

Termoelektrik jeneratörler için alçaltan-yükselten çeviricili maksimum güç noktası takibi benzetimi

Simulation of maximum power point tracking with buck-boost convertor for thermoelectric generators

Hayati MAMUR^{1*}, Yusuf ÇOBAN²

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye.
hayati.mamur@cbu.edu.tr

²Elektronik Haberleşme ve Elektrik Bölümü, Hava Astsubay Meslek Yüksekokulu, MSÜ, İzmir, Türkiye.
ycoban@tekok.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 29.04.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 01.11.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 10.07.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.92488
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Enerji çevrim verimliliği %10'lara kadar çıkabilen endüstriyel Termoelektrik Jeneratörler (TEJ) atık ısılarından elektrik enerjisi elde ediniminde kullanılarak enerji verimliliğine katkıda bulunurlar. TEJ iç direnci ile yük direncinin eşit olmaması verim değerini oldukça düşürür. İç direnç ile yük direnci arasındaki dengesizliğin ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi için Maksimum Güç Noktası İzleyici (MGNİ) algoritmaları kullanılır. Bu çalışmada, iç direnç ile yük direnci arasındaki eşitliği sağlamak için Karıştır ve Gözlemlen (K&G) metodu temelinde MGNİ algoritması, alçaltan-yükselten çevirici kullanılarak MATLAB/Simulink ile modellenmiştir. İlk olarak, Seebeck sabitine ve sıcaklık farkına bağlı olarak bir TEJ modellemesi yapılmıştır. Bu modellemede, seri ve paralel bağlanacak TEJ'ler belirlendikten sonra, TEJ modelinin çıkışına doğrudan değişken yük direnci bağlanmıştır. Yük direnci ve sıcaklık farkı değişim değerleri için çıkış gücü hesaplanmıştır. Bu durumda, MGNİ'siz TEJ'in yük değişimlerinden oldukça etkilendiği tespit edilmiştir. Verim değeri de buna bağlı olarak sürekli salınımlar yapmıştır. Daha sonra, bu sıcaklık farkı değişimi ve değişken yük K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çevirici sistemine uygulanmıştır. Geliştirilen K&G MGNİ algoritmalı TEJ'in yük ve sıcaklık değişimlerine rağmen Maksimum Güç Noktasını (MGN) %98.72 bir doğrulukla izlediği görülmüş ve TEJ en yüksek verimlilikle her koşulda çalıştırılmıştır. Geliştirilen bu K&G MGNİ algoritması ile kontrol edilen, alçaltan-yükselten çeviricili bir TEJ sisteminin modeli sayesinde tasarımcılar için yalnızca Seebeck sabitinin ve seri-paralel bağlı TEJ sayılarının girilmesinin yeterli olacağı bir benzetim çalışması sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: TEJ, K&G, MGNİ, Atık ısı, Yenilenebilir enerji

Abstract

Industrial Thermoelectric Generators (TEGs) with up to 10% energy conversion efficiency contribute to energy efficiency by using electrical energy to obtain heat from waste heat. The TEG internal resistance and the unequal load resistance considerably reduce the efficiency. Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms are used to eliminate or minimize the imbalance between internal resistance and load resistance. In this study, the MPPT algorithm was modeled with MATLAB/Simulink by using the buck-boost converter to ensure the matching between internal resistance and load resistance based on Perturb and Observe (P&O). First, a TEG modeling was performed based on the Seebeck constant and temperature difference. In this modeling, after determining the TEGs to be connected in series and parallel, the variable load resistance was directly connected to the output of the TEG model. The output power of the TEG is calculated for the load resistance and the temperature difference values. In this case, it was determined that TEG without MPPT was highly affected by the load changes. The efficiency value is therefore continuously oscillating. Subsequently, this temperature difference change and the variable load were applied to the TEG system buck-boost converter with P&O MPPT. The TEG system with P&O MPPT algorithm was observed to track the Maximum Power Point (MPP) with an accuracy of 98.72% despite load and temperature changes. Thanks to the developed TEG system modeling of the P&O MPPT buck-boost converter, a simulation study is provided for the designers who will design the TEG system only to enter the Seebeck constant, series-parallel connected TEG numbers.

Keywords: TEG, P&O, MPPT, Waste heat, Renewable energy

1 Giriş

Son yıllarda, yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) ile elektrik enerjisinin elde edilmesi oldukça yaygın çalışma alanlarından biri olmuştur. Devletler de elektrik enerjisi üretim çeşitliliğini arttırmak için bu alana büyük destekler sağlamıştır [1]. Güneş, rüzgâr, hidro ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen büyük güçlü elektrik enerjisi şebeke sistemine doğrudan verilmekteyken, küçük güçlü YEK elektrik enerjisi üretimi ise genelde şebekeden bağımsız olarak çalıştırılmaktadır [2].

Termoelektrik Jeneratörler (TEJ) atık ısıları elektrik enerjisine çeviren küçük güçlü YEK elektrik enerjisi kaynaklarıdır [3]. Elektrik enerjisi üretimi için zor çevre şartlarında, konutlardaki

sobalardan [4] arabaların egzoz çıkışlarına [5] kadar pek çok kullanım alanı bulmuştur [6]. Güvenilirlikleri ve kararlı çalışmaları sayesinde geleneksel kaynaklara göre küçük enerji ihtiyaçlarının karşılanması için tercih edilirler. Bunlar yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarıiletken malzemeden yapılırlar [7]. TEJ'lerde üretilen gerilimin artırılması için p ve n tipi termoelement (TE) yarıiletkenler elektriksel olarak seri bağlanırlar. Ayrıca, termal iletkenliğin yüksek olması için iki seramik plaka arasında bu TE yarıiletken çiftler yerleştirilirler [8]. Hareketli parçalarının olmaması, sessiz çalışmaları, uzun ömürlü olmaları gibi avantajları vardır. Elektrik enerjisi üretimi için kullanılan endüstriyel TEJ'lerin verimlerinin %10'a kadar çıkabilmesi ve pahalı olmaları da dezavantajlarıdır [9]. Verimleri düşük olmasına rağmen atık ısılarından elektrik enerjisi kazanımı

*Yazışılan yazar/Corresponding author

dikkate alındığında bu verim değeri enerji verimliliğini arttırdığı için oldukça önemlidir [10],[11].

TEJ'lerden elde edilen elektrik enerjisi verimini etkileyen faktörlerden biri TEJ iç direnci ile bağlanan yükün empedans dengesizliğidir [12]. Bunun ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi için çeşitli maksimum güç noktası izleyici (MGNİ) algoritmaları, genelde fotovoltaik panellerde kullanılanlardan uyarlanarak geliştirilmiştir [13]. Artımsal endüktans [14], açık devre [15], kısa devre [16],[17], karıştır ve gözlemler (K&G) [18]-[19], parabolik extrapolasyon [20] gibi algoritmalar bunlardan bazılarıdır.

TEJ sistemlerinin güç iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar kurulan sisteme bağlı olarak en iyinin yakalanması açısından devam etmektedir. Park ve diğ. [21] TEJ sisteminin sıcaklık değerinin bilinmesi ile bir MGNİ algoritması önermişlerdir. Onların önerisinde kesintisiz bir şekilde TEJ'den enerji alınması vardır ve maksimum güç noktasını (MGN) büyük bir doğrulukla takip etmişlerdir. Diğer bir çalışmada, TEJ'ler için K&G algoritması ve uç kontrol arayışı MGNİ algoritmalarının karşılaştırmasını MATLAB/Simulink yazılımıyla Phillip ve diğ. [22] gerçekleştirmişlerdir. Bunun sonucunda uç kontrol arayışı algoritması ile daha hızlı tepki almışlardır. Başka bir çalışmada Yamada ve diğ. [23] bir algılayıcı kullanan MGNİ algoritması önermişlerdir. Çalışmalarını TEJ'in akım karakteristiklerini dikkate alarak tasarlamışlardır. Zhang ve Chau [24] TEJ-fotovoltaik (FV) hibrit sistemini bir otomobilde denemişler ve güç iyileştirmesi için geliştirilmiş K&G MGNİ algoritması kullanmışlardır. Bununla elde ettikleri verimin %17'lere kadar iyileşmesini sağlamışlardır. Yu ve Chau [25] TEJ'leri atık ısı kazanımı için K&G tekniğini FV panellerden uyarlayarak otomobillerin egzoz sisteminde kullanmışlar ve yaklaşık %22'lik bir güç iyileşmesi sağlamışlardır. Tsai ve Lin [26] ise termoelektrik modülleri hem TEJ olarak hem de termoelektrik soğutucu olarak MATLAB/Simulink ile modellemişler ve verim değerlerini tespit etmişlerdir. FV panellerin ısınan yüzeyinin de elektrik enerjisine çevrilmesi ve sistem performansının artırılması için Zhang ve Xuan [27] FV-TEJ sistemi tasarlamışlardır.

Literatürde çalışılan TEJ K&G MGNİ teknikleri dikkate alındığında, hem TEJ modellemesinin Seebeck sabiti, seri ve paralel bağlı TEJ verileri ile hem de K&G MGNİ algoritmaları alçaltan-yükselten bir çevirici ile MATLAB/Simulink yazılımı vasıtasıyla detaylı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışma ile ilk olarak TEJ'lerin modellemesi Seebeck sabiti, seri ve paralel TEJ sayıları dikkate alınarak yapılmıştır. Bu modelleme ile değişken sıcaklık ve yük değerlerinde TEJ'in çıkış değerleri alınmıştır. Daha sonra bu model MGNİ algoritmasının yapılması için K&G temelinde alçaltan-yükselten bir çevirici ile birleştirilmiş ve değişken yükün verim üzerindeki etkisi en aza indirilerek verimin yükseltilmesi sağlanmıştır. Bunlara ek olarak, bu model hem MGNİ'siz hem de MGNİ'li çalıştırılarak TEJ modelinin sıcaklık ve yük değişimlerine verdiği tepkiler benzetim çalışmalarıyla belirlenmiştir.

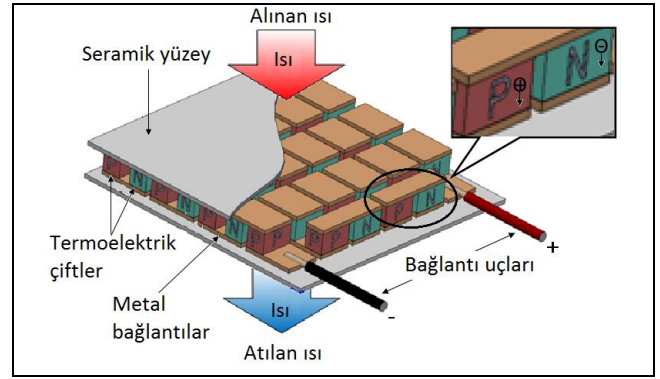
Bu bağlamda, gerçekleştirilen çalışmanın birinci bölümünde bir giriş yapıldıktan sonra, ikinci bölümde TEJ, alçaltan-yükselten çevirici ve K&G MGNİ algoritmasının materyalleri verilmiştir. Üçüncü bölümde de bu materyaller kullanılarak MATLAB/Simulink modelleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki bölümde de modellerden elde edilen çıktılar sunulmuştur. Beşinci bölümde ise çıktılar bölümünden elde edilen veriler yorumlanmıştır. Son olarak da sonuçlar verilmiştir.

2 Materyal

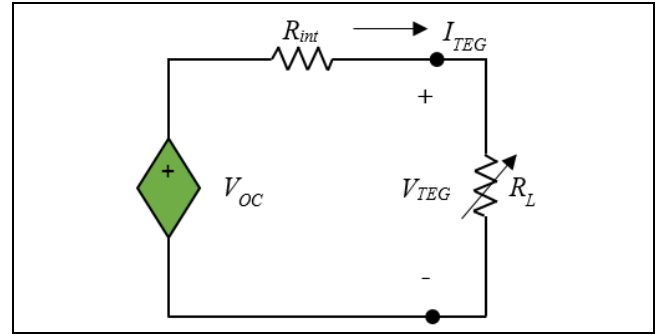
Bu bölümde, modelleme için kullanılacak TEJ ve eşitlikleri, alçaltan-yükselten çevirici ve K&G MGNİ algoritması materyalleri detayları ile sunulmuştur.

2.1 TEJ ve eşitlikleri

TEJ'ler yarıiletken, küçük güçlü, verimleri düşük olan cihazlardır. Çok sayıda p ve n tip TE çiftlerin birleşiminden oluşur. Elektron ileten n tip ve olukları ileten p tip yarıiletken TE'lerin seri bağlanmasıyla gerilim üretilir. Bu TE'ler termal iletkenliğin artırılması için de seramik plakalar yardımıyla paralel olarak birbirine bağlanırlar. İyi bir TE materyal 100-300 $\mu\text{V}/\text{K}$ arasında Seebeck sabitine sahiptir [28]. Bir TEJ'in yapısı Şekil 1(a)'da ve TEJ'in eşdeğer devresi de Şekil 1(b)'de gösterilmiştir.



(a): Yapısı.



(b): Eşdeğer devresi.

Şekil 1. TEJ.

Figure 1. TEG. (a): Structure. (b): Equivalent circuit.

Bir TEJ yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturulduğunda, ısı akışından elektrik gücü üretir. Isı, sıcak yüzeyden soğuk yüzeye aktıkça, yarıiletken TE'lerdeki elektron ve oluklar soğuk tarafa doğru sürülürler [29]. Bunun sonucunda oluşan açık devre gerilimi sıcaklık farkı ve Seebeck sabiti ile aşağıda verildiği gibi doğru orantılıdır:

$$V_{OC} = \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

Burada, V_{OC} TEJ açık devre gerilimi (V), α Seebeck sabiti (V/K) ve ΔT sıcaklık farkıdır (K). ΔT sıcak ve soğuk yüzey arasındaki farktır ($\Delta T = T_H - T_C$).

TEJ'in verimi sıcaklık farkına doğrudan bağlıdır. Tüm ısı üreticileri gibi TEJ'in verimi de Carnot çevrim verimini ($\Delta T/T_H$) geçemez ve TEJ verimi aşağıdaki gibi tanımlanır [6]:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_H} \cdot \frac{\sqrt{1 + zT} - 1}{\sqrt{1 + zT} + T_C/T_H} \quad (2)$$

Burada, $\Delta T/T_H$ ifadesi Carnot verimi ve zT TEJ'in kalite katsayısıdır. Denklem 2 TEJ verimi hesaplanırken karışık olabilmektedir. Bunun için materyalin ortalama kalite katsayısının kullanılması zT için bir yaklaşım sağlayabilmektedir. Bu durumda materyalin kalite katsayısı aşağıdaki eşitlikle ifade edilir [9]:

$$zT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa} \quad (3)$$

Burada, zT materyalin kalite katsayısı, ρ elektriksel iletkenlik ve κ termal iletkenlik ve T ise sıcaklıktır. Endüstriyel olarak kullanılan TEJ'lerin zT değeri 0.5-0.8 arasındadır. Ayrıca uygulama altındaki bir TEJ'in verimi aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir [16]:

$$\eta = \frac{P}{Q_H} \quad (4)$$

Burada, P TEJ sisteminden alınan elektriksel güç (W) ve Q_H TEJ sistemine verilen ısıdır. Bir TEJ sıcaklığa bağlı bir gerilim kaynağı ve bir iç direnç ile modellenilebilir. Bu durumda TEJ devresinden geçen akım:

$$I_{TEJ} = \frac{V_{OC}}{(R_{int} + R_L)} \quad (5)$$

olacaktır. Burada, I_{TEJ} akım (A), R_{int} iç direnç (Ω) ve R_L yük direncidir (Ω). TEJ tarafından yüke verilen güç ise:

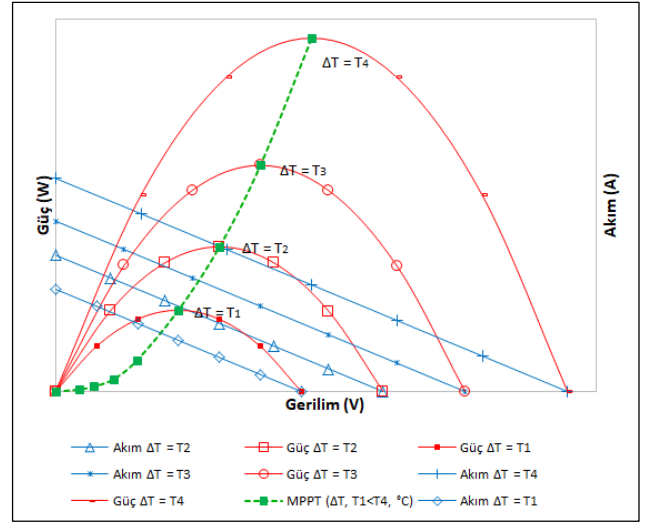
$$P = \frac{V_{OC}^2}{(R_{int} + R_L)^2} \cdot R_L \quad (6)$$

eşitliği ile ifade edilir. Denklem 5'ten TEJ akımının doğrusal olarak değiştiği ve Denklem 6'dan TEJ gücünün parabolik bir eğriye sahip olduğu söylenebilir. Maksimum güç transferi teoremine göre $R_{int} = R_L$ olduğunda TEJ'den maksimum güç alınabilecektir. Bu durumda da Denklem 7'de verildiği gibi MGN açık devre geriliminin ve kısa devre akımının yarısında elde edilebilecektir [30]:

$$V_{MPP} = 0.5 \cdot V_{OC} \quad \text{ve} \quad I_{MPP} = 0.5 \cdot I_{SC} \quad (7)$$

Burada, verilen bir sıcaklık farkı değeri için V_{MPP} gerilim ve I_{MPP} akım için MGN değerleridir. Sıcaklık farkı değiştiğinde bu değerlerde de bir değişim görülecektir. Bu durum Şekil 2'de ifade edilmiştir.

Her sıcaklık farkı değişiminde MGN değerinde kayma olacaktır. Yine MGN değerleri V_{MPP} ve I_{MPP} değişkenlerinin %50'sinde gerçekleşecektir. Sıcaklık farkı az iken MGN akım ve gerilim için düşük, sıcaklık farkı arttığında akım ve gerilim için yüksektir. MGN değerlerinde gerilime bağlı olarak güçteki değişim sıfırdır. Güç eğrisinin sağında kalan bölgelerde gerilime bağlı olarak güçteki değişim negatif iken, solundaki bölgelerde pozitifdir. Eğer TEJ doğrudan yüke bağlanırsa P-V eğrisinin yük direnci ve iç direnç uyumuna göre belirli bir noktada çalışır. Bu nokta TEJ'in en iyi çalışma bölgesi olan MGN olmayabilir. Bununla birlikte, eğer TEJ'in çıkış gerilimi, başka bir deyişle, TEJ tarafından görülen yükün direnci bir güç dönüştürücü kullanılarak kontrol edilebilirse, TEJ her koşulda MGN'de çalışabilir [31].



Şekil 2. Sıcaklık farkının bir fonksiyonu olarak TEJ akım, gerilim, güç ve MGN eğrileri.

Figure 2. The current, voltage, power and MPP curves of TEG as a function of temperature difference.

2.2 Alçaltan-yükselten çevirici

Alçaltan-yükselten çeviriciler YEK'lerle birlikte kullanıldığında güç düzenlemesi yaparak MGN takibine olanak sağlarlar. Bir alçaltan-yükselten çeviricinin TEJ ile birlikte kullanımı Şekil 3a'da gösterilmiştir. Bu alçaltan-yükselten çevirici temelinde bobin, diyot, anahtar ve kondansatörden oluşur. Anahtar kapatıldığında bobin doğrudan kaynağa bağlanır, akım üzerinden akar ve manyetik enerji depolanır. Diyot ters bağlı olduğu için akım diyot üzerinden yüke akmaz. Kondansatör yük akımını sağlar. Anahtar açıldığında bobinin bağlantısı kaynaktan ayrılır. Anahtar yalıtım durumuna geçtiği anda yük durumundan kaynak durumuna geçerek polaritesi değişir. Böylece akım sırasıyla yük ve diyot üzerinden kaynağa döner. Esas itibarıyla, alçaltan-yükselten çeviricideki bobin TEJ'in yüküdür. Bu bobindeki depolanan akımın düzenlenmesiyle TEJ'in yükü programlı yapılmış olur [32]. Bu MGN'li çeviricinin çalışma prensibidir ve Şekil 3b'de verilmiştir.

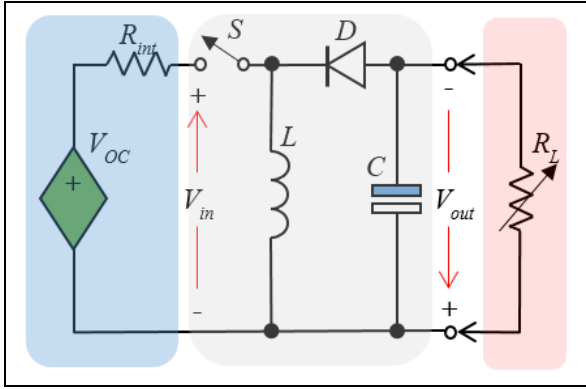
Alçaltan-yükselten çeviricilerde çıkış ve giriş gerilimleri arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi olur:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{D}{(1-D)} \quad (8)$$

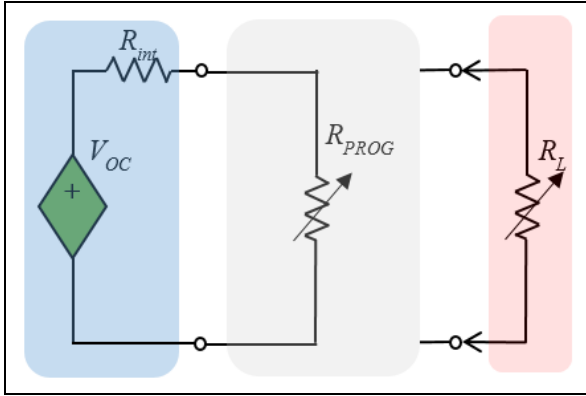
Burada, V_{out} çıkış gerilimi, V_{in} giriş gerilimi ve D anahtarın akım geçirdiği görev zamanıdır. Denklem 8 anahtarın açık ve kapalı olması ile de ifade edilebilir:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{T_{on}}{T_{off}} \quad (9)$$

Burada, T_{on} anahtarın akım geçirmeme zamanı ve T_{off} ise anahtarın akım geçirme zamanıdır. Açma-kapama zamanı ilişkisi nedeniyle bu çeviricide görev zamanı %50'den düşükse çıkış gerilimi düşer, büyükse tersi gerçekleşir. Çıkış gerilimi giriş gerilimi ile daima ters polaritededir. Çeviricideki anahtarın açma-kapama zamanının düzenlenmesiyle TEJ'den maksimum güç alınması sağlanır. Bu maksimum güçte bağlanan yüke aktarılır.



(a): Yapısı.



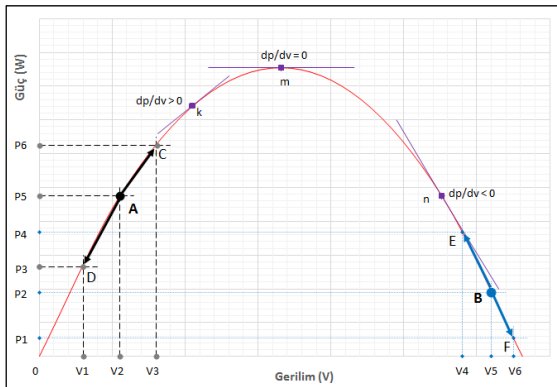
(b): MGNİ prensibi.

Şekil 3. Alçaltan-yükselten çevirici.

Figure 3. Buck-boost converter. (a): Structure. (b): MPPT principle

2.3 MGNİ algoritması

TEJ'i maksimum güç noktasında çalıştırmak için belirli aralıklarla TEJ'in hem akımının hem de geriliminin ölçülmesi gerekir. Ölçülen değerlere bağlı olarak güç değeri hesaplanır ve bir önceki güç değeri ile karşılaştırılır. Eğer son elde edilen güç değeri yüksekse bu değerle çevirici çalıştırılmaya devam edilir [33]. Bu durum bir TEJ'in güç eğrisinde Şekil 4'teki gibi gösterilmiştir. Eğrinin tepe noktasının eğimi sıfırdır veya bir başka ifadeyle gerilime göre güç değişimi sıfırdır. Güç eğrisinin sol tarafında, gerilime göre gücün değişimi pozitif iken sağ tarafında değişimin türevi negatiftir.

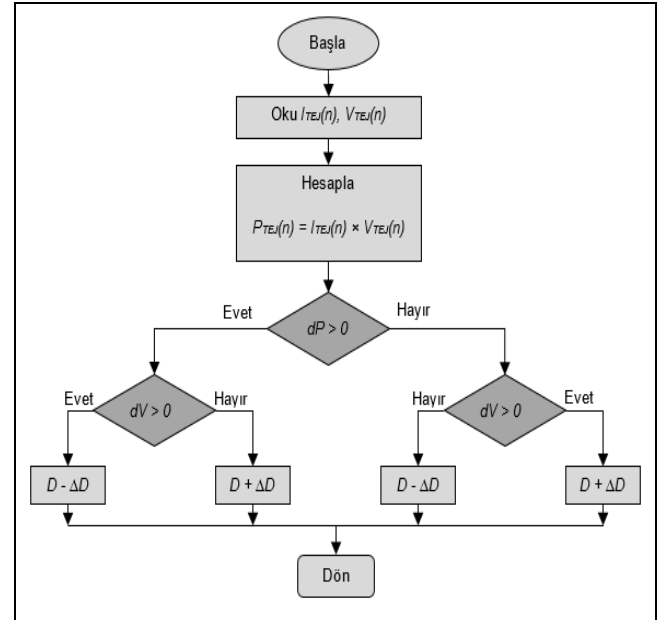


Şekil 4. TEJ gerilim-güç eğrisinde MGNİ.

Figure 4. MPPT on TEG voltage-power curve.

Şekil 4'teki TEJ sisteminin ilk başlatıldığı varsayılınsın ve TEJ'in ölçülen güç değerinin de verilen grafikte A noktasında olduğu düşünölsün. Hedef, maksimum nokta olan değerin yakalanması ve o noktada sistemin çalıştırılmasıdır. A noktasındaki gerilim V2 güç değeri de P5'dir. TEJ sistemine çevirici anahtarının görev zamanının değiştirilmesi ile bir sinyal gönderilir. Bu sinyal de görev zamanının arttırılması yönündedir. Görev zamanının arttırılması gerilim değerinin V2'de V3'e getirilmesini sağlar. Bu durumda güç değeri de P5'den P6 değerine gelecektir. Bu durumda çalışma noktası A'dan C'ye ulaşır. Yeni güç değerinden eski güç değeri çıkarılır. Eğer artış pozitif yönde ise görev zamanının arttırılmasına devam edilir. Başka bir çalışma durumu için A noktasında sistem çalışırken görev zamanı düşürülürse bu gerilimin azalmasını netice verecek, gerilim değeri V2'den V1'e gelecektir. Bu durumda da güç değeri P5'den P3'e gelecek ve sistem A noktasından D noktasına gelerek çalışacaktır. Eski değer ile karşılaştırıldığında güçte bir azalma olacağı için görev zamanı diğer döngüde arttırılacaktır.

Şekil 4'deki TEJ sistemi uçlarına bağlanan yükün değişmesi ile B noktasında çalışıyor olsun. Çeviricideki anahtarın görev zamanı arttırıldığında çıkış gerilimi V5'den V6'ya gelecektir. Bu durumda güç değeri de P2'den P1 değerine gelecek ve sistem F noktasında çalışacaktır. Bu durumda eski güç değeri ile yeni güç değeri arasındaki fark negatiftir. Bu nedenle görev çevrimi azaltılacaktır. Eğer sistem B noktasında çalışırken görev zamanının azaltılması yapılırsa gerilim değeri V5'den V4'e gelir ve azalır. Güç değeri ise P2'den P4'e gelir ve artar. Görev çevriminin azaltılması gerilimin azalmasını ama güç değerinin MGNİ değerine yaklaşmasını sağlar ve görev çevrimi değeri azalma yönünde devam ettirilir. Tüm bu ifade edilenlerle ilgili K&G MGNİ algoritması Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. MGNİ algoritması.

Figure 5. MPPT algorithm.

Sabit karıştırma değeri K&G tekniğindeki küçük karıştırma adımları için izleme yavaş, ancak güç/gerilim salınımları çok azdır. Büyük karıştırma adımı seçildiğinde, artan salınımlar olmasına rağmen daha hızlı MGNİ izlemesi sağlanır.

3 Metot

Bu bölümde bir önceki bölümde tanımlanan materyaller doğrultusunda ilk olarak TEJ'in Seebeck sabiti, soğuk-sıcak sıcaklıkları ve seri bağlı TEJ adedine bağlı olarak MATLAB/Simulink ile TEJ'in açık devre modellemesi verilmiştir. İkinci olarak da çeviricisiz yüklü modellemesi sunulmuştur. Üçüncü olarak gücün artırılması için TEJ'lerin seri-paralel bağlantı modellemesi gösterilmiştir. Son olarak da K&G MGN'li çevirici ile birlikte farklı sıcaklık ve yük değerleri için yüklü modellemesi sunulmuştur.

3.1 MATLAB/Simulink ile TEJ modellemesi

MATLAB/Simulink ile TEJ modellemede TES Termoelektrik Sistemler Ltd. Şti. firmasının üretmiş olduğu Tablo 1'de verilen TEJ'lerin karakteristik değerleri kullanılmıştır.

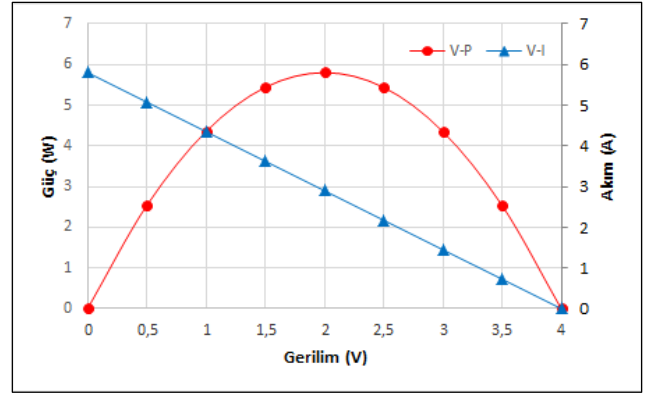
Tablo 1. TEJ karakteristikleri.

Table 1. TEG characteristics.

No	Özellik	Değer
1	Sıcak taraf sıcaklığı $-T_h$	250°C
2	Soğuk taraf sıcaklığı $-T_c$	30°C
3	Açık devre gerilimi $-V_{OC}$	4 ± 0.4 V
4	Kısa devre akımı $-I_{SC}$	5.8 ± 0.6 A
5	En yüksek güçteki ($R_{in} = R_L$) iç direnç	0.7 Ω
6	En yüksek güçteki ($R_{in} = R_L$) çıkış gerilimi	2.0 ± 0.2 V
7	En yüksek güçteki ($R_{in} = R_L$) çıkış akımı	2.9 ± 0.3 A
8	En yüksek güçteki ($R_{in} = R_L$) çıkış gücü	5.8 W
9	Modül ısı akış gücü	165 W
10	Isı akış yoğunluğu	6.6 W/cm ²
11	1000 Hz ve 27°C'de ölçülen AC direnci	0.55 ± 0.05 Ω
12	Verim	%3.5
13	Seebeck sabiti	185 μV/K
14	Kalite katsayısı	2.86 x 10 ⁻³ K ⁻¹
15	ZT	0.8
16	Modül ölçüleri	5×5×3.8 cm
17	TE ölçüleri	2.4×2.4×1.3 mm
18	TE sayısı	254

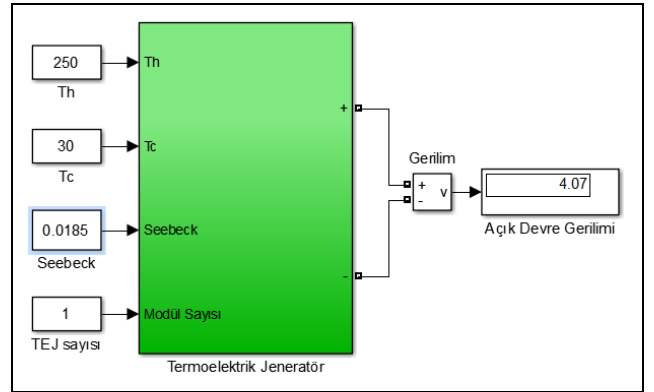
Benzetimi yapılan TEJ en çok 250°C değerine kadar kullanılabilen Bi₂Te₃ yarıiletken TE'lere sahiptir. Bunun 220°C sıcaklık farkındaki maksimum güç değeri 5.8 W'tır ve bu durumdaki verimi de %3.5'tir. Bu sıcaklık farkında maksimum güçteki TEJ iç direnci de 0.7 Ω'dur. Bu TEJ'lerin gerilim-güç ve gerilim-akım grafikleri de Şekil 6'da verilmiştir.

TEJ'ler sıcaklığa bağımlı gerilim kaynağı gibi davranırlar. Sıcaklık farkı ile doğru orantılı çıkış gerilimleri ve güçleri artar. TEJ'in sıcaklığa bağımlı gerilim kaynağı olarak modellemesi Şekil 7'de verilmiştir. TEJ üreticilerinin kataloglarından Seebeck sabiti elde edilir. Kullanılacak TEJ sayısı arzu edilen sistemde gerekli güce göre belirlenir. Bu değerler girilerek açık devre çıkış gerilimi Denklem 1'den hesaplanır. Modeldeki TEJ sayısı seri olarak bağlanacak TEJ'lerin adedini ifade etmektedir. Seri bağlanan TEJ adedine göre iç direnç değeri çarpanı da belirlenir ve girilen sıcak ve soğuk taraf sıcaklıkları ile sıcaklık farkı hesaplanır.

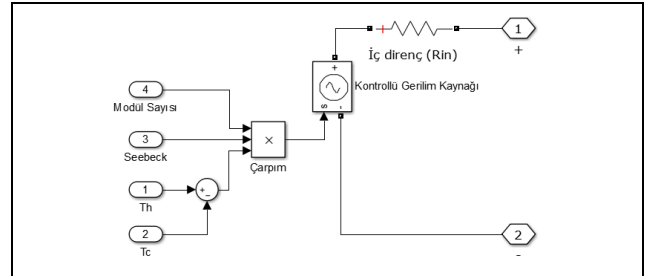


Şekil 6. Modellemesi yapılan TEJ'in 220°C sıcaklık farkı için V-P ve V-I grafiği.

Figure 6. V-P and V-I graph for 220 °C temperature difference of TEG modeled.



(a): Genel yapısı.



(b): İç yapısı.

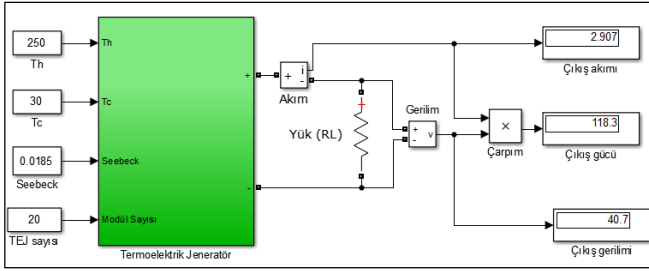
Şekil 7. TEJ'in sıcaklığa bağımlı gerilim kaynağı gösterimi.

Figure 7. Temperature dependent voltage source representation of TEG. (a): General structure. (b): Internal structure.

TEJ sistemine yük bağlandığında TEJ iç direnci ile yük direncinin birbirine eşit olması gerekir ki en yüksek güce ulaşılabilsin. Modellenen TEJ'in iç direnci 0.7 Ω'dur. Bağlanan yükün de bu değerde olması arzu edilir. TEJ geriliminin ve gücünün de artırılması için TEJ'ler seri bağlanır.

3.2 Seri bağlı çoklu TEJ ve yük direnci ile modelleme

TEJ sisteminde gerekli gücün sağlanması için 20 tane TEJ'in seri olarak bağlanıldığı varsayalım. Bu durumda TEJ gerilimi ve gücü de artacaktır. TEJ iç direnci de bağlanan TEJ adedi ile doğrusal olarak yükselir. İç direnç değeri $0.7 \times 20 = 14 \Omega$ olur. Seri bağlı TEJ sayısı artırılmış sistem modeline yük bağlantısı modellemesi Şekil 8'de gösterilmiştir.



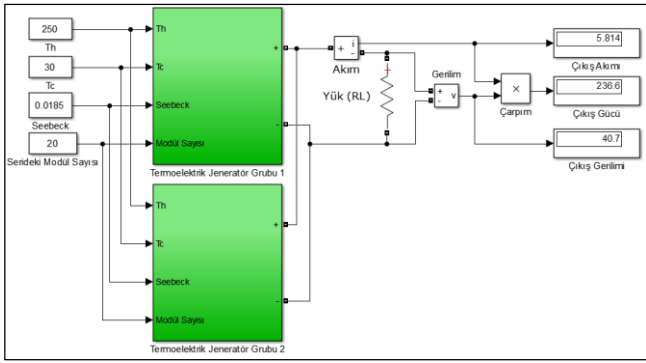
Şekil 8. Seri bağlı TEJ sayısı artırılmış sistem modelinde yük.

Figure 8. Load on the system model with increased serial number of TEGs.

Yukarıda verilen değerlere göre 14Ω iç dirence sahip olan TEJ sisteminin çıkışına da 14Ω değerinde yük bağlanmalıdır ki TEJ sistemi MGN değerinde çalıştırılabilsin.

3.3 Seri-paralel bağlı çoklu TEJ ve yük direnci ile modelleme

TEJ'lerin seri bağlanması ile gerekli güce ulaşamayabilir. Bu durumda da aynı yapıdaki TEJ sistemi paralel bağlanmalıdır. Bu tür bir modelleme Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Seri ve paralel bağlı TEJ sistem modeli.

Figure 9. Serial and parallel connected TEG system model.

Bu bağlantı ile TEJ sisteminin akım değeri iki katına çıkarılırken paralel bağlamadan dolayı da gerilim değeri sabit

tutulmaktadır. Bu modellemede grup 1'de 20 tane TEJ seri bağlıdır. Grup 2'de 20 tane seri bağlı olan TEJ bir önceki seriyeye paralel bağlanarak sistemde 40 tane TEJ kullanılmaktadır. Bu bağlantıda maksimum gücün TEJ sisteminden alınması için $(20 \times 0.7) / 2 = 7 \Omega$ 'luk yük TEJ sistemi çıkışına bağlanmalıdır. Bu yük değerinin dışındaki değerlerde TEJ sisteminden maksimum güç alınmaz.

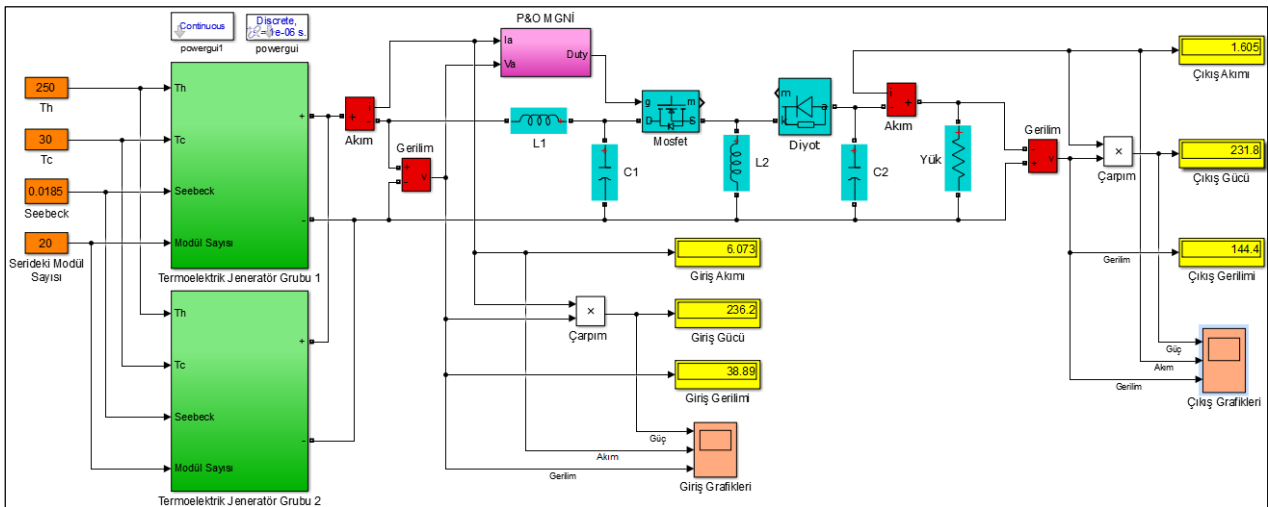
3.4 TEJ sisteminin alçaltan-yükselten çevirici ile modellemesi

TEJ sistemine bağlanılan yükün sürekli olarak aynı değerde olması beklenemez. Değişken yüklerin bu TEJ sistemine bağlanması kaçınılmazdır. Bu durumda iç direnç yük direnci eşit olmayacak, empedans dengesizliği yaşanacaktır.

Bu nedenle çevirici sistemleri hem güç düzenlemesi hem de MGN için TEJ sistemine bağlanır. Burada K&G MGNİ alçaltan-yükselten çevirici TEJ sistemine bağlanarak modelleme yapılmıştır. Bu modelleme Şekil 10'da gösterilmiştir. Modellemede kullanılan bobinler $L1 = 1 \text{ mH}$ ve $L2 = 83 \mu\text{H}$ değerinde olup, kondansatörler $C1 = C2 = 22 \text{ mF}$ değerindedir. Anahtarlama frekansı ise 10 kHz 'dir.

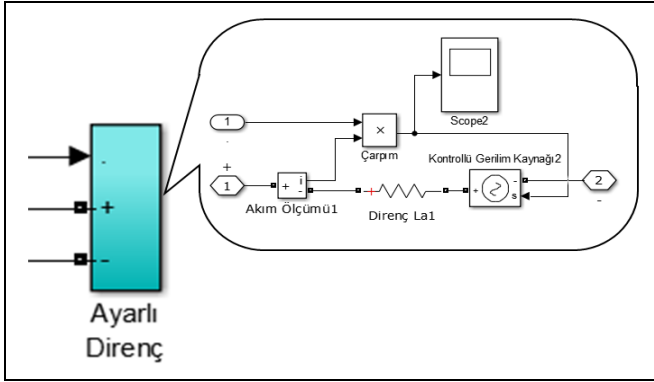
Şekil 10'da K&G MGNİ algoritması ile mosfetin açma kapama zamanı ayarlanmıştır. Sistemde çeviricinin girişini oluşturan TEJ sisteminin çıkışına ait akım, gerilim ve güç değerleri alınmıştır. Ayrıca çıkışta MGN tabibinin yapılıp yapılmadığını görmek için çıkış ölçü aletleri konulmuştur. K&G MGNİ alçaltan-yükselten çeviricinin çıkışına da sistem tepkisini ölçmek için ayarlı bir direnç bağlanmıştır. Ayarlı direnç olarak sisteme ilk olarak 0.3 sn . için 30Ω daha sonra da kalan zaman için 90Ω bağlanmıştır. TEJ sistemlerinde sıcaklık farkı her durumda sabit değildir ve sürekli olarak değişim gösterir. Önerilen sistem modelinin sıcaklık değişimlerine tepkisini ölçmek için sistemin TH girişine değişken sıcaklık uygulanmıştır. Burada TC tarafı sabit tutularak adım zamanının 0.3 'ü için TH tarafına 100°C daha sonra kalan zaman için de 250°C uygulanarak sistem cevabı ölçülmüştür. Bu ayarlı direnç ve sıcaklık farkı modellemeleri de Şekil 11'de verilmiştir.

Sıcaklık farkı değişimi gerçekte ani olmaz. Burada, TEJ sistemi içerisinde bulunan K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çeviricinin tepkisini ölçmek için ani sıcaklık değişimi adım fonksiyonu ile sisteme uygulanmıştır.

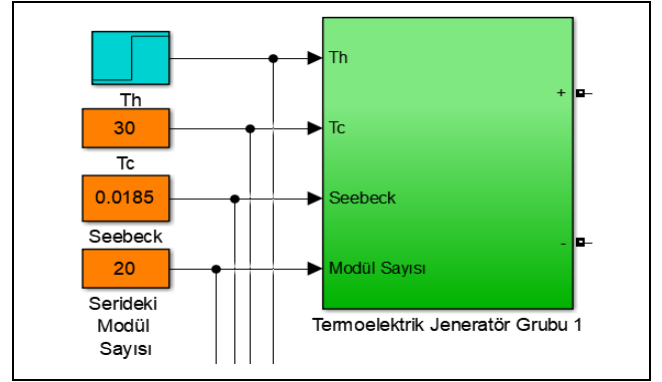


Şekil 10. TEJ sistemi ve K&G MGNİ alçaltan-yükselten çevirici modeli.

Figure 10. TEG system and P&O MPPT buck-boost converter model.



(a): Ayarlı direnç modellemesi.



(b): Sıcaklık farkı modellemesi.

Şekil 11. TEJ sistemi.

Figure 11. TEG system. (a): Adjustable resistance modeling. (b): Temperature difference modeling.

4 Çıktılar

Bu bölümde TEJ'in K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çevirici kullanılmaksızın ve kullanılarak gerçekleştirilen MATLAB/Simulink modelleme çıktıları sunulmuştur.

4.1 TEJ K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çevirici kullanılmaksızın çıktıları

TEJ sisteminde 40 tane TEJ kullanılmıştır ve bunun yük modellemeleri yapılmıştır. Bunların 20 tanesi kendi arasında seri bağlıdır. Bu 20 tane seri bağlı TEJ sisteminden grup 1 ve grup 2 isminde Şekil 9 gösterildiği gibi iki tane kullanılmıştır. Her bir TEJ'in iç direnci 0.7Ω 'dır. TEJ sisteminin toplam iç direnci ise 7Ω 'dır. Dolayısıyla maksimum gücün alınması bu değerde gerçekleşmiştir. 220°C sıcaklık farkı sabit tutulmak koşuluyla ayarlı yük direnci değerlerinde elde edilen çıkış güçleri Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 1'de verilen katalog bilgilerinde açık devre gerilimi $4 \pm 0.4 \text{ V}$ ve kısa devre akımı $5.8 \pm 0.6 \text{ A}$ 'dir. Bu toleranslar dikkate alındığında bir modülün modelleme sonucundaki açık devre gerilimi 4.07 V bulunmuştur. Kısa devre akımı da 5.8 A elde edilmiştir. Bunlar değerlendirildiğinde bir modülün gücü $4.07 \times 5.8 / 4 = 5.9015 \text{ W}$ 'tır. 40 tane modül bağlandığında elde edilebilecek MGN değeri $40 \times 5.9015 = 236.06 \text{ W}$ modelleme sonucunda tespit edilmiştir.

Bu TEJ sisteminde değişken yalnızca TEJ sistemine bağlanan yük değildir. Bunun yanı sıra TEJ sistem girişini oluşturan sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları da değişir. Dolayısı ile sıcaklık farkı da değişir. Sıcaklık farkı değişimine bağlı olarak çıkıştan alınacak güç değişimleri belirlenmiş ve bunun sonuçları da Tablo 3'te gösterilmiştir. Soğuk yüzey sıcaklığı 30°C 'de sabit tutularak sıcak yüzey sıcaklığı en yüksek sıcaklık değeri olan 250°C değerine kadar çıkarılmıştır. Yük direnci ise en yüksek gücün alınabileceği TEJ sisteminin toplam iç direnci olan 7Ω değerinde sabit tutulmuştur.

4.2 TEJ K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çevirici çıktıları

TEJ sistemi olarak iki gruptan oluşan 40 TEJ içeren sistem kullanılmıştır. Elde edilen modelleme sonuçları Şekil 10'daki sistem ile alınmıştır. K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çevirici kullanılmaksızın gerçekleştirilen sistem ile karşılaştırma kolaylığı sağlamak için ilk olarak ayarlı direnç değerlerine göre sistem çıkışı alınmış ve buradaki direnç değerleri de aynı tutulmuştur. Sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları da en iyi değer için sabit olarak ayarlanmıştır. Sıcaklık farkı 220°C 'dir. Burada

sistemin girişine ait akım, gerilim ve güç değişkenlerinin yanı sıra çıkış değerleri de kaydedilmiştir. Böylelikle MGNİ değerini sistem algoritmasının ne kadar bir yakınlıkla izleyebildiği hesaplanabilmektedir. MGNİ yüzde değerleri de tüm değerlerle birlikte Tablo 4'te verilmiştir.

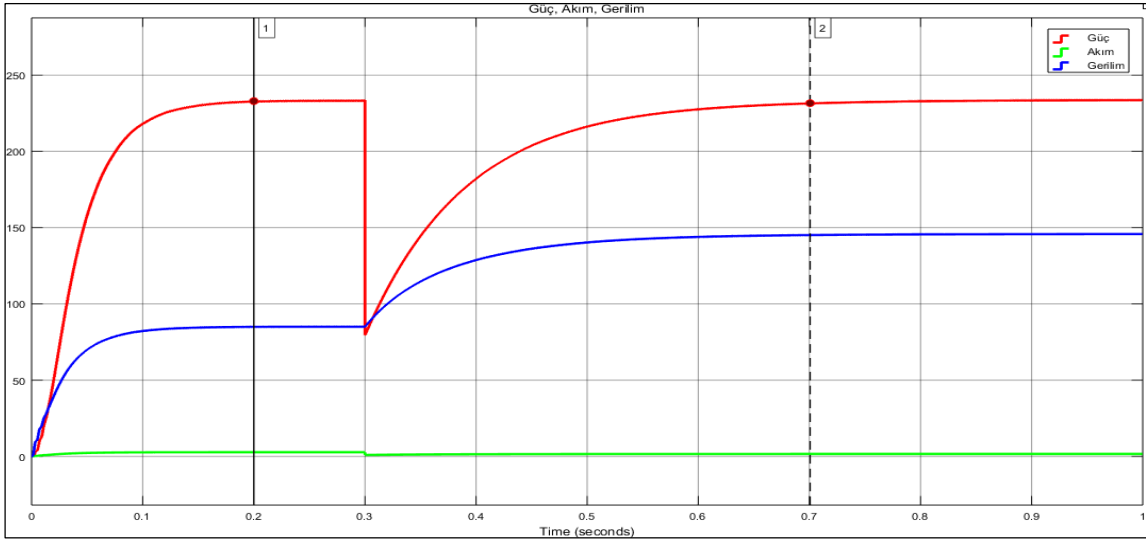
K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çeviricili TEJ sisteminin sıcaklık değişimlerine verdiği tepkinin alınması için sıcak yüzey sıcaklığı 50°C 'den başlayın en yüksek sıcaklık değerine kadar artırılmış ve bu değerler Tablo 5'te gösterilmiştir. Bu değerler TEJ iç direnci ile çeviricinin çıkışına bağlanan direnç değerleri eşitlenerek yapılmıştır. Burada sıcaklık farkı arttıkça giriş gücünün çıkışa verimli bir şekilde aktarılabilirliği görülmektedir. Örneğin; sıcaklık farkı 220°C olduğunda giriş gücünün MGNİ sayesinde %98.14'ü çıkışa aktarılabilmiştir.

TEJ sisteminin K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çeviricinin MGN değerini yakalama tepkisinin ölçülmesi için sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları 30°C ve 250°C 'de tutularak bağlanan ayarlı direncin değerleri değiştirilmiştir. Modelleme için benzetim süresi 1 sn. seçilmiştir. Bunun 0.3 sn. zamanına kadar direnç değeri en yüksek MGNİ yüzdesi değerinin elde edildiği 30Ω 'a daha sonra kalan süre de 90Ω değerine ayarlanmıştır. Girilen değerlere bağlı olarak sistemin cevabı Şekil 12'de sunulmuştur.

TEJ sistem modellemesinin K&G MPPT'li alçaltan-yükselten çeviricisi ile birlikte sıcaklık değişimlerine tepkisinin görülmesi için soğuk taraf sıcaklığı 30°C 'de sabit tutulmuş ve sıcak taraf sıcaklığına 0.3 sn. kadar 130°C 0.3-1 sn. aralığında da 250°C sıcaklık uygulanmıştır. Bu durumda çevirinin çıkışına bağlanan yük değeri de 7Ω 'da sabit tutulmuştur. Bunun sonucunda TEJ sistem modellemesinin çıkışı Şekil 13'de verilmiştir. 7Ω sabit yük değerindeyken görev çevrimi çıkışı Şekil 14'te verilmiştir.

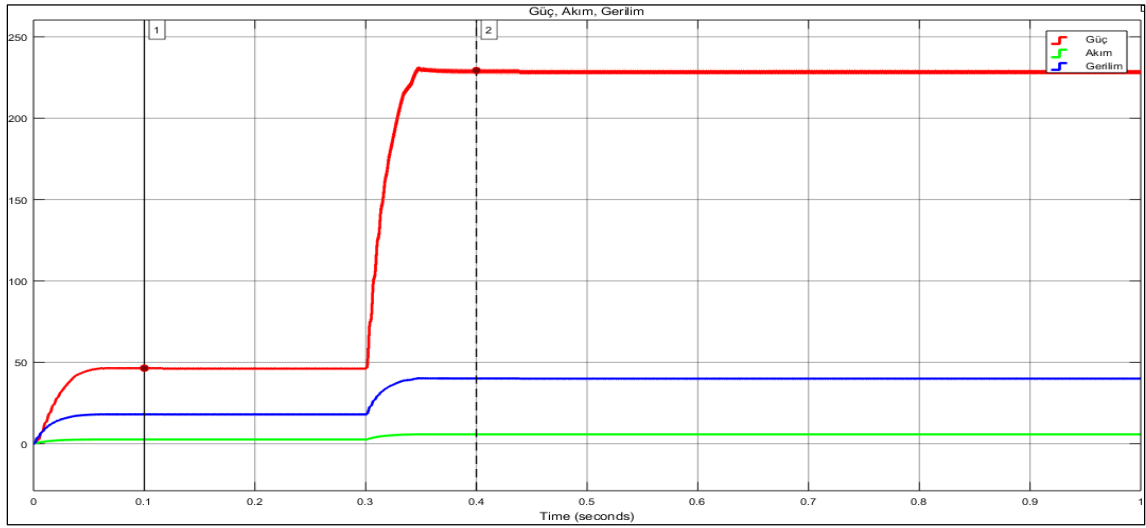
5 Tartışma

Elde edilen sonuçlar TEJ sistemlerinin çıkışına doğrudan yük bağlantısının zaten düşük olan TEJ verimini daha da düşürdüğünü göstermiştir. Modelleme yapılan TEJ'ler en yüksek 250°C değerine kadar kullanılabilirlerdir. Tablo 2'deki verilere göre 220°C sıcaklık farkında TEJ sistemine doğrudan bağlanan yükün iç direnci TEJ sistemi iç direncine eşit olduğunda en yüksek güç değeri, beklenildiği gibi, elde edilmiştir. 7Ω iç direncinin aşağısında ve yukarısındaki değerlerde elde edilen güç değeri, tipik güç karakter özelliklerinde ifade edildiği gibi azalmıştır. MGN değerine yaklaştıkça elde edilen maksimum güçteki değişim azalmıştır.



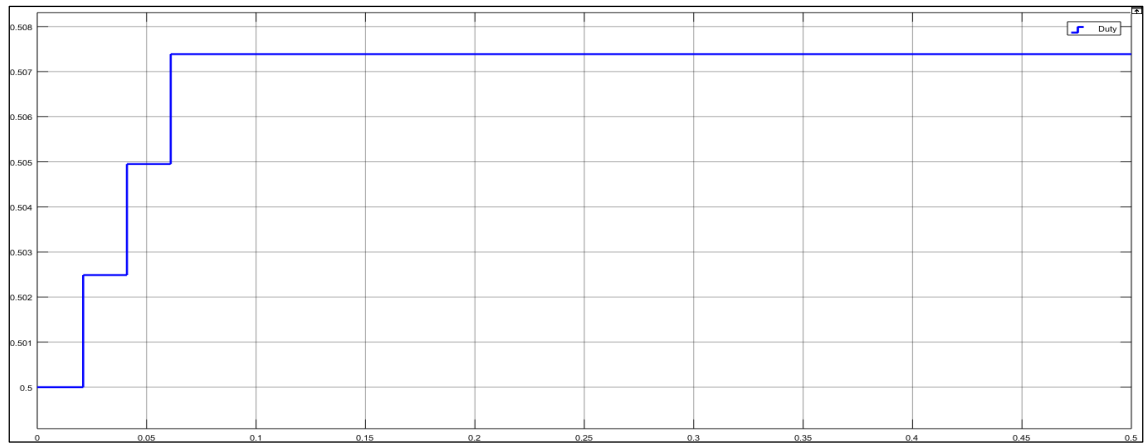
Şekil 12. K&G MGNİ alçaltan-yükselten çeviricinin yük direnci değişimine tepkisi.

Figure 12. Response of P&O MPPT buck-boost converter to load resistance change.



Şekil 13. K&G MGNİ alçaltan-yükselten çeviricinin sıcaklık farkı değişimine tepkisi.

Figure 13. Response of P&O MPPT buck-boost converter to temperature difference change.



Şekil 14. 7 Ω yük değerindeyken görev çevrimi.

Figure 14. Duty cycle for a load of 7 Ω.

Tablo 2. TEJ sistemine doğrudan yük direnci bağlandığında farklı yük dirençlerinde elde edilen sonuçlar.

Table 2. Results obtained with different load resistors when the load resistor is connected directly to the TEG system.

Yüzey sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω)	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
T_h	T_c	R_L	I_{TEG}	V_{TEG}	P_{TEG}
250	30	1	10.9	10.2	111.18
		5	6.8	33.9	230.52
		7	5.8	40.7	236.06
		9	5.1	45.8	233.58
		15	3.7	55.5	205.35
		30	2.2	66.0	145.2
		90	0.8	75.5	60.4

Tablo 3: TEJ sistemine doğrudan yük direnci bağlandığında değişken sıcaklıklarda elde edilen sonuçlar.

Table 3. Results obtained at variable temperatures when load resistance is directly connected to the TEG system.

Yüzey sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω)	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
T_h	T_c	R_L	I_{TEG}	V_{TEG}	P_{TEG}
50	30	7	0.5	3.7	1.85
75			1.2	8.3	9.96
100			1.9	13.0	24.7
130			2.7	18.5	49.95
150			3.2	22.2	71.04
200			4.5	31.5	141.75
250			5.8	40.7	236.06

Tablo 4. Değişken yük bağlandığında TEJ K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çevirici giriş ve çıkışları.

Table 4. Buck-boost converter inputs and outputs with TEG P&O MPPT when variable load is connected.

Yüzey sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω)	Akım (A)		Gerilim (V)		Güç (W)		MGNİ (%)
T_h	T_c	R_L	I		V		P		
			Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	
250	30	1	10.17	9.89	10.18	9.89	103.6	97.81	94.41
		5	6.944	6.677	32.79	33.39	227.7	222.9	97.89
		7	6.063	5.755	38.96	40.28	236.2	231.8	98.13
		9	6.041	5.079	39.11	45.71	236.2	232.2	98.30
		15	6.093	3.938	38.75	59.07	236.1	232.6	98.51
		30	6.090	2.788	38.77	83.63	236.1	233.1	98.72
		90	6.073	1.605	38.89	144.4	236.2	231.8	98.13

Tablo 5. Değişken sıcaklıklarda TEJ K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çevirici giriş ve çıktları.

Table 5. Buck-boost converter inputs and outputs with TEG P&O MPPT with variable temperature.

Yüzey sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω)	Akım (A)		Gerilim (V)		Güç (W)		MGNİ (%)
T_h	T_c	R_L	I		V		P		
			Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	
50	30	7	0.556	0.474	3.505	3.317	1.95	1.572	80.62
75			1.236	1.133	7.998	7.931	9.886	8.986	90.90
100			1.944	1.792	12.29	12.54	23.9	22.48	94.06
130			2.786	2.583	17.5	18.08	48.75	46.72	95.84
150			3.332	3.112	21.07	21.78	70.22	67.79	96.54
200			4.698	4.433	30.02	31.03	141.0	137.6	97.59
250			6.063	5.755	38.96	40.28	236.2	231.8	98.14

Tablo 3'te en yüksek gücün elde edildiği 7 Ω yük değeri sabit tutulmuştur. Sonuçlara dikkat edildiğinde sıcaklık farkının çıkış gücünde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Jeotermal kaynakların olduğu bölgelerde çıkan sıcak suların değerleri 150°C civarlarında olmaktadır. Hatta bundan daha düşük sıcaklık değerleri vardır. Bu modellenen sistem bu gibi yerlerde K&G MGNİ'li bir çevirici sistemi olmadan kullanıldığında sistem çıkışı oldukça düşmektedir. Ayrıca atık ısılardan bulunduğu yerlerde de sıcaklık değerleri bu civardadır. Bu sistemin K&G MGNİ'li bir çeviricisiz kullanımı çok büyük verim kaybına neden olmaktadır. Öte yandan arabaların egzozlarından çıkan

gazların sıcaklığı 700°C civarındadır. Çevre sıcaklığının da 40°C dolayında olduğu düşünüldüğünde çok yüksek sıcaklık farkı elde edilebilecektir. Burada da TEJ üreticilerinin verdiği TEJ'lerin kullanım sıcaklıkları yüksek olması gerekmektedir. Fakat bu tür TEJ'ler de pahalıdır.

Tablo 4'teki değişken yük bağlandığında TEJ K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çevirici giriş ve çıkışlarına dikkat edildiğinde hemen hemen giriş gücü ile çıkış gücü eşitlenmiş ve MGN değeri TEJ sistemi çalıştırılabilmiştir. Örneğin; TEJ grubuna doğrudan bağlanılan 90 Ω'luk yüke 60.4 W güç verilirken, MGNİ'li sistemde bu değer 231.8 W'a çıkmıştır.

Burada güç değerinde önemli bir artış vardır. MGNİ'li sistemin performansı dorudan bağlantıya göre yüksek yük direnci değerlerinde daha iyi olduğu gözlenmiştir. 30 Ω yük direncinde en yüksek güç iletimi MGN değeri %98.72 olarak gerçekleşmiştir.

Sıcaklık farkı değiştirildiğinde, küçük sıcaklık farklarında MGNİ değerinin daha düşük olduğu Tablo 5'den hesaplanmıştır. 20°C sıcaklık farkında MGNİ değeri %80.62'de iken en yüksek sıcaklık farkında bu değer %98.14'ye çıkmıştır. Dolayısıyla sıcaklık farkı yüksek olan yerlerde bu tür sistemlerin kullanımı daha uygun olmaktadır. Zaten sıcaklık farkı artışıyla birlikte TEJ sisteminin güç değeri de artmaktadır.

Şekil 12'ye göre, yük direncinin 30 Ω'dan 90 Ω'a çıkarıldığı durumda, K&G MGNİ algoritmasının tepkisi yaklaşık 0.4 sn.' de gerçekleşikten sonra sistemden kararlı güç çekilmeye başlanmıştır. İlk başta 30 Ω değerinde sistemden kararlı güç çekilmesi 0.15 sn. içerisinde gerçekleşmiştir. Yükün direnç değerleri büyüdükçe sistemin kararlı güç değerine ulaşma süresi artmıştır.

Yük direnci sabit tutulup sıcaklık farkı değiştirildiğinde sistemden kararlı güç çekilmesi yük değişimlerine göre daha kısa bir sürede olmuştur. Bu durum Şekil 13'te gösterilmiştir. Güç kararlılığı hemen hemen 0.05 sn. gibi kısa bir sürede sağlanmıştır. Fakat burada aniden bir sıcaklık değişimi yapılmıştır. Gerçek sistemlerde aniden sıcaklık değişiminin olması pek mümkün görülmemektedir.

Tüm bu ifade edilenler toparlanırsa, TEJ sistemlerinin bir MGNİ algoritması olmaksızın çalıştırılması verimlerinin daha da düşük olmasına ve daha kötü bir performansla çalıştırılmasına neden olmaktadır. Düşük yük direnci değerlerinde elde edilen güç ile yük elemanına verilen güç oldukça düşmektedir. TEJ sistemlerinden doğası gereği yüksek sıcaklık farkı değerlerinde daha yüksek güç alınabilmektedir. Son olarak, bağlanılan yük değeri de artırıldığında MGNİ algoritmalarının MGN değerini izleme yüzdesi daha da artmaktadır.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, bir TEJ'in MATLAB/Simulink ile üreticilerin sağladığı Seebeck sabiti ve sıcaklık farkı değerlerine bağlı olarak modellenmesi yapılmıştır. Ayrıca bunun çoklu seri-paralel kullanımı hem doğrudan yük bağlantılı MGNİ'siz hem de bir alçaltan-yükselten çevirici kullanılarak K&G MGNİ'li modelleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle üreticinin sağladığı karakteristik değerlerine göre bir TEJ sistemi için en iyi çalışma koşulları tespit edilmiştir. Modellenen TEJ sisteminde bir TEJ grubunda 20 TEJ seri olarak bağlanmıştır. Bunun gücünü arttırmak için de ayrı bir TEJ grubu ilave edilerek TEJ sayısı 40'a çıkarılarak modellenmiştir. Bu değerler kullanıcı tarafından rahatlıkla değiştirilebilecek şekilde düzenlenmiştir. Üreticinin sağladığı verilere göre bu TEJ'ler en yüksek 250°C'de kullanılabilirliği için sıcak taraf sıcaklığı 250°C ve soğuk taraf sıcaklığı da ortam sıcaklığına yakın bir değer olan 30°C alınmıştır. Bu TEJ sisteminden elde edilebilecek maksimum güç MGNİ'siz 7 Ω değerinde 236.06 W olmuştur. Fakat bu direnç değerinin dışındaki değerler de oldukça düşme olmuştur. Bir elektrik üreticisine sabit bir yükün sürekli olarak bağlanması düşünülemez. Bu durumda da MGNİ algoritmaları çeviriciler kullanılmalıdır. K&G MGNİ'li alçaltan-yükselten çeviricili TEJ sistemi kullanıldığında 30 Ω yük değerleri için giriş gücü 236.1 W iken yaklaşık 3 W'lık bir sapma ile 233.1 W olarak güç yüke aktarılabilmiş ve MGN büyük bir doğrulukla %98.72 değerinde takip edilebilmiştir.

7 Conclusions

In this study, a TEG was modeled based on the Seebeck constant and temperature difference values provided by the manufacturers with MATLAB/Simulink. In addition, its multiple serial-parallel use modeled with both direct a connected load, without MPPT, and a buck-boost converter, with P&O MPPT. Thus, the best working conditions for a TEG system are determined according to the characteristic values provided by the manufacturer. In the modeled TEG system, 20 TEGs were connected in series in a TEG group. To increase the power of this, a separate TEG group was added and the TEG number was increased to 40. These values were arranged so that they could be easily changed by the user. According to the data provided by the manufacturer, since these TEGs could be used at the highest 250 °C, the hot side temperature was 250 °C and the cold side temperature was 30 °C, which was close to the ambient temperature. The maximum power available from this TEG system was 236.06 W at 7 Ω without MPPT. However, values other than this resistance value also decreased significantly. It is unthinkable to constantly connect a constant load to an electricity generator. In this case, converters with MPPT algorithm should be used. When using the buck-boost converter TEG system with P&O MPPT, while the input power was 236.1 W for 30 Ω load values, the power could be transferred to 233.1 W with a deviation of approximately 3 W and the MPP could be followed with a great accuracy of 98.72%.

8 Teşekkür

Bu çalışma, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi (No: 2018-190) tarafından desteklenmiştir.

9 Kaynaklar

- [1] Elcic H, Çakmakçı M. "Microalgae production and biofuel from microalgae". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(3), 795-820, 2017.
- [2] Liu C, Chen P, Li K. "A 500 W low-temperature thermoelectric generator: Design and experimental study". *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(28), 15497-15505, 2014.
- [3] Wu SJ, Wang S, Yang CJ, Xie KR. "Energy management for thermoelectric generators based on maximum power point and load power tracking". *Energy Conversion and Management*, 177, 55-63, 2018.
- [4] Sornek K, Filipowicz M, Żołądek M, Kot R, Mikrut M. "Comparative analysis of selected thermoelectric generators operating with wood-fired stove". *Energy*, 166, 1303-1313, 2019.
- [5] Hsu CT, Huang GY, Chu HS, Yu B, Yao DJ. "Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators". *Applied Energy*, 88(4), 1291-1297, 2011.
- [6] Champier D. "Thermoelectric generators: A review of applications". *Energy Conversion and Management*, 140, 167-181, 2017.
- [7] Ahıska R, Mamur H, Metin U. "Termoelektrik modülün jeneratör olarak modellenmesi ve deneysel çalışması". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(4), 889-896, 2011.

- [8] Dişlitaş S, Ahıska R. "Determination of the parameters I_{max}, V_{max} and E_{max} of thermoelectric module using parabola algorithm based on three discrete measurements". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(4), 1063-1072, 2016.
- [9] Ahıska R, Mamur H. "A review: Thermoelectric generators in renewable energy". *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 4(1), 128-136, 2014.
- [10] Mamur H, Ahıska R. "Application of a DC-DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators". *Energy Conversion and Management*, 97, 265-272, 2015.
- [11] Sasaki K, Horikawa D, Goto K. "Consideration of thermoelectric power generation by using hot spring thermal energy or industrial waste heat". *Journal of Electronic Materials*, 44(1), 391-398, 2015.
- [12] Montecucco A, Knox A. "Maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(2), 828-839, 2015.
- [13] Liu Y, Li M, Ji X, Luo X, Wang M, Zhang Y. "A comparative study of the maximum power point tracking methods for PV systems". *Energy Conversion and Management*, 85, 809-816, 2014.
- [14] Twaha S, Zhu J, Yan Y, Li B, Huang K. "Performance analysis of thermoelectric generator using dc-dc converter with incremental conductance based maximum power point tracking". *Energy for Sustainable Development*, 37, 86-98, 2017.
- [15] Montecucco A, Siviter J, Knox AR. "The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel". *Applied Energy*, 123, 47-54, 2014.
- [16] Yahya K, Bilgin MZ, Erfidan T. "Practical implementation of maximum power tracking based short-current pulse method for thermoelectric generators systems". *Journal of Power Electronics*, 18(4), 1201-1210, 2018.
- [17] Laird I, Lu DDC. "High step-up DC/DC topology and MPPT algorithm for use with a thermoelectric generator". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(7), 3147-3157, 2013.
- [18] Kinsella CE, O'Shaughnessy SM, Deasy MJ, Duffy M, Robinson AJ. "Battery charging considerations in small scale electricity generation from a thermoelectric module". *Applied Energy*, 114, 80-90, 2014.
- [19] Dalala Z, Saadeh O, Bdour M, Zahid Z. "A new maximum power point tracking (mppt) algorithm for thermoelectric generators with reduced voltage sensors count control". *Energies*, 11(7), 1-16, 2018.
- [20] Bijukumar B, Raam AGK, Ganesan SI, Nagamani C. "A linear extrapolation based MPPT algorithm for thermoelectric generators under dynamically varying temperature conditions". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33, 1641-1649, 2018.
- [21] Park JD, Lee H, Bond M. "Uninterrupted thermoelectric energy harvesting using temperature-sensor-based maximum power point tracking system". *Energy Conversion and Management*, 86, 233-240, 2014.
- [22] Phillip N, Maganga O, Burnham K J, Ellis M A, Robinson S, Dunn J, Rouaud C. "Investigation of maximum power point tracking for thermoelectric generators". *Journal of Electronic Materials*, 42(7), 1900-1906, 2013.
- [23] Yamada H, Kimura K, Hanamoto T, Ishiyama T, Sakaguchi T, Takahashi T. "A novel MPPT control method of thermoelectric power generation with single sensor". *Applied Sciences*, 3(2), 545-558, 2013.
- [24] Zhang X, Chau KT. "An automotive thermoelectric-photovoltaic hybrid energy system using maximum power point tracking". *Energy Conversion and Management*, 52(1), 641-647, 2011.
- [25] Yu C, Chau KT. "Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking". *Energy Conversion and Management*, 50(6), 1506-1512, 2009.
- [26] Tsai HL, Lin JM. "Model building and simulation of thermoelectric module using Matlab/Simulink". *Journal of Electronic Materials*, 39(9), 2105-2111, 2010.
- [27] Zhang J, Xuan Y. "An integrated design of the photovoltaic-thermoelectric hybrid system". *Solar Energy*, 177, 293-298, 2019.
- [28] Dişlitaş S, Yanmaz, H, Ömer, G, Ahıska, R. "The design of multi-functional probe for determining the P-N electrical conductivity type of thermoelectric semiconductors". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(2), 151-156, 2019.
- [29] Snyder GJ. "Small thermoelectric generators". *The Electrochemical Society Interface*, 17(3), 54-56, 2008.
- [30] Bijukumar B, Raam AGK., Ganesan SI, Nagamani C, Reddy MJB. "MPPT algorithm for thermoelectric generators based on parabolic extrapolation". *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(6), 821-828, 2018.
- [31] Bond M, Park JD. "Current-sensorless power estimation and MPPT implementation for thermoelectric generators". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), 5539-5548, 2015.
- [32] Çoban Y. Termoelektrik Jeneratörler için Karıştır ve Gözlemle Maksimum Güç Noktası İzleme Metodu. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye, 2019.
- [33] Abdelsalam AK, Massoud AM, Ahmed S, Enjeti PN. "High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(4), 1010-1021, 2011.