

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER İÇİN KARIŞTIR VE
GÖZLEMLE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME METODU**

Yusuf ÇOBAN

**Danışman
Doç. Dr. Hayati MAMUR**



MANİSA-2019

**Yusuf
ÇOBAN**

**TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER İÇİN KARIŞTIR VE GÖZLEMLE
MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME METODU**

2019

TEZ ONAYI

Yusuf ÇOBAN tarafından hazırlanan "**TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER İÇİN KARIŞTIR VE GÖZLEMLE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME METODU**" adlı tez çalışması 28/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Doç. Dr. Hayati MAMUR
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Sezai TAŞKIN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Murat ARI
Çankırı Karatekin Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Yusuf ÇOBAN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	II
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLolar DİZİNİ	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1. Termoelektrik Jeneratör Yapısı.....	6
2.1.1. Termoelektrik Malzeme	6
2.1.2. Termoelektrik Etki	7
2.2. DC-DC Yükseltici Çevirici.....	11
2.3. DC-DC Alçaltıcı-Yükseltici Çevirici.....	12
2.4. K&G MGNİ Prensibi	14
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER	18
3.1. TEJ MATLAB®/Simulink® Modeli.....	18
3.2. Seri Bağlı Çoklu TEJ ve Yük Direnci ile Modelleme	20
3.3. Seri-Paralel Bağlı Çoklu TEJ ve Yük Direnci ile Modelleme.....	20
3.4. TEJ Sistemini DC-DC Yükseltici Çevirici ile Modelleme	21
3.5. TEJ Sistemini DC-DC Alçaltıcı-Yükselticili Çevirici ile Modelleme.....	23
3.6. Deneysel Doğrulama için MGNİ'siz ve MGNİ'li MATLAB®/Simulink® Benzetimleri	24
3.7. TEJ Deney Düzeneği	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	28
4.1. TEJ K&G MGNİ'li DC-DC Çevirici Kullanılmaksızın Çıktıları.....	28
4.2. TEJ K&G MGNİ'li DC-DC Yükseltici Çevirici Çıktıları.....	30
4.3. TEJ K&G MGNİ'li DC-DC Alçaltıcı-Yükseltici Çevirici Çıktıları.....	35
4.4. Deney ve Benzetim Sonuçları Karşılaştırması	41
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	45
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternative Current (Alternatif Akım)
°C	Santigrat derece
DC	Direct Current (Doğru Akım)
D	Duty cycle (Görev çevrimi)
IL	Yük akımı
I_{max}	TEM maksimum akımı
IMGN	Maksimum güç noktasındaki akım
ISC	TEJ kısa devre akımı
ITEJ	TEJ akımı
°K	Kelvin derece
K&G	Karıştır ve Gözlemler
MGN	Maksimum Güç Noktası
MGNİ	Maksimum Güç Noktası İzleyici
PL	Yükte harcanan güç
PMGN	Maksimum güç noktasındaki güç
PTEJ	TEJ gücü
PV	Fotovoltaik panel
R_{in}	TEJ iç direnci
R_L	Yük direnci
T	Anahtarlama zamanı
T_{off}	Anahtarın açık kalma zamanı
T_{on}	Anahtarın kapalı kalma zamanı
T_C	TEJ soğuk yüzey sıcaklığı
T_H	TEJ sıcak yüzey sıcaklığı
TE	Termoelement
TEM	Termoelektrik Modül
TEJ	Termoelektrik Jeneratör
TES	Termoelektrik Soğutucu
V_{in}	Giriş gerilimi
V_L	Yük gerilimi
V_{max}	TEM maksimum gerilimi
V_{MGN}	Maksimum güç noktasındaki gerilim

V_{OC}	TEJ açık devre gerilimi
V_{out}	Çıkış gerilimi
V_{TEJ}	TEJ gerilimi
ZT	TEM kalite faktörü katsayısı
α	Yarıiletken Seebeck katsayısı
ΔD	Görev çevrimi değişimi
ΔP	Güç değişimi
ΔT	TEJ yüzeyleri arası sıcaklık farkı
ΔV	Gerilim değişimi



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. TEM'lerin sıcaklığa bağlı kalite katsayıları.....	6
Şekil 2.2. (a) TE ve (b) TEJ yapısı.....	7
Şekil 2.3. Tipik TEM düzeni.....	8
Şekil 2.4. TEJ (a) elektriksel devresi ve (b) yüke bağlı gerilim-güç ve gerilim-akım grafiği.....	9
Şekil 2.5. Sıcaklık farkının bir fonksiyonu olarak TEJ akım, gerilim, güç ve MGN eğrileri	10
Şekil 2.6. DC-DC (a) yükseltici çevirici devresi, (b) MGNİ prensibi ve (c) MGNİ blok diyagramı.....	11
Şekil 2.7. DC-DC (a) alçaltıcı yükseltici çevirici devresi, (b) MGNİ prensibi ve (c) MGNİ blok diyagramı.....	13
Şekil 2.8. TEJ gerilim-güç grafiğinde MGNİ	15
Şekil 2.9. K&G MGNİ algoritması	17
Şekil 3.1. Modellemesi yapılan TEJ'in 220°C sıcaklık farkı için gerilim-güç ve gerilim-akım grafikleri	19
Şekil 3.2. TEJ modelleme (a) genel ve (b) iç yapısı	19
Şekil 3.3. Seri bağlı TEJ sayısı artırılmış sistem modeline yük bağlantısı	20
Şekil 3.4. Seri ve paralel bağlı TEJ sistem modeli.....	21
Şekil 3.5. TEJ sistemi ve K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici modeli.....	21
Şekil 3.6. Değişken yük bağlı TEJ sistemi ve K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici modeli	22
Şekil 3.7. TEJ (a) ayarlı direnç ve (b) sıcaklık farkı modellemesi.....	22
Şekil 3.8. Değişken sıcaklığa bağlı TEJ sistemi ve K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici modeli.....	23
Şekil 3.9. TEJ sistemi ve K&G MGNİ'li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici modeli	24
Şekil 3.10. TEJ sistemine doğrudan yük bağlı deney düzeneği MATLAB®/Simulink® benzetimi	24
Şekil 3.11. TEJ K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici deney düzeneği MATLAB®/Simulink® benzetimi.....	25
Şekil 3.12 TEJ düzeneği yapısı	26
Şekil 3.13. TEJ deney düzeneği	26
Şekil 4.1. TEJ sistemine doğrudan yük bağlandığında yük üzerinden alınan sonuçlar.....	29
Şekil 4.2. TEJ sistemine doğrudan yük direnci bağlandığında değişken sıcaklıklarda yük üzerinden alınan sonuçlar.....	30
Şekil 4.3. Farklı yüklerde K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici sistemde yük üzerinden alınan sonuçlar	31
Şekil 4.4. Değişken sıcaklıklarda K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici sistemde yük üzerinden alınan sonuçlar	33
Şekil 4.5. K&G MGNİ DC-DC yükseltici çeviricinin sabit yük ve sıcaklıktaki tepkisi	33
Şekil 4.6. K&G MGNİ DC-DC yükseltici çeviricinin yük direnci değişimine tepkisi	34
Şekil 4.7. K&G MGNİ DC-DC yükseltici çeviricinin sıcaklık farkı değişimine tepkisi	35

Şekil 4.8. Farklı yüklerde K&G MGNİ’li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici sistemde yük üzerinden alınan sonuçlar	37
Şekil 4.9. Değişken sıcaklıklarda K&G MGNİ’li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici sistemde yük üzerinden alınan sonuçlar	38
Şekil 4.10. K&G MGNİ DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviricinin sabit yük ve sıcaklıktaki tepkisi	39
Şekil 4.11. K&G MGNİ DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviricinin yük direnci değişimine tepkisi	40
Şekil 4.12. K&G MGNİ DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviricinin sıcaklık farkı değişimine tepkisi	41
Şekil 4.13. TEJ sistemine doğrudan yük bağlandığında farklı yük değerlerinde elde edilen deney ve MATLAB®/Simulink® sonuçları	42
Şekil 4.14. Farklı yüklerde TEJ K&G MGNİ’li DC-DC yükseltici çevirici deney ve MATLAB®/Simulink® sonuçları	44



TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. K&G MGNİ algoritma olasılıkları	16
Tablo 3.1. Kullanılan TEJ karakteristiklikleri	18
Tablo 4.1. Modellenen TEJ sistemine doğrudan yük bağlandığında yük üzerinden alınan sonuçlar	28
Tablo 4.2. TEJ sistemine doğrudan yük direnci bağlandığında değişken sıcaklıklarda yük üzerinden alınan sonuçlar.....	29
Tablo 4.3. Farklı yüklerde K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici giriş ve çıkış sonuçları	31
Tablo 4.4. Değişken sıcaklıklarda K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici giriş ve çıkış sonuçları	32
Tablo 4.5. Farklı yüklerde K&G MGNİ'li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici giriş ve çıkış sonuçları	36
Tablo 4.6. Değişken sıcaklıklarda K&G MGNİ'li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici giriş ve çıkış sonuçları	37
Tablo 4.7. TEJ sistemine doğrudan yük bağlandığında elde edilen deney ve MATLAB®/Simulink® sonuçlarının karşılaştırması	42
Tablo 4.8. TEJ K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici deney ve MATLAB®/Simulink® sonuçlarının karşılaştırması	43

TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aőamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hayati MAMUR'a, çalıőmamın deney kısmında okulumuzun laboratuvar imkânlarından faydalanmak için desteğini hiç eksik etmeyen Bölüm Baőkanımız Sayın Prof. Dr. Nevzat ONAT'a, her zaman gösterdiği sabırdan ve manevi desteklerinden dolayı eőime, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan anneme, babama ve kardeőlerime yürekten teşekkür ederim.

Yusuf ÇOBAN
Manisa, 2019



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER İÇİN KARIŞTIR VE GÖZLEMLE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME METODU

Yusuf ÇOBAN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hayati MAMUR

Termoelektrik jeneratörler (TEJ) atık ısılarından elektrik enerjisi üretmek için küçük güç uygulamalarında kullanılırlar. TEJ'in uçlarına bağlanılan yük direnci ile iç direnci eşit olduğunda maksimum güç alınır. Fakat bu empedans eşitliği her zaman sağlanamaz. Bu nedenle TEJ daha düşük verimle çalışır. Bunun için maksimum güç noktası izleyiciler (MGNİ) kullanılır. Bu çalışmada, MGNİ için TEJ'lerin detaylı bir modellemesi ve benzetimi MATLAB®/Simulink® programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, TEJ çıkışında etkili olan eşitlikler belirlendikten sonra, üreticilerin sunduğu yalnızca yüzey sıcaklıkları ve Seebeck sabitine bağlı kalarak bir TEJ modellemesi yapılmıştır. Oluşturulan TEJ modelinde TEJ gücünün arttırılabilmesi için seri ve paralel bağlı TEJ sayılarının girilebilmesi sağlanmış ve bu model çıkışına farklı yük değerleri bağlanarak çıkıştan alınan güç belirlenmiştir. Sonra, MGNİ'nin uygulanması için TEJ modeli ile birlikte DC-DC hem bir yükseltici hem de bir alçaltıcı-yükseltici çevirici modelleri oluşturulmuştur. Bundan sonra, karıştır gözlemle (K&G) MGNİ algoritması bu modellere gömülmüş ve bunların çıkışlarına bağlanan farklı yükler için MGNİ yapılmıştır. TEJ modeli ve kullanılan K&G MGNİ'li DC-DC hem yükseltici hem de alçaltıcı-yükseltici çeviriciler sayesinde TEJ'in maksimum gücü, sırasıyla, %98,64'e ve %98,95'e ulaşan değerlerle takip edilebilmiştir. Bu değerlere göre TEJ'den alınan güç hemen hemen yük değişimlerinden etkilenmemiştir. Aynı zamanda elde edilen MATLAB®/Simulink® benzetim sonuçları deneysel olarak teyit edilmiştir. Sonuçta, bu TEJ modeli sayesinde farklı Seebeck sabiti ve sıcaklık değerlerine sahip TEJ'lerin kolaylıkla benzetimlerinin yapılabileceği bir K&G MGNİ'li DC-DC hem bir yükseltici çevirici ve hem de bir alçaltıcı-yükseltici çevirici TEJ modeli sistemi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termoelektrik Jeneratör, MGNİ, DC-DC Çevirici, MATLAB®/Simulink®.

2019, 52 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHOD WITH PERTURB AND OBSERVE FOR THERMOELECTRIC GENERATORS

Yusuf ÇOBAN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hayati MAMUR

Thermoelectric generators (TEGs) are used in small power applications to produce electrical energy from waste heat. Maximum power is obtained when the load resistance connected to the ends of the TEG is equal to the internal resistance. However, this impedance equation cannot always be achieved. Thus, TEG operates with lower efficiency. Therefore, maximum power point tracking methods (MPPT) are commonly used. In this study, a detailed modeling and simulation of TEGs for MPPT were performed by using MATLAB[®]/Simulink[®] program. Firstly, after determining the equations that are effective at the TEG output, a TEG modeling was designed, based on only the surface temperatures and Seebeck coefficient offered by the manufacturers. In order to increase the power of TEG generated in TEG model, series-parallel connected TEG numbers were enabled to enter and the power obtained from the output was determined by connecting different load values the output of this model. Then, along with the TEG model, both a boost and a buck-boost converter were modelled for the simulation of the MPPT. Afterwards, a perturb and observe (P&O) MPPT algorithm was embedded in these models and the MPPT was performed for different loads connected to their outputs. Thanks to the TEG model and the DC-DC with P&O MPPT and both the boost and buck-boost converter, the maximum power of TEG was able to be traced up to values reaching 98.64% and 98.95%, respectively. According to these values, the power obtained from TEG was not affected by these load changes. MATLAB[®]/Simulink[®] simulation results were also confirmed experimentally. In conclusion, thanks to this TEG model, DC-DC both a boost and buck-boost converter TEG model system with a P&O MPPT have been obtained which can easily simulate TEGs with different Seebeck coefficient and temperature values.

Keywords: Thermoelectric Generator, MPPT, DC-DC Converter, MATLAB[®]/Simulink[®].

2019, 52 pages

1. GİRİŞ

Yarıiletkenler, yeni teknolojilerin ortaya çıkmasında büyük rol oynamaktadır. Bunların geliştirilmesi için sürekli çalışmalar yapılmaktadır. Günümüzde fosil yakıtlardan dolayı ortaya çıkan çevre kirliliklerinin azaltılması için ve enerji ihtiyacının sürekli artmasından dolayı termoelektrik (TE) yarıiletkenler ile üretilen teknolojilerin önemi artmaktadır. Sessiz, güvenilir, basit yapılı ve kullanım ömrünün uzun olmalarının yanı sıra doğru akım (DC) ile çalışmaları, bakım gerektirmemeleri ve sıcaklık kontrollerinin kolaylıkla yapılabilmesi gibi birçok avantaja sahip, çevreye zarar vermeyen termoelektrik modüllere (TEM) olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır [1]. Hem soğutma-ısıtma hem de elektrik enerjisi üretimi amaçlı olarak kullanılabilen TEM'lerin uygulama alanları başta askeri, uzay, tıp ve bilimsel çalışmalar olmak üzere hızla yaygınlaşmakta ve TE ürünlere yönelik piyasanın ekonomik hacmi büyümektedir.

Dünya nüfusunun artışı dikkate alındığında, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payının artırılması ve enerjinin verimli kullanılması kaçınılmazdır. Fosil yakıtların çevreye yaydıkları sera gazı etkisi de göz önünde bulundurulduğunda, yenilenebilir ve çevre dostu olan enerji kaynaklarının önemi daha da belirginleşmektedir [2]. Günümüzde rüzgâr, güneş, biyo kütle, hidrolik, jeotermal ve hidrojen gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla enerji elde etme çalışmaları hızlı bir şekilde devam etmektedir [3]. Hem atık ısıların hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından olan jeotermal enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesinde termoelektrik jeneratörler (TEJ) kullanılabilir [4].

TEJ, yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarıiletkenlerden yapılan cihazlardır [5]. Ürettikleri gerilimin artırılması için p ve n tipinde TE'lerin elektriksel olarak seri ve termal iletkenliğin artırılması için de paralel bağlanırlar [6]. Atık ısılarından elektrik enerjisi kazanılması ve enerji verimliliğinin artırılması için küçük güçlü elektrik enerji kaynakları olarak kullanılırlar [7-10].

TEJ'lerin giriş enerjisi atık ısı veya yenilenebilir enerji kaynağı olduğu için elektrik üretiminde tamamen çevre dostudur ve enerjinin verimli kullanılmasına olanak sağlarlar [11]. TEJ'lerden elektrik enerjisi üretimi Seebeck etkiye dayanır. TEJ yüzeyleri arasında ne kadar yüksek sıcaklık farkı olursa o oranda elektrik enerjisi

üretimi artar. Bu sıcaklık farkı kullanılan kaynağa göre değişkenlik gösterdiğinden sabit gerilim elde edebilmek amacıyla gerilim düzenlemesine ihtiyaç duyarlar [12].

TEJ'ler bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. Avantajları arasında, hareketli parçalarının olmaması, ömürlerinin uzun olması ve sessiz çalışmaları vardır. Ayrıca, yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını doğrudan elektrik enerjisine lineer bir şekilde çevirmeleri sayesinde ölçülendirilebilirler. Dahası, bunlar sera gazı salınımı yapmadıklarından çevreye zararlı etkileri yoktur. Dezavantajlarına gelince iki tane dezavantajı öne çıkmaktadır. Bunlar TEJ'lerin düşük çevrim verimine sahip olmaları ve yeni teknoloji ürünü oldukları için maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Bu nedenle kullanım alanları kısıtlıdır [13, 14]. Öte yandan, TEJ'lerin enerji verimliliğine katkıda bulunmaları düşünüldüğünde elde edilen elektrik enerjisi oldukça kıymetlidir. Diğer yenilenebilir enerji teknolojileriyle karşılaştırıldığında, TE'lerde kullanılan yarıiletkenlerin kalite faktörünün (ZT) küçüklüğü ve buna bağlı olan çevrim verimliliğinin %10'dan düşük düzeyde olmasıdır [15].

Son yıllara kadar, TE ile yapılan TEM'lerin üretiminde kullanılan yarıiletkenlerin ZT değerlerinin 1'den küçük olmasından dolayı sınırlı iken, 1990'ların başlarından itibaren, ZT'lerinin 1'den 2 değerlerine yaklaşmasıyla ilgili raporlar yayınlanmıştır. Dolayısı ile buna bağlı olarak, TEJ kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalar hızla artmış ve daha da artacağı görülmektedir [16]. Fakat bu dezavantajının yanında, TE enerji üretim sistemlerinde kullanılan ısı kaynağının atık, jeotermal ve güneş enerjisi ısıları gibi, yenilenebilir olduğu düşünüldüğünde bu çevrim sistemlerindeki verimliliğinin göz ardı edilebileceği görülmektedir [17]. TEJ veriminin düşük olmasına karşın, enerji giriş kaynağının yenilenebilir olması bu sistemlerin ekonomikliğini arttırmaktadır ve uygulamalar bunu göstermiştir. Son yıllarda, TEJ'lerle elektrik enerjisi üretimi üzerine yapılan çalışmalar jeotermal alanlar, endüstriyel fabrikalar, otomobil ve uçak motorları ve insan vücudundan alınan ısıların geri kazanımı üzerine yoğunlaşmıştır [18].

Dünyada enerji ihtiyacının sürekli artış gösterdiği, hali hazırda kullanılan enerji kaynaklarının sınırlı olması ile birlikte çevre kirliliğini artırdığı göz önünde bulundurulduğunda enerjinin verimli kullanımı dikkate alındığı sürece yenilenebilir enerji kaynaklarından olan TEJ'lere ihtiyaç artacak ve güncel araştırma konuları arasında yer almayı sürdürecektir.

TEJ'ler jeotermal enerji ile birlikte kullanıldıklarında bu enerji kaynağının temelinde ısıyı kullanır. Isı, sıcaklık farkı ya da basınç farkıyla iletilen bir enerji çeşidi olup, Termodinamiğin II. Kanununa göre normal şartlarda yüksek sıcaklıktaki bir ortamdan daha düşük sıcaklıktaki bir ortama kendiliğinden iletilmektedir. Ancak yine Termodinamiğin II. Kanununa göre sisteme dışarıdan uygulanan bir enerji ile ısının düşük sıcaklıktaki bir ortamdan alınarak daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama verilmesi de mümkün olmaktadır [19].

Sürekli artan ve gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayar sistemleri daha güçlü ve daha hızlı bir yapıya kavuşmuştur. Bununla birlikte bilgisayarlar ile birlikte kullanılan yazılım geliştirme araçlarından alınan sonuçlar da daha hassas, hızlı ve güvenilir bir hale gelmiştir. Ayrıca bu arabirim programlarının sunduğu görsel ve grafik tabanlı programlama yetenekleri sayesinde de daha kullanışlı, göze hoş gelen ve kullanıcı dostu arayüzler oluşturulabilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı günümüzde benzetim amacıyla MATLAB®/Simulink® programının önemi artmakta ve kullanım alanları hızla yaygınlaşmaktadır. Bilgisayar tabanlı olarak ölçme, kontrol, analiz ve depolama işlemlerinin geliştirilen yazılımlar sayesinde istenilen özellik ve çeşitlilikte yapılması ve bu sayede değerlendirme sürecinin iyileştirilmesi mümkün olmaktadır. TE'ler ile yapılan sistemlere yönelik gerçekleştirilen araştırmalarda da çok fonksiyonlu, pratik kullanım imkânı sunan ve kullanıcı dostu gelişmiş bilgisayar yazılımlarına ihtiyaç duyulmakta ve buna bağlı olarak da kullanımları hızla yaygınlaşmaktadır [20].

TEM üretim teknolojisinde ve güç elektroniğindeki değişimler nedeniyle bunların matematiksel modellenmeleri ve en yüksek verimle çalıştırma araştırmaları devam etmektedir [21-25]. TEJ modellemeleri, ısı iletimi ve elektrotermal özelliklerin incelenmesi üzerinedir. Bununla birlikte, TEJ'lerin elektronik devrelerin benzetim programlarında kullanabilmesi amacıyla da modellemeleri yapılmıştır. Atık ısıdan TEJ yardımıyla elektrik enerjisi elde edilmesinde TEJ'den en iyi verimin alınması için TEJ iç direnciyle (R_{in}) TEJ'e bağlı yük direnci (R_L) birbirine eşit olmalıdır. Buna empedans dengesi denir. TEJ'ler farklı sıcaklık aralıklarında kullanıldıkları için buna bağlı olarak sonuç değerleri yüke ve sıcaklık farkına bağlı olarak sürekli değişim göstermektedir [26-30].

TEJ'lerin uçlarına doğrudan yük bağlanıldığında, eğer bağlanılan yük ile TEJ'in iç direnci eşit değilse, TEJ verimi daha da düşer. Bu empedans dengesizliği olarak ifade edilir [31-33]. Bunun önüne geçmek için fotovoltaiik panellerde (PV) olduğu gibi hem maksimum güç noktası izlemesi (MGNI) hem de güç düzenlemesi yapabilen DC-DC çeviricilerle birlikte kullanılırlar [34-37]. Bu çeviricilerde MGNI işleminin yapılması için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalara dikkat edildiğinde PV panellerden uyarlandığı görülür [38, 39]. Bunlardan en yaygın olanı karıştır ve gözlemle (K&G) algoritmasıdır. Bu algoritma diğer algoritmaların da referansını oluşturur ve geliştirilen algoritmaların sonuçları bununla karşılaştırılır [40, 41]. Bu çalışmanın odak noktasını hem TEJ üreticilerinin sağladığı Seebeck sabiti ve sıcaklık farkı ile TEJ'in detaylı bir modellenmesi hem de empedans dengesizliğinin K&G MGNI'li DC-DC yükseltici çevirici ve DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici kullanılarak en aza indirilmesi oluşturduğu için diğer MGNI algoritmaları burada incelenmemiştir.

TEJ üreticileri ürettikleri TEJ'lerin katalog bilgilerini yayınlarlar. Bunların içerisinde empedans dengesi yakalandığındaki maksimum güç, akım ve gerilim değerleri vardır. Ayrıca TEJ'lerin kullanılabileceği sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarını da verirler. Bunlarla birlikte, en önemli ölçütlerden olan ve çıkış geriliminin doğrusal olarak değiştiği Seebeck sabitini de belirtirler. Sıcaklık farkı ve Seebeck sabiti ile TEJ modellendiğinde TEJ'den alınabilecek güç değeri rahatlıkla hesaplanabilir. Ayrıca TEJ'ler küçük güçlü olduklarından arzu edilen güç değerine ulaşabilmek için seri ve paralel bağlanmaları gerekir [42, 43]. Eğer modellemede seri ve paralel bağlı TEJ'lerin sayıları da düzenlenirse TEJ kullanıcıları için ideal bir modelleme olur.

Literatürde üreticilerin verdikleri ürün özellikleri ile TEJ'lerin modellemelerine rastlanılmaktadır. Bu çalışmalarda, modelleme için sıcak taraf sıcaklığı (T_H), soğuk taraf sıcaklığı (T_C), empedans dengesi gücü, empedans dengesi gerilimi ve en iyi verim değerleri birlikte kullanılmıştır [44]. Hızlı değişen sıcaklık koşullarında TEJ'lerin bu değişimlere verdiği tepkiler ölçülmüştür [45]. Ayrıca TEJ'lerin birbirleri ile seri-paralel bağlantılarındaki elde edilen verim değerleri saptanmıştır [46]. Bunların yanı sıra TEJ'lerin termoelektrik soğutucular (TES) ve PV'lerle birlikte enerji verimliliğini arttırmak için şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız olarak kullanımlarına da rastlanılmaktadır [47, 48]. PV panellerin ısınan

yüzeyleri ile bu yüzeye nispeten soğuk kalan yüzey arasındaki sıcaklık farkını elektrik enerjisine çevirerek bu PV panellerin enerji verimliliğinin artırılmasına katkıda bulunurlar.

Yapılan modelleme çalışmaları dikkatle incelendiğinde PV panellerin MATLAB®/Simulink® ile detaylı modellemelerine oldukça fazla rastlanılmaktadır ve bunlar diğer çalışmaların da bir temelini oluşturmaktadır [49-55]. Öte yandan, TEJ'lerin Seebeck sabiti ve soğuk-sıcak sıcaklık değerleri ile detaylıca modellenmesine rastlanılmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma MGNİ uygulamalarının MATLAB®/Simulink® ortamında kolaylıkla yapılabilmesi için TEJ'lerin bu parametrelerle modellenmesini esas almaktadır. Kullanım kolaylığı ve referans MGNİ karşılaştırması için de kullanılan K&G algoritması DC-DC hem bir yükseltici ve hem de alçaltıcı-yükseltici çevirici ile birlikte bu çalışma da sunulmuştur. Son olarak da TEJ modelinin MGNİ'siz ve MGNİ'li kullanımındaki sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde bir giriş bölümü verildikten sonra, ikinci bölümde kullanılan materyal ve yöntemlerden olan TEJ yapısı, eşitlikler, karakteristik eğriler, DC-DC yükseltici çevirici ve DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici, K&G MGNİ algoritması ve deneysel kurulumun ifade edildiği genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde de Seebeck sabiti, sıcak taraf sıcaklığı, soğuk taraf sıcaklığı ile TEJ'in modellenmesi, seri-paralel bağlı TEJ modellemeleri ve K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici ve DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici ile TEJ modellemesi gösterilmiştir. Dördüncü bölümde, modelleme çıktıları ve değerlendirmeleri sunulmuştur. Son olarak da, sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

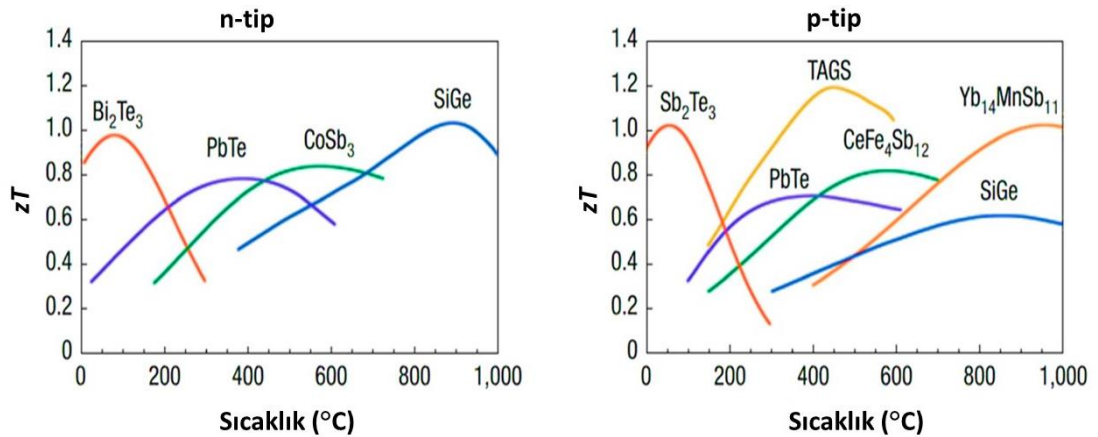
Bu bölümde TEJ yapısı, matamatiksel eşitlikleri, karakteristik eğrileri, DC-DC yükseltici çevirici, alçaltıcı-yükseltici çevirici ve K&G MGNİ algoritması verilmiştir.

2.1. Termoelektrik Jeneratör Yapısı

2.1.1. Termoelektrik Malzeme

Elektrik enerjisini sıcaklık farkına veya sıcaklık farkını elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken malzemeler termoelektrik malzemelerdir. Bizmut Tellürid (Bi_2Te_3) en yaygın ve geniş bir sıcaklık aralığında kullanılan termoelektrik malzemelerden biridir [56]. Bu malzemelerden yapılan cihazlar ise TEJ'lerdir [57]. Hareketli parçalarının olmaması, sessiz çalışmaları, bakım gerektirmemeleri, uzun ömürlü olmaları ve kararlı çalışmaları avantajlarını oluştururken, düşük verimliğe (<10) sahip olmaları ve pahalı olmaları da en büyük dezavantajlarıdır [58].

Bazı n ve p tip termoelektrik materyallerin sıcaklığa bağlı olarak değişen kalite katsayıları Şekil 2.1'de verilmiştir. Bi_2Te_3 n -tipi TE'ler yaklaşık 250°C sıcaklık değerine kadar kullanılırken, SiGe tipi termoelementler 1.000°C değerine kadar kullanılabilir. Hemen hemen tüm TE'lerin kalite katsayıları yaklaşık olarak 0,4-1,2 aralığında değişmektedir [59].

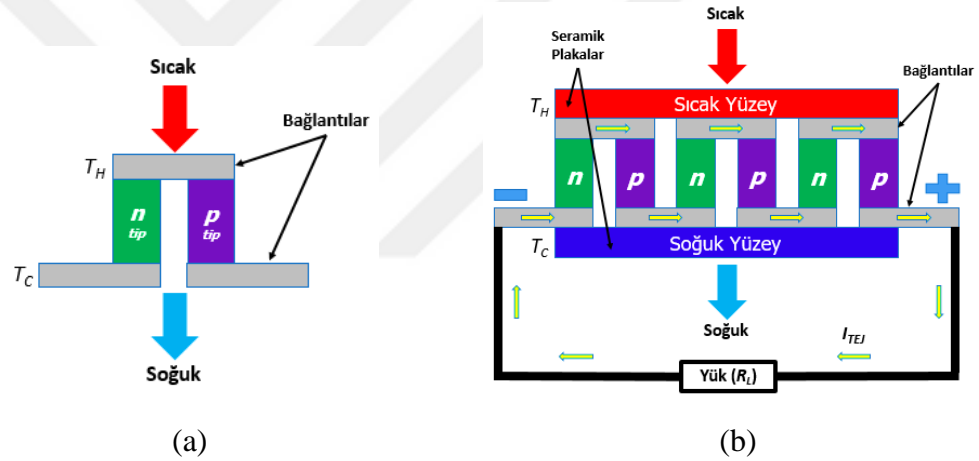


Şekil 2.1. TEM'lerin sıcaklığa bağlı kalite katsayıları [59]

2.1.2. Termoelektrik Etki

Termoelektrik etki, sıcaklık farkının elektriksel bir potansiyel farka veya gerilime doğrudan dönüştürülmesidir. Termoelektrik etkiler, yarıiletkenlerde yük taşıyıcılarının varlığı, taşınabilirliği ve aynı anda ısı ve şarj taşıma kabiliyetleri nedeniyle meydana gelir. Bir termoelektrik çift oluşturmak için serbest elektron içeren *n*-tip ve serbest oyuklar içeren *p*-tip iki tür termoelektrik malzeme gereklidir.

Materyal kalite katsayıları yüksek olan *p* ve *n* tipi yarıiletkenlerin birleştirilmesiyle Şekil 2.2(a)'da gösterildiği gibi TE'ler oluşturulur. Bu TE'ler gerilimin artırılması için birbirleri ile seri bağlanırlar. Ayrıca termal iletkenliğin yükseltilmesi için de tamamı seramik plakalar yardımıyla paralel bağlanarak TEJ'ler oluşturulur. Şekil 2.2(b)'de üç çift TE'den oluşan TEJ gösterilmiştir.



Şekil 2.2. (a) TE ve (b) TEJ yapısı

TEJ'ler Seebeck etki prensibine göre çalışırlar. Sıcaklık farkının bir potansiyel fark oluşturmasıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüşümü Seebeck etkidir. TEJ'in seramik plakaları arasında sıcaklık farkı oluşturulduğunda sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru bir ısı geçişi olur. Bu ısı geçişi *p* tipi yarıiletkenlerdeki oyuklara, *n* tipi yarıiletkenlerdeki elektronların akışını sağlar. Böylelikle TEJ uçları arasında sıcaklık farkına bağlı olarak bir gerilim üretilir. Bu gerilim değeri sıcaklık farkı ve TEJ'in Seebeck sabiti (α) ile doğru orantılıdır ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$V_{OC} = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Burada V_{OC} TEJ'in açık devre gerilimi (V), α Seebeck sabiti (V/K) ve ΔT de sıcaklık farkıdır (K). Sıcaklık farkı sıcak yüzey, T_H , ve soğuk yüzey, T_C , arasındaki değerdir ($\Delta T = T_H - T_C$). İyi bir materyalin Seebeck sabiti 0,1-0,3 V/K arasında değişir. Kullanılacağı sıcaklık değeri de üreticilerin verdikleri katalog bilgilerine göre belirlenir. Endüstriyel amaçlı olarak kullanılan TEJ'lerde sıcak yüzey sıcaklığı 350°C'ye kadar çıkar. Araç egzoz sistemlerinde kullanılan TEJ'lerde bu değer daha da yüksektir.

Termoelektrik Soğutucu (TES) ise Peltier etki prensibine göre çalışır. Bu etki Seebeck etkinin tersi şekilde olur. Bu durumda TE'lerin pozitif ve negatif uçlarına elektriksel potansiyel fark uyguladığında, TE'lerin yüzeylerinden birisi ısınırken diğeri soğumaktadır. Meydana gelen ısınma, uygulanan akıma (I) ve TE'lerin elektriksel dirençlerine (R) bağlıdır. Isı iletimi ise sıcaklık farkı ve ısı iletme kapasitelerine göre değişmektedir.

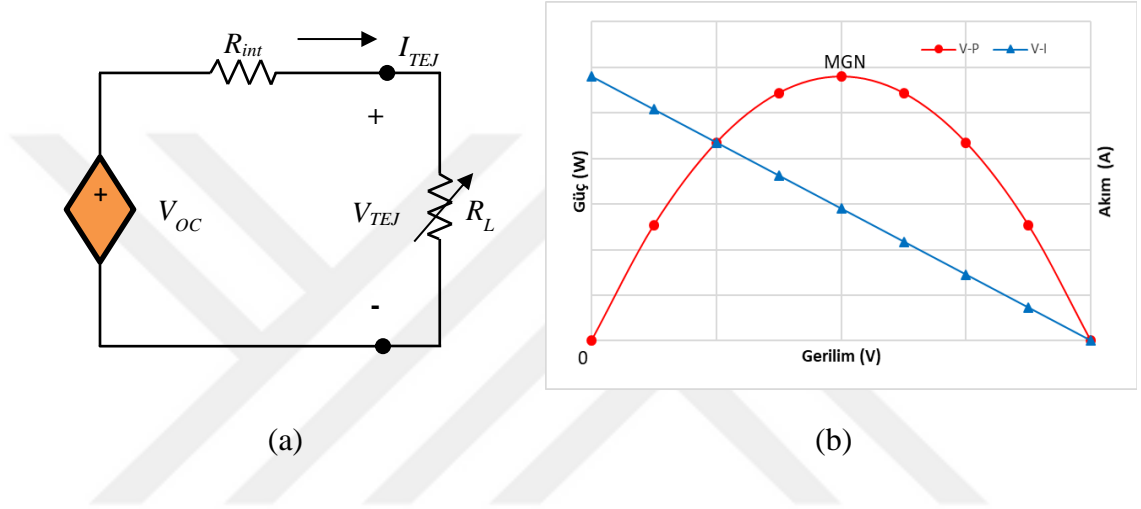
TES'ler elektrik enerjisini Peltier etki ile sıcaklık farkına çevirirken, TEJ'ler ise uygulanan sıcaklık farkını Seebeck etki ile elektrik enerjisine çevirirler. Birbirinin tersi bir mantıkla çalışır. Bu şu demek değildir "her TES elemanı TEJ şeklinde kullanabiliriz". TEJ'ler enerji üretimi için tasarlanmışken TES'ler sıcaklık farkı oluşturarak iklimlendirme amaçlı kullanılırlar [60]. Şekil 2.3'de tipik bir 40×40 mm boyutlarında TEM verilmiştir.



Şekil 2.3. Tipik TEM düzeni

Aslında, TEJ'ler veya TES'ler, enerji üretimi için olduğu kadar ısıtma veya soğutma uygulamaları için de kullanılabilir. Her iki uygulama için kullanılan modüller arasında işlevsel bir fark yoktur. Bunun yerine kullanım şekilleri farklıdır ve bazen elektrik devrelerine göre yapıları da farklıdır.

TEJ'in elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.4(a)'da gösterildiği gibi sıcaklığa bağımlı bir gerilim kaynağı ve bir iç dirençten, R_{in} , oluşur, TEJ'den güç almak için yük, R_L , bağlanılır. Bu yük değeri ile TEJ'in iç direnci eşit olduğunda ($R_{in} = R_L$) TEJ'den alınan güç maksimum güç noktasına (MGN) ulaşır. Yük değeri değiştikçe alınan güç değeri de değişir. Bu yük sonsuz olduğunda TEJ uçlarından açık devre gerilimi ölçülür. Aynı bunun gibi, yük sıfır olduğunda da TEJ uçları kısa devre olur ve kısa devre akımı TEJ'den geçer. TEJ'in yük direncinin bir fonksiyonu olarak tipik gerilim-akım ve gerilim-güç karakteristikleri Şekil 2.4(b)'de verilmiştir.



Şekil 2.4. TEJ (a) elektriksel devresi ve (b) yüke bağlı gerilim-güç ve gerilim-akım grafiği

TEJ'den alınan güç değeri MGN'de iken açık devre gerilimi ve kısa devre akımı da aşağıdaki açıklandığı gibi yarı değerlerindedirler:

$$V_{MGN} = V_{OC}/2 \quad \text{ve} \quad I_{MGN} = I_{SC}/2 \quad (2.2)$$

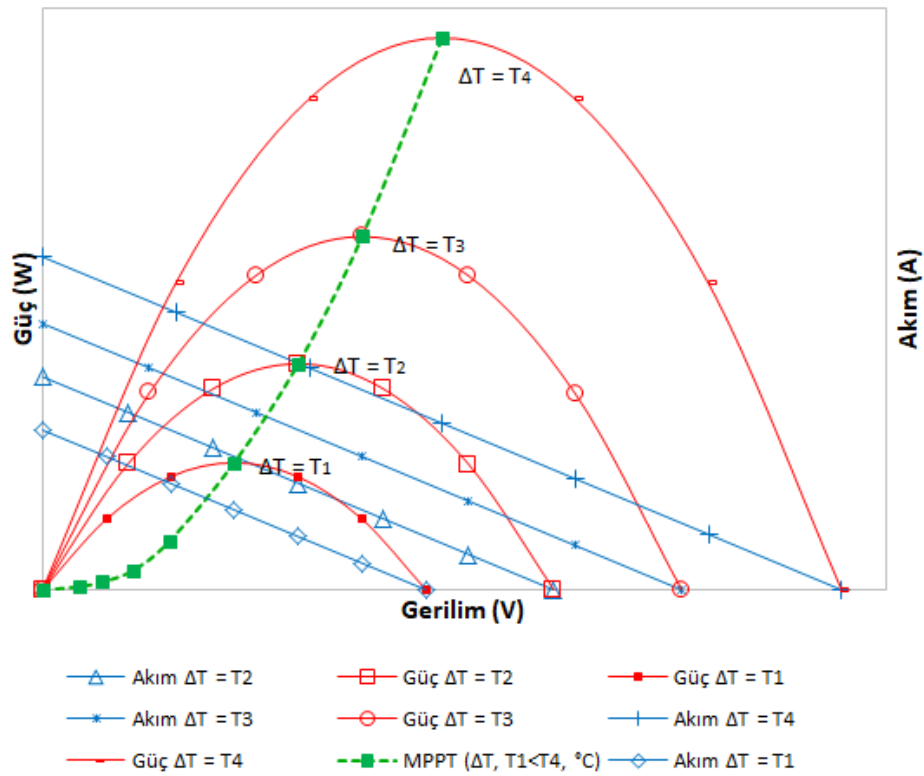
Burada, V_{MGN} ve I_{MGN} maksimum güç noktasındaki gerilim (V) ve akımdır (A). I_{SC} ise kısa devre akımıdır (A). Bu değerler ile MGN tespit edilebilir. TEJ'den geçen akım değeri aşağıda verilmiştir:

$$I_{TEJ} = V_{OC}/(R_{in} + R_L) \quad (2.3)$$

Burada, I_{TEJ} , R_{in} ve R_L , sırasıyla TEJ akımı (A), TEJ iç direnci (Ω) ve yük direncidir (Ω). Yük direnci ve iç dirence bağlı olarak TEJ'den alınan güç aşağıdaki gibidir:

$$P_{TEJ} = \frac{V_{OC}^2}{(R_{in} + R_L)^2} \cdot R_L \quad (2.4)$$

Burada P_{TEJ} , TEJ'den alınan güçtür (W). Bu güç yük değişimlerine duyarlılık gösterdiği gibi aynı zamanda TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile de doğrusal orantılıdır. Sıcaklık farkı arttıkça TEJ'den alınan güç değeri de artar ve MGN değerinde değişme olur. Şekil 2.5'de değişik sıcaklık farkı değerleri için yük direncinin bir fonksiyonu olarak TEJ'in gerilim-güç ve gerilim-akım eğrileri ile birlikte MGN değerinin de değiştiği gösterilmiştir.

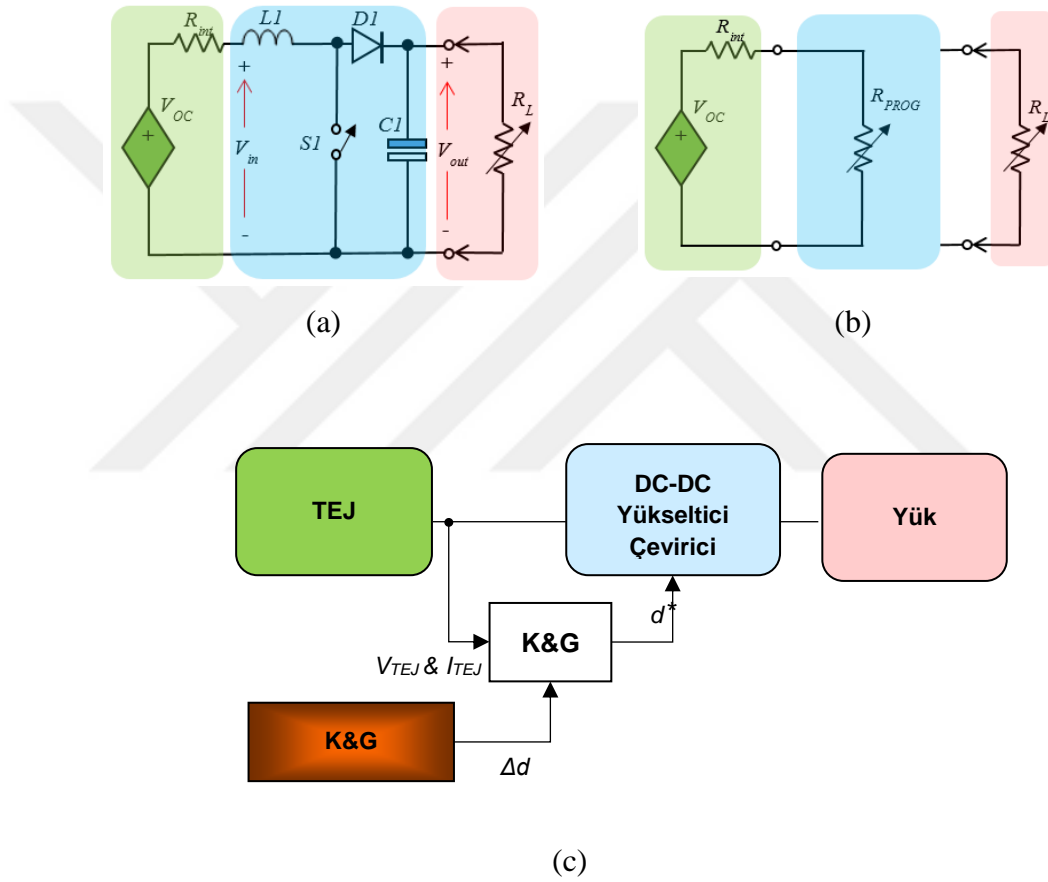


Şekil 2.5. Sıcaklık farkının bir fonksiyonu olarak TEJ akım, gerilim, güç ve MGN eğrileri

Eğer TEJ'e iç direncine eşit ve bir sabit yük bağlanırsa belirli bir sıcaklık farkı için MGN değeri yakalanabilir. Ama sıcaklık farkı değiştiğinde bu noktada kayma meydana gelir. Bu yükün uyarlamalı olması gerekir ki MGN değeri sürekli korunabilsin. Bu amaçla TEJ ile yük arasında bir uyarlama devresi konulur. Bu devreler de genelde hem güç düzenlemesi hem de MGN'ı yapan DC-DC çeviricilerdir.

2.2. DC-DC Yükseltici Çevirici

DC-DC çevirici, gerilim seviyesini bir değerden diğer değere verimli bir şekilde değiştiren elektronik cihazlardır. Yükseltici çevirici, DC gerilim seviyesini düşük gerilimden yüksek gerilim seviyesine çıkaran yalıtımsız çeviriciler grubundadır. Bir yükseltici çevirici Şekil 2.6(a)'da gösterilmiştir. Bu yükseltici çeviricinin bobin akımının programlı yapılmasıyla MGN yakalanır. Bu, Şekil 2.6(b)'de sunulduğu gibi MGNİ'nin prensibidir. MGNİ'li TEJ sisteminin blok diyagramı da Şekil 2.6(c)'de sunulmuştur.



Şekil 2.6. DC-DC (a) yükseltici çevirici devresi, (b) MGNİ prensibi ve (c) MGNİ blok diyagramı

DC-DC yükseltici çeviricide yükseltme işleminin yapılması $S1$ anahtarının yüksek frekanslarda çalıştırılmasıyla olur. Çıkış gerilimi anahtarın görev zamanı ile ayarlanır. $S1$ anahtarı kapatıldığında, akım $L1$ bobini ve $S1$ anahtarından akar ve enerji bobinin manyetik alanında depolanır. $D1$ diyotu üzerinden akım akmaz ve yük akımı

C1 kondansatörü üzerinden sağlanır. Sonra S1 anahtarı açıldığında, L1 bobin akımdaki düşüş onun geri elektromotor kuvveti ile hemen karşılanır ve L1 bobin gerilimi kaynak gerilimine eklenir. Akım L1 bobini, D1 diyotu ve R_L yükü üzerinden geçer ve aynı zamanda C1 kondansatörü şarj olur. Çıkış gerilimi bu yüzden giriş geriliminden büyüktür ve gerilim yükseltme eşitliği aşağıda ifade edildiği gibidir:

$$V_{out}/V_{in} = 1/(1 - D) \quad (2.5)$$

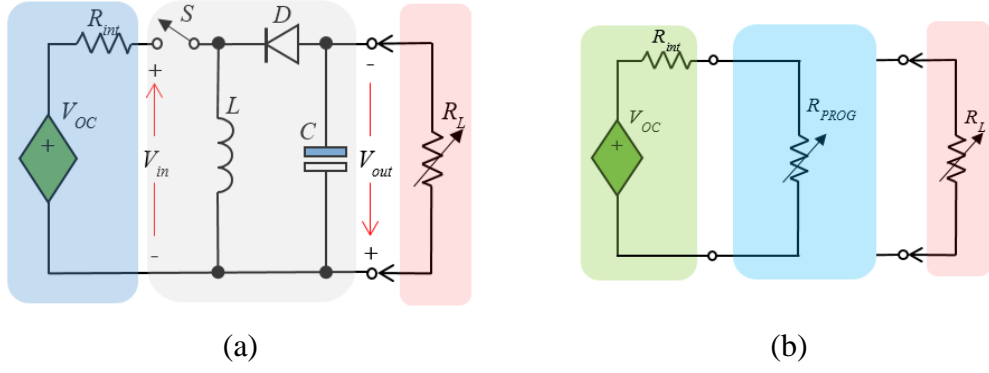
Burada V_{out} , V_{in} ve D , sırasıyla, çıkış gerilimi, giriş gerilimi ve görev çevrimidir. $I-D$ değeri S1 anahtarının açıklık zamanıyla orantılıdır. Bu yüzden yükseltme oranı aşağıdaki gibi de açıklanır:

$$V_{out}/V_{in} = T/T_{off} \quad (2.6)$$

Burada T anahtarlama zamanı (s) ve T_{off} anahtarın açık kalma zamanıdır (s).

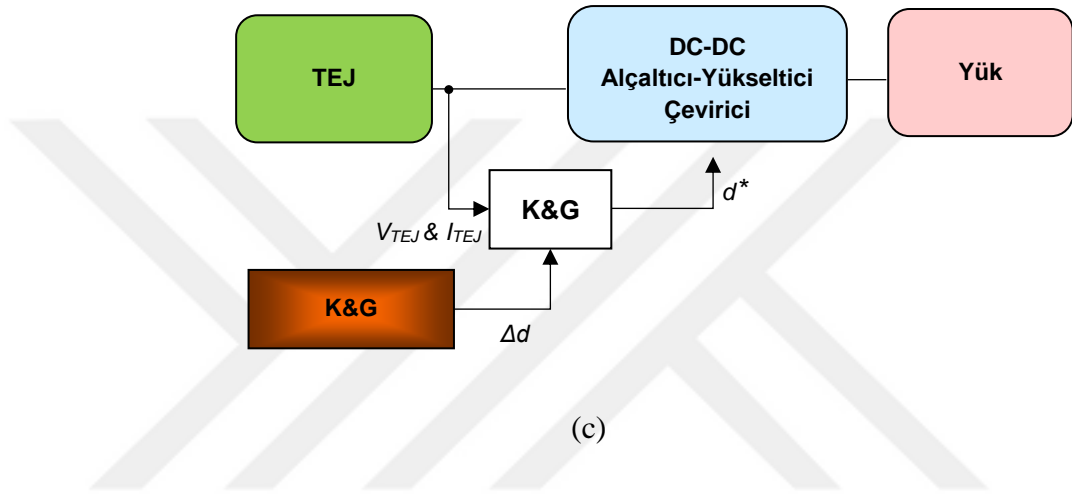
2.3. DC-DC Alçaltıcı-Yükseltici Çevirici

DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviriciler de aynı DC-DC yükseltici çeviriciler gibi TEJ gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte kullanıldığında güç düzenlemesi yaparak MGN takibine olanak sağlarlar. Bir alçaltıcı-yükseltici çeviricinin TEJ ile birlikte kullanımı Şekil 2.7(a)'da gösterilmiştir. Bu alçaltıcı-yükseltici çevirici temelde 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. Bobin ters gerilim üretir, akım diyot ve yük üzerinden akar. Esas itibarıyla, alçaltan-yükselten çeviricideki bobin TEJ'in yüküdür. Bu bobindeki depolanan akımın düzenlenmesiyle TEJ'in yükü programlı yapılmış olur [60]. Bu MGN'li çeviricinin çalışma prensibidir ve Şekil 2.7(b)'de verilmiştir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 2.7. DC-DC (a) alçaltıcı yükseltici çevirici devresi, (b) MGNİ prensibi ve (c) MGNİ blok diyagramı

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

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{D}{(1-D)} \quad (2.7)$$

Burada, V_{out} çıkış gerilimi, V_{in} giriş gerilimi ve D anahtarın akım geçirdiği görev zamanıdır. Denklem 2.8 anahtarın açık ve kapalı olması ile de ifade edilebilir:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{T_{on}}{T_{off}} \quad (2.8)$$

Burada, T_{on} anahtarın akım geçirme zamanı ve T_{off} ise anahtarın akım geçirmeme zamanıdır. Açma-kapama zamanı ilişkisi nedeniyle bu çeviricide görev

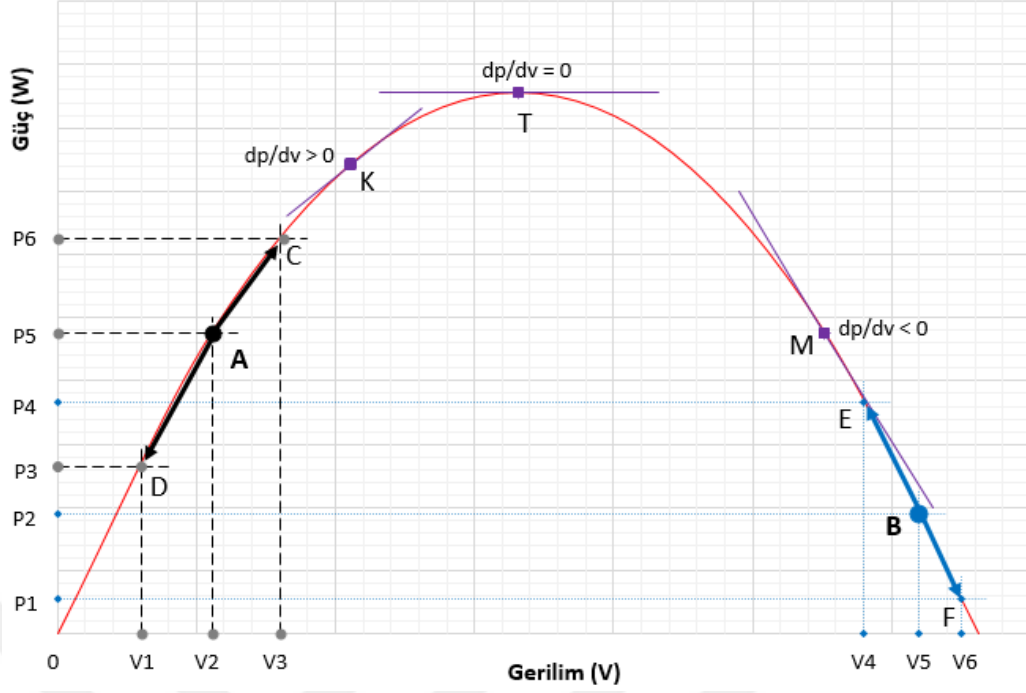
zamanı %50'den düşükse çıkış gerilimi düşer, büyükse tersi gerçekleşir. Çıkış gerilimi giriş gerilimi ile daima ters polaritededir. Çeviricideki anahtarın açma-kapama zamanının düzenlenmesiyle TEJ'den maksimum güç alınması sağlanır. Bu maksimum güçte bağlanan yüke aktarılır.

2.4. K&G MGNİ Prensibi

TEJ'lerde elektrik üretimini doğrudan etkileyen en önemli etken sıcaklık farkı ve üretilen gerilimdir. Eğer TEJ'den yüke transfer edilen güç en iyi değilse üretilen güç verimsiz demektir. Bu verimi artırmak MGNİ yöntemleri ile mümkündür. K&G MGNİ prensibi bu verimi artırmak için kullanılan yöntemlerden biridir.

TEJ'lerden güç alınırken yalnızca yükteki değişim değil aynı zamanda sıcaklıktaki değişim de MGN değerin de değişmesine netice verir. Bu durumda MGNİ gerekliliği ortaya çıkmaktadır. MGNİ'nin yapılması DC-DC çeviricilerdeki S anahtarının D değerinin değiştirilmesiyle yapılır. Bu durum MGNİ için Şekil 2.8'deki TEJ güç grafiğinde açıklanmıştır.

Bu yöntemde öncelikle TEJ'in çıkış gerilim (V_{TEJ}) ve akım (I_{TEJ}) değerleri ölçülerek ilk durumdaki TEJ'in çıkış gücü ($P1$) hesaplanır. İkinci adımda gerilimdeki veya doluluk-boşluk oranındaki (D) ufak değişimler göz önüne alınarak yeniden bir güç ($P2$) hesabı yapılır. $P1$ ve $P2$ kıyaslandığında eğer $P2$, $P1$ 'den daha büyük ise güç eğrisi üzerindeki hareket $P2$ yönünde devam eder. Bu durum bir TEJ'in güç eğrisinde Şekil 2.8'deki gibi gösterilmiştir. Eğrinin tepe noktasının eğimi sıfırdır veya bir başka ifadeyle gerilime göre güç değişimi sıfırdır. Güç eğrisindeki sol taraftaki gerilime göre değişim pozitif iken sağ taraftaki değişim negatiftir. Eğer tersi bir durum söz konusu ise güç eğrisi üzerindeki hareket de ters yönde olacaktır. Bu sayede TEJ'in maksimum güç noktası (P_{MGN}) bulunur ve dolayısıyla bu noktaya karşılık gelen gerilim değeri de (V_{MGN}) bulunabilir.



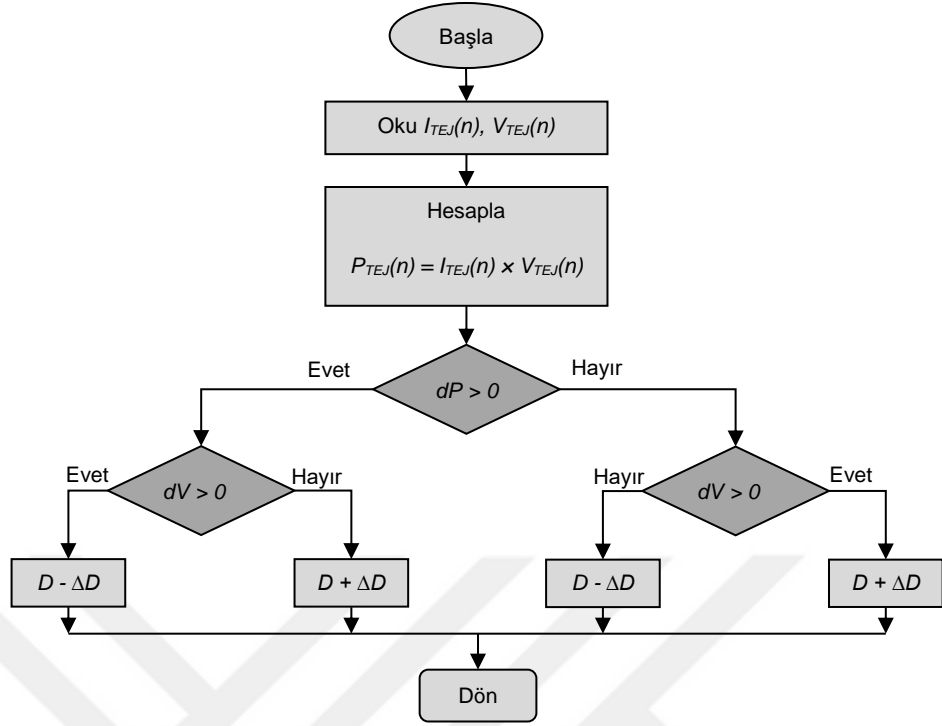
Şekil 2.8. TEJ gerilim-güç grafiğinde MGNI

MGNI prensibinin daha iyi anlaşılması için Şekil 2.8'deki gerilim-güç eğrisinde ilk önce TEJ'in çalışmaya A noktasında başladığını varsayalım. Hedef MGN olan T'nin yakalanmasıdır. A noktasındaki gerilim V_2 ve güç P_5 'dir. Gerilim değeri artırılıp V_2 'den V_3 noktasına getirilirse güç değeri de P_5 'den P_6 'ya gelir. Güç eğrisindeki yeni çalışma noktası C olur. Yine A noktasında iken gerilim değeri azaltılıp V_2 'den V_1 'e getirilirse güç değeri de P_5 'den P_3 'e gelir. Çalışma noktası güç eğrisinde D olur ve bu da güç değerinde düşmeye işaretler. Buna göre A noktasından T noktasına çıkılabilmesi için gerilimin sürekli artırılması gerekecektir. Diğer bir ifadeyle, gerilime göre gücün türevinin pozitif olduğu bölgede MGN'nin yakalanması için gerilim değeri artırılmalıdır. Diğer taraftan, B noktasında çalışıldığını düşünürsek, gerilim azaltılıp V_5 'den V_4 'e getirilirse, güç değeri de P_2 'den P_4 'e gelir. Yeni çalışma noktası E olur ve bu da güç değerinde bir artıştır. Ama B noktasında iken gerilim değeri V_5 'den V_6 'ya arttırılırsa güç değeri P_2 'den P_1 'e gelir güç değeri azalır ve yeni çalışma noktası güç eğrisinde F olur. Diğer bir deyişle, gerilime göre gücün türevinin negatif olduğu bölgede MGN'nin yakalanması için gerilim değeri düşürülmelidir. Bu olasılıklar Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. K&G MGNİ algoritma olasılıkları

Voltaj değişimi ΔV	Güç Değişimi ΔP	K&G MGNİ'nin yönü
+	+	+
+	-	-
-	+	-
-	-	+

Sistemin MGN noktasında çalıştırılması için oluşturulması gereken K&G MGNİ algoritması DC-DC çevirici için Şekil 2.9'da gösterilmiştir. İlk olarak akım ve gerilim değerleri ölçülür. İkinci olarak da güç değeri hesaplanır ve güçteki ve gerilimdeki değişim bulunur. Daha sonra güçteki değişim değeri sorgulanır. Eğer güç değişimi pozitif ise gerilim değişimi sorgulanır bu da pozitif ise D değeri ΔD kadar azaltılır. Burada gerilim değişimi negatif ise D değeri ΔD kadar arttırılır. Tekrar başa dönülür. Yeni bir ölçüm yapılarak güç değeri hesaplanır ve yeni güç ve gerilim değişimleri bulunur. Bu bulunan değerlere göre, güç değişimi negatif ise gerilim değişimi yine sorgulanır. Gerilim değişimi pozitif ise D değeri ΔD kadar arttırılır. Gerilim değişimi negatif ise D değeri ΔD kadar azaltılır. Bu süreç MGN değerine kadar devam ettirilir.



Şekil 2.9. K&G MGNİ algoritması

Bu K&G algoritmasında bir dezavantaj olarak MGN noktası bulunmasına rağmen bu noktada hala süreç çalıştığı için bu nokta etrafında salınımlar meydana gelir. Büyük ΔD aralıkları, hızlı MGN yakalanmasını netice verirken MGN’de salınımların büyüklüğüne neden olur. Diğer taraftan, küçük ΔD aralıkları yavaş MGN yakalanmasını netice verirken MGN salınımların büyüklüğünü azaltır. Diğer bir çekince de sıcaklık farkı değiştiğinde MGN değişecek ve bu durumda yeni MGN’nin bulunması için ayrı bir salınım da meydana gelecektir.

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

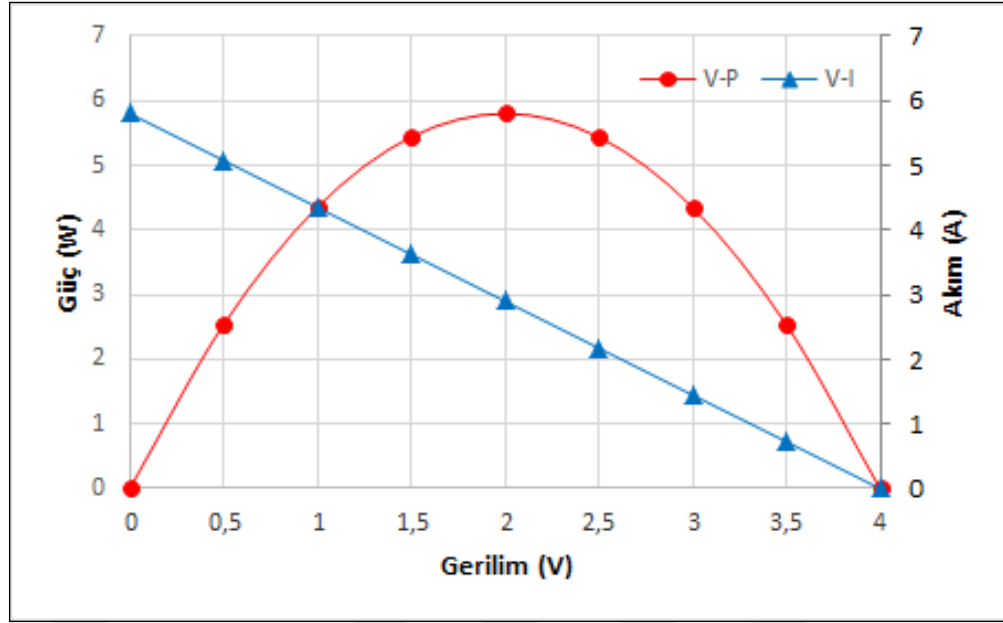
Bu bölümde; TEJ üreticilerin kataloglarında sundukları Seebeck sabiti ve sıcaklık değerleri ile modellenmesi, seri ve paralel bağlanmasındaki yüke bağlı olarak güç değişimi verilmiştir. Ayrıca MGNİ yapılması için K&G MGNİ'li DC-DC hem bir yükseltici hem de bir alçaltıcı-yükseltici çeviricilerin yük ve sıcaklık farkı değişimleri için MATLAB®/Simulink® SimPower System ortamı ile modellemeleri açıklanmıştır.

3.1. TEJ MATLAB®/Simulink® Modeli

Çalışmada, TES Termoelektrik Sistemler Ltd. Şti. firmasının ürettiği ve Tablo 3.1'de özellikleri sunulan TEJ'lerin özellikleri kullanılmıştır. Modellemesi yapılan TEJ'in gerilim-güç ve gerilim-akım eğrileri de Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

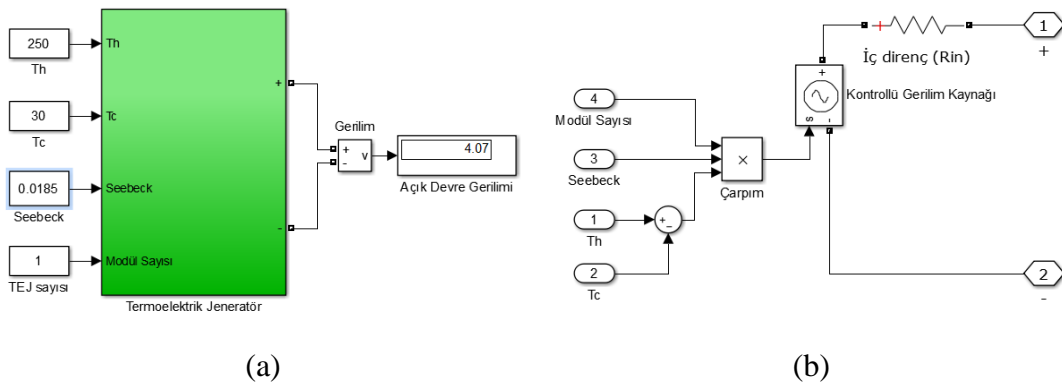
Tablo 3.1. Kullanılan TEJ karakteristiklikleri

No	Özellikler	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



Şekil 3.1. Modellemesi yapılan TEJ'in 220°C sıcaklık farkı için gerilim-güç ve gerilim-akım grafikleri

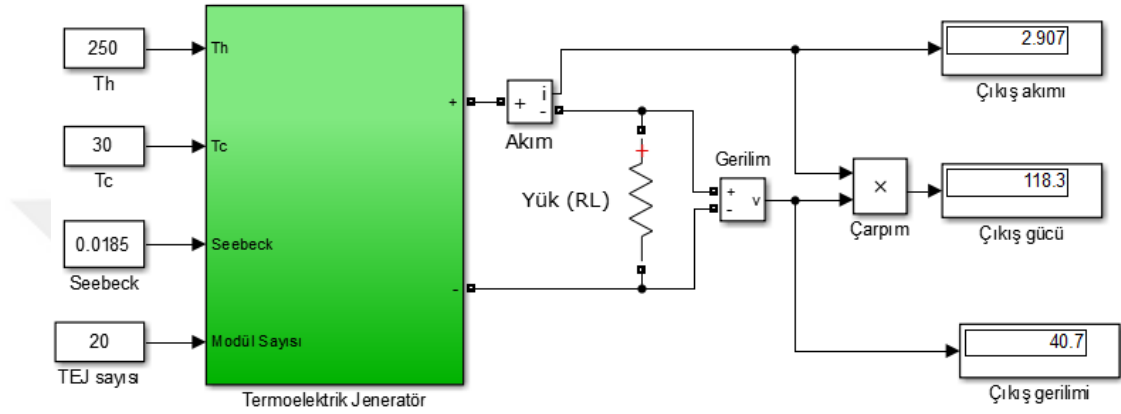
Modellemesi ve benzetimleri yapılan TEJ'in sıcaklığa bağımlı gerilim kaynağı olarak MATLAB®/Simulink® modellemesi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu modellemede TEJ'den çıkış gücünün elde edilmesi Seebeck sabiti ve sıcak ve soğuk taraf sıcaklığı ile yapılmıştır ve bir tane TEJ kullanılmıştır. Sıcaklık farkının bulunması ve iç direnç değeri modelleme içerisinde gösterilmiştir. Burada TEJ, sıcaklık bağımlı kontrollü gerilim kaynağıdır.



Şekil 3.2. TEJ modelleme (a) genel ve (b) iç yapısı

3.2. Seri Bağlı Çoklu TEJ ve Yük Direnci ile Modelleme

İlk olarak, TEJ sisteminde gerekli gücün sağlanması için 20 tane TEJ'in seri olarak bağlanıldığı varsayılmıştır. Bu durumda TEJ gerilimi ve gücü de artacaktır. TEJ iç direnci de bağlanan TEJ adedi ile doğrusal olarak artacaktır. İç direnç değeri $0,7 \times 20 = 14 \Omega$ olur. Seri bağlı TEJ sayısı artırılmış sistemin yük bağlantısı modellenmesi Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

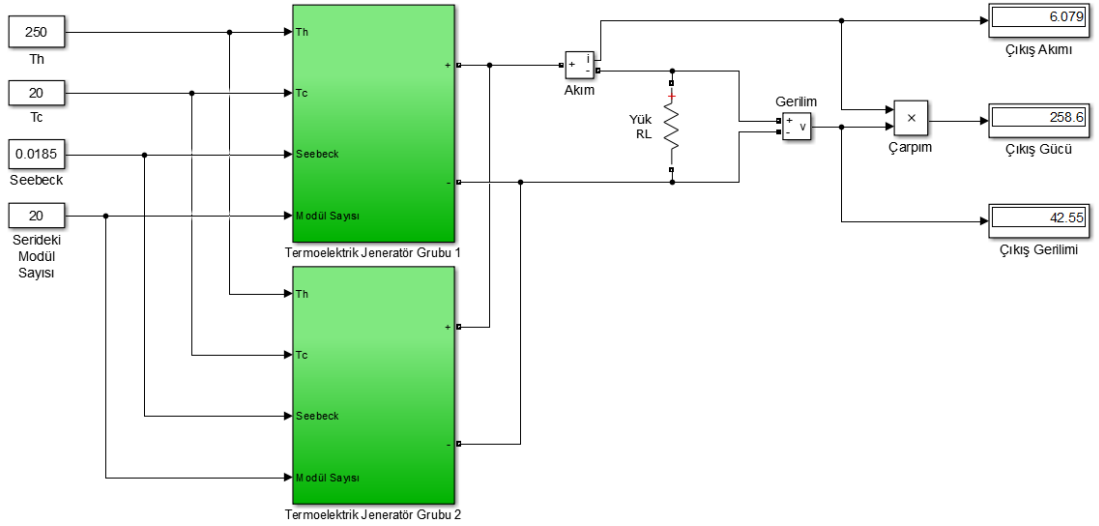


Şekil 3.3. Seri bağlı TEJ sayısı artırılmış sistem modeline yük bağlantısı

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

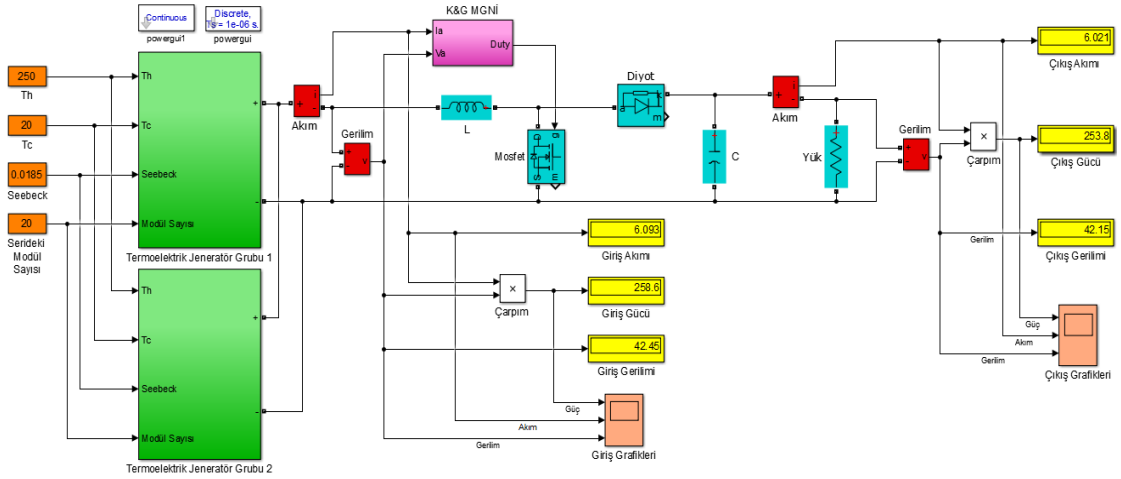
TEJ'lerden elde edilen gücün artırılması bunların seri ve paralel bağlanmasıyla yapılır. Seri ve paralel bağlanan TEJ'lerin modeli Şekil 3.4'de gösterilmiştir. TEJ modelindeki seri bağlı modül sayısı olarak 20 girilmiştir. Bu durumda bu modelin iç direnci $0,7 \times 20 = 14 \Omega$ 'dur. Bu seri bağlı modele, yine gücün artırılması için 20 tane TEJ'den oluşan ayrı bir model de paralel eklenmiştir. Bu modelin ilave edilmesiyle TEJ iç direnç değeri $14/2 = 7 \Omega$ olmuştur. Ayrıca yük ve sıcaklık değişimlerine göre elde edilecek gücün ölçülmesi için gerekli akım, gerilim ve güç göstergeleri ilave edilmiştir.



Şekil 3.4. Seri ve paralel bağlı TEJ sistem modeli

3.4. TEJ Sistemini DC-DC Yükseltici Çevirici ile Modelleme

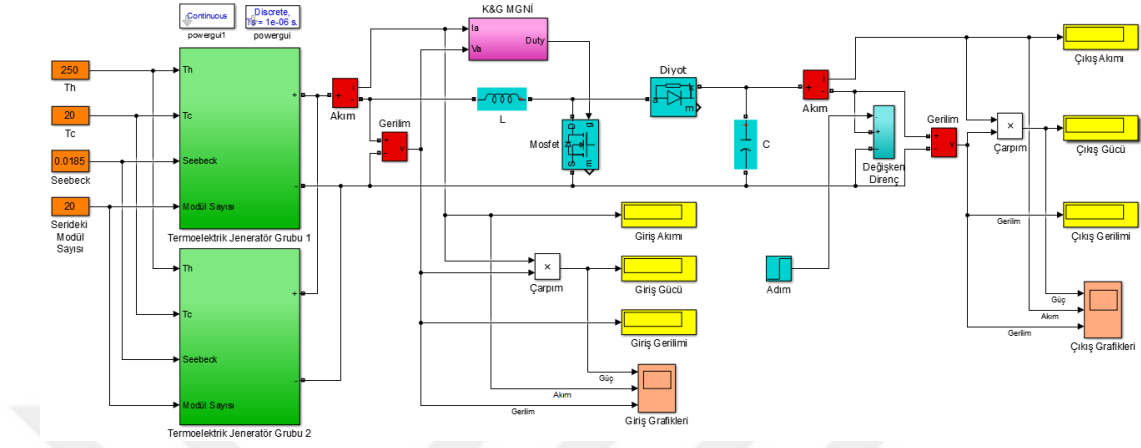
Seri ve paralel bağlı TEJ'lerden elde edilen gücün yük ve sıcaklık değişimlerinden en az etkilenecek MGN değeri yakalanması ve MGN izlemesinin gerçekleştirilmesi için K&G MGN'li DC-DC yükseltici çevirici devresi Şekil 3.5'deki gibi modele dâhil edilmiştir. Şekil 3.5'de alınan değerler sabit 7Ω yük bağlandığında alınan değerlerdir.



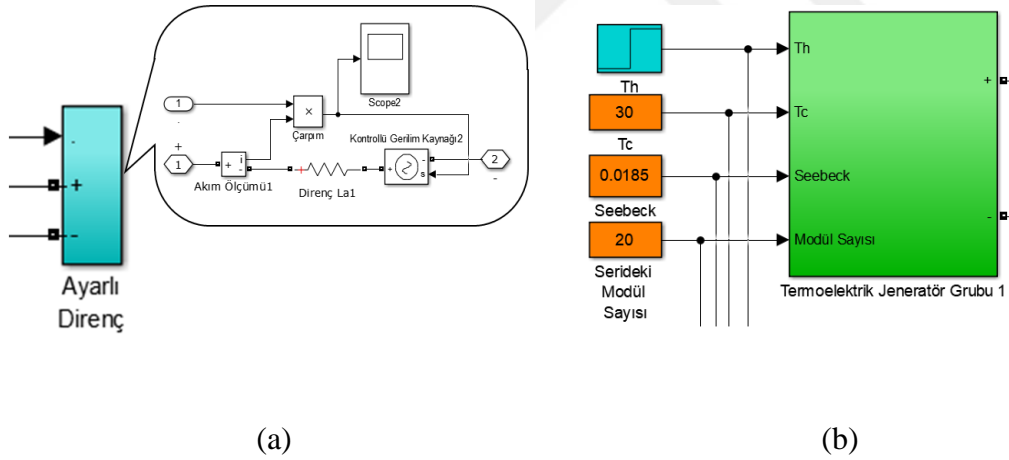
Şekil 3.5. TEJ sistemi ve K&G MGN'li DC-DC yükseltici çevirici modeli

Diğer taraftan, DC-DC yükseltici çevirici çıkışına bir ayarlı direnç takılmıştır. Bununla değişik yük değerlerinde DC-DC yükseltici çevirici MGN değeri izlemesi

belirlenmiştir. Yük olarak ayarlı direnç bağlanması ile oluşan devre şeması Şekil 3.6’da verilmiştir. Ayarlı direncin ayrıntılı modellenmesi ise Şekil 3.7’de detaylandırılmıştır.

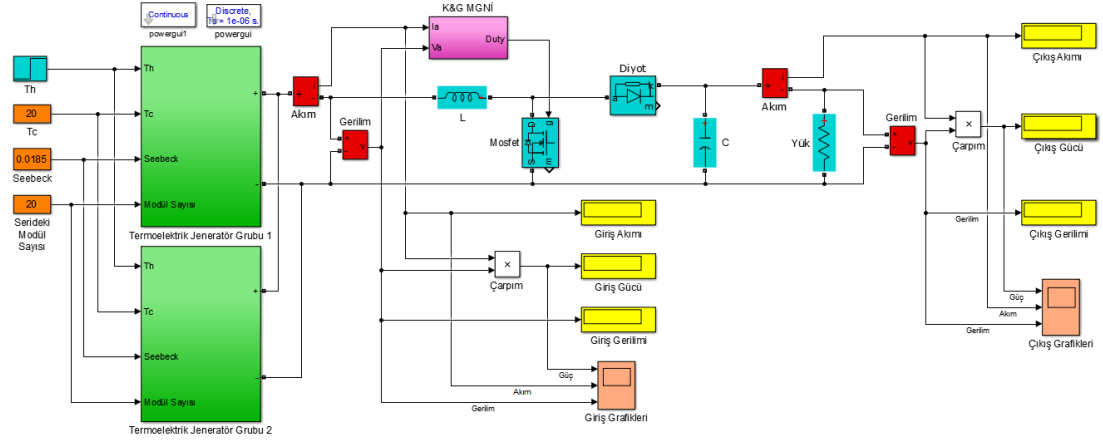


Şekil 3.6. Değişken yük bağlı TEJ sistemi ve K&G MGNİ’li DC-DC yükseltici çevirici modeli



Şekil 3.7. TEJ (a) ayarlı direnç ve (b) sıcaklık farkı modellenmesi

Diğer taraftan sıcaklık değişimindeki K&G MGNİ’li DC-DC yükseltici çevirici reaksiyonunun tespit edilmesi için de soğuk taraf sıcaklığı sabit tutulmuş ve sıcak taraf girişine değişken bir sinyal girişi bağlanmıştır. Bunun modellenmesi de Şekil 3.8’de verilmiştir.



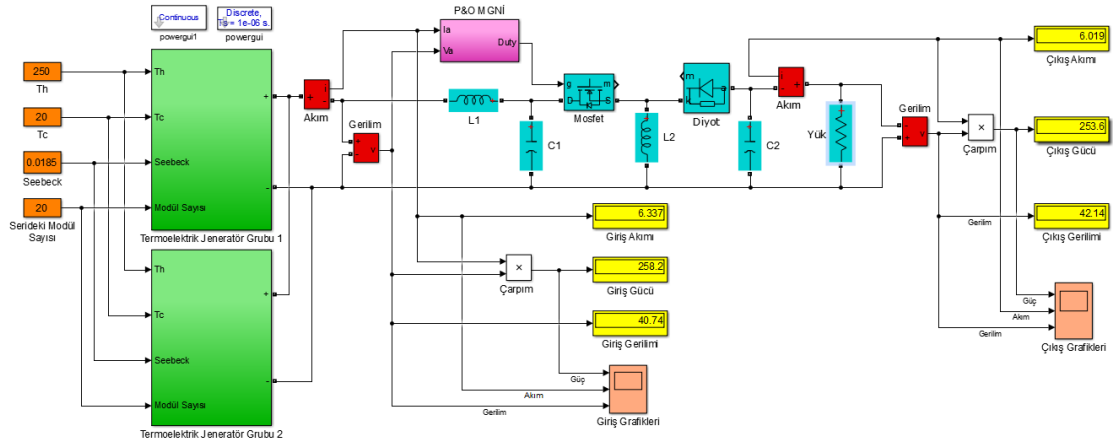
Şekil 3.8. Değişken sıcaklığa bağlı TEJ sistemi ve K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici modeli

Şekillerde MGNİ'nin ne derece yapıldığının belirlenmesi için hem TEJ çıkışına hem de K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici çıkışına gerekli olan akım, gerilim ve güç değerlerini gösteren ekranlar bağlanmıştır. Bunların zamana bağlı tepkilerin grafiklerini de görülmesi için yine hem TEJ çıkışına hem de K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici çıkışına birer osilaskop takılmıştır.

3.5. TEJ Sistemini DC-DC Alçaltıcı-Yükselticili Çevirici ile Modelleme

Seri ve paralel bağlı TEJ'lerden elde edilen gücün yük ve sıcaklık değişimlerinden en az etkilenecek MGN değerin yakalanması ve MGNİ izlemesinin gerçekleştirilmesi için aynı zamanda K&G MGNİ'li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici devresi Şekil 3.9'deki gibi modele dâhil edilmiştir. DC-DC yükseltici çeviricide olduğu gibi burada da önce sıcaklık farkı sabit tutularak TEG çıkışındaki ve yük üzerindeki akım, gerilim ve güç değerleri karşılaştırılmıştır.

Diğer taraftan, DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici çıkışına bir ayarlı direnç takılmıştır. Bununla değişik yük değerlerinde DC-DC yükseltici çevirici MGNİ değerini izlemesi belirlenmiştir. Diğer taraftan sıcaklık değişimindeki K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici reaksiyonunun tespit edilmesi için de soğuk taraf sıcaklığı sabit tutulmuş ve sıcak taraf girişine değişken bir sinyal girişi bağlanmıştır. Tüm bunlar Şekil 3.9'de belirtilen benzetim üzerinden alınmıştır.

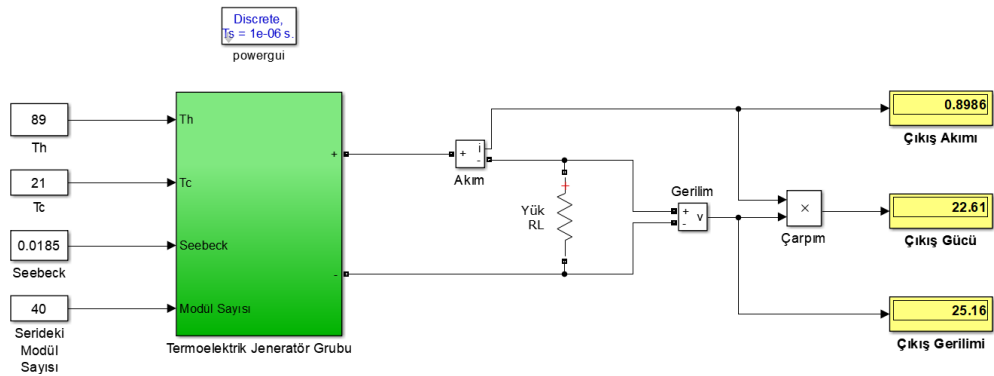


Şekil 3.9. TEJ sistemi ve K&G MGNİ'li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici modeli

MGNİ'nin ne derece yapıldığının belirlenmesi için hem TEJ çıkışına hem de K&G MGNİ'li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici çıkışına gerekli olan akım, gerilim ve güç değerlerini gösteren ekranlar bağlanmıştır. Bunların zamana bağlı tepkilerinin grafiklerinin de görülmesi için yine hem TEJ çıkışına hem de K&G MGNİ'li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici çıkışına birer osiloskop takılmıştır.

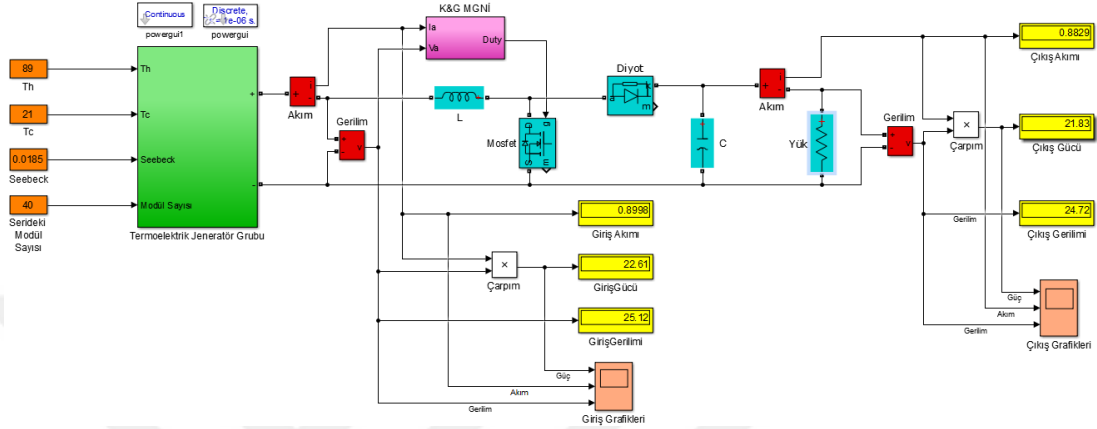
3.6. Deneysel Doğrulama için MGNİ'siz ve MGNİ'li MATLAB®/Simulink® Benzetimleri

Deney sonuçları Şekil 3.10'da gösterilen MATLAB®/Simulink® benzetiminde olduğu gibi önce MGNİ yöntemi kullanılmadan alınmıştır. Burada iç direnç değeri 0,7 Ω olan 40 tane seri bağlı TEJ yapısının T_H değeri 89 $^{\circ}\text{C}$ olurken T_C değeri 21 $^{\circ}\text{C}$ olmuştur. Farklı değerlerde yükler bağlanarak sonuçlar alınmıştır.



Şekil 3.10. TEJ sistemine doğrudan yük bağlı deney düzeneği MATLAB®/Simulink® benzetimi

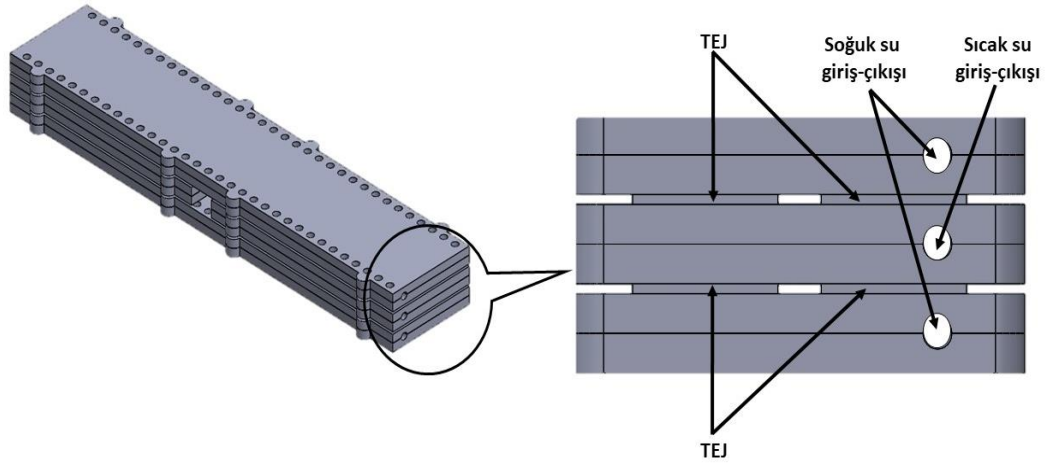
Daha sonra deney sonuçları Şekil 3.11’de gösterilen MATLAB®/Simulink® benzetiminde olduğu gibi K&G MGNİ’li DC-DC yükseltici dönüştürücü kullanılarak alınmıştır. Burda da iç direnç değeri $0,7 \Omega$ olan 40 tane seri bağlı TEJ yapısının T_H değeri 89°C olurken T_C değeri 21°C olmuştur. Farklı değerlerde yükler bağlanarak sonuçlar alınmıştır. TEJ’lerin toplam iç direnci $40 \times 0,7 = 28 \Omega$ olmuştur.



Şekil 3.11. TEJ K&G MGNİ’li DC-DC yükseltici çevirici deney düzeneği MATLAB®/Simulink® benzetimi

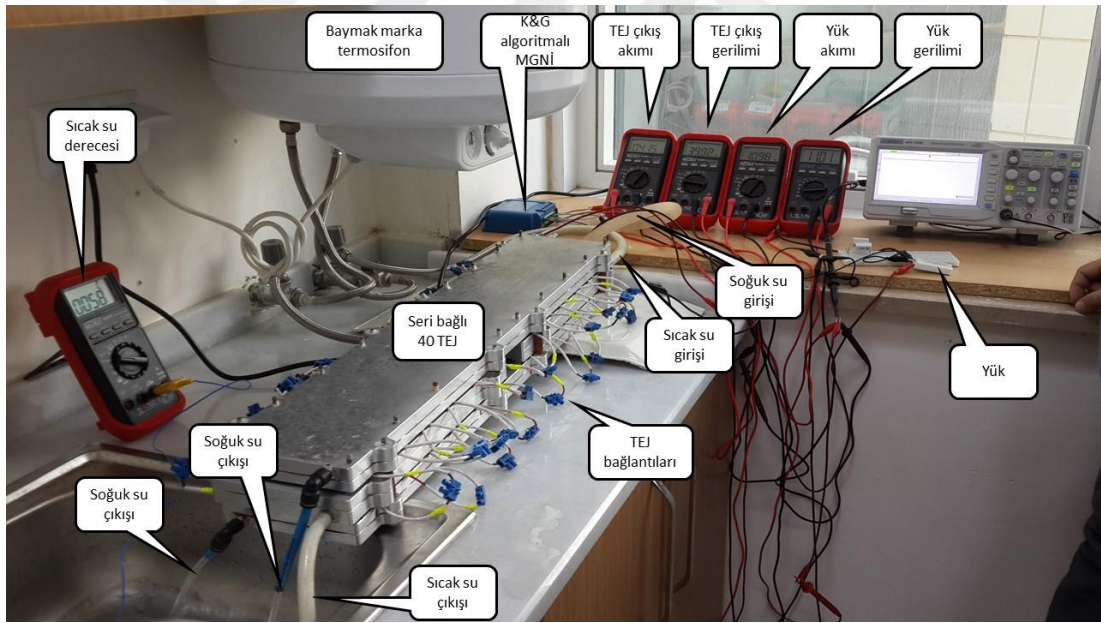
3.7. TEJ Deney Düzeneği

Deney sonuçlarını elde edebilmek için TES Termoelektrik Sistemler Ltd. Şti. firmasının ürettiği Tablo 3.1’de değerleri verilmiş olan 40 TEJ modülünün seri bağlanması ile oluşturulan düzenek kullanılmıştır. Şekil 3.12’de görüldüğü gibi iki sıra halinde 20 TEJ, alüminyumdan yapılmış bir sistemin arasına yerleştirilmiştir. TEJ’lerin bir yüzeylerinden sıcak su, diğer yüzeylerinden ise soğuk su geçirilerek sıcaklık farkı oluşturulmuştur.



Şekil 3.12 TEJ düzeneği yapısı

MATLAB®/Simulink® sonuçları ile deneysel sonuçlarını karşılaştırabilmek için laboratuvar ortamında oluşturulan uygulama düzeneği Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.13. TEJ deney düzeneği

TEJ düzeneğinin sıcaklık farkını oluşturmak için sıcak taraf sıcaklığı Baymak marka bir termosifon ile soğuk taraf sıcaklığı da şebeke suyuna bağlanarak sağlanmıştır. Yük olarak taş dirençler kullanılmıştır.

Soğuk yüzey sıcaklığını ölçerken TEJ düzeneği soğuk su çıkışına K tipi termokupl bağlanarak Brymen marka multimetre yardımı ile ölçülmüştür. Sıcak yüzey sıcaklığı ise termosifonun kendi üzerinde bulunan termometre göstergesi üzerinde yazan değer alınmıştır. TEJ yüzeyinin sıcak taraf sıcaklığı 89 °C olurken soğuk taraf sıcaklığı 21 °C olmuştur. Bu sıcaklık değerlerinde deney sonuçları alınmıştır.

K&G MGNİ algoritmalı DC-DC yükseltici çevirici üzerinde bulunan mosfeti tetiklemek için Arduino UNO mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Tetikleme frekansı 20 kHz ile yapılmıştır. TEJ çıkışındaki akım ve gerilim değerlerinin ölçülüp K&G MGNİ algoritmasında işlenebilmesi için ACS712 akım-gerilim sensörü kullanılarak Arduino UNO ile analog değerler ölçülmüştür. TEJ'lerin çıkışındaki ve yük üzerindeki akım, gerilim değerleri Brymen marka multimetreler yardımı ile anlık olarak izlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Burada TEJ modellemesinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeleri üç aşamalı olarak sunulmuştur. İlk olarak seri ve paralel bağlanan ama MGNİ olmayan modellemeden alınan sonuçlar ve değerlendirmeleri verilmiştir. Daha sonra da K&G MGNİ'li hem yükseltici çeviricinin hem de alçaltıcı-yükseltici çeviricinin modelleme sonuçları ve değerlendirmeleri açıklanmış ve yükseltici çeviricinin değerleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Son olarak da belirli bir modelde deney ve MATLAB®/Simulink® benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

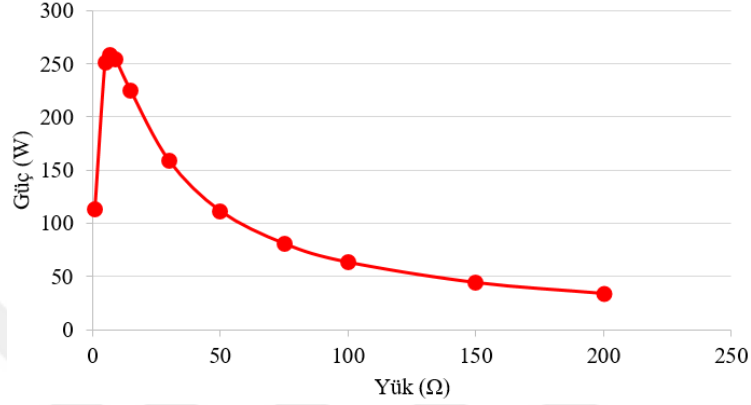
4.1. TEJ K&G MGNİ'li DC-DC Çevirici Kullanılmaksızın Çıktıları

Bu bölümde elde edilen sonuçlar Şekil 3.4'de gösterilen modelden alınmıştır. K&G MGNİ yöntemi kullanılmayan bu modellemede ilk olarak sıcaklıklar sabit tutulmuş ve TEJ çıkışına değişken yük doğrudan bağlanmıştır. Seçilen modelin sıcak taraf sıcaklığı verilen TEJ katalog bilgilerine göre 250°C'ye kadardır. Soğuk taraf sıcaklığı da şebeke suyu ile soğutulması düşünülen bir sistem için 20°C olarak belirlenmiştir. Yük değişimi de 1 Ω'dan 200 Ω'a kademeli bir şekilde arttırılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Modellenen TEJ sistemine doğrudan yük bağlandığında yük üzerinden alınan sonuçlar

Yüzey Sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω) R_L	Akım (A) I	Gerilim (V) V	Güç (W) P
T_H	T_C	R_L	I_{TEJ}	V_{TEJ}	P_{TEJ}
250	20	1	10,640	10,64	113,2
		5	7,092	35,46	251,5
		7	6,079	42,55	258,6
		9	5,319	47,87	254,6
		15	3,868	58,02	224,4
		30	2,300	69,00	158,7
		50	1,493	74,65	111,4
		75	1,038	77,84	80,78
		100	0,795	79,53	63,25
		150	0,542	81,31	44,07
		200	0,411	82,22	33,8

Tablo 4.1’de yük değeri 7Ω olduğunda en yüksek güç TEJ’den elde edilmiştir. Bunun altında ve üstündeki değerlerde elde edilen güçte düşme olmuştur. Yük değeri bu empedans eşleşmesi değerinden uzaklaştıkça daha da düşmüştür. Nihai olarak 200Ω değerinde en düşük güç elde edilmiştir. Tablo 4.1’de verilen yük değişiminin bir fonksiyonu olarak ölçülen güç değerlerine ait grafik Şekil 4.1’de verilmiştir.



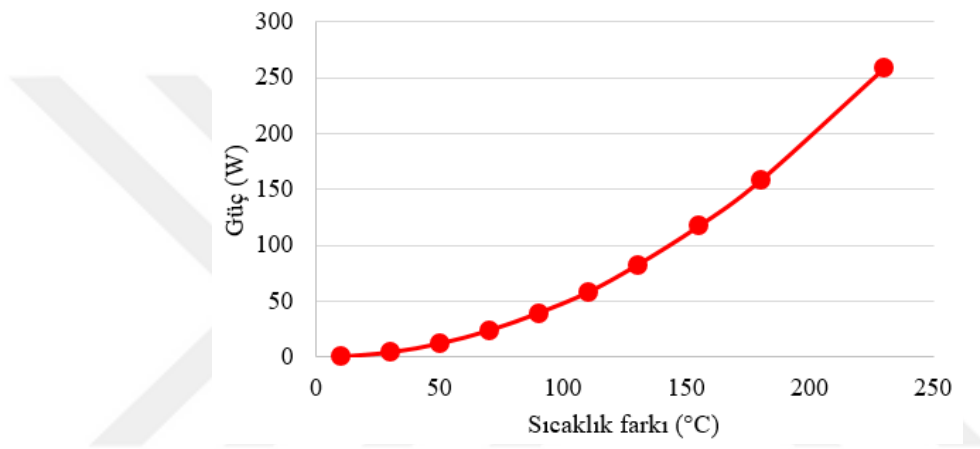
Şekil 4.1. TEJ sistemine doğrudan yük bağlandığında yük üzerinden alınan sonuçlar

Sıcaklık değişim tepkisinin ölçülmesi için MGN'nın yakalandığı yük direnci 7Ω 'da sabit tutularak sıcak taraf sıcaklığı değiştirilmiştir. Soğuk taraf sıcaklığı da 20°C değerine sabitlenmiştir. Sıcak taraf sıcaklığı kademeli olarak 20°C 'den 250°C değerine kadar arttırılmıştır. Bu durumda elde edilen sonuçlar Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. TEJ sistemine doğrudan yük direnci bağlandığında değişken sıcaklıklarda yük üzerinden alınan sonuçlar

Yüzey Sıcaklıkları ($^\circ\text{C}$)		Yük (Ω)	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
T_H	T_C	R_L	I	V	P
30	20	7	0,264	1,85	0,488
50			0,792	5,55	4,4
70			1,321	9,25	12,22
90			1,85	12,95	23,96
110			2,379	16,65	39,6
130			2,907	20,35	58,16
150			3,436	24,05	82,63
175			4,096	28,67	117,5
200			4,757	33,3	158,4
250			6,079	42,55	258,6

Tablo 4.2'deki sıcaklık değerlerine dikkat edildiğinde sıcaklık farkının artışı elde edilen güç değerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Jeotermal alanlarda atık ısılarından TEJ'ler yardımıyla elektrik enerjisi üretimi düşünüldüğünde bu değerlere çıkılması mümkün olmayabilir. Ama 100°C sıcaklık farkının elde edilmesi imkân dâhilindedir. Bu durumda da 40 tane TEJ'den oluşan bir sistemde yaklaşık 30 W'lık bir güç 7 Ω yük için elde edilebilecektir. Elde edilen güç değerinde sıcaklık farkının artmasıyla TEJ iç direnç değişiminin gerçekleşmesi de bir rol oynamaktadır. Tablo 4.2'de verilen sıcaklık farkı değişiminin bir fonksiyonu olarak ölçülen güç değerlerine ait grafik Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. TEJ sistemine doğrudan yük direnci bağlandığında değişken sıcaklıklarda yük üzerinden alınan sonuçlar

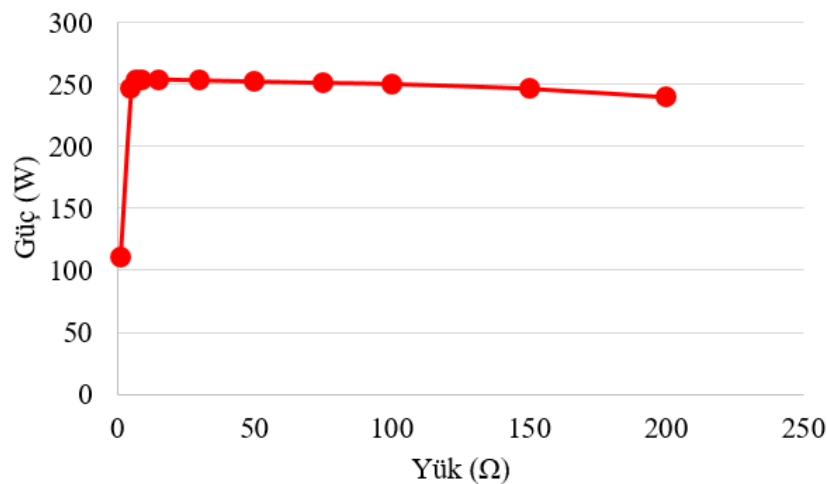
4.2. TEJ K&G MGNİ'li DC-DC Yükseltici Çevirici Çıktıları

Bu bölümde elde edilen sonuçlar Şekil 3.5'de gösterilen modelden alınmıştır. İlk olarak sıcaklık değerleri sabit tutulmuş yük direnci değiştirilmiştir. İkinci olarak da MGN değerindeki yük direnci sabit tutularak sıcak yüzeyin sıcaklığı kademeli olarak değiştirilmiştir. Bu değerler alınırken yük direnci değeri 7 Ω değerinde sabitlenmiştir. Çünkü bu değer 40 tane bağlanmış TEJ'in MGN'nin eş değer iç direncidir. Hem TEJ çıkış verileri hem de K&G MGNİ'li yükseltici çevirici çıkış verileri Tablo 4.3'de gösterilmiştir. Ayrıca farklı yük değerleri için MGNİ'nin ne kadar izlenebildiğini gösteren yüzde değerleri de verilmiştir. T = 1 s için bu değerler alınmıştır.

Tablo 4.3. Farklı yüklerde K&G MGNI'li DC-DC yükseltici çevirici giriş ve çıkış sonuçları

Yüzey Sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω) R_L	Akım (A) I		Gerilim (V) V		Güç (W) P		MGNI %
T_H	T_C		Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	
250	20	1	10,54	10,54	11,34	10,54	119,5	111	92,89
		5	7,025	7,025	35,91	35,12	252,4	246,7	97,74
		7	6,055	6,021	42,72	42,15	258,6	253,8	98,14
		9	6,301	5,313	40,99	47,82	258,3	254,1	98,37
		15	6,488	4,115	39,69	61,73	257,5	254,0	98,64
		30	6,056	2,905	42,72	87,16	258,6	253,2	97,91
		50	5,818	2,246	44,37	112,3	258,2	252,3	97,71
		75	5,673	1,83	45,39	137,3	257,5	251,2	97,55
		100	5,567	1,582	46,13	158,2	256,8	250,2	97,42
		150	5,452	2,282	46,93	192,2	255,9	246,4	96,29
		200	5,351	1,094	47,64	218,9	254,9	239,6	94,00

Tablo 4.3 incelendiğinde, empedans eşleşmesi olmasa dahi MGNI sayesinde TEJ'den elde edilen gücün hemen hemen hepsinin çıkışa aktarılabilirdiği görülmektedir. En yüksek başarımın da 15 Ω için gerçekleştiği tespit edilmiştir. 40 TEJ'den oluşan sistemin empedans eşleşmesi 7 Ω olsa da burada güç aktarımı 253,8 W iken en yüksek güç aktarımının yapıldığı 15 Ω için bu değer 254 W olmuştur. Tablo 4.3'de verilen yük değişiminin bir fonksiyonu olarak K&G MGNI'li DC-DC yükseltici çeviriciden ölçülen güç değerlerine ait grafik Şekil 4.3'de verilmiştir.



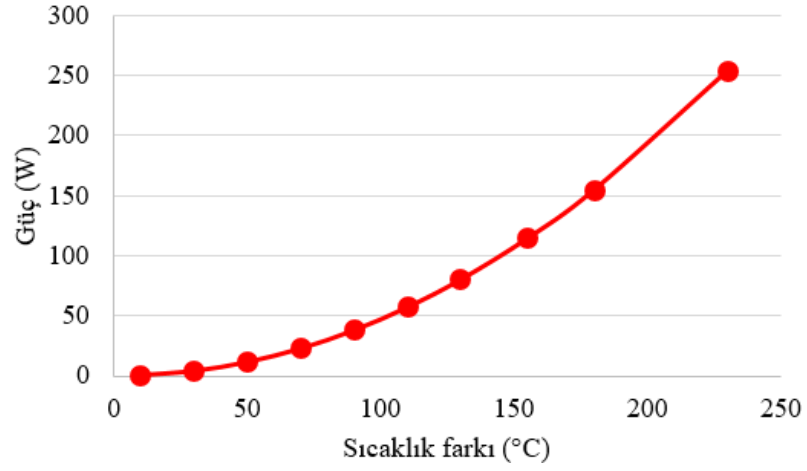
Şekil 4.3. Farklı yüklerde K&G MGNI'li DC-DC yükseltici çevirici sistemde yük üzerinden alınan sonuçlar

Yük direnci 7Ω 'da sabit tutularak sıcaklık değiştirildiğinde TEJ'in ve K&G MGNI'li yükseltici çeviricili çıkışından elde edilen sonuçlar da Tablo 4.4'de detaylandırılmıştır. Bu modellemede elde edilen sonuçlar Şekil 3.8'de gösterilen modelden alınmıştır.

Tablo 4.4. Değişken sıcaklıklarda K&G MGNI'li DC-DC yükseltici çevirici giriş ve çıkış sonuçları

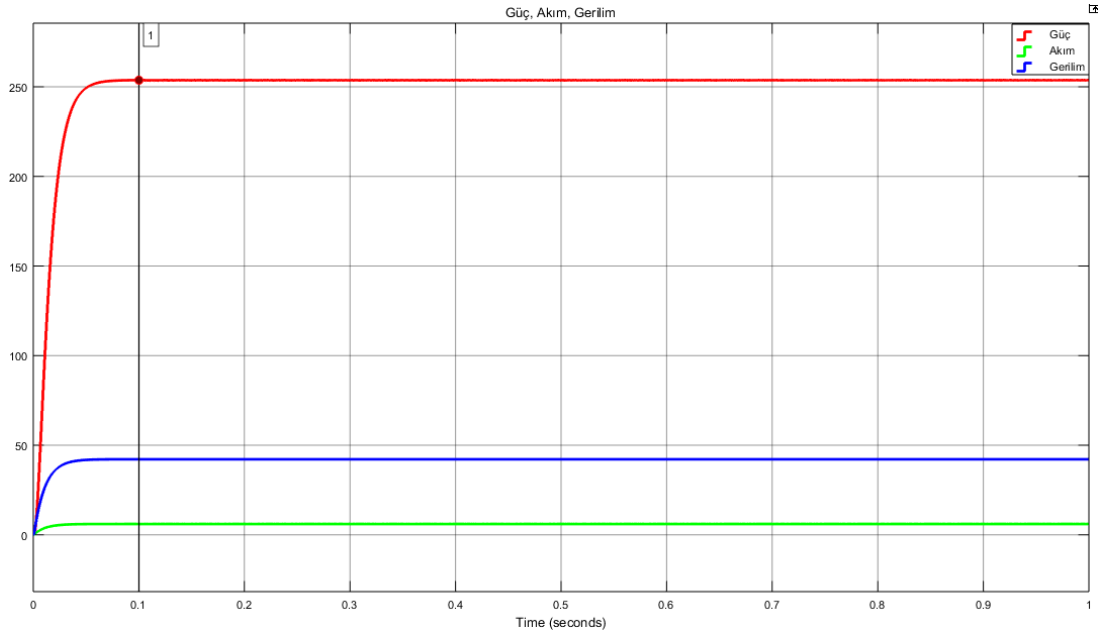
Yüzey Sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω) R_L	Akım (A) I		Gerilim (V) V		Güç (W) P		MGNI %
T_H	T_C		Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	
30	20	7	0,282	0,213	1,725	1,49	0,488	0,317	64,96
50			0,806	0,738	5,46	5,163	4,4	3,808	86,55
70			1,313	1,265	9,31	8,858	12,22	11,21	91,73
90			1,85	1,794	13,06	15,56	23,96	22,52	93,99
110			2,49	2,321	15,87	16,25	39,6	37,71	95,23
130			2,91	2,850	20,32	19,95	59,16	56,87	96,13
150			3,416	3,379	24,19	23,65	82,63	79,91	96,71
175			4,069	4,039	28,87	28,28	117,5	114,2	97,19
200			4,749	4,7	33,36	32,9	158,4	154,6	97,60
250			6,055	6,021	42,72	42,15	258,6	253,8	98,14

Tablo 4.4 verilerine bağlı olarak küçük sıcaklık farklarında elde edilen güç değerlerinin çok düşük güçlü elektronik cihazlara yetecek kadar olduğu görülmektedir. Ama büyük sıcaklık farklarında ise güç değerindeki artış çok belirgindir. Ayrıca küçük sıcaklık farkı değerlerinde MGNI'nin aktarım oranı da yüksek sıcaklık farklarına göre düşüktür. Tablo 4.4'de verilen sıcaklık farkı değişiminin bir fonksiyonu olarak K&G MGNI'li DC-DC yükseltici çeviriciden ölçülen güç değerlerine ait grafik değeri Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Değişken sıcaklıklarda K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici sistemde yük üzerinden alınan sonuçlar

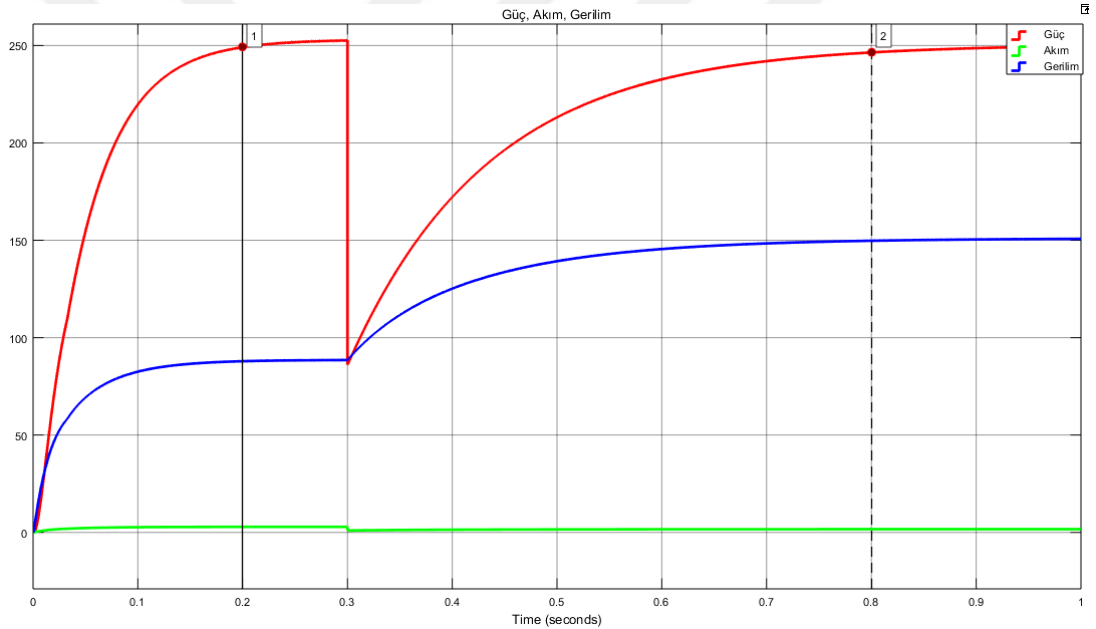
TEJ sisteminin K&G MGNİ yükseltici çeviricili modellemesinin yük ve sıcaklık değişmeden zamana bağlı olarak tepkileri alınmıştır. Modelde yük ve sıcaklık sabit tutularak MGN değeri izlenmesi ölçülmüştür. K&G MGNİ yükseltici çeviricili TEJ modelinin yük değişimine tepkisi Şekil 4.5'de verilmiştir. Yük olarak en yüksek MGNİ'nin elde edildiği empedans eşleşmesini sağlayan 7Ω kullanılmıştır. Bu durumda iken sıcak taraf sıcaklığı 250°C ve soğuk taraf sıcaklığı da 20°C 'dir.



Şekil 4.5. K&G MGNİ DC-DC yükseltici çeviricinin sabit yük ve sıcaklıktaki tepkisi

Şekil 4.5’de MGNİ’li TEJ sistemi MGN değerini bulma zamanı 0,1 s’nin altında olmuştur. Bulma zamanı 1 nolu çizgi yardımıyla gösterilmiştir. Bu süre yük direnci arttıkça MGN değerini bulma süresi uzamaktadır. En hızlı sonuç bulma yük direncinin TEJ iç direncine eşit olduğu 7 Ω değerinde olmuştur.

TEJ sisteminin K&G MGNİ yükseltici çeviricili modellemesinin yük ve sıcaklık değişimlerinde zamana bağlı olarak tepkileri alınmıştır. Model hem yük hem de sıcaklık değişimlerine tabi tutularak MGN değerini izlemesi ölçülmüştür. K&G MGNİ yükseltici çeviricili TEJ modelinin yük değişimine tepkisi Şekil 4.6’da verilmiştir. Model 0,3 s’ye kadar 30 Ω ’da çalıştırılmış daha sonra da yük direncinde büyük bir değişim yapılarak aniden 90 Ω ’a çıkarılmıştır. Bu durumda iken sıcak taraf sıcaklığı 250°C ve soğuk taraf sıcaklığı da 20°C’dir.

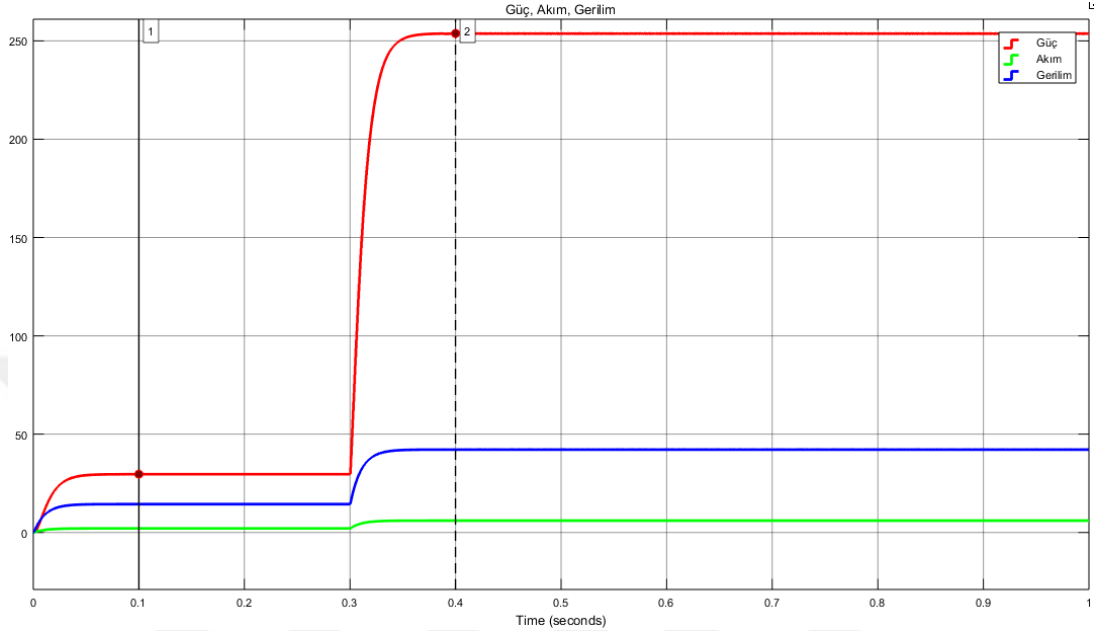


Şekil 4.6. K&G MGNİ DC-DC yükseltici çeviricinin yük direnci değişimine tepkisi

Şekil 4.6’da MGNİ’li TEJ sistemi 30 Ω yük ile çalıştırıldığında MGN değerini bulma zamanı 0,2 s civarındadır. Yük değeri 30 Ω ’dan 90 Ω ’a çıkarıldığında MGN noktasının yakalanması 0,5 s gibi daha uzun bir sürede gerçekleşmiştir. Bu aralık 1 ve 2 nolu çizgiler yardımıyla gösterilmiştir. Yük değerinin artması TEJ’in MGN noktasını bulma zamanında oldukça etkilidir.

Diğer taraftan, modelin sıcaklık değişimine tepkisi Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Model 0,3 s’ye kadar sıcak taraf sıcaklığı 100°C değerinde tutulmuştur. Bundan

sonra da kullanılan TEJ'in en yüksek kullanım sıcaklığı olan 250°C değerine çıkarılmıştır. Yük olarak en yüksek MGNİ'nin elde edildiği empedans eşleşmesini sağlayan 7 Ω kullanılmıştır. 100°C'den 250°C değerine çıkarıldığında MGN değerine kararlı hale gelme zamanı da sırasıyla 1 ve 2 nolu çizgiler ile gösterilmiştir.



Şekil 4.7. K&G MGNİ DC-DC yükseltici çeviricinin sıcaklık farkı değişimine tepkisi

Şekil 4.7'deki sıcaklık değişimi modellemede ani olarak gerçekleştirilmiştir. Bu durumla gerçek sistemlerde pek karşılaşılmaz ama sistem tepkisini ölçmek için etkili olmuştur. Sistem ilk 100°C sıcaklık farkı ile çalıştırıldığında MGN değerini bulması 0,1 s gibi kısa bir zaman diliminde gerçekleşmiştir. Yine 250°C sıcaklık farkı olduğunda ise MGN değerinin bulma 0,1 s gibi kısa bir sürede olmuştur. Bunlar değerlendirildiğinde sıcaklık değişimi MGN değerinin bulunma süresini pek değiştirmemiştir. İki farklı sıcaklık değerinde MGN değerine kararlı hale gelme zamanı da sırasıyla 1 ve 2 nolu çizgiler ile gösterilmiştir.

4.3. TEJ K&G MGNİ'li DC-DC Alçaltıcı-Yükseltici Çevirici Çıktıları

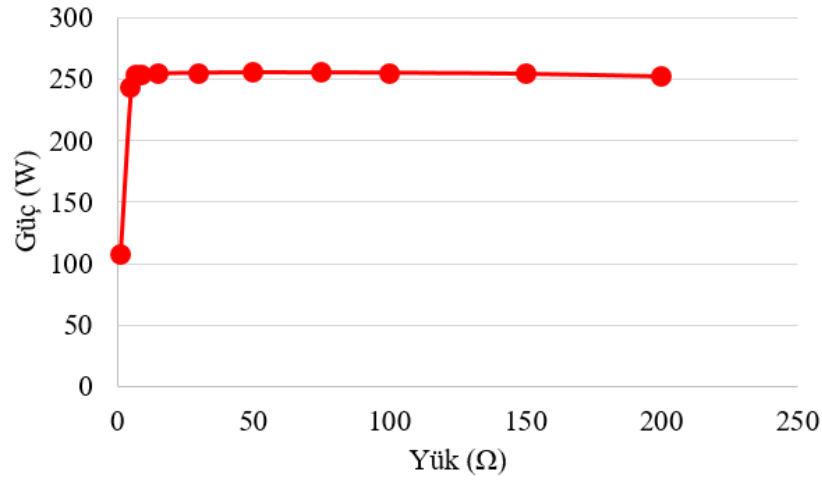
Bu modellemede elde edilen sonuçlar Şekil 3.9'da gösterilen modelden alınmıştır. Aynı bir önceki bölümde olduğu gibi ilk olarak sıcaklık değerleri sabit tutulmuş yük direnci değiştirilmiştir. İkinci olarak da MGN değerindeki yük direnci sabit tutularak sıcak yüzeyin sıcaklığı kademeli olarak değiştirilmiştir. Bu değerler alınırken yük direnci değeri 7 Ω değerinde sabitlenmiştir. Çünkü bu değer 40 tane bağlanmış TEJ'in MGN notasının eş değer iç direncidir. Hem TEJ çıkış verileri hem

de K&G MGNİ'li alçaltıcı-yükseltici çevirici çıkış verileri Tablo 4.5'de gösterilmiştir. Ayrıca farklı yük değerleri için MGNİ'nin ne kadar izlenebildiğini gösteren yüzde değerleri de verilmiştir. T=1 s için bu değerler alınmıştır.

Tablo 4.5. Farklı yüklerde K&G MGNİ'li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici giriş ve çıkış sonuçları

Yüzey Sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω) R_L	Akım (A) I		Gerilim (V) V		Güç (W) P		MGNİ %
T_H	T_C		Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	
250	20	1	10,64	10,34	10,61	10,34	112,9	107	94,77
		5	7,262	6,984	34,27	34,92	248,8	243,7	97,95
		7	6,337	6,019	40,74	42,14	258,2	253,6	98,22
		9	6,317	5,313	40,88	47,81	258,2	254	98,37
		15	6,37	4,119	40,51	61,78	258	254,5	98,64
		30	6,367	2,916	40,53	87,48	258,1	255,1	98,84
		50	6,345	2,26	40,63	113	258,1	255,4	98,95
		75	6,349	1,845	40,66	138,4	258,1	255,3	98,92
		100	6,35	1,597	40,65	159,7	258,1	255,1	98,84
		150	6,355	1,302	40,61	195,3	258,1	254,2	98,49
		200	6,364	1,123	40,55	224,6	258,1	252,1	97,68

Tablo 4.5 incelendiğinde, empedans eşleşmesi olmasa dahi MGNİ sayesinde TEJ'den elde edilen gücün hemen hemen hepsinin çıkışa aktarılabilirdiği görülmektedir. En yüksek başarımın da 50 Ω için gerçekleştiği tespit edilmiştir. 40 TEJ'den oluşan sistemin empedans eşleşmesi 7 Ω olsa da burada güç aktarımı 253,6 W iken en yüksek güç aktarımının yapıldığı 50 Ω için bu değer 255,4 W olmuştur. Tablo 4.5'de verilen yük değişiminin bir fonksiyonu olarak K&G MGNİ'li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviriciden ölçülen güç değerlerine ait grafik Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Farklı yüklerde K&G MGNİ’li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici sistemde yük üzerinden alınan sonuçlar

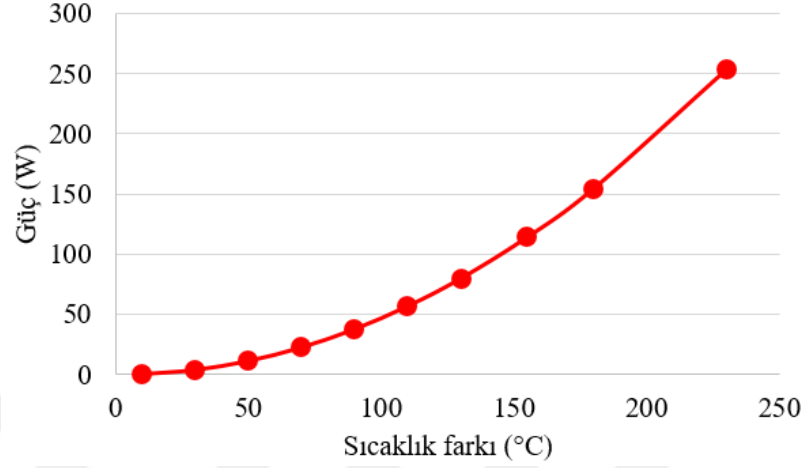
Yük direnci 7 Ω ’da sabit tutularak sıcaklık değiştirildiğinde TEJ’in ve K&G MGNİ’li yükseltici çeviricili çıkışından elde edilen sonuçlar da Tablo 4.6’da detaylandırılmıştır.

Tablo 4.6. Değişken sıcaklıklarda K&G MGNİ’li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici giriş ve çıkış sonuçları

Yüzey Sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω) R_L	Akım (A) I		Gerilim (V) V		Güç (W) P		MGNİ %
T_H	T_C		Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	
30	20	7	0,278	0,213	1,754	1,49	0,488	0,317	64,96
50			0,835	0,737	5,257	5,158	4,388	3,801	86,62
70			1,374	1,265	8,884	8,854	12,2	11,2	91,80
90			1,944	1,792	12,29	12,54	23,9	22,48	94,06
110			2,513	2,319	15,71	16,23	39,48	37,65	95,36
130			3,059	2,848	19,29	19,93	59	56,77	96,22
150			3,605	3,376	22,86	23,63	82,43	79,79	96,80
175			4,288	4,037	27,33	28,26	117,2	114,1	97,35
200			4,971	4,698	31,8	32,88	158,1	154,5	97,72
250			6,337	6,019	40,74	42,14	258,2	253,6	98,22

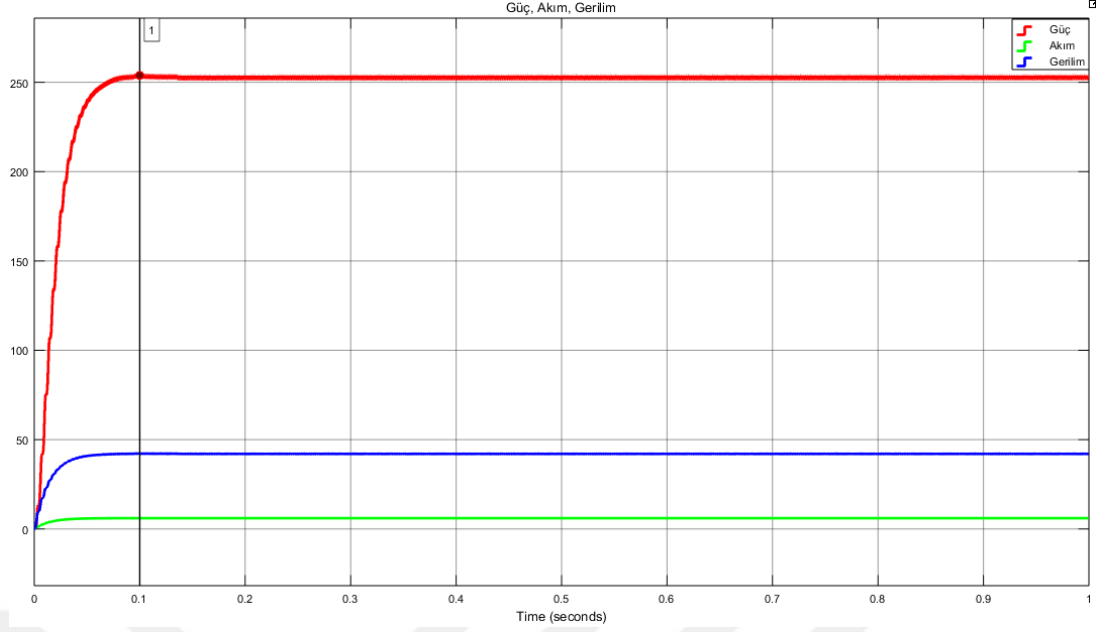
Tablo 4.6 verilerine bağlı olarak küçük sıcaklık farklarında elde edilen güç değerlerinin çok düşük güçlü elektronik cihazlara yetecek kadar olduğu görülmektedir. Ama büyük sıcaklık farklarında ise güç değerindeki artış çok belirgindir. Ayrıca küçük sıcaklık farkı değerlerinde MGNİ’nin aktarım oranı da yüksek sıcaklık farklarına göre

düşüktür. Tablo 4.6’da verilen sıcaklık farkı değişiminin bir fonksiyonu olarak K&G MGNİ’li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviriciden ölçülen güç değerlerine ait grafik değeri Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Değişken sıcaklıklarda K&G MGNİ’li DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici sistemde yük üzerinden alınan sonuçlar

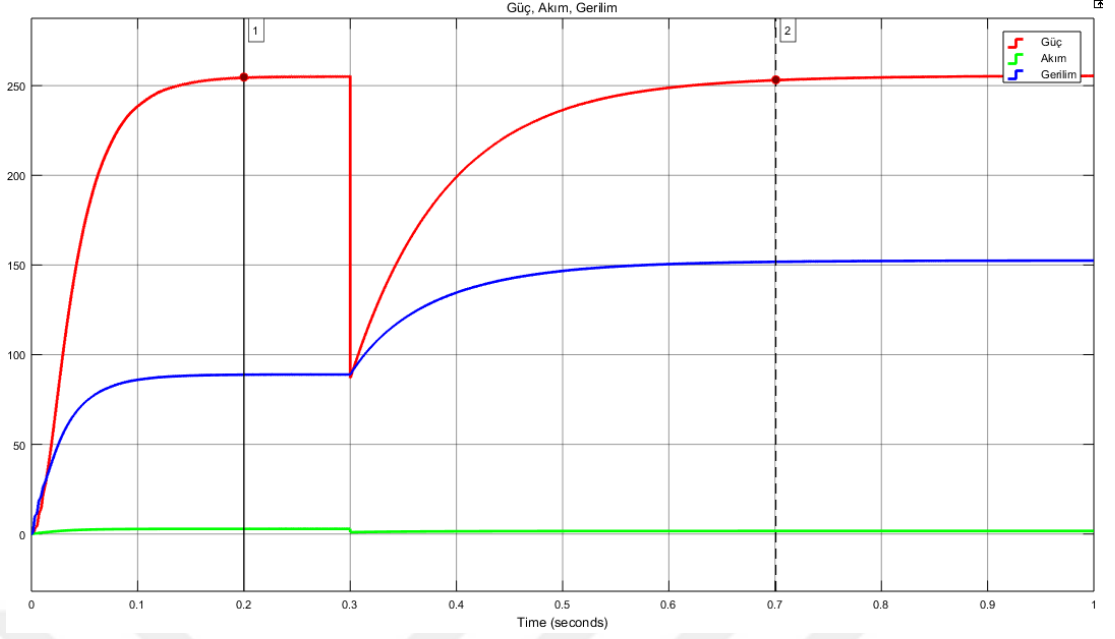
TEJ sisteminin K&G MGNİ aalçaltıcı-yükseltici çeviricili modellemesinin yük ve sıcaklık değişmeden zamana bağlı olarak tepkileri alınmıştır. Modelde yük ve sıcaklık sabit tutularak MGN değeri izlemesi ölçülmüştür. K&G MGNİ yükseltici çeviricili TEJ modelinin yük değişimine tepkisi Şekil 4.10’da verilmiştir. Yük olarak en yüksek MGNİ’nin elde edildiği empedans eşleşmesini sağlayan 7Ω kullanılmıştır. Bu durumda iken sıcak taraf sıcaklığı 250°C ve soğuk taraf sıcaklığı da 20°C ’dir.



Şekil 4.10. K&G MGNİ DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviricinin sabit yük ve sıcaklıktaki tepkisi

Şekil 4.10'da MGNİ'li TEJ sistemi MGN değerini bulma zamanı aynı DC-DC yükseltici çevirici kullanılan devrede olduğu gibi 0,1 s'nin altında olmuştur. Bulma zamanı 1 nolu çizgi yardımıyla gösterilmiştir. Bu süre yük direnci arttıkça MGN değerini bulma süresi uzamaktadır. En hızlı sonuç bulma yük direncinin TEJ iç direncine eşit olduğu 7Ω değerinde olmuştur.

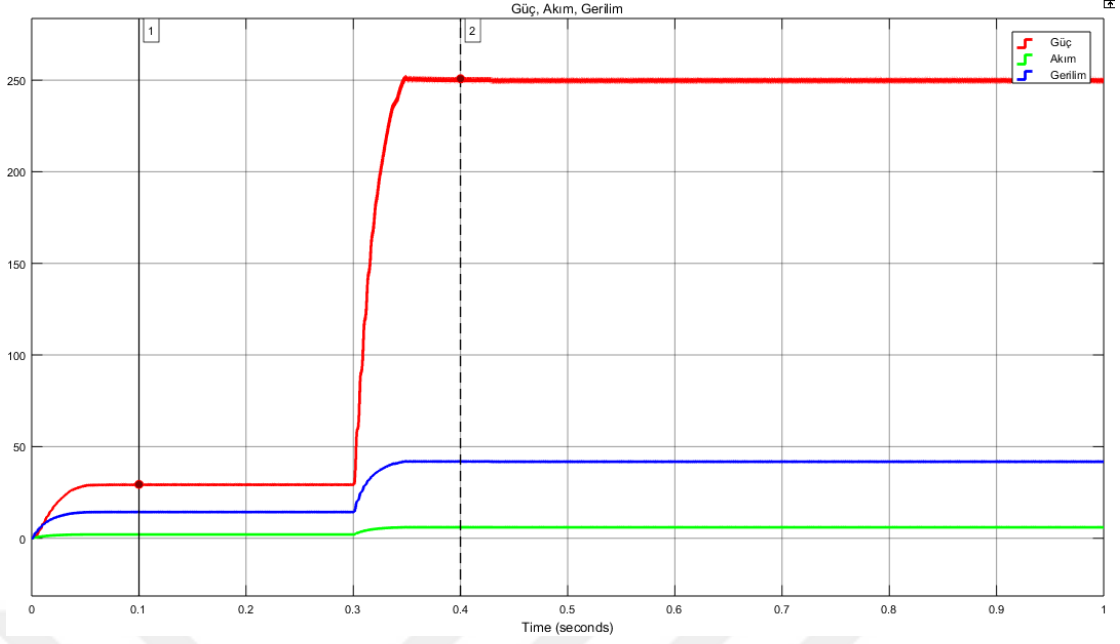
TEJ sisteminin K&G MGNİ yükseltici çeviricili modellemesinin yük ve sıcaklık değişimlerine zamana bağlı olarak tepkileri alınmıştır. Model hem yük hem de sıcaklık değişimlerine tabi tutularak MGN değerini izlemesi ölçülmüştür. K&G MGNİ yükseltici çeviricili TEJ modelinin yük değişimine tepkisi Şekil 4.11'de verilmiştir. Model 0,3 s'ye kadar 30Ω 'da çalıştırılmış daha sonra da yük direncinde büyük bir değişim yapılarak aniden 90Ω 'a çıkarılmıştır. Bu durumda iken sıcak taraf sıcaklığı 250°C ve soğuk taraf sıcaklığı da 20°C 'dir.



Şekil 4.11. K&G MGNI DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviricinin yük direnci değişimine tepkisi

Şekil 4.11’de MGNI’li TEJ sistemi 30Ω yük ile çalıştırıldığında MGN değerini bulma zamanı 0,2 s civarındadır. Yük değeri 30Ω ’dan 90Ω ’a çıkarıldığında MGN noktasının yakalanması 0,4 s gibi daha uzun bir sürede gerçekleşmiştir. Bu aralık sırasıyla 1 ve 2 nolu çizgiler yardımıyla gösterilmiştir. Yük değerinin artması TEJ’in MGN noktasını bulma zamanında oldukça etkilidir.

Diğer taraftan, modelin sıcaklık değişimine tepkisi Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Model 0,3 s’ye kadar sıcak taraf sıcaklığı 100°C değerinde tutulmuştur. Bundan sonra da kullanılan TEJ’in en yüksek kullanım sıcaklığı olan 250°C değerine çıkarılmıştır. Yük olarak en yüksek MGNI’nin elde edildiği empedans eşleşmesini sağlayan 7Ω kullanılmıştır. 100°C ve 250°C değerine çıkarıldığında MGN değerine kararlı hale gelme zamanı da sırasıyla 1 ve 2 nolu çizgiler ile gösterilmiştir.



Şekil 4.12. K&G MGNİ DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviricinin sıcaklık farkı değişimine tepkisi

Şekil 4.12'deki sıcaklık değişimi modellemede ani olarak gerçekleştirilmiştir. Bu durum gerçek sistemlerde pek karşımıza çıkmaz ama sistem tepkisini ölçmek için etkili olmuştur. Sistem ilk 80°C sıcaklık farkı ile çalıştırıldığında MGN değerini bulması 0,1 s gibi kısa bir zaman dilim altında gerçekleşmiştir. Yine 230°C sıcaklık farkı oluştuğunda ise MGN değerinin bulunması 0,1 s'nin altında bir değerde olmuştur. Bunlar değerlendirildiğinde sıcaklık değişimi MGN değerinin bulunma süresini pek değiştirmemiştir.

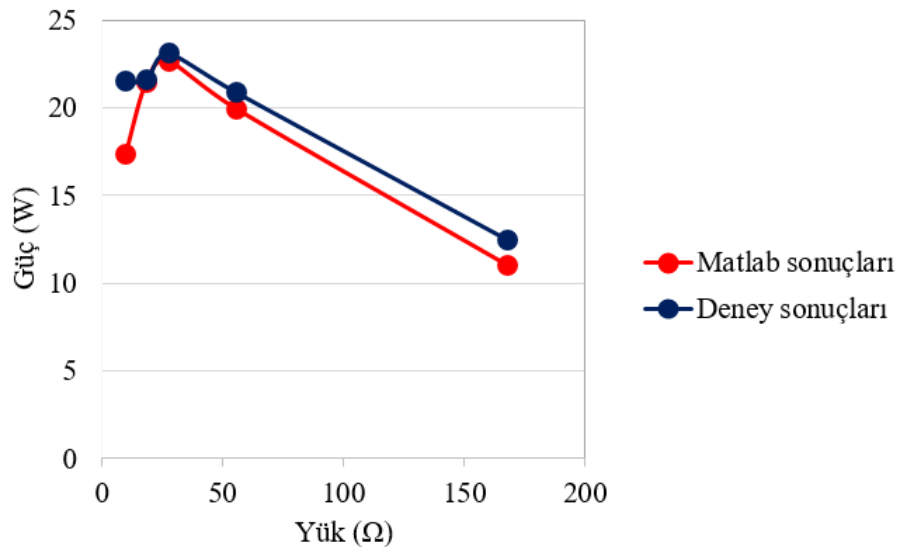
4.4. Deney ve Benzetim Sonuçları Karşılaştırması

Kurulan deney düzeneğinden Şekil 3.10'da verilen MATLAB®/Simulink® benzetim devresinde olduğu gibi TEJ'e doğrudan yük direnci bağlanarak sonuçlar alınmıştır. TEJ iç dirençleri 0,7 Ω olan 40 TEJ seri bağlandığından TEJ toplam iç direnci 28 Ω olmuştur. Tablo 4.7'de deney sonucundan alınan değerler ve MATLAB®/Simulink® sonuçları verilmiştir. Yük üzerinden alınan en büyük güç, TEJ toplam direnci olan 28 Ω değerine eşit yük bağlandığında elde edilmiştir.

Tablo 4.7. TEJ sistemine doğrudan yük bağlandığında elde edilen deney ve MATLAB®/Simulink® sonuçlarının karşılaştırması

Yüze Sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω) R_L	MATLAB®/Simulink® Sonuçları			Deney Sonuçları			Güçteki Mutlak Hata
T_H	T_C		Akım (A) I	Gerilim (V) V	Güç (W) P	Akım (A) I	Gerilim (V) V	Güç (W) P	
89	21	10	1,317	13,17	17,34	1,26	17,08	21,52	4,18
		18,6	1,074	19,98	21,46	0,97	22,27	21,60	0,14
		28	0,899	25,16	22,62	0,84	27,51	23,11	0,49
		56	0,596	33,37	19,89	0,57	36,6	20,86	0,97
		168	0,256	42,9	10,98	0,26	47,85	12,44	1,46

Tablo 4.7’de görüldüğü gibi 40 adet seri bağlı TEJ düzeneğine doğrudan yük bağlandığında toplam TEJ iç direnci olan 28 Ω değerine eşit yük direnci olduğu durumdaki empedans eşitliğinde maksimum güç çekilmiş ve yük değeri arttıkça ve azaldıkça yük üzerindeki güç değeri düşmüştür. MATLAB®/Simulink® ve deney sonuçlarına ait yüke bağlı güç değişiminin bir fonksiyonu Şekil 4.13’de verilmiştir. MATLAB®/Simulink® ve deney sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Düşük ve yüksek yük değerlerinde mutlak hatada artmalar olmuştur.



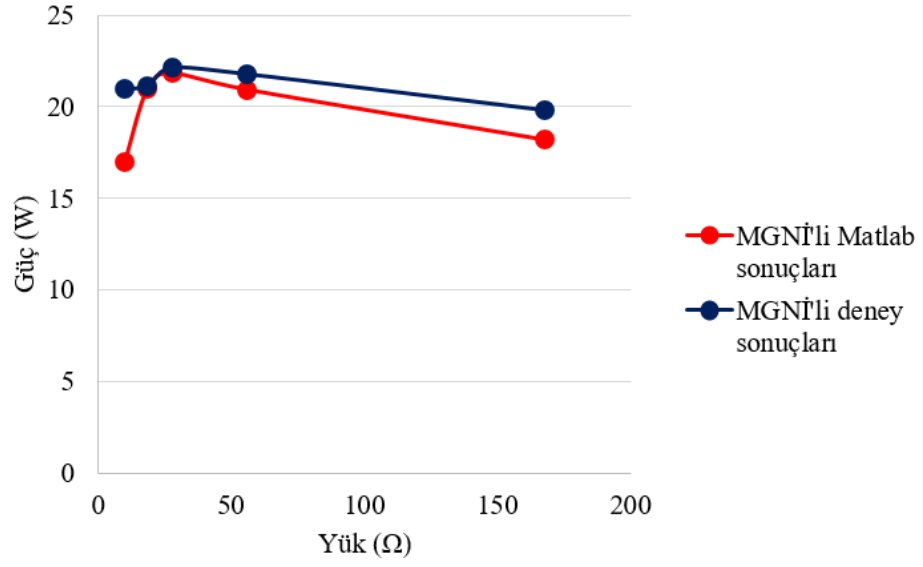
Şekil 4.13. TEJ sistemine doğrudan yük bağlandığında farklı yük değerlerinde elde edilen deney ve MATLAB®/Simulink® sonuçları

Aynı zamanda K&G MGNİ'li MATLAB®/Simulink® ve deney sonuçları da karşılaştırılmıştır. Bunun için Şekil 3.11'de MATLAB®/Simulink® benzetimi verilen deney düzeneğine farklı yükler bağlanarak sonuçlar alınmıştır. Yük üzerindeki güç, yük değişimine bağlı olarak düşmeden MGN değerine hep yakın olmuştur. Tablo 4.8'de deney sonucundan alınan değerler ve MATLAB®/Simulink® sonuçları verilmiştir. Yük üzerinden alınan en büyük güç, TEJ toplam direnci olan 28 Ω değerine eşit yük bağlandığında elde edilmiştir.

Tablo 4.8. TEJ K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çevirici deney ve MATLAB®/Simulink® sonuçlarının karşılaştırması

Yüze Sıcaklıkları (°C)		Yük (Ω) R_L	MATLAB®/Simulink® Sonuçları			Deney Sonuçları			Güçteki Mutlak Hata
T_H	T_C		Akım (A) I	Gerilim (V) V	Güç (W) P	Akım (A) I	Gerilim (V) V	Güç (W) P	
89	21	10	1,303	13,03	16,98	1,24	16,89	20,94	3,97
		18,6	1,062	19,76	20,99	0,96	22,02	21,14	0,15
		28	0,883	24,72	21,83	0,82	27,02	22,16	0,33
		56	0,611	34,25	20,93	0,58	37,56	21,78	0,86
		168	0,329	55,3	18,19	0,33	59,95	19,78	1,59

Tablo 4.8'de görüldüğü gibi TEJ'e doğrudan yük bağlandığında yük direnci ne olursa olsun yük üzerindeki güç MGN değerine yakın olduğu görülmektedir. Yüke bağlı K&G MGNİ'li DC-DC yükseltici çeviricili MATLAB®/Simulink® ve deney sonuçlarına ait güç değişiminin bir fonksiyonu Şekil 4.14'de verilmiştir. MATLAB®/Simulink® ve deney sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Burada da düşük ve yüksek yük değerlerinde mutlak hatada artmalar olmuştur.



Şekil 4.14. Farklı yüklerde TEJ K&G MGNI'li DC-DC yükseltici çevirici deney ve MATLAB®/Simulink® sonuçları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elde edilen sonuçlar TEJ sistemlerinin çıkışına doğrudan yük bağlantısının zaten düşük olan TEJ verimini daha da düşürdüğünü göstermiştir. Modellemesi yapılan TEJ'ler en yüksek 250°C değerine kadar kullanılabilir. Modellemesi yapılan TEJ'ler en yüksek 250°C değerine kadar kullanılabilir.

Tablo 4.1'deki verilere göre 220°C sıcaklık farkında TEJ sistemine doğrudan bağlanılan yükün iç direnci TEJ sistemi iç direncine eşit olduğunda en yüksek güç değeri, beklenildiği gibi, elde edilmiştir. 7 Ω 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.

Tablo 4.2'de en yüksek gücün elde edildiği 7 Ω 'da 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 de vardır. Bu modellenen sistem bu gibi yerlerde K&G MGN'li bir çevirici sistemi olmadan kullanıldığında sistem çıkışı oldukça düşmektedir. Ayrıca atık ısıların bulunduğu yerlerde de sıcaklık değerleri bu civardadır. Bu sistemin K&G MGN'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 4.3'deki ayarlı yük bağlandığında TEJ K&G MGN'li yükseltici çevirici giriş ve çıkışlarına dikkat edildiğinde hemen hemen giriş gücü ile çıkış gücü eşitlenmiş ve MGN değerinde TEJ sistemi çalıştırılabilmiştir. 1 Ω 'luk yük doğrudan bağlanıldığında 113,2 W güce ulaşılırken, MGN'li sistemde bu değer 119,5 W olmuştur. Yine doğrudan bağlanılan 100 Ω 'luk yüke 63,25 W verilirken, MGN'li sistemde bu değer 250,2 W'a çıkmıştır. Burada güç değerindeki önemli oranda bir artış vardır. MGN'li sistemin performansının doğrudan bağlantıya göre yüksek yük direnci değerlerinde daha iyi olduğu gözlenmiştir. 15 Ω yük direncinde en yüksek güç iletimi 254,0 W ve MGN değeri %98.64 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 4.4'deki sıcaklık farkı değiştirildiğinde, küçük sıcaklık farklarında MGNİ değerinin daha düşük olduğu hesaplanmıştır. 10°C sıcaklık farkında MGNİ değeri %64.96'de iken en yüksek sıcaklık farkı olan 230°C sıcaklık farkında bu değer %98.14'ye çıkmıştır. Dolayısıyla sıcaklık farkı yüksek olan yerlerde bu tür sistemlerin kullanımını daha uygun olmaktadır. Zaten sıcaklık farkı artışıyla birlikte TEJ sisteminin güç değeri de artmaktadır.

Şekil 4.6'ya göre, yük direncinin 30 Ω 'dan 90 Ω 'a çıkarıldığı durumda, K&G MGNİ algoritmasının tepkisi yaklaşık 0,5 s'de gerçekleştikten sonra sistemden kararlı güç çekilmeye başlanmıştır. İlk başta 30 Ω değerinde sistemden kararlı güç çekilmesi 0,2 s içerisinde gerçekleşmiştir. Yükün direnç değerleri büyüdükçe sistemin kararlı güç değerine ulaşma süresi artmıştır.

Şekil 4.7'de yük direnci sabit tutulup sıcaklık farkı değiştirildiğinde sistemden kararlı güç çekilmesi yük değişimlerine göre daha kısa bir sürede olmuştur. Güç kararlılığı 0,1 s gibi kısa bir sürede sağlanmıştır. Fakat burada aniden bir sıcaklık değişimi yapılmıştır. Gerçek sistemlerde aniden sıcaklık değişiminin olması pek mümkün görülmemektedir.

Öte yandan DC-DC yükseltici çeviricili K&G MGNİ algoritmali TEJ sistemi ile DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviricili K&G MGNİ algoritmali TEJ sistemi karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada DC-DC yükseltici çeviricili sistemin 254,0 W ile yük üzerine güç aktarırken hemen hemen aynı MGN'sinde DC-DC alçaltıcı-yükseltici çeviricinin 255,4 W ile yük üzerine güç aktardığı görülmüştür.

Deney ve MATLAB®/Simulink® sonuçları karşılaştırıldığında da hemen hemen aynı sonuçlar elde edilmiştir. Deney yapılırken TEJ yüzeylerine uygulanan sıcaklıklar net bir şekilde ölçülemediğinden sonuçlarda çok küçük mutlak hatalar olmuştur.

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.

Bağlanılan yük değeri de arttırıldığında MGNİ algoritmalarının MGN değerini izleme yüzdesi daha da artmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada TEJ üreticileri tarafından sağlanan Seebeck ve kullanım sıcaklığı değerlerine göre TEJ'lerin MATLAB®/Simulink® ile modellenmesi ve deney sonuçları sunulmuştur. Bu model seri ve paralel bağlanabilecek TEJ'lerin miktarlarının girilebileceği özellikte tasarlanmıştır. Bunlara ek olarak TEJ'lere bağlanılan yük ve TEJ iç direnç empedans eşitliğinin öneminin vurgulanması için hem doğrudan yük bağlanma hem de K&G MGNİ algoritmalı DC-DC yükseltici ve alçaltıcı-yükseltici çeviricili yük bağlanma modellemeleri gösterilmiştir. MGNİ'siz modellemede empedans dengesinde en yüksek güç elde edilirken diğer yük değerlerinde bu güç değerinden oldukça uzaklaşmıştır. Diğer yandan K&G MGNİ DC-DC yükseltici çevirici ile %98,64 oranında 254,0 W TEJ gücü çıkışa aktarılabilişken aynı sıcaklık farkı ile K&G MGNİ DC-DC alçaltıcı-yükseltici çevirici ile %98,95 gibi hemen hemen aynı oranında 255,4 W TEJ gücü çıkışa aktarılabiliştir. Böylelikle hem TEJ modellenmesi hem K&G MGNİ algoritmalı DC-DC çevirici benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, TEJ giriş parametreleri üretici firmaların verdiği katalog bilgilerinden alınmıştır. TEJ iç direnci sıcaklık arttıkça çok az da olsa artmaktadır. Burada yapılan benzetimlerde bu direnç artışı dikkate alınmamış ve katalog bilgilerinde verildiği gibi sabit bir değer olarak belirlenmiştir. Daha sonraki çalışmalarda sıcak yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişen iç direncin modellenmesi yapılabilir. Ayrıca MGN değerine ulaşmak için akıllı algoritmalar kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Riffat, S. B., Ma, X. Thermoelectrics: A review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003, 23(8), 913–935.
- [2] Rowe, D. Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source. *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*. 2006, 1(1), 13–23.
- [3] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., Al–Hallaj, S. A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Conversion and Management*. 2004, 45(9–10), 1597–1615.
- [4] Ahıska, R., Ahıska, G., Ahıska, K. Analysis of a new method for measurement of parameters of real thermoelectric module employed in medical cooler for renal hypothermia, *Instrumentation Science & Technology*. 2009, 37(1), 102–123.
- [5] Mamur, H., Ahıska R. A review: Thermoelectric generators in renewable energy. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2014, 4(1), 128–136.
- [6] Champier, D. Thermoelectric generators: A review of applications, *Energy Conversion and Management*. 2017, 140, 167–181.
- [7] Twaha, S., Zhu, J., Maraaba, L., Huang, K., Li, B., Yan, Y. Maximum power point tracking control of a thermoelectric generation system using the extremum seeking control method. *Energies*. 2017, 10(12), 1–18.
- [8] Rodrigues C. R., Machado, T., Pires, A. L., B. Chaves, Carpinteiro, F. S., Pereira A. M. Recovery of thermal energy released in the composting process and their conversion into electricity utilizing thermoelectric generators. *Applied Thermal Engineering*. 2018, 138, 319–324.
- [9] 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*. 2013, 42(7), 1900–1906.
- [10] Montecucco, A., Knox, A. R. Accurate simulation of thermoelectric power generating systems. *Applied Energy*. 2014, 118, 166–172.
- [11] Dai, D., Zhou, Y. ve Liu, J. Liquid metal based thermoelectric generation system for waste heat recovery. *Renewable Energy*. 2011, 36(12), 3530–3636.
- [12] Nagayoshi, H., Tokimusu, K. ve Kajikawa, T. Evaluation of multi MPPT thermoelectric generator system. 26th International Conference on Thermoelectrics, 2007, Jeju, 318–321.
- [13] 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*. 2015, 97, 265–272.
- [14] Liu, Y. H., Chiu, Y. H., Huang, J. W., Wang, S. C. A novel maximum power point tracker for thermoelectric generation system, *Renewable Energy*. 2016, 97, 306–318.
- [15] Karabetođlu, S., Şiřman, A., Öztürk, Z. F., Sahin, T. Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures. *Energy Conversion and Management*. 2012, 62(1), 47–50.
- [16] Zhao, L. D., Zhang, B. P., Li, J. F., Zhou, M., Liu, W. S., Liu, J. Thermoelectric and mechanical properties of nano–SiC–dispersed Bi₂Te₃ fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008, 455(1–2), 259–264.

- [17] Xi, H., Luo, L. ve Fraisse, G. Development and applications of solar-based thermoelectric technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007, 11(5), 923–936.
- [18] Riffat, S. B. ve Ma, X. Thermoelectrics: A review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003, 23(8), 913–935.
- [19] Çengel, Y. A., Boles, M. A. *Thermodynamics An Engineering Approach* 5th Edition (A. Pınarbaşı, Çev.). 2008, McGraw–Hill, 60–62, 279–295.
- [20] Ahıska, R. ve Dişlitaş, S. Computer controlled test system for measuring the parameters of the real thermoelectric module. *Energy Conversion and Management*. 2011, 52(1), 27–36.
- [21] Tsai, H. L. ve Lin, J. M. Model building and simulation of thermoelectric module using Matlab/Simulink, *Journal of Electronic Materials*. 2010, 39(9), 2105–2111.
- [22] Kim, S., Cho, S., Kim, N. ve Park, J. A maximum power point tracking circuit of thermoelectric generators without digital controllers. *IEICE Electronics Express*. 2010, 7(20), 1539–1545.
- [23] Liang, X., Sun, X., Shu, G., Sun, K., Wang, X. ve Wang X. Using the analytic network process (ANP) to determine method of waste energy recovery from engine. *Energy Conversion and Management*. 2013, 66(2), 304–311.
- [24] Şahin, A. Z. ve Yılbaş, B. S. The thermoelement as thermoelectric power generation: Effect of leg geometry on the efficiency and power generation. *Energy Conversion and Management*. 2013, 65(1), 26–32.
- [25] Champier, D., Bedecarrats, J. P., Rivaletto, M. ve Strub, F. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy*. 2010, 35(2), 935–942.
- [26] Fraisse, G., Ramousse, J., Sgorlon, D. ve Goupil, C. Comparison of different modeling approaches for thermoelectric elements. *Energy Conversion and Management*. 2013, 65(1), 351–356.
- [27] Gou, X., Xiao, H., Yang, S. Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system. *Applied Energy*. 2010, 87(10), 3131–3136.
- [28] Stevens, J. W. Performance factors for ground-air thermoelectric power generators. *Energy Conversion and Management*. 2013, 68(4), 114–123.
- [29] Lossec, M., Multon, B., Ahmed, H. B. Sizing optimization of a thermoelectric generator set with heatsink for harvesting human body heat. *Energy Conversion and Management*. 2013, 68(4), 260–265.
- [30] Hadjistassou, C., Kyriakides, E., ve Georgiou, J. Designing high efficiency segmented thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*. 2013, 66(2), 165–172.
- [31] 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*. 2017, 37, 86-98.
- [32] Quan, R., Zhou, W., Yang, G., Quan, S. A hybrid maximum power point tracking method for automobile exhaust thermoelectric generator. *Journal of Electronic Materials*. 2017, 46(5), 2676-2683.
- [33] Montecucco, A., Knox, A. Maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015, 30(2), 828-839.

- [34] Zainal, N. A., A. Yusoff, R., Apen, A. Integrated cooling systems and maximum power point tracking of fuzzy logic controller for improving photovoltaic performances. *Measurement*. 2019, 131, 100-108.
- [35] Basha, C. H. H., Rani, C., Odofin, S. A review on non-isolated inductor coupled DC-DC converter for photovoltaic grid-connected applications. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2017, 7(4), 1570-1585.
- [36] Kwan, T. H., Wu, X. Maximum power point tracking using a variable antecedent fuzzy logic controller. *Solar Energy*. 2016, 137, 189-200.
- [37] Husain, M. A., Tariq, A., Hameed, S., Arif, M. S. B., Jain, A. Comparative assessment of maximum power point tracking procedures for photovoltaic systems. *Green Energy & Environment*. 2017, 2(1), 5-17.
- [38] Ezinwanne, O., Zhongwen, F., Zhijun, L. Energy performance and cost comparison of MPPT techniques for photovoltaics and other applications. *Energy Procedia*. 2017, 107, 297-303.
- [39] Heidari, M. Improving efficiency of photovoltaic system by using neural network MPPT and predictive control of converter, *International Journal of Renewable Energy Research*. 2016, 6(4), 1524-1529.
- [40] Zhang, X., Chau, K. T. An automotive thermoelectric–photovoltaic hybrid energy system using maximum power point tracking. *Energy Conversion and Management*. 2011, 52(1), 641-647.
- [41] 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*. 2018, 11(7), 1-16.
- [42] Liu, C., Chen, P., Li, K. A 500 W low-temperature thermoelectric generator: Design and experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014, 39(28), 15497-15505.
- [43] Wu, S. J., Wang, S., Yang, C. J., Xie, K. R. Energy management for thermoelectric generators based on maximum power point and load power tracking. *Energy Conversion and Management*. 2018, 177, 55-63.
- [44] Tsai, H. L., Lin, J. M. Model building and simulation of thermoelectric module using Matlab/Simulink. *Journal of Electronic Materials*. 2010, 39(9), 2105-2111.
- [45] Man, E. A., Sera, D., Mathe, L., Schaltz, E., Rosendahl, L. Dynamic performance of maximum power point trackers in TEG systems under rapidly changing temperature conditions. *Journal of Electronic Materials*. 2016, 45(3), 1309-1315.
- [46] Montecucco, A., Siviter, J., Knox, A. R. The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel. *Applied Energy*. 2014, 123, 47-54.
- [47] Babu, C., Ponnambalam, P. The theoretical performance evaluation of hybrid PV-TEG system. *Energy Conversion and Management*. 2018, 173, 450-460.
- [48] Verma, V., Kane, A., Singh, B. Complementary performance enhancement of PV energy system through thermoelectric generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, 58, 1017-1026.
- [49] Salmi, T., Bouzguenda, M., Gastli, A., Masmoudi, A. Matlab/Simulink based modeling of photovoltaic cell. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2012, 2(2), 213-218.
- [50] Molina, M. G., Espejo, E. J. Modeling and simulation of grid-connected photovoltaic energy conversion systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014, 39(16), 8702-8707.

- [51] Mohammed, S. S., Devaraj, D., Ahamed, T. I. Modeling, simulation and analysis of photovoltaic modules under partially shaded conditions. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016, 9(16), 1-8.
- [52] Krismadinata, N. A. R., Ping, H. W., Selvaraj, J. Photovoltaic module modeling using Simulink/Matlab. *Procedia Environmental Sciences*. 2013, 17, 537-546.
- [53] Bellia, H., Youcef, R., Fatima, M. A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2014, 3(1), 53-61.
- [54] Chouder, A., Silvestre, S., Sadaoui, N., Rahmani, L. Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2012, 20(1), 46-58.
- [55] Al-Majidi, S. D., Abbod, M. F., Al-Raweshidy, H. S. A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018, 43(31), 14158-14171.
- [56] Mamur, H., Bhuiyan, M.R.A. Development of Bismuth Telluride nanostructure pellet for thermoelectric applications, *Istanbul International Conference on Progres in Applied Science*, 2017, Istanbul, 1-5.
- [57] Ahiska, R., Mamur, H. A review: Thermoelectric generators in renewable energy. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2014, 4(1), 128-136.
- [58] Ahiska, R., Mamur, H. Development and application of a new power analyzes system for testing of geothermal thermoelectric generators. *International Journal of Green Energy*. 2016, 13(7), 672- 681.
- [59] Snyder, G.J., Toberer, E.S. Comply thermoelectric materials. *Nature Materials*. 2008, 7, 105-114.
- [60] Mamur, H., Ahiska, R. Application of a DC-DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*. 2015, 97, 265-272.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yusuf ÇOBAN
Doğum Yeri ve Yılı : Konya, 1990
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : yusuf.coban@cbu.edu.tr

Eğitim Durumu

Lise : Konya Ereğli Anadolu Lisesi, 2008
Lisans : Dumlupınar Üni., Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 2012

Mesleki Deneyim

MSÜ Hava Astsubay MYO Öğr. Gör. 2013-(halen)

Yayımları

1. Mamur, H., Çoban, Y. A detailed modeling and simulation of thermoelectric generator for maximum power point tracking. (Hakem değerlendirmesinde).
2. Mamur, H., Çoban, Y. Termoelektrik jeneratörler için maksimum güç noktası takibi benzetimi. (Hakem değerlendirmesinde).
3. Mamur, H., Çoban, Y. Termoelektrik jeneratörler için yükseltici çeviricili maksimum güç noktası takibi benzetimi. International Conference on Engineering Sciences and Technology, 26-30 Ağustos, 2019, Prizren, Kosova (Kabul edildi).
4. Mamur, H., Çoban, Y. Investigation of thermoelectric technology applications in aviation and aerospace systems. International Scientific Conference, 17-18 Kasım, 2017, Gabrovo, Bulgaria (Bildiriler Kitabı, 47-50).
5. Bedük, A., Çoban, Y. Robotik çalışmalarının havacılık eğitimine olan katkıları. III. Ulusal Havacılık Teknolojisi ve Uygulamaları Kongresi, 23-24 Ekim, 2015, İzmir, Türkiye (Bildiriler Kitabı, 432-440).