

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MANYETİK ERICSSON VE BRAYTON SOĞUTMA ÇEVİRİMLERİNİN**  
**PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makina Müh. Yunus Emre ÇETİN**

**OCAK 2014**  
**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MANYETİK ERICSSON VE BRAYTON SOĞUTMA ÇEVİRİMLERİNİN  
PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ**

**Makina Müh. Yunus Emre ÇETİN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31.12.2013  
Tezin Savunma Tarihi : 31.01.2014**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan AYDIN**

**Trabzon 2014**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında**

**Yunus Emre ÇETİN Tarafından Hazırlanan**

**MANYETİK ERICSSON VE BRAYTON SOĞUTMA ÇEVİRİMLERİNİN  
PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 14/01/2014 gün ve 1537 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Orhan AYDIN**

  
.....

**Üye : Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI**

  
.....

**Üye : Doç. Dr. Emin BACAĞSIZ**

  
.....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Dünyadaki soğutma ihtiyacı her geçen gün artmakta ve soğutma pazarı da bu oranda büyümeye devam etmektedir. Küresel ısınma, sürekli artan enerji ihtiyacı nedeniyle enerjiyi daha verimli kullanma kaygıları, gelişmekte olan ülkelerde artan gelir düzeyinin getirdiği konfor arayışı sektörün büyümesine devam edeceğini göstermektedir. Tüm bu nedenlerden ötürü, buhar sıkıştırımlı sistemlerden daha verimli ve çevreye daha duyarlı soğutma teknolojileri konusunda yapılan çalışmalar oldukça önemli konuma gelmiştir. Termoelektrik, termoakustik, absorpsiyon, adsorpsiyon ve manyetik soğutma teknolojileri üzerinde çalışılan yeni teknolojiler olarak öne çıkmaktadırlar. Manyetik soğutma, bunlar arasında en umut veren teknolojidir. Bu sebeple manyetik soğutma konusu üzerine yapılacak disiplinler arası çalışmalar bu alandaki bilgi birikimi ve teknoloji üretimine önemli katkıda bulunacaktır.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, manyetik soğutma sistemleri ile ilgili termodinamik çevrimler parametrik olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma, manyetik soğutma sistemlerine etki eden temel fonksiyonların daha iyi anlaşılacak yapılacak deneysel çalışmalara ışık tutmaktadır.

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi, birikim ve tecrübesinden tereddütsüz istifade etmemi sağlayan, çalışmam sırasında desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Orhan AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Öte yandan, hayatımın her safhasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve varlığıyla beni motive eden oğlum ve eşime tüm kalbi duygularıyla şükranlarımı sunarım.

Yunus Emre ÇETİN  
Trabzon 2014

## **TEZ BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Manyetik Ericsson ve Brayton Soğutma Çevrimlerinin Parametrik Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Orhan AYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdığimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 31/01/2014

Yunus Emre ÇETİN

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Manyetokalorik Etki.....	2
1.3. Manyetokalorik Malzemeler.....	5
1.3.1. Gadolinyum.....	6
1.3.2. LaFe <sub>13-x</sub> Si <sub>x</sub> H <sub>y</sub> İntermetalikleri.....	9
1.3.3. MnAs Bileşikleri.....	9
1.4. Manyetik Alan Kaynakları.....	10
1.5. Manyetik Soğutma Prototipleri.....	11
1.5.1. Piston Hareketine Göre Çalışan Prototipler.....	13
1.5.2. Dönme Hareketine Göre Çalışan Prototipler.....	14
1.6. Termodinamik Analiz.....	16
1.6.1. Maxwell Bağlıntıları.....	17
1.6.2. Özgül Isı.....	19
1.6.3. İzotermal ve Adyabatik (De) Manyetizasyon.....	20
1.6.4. Manyetokalorik Etkinin Ölçülmesi.....	20
1.7. Manyetik Soğutma Çevrimleri.....	22
1.7.1. Carnot Çevrimi.....	22
1.7.2. Brayton Çevrimi.....	24
1.7.3. Ericsson Çevrimi.....	25
1.7.4. AMR-Aktif Manyetik Rejeneratör Çevrimi.....	26
1.8. Literatür Araştırması.....	30

1.9.	Tezin Amacı ve Kapsamı .....	33
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	35
2.1.	Manyetik Ericsson Çevrimi Analizi .....	36
2.2.	Manyetik Brayton Çevrimi Analizi .....	39
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	42
3.1.	Manyetik Ericsson Çevrim Parametrelerinin İncelenmesi .....	42
3.2.	Manyetik Brayton Çevriminin Parametrik Olarak İncelenmesi.....	45
4.	SONUÇLAR .....	49
5.	ÖNERİLER .....	50
6.	KAYNAKLAR.....	51
7.	EKLER .....	56
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MANYETİK ERICSSON VE BRAYTON SOĞUTMA ÇEVİRİMLERİNİN  
PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ

Yunus Emre ÇETİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Orhan AYDIN  
2014, 55 Sayfa, 6 Sayfa Ek

Manyetik soğutma, buhar sıkıştırımlı soğutma sistemlerine göre daha verimli ve çevreci yeni bir soğutma teknolojisidir. Oda sıcaklığında çalışan manyetik soğutma sistemleri henüz ticarileşmemiş olsa da manyetik soğutma birkaç yıl içerisinde klasik soğutma teknolojilerinin yerini alabilecek bir potansiyel barındırmaktadır. Manyetik soğutma sistemlerinin tasarımı için seçilecek termodinamik çevrim sistemin verimini doğrudan etkileyecek; bu da, daha kompakt ve ekonomik tasarımların oluşturulmasına fayda sağlayacaktır. Bu çalışmada, manyetik Ericsson ve Brayton çevrimleri parametrik olarak incelenmiştir. Termodinamik özellik bağıntıları istatistiksel mekanik yardımıyla oluşturulmuştur. Bağıntılar yüksek sıcaklık veya düşük manyetik alan değerleri dikkate alınarak sadeleştirilmiştir. Sadeleştirilen bağıntılarla düşük sıcaklık kaynağından alınan ısı, rejeneratörde biriken ısı, sıcak kaynağa verilen ısı, çevrim için gereken iş ve etkinlik katsayısı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlerin farklı kaynak sıcaklıkları, manyetik alan değerleri ve tersinmezlik derecelerindeki durumları incelenmiştir. Kaynaklar arası sıcaklık farkı arttıkça performans katsayısının azaldığı, Brayton çevriminde manyetik alan ve sıcak kaynak değeri arttıkça rejeneratörde biriken ısı değerinin arttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Manyetik soğutma, Manyetik soğutma çevrimleri, Paramanyetik malzemeler, İstatistiksel mekanik



Master Thesis

SUMMARY

PARAMETRIC INVESTIGATION OF MAGNETIC ERICSSON AND BRAYTON  
REFRIGERATION CYCLES

Yunus Emre ÇETİN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Orhan AYDIN  
2014, 55 Pages, 6 Pages Appendix

Magnetic refrigeration is more efficient and environmentally friendly refrigeration technology compared to vapor compression refrigeration systems. Although magnetic refrigeration systems which operate in room temperature has not been maturely developed, it has a potential to be a substitute for conventional refrigeration systems in a few years. The thermodynamic cycle which is selected for designing the magnetic refrigeration system will directly affect efficiency of the system, helping to create more compact and economic system designs. Parametric investigation is carried out for magnetic Ericsson and Brayton cycles. Thermodynamic relations are established by statistical mechanics. Relations are simplified by regarding to high temperature or low magnetic field conditions. Cooling load, inherent regenerative loss, power input and coefficient of performance (COP) are obtained with simplified relations. Influences of heat reservoirs, magnetic intensity and the degree of irreversibility are analyzed. Results show that coefficient of performance decreases with the increase of temperature span. Inherent regenerative loss increases with the increase of magnetic field strength and the temperature of hot reservoir for Brayton cycle.

**Key Words:** Magnetic refrigeration, Magnetic refrigeration cycles, Paramagnetic materials, Statistical mechanics

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Manyetokalorik ifadesinin geçtiği makale sayısı .....	2
Şekil 2. Manyetik alanın manyetik momente etkisi.....	3
Şekil 3. 0-2 T değerleri için Gd' da görülebilen sıcaklık ve entropi değişimi.....	4
Şekil 4. Gd için MKE'nin sıcaklık ve manyetik alana göre değişimi.....	5
Şekil 5. Gd için sıcaklık ve manyetik alana göre adyabatik sıcaklık farkı .....	7
Şekil 6. Gd için sıcaklık ve uygulanan manyetik alana göre izotermal entropi farkı.....	8
Şekil 7. Gd için özgül ısısının sıcaklık ve manyetik alana göre değişimi .....	8
Şekil 8. Manyetik ve buhar sıkıştırmalı çevrimlerin benzeşimi .....	12
Şekil 9. Piston hareketine göre çalışan bir manyetik soğutma sistemi .....	13
Şekil 10. Dönel tip bir manyetik soğutma mekanizması .....	14
Şekil 11. Oda sıcaklığında çalışan manyetik soğutucu prototip sayısının yıllara göre değişimi .....	15
Şekil 12. Oda sıcaklığında çalışan manyetik soğutucu ve ısı pompası patent sayıları .....	15
Şekil 13. Manyetik Carnot çevrimi.....	23
Şekil 14. Rejenerasyonlu manyetik Brayton çevrimi .....	24
Şekil 15. Manyetik Ericsson çevrimi.....	25
Şekil 16. Olası AMR yapıları: (a-c) Paralel plaka, (b) Gözenekli yapı .....	26
Şekil 17. Brayton çevrimini esas alan AMR soğutma sistemi. Kesikli çizgiler ilk, düz çizgiler son sıcaklık profilini göstermektedir .....	27
Şekil 18. AMR sistemlerinde kullanılacak bazı çevrimler için T-s diyagramları: (a) Brayton, (b) Ericsson, (c) Carnot, (d) Hibrit Brayton-Ericsson .....	28
Şekil 19. Farklı termodinamik çevrimler için manyetik alan ve aracı akışkan profilleri: (a) Brayton, (b) Ericsson, (c) Carnot, (d) Hibrit.....	30
Şekil 20. Rejenerasyonlu manyetik Ericsson çevrimine ait T-s diyagramı .....	37
Şekil 21. Rejenerasyonlu manyetik Ericsson çevrimine ait T-H diyagramı.....	37
Şekil 22. Manyetik Brayton çevrimine ait T-s diyagramı.....	39
Şekil 23. Farklı manyetik alan değerlerine göre T-s diyagramı.....	42
Şekil 24. Farklı sıcak kaynak ve manyetik alan değerlerinde rejeneratörde biriken ısının değişimi .....	43
Şekil 25. Farklı sıcak kaynak ve manyetik alan değerlerinde soğutulan ortamdan çekilen net ısının değişimi .....	44

Şekil 26.	Farklı sıcak kaynak ve manyetik alan değerlerinde performans katsayısının değişimi .....	45
Şekil 27.	Farklı tersinmezlik ve manyetik alan değerlerinde performans katsayısının değişimi .....	46
Şekil 28.	Farklı tersinmezlik ve manyetik alan değerlerinde soğuk ortamdan çekilen net ısının değişimi .....	47
Şekil 29.	Farklı tersinmezlik ve manyetik alan değerlerinde gerekli iş değerinin değişimi .....	47
Şekil 30.	Farklı tersinmezlik ve manyetik alan değerlerinde sıcak ortama atılan ısı değerinin değişimi.....	48

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Bazı MKM'lere ait özellikler.....	10

## SEMBOLLER DİZİNİ

### Kısaltmalar

AMR	Aktif manyetik rejeneratör
COP	Performans katsayısı
MKE	Manyetokalorik etki
MKM	Manyetokalorik malzeme

### Semboller

B	Manyetik akı yoğunluğu	Tesla
$B_J(x)$	Brillouin fonksiyonu	
$C_x$	Sabit x değerinde özgül ısı	J/kgK
D	Elektrik akı yoğunluğu	Coulomb/m <sup>2</sup>
E	Elektrik alanı	Volt/m
g	Lande sabiti	
H	Manyetik alan	Amper/m
J	Kuantum sayısı	
$k_B$	Boltzmann sabiti	
M	Manyetizasyon	Amper/m
$M_m$	Molar kütle	kg/mol
N	m <sup>3</sup> 'teki atom sayısı	1/m <sup>3</sup>
P	Basınç	Pa
R	Gaz sabiti	J/mol K
T	Mutlak sıcaklık	K
$T_C$	Curie sıcaklığı	K

### Yunan harfleri

$\lambda$	Curie sabiti	
$\gamma$	Elektron sabiti	J/molK
$\rho_V$	Elektrik yük yoğunluğu	Coulomb/m <sup>3</sup>
$\eta$	Verim	
$\mu$	Manyetik geçirgenlik	N/A <sup>2</sup>
$\mu_B$	Bohr manyetonu	J/T

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Endüstrileşme çağının başlangıcıyla beraber enerjiye olan bağımlılık ve ihtiyaç durmadan artmıştır. Bu enerjinin büyük bir kısmı kömür, petrol ve doğalgaz gibi karbon bazlı kaynaklardan karşılanmaktadır. Bu yakıtların kullanımı ile ortaya çıkan CO<sub>2</sub> in atmosferdeki miktarı son 200 yıl içinde %30 artmıştır (CHA, 2005). Bu oranın daha da artacağı tahmin edilmekte ve atmosferdeki CO<sub>2</sub> miktarının 2100 yılında endüstrileşme çağının öncesiyle karşılaştırılınca iki kat daha fazla olacağı tahmin edilmektedir (Miller, 2003). Bu gelişmeler hem çevreye daha duyarlı hem de daha verimli teknolojileri zorunlu kılmaktadır.

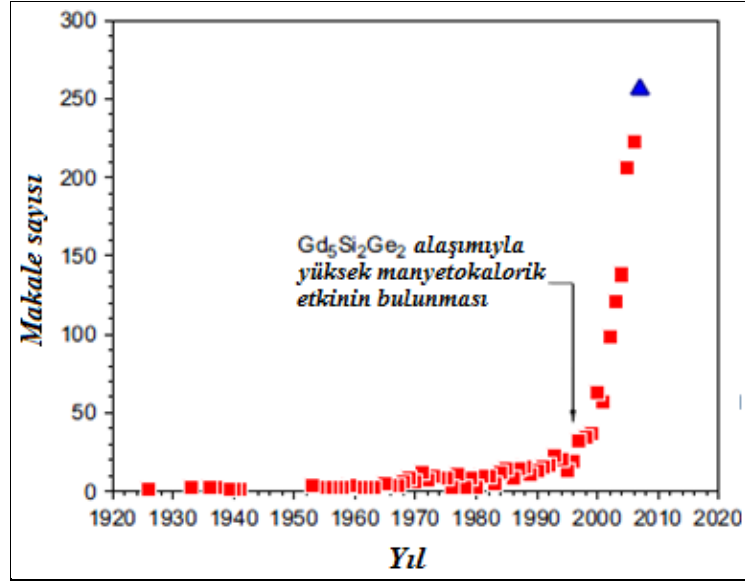
Soğutma teknolojileri günümüz dünyasının vazgeçilmez uygulamalarından birini oluşturmaktadır. Her yerde karşılaşılabileceğimiz buzdolabı ve iklimlendirme sistemlerinden gazların sıvılaştırılmasında kullanılan soğutma sistemlerine, soğutma teknolojilerinin pek çok uygulama alanı mevcuttur. Dünya enerji tüketiminin %15'i soğutmaya harcanmaktadır (Coulomb, 2007). Mevcut soğutma teknolojileri ile ilgili problemlerden biri kullanılan soğutucu akışkanların çevreye verdikleri zararlardır.

Kullanımları Kyoto protokolü ile sınırlandırılmış olan HFC, CFC, HCFC gazları, ozon tabakasına zarar vererek; sera etkisine sebep olmaktadır.

Soğutma teknolojileri, günümüzde buhar sıkıştırımlı sistemlere dayanmaktadır. Buhar sıkıştırımlı soğutma teknolojisi, 120 seneden bu yana kullanılmakta olup; oldukça gelişmiş ve birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır. Yukarıda da bahsedilen küresel ısınma, artan enerji tüketimi, çevre duyarlılığı ve benzeri nedenlerden ötürü, buhar sıkıştırımlı sistemlerden daha verimli ve çevreye daha duyarlı soğutma teknolojilerinin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Bu bağlamda, termoelektrik (Hongxia vd, 2007), termoakustik, absorpsiyon (Karamangil vd, 2010; Zhai vd, 2011), adsorpsiyon (Choudhury vd, 2010) ve manyetik soğutma teknolojileri üzerinde çalışılan yeni teknolojiler olarak öne çıkmaktadırlar.

Manyetik soğutma, bunlar arasında en umut veren teknolojidir. Bu teknoloji, ilk olarak kriyojenik sıcaklıklara ulaşılarak, nitrojenin ve diğer gazların sıvılaştırılmasında kullanılmıştır. Bu alanda elde edilen başarı, oda sıcaklığında yüksek manyetokalorik etki

gösteren malzemelerin de bulunmasıyla, manyetik soğutma teknolojisinin oda sıcaklıklarında kullanılması konusunda bilim insanlarını çalışmaya itmiştir (Brown, 1976; Pecharsky ve Gschneidner, 1997; Zimm vd, 2003; Yu vd, 2010). Şekil 1’de özellikle son 10 yılda bu alanda yayınlanan çalışma sayısındaki artış görülmektedir.



Şekil 1. Manyetokalorik ifadesinin geçtiği makale sayısı (Gschneidner ve Pecharsky, 2008).

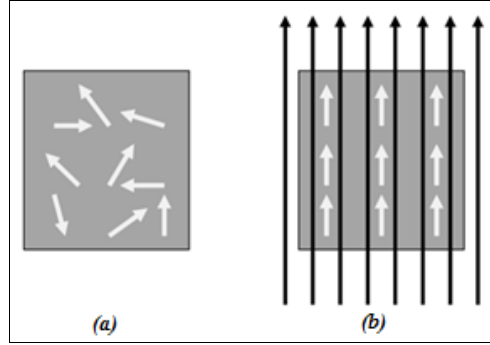
Manyetik soğutma, varlığı 1881 den beri bilinen manyetokalorik etki (magnetocaloric effect-MCE) ile bağıntılıdır. Manyetik soğutmada soğutma etkisi konvansiyonel sistemlerde soğutucu gazların sıkıştırma/genleşme etkisinden ayrı olarak çevreye zarar vermeyen katı soğutucuların manyetizasyon/demanyetizasyon işlemlerine tabi tutulmaları ile elde edilir. Manyetik soğutma çevrimi, kompresör ve kısılma vanalarına ihtiyaç duymaz. Bu etkiyi gösteren malzemeler manyetokalorik malzemeler (MKM) olarak adlandırılırlar. Manyetik soğutma sistemlerinin temel bileşenlerini manyetokalorik malzeme (MKM), mıknatıs ve ısı eşanjörleri oluşturmaktadır.

## 1.2. Manyetokalorik Etki

Manyetokalorik etki, manyetik malzemelerde manyetik alan etkisiyle gözlenen ısı emisyonu ve absorbesidir. Adyabatik bir sistemde manyetik alan, malzeme meydana

gelen iç enerji değişimlerinden ötürü ısınma ve soğuma etkilerine yol açabilir. Bununla beraber “manyetokalorik etki” ifadesi sadece malzemedeki sıcaklık değişimi olarak düşünülmemeli; ayrıca, manyetik alan etkisinde malzemenin manyetik durumundaki entropi değişimi olarak da ele alınmalıdır. Tishin ve Spichkin (2003), bu konuyu kitaplarında şu şekilde ele almaktadırlar:

“Manyetokalorik etkinin sebeplerini açıklamak için spinlerin yer aldığı, manyetik hal değişikliği sıcaklığı civarlarında paramanyetik veya ferromanyetik olan bir sistem düşünelim. Bu tür bir sistemin entropisi, sistemin manyetik durumu ve sistemin sıcaklığı olmak üzere iki değişkene bağlıdır. Sisteme manyetik bir alanın etki etmesi sistemin sıcaklıktan ötürü düzensiz olan manyetik momentlerinde ortak bir düzene yol açacak ve bunun sonucunda manyetik entropi azalacaktır. Eğer manyetik alan, adyabatik şartlar altında, çevreyle herhangi bir ısı transferi olmayacak şekilde uygulanırsa o halde sıcaklığa bağlı entropi sistemin toplam entropisi değişmeyecek şekilde artacaktır. Entropideki bu artış sistemin ısınmasına ve sıcaklığın artmasına neden olacaktır. Bu durumun tersi ise adyabatik şartlarda manyetik alan değerinde ilk hale dönülmesi (demanyetizasyon) manyetik sistemin soğumasına sebep olacaktır. Bu sıcaklık değişimleri manyetokalorik etkinin tanımını ortaya koyar.”



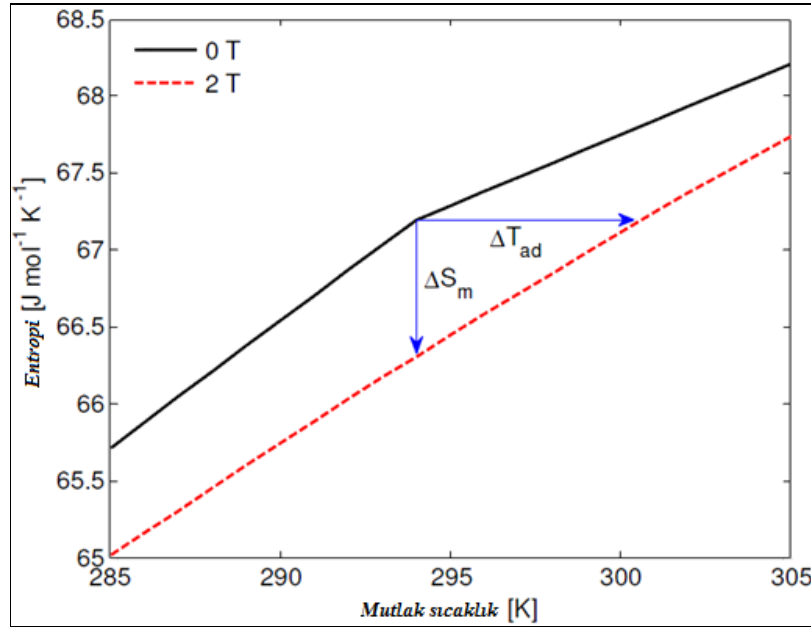
Şekil 2. Manyetik alanın manyetik momente etkisi

Manyetik alan bir malzemedeki manyetik momentlere Şekil 2’ de görüldüğü üzere etki edecek ve manyetik entropiyi azaltacaktır. Entropi kavramı ele alındığında düzensizliğin azalması ile beraber sıcaklığın artması, mantıksız görünebilir. Çünkü daha düzenli bir yapı daha düşük sıcaklık demektir. Fakat manyetik malzemenin toplam entropisinin kafes, serbest elektron ve manyetik entropiden oluştuğu gözönüne alınınca bu durum daha iyi anlaşılabilir:



$$S(T,H)=S_M(T,H)+S_K(T)+S_E(T) \quad (1)$$

Kafes ve serbest elektron entropileri manyetik alandan bağımsızdırlar. Fakat, manyetik entropi manyetik alan etkisiyle azalıp artabilir. Uygulanan manyetik alan değerinin artması ile ortaya çıkacak manyetik entropideki azalma eğer sistem adyabatik ise kafes entropisinde artış olarak görülür. Kafes entropisinin artışı, sıcaklığın da artması anlamına gelir. Manyetik bir malzemede manyetik alan etkisiyle görülen bu sıcaklık değişimi, manyetik soğutmanın arkasında yatan gerçektir.

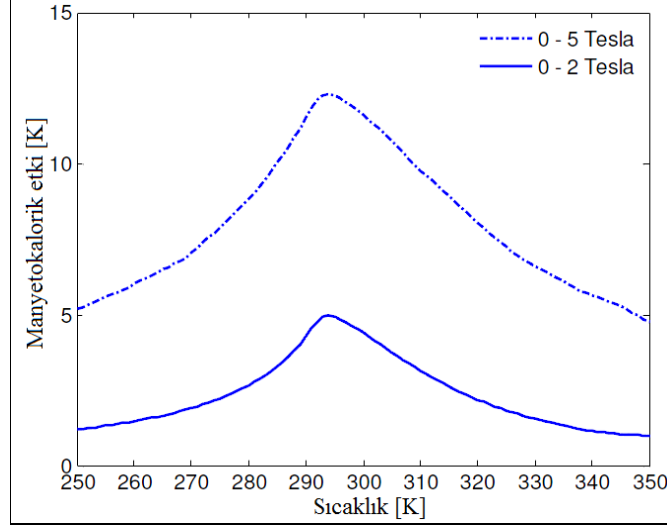


Şekil 3. 0-2 T değerleri için Gd' da görülebilen sıcaklık ve entropi değişimi (Burdyny, 2010).

Uygulanan farklı manyetik alan değerleri malzemede Şekil 3' de görülen biçimde entropi ve sıcaklık farklarına yol açacaktır. Manyetokalorik etkide dikkat edilmesi gereken ana parametreler şunlardır (Borbolla, 2012):

- Adyabatik sıcaklık farkı ( $\Delta T_{ad}$ ): Malzemenin adyabatik şartlar altında manyetizasyonu ve demanyetizasyonu sırasında görülen sıcaklık değişimidir. Bu değer, malzemenin ilk sıcaklığına ve uygulanan manyetik alan değerine bağlıdır.
- İzotermal entropi farkı ( $\Delta S_M$ ): İzotermal şartlar altında manyetizasyon ve demanyetizasyon işlemleri neticesinde görülen entropi farkıdır. Malzemenin ilk sıcaklığına ve uygulanan manyetik alan değerine bağlıdır.

- Curie sıcaklığı ( $T_C$ ): Ferromanyetik malzemelerin paramanyetik özellikler kazandığı sıcaklık değeridir. MKE Şekil 4’ te de görüldüğü üzere bu sıcaklıkta en yüksek değerdedir.



Şekil 4. Gd için MKE'nin sıcaklık ve manyetik alana göre değişimi (Burdyny, 2010).

En yüksek MKE değeri ferromanyetik fazdan paramanyetik faza geçilen sıcaklıkta görülmektedir (Tishin vd, 1994). Manyetik malzemelerin manyetik faz değişimi sıcaklığının (Curie sıcaklığı), malzemenin manyetik soğutma için uygun bir aday olarak öne çıkması açısından çalışılan soğutma sıcaklıklarına yakın olması gerekmektedir.

### 1.3. Manyetokalorik Malzemeler

Geniş sıcaklık aralıklarında yüksek MKE değerlerine sahip pek çok malzeme olmasına rağmen; malzeme konusundaki çalışmalar, manyetik soğutma çevrimleri ve tasarımları alanındaki çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça fazladır (Gschneidner ve Pecharsky, 2008)

Malzeme alanındaki yoğun çalışmalara rağmen şu ana kadar bu konuda kesin olarak belirli tip bir malzemenin üstünlüğünden bahsedilememektedir.

Daha önce de değinildiği gibi manyetokalorik etki iki parametre üzerinden tanımlanabilir: izotermal entropi farkı ( $\Delta S_M$ ) ve adyabatik sıcaklık farkı ( $\Delta T_{ad}$ ). Genelde,

$\Delta T_{ad}$  değeri manyetokalorik etkiyi tanımlamakta kullanılır. Bununla beraber manyetik alan farkı neticesinde ortaya çıkan entropi değişimi de her çevrimde ne kadar ısı yükü çekilebileceği konusunda bir fikir vermektedir.

Manyetokalorik malzemeler görülen manyetik hal değişimine göre temel olarak iki ana grupta ele alınabilirler (Nielsen, 2010).

**Birinci Dereceden Manyetik Hal Değişimi Gösteren Malzemeler:** Bu tip malzemelerde manyetik hal değişimi esnasında eş zamanlı olarak hem manyetik dipollerin yönelimi hem de kristal yapının değişimi görülür. Genelde termal ve manyetik histeri söz konusu olduğundan manyetokalorik etki saniyeler mertebesinde görülen bir süreçtir. Gizli ısının yer aldığı bu hal değişiminin bazı karakteristik özellikleri şöyledir:

- MKE dar bir sıcaklık aralığında yüksek değerde görülür (Pecharsky ve Gschneidner, 2006).

-  $\frac{\partial S}{\partial T}$  ve  $\frac{\partial M}{\partial T}$  değerleri ile bunlara bağlı olarak özgül ısı değeri Curie sıcaklığında sonsuzdur.

-Histeri görülür.

**İkinci Dereceden Manyetik Hal Değişimi Gösteren Malzemeler:** Malzemenin manyetik momentleri hal değişimi sırasında yönelir. Histeri etkisi ve kafes yapısında değişim görülmezken manyetokalorik etki mikrosaniyeler mertebesinde gerçekleşir. MKE daha geniş bir sıcaklık aralığında fakat daha düşük bir değerdedir.

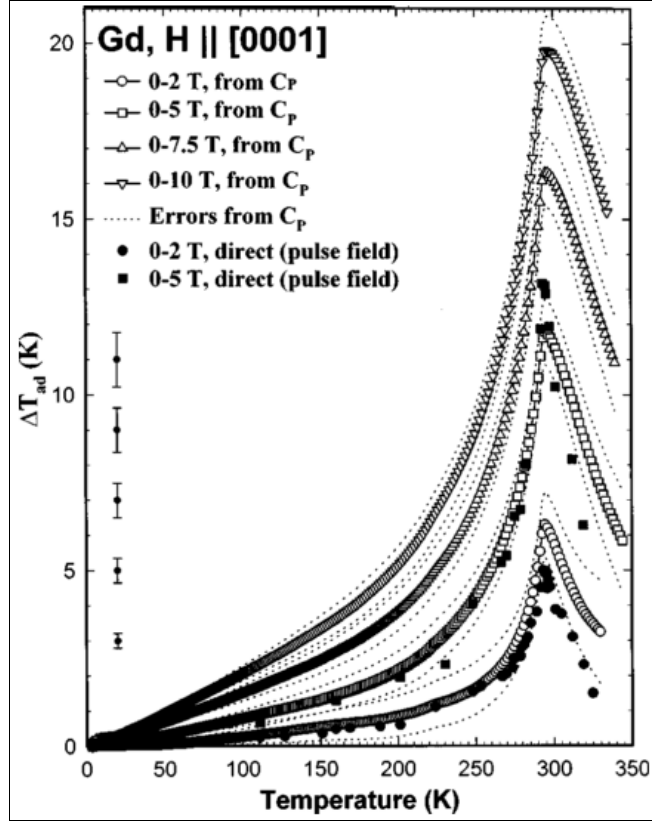
Malzeme alanındaki çalışmalar, özellikle yüksek MKE gösteren malzemelerin geliştirilmesi ve analizi konularında yoğunlaşmıştır. Manyetik soğutma alanında sürdürülen yoğun malzeme çalışmalarında öne çıkan malzemeler şunlardır:

### **1.3.1. Gadolinyum**

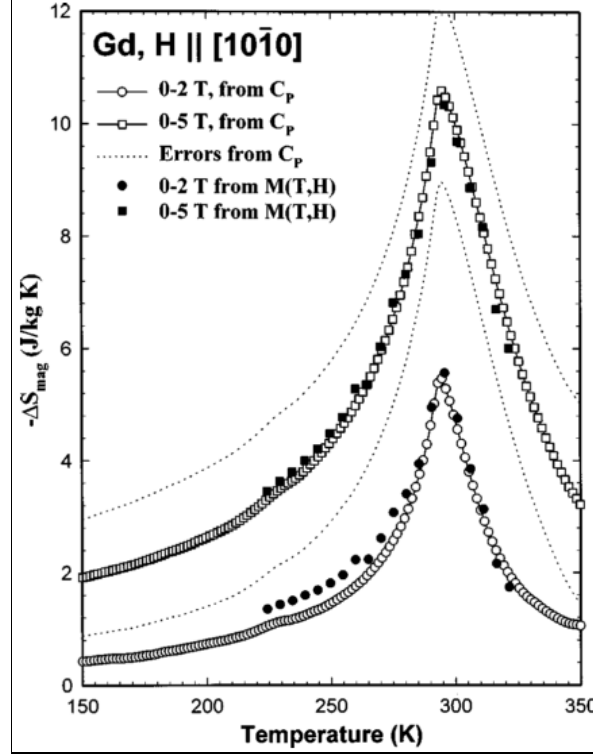
Curie sıcaklığı yaklaşık olarak 293 K olan gadolinyum manyetik soğutmada en sık karşılaşılan malzemedir. Gadolinyum oda sıcaklığı civarında Curie sıcaklığına sahip olan tek saf malzemedir ve ısı iletim katsayısı yaklaşık olarak 10 W/m·K dir. Bu özelliklerinden ötürü uygulamada en sık karşılaşılan ve şu ana kadar en fazla çalışılmış malzeme Gd' dir. (Dan'kov vd, 1998)

Gadoliniumun diğ er malzemelerle elde edilen alaşımları da farklı Curie sıcaklıklarına sahip malzemelerin elde edilmesinde kullanılabilir. (Pecharsky ve Gsdneidner, 1997; Engelbrecht vd, 2011; Shull vd, 2006)

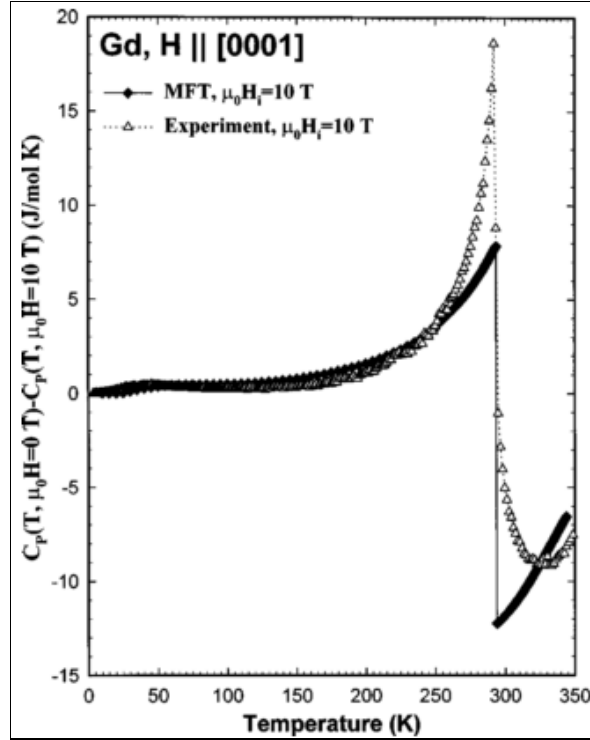
Gadolinium için Ő ekil 5 ve Ő ekil 6'da farklı manyetik alan değerlerinde ulaşılan adyabatik sıcaklık farkı ve izotermal entropi farkları görülebilir.



Ő ekil 5. Gd için sıcaklık ve manyetik alana göre adyabatik sıcaklık farkı (Dankov vd., 1998).



Şekil 6. Gd için sıcaklık ve uygulanan manyetik alana göre izotermal entropi farkı (Dankov vd., 1998).



Şekil 7. Gd için özgül ısısının sıcaklık ve manyetik alana göre değişimi (Dankov vd., 1998).

Şekil 7' de gadolinyum için farklı manyetik alan ve sıcaklık değerlerinde özgül ısının değişimi teorik ve deneysel sonuçlara bağlı olarak gösterilmektedir.

### 1.3.2. LaFe<sub>13-x</sub>Si<sub>x</sub>H<sub>y</sub> İntermetalikleri

Birinci dereceden manyetik hal değişiminin görüldüğü bu malzemelerde MKE, Gd' ye oranla daha yüksek görülmüş; bu etki, daha dar bir sıcaklık aralığında ortaya çıkmaktadır (Fujieda vd, 2003).

Alaşım oranlarına bağlı olarak Curie sıcaklığı 195-336 K arasında değişmektedir. Örneğin, La(Fe<sub>11.7</sub>Si<sub>1.3</sub>)H<sub>1.1</sub> için Curie sıcaklığı 287 K, 0-2 T değerleri arasında entropi farkı -28 J/kg.K ve adyabatik sıcaklık artışı 7.1 K dir. Bu tip malzemelerde ısı iletim katsayısı oda sıcaklığı civarlarında yaklaşık olarak 10 W/m·K değerindedir (Fujieda vd, 2003).

### 1.3.3. MnAs Bileşikleri

Yaklaşık 318 K Curie sıcaklığına sahip olan MnAs bileşiklerinde birinci dereceden manyetik hal değişimi görülür. Yüksek MKE görülen bu tip malzemelerde histeri etkisi malzemeleri manyetik soğutma için pek uygun kılmaz.

Adyabatik sıcaklık farkının az ve ısı iletim katsayısının gadolinyuma oranla düşük olması bu malzemelerin manyetik soğutmada kullanımını kısıtlamaktadır (Medeiros vd., 2010).

Tablo 1. Bazı MKM'lere ait özellikler

Malzeme	Hal değişim tipi	Curie sıcaklığı (K)	En yüksek $\Delta T_{ad}$ (K) değeri	En yüksek $\Delta S_M$ (J/Kg.K)	Kaynaklar
Gd	2. derece	293	6,3 (0-2T)	5,75 (0-2T)	(Dan'kov vd, 1998)
Gd <sub>0,74</sub> Tb <sub>0,26</sub>	2. derece	275	5.6 (0-2T)	6 (0-2T)	(Tishin ve Spichkin, 2003)
Gd <sub>0,9</sub> Dy <sub>0,1</sub>	2. derece	274	-	14 (0-9T)	(Tishin ve Spichkin, 2003)
Gd <sub>5</sub> Ge <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>	1.derece	273	7.5 (0-2T)	28 (0-2T)	(Pecharsky vd, 2003)
La(Fe <sub>0,9</sub> Si <sub>0,1</sub> ) <sub>13</sub> H <sub>1,1</sub>	1.derece	290	7 (0-2T)	30 (0-2T)	(Tishin ve Spichkin, 2003)
MnAs	1.derece	318	13 (0-5T)	35 (0-5 T)	(Medeiros vd, 2010)

Genel anlamda manyetik soğutma sistemlerinde kullanılacak MKM'lerde aranan temel özellikler şu şekilde sıralanabilir (Yu vd, 2003):

- Yüksek soğutma kapasitelerine ve geniş çalışma sıcaklıklarına uygun yüksek MKE'ye sahip olmaları.
- Yüksek çalışma frekanslarında soğutma kapasitesini etkilemeyecek düşük termal ve manyetik histeri etkisi.
- Yüksek özgül ısı.
- Rejeneratör verimini arttıran yüksek ısı iletim katsayısı.
- Yüksek elektrik direnci değeri.
- Üretim ve kolay işlenebilirlik için uygun mekanik özellikler.
- Ticarileşebilme ve rekabet için uygun fiyat.

#### 1.4. Manyetik Alan Kaynakları

Manyetik soğutmada önemli faktörlerden biri de manyetik alan kaynakları olan mıknatıslardır. Mıknatıslar klasik buhar sıkıştırmalı sistemlerde bulunan kompresör ile aynı öneme sahiptirler. Uygulanan manyetik alan değeri arttıkça oluşacak MKE de aynı oranda artacaktır böylece daha yüksek entropi veya sıcaklık farkları elde edilebilir.

En yüksek manyetik alan değerlerinin elde edildiği süper iletken mıknatıslar özellikle yüksek kapasiteli endüstriyel soğutma sistemleri için manyetik soğutma sistemlerinde kullanılabilir (Gschneidner ve Pecharsky, 2008). Süper iletken mıknatısların işlevlerini

yerine getirebilmek için sıvı helyum tarzı bileşenler gerektiğinden bu mıknatısların evsel uygulamalarda kullanılabilmesi pek mümkün görünmemektedir.

Manyetik soğutmanın özellikle evsel alanda kullanılabilmesi için süperiletken mıknatıslarda olduğu gibi ayrıca bileşenler gerektirmeyen ve onlar kadar güçlü kalıcı mıknatısların geliştirilmesi önemlidir. Özellikle son dönemde Nd-Fe-B kalıcı mıknatıslar ile yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Bu konudaki gelişmeler Bjork vd. (2010)'nin çalışmasında değerlendirilmektedir.

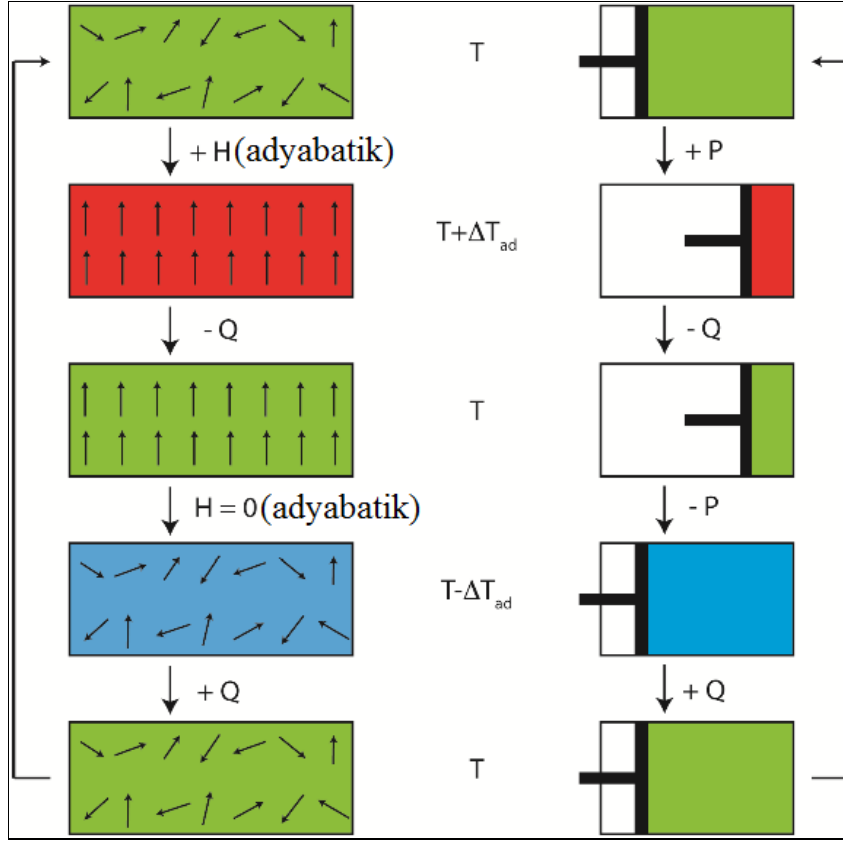
### **1.5. Manyetik Soğutma Prototipleri**

Manyetik soğutmada soğutma etkisi konvansiyonel sistemlerde soğutucu gazların sıkıştırma/genleşme etkisinden farklı olarak çevreye zarar vermeyen katı soğutucuların manyetizasyon/demanyetizasyon işlemlerine tabi tutulmaları ile elde edilir. Manyetik soğutma çevriminde sıkıştırma ve genleşme işlemleri yer almadığından kompresör ve kısılma vanalarına ihtiyaç duyulmaz. Bu durum klasik sistemlerle karşılaştırıldığında teorik açıdan daha verimli bir yapı anlamına gelir. Manyetik soğutma sistemlerinin verimi bir Carnot çevriminin %30-%60' ı kadarken (Zimm vd, 1998), buhar sıkıştırmalı çevrimlerde bu oran % 5-10 civarındadır.

Manyetik soğutma işleminin genel adımları buhar sıkıştırmalı sistemlerin işlem adımları ile Şekil 8'deki gibi benzeştirilebilir.

Buhar sıkıştırmalı sistemlerde sıkıştırma işlemi soğutucu akışkanın sıcaklığını artırır. Bu adım manyetik soğutmada malzemenin manyetize edilerek sıcaklığının artması ile eşleştirilebilir. Daha sonra, sıkıştırılmış soğutucu akışkan ısıyı sıcak kaynağa atar, ardından aynı akışkan genleşir ve sıcaklığı azalır. Bu adım ise ısının sıcak kaynağa atılmasından sonra demanyetizasyon sonucu manyetik malzemenin sıcaklığının azalması ile eş tutulabilir. Genleşen akışkan, soğuk kaynaktan tekrar ısı alır ve çevrim tamamlanır.

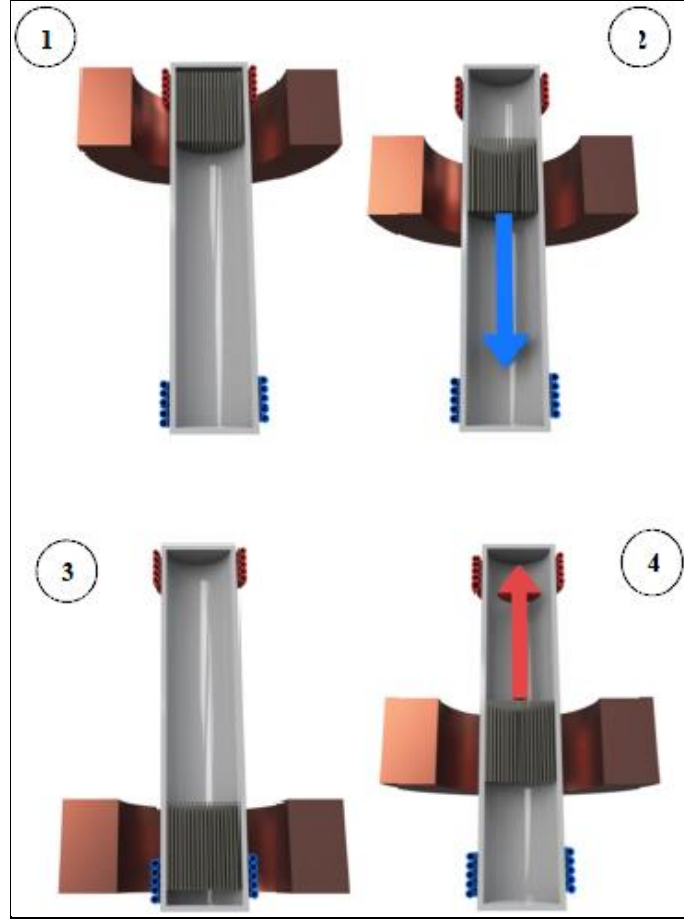




Şekil 8. Manyetik ve buhar sıkıştırımlı çevrimlerin benzeşimi (Burdyny, 2010).

Soğutma etkisinin devamlılığı için MKM en azından bir manyetik alana periyodik olarak girmelidir. Bunu gerçekleştirmek için piston veya dönme hareketini esas alan sistemler kullanılmaktadır ve manyetik soğutma prototipleri de bu şekilde sınıflandırılmaktadır (Yu vd., 2010). Her iki düzenlemenin de avantaj ve dezavantajları olmakla beraber piston hareketine bağlı olarak çalışan sistemler dönele sistemlerle karşılaştırıldıklarında daha zayıf kalmaktadırlar. Bu sebepten dolayı prototip çalışmaları özellikle dönele tip sistemler üzerinde yoğunlaşmıştır.

### 1.5.1. Piston Hareketine Göre Çalışan Prototipler

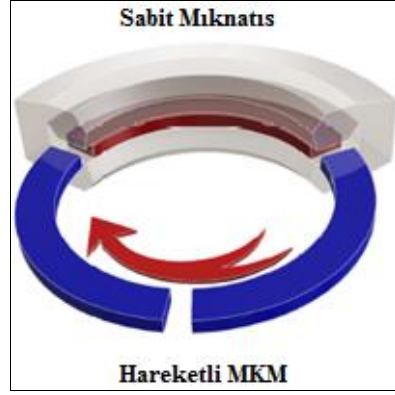


Şekil 9. Piston hareketine göre çalışan bir manyetik soğutma sistemi (Tura, 2013).

Oda sıcaklığında çalışan manyetik soğutma sistemlerinin ilk örneği Brown (1976, 1978) tarafından yapılmıştır. Üstteki şekilde çalışma prensibi verilen piston hareketine göre çalışan sistemde MKM olarak Gd, ısı transfer akışkanı olarak su alkol karışımı kullanılmaktadır. Ayrıca MKM, 7 T değerinde çalışan su soğutmalı bir elektromıknatıs ile manyetize edilmektedir.

Silindirik yapı içerisinde görülen manyetik soğutucu 1 mm kalınlığında paralel Gd plakalardan meydana gelmekte ve ısı transfer akışkanı (rejeneratör) içinde hareket etmektedir. Silindir yapının üst ve alt bölümlerinde görülen ısı eşanjörleri izotermal (de)manyetizasyonu sağlamakta, sabit manyetik alanda rejenerasyon ise MKM' nin piston içerisinde hareketi esnasında gerçekleşmektedir.

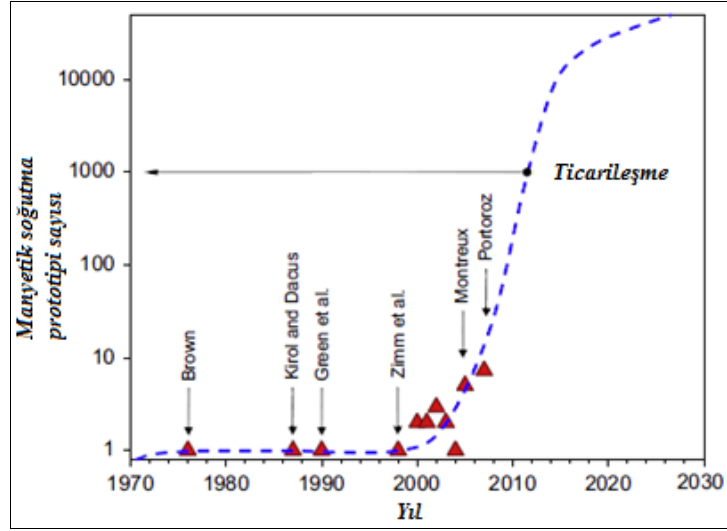
### 1.5.2. Dönme Hareketine Göre Çalışan Prototipler



Şekil 10. Dönel tip bir manyetik soğutma mekanizması (Tura, 2013).

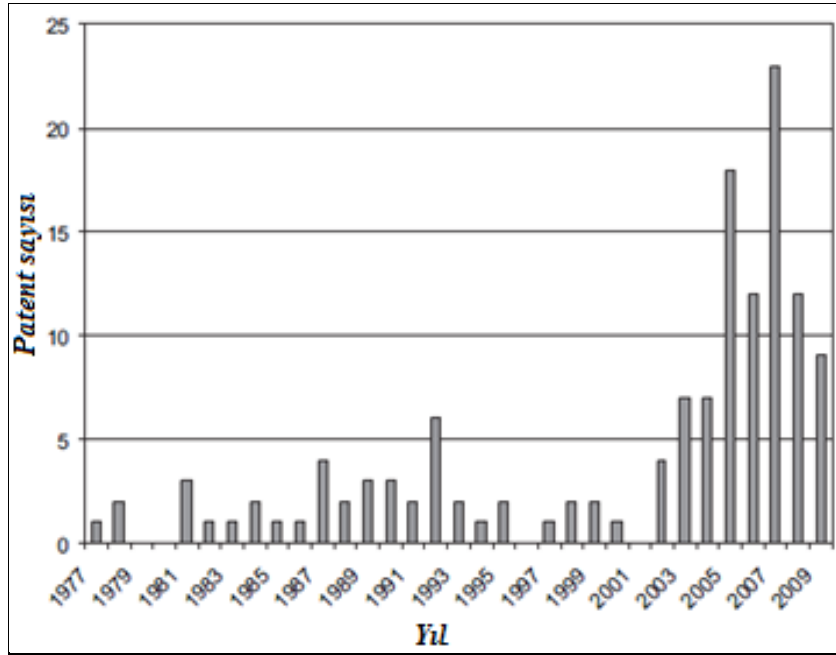
Dönel tip manyetik soğutucularda mıknatıs veya MKM sabit veya hareketlidir. Bu tip soğutucularda soğutma piston hareketine göre çalışan sistemlerden farklı olarak süreklilik arzeder.

Piston hareketine göre çalışan sistemler uygulaması daha kolay ve güvenilir olmasına rağmen yüksek frekanslara çıkılamaz ve verim dönel sistemlere oranla düşük olur. Bu tür sistemlerde çalışma frekansı 0.2-1 Hz arasındadır. Dönel tip manyetik soğutma sistemlerinde hareket doğası gereği daha dengeli ve stabil olduğundan atalet kuvvetleri daha az etkilidir, bu nedenle daha yüksek frekansta çalışan daha kompakt dolayısıyla daha verimli sistemler tasarlanabilir. Dönel tip manyetik soğutucular çok daha karmaşık yapıdadırlar. Pek çok dönel sistem 4, 8 hatta 10 Hz' de çalışabilmektedir (Yu vd., 2010).



Şekil 11. Oda sıcaklığında çalışan manyetik soğutucu prototip sayısının yıllara göre değişimi (Gschneidner ve Pecharsky, 2008).

1980'lerden sonra pek çok farklı tipte prototip geliştirilmiştir (Şekil 11) ve farklı dizayn ve soğutma güçleri yakalanmıştır. Ek-1' de (Tura, 2013) bu sistemlere ait detaylar görülebilir. Şekil 12'de manyetik soğutma ve ısıtma sistemleri üzerine alınan patent sayılarındaki artış görülmektedir.



Şekil 12. Oda sıcaklığında çalışan manyetik soğutucu ve ısı pompası patent sayıları (Yu, Liu, Egolf ve Kitanovski, 2010).

### 1.6. Termodinamik Analiz

Manyetokalorik etkiyi termodinamik olarak değerlendirmek için Maxwell denklemlerinin bilinmesi gerekir. Maxwell denklemleri, James Clerk Maxwell' in topladığı dört denklemlidir, elektrik ve manyetik özelliklerle, bu alanların maddeyle etkileşimlerini açıklayan bir settir (URL-1).

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_V \text{ (Gauss yasası)} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \text{ (Manyetizma için Gauss Yasası)} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \text{ (Faraday yasası)} \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \text{ (Ampere yasası)} \quad (5)$$

Bu denklemlerde,  $D$  (coulomb/m<sup>2</sup>), elektrik akı yoğunluğunu;  $\rho_V$  (coulomb/m<sup>3</sup>), elektrik yük yoğunluğunu;  $B$  (Tesla), manyetik akı yoğunluğunu;  $E$  (volt/metre), elektrik alanı;  $H$  (Amper/metre), manyetik alanı ve  $J$  (Amper/m<sup>2</sup>), akım yoğunluğunu göstermektedir.

Bu dört denklem sırasıyla, elektrik alanın elektrik yükler tarafından oluşturulduğunu (Gauss Yasası), manyetik yükün olmadığını (Manyetizma için Gauss Yasası), değişken manyetik alanın elektrik alan ürettiğini (Faraday Yasası) ve yüklerin ve değişken elektrik alanların manyetik alan ürettiğini (Ampere Yasası) gösterir (URL-2).

Mekanik olayların analizinde Newton yasalarının önemiyle, elektromanyetizmada Maxwell denklemlerinin önemi eşdeğerdir. Maxwell denklemlerinin anlaşılması manyetik indüksiyon veya manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ), manyetik alan ( $H$ ), manyetizasyon ( $M$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) kavramlarının birbirleriyle olan ilişkilerini ve bu kavramların kendilerini değerlendirmek açısından önemlidir.

$$B = \mu(H + M) \quad (6)$$

Termodinamiğin ilk yasasına göre,

$$\delta U = \delta Q + \delta W \quad (7)$$

Burada  $\delta U$  iç enerjideki değişimi,  $\delta Q$  sisteme giren veya sistemi terkeden ısıyı,  $\delta W$  ise sistem üzerinde yapılan işi veya sistemden elde edilen işi göstermektedir. Manyetik soğutucular genelde katı malzemeler olduklarından bundan sonraki tüm değerlendirmelerde  $p = \text{sabit}$ ,  $v = \text{sabit}$  olduğu unutulmamalıdır ve elde edilecek termodinamik bağıntılarda bu değişkenler yer almayacaktır.

Manyetik malzemede manyetik alan etkisiyle yapılan iş Maxwell denklemleri yardımıyla bulunabilir (Kitanovski ve Egolf, 2006).

$$\delta w = -\mu H \delta M \quad (8)$$

Ayrıca ikinci yasadın

$$\delta q = T \delta s \quad (9)$$

Sonuçta iç enerji için şu eşitlik kurulabilir.

$$\delta u = T \delta s - \mu H \delta M \quad (10)$$

Basit sıkıştırılabilir sistemler için yazılan iç enerji değeri de benzerdir ve manyetik sistemlerin karşılaştırmalı olarak kavranması açısından önemlidir.

$$\delta u = T \delta s - P \delta v \quad (11)$$

### 1.6.1. Maxwell Bağıntıları

Bu noktadan sonra Legendre dönüşümü (Arnold, 1980) ile elde edilecek farklı termodinamik potansiyeller yardımıyla Maxwell bağıntıları elde edilir (Kitanovski ve Egolf, 2006). Maxwell bağıntılarını, daha önce bahsedilen Maxwell denklemlerinden tamamen farklı ve bağımsız olarak ele almak gerekir.

Manyetik sistemler için elde ettiğimiz iç enerji eşitliği dışında diğer termodinamik potansiyeller entalpi, Helmholtz ve Gibbs enerjileri sırasıyla şu şekildedir:

$$h = Tds + \mu MdH \quad (12)$$

$$f = -sdT - \mu HdM \quad (13)$$

$$g = -sdT + \mu MdH \quad (14)$$

Yukarıda yazılan entalpi değeri, sınırları içerisinde iş yapılan açık bir sistemin durumunu belirten bir potansiyeldir. Helmholtz potansiyeli (bazı kaynaklarda Helmholtz enerjisi veya Serbest enerji) sistem sınırlarından dışarıya ısı akısı transferi gerçekleşen açık bir sistemi tanımlar son olarak Gibbs enerjisi sistem sınırları içinde iş yapılan ve sistem dışına ısı akısının olduğu durumları tanımlayan bir termodinamik potansiyeldir.

Manyetik bir sistem için elde edilen bu termodinamik potansiyeller yardımıyla bulunan Maxwell bağıntıları sırasıyla aşağıdaki gibidir ve bu bağıntılar MKE' nin görüldüğü uygulamalar için farklı eşitlikler kurmada kullanılacaktır.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial M}\right)_s = -\mu \left(\frac{\partial H}{\partial s}\right)_M \quad (15)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_s = \mu \left(\frac{\partial M}{\partial s}\right)_H \quad (16)$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial M}\right)_T = \mu \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_M \quad (17)$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial H}\right)_T = -\mu \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H \quad (18)$$

### 1.6.2. Özgül ısı

Özgül ısı bir maddenin birim kütesinin sıcaklığını bir derece arttırmak için gerekli enerji olarak tanımlanır ve genelde sabit hacim veya sabit basınçta özgül ısı olarak kullanılır. Manyetik soğutma sistemlerinde ise sabit manyetik alanda ve sabit sıcaklıkta özgül ısı tanımlanacaktır. MKE süresince ortaya çıkacak farklı alan ve sıcaklık değerleri özgül ısı değerini de değiştirecektir.

Özgül ısı tanımından

$$c_x = \left( \frac{\delta q}{dT} \right)_x \quad (19)$$

Termodinamiğin ikinci yasasından

$$ds = \delta q / T \quad (20)$$

$$c_H = T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_H \quad (21)$$

İzotermal durumda ise,

$$c_T = \left( \frac{\partial q}{\partial H} \right)_T \quad (22)$$

$$c_T = T \left( \frac{\partial s}{\partial H} \right)_T \quad (23)$$

İlgili Maxwell bağıntısı yardımıyla

$$c_T = -\mu T \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_H \quad (24)$$



### 1.6.3. İzotermal ve Adyabatik (De) Manyetizasyon

Manyetokalorik bir malzemede özgül entropi manyetik alan ve sıcaklığın kısmi türevleri cinsinden ifade edilebilir (Gomez vd., 2013).

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_H dT + \left(\frac{\partial s}{\partial H}\right)_T dH \quad (25)$$

Daha önce tanımlanan sabit manyetik alanda özgül ısı ve ilgili Maxwell bağıntısı yardımıyla özgül entropi değeri daha farklı bir hale getirilebilir.

$$ds = \left(\frac{c_H}{T}\right)dT - \mu\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H dH \quad (26)$$

Bu denklemde  $ds=0$  ve  $dT=0$  durumları için sırasıyla adyabatik sıcaklık farkı ( $\Delta T_{ad}$ ) ve izotermal entropi farkı ( $\Delta S_{izot}$ ) elde edilir:

$$\Delta T_{ad} = \mu \int_{H_0}^{H_1} \frac{T}{c_H} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H dH \quad (27)$$

$$\Delta S_{izot} = -\mu \int_{H_0}^{H_1} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H dH \quad (28)$$

### 1.6.4. Manyetokalorik Etkinin Ölçülmesi

Manyetokalorik etki neticesinde gözlemlenen adyabatik sıcaklık farkı  $\Delta T_{ad}$ , ortam sıcaklığı ve uygulanan manyetik alana bağlıdır.  $\Delta T_{ad}$  değeri deneysel veri tabloları veya moleküler alan teorisi (Morrish, 1965), (Tishin ve Spichkin, 2003) yardımıyla elde edilebilir. Manyetizasyon, özgül ısı gibi değerleri barındıracak deneysel veri tabloları birçok malzeme için detaylı bir şekilde bulunmayabilir. Bu durumda, moleküler alan teorisi hesaplamaları kullanılır.

Moleküler alan teorisine göre ferromanyetik bir malzeme için manyetizasyon şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$M(B, T) = Ng\mu_B J B_J(x) \quad (29)$$

Burada  $B_J(x)$  Brillouin fonksiyonudur.

$$B_J(x) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{x}{2J}\right) \quad (30)$$

$$x = g\mu_B J \frac{B+\lambda M}{k_B T} \quad (31)$$

$$\lambda = \frac{3k_B}{Ng^2\mu_B^2 J(J+1)} T_C \quad (32)$$

Bu denklemlerde;  $N$  ( $1/m^3$ ) her bir  $m^3$  teki atom sayısını,  $g$  Lande sabitini,  $\mu_B$  (J/T) Bohr manyetonu,  $J$  kuantumlu toplam açısıl momentumu,  $B$  (T) manyetik akı yoğunluğunu,  $\lambda$  Curie sabitini,  $M$  (A/m) manyetizasyonu,  $k_B$  (J/K) Boltzmann sabiti,  $T_C$  (K) Curie sıcaklığını göstermektedir.  $\lambda=0$  olduğu durumda, bu denklemler paramanyetik malzemeler için de geçerlidir.

Böylece iteratif bir yaklaşımla iki farklı manyetik alan değeri için manyetizasyon değeri elde edilebilir.

Manyetik alan teorisine göre manyetik bir malzemedeki entropi değeri için şu denklemler kullanılabilir.

$$s_M(B, T) = \frac{R}{M_m} \left[ \ln \frac{\sinh\left(\frac{2J+1}{2J}x\right)}{\sinh\left(\frac{x}{2J}\right)} - x B_J(x) \right] \quad (33)$$

$$s_E(T) = \frac{\gamma}{M_m} T \quad (34)$$

$$s_K(T) = \frac{NR}{M_m} \left[ -3 \ln \left( 1 - e^{-\frac{T_{De}}{T}} \right) + 12 \left( \frac{T_{De}}{T} \right)^3 \int_0^{\frac{T_{De}}{T}} \frac{z^3}{e^z + 1} dz \right] \quad (35)$$

$$S(T, H) = S_M(T, H) + S_K(T) + S_E(T) \quad (36)$$

Bu denklemlerde;  $R$  ( $\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) gaz sabiti,  $M_m$  ( $\text{kg/mol}$ ) molar kütle,  $\gamma$  ( $\text{J/K mol}$ ) elektron sabiti,  $N$  her bir moleküldeki atom sayısı,  $T_{De}$  Debye sıcaklığı ve  $z$  integrasyon değişkenidir.

Moleküler alan teorisine göre hesaplanan manyetizasyon ve toplam entropi farkı değerleri yardımıyla özgül ısı ve adyabatik sıcaklık farkları bulunur.

## 1.7. Manyetik Soğutma Çevrimleri

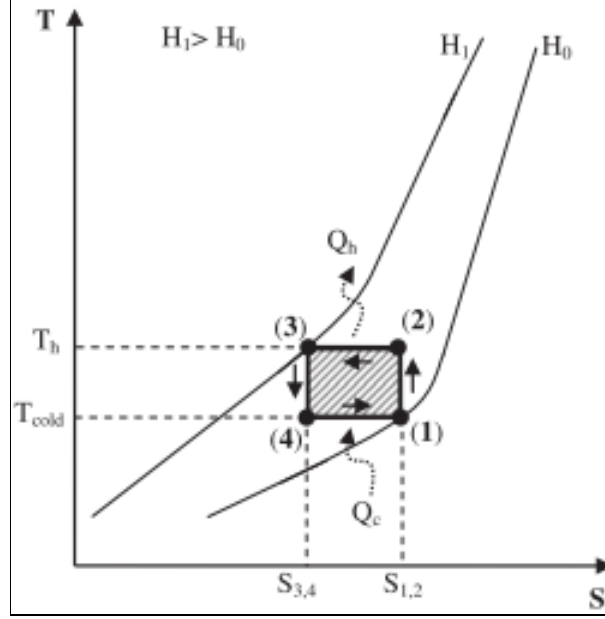
Manyetik soğutma sistemleri genel olarak soğutucu manyetik bir malzeme, manyetikleme-demanyetikleme işlemini yerine getirebilecek bir mıknatıs sistemi, sıcak ve soğuk kaynaklar (eşanjörler) ve ısı transferi için aracı bir akışkandan meydana gelirler. Aracı akışkan, soğutucu manyetik malzeme ve eşanjörler arasında ısı transferini gerçekleştirir. Çalışılan sıcaklığa göre bu akışkan sıvı veya gaz olabilir.

İzotermal manyetizasyon, adyabatik manyetizasyon ve sabit manyetik alan altında gerçekleşen süreçler ile farklı manyetik soğutma çevrimleri tasarlanabilir. Çevrimlerde unutulmaması gereken, klasik buhar sıkıştırırmalı soğutmadaki gibi bir sıvı-buhar soğutucu yerine tüm çevrim boyunca katı halde bulunan manyetokalorik malzemenin bu süreçleri geçirdiğidir.

### 1.7.1. Carnot Çevrimi

Carnot çevriminin önemi, gerçek veya diğer ideal çevrimlerin karşılaştırılacağı bir standart oluşturmasıdır. Uygulamada gerçekleştirilen çevrimler Carnot çevriminden önemli ölçüde farklılıklar gösterir. Bu nedenle Carnot çevrimi gerçekçi bir model olamaz.

Manyetik Carnot çevriminde iki adyabatik ve iki izotermal işlem görülür. Carnot çevrimine ait T-s diyagramı Şekil 13 'te görülmektedir.



Şekil 13. Manyetik Carnot çevrimi (Gomez vd., 2013).

Adyabatik 1-2 aralığında manyetik malzeme bir miktar manyetize edilir ve böylece malzeme sıcaklığı  $T_C$  değerinden  $T_H$  değerine kadar yükselir. İzotermal 2-3 işlemi süresince manyetizasyon değeri en yüksek değere getirilir ve malzemedeki ısı transferinin gerçekleşmesine müsaade edilir. Bu adımda dikkat edilmesi gereken soğutucu malzemenin sıcaklığı korunurken sıcak kaynağın bu ısıyı aldığıdır. 3-4 aralığında manyetizasyon değeri bir miktar azaltılır ve malzeme manyetokalorik etkiden ötürü adyabatik olarak  $T_H$  sıcaklığından  $T_C$  sıcaklığına soğur. Son olarak 4-1 işleminde malzeme izotermal olarak demanyetize edilmeye devam edilir ve bu sırada soğuk kaynaktan da ısı çeker.

Bu çevrimde önemli olan 4-1 aralığında soğuk kaynaktan çekilen ısının 2-3 aralığında sıcak kaynağa iletilmesidir.

Carnot çevrimi 4 tünden tersinir hal değişiminden meydana gelmektedir ve  $T_C$  ile  $T_H$  sıcaklıklarında bulunan iki ısı enerjisi deposu arasında gerçekleşebilecek en yüksek verimli çevrimdir. Carnot çevriminin verimi şu şekilde ifade edilebilir.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (37)$$

Termodinamiğin ilk kanununa göre;

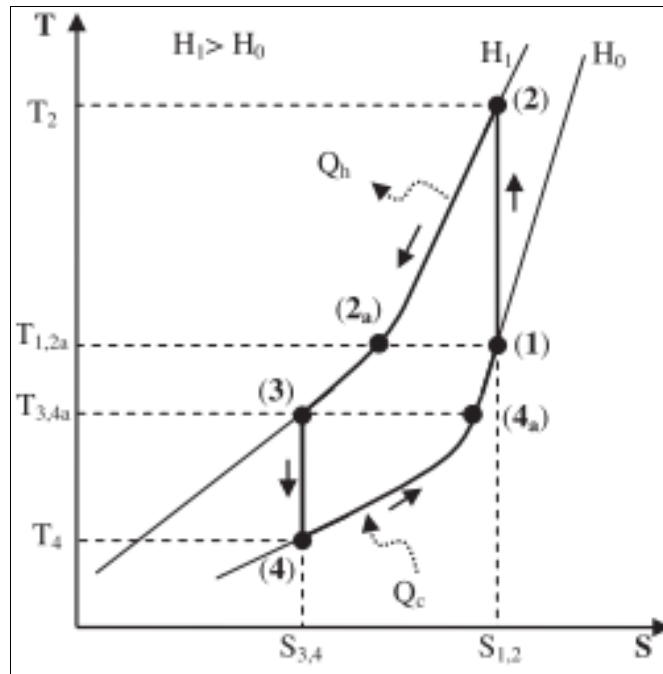
$$COP = \frac{Q_c}{W_{mag} + W_{aux}} \quad (38)$$

Termodinamiğin ikinci kanununa dikkat edilirse sistemdeki tersinmezliklerin çevrim verimini düşüreceği görülür. Bu durumda ikinci yasa verimi şu şekilde yazılabilir:

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{Carnot}} \quad (38)$$

### 1.7.2. Brayton Çevrimi

Carnot çevriminden farklı olarak Brayton çevriminde ısı transferi manyetik alan değerinin aynı olduğu süreç içerisinde gerçekleşir. Brayton çevrimi 2 izotermal ve 2 eş manyetik alan adımlarından meydana gelir. Rejenerasyonlu manyetik Brayton çevrimi için T-s diyagramı Şekil 14' te görüldüğü gibidir.

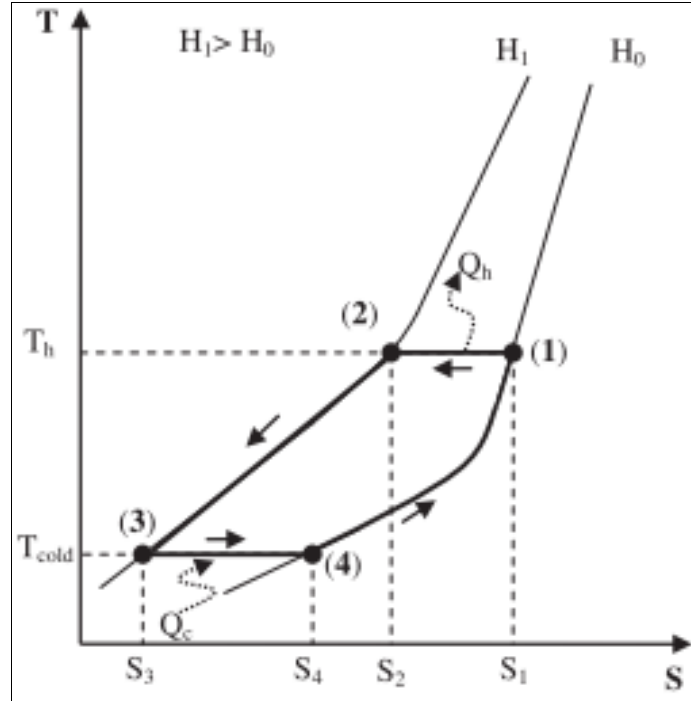


Şekil 14. Rejenerasyonlu manyetik Brayton çevrimi (Gomez vd., 2013).

1-2 aralığında, ilk olarak  $T_1$  sıcaklığında bulunan malzeme manyetizasyon neticesinde adyabatik olarak  $T_2$  sıcaklığına kadar MKE ile ısınır. Bundan sonra malzeme aynı manyetik alan değeri korunurak 2-2a aralığında ilk sıcaklığına kadar soğur ve bu süreçte ısısını sıcak kaynağa aktarır. Bu noktada 2a-3 aralığında görülen daha fazla soğuma rejeneratör yardımıyla gerçekleşir. 3-4 aralığında adyabatik demanyetizasyon ile malzeme  $T_4$  sıcaklığına kadar soğur ve soğuk kaynaktan  $Q_c$  ısıyı çekerek  $T_4-T_{4a}$  aralığında ısınır. Son olarak rejeneratör 4a-1 aralığında ısısını soğutucu manyetik malzemeye iletir ve çevrim tamamlanır.

### 1.7.3. Ericsson Çevrimi

Ericsson çevrimi Brayton çevrimine benzeyen bir rejenerasyon çevrimidir. Tek fark adyabatik manyetizasyon ve demanyetizasyon adımlarının izotermal manyetizasyon ve demanyetizasyon olarak görülmesidir. Manyetik Ericsson çevrimine ait T-s diyagramı Şekil 15'te görülebilir.



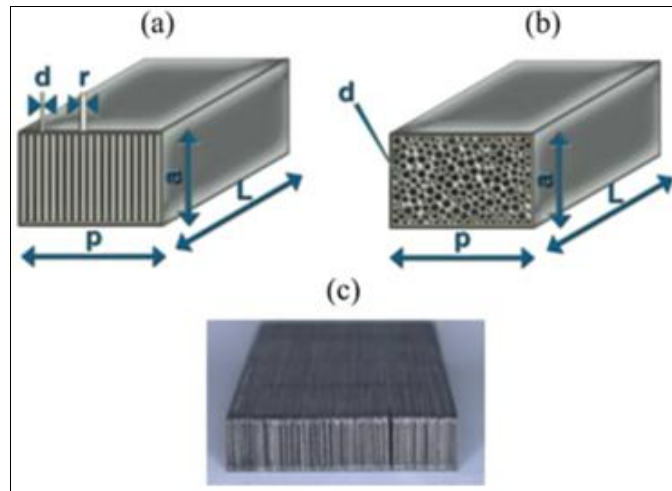
Şekil 15. Manyetik Ericsson çevrimi (Gomez vd., 2013).

1-2 aralığında malzeme izotermal olarak manyetize edilir ve malzeme  $Q_h$  ısını sıcak kaynağa bırakır. 2-3 aralığında rejeneratör yardımıyla soğur ve  $T_c$  sıcaklığına ulaşır. 3-4 aralığında izotermal demanyetizasyon sonucunda soğuk kaynaktan  $Q_c$  ısı çekilir ve 4-1 aralığında rejeneratöre verilen ısı geri alınarak tekrar  $T_h$  sıcaklığına ulaşılır.

#### 1.7.4. AMR-Aktif Manyetik Rejeneratör Çevrimi

Manyetik soğutma sistemlerinin iki temel problemi vardır. Bunlardan biri özellikle oda sıcaklığı civarlarında MKE'nin görece düşük olması (adyabatik sıcaklık farkı  $G_d$  için 7-8 K), diğeri ise soğutucu maddenin buhar sıkıştırılmalı sistemlerdeki gibi sıvı-buhar değilde katı olmasından pompalanamamasıdır. Bu nedenle ısı transferini gerçekleştirmek için aracı bir akışkan kullanılmalıdır ve daha yüksek sıcaklık farklarına ulaşabilmek için rejenerasyon gerekmektedir (Plaznik vd., 2013).

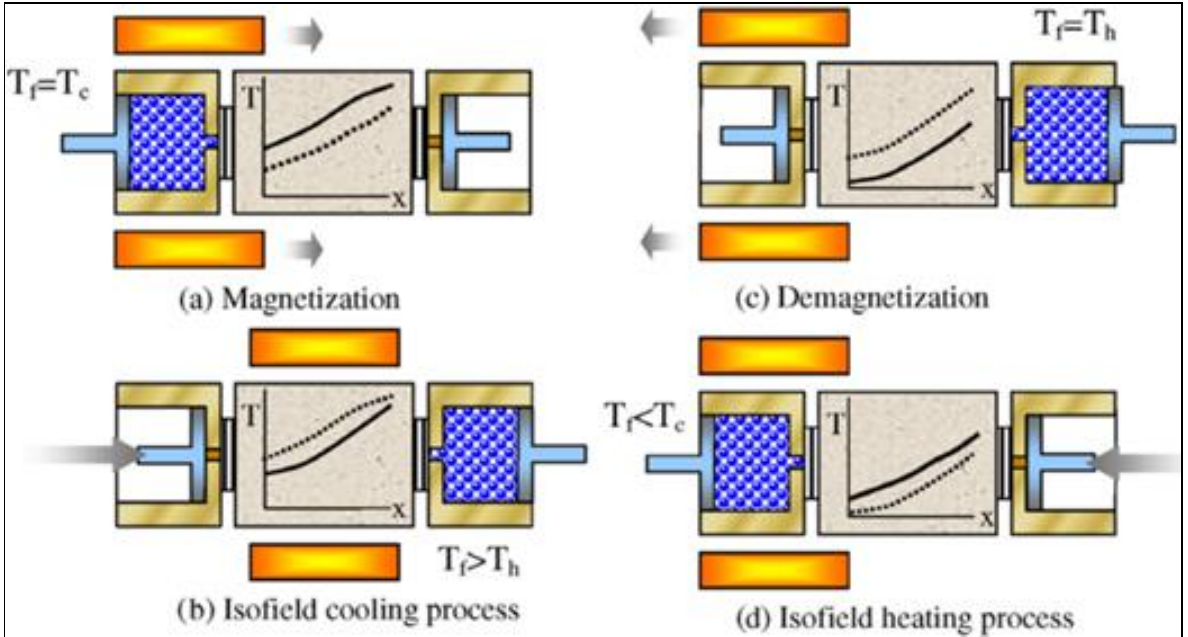
Manyetik malzemeler manyetik soğutma sistemlerinde hem soğutucu hem de rejeneratör olarak aynı anda görev alabilirler. Bu tür yapılara aktif manyetik rejeneratör (Barclay ve Steyert, 1982; Brown, 1976) denir. Aktif manyetik rejeneratör, Şekil 16'da görüldüğü üzere gözenekli veya mikro kanallar yapısındaki MKM'lerden meydana gelir. AMR'ler manyetokalorik malzemeden oluştuğu için sistemde hem soğutucu olarak çalışan, hem de rejeneratör olarak çalışan, yapıları gereği de boyunca bir sıcaklık gradyanı barındıran sistemlerdir. AMR sistemlerinde erişilen sıcaklık farkı MKE ile ulaşılan adyabatik sıcaklık farklarından daha yüksektir (Plaznik vd., 2013).



Şekil 16. Olası AMR yapıları: (a-c) Paralel plaka, (b) Gözenekli yapı (Plaznik vd., 2013).

AMR lerin yer aldığı soğutma sistemleri genelde Brayton çevrimine göre çalışırlar (Kitanovski vd., 2013). Bu alanda yapılan birçok nümerik ve deneysel çalışma Brayton çevrimine dayanmaktadır (Yu vd., 2010). Bu tür sistemler Şekil 17’ de görüleceği gibi kısaca şu şekilde işler:

(a) İlk olarak AMR adyabatik bir ortamda manyetize edilir ve MKE nedeniyle ısınır. (b) Ardından soğuk kaynaktan gelen aracı akışkan AMR yapısından geçirilerek ısınır ve AMR nin sıcaklığı düşer. Bu adımda işlem sonunda aracı akışkan sıcaklığı sıcak kaynaktan daha yüksektir. (c) Üçüncü adımda AMR demanyetize edilir ve sıcaklığı düşer. (d) Son olarak ikinci adımdaki akışkan sıcak kaynaktan gelerek bu sefer zıt yönde AMR den geçirilir ve akışkanın soğuması sağlanır. Böylece AMR tekrar ısınır ve ilk sıcaklığına dönmüş olur. Aracı akışkan sıcaklığı bu süreçte soğuk kaynak sıcaklığından daha düşük bir değere gelir.

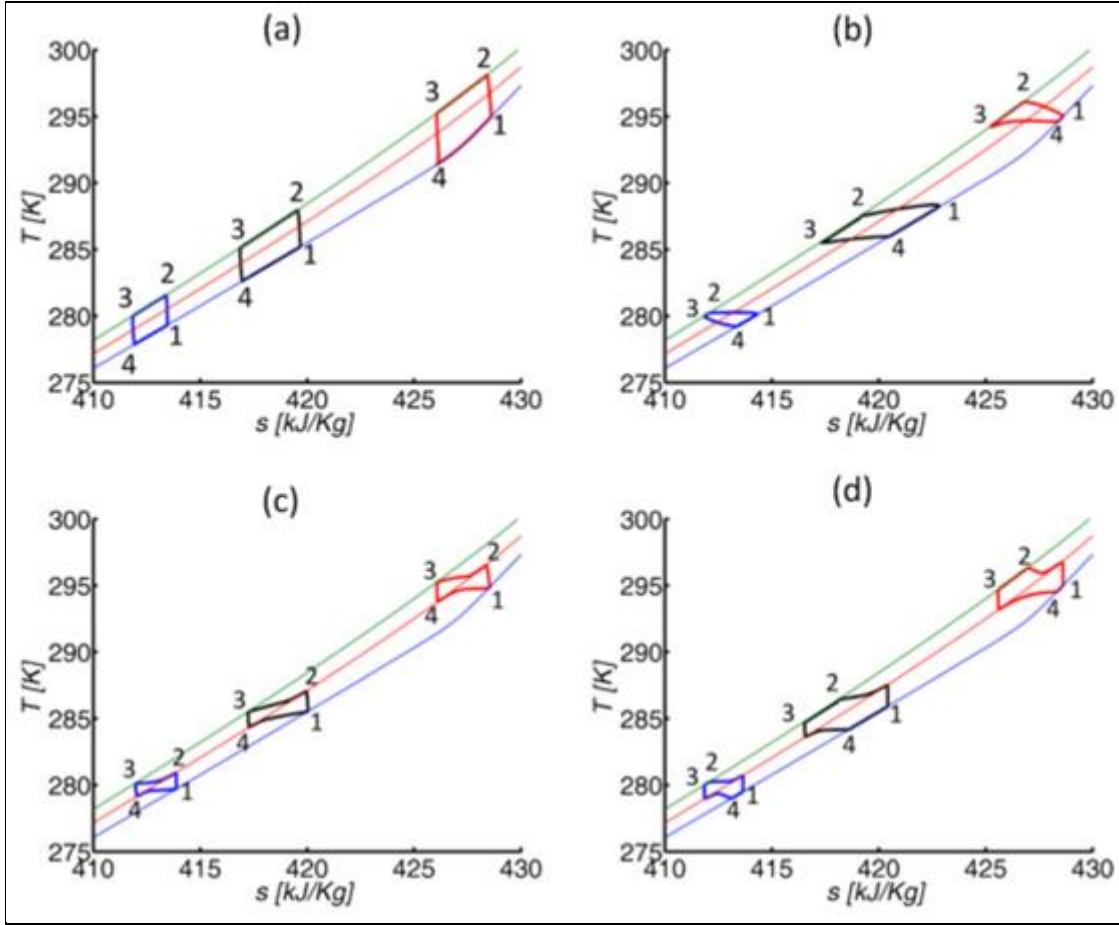


Şekil 17. Brayton çevrimini esas alan AMR soğutma sistemi. Kesikli çizgiler ilk, düz çizgiler son sıcaklık profilini göstermektedir (Aprea ve Maiorino, 2010).

AMR sistemlerinde görülen sıcaklık profili sistemin tek bir diyagramla ifade edilmesini imkansız kılar (Plaznik vd., 2013). AMR bir sıcaklık gradyanı içerdiğinden bu yapıyı oluşturan her birim farklı sıcaklık aralıklarında çalışır ve farklı Brayton çevrimleri görülür.



AMR'nin kullanılabileceği tek termodinamik çevrim Brayton çevrimi değildir. Brayton çevrimi dışında pek çok yeni ve alternatif termodinamik çevrim vardır (Kitanovski vd., 2013). Bu çevrimlerle çalışan daha ucuz ve verimli manyetik soğutma sistemleri tasarlanabilir. Farklı çevrimler, manyetik alan değişimi ve aracı akışkanın sistemde bulunduğu süreçlerin manipülasyonu ile ortaya çıkar. Buhar sıkıştırmalı sistemlerde bu mümkün değildir.



Şekil 18. AMR sistemlerinde kullanılabilecek bazı çevrimler için T-s diyagramları: (a) Brayton, (b) Ericsson, (c) Carnot, (d) Hibrit Brayton-Ericsson (Plaznik vd, 2013).

AMR'yi oluşturan her parça farklı sıcaklıkta bulunduğundan T-s grafiklerinde sadece Şekil 18' deki gibi AMR' nin en soğuk, en sıcak ve arada bir noktasına ait çevrimler verilmiştir.

Daha önce de belirttiğimiz gibi AMR'li Brayton çevrimi (A), adyabatik manyetizasyon (1-2), sabit manyetik alan değerinde ısı emisyonu (2-3), adyabatik

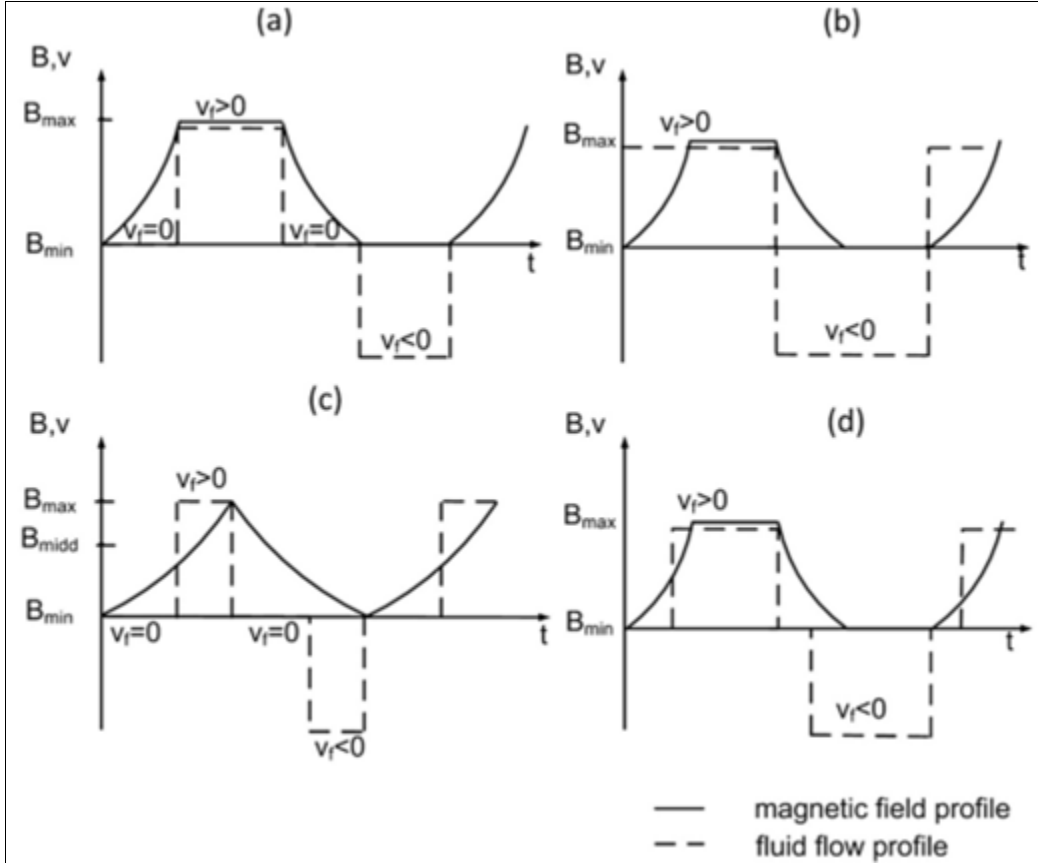
demanyetizasyon (3-4) ve sabit manyetik alanda ısı absorbesinden (4-1) meydana gelir. AMR'nin yapısını oluşturan MKM ve akışkan arasında manyetizasyon ve demanyetizasyon süreçlerinde görülecek ısı transferinden dolayı sıcaklık değişimi ideal çevrimdeki gibi adyabatik olmayacaktır.

AMR'li Ericsson çevrimi (B), izotermal manyetizasyon (1-2), sabit manyetik alanda ısı emisyonu (2-3), izotermal demanyetizasyon (3-4) ve sabit manyetik alanda soğutulan medyumdan ısı absorbesi (4-1) olarak 4 adımdan oluşur. Ericsson çevriminde manyetizasyon ve demanyetizasyon süreçleri için ideal durum MKM' de MKE neticesinde ortaya çıkan ısının tam olarak aracı akışkana taşınmasıdır fakat gerçek uygulamalarda izotermal süreçlerin gerçekleşmesi zordur.

Hibrid Brayton-Ericsson çevriminde (D), manyetizasyon ve demanyetizasyon süreçleri adyabatik ve izotermal süreçlerin bir kombinasyonu olarak (1-2, 3-4) görülmektedir.

AMR li Carnot çevriminde (C), (de)manyetizasyon süreçleri (1-2-3, 3-4-1) Hibrid çevrime benzemektedir. Fakat Carnot çevriminde sabit manyetik alanda herhangi bir ısı emisyonu veya absorbesinden söz edilemez. AMR' li Carnot çevrimi genel olarak Hibrid çevrime çok benzer.

Tüm bu çevrimlere ait Şekil 19'da bulunan manyetik alan ve akışkan profilleri incelenerek olası çevrim süreçleri daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 19. Farklı termodinamik çevrimler için manyetik alan ve aracı akışkan profilleri: (a) Brayton, (b) Ericsson, (c) Carnot, (d) Hibrit (Plaznik vd, 2013).

### 1.8. Literatür Araştırması

Manyetik soğutma sistemleri, temelde; soğutucu malzemeler, mıknatıslar, soğutma sistemi tasarımları, çevrimleri ve analizleri gibi pek çok başlığı içinde barındıran disiplinler arası bir konu halini almıştır.

Çalışma kapsamında manyetik soğutma alanında oldukça detaylı bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu bölümde ise özellikle çalışma konusu ile ilgili olarak manyetik soğutma çevrimlerinin analizine ilişkin literatür araştırmalarına yer verilecektir. İlgili araştırma ve araştırmacılar aşağıdaki gibidir:

Yan ve Chen (1992), ferromanyetik malzemelerin kullanıldığı manyetik Ericsson çevrimine ait termodinamik özellik bağıntıları irdemişlerdir. Rejenerasyonda etkili olan ısı kapasitesi değeri incelenmiştir. Teorik analiz sonucunda kayıpsız bir rejenerasyon için farklı malzemelerden oluşan bir manyetik soğutucunun kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Chen vd. (1992), Carnot, Ericsson, Stirling ve rejenerasyonlu manyetik çevrimleri inceleyerek en verimli çevrimin rejenerasyonlu çevrim olacağını ortaya koymuşlardır.

Chen ve Yan (1994), paramanyetik tuzlar için ortaya konulan temel özellik bağıntılarını dikkate alarak bu tür malzemelerin yer aldığı manyetik Brayton soğutma çevrimine ait temel karakteristikleri incelemişlerdir. Manyetik Brayton soğutma çevriminin manyetik Ericsson ve Carnot soğutma çevrimlerinin avantajlarını içerdiğini ortaya koymuşlardır.

Yan (1995), manyetik Ericsson çevriminde mükemmel rejenerasyon durumunu irdelemiştir. Rejenerasyona ait bazı yeni çevrim karakteristiklerini belirlemiştir.

Chen ve Yan (1998), termal dirençler ve rejenerasyon kayıplarına bağlı tersinmezliklerin manyetik Ericsson soğutma çevrimindeki etkisini incelemişlerdir. Çevrime ait temel bağıntılar ve genel performans karakteristiklerini hesaplamışlardır.

Smaili ve Chahine (1998), AMR'li sistemlerde farklı sıcaklık profillerinin soğutma kapasitesi ve termodinamik çevrim verimine etkisini nümerik bir modelleme ile incelenmişlerdir. 300 K-200 K aralığında 7 Tesla değerinde Gd-Dy alaşımı ile çalışmışlardır.

Wu vd. (2001), paramanyetik malzemelerle Stirling çevrimine göre çalışan tersinmez manyetik bir kriyo soğutucu için matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Optimum soğutma yükü ve performans katsayısı ile maksimum soğutma yükü ve ilgili performans katsayısı arasında bir ilişki kurmuşlardır.

He vd. (2002), manyetik Ericsson soğutma çevriminde sonlu sıcaklık farkında ısı transferi nedeniyle oluşacak tersinmezlik ve rejenerasyon süresince oluşacak kayıpları incelemişlerdir.  $Q_L$  ve  $W$  değerlerinin performans katsayısına etkilerini optimize ederek gerçek manyetik Ericsson soğutma çevrimi için optimum performans değerlerini incelemişlerdir.

Tyagi vd. (2002), tersinmez Stirling ve Ericsson kriyojenik soğutma çevrimleri için sonlu ısı kapasitesine sahip kaynakları gözönüne alarak parametrik bir çalışma yürütmüşlerdir. İç tersinmezliklerin diğer tersinmezliklere göre daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır.

Yang vd. (2005), tersinmez rejenerasyonlu manyetik Brayton çevrimi için moleküler alan teorisi yardımıyla elde edilen soğutma yükü, COP ve iş değerlerini incelenmişlerdir.

Xia vd. (2006), paramanyetik soğutucu bir malzemenin kullanıldığı ve sonlu sıcaklık farkında ısı transferi, rejenerasyon kaybı, ısı kaçağı, rejeneratör verimi ve malzemedeki

meydana gelen iç tersinmezliklerin hesaba katıldığı manyetik Ericsson çevrimi için oluşturulan parametrelerde(soğutma yükü, atılan ısı, COP) tersinmezliklerin etkisini incelemiştir.

He vd. (2006), istatistiksel mekaniğe bağlı olarak termodinamik özellikleri belirtilen paramanyetik tuzlar için kuantum değeri  $J=1/2$  durumunda manyetik Brayton soğutma çevrimine ait performans ölçütlerini ortaya koymuşlardır. Rejenerasyonlu ve rejenerasyonsuz çevrimlere ait değerleri karşılaştırmış ve rejenerasyonlu çevrimin üstünlüklerini teorik olarak göstermişlerdir.

Bingfend vd. (2006), Langevin teorisi, istatistiksel mekanik, termodinamik ve manyetizma ile beraber manyetizasyon, manyetik entropi ve manyetik özgül ısı için yeni eşitlikler çıkarmışlardır. Bulunan eşitlikler deneysel veriler ve farklı teorik eşitliklerle karşılaştırılarak valide edilmiş ve manyetik rejenerasyonlu Ericsson çevriminin analizinde kullanılmıştır. Isı kaynakları sıcaklıklarının rejenerasyona ve manyetik alan değeri ile beraber soğutma kapasitesine ve COP'ye etkilerini teorik olarak incelemiştir.

Ye vd. (2007), sonlu ısı kapasitesine sahip kaynaklar dikkate alınarak ısı transferi ile ilgili tersinmezlikler ve rejenerasyon kayıpları değerlendirildiğinde manyetik Ericsson çevrimi için oluşturulan çevrim parametrelerini irdelemiştir.

Lucia (2008), ikinci dereceden manyetik hal değişiminin görüldüğü manyetokalorik malzemeler için COP değerini ideal bir çevrim üzerinden oluşturmuştur. Bu denklemi manyetizasyon eşitliği yardımıyla detaylı olarak irdelemiştir.

Xia vd. (2008), tersinmez manyetik Brayton çevrimi için matematiksel bir model oluşturmuş, çevrimde termal dirençlerin ve adyabatik süreçlerde tersinmezliklerin etkisini incelemiştir. Soğutma yükü ve performans katsayılarını matematiksel olarak elde edip optimize etmişlerdir.

He vd. (2008), tersinmez manyetik Brayton çevrimi için COP, soğutma yükü ve iş terimlerini manyetik sistemlere ait genel termodinamik ifadeler yardımıyla ortaya koymuş ve farklı durumlar için irdelemiştir.

Lucia (2010), entropi ve ekserji arasındaki ilişki açıklayarak manyetik Brayton çevrimi için ekserji analizini yapmıştır.

Zhang vd. (2010), üç farklı manyetik alan değeri ve üç tersinmez adyabatik proses içeren iki kademeli manyetik Brayton çevrimi için performans karakterleri incelemiştir. Manyetik malzemelerin termodinamik özellikleri yardımıyla soğutma yükü ve COP değerlerini oluşturmuşlardır.

Wei vd. (2011), sonlu sıcaklık farkında ısı transferi, kaynaklar arası ısı kaçağı, rejenerasyon kaybı, rejenerasyon zamanı ve soğutucu malzemeden kaynaklanan iç tersinmezliklerin çevrim fonksiyonları üzerindeki etkilerini manyetik Ericsson ısı pompası için incelemişlerdir.

Lucia (2011), manyetik ideal Ericsson çevrimi için ekserji analizini manyetizasyon denklemi yardımıyla COP üzerinden incelemiştir.

Diguet vd. (2012), rejenerasyonlu manyetik Brayton çevriminde belirli bir malzeme için tersinmezlikleri dikkate alarak soğutma yükü ve performans katsayısını irdelemişlerdir.

Diguet vd. (2012), rejenerasyonlu manyetik Brayton çevriminde 3 farklı malzemeye ait T-s diyagramlarını irdelemişlerdir. Malzemelere ait manyetokalorik özellikler için deneysel verileri dikkate almışlardır. Rejenerasyon, soğutma kapasitesi ve performans katsayısı ile bunlara bağlı parametreleri hesaplayıp analiz etmişlerdir.

### **1.9. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Modern toplumun temel bağımlılıklarından biri olan soğutma, günümüzde, buhar sıkıştırımlı kompresör teknolojisine dayanmaktadır. Buhar sıkıştırımlı kompresör teknolojisinin temel malzemeleri olan kloroflorokarbon (CFC) ve hidrokloroflorokarbonun (HCFC) çevreye verdikleri zarar yüzünden yasaklanmaları ve artan enerji tüketimi ile beraber daha verimli uygulamalara olan ihtiyaç ile birlikte, şimdiye kadar arka plana atılmış olan alternatif soğutma teknolojileri giderek daha büyük önem kazanmaya başlamışlardır. Bu nedenle son yıllarda dünya soğutma endüstrisinin Ar-Ge harcamalarının büyük bir kısmı, orta ve uzun vadede buhar sıkıştırımlı sistemlerin yerine geçecek alternatif teknolojilerin geliştirilmesine harcanmaktadır. Soğutucuların mümkün olduğu kadar az enerji tüketmeleri ve çevre dostu olmaları istenmektedir. Alternatif teknolojilerden biri olan manyetik soğutma, hem çevre konusundaki endişeleri yanıtlayabilen, hem de az enerji tüketme özelliğini sağlayan bir seçenek oluşturmaktadır.

Manyetik soğutma çevrimleri ile beraber daha verimli sistemlerin tasarlanması bu çevrimlerin iyi anlaşılması ve analizini gerektirmektedir. Bu bağlamda çevrim verimine etki edecek parametreler ortaya konularak farklı sınır koşulları için farklı çalışmalar gerekmektedir.

Literatür incelendiğinde istatistiksel mekanik yardımıyla ferromanyetik veya paramanyetik malzemeler için ortaya konan temel bağıntılarla beraber özellikle manyetik Brayton ve Ericsson çevrimlerinin analiz edildiği görülebilir. Bu çalışmalar çevrimlere ilişkin genel ifadelerle yoğunlaşmış olup yüksek sıcaklık ve düşük manyetik alan değerlerinde paramanyetik malzemelerin davranışlarını inceleyen özel analizler içermemektedir.

Yapılan çalışma, bu alandaki eksikliklerin giderilmesine yönelik veriler üretmeyi amaçlayan sayısal bir çalışmadan oluşmaktadır. Bu tez kapsamında, yüksek sıcaklık veya düşük manyetik alan değerlerinde paramanyetik malzemelerle çalışan rejenerasyonlu manyetik Ericsson ve Brayton çevrimleri irdelenmiştir. Çalışılan manyetik alan değerlerinin, rejenerasyonun, sıcak ve soğuk kaynak sıcaklıklarının ve tersinmezliklerin sistem parametrelerine etkileri ortaya çıkarılmıştır.

Elde edilen verilerin bundan sonraki sayısal ve deneysel çalışmalar için bir referans teşkil edeceği de belirtilmelidir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Paramanyetik malzemelerin termodinamik özellikleri için istatistiksel mekaniğe göre basit paramanyetik bir malzemede üleşim fonksiyonu (Pathria, 1972) şu şekilde ifade edilmektedir:

$$Z = \left\{ \frac{\sinh\left[\left(\frac{2j+1}{2j}\right)x\right]}{\sinh\left(\frac{1}{2j}x\right)} \right\}^N \quad (39)$$

Burada; j açısal momentumun kuantum sayısı, g Lande faktörü,  $\mu_B$  Bohr manyetonu, k Boltzmann sabiti, H manyetik alan, T mutlak sıcaklık ve N manyetik moment sayısıdır.

Ayrıca x, şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$x = \frac{g\mu_B j H}{kT} \quad (40)$$

İlk denklem ve Helmholtz serbest enerjisi (A), kullanılarak entropi, iç enerji, manyetizasyon ve sabit manyetik alanda ısı kapasitesi değerleri hesaplanabilir. Bu durumda,

$$A = -kT \ln Z \quad (41)$$

$$S = -\left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_H$$

$$= Nk \left[ \ln \sinh\left(\frac{2j+1}{2j}x\right) - \ln \sinh\left(\frac{x}{2j}\right) - x B_j(x) \right]$$

$$U = A + TS = -NkTx B_j(x)$$

$$M = -\left(\frac{\partial A}{\partial H}\right)_T = Ng\mu_B j B_j(x)$$

$$c_H = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_H$$

$$= -Nkx^2 \left[ \left(\frac{2j+1}{2j}\right)^2 \operatorname{csch}^2\left(\frac{2j+1}{2j}x\right) - \left(\frac{1}{2j}\right)^2 \operatorname{csch}^2\left(\frac{1}{2j}x\right) \right]$$



Burada  $B_j(x)$  Brillouin fonksiyonudur ve

$$B_j(x) = \frac{2j+1}{2j} \coth\left(\frac{2j+1}{2j}x\right) - \frac{1}{2j} \coth\left(\frac{1}{2j}x\right) \quad (42)$$

şeklinde tanımlanır.

Eğer  $x \ll 1$  ise, yani yüksek sıcaklık veya zayıf manyetik alan değerlerinde,

$$B_j(x) \approx \left(\frac{1}{3}\right) \left(1 + \left(\frac{1}{j}\right)\right) x \quad (43)$$

şeklinde yazılabilir ve manyetizasyon denklemi Curie yasasındaki forma sahip olur.

$$M = \frac{CH}{T} \quad (44)$$

Burada Curie sabiti;

$$C = Ng^2\mu_B^2j(j+1)/3k$$

kullanılarak belirlenir.

Ayrıca  $\mu_B=9,274 \times 10^{-24}$  J/T,  $k=1,38 \times 10^{-23}$  J/K dir. Aynı zamanda entropi, iç enerji ve sabit manyetik alanda ısı kapasitesi değerleri şu şekli alır.

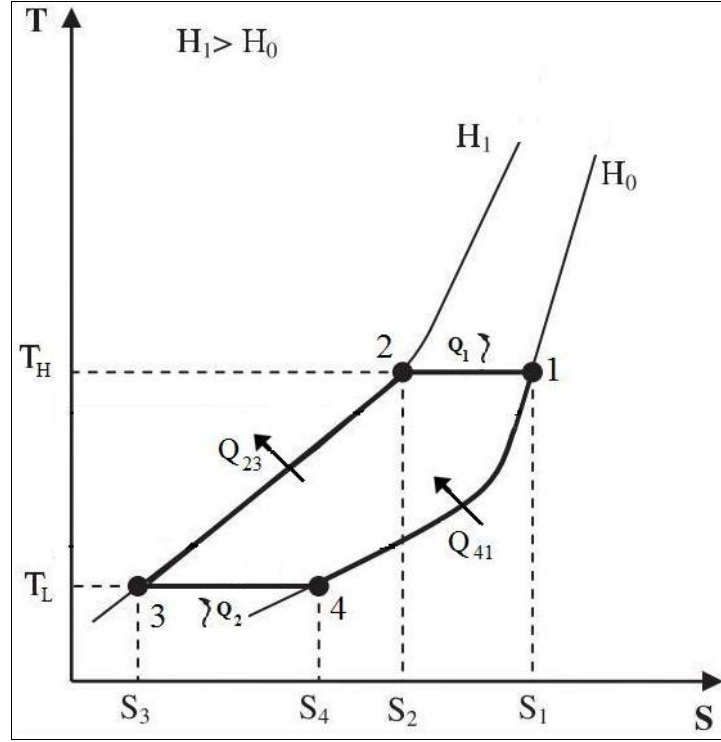
$$S = Nk \ln(2j+1) - \frac{CH^2}{2T^2} \quad (45)$$

$$U = -\frac{CH^2}{T}$$

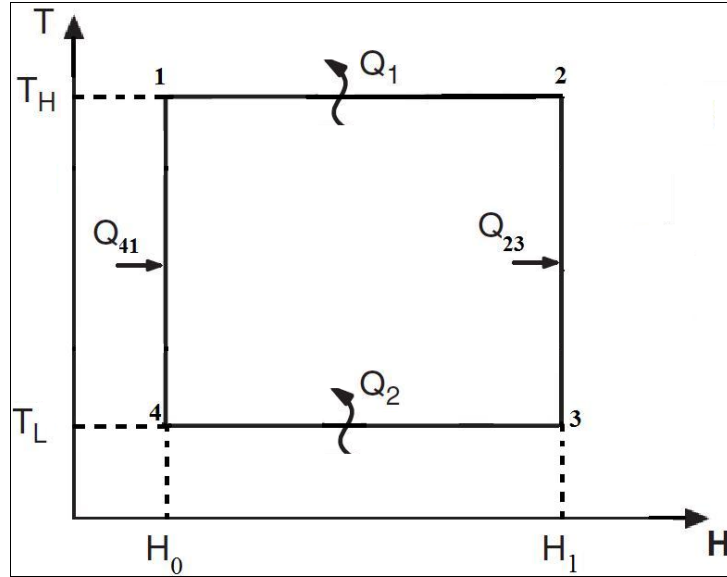
$$C_H = \frac{CH^2}{T^2}$$

## 2.1. Manyetik Ericsson Çevrimi Analizi

Zayıf bir manyetik alan değerinde veya yüksek sıcaklıkta Curie yasasının geçerli olduğu paramanyetik bir soğutucunun kullanıldığı Ericsson çevrimine ait T-s diyagramı Şekil 20'de görülmektedir. Şekil 21'deki T-H diyagramında görüldüğü gibi 1-2 ve 3-4 adımları izotermal olarak, 2-3 ve 4-1 adımları ise sırasıyla  $H_1$  ve  $H_0$  sabit manyetik alan değerlerinde gerçekleşecektir.



Şekil 20. Rejenerasyonlu manyetik Ericsson çevrimine ait T-s diyagramı



Şekil 21. Rejenerasyonlu manyetik Ericsson çevrimine ait T-H diyagramı

$Q_1$  ve  $Q_2$  değerleri sırasıyla  $T_H$  sıcaklığındaki kaynağa atılan ısıyı ve  $T_L$  sıcaklığındaki soğutulan ortamdan çekilen ısı değerini ifade etmektedir.  $Q_{23}$  ve  $Q_{41}$  değerleri ise sabit manyetik alan değerlerinde soğutucu malzeme ve rejeneratör arasında transfer edilen ısı miktarlarını ifade etmektedir. Buna göre;

$$Q_1 = T_H(s_1 - s_2) = -\frac{cH_0^2}{2T_H} + \frac{cH_1^2}{2T_H} = \frac{c(H_1^2 - H_0^2)}{2T_H} \quad (46)$$

$$Q_2 = T_L(s_4 - s_3) = -\frac{cH_0^2}{2T_L} + \frac{cH_1^2}{2T_L} = \frac{c(H_1^2 - H_0^2)}{2T_L} \quad (47)$$

$$Q_{23} = \int_{T_L}^{T_H} c_{H_1} dT = \int_{T_L}^{T_H} \frac{cH_1^2}{T^2} dT = cH_1^2(T_L^{-1} - T_H^{-1}) \quad (48)$$

$$Q_{41} = \int_{T_L}^{T_H} c_{H_0} dT = \int_{T_L}^{T_H} \frac{cH_0^2}{T^2} dT = cH_0^2(T_L^{-1} - T_H^{-1}) \quad (49)$$

Eşitliklerden de görüleceği üzere soğutucu malzeme ile rejeneratör arasındaki ısı alışverişi değerleri birbirine eşit değildir. Bu durumda rejenerasyonun %100 verimle gerçekleşmeyeceği söylenebilir. Sonuç olarak soğutucu paramanyetik malzemelerin kullanıldığı sistemlerde her çevrimde rejeneratörde bir miktar ısı birikecektir. Biriken bu ısı soğutulan ortama atılmalıdır, aksi takdirde rejeneratör düzgün olarak işlevini yerine getiremeyecektir. Rejeneratörde her çevrim sonunda biriken ısı  $Q_B$  ile ifade edilmektedir.

$$Q_B = Q_{23} - Q_{41} = c(H_2^2 - H_1^2)(T_L^{-1} - T_H^{-1}) \quad (50)$$

Rejeneratörde biriken ısının dışında sonlu sıcaklık farkında ısı transferinden ötürü rejeneratörün verimine bağlı olarak farklı rejeneratör kayıpları ( $Q_R$ ) söz konusu olabilir. Bununla beraber iç tersinmezlikler neticesinde ortaya çıkan ısı ve kaynaklar arasında oluşacak ısı sızıntısı ( $Q_S$ ) da net soğutma değerini düşürecektir. Sıcak ve soğuk kaynakların ısı kapasiteleri de temel sistem parametrelerini verimi düşürecek şekilde etkileyebilir.

Bu çalışma kapsamında farklı manyetik alan değerlerinde rejenerasyonlar süresince rejeneratörde biriken ısı dışında herhangi bir kayıp dikkate alınmamıştır. Bu durumda soğuk ortamdan çekilen net ısı miktarı  $Q_L$  ve sıcak kaynağa atılan net ısı miktarı  $Q_H$  olarak tanımlanırsa, sisteme ait bazı değerler şu şekilde yazılabilir:

$$Q_H = Q_1 \quad (51)$$

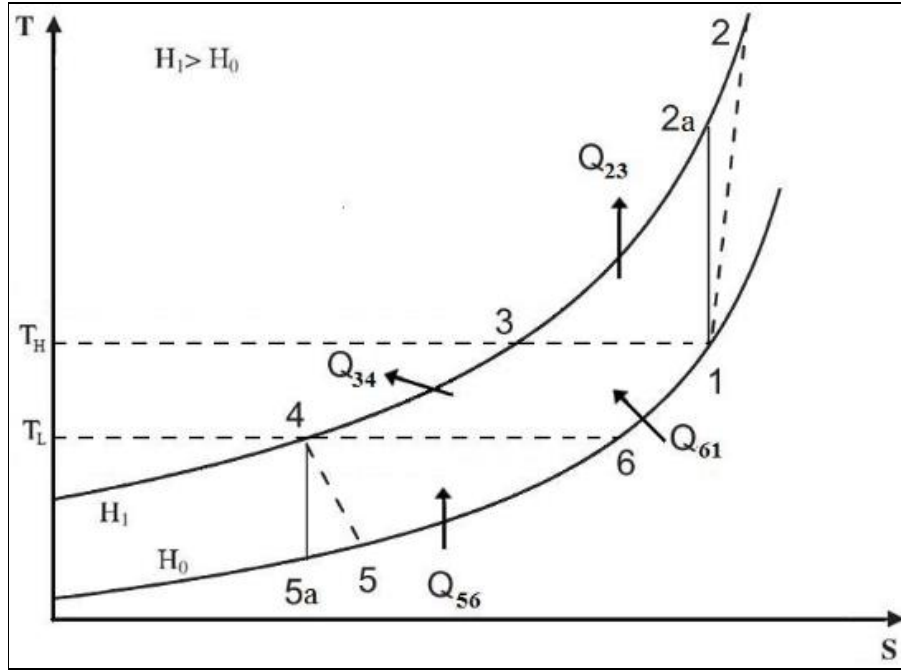
$$Q_L = Q_2 - Q_B \quad (52)$$

$$W = Q_H - Q_L = Q_1 - Q_2 + Q_B = \frac{c(H_1^2 - H_0^2)(T_H - T_L)}{2T_H T_L} \quad (53)$$

$$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_2 - Q_B}{Q_1 - Q_2 + Q_B} = \frac{2T_L - T_H}{T_H - T_L} \quad (54)$$

## 2.2. Manyetik Brayton Çevrimi Analizi

Soğutucu malzeme olarak paramanyetiklerin kullanıldığı rejenerasyonlu manyetik Brayton çevrimi için T-s diyagramı Şekil 22’ de görülmektedir. Diyagramdaki 1-2<sub>a</sub> ve 4-5<sub>a</sub> adımları tersinir adyabatik süreçleri göstermektedir. T<sub>H</sub> ve T<sub>L</sub> değerleri sırasıyla sıcak ve soğuk kaynak sıcaklıklarını ifade ederken, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 noktalarındaki sıcaklık değerleri de sırasıyla T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub> ve T<sub>6</sub> olarak ifade edilecektir. Diyagrama göre T<sub>1</sub>=T<sub>H</sub>=T<sub>3</sub> ve T<sub>4</sub>=T<sub>L</sub>=T<sub>6</sub> eşitliklerine dikkat edilmelidir.



Şekil 22. Manyetik Brayton çevrimine ait T-s diyagramı

Bu diyagrama göre tersinmez adyabatik manyetizasyon (1-2) sonrası sabit manyetik alan değerinde sıcak kaynağa iletilen ısı  $Q_{23}$ , soğutucu malzemedен rejeneratöre geçen ısı  $Q_{34}$ , tersinmez adyabatik demanyetizasyon (4-5) sonrası soğutulan ortamdan veya diğer

adıylı soğuk kaynaktan çekilen ısı  $Q_{56}$  ve son olarak soğutucu malzemeye rejeneratörden geri alınan ısı ise  $Q_{61}$  olarak ifade edilmektedir.

$$Q_{23} = \int_{T_3}^{T_2} c_{H_1} dT = c_{H_1}(T_2 - T_3) = \frac{c_{H_1}^2}{T_2} - \frac{c_{H_1}^2}{T_3} = CH_1^2(T_2^{-1} - T_3^{-1}) \quad (55)$$

$$Q_{34} = \int_{T_4}^{T_3} c_{H_1} dT = c_{H_1}(T_3 - T_4) = \frac{c_{H_1}^2}{T_3} - \frac{c_{H_1}^2}{T_4} = CH_1^2(T_3^{-1} - T_4^{-1}) \quad (56)$$

$$Q_{56} = \int_{T_6}^{T_5} c_{H_0} dT = c_{H_0}(T_5 - T_6) = \frac{c_{H_0}^2}{T_5} - \frac{c_{H_0}^2}{T_6} = CH_0^2(T_5^{-1} - T_6^{-1}) \quad (57)$$

$$Q_{61} = \int_{T_1}^{T_6} c_{H_0} dT = c_{H_0}(T_6 - T_1) = \frac{c_{H_0}^2}{T_6} - \frac{c_{H_0}^2}{T_1} = CH_0^2(T_6^{-1} - T_1^{-1}) \quad (58)$$

Paramanyetik malzemelerin kullanıldığı sistemlerde, farklı manyetik alan değerlerinde rejenerasyon süreçlerinde, soğutucu malzemedan rejeneratöre ( $Q_{34}$ ) ve rejeneratörden soğutucu malzemeye ( $Q_{61}$ ) transfer edilen ısı değerleri birbirinden farklı olduğu elde edilen eşitliklerden görülebilir.

Soğutucu malzemedan rejeneratöre geçen ısı ( $Q_{34}$ ) daha sonra rejeneratörden soğutucu malzemeye geçen ısıdan ( $Q_{61}$ ) fazlaysa ( $Q_{34} > Q_{61}$  durumunda) rejeneratörde kalan ısı soğuk kaynağa atılmak durumundadır, bu durum soğuk kaynaktan çekilen ısı miktarını azaltacaktır. Rejeneratörde biriken ısı soğuk kaynağa verilmezse rejeneratör işlevini yerine getiremeyecektir.

Rejeneratörde biriken ısı miktarı  $Q_B$  ile ifade edilir.

$$Q_B = Q_{34} - Q_{61} = CH_1^2(T_H^{-1} - T_4^{-1}) - CH_0^2(T_L^{-1} - T_1^{-1}) \quad (59)$$

Bu durumda soğuk ortamdan çekilen net ısı miktarı  $Q_L$  ve sıcak kaynağa atılan net ısı miktarı  $Q_H$  olarak ifade edilebilir.

$$Q_H = Q_{23} \quad (60)$$

$$Q_L = Q_{56} - Q_B \quad (61)$$

Bu durumda gerekli iş (W) ve etkinlik katsayısı (COP) şu şekilde yazılabilir,

$$W = Q_H - Q_L = Q_{23} - Q_{56} + Q_B \quad (62)$$

$$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_{56} - Q_B}{Q_{23} - Q_{56} + Q_B} \quad (63)$$

Ayrıca adyabatik süreçlerde tersinmezlik ( $T_1-T_2$  ve  $T_4-T_5$ ) derecesi iki farklı parametre ile tanımlanabilir.

$$\eta_E = \frac{(T_4 - T_5)}{(T_4 - T_{5a})} \quad (64)$$

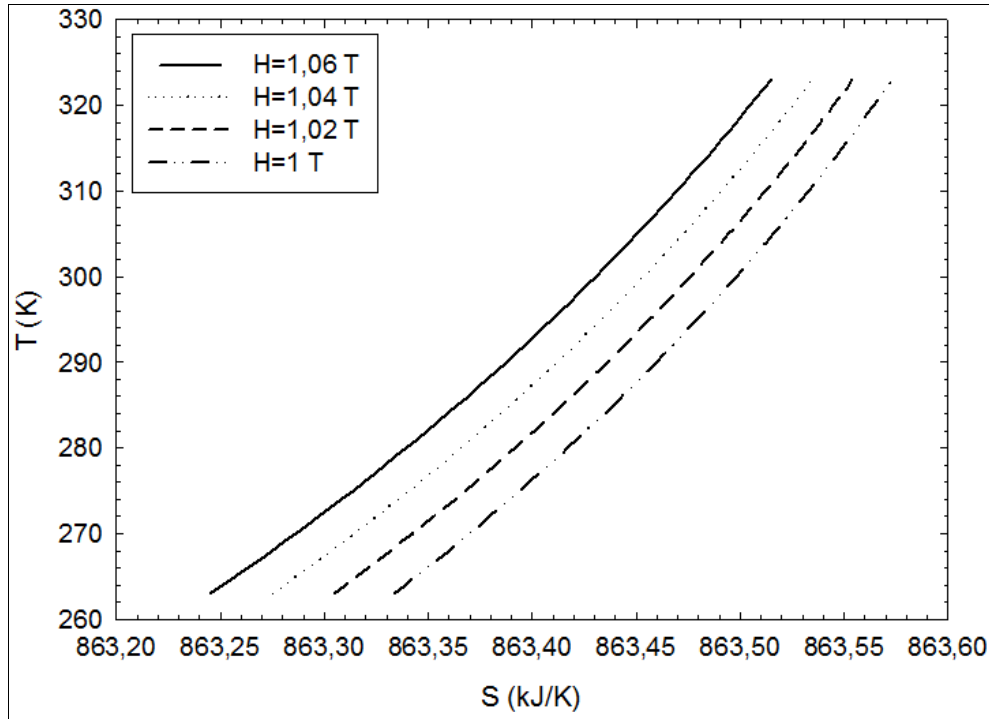
$$\eta_C = \frac{(T_{2a} - T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (65)$$

$\eta_C = \eta_E = 1$  olduğunda adyabatik süreçler tersinirdir.

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu çalışmada Curie yasası dikkate alınarak yüksek sıcaklık veya düşük manyetik alan değerlerinde çalışan paramanyetik malzemelerin kullanıldığı manyetik soğutma çevrimleri için oluşturulan eşitlikler yardımıyla farklı parametrelerin çevrim değerleri üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Çevrimlere ait sınır koşulları ve temel çalışma aralıkları literatür ve paramanyetik malzemelere ait temel özellikler dikkate alınarak oluşturulmuştur.

Curie yasası ve ilgili eşitliklere göre oluşturulan T-s diyagramı Şekil 23'de görülebilir. Yapılacak çalışmalarda çevrimler Şekil 23 dikkate alınarak oluşturulmuştur.



Şekil 23. Farklı manyetik alan değerlerine göre T-s diyagramı

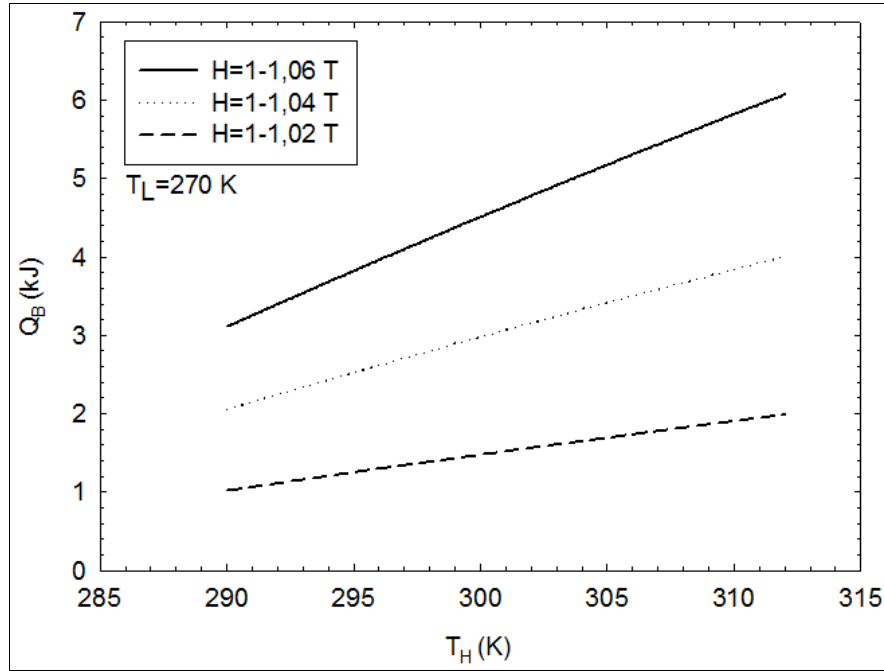
#### 3.1. Manyetik Ericsson Çevrim Parametrelerinin İncelenmesi

Manyetik Ericsson çevrimi iki izotermal ve iki sabit manyetik alan sürecinden meydana gelmektedir. Çevrim veriminin Carnot çevrim verimine yaklaşması ve rejeneratörün düzgün bir şekilde işlevini yerine getirebilmesi için sabit manyetik alan

değerlerinde görülen rejenerasyon sırasında alınan ve verilen ısıların eşit olması gerekir. Fakat farklı manyetik alan değerlerinden ve rejeneratörün veriminden ötürü mükemmel rejenerasyon söz konusu değildir. Bununla beraber yapılan çalışmada;

- Manyetik Ericsson çevrimi ideal olarak tasarlanmıştır.
- (De)manyetizasyon, MKE ve ısı transferi süreçleri için zaman dikkate alınmamıştır.
- Eşitlikler paramanyetik malzeme karakteristikleri dikkate alınarak oluşturulmuştur.
- Rejenerasyonda ortaya çıkan ısı birikimi dışında tüm sonlu sıcaklık farkında ısı transferi, rejeneratör verimi, kaynaklar arası ısı kaçakları ve iç kayıplar gibi tersinmezlikler dikkate alınmamıştır.

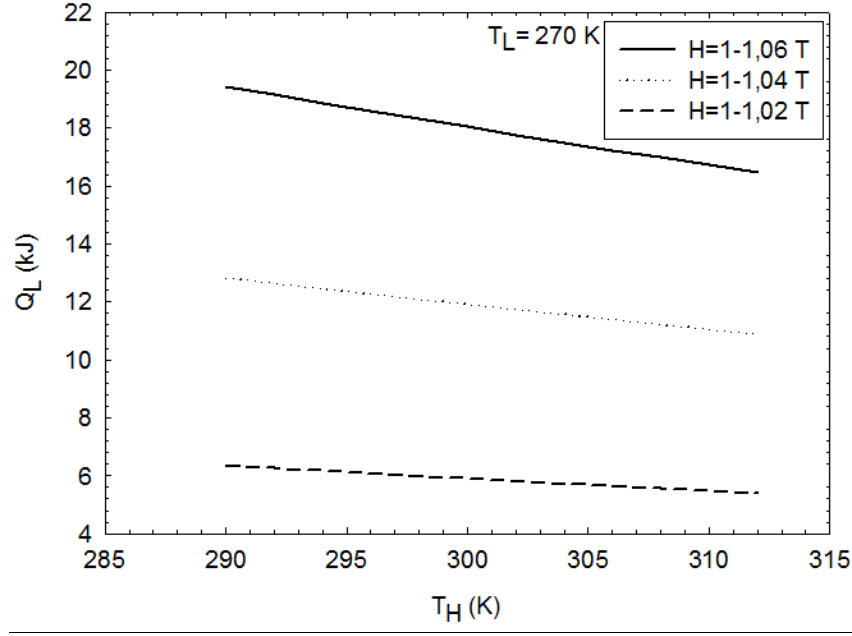
Manyetik Ericsson çevriminde sıcak ve soğuk kaynak değerleri soğutma performansına etki eden iki önemli parametredir. Şekil 24' te rejenerasyon sonucu biriken ısıнын farklı sıcak kaynak ve manyetik alan değişimlerine bağlı olarak aldığı değerler görülmektedir. Uygulanan manyetik alan değeri arttıkça rejeneratörde biriken ısı da artmaktadır.



Şekil 24. Farklı sıcak kaynak ve manyetik alan değerlerinde rejeneratörde biriken ısıнын değişimi

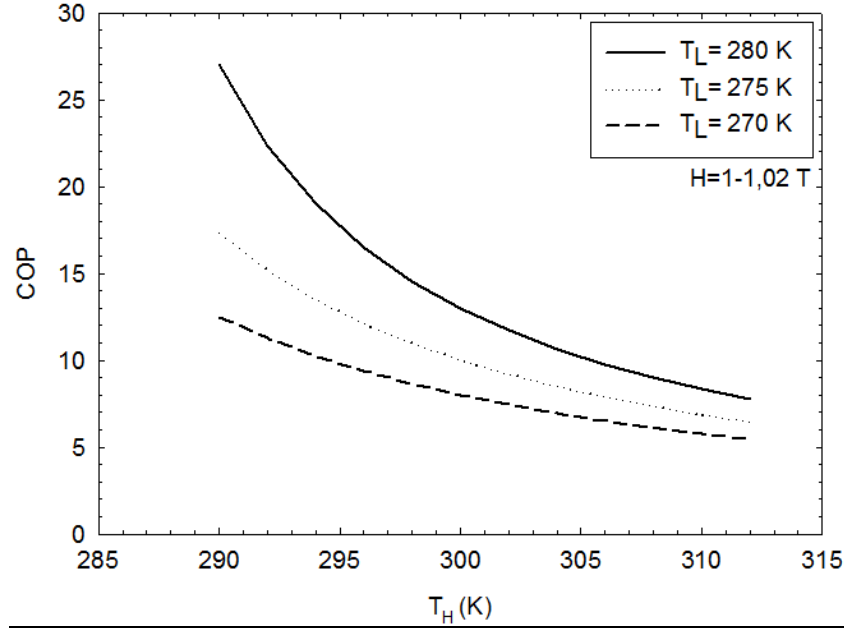


Sıcak kaynak sıcaklığı arttıkça soğutulan ortamdaki çekilen ısı Şekil 25’te görüldüğü üzere azalmaktadır. Sıcak kaynak sıcaklığı arttıkça ve manyetik alan değeri azaldıkça net soğutma değeri azalmaktadır.



Şekil 25. Farklı sıcak kaynak ve manyetik alan değerlerinde soğutulan ortamdaki çekilen net ısının değişimi

Şekil 26’da performans katsayısı ve sıcak kaynak değeri arasındaki ilişki görülmektedir. Aynı sıcak kaynak değerinde, sıcak ve soğuk kaynaklar arasındaki fark azaldıkça COP değeri artmaktadır. Bu nedenle uygun çalışma sıcaklıkları, belirlenen performans değerlerine bağlı olarak mümkün olan en yüksek COP dikkate alınarak seçilmelidir. Kaynak sıcaklıkları performansa doğrudan etki etmektedir. Bu manada sonuçlar benzer literatür (Bingfeng vd., 2006; Xia vd., 2006) ile de uyum içindedir.



Şekil 26. Farklı sıcak kaynak ve manyetik alan değerlerinde performans katsayısının değişimi

Manyetik Ericsson soğutma çevriminde rejeneratörde biriken ısı dışında herhangi bir tersinmezlik veya kayıptan söz edilmiyorsa çevrime ait performans katsayısı çalışılan manyetik alan değerlerinden bağımsız olarak sadece çalışma sıcaklıklarının bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkar;

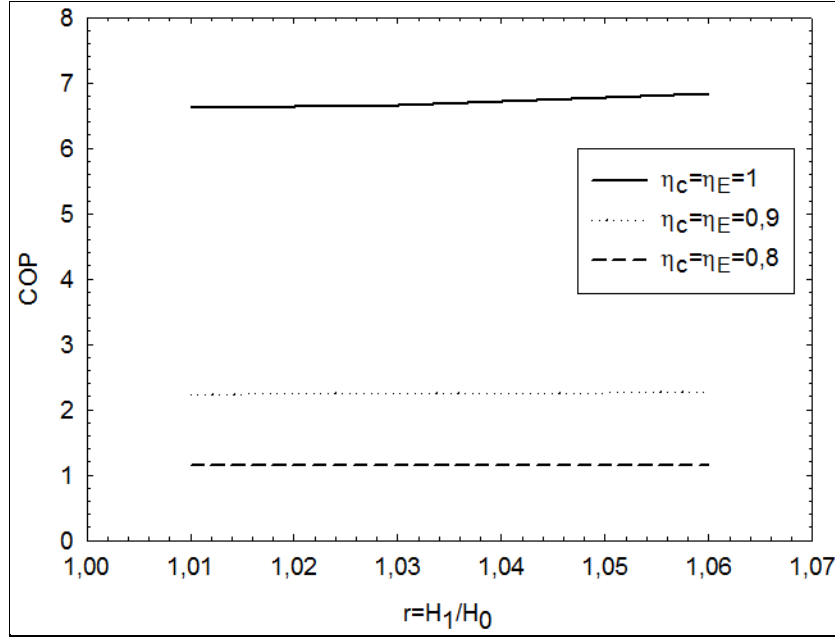
$$COP = \frac{2T_L - T_H}{T_H - T_L} \quad (66)$$

### 3.2. Manyetik Brayton Çevriminin Parametrik Olarak İncelenmesi

Bu kısımda, paramanyetik malzemeler için belirlenen termodinamik özellikler yardımıyla manyetik Brayton çevrimi için elde edilen temel özellik bağıntıları incelenmiştir. Verim, soğuk kaynaktan çekilen ısı, iş gibi temel değerler farklı manyetik alan ve tersinmezlik dereceleri dikkate alınarak irdelenmiştir. Oluşturulan çevrimde sıcaklık değerleri şu şekilde alınmıştır;  $T_{2a}=318$  K,  $T_{5a}=264$  K,  $T_1 = T_H = T_3 = 300$  K ve  $T_4 = T_L = T_6 = 280$  K.

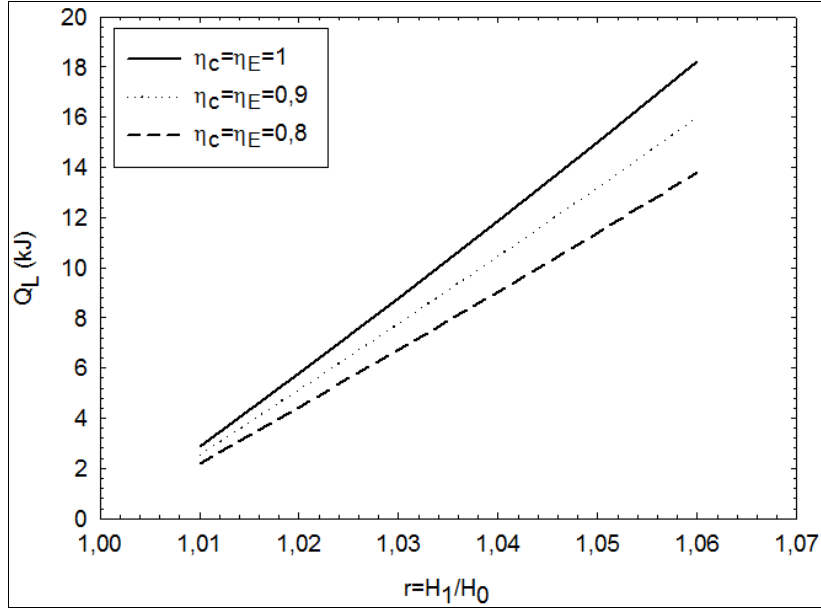
Şekil 27'de malzemeye uygulanan farklı manyetik alan oranları ve tersinmezlik derecesine göre performans katsayısının değişimi görülebilir. Adyabatik (de)manyetizasyon tersinir olarak ele alındığında ( $\eta_C = \eta_E = 1$ ) COP aynı manyetik alan

değişimi için en yüksek değerini almaktadır. Genel manada manyetik alanın oranı arttıkça performans katsayısında da artış görülmektedir. Tersinmezliklerle beraber performans katsayıları azalmıştır. Tersinmezlikler aynı oranda artarken performans katsayısındaki azalma miktarı da düşmektedir.



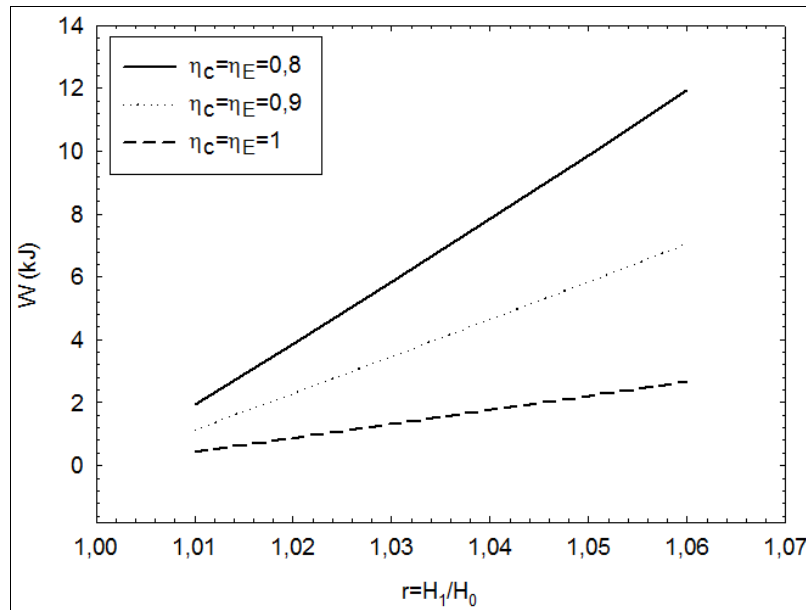
Şekil 27. Farklı tersinmezlik ve manyetik alan değerlerinde performans katsayısının değişimi

Aynı sıcaklıklarda fakat farklı tersinmezlik dereceleri ve manyetik alan oranlarında çalışan manyetik Brayton çevrimlerinde soğuk kaynaktan çekilen net ısı miktarı Şekil 28’de görülmektedir. Tersinmezlikler arttıkça soğuk kaynaktan çekilen net ısı miktarı azalsa da daha yüksek manyetik alan değerleri çekilen net ısı miktarını arttırmaktadır.



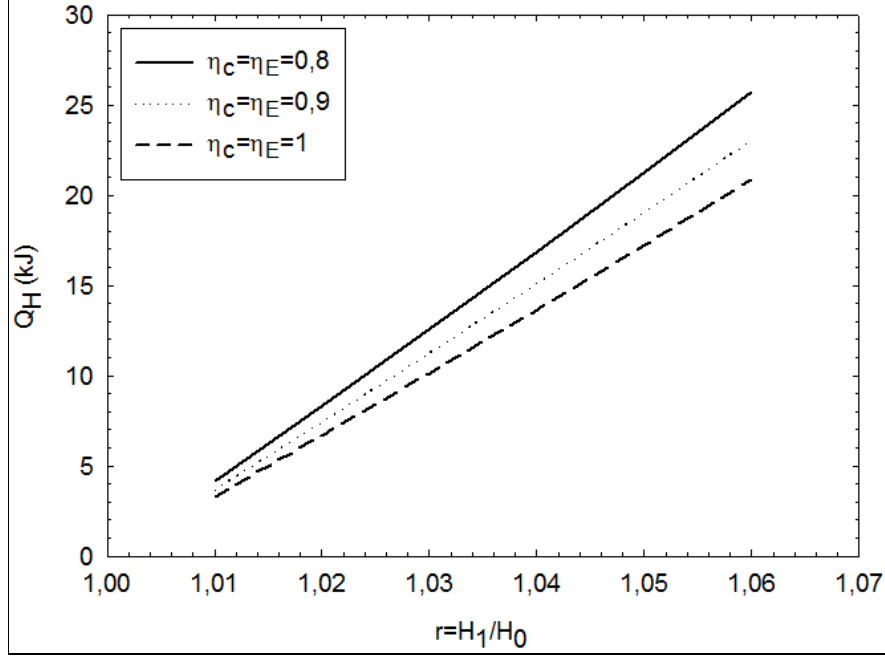
Şekil 28. Farklı tersinmezlik ve manyetik alan değerlerinde soğuk ortamdaki çekilen net ısının değişimi

Çevrim için gerekli iş değeri  $W$ , farklı manyetik alan oranlarına ve tersinmezliklere göre Şekil 29’da görüldüğü gibi değişmektedir. Hem uygulanan manyetik alanın oranı, hem de tersinmezliklerdeki artışla beraber çevrim için gerekli iş miktarı artsa da tersinmezlikler, gerekli iş miktarında, manyetik alan oranına göre daha etkilidir.



Şekil 29. Farklı tersinmezlik ve manyetik alan değerlerinde gerekli iş değerinin değişimi

Sıcak kaynağa verilen ısı miktarı Şekil 30’ da görülmektedir. Tersinmezlik derecesi ve manyetik alan oranı arttıkça sıcak kaynağa verilen ısı da artmaktadır. Literatürde Brayton çevrimini esas alan çalışmalar (Yang vd., 2005; He vd., 2008; Diguët vd., 2012) incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürle uyum içinde olduğu görülebilir.



Şekil 30. Farklı tersinmezlik ve manyetik alan değerlerinde sıcak ortama atılan ısı değerinin değişimi

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, rejenerasyonlu manyetik Ericsson ve Brayton çevrimleri için düşük manyetik alan veya yüksek sıcaklık değerlerinde paramanyetik malzemelere ait performans karakteristikleri parametrik olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada rejenerasyon, kaynak sıcaklıkları, manyetik alan oranları ve tersinmezliklerin, soğutma yükü ( $Q_L$ ), performans katsayısı (COP), çevrim için gerekli iş (W) gibi temel parametrelere etkileri belirlenmiştir. Bu bağlamda, üretilen sonuçların konu ile ilgili yürütülecek sayısal/deneysel çalışmalara bir referans teşkil edeceği düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özet halinde verilmektedir:

1. Rejenerasyonlu manyetik Ericsson çevrimi için rejenerasyon sırasında rejeneratörde biriken ısı dışında herhangi bir tersinmezlik veya kayıp hesaba katılmıyorsa sistem verimi sadece kaynak sıcaklıklarının bir fonksiyonudur.
2. Manyetik Ericsson çevriminde kaynaklar arası sıcaklık farkı arttıkça performans katsayısı azalmaktadır bu durum rejeneratörde biriken ısıyla beraber soğuk ortamdan çekilen ısı değerindeki azalma ile bağdaştırılabilir.
3. Kaynak sıcaklıkları manyetik Ericsson çevrimi performansına doğrudan etki etmektedir bu nedenle sistem parametreleri belirlenirken kaynak sıcaklıklarına özellikle dikkat edilmelidir.
4. Brayton çevrimi için adyabatik süreçlerdeki tersinmezlik dereceleri arttıkça çekilen net ısı ve performans katsayısı azalırken, çevrim için gerekli iş ve sıcak kaynağa atılan ısı değeri artmıştır. Tersinmezlik derecesinde aynı oranda artışlar performans katsayısında azalan hızda bir düşüşe sebep olmaktadır.
5. Brayton çevriminde ilk ve son manyetik alan değerleri oranı arttıkça soğuk ortamdan çekilen ısı ve çevrim için gereken iş değerleri artmaktadır. Bu durum performans katsayısında tersinmezliklerin daha etkili olduğunu göstermektedir.

## 5. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, rejenerasyonlu manyetik Ericsson ve Brayton çevrimlerine ilişkin temel çevrim parametreleri yüksek sıcaklık veya düşük manyetik alan değerleri dikkate alınarak paramanyetik malzemeler için incelenmiştir. Bundan sonraki çalışmalara yön vermesi açısından aşağıda verilen önerilerin dikkate alınması faydalı olacaktır.

1. Ferromanyetik malzemeler çalışmaya dahil edilerek temel performans farkları incelenebilir.
2. Farklı çevrimler (AMR ve hibrit çevrimler (Kitanovski vd., 2013)) için performans özellikleri incelenebilir.
3. Farklı rejenerasyon davranışları irdelenerek rejenerasyonun çevrimdeki fonksiyonu değerlendirilebilir.
4. Sonlu sıcaklık farkında ısı transferi, rejeneratör verimi, ısı kaçakları, iç ve dış tersinmezlikler gibi parametreler temel fonksiyonlara yansıtılarak bu değerlerin her birinin çevrim üzerindeki etkileri incelenebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Apra, C. ve Maiorino, A., 2010. A flexible numerical model to study an active magnetic refrigerator for near room temperature applications, Applied Energy, 87, 2690–2698.
- Arnold, V.I., 1980. Mathematical methods of classical mechanics, Springer, Berlin. [Second corrected printing].
- Barclay, J.A. ve Steyert, W.A., 1982. Active magnetic regenerator, U.S. Patent No. 4.332.135.
- Bingfeng, Y., Yan, Z., Qiang, G. ve Dexi, Y., 2006. Research on performance of regenerative room temperature magnetic refrigeration cycle, International Journal of Refrigeration, 29, 1348–1357.
- Bjørk, R., Bahl, C. R. H., Smith, A. ve Pryds, N., 2010. Review and comparison of magnet designs for magnetic refrigeration, International Journal of Refrigeration, 33, 437–448.
- Borbolla, I.M., 2012. Assessment of Magnetic Cooling for Domestic Applications, Yüksek Lisans Tezi, KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology, Stockholm, İsveç.
- Brown, G.V., 1976. Magnetic heat pumping near room temperature, Journal of Alloys and Compounds, 47, 3673–3680.
- Brown, G.V., 1978. Practical and efficient magnetic heat pump, NASA Tech. Brief 3, 190-191.
- Burdyny, T., 2012. Simplified Modeling of Active Magnetic Regenerators, Yüksek Lisans Tezi, University of Victoria, Victoria, Kanada.
- CHA: Canadian Healthcare Association, 2005. Hydrogen Systems: A Discussion Paper for Greenhouse Gas Reduction and Economic Growth.
- Chen, G. L., 1992. Thermodynamic Analysis of Four Magnetic Heat-Pump Cycles, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 114, 715–720.
- Chen, L. ve Yan, Z., 1994. Main characteristics of a Brayton refrigeration cycle of paramagnetic salt, Journal of Applied Physics, 75, 1249-1253.
- Chen, L. ve Yan, Z., 1995. The effect of thermal resistances and regenerative losses on the performance characteristics of a magnetic Ericsson refrigeration cycle, Journal of Applied Physics, 84, 1791-1794.



- Choudhury, B., Chatterjee, P. K. ve Sarkar, J. P., 2010. Review paper on solar-powered air- conditioning through adsorption route, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 2189–2195.
- Coulomb, D., 2007. The IIR and environmental challenges facing the refrigeration sector, Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia.
- Dan'kov, S.Y., Tishin, A.M., Pecharsky, V.K. ve Gschneidner, K.A., 1998. Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolinium, Physical review B: Condensed Matter, 6.
- Diguet, G., Lin G. ve Chen, J., 2012. Performance characteristics of magnetic Brayton refrigeration cycles using Gd, Gd<sub>0.74</sub>Tb<sub>0.26</sub> and (Gd<sub>3.5</sub>Tb<sub>1.5</sub>)Si<sub>4</sub> as the working substance, International Journal of Refrigeration, 35, 1035–1042.
- Diguet, G., Lin, G. ve Chen, J., 2012. Performance characteristics of an irreversible regenerative magnetic Brayton refrigeration cycle using Gd<sub>0.74</sub>Tb<sub>0.26</sub> as the working substance, Cryogenics, 52, 500–504.
- Engelbrecht, K. L., Nellis, G. F., Klein, S. A. ve Zimm, C. B., 2011. Recent developments in Room Temperature Active Magnetic Regenerative Refrigeration, HVAC&R Research, 530.
- Fujieda, S., Fujita, A. ve Fukamichi, K., 2003. Large magnetocaloric effects in NaZn<sub>13</sub>-type La(Fe<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>)<sub>13</sub> compounds and their hydrides composed of icosahedral clusters, Science and Technology of Advanced Materials, 4, 339-346.
- Gómez, J.R., Garcia, R.F., Catoira, A.M. ve Gómez, M.R., 2013. Magnetocaloric effect: A review of the thermodynamic cycles in magnetic refrigeration, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 17, 74-82.
- Gschneidner, Jr.K.A. ve Pecharsky, V.K., 2008. Thirty years of near room temperature magnetic cooling: where we are today and future prospects, International Journal of Refrigeration, 31, 945–61.
- He, J., Chen, J. ve Wu, C., 2002. Heat-Transfer Effect on the Performance of a Magnetic Ericsson Refrigerator, Journal of non equilibrium thermodynamics, 27, 57-69.
- He, J., Chen, J. ve Wu, C., 2006. The performance characteristics of a magnetic Brayton refrigeration cycle for different regeneration cases, International Journal of Ambient Energy, 27, 141-148.
- He, J.Z., Wu, X. ve Deng, X.F., 2008. Performance characteristics of an irreversible magnetic Brayton refrigeration cycle, International Journal of Refrigeration, 31, 138–144.

- Hongxia, X., Lingai, L. ve Gilles, F., 2007. Development and applications of solar- based thermoelectric technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 923–936.
- Karamangil, M., Coskun, S., Kaynakli, O. ve Yamankaradeniz, N., 2010. A simulation study of performance evaluation of single-stage absorption refrigeration system using conventional working fluids and alternatives, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 1969–1978.
- Kitanovski, A. ve Egolf, P.W., 2006. Thermodynamics of magnetic refrigeration, International Journal of Refrigeration, 29, 3-21.
- Kitanovski, A., Plaznik, U., Tusek, J. ve Poredos, A., 2013. New thermodynamic cycles for magnetic refrigeration, International Journal of Refrigeration, Basımda
- Lucia, U., 2008. General approach to obtain the magnetic refrigeration ideal coefficient of performance, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 387, 3477–3479.
- Lucia, U., 2010. Exergy analysis of magnetic refrigeration, [arxiv.org/pdf/1011.1684.pdf](https://arxiv.org/pdf/1011.1684.pdf) 24 Aralık, 2013.
- Lucia, U., 2011. Second law analysis of the ideal Ericsson magnetic refrigeration, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 2872–2875.
- Medeiros, L. G., Oliveira, N. and Troper, A., 2010. Giant magnetocaloric and barocaloric effects in Mn(As<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>), Journal of Alloys and Compounds, 501, 177-182.
- Miller, A., 2003. Constraining Climate Change with Nuclear Electricity and Hydrogen (N + H<sub>2</sub>), AECL Report 12142.
- Morrish, A.H., 1965. *The Physical Principles of Magnetism*. JohnWiley & Sons, Inc.
- Nielsen, K.K., 2010. Numerical modeling and analysis of the active magnetic regenerator, Doktora Tezi, DTU Mechanical Engineering, Danimarka.
- Pecharsky, A., Gschneidner, K. and Pecharsky, V., 2003. The giant magnetocaloric effect of optimally prepared Gd<sub>5</sub>Si<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>, Journal of Applied Physics, 8, 4722-4728.
- Pecharsky, V. K. ve Gschneidner, K., 2006. Advanced magnetocaloric materials: What does the future hold?, International Journal of Refrigeration, 29, 1239-1249.
- Pecharsky, V.K. ve Gschneidner, Jr.K.A., 1997. Giant magnetocaloric effect in Gd<sub>5</sub>(Si<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>), Physical Review Letters, 78, 4494–4507.
- Plaznik, U., Tusek, J., Kitanovski, A. ve Poredos, A., 2013. Numerical and experimental analyses of different magnetic thermodynamic cycles with an active magnetic regenerator, Applied Thermal Engineering, 59, 52-59.

- Shull, R. D., Provenzano, V., Shapiro A. J., Fu, A., Lufaso, M. W., Karapetrova, J. ve Kletetschka, G., 2006. The Effects of Small Metal Additions (Co, Cu, Ga, Mn, Al, Bi, Sn) on, Journal of Applied Physics, 99, 1-3.
- Smaïli, M. ve Chahine, R., 1998. Thermodynamic investigations of optimum active magnetic regenerators, Cryogenics, 38, 247–252.
- Tishin, A.M., Gschneidner Jr.K.A. ve Pecharsky, V.K., 1994, Magnetocaloric effect and heat capacity in the phase-transition region, Physical Review B, 59, 503.
- Tishin, A.M. ve Spichkin, Y.I., 2003. The magnetocaloric effect and its applications, series in condensed matter physics, Institute of Physics, Publishing Ltd., London.
- Tura. A, 2013. Design and Analysis of a Nested Halbach Permanent Magnet Magnetic Refrigerator, Doktora tezi, University of Victoria, Kanada.
- Tusek, J., Kitanovski A., Prebil, I. ve Poredos, A., 2011. Dynamic operation of an active magnetic regenerator (AMR) : Numerical optimization of a packed-bed AMR, International Journal of Refrigeration, 34, 1507-1517.
- Tyagi, S. K., Kaushik, S. C. ve Singhal, M. K., 2002. Parametric study of irreversible Stirling and Ericsson cryogenic refrigeration cycles, Energy Conversion and Management, 43, 2297–2309.
- URL-1, [http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell's\\_equations](http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell's_equations) , 22 Nisan 2013
- URL-2, <http://www.maxwells-equations.com/> , 22 Nisan 2013
- Wei, F., Lin, G., Chen, J. ve Brück, E., 2011. Performance characteristics and parametric optimization of an irreversible magnetic Ericsson heat-pump, Physica B: Condensed Matter, 406, 633–639.
- Wu, F., Chen, L., Wu, C., Sun, F. ve Zhu, Y., 2001. Optimization of irreversible magnetic Stirling cryocoolers, International Journal of Engineering Science, 39, 4, 361–368.
- Xia, Z., Zhang, Y., Chen, J. ve Lin, G., 2008. Performance analysis and parametric optimal criteria of an irreversible magnetic Brayton-refrigerator, Applied Energy, 85, 159–170.
- Xia, Z.R., Ye, X.M., Lin, G.X. ve Brück, E., 2006. Optimization of the performance characteristics in an irreversible magnetic Ericsson refrigeration cycle, Physica B: Condensed Matter, 381, 246-255.
- Yan, Z. ve Chen, J., 1992. The effect of field dependent heat capacity on the characteristics of the ferromagnetic Ericsson refrigeration cycle, Journal of Applied Physics, 72, 1-5.

- Yan, Z., 1995. On the criterion of perfect regeneration for a magnetic Ericsson cycle, Journal of Applied Physics, 78, 2903-2905.
- Yang, Y., Chen, J., He, J. ve Brück, E., 2005. Parametric optimum analysis of an irreversible regenerative magnetic Brayton refrigeration cycle, Physica B: Condensed Matter, 364, 33–42.
- Ye, X.M., Lin, G.X., Chen, J.C. ve Brück, E., 2007. Parametric optimization of an irreversible magnetic Ericsson refrigerator with finite heat reservoirs, Physica B: Condensed Matter, 391, 350-356.
- Yu, B., Liu, M., Egolf, P.W. ve Kitanovsky, A., 2010. A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010, International Journal of Refrigeration, 33, 1029-1060.
- Yu, B.F., Gao, Q., Zhang, B., Meng, X.Z. ve Chen, Z., 2003. Review on Research of Room Temperature Magnetic Refrigeration, International Journal of Refrigeration, 26, 622-636.
- Zhai, X.Q., Qu, M. ve Wang Yue Li, R.Z., 2011, A review for research and new design options of solar absorption cooling systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 4416–4423.
- Zhang, X., Chen, J., Lin, G. ve Brück, E., 2010. Influence of irreversible losses on the performance of a two-stage magnetic Brayton refrigeration cycle, Physica B: Condensed Matter, 405, 1632–1637.
- Zimm, C., Jastrab, A., Sternberg, A., Pecharsky, V. K., Gschneidner, Jr. K. A., Osborne, M. ve Anderson, I., 1998. Description and performance of a near-room temperature magnetic refrigerator, Advanced Cryogenic Engineering, 43, 1759–1766.
- Zimm, C.B., Sternberg, A., Jastrab, A.G., Boeder, A.M., Lawton, L.M. ve Chell, J.J., 2003. Rotating bed magnetic refrigeration apparatus, US Patent 6.526.759.4.

## 7. EKLER

### Ek 1. Manyetik Soğutucu Prototipleri

<i>Çalışma</i>	<i>Yıl</i>	<i>Prototip türü ve en yüksek çalışma frekansı(Hz)</i>	<i>En yüksek soğutma gücü (W)</i>	<i>En yüksek DT (K)</i>	<i>Mıknatıs tipi ve alan değeri (T)</i>	<i>Manyetik rejeneratör malzemesi ve aracı akışkan</i>
1 Brown (1976, 1978) NASA, ABD	1976	Piston hareketi, Stirling/	/	47	Süperiletken 7 T	1 mm Gd plakaları, 20% etil alkol-su karışımı
2 Kirol and Dacus (1987) Idaho National Engineering Laboratory, ABD	1987	Dönel, Ericsson, 0.5 Hz	/	11	Kalıcı, 0.9 T	Gd plakaları, su
3 Green vd. (1990) US NAVY, ABD	1990	Piston hareketi, 0.02 Hz	/	24	Süperiletken, 7	G-Tb, nitrojen gazı
4 Zimm vd. (1998) AMES Ast. Corp. A., ABD	1997	Piston hareketi	600	38	Süperiletken, 5	Gd küreleri 0.15- 0.3 mm
5 Bohigas vd. (2000) Mater. Science Institute, Barcelona, İspanya	2000	Dönel, 0.8 Hz	/	5	Kalıcı, 0.9	Gd, zeytin yağı
6 Okamura vd. (2005) Tokyo Inst. Tech Chubu Electric Power, Japonya	2000	Piston hareketi	100	21	Süperiletken, 4	Gd küreleri
7 Rowe ve Barclay (2002) Univ. Victoria, Victoria, Kanada	2001	Piston hareketi, 0.8 Hz	2	14	Süperiletken, 2	Gd & Gdl xTbx, Helyum

Ek 1'in devamı

8	Zimm vd. (2003, 2005, 2006), Ast. Corp. A., Madison, Wisconsin, ABD	2001	Dönel, 4 Hz	50	25	Kalıcı, 1.5	Gd, GdEr küreleri, 0.25-0.5 mm, su
10	Blumenfeld vd. (2002) Los Alamos Natl. Lab. New Mexico, ABD	2002	Eşanjörün devreye sokulup çıkarılması ile hareketli parça yok	3	15	Süperiletken, 1.7	Gd tozu
11	Okamura vd. (2005) Tok.Inst.Tech. Chubu Electric Japonya	2003	Dönel (miknatıslar hareketli), 0.4 Hz	60	8	Kalıcı, 0.77	GdL-xDyx alaşımları, küreler 0.6 mm, 1 kg, su
12	Clot vd. (2003) Lab. d'Electronique Grenoble, Fransa	2003	Piston hareketi, 0.5 Hz	8.8	4	Kalıcı, 0.8	Gd folyosu
13	Richard vd. (2004) Univ. Quebec, U Univ. Victoria, Kanada	2004	Piston hareketi	2	14	Süperiletken, 2	Gd-R
14	Rowe vd. (2005, 2006) Univ. Victoria Kanada	2004	Piston hareketi, 1 Hz	10	50	Süperiletken, 2	Gd-R
15	Rowe Univ. Victoria Kanada	2005	Piston hareketi, 1 Hz	/	86	Süperiletken, 5	Gd-R, Helyum
16	Shir vd. (2005) George Washington Univ., Ashburn, Virginia, ABD	2005	Piston hareketi	/	5	Kalıcı, 2	Gd tozu
17	Okamura vd. (2007) Tokyo I. Tech., Chubu Electric Power, Japonya	2005	Dönel	110	10	Kalıcı, 0.77	Gd alaşımları, MnAsSb alaşımları, Su
18	Vasile ve Müller (2005, 2006) INSA, Cooltech Applications Strasbourg, Fransa	2005	Dönel	360	10	Kalıcı, 2.4	Gd plakaları, su

Ek 1'in devamı

19	Yu vd. (2005) School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiatong University Xi'an, Çin	2005	Piston hareketi	18.7	3	Elektro miknatis (su sogutmalı), 2.18	Gd 0.3mm ve Gd5Si2Ge2 partikülleri, su
20	Kawanami vd. (2005) Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Japonya	2005	Piston hareketi, 0.02 Hz	/	10	Kalıcı, 1.0	Gd, su
21	Yao vd. (2006) Technical Institute of Physics and Chemistry, Beijing, Çin	2006	Piston hareketi, 1 Hz	51	42	Kalıcı, 1.5	Gd partikülleri, helyum
22	Egolf vd. (2006) University of Applied Sc.of Western Switzerland, İsviçre	2006	Dönel, 0.8	-	-	Kalıcı, 0.8	Gd partikülleri, hava
23	Okamura vd. (2005, 2007) Tokyo Inst. Tech., Chubu Electric Power, Japonya	2006	Dönel 0.5 Hz	560	8	Kalıcı, 1.1	Gd folyosu, su
24	Huang vd. (2006, 2007) Baotou Research Institute of Rare Earth, Çin	2006	Piston hareketi	50	18	Kalıcı, 1.5	Gd 750 g ve LaFe, su
25	Zimm vd. (2007) Astronautics Corp. America Madison, Wisconsin, ABD	2007	Dönel, 4 Hz	220	12	Kalıcı, 1.5	Gd plakaları, su
26	Tura ve Rowe (2007) Univ. Victoria Victoria, Kanada	2007	Dönel, 4 Hz	/	13.2	Kalıcı, 1.47	Gd pulu, water
27	Buchelnikov vd. (2007) Chelyabinsk State University, Rusya	2007	Dönel, 10 Hz	40	/	Kalıcı, 1	Gd, NiMnGa alaşımı

## Ek 1'in devamı

28	Petersen vd. (2007) Riso National Laboratory, Danimarka	2007	Piston hareketi, < 1 Hz	/	8.7	Kalıcı, 1.2	Gd plakası
29	Muller vd. (2007) INSA, Cooltech Applications Strasbourg, Fransa	2007	Dönel (hareketli mknatis)	/	/	Kalıcı, 1.3	Gd, su
30	Chen vd. (2007) School of Materials Science and Engineering, Sichuan University Chengdu, Çin	2007	Dönel (hareketli mknatis), 0.7 Hz	40	11.5	Kalıcı, 1.5	Gd parçacıkları, su
31	Nakamura vd. (2008) Graduate School of Engr, Hokkaido University, Japonya	2008	Piston hareketi	/	/	Kalıcı, 2	Gd partikülleri, su veya hava
32	Hirano vd. (2009) Hokkaido Industrial Research Institute, Japonya	2009	Piston hareketi	/	~2	Kalıcı, 2.3	LaFeSi, hava
33	Zheng vd. (2009) South China University of Technology, Çin	2009	Piston hareketi	/	/	Kalıcı, 1.5	Gd
34	Bour vd. (2009), Cooltech Applications, Fransa	2009	Piston hareketi, 1 Hz	/	16.1	Kalıcı, 1.1	Gd plakaları, 0.6 mm, su
35	Coelho vd. (2009) Universidade Estadual de Campinas, Breziya	2009	Dönel, 0.85	/	11	Elektro mknatis, 2.3	Gd, etil alkol
36	Dupuis vd. (2009) Grenoble Electrical Engineering Laboratory, Fransa	2009	Piston hareketi, 1 Hz	/	7.8	Kalıcı, 0.8	Gd, 1 mm



Ek 1'in devamı

37	Kim ve Jeong (2009) Korea Advanced Institute of Science and Technology, Kore	2009	Dönel, 1 Hz	/	16	Kalıcı, 1.58	Gd partikülleri, 325 - 500 mm. Helyum
38	Pryds vd. (2009) Riso DTU, Danimarka	2009	Piston hareketi	/	/	Kalıcı, 1.5	La <sub>0.67</sub> Ca <sub>0.33</sub> SrxMn <sub>0</sub> 3 plakaları, su etanol karışımı
39	Sari vd. (2009) IGT in University of Applied Sciences of Western Switzerland, İsviçre	2009	Dönel	/	/	Kalıcı, 2	LaFe <sub>1</sub> Co <sub>0.9</sub> Sil <sub>1</sub> ve Gd, hava
40	Tagliafico vd. (2009) University of Genoa, Genoa, İtalya	2009	Piston hareketi, <0.2 Hz	/	/	Kalıcı, 1.5	Gd, 300 mm, su
41	Tura ve Rowe (2009) University of Victoria, Victoria, Kanada	2009	Dönel, 4 Hz	50	29	Kalıcı, 1.47	Gd küreleri, 300 mm
41	Tusek vd. (2009) University of Ljubljana, Slovenya	2009	Dönel, 4 Hz	/	~7	Kalıcı, 1.4	Gd plakaları, 0.3 mm, 600 g, su
42	Russek vd. (2010) Ast. Corp. A., Madison, Wisconsin, ABD	2010	Dönel, 4 Hz	840	19	Kalıcı, 1.5	Gd küreleri, 900 g
43	Trevizoli vd. (2011) Federal University of Santa Caterina, Brezilya	2011	Piston hareketi, 0.14 Hz	4	4.2	Kalıcı, 1.7	Gd plakaları, 150 g
44	Jacob vd. (2012) Ast. Corp. A., Madison, Wisconsin, ABD	2012	Dönel, 4 Hz	2049	~	Kalıcı, 1.5	LaFeH küreleri.

Ek 1'in devamı

45	Bahl vd, (2012) Riso National Laboratory, Danimarka	2012	Dönel, 2.5 Hz	1010	25	Kalıcı, 1.4	Gd küreleri, 2800 g
46	Arnold vd. (2012), University of Victoria, Victoria, Kanada	2012	Dönel, 0.8 Hz	100	32	Kalıcı, 1.45	Gd küreleri, 620 g

## ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emre ÇETİN, 1984 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğrenimi Ordu'da lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2003 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2008 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. Aynı yıl İstanbul'da GEA Heat Exchangers'ta proje mühendisi olarak göreve başladı ve 3 yıl boyunca çeşitli projelerde görev aldı. 2011 yılı sonundan itibaren KTÜ Arsin Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir. Evlidir ve bir oğlu vardır.