



## مطالعه عددی بهبود عملکرد انتقال حرارت برای یک اینورتر قدرت سه فاز

حمیده دل آرام<sup>1</sup>، علی دستفان<sup>2</sup>، محمود نوروزی<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق، دانشگاه شاهرود، شاهرود

2- استادیار، مهندسی برق، دانشگاه شاهرود، شاهرود

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

\* شاهرود، صندوق پستی 3619995161 mnorouzi@shahroodut.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

در این مقاله، شبیه‌سازی سه‌بعدی انتقال حرارت برای یک نمونه تجهیز الکترونیک قدرت و سیستم خنک‌ساز آن پیاده‌سازی می‌شود. تجهیز یک اینورتر سه‌فاز توان بالا ساخت شرکت سیمیکرون است که کاربرد اصلی آن در وسایل تغذیه برقی و هیبریدی است. سیستم خنک‌ساز یک گرمابر دارای پره مستقیم مستطیلی با مقطع عرضی یکنواخت است که از طریق همرفت خنک می‌شود. عامل محدودکننده طراحی سیستم انتقال حرارت، بالا بودن دمای بیشینه تراشه‌ها و به عبارتی منابع حرارتی موجود در اینورتر با نام اختصاری IGBT است. دمای IGBTها برای جلوگیری از شکست حرارتی و مکانیکی تجهیز بایستی زیر  $125^{\circ}\text{C}$  باشد. یکی از اهداف اصلی، کاهش دمای بیشینه با طراحی دقیق چیدمان تراشه‌ها است. طراحی ابعاد هندسی گرمابر، با توجه به محدودیت حرارتی تراشه‌ها و مصالحه بین حجم مواد مصرفی و بازده گرمابر انجام می‌شود. پارامترهای هندسی مورد بررسی تعداد، ارتفاع و ضخامت پره‌ها و نیز ضخامت پایه گرمابر است. تلفات توان منابع حرارتی با شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب و اطلاعات فنی ارائه شده از طرف شرکت سازنده به دقت محاسبه می‌شود. مدل حرارتی اینورتر و سیستم خنک‌ساز آن توسط روش اجزاء محدود پیاده‌سازی می‌شود. صحت مدل‌سازی حرارتی و توان اتلافی محاسبه شده، توسط نرم‌افزار سیمسِل تأیید می‌شوند. طراحی دقیق چیدمان سبب کاهش چشمگیر دمای بیشینه تراشه‌ها به مقدار  $20^{\circ}\text{C}$  می‌شود. بازده گرمابر با طراحی مناسب برای ضرایب انتقال حرارت  $50\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ،  $75\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  و  $100\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  به ترتیب با افزایش حجم  $22/52\%$ ،  $13/51\%$  و  $0\%$ ، به مقدار  $10/35\%$ ،  $16/67\%$  و  $27/51\%$  نسبت به گرمابر اولیه افزایش یافته است.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 07 شهریور 1393  
پذیرش: 14 آبان 1393  
ارائه در سایت: 29 آذر 1393  
کلید واژگان:  
اینورتر قدرت  
مدیریت حرارتی  
طراحی چیدمان  
طراحی ابعاد هندسی گرمابر  
بازده گرمابر

## A numerical study on efficiency improvement of heat transfer for a 3-phase inverter

Hamideh Delaram<sup>1</sup>, Ali Dastfan<sup>2</sup>, Mahmood Norouzi<sup>3\*</sup>

1,2- Faculty of Electrical and Robotics Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran.

3- Faculty of Mechanical Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran

\* P.O.B. 361 9995161 Shahrood, Iran, mnorouzi@shahroodut.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 29 August 2014  
Accepted 05 November 2014  
Available Online 20 December 2014

## Keywords:

Power Inverter  
Thermal Management  
Layout Design  
Heatsink Geometry Design  
Heatsink Efficiency

## ABSTRACT

In this paper, 3-D simulation of heat transfer in a power electronic device and its cooling system is performed. The device is a high voltage three-phase inverter manufactured by Semikron Company; its main application is in electric and hybrid vehicles. Cooling system is a forced-air plate-fin heat sink. A limitation factor of designing heat transfer is maximum temperature of the inverter's chips, heat sources, called IGBT. Maximum temperature of IGBTs should be below  $125^{\circ}\text{C}$  in order to avoid both the thermal and the mechanical failures. One of the primary objectives is the reduction of the maximum temperature by designing the layout of chips. Also, the heatsink geometry design is accomplished by taking into consideration the maximum temperature and tradeoff between both the usage material volume and the heatsink efficiency. Geometries are the number of fins, the fin height, fin thickness and the base thickness of the heatsink. The power dissipation is estimated using datasheet information and output waveforms obtained from simulation in MATLAB. A thermal model of the inverter and its cooling system are simulated by using finite-element method (FEM). The accuracy of the thermal model and power dissipation estimation are verified by Semisil software. The maximum temperature is significantly reduced about  $20^{\circ}\text{C}$  by designing the layout precisely. Also, the heatsink efficiency is increased 10.35%, 16.67% and 27.51% with the increase of the material volume about 22.52%, 13.51% and 0% for the heat transfer coefficient, 50, 75 and  $100\text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$  by good design of the heatsink geometry, respectively.

## 1- مقدمه

طراحی اجزاء داخلی و نیز سیستم خنک‌ساز مناسب است، سبب توسعه روش‌های انتقال حرارت پیشرفته شده است. مزایایی مانند قابلیت کنترل بهتر

در 60 سال اخیر مدیریت حرارتی تجهیزات الکترونیک قدرت که همان

Please cite this article using:

H. Delaram, A. Dastfan, M. Norouzi, A numerical study on efficiency improvement of heat transfer for a 3-phase inverter, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 13-24, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Delaram, A. Dastfan, M. Norouzi, A numerical study on efficiency improvement of heat transfer for a 3-phase inverter, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 13-24, 2015 (In Persian)

توان انتقالی، افزایش توان و کوچک‌سازی تجهیزات الکترونیک قدرت، بدون توسعه روش‌های طراحی و آنالیز حرارتی امکان پذیر نیستند [1]. هدف اولیه مدیریت حرارتی این تجهیزات، جلوگیری از شکست حرارتی است که به‌عنوان شکست ناشی از حرارت و از دست رفتن کل عملکرد الکترونیکی یک جزء مشخص تعریف می‌شود. این نوع شکست معمولاً منجر به ترک خوردگی قطعات مکانیکی تجهیز الکترونیک قدرت و یا جدا شدن هدایت‌کننده‌ها در داخل تجهیز از اتصالات الکتریکی خارج از آن می‌شود، همچنین افزایش حرارت از محدوده مجاز منجر به شکست مواد نیمه‌رسانای تجهیز الکترونیک قدرت خواهد شد. هدف ثانویه از مدیریت حرارتی در این تجهیزات، دستیابی به قابلیت اطمینان و طول عمر مطلوب است. دستیابی به این هدف از آنجا که نرخ شکست تراشه‌ها تقریباً به‌طور نمایی با دمای عملکردی افزایش می‌یابد، تنها با کنترل درجه حرارت عملکردی امکان‌پذیر است [1].

الکترونیک قدرت، مطالعات مربوط به مدارات الکترونیکی با هدف کنترل انتقال انرژی الکتریکی را شامل می‌شود [2]. امروزه الکترونیک قدرت کنترل توان و انرژی را به شدت متحول کرده است. در قلب این تحول، تجهیزات نیمه‌رسانا قرار گرفته‌اند که وظیفه مهم تبدیل انرژی به‌صورت متناسب با کاربرد مورد نیاز را عهده دارند [3]. اینورترها تجهیزات الکترونیک قدرتی هستند که توان الکتریکی مستقیم را به توان الکتریکی متناوب سینوسی با ولتاژ خروجی و فرکانس مطلوب تبدیل می‌کنند. اینورترها در رنج‌های وسیعی، از منابع تغذیه کوچک رایانه‌ها گرفته تا صنایع بزرگ توان بالا استفاده می‌شوند. از جمله کاربردهای صنعتی اینورترها می‌توان به درایوهای ماشین‌های الکتریکی، فیلترهای اکتیو، جبران‌سازهای استاتیکی توان راکتیو، نیروگاه‌های انرژی‌های نو مانند انرژی بادی و پنل‌های خورشیدی، سیستم‌های گرمایش القایی، منابع تغذیه هواپیماها، منابع تغذیه بدون وقفه<sup>1</sup> رایانه‌ها، خطوط انتقال برق ولتاژ مستقیم توان بالا<sup>2</sup> اشاره کرد [۱، 4]. به‌طور خاص پیشرفت‌های مختلف انجام شده در فناوری اینورترها به دلیل کاربرد آن‌ها در وسایل نقلیه برقی است. در حال حاضر از اینورترها جهت کنترل قدرت کشش موتور در برخی وسایل نقلیه برقی مانند قطار برقی و همچنین برخی از خودروهای الکتریکی و هیبریدی استفاده می‌شود [5]. المان کلیدزنی در اینورترها، کلید قدرت IGBT دارای کاربرد بیشتری است که اوایل دهه 1980 معرفی شده و امروزه به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان به تجهیزاتی مهم در عرصه صنعت تبدیل شده‌اند. از مزیت‌های عمده IGBT استفاده از آن در توان و فرکانس کلیدزنی بالا است [2].

همگام با افزایش توان نامی، فرکانس کلیدزنی و چگالی جریان و همچنین نیاز به قابلیت اطمینان بالاتر و محدودیت‌های فضای قابل دسترس در تجهیزات الکترونیک، آنالیز حرارتی و بهبود طراحی حرارتی این تجهیزات اهمیت ویژه‌ای یافته است [۱، ۶، 7]. هدف اصلی در آنالیز حرارتی بررسی دمای نقاط اتصال تجهیزات الکترونیک قدرت و قرارگیری این دما در محدوده قابل قبول از دیدگاه محدودیت‌های حرارتی است. بیشینه دمای اتصالی قابل تحمل برای تراشه IGBT،  $150^{\circ}\text{C}$  است. با این حال، با هدف افزایش قابلیت اطمینان، دمای اتصالی تراشه IGBT بهتر است در دمایی پایین‌تر از  $125^{\circ}\text{C}$  قرار گیرد [8]. این امر تنها با مدیریت حرارتی و پیاده‌سازی روش‌های خنک‌سازی مناسب قابل دستیابی است. نخستین گام در آنالیز حرارتی یک تجهیز الکترونیک قدرت، تخمین صحیح توان تلفاتی تمامی تراشه‌های موجود در آن است. تخمین صحیح تلفات در تجهیزات الکترونیک قدرت به بهبود

خنک‌سازی با هوا ساده‌ترین روش کنترل درجه حرارت است که به‌صورت گسترده برای سیستم‌های الکتریکی مختلفی استفاده می‌شود [11]. مزیت خنک‌سازی با هوا در دسترس بودن و کاربرد راحت آن است. روش‌های بهبود انتقال حرارت همچون گرمابراه‌های پرده‌دار با طراحی‌های مختلف برای خنک‌سازی بسته‌های الکترونیک قدرت توان بالا استفاده می‌شوند. وقتی آرایشی از پره‌ها تحت شرایط همرفت برای افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شود، ابعاد هندسی بهینه برای پره‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های فضای و اقتصادی (متناسب با نرخ انتقال حرارت بیشینه) بایستی طراحی شوند. پره‌های مستطیلی<sup>5</sup> برای افزایش نرخ انتقال حرارت از طریق همرفت در سیستم‌ها بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا این نوع پره‌ها از نظر ساخت بسیار ساده و کم هزینه هستند. استفاده از پره‌های طولی<sup>6</sup> برای افزایش نرخ انتقال حرارت در کانال‌های مستطیلی امکان خنک‌سازی مناسب تجهیزات الکترونیک قدرت را فراهم می‌کند [12].

در زمینه طراحی چیدمان منابع حرارتی کارهای مختلفی انجام شده است که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی و یا مقایسه حالات مختلف چیدمان، طراحی مطلوب انتخاب شده است. هامفری<sup>7</sup> و همکاران [13]، با یک برنامه بهینه‌سازی  $N$  منبع حرارتی را در داخل یک محفظه با ابعاد معین و دارای تهویه به‌صورت بهینه جایابی کردند. کویپو<sup>8</sup> [14]، از الگوریتم ژنتیک برای حل معادلات انتقال حرارت با هدف مینیمم کردن نرخ شکست ناشی از افزایش بیش از حد حرارت اجزاء داخلی استفاده کرد. در این مطالعه دمای بیشینه چند جزء داخلی که با فواصل مساوی روی برد قرار داده شده بودند، بهینه شده است. در پژوهشی که توسط سیوال<sup>9</sup> [15] انجام شده است، آنالیز حرارتی در سطح سیستم و با استفاده از نرم‌افزار تجاری I-deas برای کانورتر قدرت  $1/2$  کیلو وات مورد بررسی قرار گرفته و دمای عملکردی اجزای داخلی آن استخراج شده است. سپس چیدمان مطلوب با هدف بهبود عملکرد حرارتی و الکتریکی از بین چندین چیدمان انتخاب شده است.

پژوهش‌های مختلفی در زمینه مطالعه همرفت طبیعی و اجباری جهت بررسی و استخراج معادلات انتقال حرارت، نحوه مدل‌سازی حرارتی و پارامترهای هندسی مؤثر گرمابراه در بهبود انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفته است. نخستین پژوهش در زمینه مطالعه همرفت طبیعی بین صفحات

3- Finite element method  
4- Finite difference method  
5- Rectangular Fins  
6- Longitudinal Fins  
7- Humphrey  
8- Queipo  
9- Sewall

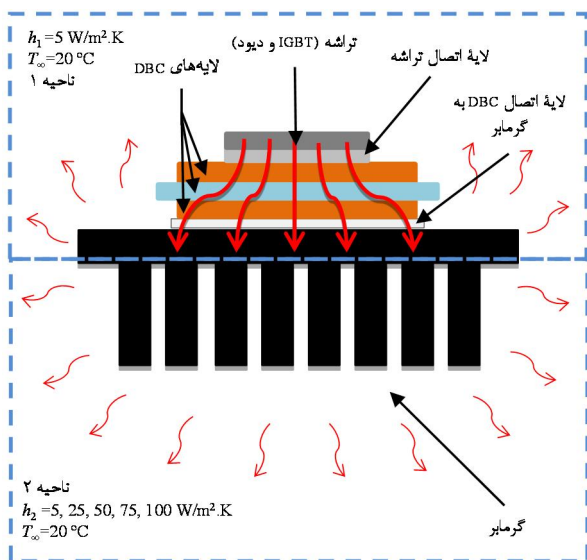
1- UPS  
2- HVDC

پهنای باند<sup>10</sup> توسط پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار متلب و برخی اطلاعات موجود در اطلاعات فنی شرکت سازنده تجهیز انتخابی، تخمین زده می‌شود. سپس مدل حرارتی اینورتر در نرم‌افزار کامسول<sup>11</sup> شبیه‌سازی می‌شود. شمای کلی انتقال حرارت از منبع حرارتی (تجهیز الکترونیک قدرت) و گرمابار با پره مستقیم مستطیلی و مقطع عرضی یکنواخت که با همرفت هوا خنک می‌شود، در شکل 1 نمایش داده شده است. پس از پیاده‌سازی مدل حرارتی اینورتر مورد مطالعه، دو هدف عمده با انجام طراحی‌های مختلف دنبال می‌شوند که عبارتند از: (1) مینیم کردن دمای نقاط داغ با چیدمان مطلوب منابع تولید حرارت و (2) تعیین هر یک از ابعاد هندسی مورد نظر به‌طور مجزا با هدف دستیابی به بیشترین بهره برای گرمابار. پارامترهای هندسی مورد بررسی تعداد، ارتفاع و ضخامت پرها و نیز ضخامت پایه گرمابار است. سپس با توجه به مقدار محاسبه شده برای هر یک از پارامترهای هندسی، طراحی‌های مختلف ابعاد هندسی گرمابار استخراج می‌شوند، همچنین طراحی‌های مناسب، با توجه به محدودیت حرارتی تراشه‌ها و مصالحه بین حجم مواد مصرفی و بازده گرمابار انتخاب می‌شوند. از جمله مشکلات طراحی گرمابار برای خنک‌سازی اینورتر مورد نظر از طریق هوا می‌توان به چگالی توان بالا و محدودیت حرارتی تراشه‌ها اشاره کرد. با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده، ابعاد هندسی مناسب برای گرمابار و چیدمان مطلوب برای منابع حرارتی در اینورتر که همان کلیدهای نیمه‌رسانای قدرت است، از بین چندین طراحی مورد بررسی انتخاب می‌شود.

## 2- تخمین تلفات اینورتر قدرت

مدارات الکترونیک قدرت سطوح و انواع مختلف شکل موج ولتاژ و جریان را به یکدیگر تبدیل می‌کند؛ بنابراین به این مدارت میدل‌های الکترونیک قدرت گفته می‌شود. این میدل‌ها بین بار و منبع به‌عنوان یک تجهیز واسط قرار می‌گیرند [26]. میدل‌های الکترونیک قدرت براساس نوع ارتباط بین ولتاژ ورودی و خروجی به چهار گروه زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- ورودی متناوب سینوسی و خروجی مستقیم (یکسوکننده‌ها<sup>12</sup>)
- ورودی مستقیم و خروجی متناوب سینوسی (اینورترها<sup>13</sup>)



شکل 1 شمای کلی منبع حرارتی، گرمابار و شرایط مرزی

موازی اینورترمال توسط این‌پاس<sup>1</sup> [16] انجام شده است. لوی<sup>2</sup> [17] فاصله بین صفحات موازی اینورترمال عمودی را با هدف دستیابی به کمینه دما برای صفحات یا ضریب انتقال حرارت بیشینه در یک نرخ انتقال حرارت معین، بهینه‌سازی کرد. بار-کوهن<sup>3</sup> و همکاران [18] رابطه‌هایی را برای بهینه‌سازی فاصله بین صفحات موازی و عمودی که به‌صورت همرفت طبیعی خنک‌سازی می‌شوند تحت شرایط مرزی حرارتی مختلف توسعه دادند. در چند سال اخیر با افزایش توان اتلافی اجزاء الکترونیک قدرت اغلب خنک‌سازی با همرفت طبیعی دیگر پاس‌گو نبوده و طراحان مجبور به استفاده از فن یا پمپ برای خنک‌سازی سیستم‌ها شدند. سیمنس<sup>4</sup> [19] روشی برای افزایش عملکرد حرارتی گرمابار با صفحات موازی که با همرفت اجباری خنک می‌شود از طریق محاسبه مقاومت حرارتی کل از پایه پرها تا محیط ارائه داد، همچنین سیمنس [20] در مقاله‌ای دیگر عملکرد گرمابار با صفحات موازی را برحسب افت فشار هوای عبوری از پرها بالا برد. دروفنیک<sup>5</sup> [21,22] محدودیت‌های تئوری چگالی توان یک میدل قدرت با سیستم خنک‌ساز همرفت اجباری هوا مورد بررسی قرار داد و با استفاده از معادلات تجربی و مدل تحلیلی گرمابار را برحسب چگالی توان بهینه‌سازی کرد. لی<sup>6</sup> [23] توصیه‌هایی کاربردی برای انتخاب گرمابار معرفی کرد و استفاده از رابطه جریان فراگیر را پیشنهاد داد. نینگ<sup>7</sup> [12] یک مدل حرارتی بر پایه معادلات تحلیلی برای گرمابار، فن، کانال و جریان هوای برگشتی را ارائه داد. بر پایه این مدل بهینه‌سازی سیستم خنک‌ساز با هدف دستیابی به کم‌ترین وزن انجام شد. اسدی و عارضی [24] مدلی از سیستم خنک‌ساز همرفت اجباری هوا برای یک نمونه تجهیز الکترونیک قدرت با استفاده از معادلات انتقال حرارت و شبیه‌سازی در نرم‌افزار آنسیس<sup>8</sup> ارائه و مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش بر ابعاد هندسی گرمابار و کانال‌های آن متمرکز شده است و همچنین فلوجرارتی برای طراحی گرمابار براساس سرعت هوا و ابعاد کانال‌ها ارائه شده است. چن و همکارانش [25] یک مدل حرارتی برای پیش‌بینی افزایش دما در یک میدل قدرت مورد استفاده در درایو موتور رلوکتانسی ارائه کرده‌اند و براساس اطلاعات به‌دست آمده از مدل حرارتی دو طرح مختلف چیدمان اجزاء توان<sup>9</sup> بررسی شد. همچنین تأثیر تعدادی از پارامترهای هندسی گرمابار به‌صورت مجزا بر دمای بیشینه تراشه‌های موجود در میدل قدرت، مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش، شاخص انتخاب چیدمان مناسب و هر یک از پارامترهای هندسی گرمابار مورد بررسی، افزایش دمای بیشینه تراشه‌ها در نظر گرفته شد.

در تحقیق حاضر، مدل حرارتی مناسب برای پیش‌بینی توزیع دما در یک میدل قدرت اینورتری ارائه خواهد شد. در این مقاله نسبت به [25]، تعداد بیشتری از حالت‌های چیدمان منابع حرارتی به‌منظور کاهش دمای بیشینه تراشه‌های موجود در اینورتر ارائه و بررسی شده است. همچنین علاوه بر در نظر گرفتن تعداد بیشتری از پارامترهای هندسی گرمابار، تأثیر هر کدام به‌صورت مجزا بر دمای بیشینه تراشه‌ها و نیز بازده حرارتی گرمابار مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نتایج حاصله، ابعاد هندسی مناسب برای گرمابار استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

در این تحقیق، تلفات توان در یک نمونه اینورتر سه فاز با روش کلیدزنی

- 1- Elenbaas
- 2- Levy
- 3- Bar-Cohen
- 4- Simons
- 5- Drogenik
- 6- Lee
- 7- Ning
- 8- Ansys
- 9- Power Components

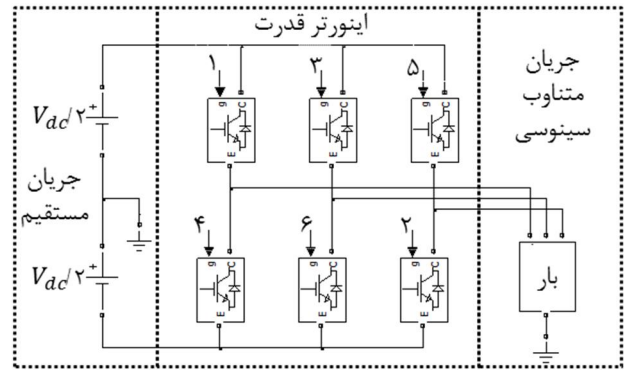
10- PWM  
11- Comsol  
12- Rectifiers  
13- Inverters

معکوس<sup>3</sup> شناخته می‌شود. با شبیه‌سازی مدار اینورتر در نرم‌افزار متلب، تلفات هدایتی و کلیدزنی IGBT و دیود به ترتیب از طریق منحنی‌های خروجی ولتاژ-جریان و منحنی‌های انرژی برحسب جریان بار که در اطلاعات فنی شرکت سازنده موجود است، تخمین زده می‌شود. مقادیر نامی و مشخصات عملکردی مربوط به این شبیه‌سازی در جدول 1 ارائه شده است. اینورتر سه فاز SKIM606GD066HD ساخت شرکت سمیکرون<sup>4</sup> به‌عنوان نمونه مورد مطالعه در این مقاله انتخاب می‌شود. شرکت سمیکرون، یک شرکت آلمانی بسیار معتبر و پیشرو در زمینه تولید قطعات نیمه‌رسانا و تجهیزات الکترونیک قدرت در سطح بین‌المللی است. تجهیز انتخابی یک اینورتر با قابلیت اطمینان بالاست و کاربرد اصلی آن در خودروهای الکتریکی و هیبریدی است؛ بنابراین به‌گونه‌ای طراحی شده است، که قابلیت عملکرد مطلوب در تکان‌های شدید و لرزش‌ها و نیز تحمل دمای بالا را داشته باشد [27]. منحنی‌های موجود در اطلاعات فنی تجهیز مورد مطالعه در دو دمای نقطه اتصال  $25^{\circ}\text{C}$  و  $150^{\circ}\text{C}$  رسم شده است [28]. از آنجایی که در عمل دمای نقطه اتصال تراشه‌ها بسیار بالاتر از دمای  $25^{\circ}\text{C}$  است، منحنی‌های رسم شده در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  برای تخمین تلفات توان هر یک از تراشه‌های IGBT و دیود استفاده می‌شود. علاوه بر این برای طراحی سیستم خنک‌ساز بهتر است که بدترین شرایط عملکردی اینورتر از نقطه نظر حرارتی در نظر گرفته شود. شرکت سمیکرون برای محاسبه تلفات، دما و انتخاب بهینه محصولات خود، نرم‌افزار سمیسِل<sup>5</sup> را ارائه کرده است که با توجه به اعتبار بالای این شرکت در سطح بین‌المللی، داده‌های تجربی ارائه شده توسط این نرم‌افزار قابل استناد است. توان اتلافی تخمین‌زده‌شده IGBT و دیود با تلفات به‌دست‌آمده از نرم‌افزار سمیسِل مقایسه می‌شود و در جدول 2 ارائه شده‌اند. خطای تلفات کل IGBT و دیود در تجهیز اینورتری بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نرم‌افزار سمیسِل،  $12/8\%$  است. کارهای پیشین در [7, 29, 30] که در زمینه تخمین تلفات انجام شده‌اند، خطای محاسباتی در حدود  $15\%$  و حتی بیشتر از این مقدار را گزارش داده‌اند.

### 3- مدل سازی حرارتی اینورتر سه‌فاز

در این بخش، به توصیف معادلات ریاضی مربوط به انتقال حرارت و تقریب‌هایی که برای ساده‌سازی این معادلات فرض می‌شوند، پرداخته می‌شود. این تقریب‌ها عبارتند از:

- 1- ضریب رسانش تمامی مواد ثابت و مستقل از دماست.
- 2- ضریب انتقال حرارت از اجزاء الکترونیک قدرت و گرمابار ثابت فرض می‌شود.
- 3- از انتقال حرارت تشعشی صرف‌نظر می‌شود.
- 4- در شبیه‌سازی‌ها دمای محیط ثابت و مستقل از زمان در نظر گرفته می‌شود.
- 5- از مقاومت‌های حرارتی تماسی بین سطوح و مواد مختلف به جز سطح اتصال تراشه‌ها چشم‌پوشی می‌شود.
- 6- از آنجایی‌که ساختار داخلی و مواد تشکیل‌دهنده اجزاء الکترونیک قدرت پیچیده و در انحصار طراحان است، در شبیه‌سازی‌های حرارتی، ساختار هر یک از این اجزاء به‌صورت یک مکعب ساده که تنها از یک ماده تشکیل شده است در نظر گرفته می‌شود.
- 7- توان تلفاتی هر یک از کلیدهای نیمه‌رسانای قدرت مستقل از زمان و با توجه



شکل 2 ساختار مداری یک اینورتر سه فاز

جدول 1 مقادیر نامی و مشخصات عملکردی اینورتر مورد مطالعه

نوع کمیت	علامت اختصاری	مقدار
ولتاژ مستقیم ورودی اینورتر	$V_{dc}$	350 ولت
جریان ورودی اینورتر	$I_{dc}$	272/6 آمپر
مقدار اصلی ولتاژ خط خروجی	$V_{ab}$	220 ولت
فرکانس نامی	$f$	50 هرتز
فرکانس کلیدزنی اینورتر	$f_{sw}$	10 کیلوهرتز
توان اکتیو بار	$P_{Load}$	85/5 کیلو وات
ضریب قدرت	$PF$	0/911
مقدار اصلی جریان خروجی	$I_{Load}$	249/6 آمپر

جدول 2 مقایسه توان اتلافی تخمین‌زده‌شده با تلفات به‌دست‌آمده از سمیسِل

نوع توان اتلافی	تخمین‌زده‌شده	سمیسِل	میزان خطا
تلفات کلیدزنی IGBT	115 وات	146 وات	21/2%
تلفات هدایتی IGBT	130 وات	141 وات	7/8%
کل توان اتلافی در IGBT	245 وات	287 وات	14/6%
تلفات بازیابی معکوس دیود	41 وات	42 وات	2/4%
تلفات هدایتی دیود	19 وات	21 وات	9/5%
کل توان اتلافی در دیود	60 وات	63 وات	4/8%
کل توان اتلافی	305 وات	350 وات	12/8%

• ورودی و خروجی مستقیم (چاپرها<sup>1</sup>)

• ورودی و خروجی متناوب سینوسی (سیکلوکانورترها<sup>2</sup>)

مبدل ولتاژ مستقیم به ولتاژ متناوب سینوسی به‌عنوان اینورتر شناخته می‌شود. ورودی اینورتر یک منبع ولتاژ مستقیم و خروجی آن به‌صورت ولتاژ متناوب است. در اینورتر کلیدهای نیمه‌رسانای قدرت عملیات کلیدزنی را انجام می‌دهند و خروجی مطلوب با تغییر زمان خاموش و روشن شدن آن‌ها به‌دست می‌آید. اینورترها برای تولید ولتاژهای سینوسی تک‌فاز یا چند فاز از یک منبع ولتاژ مستقیم به‌کار می‌روند. در بین اینورترهای چند فاز، اینورترهای سه فاز بیشترین کاربرد را دارند. یکی از کلیدهای قدرت رایج مورد استفاده در اینورترها، کلیدهای قدرت IGBT است. دو سر هر IGBT در اینورتر یک دیود به‌صورت برعکس موازی می‌شود. شکل 2، ساختار مداری یک اینورتر سه فاز را نشان می‌دهد. در این شکل، منابع تولیدکننده توان (IGBT و دیود) با شماره‌های 1 تا 6 مشخص شده‌اند.

تلفات توان IGBT و دیود شامل دو نوع تلفات هدایتی و تلفات کلیدزنی می‌شوند. تلفات کلیدزنی IGBT شامل دو نوع تلفات در لحظه خاموش شدن و تلفات در لحظه روشن شدن است. تلفات کلیدزنی دیود با نام تلفات بازیابی

3- Reverse Recovery Loss  
4- Semikron Company  
5- Semisel

1- Choppers  
2- Cycloconverters

جدول 3 مشخصات مواد و ضخامت لایه‌ها برای تجهیز SKIM606GD066HD [28]

نوع لایه	جنس	ضخامت هدایت حرارتی (W/m/K)	ظرفیت حرارتی (J/kg/K)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
تراشه IGBT	سیلیکون	0/07	750	2330
تراشه دیود	سیلیکون	0/24	750	2330
اتصال تراشه	Ag-sinter	0/02	230	7350
مس DBC	مس	0/30	390	8960
مس DBC	سرامیک AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0/38	830	3780
مس DBC	مس	0/30	390	8960

جدول 4 ابعاد هندسی نمونه نخستین گرماب

نوع پارامتر	علامت اختصاری	مقدار
طول گرماب	L	300 میلی‌متر
عرض گرماب	W	198 میلی‌متر
ارتفاع گرماب	H	77 میلی‌متر
تعداد پره‌ها	N	22
ارتفاع پره‌ها	H <sub>f</sub>	60 میلی‌متر
ضخامت پره‌ها	l <sub>f</sub>	3 میلی‌متر
ضخامت پایه گرماب	H <sub>bp</sub>	17 میلی‌متر

جدول 5 آنالیز حساسیت مش‌بندی در اینورتر مورد مطالعه

شماره شبکه	شبکه 1	شبکه 2	شبکه 3	شبکه 4	شبکه 5
تراکم در حجم	176900	226428	391474	778752	3203844
تراکم در مرزها	83082	103446	159399	259506	781924
تراکم در لبه‌ها	9864	11426	15686	22129	35630
دمای ماکزیمم (°C)	117/479	117/604	117/810	117/861	117/898
خطای نسبی (%)	(0/355)	(0/250)	(0/075)	(0/032)	(—)
دمای متوسط IGBTها (°C)	102/333	102/411	102/516	102/531	102/549
خطای نسبی (%)	(0/210)	(0/135)	(0/032)	(0/017)	(—)
دمای متوسط دیودها (°C)	94/835	94/897	95/010	95/021	95/035
خطای نسبی (%)	(0/210)	(0/145)	(0/026)	(0/014)	(—)

**مدل‌سازی هندسی تجهیز مورد مطالعه:** محل قرارگیری اجزاء کلیدهای نیمه‌رسانای قدرت برای استخراج توزیع دمایی بسیار دقیق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چیدمان تراشه‌ها در هر یک از فازهای اینورتر مورد نظر و نحوه قرارگیری فازهای کنار هم در شکل 3 و همچنین نمای جانبی لایه‌های مختلف در شکل 4 نمایش داده می‌شوند. این اطلاعات از اطلاعات فنی ارائه شده توسط شرکت سمیکرون استخراج می‌شوند. هر فاز از اینورتر، دارای 8 تراشه IGBT و 4 تراشه دیود است که بر لایه DBC<sup>1</sup> قرار گرفته‌اند. ضخامت تراشه‌ها، لایه‌های مختلف DBC و لحیم بین لایه DBC و تراشه و نیز مشخصات مواد آن‌ها در جدول 3 ارائه شده‌اند. نمونه نخستین گرماب دارای پره مستطیلی با مقطع عرضی یکنواخت در شکل 5 نمایش داده شده است و ابعاد هندسی آن در جدول 4 ارائه شده‌اند. این ابعاد با توجه به نمونه استاندارد گرماب P16 که توسط شرکت سمیکرون به‌عنوان سیستم خنک‌ساز برای تجهیز SKIM606GD066HD طراحی شده است، انتخاب می‌شوند. گرماب مورد نظر در این مقاله از جنس آلومینیوم انتخاب می‌شود.

**شرایط مرزی:** شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی به‌صورت رابطه (3) در نظر گرفته شده است:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\infty}) \quad (3)$$

1- Direct Bond Copper

به جدول 2، مقدار متوسط آن در شبیه‌سازی‌های حرارتی استفاده می‌شود. معادله حاکم بر مسئله انتقال حرارت از گرماب با پره مستقیم مستطیلی با قطع عرضی یکنواخت با در نظر گرفتن تقریب‌های بیان شده، رابطه (1)، عبارت است از:

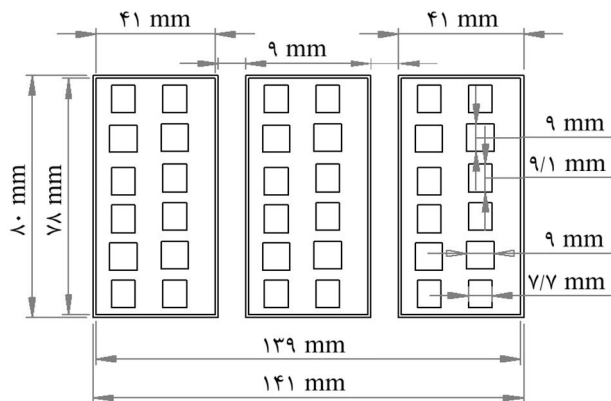
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} \quad (1)$$

که در آن  $\dot{q}$  معرف چشمه حرارتی (W/m<sup>3</sup>) است و با توجه به شبیه‌سازی ارائه‌شده در بخش پیشین، مقدار آن برای هر IGBT،  $12/4425 \times 10^9$  W/m<sup>3</sup> و هر دیود،  $1/525 \times 10^9$  W/m<sup>3</sup> است.

همچنین بازده کلی سطح، عملکرد آرایه پره‌ها و سطحی از پایه را که پره‌ها به آن متصل‌اند، مشخص می‌کند و از رابطه (2) محاسبه می‌شود.

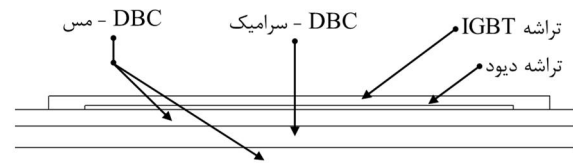
$$\eta_o = \frac{q}{h_1 A_1 (T_1 - T_{\infty}) + h_2 A_2 (T_2 - T_{\infty})} \quad (2)$$

مدل‌سازی اینورتر سه فاز SKIM606GD066HD با توجه به تقریب‌ها و معادلات ارائه شده، در نرم‌افزار کامسول نسخه 4.4 انجام می‌شود. تحلیل‌های حرارتی این نرم‌افزار براساس روش اجزاء محدود است. اطلاعات مربوط به ابعاد هندسی و مشخصات مواد تجهیز مورد نظر از اطلاعات فنی که توسط شرکت سازنده فراهم می‌شود، به‌دست می‌آید.

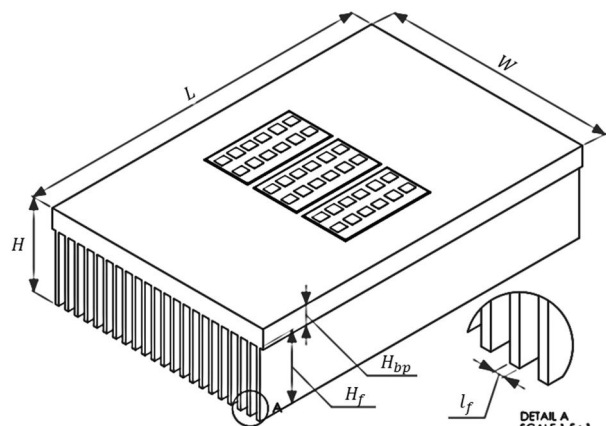


شکل 3 چیدمان تراشه‌ها در هر یک از فازهای تجهیز SKIM606GD066HD و نحوه

قرارگیری فازها در مجاورت یکدیگر [28]



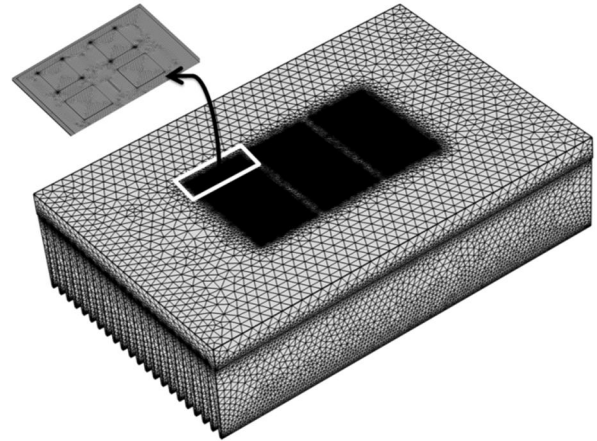
شکل 4 نمای جانبی لایه‌های مختلف تجهیز SKIM606GD066HD



شکل 5 نمونه نخستین گرماب دارای پره مستطیلی با مقطع عرضی یکنواخت



باقی سطوح جانبی غیر از سطح بالایی فازهای اینورتر که عایق در نظر گرفته می‌شوند، با محیط اطراف تبادل حرارت دارند و ضریب انتقال حرارت این سطوح  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  است. در شبیه‌سازی‌ها دمای محیط ثابت و برابر  $20^\circ\text{C}$  است.

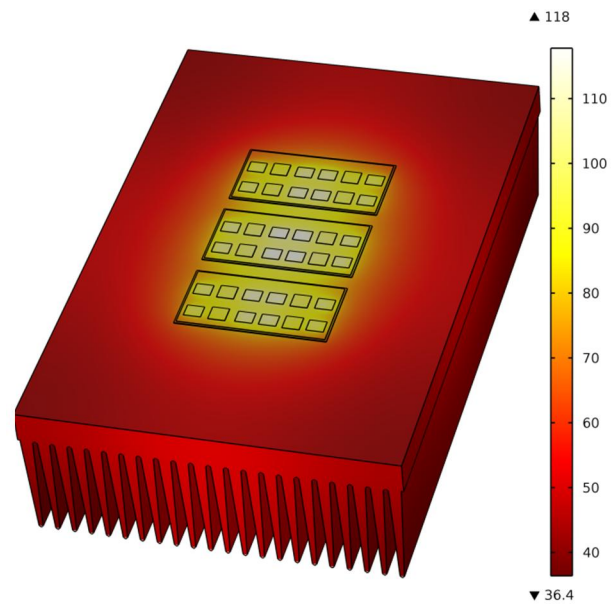


شکل 6 نمای ایزومتریک شبکه 4

#### 4- بررسی حساسیت شبکه محاسباتی و راستی آزمایشی حرارتی اینورتر سه فاز مورد مطالعه

##### 4-1- آنالیز حساسیت شبکه محاسباتی

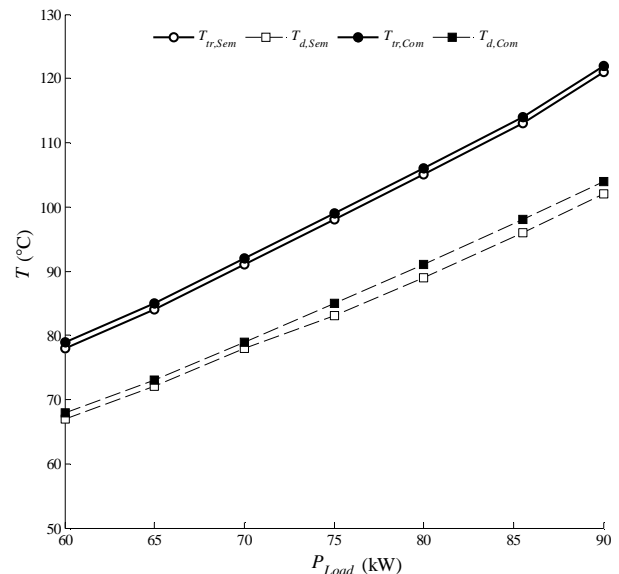
مطالعه مش‌بندی مدل حرارتی جهت اطمینان از دقت محاسبات متغیرها انجام خواهد شد. تأثیر تغییر تعداد گره‌ها بر برخی پارامترهای خروجی مهم مانند دمای بیشینه و دمای متوسط تراشه‌های IGBT و دیود مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به هندسه پیچیده مساله، استفاده از شبکه با سازمان میسر نبوده و جهت حل عددی مساله از شبکه‌بندی چهار وجهی استفاده شده است. به دلیل بالا بودن گرادیان دما در نزدیکی تراشه‌ها، تراکم شبکه در این قسمت‌ها بیشتر در نظر گرفته شده است تا توزیع دمای مناسب‌تری از شبیه‌سازی عددی حاصل شود. جدول 5 تعداد گره‌ها، مقادیر پارامترهای مورد نظر و خطای آن‌ها نسبت به شبکه متراکم شماره 5 را برای مش‌بندی‌های مختلف گزارش می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول 5، میزان خطا در شبکه‌های 2 تا 4 نسبت به شبکه 5 کوچک بوده؛ بنابراین عدم وابستگی مدل‌سازی عددی به این شبکه‌ها کاملاً مشهود است. در این تحقیق، از شبکه 4 به‌عنوان شبکه مرجع جهت سایر مدل‌سازی‌های انتقال حرارت در تراشه‌ها استفاده شده است تا نخست حل عددی به شبکه محاسباتی وابسته نباشد و همچنین با حفظ دقت، میزان هزینه محاسباتی نیز در حد قابل قبولی باشد. نمای ایزومتریک شبکه 4 در شکل 6 نمایش داده شده است.



شکل 7 توزیع دما در نمونه مازول مورد نظر و گرمابر P16

##### 4-2- بررسی صحت مدل حرارتی اینورتر سه فاز مورد مطالعه

شکل 7 توزیع دما در نمونه تجهیز مورد نظر و گرمابر P16 که توسط شرکت سمیکرون ارائه شده است را نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به ابعاد هندسی و مشخصات مواد آن‌ها از اطلاعات فنی به‌دست آمده است. برای بررسی صحت مدل‌سازی حرارتی که در بخش 3 بیان شد، از نمونه استاندارد گرمابر P16 استفاده شده است، و دمای متوسط تراشه‌های IGBT و تراشه‌های دیود در مقادیر مختلف توان خروجی اینورتر سه‌فاز با دمای به‌دست‌آمده از نرم‌افزار سیمپل مقایسه شده‌اند. شکل 8 مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نرم‌افزار سیمپل را ارائه می‌دهد. با توجه به شکل 8، نتایج شبیه‌سازی با نتایج به‌دست‌آمده از این نرم‌افزار تطابق قابل قبولی دارند. بیشینه خطا در پیش‌بینی دمای متوسط تراشه‌های IGBT و تراشه‌های دیود به ترتیب 1/28% و 2/41% است؛ بنابراین مدل حرارتی مورد نظر برای پیش‌بینی توزیع دما دقت قابل قبولی دارد.

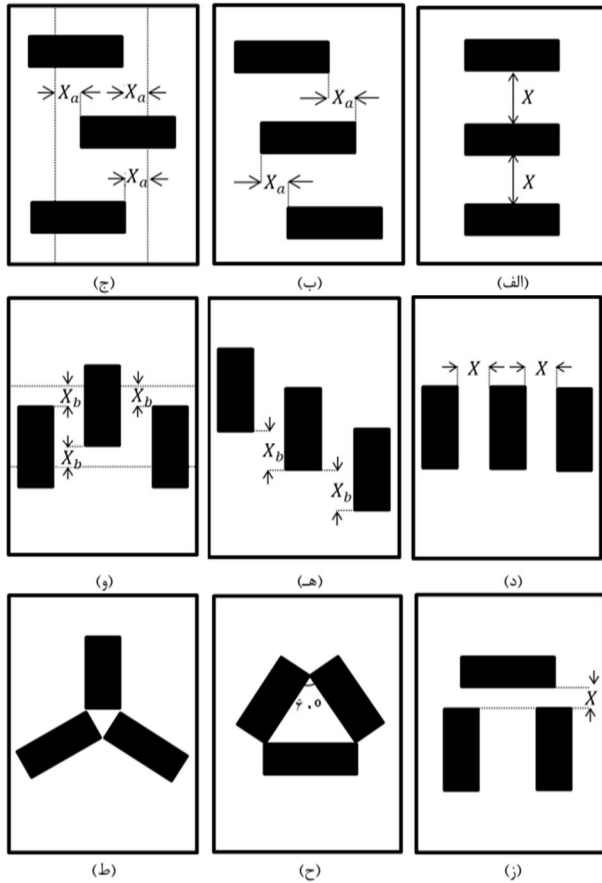


شکل 8 مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نرم‌افزار سیمپل

#### 5- چیدمان مطلوب منابع توان و تعیین پارامترهای هندسی بینه برای گرمابر

در این بخش دو هدف عمده با انجام طراحی‌های مختلف دنبال می‌شود. از آنجایی‌که نقاط داغ محتمل‌ترین مکان‌های شکست حرارتی و مکانیکی تجهیز است، هدف نخستین کمینه کردن دمای نقاط داغ با چیدمان مطلوب منابع تولید حرارت است؛ بنابراین چندین طراحی مختلف از نحوه چیدمان فازهای اینورتر مورد نظر و همچنین تغییر فاصله‌گذاری بین فازها در هر یک از طراحی‌ها برای کاهش دمای بیشینه بررسی می‌شود. هدف بعدی دستیابی

ضریب انتقال حرارت از سطح زیر گرمابر ثابت و مقدار آن در طراحی‌های مختلف 5، 25، 50، 75 و 100 با واحد  $\text{W/m}^2\text{K}$  است. فرض می‌شود که



شکل 9 طراحی‌های مختلف برای نحوه چیدمان فازهای اینورتر مورد مطالعه

کمترین دما در  $X=70$  mm و برابر  $107/50^\circ\text{C}$  است. دو طراحی دیگر برای نحوه چیدمان فازهای اینورتر مورد مطالعه در شکل 9-ح و شکل 9-ط نمایش داده شده‌اند و دمای بیشینه در آن‌ها به ترتیب برابر  $113/88^\circ\text{C}$  و  $111/93^\circ\text{C}$  است. شکل 13 توزیع دمای مربوط به چیدمان شکل 9-الف ( $X=60$  mm)، شکل 9-و ( $X=25$  mm و  $X_b=60$  mm)، شکل 9-ز ( $X=70$  mm)، شکل 9-ح و شکل 9-ط را نمایش می‌دهد و دمای بیشینه آن‌ها در جدول 8 بیان شده‌اند. با مقایسه بیشینه دما در جدول 8، این نتیجه حاصل می‌شود که چیدمان شکل 9-الف با  $X=60$  mm دارای کمترین دمای بیشینه برابر  $106/9^\circ\text{C}$  است.

### 2-5- تغییر ارتفاع پره‌های گرمابر

شکل 14 بازده گرمابر را برحسب مقادیر مختلف ارتفاع پره‌های گرمابر نشان می‌دهد.

جدول 6 دمای بیشینه برای چیدمان شکل 9-الف با تغییر فاصله میان فازها

فاصله بین فازها ( $X$ )	دمای ماکزیمم ( $T_j$ )
1 میلی‌متر	$130/85^\circ\text{C}$
10 میلی‌متر	$124/29^\circ\text{C}$
20 میلی‌متر	$118/63^\circ\text{C}$
30 میلی‌متر	$114/23^\circ\text{C}$
40 میلی‌متر	$110/76^\circ\text{C}$
50 میلی‌متر	$108/05^\circ\text{C}$
60 میلی‌متر	$106/90^\circ\text{C}$
70 میلی‌متر	$109/65^\circ\text{C}$
80 میلی‌متر	$114/72^\circ\text{C}$

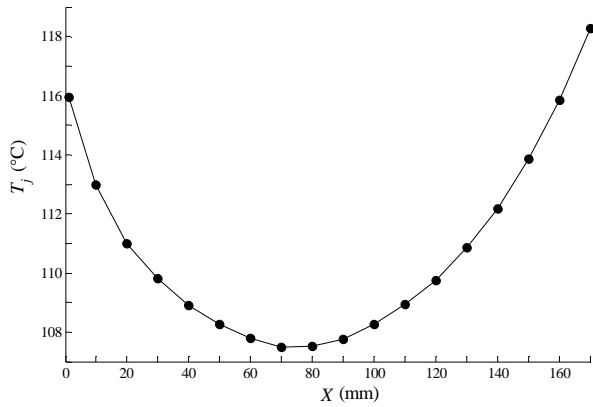
به بیشترین بهره برای گرمابر با تعیین ابعاد هندسی بهینه برای آن است، البته با این شرط که دمای تراشه‌های IGBT در محدوده حرارتی مجاز یعنی زیر  $125^\circ\text{C}$  قرار گیرند. در شبیه‌سازی‌ها تأثیر تعداد پره‌ها ( $N$ )، ارتفاع پره‌ها ( $H$ )، ضخامت پره‌ها ( $l$ ) و ضخامت پایه گرمابر ( $H_{bp}$ ) روی بازده گرمابر بررسی می‌شوند. رابطه بین بهره گرمابر با این پارامترها برای دستیابی به بالاترین بازده مورد بررسی قرار می‌گیرند. با این شرط که دمای تراشه‌های IGBT در محدوده حرارتی مجاز یعنی زیر  $125^\circ\text{C}$  باشند، ضریب انتقال حرارت از سطح زیر گرمابر ثابت و مقدار آن در طراحی‌های مختلف 5، 25، 50، 75 و 100 ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ) است. بیان این نکته لازم است که برای بررسی تأثیر هر یک از طراحی‌های مختلف چیدمان منابع حرارتی و ابعاد هندسی گرمابر، تنها پارامترهای مربوط به طراحی مورد نظر تغییر می‌کنند و دیگر ابعاد هندسی ارائه شده در جدول 4 و سایر خصوصیات فیزیکی و مواد بیان شده در جدول 3 تغییری نخواهند کرد.

### 5-1- چیدمان‌های مختلف فازهای اینورتر مورد مطالعه

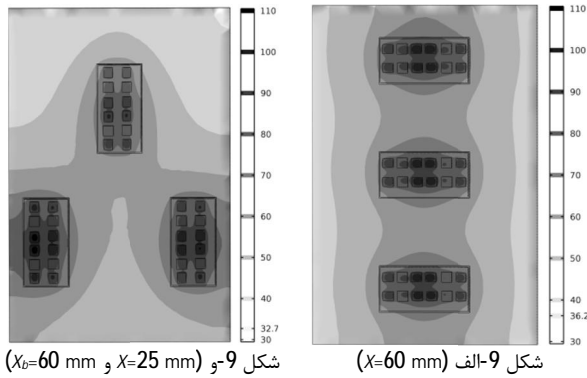
با توجه به شکل 7، محل داغ‌ترین نقاط در 4 تراشه IGBT که در مرکز هر یک از فازها و در مجاورت هم قرار دارند، است. مکان قرارگیری تراشه‌ها در هر یک از فازها ثابت است؛ بنابراین تنها تغییر نحوه چیدمان فازها کنار هم برای کاهش دمای بیشینه امکان‌پذیر است. طراحی‌های مختلف چیدمان و نیز فاصله‌گذاری هر یک از طراحی‌ها، بهتر است به گونه‌ای انتخاب شوند که مرکز فازها از هم دور شوند. چند طراحی مختلف برای نحوه چیدمان فازهای اینورتر مورد مطالعه در شکل 9 نمایش داده شده‌اند که در هر یک از این طراحی‌ها تلاش می‌شود با تغییر فاصله‌گذاری بین فازها کمترین دمای بیشینه برای تراشه‌های IGBT ( $T_j$ ) حاصل شود.

در چیدمان شکل 9-الف سعی می‌شود که با تغییر  $X$  دمای بیشینه کاهش یابد. نتایج شبیه‌سازی برای چیدمان شکل 9-الف در جدول 6 بیان شده‌اند. کمترین دما در  $X=60$  mm و برابر  $106/9^\circ\text{C}$  است. سپس با ثابت نگه‌داشتن فاصله  $X$  در مقدار بهینه، همان‌طور که در شکل 9-ب و شکل 9-ج نشان داده است، دمای بیشینه با تغییر فاصله  $X_b$  بین فازها بررسی می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای چیدمان شکل 9-ب و شکل 9-ج در شکل 10 نشان داده شده‌اند. در هر دو نمودار با افزایش  $X_b$  دمای بیشینه افزایش می‌یابد و همچنین در فاصله کمتر از 10 mm اختلاف دما بین دو نمودار بسیار اندک است؛ بنابراین از بین شکل 9-الف، شکل 9-ب و شکل 9-ج چیدمان شکل 9-الف با  $X=25$  mm و بیشینه دمای  $106/9^\circ\text{C}$  به‌عنوان طراحی بهینه انتخاب می‌شود.

در چیدمان شکل 9-د سعی می‌شود که با تغییر  $X$  دمای بیشینه کاهش یابد. جدول 7 نتایج شبیه‌سازی برای چیدمان شکل 9-د را ارائه می‌دهد. کمترین دما در  $X=25$  mm و برابر  $117/2^\circ\text{C}$  است. سپس با ثابت نگه داشتن فاصله  $X$  در مقدار بهینه همان‌طور که در شکل 9-ه و شکل 9-و نشان داده است، دمای بیشینه با تغییر فاصله  $X_b$  میان فازها بررسی می‌شود. شکل 11 نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای چیدمان شکل 9-ه و شکل 9-و را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل 11، کمترین دمای بیشینه برابر  $113/05^\circ\text{C}$  است؛ بنابراین از بین شکل 9-د، شکل 9-ه و شکل 9-و چیدمان شکل 9-و با  $X=25$  mm و  $X_b=60$  mm و بیشینه دمای  $113/05^\circ\text{C}$  به‌عنوان طراحی بهینه انتخاب می‌شود. در چیدمان شکل 9-ز سعی می‌شود که با تغییر  $X$  دمای بیشینه کاهش یابد. نتایج شبیه‌سازی برای چیدمان شکل 9-ز در شکل 12 نشان داده شده است.

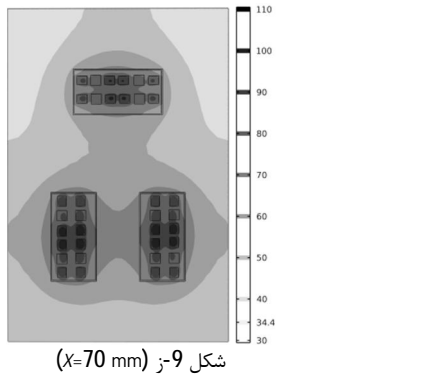


شکل 12 دمای بیشینه برای چیدمان شکل 9-ز با تغییر فاصله بین فازها

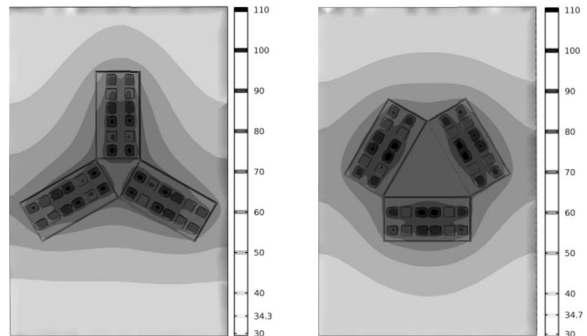


شکل 9-و ( $X_b=60\text{ mm}$  و  $X=25\text{ mm}$ )

شکل 9-الف ( $X=60\text{ mm}$ )



شکل 9-ز ( $X=70\text{ mm}$ )



شکل 9-ط

شکل 9-ح

شکل 13 توزیع دمایی در چیدمان‌های انتخابی (جدول 8)

(4) بالاترین بازده در  $h=100\text{ W/m}^2\text{K}$  با دمای بیشینه  $123/5^\circ\text{C}$ ، در ارتفاع پره 45 mm حاصل می‌شود و مقدار آن 37/3% است.

### 3-5- تغییر ضخامت پره‌های گرمابر

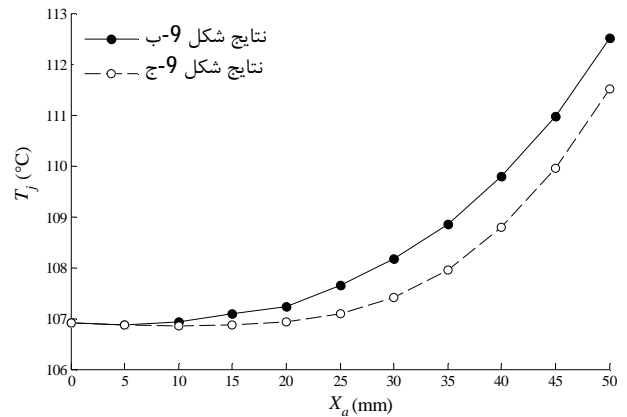
شکل 15 بازده گرمابر را برحسب مقادیر مختلف ضخامت پره‌های گرمابر نشان می‌دهد. (1) با توجه به شکل 15 دمای سایر نقاط روی نمودارهایی که ضریب انتقال

جدول 7 دمای ماکزیمم برای چیدمان شکل 9-د با تغییر فاصله بین فازها

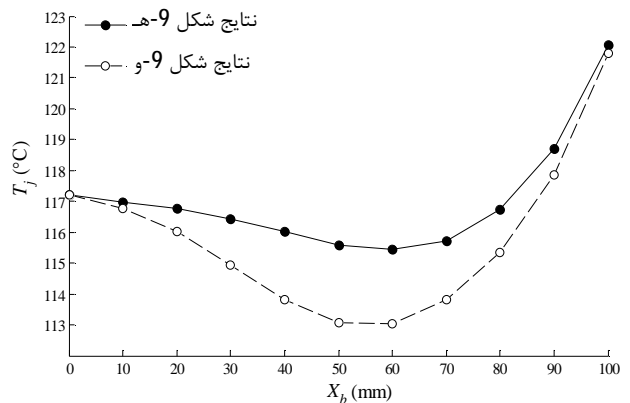
فاصله بین فازها ( $X$ )	دمای ماکزیمم ( $T_j$ )
1 میلی‌متر	$130/05^\circ\text{C}$
5 میلی‌متر	$126/85^\circ\text{C}$
10 میلی‌متر	$123/38^\circ\text{C}$
15 میلی‌متر	$120/43^\circ\text{C}$
20 میلی‌متر	$117/94^\circ\text{C}$
25 میلی‌متر	$117/20^\circ\text{C}$
30 میلی‌متر	$119/84^\circ\text{C}$
35 میلی‌متر	$124/05^\circ\text{C}$

جدول 8 دمای ماکزیمم چیدمان‌های انتخابی از بین طراحی‌های مختلف چیدمان

نوع چیدمان	دمای ماکزیمم ( $T_j$ )
شکل 8-الف ( $X=60\text{ mm}$ )	$106/90^\circ\text{C}$
شکل 8-و ( $X_b=60\text{ mm}$ و $X=25\text{ mm}$ )	$113/05^\circ\text{C}$
شکل 8-ز ( $X=70\text{ mm}$ )	$107/50^\circ\text{C}$
شکل 8-ح	$113/88^\circ\text{C}$
شکل 8-ط	$111/93^\circ\text{C}$



شکل 10 دمای بیشینه برای چیدمان شکل 9-ب و شکل 9-ج با تغییر  $X_a$



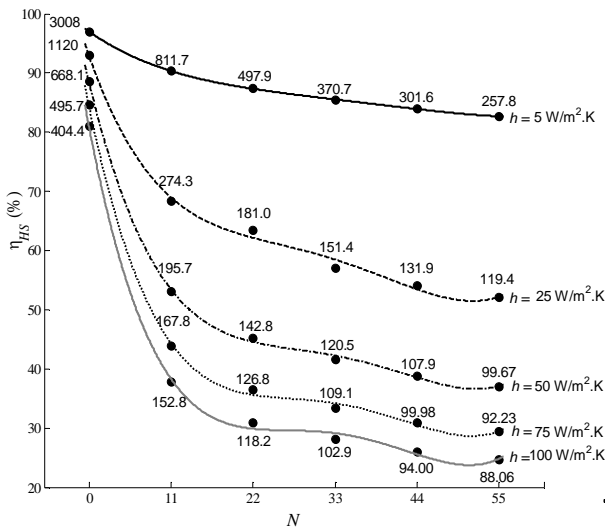
شکل 11 دمای بیشینه برای چیدمان شکل 9-ه و شکل 9-و با تغییر  $X_b$

(1) با توجه به شکل 14 دمای سایر نقاط روی نمودارهایی که ضریب انتقال حرارت آن‌ها از سطح زیر گرمابر کمتر از  $50\text{ W/m}^2\text{K}$  است، بالای  $125^\circ\text{C}$  و خارج از محدوده مجاز حرارتی است.

(2) در هر یک از نمودارها با افزایش ارتفاع پره‌های گرمابر، بازده گرمابر و دمای بیشینه کاهش می‌یابند.

(3) بالاترین بازده در  $h=75\text{ W/m}^2\text{K}$  با دمای بیشینه  $123/1^\circ\text{C}$ ، در ارتفاع پره 75 mm حاصل می‌شود و مقدار آن 31/16% است.





شکل 16 تغییر تعداد پره‌های گرمابر

- (4) بالاترین بازده در  $h=50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  با دمای بیشینه  $120/5^\circ\text{C}$ ، در تعداد پره 33 حاصل می‌شود و مقدار آن  $41/59\%$  است.
- (5) بالاترین بازده در  $h=75 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  با دمای بیشینه  $109/1^\circ\text{C}$ ، در تعداد پره 33 حاصل می‌شود و مقدار آن  $33/32\%$  است.
- (6) بالاترین بازده در  $h=100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  با دمای بیشینه  $118/2^\circ\text{C}$ ، در تعداد پره 22 حاصل می‌شود و مقدار آن  $30/9\%$  است.

#### 5-5- تغییر ضخامت پایه گرمابر

- شکل 17 بازده گرمابر را برحسب مقادیر مختلف ضخامت پایه گرمابر نشان می‌دهد.
- (1) با توجه به شکل 17 دمای سایر نقاط روی نمودارهایی که ضریب انتقال حرارت آن‌ها از سطح زیر گرمابر کمتر از  $50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  است، بالای  $125^\circ\text{C}$  و خارج از محدوده مجاز حرارتی است.
- (2) در هر یک از نمودارها با افزایش ضخامت پایه گرمابر، دمای بیشینه کاهش و بازده گرمابر افزایش می‌یابد.
- (3) بالاترین بازده در  $h=75 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  با دمای بیشینه  $121/8^\circ\text{C}$ ، در ضخامت پایه 27 mm حاصل می‌شود و مقدار آن  $43/32\%$  است.
- (4) بالاترین بازده در  $h=100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  با دمای بیشینه  $113/9^\circ\text{C}$ ، در ضخامت پایه 27 mm حاصل می‌شود و مقدار آن  $37/18\%$  است.

#### 5-6- تغییر هم‌زمان ارتفاع پره و ضخامت پایه با ثابت بودن ارتفاع گرمابر

- شکل 18 بازده گرمابر برحسب مقادیر مختلف ارتفاع پره و ضخامت پایه با فرض ثابت بودن ارتفاع گرمابر را نشان می‌دهد.
- (1) با توجه به شکل 18 دمای سایر نقاط روی نمودارهایی که ضریب انتقال حرارت آن‌ها از سطح زیر گرمابر کمتر از  $75 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  است، بالای  $125^\circ\text{C}$  و خارج از محدوده مجاز حرارتی است.
- (2) بالاترین بازده در  $h=100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  با دمای بیشینه  $116/6^\circ\text{C}$ ، برای ارتفاع پره 50 mm و ضخامت پایه گرمابر 27 mm حاصل می‌شود و مقدار آن  $41/50\%$  است.

#### 5-7- استخراج طراحی‌های مختلف ابعاد هندسی گرمابر با در نظر گرفتن نحوه چیدمان

- کلید نتایج مربوط به طراحی ابعاد هندسی گرمابر با شرط قرارگیری دمای تراشه‌ها در محدوده حرارتی مجاز و بازده بیشینه گرمابر (نتایج بخش 2-5 تا 6-5) در جدول 9 ارائه شده‌اند.

حرارت آن‌ها از سطح زیر گرمابر کمتر از  $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ، بالای  $125^\circ\text{C}$  و خارج از محدوده مجاز حرارتی است.

(2) در هر یک از نمودارها با افزایش ضخامت پره‌های گرمابر، دمای بیشینه کاهش می‌یابد.

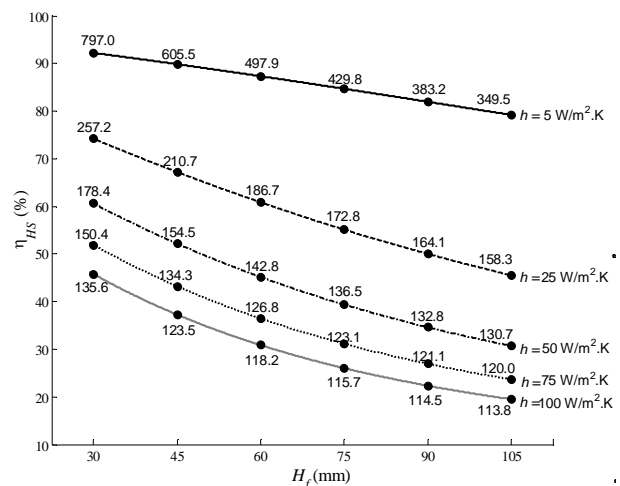
(3) بالاترین بازده در  $h=50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  با دمای بیشینه  $124/5^\circ\text{C}$ ، در ضخامت پره 7 mm حاصل می‌شود و مقدار آن  $57/72\%$  است.

(4) بالاترین بازده در  $h=75 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  با دمای بیشینه  $112/7^\circ\text{C}$ ، در ضخامت پره 7 mm حاصل می‌شود و مقدار آن  $46/16\%$  است.

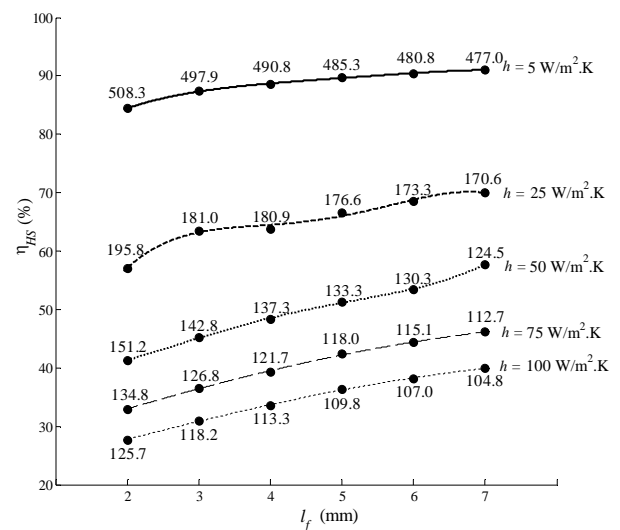
(5) بالاترین بازده در  $h=100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  با دمای بیشینه  $104/8^\circ\text{C}$ ، در ضخامت پره 7 mm حاصل می‌شود و مقدار آن  $39/93\%$  است.

#### 5-4- تغییر تعداد پره‌های گرمابر

- شکل 16 بازده گرمابر را برحسب مقادیر مختلف تعداد پره‌های گرمابر نشان می‌دهد.
- (1) با توجه به شکل 16 دمای سایر نقاط روی نمودار با ضریب انتقال حرارت  $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ، بالای  $125^\circ\text{C}$  و خارج از محدوده مجاز حرارتی است.
- (2) در هر یک از نمودارها با افزایش تعداد پره‌های گرمابر، بازده گرمابر و دمای بیشینه کاهش می‌یابد.
- (3) بالاترین بازده در  $h=25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  با دمای بیشینه  $119/4^\circ\text{C}$ ، در تعداد پره 55 حاصل می‌شود و مقدار آن  $52/04\%$  است.



شکل 14 تغییر ارتفاع پره‌های گرمابر



شکل 15 تغییر ضخامت پره‌های گرمابر

جدول 9 طراحی‌های مختلف گرمابری برای چیدمان شکل 8-د ( $X=5\text{ mm}$ )

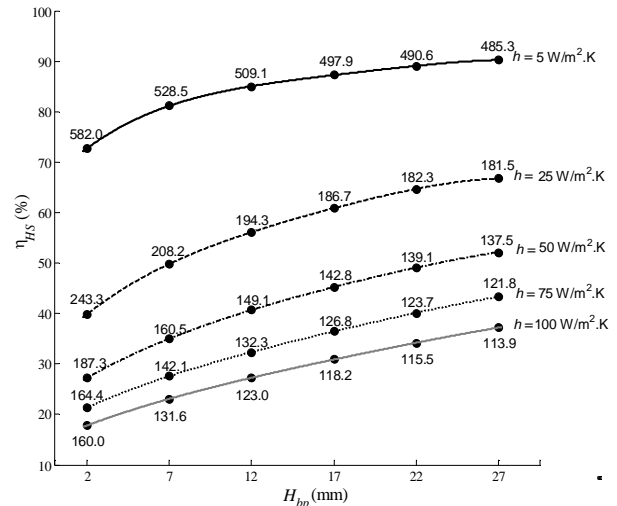
طراحی	$h$	$N$	$l_f$	$H_f$	$H_{bp}$	$\Delta V$	$T_f$ (°C)	$\eta_{HS}$
1	25	55	3	60	17	81/08	109/4	52/04
2	50	33	3	60	17	27/03	120/5	41/59
3	50	22	7	60	17	72/07	124/5	57/72
4	75	33	3	60	17	27/03	109/1	33/32
5	75	22	7	60	17	72/07	112/7	46/16
6	75	22	3	75	17	13/51	123/1	31/16
7	75	22	3	60	27	27/03	121/8	43/32
8	75	33	3	75	27	74/76	104/3	34/04
9	75	22	7	75	27	130/63	107/2	47/33
10	75	22	3	75	27	40/54	118/34	37/21
11	100	22	3	60	17	0	118/2	30/90
12	100	22	7	60	17	72/07	104/8	39/93
13	100	22	3	45	17	-13/51	123/5	37/3
14	100	22	3	60	27	27/03	113/9	37/18
15	100	22	3	50	27	18/02	116/6	41/5
16	100	22	7	50	27	78/08	107/97	50/92
17	100	22	7	45	27	67/57	110/5	53/23
18	100	22	3	45	27	13/51	118/6	44/57

\* درصد اختلاف حجمی مواد هر نمونه گرمابری با نمونه اولیه

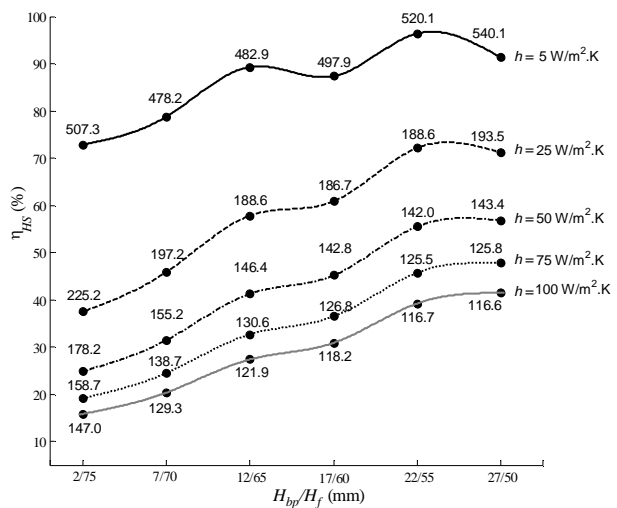
جدول 10 طراحی‌های مختلف گرمابری برای چیدمان شکل 8-الف ( $X=60\text{ mm}$ )

طراحی	$h$	$N$	$l_f$	$H_f$	$H_{bp}$	$\Delta V$	$T_f$ (°C)	$\eta_{HS}$
1	25	44	3	60	17	54/05	117/79	63/69
2	50	22	3	60	17	0	122/03	56/93
3	50	22	7	60	17	72/07	114/94	64/35
4	50	22	3	60	27	21/28	119/23	64/73
5	50	22	3	55	22	9/01	122/84	63/84
6	50	22	7	55	22	75/08	116/93	70/88
7	50	22	7	60	27	99/10	113/25	72/51
8	50	22	7	60	22	85/59	113/69	68/93
9	50	22	3	60	22	13/51	120/05	61/33
10	50	22	7	55	27	88/59	116/46	74/41
11	50	22	3	55	27	22/52	121/99	67/28
12	75	22	3	60	17	0	106/90	47/90
13	75	22	7	60	17	72/07	100/02	55/87
14	75	22	3	45	17	-13/51	113/51	56/97
15	75	22	3	60	27	21/28	104/62	55/93
16	75	22	3	50	27	18/02	108/35	61/56
17	75	22	7	50	27	78/08	103/43	69/16
18	75	22	7	45	27	67/57	106/50	71/50
19	75	22	3	45	27	13/51	110/98	64/57
20	100	22	3	60	17	0	98/95	41/64
21	100	22	7	60	17	72/07	92/25	49/73
22	100	22	3	30	17	-27/03	113/8	59/96
23	100	22	3	60	27	21/28	97/06	49/54
24	100	22	3	50	27	18/02	99/6	56/58
25	100	22	7	50	27	78/08	94/80	63/50
26	100	22	7	30	27	36/04	108/23	74/38
27	100	22	3	30	27	0	111/22	69/15

\* درصد اختلاف حجمی مواد هر نمونه گرمابری با نمونه اولیه



شکل 17 تغییر ضخامت پایه گرمابری



شکل 18 تغییر هم‌زمان ارتفاع پره و ضخامت پایه با ثابت بودن ارتفاع گرمابری

نتایج جدول 9 مربوط به طراحی چیدمان فازهای اینورتر به صورت شکل 9-د با  $X=5\text{ mm}$  است. همچنین طراحی ابعاد هندسی گرمابری با دو شرط یادشده در بالا، برای چیدمان بهینه شکل 9-الف با  $X=60\text{ mm}$  انجام شده و نتایج آن در جدول 10 گزارش شده‌اند. شایان یاد است، از ترکیب ابعاد هندسی که برای هر یک از پارامترها (تعداد پره‌ها، ارتفاع پره‌ها، ضخامت پره‌ها و ضخامت پایه گرمابری) با شرط بازده بیشینه به صورت جداگانه به دست آمده‌اند، طراحی‌های دیگری برای گرمابری استخراج می‌شود. یاد این نکته لازم است که طراحی بهینه در این پژوهش لزوماً بهترین حالت ممکن نیست، بلکه منظور از چیدمان بهینه و ابعاد هندسی بهینه، ارزیابی و انتخاب بهترین گزینه از بین طراحی‌های مختلف شکل 9، جدول 9 و جدول 10 است. نکته پسین این است که انتخاب حالت بهینه از بین طراحی‌های مختلف چیدمان منابع حرارتی و گرمابری به نظر طراح بستگی دارد.

نتایج مربوط به جدول 9 به این صورت است که در ضریب انتقال حرارت  $25\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ، تنها یک طراحی وجود دارد که دمای بیشینه در محدوده مجاز قرار می‌گیرد. بازده در این طراحی به بهای افزایش حجم  $81/08\%$  مواد مصرفی نسبت به گرمابری اولیه، به مقدار  $21/14\%$  افزایش یافته است. در ضریب انتقال حرارت  $50\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ، بازده در طراحی 3 نسبت به طراحی 2 بیشتر است، اما باید به این نکته توجه کرد که حجم مواد مصرفی در طراحی 3 بسیار بیشتر از طراحی 2 است.

بازده 10/35% و 16/67% نسبت به گرمای اولیه با ضریب انتقال حرارت یکسان افزایش یافته است. همچنین در ضریب انتقال حرارت 100 W/m<sup>2</sup>.K، حجم مواد مصرفی 27/03% کاهش یافته و بازده 15/32% نسبت به گرمای اولیه افزایش پیدا کرده است و از طرفی با 36/04% افزایش حجم در مواد مصرفی بازده 32/92% افزایش یافته است. جالب توجه است که در ضریب انتقال حرارت 100 W/m<sup>2</sup>.K بدون تغییر حجم مواد مصرفی نسبت به گرمای اولیه و تنها با طراحی مناسب می توان بازده را 27/51% افزایش داد.

#### 7- فهرست علائم

$q$	آهنگ انتقال گرما (W)
$\dot{q}$	آهنگ تولید انرژی در واحد حجم (W/m <sup>3</sup> )
$T$	دما (K)
$k$	رسانندگی گرمایی (W/mK)
$h$	ضریب انتقال گرمای جابه جایی (W/m <sup>2</sup> .K)
$c_p$	گرمای ویژه در فشار ثابت (J/kgK)
$A$	مساحت گرمایر (m <sup>2</sup> )
$\eta$	بهره (%)
$\rho$	چگالی جرمی (kg/m <sup>3</sup> )

#### زیر نویس ها

$HS$	گرمایر
$j$	مقدار بیشینه برای تراشه IGBT
1	ناحیه 1 در شکل شماتیک (شکل 1)
2	ناحیه 2 در شکل شماتیک (شکل 1)
$d, Com$	نتایج شبیه سازی برای تراشه دیود
$d, Sem$	نتایج نرم افزار سمسپل برای تراشه دیود
$tr, Com$	نتایج شبیه سازی برای تراشه IGBT
$tr, Sem$	نتایج نرم افزار سمسپل برای تراشه IGBT

#### 8- مراجع

- [1] R. K. Ulrich, W. D. Brown, *Advanced electronic packaging*, 2 ed., New York: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [2] M. H. Rashid, *Power electronics handbook*, United Kingdom: Academic Press Inc., 2006.
- [3] M. Rahimo, Future trends in high-power bipolar metal-oxide semiconductor controlled power semi-conductors, *IET Circuits, Devices & Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 155-167, 2014.
- [4] P. S. Bimbhra, *Power Electronics*, 3 ed.: Raheel Naseem Printing Press, 2002.
- [5] D. Bortis, B. Wrzecionko, J. W. Kolar, A 120 °C Ambient Temperature Forced Air-Cooled Normally-off SiC JFET Automotive Inverter System, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 5, pp. 2345- 2358, 2014.
- [6] M. Ishiko, T. Kondo, A simple approach for dynamic junction temperature estimation of IGBTs on PWM operating conditions, in *Power Electronics Specialists Conference*, Orlando, FL, pp. 916-920, 2007
- [7] A. M. Bazzi, P. T. Krein, J. W. Kimball, IGBT and diode loss estimation under hysteresis switching, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 3, pp. 1044-1048, 2012.
- [8] H. Bostanci, D. V. Ee, B. A. Saarloos, D. P. Rini, L. C. Chow, Thermal Management of Power Inverter Modules at High Fluxes via Two-Phase Spray Cooling, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 2, No. 9, pp. 1480-1485, 2012.
- [9] G. Chen, D. Han, Y. Mei, X. Cao, T. Wang, X. Chen, G. Lu, Transient thermal performance of IGBT power modules attached by low-temperature sintered nanosilver, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 12, No. 1, pp. 124-132, 2011.

در ضریب انتقال حرارت 75 W/m<sup>2</sup>.K، هر چند بالاترین بازده مربوط به طراحی 9 است، اما حجم مواد مصرفی در این طراحی بسیار بالاست؛ بنابراین با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمایر، می توان طراحی 7 را با افزایش حجم 27/03% و بازده 43/32% به عنوان حالت مطلوب در نظر گرفت. در ضریب انتقال حرارت 100 W/m<sup>2</sup>.K، بازده در طراحی 17 به بهای افزایش حجم 67/57% مواد مصرفی نسبت به گرمایر اولیه، به مقدار 22/33% افزایش یافته است. در طراحی 13 با این که حجم مواد مصرفی 13/51% کاهش پیدا کرده، بازده به مقدار 6/4% بهبود یافته است. در این جا نیز با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمایر، می توان طراحی 18 را با افزایش حجم 13/51% و بازده 44/57% به عنوان حالت مطلوب در نظر گرفت.

نتایج مربوط به جدول 10 به این صورت است که در ضریب انتقال حرارت 25 W/m<sup>2</sup>.K، تنها یک طراحی وجود دارد که دمای بیشینه در محدوده مجاز قرار می گیرد. در ضریب انتقال حرارت 50 W/m<sup>2</sup>.K، اگر حجم مواد مصرفی عامل محدودکننده نباشد، می توان طراحی 10 با افزایش حجم مواد مصرفی 88/59% و بازده 74/41% را انتخاب کرد و در غیر این صورت می توان از طراحی 5 با افزایش حجم مواد مصرفی 9/01% و بازده 63/84% استفاده کرد. همچنین با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمایر، می توان طراحی 11 را با افزایش حجم 22/52% و بازده 67/28% به عنوان حالت مطلوب در نظر گرفت. به صورت مشابه در ضریب انتقال حرارت 75 W/m<sup>2</sup>.K، اگر حجم مواد مصرفی عامل محدودکننده نباشد، می توان طراحی 18 با افزایش حجم مواد مصرفی 67/57% و بازده 71/50% را انتخاب کرد و در غیر این صورت می توان از طراحی 14 با کاهش حجم مواد مصرفی 13/51% و بازده 56/97% استفاده کرد. همچنین با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمایر، می توان طراحی 19 را با افزایش حجم 13/51% و بازده 64/57% به عنوان حالت مطلوب در نظر گرفت. در ضریب انتقال حرارت 100 W/m<sup>2</sup>.K، با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمایر، می توان سه طراحی 22، 26 و 27 را به عنوان حالات مطلوب انتخاب کرد. در طراحی 22 حجم مواد مصرفی 27/03% کاهش یافته و بازده 69/15% است. در طراحی 26 با 36/04% افزایش حجم در مواد مصرفی بازده برابر با 74/38% می شود. جالب توجه است که در طراحی 27 بدون تغییر حجم مواد مصرفی نسبت به گرمایر اولیه بازده 27/51% افزایش یافته است.

#### 6- نتیجه گیری

در این مقاله، تلفات توان در یک نمونه اینورتر سه فاز با روش کلیدزنی پهنای باند توسط پیاده سازی آن در نرم افزار متلب و برخی اطلاعات فنی شرکت سازنده تجهیز انتخابی، تخمین زده شد. سپس مدل حرارتی اینورتر برای بررسی توزیع دمایی در چیدمان های مختلف منابع حرارتی و محاسبه بهره گرمایر در شرایط هندسی مختلف، در نرم افزار کامسول شبیه سازی شد. صحت مدل سازی حرارتی با مقایسه دمای متوسط تراشه های IGBT و دیود در مقادیر مختلف توان خروجی اینورتر با دمای به دست آمده از نرم افزار سیمپل تایید شد. نتیجه جالب توجه از طراحی های مختلف چیدمان فازهای اینورتر این است که با چیدمان مطلوب منابع حرارتی، می توان دمای بیشینه تراشه ها را به مقدار قابل ملاحظه ای حدوداً 20 °C کاهش داد. طراحی مطلوب ابعاد هندسی گرمایر برای خنک کردن اینورتر با چیدمان بهینه، با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمایر انجام شد. در ضرایب انتقال حرارت 50 W/m<sup>2</sup>.K و 75 W/m<sup>2</sup>.K به ترتیب با افزایش حجم 22/52% و 13/51%،

- [20] R. E. Simons, Estimating Parallel Plate-Fin Heat Sink Pressure Drop, *Electronics Cooling*, Vol. 9, No. 2, pp. 8-10, 2003.
- [21] U. Drogenik, G. Laimer, J. W. Kolar, Theoretical converter power density limits for forced convection cooling, in *International conference, Power electronics, intelligent motion, power quality*, Nuremberg, Germany, pp. 608-619, 2007.
- [22] U. Drogenik, J. W. Kolar, Analyzing the theoretical limits of forced air-cooling by employing advanced composite materials with thermal conductivities > 400 W/mK, in *4th International Conference on Integrated Power Systems (CIPS)*, Naples, Italy, pp. 1-6, 2006.
- [23] S. Lee, Optimum design and selection of heatsinks, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, Vol. 18, No. 4, pp. 812-817, 2002.
- [24] M. Asadi, B. Arezi, Modeling and Simulation of Air Forced Cooling Heat Sink for Thyristor Controlled Reactor (TCR), in *2nd international Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, Tehran, 1389.
- [25] H. Chen, Y. Xu, H. H. Lu, Analysis of temperature distribution in power converter for switched reluctance motor drive, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 2, pp. 991-994, 2012.
- [26] D. W. Hart, *Power Electronics*, 1 ed.: Tata McGraw-Hill, 2011.
- [27] A. Zanin, SKiM-Technical Explanations, SEMIKRON, 2013.
- [28] SKiM606GD066HD datasheet, SEMIKRON, 2013.
- [29] A. Consoli, C. Licitra, S. Musumeci, A. Testa, F. Frisina, R. Letor, Comparative investigation on power losses in soft-switching insulated gate devices, in *Proceedings of the 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*, Davos, 1994.
- [30] X. Dewei, L. Haiwei, H. Lipei, S. Azuma, M. Kimata, R. Uchida, Power loss and junction temperature analysis of power semiconductor devices, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, No. 5, pp. 1426-1431, 2002.
- [10] A. Castellazzi, Comprehensive compact models for the circuit simulation of multi-chip power modules, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 5, pp. 1251-1264, 2009.
- [11] A. Shah, B. G. Sammakia, H. Srihari, K. Ramakrishna, A numerical study of the thermal performance of an impingement heat sink-fin shape optimization, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 27, No. 4, pp. 710-717, 2004.
- [12] P. Ning, F. Wang, K. D. T. Ngo, Forced-Air Cooling System Design Under Weight Constraint for High-Temperature SiC Converter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 4, pp. 1998-2007, 2013.
- [13] J. Humphrey, R. Devarakonda, N. Queipo, Interactive computational-experimental methodologies (ICEME) for thermofluids research: application to the optimized packaging of heated electronic components, in *Advances in electronic packaging*, pp. 179-191, 1992.
- [14] N. Queipo, J. Humphrey, A. Ortega, Multiobjective optimization of component placement on planar printed wiring boards, in *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, Austin, TX, pp. 92-105, 1997.
- [15] E. A. Sewall, *Development of a thermal management methodology for a front-end dps power supply*, Master of Science Thesis, Mechanical Engineering Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 2002.
- [16] W. Elenbaas, Heat Dissipation of Parallel Plates by Free Convection, *Physica*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-28, 1942.
- [17] E. K. Levy, Optimum Plate Spacing for Laminar Natural Convection Heat Transfer from Parallel Vertical Isothermal Flat Plates, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 93, No. 4, pp. 463-465, 1971.
- [18] A. Bar-Cohen, W. M. Rohsenow, Thermally Optimum Spacing of Vertical, Natural Convection Cooled, Parallel Plates, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 106, No. 1, pp. 116-123, 1984.
- [19] R. E. Simons, Estimating Parallel Plate-Fin Heat Sink Thermal Resistance, *Electronics Cooling Magazine*, pp. 8-9, 2003.