

Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol ile Kablosuz Sıcaklık Profillerinin Karşılaştırılması

Adnan ALDEMİR^{1*}, Hale HAPOĞLU²

¹Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

²Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

(Geliş / Received : 23.10.2015 ; Kabul / Accepted : 26.04.2016)

ÖZ

Bu çalışmada bir proses simülatoründe Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol (GPC) algoritmasının uygulandığı kablosuz sıcaklık kontrol deneyleri gerçekleştirildi ve aynı koşullarda yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı. Temel İşlemler Laboratuvarında bulunan proses simülatorü ile Proses Kontrol Laboratuvarında bulunan bilgisayar arasındaki veri aktarımını sağlamak için kablosuz iletişim sistemi kuruldu ve kablosuz deneyler MATLAB/Simulink programı yardımıyla on-line olarak gerçekleştirildi. Deneyler sırasında kablosuz veri transferi 2,4 GHz frekansında radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirildi. GPC algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde, herhangi bir N_U (kontrol ufku), N_1 (minimum öngörme ufku) ve N_2 (maksimum öngörme ufku) değerinde, L (kontrol ağırlık faktörü) değerinin 1.0'den büyük tüm değerlerinde ısıtıcının çok büyük salınımlar yaptığı ve buna bağlı olarak sıcaklığında çok büyük salınımlar yaptığı görülmüştür. Bu nedenle GPC kontrol deneyleri, L 'nin 1.0'den küçük değerlerinde gerçekleştirildi. GPC algoritmasındaki N_U , N_2 ve L parametreleri kullanılarak $N_U=1.0$ $N_1=1.0$; $N_2=2.0$; $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$; $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$ değerlerinde $L=0.001$; 0.005 ; 0.01 ; 0.05 ; 0.1 ; 0.5 değerleri için aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda sıcaklık profillerinin zamanla değişimi gözlemlendi. Elde edilen deneysel sonuçlara göre sıcaklık profilleri incelendiğinde genel olarak $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ değerlerindeki deneysel sıcaklıkların $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$; $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$ değerlerine göre set noktasına daha yakın olduğu ve salınımların daha az olduğu görüldü. Ayrıca N_U ve N_2 değerlerinin artırılmasıyla sıcaklıkların set noktasından uzaklaşmaya başladığı ve salınımların arttığı gözlemlenmiştir. $L=0.001$; 0.005 ; 0.01 ; 0.05 ; 0.1 ve 0.5 değerleri ile aynı koşullarda $T_{set}=50^\circ\text{C}$ ve $T_{set}=60^\circ\text{C}$ için yapılan deneyler sonucunda en iyi sıcaklık kontrolünü sağlayan parametreler, hata karelerinin toplamı (ISE) ve hata mutlak değerlerinin toplamı (IAE) değerleri kullanılarak belirlendi. Buna göre yapılan deneylerde en düşük ISE ve IAE değerleri $L=0.01$ değerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca $L=0.01$ 'den daha düşük ve daha yüksek değerlerde hesaplanan ISE ve IAE değerlerinin arttığı ve sıcaklığın set noktasından uzaklaştığı görülmektedir. Sonuç olarak en iyi sıcaklık kontrolü $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $L=0.01$ değerlerinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: GPC kontrol, MATLAB/Simulink, kablosuz proses kontrol, ISE, IAE

Comparison of Wireless Temperature Profiles With Generalized Predictive Control

ABSTRACT

In this study, Generalized Predictive Control (GPC) algorithm is applied to a process simulator which wireless temperature experiments were achieved and the results of the experiments were compared under the same conditions obtained. To achieve the data transfer between computer in Process Control Laboratory and the process simulator in Unit Operations Laboratory, wireless communication system was established and wireless experiments were performed on-line by means of MATLAB/Simulink program. Wireless data transfers during the experiments were carried out by using radio waves at a frequency of 2.4 GHz. In wireless temperature control experiments which are conducted using with algorithm of GPC, all L (control weighting) values which are bigger than 1.0 are not suitable for temperature control because the heater made very big oscillatory behaviour and consequently temperatures also made very big oscillations at any N_U (control costing horizon), N_1 (minimum costing horizon) and N_2 (maximum costing horizon) values. Therefore GPC experiments were carried out in L values smaller than 1.0. Changes of temperature profiles were observed with time as a result of experiments carried under the same conditions, using the N_U , N_2 ve L parameters in the GPC algorithm to the $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$; $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$; $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$ values for the $L=0.001$; 0.005 ; 0.01 ; 0.05 ; 0.1 and 0.5 values. According to the experimental results analyzing the temperature profiles, the temperatures the $N_1=1.0$ and $N_2=2.0$ values of control was closer to the set point and oscillations were found to be less than according to the values of $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$; $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$. Also by increasing the value of N_U and N_2 temperatures are begin to move away from the set point and the oscillations are increased. Wireless experiments conducted under the same conditions for $T_{set}=50^\circ\text{C}$ and $T_{set}=60^\circ\text{C}$ which using the best temperature control parameters with the $L=0.001$; 0.005 ; 0.01 ; 0.05 ; 0.1 and 0.5 values were determined with the integral of the square of the error (ISE) and the integral of the absolute of the error (IAE) values. According to the experiments carried out at the lowest values of ISE and IAE were determined that the value $L = 0.01$. In addition, lower and higher values of $L=0.01$ calculated ISE and IAE values were higher and that can be seen the temperature away from set point. In conclusion, the best temperature control is obtained $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ and $L=0.01$ values.

Keywords: GPC control, MATLAB/Simulink, wireless process control, ISE, IAE

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kimyasal proseslerde istenilen ürün kalitesinin elde edilmesi için gerekli işletim koşullarının sağlanması ve

çalışanlar için güvenli bir çalışma ortamının sağlanması için sıcaklık, basınç, derişim, seviye, akış hızı gibi parametrelerin iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. İyi kontrol edilmeyen sistemlerde ekonomik kayıpların yanında çeşitli arızalar da meydana gelebilir. Örneğin bir proseste etkin olmayan sıcaklık kontrolü gereksiz

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: adnanaldemir@yyu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 377-388

yakıt tüketimi ve enerji kaybı ile birlikte üretim maliyetinin artmasına veya etkin olmayan basınç kontrolü prosete bulunan makine-ekipmanların zorlanmasına ve dayanımı zayıf sistemlerde ise patlamalara neden olmaktadır. Amaca yönelik, güvenilir ve sürekli bir kontrolün sağlanabilmesi için kontrol parametrelerinin ve kullanılan kontrol yönteminin etkinliği son derece önemlidir.

Literatürde farklı sistemlerle kablosuz iletişim sağlanması ve bazı parametrelerin kablosuz olarak ölçülerek izlenmesi üzerine birtakım çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak; vakum tanklarındaki veri aktarımı için 90 mm genişliğinde ve 140 mm uzunluğundaki küçük bir sensör düzeneği ile 2.4 GHz frekansında bluetooth sinyalleri kullanılarak bir vakum bölmesinden sıcaklık ve ışık değerlerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bilgisayara on-line veri aktarımı yapılan sistemde termocift ile sıcaklık ve optik sensör ile ışık miktarı voltaj olarak ve pil değeri bilgisayardan takip edilmektedir [1]. Kablosuz sıvı seviye ölçümü için bir sensör sistemi geliştirilmiş ve bu sensör ince bir kapasitör ve indüktör plaka arasına yerleştirilerek bu plakalar arasındaki elektronların geçişi ile oluşan akım ile sensörün ihtiyacı olan güç herhangi bir fiziksel bir akım kaynağı kullanmadan karşılanmaktadır. Hazırlanan bu 22,86 cm boyundaki ve 2 cm kalınlığındaki sensör yardımıyla farklı sıvıların seviye ölçümü gerçekleştirilmiş ve maksimum hata miktarı 1,07 cm olarak belirlenmiştir [2]. Toprağın nem ve sıcaklığının kablosuz ölçümü için MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) geliştirilen bir sensör yardımıyla 2.4 GHz RF ile çalışan bu sensör kullanılarak %0 ile %100 arasında bağıl nem ve -30 ile +100 °C çalışma aralığında ölçümler yapılabilmektedir. Birbirine uzaklığı 8m olan ve 100 mm derinliğinde toprağa gömülmüş iki çubuğa bağlı sensörler 20 m uzaklıktaki veri alıcısına sinyallerini başarılı bir şekilde iletmektedir. Veri alıcısına bağlı 2MB kapasitesinde taşınabilir bellek tarafından veriler kaydedilmektedir [3]. Bir balık çiftliğindeki pH, amonyum ve sıcaklık değerlerinin kablosuz olarak izlenebilmesi için Te sensör ve kablosuz modül olmak üzere iki tür sensör kullanılmıştır. Sensör modülünde pH ve NH₄ sensörleri ile bilgiler toplanarak kablosuz modüle aktarılır. Kablosuz modül radyo frekansı ile verileri merkeze iletir. Bu çalışmadaki amaç sıcaklık, pH ve NH₄ iyonlarını kablosuz olarak görüntülemek ve bunun için kablosuz sensör ağının uygulamasıdır [4]. Kablosuz sensör ağı ile iyon seçici elektrotlar kullanarak içme suyundaki nitrat, amonyum ve klorit iyonlarının analizleri gerçekleştirilmiş ve kablosuz ölçüm sonuçları klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında birçok sonucun aynı olduğu aynı olmayan sonuçların da birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir [5]. Beton yapısının özellikle ilk evrelerde ve katılma sürecinde hem sıcaklık hemde nem değişimlerinin kablosuz sensör izleme sistemi ile gözlenmesi amaçlanmıştır. Küp şeklindeki beton kalıplarının içinde sıcaklık ve nem değerlerinin aynı anda izlenebileceği iki farklı tür sensör

kullanılmıştır. Verilerin kablosuz olarak gönderilmesine izin veren IEEE 802.15.4 standardına dayalı kablosuz sensör ağı kurulmuştur [6].

GPC yöntemi, proses modeline bağlı olarak proses çıktısının gelecekteki değerlerini tahmin etmek suretiyle yüksek kontrol performansına sahip ileri bir proses kontrol tekniğidir. Proses için tahmin edilen bu değerler ile set değerleri karşılaştırılır ve hata değerleri belirlenir. Hesaplanan hata değerleri formüle edilerek kontrol edici hareketleriyle hata minimize edilir. Literatürde GPC yöntemi ile değişik proseslerde farklı parametrelerin kontrolüne yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. GPC yöntemi ilk olarak Clarke vd. tarafından 1987'de geliştirilmiş ve bu konudaki çalışmalarını iki ayrı yayında toplanmıştır. Bu yayınlarda kontrol yöntemi tasarımı için ARIMAX modelini kullanmışlardır. İlk çalışmada simülasyon sonuçlarıyla GPC'nin PID ve GMV kontrol yöntemlerinden daha üstün olduğunu göstermişlerdir. Bu kontrol yönteminde gelecekteki proses çıkış değişkeni tahmin edilmektedir [7]. Diğer çalışmada prosete bulunan ölü zaman değişimlerinin GPC kontrol algoritması tarafından bertaraf edildiğini göstermişlerdir. Sistem parametrelerinin tespitinde kök yerleştirme, GMV ve PID karşılaştırmaları yapılmıştır. Model parametrelerinin tahmininde yinelemeli en küçük kareler yöntemini uygulamışlardır. Çalışmalarda elde edilen sonuçlara dayanarak endüstriyel proseslerin kontrolü amacıyla GPC yönteminin kullanılmasını önermişlerdir [8]. NaOH ve asetik asit çözeltilerinin sürekli akım borsal reaktörde nötralizasyonu gerçekleştirilmiş ve pH'ın istenilen değerde tutulması için GPC yöntemi kullanılmıştır. GPC algoritması için sistem modeli olarak ARIMAX modeli kullanılmıştır. L'nin göreceli küçük değerleri seçildiğinde, pH değeri kontrol değişkeni olarak set noktasına erişmiş fakat salınımlı davranış sergilemiştir. Uygun L değeri genetik algoritmaları (GA) kullanılarak elde edilmiştir [9]. Stiren polimerizasyonunun gerçekleştiği kesikli çalıştırılan ceketli bir reaktörünün sıcaklık profilinin kontrolünde genelleştirilmiş delta kuralı (GDR) algoritması ile birleştirilen GPC algoritması kullanılmıştır. Monomer dönüşümü, viskozite ortalama molekül ağırlığı ve zincir uzunluğu üzerine değişik optimal koşulların etkileri incelenmiştir. Reaktör sıcaklığı ve reaktöre verilen ısı arasındaki etkileşime dayanan yapay sinir ağı modeli kullanılmıştır. Sonuçlar Self-Tuning PID (STPID) yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Kontrol deneyleri sonucunda GDK-GPC kontrol yönteminin iyi bir performans gösterdiği ve istenilen özelliklerde polimer elde edildiği gözlenmiştir [10]. Dolgulu damıtma kolonu için optimal işletme koşulları ile birlikte sıcaklık kontrolü için PID ve GPC algoritmaları kullanılmış ve ARIMAX tip model parametrelerinin belirlenmesi için kazan ısısına PRBS sinyalleri verilmiştir. GPC algoritmasıyla elde edilen deneysel ve modelden elde edilen verilerin uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalarda GPC performansının PID kontrole göre daha iyi olduğu

anlaşılmıştır [11]. Tam karıştırmalı ceketli bir polimerizasyon reaktörünün sıcaklık kontrolünü set noktası değişimi ile doğrusal olmayan GPC algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiş ve soğutma suyu akış hızına verilen etkiler ile prosesin dinamik davranışı incelenmiştir. Doğrusal olmayan GPC algoritmasında reaktör sıcaklığı ve ısı arasındaki ilişki için NARIMAX tipi model kullanılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan GPC sonuçları karşılaştırılarak doğrusal olmayan GPC algoritmasıyla daha iyi bir performans elde edilmiştir [12].

Literatür örneklerinde görüldüğü gibi kablosuz iletişim tekniği ile farklı sistemlerdeki değişkenlerin ölçümleri yapılarak bu değişkenlerin zamanla değişimleri izlenmiştir. Diğer taraftan GPC yöntemi ile değişik proseslerde farklı parametrelerin kontrolü başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bir proses kontrol simülöründe GPC kontrol yöntemini kullanarak kablosuz sıcaklık kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. MATLAB/Simulink programı yardımıyla on-line olarak gerçekleştirilen kablosuz deneyler sırasında veri transferi 2,4 GHz frekansında radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı koşullarda gerçekleştirilen kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde kullanılan parametrelerin etkinliği ve sıcaklık kontrolündeki performansları sıcaklık profilleri incelenerek ve hesaplanan ISE ve IAE değerleri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Ayrıca GPC yönteminin kullanıldığı bir sistemde sabit set noktasındaki kablosuz sıcaklık profillerinin karşılaştırılması deneysel olarak ilk defa uygulanmıştır. Bu bakımdan yapılan çalışma kablosuz proses kontrol için yeni ve iyi bir örnek olmakla birlikte bu alanda literatüre önemli bir katkı sağlayacağı kesindir.

2. DENEY SİSTEMİ (EXPERIMENTAL SYSTEM)

Kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinin gerçekleştirilmesinde Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Temel İşlemler laboratuvarında bulunan Cussons P3005 proses kontrol simülörü kullanılmıştır. Bu simülör sıcaklık, akış hızı, sıvı seviye ve basınç olmak üzere dört farklı proses parametresinin ölçüm ve kontrolü yapılabilen bir sistemdir. Proses simülöründe iki ana bölüm vardır. Bunlar proses ekipmanlarının bulunduğu bölüm ve elektronik devrelerin bulunduğu, ölçüm ve kontrolün yapılabildiği kumanda panosudur [13]. Proses kontrol simülöründe sisteme beslenen suyun muhafaza edildiği bir adet tank, sistemde suyun sirkülasyonunu sağlayan elektrik ile çalışan bir adet pompa, şebeke suyu ile soğutmanın yapıldığı ceketli soğutucu, sistemde suyun tutulduğu iki adet cam tank, elektrik ile çalışan bir adet akış hızı kontrol vanası, bir adet sıvı seviye kontrol vanası, akış hızını ölçen bir adet orifismetre, diferansiyel basınç farkını sıvı seviyesine çeviren bir adet transmitter, sıvının taşmasını önlemek amacıyla pompanın otomatik olarak kapanmasını sağlayan sigorta, pnömatik basınç kontrol edici indikatörü,

pnömatik basınç kaydedici, pnömatik olarak çalışan basınç kontrol vanası, sisteme kompresörden gelen basınçlı havayı istenilen basınç değerindeki havayı ileten iki adet regülatör bulunmaktadır. Ayrıca sistemde dört farklı deney düzeneğini oluşturabilmek için elle ayarlanan vanalar bulunmaktadır. Proses kontrol simülörünün diğer bir birimi ise elektronik devrelerin bulunduğu kontrol panosudur.

Bu panoda sıcaklık, sıvı seviye kontrol ve akış hızının ölçüm ve kontrolü yapılabilmektedir. Burada üç adet gösterge, otomatik-manual kontrole geçiş yapılabilen butonlar, pompa ve ısıtıcıyı çalıştırmak için butonlar bulunmaktadır. Simülörde sıcaklık, akış hızı ve sıvı seviyesi ölçüm ve kontrol sistemi tamamen elektriksel olarak basınç sistemi ise pnömatik olarak çalışmaktadır (Şekil 1)



Şekil 1. Kablosuz ölçüm ve kontrol için geliştirilen proses kontrol simülörü (Developed process control simulator for wireless measurement and control)

Kablosuz deneylerin gerçekleştirilmesinde Temel İşlemler laboratuvarında bulunan proses kontrol simülörü ile Proses Kontrol laboratuvarında bulunan bilgisayar arasında veri aktarımını sağlamak için kablosuz iletişim sistemi kurulmuştur. Bunun için proses kontrol simülöründe kablosuz ölçüm ve kontrol deneyleri gerçekleştirmek için bazı değişiklikler yapılarak, yeni ekipmanlar eklenmiştir. Bu amaçla bilgisayar ve sistem arasında iletişimi sağlayabilmek için simülör ve laboratuvardaki bilgisayar arasında veri

aktarımını sağlayan iki adet anten koyulmuştur. Ayrıca proseste ayarlanabilen değişkenler olarak belirlenen; ısıtıcı, sıvı seviye kontrol vanası, basınç kontrol vanası tekrardan kalibre edilmiş ve bunların çıkışları modüllere bağlanmıştır. Bu modüller iki anten arasındaki aktarılan verileri bünyesinde bulundurmaktadır. Deneyler sırasında kablosuz veri transferi 2,4 GHz frekansında radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir [13].

3. DENEY YÖNTEMİ (EXPERIMENTAL METHOD)

Proses kontrol simülöründe sıcaklık kontrol deneyleri için elle ayarlanan vanaların pozisyonları açık veya kapalı şeklinde uygun konumda ayarlanır. Akış hızı kontrol vanası 2.5 l/dk ve sıvı seviye kontrol vanası % 45 vana açıklığı değerinde ayarlanarak ikinci tanktaki sıvı seviyesinin yaklaşık aynı değerinde sabitlenmesi sağlanır. Kontrol panosu üzerindeki ısıtıcı düğmesi ile çalıştırılan ısıtıcı ile sistemdeki suyun sıcaklığı artırılır. Sistemde sıcaklığı artan suyun soğutulması tanka dönmeye önce ceketli soğutucudan şebeke suyu ile sağlanır.

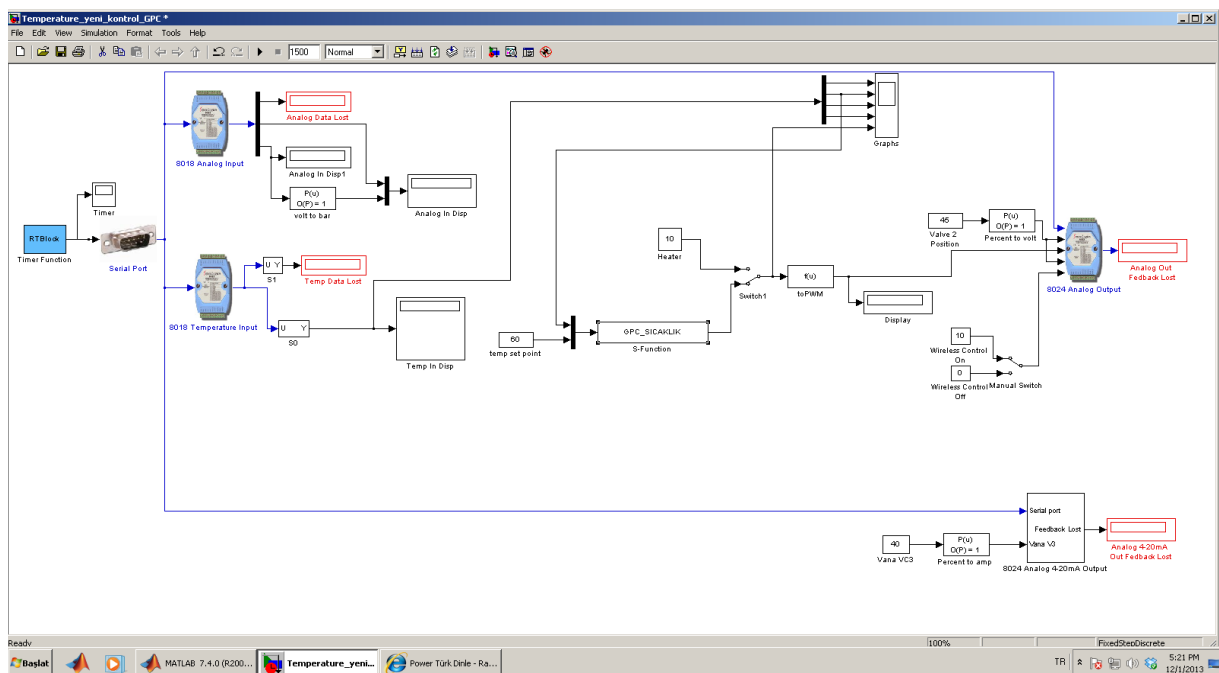
GPC algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde, algoritmadaki N_U , N_1 , N_2 ve L parametreleri kullanılarak $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$; $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$; $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$ değerlerindeki $L=0.001$, 0.005 , 0.01 , 0.05 , 0.1 , 0.5 değerleri için aynı koşullarda farklı set noktaları seçilerek deneyler yapılmıştır. Bu kontrol deneylerinde ısıtıcı ve sıcaklık profillerinin zamanla değişimi gözlenmiştir. En iyi sıcaklık kontrolünü sağlayan parametrelerin belirlenmesinde deney verileri kullanılarak hesaplanan ISE ve IAE değerleri kullanılmıştır. Sıcaklık kontrol deneylerinde başlangıçta ısıtıcı sabit %10 ısıtıcı açıklığı değerinde 300 saniye çalıştırılarak sistemin yatışkın hale gelmesi

beklenmiştir. 300 saniye sonunda MATLAB/Simulink blok diyagramında bulunan kontrol anahtarı değiştirilerek daha önce kaydedilen kontrol algoritması devreye alınmış ve bu algoritmadaki parametrelerin kontrol üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde kullanılan MATLAB/Simulink programının şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir. Burada sistemin kablosuz kontrolünün yapılabilmesi için bir adet wireless açık-kapalı düğmesi, proses parametrelerinin sayısal ve grafiksel olarak gösterildiği bloklar, hata sinyallerinin depolandığı bloklar, simülördeki elektriksel vanaların açıklık değerlerinin ayarlandığı kutucuklar bulunmaktadır (Şekil 2).

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

GPC algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde yapılan ön denemelerde, algoritmada kullanılan herhangi bir N_U , N_1 ve N_2 değerinde, L 'nin 1,0'den büyük tüm değerlerinde ısıtıcının % 0-100 arasında salınımlar yaptığı ve buna bağlı olarak sıcaklığında çok büyük salınımlar yaptığı görülmüştür (Şekil 3-4). GPC algoritmasında en etkili ayar parametresi olan L 'nin 1.0'den büyük değerlerinde, sistemin tepkisi azaldığından dolayı GPC deneyleri, L 'nin 1.0'den küçük değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

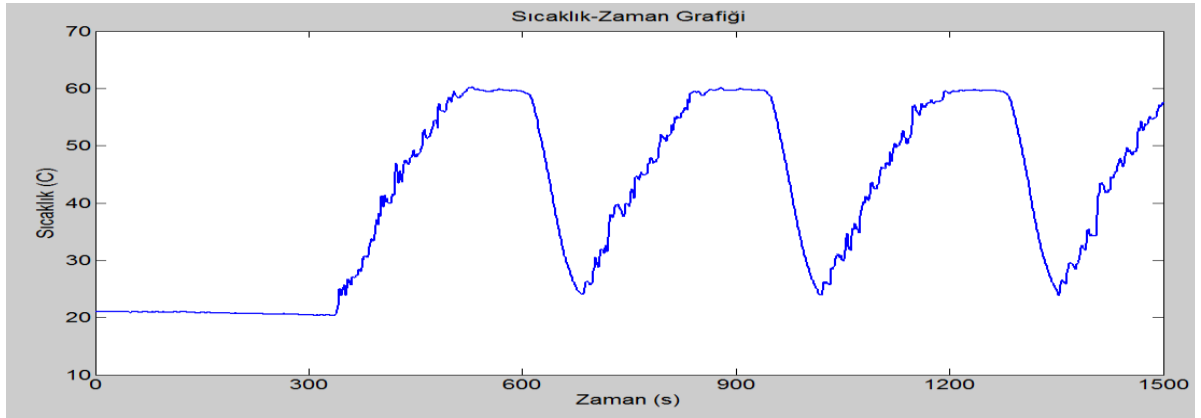
GPC algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde yapılan ön denemelerde, algoritmadaki herhangi bir N_U , N_1 ve N_2 değerinde, L 'nin 1.0'den büyük tüm değerlerinde ısıtıcının çok büyük salınımlar yaptığı ve buna bağlı olarak sıcaklığında çok büyük salınımlar yaptığı görülmüştür. Bu nedenle GPC kontrol deneyleri, L 'nin 1.0'den küçük değerlerinde gerçekleştirilmiştir.



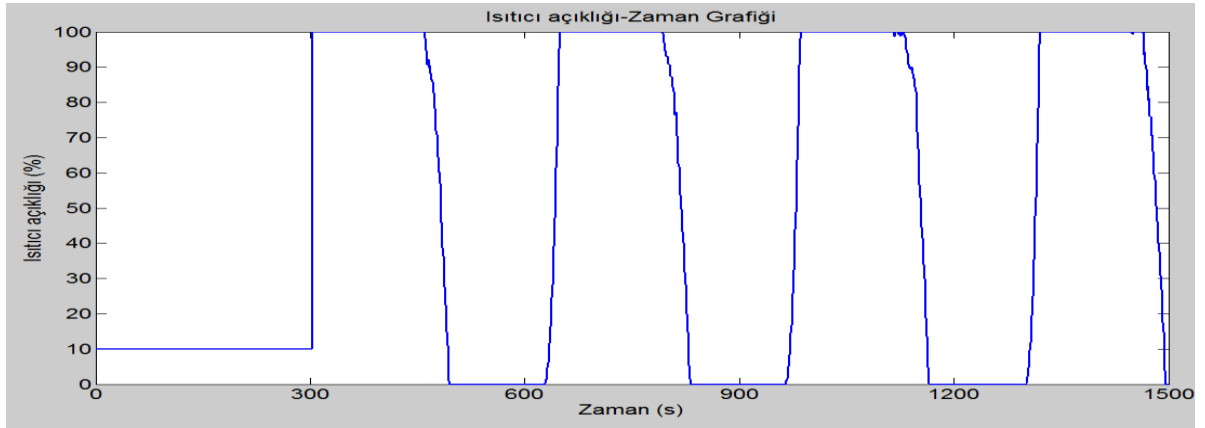
Şekil 2. Kablosuz sıcaklık GPC deneyinin MATLAB/Simulink blok diyagramı (MATLAB/Simulink block diagram of wireless temperature GPC experiment)

GPC kontrol algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde, $T_{set}=50$ °C için algoritmadaki N_U , N_2 ve L parametreleri kullanılarak

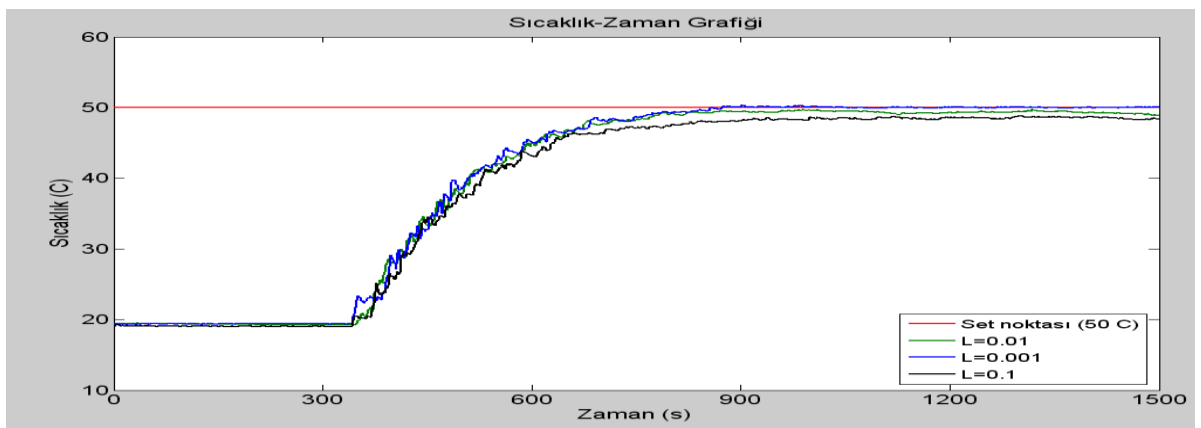
$L=0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5$ değerlerinde yapılan deneylerde sıcaklığın zamanla değişim grafiği Şekil 5-12'de verilmiştir. Bu deneylerde elde edilen veriler



Şekil 3. L 'nin 1.0'den büyük değerleri için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for L values are bigger than 1.0)



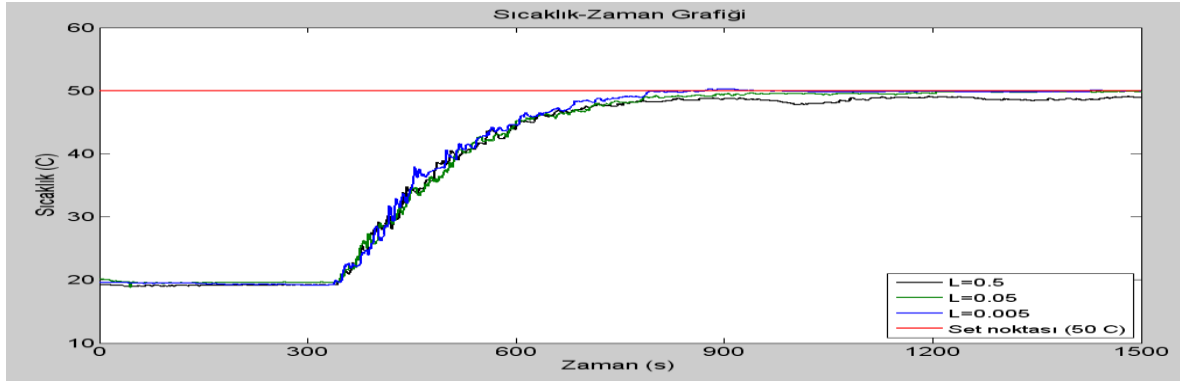
Şekil 4. L 'nin 1.0'den büyük değerleri için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (Heater capacity changes for L values are bigger than 1.0)



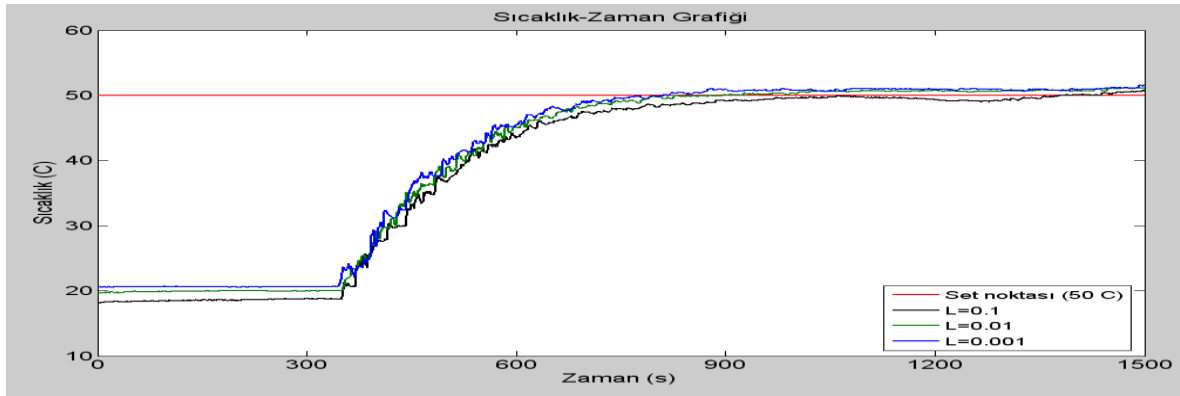
Şekil 5. $N_U=1, N_1=1, N_2=2$ ve $L=0.001, 0.01, 0.1$ için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1, N_1=1, N_2=2$ and $L=0.001, 0.01, 0.1$)

$N_U=1.0, N_1=1.0, N_2=2.0, N_U=1.0, N_1=1.0, N_2=4.0, N_U=2.0, N_1=1.0, N_2=2.0$ ve $N_U=2.0, N_1=1.0, N_2=4.0$ değerlerindeki

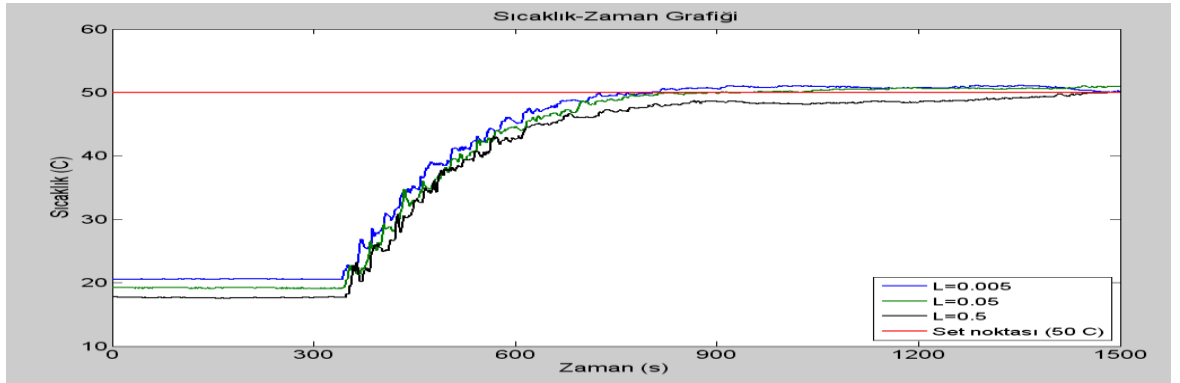
kullanılarak hesaplanan ISE değerleri Tablo 1'de ve IAE değerleri Tablo 2'de verilmiştir.



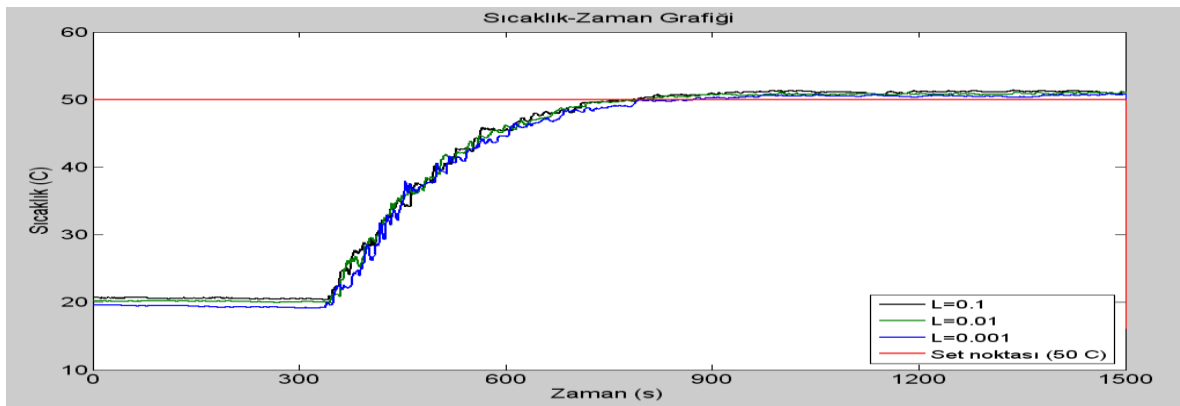
Şekil 6. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve $L=0.005$, 0.05 , 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=2$ and $L=0.005$, 0.05 , 0.5)



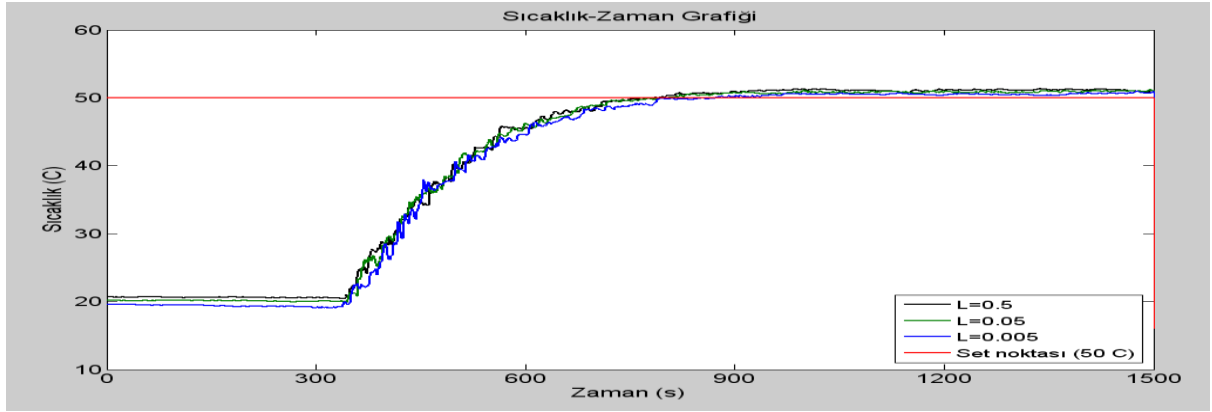
Şekil 7. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.001$, 0.01 , 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.001$, 0.01 , 0.1)



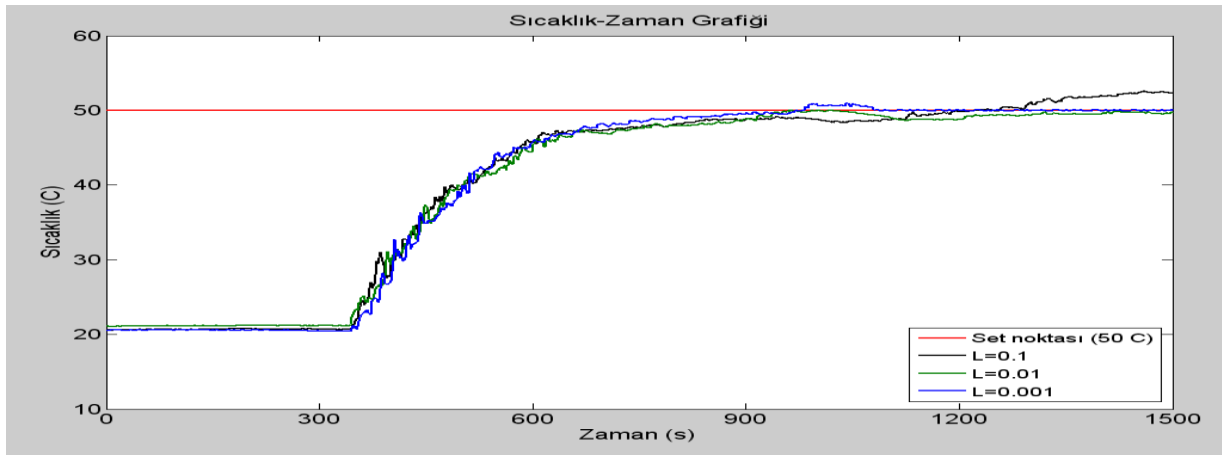
Şekil 8. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.005$, 0.05 , 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.005$, 0.05 , 0.5)



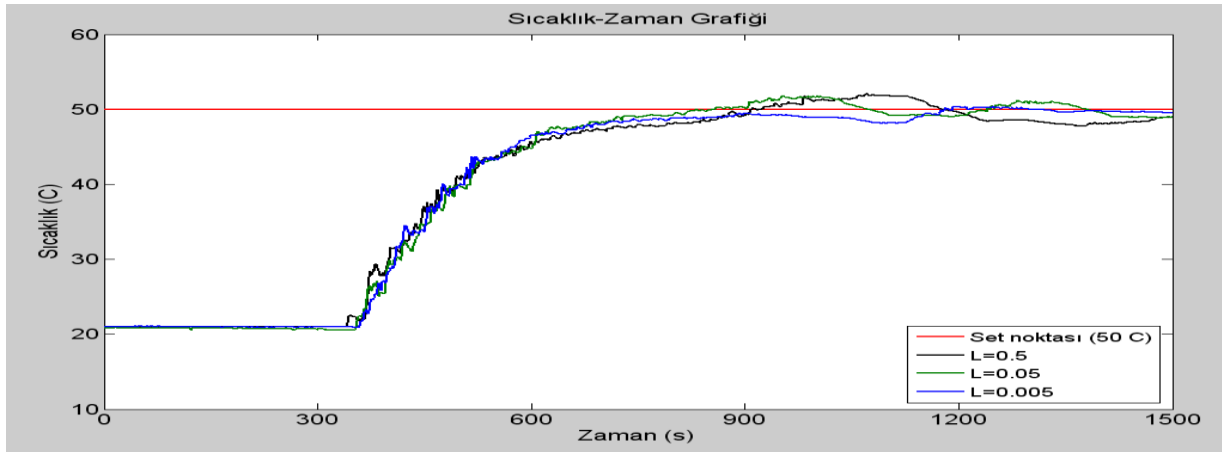
Şekil 9. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve $L=0.001$, 0.01 , 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ and $L=0.001$, 0.01 , 0.1)



Şekil 10. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve $L=0.005, 0.05, 0.5$ için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ and $L=0.005, 0.05, 0.5$)



Şekil 11. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.001, 0.01, 0.1$ için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.001, 0.01, 0.1$)



Şekil 12. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.005, 0.05, 0.5$ için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.005, 0.05, 0.5$)

Çizelge 1. Tset=50 °C için hesaplanan ISE değerleri (Calculated ISE values for Tset=50 °C)

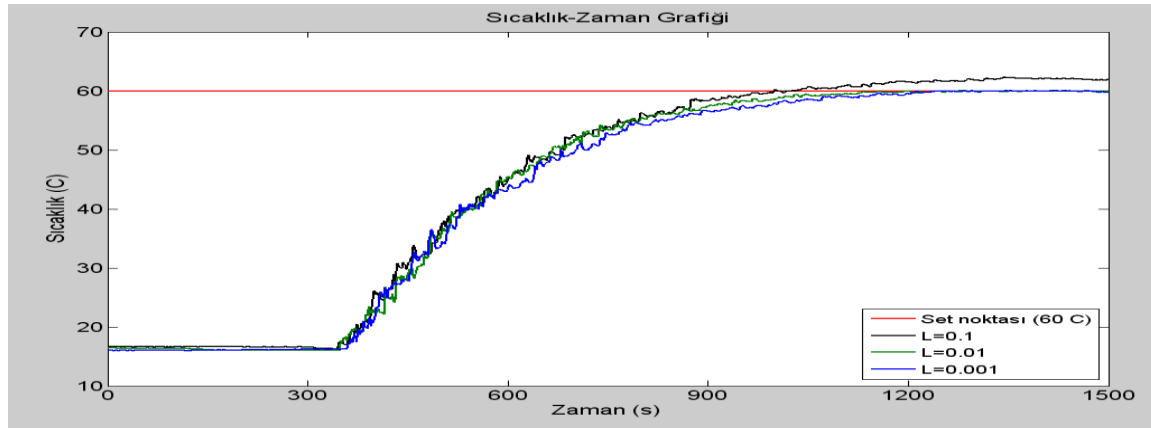
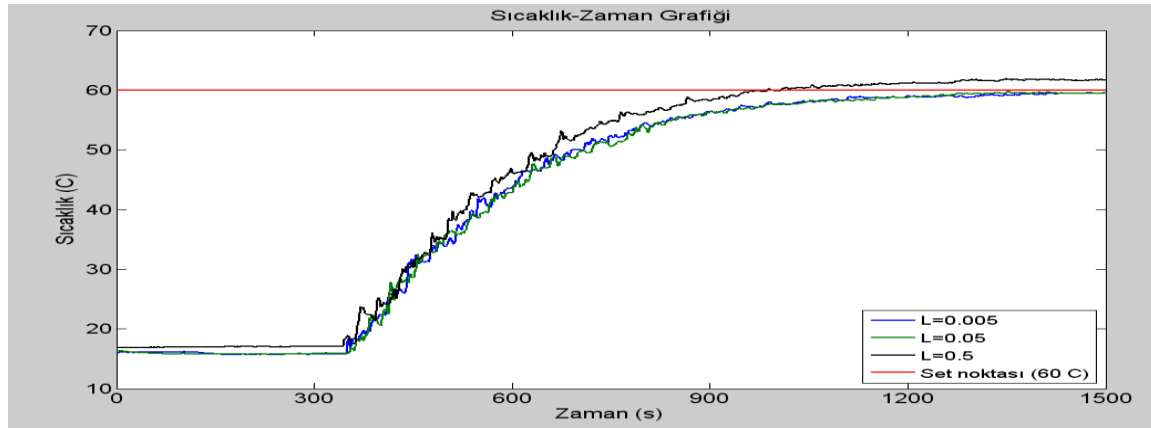
	L=0,001	L=0,005	L=0,01	L=0,05	L=0,1	L=0,5
Nu=1, N2=2	60534,77	61563,10	59008,28	59981,36	62488,23	63248,61
Nu=1, N2=4	63143,64	63437,35	61657,55	62182,98	63793,99	70883,09
Nu=2, N2=2	66114,53	71016,31	63999,01	64935,69	72290,16	74135,42
Nu=2, N2=4	70872,40	75781,33	64562,83	69668,41	78849,61	79998,53

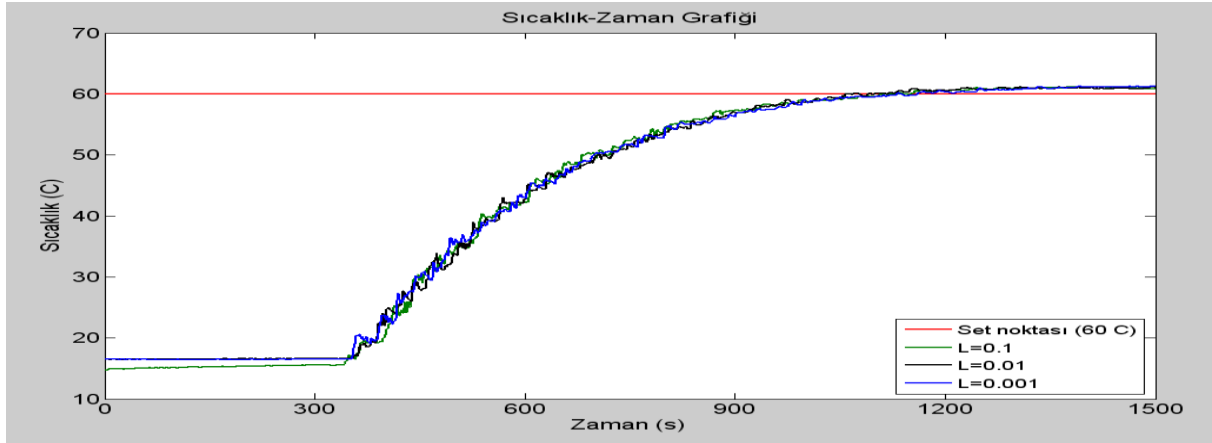
Çizelge 2. Tset=50 °C için hesaplanan IAE değerleri (Calculated IAE values Tset=50 °C)

	L =0,001	L =0,005	L =0,01	L =0,05	L =0,1	L =0,5
Nu=1, N2=2	4224,90	4425,10	4088,30	4355,10	4742,80	4498,70
Nu=1, N2=4	4415,00	4896,50	4232,40	4436,70	4602,50	5067,50
Nu=2, N2=2	4505,70	4706,50	4310,00	4491,50	4827,40	4840,80
Nu=2, N2=4	4856,50	4881,80	4540,90	4600,40	5315,10	5881,10

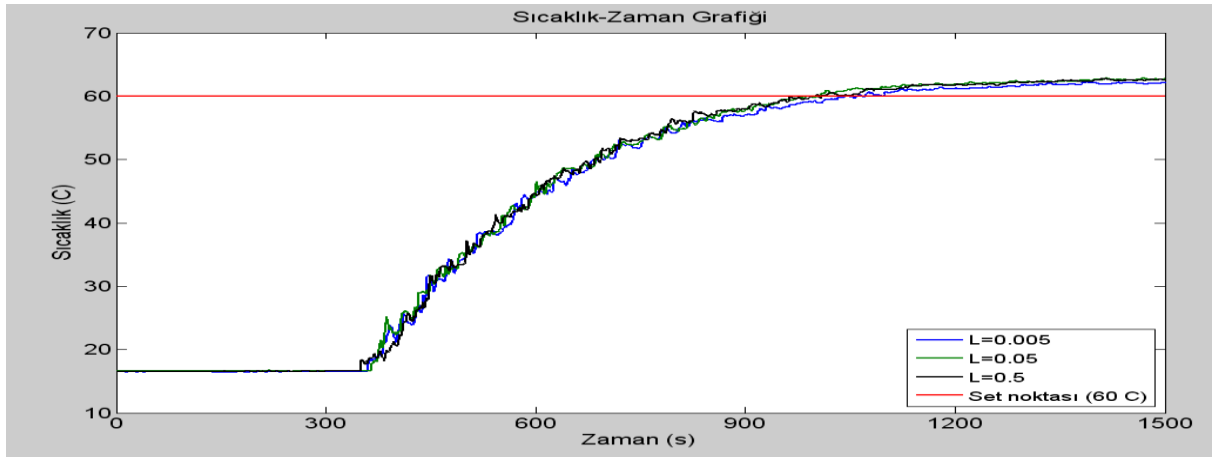
GPC kontrol algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde, Tset=60 °C için algoritmadaki N_U , N_2 ve L parametreleri kullanılarak $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$, $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$, $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$ değerlerindeki

L=0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 değerlerinde yapılan deneylerde sıcaklığın zamanla değişim grafiği Şekil 13–20’de verilmiştir. Bu deneylerde elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan ISE değerleri Tablo 3’de ve IAE değerleri Tablo 4’de verilmiştir.

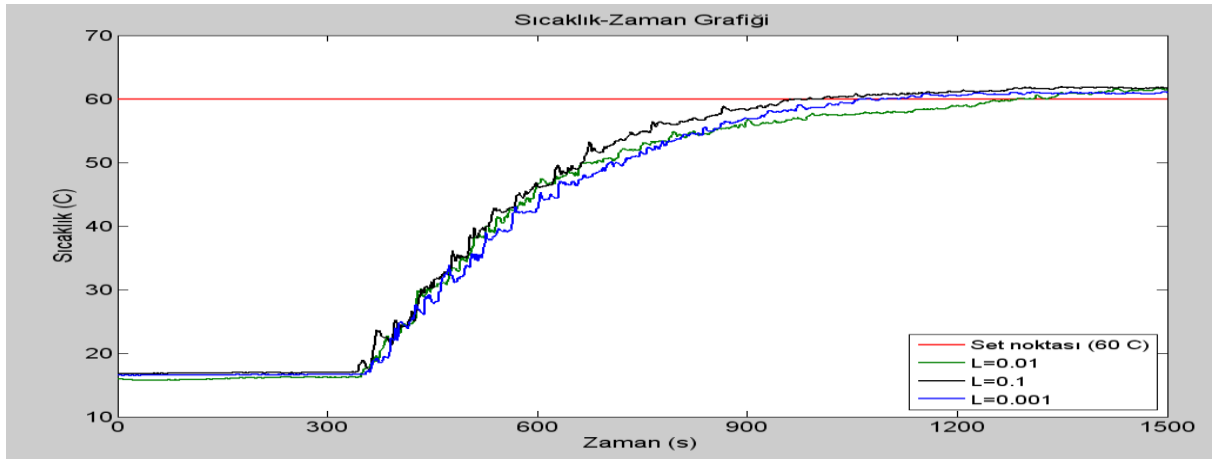
Şekil 13. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve L=0.001, 0.01, 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=2$ and L=0.001, 0.01, 0.1)Şekil 14. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve L=0.005, 0.05, 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=2$ and L=0.005, 0.05, 0.5)



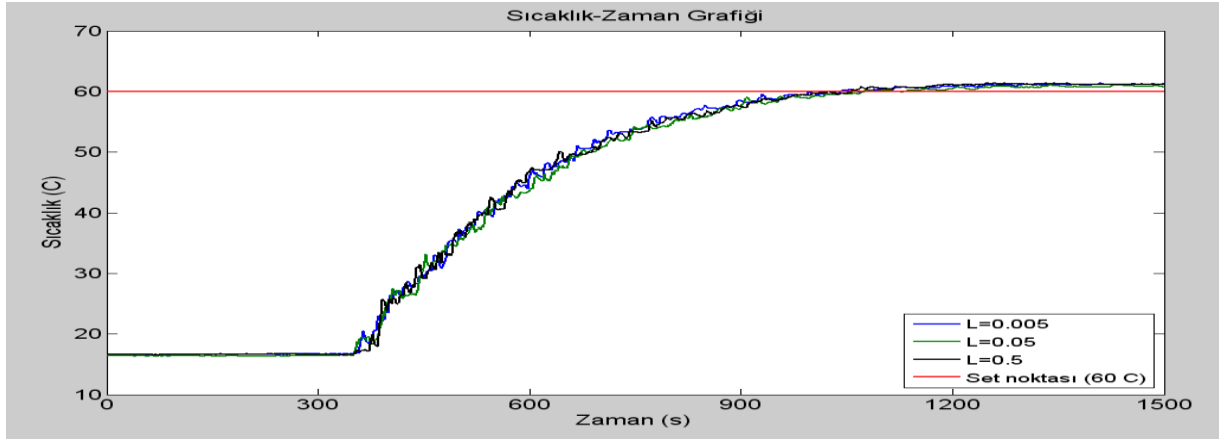
Şekil 15. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.001$, 0.01 , 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.001$, 0.01 , 0.1)



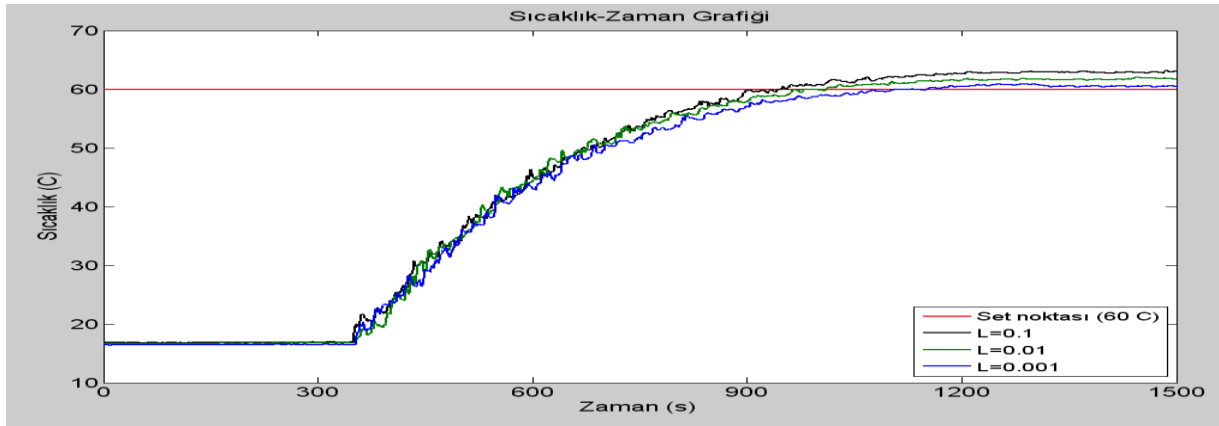
Şekil 16. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.005$, 0.05 , 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.005$, 0.05 , 0.5)



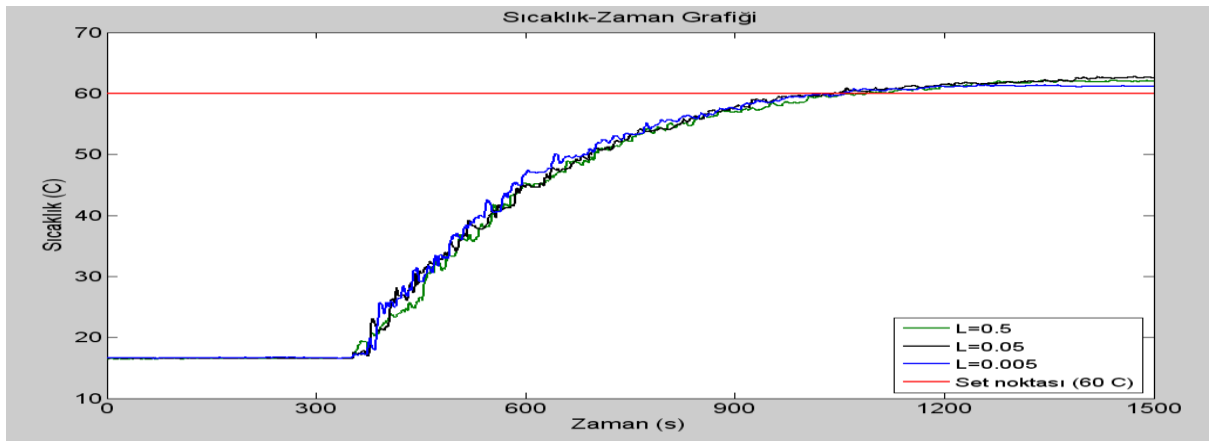
Şekil 17. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve $L=0.001$, 0.01 , 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ and $L=0.001$, 0.01 , 0.1)



Şekil 18. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve $L=0.005$, 0.05 , 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ and $L=0.005$, 0.05 , 0.5)



Şekil 19. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.001$, 0.01 , 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.001$, 0.01 , 0.1)



Şekil 20. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.005$, 0.05 , 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.005$, 0.05 , 0.5)

Çizelge 3. Tset=60 °C için hesaplanan ISE değerleri (Calculated ISE values for Tset=60 °C)

	L=0.001	L=0.005	L=0.01	L=0.05	L=0.1	L=0.5
Nu=1, N2=2	230608.73	238978.45	216372.58	229068.34	251189.20	255201.85
Nu=1, N2=4	246643.91	245438.40	224396.82	226978.68	231434.14	251434.14
Nu=2, N2=2	247277.42	248254.42	241464.77	236526.64	248487.98	252190.04
Nu=2, N2=4	250241.19	257593.07	239987.66	243916.83	257283.73	258254.42

Çizelge 4. Tset=60 °C için hesaplanan IAE değerleri (Calculated IAE values for Tset=60 °C)

	L=0.001	L=0.005	L=0.01	L=0.05	L=0.1	L=0.5
Nu=1, N2=2	10026.00	10178.50	9285.60	9585.60	10295.00	10758.30
Nu=1, N2=4	10197.50	10318.20	9473.00	9632.90	10417.70	10544.00
Nu=2, N2=2	10178.50	10278.40	9697.20	9755.60	10471.40	10544.00
Nu=2, N2=4	10300.70	10423.40	9897.20	9919.20	10398.50	10646.70

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Bu çalışmada GPC algoritmasının uygulandığı kablosuz sıcaklık kontrol deneyleri gerçekleştirilmiş ve aynı koşullarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. GPC algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde, algoritmadaki N_U , N_1 , N_2 ve L parametreleri kullanılarak $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$, $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$, $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$ değerlerindeki $L=0.001$, 0.005 , 0.01 , 0.05 , 0.1 , 0.5 değerleri için aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda ısıtıcı ve sıcaklık profillerinin zamanla değişimi gözlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlarda, sıcaklık profilleri incelendiğinde genel olarak $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$ değerlerindeki deneysel sıcaklıkların $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$, $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$ değerlerine göre set noktasına daha yakın olduğu ve salınımın daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca N_U ve N_2 değerlerinin artırılmasıyla sıcaklıkların set noktasından uzaklaşmaya başladığı ve salınımların arttığı gözlenmiştir. $L=0.001$, 0.005 , 0.01 , 0.05 , 0.1 , 0.5 değerleri kullanılarak $T_{set}=50$ °C ve $T_{set}=60$ °C için aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda en iyi sıcaklık kontrolünü sağlayan parametre değerleri ISE ve IAE değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar kullanılarak hesaplanan ISE değerlerinin verildiği Tablo 1, Tablo 3 ve IAE değerlerinin verildiği Tablo 2, Tablo 4 incelendiğinde en düşük ISE ve IAE değerleri $L=0.01$ değerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu çizelgelerde $L=0.01$ 'den düşük ve yüksek değerlerde ISE ve IAE değerlerinin arttığı ve sıcaklığın set noktasından uzaklaştığı görülmektedir. Sonuç olarak en iyi sıcaklık kontrolü $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $L=0.01$ değerlerinde elde edilmiştir.

SEMOLLER (NOTATIONS)

N_U	Kontrol ufku
N_1	Minimum öngörme ufku
N_2	Maksimum öngörme ufku
L	Kontrol Ağırlık Faktörü

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

ARIMAX	Auto Regressive Integral Moving Average eXogenous
GA	Genetik Algoritma
GMV	Generalized Minimum Variance Control
GPC	Generalized Predictive Control
IAE	Integral of the Absolute value of the Error
ISE	Integral of the Square value of the Error
MPC	Model Predictive Control
PID	Proportional Integral Derivative Control
RF	Radio Frequency

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı (AÜ BAPRO) 10A4343001 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Murari, A. ve Lotto, L., Wireless Communication Using Detectors Located Inside Vacuum Chambers, *Vacuum*, 72(2): 149–155, (2004).
2. Woodard, S.E. ve Taylor, B.D., A Wireless Fluid-Level Measurement Technique, *Sensors and Actuators*, 137(2): 268–278, (2007).
3. Jackson, T., Mansfield, K., Saafi, M., Colman, T. ve Romine, P., Measuring Soil Temperature and Moisture Using Wireless MEMS Sensors, *Measurement*, 41(4): 381–390, (2008).

4. López, M., Martínez, S., Gómez, J. M., Herms, A., Tort, L., Bausells, J. ve Errachid, A., Wireless Monitoring of the pH, NH_4^+ and Temperature in a Fish Farm, *Procedia Chemistry*, 1(1): 445–448, (2009).
5. Capella, J. V., Bonastre, A., Ors, R. ve Peris, M., A Wireless Sensor Network Approach for Distributed In-Line Chemical Analysis of Water, *Talanta*, 80(5): 1789–1798, (2010).
6. Barroca, N., Borges, L. M., Velez, F. J., Monteiro, F., Górski, M., Gomes, J. C., Wireless Sensor Networks for Temperature and Humidity Monitoring Within Concrete Structures, *Construction and Building Materials*, 40(1): 1156–1166, (2013).
7. Clarke, D.M., Mohtadi, C. and Tuffs, P.S., Generalized Predictive Control, Part I. The Basic Algorithm, *Automatica*, 23(2): 137-148, (1987).
8. Clarke, D.M., Mohtadi, C. and Tuffs, P.S., Generalized Predictive Control, Part II. Extensions and Interpretations, *Automatica*, 23(2): 149-160, (1987).
9. Altınten, A., Generalized Predictive Control Applied to A pH Neutralization Process, *Computers and Chemical Engineering*, 31(10): 1199-1204, (2007).
10. Çetinkaya, S., Durmazucar, H. H., Zeybek, Z., Hapoğlu, H., Alpbaz, M., Kesikli Bir Polimerizasyon Reaktörüne Farklı Optimal Şartlarda Sıcaklık Kontrolünün Uygulanması, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 28(2): 383-392, (2013).
11. Karacan, S., Hapoğlu, H., Alpbaz, M., Application of Optimal Adaptive Generalized Predictive Control to A Packed Distillation Column, *Chemical Engineering Journal*, 84(3): 389-396, (2001).
12. Özkan, G., Hapoğlu, H., Alpbaz, M., Non-Linear Generalized Predictive Control of A Jacketed Well Mixed Tank As Applied to A Batch Process—A Polymerisation Reaction, *Applied Thermal Engineering*, 26(7): 720–726, (2006).
13. Aldemir, A., Hapoğlu, H., Kablosuz Sıcaklık Kontrolü İçin PID Ayarlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Journal of Polytechnic*, 19(1): 9-19, (2016).