



Makale / Research Paper

Termal Arayüz Malzemesinin Termoelektrik Jeneratör Performansına Etkisinin Nümerik İncelenmesi

Seyda OZBEKTAS^{1a}, Bilal SUNGUR^{2b*}, Bahattin TOPALOĞLU^{1c}

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. Samsun/TÜRKİYE

²Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. Samsun/TÜRKİYE

bilal.sungur@samsun.edu.tr

Received/Geliş: 08.07.2021

Accepted/Kabul: 17.01.2021

Öz: Termal arayüz malzemeleri çoğunlukla mikroelektronik, güç elektroniği ve LED aydınlatma alanlarında uygulanmaktadır. Daha az araştırılmış olmasına rağmen, termal arayüz malzemeleri uygulamasının bir diğer önemli alanı da termoelektrik jeneratörlerdir. Termoelektrik jeneratörler temel olarak sıcaklık farkından yararlanılarak elektrik üretimini sağlamaktadırlar ve özellikle atık ısı geri kazanımında uygulaması her geçen gün daha fazla ilgi görmektedir. Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak termal arayüz malzemelerinin termoelektrik jeneratörün performansı üzerindeki etkisini dikkate alarak nümerik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın nümerik sonuçları literatürden elde edilmiş deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Çalışma parametreleri olarak farklı sıcak yüzey sıcaklıklarında (75°C, 80°C, 85°C, 90°C, 95°C) farklı ısı iletim katsayılarına (2 W/m·K, 2.5 W/m·K ve 3 W/m·K) ve kalınlığa (0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 0.75 mm ve 1 mm) sahip termal macunlar irdelenmiş ve bu parametrelerin termoelektrik jeneratör performansına olan etkisi incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 0.5 mm termal macun kalınlığında deneysel ve nümerik sonuçların iyi uyum sağladığı tespit edilmiştir. Bu kalınlıkta maksimum açık devre voltajı, yükteki voltaj, akım, güç çıktı değerleri 95°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 3 W/m·K termal iletkenlik katsayısı durumunda meydana gelmiştir. Bu şartlarda maksimum açık devre voltajı ve güç çıkışı deneysel olarak sırasıyla 4.60 V ve 0.84 W değerlerinde iken, nümerik olarak 4.32 V ve 1.23 W olarak hesaplanmıştır. Tüm analizlerde sıcaklık farkı ve termal macun ısı iletim katsayısı artışı termoelektrik jeneratörün güç çıkışını arttırmış, termal macun kalınlığının artması ise güç çıkışını azaltmıştır.

Anahtar Kelimeler: Termal arayüz malzemesi; termal macun; termoelektrik jeneratör; nümerik modelleme.

Numerical Investigation of the Effect of Thermal Interface Material on Thermoelectric Generator Performance

Abstract: Thermal interface materials are mostly applied in microelectronics, power electronics and LED lighting fields. Another important area of application of thermal interface materials, although less researched, is thermoelectric generators. Thermoelectric generators basically provide electricity production with temperature difference and its application in waste heat recovery is getting more attention day by day. In this study, different from the studies in the literature, numerical calculations were made by considering the effect of thermal interface materials on the performance of thermoelectric generator. Numerical results were compared with experimental results obtained from the literature. Thermal greases with different heat conduction coefficients (2 W/m·K, 2.5 W/m·K and 3 W/m·K) and thickness (0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 0.75 mm and 1 mm) were examined at different hot surface temperatures (75°C, 80°C, 85°C, 90°C, 95°C) as working parameters and the effect of these parameters on thermoelectric module performance was investigated. When the results were examined, it was determined that the experimental and numerical results were in good agreement at 0.5 mm thermal grease thickness. At this thickness, the maximum open circuit voltage, voltage at load, current, power output values occurred at hot surface temperature of 95°C and a thermal conductivity coefficient of 3 W/m·K. Under these conditions, the maximum open circuit voltage and power output were experimentally at 4.60 V and 0.84 W, respectively, while numerically at 4.32 V and 1.23 W. In all analyzes, the increase in temperature difference and the increase of thermal grease heat transfer coefficient increased the power output of the thermoelectric module, while the increase in thermal grease thickness decreased the power output.

Keywords: Thermal interface material; thermal grease; thermoelectric generator; numerical modeling.

Bu makaleye atıf yapmak için

Ozbehtas, S., Sungur, B., Topaloglu, B., "Termal arayüz malzemesinin termoelektrik jeneratör performansına etkisinin nümerik incelenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2022, 9 (2); 492-506.

How to cite this article

Ozbehtas, S., Sungur, B., Topaloglu, B., "Numerical Investigation of the Effect of Thermal Interface Material on Thermoelectric Generator" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2022, 9 (2); 492-506.

ORCID ID: *0000-0001-7399-733X; *0000-0002-7320-1490; *0000-0002-7095-4913

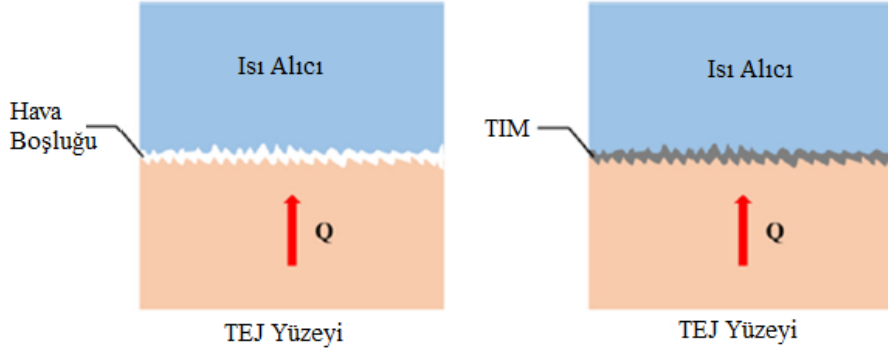
1. Giriş

Teknolojinin ve sanayileşmenin gelişmesiyle birlikte fosil yakıtların tüketimi artmakta ve bu nedenle hava kirliliği ve küresel ısınma gibi çevre sorunları da hızlı bir artış göstermektedir. Ayrıca fosil yakıt rezervleri de gün geçtikçe azalmaktadır. Sonuç olarak, yeni enerji kaynaklarını keşfetmek ve geleneksel enerjiyi daha kullanışlı ve çevre dostu bir hale getirerek enerji verimliliğini arttırmaya yönelik önemli bir yaklaşım, atık ısının geri kazanılmasıdır. Atık ısı geri kazanımında kullanılan sistemlerden birisi olan termoelektrik jeneratörler (TEJ), termal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen, Seebeck etkisine dayalı bir güç üretim teknolojisidir. Seebeck etkisi, sıcaklık farkının etkisi altında iki iletken veya yarı iletken maddeler arasında bir voltaj farkının üretildiğini ifade eden termoelektrik (TE) etki olarak da bilinir. Diğer güç üretim teknolojilerine kıyasla basit yapıları, güvenilirlikleri, sessiz ve kararlı çalışmaları, bakım gerektirmemeleri, hareketli parçaların olmaması ve uzun ömürlü olmaları gibi birçok avantajları bulunmaktadır. TEJ, mikroelektronik ısı kullanımından büyük ölçekli termik santral atık ısı geri kazanımına, yenilenebilir enerjiden geleneksel endüstriyel atık ısıya kadar birçok pratik uygulama alanına sahiptir [1]. Bununla birlikte, düşük termoelektrik dönüşüm verimliliği, TEJ'in geniş çapta uygulanmasının önünde büyük bir engeldir. Literatürde termoelektrik üretim verimliliğini iyileştirmek için malzeme [2-6], geometri [7-10] ve termal yönetim [1, 11-17] optimizasyonunda önemli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaları temel olarak iki kategoriye ayırmak mümkündür: (1) termoelektrik malzeme ve yapıların iyileştirilmesi; (2) TEJ genelinde daha büyük bir sıcaklık farkı oluşturmak için termal yönetimin iyileştirilmesi.

Son yıllarda özellikle malzeme alanındaki gelişmeler ve yeni fikirlerle birlikte TEJ performanslarında da önemli artışlar meydana gelmiştir. 1950 yılından önce dönüşüm oranı %5'in altında olan termoelektrik modüller günümüzde yaklaşık %20 seviyelerine kadar gelmiştir [12]. Ancak yeni bir TEJ tasarımı planlandığında ve üretildiğinde, termoelektrik güç dönüşümündeki en önemli zorluk, termoelektrik modül boyunca önemli bir sıcaklık farkı oluşturmaktır. TE cihazlarının sıcak tarafında üretilen ısıyı dağıtmak için en çok kullanılan soğutma yöntemlerine örnek olarak hava soğutma, sıvı soğutma, ısı borulu soğutma ve faz değişim malzemeli soğutma gösterilebilir[1]. Soleimani vd. [18] TE modülü kullanılarak vücut ısısından yararlanılarak elde edilen gücün giyilebilir kişisel ısıtma sisteminde kullanılıp kullanılmayacağını sayısal olarak araştırmıştır. Simülasyon, COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak gerçekleştirmiştir. TEJ performansını artırmak için farklı hava hızlarında dört tip ısı alıcı modelini referans model olan düz kanatçıklı ısı alıcı ile karşılaştırmışlardır. Lv vd. [1], TE modülünün soğuk tarafını soğutmak için farklı ısı değiştirici türlerini deneysel olarak araştırmışlardır. Her ısı değiştirici modelinin kendi içerisinde avantaj ve dezavantajları olduğunu belirtmişlerdir. Naphon vd. [19], üç farklı su bloğu modeli ile entegre edilmiş TE soğutma modülünün soğutma performansını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu sonucuna varmışlardır. Naphon ve Wiriyasart [20], CPU için termoelektrikli ve termoelektriksiz dikdörtgen kanatçıklı ısı alıcıda iyonsuzlaştırılmış su kullanılan sıvı soğutma sistemini araştırmışlardır ve elde ettikleri sonuçları diğer soğutma teknikleriyle karşılaştırmışlardır. Seo vd. [21] kare kesitli bir kanala yerleştirilmiş ısı alıcıyla entegre edilmiş TEJ'lerden oluşan bir sistemi sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. TEJ performansının, ısı alıcı parametrelerinden önemli ölçüde etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Isı kaynağından olan ısı transferi, TEJ tarafından üretilen iş ile ısı alıcısına olan ısı transferinin toplamına eşittir. TEJ'in sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkları maksimum olduğunda TEJ tarafından yapılan iş maksimum olacaktır. Sıcaklık farkı yalnızca, sıcak yüzey sıcaklığı kaynak sıcaklığına eşit olduğunda ve soğuk yüzey sıcaklığı, ısı alıcı sıcaklığına eşit olduğunda maksimum olacaktır. TEJ'in sınırlı yüzey alanı nedeniyle, arttırılmış yüzey alanlarının kullanımının TEJ sisteminin verimliliğini arttıracığı düşünülmektedir. TEJ yüzeyi ile ısı transferini arttıran alanlar arasındaki arayüz sıcaklık farkları neredeyse sıfır olacak şekilde olmalıdır. Pratik olarak böyle bir

duruma ulaşmak oldukça zordur. Bu bağlamda, maksimum güç elde etmek için, termoelektrik modülün temas ettiği ısı kaynağı ile ısı alıcı ara yüzlerinin ısıl iletkenliği çok yüksek olmalıdır. Termal macun ve termal pedler, en uygun termal performansa sahip ortak arayüz malzemeleridir. Termal Arayüz Malzemesi (TIM) olarak macun kullanılması, ısı alıcı ile TEJ yüzeyi arasında ince bir yüzey oluşturmakta ve bu şekilde tüm hava boşlukları kapanmaktadır. Bunun sonucunda, yaklaşık 0.1 ila 0.2 °C/W aralığında düşük termal direnç sağlanmaktadır. Şekil 1’de, TIM’siz ve TIM’li yüzeylerin mikroskobik görünümüne ait şematik gösterimleri verilmiştir.



Şekil 1. TIM’siz (solda) ve TIM’li (sağda) yüzeylerin mikroskobik görünümüne ait şematik gösterim

TIM'ler çoğunlukla mikroelektronik, güç elektroniği ve LED aydınlatma alanlarında uygulanmaktadır [22-25]. TIM ısıl kaynak ile ısı alıcı arasındaki ısı iletimini en üst düzeye çıkararak TEJ boyunca büyük sıcaklık farkının ve maksimum gücün elde edilmesinde önemli rol oynarlar. Bu nedenle son yıllarda TIM'lerin bir TEJ sistemine uygulanması çalışmalarını artıran bir ilgiye sahiptir. Ancak bu konudaki çalışmalar hala sınırlı sayıda [26-29]. Wang vd. [29] yaptıkları deneysel çalışmada termal temas direncinin termoelektrik üretim cihazının verimliliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda, termal temas direncinin azalmasıyla güç üretimi ve dönüştürme verimliliğinin önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Astrain vd. [26] soğuk ve ısı kaynakları arasındaki ısıl direncin termoelektrik üretim sisteminin verimliliğine etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Termik direncin %8 azaltıldığında güç üretim verimliliğinin yaklaşık %10 arttırılabileceğini belirtmişlerdir. Üretilen elektrik gücünün deneysel ve nümerik sonuçları arasında en fazla %5’lik bir fark olduğunu ve genel olarak sonuçların tatmin edici seviyede olduğunu ifade etmişlerdir. Li vd. [28] arayüz ısı transferinin TEJ performansına etkisini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Bu kapsamda 0.1 ila 0.4 MPa arasında değişen farklı dış basınçlarda farklı termal iletkenliklere sahip üç tür termal macun, termal arayüz malzemeleri olarak kullanmışlardır. TEJ performansının termal macun kullanımıyla birlikte önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle; termoelektrik malzeme, geometri ve TEJ’in termal yönetimi üzerine odaklanılmıştır. Termal macun ile ilgili yapılan çalışmaların büyük bir kısmı mikroelektronik, güç elektroniği ve LED aydınlatma uygulamaları üzerindedir ve TEJ uygulamaları için TIM ile ilgili literatürde yalnızca sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Yapılan bu çalışmalar genellikle deneyseldir ve TIM’lerin TEJ performansına olan etkisini içeren nümerik çalışmalar oldukça az sayıdadır. Bu çalışmanın temel amacı, TIM’lerin TEJ performansı üzerindeki etkisini dikkate alarak nümerik hesapları gerçekleştirmek ve literatürden elde edilmiş deneysel sonuçlarla kıyaslamaktır. Bu kapsamda farklı ısı iletim katsayılarına ve kalınlığa sahip termal macunların TEJ performansına olan etkisi incelenmiştir. Nümerik hesaplamalar üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik sonuçlar açık devre voltajı ve güç çıkışı cinsinden hem deneysel

sonuçlarla [28] hem de literatürden termal macun etkisinin hesaba katılmadığı [28] durumdaki (nümerik) sonuçlarla kıyaslanmıştır.

2. Materyal ve Metod

Li vd. [28] çalışmalarında termal macun etkisini hesaba katmadan açık devre voltajlarını nümerik olarak incelemişlerdir. Bu nedenle bu çalışmada öncelikle termal macunsuz durum için 4 farklı yüzey sıcaklığında hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, Li vd. [28]'nin nümerik hesaplarında dikkate almadıkları termal macun etkisi dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu kapsamda farklı termal iletkenliklere sahip termal macun etkisindeki bir TEJ'den elde edilen açık devre voltajı ve güç çıktı değerleri nümerik olarak incelenmiş ve elde edilen bu sonuçlar Li vd.'nin [28] çalışmasındaki deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında, bu değerlere ek olarak Li vd.'nin çalışmalarında deneysel ve nümerik olarak incelenmemiş olan yük direnci bağılyken elde edilen voltaj ve akım değerleri de nümerik olarak elde edilmiştir.

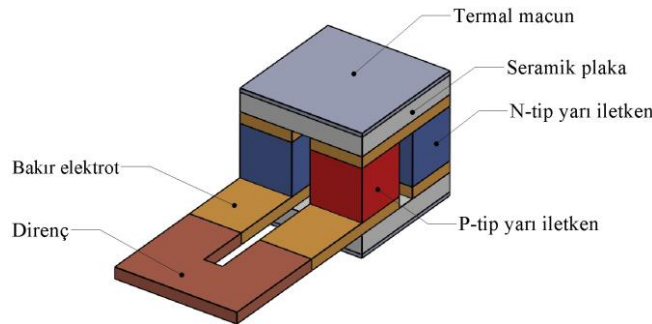
Termal macunlar TEJ'in sıcak ve soğuk yüzeyine uygulanmıştır. Güç çıktı değerleri, toplam iç direnci 3.1Ω büyüklüğünde olan bir yük direnci bağlanarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm kalınlıklarında ve 2 W/m·K, 2.5 W/m·K, 3 W/m·K termal iletkenlik katsayılarında toplamda 15 farklı termal macun ile analizler gerçekleştirilmiştir. Tüm hesaplamalar 60°C, 65°C, 70°C ve 75°C sıcaklık farkları durumları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

2.1. Geometri

Şekil 2'de TEJ sisteminin şematik görünümü verilmiştir. TEJ sistemi P ve N-tip yarı iletkenler, bakır elektrotlar, seramik plakalar ve termal macunlardan oluşmaktadır. P ve N-tip yarı iletkenler termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme, bakır elektrotlar P ve N-tip yarı iletkenleri elektriksel olarak birbirine seri bağlama, seramik plakalar ise elektriksel yalıtım görevi görmektedir.

Tablo 1. TEJ sistemini oluşturan parçaların boyutu ve sayısı

Parça	Sayısı	Boyutu (mm)
Seramik plaka	2	3.3x3.3x0.5
Bakır elektrot	5	3.3x1.4x0.3
N-tip yarı iletken	2	1.4x1.4x1.4
P-tip yarı iletken	2	1.4x1.4x1.4
Termal macun	2	3.3x3.3x0.1-0.2-0.5-0.75-1
Yük direnci	1	3.3x2.8x0.3



Şekil 2. TEJ sisteminin şematik görünümü

Kullanılan TEJ (TEG1-199-1.4-0.5), 199 çift P ve N-tip yarı iletkenlerden meydana gelmektedir. Hesaplama zamanından tasarruf etmek amacıyla iki çift P ve N-tip yarı iletkenlerden meydana gelecek şekilde model oluşturulmuştur. TEJ sistemini oluşturan parçaların sayı ve boyutları ile ilgili bilgiler Tablo 1’de verilmiştir [28].

2.2. Matematiksel Model

Bu çalışmada farklı sıcaklıklardaki bir TEJ’e uygulanan farklı termal iletkenlik katsayılarına ve kalınlıklarına sahip termal macunların, TEJ sisteminin termal ve elektriksel performansına olan etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Elektrik yükü ve enerji denklemlerini sonlu elemanlar metodu kullanarak çözmek için ANSYS Termal-Elektrik programı kullanılmıştır. Termal macun iletkenlik katsayıları, TEJ’e uygulanan sıcaklık değerleri ve TEJ’in malzeme özellikleri Li vd. [28]’nin çalışmasından alınmıştır.

Termal-Elektrik analizinde P ve N tipi yarı iletken ayaklar için kullanılan enerji korunumu denklemleri 1 ve 2 numaralı eşitliklerde verilmektedir.

$$\nabla \cdot (\lambda_p(T) \nabla T_p) = -\gamma_p^{-1}(T) J^2 + \nabla \alpha_p(T) J T_p \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\lambda_n(T) \nabla T_n) = -\gamma_n^{-1}(T) J^2 + \nabla \alpha_n(T) J T_n \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve 2’de, $\alpha_{p,n}(T)$, $\gamma_{p,n}^{-1}(T)$ ve $\lambda_{p,n}(T)$ sırasıyla P ve N tipi yarı iletken ayağın Seebeck katsayısını, elektrik öz direncini ve termal iletkenliğini ifade etmektedir ve akım yoğunluk vektörü J olarak tanımlanmaktadır. $\nabla \cdot (\lambda_{p,n}(T) \nabla T_{p,n})$, $-\gamma_{p,n}^{-1}(T) J^2$, $\nabla \alpha_{p,n}(T) J T_{p,n}$ terimleri sırasıyla Fourier ısısı, Joule ısısı ve Peltier ya da Thomson ısısına karşılık gelmektedir.

Bakır malzemenin Joule etkisi vardır, ancak Seebeck etkisi yoktur. Ayrıca, seramik malzemenin hem Joule etkisi hem de Seebeck etkisi yoktur. Bu nedenle, bakır elektrotlar ve seramik plakalar için enerji korunumu denklemleri P ve N yarı iletken bacaklardan farklıdır ve 3 ile 4 numaralı eşitliklerdeki gibi yazılabilmektedir.

$$\nabla \cdot (\lambda_{co} \nabla T) = -\gamma_{co}^{-1} J^2 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\lambda_{ce} \nabla T) = 0 \quad (4)$$

Eşitlik 3 ve 4’te, γ_{co}^{-1} , λ_{co} , λ_{ce} sırasıyla bakır elektrodun elektrik direnci ile termal iletkenliğini ve seramik plakanın termal iletkenliğini ifade etmektedir.

Yarı iletken ayaklardaki elektrik alan şiddeti vektörü Eşitlik 5’te verilmektedir.

$$E = -\nabla \phi + \alpha \nabla T \quad (5)$$

Eşitlik 5’te, Seebeck elektromotiv kuvveti ve elektrik potansiyeli sırasıyla $\alpha \nabla T$ ve ϕ olarak gösterilmektedir. Böylece, 6 numaralı denklemi kullanarak, 1, 2 ve 3 numaralı eşitliklerdeki akım yoğunluk vektörü bulunabilmektedir.

$$J = \gamma E \quad (6)$$

Ek olarak, yük direnci, yarı iletken bacaklar ve bakır elektrotlar boyunca akım süreklidir ve 7 numaralı eşitlik ile gösterilmektedir.

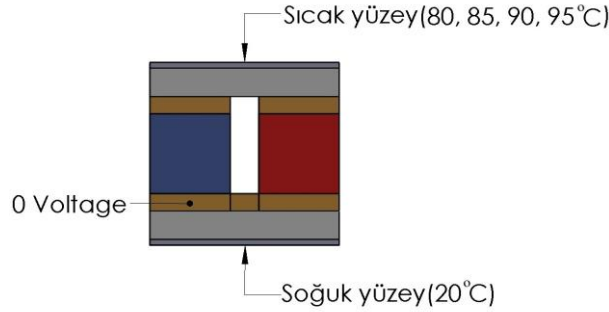
$$\nabla J = 0 \quad (7)$$

Yukarıdaki Termal Elektrik modelini çözerek TEJ'in elektriksel çıktıları bulunabilmektedir. Akım (I) seçili kesit alanı üzerinde akım yoğunluğunun basit alan integrasyonu yöntemiyle bulunmaktadır. Ayrıca, çıktı gücü (P) denklem 8'deki formüle göre hesaplanmaktadır.

$$P = I^2 R_{yük} = VI \quad (8)$$

2.3. Sınır Koşulları

TEJ'i oluşturan parçaların malzeme özellikleri Tablo 2'de gösterilmektedir. Bu amaçla termal iletkenlik katsayıları 2 W/m·K, 2.5 W/m·K, 3 W/m·K ve kalınlıkları 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm olan toplamda 15 farklı durum için oluşturulan modelde termal macunlar TEJ'in sıcak ve soğuk yüzeylerine eklenmiştir. Sınır koşulu olarak TEJ'in soğuk yüzeyi 20°C'de sabit tutulmuş, sıcak yüzeyi 80°C, 85°C, 90°C, 95°C olarak girilmiştir. TEJ sisteminin sınır koşulları Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. TEJ sisteminin sınır koşulları

Ayrıca Li vd. [28]'nin nümerik çalışmasıyla kıyaslamak amacıyla macunsuz bir model için de aynı şartlar altında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu şartlar altında TEJ'in ürettiği açık devre voltajları belirlenmiştir. Daha sonra maksimum güç çıkışını elde etmek için TEJ'in toplam iç direnci büyüklüğünde olan 3.1 Ω yük direnci TEJ'e bağlanmıştır.

Tablo 2. TEJ'i oluşturan parçaların malzeme özellikleri

Parça	Malzeme	Termal İletkenlik(W/m·K)	Elektriksel Direnç($\Omega \cdot m$)	Seebeck katsayısı($\mu V/K$)
Seramik plaka	Seramik	31	-	-
Bakır Elektrot	Bakır	401	$1.69e^{-8}$	-
P-tip yarı iletken	Bizmut-Telleryum	1.6	$1.18e^{-5}$	230
N-tip yarı iletken	Bizmut-Telleryum	1.6	$1.18e^{-5}$	-230
Yük Direnci	-	201	$3.04e^{-6}$	-
Termal macun	-	2-2.5-3	-	-

Nümerik model iki çift P ve N-tip yarı iletkenlerden oluştuğu için (9) numaralı denklem kullanılarak iki çift P ve N-tip yarı iletkenlerden oluşan TEJ'in maksimum güç değerini verecek iç direnç büyüklüğü elde edilmiştir. Elde edilen iç direnç büyüklüğünü sağlamak için yük direnci olarak kullanılacak parçanın elektrik öz direnci (10) numaralı denklem kullanılarak belirlenmiştir. Bu denklemlerde n , γ , L ve A_k sırasıyla yarı iletken çift sayısı, elektrik öz direnci, uzunluk ve kesit

alanıdır. Bu yükte akım, voltaj ve güç değerleri elde edilmiştir. Elde edilen voltaj ve güç değerleri iki çift P ve N-tip yarı iletkenlerden oluşan TEJ içindir. Gerçekte TEJ 199 çift P ve N-tip yarı iletkenlerden meydana geldiği için bu değer baz alınarak sonuçlar verilmiştir.

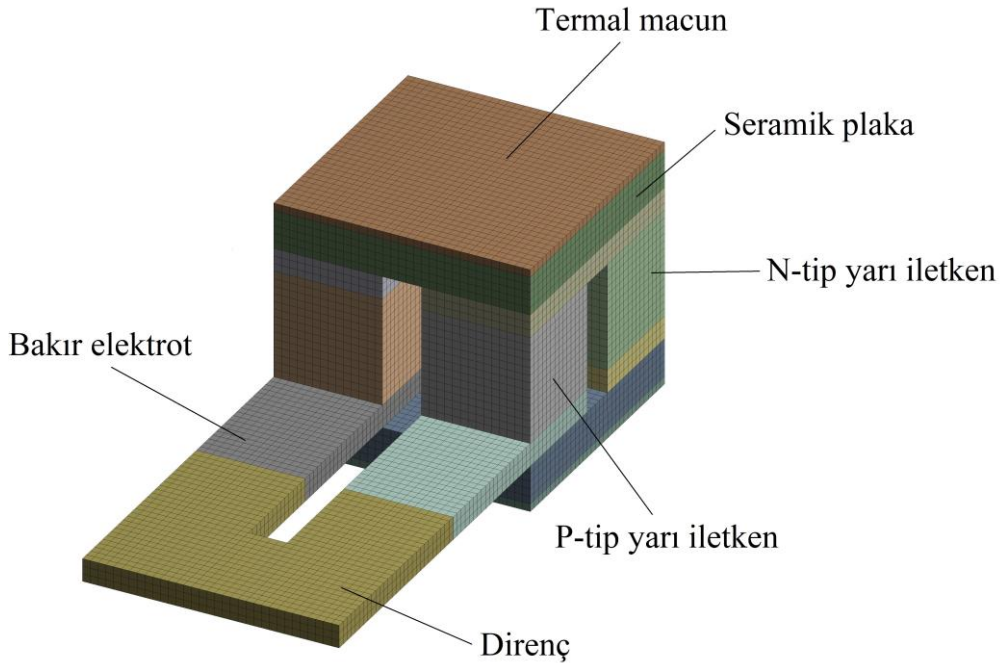
$$R_{iç} = n \cdot [\gamma_P \cdot L_P \cdot (A_{k_P})^{-1} + \gamma_N \cdot L_N \cdot (A_{k_N})^{-1}] \quad (9)$$

$$R_{yük} = \gamma_{yük} \cdot L_{yük} / A_{k_{yük}} \quad (10)$$

2.4. Ağ Yapısı

Termal-Elektrik analizde çözümden önce geometrinin bir ağ yapısıyla örülmesi gerekmektedir. İyi bir ağ yapısı elde etmek için eleman kalitesi, ortogonal kalite ve çarpıklık gibi değerlerin sırasıyla 1, 1 ve 0 değerlerine yakın olması istenir [30]. Bu özelliklerin yanında ağ boyutu da önemli bir parametredir. Ağ boyutunu küçültmek ağ yapısının kalitesi üzerinde genellikle olumlu bir etkiye sahip olmakla birlikte bu durum ağ yapısındaki eleman ve nokta sayılarını arttıracığından çözüm için gerekli süreyi uzatacaktır. Bu bağlamda optimal bir ağ boyutu bulunmalıdır. Bu çalışmada her ne kadar geometri küçük olsa da yapılan analiz sayısı çok fazla olduğundan optimal ağ boyutu tespit edilmiştir.

Bu amaçla 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm olmak üzere üç farklı boyutta ağ yapısı birbiriyle karşılaştırılmış, termal ve elektriksel çıktılar açısından yaklaşık aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu anlamda çözüm süresinden tasarruf etmek amacıyla 0.1 mm boyutundaki ağ yapısı kullanılmıştır. Kullanılan ağ yapısı Şekil 4'te gösterilmektedir. Tüm modeller için eleman kalitesi 1, ortogonal kalite 1 ve çarpıklık 0 değerlerindedir.



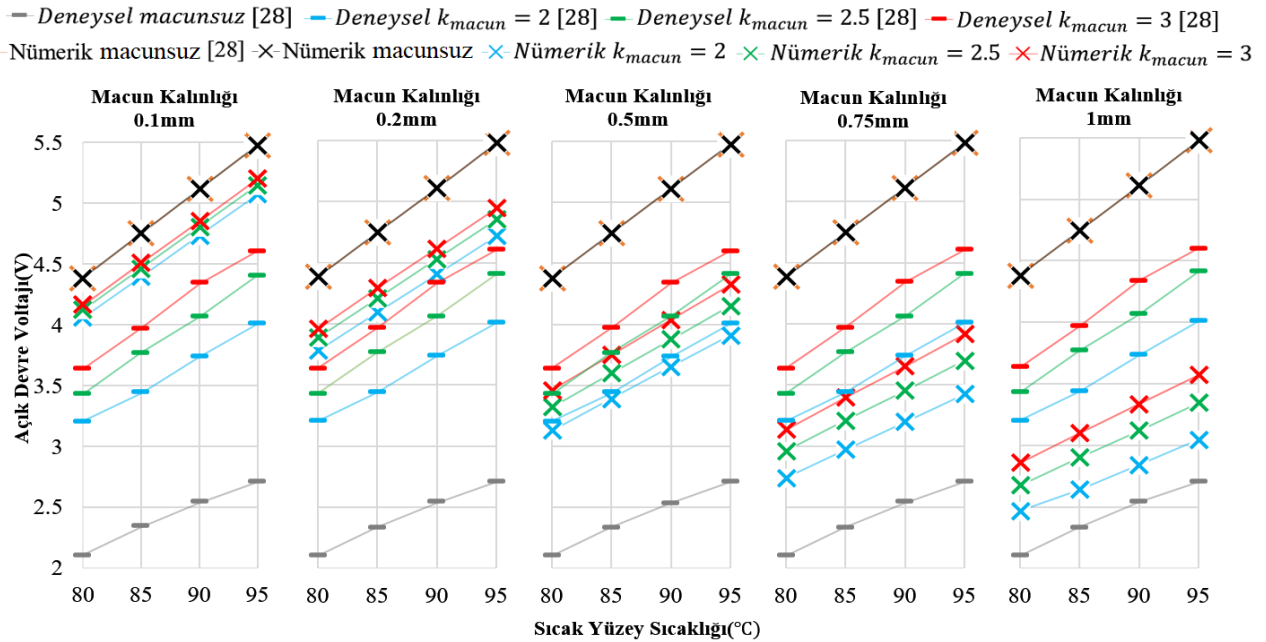
Şekil 4. TEJ sisteminin ağ yapısı görünümü

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında öncelikle termal macunsuz durum için 4 farklı yüzey sıcaklığında hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve literatürdeki [28] nümerik çalışma ile açık devre voltajları

kıyaslanmıştır. Daha sonra, farklı termal iletkenliklere sahip termal macun etkisindeki bir TEJ'den elde edilen açık devre voltajı ve güç çıktı değerleri nümerik olarak incelenmiş ve elde edilen bu sonuçlar Li vd.'nin [28] çalışmasındaki deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Kıyaslanmanın yapıldığı deneysel sonuçlar, TEJ'den en yüksek elektriksel çıktılar elde edildiği 0.4 MPa dış basınç koşulundaki verilerden alınmıştır. Çalışma kapsamında, bu değerlere ek olarak Li vd.'nin çalışmalarında deneysel ve nümerik olarak incelenmemiş olan yük direnci bağlıyken elde edilen voltaj ve akım değerleri de nümerik olarak elde edilmiştir.

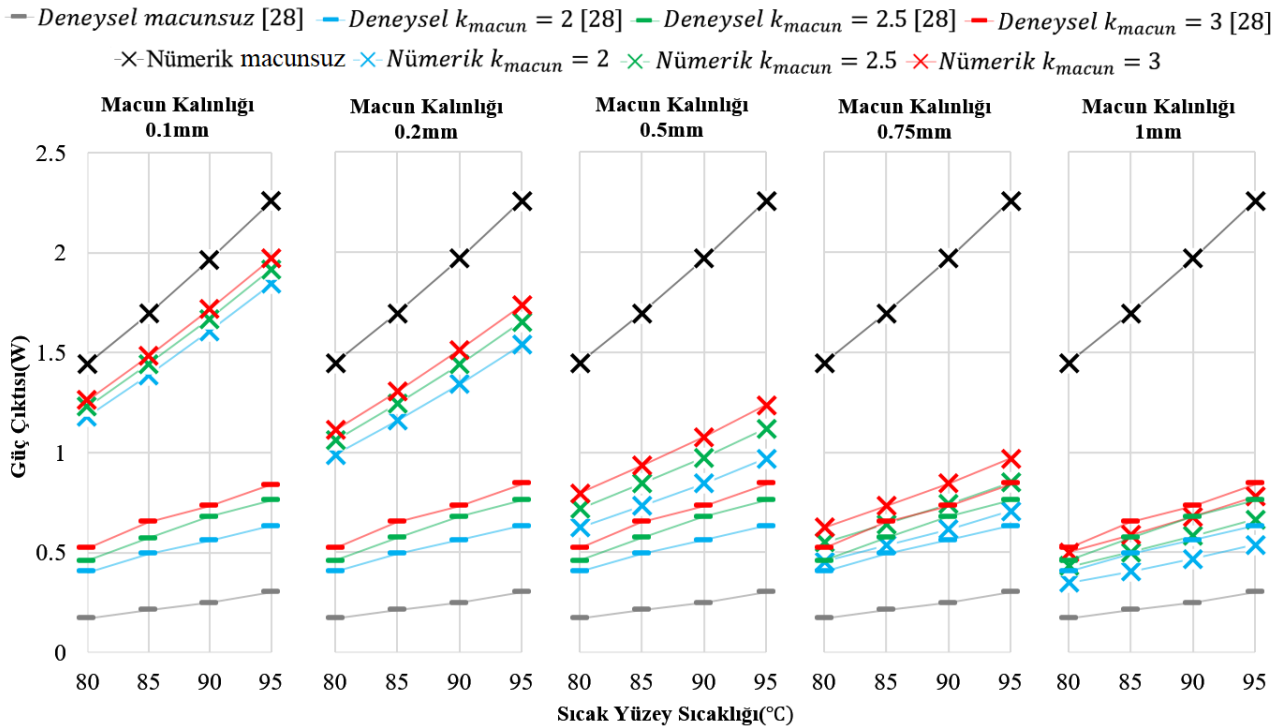
Şekil 5'te farklı sıcak yüzey sıcaklıklarında ve arayüz ısı transfer koşullarında TEJ'den deneysel ölçümlerle ve nümerik hesaplamalarla elde edilen açık devre voltajları gösterilmektedir. Şekillerdeki k değerleri termal macunun termal iletkenlik katsayısını temsil etmektedir. Deneysel için kullanılan "deneysel macunsuz" ifadesi TEJ ve ısı alıcı ara yüzeylerinde termal macunun olmadığı fakat yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan hava boşluklarının olduğu yani kaybın maksimum olduğu durumu simgelemektedir. Termal iletkenlik katsayısı verilmeyen ve "nümerik macunsuz" olarak belirtilen nümerik hesaplamalarda ise TEJ ve ısı alıcı ara yüzeylerinde termal macun ve yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan hava boşlukları yoktur. Dolayısıyla TEJ ve ısı alıcı arasında herhangi bir termal direnç oluşmamaktadır. Bu durumda TEJ ve ısı alıcı ara yüzeylerinde herhangi bir kayıp bulunmamakta, diğer bir ifadeyle iletim kayıpsız gerçekleşmektedir. Şekil incelendiğinde, termal macunsuz olarak gerçekleştirilen nümerik hesaplamaların Li vd.'nin [28]'nin termal macunsuz hesaplamalarıyla uyum içinde olduğu görülmektedir. Termal macun etkisinin daha net görülebilmesi amacıyla tüm grafiklerde termal macunsuz sonuçlara da yer verilmiştir. Daha sonra farklı ısı iletim katsayılarında ve kalınlıklarında termal macunlar kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan nümerik hesaplamalar sonucunda deneysel sonuçlarla [28] en iyi uyumun termal macun kalınlığının 0.5 mm olduğu durumda elde edildiği belirlenmiştir. Bu durumda maksimum açık devre voltajı 95°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 3 W/m·K termal iletkenlikte deneysel olarak 4.60 V ölçülmüş, nümerik olarak 4.32 V hesaplanmıştır. Diğer taraftan en düşük açık devre voltajı 80°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 2 W/m·K termal iletkenlikte deneysel olarak 3.20 V ölçülmüş, nümerik olarak 3.13 V hesaplanmıştır. Tüm durumlarda sıcak yüzey sıcaklığının ve dolayısıyla sıcaklık farkının artmasıyla açık devre voltajları artmıştır. Ayrıca sabit yüzey sıcaklıklarında, kullanılan termal macunların termal iletkenliği arttıkça hem deneysel hem de nümerik olarak elde edilen açık devre voltajları artmıştır.



Şekil 5. Farklı termal iletkenliklerdeki termal macunların arayüz malzemesi olarak kullanımının TEJ'in açık devre voltajı üzerine etkisinin nümerik ve deneysel karşılaştırılması

Bu duruma örnek olarak, nümerik hesaplamalarda 0.5 mm macun kalınlığında ve 85°C sıcak yüzey sıcaklığında termal macunun termal iletkenlikleri 2 W/m·K, 2.5 W/m·K, 3 W/m·K iken hesaplanan açık devre voltajlarının sırasıyla 3.39 V, 3.59 V, 3.74 V olması gösterilebilir. Nümerik gerçekleştirilen ve termal macunun dikkate alınmadığı hesaplamalarda TEJ'in sıcak ve soğuk yüzeylerinde herhangi bir temas direnci olmadığı için TEJ'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ve açık devre voltajı termal macunlu durumlara göre daha yüksek değerlerde çıkmıştır. Deneysel termal macun kullanılmadığı durumda TEJ'in sıcak ve soğuk yüzeylerinde oluşan temas direnci çok yüksek olduğundan en düşük sıcaklık farkı ve açık devre voltajları bu durumda ölçülmüştür. Termal macun kullanıldığı durumlarda, deneysel ve nümerik olarak elde edilen açık devre voltajı değerleri, termal macunun kullanılmadığı durumlardaki nümerik ve deneysel açık devre voltajları arasında kalmıştır. Termal macun kalınlığı arttıkça TEJ ve sıcak yüzey arasındaki temas direnci artacaktır. Şekil 5'te görüldüğü gibi macun kalınlıkları arttıkça açık devre voltajları azalmaktadır. Şekilde deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki en büyük fark 0.1 mm ve 1 mm macun kalınlıklarında meydana gelmiştir. 0.1 mm macun kalınlığında nümerik sonuçlar deneysel sonuçların üstünde kalırken, 1 mm macun kalınlığında altında kalmıştır.

Şekil 6, farklı sıcak yüzey sıcaklıkları ve arayüz ısı transfer koşullarında TEJ'den deneysel ölçümlerle ve nümerik hesaplamalarla elde edilen güç çıktıları göstermektedir. Açık devre voltajları gibi güç çıktıları da sıcaklık farkı arttıkça artmakta, termal macun kalınlığının artmasıyla azalmaktadır. Grafiklerin hepsinde yüksek temas direnci nedeniyle macunsuz olarak gerçekleştirilen deney durumu en düşük güç çıktısına sahiptir. Güç çıktı grafiğinde açık devre voltajı grafiğinden farklı olarak 0.75 mm macun kalınlığında deneysel ve nümerik sonuçların daha iyi uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Termal macun kalınlığının 0.5 mm olduğu durumda deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki fark, 0.75 mm macun kalınlığındakine göre daha büyüktür.

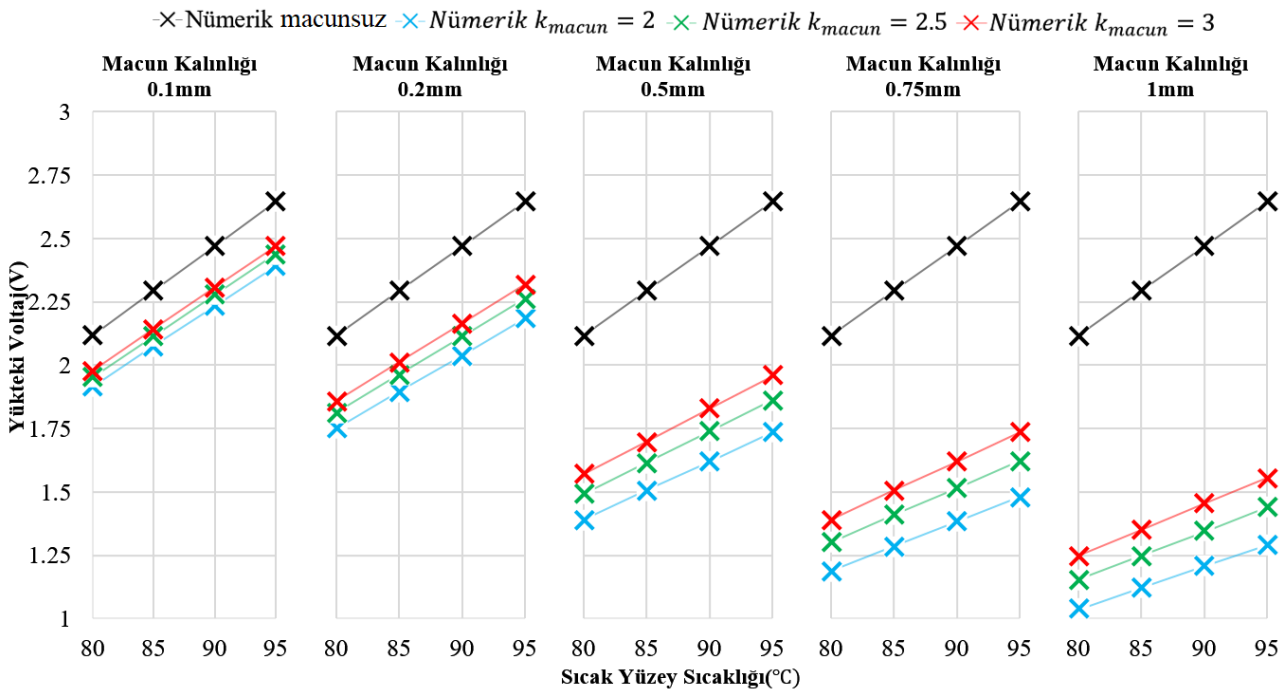


Şekil 6. Farklı termal iletkenliklerdeki termal macunların arayüz malzemesi olarak kullanımının TEJ'in güç çıktısı üzerine etkisinin nümerik ve deneysel karşılaştırılması

Bunun nedeni TEJ'in çıktı gücünün yükteki akım ve voltaj değerlerinin birbiriyle çarpılarak elde edilmesidir. Termal macun kalınlığının 0.5 mm, sıcak yüzey sıcaklığının 95°C ve termal iletkenliğin 3 W/m·K olduğu durumda maksimum güç çıktısı deneysel olarak 0.84 W ölçülmüş,

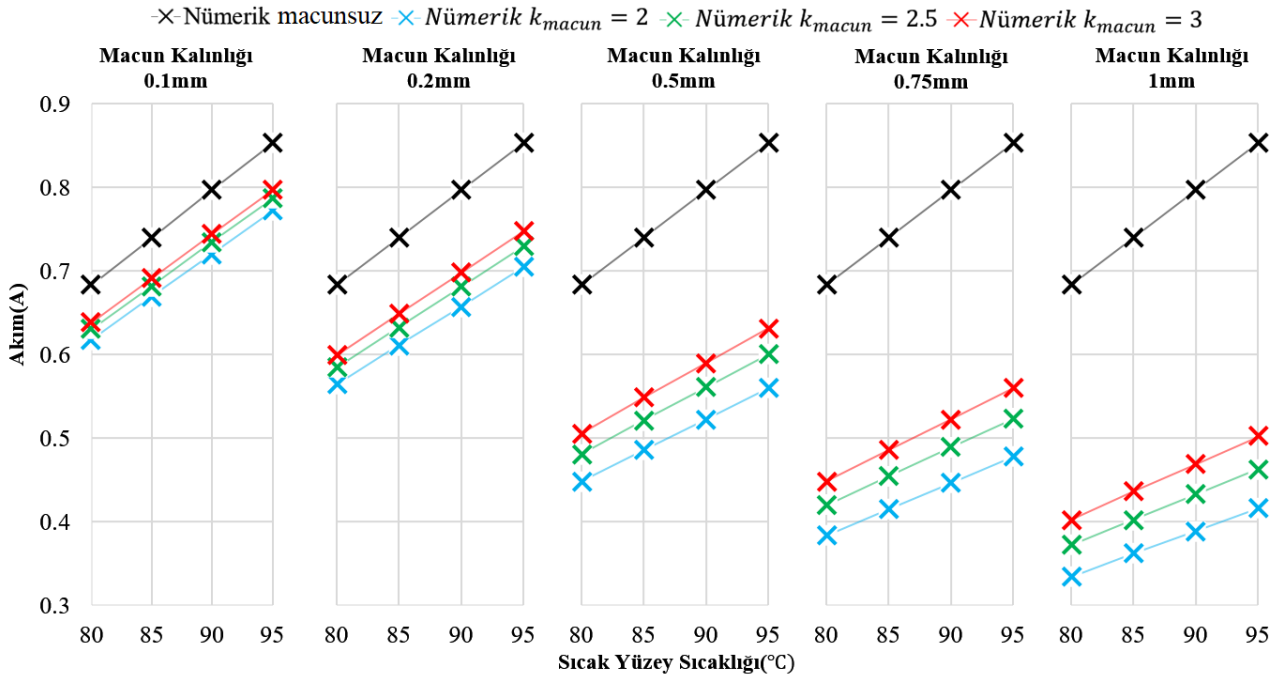
nümerik olarak 1.23 W hesaplanmıştır. Diğer taraftan en düşük güç çıktısı 80°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 2 W/m·K termal iletkenlikte deneysel olarak 0.40 W ölçülmüş, nümerik olarak 0.62 W hesaplanmıştır. Açık devre voltajlarına benzer şekilde sabit yüzey sıcaklıklarında, termal macun termal iletkenliğinin artışıyla güç çıktı değerleri de artmıştır. Örnek olarak 85°C sıcak yüzey sıcaklığında termal macunun termal iletkenliği 2 W/m·K, 2.5 W/m·K ve 3 W/m·K olduğu durumlarda güç değerleri nümerik olarak sırasıyla 0.73 W, 0.84 W, 0.93 W hesaplanmıştır. Termal macun kalınlığının 0.75 mm olduğu durumda maksimum güç çıktısı 95°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 3 W/m·K termal iletkenlikte deneysel olarak 0.84 W ölçülmüş, nümerik olarak 0.96 W hesaplanmıştır. Minimum güç çıktısı 80°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 2 W/m·K termal iletkenlikte deneysel olarak 0.40 W ölçülmüş, nümerik olarak 0.45 W hesaplanmıştır. Deneysel ve nümerik güç çıktıları açık devre voltajlarına benzer şekilde macun kalınlıklarının artmasıyla düşmektedir. Ancak görüldüğü gibi, tüm durumlarda nümerik olarak elde edilen güç çıktı değerleri deneysel sonuçlardan yüksek çıkmıştır. Bunun temel sebebi olarak, TEJ'in güç çıktısının yükteki akım ve voltaj değerlerinin birbiriyle çarpılarak elde edilmesi ve böylece daha yüksek farkların ortaya çıkması olarak belirtilebilir.

Şekil 7, farklı termal iletkenlik ve kalınlıklardaki termal macunların arayüz malzemesi olarak kullanımının TEJ'in yükteki voltaj değerleri üzerine etkisinin uygulanan sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Açık devre voltajları gibi yükteki voltaj değerleri de artan sıcaklık farkıyla artmaktadır. Termal macun kalınlığının 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 0.75 mm ve 1 mm olduğu durumlarda maksimum yük voltajları 95°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 3 W/m·K termal iletkenlikte sırasıyla 2.47 V, 2.31 V, 1.95 V, 1.73 V, 1.55 V'tur. Diğer taraftan minimum yük voltajları 80°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 2 W/m·K termal iletkenlikte sırasıyla 1.91 V, 1.75 V, 1.39 V, 1.18 V, 1.03 V'tur. Termal macun kalınlığı arttıkça TEJ'in sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı azalmakta ve bu durum yükteki voltaj değerlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Nümerik olarak yapılan ve termal macun etkisinin dikkate alınmadığı hesaplamalarda yükteki voltaj değerleri termal macun etkisi dikkate alınarak yapılan hesaplamalardan daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni daha önce de belirtildiği termal macun etkisinin dikkate alınmadığı hesaplamalarda temas direncinin olmamasından kaynaklanmaktadır. Nümerik macunsuz durumda minimum ve maksimum yük voltajları sırasıyla 80°C'de 2.11 V ve 95°C'de 2.64 V hesaplanmıştır.



Şekil 7. Farklı termal iletkenliklerdeki termal macunların arayüz malzemesi olarak kullanımının TEJ'in yükteki voltaj değerleri üzerine etkisi

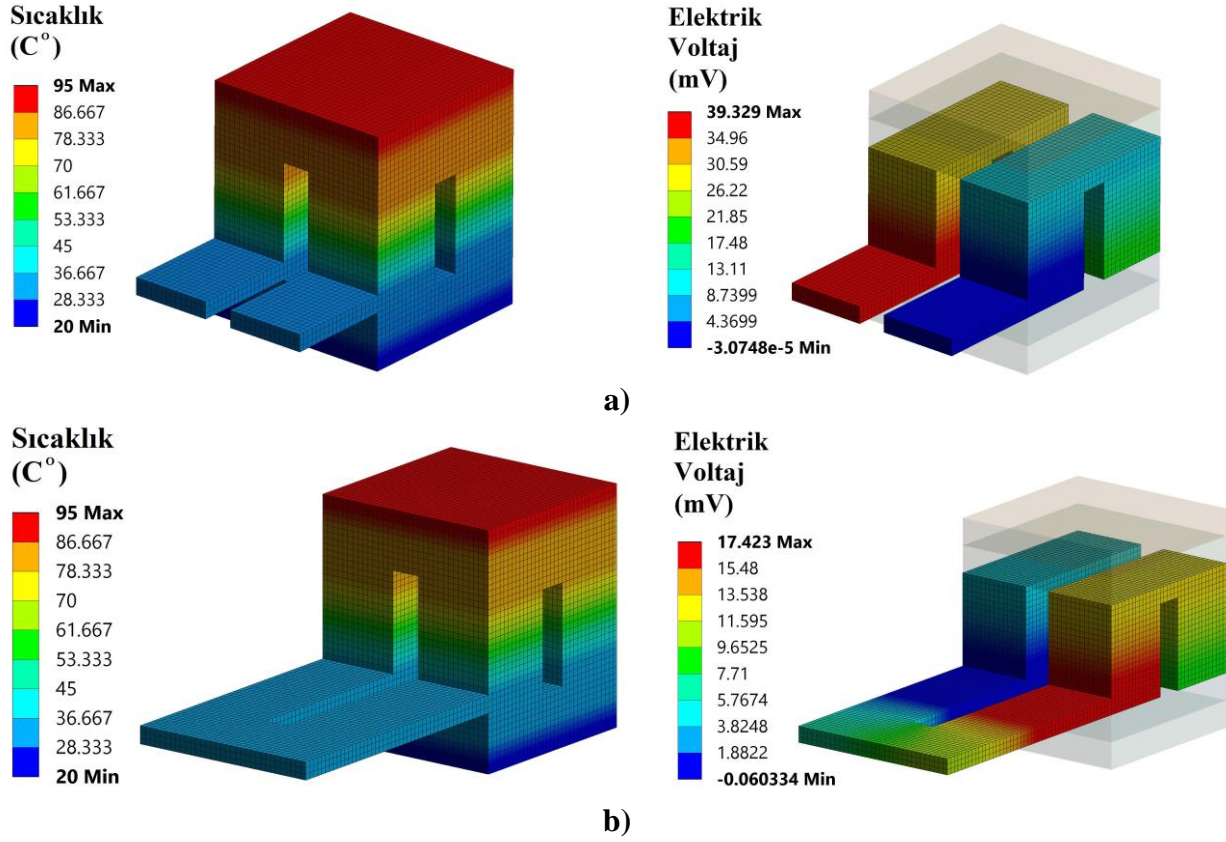
3.1 Ω yük direnci bağılyken TEJ'den çekilen akım değerlerinin sıcaklık, termal macun kalınlığı ve termal iletkenliğine bağıly değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Akım değerleri de güç ve voltaj değerleriyle aynı trendi izlemiştir. Termal macun kalınlığının 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 0.75 mm ve 1 mm olduğu durumlarda maksimum akım değerleri 95°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 3 W/m·K termal iletkenlikte sırasıyla 0.79 A, 0.74 A, 0.63 A, 0.55 A, 0.50 A'dır. Minimum akım değerleri ise 80°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 2 W/m·K termal iletkenlikte sırasıyla 0.61 A, 0.56 A, 0.44 A, 0.38 A, 0.33 A bulunmuştur. Nümerik olarak yapılan ve termal macun etkisinin dikkate alınmadığı hesaplamalarda ise minimum akım çıktısı 80°C sıcak yüzey sıcaklığında 0.68 A, maksimum akım çıktısı 95°C sıcak yüzey sıcaklığında 0.85 A hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlarla daha uyumlu sonuçların elde edildiğı 0.5 mm termal macun kalınlığında ve 2.5 W/m·K termal iletkenlikte 80°C, 85°C, 90°C, 95°C sıcaklığa karşılık gelen akım değerleri sırasıyla 0.48 A, 0.52 A, 0.56 A, 0.60 A olarak elde edilmiştir.



Şekil 8. Farklı termal iletkenliklerdeki termal macunların arayüz malzemesi olarak kullanımının TEJ'in akım değerleri üzerine etkisi

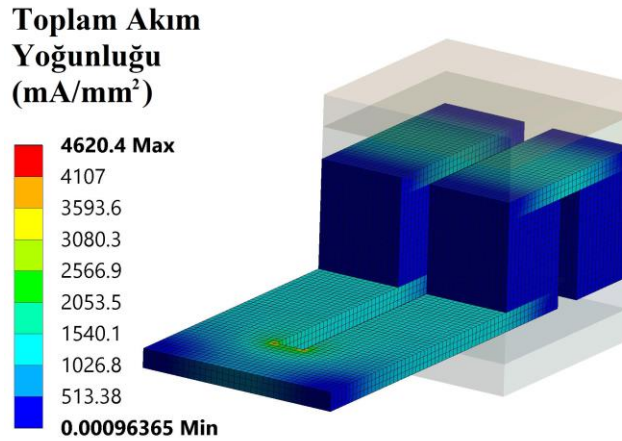
Yük direncinin bağıly olduğu ve bağıly olmadığı durumlardaki TEJ sisteminin denge haline ulaştığındaki sıcaklık ve elektrik voltaj dağılımı Şekil 9'da gösterilmiştir. Verilen şekil, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağladığı için 0.5 mm macun kalınlığında, sıcak yüzey sıcaklığının 95°C, soğuk yüzey sıcaklığının 20°C ve termal macun iletkenliğinin 2 W/m·K olduğu durumu göstermektedir. Her iki durumda da voltaj kademeli olarak P-tip'den N-tip yarı iletkene doğru azalmıştır ve yük direnci bağılyken voltaj değeri açık devre voltajına göre yaklaşık olarak yarıya düşmüştür. Bu sonuçlara göre açık devre voltajı 39.32 mV iken yükteki voltaj değeri 17.72 mV bulunmuştur. Deneyde kullanılan TEJ içinde 199 çift P ve N tip yarı iletken birbirine elektriksel olarak seri bağılydır. Bu değerler 199 çift termoeleman için hesaplandığında açık devre voltajı 3.91 V, yükteki voltaj değeri 1.73 V'tur. Çeşitli sıcaklık farkları için açık devre voltajları ve yükteki voltaj değerleri sıcak yüzeyin sınır koşulu değiştirilerek hesaplanabilmektedir. Bu bağlamda 80°C, 85°C, 90°C sıcaklıklarda açık devre voltajları sırasıyla 3.13 V, 3.39 V, 3.65 V ve yükteki voltaj değerleri 1.39 V, 1.50 V, 1.61 V bulunmuştur.

Şekil 10'da, 0.5 mm macun kalınlığında, sıcak yüzey sıcaklığının 95°C , soğuk yüzey sıcaklığının 20°C ve termal macun iletkenliğinin $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ olduğu durumda yük direnci bağlıken elde edilen toplam akım yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir. Bakır elektrotun seçili kesit alanı üzerinde akım yoğunluğunun basit alan integrasyonu yapılarak akım değeri 0.55 A olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. TEJ sisteminin denge durumunda **a)** direnç bağı değilken sıcaklık ve voltaj dağılımı, **b)** direnç bağılyken sıcaklık ve voltaj değılımı

Aynı şekilde 80°C , 85°C , 90°C sıcaklıklarda akım değeri sırasıyla 0.44 A , 0.48 A , 0.52 A bulunmuştur. Yapılan diğer analizlerde de sıcaklık, voltaj ve toplam akım yoğunluğu dağılımı görünümleri benzer olduğundan bundan sonraki aşamalarda gösterilmemiştir.



Şekil 10. TEJ sisteminin toplam akım yoğunluğu dağılımı

Yapılan çalışmada analizler, 80°C, 85°C, 90°C, 95°C sıcak yüzey sıcaklıklarında, 2 W/m·K, 2.5 W/m·K, ve 3 W/m·K termal macun termal iletkenliklerinde ve 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 0.75 mm ve 1 mm termal macun kalınlıklarında gerçekleştirilmiştir. Tüm durumlar incelendiğinde, TEJ için optimum çalışma şartları, 95°C sıcak yüzey sıcaklığı, 3 W/m·K termal macun termal iletkenlik katsayısı ve 0.5 mm termal macun kalınlığı durumunda elde edilmiştir.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, TIM'lerin TEJ performansı üzerindeki etkisi dikkate alınarak nümerik hesaplar gerçekleştirilmiş ve literatürden [28] elde edilmiş deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Bu kapsamda farklı ısı iletim katsayılarına ve kalınlığına sahip termal macunların TEJ performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Nümerik hesaplamalar üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik sonuçlar açık devre voltajı ve güç çıkışı cinsinden hem deneysel sonuçlarla [28] hem de literatürden termal macun etkisinin hesaba katılmadığı [28] nümerik çalışma sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca akım ve yük voltajları farklı termal macun kalınlıklarında ve termal iletkenliklerinde nümerik olarak tespit edilmiştir. Bu kapsamda farklı ısı iletim katsayılarına (2 W/m·K, 2.5 W/m·K ve 3 W/m·K) ve kalınlıklarına (0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 0.75 mm ve 1 mm) sahip termal macunların TEJ performansına olan etkisi incelenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, deneysel ve nümerik sonuçların 0.5 mm termal macun kalınlığında iyi uyum sağladığı belirlenmiştir. Bu kalınlıkta maksimum açık devre voltajı, yükteki voltaj, akım, güç çıktı değerleri 95°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 3 W/m·K termal iletkenlik katsayısı durumunda meydana gelmiştir. Bu şartlarda maksimum açık devre voltajı ve güç çıkışı deneysel olarak sırasıyla 4.60 V ve 0.84 W değerlerinde iken, nümerik olarak 4.32 V ve 1.23 W olarak hesaplanmıştır. Çekilen maksimum akım 0.63 A, yük voltajı 1.95 V olarak bulunmuştur. Minimum elektriksel çıktılar ise 80°C sıcak yüzey sıcaklığında ve 2 W/m·K termal iletkenlikte elde edilmiştir. Bu şartlarda minimum açık devre voltajı ve güç çıkışı sırasıyla deneysel olarak 3.20 V ve 0.40 W ölçülmüş, nümerik olarak 3.13 V ve 0.62 W olarak hesaplanmıştır. Çekilen minimum akım 0.44 A, yük voltajı 1.39 V bulunmuştur. Tüm analizlerde sıcaklık farkı artışı ve termal macun ısı iletim katsayısının artışı TEJ'in elektriksel çıktılarını arttırmış, termal macun kalınlığının artması ise elektriksel çıktılarını azaltmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, TEJ için optimum çalışma şartları, 95°C sıcak yüzey sıcaklığı, 3 W/m·K termal macun termal iletkenlik katsayısı ve 0.5 mm termal macun kalınlığı olarak belirlenmiştir.

Bu çalışma ile özellikle son yıllarda artan bir ilgiye sahip olan TEJ'lerin nümerik modellenmesinde termal macun etkisinin hesaba katılarak daha gerçekçi sonuçların elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu çalışma termal macunun çoğunlukla uygulandığı mikroelektronik, güç elektroniği ve LED aydınlatma alanları için de katkıda bulunacaktır. İlerleyen çalışmalarda, TEJ sisteminin tamamının modellenmesi ve TEJ'lerin soğutulmasında kullanılan ısı alıcıların da sisteme entegre edilerek komple bir çözüm yapılması hedeflenmektedir.

Yazar(lar)ın Katkıları

SO, BS ve BT çalışmaları ve hesaplamaları yaptı ve birlikte makaleyi yazdı. Üç yazar da makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Lv, S., He, W., Jiang, Q. Y., Hu, Z. T., Liu, X. H., Chen, H. B. and Liu, M. H., "Study of different heat exchange technologies influence on the performance of thermoelectric generators," *Energy Conversion and Management*, 2018. 156: p. 167-177.
- [2]. Ma, Z., Wei, J. T., Song, P. S., Zhang, M. L., Yang, L. L., Ma, J., Liu, W., Yang, F. H. and Wang, X. D., "Review of experimental approaches for improving zT of thermoelectric materials," *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021. 121.
- [3]. Musah, J. D., Guo, C., Novitskii, A., Serhienko, I., Adesina, A. E., Khovaylo, V., Wu, C. M. L., Zapien, J. A. and Roy, V. A. L., "Ultralow Thermal Conductivity in Dual-Doped n-Type Bi₂Te₃ Material for Enhanced Thermoelectric Properties," *Advanced Electronic Materials*, 2021.
- [4]. Shyni, P., Pradyumnan, P. P., Rajasekar, P., Narayanan, A. M. and Umarji, A. M., "Graphitic carbon nitride-bismuth antimony telluride nanocomposites: A potential material for thermoelectric applications," *Journal of Alloys and Compounds*, 2021. 853.
- [5]. Xu, Y. W., Jia, Y. H., Liu, P. P., Jiang, Q. L., Hu, D. H. and Ma, Y. G., "Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) as promising thermoelectric materials and devices," *Chemical Engineering Journal*, 2021. 404.
- [6]. Zhao, L. D., Tan, G. J., Hao, S. Q., He, J. Q., Pei, Y. L., Chi, H., Wang, H., Gong, S. K., Xu, H. B., Dravid, V. P., Uher, C., Snyder, G. J., Wolverton, C. and Kanatzidis, M. G., "Ultrahigh power factor and thermoelectric performance in hole-doped single-crystal SnSe," *Science*, 2016. 351(6269): p. 141-144.
- [7]. Erturun, U., Eremis, K. and Mossi, K., "Effect of various leg geometries on thermo-mechanical and power generation performance of thermoelectric devices," *Applied Thermal Engineering*, 2014. 73(1): p. 128-141.
- [8]. Park, S. H., Jo, S., Kwon, B., Kim, F., Ban, H. W., Lee, J. E., Gu, D. H., Lee, S. H., Hwang, Y., Kim, J. S., Hyun, D. B., Lee, S., Choi, K. J., Jo, W. and Son, J. S., "High-performance shape-engineerable thermoelectric painting," *Nature Communications*, 2016. 7.
- [9]. Sahin, A. Z. and Yilbas, B. S., "The thermoelement as thermoelectric power generator: Effect of leg geometry on the efficiency and power generation," *Energy Conversion and Management*, 2013. 65: p. 26-32.
- [10]. Zhang, G. B., Fan, L. H., Niu, Z. Q., Jiao, K., Diao, H., Du, Q. and Shu, G. Q., "A comprehensive design method for segmented thermoelectric generator," *Energy Conversion and Management*, 2015. 106: p. 510-519.
- [11]. Chen, T., Bae, K. J. and Kwon, O. K., "Experimental study on heat transfer performance of fin-tube exchanger and PSHE for waste heat recovery," *Heat and Mass Transfer*, 2018. 54(2): p. 305-312.
- [12]. Elghool, A., Basrawi, F., Ibrahim, T. K., Habib, K., Ibrahim, H. and Idris, D. M. N. D., "A review on heat sink for thermo-electric power generation: Classifications and parameters affecting performance," *Energy Conversion and Management*, 2017. 134: p. 260-277.
- [13]. Lu X, Y. X.-F., Ma T, Wang Q-W, "Numerical Investigation on Thermoelectric Power Generator With Gradient Plate-Fin Heat Exchanger," *K Cheng Je Wu Li Hsueh Pao/Journal Eng Thermophys*, 2020. 41: p. 169-74.
- [14]. Zhang., M., Wang., J., Tian., Y., Zhou., Y., Zhang., J., Xie., H., Wu., Z., Li., W. and Wang., Y., "Performance comparison of annular and flat-plate thermoelectric generators for cylindrical hot source," *Energy Reports*, 2021. 7: p. 413-420.
- [15]. Ong, K. S., Tan, C. F., Lai, K. C. and Tan, K. H., "Heat spreading and heat transfer coefficient with fin heat sink," *Applied Thermal Engineering*, 2017. 112: p. 1638-1647.
- [16]. Patil, D. S., Arakerimath, R. R. and Walke, P. V., "Thermoelectric materials and heat exchangers for power generation - A review," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018. 95: p. 1-22.

- [17]. Wang, T. C., Luan, W. L., Wang, W. and Tu, S. T., "Waste heat recovery through plate heat exchanger based thermoelectric generator system," *Applied Energy*, 2014. 136: p. 860-865.
- [18]. Soleimani, Z., Zoras, S., Cui, Y., Ceranic, B. and Shahzad, S., "Design of heat sinks for wearable thermoelectric generators to power personal heating garments: A numerical study," *Sustainability in the Built Environment for Climate Change Mitigation (Sbe19)*, 2020. 410.
- [19]. Naphon, P., Wiriyasart, S. and Hommalee, C., "Experimental and numerical study on thermoelectric liquid cooling module performance with different heat sink configurations," *Heat and Mass Transfer*, 2019. 55(9): p. 2445-2454.
- [20]. Naphon, P. and Wiriyasart, S., "Liquid cooling in the mini-rectangular fin heat sink with and without thermoelectric for CPU," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009. 36(2): p. 166-171.
- [21]. Seo, Y. M., Ha, M. Y., Park, S. H., Lee, G. H., Kim, Y. S. and Park, Y. G., "A numerical study on the performance of the thermoelectric module with different heat sink shapes," *Applied Thermal Engineering*, 2018. 128: p. 1082-1094.
- [22]. Hamidnia, M., Luo, Y. and Wang, X. D., "Application of micro/nano technology for thermal management of high power LED packaging - A review," *Applied Thermal Engineering*, 2018. 145: p. 637-651.
- [23]. Khan, J., Momin, S. A. and Mariatti, M., "A review on advanced carbon-based thermal interface materials for electronic devices," *Carbon*, 2020. 168: p. 65-112.
- [24]. Moore, A. L. and Shi, L., "Emerging challenges and materials for thermal management of electronics," *Materials Today*, 2014. 17(4): p. 163-174.
- [25]. Xu, Y., Zhang, Y., Suhir, E. and Wang, X. W., "Thermal properties of carbon nanotube array used for integrated circuit cooling," *Journal of Applied Physics*, 2006. 100(12).
- [26]. Astrain, D., Vian, J. G., Martinez, A. and Rodriguez, A., "Study of the influence of heat exchangers' thermal resistances on a thermoelectric generation system," *Energy*, 2010. 35(2): p. 602-610.
- [27]. Chung, S. H., Kim, J. T. and Kim, D. H., "Hybrid carbon thermal interface materials for thermoelectric generator devices," *Scientific Reports*, 2020. 10(1).
- [28]. Li, G., Wang, Z. C., Wang, F., Wang, X. Z., Li, S. B. and Xue, M. S., "Experimental and Numerical Study on the Effect of Interfacial Heat Transfer on Performance of Thermoelectric Generators," *Energies*, 2019. 12(19).
- [29]. Wang, S. X., Xie, T. X. and Xie, H. X., "Experimental study of the effects of the thermal contact resistance on the performance of thermoelectric generator," *Applied Thermal Engineering*, 2018. 130: p. 847-853.
- [30]. *Fluent User's Guide*, Fluent 18 version, Fluent Incorporated. 2017.