

Mikrodenetleyici Kontrollü, Termoelektrik Kaynaklı Kablosuz ve Sensörsüz Yüksek Sıcaklık Duyum Devresi

Ahmet KÜÇÜKKÖMÜRLER¹, Kubilay TAŞDELEN^{2*}

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / ISPARTA

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / ISPARTA

Alınış Tarihi:26.06.2012, Kabul Tarihi:06.11.2012

Özet: Sürdürülebilir enerjinin her geçen gün daha da önemli bir konu olduğu günümüzde, enerji üretiminin farklı yöntemleri araştırılmakta ve denenmektedir. Bu yöntemlerden bir tanesi de atıl ısıdan elektrik enerjisi üretmektir. Termoelektrik malzeme, iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı meydana gelmesi durumunda elektriksel bir gerilim üreten malzemelerdir. Bu çalışmada termoelektrik malzeme ile atıl ısı elektrik enerjisine çevrilerek, RF (Radyo Frekansı) alıcı-verici kullanımı ile yüksek sıcaklık kablosuz ve sensörsüz duyum devresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen bu devrede TMG-450-0.8-1.0 termoelektrik üreteç, ATX-34 RF verici, ARX-34 radyo frekans alıcı ve 8051 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Sistem, laboratuvar ortamında test edilmiş ve otomotiv alanında kablosuz ve sensörsüz yüksek sıcaklık ölçüm uygulamaları için simülasyon ve deneysel sonuçlar elde edilerek bu sonuçların doğruluğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termoelektrik Üreteç, 8051 Mikrodenetleyici, ATX-34 RF Verici, ARX-34 RF Alıcı, Atıl Isı

Wireless and Sensorless High Temperature Sensing Circuit with Thermoelectric Source by Controlling Microcontroller

Abstract: Sustainable energy is one of the most important subject in nowadays, therefore new energy production techniques are subject for researchers. One of the methods to produce electricity is convert waste heat to electrical energy using thermoelectric element. Produced electricity on a thermoelectric element is proportional with temperature difference between hot and cold surfaces. In this study thermoelectric element convert waste heat to electricity to power up RF (Radio Frequency) receiver and transmitter to measure wireless and sensorless high temperature. For that reason TMG-450-0.8-1.0 thermoelectric generator, ATX-34RF transmitter, ARX-34RF receiver and 8051 microcontroller has been utilized. System has been tested in the laboratory environment and promising results captured for the automotive wireless and sensorless high temperature sensing and telemetry.

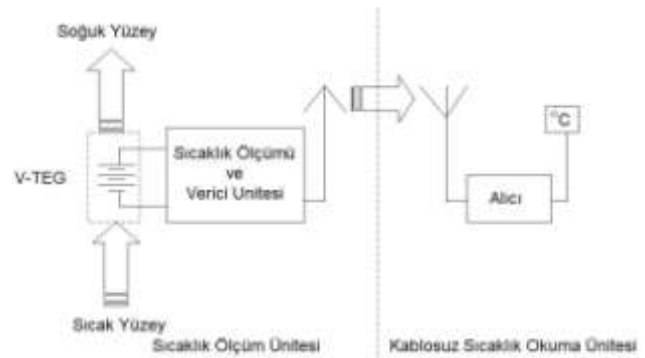
Keywords: Thermoelectric Generator, 8051 Microcontroller, ATX-34 RF Receiver, ARX-34 RF Transmitter, Waste Heat

Giriş

Tarihsel olarak bakıldığında yüksek sıcaklık ölçümlerinde ısı çiftleri kullanılmaktadır. Isıl çiftlerin sıcaklık ölçümünde kullanılmasında çalışılan yüzeydeki sıcaklığın konumsal farklılıkları olması, elektrikle ısıtılan yüzeyler için elektriksel alan dağılımında sapmaların olabilmesi (Gao ve Sunden, 2000) ve ısı çift kullanımının en önemli dezavantajı yüksek sıcaklık kablolarının ölçüm yapılacak noktaya bağlanması ve bu kablo bağlantılarının getirdiği ekstra işçilik ve maliyet olmaktadır. Kablosuz sıcaklık ölçümü bu gibi dezavantajları ortadan kaldırmasının yanında kullanım kolaylığı sağlayacaktır.

Günümüzde kablosuz sıcaklık ölçümlerinde kızılötesi, termal (Socher vd., 2000) ve lazer teknikleri (Patino-Lopez vd., 2001) kullanılmaktadır. Fakat bu ölçümlerde sıcaklığın ölçüleceği yüzeyi kablosuz sıcaklık ölçerlerin görmesi gerekmekte (Suster vd., 2004) ve buna bağlı olarak ölçüm sonuçlarının görüntülenmesi için uzaklıkla ilgili sorunlar ortaya çıkmaktadır. Kablosuz sıcaklık ölçümü yapacak ölçü aleti ile ölçümü yapılacak cisimlerin birbirlerini görmesi ve uzaklık kısıtlamasının üstesinden gelebilmenin en kolay yolu, ölçüm yapılacak cisim üzerinden sıcaklığın RF ile kablosuz sıcaklık okuması yapılacak noktaya aktarımıdır. Sıcaklık okuması ve ölçümün RF verici ile aktarımı için elektronik devrelere ve elektriksel besleme kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu besleme kaynağı atıl ısıdan bir termoelektrik üreteç ile sağlanmaktadır. Aynı zamanda termoelektrik güç üretiminin

sıcak ve soğuk yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ile orantılı bir potansiyel üretebilme kabiliyeti sayesinde sıcaklık sensörüne gerek duyulmadan sıcaklığın okunması, kablosuz sıcaklık ölçümlerinde daha önce kullanılmamış bir yöntem olarak literatüre geçecektir. Termoelektrik güç üretiminin sıcak yüzeyi, sıcaklığı ölçülecek yüzeye bağlanacak termoelektrik güç üretiminin soğuk yüzeyi ise ortama alüminyum soğutucu ile açık bırakılacaktır. Basitleştirilmiş sistem blok şeması aşağıda Şekil 1'de verilmiştir.



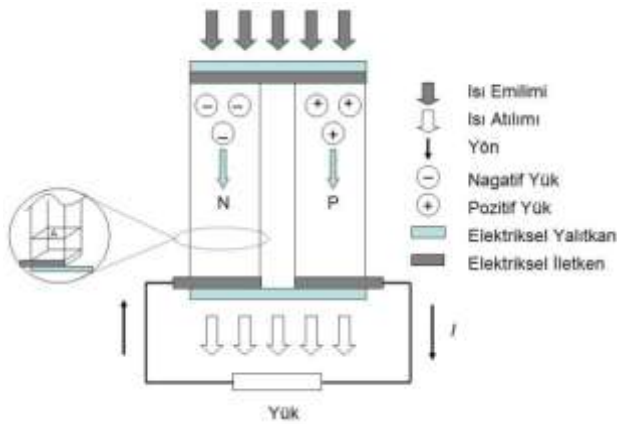
Şekil 1. Termoelektrik kaynaklı kablosuz ve sensörsüz yüksek sıcaklık duyum devresi blok şeması

* kubilaytasdelen@sdu.edu.tr

Materyal ve Metot

Termoelektrik Güç Üreteç Teorisi

Termoelektrik etki ilk olarak Joann Seeback tarafından bulunmuş olup, iki farklı metalin bir noktadan birleştirilerek ısıtılması sonucu metallerin açık uçlarından bir potansiyelin okunması ile ifade edilmektedir (Rowe ve Min, 1996). Tipik çoklu termoelektrik güç üreteci prensip şeması Şekil 2’de verilmiştir. P-tipi ve N-tipi yarı iletkenlerden oluşan termoelektrik üreteç ısı elemanların seri ve paralel kombinasyonlarından oluşmuştur. Termoelektrik üretecin geliştirilmiş teorik modeline ısıl ve elektriksel kontak dirençleri dahil edildiğinde, termoelektrik üretecin optimum yükteki çıkış voltajı V_o , akımı I_o , ve gücü P_o eşitlikleri aşağıda verilmiştir (Lineykin ve Ben-Yaakov, 2007).



Şekil 2. Tekil termoelektrik üreteç prensip şeması

$$V_o = \frac{\alpha N(T_h - T_c)}{1 + 2rL_c/L} \quad (1)$$

$$I_o = \frac{\alpha A(T_h - T_c)}{2p(L+n)\left(1 + \frac{2rL_c}{L}\right)} \quad (2)$$

$$P_o = \frac{\alpha^2 NA}{2p(L+n)(1 + 2rL_c/L)} (T_h - T_c)^2 \quad (3)$$

Yukarıda; $n = \frac{2pc}{p}$, $r = \frac{\lambda}{\lambda c}$, α termoelektrik

materyallerin Seeback katsayısı olup (V/K), p elektriksel iletkenlik (Ω -cm), pc elektriksel kontak iletkenliği, N toplam ısıl elemanların sayısı yüzey alanı (mm^2), L ısıl elemanların uzunluğu (mm), L_c ısıl elemanların kalınlığı (mm), T_h sıcak yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), T_c soğuk yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), λ kontakların termal iletkenliğidir (Zhang ve Sen, 2003).

Termoelektrik Üreteç Seçimi

Bu çalışmada termoelektrik güç üreteci ile atıl ısının elektrik enerjisine çevrilerek kablosuz sıcaklık ölçerin elektriksiz beslenmesi için kullanılmış olup ayrıca bir yüksek sıcaklık sensörüne ihtiyaç duyulmaksızın termoelektrik güç üretecin çıkışındaki potansiyelden sıcak yüzeyin sıcaklığı formülize edilmiş ve 8051 mikrodenetleyicisi tarafından çözümlenerek bulunan sıcaklık değeri alıcıya gönderilmiştir. Aynı zamanda termoelektrik güç üreteç prototip devre için sadece güç kaynağı olmayıp sensör görevi yapıyor olması da kullanımının önemini arttırmaktadır. Sistemde kullanılan termoelektrik güç üreteç modülü Alman QUICK-OHM Küpper & Co. firmasına ait olup ticari olarak “TMG-450-0.8-1.0” ismi ile anılmaktadır. Modülün optimum çalışma sıcaklıkları sıcak yüzey 175°C ve soğuk yüzey 50°C ve toplam sıcaklık farkı 125°C olup diğer fabrikasyon karakteristik değerleri Çizelge 1’de verilmiştir. Bu karakteristik değerler ile atıl ısının elektrik enerjisine çevrim verimliliği %3 civarında olup bu verimlilik $W_{\text{yük}}/Q_{\text{ısı}}$ formülü ile hesaplanmıştır. Burada $W_{\text{yük}}$ watt cinsinden çıkış gücü olup $Q_{\text{ısı}}$ modül içersindeki watt cinsinden ısı akış miktarıdır (Küçükkömürler, 2009).

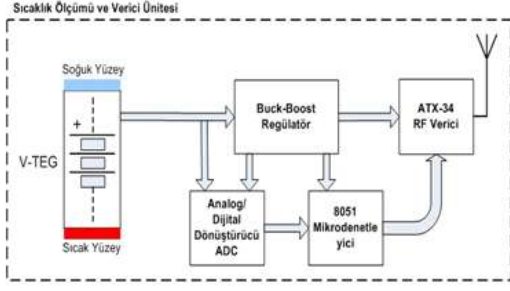
Çizelge 1. TMG-450-0.8-1.0 fabrikasyon karakteristik değerleri

Ürün No	TMG-450-0.8-1.0
Ölçüler: Soğuk yüzey	54.4 x 57.0 x 3.4mm.
Ölçüler: Sıcak yüzey	54.4 x 54.4 x 3.4mm.
Açık devre çıkış potansiyeli	21V @125 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkı.
İç direnç	21.5 Ω
Optimum yükte çıkış potansiyeli	12V @ 28 Ω yük direnci.
Optimum yükte çıkış akımı	416mA.
Optimum yükte çıkış gücü	5 W.
Modül termal iletkenliği	1.45W/ $^{\circ}\text{C}$.
Modül ısı akış	159.5Watts.
Modül ısı akış yoğunluğu	5.46Watts/ cm^2 .

Sensörsüz Yüksek Sıcaklık Ölçümü ve RF Verici Ünitesi

Sensörsüz yüksek sıcaklık ölçümü ve RF verici ünitesinin blok şeması Şekil 3’te görülmektedir. Termoelektrik güç üreteç modülünün sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı 20°C ’ye ulaştığı zaman yaklaşık 2.74 Volt’a eşit bir V-TEG (Termoelektrik Üretecin Gerilimi) gerilimi meydana gelir. Bu gerilim seviyesi Buck-Boost regülatör tarafından 5 Volta çıkarılarak mikrodenetleyici ve RF vericinin beslenmesinde kullanılmaktadır. Bu gerilim seviyesi 8051 mikrodenetleyicisini ve RF verici devreyi besleyebilmek için yeterlidir. Sıcak ve soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkından oluşan gerilim seviyesi analog dijital dönüştürücü tarafından 8051 mikrodenetleyicisinin algılayabileceği biçime çevrilmektedir. Keil firması tarafından geliştirilmiş olan μ Vision3 programı kullanılarak geliştirilen 8051 mikrodenetleyicisi üzerindeki gömülü program analog dijital dönüştürücüden gelen verileri işleyerek elde edilen

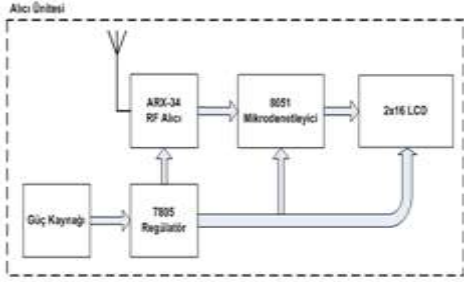
sıcaklık bilgisini ATX-34 RF vericisine göndermektedir.



Şekil 3. Sensörsüz yüksek sıcaklık ölçümü ve RF verici ünitesi

Yüksek Sıcaklık Kablosuz Algılama RF Alıcı Ünitesi

ATX-34 RF vericisi, verileri ARX-34 RF alıcısına 434 Mhz bandında 2400b/sn hızında iletmektedir. RF alıcısının dijital çıkışı, 8051 mikrodenetleyicisine bağlanmıştır. 8051 mikrodenetleyicisi içerisindeki gömülü program RF alıcısından gelen sıcaklık bilgisini mikrodenetleyicinin portuna bağlı olan 2x16 LCD göstergeye aktarmaktadır. Bu ünitenin çalışması için gerekli 5 Voltluk besleme, güç kaynağından gelen 9 Voltluk gerilimin 7805 gerilim regülatörü aracılığıyla 5 Volta düşürülmesiyle elde edilmiştir. Şekil 4'te yüksek sıcaklık kablosuz algılama RF alıcı ünitesinin blok şeması görülmektedir.



Şekil 4. Yüksek sıcaklık kablosuz algılama RF alıcı ünitesi

Bulgular

TMG-450-0.8-1.0 Termoelektrik Güç Üreteç Modülün Elektriksel Karakteristiğinin Çıkarılması İçin Kullanılan Deney Düzenegi

Mevcut termoelektrik modülün elektriksel karakteristiğinin çıkarılması için aşağıdaki Şekil 5'te gösterilen deney düzenegi kurulmuştur. Deney düzeneginde sıcaklık kontrollü elektrikli ısıtıcı, termoelektrik modülün sıcak yüzeyi için gerekli ısı akışını sağlamak için kullanılmıştır. Soğuk yüzey sıcaklığını 25°C 'de sabit tutabilmek için de sabit sıcaklık banyosu kullanılarak sıcak yüzey sıcaklığı yaklaşık 50 °C'den başlayarak orantılı bir şekilde 225 °C'ye artırılarak termoelektrik güç üreticinin çıkışı boşa ve yükte (Optimum yük R_L 21.5Ω) okunmuş ve alınan değerler Çizelge 2'de verilmiştir. Aynı zamanda alınan veriler grafiksel olarak Şekil 6 'da termoelektrik güç üreticinin çıkış potansiyeli boşa ve yükte olmak üzere sıcak yüzey

sıcaklık artışı ile birlikte çizilmiştir.

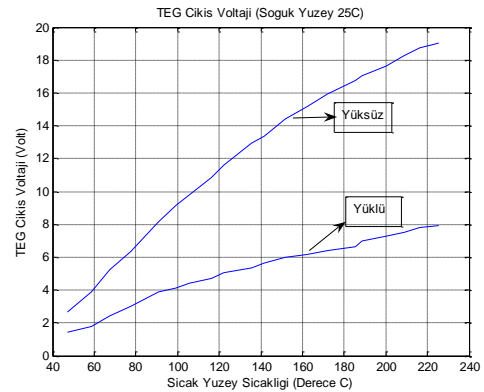


Şekil 5. TMG-450-0.8-1.0 elektriksel karakteristiğinin çıkarılması için kurulan deneysel düzenek

Çizelge 2. TMG-450-0.8-1.0 elektriksel karakteristik değerleri

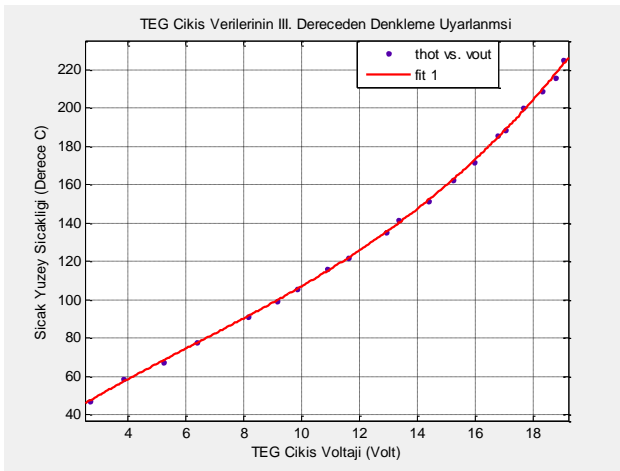
T_h °C (Sıcak Yüzey Sıcaklığı)	T_c °C (Soğuk Yüzey Sıcaklığı)	V_{OC} (Volt) Boşa	V_{Out} (Volt) Yükte $R=21.5\Omega$	T_h-T_c °C (Sıcaklık Farkı)	I_L (miliamper) Yükte Akım
47.0	25.0	2.68	1.28	22.0	0.059535
58.5	25.5	3.86	2.04	33.0	0.094884
66.1	24.0	5.23	2.53	42.1	0.117674
75.5	25.2	6.36	3.01	50.3	0.140000
85.0	24.6	8.13	3.56	60.4	0.165581
97.1	25.0	9.14	4.24	72.1	0.197209
103.2	24.0	9.82	4.61	79.2	0.214419
116.5	25.1	10.87	5.29	91.4	0.246047
124.7	25.6	11.61	5.76	99.1	0.267907
135.9	24.9	12.93	6.23	111.0	0.289767
144.8	24.6	13.35	6.57	120.2	0.305581
153.1	25.7	14.39	6.80	127.4	0.316279
159.1	25.0	15.20	7.06	134.1	0.328372
169.8	25.0	15.95	7.54	144.8	0.350698
179.5	25.5	16.76	7.78	154.0	0.361860
194.0	25.4	17.03	8.14	168.6	0.378605
204.4	25.2	17.64	8.41	179.2	0.391163
211.2	24.2	18.3	8.61	187.0	0.400465
218.2	25.0	18.76	8.71	193.2	0.405116
225.2	25.2	19.03	8.97	200.0	0.417209

Ortalama $T_c = 24.985$ °C



Şekil 6. Termoelektrik güç üreticinin boşa ve yükteki çıkış potansiyeli

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen akım ve gerilim değerleri termoelektrik güç üreticinin modülünü, RF verici modülünü ve 8051 mikrodenetleyici ünitesini elektriksel olarak besleyebilme kabiliyetinde olduğu gözlenmiş ve termoelektrik güç üreticinin çıkışına uygun bir düşüren-yükselten dönüştürücü devresi eklenerek sıcaklık ölçümü kablosuz olarak alıcı üniteye aktarımı sağlanmıştır. Ayrıca sensör kullanmadan termoelektrik güç üreticinin çıkış potansiyeli gözlenerek soğuk yüzey sıcaklığı (Soğuk yüzey sıcaklığı 25°C'de) sabit olduğu kabulü ile MATLAB Curve Fitting Tool kullanılarak elde edilen veriler üçüncü dereceden denklem atanmış ve bu denklem 8051 mikrodenetleyicisi tarafından çözülerek sıcak yüzey sıcaklığı sensörsüz olarak okunmuştur. Deneysel verilerden elde edilen eğri grafiği aşağıda Şekil 7'de verilmiştir. Ayrıca verilere atanan üçüncü dereceden denklemin katsayıları Çizelge 3'te gösterilmiştir.



Şekil 7. Termoelektrik güç üreticinin verileri doğrultusunda elde edilen III. dereceden denklemin grafiği

Çizelge 3. Üçüncü dereceden elde edilen denklem parametreleri

Doğrusal Model Poly3: $f(x) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$

Katsayılar (%95 Doğruluk oranı sınırları):

$a = 0.02243$ (0.01693, 0.02794)

$b = -0.425$ (-0.6094, -0.2406)

$c = 10.55$ (8.699, 12.4)

$d = 21.8$ (16.48, 27.12)

8051 mikrodenetleyicisi kullanılarak üçüncü dereceden denklem çözümü

Termoelektrik güç üreticisi modülünden gelen ve sıcak yüzey ile soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan gerilim, 8 bitlik bir analog dijital dönüştürücü (ADC0808) kullanılarak 8051 mikrodenetleyicisinin verileri işleyebileceği biçime dönüştürülmüştür. Şekil 8'de verilen akış şemasında da görüleceği üzere öncelikle üçüncü derece denklemin çözümünde kullanılacak olan sabitler ve değişkenler tanımlanmıştır. Analog dijital dönüştürücü çevrime başladığı andan itibaren 8051 mikrodenetleyicisinin 0 numaralı portuna gelen sayısal veriler kullanılarak üçüncü dereceden denklemin çözümünde kullanılacak olan x

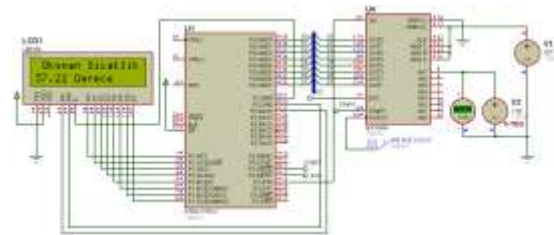
değişkeninin değeri hesaplanmaktadır. Bir sonraki adımda x değişkeni üçüncü dereceden denklemde yerine konularak termoelektrik üreticinin sağlamış olduğu gerilim değeri hesaplanarak RF vericiye gönderilmiştir.



Şekil 8. Mikrodenetleyici yazılımının akış şeması

8051 mikrodenetleyicisi kullanılarak üçüncü dereceden denklem çözümüne ait simülasyon sonuçları

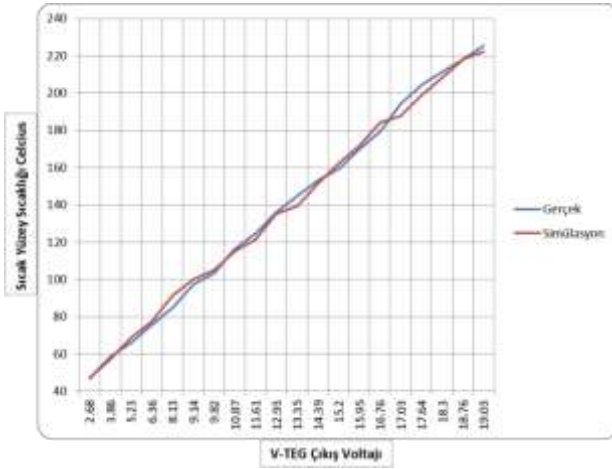
Aşağıda Şekil 9'da açık devre şeması verilen 8051 mikrodenetleyicisi içeren ünite, Şekil 8'de verilen algoritmayı çalıştırmaktadır. Termoelektrik güç üreticinin çıkışında okunan potansiyel aslında üreticinin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklık farkı ile elde edilen ve üçüncü dereceden denklem parametrelerinin 8051 mikrodenetleyicisi ünitesine girilerek denklemin V-TEG değerine göre çözümlenmesi sonucunda okunan potansiyelin sıcaklık olarak LCD ekrana aktarılmasıdır. Simülatördeki V-TEG yüksüz potansiyel değerine karşılık gelen sıcaklık değerleri ile deneysel gerçek değerler Çizelge 4'te karşılaştırılmış ve simülasyon sonucu elde edilen değerlere olan yakınlığı gözlenmiştir. Şekil 10'da simülasyon sonuçları ile gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarını gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 9. Mikrodenetleyici açık devre şeması

Çizelge 4. Gerçek ile Simülasyon sonucu elde edilen sıcaklık değerleri.

V-TEG Çıkış Voltajı	T _h °C Gerçek Değer	T _h °C Simülasyon Değeri	ΔT _h °C Sıcaklık Farkı
2.68	47.0	47.25	0.25
3.86	58.5	57.22	1.28
5.23	66.1	68.60	2.50
6.36	75.5	77.23	1.73
8.13	85.0	91.49	6.49
9.14	97.1	99.85	2.75
9.82	103.2	105.19	1.99
10.87	116.5	114.97	1.53
11.61	124.7	121.64	3.06
12.93	135.9	135.22	0.68
13.35	144.8	139.50	5.30
14.39	153.1	151.31	1.79
15.20	159.1	162.16	3.06
15.95	169.8	171.69	1.89
16.76	179.5	184.21	4.71
17.03	194.0	187.80	6.20
17.64	204.4	199.04	5.36
18.3	211.2	208.31	2.89
18.76	218.2	218.05	0.15
19.03	225.2	222.38	2.82
Ortalama T_c = 24.985 °C		Ortalama ΔT_h = ± 2.8215°C	



Şekil 10. Gerçek sıcaklık değerleri ile simülasyon sonucu okunan değerlerin karşılaştırılması

Sonuç ve Tartışmalar

Çalışma sonucu ortam sıcaklığı sabit kabul edilebilen sistemler için termoelektrik kaynaklı kablosuz ve sensörsüz sıcaklık duyum devresi gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı sabit olmayan sistemler için sıcaklık sensörü kullanılması kaçınılmazdır. Elde edilen deneysel ve simülasyon değerleri karşılaştırıldığında aradaki çok küçük farklılıklar yüksek sıcaklık duyum devreleri için gözardı edilebilecek sınırlar içerisinde olması nedeni ile yapılan çalışma başarı ile tamamlanmıştır. Bundan sonra yapılabilecek çalışma ortam sıcaklığının sabit olmadığı sistemler için 8051 mikrodenetleyicisi yerine uygun bir DSP (Digital Signal

Processing – Sayısal İşaret İşleme) seçilip ortam sıcaklığının okunması ve bu sıcaklık değeri ve V-TEG çıkış potansiyeli arasındaki bağıntının formüle edilerek gerçek zamanlı sinyaller DSP işlemcide işlenerek sıcak yüzey sıcaklık değerinin sensörsüz (yüksek sıcaklık sensörü kullanmaksızın sadece ortam sıcaklığını okuyan bir sensör kullanarak) ölçümü için gerekli devrenin tasarımı üzerinde çalışılacaktır.

Sonuç olarak ileride termoelektrik jeneratörlerin yüksek sıcaklık entegre devreler içerisinde tekil üretimleri ile termoelektrik güç kaynaklı entegre devrelerin üretilmesi önemli bir konu haline geleceği düşünülmektedir. Bu ve benzeri entegre devreler endüstride atıl ısı ihtiva eden sistemlerde kolaylıkla kullanılabilirlerdir. Örneğin bir otomobilin motor bölümünde ki atıl ısı kullanılarak herhangi bir yüksek sıcaklık okuması gerekli ünitelerin radyatör, motor, vb., sıcaklık değerinin kablosuz okunması, yüksek sıcaklık sensörleri ve bunun yanı sıra yüksek sıcaklık besleme kablolarının kullanımını ortadan kaldıracak ve kablolama kolaylığı yanı sıra büyük ekonomik katma değer sağlayacaktır.

Kaynaklar

Gao X., Sunden B., 2000. Detailed Measurements of Heat Transfer Coefficients in a Rectangular Duct Using Hue-Based Calibrated Liquid Crystal. International Communication in Heat and Mass Transfer, 27, 1, 13-22.

Socher E., Bochobza-Degani O., Nemirovsky Y., 2000. Optimal Performance of CMOS Compatible IR Thermoelectric Sensors. IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, 9, 1, 38 – 46.

Patino-Lopez L.D., Dilhaire S., Grauby S., Jorez S., W Claeys., 2001. Study of the Thermal Behaviour of PN Thermoelectric Couples by Laser Probe Interferometric Measurement. XX International Conference on Thermoelectrics, 503-506

Suster M., Ko W.H., Young D.J., 2004. Optically-Powered Wireless Transmitter for High-Temperature MEMS Sensing and Communication. IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, 13, 3, 536 – 541.

Rowe D.M., Min G., 1996. Design Theory of Thermoelectric Modules for Electrical Power Generation. IEEE Proceedings Science Measurement Technology, 143, 6, 351 – 356.

Lineykin S., Ben-Yaakov S., 2007. Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules. IEEE Transactions on Industry Applications, 43, 2, 505 – 512.

Zhang Yingqi., Sen P.C., 2003. A New Soft-Switching Technique for Buck, Boost, and Buck-Boost Converters. IEEE Transactions on Industry Applications, 39, 6, 1775 – 1782.

Küçükkömürler, A., 2009. Thermoelectric Powered High Temperature Wireless Sensing. Journal of Thermal Science and Technology, 4, 1, 63–73.