışlarını korelasyonlu EAT yararlanılarak detaylıca çalışmışlardır. Farklı kristal alan etkileşme hamiltonyenli karma-spin (3/2, 2) Ising modelinin çoklu kritik noktaları ve faz geçiş sıcaklıkları, OAY formu kullanılarak ifade edilmiştir [116, 117]. Bu karma spin sisteminin Bethe örgüsü üzerindeki kati çözümleri de bulunmuştur [118].

Karma-spin (2, 5/2) sistemi de dikkate değer başka bir iki spinli karma-spin modeli olup ilgi çekici araştırmalar yapılmıştır. Bunun mühim nedenlerinden biri, sistemin

AMIIFeIII (C₂O₄)₃ (A = N(n - C₃H₇)₄, MII = Mn, Fe) moleküler-temelli mıknatısı [119] için model teşkil etmesidir. Belirtilen mıknatısın manyetik davranışlarını incelemek için, karma-spin (2, 5/2) sistemi ilk olarak EAT [120–123] ve MC hesaplamaları [124, 125] yaklaşıkları kullanılarak çalışılmış ve çalışılmaya devam edilmektedir. Sistemin kuantum mekaniksel çalışmaları, yani karma-spin (2, 5/2) Heisenberg ferrimanyetik sistemi, Green-fonksiyon tekniği [126] ve lineer spin-dalga teorisiyle [127] formları ile incelenmiştir. Ayrıca sistemin Bethe örgüsü üzerindeki kati çözümleri de elde edilmiştir [128].

İki spinli karma spin Ising modellerine göre üç spinli üç-tabakalı Ising modeli kullanılarak yapılan akademik araştırmalar yeteri kadar olmamakla birlikte; bahse konu üç-tabakalı Ising sistemi ile ilgili yapılan çalışmaları aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

Wiatrowskia ve arkadaşları EAT kullanarak üç katmanlı karma-spin sistemlerinin sıcaklığa bağlı mıknatıslanma derinliği ve potansiyellerini incelemiştir [129]. Ferromanyetizmanın ve antiferromanyetizmanın dönme anizotropileri ile ilişkilerini ortalama alan yaklaşıklığından faydalanarak Jing-Guo, H. and Stamps, R.L. araştırmışlar ve deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu bulmuşlardır [130]. Co/Ge/Co üç katmanlı manyetik filmin sıcaklıkla birlikte nasıl davranış sergilediği Patrin, G.S. ve arkadaşları tarafından hem teorik hem deneysel olarak karşılaştırılmışlardır [131]. Albayrak, E. üç katmanlı Bethe kafesi üzerindeki Ising modelinin, tekrarlama bağıntıları yardımı ile faz diyagramlarını, faz geçişlerini ve mıknatıslanmalarını çalışmıştır [132]. Petek ve kare kafesler üzerinde üç alternatif katmandan oluşan Ising modeli etkin alan teorisi kullanılarak çalışmış ve faz diyagramları ile kritik davranışlar sunulmuştur [133]. Bethe kafeslerinin spin-(1/2,1,1/2) Ising modeli, tekrarlama bağıntıları vasıtası ile Albayrak ve Aker tarafından araştırılarak faz diyagramları elde edilmiştir [134]. Yine Albayrak ve Aker tarafından spin-(1,1/2,1) Ising modeli de incelenerek sıcaklığa bağlı faz geçişleri ve faz diyagramları elde edilmiştir [135]. Kendiliğinden mıknatıslanma, keyfi derecelerdeki manyetik momentler, alınganlık vb. fiziksel nitelikleri de ihtiva eden tekrarlama bağıntıları vasıtası ile elde edilen denklemlerin neticesinde kritik sıcaklıkların daha hassas hesaplama olanağı sunan bir form geliştirilmiştir [136]. Spin-(1/2,3/2,1/2) formundaki üç katmanlı Bethe kafesinin çift doğrusal değişim etkileşimleriyle incelenerek faz diyagramları, faz geçişleri ve kritik sıcaklıklar müşahade edilmiştir [137]. Thota ve arkadaşları tarafından SrRuO₃/LaNiO₃/SrRuO₃ üç

katmanlı yarıiletken yapının darbeleri lazer biriktirme tekniğini kullanarak mıknatıslanması incelenmiştir [138]. Üç katman içeren spin-1/2 Ising sisteminin manyetik özellikleri etkin alan ve ortalama alan formların istifade ederek araştırılmıştır [139]. Üç tabakalı süper film kafesi karma spin-(1/2, 1, 3/2) sisteminin, manyetik ve termodinamik davranışlarına filmin kalınlığının etkisi, Lv ve arkadaşları tarafından MC Simülasyonundan faydalanarak araştırmışlardır [140]. Ayrıca yine MC yönteminden istifade ederek üç tabakalı spin-1/2 Ising sistemindeki rastgele manyetik olmayan safsızlığın etkileri ile sıcaklığın etkileri ve mıknatıslanmalar incelenmiştir [141]. Monte Carlo yöntemi kullanılarak yapılan bir başka çalışma ise Chandra ve Acharyya tarafından Ising üç katmanlı sisteminin manyetik davranışlarının araştırılmasıdır [142]. Diğer bir Monte Carlo Simülasyonu çalışması da spin-1/2 ising modelini içeren üç katmanlı sistemin telafi sıcaklıklarının gözlemlenmesidir [143]. Spin-1/2 Ising modeliyle tanımlanan altıgen kafeslerden oluşan üç katmanlı bir nanoyapının manyetik özellikleri etkin alan teorisi formu ile Santos ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [144]. Kare Bravais kafesi üzerinde spin-1/2, Ising üç katmanlı ferrimanyetik sistem, tek spin-flip Metropolis algoritması ile Monte-Carlo yönteminden istifade ederek araştırılmıştır. Ayrıca üçgen yapıdaki ferrimıknatısın üç katmanlı spin-1/2 ising sistemi de incelenmiştir. [145, 146]. Boubekri ve arkadaşları üç tabakalı nanografen yapısının manyetik özelliklerini etkin alan teorisinden faydalanarak çalışmışlardır [147]. Grafen benzeri üç katmanlı bir yapının karma spin-(3/2, 5/2) Ising modeline odaklanarak Monte-Carlo metodu kullanılarak telafi davranışları ve histerezis özellikleri üzerine çalışmalar yapılmıştır [148]. Üçgen yapıdaki nanotüp karma spin-(1/2,1) sistemi diferansiyel operatör tekniği ile etkin alan teoreminden faydalanılarak sistemin manyetik özellikleri müşahede edilmiştir [149]. Chandra, Metropolis algoritması ile Monte Carlo similasyonlarını kullanılarak, eşdeğer düzlemlere sahip olmayan üçgen yapıdaki ferrimanyetik üç tabakalı spin-1/2 ising sistemin manyetik ve termodinamik davranışlarını çalışmıştır [150].

Üç spinli üç-tabakalı Ising modeli kullanılarak farklı yapıdaki sistemlerin denge özellikleri üzerine yapılan bu çalışmalara rağmen, bu sistemlerin dinamik özellikleri üzerine yapılan çalışma sayısı en iyi bilgilerimiz dahilinde bir tanedir. Bu dinamik çalışma ise [151] Kantar ve Ertaş tarafından yapılmış olup özetleyecek olursak; Kristal alan etkileşimli üç-katmanlı karma spin (1/2, 1, 3/2) Ising sisteminin dinamik özellikleri

araştırılmıştır. Burada glauber geçiş oranları temelli dinamik ortalama-alan yaklaşıklığından istifade edilerek sıcaklığa bağlı denklemler ve parametreler belirtilmiştir ki özellikle Hamiltonyen parametrelerine güçlü bir şekilde bağlı olduğu neticesine ulaşmışlardır. Ayrıca sistemin dinamik faz geçişlerini, türlerini (N-, W-, S-, R-, P-, L- ve Q- fazları) ve dinamik faz sıcaklıklarını müşahede etmişlerdir. Bir diğer sonuç ise dinamik faz geçişlerinin telafi sıcaklıklarının görüldüğü ve görülmediği dinamik faz grafikleri de elde edilmiştir.

Dengesiz yani dinamik sistemlerin özelliklerini araştırırken karşılaşılan dikkat çekici sorunlardan birisi dinamik faz geçiş (DFG) sıcaklıklarının varlığı ve bu sıcaklıkların varlığına temel olarak neyin sebep olduğunun tam olarak ifade edilememesi, bu itibarla üzerinde çok araştırılan ve araştırılması lazım gelen bu problemi karşımıza çıkarmaktadır. Bu konu yani dinamik faz geçiş sıcaklıkları ilk olarak, zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında kinetik spin-1/2 Ising sisteminin kararlı durumlarının OAY yöntemi ile Glauber-tipi stokastik dinamikten istifade edilerek çalışılmıştır [152-154]. Sonrasında dinamik faz geçişleri, dinamik OAY tekniği [155, 156] ve dinamik MC hesaplamaları ile kinetik spin 1/2 Ising sistemi için araştırılmıştır [157-167]. Landau tipi potansiyelleri olan sistemlerde Tutu ve Fujiwara [168], sistematik bir teknik geliştirerek DFG sıcaklıklarını ve dinamik faz diyagramlarını elde etmişlerdir. Kinetik spin-1/2 Ising sisteminin tek boyuttaki DFG'leri için Glauber tekniği kullanılarak çözümlenmiştir [169]. Yakın geçmişte ise, spin-1 [170-174], spin-3/2 [175-179], spin-2 [180, 181], spin-5/2 [182, 183] gibi Ising modellerinde DFG sıcaklıkları ve dinamik faz diyagramları gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak, Heisenberg spin modelleri [184-187], CO basıncının belirli zaman aralıklarındaki değişimi ile CO oksidasyonu için Ziff-Gulari-Barshad sistemi [188], XY sistemi [189, 190] gibi daha karmaşık modellerde de DFG sıcaklıkları ve dinamik faz diyagramları tartışılmıştır. Ayrıca, spin-1/2 Ising sistemi korelasyonlu EAT ve Glauber-tipi stokastik dinamikten faydalanılarak çalışılmış ve modelin dinamik faz diyagramları gösterilmiştir [191-194].

DFG sıcaklıkları, ilk defa deneysel olarak çok ince ferromanyetik Co/Cu (001) filmlerinde gözlemlenmiştir [195, 196]. Daha sonra, ferroik malzemelerde (ferroelektrik, ferroelastik ve ferromagnet) [197], YbaCuO sistemlerde [198], C10E3/D2O filmlerde [199], Fe/Au(001) aşırı ince filmlerde [200, 201], manyetik çok tabakalı [Co/Pt]3 sisteminde [202], ince Ni80Fe20 polikristal filmlerde [203],

photoinduced faz değişimlerinde [204], yüksek sıcaklıkta süperiletken-9 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ bileşiginde [205] ve PEN (polietilen naftalin) nano bileşiklerinde [206] DFG sıcaklıkları müşahede edilmiştir.

Dinamik sistemlerdeki dikkat çekici problemlerden bir diğeri ise dinamik telafi sıcaklıklarının varlığıdır. Telafi sıcaklığı (T_{telafi}), toplam mıknatıslanmanın kritik sıcaklığın altında sıfır olduğu sıcaklıktır [207]. Başka bir deyişle bu sıcaklık alt örgülerin manyetik momentlerinin birbirlerini $T = T_{\text{telafi}}$ 'de yok ettikleri sıcaklık değerini ifade eder. Toplam mıknatıslanmanın sıfır olduğu bu durum malzemenin dış alan varlığından etkilenmediği anlamını taşır. Bazı ferromanyetik sistemlerde telafi sıcaklığının oda sıcaklığına yaklaşık değerlerinde termomanyetik kayıt sistemleri bakımından kritik bir öneme haizdir [208-211]. Ayrıca bazı fiziksel nicelikler bu sıcaklıkta ilgi çekici davranışlar sergilemektedir. Örneğin, artık mıknatıslanma (coercivity) alanı telafi sıcaklığına yakın sıcaklıklarda çok belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Artık mıknatıslanma alanı bu durumlarda T_{telafi} sıcaklığının altında minimum değerine ve $T = T_{\text{telafi}}$ 'de maksimum değerine ulaşır ve küçük, kararlı manyetik bölgeler oluşur [212-214]. Başka bir ifade ile toplam dinamik mıknatıslanmanın sıfır olduğu bu sıcaklık, kritik sıcaklığın altında dinamik telafi sıcaklığıdır (T_{telafi}). Bununla birlikte, dinamik telafi sıcaklığı, karma spin (1/2, 1) [215-217], karma spin (3/2, 5/2) [218], karma spin (1/2, 3/2) [219], karma spin (1, 2) [220], karma spin (2, 5/2) [221], karma spin (1, 3/2) [222], Ising modelleri için araştırılmıştır. Telafi sıcaklığı, deneysel olarak da farklı sistemlerde müşahede edilmiştir. Fe_3O_4 ve Mn_3O_4 süper örgülerinin sıcaklığa bağlı faz diyagramlarını ve telafi sıcaklıklarını Chern ve arkadaşları [223] araştırdılar. Nikel II format dehidratın ($\text{Ni}(\text{HCOO}_2)_2\text{H}_2\text{O}$) manyetik davranışlarını, Kageyama ve arkadaşları [224] çalışarak düşük sıcaklıklarda zayıf bir ferrimanyet olduğu ile bu bileşigin belirli bir sıcaklıkta dikkat çekici manyetik davranışlar sergilediği bir faz durumuna geçtiğini ve bu manyetik davranışların, kendiliğinden olan zayıf bir ferromanyetizma, ani değişen mıknatıslanma ve telafi sıcaklığı özellikleri olduğu sonucuna varmışlardır.

Bu tez çalışmasında, üç-tabakalı sandviç karma-spin (1/2,1,1/2) sisteminin zamana bağlı dış manyetik alan varlığında, dinamik davranışı (dinamik faz geçişleri, sıcaklıkları, kritik noktaları ve dinamik faz diyagramları) ayrıntılı bir şekilde incelenerek elde edilen bilgileri paylaşacağız. Ayrıca bu çalışmanın dinamik üç-tabakalı karma-spin

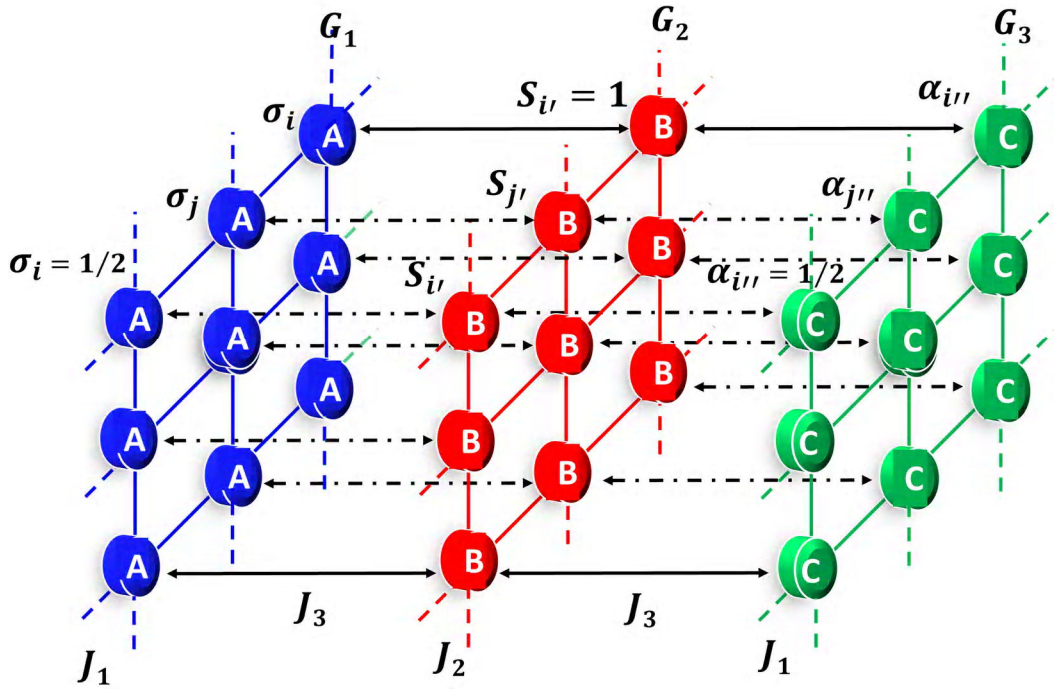
sistemlerini incelemek isteyen araştırmacılara kaynak çeşitliliği sağlayacağı öngörölmektedir. Bu giriş bilgilerinden sonra, Bölüm 2’de zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan altında karma spin (1/2, 1, 1/2) Ising modelinin tanıtımı yapılacak ve sistemin dinamik davranışını veren ortalama-alan dinamik denklemleri Glauber-tipi stokhastik dinamik tekniği kullanılarak elde edilecektir. Bölüm 3’de ise Bölüm 2’de elde edilen ortalama alan dinamik denklemleri vasıtası ile dinamik düzen parametrelerinin zamanla değişimleri incelenerek, sıcaklığa bağlı dinamik düzen parametreleri, dinamik faz geçiş noktaları (süreksiz ve sürekli, yani birinci- ve ikinci-derece faz geçişleri) ve dinamik faz diyagramları sunulacaktır. Son bölümde ise, yapılan çalışma özetlenerek elde edilen sonuçlar bilimsel temelde tartışılacak ve yorumlanacaktır.

1. BÖLÜM

MODEL VE ÜÇ TABAKALI SANDVIÇ YAPILI İSİNG SİSTEMİNİN DİNAMİK ORTALAMA ALAN DENKLEMLERİ

1.1. Model

Bu tez çalışmasında üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin (1/2, 1, 1/2) ısing sisteminin dinamik fazları, dinamik faz geçiş sıcaklıkları ve dinamik faz diyagramları gibi dinamik manyetik özelliklerini tanımlayan dinamik denklemleri elde etmek için Glauber-tipi stokastik dinamik temelli ortalama alan yaklaşımı kullanılacaktır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda bu dinamik yöntem için kısaca dinamik ortalama alan yaklaşımı (DOAY) ifadesi kullanılmaktadır. Üç tabakalı sandviç yapılı karma Ising sistemini tanımlayan şematik gösterim Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapısının şematik gösterimi. Birinci tabakadaki (G₁) spinlerin bilineer etkileşim parametresi J₁, ikinci tabakadaki (G₂) spinlerin bilineer etkileşim parametresi J₂, üçüncü tabakadaki (G₃) spinlerin bilineer etkileşim parametresi J₁, bir ile ikinci ve ikinci ile üçüncü tabakadaki karşılıklı spinlerin etkileşim parametresi ise J₃ ile gösterilmiştir.

Burada, üç-tabakalı sandviç kare örgü yapısı A , B ve C gibi üç alt tabakadan oluşmaktadır. Her tabaka yalnızca A tipi, B tipi veya C tipi atomlardan oluşur. Mavi, kırmızı ve yeşil renkli kürelerle gösterilen A, B ve C tipi atomlar sırasıyla $\sigma = 1/2$, $S = 1$ ve $\alpha = 1/2$ olarak seçilmiştir. Sistemin Hamiltonyen ifadesi,

$$\begin{aligned} \mathcal{H} = & -J_1 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i \sigma_j - J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S_{i'} S_{j'} - J_3 \sum_{\langle i'' j'' \rangle} \alpha_{i''} \alpha_{j''} - \\ & J_3 (\sum_{\langle ii' \rangle} \sigma_i S_{i'} + \sum_{\langle i' i'' \rangle} S_{i'} \alpha_{i''}) - D \sum_{i'} S_{i'}^2 - H(t) (\sum_i \sigma_i + \sum_{i'} S_{i'} + \\ & \sum_{i''} \alpha_{i''}) \end{aligned} \quad (1.1)$$

ile verilir. (1.1) eşitliğindeki J_1 birinci ve üçüncü tabakanın, J_2 ikinci tabakanın, J_3 hem birinci ve ikinci tabakalar arasındaki en yakın komşu spinlerin ve hem de ikinci ve üçüncü tabakalar arasındaki en yakın komşu spinlerin bilineer etkileşim parametrelerini ifade eder. Birinci tabaka olan A tabakasının i . konumundaki spinler σ_i , j . konumundaki spinler σ_j , ikinci tabaka olan B tabakasının i' . konumundaki spinler $S_{i'}$, j' . konumundaki spinler $S_{j'}$ ve son olarak C tabakasının i'' . konumundaki spinler $\alpha_{i''}$, j'' . konumundaki spinler $\alpha_{j''}$ şeklinde ifade edilirler. $\sigma = \pm 1/2$, ve $\alpha = \pm 1/2$ değerlerini alırken $S = \pm 1, 0$ değerlerini alır. D tek iyon etkileşim veya kristal alan etkileşme parametresi, $H(t)$ ise zamana bağlı salınımlı dış manyetik alandır ve

$$H(t) = H_0 \cos(wt) \quad (1.2)$$

şeklinde tanımlanır. (1.2) eşitliğinde, zamana bağlı salınımlı dış manyetik alanın genliği H_0 ile açısal frekansı ise w ile ifade edilir. Sistem mutlak T sıcaklığında izotermal ısı banyosu ile temas etmektedir.

1.2. Dinamik Ortalama Alan Denklemleri

Bu kesimde sistemin davranışını tam olarak açıklayan diferansiyel denklemler elde edilecektir. Bunun için Glauber modelini kullanacağız ve master denklemden yararlanacağız. Glauber [152], sistemin bir durumdan diğer bir duruma zamana bağlı olarak değiştiğini öngörerek bu geçişi, bir ihtimaliyet fonksiyonu olarak ele almış ve sistemin birim zamanda $1/\tau$ oranında değişeceğini belirtmiştir. G_2 tabakasındaki S spinlerin ve G_3 tabakasındaki α spinlerinin bir an için sabit kaldıkları düşünülürse, sistemin bir t zamanında $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$ spin konfigürasyonuna sahip olma olasılıkları

$P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t)$ şeklinde ifade edilirken, birim zamanda herhangi bir i . spinin bir σ_i durumundan başka bir σ'_i durumuna geçme olasılık yoğunluğu $W_i(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t)$ ile tanımlanır. Benzer şekilde, G_1 tabakasındaki σ spinlerin ve G_3 tabakasındaki α spinlerinin bir an için sabit kaldıkları düşünülürse, sistemin bir t zamanında S_1, S_2, \dots, S_N spin konfigürasyonuna sahip olma olasılıkları $P(S_1, S_2, \dots, S_N; t)$ şeklinde tanımlanırken, birim zamanda herhangi bir i' . spinin bir $S_{i'}$ durumundan başka bir $S'_{i'}$ durumuna geçme olasılık yoğunluğu $W_{i'}(S_1, S_2, \dots, S_N; t)$ ile ifade edilir. Eğer G_1 tabakasındaki σ spinlerin ve G_2 tabakasındaki S spinlerinin bir an için sabit kaldıkları düşünülürse, sistemin bir t zamanında $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ spin konfigürasyonuna sahip olma olasılıkları $P(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N; t)$ şeklinde gösterilirken, birim zamanda herhangi bir i'' . spinin bir $\alpha_{i''}$ durumundan başka bir $\alpha'_{i''}$ durumuna geçme olasılık yoğunluğu $W_{i''}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N; t)$ ile gösterilir. $W_i(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t)$, $W_{i'}(S_1, S_2, \dots, S_N; t)$ ve $W_{i''}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N; t)$ olasılık yoğunluklarının sistemin daha önceki durumundan bağımsız olduğu varsayılır. Bu durumda birim zamandaki olasılık yoğunlukları basitçe $W_i(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i)$, $W_{i'}(S_{i'} \rightarrow S'_{i'})$, $W_{i''}(\alpha_{i''} \rightarrow \alpha'_{i''})$ şeklinde yazılabilir.

Şimdi, G_2 tabakasındaki S spinlerin ve G_3 tabakasındaki α spinlerinin bir an için sabit kaldıkları düşünülürse, sistemin bir t zamanında $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$ spin konfigürasyonuna sahip olma olasılıkları olan $P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t)$ ihtimaliyet fonksiyonunun zamana bağlı denklemi master denklemi ile verilir. Buna göre master denklemi,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t) = & - \sum_i \left(\sum_{\sigma_i \neq \sigma'_i} W_i(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) \right) P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_N) + \\ & + \sum_i \left(\sum_{\sigma_i \neq \sigma'_i} W_i(\sigma'_i \rightarrow \sigma_i) \right) P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma'_i, \dots, \sigma_N) \end{aligned} \quad (1.3)$$

şeklinde yazılır. (1.3) denklemindeki ilk toplam sistemin $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_N)$ konfigürasyonunda bulunduğu zamanki durumuna, ikinci toplam ise sistemin $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma'_i, \dots, \sigma_N)$ konfigürasyonunda bulunduğu zamanki durumuna bağlıdır. Denge durumu için (1.3) ile verilen master denklemi,

$$\frac{d}{dt} P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N; t) = 0 \quad (1.4)$$

şeklini alır. Olasılık yoğunlukları oranı (1.3)'den denge durumu için,

$$\frac{W_i(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i)}{W_i(\sigma'_i \rightarrow \sigma_i)} = \frac{P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_N)}{P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma'_i, \dots, \sigma_N)}, \quad (1.5)$$

Genel Kanonik dağılım ifadesinden,

$$P(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N) \propto \exp(\beta \mathcal{H}), \quad (1.6)$$

yazılır. Sistem dengede iken, kanonik dağılımın genel tanımı ve master denklemleri ile, her bir spinin σ_i durumundan σ'_i durumuna birim zamanda geçiş olasılık yoğunluğu,

$$W_i(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta \Delta E_i(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i))}{\sum_{\sigma'_i} \exp(-\beta \Delta E_i(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i))}. \quad (1.7)$$

Burada $\sum_{\sigma'_i}$ toplamın değerleri üzerinden olacağını gösterir. $\beta = 1/k_B T$ olup k_B Boltzmann faktörünü ifade eder. $\Delta E_i(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i)$ herhangi bir spinin bir durumundan başka bir durumuna geçişi sırasında enerjide meydana gelen değişim olup (2.1) ifadesi ile verilen Hamiltonyen ifadesinden,

$$\begin{aligned} \Delta E(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) = & (-J_1 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma'_i \sigma_j - J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S_{i'} S_{j'} - J_1 \sum_{\langle i'' j'' \rangle} \alpha_i'' \alpha_j'' - J_3 \sum_{\langle ii' \rangle} \sigma'_i S_{i'} - \\ & J_3 \sum_{\langle i' i'' \rangle} S_{i'} \alpha_i'' - D \sum_{i'} S_{i'}^2 - H(t) \sum_i \sigma'_i - H(t) \sum_{i'} S_{i'} - H(t) \sum_{i''} \alpha_i'') - \\ & (-J_1 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i \sigma_j - J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S_{i'} S_{j'} - J_1 \sum_{\langle i'' j'' \rangle} \alpha_i'' \alpha_j'' - J_3 \sum_{\langle ii' \rangle} \sigma_i S_{i'} - J_3 \sum_{\langle i' i'' \rangle} S_{i'} \alpha_i'' - \\ & D \sum_{i'} S_{i'}^2 - H(t) \sum_i \sigma_i - H(t) \sum_{i'} S_{i'} - H(t) \sum_{i''} \alpha_i''), \end{aligned}$$

buradan,

$$\begin{aligned} \Delta E(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) = & -J_1 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma'_i \sigma_j - J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S_{i'} S_{j'} - J_1 \sum_{\langle i'' j'' \rangle} \alpha_i'' \alpha_j'' - J_3 \sum_{\langle ii' \rangle} \sigma'_i S_{i'} - \\ & J_3 \sum_{\langle i' i'' \rangle} S_{i'} \alpha_i'' - D \sum_{i'} S_{i'}^2 - H(t) \sum_i \sigma'_i - H(t) \sum_{i'} S_{i'} - H(t) \sum_{i''} \alpha_i'' + J_1 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i \sigma_j + \\ & J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S_{i'} S_{j'} + J_1 \sum_{\langle i'' j'' \rangle} \alpha_i'' \alpha_j'' + J_3 \sum_{\langle ii' \rangle} \sigma_i S_{i'} + J_3 \sum_{\langle i' i'' \rangle} S_{i'} \alpha_i'' + D \sum_{i'} S_{i'}^2 + \\ & H(t) \sum_i \sigma_i + H(t) \sum_{i'} S_{i'} + H(t) \sum_{i''} \alpha_i'' \end{aligned}$$

veya düzenleme yapılırsa,

$$\Delta E(\sigma_i \rightarrow \sigma'_i) = (\sigma_i - \sigma'_i) \left(J_1 \sum_j \sigma_j + J_3 \sum_{i'} S_{i'} + H(t) \right), \quad (1.8)$$

elde edilir. (1.8) eşitliği kullanılarak sistemin σ_i durumundan σ'_i durumuna geçişi sırasında enerjisinde meydana gelen mümkün değişimler aşağıdaki gibi bulunur.

$$W_i \left(\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \right) = W_i \left(-\frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2\tau} \frac{\exp \left[-\frac{\beta}{2} (J_1 \sum_j \sigma_j + J_3 \sum_{i'} S_{i'} + H(t)) \right]}{\cosh \left[\frac{\beta}{2} (J_1 \sum_j \sigma_j + J_3 \sum_{i'} S_{i'} + H(t)) \right]}, \quad (1.9)$$

$$W_i \left(-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \right) = W_i \left(\frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2\tau} \frac{\exp \left[\frac{\beta}{2} (J_1 \sum_j \sigma_j + J_3 \sum_{i'} S_{i'} + H(t)) \right]}{\cosh \left[\frac{\beta}{2} (J_1 \sum_j \sigma_j + J_3 \sum_{i'} S_{i'} + H(t)) \right]}. \quad (1.10)$$

Bu iki denklemle birlikte, Master denklemi ve ortalama alan yaklaşımı kullanılırsa, A alt örgüsündeki spinleri için dinamik ortalama alan denklemi,

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_1^A = -m_1^A + \frac{1}{2} \tanh \left(\frac{1}{2T} (J_1 z_{AA} m_1^A + J_3 z_{AB} m_2^B + h \cos(\xi)) \right) \quad (1.11)$$

Burada $\Omega = \tau w$, $\xi = wt$, $m_1^A = \langle \sigma \rangle$, ve $m_2^B = \langle S \rangle$ şeklinde tanımlanır. Ω değeri çalışma boyunca sabit olup 2π değerine sahiptir. h , J_1 , J_3 ve T terimleri boyutsuz parametreler olup sırasıyla $h = \frac{H_0}{|J_2|}$, $J_1 = \frac{J_1}{|J_2|}$, $J_3 = \frac{J_3}{|J_2|}$ ve $T = \frac{1}{|\beta J_2|}$ şeklinde tanımlanmıştır. $z_{AA} = 4.0$ ve $z_{AB} = 1.0$ sabit değerlerine sahip olup en yakın komşu spin $\sigma - \sigma$ ve $\sigma - S$ (veya $S - \sigma$) çifti sayısıdır.

Şimdi, G_1 tabakasındaki σ spinlerin ve G_3 tabakasındaki α spinlerinin bir an için sabit kaldıkları düşünülürse, sistemin bir t zamanında S_1, S_2, \dots, S_N spin konfigürasyonuna sahip olma olasılıkları olan $P(S_1, S_2, \dots, S_N; t)$ ihtimaliyet fonksiyonunun zamana bağlı denklemi,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P(S_1, S_2, \dots, S_N; t) = & - \sum_i \left(\sum_{S_i \neq S'_i} W_i(S_i \rightarrow S'_i) \right) P(S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_N) + \\ & + \sum_i \left(\sum_{S_i \neq S'_i} W_i(S'_i \rightarrow S_i) \right) P(S_1, S_2, \dots, S'_i, \dots, S_N) \end{aligned} \quad (1.12)$$

şeklinde yazılır. (1.12) denklemindeki ilk toplam sistemin $(S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_N)$ konfigürasyonunda bulunduğu zamanki durumuna, ikinci toplam ise sistemin $(S_1, S_2, \dots, S'_i, \dots, S_N)$ konfigürasyonunda bulunduğu zamanki durumuna bağlıdır. Sistem dengede iken, kanonik dağılımın genel tanımı ve master denklemi ile, her bir spinin S_i durumundan S'_i durumuna birim zamanda geçiş olasılık yoğunluğu,

$$W_i(S_i \rightarrow S'_i) = \frac{1}{\tau} \frac{\exp(-\beta \Delta E_i(S_i \rightarrow S'_i))}{\sum_{S'_i} \exp(-\beta \Delta E_i(S_i \rightarrow S'_i))}. \quad (1.13)$$

Burada $\sum_{S'_i}$ toplamın değerleri üzerinden olacağını gösterir. $\Delta E_i(S_i \rightarrow S'_i)$ herhangi bir spinin bir durumundan başka bir durumuna geçişi sırasında enerjide meydana gelen değişme olup (1.1) ifadesi ile verilen Hamiltonyen ifadesinden,

$$\begin{aligned} \Delta E(S_{i'} \rightarrow S'_{i'}) &= \left(-J_1 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i \sigma_j - J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S'_{i'} S'_{j'} - J_1 \sum_{\langle i'' j'' \rangle} \alpha_i'' \alpha_j'' - J_3 \sum_{\langle ii' \rangle} \sigma_i S'_{i'} - \right. \\ & J_3 \sum_{\langle i' i'' \rangle} S'_{i'} \alpha_i'' - D \sum_{i'} S_{i'}^2 - H(t) \sum_i \sigma_i - H(t) \sum_{i'} S'_{i'} - H(t) \sum_i \alpha_i'' \left. \right) - \\ & \left(-J_1 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i \sigma_j - J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S'_{i'} S'_{j'} - J_1 \sum_{\langle i'' j'' \rangle} \alpha_i'' \alpha_j'' - J_3 \sum_{\langle ii' \rangle} \sigma_i S'_{i'} - J_3 \sum_{\langle i' i'' \rangle} S'_{i'} \alpha_i'' - \right. \\ & D \sum_{i'} S_{i'}^2 - H(t) \sum_i \sigma_i - H(t) \sum_{i'} S'_{i'} - H(t) \sum_i \alpha_i'' \left. \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta E(S_{i'} \rightarrow S'_{i'}) &= -J_1 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i \sigma_j - J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S'_{i'} S'_{j'} - J_1 \sum_{\langle i'' j'' \rangle} \alpha_i'' \alpha_j'' - J_3 \sum_{\langle ii' \rangle} \sigma_i S'_{i'} - \\ & J_3 \sum_{\langle i' i'' \rangle} S'_{i'} \alpha_i'' - D \sum_{i'} S_{i'}^2 - H(t) \sum_i \sigma_i - H(t) \sum_{i'} S'_{i'} - H(t) \sum_i \alpha_i'' + J_1 \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i \sigma_j + \\ & J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S'_{i'} S'_{j'} + J_1 \sum_{\langle i'' j'' \rangle} \alpha_i'' \alpha_j'' + J_3 \sum_{\langle ii' \rangle} \sigma_i S'_{i'} + J_3 \sum_{\langle i' i'' \rangle} S'_{i'} \alpha_i'' + D \sum_{i'} S_{i'}^2 + \\ & H(t) \sum_i \sigma_i + H(t) \sum_{i'} S'_{i'} + H(t) \sum_i \alpha_i'' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta E(S_{i'} \rightarrow S'_{i'}) &= -J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S'_{i'} S'_{j'} + J_2 \sum_{\langle i' j' \rangle} S'_{i'} S'_{j'} - J_3 \sum_{\langle ii' \rangle} \sigma_i S'_{i'} + J_3 \sum_{\langle ii' \rangle} \sigma_i S'_{i'} - \\ & J_3 \sum_{\langle i' i'' \rangle} S'_{i'} \alpha_i'' + J_3 \sum_{\langle i' i'' \rangle} S'_{i'} \alpha_i'' - H(t) \sum_{i'} S'_{i'} + H(t) \sum_{i'} S'_{i'} - D \sum_{i'} S_{i'}^2 + D \sum_{i'} S_{i'}^2 \end{aligned}$$

düzenleme yapılırsa,

$$\Delta E(S_{i'} \rightarrow S'_{i'}) = (S_{i'} - S'_{i'}) \left(J_2 \sum_{j'} S'_{j'} + J_3 \sum_i \sigma_i + J_3 \sum_i \alpha_i'' + H(t) \right) + (S_{i'}^2 - S_{i'}'^2) D, \quad (1.14).$$

bulunur. (1.14) eşitliği kullanılarak sistemin σ_i durumundan σ'_i durumuna geçişi sırasında enerjisinde meydana gelen mümkün değişimler bulunur. Bu denklemlerle birlikte, Master denklemi ve ortalama alan yaklaşımı kullanılırsa, B alt örgüsündeki S spinleri için dinamik ortalama alan denklemi,

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_2^B = -m_2^B + \frac{2 \sinh \left[\frac{1}{T} (J_2 z_{BB} m_2^B + J_3 z_{BA} m_1^A + J_3 z_{BC} m_3^A + h \cos(\xi)) \right]}{2 \cosh \left[\frac{1}{T} (J_2 z_{BB} m_2^B + J_3 z_{BA} m_1^A + J_3 z_{BC} m_3^A + h \cos(\xi)) \right] + \exp \left(-\frac{d}{T} \right)} \quad (1.15)$$

Burada $m_C = \langle \alpha \rangle$ şeklinde tanımlanır. $z_{BB} = 4.0$, $z_{BC} = 1.0$ ve $z_{BA} = 1.0$ sabit değerlerine sahip olup en yakın komşu spin $S - S$, $\sigma - S$, $S - \alpha$ (veya $\alpha - S$) çifti sayısı ve $d = \frac{D}{|J_2|}$ dir.

Son olarak, G_1 tabakasındaki σ spinlerinin ve G_2 tabakasındaki S spinlerinin bir an için sabit kaldıkları düşünülerek benzer işlemler G_3 tabakasındaki α spinleri için dinamik ortalama alan denklemleri,

$$\Omega \frac{d}{d\xi} m_3^C = -m_3^C + \frac{1}{2} \tanh \left(\frac{1}{2T} \left((J_1 z_{CC} m_3^A + J_3 z_{CB} m_2^B + h \cos(\xi)) \right) \right) \quad (1.16)$$

olarak elde edilir.

2. BÖLÜM

NÜMERİK SONUÇLAR

Bu bölümde üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin (1/2, 1, 1/2) ising sisteminin dinamik davranışını tanımlayan ve (2.11), (2.15) ve (2.16) ile verilen ortalama-alan dinamik denklemlerinin nümerik çözümleri yapılacak ve bu çözümler detaylı bir şekilde tartışılacaktır. Nümerik hesaplamalarda $|J_2| = 1$ ve $\Omega = 2\pi$ olarak alınacaktır.

2.1. Dinamik Fazlar

Sistemde var olan fazları belirlemek için, sistemin dinamik davranışını tanımlayan dinamik ortalama-alan denklemlerinin kararlı çözümleri, farklı kristal alan (d), manyetik alan genliği (h) ve sıcaklık (T) değerleri için incelendi. Bu denklemlerin devinimsiz veya kararlı çözümleri, periyodik bir fonksiyonun 2π periyodu için ξ 'nin periyodik bir fonksiyonu olurlar, yani

$$m_1^A(\xi + 2\pi) = m_1^A(\xi), \quad (2.1a)$$

$$m_2^B(\xi + 2\pi) = m_2^B(\xi), \quad (2.1b)$$

$$m_3^A(\xi + 2\pi) = m_3^A(\xi). \quad (2.1c)$$

Burada birinci ve üçüncü tabakadaki spinler eşdeğer olduğu için $m_3^C = m_3^A$ olarak alındı. Denklem (2.11), (2.15) ve (2.16) da m_1^A , m_2^B ve m_3^A 'nın zamanla değişimi incelendi ve

$$m_1^A(\xi + \pi) = -m_1^A(\xi) \quad (2.2a)$$

$$m_2^B(\xi + \pi) = -m_2^B(\xi) \quad (2.2b)$$

$$m_3^A(\xi + \pi) = -m_3^A(\xi) \quad (2.2c)$$

özelliklerinin sağlanıp sağlanmama durumuna göre sistemde üç tip çözümden biri olduğu bulundu.

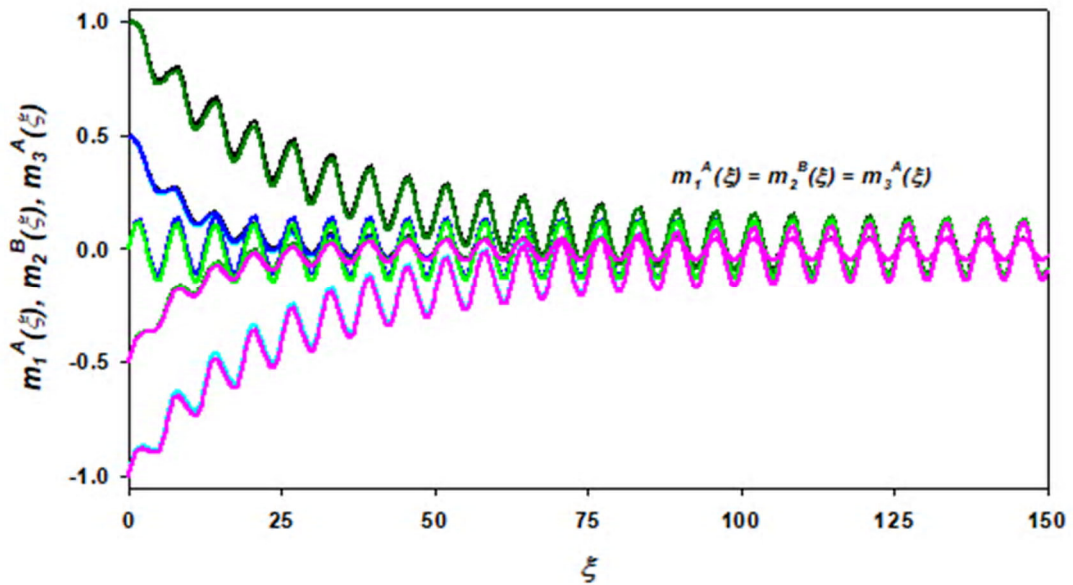
Denklem (3.2a)-(3.2c) ile verilen özelliğe uyan çözüm paramanyetik faza (P) karşılık gelir ve bu çözüm simetrik çözüm olarak adlandırılır. Paramanyetik fazda alt örgü mıknatıslanmaları olan m_1^A , m_2^B ve m_3^A birbirine eşittirler ve dış manyetik alana uyum göstererek sıfır değeri civarında salınırlar.

Denklem (3.2a)-(3.2c) ile verilen özelliğe uymayan çözüm simetrik olmayan çözüme karşılık gelir ve bu çözümde alt örgü mıknatıslanmaları m_1^A , m_2^B ve m_3^A , dış manyetik alana eşlik etmezler. Eğer bu simetrik olmayan çözümde m_1^A , m_3^A alt örgü mıknatıslanmaları $+1/2$ değeri etrafında salınırken m_2^B alt örgü mıknatıslanması $+1.0$ değeri etrafında salınırsa veya m_1^A , m_3^A alt örgü mıknatıslanmaları $-1/2$ değeri etrafında salınırken m_2^B alt örgü mıknatıslanması -1.0 değeri etrafında salınırsa bu çözüm I temel fazına karşılık gelir. Bununla birlikte eğer m_1^A , m_3^A alt örgü mıknatıslanmaları $+1/2$ değeri etrafında salınırken m_2^B alt örgü mıknatıslanması -1.0 değeri etrafında salınırsa veya m_1^A , m_3^A alt örgü mıknatıslanmaları $-1/2$ değeri etrafında salınırken m_2^B alt örgü mıknatıslanması $+1.0$ değeri etrafında salınırsa bu simetrik olmayan çözüm II temel fazına karşılık gelir. Eğer m_1^A , m_3^A alt örgü mıknatıslanmaları $+1/2$ değeri etrafında salınırken m_2^B alt örgü mıknatıslanması 0.0 değeri etrafında salınırsa veya m_1^A , m_3^A alt örgü mıknatıslanmaları $-1/2$ değeri etrafında salınırken m_2^B alt örgü mıknatıslanması 0.0 değeri etrafında salınırsa bu simetrik olmayan çözüm III temel fazına karşılık gelir. Bu sonuçlar (2.11), (2.15) ve (2.16) ile ifade edilen ve sistemin dinamik davranışını tanımlayan ortalama-alan denklemlerinin nümerik olarak çözülmesi ile elde edilir.

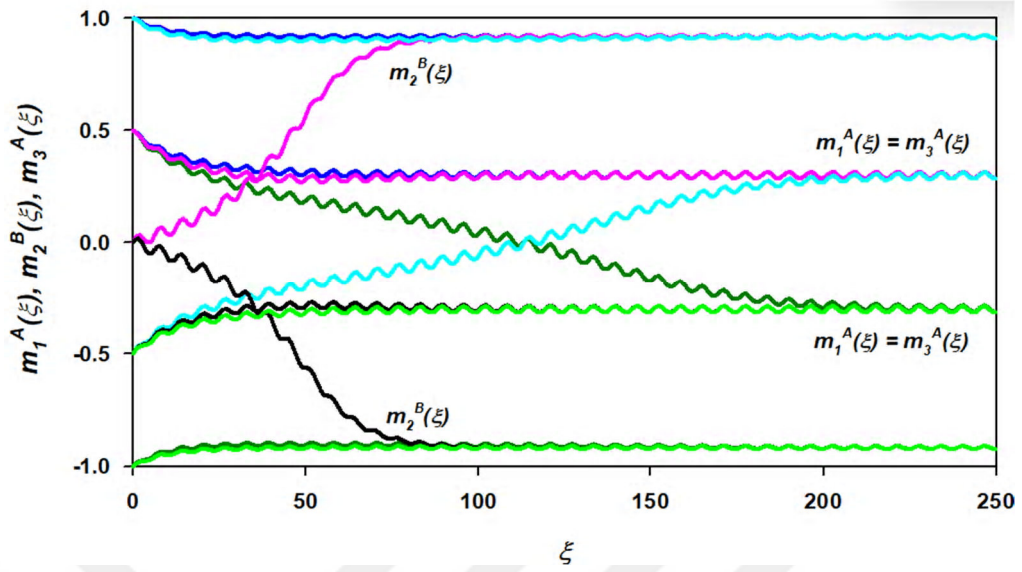
Alt örgü mıknatıslanmalarının farklı başlangıç değerleri ve verilen Hamiltonyen parametreleri için (2.11), (2.15) ve (2.16) denklemleri Adams-Moulton kestirme ve düzeltme nümerik yöntemi ile çözüldü. Bu çözüm sonucunda sandviç yapıları karma Ising sisteminin P , I , II , ve III temel fazlarının yanında I ve P fazlarının bir arada bulunduğu $I + P$ karma fazı; I ve II fazlarının bir arada bulunduğu $I + II$ karma fazı; I ve III fazlarının bir arada bulunduğu $I + III$ karma fazı ve I , II ve III fazlarının bir arada bulunduğu $I + II + III$ karma fazı olmak üzere dört adet karma faz bölgesi gösterdiği

gözlemlendi. Şekil 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'de sırasıyla *P*, *I*, *II*, ve *III* temel fazlarına karşılık gelen çözümler gösterilmiştir.

Şekil 3.1 simetrik çözüm olan paramanyetik faza karşılık gelmektedir ve $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = 1.0$, $h = 3.2$, $T = 2.55$ değerleri için elde edilmiştir. Bu çözümde m_1^A , m_2^B ve m_3^A mıknatıslanmaları birbirlerine eşittir ve sıfır değeri civarında salınırlar ($m_1^A = m_2^B = m_3^A = 0$).

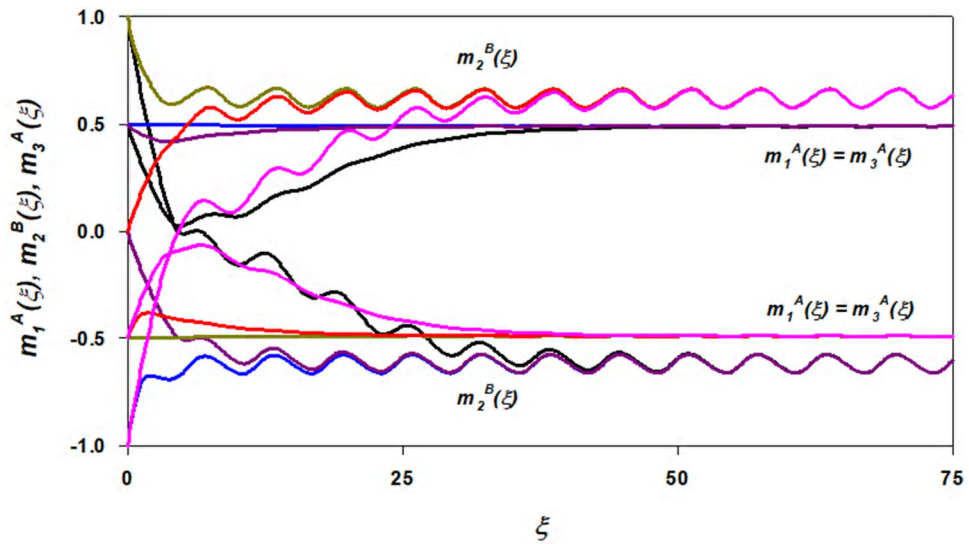


Şekil 2.1. Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin ortalama alt örgü mıknatıslanmaları m_1^A , m_2^B ve m_3^A 'ün zamana bağlı değişimi. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = 1.0$, $h = 3.2$, $T = 2.5$ değerleri için sistemde paramanyetik (*P*) faz mevcuttur.



Şekil 2.2. Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin ortalama alt örgü mıknatıslanmaları m_1^A , m_2^B ve m_3^A 'ün zamana bağlı değişimi. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = -1.5$, $h = 0.5$, $T = 0.95$ değerleri için sistemde I temel fazı mevcuttur.

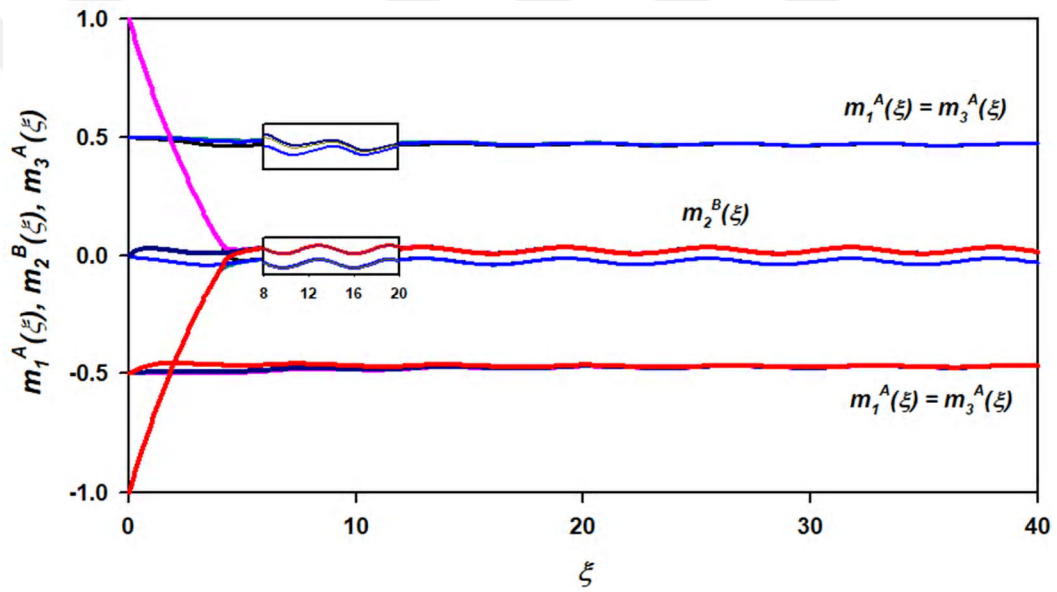
Şekil 2.2 grafiği Hamiltonyen parametrelerinin $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = -1.5$, $h = 0.5$, $T = 0.95$ değerleri için elde edilmiş olup sistemde simetrik olmayan çözüm mevcuttur. m_1^A ve m_3^A alt örgü mıknatıslanmaları $\pm 1/2$ değerleri etrafında salınırken m_2^B alt örgü mıknatıslanması ± 1.0 değeri etrafında salınır ve bu durum I temel fazına karşılık gelir.



Şekil 2.3. Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin ortalama alt örgü mıknatıslanmaları m_1^A , m_2^B ve m_3^A 'ün zamana bağlı değişimi. $J_1 = 1.0$, $J_2 = -1.0$, $J_3 = -3.0$, $d = -0.1$, $h = 0.36$, $T = 0.34$ değerleri için sistemde II temel fazı mevcuttur.

Şekil 2.3 grafiği Şekil 3.2 grafiğine benzemekle birlikte $J_2 = -1.0$, $J_3 = -3.0$, $d = -0.1$, $h = 0.36$, $T = 0.34$ değerleri için elde edilmiş olup sistemde *II* temel fazı mevcuttur. Bu çözümde m_1^A ve m_3^A alt örgü mıknatıslanmaları $\pm 1/2$ değerleri etrafında salınırken m_2^B alt örgü mıknatıslanması ∓ 1.0 değeri etrafında salınır.

Son olarak, $J_1 = 0.1$, $J_2 = -1.0$, $J_3 = -0.1$, $d = -0.1$, $h = 0.06$, $T = 0.1$ değerleri için sistemde simetrik olmayan *III* temel fazı mevcut olup bu çözüm Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Bu çözümde m_1^A , m_3^A alt örgü mıknatıslanmaları $\pm 1/2$ veya $\mp 1/2$ değeri etrafında salınırken m_2^B alt örgü mıknatıslanması 0.0 değeri etrafında salınır.



Şekil 2.4. Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin ortalama alt örgü mıknatıslanmaları m_1^A , m_2^B ve m_3^A 'ün zamana bağlı değişimi. $J_1 = 0.1$, $J_2 = -1.0$, $J_3 = -0.1$, $d = -0.1$, $h = 0.06$, $T = 0.1$ değerleri için sistemde *III* temel fazı mevcuttur.

Sistemde mevcut olan dinamik fazların temel özellikleri Tablo 1’de özet olarak verildi. Tablo 1(a)’da temel fazların özellikleri sunulurken Tablo 1(b)’de karma fazların özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 1(a). Temel fazlar ve özellikleri.

		Mıknatıslanmaların Salınım Değerleri
Temel Fazlar veya Çözümler	P	$m_1^A = m_2^B = m_3^A = 0$
	I	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ ve $m_2^B = +1.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = -1.0$
	II	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ ve $m_2^B = -1.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = +1.0$
	III	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ ve $m_2^B = 0.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = 0.0$

Tablo 1(b). Karma fazlar ve özellikleri.

			Mıknatıslanmaların Salınım Değerleri
Karma Fazlar veya Çözümler	I + P	I	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ ve $m_2^B = +1.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = -1.0$
		P	$m_1^A = m_2^B = m_3^A = 0$
	I + II	I	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ ve $m_2^B = +1.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = -1.0$
		II	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ ve $m_2^B = -1.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = +1.0$
	I + III	I	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ and $m_2^B = +1.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = -1.0$
		III	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ ve $m_2^B = 0.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = 0.0$
	I + II + III	I	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ ve $m_2^B = +1.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = -1.0$
		II	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ ve $m_2^B = -1.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = +1.0$
		III	$m_1^A = m_3^A = +1/2$ ve $m_2^B = 0.0$ veya $m_1^A = m_3^A = -1/2$ ve $m_2^B = 0.0$

2.2. Dinamik Faz Geçiş Sıcaklıkları

Bir önceki kesimde sistemde var olan temel fazların ve karma fazların neler olduğu ve bunların nasıl elde edildiği üzerine detaylı bir tartışma sunuldu. Bu kesimde ise bu fazlar arasındaki dinamik faz geçiş sınırları ve bunların türü yani birinci dereceden mi ikinci dereceden mi olup olmadığı belirlenecek. Bir fazdan başka bir faza sürekli olacak şekilde bir faz geçişi varsa buna ikinci dereceden faz geçişi, süreksiz olacak şekilde bir faz geçişi varsa buna da birinci dereceden faz geçişi denir. Dinamik faz geçiş sınırlarını

belirlemek için dinamik faz geçiş sıcaklıkları (DFGS) hesaplanmalıdır. DFGS'nın hesaplanması ile birlikte sistemde birinci dereceden mi ikinci dereceden mi faz geçişi olduğu tespit edilebilir. Bu hesaplanan DFGS'nın kullanılması ile birlikte artık üç-tabakalı sandviç kare örgü yapıları karma spin Ising sisteminin dinamik faz diyagramları farklı parametre değerlerine bağlı olarak (T, h) düzleminde sunulabilir. Tezin son aşamasını oluşturan dinamik faz diyagramlarının farklı parametre değerlerine bağlı olarak (T, h) düzleminde elde edilme işlemi bir sonraki bölümde kapsamlı bir şekilde tartışılacaktır.

Dinamik mıknatıslanmalar (M_1^A, M_2^B, M_3^A) sistemin dinamik düzen parametreleri olup, tanım olarak zamana bağlı salınımlı dış manyetik alan varlığında bir periyot boyunca dinamik alt örgü mıknatıslanmalarına eşittir. Matematiksel olarak,

$$M_1^A(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_1^A(\xi) d\xi, \quad (2.2a)$$

$$M_2^B(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_2^B(\xi) d\xi, \quad (2.2b)$$

$$M_3^A(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m_3^A(\xi) d\xi, \quad (2.2c)$$

şeklinde ifade edilirler. Toplam dinamik mıknatıslanma ise,

$$M_t(\xi) = \frac{M_1^A + M_2^B + M_3^A}{3}, \quad (2.2d)$$

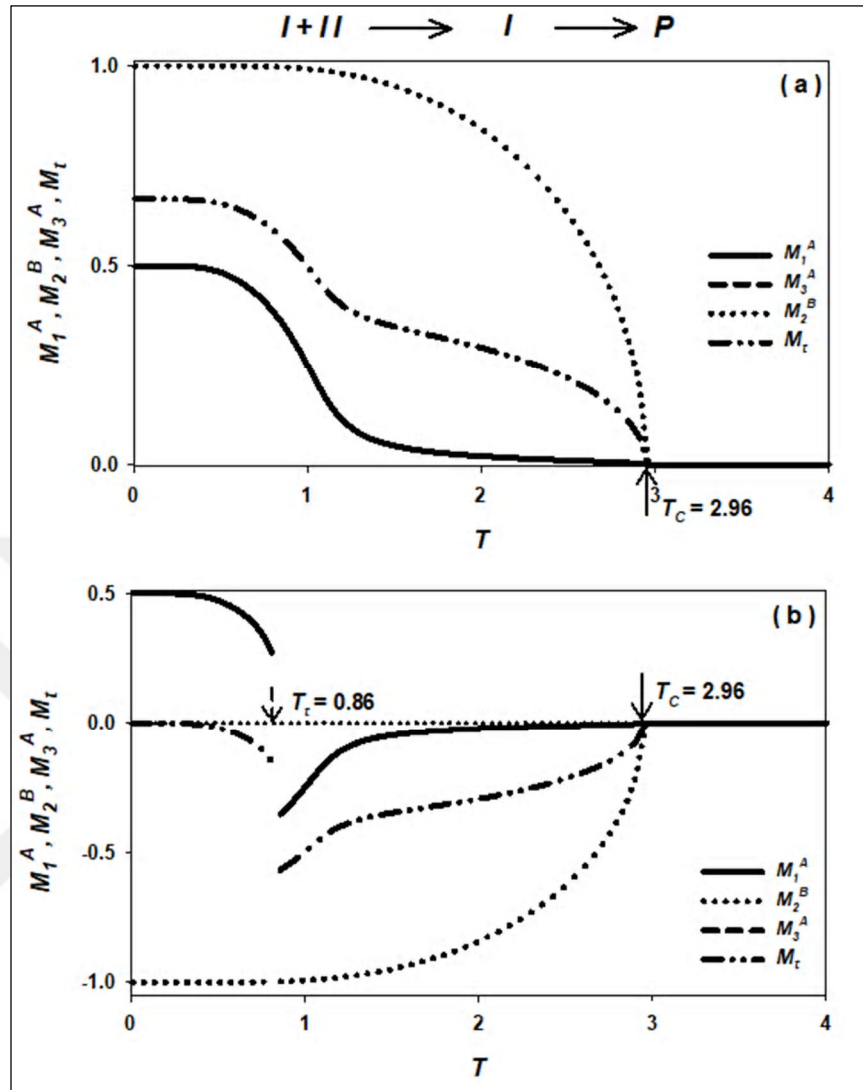
şeklinde tanımlanır. M_1^A, M_2^B, M_3^A ve M_t 'nin indirgenmiş sıcaklığa (T) bağlı davranışları, indirgenmiş değerler olan h, J_1, J_3, d 'nin farklı değerleri için nümerik olarak Romberg integrasyon metodu ile Adams-Moulton kestirme-düzeltilme metotları kullanılarak incelendi. Dinamik faz sınırlarının nasıl tespit edildiği ve DFGS'nın nasıl hesaplandığına örnek olması açısından elde edilen sonuçlar Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da sunuldu. Bu şekillerde T_C ikinci dereceden faz geçiş sıcaklığını gösterirken T_t, T_{t1} , ve T_{t2} ise birinci dereceden faz geçiş sıcaklıklarını gösterir.

Şekil 2.5(a) ve Şekil 2.5(b), $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = 1.0, h = 0.1$ ve farklı başlangıç değerleri için elde edilmiş olup dinamik düzen parametreleri M_1^A, M_2^B, M_3^A ve M_t 'nin termal davranışını göstermektedir.

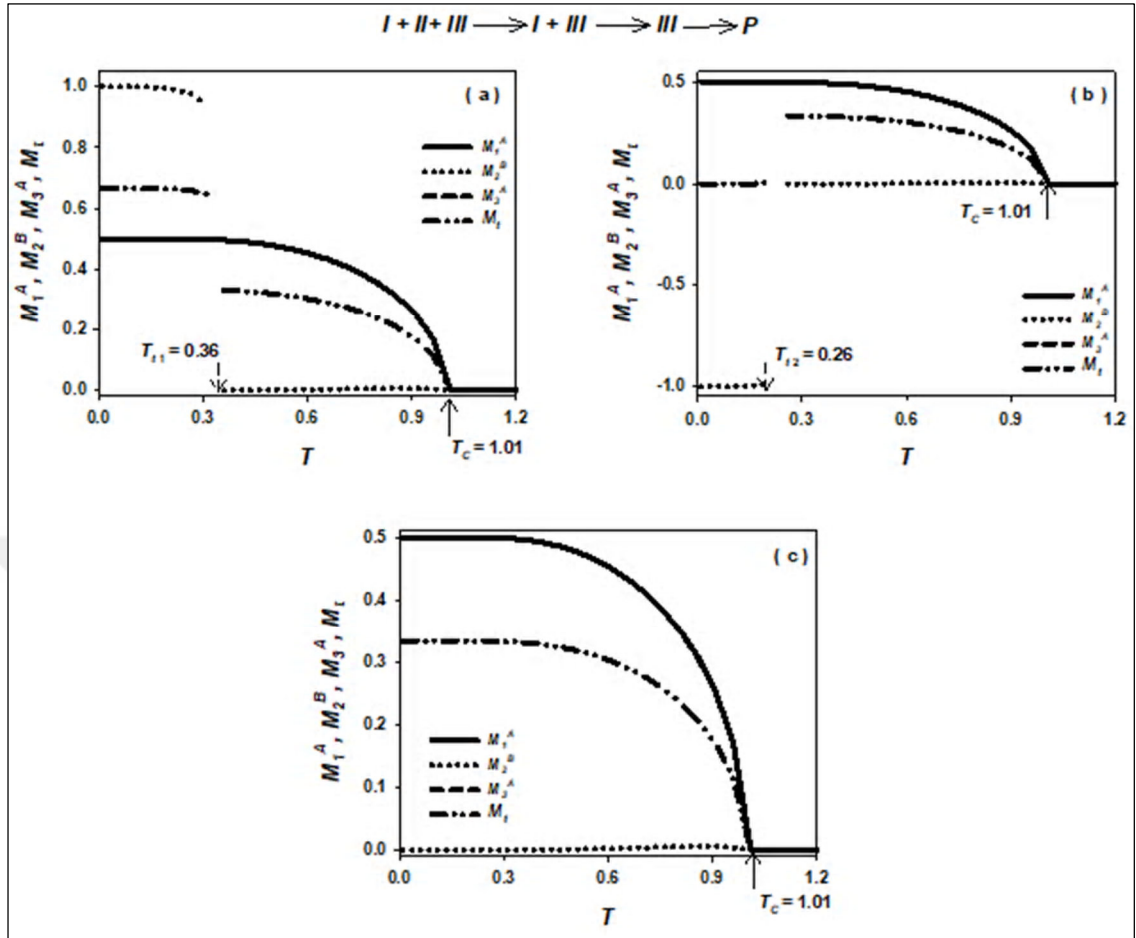
Şekil 2.5 (a)'da sıfır sıcaklıkta dinamik mıknatıslanmalardan M_1^A ve M_3^A 0.5 değerinde iken M_2^B dinamik mıknatıslanması 1.0 M_t dinamik toplam mıknatıslanması ise 0.75 değerindedir. Dolayısıyla sistemde I temel fazının olduğunu söyleriz. Şekilden,

İndirgenmiş sıcaklık değeri arttırıldıkça M_1^A, M_2^B, M_3^A ve M_t dinamik mıknatıslanma değerlerinin sürekli bir davranışla azaldığı ve 2.96 kritik sıcaklık değerinde sıfır değerine ulaştıkları görülür. Dolayısıyla Şekil 3.5 (a)'da sistemin $T_c = 2.96$ kritik sıcaklık değerinde I temel fazından P temel fazına ikinci dereceden bir faz geçişi sergilediğini söyleriz.

Şekil 2.5 (b)'de sistem $T_t = 0.86$ ve $T_c = 2.96$ değerlerinde peş peşe iki faz geçişi sergilemektedir. Sıfır sıcaklıkta M_1^A, M_2^B, M_3^A dinamik mıknatıslanmaları sırasıyla 0.5, 0.5 ve -1.0 değerlerindedirler. Dolayısıyla sistemde II temel fazı mevcuttur. İndirgenmiş sıcaklık arttıkça, M_1^A ve M_3^A dinamik mıknatıslanmaları $T_t = 0.86$ değerinde -0.5 değerine süresiz olacak şekilde bir geçiş yapar. Bu durumda sistemin II temel fazından I temel fazına birinci dereceden bir faz geçişi sergilediği söylenir. Eğer indirgenmiş sıcaklık arttırılmaya devam edilirse dinamik mıknatıslanmalar sıfıra sürekli olarak azalır; dolayısıyla $T_c = 2.96$ 'da I fazından P fazına ikinci dereceden bir faz geçişi meydana gelir.



Şekil 2.5. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = 1.0$, $h = 0.1$ değerleri ve iki farklı başlangıç değeri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin dinamik mıknatıslanmaları M_1^A , M_2^B , M_3^A ve M_t 'nin sıcaklığa bağlı değişimi.



Şekil 2.6. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = -3.0$, $h = 0.05$, değerleri ve üç farklı başlangıç değeri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin Ising sisteminin dinamik mıknatıslanmaları M_1^A , M_2^B , M_3^A ve M_t 'nin sıcaklığa bağlı değişimi.

Şekil 3.6, üç farklı başlangıç değeri ve $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = -3.0$, $h = 0.05$ değerleri için elde edilmiş olup sistem peş peşe üç farklı faz geçişi sergilemektedir. İlk iki faz geçişi birinci dereceden faz geçişidir. İlk faz geçişi $T_{t1} = 0.36$ sıcaklığında $I + II + III$ karma fazından $I + III$ karma fazına olup ikinci faz geçişi $T_{t2} = 0.26$ sıcaklığında $I + III$ karma fazından III temel fazına gerçekleşmektedir. Üçüncü faz geçişi ise $T_c = 1.01$ değerinde gerçekleşmekte olup sistem III temel fazından P temel fazına ikinci dereceden faz geçişi ile geçiş yapar.

DFGS ve DFGS'nin doğası (birinci dereceden veya ikinci dereceden faz geçişi) tespit edildikten sonra artık sistemin dinamik faz diyagramları farklı düzlemlerde sunulabilir.

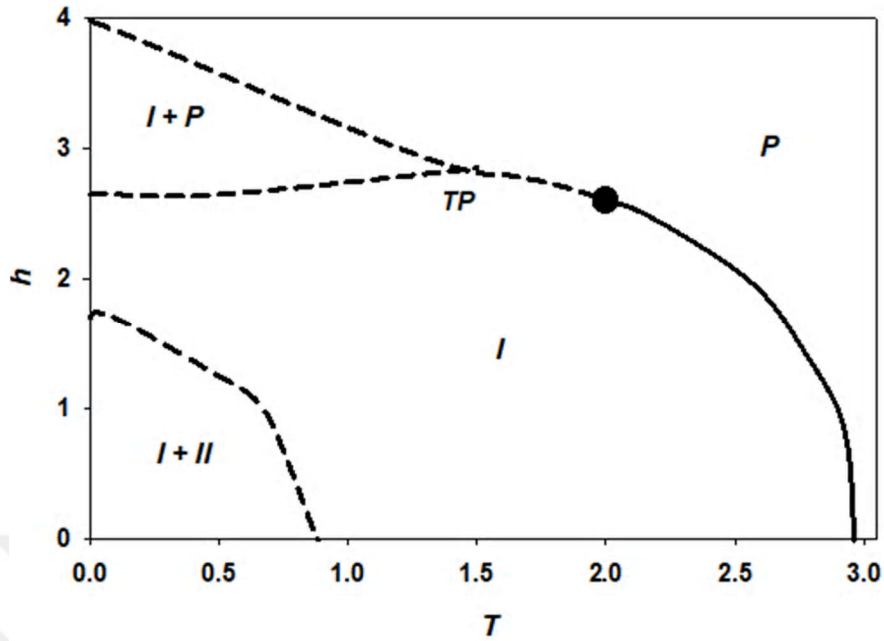
2.3. Dinamik Faz Diyagramları

Önceki kesimde dinamik faz geçişlerinin doğası tespit edildiğinden ve faz geçiş noktaları bulunduğundan dolayı artık sistemin dinamik faz diyagramlarını sunabiliriz. Sistemin dinamik faz diyagramları T indirgenmiş sıcaklık ve h manyetik alan genliği düzleminde sunulacak ve dinamik faz diyagramları üzerine bilinear etkileşim parametreleri J_1, J_2, J_3 ile indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) farklı değerlerinin etkileri incelenecektir. Dinamik faz diyagramlarında, kesikli ve sürekli yapıdaki çizgiler sırasıyla birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerini, içi dolu daireler ise dinamik üçlü kritik noktayı ifade etmektedir.

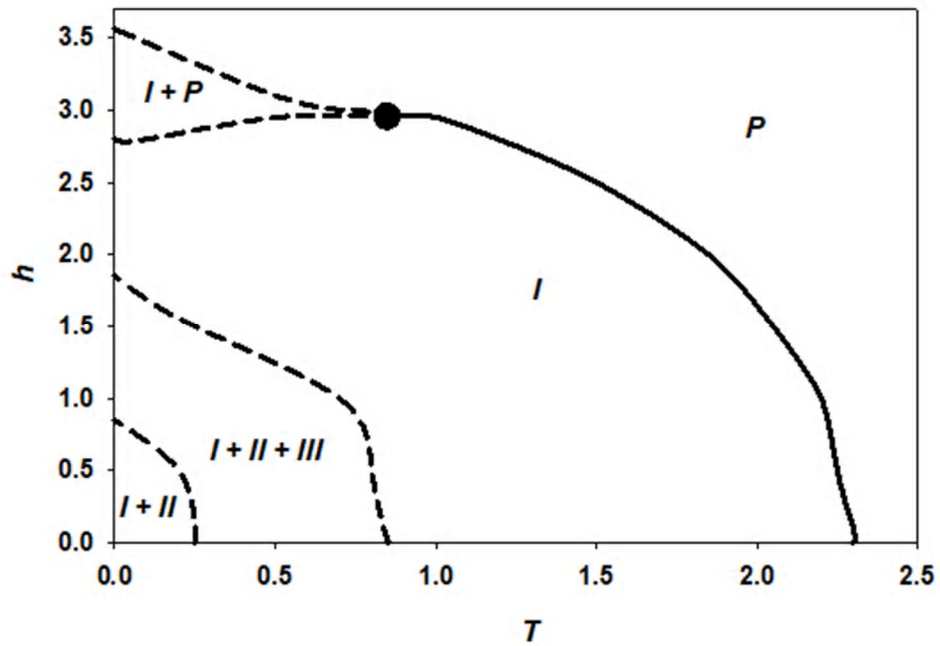
2.3.1. $J_1, J_2, J_3 > 0$ Durumu İçin Dinamik Faz Diyagramları

Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin dinamik faz diyagramları ilk olarak $J_1, J_2, J_3 > 0$ durumu için elde edilmiş olup sonuçlar Şekil 3.7- Şekil 3.13'te sunulmuştur. Bu dinamik faz diyagramları incelendiğinde bulunan ilginç ve temel sonuçlar şunlardır:

Şekil 3.7, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1$ ve $d = 1.0$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu faz diyagramında, sistem birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerinin yanı sıra, I, P temel fazları ile $I + P, I + II$ karma fazları, bir adet dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daire) ve üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü nokta (TP) mevcuttur. İndirgenmiş sıcaklığın (T) ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin (h) düşük değerlerinde $I + II$ karma fazı gözlemlenmiş olup bu karma fazın birinci-dereceden faz geçiş çizgileri ile P ve I temel fazlarından ayrıldığı görülmektedir. Ayrıca $I + P$ karma fazı ile I ve P temel fazlarının aynı anda birlikte bulunduğu dinamik üçlü noktanın (TP) yanı sıra, I ve P temel fazlarının ikinci-dereceden faz geçiş çizgisi ile birbirlerinden ayrıldığı da açıkça görülmektedir.



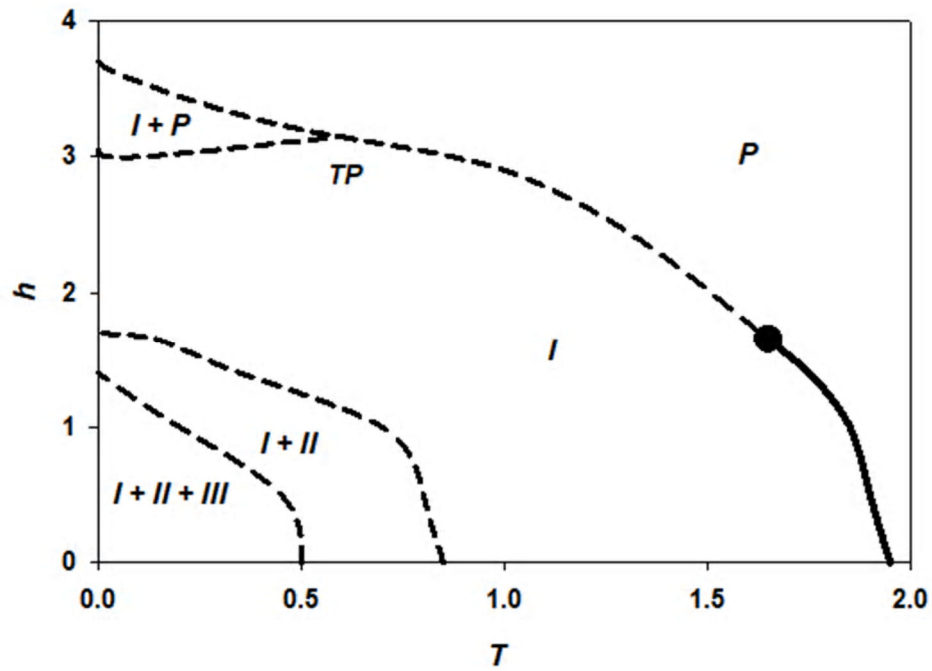
Şekil 2.7. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = 1.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.



Şekil 2.8. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -1.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

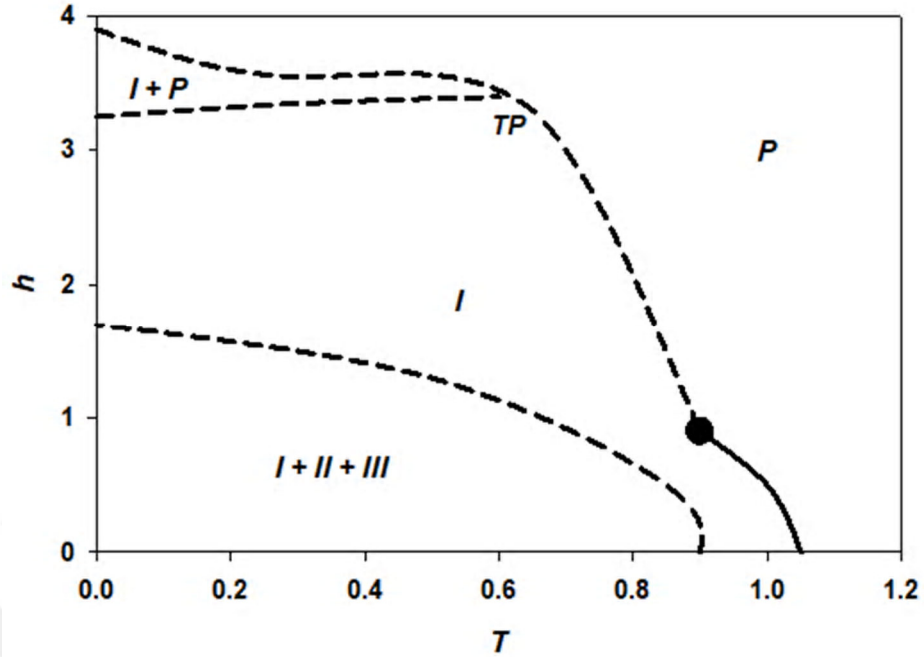
Şekil 2.8, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -1.0$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu faz diyagramında sistem birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileri, I, P temel

fazları ile $I + P, I + II, I + II + III$ karma fazları, bir adet dinamik üçlü kritik nokta sergilemektedir. Burada $I + II, I + P$ karma fazları birinci-dereceden faz geçiş çizgileri ile I temel fazından, I temel fazının da P temel fazından ikinci-dereceden faz geçiş çizgisi ile ayrıldığı, ayrıca I temel fazı ile $I + P, I + II$ karma faz bölgelerinin bir miktar azaldığı açıkça görülmektedir. Şekil 3.7'den farklı olarak sistem indirgenmiş sıcaklığın ve manyetik alan genliğinin küçük değerlerinde $I + II + III$ karma fazı göstermektedir. Ayrıca Şekil 2.7'de karşımıza çıkan üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü nokta artık bu dinamik faz diyagramında mevcut değildir.



Şekil 2.9. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -1.5$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapıları karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

Şekil 2.9, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -1.5$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu dinamik faz diyagramı Şekil 3.8 ile benzerdir. Burada sadece fazların bulunduğu bölgelerde değişiklik söz konusudur. $I + II + III$ karma fazının bulunduğu bölgenin bir miktar arttığı, I temel fazı ile $I + P, I + II$ karma fazlarının bulunduğu bölgelerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca burada Şekil 3.8'de gözlemlenmeyen $I + P$ karma fazı ile I ve P temel fazlarının aynı anda birlikte bulunduğu dinamik üçlü nokta (TP) tekrardan ortaya çıkmaktadır.

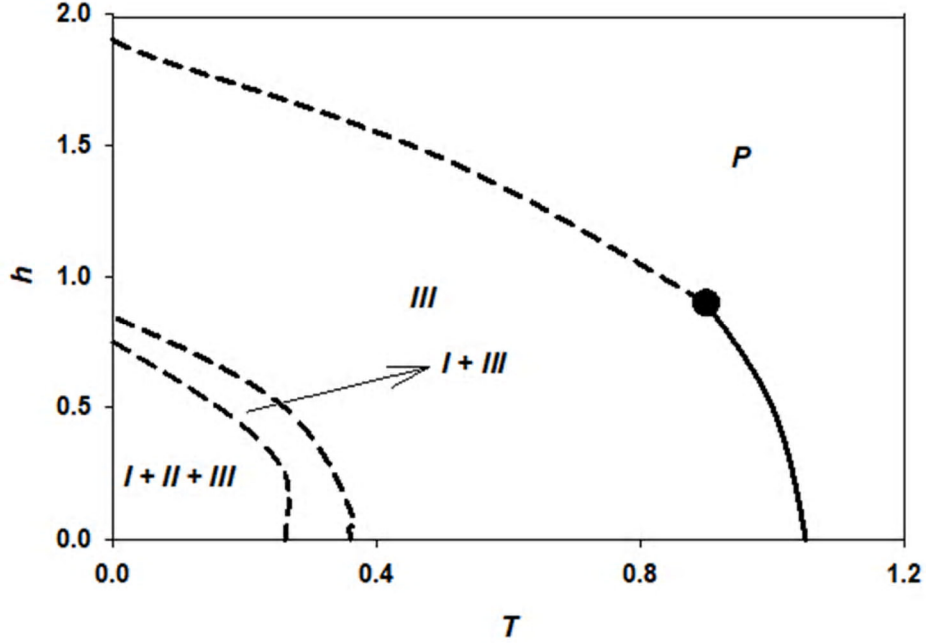


Şekil 2.10. $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -2.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

Şekil 2.10, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -2.0$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Sistem birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerinin yanı sıra, I, P temel fazları ile $I + P, I + II + III$ karma fazları, bir adet dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daire) ve üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü nokta (TP) mevcut iken $I + II$ karma fazı artık bu dinamik faz diyagramında yer almamaktadır. Yine bu dinamik faz diyagramında I temel fazı ile $I + P$ karma fazının bulunduğu bölgelerin giderek azaldığı $I + II + III$ karma fazının bulunduğu bölgenin ise arttığı açıkça görülmektedir.

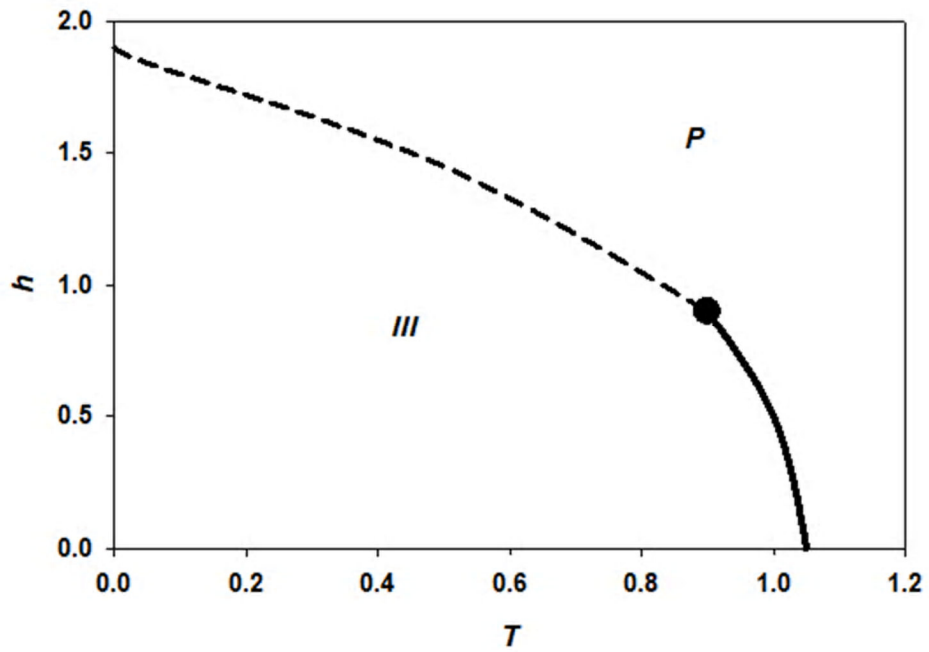
Şekil 2.11, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -3.0$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu dinamik faz diyagramı Şekil 2.10'a benzetmekle birlikte Şekil 2.10'dan farklı olarak I temel fazı ile $I + P$ karma fazı ile üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü nokta (TP) artık bu dinamik faz diyagramında karşımıza çıkmamaktadır. Bu grafikte birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerinin yanı sıra, III ve P temel fazları ile $I + III, I + II + III$ karma fazları görülmüştür. Yine bu dinamik faz diyagramında da bir adet dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daire) ve $I + III, I + II + III$ karma fazlarının, III temel

fazından birinci-dereceden faz geçiş çizgileriyle, *III* temel fazının *P* temel fazından ise ikinci-dereceden faz geçiş çizgisi ile ayrıldığı gözlemlenmiştir.

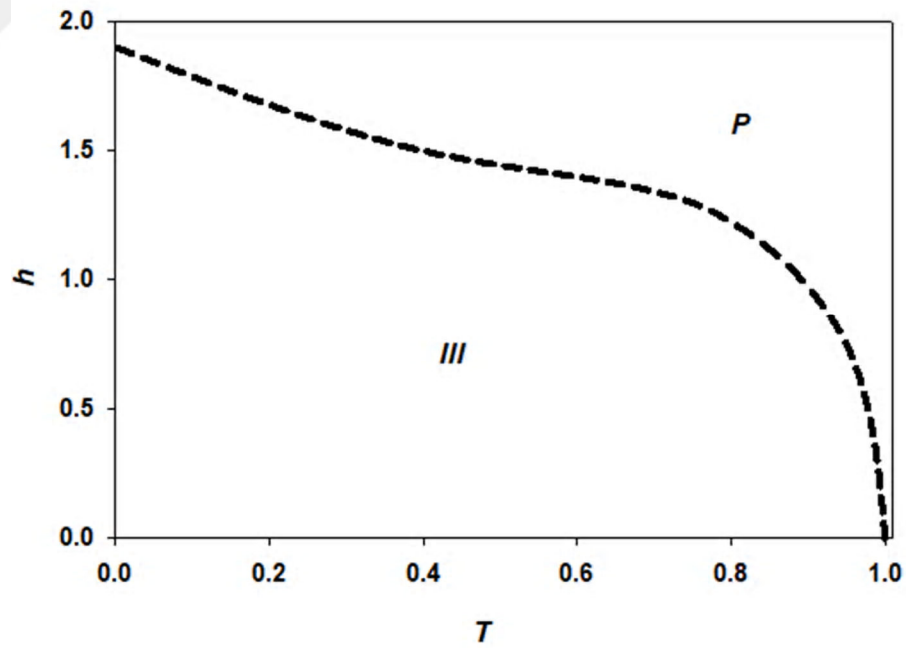


Şekil 2.11. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = -3.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

Şekil 2.12, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = -4.0$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu dinamik faz diyagramında, *III* temel fazı ile *P* temel fazı ve bir adet dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daire) bulunmuştur. Ayrıca *III* temel fazını *P* temel fazından ayıran faz geçiş çizgisi, indirgenmiş sıcaklığın ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin küçük değerlerinde ikinci-dereceden faz geçiş çizgisi indirgenmiş sıcaklığın ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin büyük değerlerinde birinci dereceden faz geçiş çizgisi olduğu görülmektedir.



Şekil 2.12. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = -4.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapıları karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

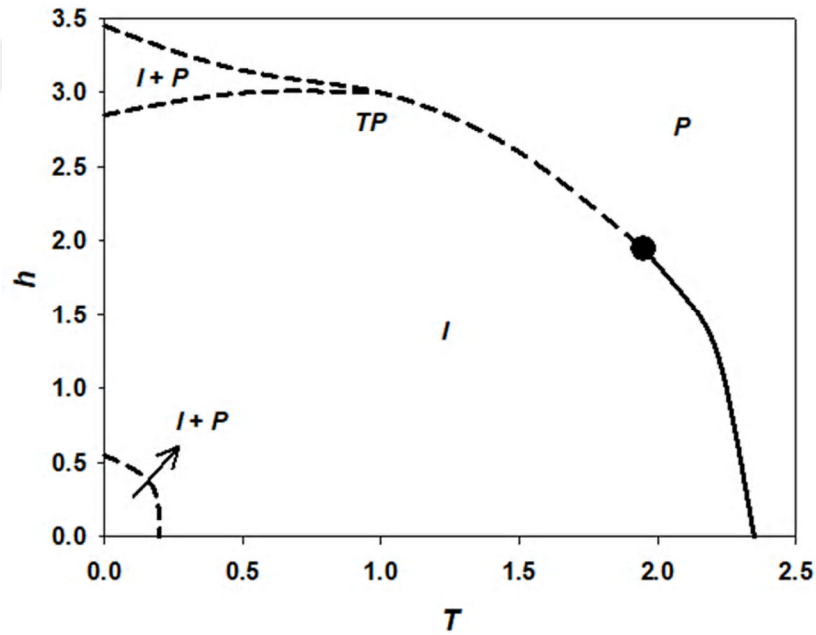


Şekil 2.13. $J_1 = 1.0$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.1$, $d = -7.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapıları karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

Şekil 2.13, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = 1.0, J_2 = 1.0, J_3 = 0.1, d = -7.0$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu dinamik faz diyagramı, Şekil 2.12 ile benzer olup yine grafikte *III* temel fazı ile *P* temel fazı gözlemlenmiştir ve bu temel fazlar arasındaki faz geçiş çizgisinin birinci dereceden faz geçiş çizgisi olduğu ve *III* faz bölgenin bir miktar azaldığı görülmüştür. Ayrıca bu dinamik faz diyagramında dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daire) gözlemlenmemiştir.

2.3.2. $J_1 < 0, J_2 > 0, J_3 > 0$ Durumu İçin Dinamik Faz Diyagramları

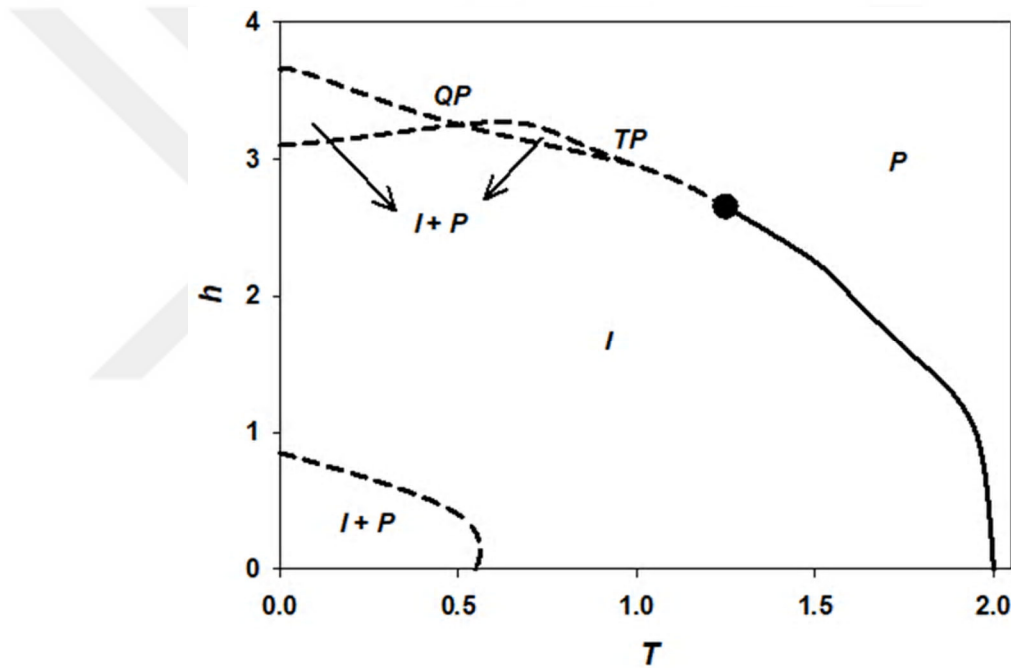
Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin dinamik faz diyagramları ikinci olarak $J_1 < 0, J_2 > 0, J_3 > 0$ durumu için elde edilmiş olup sonuçlar Şekil 2.14-Şekil 2.19’da sunulmuştur. Bu dinamik faz diyagramları incelendiğinde bulunan ilginç ve temel sonuçlar şunlardır:



Şekil 2.14. $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7, d = -1.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

Şekil 2.14, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7, d = -1.0$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını göstermektedir. Bu dinamik faz diyagramında, sistem birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerinin yanı sıra, I, P temel fazları ile $I + P$ karma fazı, bir adet dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu

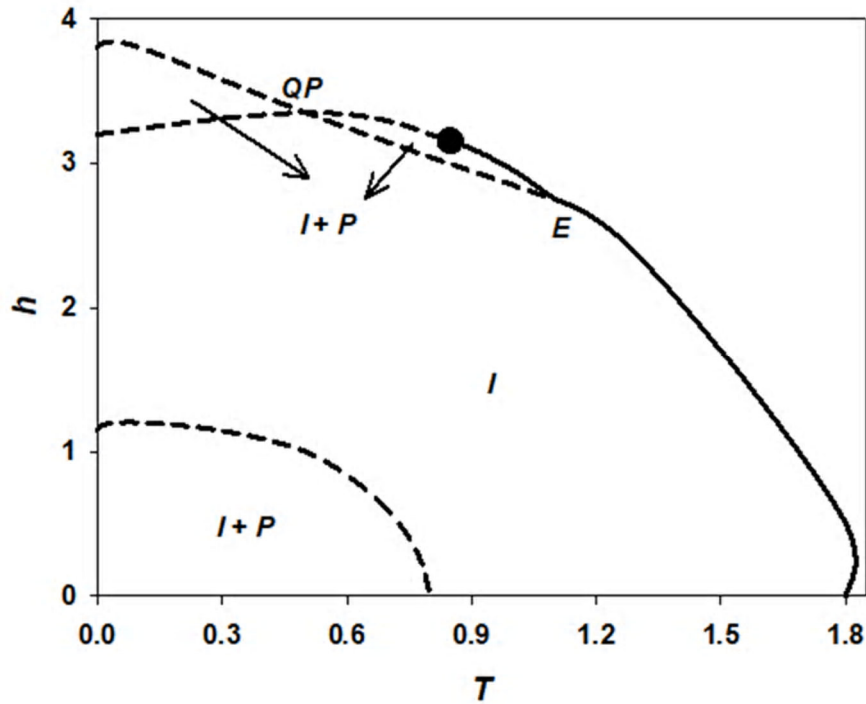
daire) ve üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü nokta (TP) sergilemektedir. Burada iki ayrı bölgede $I + P$ karma fazı tespit edilmiş olup bu karma faz bölgesi birinci-dereceden faz geçiş çizgileri ile P ve I temel fazlarından ayrıldığı görülmektedir. Bu faz diyagramı Şekil 2.7 de sunulan faz diyagramına benzemekle birlikte Şekil 3.7 'den farklı olarak indirgenmiş sıcaklığın ve indirgenmiş manyetik alanın küçük değerlerinde sistem $I + II$ karma fazı yerine $I + P$ karma fazı sergilemektedir. Ayrıca indirgenmiş manyetik alan ve indirgenmiş sıcaklığın yüksek değerlerinde ortaya çıkan $I + P$ karma faz bölgesi Şekil 2.14'de daha küçük olmaktadır. Bu sonuca bağlı olarak I temel faz bölgesi Şekil 2.14'de daha büyük olmaktadır.



Şekil 2.15. $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7, d = -1.5$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapıları karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

Şekil 2.15, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7, ve d = -1.5$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu faz diyagramında Şekil 2.14' de görülen birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerinin, I, P temel fazları ile $I + P$ karma fazının, bir adet dinamik üçlü kritik noktanın (içi dolu daire), üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü noktanın (TP) yanında dört fazın birlikte görüldüğü dinamik dördü nokta (QP) gözümüze çarpmaktadır. Yine bu dinamik faz diyagramında üç ayrı bölgede $I + P$ karma fazı görülmüş olup birinci-dereceden faz geçiş çizgileri ile P ve I temel fazlarından ayrıldığı

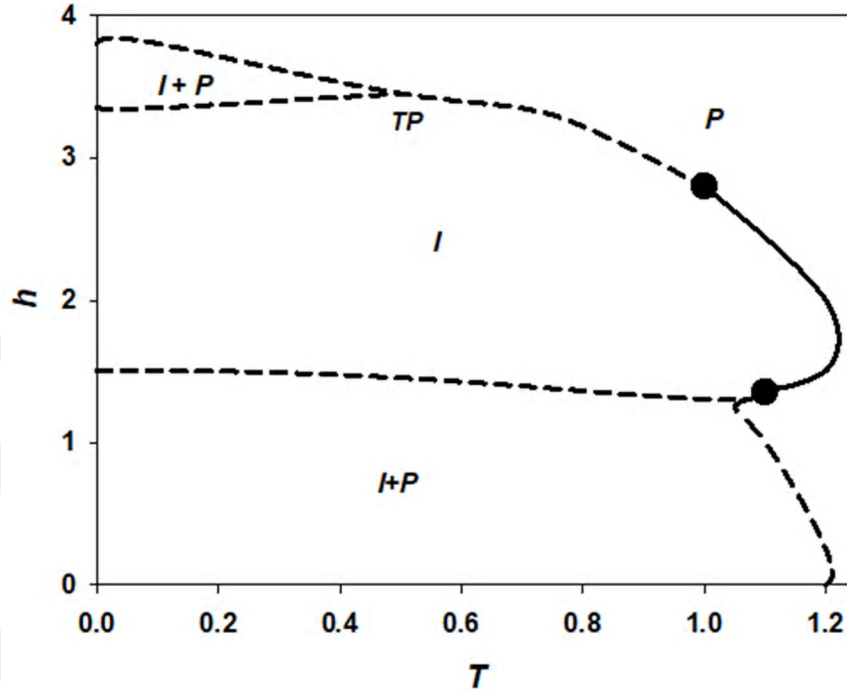
görülmektedir. Ayrıca $I + P$ karma fazı ile I ve P temel fazlarının aynı anda birlikte bulunduğu dinamik üçlü nokta (TP) ve dinamik dördümlü nokta (QP) bu dinamik faz diyagramında gözlenmektedir. İndirgenmiş sıcaklığın (T) ve indirgenmiş manyetik alan genliğinin (h) düşük değerlerinde $I + P$ karma fazının bulunduğu bölgenin Şekil 2.15 de göre bir miktar arttığı ve I temel fazından birinci-dereceden faz geçiş çizgisi ile ayrıldığı da gözlemlenmektedir.



Şekil 2.16. $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7, d = -1.75$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

Şekil 2.16, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7$, ve $d = -1.75$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu faz diyagramında Şekil 3.15' de ki gibi birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileri, I, P temel fazları ile $I + P$ karma fazları, bir adet dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daire), dört fazın birlikte görüldüğü dinamik dördümlü nokta (QP) gözlemlenmiştir. üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü nokta (TP) bu faz diyagramında gözlemlenmemiştir. Ayrıca bu dinamik faz diyagramında farklı olarak kritik sonlu nokta (E) olan başka bir fiziksel nicelik görülmektedir. Yine bu dinamik faz diyagramında üç ayrı bölgede $I + P$ karma fazı görülmüş olup birinci-dereceden faz geçiş çizgileri ile P ve I temel fazlarından ayrıldığı görülmektedir. İndirgenmiş sıcaklığın (T) ve

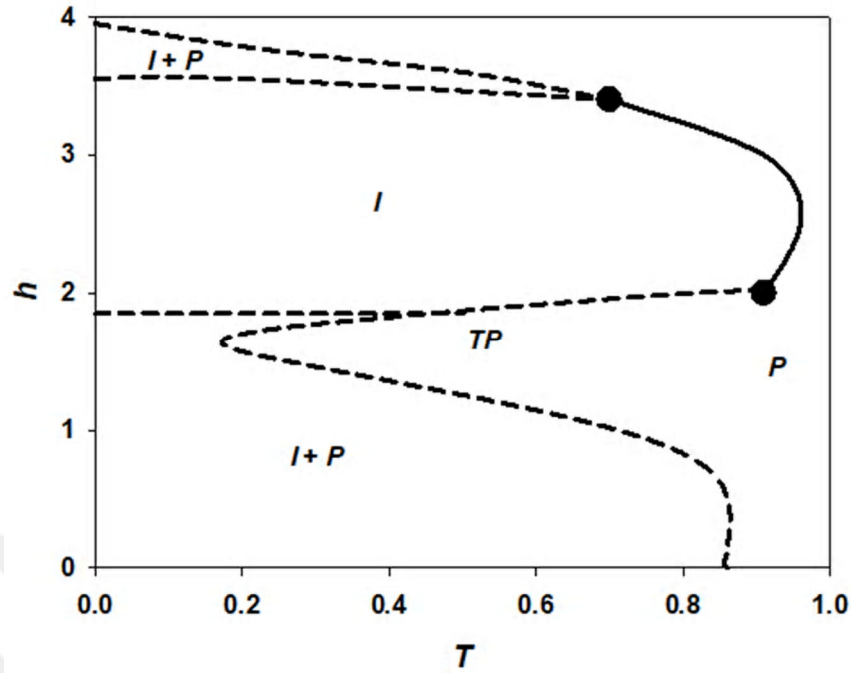
indirgenmiş manyetik alan genliğinin (h) düşük değerlerinde ortaya çıkan $I + P$ karma fazının bulunduğu bölgenin Şekil 2.15 deki bölgeye göre bir miktar arttığı ve I temel fazından birinci-dereceden faz geçiş çizgisi ile birbirlerinden ayrıldığı da görülmektedir.



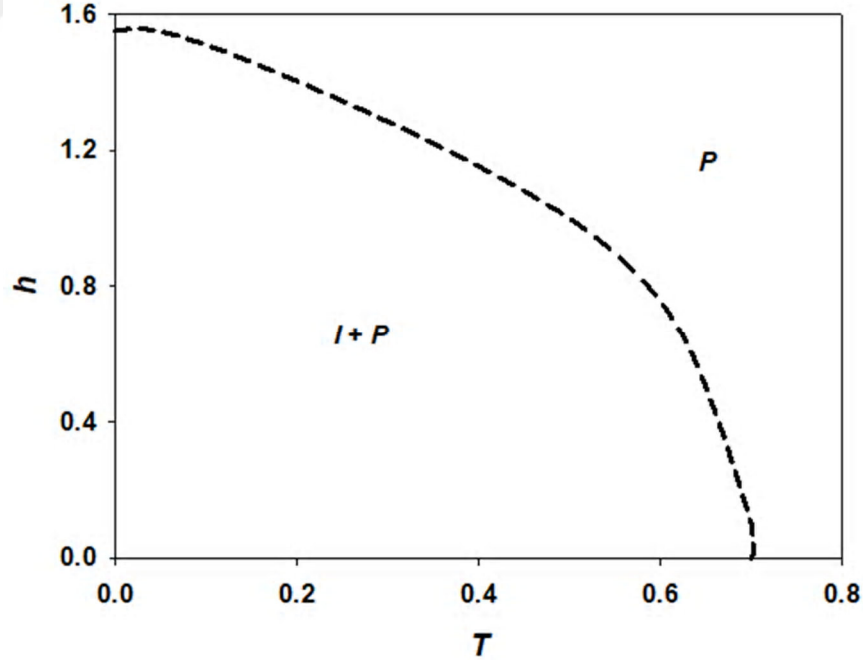
Şekil 2.17. $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7, d = -2.0$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

Şekil 2.17, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7$, ve $d = -2.0$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu faz diyagramı ilginç bir faz diyagramı olup sistemde iki adet dinamik üçlü kritik nokta gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sistemde I, P temel fazları ile $I + P$ karma fazlarının bir arada bulunduğu dinamik üçlü nokta (TP) görülmektedir. Karma faz bölgesi ile temel fazlar birbirinden birinci dereceden faz geçiş çizgisi ile ayrılmaktadır.

Şekil 2.18, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = -0.1, J_2 = 1.0, J_3 = 0.7$, ve $d = -2.25$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu faz diyagramı Şekil 3.17'ye benzemekle birlikte Şekil 3.17'den farkı sistemde üç fazın bir arada bulunduğu dinamik üçlü noktanın (TP) yeri değiştirmesidir. $I + P$ karma faz bölgesi artarken I temel faz bölgesi azalmaktadır.



Şekil 2.18. $J_1 = -0.1$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.7$, $d = -2.25$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.



Şekil 2.19. $J_1 = -0.1$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.7$, $d = -2.5$ değerleri için üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

Şekil 2.19, karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = -0.1$, $J_2 = 1.0$, $J_3 = 0.7$, $d = -2.5$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir.

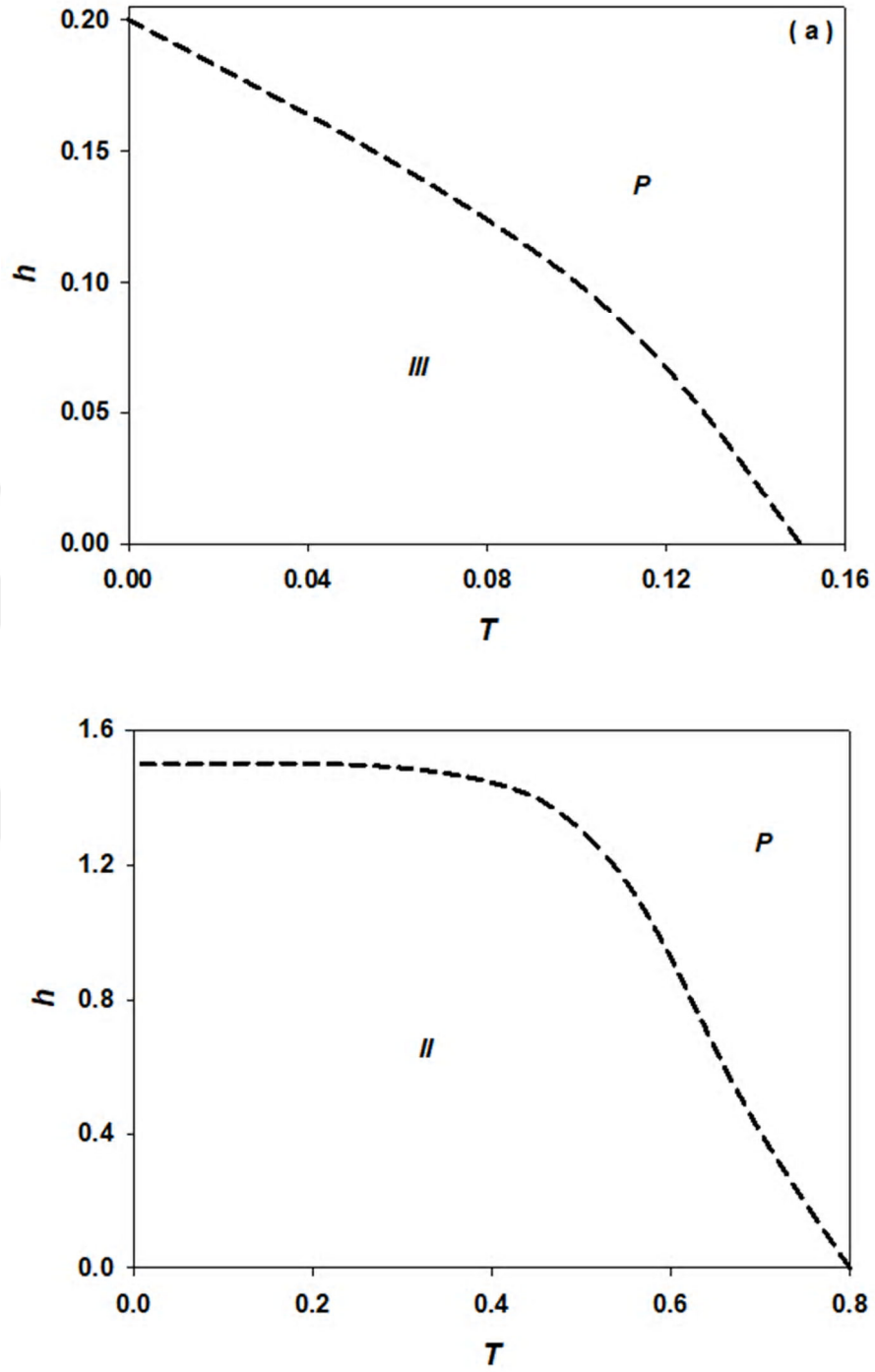
Bu dinamik faz diyagramında diğer dinamik faz diyagramlarında gözlenen ikinci-derece faz geçiş çizgileri, I temel fazı, dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daire) ve üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü nokta (TP) gibi fiziksel nicelikler artık gözlenmemektedir. Ayrıca burada, $I + P$ karma fazı, P temel fazı ve birinci-derece faz geçiş çizgileri görülmektedir.

2.3.3. $J_1 > 0, J_2 < 0, J_3 < 0$ ve $J_1 < 0, J_2 < 0, J_3 < 0$ Durumları İçin Dinamik Faz Diyagramı

Üç-tabakalı sandviç kare örgü yapıları karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin dinamik faz diyagramı son olarak $J_1 > 0, J_2 < 0, J_3 < 0$ ve $J_1 < 0, J_2 < 0, J_3 < 0$ durumları için elde edilmiştir. Her iki durum için yalnızca birer adet dinamik faz diyagramı elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 3.20'de sunulmuştur.

Şekil 3.20 (a), karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = 0.1, J_2 = -1.0, J_3 = -0.1, d = -0.1$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu dinamik faz diyagramı da Şekil 3.19 daki dinamik faz diyagramı ile benzer olup, P, III temel fazları ve birinci-derece faz geçiş çizgileri görülmektedir.

Şekil 2.20 (b), karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin $J_1 = -0.1, J_2 = -1.0, J_3 = -0.1, d = -0.1$ değerleri için (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramını ifade etmektedir. Bu dinamik faz diyagramı da Şekil 3.20 (a) ve Şekil 3.19 daki dinamik faz diyagramları ile benzer olup, P, II temel fazları ve birinci-derece faz geçiş çizgileri görülmektedir.



Şekil 2.20. (a) $J_1 = 0.1, J_2 = -1.0, J_3 = -0.1, d = -0.1$ değerleri için (b) $J_1 = -0.1, J_2 = -1.0, J_3 = -0.1, d = -0.1$ üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde dinamik faz diyagramı.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar Eur. Phys. J. Plus dergisinde yayınlanmıştır [225].

3. BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, denge özellikleri denge istatistik fiziğinde geliştirilen yöntemlerle kapsamlı bir şekilde incelenmiş olmasına rağmen, dinamik özellikleri yeterince incelenmeyen üç tabakalı sandviç yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising modelinin dinamik davranışı Glauber tipi stokastik dinamik temelli ortalama alan yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir.

Giriş bölümünde literatür bilgileri ile tezin önemi ve özgün değeri belirtildikten sonra ikinci bölümde modelin tanıtımı ve dinamik denklemlerin elde edilmesi üzerinde durulmuştur. Sistemin dinamik davranışı yani dinamik fazları, dinamik faz geçiş sıcaklıkları ve dinamik faz diyagramları gibi dinamik manyetik özelliklerini tanımlayan dinamik denklemleri Glauber-tipi stokastik dinamik temelli ortalama alan yaklaşımı ile master denklemlerinden istifade edilerek elde edilmiştir. Üçüncü bölümde ise sistemi tanımlayan ortalama-alan dinamik denklemlerinin nümerik çözümleri Hamiltonyen parametrelerinden istifade edilerek incelenmiştir. İlk olarak sistemde var olan fazları bulmak için sistemin dinamik davranışını tanımlayan denklemlerinin kararlı çözümleri farklı kristal alan (d), manyetik alan genliği (h) ve sıcaklık (T) değerleri için Adams-Moulton kestirme ve düzeltme nümerik yöntemi ile çözümlenerek P, I, II , ve III temel fazların yanında I ve P fazlarının bir arada bulunduğu $I + P$ karma fazı; I ve II fazlarının bir arada bulunduğu $I + II$ karma fazı; I ve III fazlarının bir arada bulunduğu $I + III$ karma fazı ve I, II ve III fazlarının bir arada bulunduğu $I + II + III$ karma fazı olmak üzere dört adet karma faz bölgesi gösterdiği müşahade edilmiş olup Tablo 1(a) ve Tablo 1(b) de sistemin tüm fazlarının özellikleri sunulmuştur.

Ayrıca m_1^A , m_2^B ve m_3^A alt örgü mıknatıslanmalarının değerlerine göre elde edilen P, I, II, III temel fazlarının salınımları Şekil 3.1 – Şekil 3.4’ verildi. Yine m_1^A , m_2^B ve m_3^A alt örgü mıknatıslanmalarının değerlerine göre elde edilen $I+P, I+II, I+III, I+II+III$ karma

fazlarında belirtilti. Bu itibarla sistemin fazlarını sunduktan sonra artık dinamik faz geçiş sıcaklıklarını (DFGS) verebiliriz. Burada denklem (3.2d) de M_1^A, M_2^B, M_3^A ve M_t 'nin indirgenmiş sıcaklığa (T) bağlı davranışları, indirgenmiş değerler olan h, J_1, J_3, d 'nin farklı değerleri için nümerik olarak Romberg integrasyon metodu ile Adams-Moulton kestirme-düzeltilme metotları kullanılarak dinamik faz sınırlarının nasıl tespit edildiği ve DFGS'nin nasıl hesaplandığına örnek olması açısından elde edilen sonuçlar, aynı zamanda sistemin termal davranışını da gösteren grafikler Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da sunuldu. Bu şekillerde T_C ikinci dereceden faz geçiş sıcaklığını gösterirken $T_t, T_{t1},$ ve T_{t2} ise birinci dereceden faz geçiş sıcaklıklarını gösterir. Buna göre şekil 3.5(a)' da sistemde I temel fazının olduğunu, indirgenmiş sıcaklık değeri arttırıldıkça M_1^A, M_2^B, M_3^A ve M_t dinamik mıknatıslanma değerlerinin sürekli bir davranışla azaldığı ve $T_C = 2.96$ kritik sıcaklık değerinde sıfıra değerine ulaşmasına müteakip sistemin I temel fazından P temel fazına ikinci dereceden bir faz geçişi sergilediği görüldü. Şekil 3.5 (b)' de ise sistem $T_t = 0.86$ ve $T_C = 2.96$ değerlerinde peş peşe iki faz geçişi gösterdi. İndirgenmiş sıcaklık arttıkça, M_1^A ve M_3^A dinamik mıknatıslanmaları $T_t = 0.86$ değerinde -0.5 değerine süreksiz olacak şekilde bir geçiş yaptığı ve sistemin II temel fazından I temel fazına birinci dereceden bir faz geçişi sergilediği ayrıca indirgenmiş sıcaklık arttırılmaya devam edilirse dinamik mıknatıslanmalar sıfıra sürekli olarak azaldığı; dolayısıyla $T_C = 2.96$ 'da I fazından P fazına ikinci dereceden bir faz geçişinin meydana geldiği müşahade edildi. Şekil 3.6' da sistemin peş peşe üç farklı faz geçişi sergilediği, ilk iki faz geçişi birinci dereceden faz geçişi olduğu ve ilk faz geçişi $T_{t1} = 0.36$ sıcaklığında $I + II + III$ karma fazından $I + III$ karma fazına olduğu, ikinci faz geçişinin $T_{t1} = 0.26$ sıcaklığında $I + III$ karma fazından III temel fazına geçişin gerçekleştiği, üçüncü faz geçişinin ise $T_C = 1.01$ değerinde meydana geldiği ayrıca sistemin III temel fazından P temel fazına ikinci dereceden faz geçişi sergilediği gözlemlendi. Böylelikle dinamik faz geçiş doğasını ve sıcaklıklarını belirledikten sonra bilinear etkileşim parametreleri J_1, J_2, J_3 ile indirgenmiş kristal alan etkileşme parametresinin (d) farklı değerleri için (T, h) düzlemlerde dinamik faz diyagramları elde edildi ve Şekil 3.7 – Şekil 3.20' de sunulmuştur. Burada birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileri, P, I, II, III temel fazları ile $P+I, I+II, I+III, I+II+III$ karma fazları, dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daireler), üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü nokta (TP), dört fazın birlikte görüldüğü dinamik dördü nokta (QP) ve kritik sonlu nokta (E) gibi fiziksel nicelikler gözlemlendi. Ayrıca bu fiziksel niceliklerden fazların

bulduğu bölgelerin birbirlerine göre azaldığı ve arttığı dinamik faz diyagramları sunuldu. Bu dinamik faz diyagramlarından ilk olarak Şekil 3.7 ve Şekil 3.13 olmak üzere yedi dinamik faz diyagramı üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sistemi $J_1, J_2, J_3 > 0$ durumu için elde edildi. Burada P, I, III temel fazları ile $P+I, I+II, I+III, I+II+III$ karma fazları, dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daireler), üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü nokta (TP), birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgileri müşahede edildi. Ayrıca kristal alan etkileşme parametresinin (d) değerleri küçüldükçe şekil 3.7 deki faz diyagramlarına göre P, I temel fazı ile $P+I, I+II$ karma fazlarınıın bulunduğu alanların azaldığı, $I+III$ ile $I+II+III$ karma fazlarının bulunduğu bölgelerin de arttığı ayrıca $I+II$ ile $I+III$ karma fazlarının giderek kaybolduğu görüldü. Yine şekil 3.13 de artık $d=-7.0$ değeri için $I+II+III$ karma fazı ile dinamik üçlü kritik noktanın (içi dolu daire) da kaybolduğu ve dinamik faz diyagramında artık P ve III temel fazlarının dışındaki fiziksel niceliklerin kaybolduğu gözlemlendi.

Diğer bir durum ise üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin dinamik faz diyagramları ikinci olarak $J_1 < 0, J_2 > 0, J_3 > 0$ durumu için elde edilerek sonuçlar Şekil 3.14-Şekil 3.19'da sunuldu. Yine burada P, I , temel fazları ile $P+I$ karma fazı, dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daireler), üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü nokta (TP), birinci- ve ikinci-derece faz geçiş çizgilerinin yanı sıra, dört fazın birlikte görüldüğü dinamik dördü nokta (QP) ve kritik sonlu nokta (E) müşahede edildi. Ayrıca burada kristal alan etkileşme parametresinin (d) değerlerine paralel olarak indirgenmiş sıcaklığın (T) değerleri küçüldükçe, indirgenmiş manyetik alanın küçük değerlerinin olduğu bölgelerde $I+P$ karma fazının bulunduğu bölge giderek arttığı, yine bu değerler doğrultusunda ilk başlarda karşılaşmadığımız fiziksel niceliklerin görüldüğü dört fazın birlikte görüldüğü dinamik dördü nokta (QP) ve kritik sonlu nokta (E), iki adet dinamik üçlü kritik nokta (içi dolu daireler), üç fazın birlikte görüldüğü dinamik üçlü noktanın (TP) daha sonraki değerlere paralel olarak tekrardan kaybolduğu gözlemlendi. Son olarak üç-tabakalı sandviç kare örgü yapılı karma spin $(1/2, 1, 1/2)$ Ising sisteminin (T, h) düzleminde iki adet dinamik faz diyagramları $J_1 > 0, J_2 < 0, J_3 < 0$ ve $J_1 < 0, J_2 < 0, J_3 < 0$ durumları için elde edildi ve her iki durum için yalnızca birer adet dinamik faz diyagramı görüldü ve sonuçlar Şekil 3.20'de sunuldu. Burada yine P, II ve III temel fazları müşahede edildi.

Bu karma spin sisteminin dinamik manyetik özellikleri incelendiğinde, sistemin davranışının kuvvetli bir şekilde Hamiltonyen parametrelerine bağlı olduğu açık olarak görülmektedir. Bu karma spin sisteminden elde edilen sonuçlardan anlaşılacağı üzere, üzerinde çalışılan sistemin etkileşim parametreleri ne kadar fazla ve spin değerleri ne kadar yüksek olursa bu sistemlerin çalışılması zorlaşmakla beraber elde edilen dinamik manyetik özellikleri de örneğin dinamik faz diyagramları o kadar zengin olmaktadır. Bu açıdan yüksek spinli sistemler çalışılabilir.

Son olarak spin korelasyonları dikkate alınmadığından dolayı ortalama-alan yaklaşımının sınırlamalarından birinci-derece faz geçiş çizgilerinin ve aynı zamanda dinamik özel noktaların en azından bazıları yapay olmaları güçlü bir olasılık dahilindedir. Bu yüzden biz umuyoruz ki detaylı teorik araştırmamızın renormalizasyon-grup (RG) hesaplamaları veya kinetik Monte Carlo (MC) simülasyonları gibi daha hassas teknikler kullanılarak bu ve benzeri sistemleri çalışmak için daha ileri çalışmaları tetikleyebilir. Dinamik MC metodu sonuçları daha güvenilir olmasına rağmen genellikle bilgisayar hızına bağlı olarak kısıtlandığı belirtilmelidir. Bu yüzden sonuçlarımız dinamik MC simülasyonları kullanırken aranan kritik davranışın zaman gereken işlemler için eğitici olacaktır.

KAYNAKÇA

1. Caric, P.. 1895. Magnetic properties of materials at various temperatures. **Annales de Chimie et de Physique**, **5**: 289-40.
2. Hopkinson J.. 1890. Magnetic properties of alloys of Nicel and Iron. **Proceedings of the Royal Society of Medicine**, **18**: 1-13.
3. Langevin P., 1904. Electronic theory of magnetism. **Comptes Rendus**, **139**: 1204-1207.
4. Langevin. P., 1905. Electronic Theory of Magnetism **Annales de Chimie et de Physique**, **5**: 70.127.
5. Weiss, P.. 1906. Temperature variation of ferromagnetism. **Comptes Rendus**, **143**: 1136-1139.
6. Weiss. P.. 1907. Hypothesis of the molecular field and ferromagnetism. **Journal de Physique**, **7**: 661-690.
7. Stanley. H. E., 1971. Introduction to Phase Transition and Critical Phenomena, Clarendon Press, Oxford.
8. S. Tebble, R. S., Craik. D. J., 1969. Magnetic Materials. Wiley-Interscience. London.
9. Lenz, W. F., 1920. Beitrag zum verstandnis der magnetischen erscheinungen in festen körpern. **Physikalische Zeitschrift**, **21**: 613-615.
10. Ising, E., 1924. Beitrag zur Theorie des Ferro- und Paramagnetismus, Doctora Dissertation. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultat der Hamburgischen Universitat, Hamburg.
11. Ising, E., 1925. Beitrag zur theorie des ferromagnetismus, **Physikalische Zeitschrift**, **31**: 253-258.
12. Heisenberg, W.. 1928. Zur theorie des ferromagnetismus. **Zeitschrift für Physik**, **49**: 619-636.
13. Huang, K., 1987. Statistical Mechanics, John & Wiley Sons Inc.
14. Baxter, R. J., 1982. Exactly Solved Models in Statistical Mechanics Academic Press Inc. New York.
15. Toda, M. Kubo. R., Saito. N., 1992. Statistical Physics 1 Equilibrium Statistical Mechanic. Springer Verlag.

16. Greiner, W., Neise, L., Stöcker, H., 1994. Thermodynamics and Statistical Mechanics. Springer Verlag New York.
17. Kramer, H. A., Wannier, G. H. Statistics of the Two Dimensional Ferromagnet. Part 1. **Physical Review**, **60**: 252-262.
18. Onsager, L., 1944. Crystal statistics. 1. a. two-dimensional model with an order-disorder transition, **Physical Review**, **65**: 117-149.
19. Ma, S.K., 1976. Modern Theory of Critical Phenomena, Benjamin, New York.
20. Ma, S.K., 1985. Statistical Mechanics, World Scientific Publishing Co.
21. Blume, M., 1966. Theory of the first-order magnetic phase change in UO_2 , **Physical Review**, **141**: 517-524.
22. Capel, H.W., 1966. On the possibility of first-order phase transitions in Ising systems of triplet ions with zero-field splitting. **Physica**, **32**: 966-988.
23. Capel, H.W., 1967. On the possibility of first-order phase transitions in Ising systems of triplet ions with zero-field splitting. **Physica**, **37**, 423-441.
24. Elmers, H. J., 1995. Ferromagnetic monolayers. **International Journal of Modern Physics B**, **9**: 3115-3180.
25. Digest 13th Int. Colloq. On Magnetic Films and Surfaces, Glasgow. 1991.
26. Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Van Dau, F. Nguyen, Petroff, F., Eitenne, P., Creuzet, G., Friederich, A., Chazelas, J., 1998. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. **Physical Review Letters**, **61**: 2472-2475.
27. Sayama, J., Asahi, T., Mizutani, K., Osaka, T., 2004. Newly developed SmCo_5 thin film with perpendicular magnetic anisotropy. **Journal of Physics D: Applied Physics**, **37**: L1L4.
28. Wu, R., J. Freeman, A., 1992. Structural and magnetic properties of Fe/Ni(111). **Physical Review B**, **50**: 7205-7210.
29. O'Handley, R. C., Sun, S. W., 1991. Surface magnetoelastic coupling. **Physical Review Letters**, **66**: 2798-2801.
30. Bochi, G., Song, O., O'Handley, R. C., 1994. Surface magnetoelastic coupling coefficients of single-crystal fcc co thin films, **Physical Review B**, **50**: 2043-2046.
31. Horiguchi, T., Tsushima, N., 1997. Shift exponent and breakdown of universality for the two-layer Ising model on a square lattice. **Physica A**, **238**: 295-306.

32. Al, Mukadam, H. M., Uzunov, D. I., 1996. Phase transitions in two sublattice ising systems. **Physica A**, **232**: 326-348.
33. Lyra, M. L., Dasilva, C. R., 1993. Intralayer correlation enhancement and interlayer coherence loss in cuo2 bilayers. **Physical Review B**, **47**: 526-529.
34. Lipowski, A., Suziki, M., 1993. The layered ising model mean-field and interfacial approximations. **Physica A**, **198**: 227-224.
35. Wosiek, J., 1994. Locating analytically critical temperatures in some statistical systems. **Physical Review B**, **49**: 15023-15026.
36. Kaneyoshi, T., 1994. The magnetic properties of a ferrimagnetic bilayer system with disordered interfaces. **Journal of Physics: Condensed Matter**, **6**: 10691-10703.
37. Ferrenberg, A. M., Landau, D. P., 1991. Monte carlo study of phase transitions in ferromagnetic bilayers, **Journal Applied Physics**, **70**: 6215-6217.
38. Oitmaa, J., Enting, G., 1975. Critical behaviour of a two-layer ising system. **Journal of Physics A**, **8**: 1097-1114.
39. Mansiripur, M., 1987. Magnetization reversal, coercivity and the process of thermomagnetic recording in thin films of amorphous rare earth-transition metal alloys. **Journal Applied Physics**, **61**: 1580-1587.
40. Tang, F.K., 1988. Critical couplings of mixed spin-1/2 and spin-S ising model: va free-fermion approximation. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, **21**: L1097- L1098.
41. Zhang, G.M., Yang, C.Z., 1993. Monte-Carlo study of the 2-dimensional quadratic Ising ferromagnet with spins $s = 1/2$ and $s = 1$ and with crystal-field interactions, **Physical Review B**, **48**: 9452-9455.
42. Buendia, G.M., Novotny, M.A., 1997. Numerical study of a mixed Ising ferrimagnetic system. **Journal of Physics: Condensed Matter**, **9**: 5951-5964.
43. Schofield, S.L., Bowers, R.G., 1980. Renormalization group calculations on a mixed-spin system in 2 dimensions. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, **13**: 3697-3706.
44. Schofield, S.L., Bowers, R.G., 1981. High-temperature series expansion analyses of mixed-spin ising-models. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, **14**: 2163-2169.

45. Iwashita, T., Uryu, N., 1983. The effect of the biquadratic exchange interaction on the curie-temperature of the mixed Ising ferromagnet. **Physics Letters A**, **96**: 311-313.
46. Iwashita, T., Uryu, N., 1984. The curie-temperature of the two-dimensional quadratic Ising ferromagnet with mixed spins of $s = 1/2$ and $s = 1$. **Journal of the Physical Society of Japan**, **53**: 721-728.
47. Kaneyoshi, T., 1987. Curie temperatures and tricritical points in mixed Ising ferromagnetic systems. **Journal of the Physical Society of Japan**, **56**: 2675-2680.
48. Kaneyoshi, T., 1990. Magnetic properties of a mixed spin Ising-model with random nearest-neighbor interactions. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **92**: 59-67.
49. Siqueira, A.F., Fittipaldi, I.P., 1986. Thermodynamical properties of a mixed Ising ferromagnetic system. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **54-57**: 678-680.
50. Kaneyoshi, T., 1987. Theory of surface phase-diagrams in semi-infinite mixed Ising alloys. **Journal of the Physical Society of Japan**, **56**: 2886-2895.
51. Fu, H.H., Yao, K.L., Liu, Z.L., 2006. Thermodynamic properties of mixed-spin chains in magnetic field by the transfer matrix method, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **305**: 253-258.
52. Plascak, J.A., 1993. Multicritical points in the ferromagnetic binary Ising-model, **Physica A**, **198**: 655-665.
53. Vieira, A.P., de Carvalho, J.X., Salinas, S.R., 2001. Phase diagram of a random-anisotropy mixed-spin Ising model. **Physica Review B**, **63**: 184415-184422.
54. Plascak, J.A., 1993. Multicritical points in the ferromagnetic binary Ising-model, **Physica A**, **198**: 655-665.
55. Vieira, A.P., de Carvalho, J.X., Salinas, S.R., 2001. Phase diagram of a random-anisotropy mixed-spin Ising model. **Physica Review B**, **63**: 184415-184422.
56. Da Silva, N.R., Salinas S.R., 1991. Mixed-spin Ising-model on the Bethe lattice. **Physical Review B**, **44**: 852-855.

57. Albayrak, E., Keskin, M., 2003. Mixed spin-1/2 and spin-1 blume-capel ising ferrimagnetic System on the bethe lattice. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **261**: 196-203.
58. Da Silva, N.R., Salinas S.R., 1991. Mixed-spin ising-model on the bethe lattice. **Physical Review B**, **44**: 852-855.
59. Da Silva, N.R., Salinas S.R., 1991. Mixed-spin ising-model on the bethe lattice. **Physical Review B**, **44**: 852-855.
60. Jaščur, M., Kaneyoshi, T., 1995. Dilution in a mixed spin Ising system. **Physica B**, **215**: 318-324.
61. Xin, Z.H., Wei, G.Z., Liu, T.S., 1998. Phase diagrams of the diluted mixed-spin Ising model on a honeycomb lattice. **Physica A**, **248**: 442-453.
62. Htoutou, K., Ainane, A., Saber, M., 2004. The transverse crystal-field effects of the mixed spin ising bilayer system. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **269**: 245-258.
63. Benayad, N., Zerhouni, R., 1997. Magnetic properties of the mixed spin transverse Ising model with longitudinal crystal field interactions. **Physiscs Status Solidi B**, **201**: 491-503.
64. Weng, X.M., Li, Z.Y., 1996. On the random transverse field mixed spin Ising model of spin-1/2 and spin-1, **Physiscs Status Solidi B**, **197**: 487-494.
65. Benayad, N., Zerhouni, R., Klumper A., Zittartz J., 1999. Mixed spin-1/2 and spin-1 Ising model in transverse random fields. **Physica A**, **262**: 483-495.
66. Kaneyoshi, T., Sarmiento, E. F., Fittipaldi, I. P., 1988. Magnetic-properties of amorphous mixed Ising spin systems in a transverse field. **Physical Review B**, **38**: 2649-2658.
67. Yan, S.L., Yang, C.Z., 1996. Tricritical behaviour on the mixed transverse Ising spin system with a crystal field. **Physiscs Status Solidi B**, **208**: 151.
68. Boughrara, M., Kerouad, M., Saber, M., 2007. Effect of a random longitudinal field and crystal field on a decorated ferrimagnetic ising model. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **316**: e287-e290.
69. Yan, S.L., Yang, C.Z., 1998. Effect of the transverse field on the bond-diluted mixed Ising spin system with single-ion anisotropy. **Physical Review B**, **57**: 3512-3517.

70. Benayad, N., Dakhama, A., Fathi, A., Zerhouni, R., 1998. The diluted mixed spin-1/2 and spin-1 Ising model in a transverse random. **Journal of Physics: Condensed Matter**, **10**: 3141-3157.
71. Bobák, A., Jurcisin, M., 1996. Ferrimagnetism in diluted mixed-spin two-dimensional Ising models. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **163**: 292-298.
72. Bobák, A., Jurcisin, M., 1997. Ferrimagnetism in diluted mixed spin-1/2 and spin-3/2 Ising systems. **Journal de Physique IV**, **7**: 179-180.
73. Benayad, N., Dakhama, A., Klümper, A., Zittartz, J., 1996. Mixed spin-3/2 and spin-1/2 Ising models with random nearest-neighbour interactions. **Annalen Der Physik**, **5**: 387-398.
74. Buendia, G. M., Cardona, R., 1999. Monte Carlo study of a mixed spin-3/2 and spin-1/2 Ising ferrimagnetic model. **Physical Review B**, **59**: 6784-6789.
75. Benayad, N., Dakhama, A., Klümper, A., Zittartz, J., 1996. Magnetic properties of a mixed spin-1/2 and spin-3/2 transverse Ising model. **Zeitschrift Fur Physik B**, **101**: 623-630.
76. Bobák, A., Horváth, D., 1999. Magnetic properties of diluted mixed spin-1/2 and spin-s Ising ferrimagnets with a crystal field. **Physica Status Solidi B**, **213**: 459-470.
77. Jiang, W., Wei, G.-Z., Xin, Z.-H., 2001. Magnetic properties of a mixed spin-1/2 and spin-3/2 transverse Ising model with a crystal field. **Physica A**, **293**: 455-464.
78. Wei, G.-Z., Liang, Y-Q., Zhang, Q., Xin, Z-H., 2004. Magnetic properties of mixed-spin Ising systems in a longitudinal magnetic field. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **271**: 246-253.
79. Li, J., Wei, G., Du, A., 2004. Green function study of a mixed spin-3/2 and spin-1/2 Heisenberg ferrimagnetic model. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **271**: 246-253.
80. Jaščur, M., Strečka, J., 2005. Magnetic properties of a mixed spin-1/2 and spin-3/2 Ising model with an uniaxial and biaxial crystal-field potential. **Physica A**, **358**: 393-412.

81. Strečka, J., 2006. Weak universality, bicritical points and reentrant transitions in the critical behaviour of a mixed spin-1/2 and spin-3/2 Ising model on the union jack (centered square) lattice. **Physica Status Solidi B**, **343**: 708-715.
82. Zhang, X., Kong, X.-M., 2006. Ferromagnetism in the mixed spin-1/2 and spin-3/2 Blume-Capel system on the two-fold Cayley tree. **Physica A**, **369**: 589-598.
83. Strečka, J., Canová, L., Non-universal critical behaviour of a mixed-spin Ising model on the extended Kagome lattice. **Condensed Matter Physics**, **9**: 179-186, 2006.
84. Albayrak, E., Alçi, A., Mixed spin-1/2 and spin-3/2 Blume-Capel Ising ferrimagnetic system on the Bethe lattice. **Physica A**, **345**: 48-60, 2005.
85. Mackowiak, J., Mean-Field Heat Capacity of Dilute Magnetic Alloys, *Cond-Mat/0703146*.
86. Manriquez, J. M., Yee, G. T., Mclean, R. S., Epstein, A. J., Miller, J.S., 1991. A room temperature molecular/organic-based magnet. **Science**, **252**: 1415-1417.
87. Morin, G., Zhou, P., Hahn, C., Epstein, A. J., Miller, J.S., 1993. Complex ac susceptibility studies of the disordered molecular based magnets V(T CNE)X: Role of spinless solvent. **Journal of Applied Physics**, **73**: 5648-5650.
88. Du, G., Joo, J., Epstein, A. J., Miller, J.S., 1993. Anomalous charge-transport phenomena in molecular-based magnet V(T CNE)X.Y(Solvent). **Journal of Applied Physics**, **73**: 6566-6568.
89. Iwashita, T., Satou R., Imada, T., Miyoshi, Y., Idogaki, T., 2001. Mixed Ising spin system with higher-order spin interaction. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **226**: 577-578.
90. Weng, X.M., Li, Z.Y., 1996. Transverse-random-field mixed Ising model with arbitrary spins. **Physical Review B**, **53**: 12142-12147.
91. Strečka, J., Jaščur, M., Thermodynamic properties of the exactly solvable transverse Ising model on decorated planar lattices. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **260**: 415, 2003.
92. Albayrak, E., Yigit, A., The critical behaviors and the phase diagram of the mixed spin-1/2 and spin-2 Ising system on the Bethe lattice. **Physica Status Solidi B**, **242**: 1510, 2005.

93. Strečka, J., 2006. 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. **Physica A**, **360**: 379.
94. Ekiz, C., 2005. Mixed spin-1/2 and spin-s Ising ferrimagnets with a crystal field. **Physica A**, **353**: 286-296.
95. Bobák, A., Jurcisin, M., A 1997. Theoretical study of the diluted mixed spin-1 and spin-3/2 Ising ferrimagnet. **Physica B**, **233**: 187-195.
96. Wei, G.-Z., Xin, Z.-H., Wei, J., 1999. Phase diagrams and tricritical behavior in mixed spin-1 and spin-3/2 Ising model on honeycomb lattice. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **204**: 144-150.
97. Bobák, A., 2000. Multicritical points in the mixed spin-1 and spin-3/2 Ising system on a square lattice with different single-ion anisotropies. **Physica A** **286**: 531-540.
98. Wei, J., Wei, G.-Z., Zhang, Z.-D., 2003. Tricritical behavior and magnetic properties for a mixed spin-1 and spin-3/2 transverse Ising model with a crystal field. **Physical Review B**, **68**: 134432.
99. Bobák, A., Jurcisin, M., 1997. Compensation temperature in a diluted mixed spin-1 and spin-3/2 Ising ferrimagnet with a crystal field. **Journal of Physics: Condensed Matter**, **204**: 787-791.
100. Wei, G.Z., Zhang, Q., Gu, Y.W., 2006. Monte Carlo studies of critical phenomena in mixed spin-1 and spin-3/2 Blume-Capel Ising model on simple cubic lattice. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **301**: 245-250.
101. Jiang, W., Wei, G.Z., Zhang, Z.D., 2003. Tricritical behavior and magnetic properties for a mixed spin-1 and spin-3/2 transverse Ising model with a crystal field. **Physical Review B**, **68**: 134432-134436.
102. Abubrig, O.F., Horvath, D., Bobak, A., 2001. Mean-field solution of the mixed spin-1 and spin-3/2 Ising system with different single-ion anisotropies. **Physica A**, **296**: 437-450.
103. Fireman, E.C., Cressoni, J.C., dos Santos, R.J.V., 2003. Thermodynamics of an alternate $\sigma = 1$ and $s = 3/2$ Ising chain mapped onto an effective BEG model. **Physica A**, **329**: 147-160.
104. Oitmaa, J., Zheng, W.H., 2003. Ferrimagnetism and compensation points in a decorated 3d Ising models. **Physica A**, **328**: 185-192.

105. Albayrak, E., 2003. Mixed spin-1 and spin-3/2 Blume-Capel Ising ferrimagnetic system on the Bethe lattice, **International Journal Modern Physics B**, **17**: 1087-1100.
106. Ekiz, C., 2006. The possibility of two compensation points in a ferrimagnetic mixed spin-1 and spin-3/2 Ising system using Bethe lattice approach. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **307**: 139-147.
107. Liu, J., Zhang, Q., Yu, H., Sun, F., 2005. Magnetic properties of the Ising ferromagnetic iron nitride system, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **288**: 48-5.
108. Weng, X.M., Li, Z.Y., 1996. Transverse-random-field mixed ising model with arbitrary spins. **Physical Review B**, **53**: 12142-12147.
109. Iwashita, T., Satou R., Imada, T., Miyoshi, Y., Idogaki, T., 2001. Mixed ising spin system with higher-order spin interaction. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **226**: 577-578.
110. Li, J., Du, A., Wie, G., 2003. Green function study of a mixed spin-2 and spin-5/2 Heisenberg ferrimagnetic system on a honeycomb lattice, **Physiscs Status Solidi B**, **238**: 191-197.
111. Albayrak, E., Yigit, A., 2005. The critical behavior of the mixed spin-1 and spin-2 Ising ferromagnetic system on the bethe lattice. **Physica A**, **349**: 471-486.
112. Wie, G.-Z., Gu, Y.-W., Liu, J., 2006. Mean-field and Monte Carlo studies of a mixed spin-1 and spin-2 Ising system with different anisotropies. **Physical Review B**, **74**: 024422-024426.
113. Deviren, B., Ertaş, M., Keskin M., 2010. The effective-field theory studies of critical phenomena in a mixed spin-1 and spin-2 Ising model on honeycomb and square lattices. **Physica A**, **389**: 2036-2047.
114. Deviren, B., Bati, M., Keskin, M., 2009. The effective-field study of a mixed spin-1 and spin-5/2 Ising ferrimagnetic system. **Physica Scripta**, **79**: 065006-065009.
115. Deviren, B., Kantar, E., Keskin, M., 2010. Magnetic properties of a mixed spin-3/2 and spin-2 ising ferrimagnetic system within the effective-field theory. **Journal of Korean Physics Society**, **56**: 1738-1747.

116. Bobak, A., Dely, J., 2007. Phase transitions and multicritical points in the mixed spin-3/2 and spin-2 Ising system with a single-ion anisotropy. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **310**: 1419-1421.
117. Miao, H., Wei, G., Geng, J., 2009. Phase transitions and multicritical points in the mixed spin-3/2 and spin-2 Ising model with different single-ion anisotropies, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **321**: 4139-4144.
118. Albayrak, E., 2007. The critical and compensation temperatures for the mixed spin-3/2 and spin-2 Ising model. **Physica B**, **391**: 47-53.
119. Mathoniere, C., Nuttall, C.J., Carling, S.G., Day, P., 1996. Ferrimagnetic mixed-valency and mixed-metal Tris(oxalato)iron(III) compounds: synthesis, structure, and magnetism. **Inorganic Chemistry**, **35**: 1201-1206.
120. Kaneyoshi, T., Nakamura, Y., Shin, S., 1998. A diluted mixed spin-2 and spin-5/2 ferrimagnetic Ising system: a study of a molecular-based magnet. **Journal of Physics: Condensed Matter**, **10**: 7025-7035.
121. Nakamura, Y., Shin, S., Kaneyoshi, T., 2000. The effects of transverse field on the magnetic properties in a diluted mixed spin-2 and spin-5/2 Ising system. **Physica B**, **284**: 1479-1480.
122. Wie, G., Zhang, Q., Xin, Z., Liang, Y., 2004. Internal energy and initial susceptibility of mixed spin-2 and spin-5/2 ferrimagnetic Ising system with interlayer coupling. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **277**: 1-5.
123. Wei, G., Zhang, Q., Zhao, J., Gy, Y., 2004. Tricritical behavior of mixed spin-2 and spin-5/2 ferrimagnetic Ising system with interlayer coupling. **Physica B**, **381**: 1-6.
124. Nakamura, Y., 2000. Monte Carlo study of a mixed spin-2 and spin-5/2 Ising system on a honeycomb lattice. **Journal of Physics: Condensed Matter**, **12**: 4067-4074.
125. Nakamura, Y., 2000. Monte Carlo simulation of mixed $S = 2$ and $S = 5/2$ Ising system. **Progress of Theoretical Physics**, **138**: 466-467.
126. Li, J., Du, A., Wei, G., 2003. Green function study of a mixed spin-2 and spin-5/2 Heisenberg ferrimagnetic system on a honeycomb lattice. **Physica Status Solidi B**, **238**: 191-197.

127. Li, J., Du, A., Wei, G., 2003. Low-temperature properties of a mixed spin heisenberg ferrimagnetic system on a honeycomb lattice. **Physica Status Solidi B**, **240**: 610-617.
128. Yigit, A., Albayrak E., 2007. A bethe lattice study of the mixed spin-2 and spin-5/2 ising model. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **309**: 87-95.
129. Wiatrowskia, G., Baldomirb, D., Wardaa, K., Pereirob, M., Wojtczaka, L., Ariasb, J.E., 2004. Magnetisation depth profiles in trilayer systems with mixed-spin interfaces—a contribution to temperature dependent gmr-potentials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **277**: 285–292.
130. Jing-Guo, H. and Stamps, R.L., 2006. The rotational anisotropies in the ferromagnetism/antiferromagnetism 1/ antiferromagnetism 2 exchange bias structures. **Chinese Physics**, 1009-1963, 15(07), 1595-07.
131. Patrin, G.S., Lee, C.G., Koo, B.H., Shin, K., 2006. Peculiarities of temperature behavior of magnetization in Co/Ge/Co films. **Physics Letters A**, **359**: 149–152.
132. Albayrak, E., 2007. The ising model on a trilayer bethe lattice. **Physiscs Status Solidi B**, **244**: 759-774.
133. Deviren, B., Canko, O., Keskin, M., 2008. Effective-field theory of the Ising model with three alternative layers on the honeycomb and square lattices. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **320**: 2291-2299.
134. Albayrak, E., Aker, A., 2010. Sandwiched trilayer of bethe lattices in the form of spin-(1/2,1,1/2). **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **322**: 3281-3289.
135. Albayrak, E., Aker, A., 2010. The spin-(1, 1/2, 1) sandwiched trilayer bethe lattices. **Physica A**, **389**: 5677-5688.
136. Jurčišinová, E., Jurčišin, M., 2012. Critical temperatures of the ising model on the bethe lattice for arbitrary values of spin. **International Journal of Modern Physics B**, **26**: 01-120003.
137. Albayrak, E., Ak, F., 2012. Trilayer bethe lattices in the form of spin-(1/2,3/2,1/2). **Physica B**, **407**: 2642–2649.
138. Thota, S., Ghosh, S., Nayak, S., Joshi, D. C., Pramanik, P., Roychowdhury, K., Das, S., 2017. Finite-size scaling and exchange-bias in

- SrRuO₃/LaNiO₃/SrRuO₃ trilayers. **Journal of Applied Physics**, **122**: 124304.
139. Diaz, I.J.L., Branco, N.S., 2018. Ferrimagnetism and compensation temperature in spin-1/2 Ising trilayers. **Physica B: Physics of Condensed Matter**, **529**: 73–79.
140. Lv, D., Ma, Y., Jiang, W., Si, X., Gao W., 2018. Magnetic and thermodynamic properties of a ferromagnetic mixed-spin (1/2, 1, 3/2) three-layer film superlattice. **Superlattices and Microstructures**, **119**: 46-58.
141. Sajid, S., Acharyya, M., 2019. Compensation in the spin-1/2 site diluted Ising ferrimagnet: a Monte Carlo study. **Phase Transition**, **93**: 1-12.
142. Chandra, S., Acharyya, M., 2020. A monte carlo study on the variation of residual magnetisation with the ratio of coupling strengths and non-magnetic impurities in an ising trilayer. **AIP Conference Proceedings**, **2220**: 130037.
143. Diaz, I.J.L., Branco, N.S., 2020. Compensation temperature in spin-1/2 ising trilayers: A Monte Carlo study. **Physica A**, **540**: 123014.
144. Santos, J.P., Francisco, R.M., Mendes, R.G.B., 2020. Susceptibility and magnetic properties of a trilayer ising nanostructure: An effective-field theory. **Physica B**, **597**: 412419.
145. Chandra, S., 2021. Thermodynamic behaviour of magnetocaloric quantities in spin-1/2 Ising square trilayer. **The European Physical Journal B**, **94**: 13.
146. Chandra, S., 2021. Compensation and its systematics in spin-1/2 Ising trilayered triangular ferrimagnet. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, **156**: 110165.
147. Boubekri, A., Elmaddahi, Z., Farchakh, A., El Hafidi, M., 2022. Critical and compensation temperature in a ferrimagnetic mixed spin Ising trilayer nano-graphene superlattice. **Physica B**, **626**: 413526.
148. An, Y., Wang, W., Sun, L., Li, B., 2022. Study on compensation behaviors and hysteresis characteristics of a graphene-like trilayer with sandwich structure. **Micro and Nanostructures**, **171**: 207429.
149. Farchakh, A., Elmaddahi, Z., El Hafdi, M., 2023. Magnetic modeling of a straight triangular single-walled nanotube with mixed spins (1/2, 1). **Journal of Low Temperature Physics**, **210**: 406–425.

150. Chandra, S. 2023. Effects of site dilution on compensation in ising spin-1/2 trilayered triangular ferrimagnets with non-equivalent planes. **Physica A**, **619**: 128737.
151. Kantar E., and Ertas M., 2023. Dynamic study of a ternary trilayer Ising system with crystal field interaction. **The European Physical Journal Plus**, **138**: 509.
152. Glauber, R.J., 1963. Time-dependent statistics of the ising model. **Journal of Mathematical Physics**, **4**: 294-307.
153. Tome, T., Oliveira, M.J., 1990. Dynamic phase transition in the kinetic Ising model under a time-dependent oscillating field. **Physical Review A**, **41**: 4251- 4254.
154. Mendes, J.F.F., Lage, E.J.S., 1991. Dynamics of the infinite ranged potts model. **Journal of Statistical Physics**, **64**: 653-672.
155. Acharyya, M., 1997. Nonequilibrium phase transition in the kinetic Ising model: critical slowing down and the specific-heat singularity. **Physical Review E**, **56**: 2407-2411.
156. Chatterjee, A., Chakrabarti, B.K., 2003. Fluctuation cumulant behavior for the field pulse-induced magnetization-reversal transition in Ising models. **Physical Review E**, **67**: 046113-1-046113-5.
157. Sides, S.W., Rikvold, P.A., Novotny, M.A., 1998. Kinetic Ising model in an oscillating field: finite-size scaling at the dynamic phase transition. **Physical Review Letters**, **81**: 834-837.
158. Sides, S.W., Rikvold, P.A., Novotny, M.A., 1999. Kinetic Ising model in an oscillating field: avrami theory for the hysteretic response and finite-size scaling for the dynamic phase transition. **Physical Review E**, **59**: 2710- 2729.
159. Korniss, G., White, C.J., Rikvold, P.A., Novotny, M.A., 2001. Dynamic phase transition, universality, and finite-size scaling in the two-dimensional kinetic Ising model in an oscillating field. **Physical Review E**, **63**: 16120-16134.
160. Korniss, G., Rikvold, P.A., Novotny, M.A, 2002. Absence of first-order transition and tricritical point in the dynamic phase diagram of a spatially extended bistable system in an oscillating field. **Physical Review E**, **66**: 56127-56138.
161. Chakrabarti, B.K., Acharyya, M., 1999. Dynamic transitions and hysteresis. **Reviews of Modern Physics**, **71**: 847-859.

162. Godoy, M., Figueiredo, W., 2004. Kinetic phase transition in the mixed-spin Ising model. **Brazilian Journal of Physics**, **34**: 422-424.
163. Krawiecki, A., 2005. Dynamical phase transition in the Ising model on a scale-free network. **International Journal of Modern Physics B**, **19**: 4769-4776.
164. Zimmer, M.F., 1993. Ising model in an oscillating magnetic field: mean-field theory, **Physical Review E**, **47**: 3950-3955.
165. Acharyya, M., Chakrabarti, B.K., 1995. Response of Ising systems to oscillating and pulsed fields: hysteresis, ac, and pulse susceptibility. **Physical Review B**, **52**: 6550-6568.
166. Acharyya, M., 1998. Nonequilibrium phase transition in the kinetic ising model: is the transition point the maximum lossy point. **Physical Review E**, **58**: 179-186.
167. Fujisaka, H., Tutu, H., Rikvold, P.A., 2001. Dynamic phase transition in a time-dependent ginzburg-landau model in an oscillating field. **Physical Review E**, **63**: 36109-36120.
168. Tutu, H., Fujiwara, N., 2004. Landau theory of dynamic phase transitions and systematic perturbation expansion method for getting phase diagrams. **Journal of the Physical Society of Japan**, **73**: 2680-2696.
169. Khorrami, M., Aghamohammadi, A., 2002. Dynamical phase transition of a one-dimensional kinetic Ising model with boundaries. **Physical Review E**, **65**: 56129-56134.
170. Keskin, M., Canko, O., Temizer, Ü., 2005. Dynamic phase transition in the kinetic spin-1 Blume-Capel model under a time-dependent oscillating external field. **Physical Review E**, **72**: 36125-36134.
171. Keskin, M., Canko, O., Temizer, Ü., 2007. Dynamic phase transition in the kinetic spin-1 Blume-Capel model: phase diagrams in the temperature and crystal-field interaction plane. **Journal of Experimental and Theoretical Physics**, **104**: 936-942.
172. Keskin, M., Canko, O., Kantar, E., 2006. Dynamic dipole and quadrupole phase transitions in the kinetic spin-1 model. **International Journal of Modern Physics C**, **17**: 1239-1255.

173. Keskin, M., Canko, O., Temizer, Ü., 2006. Dynamic phase transition in the kinetic Blume-Emery-Griffiths model in an oscillating external field. **International Journal of Modern Physics C**, **17**: 1717-1737.
174. Keskin M., Temizer, Ü., Canko, O., Kantar, E., 2007. Dynamic phase transition in the kinetic Blume-Emery-Griffiths model: phase diagrams in the temperature and interaction parameters planes. **Phase Transition**, **80**: 855-866.
175. Keskin, M., Canko, O., Deviren, B., 2006. Dynamic phase transition in the kinetic spin-3/2 Blume-Capel model under a time-dependent oscillating external field. **Physical Review E**, **74**: 11110-11119.
176. Keskin, M., Canko, O., Deviren, B., 2007. Dynamic phase transition in the kinetic spin-3/2 Blume-Capel model phase diagrams in the temperature and crystal-field interaction plane. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **313**: L1-L5.
177. Keskin, M., Canko, O., Kirak, M., 2007. Dynamic dipole and quadruple phase transition in the kinetic spin-3/2 model. **Journal of Statistical Physics**, **127**: 359-380.
178. Canko, O., Deviren, B., Keskin M., 2006. Dynamic phase transition in the spin-3/2 Blume-Emery-Griffiths model in an oscillating field. **Journal of Physics: Condensed Matter**, **18**: 6635-6653.
179. Keskin, M., Deviren, B., Canko, O., Kirak M., 2007. Dynamic phase transition in the kinetic spin-3/2 Blume-Emery-Griffiths model: phase diagram in the temperature and interaction parameters planes. **Acta Physica Polonica B**, **38**: 2445-2457.
180. Keskin, M., Canko, O., Ertaş, M., 2007. Kinetics of the Spin-2 Blume-Capel model under a time-dependent oscillating external field. **Journal of Experimental and Theoretical Physics**, **105**: 1190-1197.
181. Ertaş, M., Canko, O., Keskin, M., 2008. Dynamic phase transition in the kinetic spin-2 Blume-Emery-Griffiths model in an oscillating field. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **320**: 1765-1774.
182. Deviren, B., Keskin, M., Canko, O., 2009. Dynamic phase transition and dynamic phase diagrams in the spin- 5/2 Blume-Capel model under a time-dependent oscillating external field. **Phase Transtions**, **82**: 683-698.

183. Keskin, M., Ertaş, M., 2010. Dynamic phase transition in the kinetic spin-5/2 Blume-Emery-Griffiths model in an oscillating external magnetic field. **Phase Transition**, **83**: 349-367.
184. Jang, H., Grimson, M.J., 2001. Hysteresis and the dynamic phase transition in thin ferromagnetic films. **Physical Review E**, **63**: 066119-066128.
185. Jang, H., Grimson, M.J., Hall, C.K., 2003. Dynamic phase transitions in thin ferromagnetic films. **Physical Review B**, **67**: 094411-094421.
186. Jang, H., Grimson, M.J., Hall, C.K., 2003. Exchange anisotropy and the dynamic phase transition in thin ferromagnetic heisenberg films. **Physical Review E**, **68**: 046115-046119.
187. Huang, Z., Chen, Z., Zhang, F., Du, Y., 2005. Dynamic phase transition in the heisenberg model under a time-dependent oscillating field. **Physics Letters A**, **338**: 485-493.
188. Machado, E., Buendía, G. M., Rikvold, P. A., Ziff, R. M., 2005. Response of a catalytic reaction to periodic variation of the co pressure: increased CO₂ production and dynamic phase transition. **Physical Review E**, **71**: 016120-016126.
189. Yasui, T., Tutu, H., Yamamoto, M., Fujisaka, H., 2002. Dynamic phase transitions in the anisotropic XY Spin System in an oscillating magnetic field. **Physical Review E**, **66**: 036123-036140.
190. Yasui, T., Tutu, H., Yamamoto, M., Fujisaka, H., 2003. Erratum: Dynamic phase transitions in the anisotropic xy spin system in an oscillating magnetic field. **Journal of the Physical Society of Japan**, **67**: 019901-019905.
191. Shi, X.L., Wei, H.L., 2010. Effective-field theory on the transverse ising model under a time oscillating longitudinal field. **Physics Letters A**, **374**: 1885-1888.
192. Deviren, B., Canko, O., Keskin, M., 2010. Kinetic ising model in a time-dependent oscillating external magnetic field: Effective-field theory. **Chinese Physics B**, **19**: 050518.
193. Shi, X.L., Wei, G.Z., Li, L., 2008. Effective-field theory on the kinetic ising model. **Physics Letters A**, **372**: 5922-5927.

194. Shi, X.L., Wei, G.Z., 2010. Effective-field theory on the transverse ising model under a time oscillating longitudinal field. **Physics Letters A**, **374**: 1885-1888.
195. Jiang, Q., Yang, H.N., Wang, G.C., 1995. Scaling and dynamics of low-frequency hysteresis loops in ultrathin co films on a Cu (001) surface. **Physical Review B**, **52**: 14911-14916.
196. Jiang, Q., Yang, H.N., Wang, G.C., 1996. Field dependent resonance frequency of hysteresis loops in a few monolayer thick Co/Cu(001) films. **Journal of Applied Physics**, **79**: 5122-5124.
197. Kleemann, W., Braun, T., Dec, J., Petravic, O., 2005. Dynamic phase transitions in ferroic systems with pinned domain walls. **Phase Transitions**, **78**: 811-816.
198. Samoilenko, Z.A., Okunev, V.D., Pushenko, E.I., Isaev, V.A., Gierlowski, P., Kolwas, K., Lewandowski, S.J., 2003. Dynamic phase transitions in amorphous YbaCuO films under ar laser irradiation. **Inorganic Materials**, **39**: 836-842.
199. Oliviero, C., Coppola, L., Gianferri, R., Nicotera, I., Olsson, U., 2003. Dynamic phase diagram and onion formation in the system C10E3/D2O. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, **228**: 85-90.
200. He, Y.L., Wang, G.C., 1993. Observation of dynamic scaling of magnetic hysteresis in ultrathin ferromagnetic Fe/Au(001) films. **Physics Review Letters**, **70**: 2336- 2339.
201. He, Y.L., Liew, Y.F., Wang, G.C., 1994. Growth and magnetic dynamic scaling of ultrathin ferromagnetic films Fe/Au(001). **Journal of Applied Physics**, **75**: 5580-5587.
202. Robb, D.T., Xu, Y.H., Hellwig, O., McCord, J., Berger, A., Novotny, M.A., Rikvold, P.A., 2008. Evidence for a dynamic phase transition in [Co/Pt]₃ magnetic multilayers. **Physical Review B**, **78**: 134422-134432.
203. Choi, B.C., Lee, W.Y., Samad, A., Bland, J.A.C., 1999. Dynamics of magnetization reversal in thin polycrystalline Ni₈₀Fe₂₀ films. **Physical Review B**, **60**: 11906-11909.
204. Yamauchi, T., Nakamura, A., Moritomo, Y., Hozumi, T., Hashimoto, K., Ohkoshi, S., 2005. Spectroscopic investigation of the dynamical behavior of

- the photoinduced phase transition of $\text{Na}_{0.6}\text{Co}_{1.3}[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. **Physical Review B**, **72**: 214425-214431.
205. Maeda, A., Togawa, Y., Kitano, H., 2002. An experimental approach to understand dynamical phase diagram of driven vortices of High-Tc superconductors, **Physica C**, **369**: 177-181.
206. Kanuga, K., Cakmak, M., 2007. Dynamic phase diagram derived from large deformation non-linear mechano-optical behavior of polyethylene naphthalate nanocomposites. **Polymer**, **48**: 7176-7192.
207. Néel, L., 1948. Magnetic Properties of ferrites: ferrimagnetism and antiferromagnetism. **Annals of Physics**, **3**: 137-98.
208. Mansiripur, M., 1987. Magnetization Reversal, Coercivity, and the process of thermomagnetic recording in thin films of amorphous rare earth-transition metal alloys. **Journal Applied Physics**, **61**: 1580-1587.
209. Mathoniere, C., Nuttall, C.J., Carling, S.G., Day, P., 1996. Ferrimagnetic mixed-valency and mixed-metal Tris(oxalato)iron(III) compounds: synthesis, structure, and magnetism. **Inorganic Chemistry**, **35**: 1201-1206.
210. Hernando, A., Kulik, T., 1994. Exchange interactions through amorphous paramagnetic layers in ferromagnetic nanocrystals. **Physical Review B**, **49**: 7064-7067.
211. Alex, M., Shono, K., Kuroda, S., Koshino, N., Ogawa, S., 1990. Ce-Substituted garnet media for magneto-optic recording. **Journal Applied Physics**, **67**: 4432-4434.
212. Shieh, H.P., Kryder, M.H., 1986. Magneto-optic recording materials with direct overwrite capability. **Applied Physics Letters**, **49**: 473-474.
213. Connell, G., Allen, R., Mansuripur, M., 1982. Magneto-Optical Properties of Amorphous Terbium– Iron Alloys. **Journal Applied Physics**, **53**: 7759-7761.
214. Ostoréro, J., Escorne, M., Percheron-Guégan, A., Soulette, F., Le Gall, H., 1994. $\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ garnet thin films grown from sputtering of metallic targets. **Journal Applied Physics**, **75**: 6103-6105.
215. Godoy, M., Leite, V.S., Figueiredo, W., 2004. Mixed-spin Ising model and compensation temperature. **Physical Review B**, **69**: 054428–054434.

216. Keskin, M., Ertaş, M., 2010. Mixed-spin Ising model in an oscillating magnetic field and compensation temperature. **Journal of Statistical Physics**, **139**: 333–344.
217. Figueiredo, W., Godoy, M., Leite, V. S., 2004. Compensation temperature of the mixed-spin Ising model on the hexagonal lattice. **Brazilian Journal of Physics**, **34**: 392–394.
218. Deviren, B., Keskin, M., 2010. Dynamic phase transitions and compensation temperatures in a mixed spin-3/2 and spin-5/2 Ising system, **Journal of Statistical Physics**, **140**: 934–947.
219. Keskin, M., Deviren, B., Canko, O., 2009. Dynamic compensation temperature in the mixed spin-1/2 and spin-3/2 Ising model in an oscillating field on alternate layers of hexagonal lattice. **IEEE Transactions on Magnetics**, **45**: 2640–2643.
220. Korkmaz, T., Temizer, Ü., 2012. Dynamic compensation temperature in the mixed spin-1 and spin-2 Ising model in an oscillating field on alternate layers of a hexagonal lattice. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **324**: 3876–3886.
221. Keskin, M., Ertaş, M., 2009. Existence of a dynamic compensation temperature of a mixed spin-2 and spin-5/2 Ising ferrimagnetic system in an oscillating field. **Physical Review E**, **80**: 061140–061150.
222. Keskin, M., Kantar, E., 2010. Dynamic compensation temperatures in the mixed spin-1 and spin-3/2 Ising system under a time-dependent oscillating magnetic field. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **322**: 2789–2796.
223. Chern, G., Horng, L., Shieh, W.K., Wu, T.C., 2001. Antiparallel state, compensation point, and magnetic phase diagram of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Mn}_3\text{O}_4$ superlattices. **Physical Review B**, **63**: 094421–094426.
224. Kageyama, H., Khomskii, D.I., Levitin, R.Z., Vasil'ev, A.N., 2003. Weak ferrimagnetism, compensation point and magnetization reversal in $\text{Ni}(\text{HCOO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Physical Review B**, **67**: 224422–224429.
225. Kozan, A., Ertaş M., 2023. Kinetic study on sandwiched trilayer with square lattices in the form of mixed spin-(1/2, 1, 1/2). **The European Physical Journal Plus**, **138**: 727–738.

EKLER

EK 1.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ali KOZAN
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti (TC)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik / ERZURUM	2014
Lise	Serik Lisesi / ANTALYA	2007

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Kozan A. ve Ertaş M. (2023). “Kinetic study on sandwiched trilayer with square lattices in the form of mixed spin-(1/2, 1, 1/2)”, **The European Physical Journal Plus**, cilt.138, sa.8.