



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

MANYETİK ERICSSON SOĞUTMA ÇEVİRİMİNİN PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ

**YUNUS EMRE ÇETİN
ORHAN AYDIN
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**



MANYETİK ERICSSON SOĞUTMA ÇEVİRİMİNİN PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ

Yunus Emre ÇETİN
Orhan AYDIN

ÖZET

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 etkileyerek daha kompakt ve ekonomik tasarımların oluşturulmasına fayda sağlayacaktır. Bu çalışmada, manyetik Ericsson çevrimi, 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 tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Manyetik soğutma, manyetik Ericsson çevrimi, paramanyetik malzemeler, istatistiksel mekanik.

ABSTRACT

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, they have 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. In this study, parametric investigation is carried out for magnetic Ericsson cycle. 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 reservoir temperatures, magnetic intensity and the degree of irreversibility are analyzed. Results show that coefficient of performance decreases with an increase in the temperature span.

Key Words: Magnetic refrigeration, magnetic Ericsson cycle, paramagnetic materials, statistical mechanics.

1. GİRİŞ

Manyetik soğutma, varlığı 1881 den beri bilinen manyetokalorik etki [1] ile ilişkilidir. 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.

Manyetik soğutma çevrimlerine dayanan daha verimli sistemlerin tasarlanması, bu çevrimlerin iyi anlaşılması ve analizini gerektirmektedir. Bu bağlamda çevrim verimine etki edecek parametrelerin belirlenmesi ve farklı sınır koşulları için parametrik çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Manyetik Ericsson soğutma çevrimini istatistiksel mekaniğe bağlı olarak oluşturulan eşitlikler yardımıyla parametrik olarak inceleyen bir takım çalışmalar mevcuttur [2-6].

Bu çalışmada, yüksek sıcaklık veya düşük manyetik alan değerlerinde paramanyetik malzemelerle çalışan rejenerasyonlu manyetik Ericsson çevrimi irdelenmiştir. Çalışılan manyetik alan değerlerinin, rejenerasyonun, sıcak ve soğuk kaynak sıcaklıklarının sistem parametrelerine etkileri ortaya çıkarılmıştır.

2. PARAMANYETİK MALZEMELERE AİT TEMEL TERMODİNAMİK ÖZELLİKLER

Paramanyetik malzemelerin termodinamik özellikleri için istatistiksel mekaniğe göre basit paramanyetik bir malzemede üleşim fonksiyonu [7, 8] şu şekilde ifade edilmektedir:

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

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

Burada x, şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$x = \frac{g \mu_B j H}{k T} \quad (2)$$

Üleşim fonksiyonu (Z) ve Helmholtz serbest enerjisi (A), kullanılarak entropi, iç enerji, manyetizasyon ve sabit manyetik alanda ısı kapasitesi değerleri hesaplanabilir [7, 8]. Bu durumda,

$$A = -k T \ln Z \quad (3)$$

$$S = -\left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_H = N k \left[\ln \sinh\left(\frac{2j+1}{2j} x\right) - \ln \sinh\left(\frac{x}{2j}\right) - x B_j(x) \right] \quad (4)$$

$$U = A + T S = -N k T x B_j(x) \quad (5)$$

$$M = -\left(\frac{\partial A}{\partial H}\right)_T = N g \mu_B j B_j(x) \quad (6)$$



$$c_H = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_H = -Nkx^2 \left[\left(\frac{2j+1}{2j} \right)^2 \operatorname{csch}^2 \left(\frac{2j+1}{2j} x \right) - \left(\frac{1}{2j} \right)^2 \operatorname{csch}^2 \left(\frac{1}{2j} x \right) \right] \quad (7)$$

Burada $B_j(x)$ Brillouin fonksiyonudur ve

$$B_j(x) = \frac{2j+1}{2j} \coth \left(\frac{2j+1}{2j} x \right) - \frac{1}{2j} \coth \left(\frac{1}{2j} x \right) \quad (8)$$

şeklinde tanımlanır.

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

$$B_j(x) \approx \left(\frac{1}{3} \right) \left(1 + \left(\frac{1}{j} \right) \right) x \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir ve manyetizasyon denklemi Curie yasasındaki forma sahip olur.

$$M = \frac{cH}{T} \quad (10)$$

Burada Curie sabiti;

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

kullanılarak belirlenir.

Aynı zamanda entropi, iç enerji ve sabit manyetik alanda ısı kapasitesi değerleri şu şekli alır:

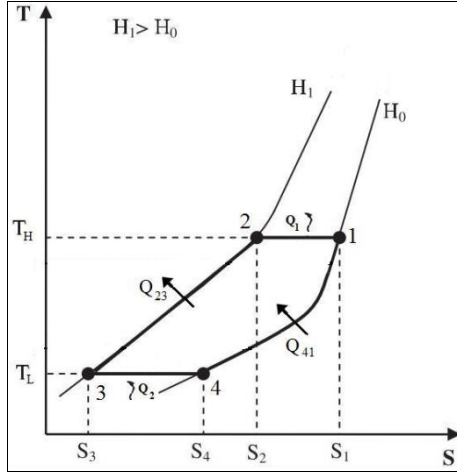
$$S = Nk \ln(2j+1) - \frac{cH^2}{2T^2} \quad (11)$$

$$U = -\frac{cH^2}{T} \quad (12)$$

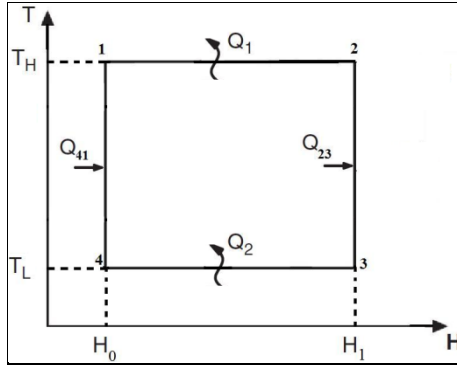
$$c_H = \frac{cH^2}{T^2} \quad (13)$$

3. MANYETİK ERICSSON ÇEVİRİMİ ANALİZİ

Zayıf bir manyetik alan değerinde veya yüksek sıcaklıkta Curie yasasının geçerli olduğu paramanyetik bir soğutucunun kullanıldığı Ericsson çevrimine ait T-s diyagramı Şekil 1' de görülmektedir [9]. Şekil 2' 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 1. Rejenerasyonlu manyetik Ericsson çevrimine ait T-s diyagramı



Şekil 2. 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 ortamdaki 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 [9];

$$Q_1 = T_H(s_1 - s_2) = -\frac{cH_0^2}{2T_H} + \frac{cH_1^2}{2T_H} = \frac{c(H_1^2 - H_0^2)}{2T_H} \quad (14)$$

$$Q_2 = T_L(s_4 - s_3) = -\frac{cH_0^2}{2T_L} + \frac{cH_1^2}{2T_L} = \frac{c(H_1^2 - H_0^2)}{2T_L} \quad (15)$$

$$Q_{23} = \int_{T_L}^{T_H} c_{H_1} dT = \int_{T_L}^{T_H} \frac{cH_1^2}{T^2} dT = cH_1^2(T_L^{-1} - T_H^{-1}) \quad (16)$$

$$Q_{41} = \int_{T_L}^{T_H} c_{H_0} dT = \int_{T_L}^{T_H} \frac{cH_0^2}{T^2} dT = cH_0^2(T_L^{-1} - T_H^{-1}) \quad (17)$$

Eşitliklerden de görüleceği üzere soğutucu malzeme ile rejeneratör arasındaki ısı alışverişisi 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.

$$Q_B = Q_{23} - Q_{41} = c(H_2^2 - H_1^2)(T_L^{-1} - T_H^{-1}) \quad (18)$$

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 çalışmada 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 [9]:

$$Q_H = Q_1 \quad (19)$$

$$Q_L = Q_2 - Q_B \quad (20)$$

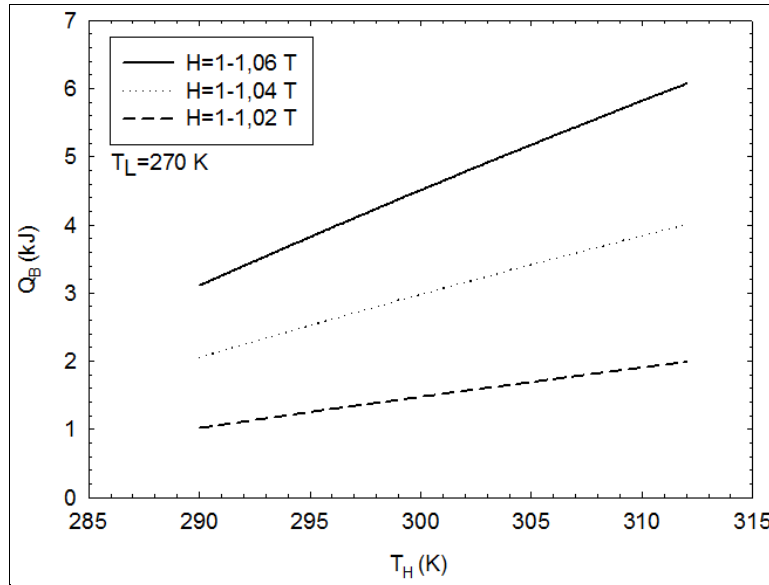
$$W = Q_H - Q_L = Q_1 - Q_2 + Q_B = \frac{c(H_1^2 - H_0^2)(T_H - T_L)}{2T_H T_L} \quad (21)$$

$$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_2 - Q_B}{Q_1 - Q_2 + Q_B} = \frac{2T_L - T_H}{T_H - T_L} \quad (22)$$

4. MANYETİK ERICSSON ÇEVİRİM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

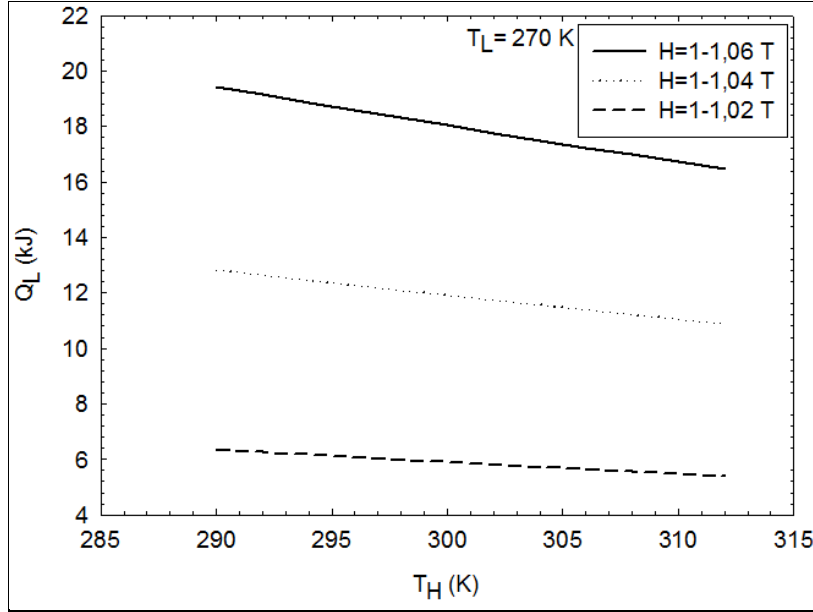
Manyetik Ericsson çevrimi iki izotermal ve iki sabit manyetik alan sürecinden meydana gelmektedir. Çevrim veriminin Carnot çevrim verimine yaklaşması ve rejeneratörün düzgün bir şekilde işlevini yerine getirebilmesi için sabit manyetik alan değerlerinde görülen rejenerasyon sırasında alınan ve verilen ısıların eşit olması gerekir. Fakat farklı manyetik alan değerlerinden ve rejeneratörün veriminden ötürü mükemmel rejenerasyon söz konusu değildir.

Manyetik Ericsson çevriminde sıcak ve soğuk kaynak değerleri soğutma performansına etki eden iki önemli parametredir. Şekil 3'te rejenerasyon sonucu biriken ısının farklı sıcak kaynak ve manyetik alan değişimlerine bağlı olarak aldığı değerler görülmektedir. Uygulanan manyetik alan değeri arttıkça rejeneratörde biriken ısı da artmaktadır.



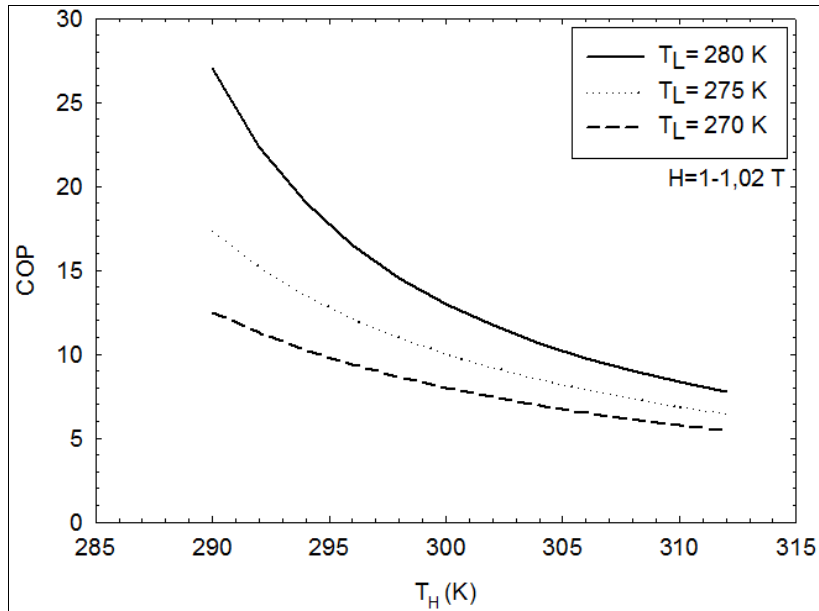
Şekil 3. Farklı sıcak kaynak ve manyetik alan değerlerinde rejeneratörde biriken ısının değişimi

Sıcak kaynak sıcaklığı arttıkça soğutulan ortamdaki çekilen ısı Şekil 4'te görüldüğü üzere azalmaktadır.



Şekil 4. Farklı sıcak kaynak ve manyetik alan değerlerinde soğutulan ortamdaki çekilen net ısının değişimi

Şekil 5'te 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.



Şekil 5. 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;

$$COP = \frac{2T_L - T_H}{T_H - T_L}$$

SONUÇLAR

Bu çalışmada, rejenerasyonlu manyetik Ericsson çevrimi için düşük manyetik alan veya yüksek sıcaklık değerlerinde paramanyetik malzemelere ait performans karakteristikleri parametrik olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada rejenerasyon, kaynak sıcaklıkları ve çalışılan manyetik alan değerlerinin soğutma yükü (Q_L) ve performans katsayısı (COP) 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 çevrim performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, sistem parametreleri belirlenirken kaynak sıcaklıklarına özellikle dikkat edilmelidir.

SEMBOLLER

$B_J(x)$	Brillouin fonksiyonu	
C_x	Sabit x değerinde özgül ısı	J/kgK
g	Lande sabiti	
H	Manyetik alan	Amper/m
J	Kuantum sayısı	
k_B	Boltzmann sabiti	
M	Manyetizasyon	Amper/m
N	m^3 'teki atom sayısı	$1/m^3$
P	Basınç	Pa
R	Gaz sabiti	J/mol K
T	Mutlak sıcaklık	K
T_C	Curie sıcaklığı	K

Yunan harfleri

γ	Elektron sabiti	J/molK
μ	Manyetik geçirgenlik	N/A^2
μ_B	Bohr manyetonu	J/T

KAYNAKLAR

- [1] 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.
- [2] He, J., Chen, J., Wu, C., 2002. Heat-Transfer Effect on the Performance of a Magnetic Ericsson Refrigerator, Journal of non equilibrium thermodynamics, 27, 57-69.
- [3] Xia, Z.R., Ye, X.M., Lin, G.X., Brück, E., 2006. Optimization of the performance characteristics in an irreversible magnetic Ericsson refrigeration cycle, Physica B: Condensed Matter, 381, 246-255.
- [4] Bingfeng, Y., Yan, Z., Qiang, G., Dexi, Y., 2006. Research on performance of regenerative room temperature magnetic refrigeration cycle, International Journal of Refrigeration, 29, 1348–1357.
- [5] Ye, X.M., Lin, G.X., Chen, J.C., Brück, E., 2007. Parametric optimization of an irreversible magnetic Ericsson refrigerator with finite heat reservoirs, Physica B: Condensed Matter, 391, 350-356.
- [6] Wei, F., Lin, G., Chen, J., Brück, E., 2011. Performance characteristics and parametric optimization of an irreversible magnetic Ericsson heat-pump, Physica B: Condensed Matter, 406, 633–639.
- [7] Morrish, A.H., 1965. The Physical Principles of Magnetism. JohnWiley & Sons, Inc.
- [8] Pathria, R.K., 1972. Statistical Mechanics, Pergamon Press Ltd.,
- [9] Çetin, Y.E., 2014. Manyetik Ericsson ve Brayton Soğutma Çevrimlerinin Parametrik Olarak İncelenmesi, Yüksekisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emre ÇETİN

1984 Trabzon doğumludur. İlk ve orta öğrenimi Ordu'da lise öğrenimini Trabzon'da tamamlamıştır. 2003 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2008 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun olmuştur. Aynı yıl GEA Heat Exchangers'ta proje mühendisi olarak göreve başlamış ve 3 yıl boyunca çeşitli projelerde görev almıştır. 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.

Orhan AYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Termodinamik Anabilim Dalı öğretim üyelerinden olan Aydın, 2007 yılında profesör unvanını aldı. Aydın'ın, seksenin üzerinde uluslararası saygın dergide yayınlanmış makalesi, uluslararası saygın bir yayınevi tarafından basılan bir kitap bölümü, çok sayıda yurtiçi ve yurtdışı bildirisi mevcuttur. Bu eserlerine bu zamana kadar 1200/1600 civarında (Web of Science/Scopus) atıf yapılmıştır. Yaptığı çalışmalar neticesinde şu ulusal ve uluslararası ödüllere lâyık görülmüştür: 2007 ODTÜ M.N. Parlar Vakfı Araştırma Teşvik Ödülü, 2008 TÜBA Üstün Başarılı Genç Bilim İnsanı Ödülü, 2008 TÜBİTAK Bilim Teşvik Ödülü, 2009 yılında TWAS Asosiye Üyelik ödülü. Aydın'ın araştırma ilgisi, termodinamik, ısı ve kütle transferi, akışkanlar mekaniği, mikro-elektromekanik sistemlerde akış fiziği, elektronik soğutma ve enerji depolama gibi alanlarda yoğunlaşmıştır.