



GAN GÜÇ ANAHTARLARI İLE GERÇEKLENEN YARIM KÖPRÜ GELİŞTİRME KARTININ ISIL BAŞARIMININ İNCELENMESİ

Ömer Faruk GÖKSU^{1,2}, Mehmet Onur GÜLBAHÇE^{2*}, Serkan DÜŞMEZ³

¹ Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ Güç Yönetimi Çözümleri İş Birimi, Wat Motor, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

GaN FET,
Isıl Yönetim,
Sürekli Hal Isıl Analiz,
Sonlu Elemanlar Yöntemi,
EPC2215,
EPC9099.

Öz

GaN FET anahtarlar ufak paket boyutlarına sahip olması ve yüksek çalışma gerilim-akım değerlerini yüksek anahtarlama frekanslarında sağlayabilmesinden dolayı güç elektroniği çeviricilerinde yeni ufuklar açmıştır. Bu çalışma EPC firması tarafından üretilmiş olan küçük paket boyutlarındaki EPC2215 ($V_{DS}=200V$, $I_D=32A$, $R_{DS(on)}=8m\Omega$) GaN FET anahtarların sonlu elemanlar yöntemi tabanlı ısıl modelinin elde edilmesini ile ilgilidir. JEDEC standartlarınca belirlenen deney talimatları kurulan benzetim modeline uygulanmıştır. Anahtarın jonksiyondan kılıfa, jonksiyondan dış ortama ve jonksiyondan devre kartına olan ısıl dirençleri benzetim modeli ile hesaplanmış ve firmanın veri föylerinde paylaştığı ısıl direnç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra yine aynı firmaya ait olan, EPC2215 anahtarları ile yapılan, EPC9099 yarım-köprü geliştirme kartının ısıl modellemesi yapılmıştır. Firma tarafından veri föyünde paylaşılan kayıp güç değerleri benzetim modeline uygulanmıştır. Benzetim sonucunda geliştirme kartının ısıl yönden zorlandığı bölgeler belirlenmiştir. Daha sonra benzetim ile elde edilen ısıl dağılım sonuçları ile deneysel termal kamera görüntüleri karşılaştırılmıştır.

INVESTIGATION OF THE HEAT PERFORMANCE OF THE HALF-BRIDGE DEVELOPMENT BOARD WITH GAN POWER DEVICES

Keywords

GaN FET,
Thermal Management,
Steady-State Thermal
Analysis,
Finite Element Method,
EPC2215,
EPC9099.

Abstract

GaN FET switches have opened new horizons in power electronics converters due to their small package size and their ability to provide high operating voltage-current values at higher switching frequencies. This study presents the finite element method (FEM) based thermal model of EPC2215 ($V_{DS}=200V$, $I_D=32A$, $R_{DS(on)}=8m\Omega$) GaN FET switches produced by EPC company in small package sizes. Firstly, the test procedures determined by the JEDEC standards have been applied to the established FEM-based model. The thermal resistances of the switch from junction to case, junction to ambient, and junction to board have all been estimated using the FEM-based simulation model and compared with the thermal resistance values given in the datasheet. Afterwards, the thermal model of the EPC9099 half-bridge development board that uses EPC2215 switches has been developed. The power loss values given in the datasheet have been applied to the thermal model. As a result of the simulation, the regions where the development board was subjected to thermal stress were identified. Finally, the thermal map results obtained by the simulation have been compared with the thermal camera readings captured during experiments.

Alıntı / Cite

Göksu, Ö. F., Gülbahçe, M. O., Düşmez, S. (2022). GaN Güç Anahtarları ile Gerçeklenen Yarım Köprü Geliştirme Kartının Isıl Başarımının İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 550-560.

* İlgili yazar / Corresponding author: mogulbahce@fsm.edu.tr

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
Ö. F. Göksu, 0000-0002-5192-7055	Başvuru Tarihi / Submission Date	19.11.2021
M. O. Gülbahçe, 0000-0002-6689-8445	Revizyon Tarihi / Revision Date	15.02.2022
S. Düşmez, 0000-0002-3728-900X	Kabul Tarihi / Accepted Date	08.03.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.06.2022

1. Giriş (Introduction)

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte, üretilen elektriksel cihazlarda ve bu cihazlarda kullanılan tümdevrelerin boyutlarında sürekli küçülme eğilimi görülmektedir. Bu sayede güç elektroniği yapılarının boyutlarında küçülme olmasına rağmen ihtiyaç duyulan enerji gereksiniminin her geçen gün artış göstermesi, istenen birim hacim başına güç yoğunluklarının da artmasına sebep olmuştur. İstenen gerilim ve akım değerlerini sağlayacak anahtarlama elemanlarının boyutlarının küçülmesi, günümüzde bu anahtarların yonga-boyutlu paketler şeklinde üretilmesini sağlamıştır. Ufak paket boyutlarına sahip olması, yüksek gerilim ve akım değerlerini yüksek anahtarlama frekans değeri ile sunmasından dolayı Galyum-Nitrat (GaN) FET anahtarlar, yüksek enerji verimliliği sebebi ile güç dönüştürücü yapılarında tercih edilmektedir. EPC firmasının 200 V savak-kaynak geriliminde ve sürekli halde 32 A savak akımında çalışabilecek GaN FET anahtarlarının paketleri sadece 7 mm² bir alana sahiptir. Bu özellikleri ile GaN FET tabanlı güç çeviricileri 6 kW güç değerine kadar tasarlanabilmektedir (Jones ve Rooij, 2018; Bulut vd., 2021).

Güç elektroniği devresi tasarımında anahtar paketi seçilirken, birçok etken ve fiziksel özelliğin dikkate alınması gerekmektedir. Güç elektroniğinde çeviricilerinde dikkat edilmesi gereken etken ve özelliklerin başında güvenlik, ısı yönetim, seri üretime uygun tasarım ve uzun kullanım ömrü gelmektedir. Anahtarlar üzerinde açığa çıkan ısı enerjisinin verimli bir şekilde yapıdan uzaklaştırılması, yapının uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışması açısından en önemli etkidir. Fakat ısının güç çevirici yapısından uzaklaştırılması anahtar paket boyutlarının küçülmesi ile daha da zorlu bir hedefe dönüşmüştür. Sıcaklık artışı anahtar iletim dirençlerinin değişmesine neden olurken tasarlanan çeviricinin de veriminin düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar güç anahtarlarının ömürlerini azaltmakta ve güvenli çalışma bölgesi eğrilerini ciddi şekilde etkilemektedir. Bu nedenle bir güç elektroniği devresi tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden bir tanesi ısı yönetimidir (Ilhan ve BAŞKAYA, 2020; Gautam vd, 2013; Laloya vd.,2016).

Güç dönüştürücü yapılarında bulunan ısı yönetim sisteminin iki önemli problemin önüne geçmesi gerekmektedir. Bunlardan ilki yüksek güç kayıpları sonucunda ortaya çıkan ısı enerjisidir. Diğer ise bu ısı enerjisinin küçük paket boyutlarından dolayı anahtarlardan uzaklaştırılmasıdır. Bu problemlerin çözülmesi için pahalı, hacim olarak büyük ve ağır ısı yönetim sistemleri tasarlandığı literatürde görülmektedir. Bu sistemler ısıyı yapıdan hızlı bir şekilde uzaklaştırmasına rağmen güç dönüştürücü yapısının maliyetini arttırmakta ve ısı yönetim sistemi için harcanan güç arttığından dolayı verimi düşürmektedir (Huai vd, 2013; Ke and Blaabjerg, 2014).

Sistemdeki ısının uzaklaştırılması ile GaN FET anahtar tabanlı güç dönüştürücü yapılarının güç yoğunluğu artırılabilir. Yeni GaN FET anahtarlarının küçük yüzey alanına sahip olması, açığa çıkan ısı enerjisinin uzaklaştırılması sırasında darboğaza sebep olmaktadır. Verimli ısı yönetim sistemlerinin kullanılması ile bu darboğaz aşılabilmekte ve istenilen verimli soğutma elde edilebilmektedir (Jones and Rooij, 2019; Gao vd., 2014).

Güç elektroniği devrelerindeki ısı analizler, hesaplamalı akışkan dinamiği ve sonlu elemanlar yönteminin birlikte kullanıldığı bir benzetim programları ile yapılabilir. Bu benzetim programları sayesinde sıcaklık analizi, ısı dağılımı ve sıcaklık gerilim testleri kolaylıkla yapılabilmektedir. Bu testlerin amacı, tasarlanan güç elektroniği devre yapısı ve ısı yönetim sisteminin birlikte çalışması sırasında meydana gelebilecek en yüksek çalışma sıcaklığını öngörebilmektir. Buna ek olarak devre üzerinde ısının yoğunlaştığı ve ısı yönetim sistemindeki iyileştirilme yapılması gereken bölgelerin de tespiti yapılabilmektedir (Çiçek ve Şahin, 2020; Bulut vd. 2021).

Açığa çıkan ısının güç elektroniği elemanlarından uzaklaştırılması sağlıklı ve uzun ömürlü çalışma için önemlidir. Güç elektroniği devrelerinde ısıyı uzaklaştırmak amacı ile kullanılan en yaygın yöntem hava akışı ile elemanın soğutulmasıdır. Sistem üzerinde ısının ortaya çıktığı bazı bölgeler, tasarımdan dolayı hava akışının geçmesine uygun olmamaktadır. Bu durumlarda oluşan ısının hava akışının olduğu bölgeye taşınması gerekmektedir. Ayrıca bu ısının daha geniş yüzeylere taşınması da hava akışı ile soğutmaya yardımcı olmaktadır. Bu amaçla ısıyı hızlıca iletebilen katı malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler iletim plakaları, ısı yalıtım malzemesi ve alüminyum ya da bakırdan üretilmiş soğutuculardır. Oluşan ısıyı güç elektroniği devresinden uzaklaştırmak için kullanılan üç temel yöntem bulunmaktadır; doğal hava akışı, zorlanmış hava akışı, sıvı soğutma. Doğal hava akışı, oluşan ısının ortamdaki hava yolu ile uzaklaştırılmasıdır. Zorlanmış hava akışı, oluşan ısının bir fan ya da hava akışını arttıran bir cihaz kullanılarak soğutma işleminin gerçekleştirilmesidir. Sıvı soğutma yöntemi, oluşan ısının sıvı malzemeye

aktarılması ve sonrasında bu sıvı malzemenin soğutulması ile gerçekleştirilen soğutma yöntemidir (Laloya vd.,2016; Blinov vd., 2011).

Bu çalışmada, öncelikle EPC firması tarafından üretilmiş olan EPC 2215 ($V_{DS}=200V$, $I_D=32A$, $R_{DS(on)}=8m\Omega$) GaN FET anahtarlarının ısıl modellemesi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. JEDEC standartları gereği oluşturulan deney platformu kurulan sonlu elemanlar yöntemine dayalı ısıl model üzerinde oluşturulmuştur. Anahtarın jonksiyondan kılıfa, jonksiyondan dış ortama ve jonksiyondan devre kartına olan ısıl dirençleri sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış ve firmanın veri föylerinde paylaştığı ısıl direnç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra yine aynı firmaya ait olan EPC9099 yarım-köprü geliştirme kartı ısıl modeli elde edilmiş ve firma tarafından veri föyünde paylaşılan kayıp güç değerleri benzetim modeline uygulanmıştır. Geliştirme kartının anma çalışması sırasında ortaya çıkan ısıl dağılımı elde edilmiş, devrenin ısıl yönden zorlandığı noktalar belirlenmiştir. Daha sonra benzetim ile elde edilen sonuçlar ile termal kamera görüntülerinin elde edildiği deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. Sonlu Elemanlar Yöntemine Dayalı Isıl Modelleme Yaklaşımı (Thermal Modeling Approach Based on Finite Element Method)

Güç elektroniği devrelerinde kullanılan bileşenlerin üreticinin belirlediği sıcaklık aralığında çalıştırılması gerekmektedir. Bu değer aralığının dışında kullanım bileşenleri tahrip olmasına veya istenilen şekilde çalışmamasına sebep olmaktadır. GaN FET anahtarları için üreticinin belirlediği sıcaklık değeri genellikle $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ile $125\text{ }^\circ\text{C}$ aralığındadır. Devre üzerindeki GaN FET anahtarların anma çalışmasındaki eriştiği sıcaklık değerini belirlemek için ısıl modeli elde edilmelidir. Güç elektroniği devrelerinde kullanılan elemanların ısıl yönden modellenmesi yapılırken ısı akışı sürekli, laminer ve sıkıştırılmaz kabulü ile Eşitlik (1)'de verilen laplace denklemi çözülür. Bu denklemde T sıcaklığı temsil etmektedir.

$$\nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Isı transferi yasaların göre bir malzemenin ısının iletilme hızı, ısı akışına normal alan ve ısı akış yolu boyunca sıcaklık gradyanıyla orantılıdır. Güç elektroniğinde kullanılan yarı iletken anahtarlarındaki aktif bölge, anahtarlama bölgesi, kılıf bölgesi, tümdevre bacak bölgesi gibi bölgelerin modellenmesi sırasında Eşitlik (1)'deki denklemin tek boyutlu özel hali olan Fourier denkleminin yararlanır. Burada Q birim zamanda transfer edilen ısı miktarını (W), k ısıl iletkenliği ($W/(m^2K)$), A ısı geçişine dik olan yüzey alanını (m^2), T sıcaklığı (K) ve L ise malzemenin kalınlığını (m) göstermektedir.

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

Bir malzemenin ısıl iletkenliği, birim alan başına ve birim sıcaklık farkı başına malzemenin birim kalınlığı boyunca ısı transfer hızı olarak tanımlanır ve malzemenin ısıyı iletme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Isıl iletkenlik tanımından yola çıkarak güç elektroniği anahtarlarındaki her bir bölgenin ısıl dirençleri (R_θ) elde edilebilir.

$$R_\theta = \frac{L}{k \cdot A} \quad (3)$$

Güç elektroniği devrelerinde jonksiyondan kılıfa ya da kılıftan ortama ısı transferinin taşınım yöntemi ile mümkündür. Taşınım yöntemi ile ısı transferi ise Newton'un soğuma denklemi (Eşitlik 4) ile ifade edilebilir. Denklemden Q birim zamanda transfer edilen ısı miktarını (W), h ısı taşınım katsayısını ($W/(m^2K)$), A ısı geçişine dik olan yüzey alanını (m^2), ΔT sıcaklık farkını (K) temsil eder.

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (4)$$

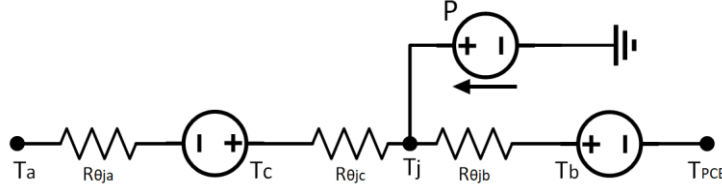
Isı taşınım katsayısı (h) birim yüzey alanından, birim sıcaklık farkında ve birim sürede taşınan ısı miktarıdır. Jonksiyondan kılıfa ya da kılıftan ortama herhangi iki yüzey arasındaki ısı transferini modellemek için Eşitlik (5)'te verilen ısıl direnç yaklaşımı kullanılabilir. Burada $R_{\theta ij}$ yarıiletkeni çevreleyen herhangi bir ortam ile jonksiyon arasındaki ısı geçişini tanımlayan ısıl direnci temsil etmektedir.

$$R_{\theta ij} = \frac{1}{(h \cdot A)} \quad (5)$$

Genellikle güç elektroniği devrelerinde kullanılan yarı iletkenlerin soğutulması için Eşitlik (4) ve Eşitlik (5)'den yola çıkarak Eşitlik (6)'daki genelleştirilmiş denklem elde edilir. Buradaki P yarı iletken üzerindeki kayıp gücü, T_i aktif bölge haricindeki dış bölgenin sıcaklığını, T_j ise jonksiyon sıcaklığını temsil eder.

$$R_{\theta ij} = \frac{(T_i - T_j)}{P} \quad (6)$$

Basit bir güç elektroniği anahtarının sürekli-hal ısı analizi için kullanılan eşdeğer ısı devre modeli Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Anahtar eşdeğer ısı devre modeli (Equivalent thermal circuit model of switch)

T_j , T_c , T_b ve T_a sırasıyla jonksiyon sıcaklığını, tümdevre kılıf sıcaklığını, tümdevre taban sıcaklığını ve ortam sıcaklığını belirtmektedir. P ise ısıya dönüşen güç kaybını ifade eder. Isıl direnç değerleri ($R_{\theta jc}$, $R_{\theta jb}$ ve $R_{\theta ja}$) üretici firma tarafından belirtilen ve sonradan değiştirilemeyen değerlerdir. Fakat oluşan ısı enerjisi jonksiyondan uzaklaştırılırken, tümdevre kılıfı ve ortam arasındaki ısı direnç değeri ($R_{\theta ca}$) önem kazanmaktadır. Kullanılan soğutma yöntemine göre $R_{\theta ca}$ direnci değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle tasarım hedeflerini sağlayabilecek en uygun soğutma sisteminin seçilmesi gerekmektedir (Laloya vd.,2016).

Her ne kadar güç elektroniğindeki anahtarlama elemanları için bir boyutlu ısı dirence dayalı modelleme yaklaşımı basit olsa da doğruluğu tatmin edici değildir. Bu yüzden bir boyutlu ısı dirence ek olarak tüm boyutların hesaba katıldığı eşdeğer ısı yayılma direnci tanımı daha doğru bir yaklaşımdır. Fakat yarı iletken içindeki ısı yayılma direncini hesap etmek pek de kolay değildir. Yayılma direnci, küçük bir ısı kaynağı daha büyük bir soğutucu tabanı ile temas ettiğinde ortaya çıkar. Isı, soğutucu tabanı boyunca düzgün bir şekilde dağılmaz ve sonuç olarak taşınım ile soğutma için kanatlara verimli bir şekilde aktarılmaz. Bu özel problemin çözümü için izotropik ısı akış kanalının bir ucuna düzlemsel dikdörtgen bir ısı kaynağı yerleştirilir. Isı akışı kanalı ya yarı sonsuzdur ya da alt yüzey boyunca düzgün bir taşınım katsayısı ile soğutulur. Tanımlanan dikdörtgensel akış kanalı problemi ile Eşitlik (6)'da verilen ısı direnç Eşitlik (7)'deki gibi yeniden yazılır. Buradaki R_{toplam} toplam ısı direnci, R_{1D} bir boyutlu ısı direnci, R_s ise ısı yayılma direncini temsil eder.

$$R_{\text{toplam}} = R_s + R_{1D} \quad (7)$$

Isıl yayılım direnci bazı geometrik ve termofiziksel parametrelere bağlı olarak değişir. (Muzychka vd., 2003) Devredeki bulunan yarı iletken sayısına, çeşidine ve kullanılan soğutucu yapılarına göre çözümü oldukça karmaşık olabilir.

Bu çalışmada problemin karmaşıklığından dolayı ısı modelleme yapılırken sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, bütün bir parçayı, daha ufak parçalara bölerek bu ufak parçalarda ısı akışı denklemlerinin çözümüne dayanır. İlk adım, problemin alanını eleman adı verilen alt bölümlere ayırılmasıdır. Bu elemanlar üçgen veya dörtgen gibi birçok farklı şekil alabilir. Her bir elemanın geometrisini tanımlayan belirli sayıda düğüm ile karakterize edilirler. Problem ayrıklaştırıldıktan sonra, oluşturulan her bir eleman için yaklaşık çözümler varsayılır. Bu çözümlere şekil fonksiyonları da denir. Bunlar kolayca türevlenebildikleri için genellikle ikinci dereceden fonksiyonlardır. Şekil 2'de tek boyutlu bir doğrusal eleman gösterilmektedir. Bu eleman boyunca sıcaklık için genel bir çözüm Eşitlik 8'deki gibi yazılabilir (Logan, 2011; Razavi, 2016; Zienkiewicz vd., 2013);



Şekil 2. Bir boyutlu doğrusal eleman (One dimensional linear element)

$$T = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x \quad (8)$$

Buradaki α_1 ve α_2 çözülecek sabitlerdir ve her bir düğüm için yerine yazılırsa Eşitlik 9 ve Eşitlik 10'daki denklem sistemi elde edilir.

$$T_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_1 \quad (9)$$

$$T_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_2 \quad (10)$$

Eşitlik 9 ve Eşitlik 10 α_1 ve α_2 katsayıları için çözümlerse Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 elde edilir.

$$\alpha_1 = \frac{T_1 x_2 - T_2 x_1}{x_2 - x_1} \quad (11)$$

$$\alpha_2 = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (12)$$

Elde edilen eşitlikler Eşitlik 8'de yerine yazılırsa:

$$T = T_1 \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} + T_2 \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = T_1 N_1 + T_2 N_2 \quad (13)$$

Eşitlik 13'ün türevi alınırsa her bir elemandaki sıcaklık değişimi elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= T_1 \frac{dN_1}{dx} + T_2 \frac{dN_2}{dx} \\ &= -T_1 \frac{1}{x_2 - x_1} + T_2 \frac{1}{x_2 - x_1} \end{aligned} \quad (14)$$

Çok sayıda eleman ve düğümden oluşan bir sistem için bu işlem, tüm elemanlara şekil fonksiyonları uygulanarak yinelenmeli olarak yapılır. Buradan, tüm denklem sistemi Eşitlik 15'te gösterilen bir matris formuna dönüşür. Burada K matrisi T matrisinin katsayılarını, T matrisi ise sıcaklıkları ve sıcaklık değişimlerini, f matrisi ise bilinen parametreleri içermektedir.

$$[K][T] = [f] \quad (15)$$

Bu çalışmada modellenen GaN FET EPC firmasının EPC2215 isimli güç tranzistörüdür. Bu tranzistör 200 V savak-kaynak (V_{DS}) gerilim değerine, 32 A I_D akım değerine ve 8 m Ω (R_{DSon}) iletim direncine sahiptir. Tranzistöre ait üretici tarafından belirtilen ısıl karakter özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu değerler, ortaya çıkan birim ısı enerjisi karşılığında yüzeyler arasında oluşan ısı farkını göstermektedir.

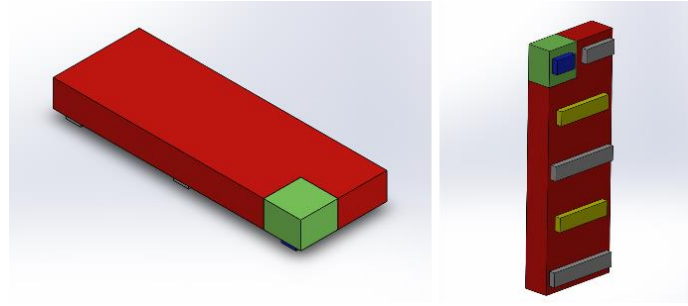
Tablo 1. EPC2215 GaN güç tranzistörü ısıl karakter özellikleri (EPC2215 GaN power transistor thermal characteristics)

Parametre	$R_{\theta JC}$	$R_{\theta JB}$	$R_{\theta JA}$
Isıl Direnç	0,5 C/W	2,5 C/W	52 C/W

$R_{\theta JC}$ değeri, tranzistör aktif bölgesi ile kılıf üst yüzeyi arasındaki ısıl direnç değerini, $R_{\theta JB}$ değeri tranzistör aktif bölgesi ile tranzistör bacak alt yüzeyi arasındaki ısıl direnç değerini, $R_{\theta JA}$ değeri ise tranzistör aktif bölgesi ile bulunan hava ortamı arasındaki ısıl direnç değerini belirtmektedir. $R_{\theta JA}$ değeri üreticinin belirtmiş olduğu şartlarda ve ilave bir soğutucunun bulunmadığı durumda gerçekleştirilen test sonucunda ölçülmüştür. Bu değer soğutucu kullanımına ve elemanların baskı devre üzerindeki yerleşimine göre değişiklik göstermektedir.

3. EPC2215 Anahtarının Isıl Modelinin Oluşturulması (Creating the Thermal Model of the EPC2215 Switch)

Güç elektroniğinde bir anahtarın ısıl modeli oluşturulurken sonlu elemanlar yöntemi tabanlı benzetim programlarından yararlanır. Sonlu elemanlar yöntemi tabanlı benzetim programları içinse öncelikle anahtarlama elemanlarının ve devredeki diğer bileşenleri katı modelinin oluşturulması gerekmektedir. Katı model oluşturulurken öncelikle farklı karaktere sahip bölgeler belirlenmelidir. EPC2215 anahtarı içinse bu bölgeler; aktif bölge, anahtarlama bölgesi, kılıf bölgesi, tümdevre bacak bölgesi olarak belirlenmiştir. Anahtarın oluşturulan katı modeli Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. EPC2215 3B katı modeli (EPC2215 3D solid model)

Gri ve mavi renkli parçalar tranzistörün savak ve kaynak terminalerini gösterirken mavi renkli parça ise kapı terminalini göstermektedir. Yeşil renkli parça anahtarlama bölgesi olarak gösterilirken kırmızı renkli parça ise kılıf bölgesini temsil etmektedir. Kılıf bölgesi ile terminalerin birleştiği yüzey aktif bölge olarak tanımlanır. Modeli oluşturan malzemelerin ısı iletkenlik değerleri Eşitlik (3) yardımı ile hesaplanmıştır hesaplanan ısı iletkenlik değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. EPC2215 GaN güç tranzistörü ısı iletkenlik değer tablosu
(EPC2215 GaN power transistor thermal conductivity chart)

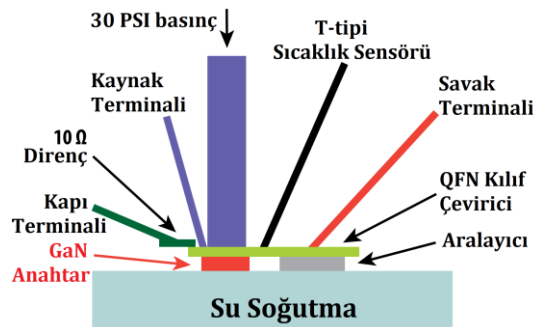
Parametre	Malzeme Uzunluğu	Isıl Direnç	Isı İletim Alanı	Hesaplanan Isıl İletkenlik Değeri
Kılıf	0,5 mm	0,5 °C/W	7,36 mm ²	136 W/m.°C
Terminal	0,1 mm	2,5 °C/W	1,54 mm ²	26 W/m.°C

Aktif bölge ısı enerjisinin açığa çıktığı bölgedir ve ısı enerjisi bu kısımdan diğer bölgelere, bu bölgelerin temas ettiği diğer bölge ya da ortamlara yayılmaktadır. Anahtarlama bölgesi, tranzistörün kapı terminalinin bulunduğu bölgedir. Bu bölgede ısı üretimi bulunmamaktadır. Katı modelin oluşturulması sırasında aktif bölgeden ayrılması için modelden bağımsız olarak ayrı tasarlanmıştır. Kılıf bölgesi, aktif bölgenin üstünde bulunan ve tümdevrenin kalıp bileşenini (mold compound) temsil eder. Soğutucu kullanıldığında soğutucu bileşenler bu bölge ile temas etmektedir ve dış ortama ısı bu alan üzerinden yayılmaktadır.

Isıl karakteristiği belirlemek için kullanılan üç adet deney bulunmaktadır. Bunlardan ilki jonksiyon-kılıf deneyi, ikincisi jonksiyon-bacak deneyi ve üçüncüsü ise jonksiyon-ortam deneyidir. Bu deneylerin nasıl yapıldığı ve hangi parametrelerin belirlediği daha sonraki bölümlerde irdelenecektir. Bu deneyler ile tranzistörün ısı modeli belirlenmekte ve güç elektroniği devresinin tasarımı sırasında elde edilen model parametreleri kullanılarak devrenin çalışması sırasında ortaya çıkan ısının devreden uzaklaştırılması için çözümler üretilmektedir.

3.1. Jonksiyon-Kılıf ve Jonksiyon-Terminal Isıl Deneyleri (Junction-Case and Junction-Base Thermal Experiments)

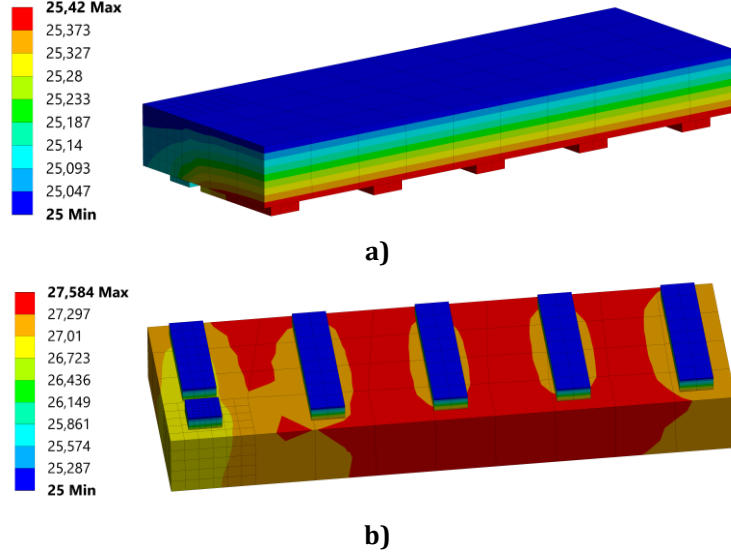
Jonksiyon-kılıf deneyi, aktif bölge ile tranzistör üst yüzeyi arasındaki ısı direnç değerini belirlemek için yapılırken jonksiyon-terminal deneyi ise aktif bölge ile tranzistör terminallerinin alt yüzeyi arasındaki ısı direnci belirlemek için kullanılır. Şekil 4, üretici tarafından gerçekleştirilen deney ortamını göstermektedir. Test sırasında tranzistörün kılıf üst yüzeyi ya da terminal alt yüzeyi sabit sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Isının sabit tutulması için genellikle sıvı soğutmalı bir soğutucu panel tercih edilir. Aktif bölgede 1 W ısı enerji harcanır ve aktif bölge ile karşılaştırılması yapılan diğer bölge arasındaki sıcaklık farkı sayesinde ısı direnç değeri belirlenmiş olur.



Şekil 4. Jonksiyon-Kılıf test platformu (Junction-Case test platform)

Bu çalışmada jonksiyon-kılıf ve jonksiyon terminal deneyleri standartlarca belirlenmiş olan deney adımları uyarınca sonlu elemanlar yöntemine dayalı ısıl benzetim programında yapılmıştır. Öncelikle katı model benzetim ortamına aktarılmış ve bölgeleri oluşturan tüm malzemeler ve bu malzemelerin ısıl iletkenlikleri benzetim programında tanımlanmıştır.

Sınır koşulları ve gerekli malzeme bilgisi tanımlandıktan sonra kılıf üst yüzeyi sabit sıcaklıkta (25 °C) tutularak benzetim gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuç ile Jonksiyon-kılıf arasındaki ısıl direnç değeri belirlenmiş ve üretici tarafından veri föyünde paylaşılan değerle karşılaştırılmıştır. Benzetim sırasında GaN FET üzerinde ortaya çıkan ısıl dağılım Şekil 5'te izotropik olarak verilmiştir.



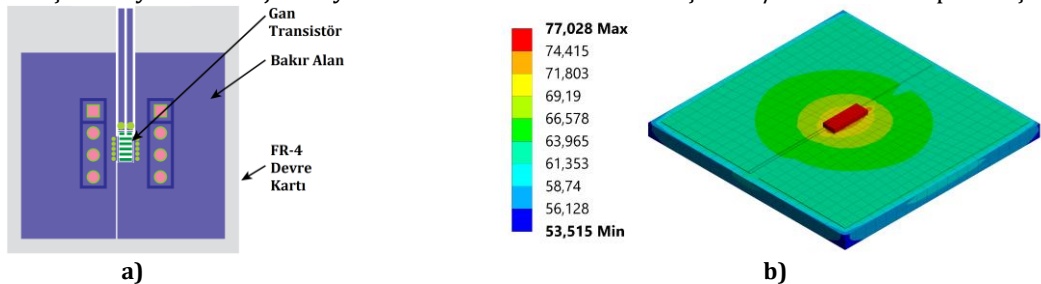
Şekil 5. a) Jonksiyon-Kılıf ve b) Jonksiyon-Terminal test benzetim sonuçları
(a) Junction-Case and b) Junction-Base test simulation results)

Deney adımları terminal alt yüzeyi için tekrarlanmış ve jonksiyon-terminal ısıl direnci de üretici firmanın paylaştığı değer ile karşılaştırılmıştır.

3.2. Jonksiyon-Ortam Isıl Testi (Junction-Ambient Thermal Experiment)

Jonksiyon-ortam testi sonucunda elde edilen ısıl direnç değeri, soğutucu kullanılmayan güç elektroniği devrelerinde sürekli-hal sıcaklık değerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Tranzistörün ısıl karakterinin benzetim ortamına tanıtılması için, ortaya çıkan kayıp gücün ortama iletiminin nasıl gerçekleşeceğini bilmesi gerekmektedir. Bu iletim tranzistör kılıf yüzeyi ile sağlanmaktadır. Benzetim üzerinde bunun sağlanması için yüzeye ait ısı taşınım katsayısı belirlenmelidir. Tranzistörün ortam ile olan ısı taşınım katsayısı hesaplanırken Eşitlik 5 kullanılmıştır ve 21 W/m² °C olarak hesaplanmıştır.

Bu değer benzetim üzerinde doğruluğunu test etmek için JEDEC standartlarına göre hazırlanmış test devresi sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Modellenen devre kartı Şekil 6'a da verilmiştir. Test edilecek tranzistör 645 mm² yüzey alanına sahip olup tek taraflı bakır yüzeyi olan FR4 devre kartı üzerine lehimlenmiştir. Tranzistör kartın ortasında konumlandırılmış, bakır alanın yarısı savak uçlarına, diğer yarısı da kaynak uçlarına bağlıdır. Ortam sıcaklığı (T_a) 25 °C'de sabit tutulmuş ve aktif bölgeye 1 W ısı enerjisi uygulanmıştır. Benzetim sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve sıcaklık değerleri Şekil 6b'de verilmiştir. Test sonunda elde edilen veriler kullanılarak Eşitlik 5 yardımı ile jonksiyon-ortam arasındaki ısıl direnç 52 °C/W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. R_{θja} direnç değerinin belirlenmesi a) Üretici tarafından belirlenen test devresi, b) Simülasyon sonucu
(Determination of R_{θja} resistance value a) Test circuit determined by the manufacturer, b) Simulation result)

Bu değer güç elektroniği devresi tasarımına göre değişiklik göstermektedir. Ortaya çıkan ısının devre kartına verimli bir şekilde aktarılması, soğutucu kullanılması gibi soğutmayı iyileştiren yöntemler jonksiyon-ortam direncinin ($R_{\theta ja}$) düşmesini sağlar.

3.3. Hesaplanan Termal Direnç Değerlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Calculated Thermal Resistance Values)

Üretici tarafından verilen ve benzetim yolu ile hesaplanan ısı direnç değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde, aradaki farkın en fazla %2 olduğu görülmektedir. Elde edilen verilen ışığında EPC2215 GaN FET’in yüksek başarılı bir modelinin elde edildiği aşikârdır.

Tablo 3. EPC2215 GaN FET’in deneysel ve modelleme ile elde edilen ısı dirençlerinin karşılaştırılması (Comparison of experimental thermal resistances and modeling thermal resistances of EPC2215 GaN FET)

Parametre	Üretici bilgisi	Hesaplanan	Hata (%)
$R_{\theta jC}$	0,5 °C/W	0,49 °C/W	2
$R_{\theta jB}$	2,5 °C/W	2,48 °C/W	0,8
$R_{\theta jA}$	52 °C/W	52 °C/W	0

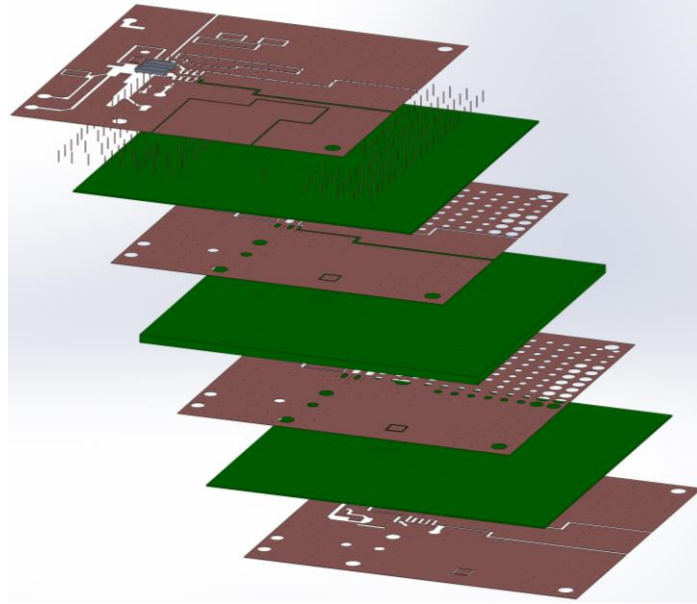
4. EPC9099 Geliştirme Kartının Isıl Modeli (Thermal Model of EPC9099 Development Board)

Bu bölümde 3. bölümde elde edilen ısı model yardımıyla EPC2215 GaN FET anahtarların bulunduğu gerçek bir güç dönüştürücü devresinin benzetimi yapılacaktır. Bunun için EPC firmasının üretmiş olduğu yarım köprü güç dönüştürücü geliştirme kartı olan EPC9099 seçilmiştir. EPC9099 geliştirme kartı 5 cm x 5 cm boyutlarında ve 4 katlı FR4 plakadan oluşmaktadır. Oda sıcaklığında ve fansız şekilde soğutulabilmesi için EPC firması tarafından özel olarak tasarlanmıştır. Soğutmanın etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için tüm katmanlarda 0.07 mm kalınlıkta bakır kullanılmıştır. Ayrıca tüm güç hatları kartın yüzey alanına yayılacak şekilde çizilmiş, yüzey alanları arttırılmıştır. Oluşan ısı etkin bir şekilde kartın bakır yüzeylerine aktarılmış ve geniş bakır yüzey alanları sayesinde anahtarlar için verimli bir soğutma sağlanmıştır. EPC firması tarafından yayınlanmış çizimler ve teknik özellikler kullanılarak katı model oluşturulmuştur. EPC9099 geliştirme kartının önden ve arkadan görünüşü Şekil 7’de gösterilmiştir.



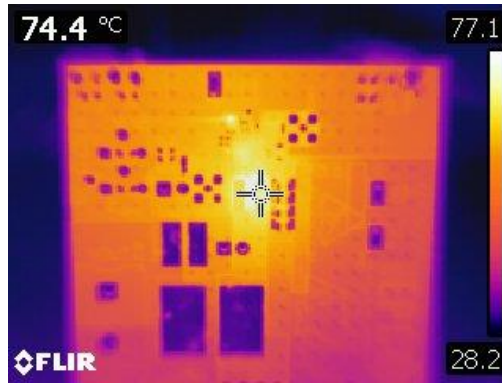
Şekil 7. EPC9099 Geliştirme kartı **a)** önden görünüş, **b)** Arkadan görünüş (EPC9099 Development board **a)** front view, **b)** rear view)

Geliştirme kartına ait katı modelin katman görüntüsü Şekil 9’da gösterilmiştir. Devre kartını oluşturan her katman ayrı bir model olarak oluşturulmuş ve sınır koşulları belirtilerek geliştirme kartı modeli ortaya çıkarılmıştır.



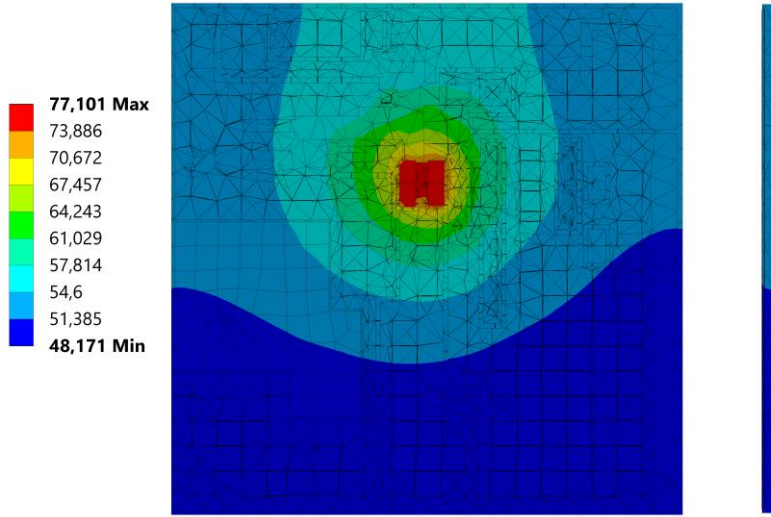
Şekil 9. EPC9099 geliştirme kartı katı modeli katman görüntüsü (EPC9099 development board solid model layers)

Geliştirme kartının gerçek sıcaklık testi laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar sıcaklığı iklimlendirme cihazı ile 25 °C sıcaklıkta sabit tutulmuştur. Geliştirme kartı, herhangi bir yüzeye temas etmeyecek ve alt - üst taraflarında hava akışını engellemeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Geliştirme kartına laboratuvar tipi güç kaynağı ile güç sağlanmış, akım ve gerilim değerleri anahtarlar üzerinde istenen güç kaybı değeri elde edilecek şekilde ayarlanmıştır. EPC9099 kartı üzerinde 2 adet GaN anahtar bulunmaktadır ve yarım köprü güç çevirici yapısı oluşturacak şekilde bağlanmıştır. Anahtarlar üzerinde toplam 2,3 W güç kaybı oluşacak şekilde çalıştırılmıştır. Kart sıcaklığı test başlangıcından test bitimine kadar termal kamera ile izlenmiştir. Sıcaklık değerleri sürekli-hal durumuna geçene kadar test sürdürülmüştür. Elde edilen termal kamera görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. EPC9099 geliştirme kartının test ortamında termal kamera görüntüsü
(Thermal camera image in the test environment of the EPC9099 development board)

3. Bölümde elde edilen ısıl model yardımıyla geliştirme kartının benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonucu ortaya çıkan ısıl dağılım Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. EPC9099 geliştirme kartının benzetimi sonucu ortaya çıkan ısı dağılımının üstten ve yandan görünümü (Top and side view of the heat dissipation simulation result of the EPC9099 development board)

Termal kamera görüntüsü incelendiğinde, kartın en sıcak noktasının $77,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, kart üzerinde bulunan iki transistörün orta alanına odaklanan noktada sıcaklığın $74,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir. Benzetim sonucunda ortaya çıkan ısı dağılımında en yüksek sıcaklığın $77,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir.

6. Sonuç (Conclusion)

Günümüzdeki güç elektroniğindeki kullanılan yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler istenen gerilim ve akım değerlerini sağlayacak anahtarlama elemanlarının boyutlarının küçülmesine ve bu anahtarların yonga-boyutlu paketler şeklinde üretilmesine olanak sağlamıştır. Şüphesiz ki bu gelişmelerin başında GaN FET anahtarların güç elektroniği çeviricilerinde kullanılabilecek çalışma sınırlarına erişmesi gelmektedir. Ufak paket boyutlarına sahip olması, yüksek çalışma gerilimini ve akımını yüksek anahtarlama frekanslarında sağlayabilmesinden dolayı güç elektroniği devrelerinde yeni ufuklar açmaktadır. Paket boyunun küçülmesi ve tasarlanan çeviricilerin güç yoğunluklarının artması ile ortaya çıkan ısının çevirici yapısından uzaklaştırılması zorlaşmıştır. Bu nedenle çeviricilerin tasarımında ısı yönetim büyük önem taşımakta ve ısı analizler yapılırken ısı geçişi çok boyutlu akış problemi olarak ele alınmalıdır.

Bu çalışmada, öncelikle EPC firması tarafından üretilmiş olan EPC 2215 ($V_{DS}=200\text{V}$, $I_D=32\text{A}$, $R_{DS(on)}=8\text{m}\Omega$) GaN FET anahtarlarının ısı modellemesi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Geleneksel bir boyutlu analiz yaklaşımının aksine, problem sonlu elemanlar yöntemi sayesinde çok boyutlu bir ısı geçişi problemi olarak ele alınmıştır. JEDEC standartlarıncı belirlenen deney ilkeleri kurulan benzetim modeline uygulanmıştır. Anahtarın jonksiyondan kılıfa, jonksiyondan dış ortama ve jonksiyondan devre kartına olan ısı dirençleri benzetim modeli sayesinde sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış ve firmanın veri föylerinde paylaştığı ısı direnç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında jonksiyondan kılıfa olan ısı direncin %2, jonksiyondan dış ortama %0 ve jonksiyondan devre kartına % 0.8'lik bir hata ile modellenebilmektedir.

Daha sonra yine aynı firmaya ait olan, EPC2215 anahtarları ile yapılan, EPC9099 yarım-köprü geliştirme kartının ısı modellemesi bir önceki adımda elde edilen EPC2215 anahtar modelleri ile yapılmıştır. Geliştirme kartının laboratuvar koşullarında ortam sıcaklığı $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutularak anma koşullarında deneyleri yapılmış ve ortaya çıkan kayıp güç değerleri benzetim modeline uygulanmıştır. Benzetim sonucunda geliştirme kartının ısı haritası çıkarılmış ve ısı yönden zorlandığı bölgeler tespit edilmiştir. Daha sonra benzetim ile elde edilen ısı dağılım sonuçları ile deneysel termal kamera görüntüleri karşılaştırılmıştır. Termal kamera görüntüsünde geliştirme kartının en yüksek sıcaklığının $77,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu ve bu değer sonlu elemanlar modeline dayalı kurulan benzetim modeli ile elde edilen sonuçlarla birebir örtüştüğü ve çeviricinin ısı yönden yüksek başarılı bir şekilde modellenebildiği görülmüştür. Gelecek çalışmalarda ise bu çalışmadan yola çıkılarak elde edilen ısı model, EPC2215 anahtarlarla tasarlanan farklı çevirici topolojilerinin ısı analizleri için kullanılabilecek ve tasarlanan çeviriciler için en uygun soğutma yapısı belirlenebilecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, TÜBİTAK'ın 2232 Uluslararası Burs Programının (Proje No: 118C374) katkılarıyla hazırlanmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Blinov, A., Vinnikov, D., and Lehtla, T., 2011. Cooling Methods for High-Power Electronic Systems. *Scientific Journal of Riga Technical University*, 29, 79-86.
- Bulut, E.B., Gulbahce, M.O., Kocabas, D.A., and Dusmez, S., 2021. Simplified Method to Analyze Drive Strengths for GaN Power Devices. *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 1-8.
- Bulut, E.B., Gulbahce, M.O., Kocabas, D.A., 2021. Analysis of a GaN Based PWM AC-AC Converter with an Improved Switch Loss Model. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 131(8).
- Çiçek, B., Şahin, N., 2020. Sokak Aydınlatmalarında Kullanılacak Yüksek Güçlü Led'lerin Termal Performansının Sayısal Ve Deneysel Olarak İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (1), 185-197.
- E. A. Jones and M. de Rooij, 2018. Thermal Characterization and Design for a High Density GaN-Based Power Stage. *IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, 295-302.
- Gao, C., Liu, H., Huang, J., and Diao, S., 2014. Steady-state thermal analysis and layout optimization of DC/DC converter. *Prognostics and System Health Management Conference*, 405-409.
- Gautam, D. S., Musavi, F., Wager, D. and Edington, M., (2013). A comparison of thermal vias patterns used for thermal management in power converter. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2214-2218.
- Huai, W., Liserre, M., and Blaabjerg F., 2013. Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7, 17-26.
- Ilhan, D. C., BAŞKAYA, Ş., 2020. Numerical investigation of thermal behaviour of AlGaIn/GaN HEMTs on SiC, Si and Sapphire substrates. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(4), 2125-2134.
- Jones, E. A., and Rooij, M., 2019. High-Power-Density GaN-Based Converters: Thermal Management Considerations. *IEEE Power Electronics Magazine*, 6(4), 22-29.
- Ke, M., and Blaabjerg, F., 2014. Modulation Methods for Neutral-Point-Clamped Wind Power Converter Achieving Loss and Thermal Redistribution Under Low-Voltage Ride-Through. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, 835-845.
- Laloya, E., Lucía, Ó., Sarnago, H. and Burdío, J. M., (2016). Heat Management in Power Converters: From State of the Art to Future Ultrahigh Efficiency Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(11), 7896-7908.
- Logan, D. L., 2011. *A first course in the finite element method*. Cengage Learning.
- Muzychka, Y., Culham, J and Yovanovich, M.. 2003. Thermal Spreading Resistances in Rectangular Flux Channels: Part II - Edge Cooling. 10.2514/6.2003-4188.
- Razavi, S.M., 2016. *Advanced Thermal Analysis of Microelectronics Using Spreading Resistance Models*. Ph.D. Thesis. Memorial University of Newfoundland, Newfoundland.
- Zhou X., Wang T G., Lee F C. 1997. Optimizing design for low voltage DC-DC converters. *Proceedings of the Twelfth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 612-616.
- Zienkiewicz, O.C.; Taylor, R.L.; Zhu, J. Z., 2013. *The finite element method: Its basis and fundamentals*. Butterworth - Heinemann.