



Bu bir MMO
yayıdır

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

DENEYSEL BİR MANYETİK SOĞUTMA SİSTEMİ İÇİN OPTİMAL KONTROL TASARIMI

EMRAH BIYIK
YAŞAR ÜNİVERSİTESİ

MEHMET AKİF EZAN
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

AHMET YILANCI
ORHAN EKREN
EGE ÜNİVERSİTESİ



DENEYSEL BİR MANYETİK SOĞUTMA SİSTEMİ İÇİN OPTİMAL KONTROL TASARIMI

An Optimal Control Design for an Experimental Magnetic Cooling System

Emrah BIYIK
Mehmet Akif EZAN
Ahmet YILANCI
Orhan EKREN

ÖZET

Günümüzde yaygın olarak kullanılan buhar sıkıştırımlı soğutma sistemlerinin olumsuz çevresel etkileri ve fazla enerji tüketimleri nedeniyle farklı soğutma yöntemlerine yönelik araştırmalara hız verilmektedir. Manyetik soğutma sistemleri, geleneksel buhar sıkıştırımlı soğutma sistemlerine göre daha yüksek verim potansiyeline sahip olmaları, daha sessiz çalışmaları ve doğaya zarar verebilecek soğutucu akışkan içermemeleri gibi avantajları sebebiyle yoğun ilgi gören konulardan birisidir. Bu çalışmada deneysel bir manyetik soğutma sisteminin verimli bir şekilde işletilmesi için geliştirilen model tanılama ve optimal kontrol yaklaşımı sunulacaktır.

Kontrol stratejileri bir sistemin kararlı çalışmasını, istenmeyen dış etkilere karşı gürbüz olmasını ve aynı zamanda yüksek performans sergilemesini sağladıkları için sistem tasarımı sürecinde büyük önem taşımaktadırlar. Sistem optimizasyonu temelli optimal kontrol yaklaşımı bir sistemin parçaları arasındaki dinamik ilişkileri modellemesi ve sistem performansını optimize edebilmesi açısından şu an yaygın olarak kullanılan on/off mantık devreleri ve PID uygulamalarına ve önceden belirlenmiş ayar noktaları planlamasına göre çok daha avantajlıdır. Çalışma kapsamında, kontrol algoritmaları için gerekli olan dinamik modeller sistem tanılama metodu kullanılarak elde edilmiş, manyetik soğutma sisteminden çeşitli çalışma koşullarında veriler toplanmış ve bu verilere yakın çıktılar veren 8. dereceden bir durum uzayı modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu model, sistemdeki piston stroku ve manyetizasyon/demanyetizasyon sürelerini ayarlayan model öngörümü denetleç içerisinde kullanılmıştır. Bilgisayar ortamında yürütülen benzetim testleri sonuçları geliştirilen kontrol algoritmalarının manyetik soğutma sistemini etkin ve verimli şekilde işleterek sistem performansını artırdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Manyetik soğutma, optimal kontrol, enerji verimliliği, model tanılama

ABSTRACT

Due to the adverse environmental effects and high energy consumption of the commonly used vapor compression based cooling systems, research for alternative cooling systems have been gaining momentum. Magnetic cooling systems have attracted recent interest due to their higher efficiency potential, more silent operation and lack of environmentally damaging cooling fluids as compared to the conventional vapor compression cooling systems. In this study, a system identification and an optimal control approach for efficient operation of a magnetic cooling system will be presented.

Control strategies play a vital role engineering systems since they provide safety and protection, stable and robust operation, as well as high performance. Control systems that are based on system optimization can model complex interactions between system components, deliver optimal system performance, and thus outperform on-off logic, a-priori set-point scheduling and PID based designs. In this study, dynamic mathematical models of the system are obtained by system identification methods.

Several sets of operational data are collected from the magnetic cooling system, and an 8-order state space model is constructed. This model is then used in a model predictive controller that coordinates the optimal piston stroke and magnetization/demagnetization period of the system. Computer simulations reveal that the designed controller can operate the magnetic cooling system efficiently and effectively increased system performance.

Keywords: Magnetic cooling, optimal control, energy efficiency, system identification

1. GİRİŞ

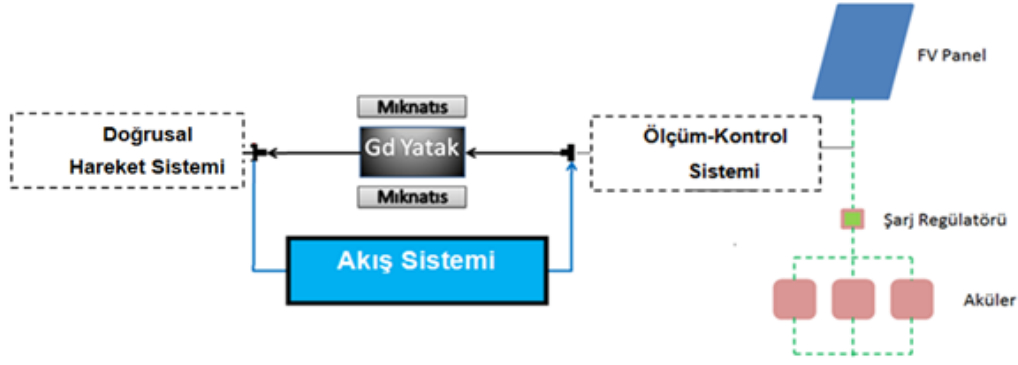
Günümüzde soğutma sistemlerinde yaygın olarak geleneksel buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminden yararlanılmaktadır. Ancak bu soğutma sistemlerinde kullanılan soğutucu gazlar çeşitli çevre sorunlarına yol açmaktadır. Ayrıca, buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimleri teorik sınırları olan Carnot çevriminin %5'ı ila %10'ı aralığında bir verime sahiptir [1]. Bu nedenle, termoelektrik, termoakustik, absorpsiyonlu/adsorpsiyonlu, Stirling çevrimli soğutma gibi alternatif soğutma yöntemlerine yönelik araştırmalar son yıllarda hız kazanmıştır.

Bu alternatif yöntemlerden biri olan, bazı malzemelerin manyetik alan varlığında/yokluğunda ısınma/soğuma eğilimi göstermesi prensibine dayanan manyetik soğutma, buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin çevreye olumsuz etkilerinin azaltılmasında ve enerji verimliliğinin artırılmasında uygun bir seçenek olmaktadır. Manyetik soğutmada çevreye zarar veren soğutucu gazların yerine manyetik malzeme ve ısı transfer akışkanı (su, etilen glikol karışımı, hava, helyum gazı vb.) kullanılmaktadır. Aynı zamanda, manyetik soğutmada buhar sıkıştırımlı çevrimlerde yer alan kompresör bulunmamaktadır. Dolayısıyla sıkıştırma ve kısılma işlemleri olmadığından buhar sıkıştırımlı soğutmaya göre teorik olarak daha verimli olabilirler [2]. Ayrıca, sistemde hareketli parçalar azalmakta, kompresörün çalışması sırasında oluşan ses, manyetik soğutmada ortadan kalkmaktadır.

Kontrol stratejileri bir sistemin kararlı çalışmasını, istenmeyen dış etkilere karşı gürbüz olmasını ve aynı zamanda yüksek performans sergilemesini sağladıkları için sistem tasarımı sürecinde büyük önem taşımaktadırlar. Taranan çalışmaların çoğunda [2-5], manyetik soğutma sistemleri tekil ekipmanlar üzerinden basit aç-kapa, mantık devreleri, vb. yöntemler ile kontrol edilmiş, bütünsel bir sistem kontrolü tasarımı gerçekleştirilmemiştir. Bahsi geçen basit kontrol stratejileri reaktif olarak sınıflandırılır. Sisteme beklenmeyen bir dış etki geldiği zaman ayar noktalarından sapmaları gözleyerek reaksiyon gösterirler, ileriki zamanda gerçekleşebilecek etkilerin tahminlerini bütünlük bir çerçevede ele alamazlar. Bu çalışmada ise manyetik soğutma sisteminin performansını optimize eden bir model öngörümü denetleç (MÖD) geliştirilerek, sistemin gerçek zamanlı kontrolü ile elde edilecek enerji tasarrufu ve sistem performansı hesaplanacaktır. Bu amaçla manyetik soğutma sisteminin dinamik modelleri oluşturulacak, bu modeller kullanılarak belirli bir tahmin ufku içerisinde sistemin ısı ve elektriksel durumu dinamik olarak tahmin edilecek ve belirlenen performans kriterlerini eniyileyen kontrol komutları manyetik soğutma sistemi için hesaplanacaktır. MÖD teknolojisi endüstriyel tesislerde başarılı ile uygulanan çok aktif bir disiplindir [6,7]. Büyük ölçekli kimyasal proseslerde [8], LNG kompresör sistemlerinde [9], doğalgaz kombine çevrim santrallerinde [10,11] MÖD metodunun uygulamaları yaygın olarak görülmektedir.

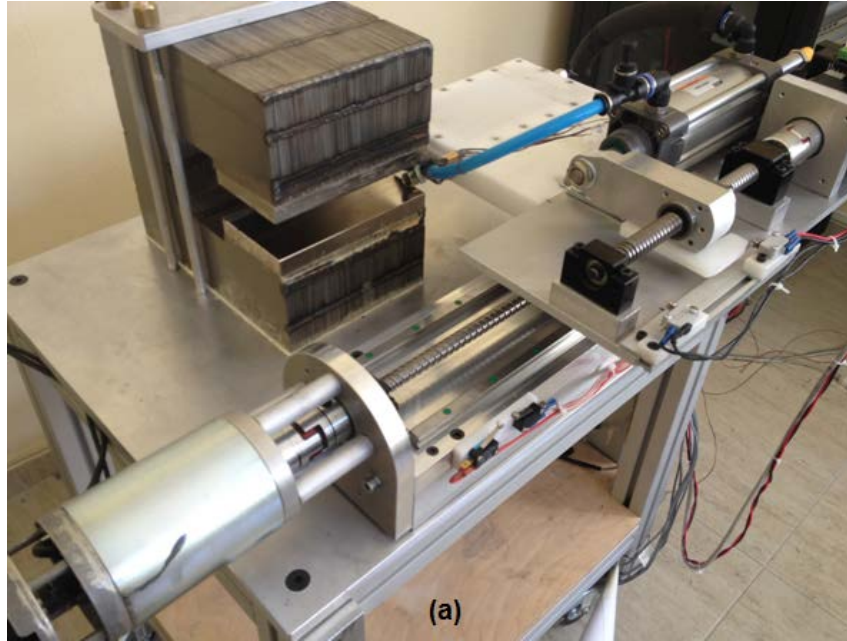
2. MANYETİK SOĞUTMA SİSTEMİ DENEY DÜZENEGİ

Bu çalışmada kullanılan manyetik soğutma deney düzeneği temel olarak (i) gadolinyum yatak, (ii) mıknatıslar, (iii) doğrusal (lineer) hareket düzeneği, (iv) akış sistemi, (v) ölçüm-kontrol sistemi ve (vi) güç bileşenlerinden oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Manyetik soğutma sistemi şematik gösterimi

Sistemin en önemli kısmı olan yatak içindeki akışkanın yönlendirilmesi akış sistemi adı verilen piston silindir düzeneği ile gerçekleştirilmektedir. Manyetik soğutma sisteminde (Şekil 2) sıcak ve soğuk uç yaratmak için akışkan piston silindir düzeneği ile iki uç (sıcak ve soğuk) arasında yönlendirilir.



Şekil 2. Deney düzeneği

Kullanılan piston silindir düzeneğinin silindir çapı 63 mm ve maksimum stroku 100 mm'dir. Pistonun hareket miktarı yani stroku ve hızı yatak içindeki akışkanın hareket miktarı ve debisini doğrudan etkilemektedir. Piston silindir düzeneğine bağlı çalışma parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Manyetik soğutma sistemlerinde sıcak ve soğuk uç elde edilmesi performans karşılaştırma ve soğutma eldesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Elde edilen sıcak ve soğuk uçlar arasındaki sıcaklık farkı ne kadar çok ise manyetik soğutma sistemi performansı o derece yüksek olmaktadır. Doğrusal tip manyetik soğutma sistem hareketli bu çalışmada da Gd yatakta sıcak ve soğuk uçlar elde edilmiştir.

Tablo 1. Piston stroku ile yatak için akışkan hareketi ilişkisi

Piston Hareketi (mm)	Yataktaki Akışkan Hareketi (cm)	Yatak Akışkan Debisi (lt/dk)
2	0.3	0.03
3	0.4	0.04
4	0.6	0.06
5	0.7	0.07
7	1.0	0.10
8	1.2	0.12
10	1.5	0.15
12	1.7	0.17
14	2.0	0.20
16	2.3	0.23
18	2.6	0.26
21	3.0	0.30
23	3.3	0.33
25	3.6	0.36
27	3.9	0.39
30	4.4	0.44
34	4.9	0.49
38	5.5	0.55

3. DİNAMİK MODEL TANILAMA

Bu çalışmada manyetik soğutma sisteminde yüksek performans elde etmek amacıyla güden optimal kontrol sistemi tasarlanmıştır. Bu kısımda, manyetik soğutma sisteminin dinamik modellerinin elde edilmesi için izlenen yöntem sunulacaktır.

3.1 Manyetik Soğutma Sisteminin Dinamik Modeli

Optimal kontrol yönteminde sistemin dinamik modeli önemli rol oynamaktadır. Bu amaçla, manyetik soğutma sisteminde gadolinyumun manyetizasyon ve demanyetizasyon süresi, ortam sıcaklığı ve piston strokunun ısı transfer akışkanı sıcaklığına etkisi modellenmiştir (Tablo 2). Bu amaçla, manyetik soğutma sistemi çeşitli dinamik testlere tabi tutulmuş ve ilgili parametrelerdeki değişiklikler gözlenmiştir.

Tablo 2. Manyetik soğutma sistemi kontrol modeli girdileri ve çıktıları

Girdiler	Birim
• Manyetizasyon/demanyetizasyon süresi	s
• Piston stroku	s
• Ortam sıcaklığı	°C
Çıktılar	Birim
• Isı transfer akışkanı sıcaklığı (sıcak taraf)	°C
• Isı transfer akışkanı sıcaklığı (soğuk taraf)	°C

Sistem tanılama [12] belirli bir sistemin girdi ve çıktıları belirli bir süre boyunca inceleyerek, matematiksel modelini oluşturmayı amaçlayan tekniktir. Sistem tanılama yöntemi kullanılarak girdileri manyetizasyon/demanyetizasyon süresi ve ortam sıcaklığı olan, çıktıları ise gadolinyum sıcaklığı olan doğrusal kesikli zamanlı durum uzayı modeli oluşturulmuştur. Bu model matematiksel olarak

$$\Delta x(k+1) = A\Delta x(k) + B\Delta u(k) + K\varepsilon(k) \quad (1)$$

$$\Delta y(k) = C\Delta x(k) + D\Delta u(k) + \varepsilon(k) \quad (2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada k kesikli zaman değişkenini, Δu girdinin kararlı durumdan sapma miktarını Δx ve Δy bunun sonucunda sırasıyla durum değişkenleri ve çıktılarının kararlı durum değerlerinden sapma miktarlarını, ε ise ölçümden kaynaklanan gürültüyü ifade etmektedir. Yapılan deneylerde veriler 1 sn aralıklarla kaydedilmiştir.

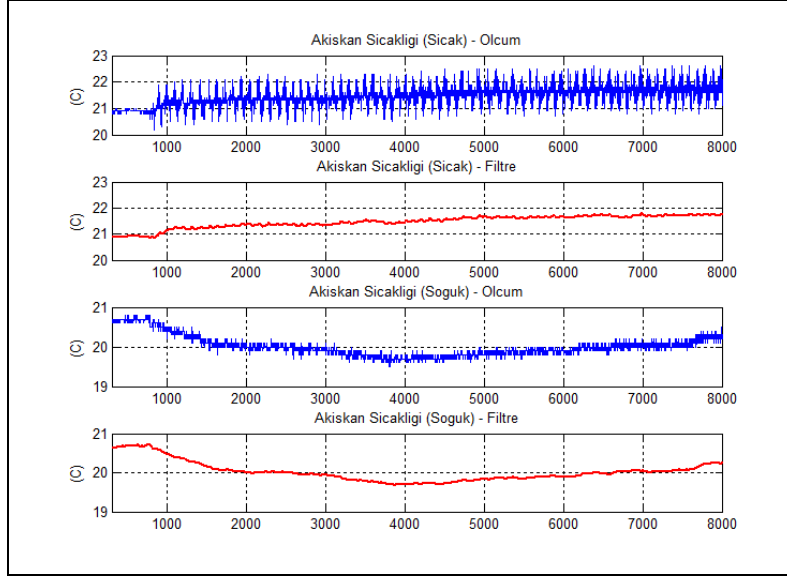
Kontrol sistemi manyetik soğutma sistemini yavaş zaman ölçeğinde kontrol edeceği için deney verilerindeki hızlı değişimlerin modellenmesine gerek yoktur. Bu amaçla, deneylerden elde edilen model çıktı verileri zaman sabiti 40sn olan düşük frekans geçiren bir filtreden geçirilmiştir. Filtreleme işlemi sonucunda elde edilen ısı transfer akışkan sıcaklıkları Şekil 3'te sunulmuştur.

3.2 Sistem Tanılama

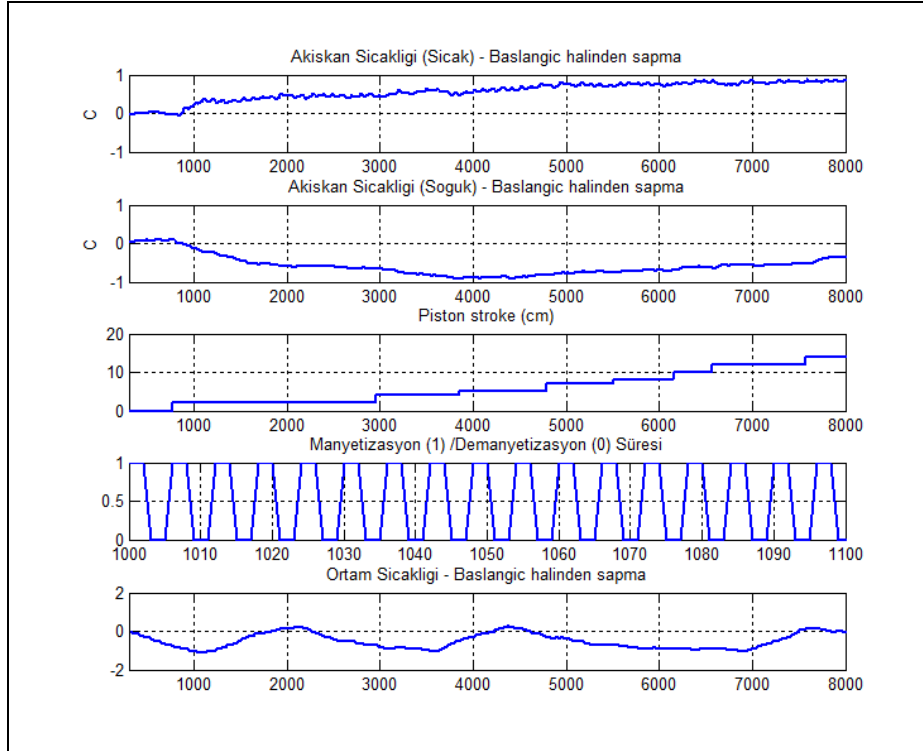
Manyetik soğutma sistemi için seçilen sistem tanılama yaklaşımında temel amacımız A, B, K, C ve D matrislerini belirlemektir. Doğrusal modeller sistemin kararlı durum noktasından belirli sınırlar içinde dürtüldüğünde gösterdiği dinamik davranışı belirlemek için kullanılmaktadır. Bu sebeple, deneylerde ölçülen çıktı verilerinin ilk değerleri veri setinden çıkarılarak sistemin kararlı durumdan sapma miktarları ortaya çıkarılmış, böylece deney verisi sistem tanılama algoritması için hazır hale getirilmiştir. Bu işlemin sonucundaki deney verileri Şekil 4'te sunulmuştur.

Bir sonraki adımda, Matlab System Identification Toolbox eklentisi kullanılarak değişik büyüklüklerde modeller elde edilmiştir. Bu modeller içerisinde deney verilerine yeteri kadar yakın sonuçlar veren ve boyutu kontrol ve optimizasyon algoritmalarının gerçek zamanda koşturulabilmesine olanak sağlayan 8 değişkenli model parametreleri Şekil 5'te görülmektedir. Sistem tanılama yöntemi ile elde edilen bu parametreler herhangi bir fiziksel değişkeni (sıcaklık, basınç, debi, vb.) ifade etmemekte, bu değişkenlerin sistem tanılama algoritması içerisinde bir dönüşüm matrisi çarpılarak farklı bir uzayda elde edilen izdüşümlerini belirtmektedir. Bu parametreler ile koşturulan dinamik modelin deney verileri ile kıyaslanması sonucu gadolinyum sıcaklığında yaklaşık %77 ve %83 uydurma oranları elde edilmiştir (Şekil 6). Bu değerler kontrol sistemi tasarımı için yeterlidir.

Sistem tanılama ile elde edilen A matrisinin özdeğerlerinin (eigenvalue) mutlak değerleri **Lambda_A = {0.9804, 0.9804, 0.9341, 0.9341, 0.7429, 0.9992, 0.9878, 0.9878}** olarak elde edilmiştir. Kesikli zamanlı modelimizin A matrisinin özdeğerlerinin hepsi birim çemberin içerisinde olduğu için A matrisinin kararlı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 3. Isı transfer akışkanı sıcaklığı: ölçüm verileri ve filtreden geçirildikten sonraki durum



Şekil 4. Piston stroku, manyetizasyon/demanyetizasyon süresi ve ortam sıcaklığının ısı transfer akışkanı sıcaklığına etkisi

State-space model: $x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)$
 $y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)$

A =

	x1	x2	x3	x4	x5
x1	0.99922	-0.000237	-0.0054051	0.00084952	0.0010513
x2	-0.00087744	0.99595	0.0064149	0.027949	0.018523
x3	0.004457	-0.0089993	0.77099	0.20778	0.2175
x4	0.00092413	0.0039952	-0.038186	0.45595	-0.87861
x5	-0.00038483	-0.021018	-0.12709	0.81945	0.34013
x6	0.0010333	-0.0028712	0.47074	-0.0073812	-0.22186
x7	0.0022974	0.020469	-0.11979	-0.0047548	0.068077
x8	0.0014156	0.013425	0.048334	0.067185	0.072887

	x6	x7	x8
x1	-0.0024697	0.00078332	0.00086645
x2	0.0024659	-0.03186	-0.00098976
x3	-0.48049	0.074849	-0.20851
x4	-0.24331	0.018358	0.018516
x5	0.33162	0.044452	-0.062128
x6	0.79562	0.066533	-0.36008
x7	-0.046979	0.92623	-0.023453
x8	-0.054724	-0.10818	0.74074

B =

	Piston strok	Manyetizasyo	Ortam Sicakl
x1	1.6054e-006	-1.2393e-005	0.00016849
x2	-4.1986e-005	-3.5104e-005	-0.00016003
x3	0.00030402	-0.0086807	0.01831
x4	0.0028673	-0.0043506	0.0036406
x5	0.001487	0.00062982	-0.0023563
x6	0.00089773	0.005475	-0.0020107
x7	-0.00013619	-0.0072604	0.017148
x8	0.00012838	-0.009744	0.038813

C =

	x1	x2	x3	x4	x5
Sicak Akiska	6.6657	5.2365	0.011954	0.054394	0.040024
Soguk Akiska	-17.7	0.029747	0.043886	-0.0015252	-0.00013782

	x6	x7	x8
Sicak Akiska	0.0097701	-0.063792	-0.035528
Soguk Akiska	-0.01011	0.0048932	-0.0014034

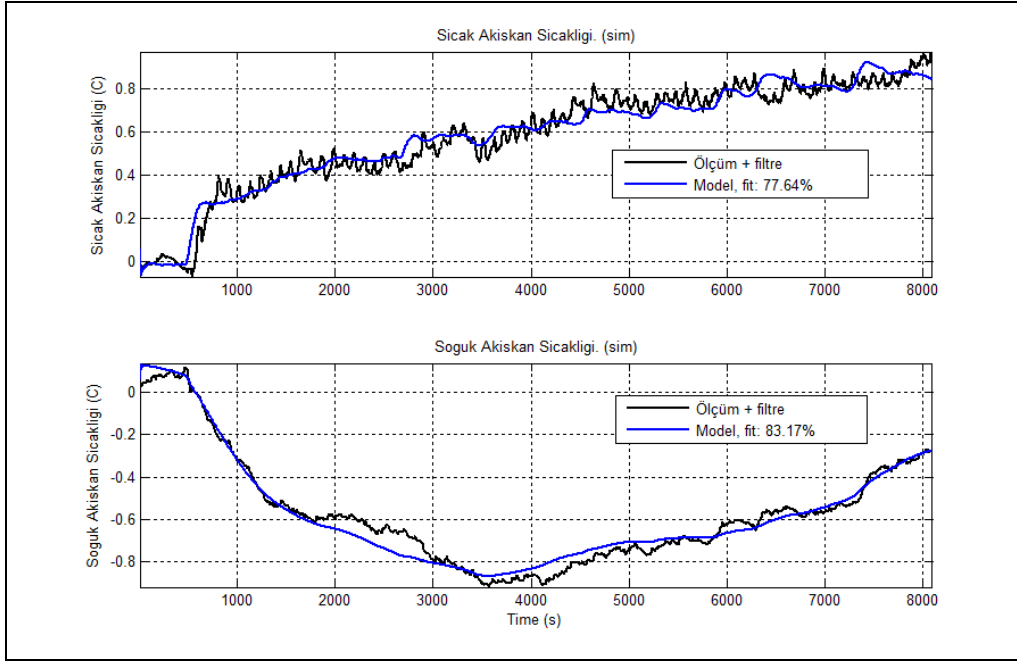
D =

	Piston strok	Manyetizasyo	Ortam Sicakl
Sicak Akiska	0	0	0
Soguk Akiska	0	0	0

K =

	Sicak Akiska	Soguk Akiska
x1	0.00066106	-0.046485
x2	0.17532	0.066755
x3	0.16999	0.9631
x4	-0.2765	0.12785
x5	0.24348	-0.038013
x6	-0.016171	0.33952
x7	-0.33958	-0.063278
x8	-0.23372	-0.21602

Şekil 5. Sistem tanımlama ile belirlenen dinamik model parametreleri



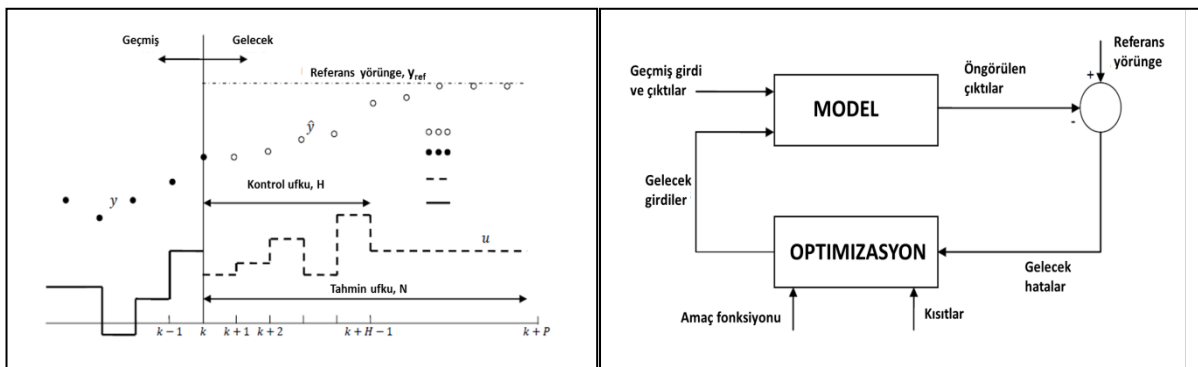
Şekil 6. Dinamik model çıktılarının deney verileri ile karşılaştırması

4. OPTİMAL KONTROL TASARIMI

Sistem tanılama metodu ile geliştirdiğimiz matematiksel modeller kullanılarak belirli bir tahmin ufku içerisinde sistemin ısı ve elektriksel durumu dinamik olarak tahmin edilecek ve manyetik soğutma sistemi için belirlenen performans ölçütlerini eniyileyen kontrol girdileri hesaplanacaktır.

4.1. Kontrol Metodolojisi

Optimal kontrol sisteminde, her bir kontrol adımında sistemde bulunan ölçme cihazlarından gelen bilgiler kullanılarak sistemin son durumu kestirilmekte, sonrasında sistemin matematiksel modeli yardımıyla sistem dinamikleri göz önüne alınarak sistemi kısıtlar içinde tutan ve aynı zamanda belirlenen sistem performans parametrelerini optimize eden ayar noktaları hesaplanmaktadır. Şekil 7'de tasarlanan kontrol stratejisinin temel prensibi özetlenmektedir.



Şekil 7. Optimal kontrol sisteminin temel çalışma prensibi

Manyetik soğutma sistemi için tasarladığımız optimal kontrol sisteminde her bir kontrol adımında aşağıdaki optimizasyon problemi çözülmektedir:

$$\text{Min} \quad \sum_{k=1}^N \left\{ \Delta x^T(k) P \Delta x(k) + \Delta u^T(k) Q \Delta u(k) + (\Delta y(k) - \Delta y_{\text{ref}}(k))^T R (\Delta y(k) - \Delta y_{\text{ref}}(k)) \right\}$$

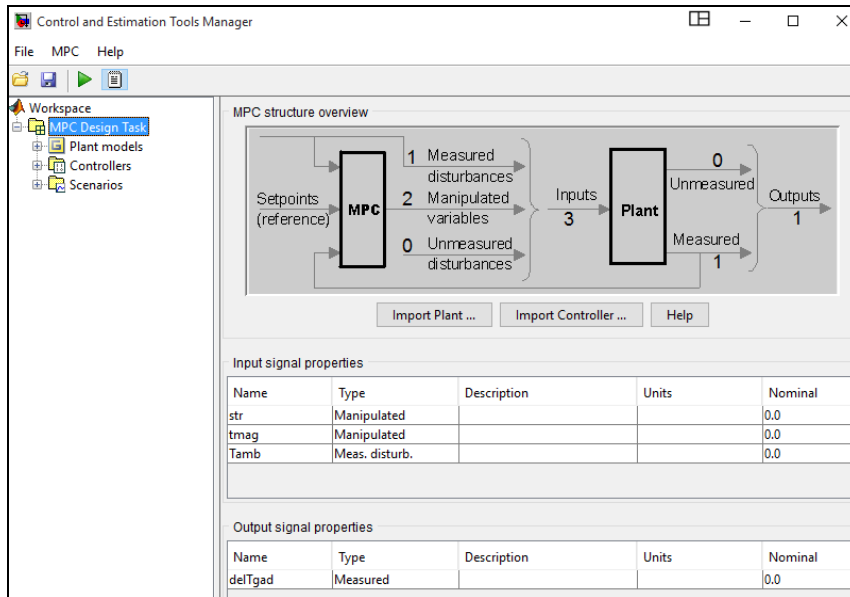
Kısıtlar

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= A \Delta x(k) + B \Delta u(k) \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k) + D \Delta u(k) \\ \Delta u_{\min} &< \Delta u(k) < \Delta u_{\max} \\ \Delta x_{\min} &< \Delta x(k) < \Delta x_{\max} \\ \Delta y_{\min} &< \Delta y(k) < \Delta y_{\max} \end{aligned}$$

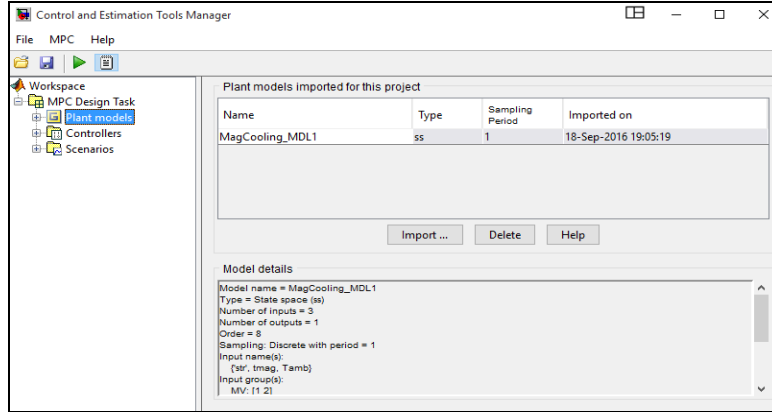
Burada k kesikli zaman değişkenini, Δx durum değişkenlerini, Δu girdileri (piston stroku ve gadolinyum manyetizasyon/demanyetizasyon süresi), Δy ise çıktıları (ısı transfer akışkanı sıcak-soğuk sıcaklık farkı) ifade etmektedir. N tahmin ufkunu, $P \geq 0$, $Q > 0$, $R > 0$ matrisleri amaç fonksiyonunda ağırlıkları temsil eden optimal kontrol tasarım parametreleridirler.

4.2 Kontrol Uygulaması ve Benzetimi

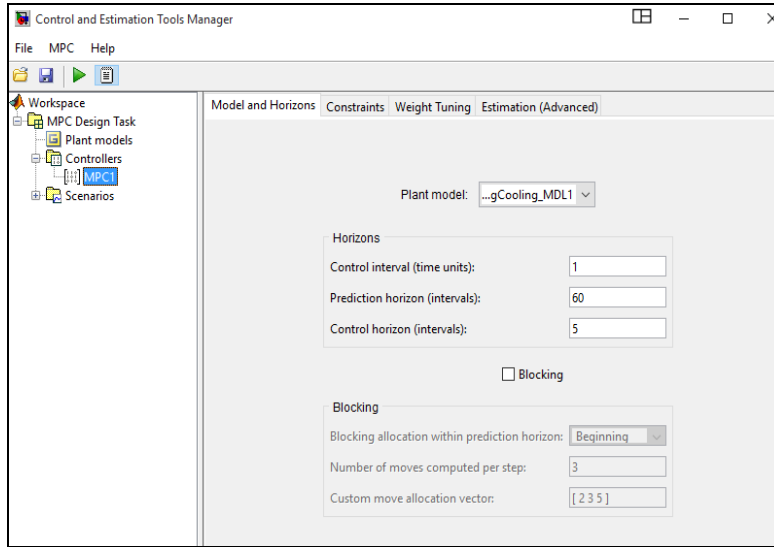
Bu kısımda önce kontrol sisteminin benzetim ortamında uygulamasının kısa bir özeti verilecek, sonrasında performans testi sonuçları sunulacaktır. Kontrol sisteminin tasarımı ve ön testleri Matlab programında gerçekleştirilmiştir. Kontrol sisteminin tasarımında kullanılan parametreler (amaç fonksiyonu ağırlıkları, tahmin ufkı, kısıtlar, vb.) Şekil 8-11'de görüldüğü gibi Matlab MPC eklentisi kullanılarak girilmiş, benzetim test senaryolarının belirlenmesi yine aynı arayüz ile yapılmıştır.



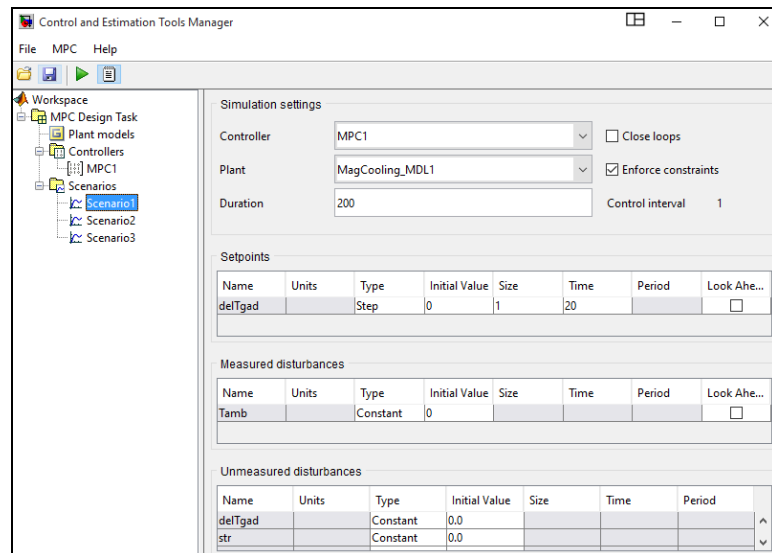
Şekil 8. Kontrol tasarımı arayüzü - kontrol blok şeması



Şekil 9. Kontrol tasarımı arayüzü - durum uzayı modeli özellikleri



Şekil 10. Kontrol tasarımı arayüzü - kontrol parametreleri (tahmin ufkü, kısıtlar, ağırlıklar)



Şekil 11. Kontrol tasarımı arayüzü -benzetim testi senaryoları

5. PERFORMANS ANALİZİ

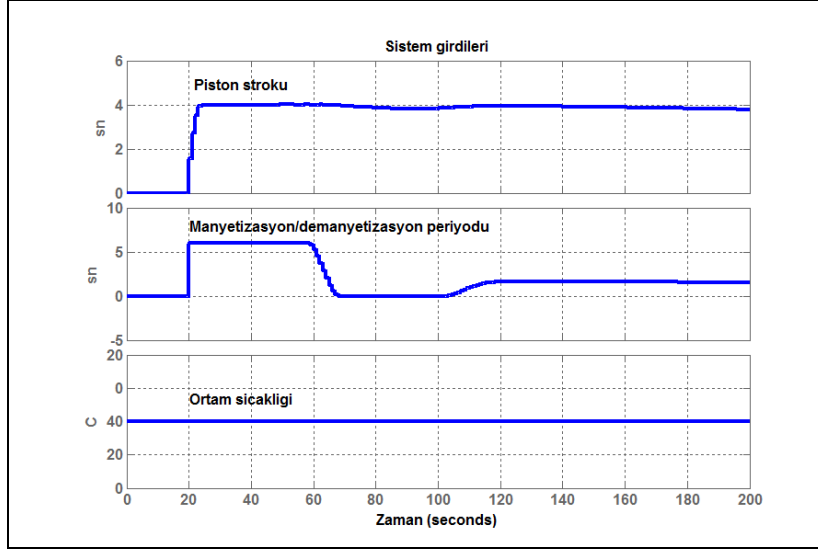
Yukarıda detayları verilen modelleme ve kontrol tasarımı çalışmalarının benzetim testleri ile doğrulaması yine Matlab ortamında yapılmıştır. Benzetim sonucu hem grafik olarak izlenebilmekte, hem de daha sonra analiz edilmek üzere Matlab çalışma alanına kaydedilmektedir. Şekil 12 ve Şekil 13'te sonuçları verilen benzetim testinde çıktılar ($\Delta y(k)$) = ısı transfer akışkanı sıcak ve soğuk sıcaklık farkı için referans $\Delta y^{ref}(k)$ değeri verilmiş ve MPC algoritması koşturulmuştur. MPC amaç fonksiyonu bu değişkenin verilen referans değerini takip etmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Tablo 3'te bu benzetim testinde kullanılan MPC parametreleri listelenmiştir. Burada 1s aralıklarla örnekleme alınan sistemde kontrol algoritması 60 adım (=60 s) ötesine kadar optimum girdileri hesaplamaktadır. Manyetik soğutma sistemindeki sıcaklık değişim hızları göz önüne alındığında 60 s'lik tahmin ufku yeterli bulunmuştur. P, Q ve R matrisleri sırasıyla durum değişkeni, girdi ve çıktının kararlı veya referans değerlerinden sapmalarını önlemek için amaç fonksiyonunda kullanılan ağırlıklardır. P matrisi 0 olarak alınarak durum değişkenlerindeki değişim ihmal edilmiştir. Q matrisi küçük bir değer seçilerek kontrol girdilerinin zaman içerisinde çok fazla salınımlı hareket etmesinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. R matrisi ise sistemde çıktının (soğutucu akışkan sıcaklık farkı) referans değeri iyi takip etmesi için diğerlerine göre daha yüksek seçilmiştir. Değişkenlerin en küçük (Δ_{min}) ve en büyük (Δ_{max}) değerleri optimizasyon probleminin uygun bölgede çözülmesini sağlamaktadır.

Windows 7, 4GB RAM, Intel Core i5-2430/2.40Ghz işlemci özelliklerine sahip dizüstü bilgisayarda her bir optimizasyon probleminin çözümü ortalama 0.05 saniye sürmüştür. Sistemin örnekleme frekansı 1Hz olduğundan bu süre kontrol algoritmasını gerçek zamanda çalıştırmak için yeterlidir.

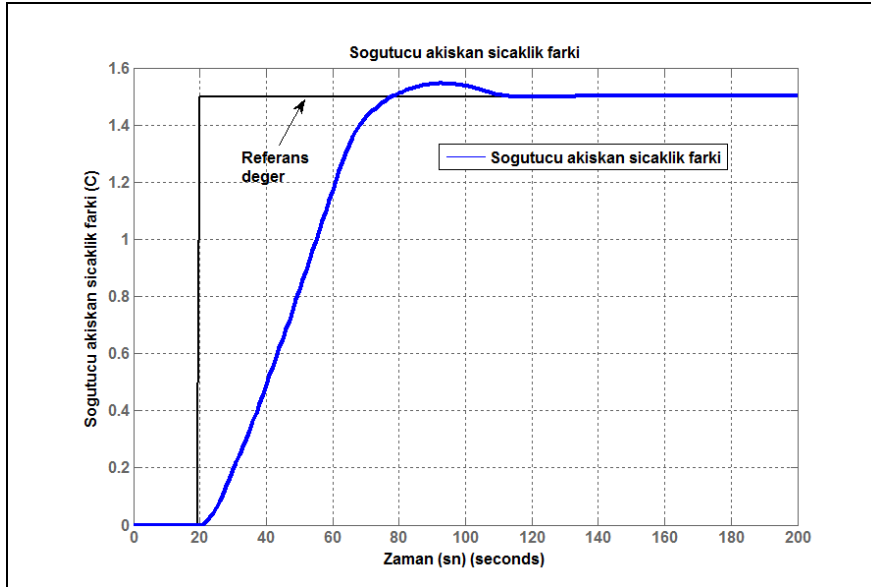
Tablo 3. Benzetim testinde kullanılan MPC parametreleri

Parametre	Değer
N	60 adım
T	1.0s
P	$0_{8 \times 8}$
Q	[0.1 0; 0 0.1]
R	1
Δx_{max}	$diag(100)_{8 \times 8}$
Δx_{min}	$-diag(100)_{8 \times 8}$
Δu_{max}	[10 6]
Δu_{min}	[0 0]
Δy_{max}	-
Δy_{min}	0

Şekil 12'de görüldüğü üzere MPC kontrol algoritması piston stroku ve manyetizasyon/demanyetizasyon sürelerini etkili bir şekilde değiştirerek ısı transfer akışkanı sıcaklığını Şekil 13'teki gibi hızlıca referans değere yaklaştırmıştır ($\Delta y(k) - \Delta y^{ref}(k)$ sifıra doğru yakınsamıştır).



Şekil 12. MPC benzetim testi sonuçları – model girdileri (piston stroku ve manyetizasyon/ demanyetizasyon periyodu kontrol sistemi tarafından set değerleri hesaplanan ve değiştirilebilir değerlerdir; ortam sıcaklığı ise dış etken olarak sisteme etki eden sadece ölçülebilir girdidir)



Şekil 13. MPC benzetim testi sonuçları – model çıktısı (soğucu akışkan sıcaklık farkı)

6. SONUÇ

Bu çalışmada manyetik soğutma sisteminin verimli bir şekilde işletilmesi için optimal kontrol yaklaşımı geliştirilmiştir. Kontrol algoritmalarının çalışması için gerekli olan dinamik model sistem tanımlama metodu kullanılarak elde edilmiştir. Manyetik soğutma sistemi üzerinden çeşitli çalışma koşullarında veriler toplanmış ve bu verilere yakın çıktılar veren 8. dereceden bir durum uzayı modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu model, sistemdeki piston stroku ve manyetizasyon/demanyetizasyon sürelerini ayarlayan model öngörümlü denetleç içerisinde kullanılmıştır. Bilgisayar ortamında yürütülen benzetim testlerinde tasarlanan kontrol sisteminin manyetik soğutma sistemini etkin ve verimli şekilde işleterek sistem performansını artırdığı gözlemlenmiştir. Tasarlanan optimal kontrol stratejisinin deneysel ortamda testleri önümüzdeki süreçte yapılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] ZIMM, C., JASTRAB, A., STERNBERG, A., PECHARSKY, A., GSCHEIDER, K. A., OSBORNE, M., ANDERSON, M. Description and performance of a near-room temperature magnetic refrigerator. *Advanced Cryogenic Engineering*, 43:1759–66, (1998).
- [2] ENGELBRECHT, K.L., ERIKSEN, D., BJORK, R., GEYTI, J., LOZANO, J.A, NIELSEN, K.K., SAXILD, F., SMITH, A., PRYDS, N. Experimental results for a novel rotary active magnetic regenerator, *Int. J. Refrigeration* 35 (6). pp. 1498–1505, (2012)
- [3] HIRANO, N., NAGAYA, S., TAKAHASHI, M., KURIYAMA, T., ITO, K., NOMURA, S. Development of magnetic refrigerator for room temperature application. *Advance in Cryogenic Engineering* 47. pp. 1027-1034, (2002).
- [4] PLAZNIK, U., TUSEK, J., KITANOVSKI, A., POREDOS, A. Numerical and experimental analyses of different magnetic thermodynamic cycles with an active magnetic regenerator. *Applied Thermal Engineering* 59, 52-59, (2013).
- [5] YU, B.F, LIU, M., EGOLF, P.W., KITANOVSKI, A. A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010, *International Journal of Refrigeration* vol. 33, pp. 1029-1060, (2010)
- [6] MACIEJOWSKI, J.M., *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall, New Jersey, (2002).
- [7] RAWLINGS, J.B., *Tutorial Overview of Model Predictive Control*, *IEEE Control Systems Magazine*, (20), 38-52, (2000).
- [8] PARK, M.-J., DOKUCU, M., DOYLE, F., *Modeling and Sensitivity Analysis of Particle Size Distribution and Chain Length Distribution in a Semibatch Emulsion Copolymerization Reactor. Macromolecular Theory and Simulations*, 14 (8), 474-90, (2005).
- [9] CORTIVONIS, A., PARESCHI, D., MERCANGÖZ, M. BESSELMANN, T. Model Predictive Anti-Surge Control of Centrifugal Compressors with Variable-Speed Drives, *IFAC Workshop on Automatic Control of Oil and Gas Production*, 251-256, (2012).
- [10] BIYIK, E., LONG, C., D'AMATO, F., BAKER, D., DIPALMA, S., *Enhanced Operational Flexibility of Combined Cycles through Advanced Controls*, 55th Annual ISA POWID Symposium, Austin, TX, (2012).
- [11] HENKEL, N., SSHMID, E., GOBRCHT, E., *Operational Flexibility Enhancements of Combined Cycle Power Plants*, *POWER- EN Asia*, Kuala Lumpur-Malaysia, (2008).
- [12] LJUNG, L., *System Identification: Theory for the User*, Prentice Hall, New Jersey, (1999).

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmanın yapılabilmesini sağlayan “Güneş Enerjisi Destekli Manyetik Soğutma Sisteminin Performansının Deneysel İncelenmesi” başlıklı ve 114M829 nolu projeye desteği için TÜBİTAK'a teşekkür eder.

ÖZGEÇMİŞ

Emrah BIYIK

Boğaziçi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2003 yılında lisans derecesini aldıktan sonra, yüksek lisans eğitimine ABD'de devam etmiş ve Rensselaer Polytechnic Enstitüsü'nden 2004 yılında Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans, 2006 yılında Uygulamalı Matematik Yüksek Lisans ve 2007 yılında Elektrik Mühendisliği doktora derecelerini almıştır. Sonrasında General Electric firmasının ABD'deki AR-GE merkezinde araştırmacı olarak çalışmış, elektrik şebekeleri, doğalgaz santralleri, uçuş dinamiği ile ilgili birçok projede yer almıştır. 2012 yılından bu yana Yaşar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmakta olup, enerji sistemlerinde kontrol ve optimizasyon, akıllı şebekeler, güç sistemleri ve binalarda enerji optimizasyonu konularında çalışmaktadır. TÜBİTAK ve Avrupa Komisyonu 7. Çerçeve Programı destekli çeşitli projelerde araştırmacı olarak görev almış, halen Marie Skłodowska-Curie Fellow olarak Horizon 2020 “BuildingControls” projesinin yürütücülüğünü sürdürmektedir.

**Mehmet Akif EZAN**

Dokuz Eylül Üniversitesi (D.E.Ü.) Makina Mühendisliği Bölümü'nü 2004 senesinde bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 2006 yılında Yüksek Mühendis ve 2011 yılında Doktor unvanlarını almıştır. 2007 yılında Université de ReimsChampagneArdenne (Fransa), 2010 yılında ise University of OntarioInstitute of Technology (UOIT) araştırmacı olarak bulunmuştur. 2014 yılından itibaren D.E.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda Yardımcı Doçent olarak görev yapmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, faz değişim malzemelerinin karakterizasyonu, faz değişimli ısı sistemlerin modellenmesi ve manyetik soğutma sistemlerinin sayısal modellenmesi çalışma konuları arasındadır.

Ahmet YILANCI

Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 2000 yılında mezun olmuştur. Ardından, Pamukkale Üniversitesi'nde Makina Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimini 2004 yılında, doktora eğitimini ise; 2008 yılında tamamlamıştır. 2007-2008 yılları arasında, University of OntarioInstitute of Technology (Kanada)'de ziyaretçi araştırmacı olarak bulunmuştur. Pamukkale Üniversitesi'nde 2002-2008 yılları arasında Araştırma Görevlisi, 2008-2009 yılları arasında Dr. Araştırma Görevlisi olarak, 2009-2013 yılları arasında ise Yrd. Doç. Dr. Unvanı ile görev almıştır. 2013 yılından itibaren, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nde Yrd. Doç. Dr. unvanı ile çalışmalarını sürdürmektedir. Çalışma konuları arasında, Hidrojen Enerjisi, Ekserji Analizi, Enerji Verimliliği, Fotovoltaik Güç Sistemleri, Jeotermal Sistemler, Enerji Depolama, Enerji Dönüşüm Sistemleri, Manyetik Soğutma yer almaktadır.

Orhan EKREN

1976 yılı İzmir doğumlu olan Orhan Ekren, lisans eğitimini Dokuz Eylül Üniversitesi(DEÜ) Makina Mühendisliği Bölümü'nde 1999 yılında, yüksek lisans eğitimini İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE) Enerji Mühendisliği'nde 2003 yılında, doktorasını ise DEÜ Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik anabilim dalında 2009 yılında tamamlamıştır. 2000-2003 yılları arasında İYTE makina mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. 2005 yılından buyana Ege Üniversitesi'nde çalışan Dr. Ekren, 2008 ve 2011 yıllarında akademik çalışmalar için, Amerika Birleşik Devletleri'nde iki farklı üniversitede Makina Mühendisliği bölümünde ziyaretçi araştırmacı olarak bulunmuştur. 2014 yılından bu yana Ege Güneş Enerjisi Enstitüsü'nde Doçent olarak çalışmalarını sürdürmektedir. Çalışma konuları arasında; Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Hibrid Enerji Sistemlerinin Optimum Boyutlandırılması, Soğutma Sistemlerinde Enerji Verimliliği, Isı Pompası Sistemleri, Alternatif Soğutma Yöntemleri yer almaktadır.