مروری بر تحقیقات انجام گرفته در زمینه‌ی عملکرد حرارتی پره‌ها و هیت سینک‌ها

محمد جعفریان[1]، نادر رهبر[2*]

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و تولید پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
* سمنان، ۳۵۱۹۶۹۷۹۵۱، rahbar@semnaniau.ac.ir

چکیده

یکی از موضوعات مهم در صنایع مختلف ازجمله الکترونیک، مدیریت حرارتی قطعات می‌باشد. روند صنعت الکترونیک در جهت تولیدات قوی‌تر، فشرده‌تر و سبک‌تر نیاز به سطح بالاتری از قابلیت در زمینه فناوری خنک کاری را دارد. این نیاز با بکار گیری سطوح گسترش‌یافته (پره‌ها) رفع می‌گردد. تحقیقات بسیاری جهت پیدا کردن شکل بهینه پره‌ها صورت گرفته است. از روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی و افزایش بازدهی پره‌ها و هیت سینک‌ها استفاده می‌شود که می‌توان به بهینه‌سازی هندسی، شکل و ابعاد، تغییر فاصله پره‌ها، بکار گیری مواد مختلف در ساخت پره‌ها، بکار گیری زمینه‌های متخلخل با هدایت حرارتی بالا جهت بهبود مشخصه حرارتی پره‌ها اشاره کرد. در این پژوهش به برخی از تحقیقات پیشین که در این زمینه صورت گرفته اشاره‌شده است.

کلیدواژگان

پره، پره متخلخل، انتقال حرارت ، جابجایی طبیعی، هیت‌سینک

A review of studies in the field of thermal performance of the fins and heat sinks

Mohammad Jafarian[1], Nader Rahbar [2*]

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
* P.O.B. 3519697951 Semnan, Iran, rahbar@semnaniau.ac.ir

Abstract

One of the most important issues in various industries, including electronics, is Components thermal management. In order to have more powerful, integrated and smaller electronic products, it is necessary to use higher level of Heat Dissipation Technology. This requires the use of extended surfaces (fins) resolves. Many studies have been conducted to find the optimal shape of the fins. Different methods are used to optimize and increase the efficiency of the fins and heat sinks which can be noted to optimize the geometry, shape and dimensions, change the fins distance, the use of different materials in the manufacture of fins, the use of porous media with high thermal conductivity to improve fins thermal characteristics. . In this study is mentioned review of some previous researches that has been done in this context.

Keywords

Fin, Porous fin, Heat transfer, Natural convection, Heat sink

۱- مقدمه

میزان انرژی حرارتی که در یک انتقال حرارت جابجایی از یک سطح به سیال منتقل می‌شود به پارامترهای مختلفی ازجمله سطح تماس آن‌ها بستگی دارد. برای ازدیاد انتقال حرارت می‌توان سطح تماس جسم با سیال را گسترش داد. این امر با افزودن پره روی سطح امکان‌پذیر است.

همواره صنعت پره به دنبال کاهش ابعاد، وزن و قیمت تمام‌شده پره بوده است. این نیاز اغلب با هزینه بالای تولید فلزات با هدایت حرارتی بالا حاصل می‌شود. بهبود انتقال حرارت از پره پارامتر مهمی است که توجه بسیاری از محققان را جلب کرده است. که این امر توسط روش‌های زیر محقق خواهد شد:

۱- افزایش نسبت سطح به حجم
۲- افزایش هدایت حرارتی پره
۳- افزایش انتقال حرارت جابجایی بین سطح و سیال اطراف

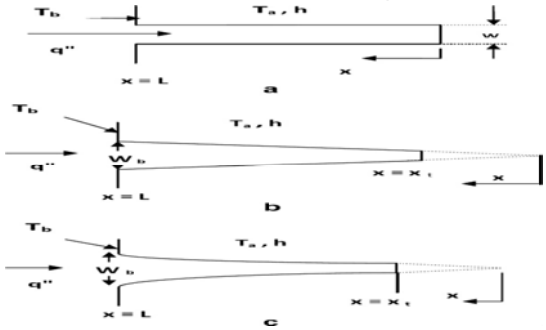
تا به امروز تحقیقات بسیاری در زمینه بهینه‌سازی پره‌ها صورت گرفته است. از روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی و افزایش بازدهی پره‌ها استفاده می‌شود، ازجمله بهینه‌سازی هندسی، شکل و ابعاد، تغییر فاصله پره‌ها، زاویه پره‌ها و به‌کارگیری مواد مختلف در ساخت پره‌ها. در این پژوهش به بیان برخی تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌های فوق پرداخته خواهد شد.

۲- تحقیقات انجام‌شده بر روی پره‌های ساده (جامد)

مروری بر شکل بهینه پره توسط سیندر وکراس ارائه گردیده است [۱]. دافین[1] از محاسبات متغیر جهت پیدا کردن شکل بهینه پره استفاده کرد [۲]. بیژن[2] و پولیکاکوس[3] نشان دادند که شکل بهینه پره‌ها و ابعاد آن‌ها فقط بر پایه زمینه‌های ترمودینامیکی محاسبه می‌شود [۳]. شکل بهینه پره‌ها با هدایت وابسته به دما توسط بیژن بررسی‌شده است [۴]. عزیز[4] و فانگ[5] پره‌هایی با سطح مقطع‌های مختلف مستطیلی، ذوزنقه‌ای و منحنی با سطح مقعر را بررسی نمودند. انتقال حرارت این مقاطع باهم مقایسه شده است.

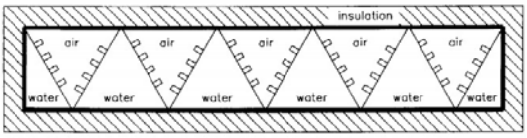
[1] Duffin
[2] Bejan
[3] Poulikakos
[4] Abdul Aziz
[5] Fang

نتایج بیانگر این مسئله است که انتقال حرارت از پره منحنی با سطح مقعر، ذوزنقه‌ای و مستطیلی افزایش خواهد یافت [۵].



شکل ۱ طرحواره پره موردمطالعه (a) :مستطیلی، (b) ذوزنقه‌ای، (c) سهموی مقعر [۵]

از دیگر تحقیقات انجام‌شده می‌توان به تحقیق برگا[1] و سبویا[2] اشاره کرد. در این تحقیق جریان مغشوش توسعه‌یافته در مجموعه پره‌ها در داخل داکت مثلثی بررسی‌شده است و افت فشار داخل داکت با ثابت ماندن عدد رینولدز بررسی‌شده است. همچنین به افزایش ٪۲۰۰ عدد بدون بعد ناسلت و درنتیجه انتقال حرارت در هنگام وجود پره نسبت به حالتی که پره وجود ندارد اشاره‌شده است[۶, ۷].



شکل ۲ مجموعه پره‌ها در داخل داکت مثلثی[۶, ۷]

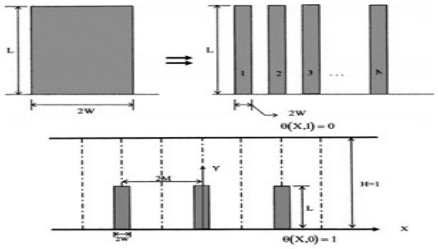
۳- تحقیقات انجام‌شده بر روی پره‌های متخلخل

در بررسی مقالات مشخص‌شده زمینه‌های متخلخل با هدایت حرارتی بالا جهت بهبود مشخصه حرارتی سیستم‌های مختلف استفاده‌شده‌اند. می‌توان ازجمله صفحات جذب حرارت (کولکتورهای خورشیدی) بدون تیوب رآکتورهای بستر بسته‌شده و کاتالیزوری، بالا بردن راندمان خشک‌کن‌ها، فیلتر کردن، عایق‌کردن و روغن‌کاری و مبدل‌های حرارتی را نام برد.

فلسفه و اساس استفاده از پره‌های متخلخل افزایش سطح مؤثر است. یکی از اولین مزیت‌های استفاده از پره‌های متخلخل صرفه‌جویی در مواد اولیه بکار رفته می‌باشد. به همین دلیل پره‌های متخلخل داری مشخصه حرارتی بهتری نسبت به پره‌های قدیمی هم‌وزن خود هستند.

هوانگ[3]و وفایی[4] برای کنترل جریان و افزایش نرخ انتقال حرارت از بلوک‌های متخلخل استفاده کردند [۸]. الکم[5] و النمیر[6] با هدف بهبود عملکرد حرارتی سیستم‌های مختلف از لایه‌های متخلخل با هدایت حرارتی بالا استفاده نمودند [۹]. کیم[7] و همکاران به‌طور تجربی تأثیر استفاده از پرده‌های متخلخل را بروی انتقال حرارت و ویژگی‌های جریان در مبدل‌های حرارتی مطالعه کردند [۱۰]. کارهای تجربی در این زمینه محدود است و کار آن‌ها تحت شرایط انتقال حرارت اجباری صورت گرفته است.

مفهوم استفاده از پره‌های متخلخل اولین بار توسط کیوان و النمیر مطرح شد. در این تحقیق با قرار دادن تعدادی پره متخلخل بین دو سطح سرد و گرم، رفتار انتقال حرارت این مجموعه تحت جابجایی طبیعی موردبررسی قرار گرفت [۱۱].



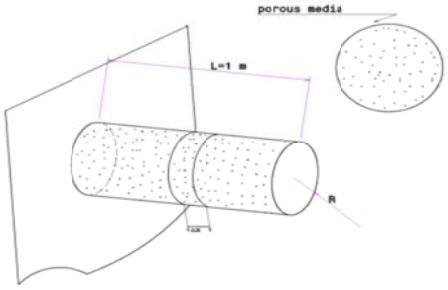
شکل ۳ پره‌های متخلخل مستطیل شکل [۱۱]

کیوان یک مدل ساده شده برای تحلیل حرارتی پره‌های متخلخل مستطیل شکل تحت شرایط جابجایی طبیعی ارائه نمود [۱۲]. ابوهجله[8] اثر استفاده از پره‌های متخلخل بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری از یک استوانه افقی را بررسی عددی کرده است او به این نتیجه رسید که استفاده از پره‌های متخلخل به‌جای پره‌های ساده نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد [۱۳].

نتایج شبیه‌سازی کیوان و زیتون نشان می‌دهد که با به‌کارگیری پره متخلخل ممکن است عملکرد مشابه پره‌های معمولی اما با صرفه‌جویی مواد مصرفی به دست آید [۱۴].

موضوع استفاده از پره‌های ساخته‌شده از مواد متخلخل با معرفی مدل دارسی اولین بار توسط کیوان و همکارانش انجام شد به دنبال آن مطالعات بعدی در رابطه با تحلیل سطوح اضافه‌شده (پره‌های متخلخل) ارائه گردید [۱۱].

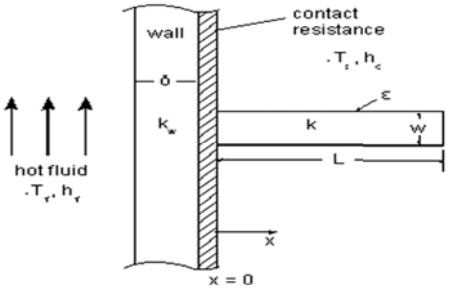
سعدالدین و صادقی [۱۵] انتقال حرارت پره‌های استوانه‌ای را از طریق معادله رانج کوتای درجه ۴[9] مطالعه نمودند و به این نتیجه رسیدند میزان انتقال حرارت از پره متخلخل می‌تواند پیش از یک پره جامد باشد.



شکل ۴ پره متخلخل با سطح مقطع دایره‌ای[۱۵]

ترکیلمازگا [10] [۱۶] راه‌حلی دقیق برای نفوذ حرارتی در یک پره مستقیم با سطح مقطع‌های متغیر به دست آورد. او مشخص نمود که کارایی و میزان انتقال حرارت پره با سطح مقطع نمایی بیش از پره‌های مستطیل شکل است.

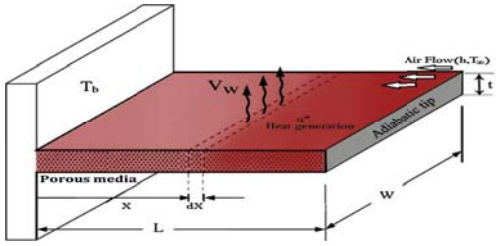
[1] Braga
[2] Saboya
[3] Hung
[4] Vafai
[5] Alkam
[6] Al-Nimr
[7] Kim
[8] Abu-Hijleh
[9] Runge-Kutta 4th grade
[10] Turkyilmazoglu



شکل ۵ پره‌ی مستطیل شکل طولی متصل به یک دیواره‌ی گرم شده[۱۷]

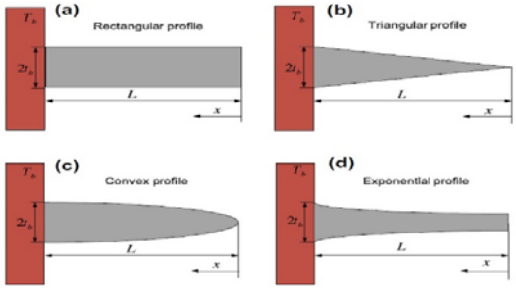
عزیز و بیرگیرین مشخصه و طرح بهینه‌ی پره‌ی مستطیل شکل طولی را متصل به یک دیوار ه ی گرم شده با جابه‌جایی با قطر و ضخامت معین توسط روش عددی به دست آوردند و نتایج خود را با نتایج به‌دست‌آمده توسط روش چهاربعدی دیفرانسیل ترکیبی مقایسه نمودند [۱۷]؛ همچنین عزیز و خانی روش تحلیل هموتوپی را برای تخمین مشخصه حرارتی یک پره مستقیم از شکل زین اسبی زمانی که ضرایب انتقال حرارت و جابه‌جایی تابع دما هستند را به‌کاربرده‌اند [۱۸]. روش اختلاف محدود بر روی یک پره سوزنی با شرایط مرزی مختلف توسط ملک‌زاده و رهیده بکار رفته است [۱۹].

حاتمی و همکارانش اثر دارسی و عدد رایلی روی پره متخلخل مستطیل شکل توسط روش آنالیز ضرایب بررسی کردند و همچنین نشان دادند روش حداقل مربعات نتایج دقیق‌تری نسبت به روش‌های دیگر دارد [۲۰].



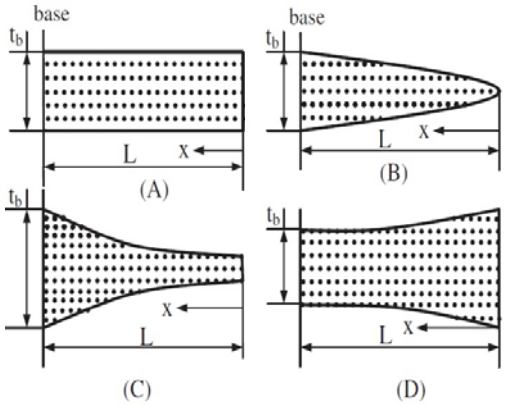
شکل ۶ شکل شماتیک از انتقال حرارت جابجایی در پره متخلخل با تولید گرما وابسته به دما[۲۰]

کارایی پره برای چهار پره‌ی جامد طولی با سطح مقطع‌های مستطیلی، نمایی، مثلثی و... توسط ترابی و ژانگ[1] از طریق روش تحلیل دیفرانسیل با در نظر گرفتن تمام شرایط غیرخطی مطالعه شده است [۲۱].



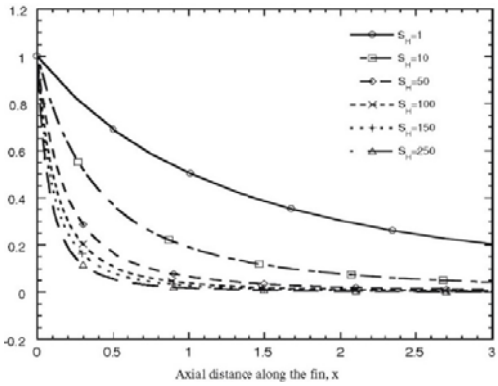
شکل ۷ چهار پره‌ی جامد طولی با سطح مقطع‌های (a) مستطیلی، (b) مثلثی، (c)محدب، (d) نمایی[۲۱]

کندو[2] [۲۲] کاری تحلیلی بر روی طراحی بهینه پره متخلخل ارائه نمود. او اشکال مختلف پره را تحت شرایط جابجایی آزاد بررسی و متوجه افزایش قابل‌ملاحظه‌ی انتقال حرارت از طریق پره‌های متخلخل برای هر شکل هندسی پره در مقایسه با پره‌های جامد (در شرایط تخلخل کم و ضرایب بالای جریان) شد.



شکل ۸ شکل شماتیک از پره سوزنی با سطح مقطع‌های مختلف (A) مستطیلی (B)مثلثی محدب و نمایی (C,D) [۲۲]

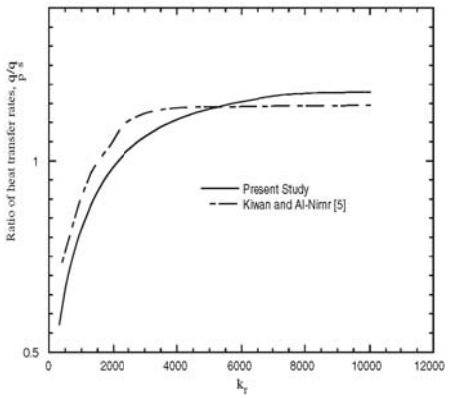
کیوان تحلیل حرارتی پره‌های متخلخل در شرایط جابه‌جایی طبیعی را بررسی نمود. او یک روش بر پایه تعادل انرژی و مدل دارسی جهت فرموله کردن معادلات انتقال حرارت و مشخصه حرارتی پره‌های متخلخل ارائه نمود و برای سه نوع مختلف پره مورداستفاده قرارداد. مشخص شد که انتقال حرارت پره‌های متخلخل می‌تواند از پره جامد بیشتر باشد [۲۳].



شکل ۹ توزیع دمای بی‌بعد در طول پره متخلخل[۲۳]

با توجه به شکل ۹ که برای حالت پره با طول بلند می‌باشد، با افزایش S_H گرادیان حرارتی در پای پره افزایش می‌یابد. با توجه به تعریف پارامتر S_H با افزایش مقادیر عدد رایلی، عدد دارسی و نسبت طول به عرض پره میزان انتقال حرارت از پره افزایش و با افزایش هدایت حرارتی این مقدار کاهش می‌یابد.

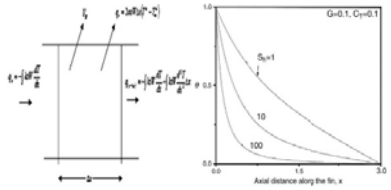
[1] Zhang
[2] Kundu



شکل ۱۰ میزان تغییرات نرخ انتقال حرارت در پره متخلخل نسبت به پره جامد[۲۳]

نمودار ۱۰ میزان انتقال حرارت را در پره‌ی متخلخل را با انتقال حرارت در یک پره ساده مقایسه نموده است . مشخص است که به‌طور محسوسی راندمان پره متخلخل افزایش یافته است.

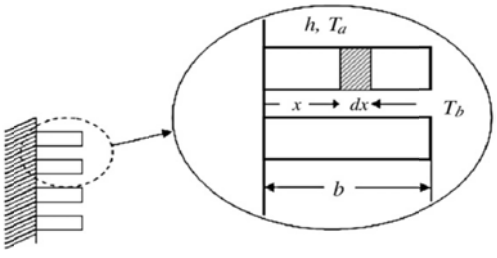
بیکر[1] و گرلا[2] مطالعه‌ای جهت جابجایی طبیعی تشعشعی در پره مستطیل شکل را مطالعه نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که تشعشع حرارت بیشتری را نسبت به مدل مشابه بدون تشعشع جابجا می‌کند [۲۴].



شکل ۱۱ توزیع دمای بی‌بعد در طول پره متخلخل[۲۴]

دومیری و فاضلی [۲۵] معادله دیفرانسیل پره مستقیم غیرخطی را جهت بررسی توزیع حرارت و کارایی پره حل نموده‌اند. همچنین توزیع حرارتی برای پره‌های با هدایت حرارت وابسته به دما توسط گنجی و همکارانش مطالعه شد [۲۶].

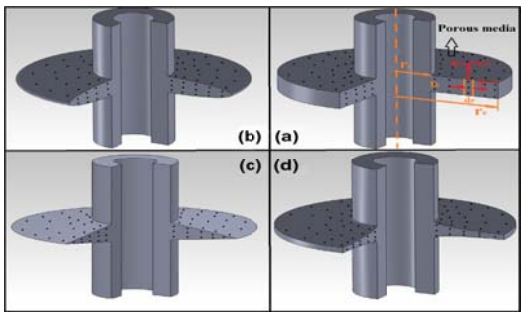
جونیدی و همکارانش از روش انتقال دیفرانسیلی برای حل تحلیل پره‌های مستقیم با انتقال حرارت جابه‌جایی وابسته به دما استفاده کردند و نتایج را با نمونه عددی و دقیق مقایسه نموده‌اند. نتایج آن‌ها مؤثر بودن و دقت بالای این روش را نشان داد [۲۷].



شکل ۱۲ شکل شماتیک از پره‌های مستقیم متخلخل[۲۷]

[1] Bakier
[2] Gorla

حاتمی و گنجی مشخصه دمایی پره‌های متخلخل را در حالت جابجای همراه با تشعشع با اشکال حلقوی استوانه‌ای در سطح مقطع‌های مختلف موردبررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که پره‌هایی با برش نمایی (d) از جنس Si_4N_4 بیشترین مقدار انتقال حرارت را در بین بقیه پره‌ها دارند [۲۸].



شکل ۱۳ شکل شماتیک از پره متخلخل دایره‌ای با سطح مقطع‌های (a) مستطیلی، (b) محدب، (c) مثلثی ، (d) نمایی[۲۸]

کیم [۲۹] به‌طور تجربی تأثیر استفاده از پره‌های متخلخل بر انتقال حرارت و مشخصات جریان در صفحات مبدل حرارتی پره را بررسی کرده‌اند آن‌ها فهمیدند که تحت شرایط خاصی انتقال حرارت بهتری را نسبت به پره‌های معمولی دارند.

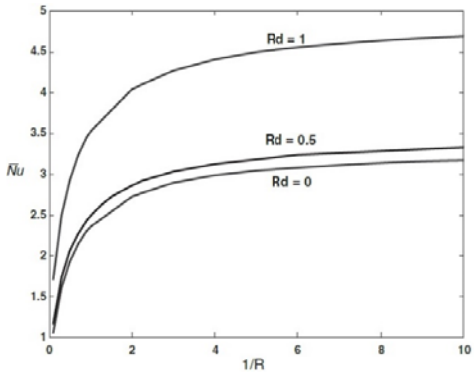
علی[3] و همکارانش انتقال حرارت تشعشعی جابه‌جایی از یک صفحه افقی نامحدود را مطالعه کردند [۳۰].

حسین و تخار[4] اثر تشعشع بر جریان جابه‌جایی ویسکوز ضخیم و سیال تراکم ناپذیر را بر روی یک صفحه عمودی ایزوترمال[5] موردمطالعه قرار دارند. آن‌ها تقریب نفوذپذیری روزلند را بکار بردند [۳۱].

حسین و الیم[6] رفتار متقابل جابه‌جایی همراه با تشعشع را در جریان سیال در طول یک سیلندر عمودی را تحلیل کردند آن‌ها در محاسبات خود روش‌های نامتشابه و رفتار اختلاف محدود به کاربردند [۳۲].

بدرالدین[7] و همکارانش اثر تشعشع بر روی انتقال حرارت جابجایی طبیعی از طریق رینگ‌های به‌کاررفته در یک محیط متخلخل را مطالعه کردند. آن‌ها اثر ضریب تشعشع را بر روی عدد ناسلت[8] ارائه کردند و متوجه شدند که عدد متوسط ناسلت به‌طور فراوانی با افزایش ضریب تشعشع افزوده می‌شود [۳۳].

[3] Ali
[4] Takhar
[5] Isothermal
[6] Alim
[7] Badruddin
[8] Nusselt

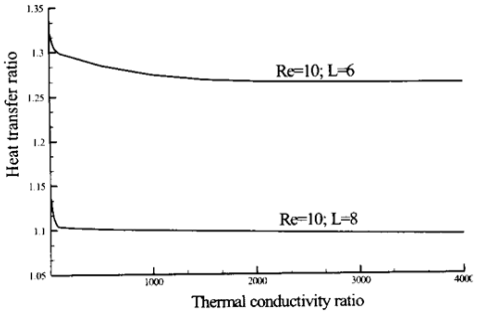


شکل ۱۴ اثر تشعشع بر روی انتقال حرارت جابجایی طبیعی در مقادیر مختلف ناسلت[۳۳]

حسین و پاپ[1] [۳۴] اثر تشعشع بروی جابه‌جایی آزاد در صفحه‌ی عمودی داخل یک محیط متخلخل با تخلخل بالا را مطالعه کردند. آن‌ها چندین ضریب برای ترک‌های پوستی و ضرایبی برای انتقال حرارت محلی ارائه نمودند.

باهانجا[2] و کاندو [۳۵] تأثیر پارامترهای مؤثر بر بهینه‌سازی و کارکرد پره‌های متخلخل را بررسی نمود. او به این نتیجه رسید که با افزایش تخلخل کارایی پره در مدل‌های دقیق و تقریبی افزایش می‌یابد از طرف دیگر در مدل ساده‌شده راندمان پره در تخلخل با نسبت بالا کاهش می‌یابد.

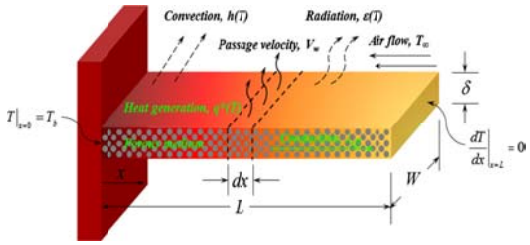
شکوهمند انتقال حرارت از پره متخلخل به همراه جابجایی و هدایت حرارتی را بررسی نمود نتایج محاسبات او نشان می‌دهد که استفاده از پره‌های متخلخل راندمان حرارتی را نسبت به پره‌های جامد[3] افزایش می‌دهد با توجه به شکل افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت باعث کاهش راندمان حرارتی پره‌های متخلخل نسبت به انواع پره‌های متداول غیر متخلخل می‌شود. همچنین افزایش سرعت جریان در بهبود نسبت انتقال حرارت بی‌تأثیر است زیرا در این حالت ذرات سیال با سرعت بیشتری محیط متخلخل را ترک می‌کنند. [۳۶].



شکل ۱۵ تأثیرات ضریب انتقال حرارت هدایت (K_e/K_f) بر نسبت انتقال حرارت (q_p/q_s) [۳۶]

جینگ[4] ما انتقال حرارت جابجایی همراه با تشعشع را در پره متخلخل بررسی نمود. با به دست آوردن توزیع دما در طول پره به بررسی تأثیر ضریب تخلخل در راندمان پره پرداخته است. درنهایت با مقایسه نتایج باحالت جامد به بهینه کردن افزایش انتقال حرارت از پره رسیده است [۳۷].

[1] Pop
[2] Bhanja
[3] Solid
[4] Jing Ma



شکل ۱۶ شکل شماتیک از پره متخلخل با انتقال حرارت جابجایی همراه با تشعشع[۳۷]

علاوه بر کارهای بیان‌شده کارهای مشابهی درزمینه‌ی طراحی و تحلیل پره جهت انتقال حرارت بهینه و طول بهینه انجام‌شده است [۳۸, ۳۹]. در این تحقیقات نیز ضریب تأثیر،راندمان و انتقال حرارت از پره بررسی‌شده است و ابعاد بهینه نظیر طول،جنس و سطح مقطع موردمطالعه قرارگرفته است.

۴- تحقیقات انجام‌شده بر روی هیت سینک‌ها

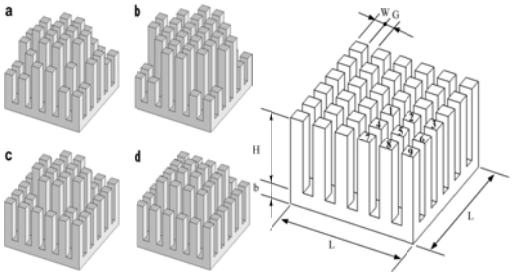
در طول پیشرفت تکنولوژی یکی از مسائل مهمی که مدنظر دانشمندان و تولیدکنندگان بوده بحث انتقال حرارت و خنک‌کنندگی وسایل الکترونیکی است. یکی از روش‌های مؤثر در خنک‌کنندگی بهینه وسایل الکترونیکی استفاده از هیت سینک‌ها است. هیت سینک از صفحه‌ای همراه با تعدادی پره که معمولاً به‌صورت موازی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند تشکیل‌شده است.

هیت سینک‌ها را می‌توان به‌صورت تنها که منجر به انتقال حرارت به شکل جابه‌جایی آزاد یا همراه با یک فن که منجر به انتقال حرارت به شکل جابه‌جایی اجباری می‌شود در نظر گرفت. از روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی و افزایش بازدهی هیت سینک ها استفاده می‌شود. ازجمله بهینه‌سازی هندسی، شکل و ابعاد، تغییر فاصله پره‌ها، بکار گیری مواد مختلف در ساخت پره‌ها و ... هیت سینک‌ها را می‌توان به‌صورت اشکال متفاوتی با توجه به نیاز ساخت. انواع هیت سینک‌ها با توجه به شکل عبارت‌اند از مستطیلی، پینی ، مثلثی و ...

ازجمله تحقیقاتی که درزمینه‌ی شکل هیت سینک‌ها انجام‌شده می‌توان به کار ژیائولینگ[5] در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد. او و همکارانش تحقیقاتی را روی هیت سینک‌های پره پینی انجام دادند و دریافتند که می‌توان با تغییر ساختار هیت سینک‌های ساده به پره پینی راندمان را به‌صورت قابل‌توجهی بالا برد. همچنین فهمیدند که در شرایط مشابه مقاومت گرمایی هیت سینک‌های پره پینی ۳۰٪ کمتر از هیت‌سینک‌های ساده است [۴۰]. جونز[6] تقریباً تمام پارامترهای مربوط به شکل هندسی و جهت‌گیری پرها را برای بازده بهتر آن‌ها موردمطالعه قرارداد. فضای بین پره‌ها و طول پره‌ها مهم‌ترین پارامترهای هندسی در پره‌هایی با جهت‌گیری افقی هستند [۴۱]. دیانی و همکاران نتایج حاصل از بررسی عددی تأثیر متغیرهای هندسی در پره‌ها نظیر تعداد، طول و گام آن‌ها را بر عملکرد حرارتی مجموعه را با استفاده از نرم‌افزار کامسول بررسی کرده‌اند، سپس نتایج آن را با نتایج حاصل از بررسی تجربی رفتار حرارتی سطوح پره دار ذوزنقه‌ای و مستطیلی در تونل باد مقایسه نمودند [۴۲]. یانگ[7] و پنگ[8] با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی به بررسی هیت سینک با پره‌های سوزنی پرداخته‌اند. با بررسی پارامتر طول در مقادیر مختلف رینولدز[9] نتیجه

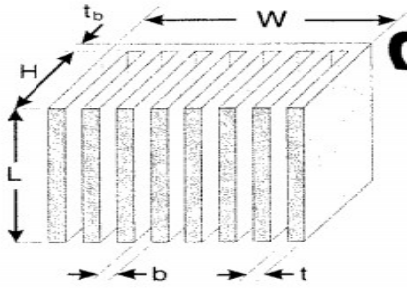
[5] Xiaoling
[6] Jones
[7] Yang
[8] Peng
[9] Reynolds number

گرفتند که طول غیریکنواخت به بهبود انتقال حرارت کمک شایانی می‌کند [۴۳].



شکل ۱۷ بررسی پارامتر طول در هیت سینک با پره‌های سوزنی[۴۳]

بیژن استفاده از کمینه کردن تولید آنتروپی را برای کاربردهای مختلف ارائه نمود [۴۴-۴۸]. کلهام[1] و موزیچکا[2] و خان از همین روش جهت بهینه‌سازی هیت سینک‌های پره صفحه‌ای استفاده کردند.



شکل ۱۸ هیت سینک مستطیلی[۴۴-۴۸]

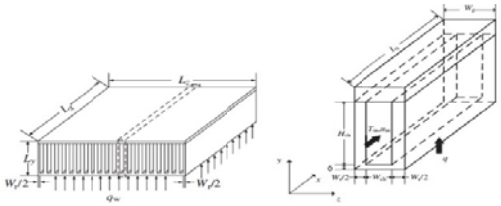
آن‌ها با در نظر گرفتن پنج مدل هیت سینک مختلف تمامی ضرایب طراحی مربوط به هیت سینک‌های صفحه‌ای ازجمله ضرایب هندسی دفع حرارت مشخصه مواد شرایط جریان را به‌طور همزمان بهینه نمودند. تعداد پره بهینه، شکل بهینه جریان عبوری از پره و ارتفاع بهینه را محاسبه نمودند [۴۹-۵۴].

خان و کلهان و یوانویچ[3] تمامی ضرایب هیت سینک میکروکانال[4] را با استفاده از روش بهینه‌سازی نمودند [۵۱]. کرن[5] و کراس[6] به بررسی توزیع دما در پره جامد پرداختند و رفتار پره جامد را تحت شرایط انتقال حرارت جابجایی بررسی کردند [۵۵]. سان[7] و بارکهن[8] [۵۶] و لینگر[9] و بارکهن [۵۷، ۵۸] یک بهینه‌سازی حداقل مواد در پره‌های سوزنی (استوانه‌ای)، پره صفحه‌ای و پره مثلثی با توسعه تک پره به‌ردیف چندتایی با استفاده از تحلیل حداقل مواد مطالعه نمودند.

بارکهن و جلینگ[10] معادلات طراحی برای ردیف پره‌های صفحه‌ای بهینه را توسعه دادند [۵۹]. خان و کلهم و یوانویچ بهینه‌سازی در هیت سینک‌های پره سوزنی در جریان بایپس را با استفاده از روش کمینه کردن تولید آنتروپی[11] انجام دادند [۶۰].

مشخصه‌ی هیت‌سینک‌ها عموماً توسط مقاومت حرارتی تعریف می‌شود. مقدار مقاومت حرارتی کمتر نشان‌دهنده دمای پایین‌تر برای خنک‌کن برای دفع میزان حرارت مشابه است.

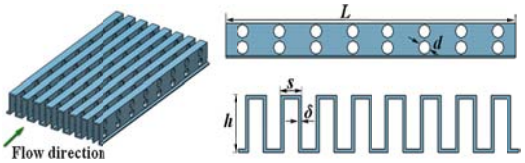
مقاومت حرارتی کمتر را می‌توان با مواد جامدی که ضریب حرارتی بالا دارند [۶۱، ۶۲] و همچنین خنک‌کننده‌های نانو سیال[12] [۶۳، ۶۴] و همچنین توسط بهینه‌سازی شکل هیت سینک به دست آورد [۶۵-۶۷].



شکل ۱۹ هیت سینک میکروکانال[۶۱، ۶۲]

اخیراً تلاش‌های زیادی جهت بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی و همچنین کاهش مقاومت حرارتی از طریق بکار گیری مواد متخلخل و یا صفحات نیمه متخلخل و یا توری در مسیر کانال‌ها صورت گرفته است [۱، ۶۸-۷۷]. این مطالعات نشان داده که بهبود انتقال حرارت در کانال به خاطر استفاده از تخلخل صورت گرفته، به‌طوری‌که این کار همراه با افزایش زیاد افت فشار و یا قدرت پمپ کردن انجام‌گرفته است.

وانگ[13] با بکار گیری پره‌های صفحه‌ای متخلخل در مبدل حرارتی به بررسی تأثیر رینولدز بر پارامترهای مختلفی چون افت فشار و انتقال حرارت پرداخته است [۷۸].



شکل ۲۰ پره‌های صفحه‌ای متخلخل بکار رفته در مبدل حرارتی[۷۸]

از مطالعات متعددی جهت بهبود مشخصه هیت‌سینک های میکروکانال با اضافه کردن ناحیه متخلخل صورت گرفته است، مشخص می‌شود حداکثر بهبود ۷۶/۶٪ در مقاومت حرارتی با اضافه کردن تخلخل امکان‌پذیر است. آن‌ها گزارش کردند که افت فشار هنگفتی در طول میکروکانال وجود دارد. همان‌طور که مشخص است افت فشار بالا یک موضوع جدی در کاربرد عملی هیت سینک‌های میکروکانال است؛ بنابراین استفاده از این طرح محدود خواهد بود [۷۹-۸۱].

موضوع هیت سینک‌ها ی میکروکانال توسط تورکرمن[14] مطرح شد [۸۲]. به دنبال کار باارزش او توجه زیادی مخصوصاً در زمینه میکروالکترونیک به میکرو کانال‌ها جلب شد.

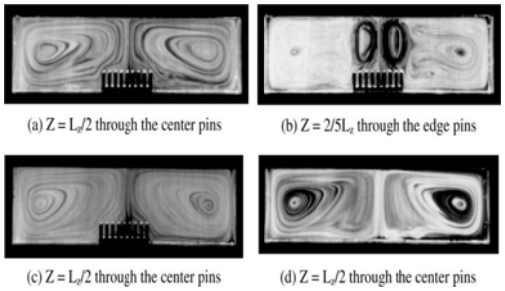
کلینر[15] و همکارانش [۸۳] و آرینوس[16] و همکارانش [۸۴] و هریس[17] و همکارانش [۸۵] مشخصه‌های هیت سینک‌های میکروکانال را به‌صورت تئوری و تجربی بررسی نمودند. آن‌ها مشخصه‌های مقاومت حرارتی، افت

[1] Culham
[2] Muzychka
[3] Yovanovich
[4] Microchannels
[5] Kern
[6] Kraus
[7] Sonn
[8] Bar-Cohen
[9] Iyengar
[10] Jelinek
[11] Entropy generation minimization
[12] Nanofluid
[13] Wang
[14] Tuckerman
[15] Kleiner
[16] Aranyosi
[17] Harris

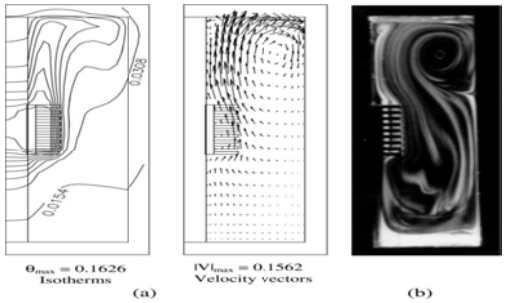
فشار, قدرت پمپ کردن را به‌صورت تابعه‌ای از ابعاد هیت سینک و ابعاد لوله و میزان عبور هوا بیان نمودند.

دلسمن[1] و همکارانش [۸۶] از مطالعه‌ی دینامیک سیالات محاسباتی برای بهینه‌سازی شکل صفحه‌ای هیت‌سینک برای رسیدن به اهداف ازلحاظ توزیع جریان استفاده نمودند.

حداد[2] و همکارانش به شکل عددی تولید آنتروپی را با توجه به جابه‌جایی اجباری خطی پیوسته عبور سیال از طریق میکروکانال انجام دادند [۸۷]. چوان[3] مشخصه‌های جریان سیال و انتقال حرارت را برای هیت سینک میکروکانال بر پایه موضوع طراحی پره‌های متخلخل بررسی کردند [۸۸]. انچاویو جوشی[4] و یوگندرا[5] جابجایی آزاد به همراه تشعشع و هدایت حرارتی از هیت‌سینک میله‌ای در حالت افقی و عمودی بررسی نمودند. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده به این نتیجه رسیدند که جهت قرار گرفتن پره بین ۱۵ تا ۲۰ ٪ بر انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد. تشعشع حرارتی نیز به‌عنوان پارامتر مهمی ۲۵ تا۴۰ ٪ بر انتقال حرارت تأثیرگذار است [۸۹].



شکل ۲۱ بررسی جریان و درجه حرارت هیت سینک در حالت افقی در یک محفظه‌ی بسته گرم شده[۸۹]



شکل ۲۲ بررسی جریان و درجه حرارت هیت سینک در حالت عمودی در یک محفظه‌ی بسته گرم شد[۸۹]

۵- مراجع

[1] Singh, R., A. Akbarzadeh, and M. Mochizuki, *Sintered porous heat sink for cooling of high-powered microprocessors for server applications.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(9): p. 2289-2299.

[2] Duffin, R., *A variational problem relating to cooling fins.* J. Math. Mech, 1959. **8**(1): p. 47.

[3] Poulikakos, D. and A. Bejan, *Fin geometry for minimum entropy generation in forced convection.* Journal of Heat Transfer, 1982. **104**: p. 616.

[4] Bejan, A., *Heat Transfer John Wiley & Sons.* New York, 1993.

[5]Aziz, A. and T. Fang, *Alternative solutions for longitudinal fins of rectangular, trapezoidal, and concave parabolic profiles.* Energy conversion and Management, 2010. **51**(11): p. 2188-2194.

[6] Braga, S. and F. Saboya, *Turbulent heat transfer and pressure drop in an internally finned equilateral triangular duct.* Experimental thermal and fluid science, 1996. **12**(1): p. 57-64.

[7] Braga, C. and F. Saboya, *Turbulent heat transfer, pressure drop and fin efficiency in annular regions with continuous longitudinal rectangular fins.* Experimental thermal and fluid science, 1999. **20**(2): p. 55-65.

[8] Huang, P. and K. Vafai, *Passive alteration and control of convective heat transfer utilizing alternate porous cavity-block wafers.* International journal of heat and fluid flow, 1994. **15**(1): p. 48-61.

[9] Alkam, M. and M. Al-Nimr, *Improving the performance of double-pipe heat exchangers by using porous substrates.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999. **42**(19): p. 3609-3618.

[10] Kim, S.Y., J.H. Kim, and B.H. Kang, *Effect of porous fin in a plate-fin heat exchanger.* ASME HEAT TRANSFER DIV PUBL HTD, 1998. **361**: p. 477-482.

[11] Kiwan, S. and M. Al-Nimr, *Using porous fins for heat transfer enhancement.* Journal of Heat Transfer, 2001. **123**(4): p. 790-795.

[12] Kiwan, S., *Effect of radiative losses on the heat transfer from porous fins.* International Journal of Thermal Sciences, 2007. **46**(10): p. 1046-1055.

[13] Abu-Hijleh, B.A., *Enhanced forced convection heal transfer from a cylinder using permeable fins* .Journal of heat transfer, 2003. **125**(5): p. 804-811.

[14] Kiwan, S. and O. Zeitoun, *Natural convection in a horizontal cylindrical annulus using porous fins.* International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2008. **18**(5): p. 618-634.

[15] Saedodin, S. and S. Sadeghi, *Temperature distribution in long porous fins in natural convection condition.* Middle-East J Sci Res, 2013. **13**(6): p. 812-817.

[16] Turkyilmazoglu, M., *Exact solutions to heat transfer in straight fins of varying exponential shape having temperature dependent properties.* International Journal of Thermal Sciences, 2012. **55**: p. 69-75.

[17] Aziz, A. and A.B. Beers-Green, *Performance and optimum design of convective–radiative rectangular fin with convective base heating, wall conduction resistance, and contact resistance between the wall and the fin base.* Energy Conversion and Management, 2009. **50**(10): p. 2622-2631.

[18] Khani, F. and A. Aziz, *Thermal analysis of a longitudinal trapezoidal fin with temperature-dependent thermal conductivity and heat transfer coefficient.* Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010. **15**(3): p. 590-601.

[19] Malekzadeh, P. and H. Rahideh, *Two-dimensional nonlinear transient heat transfer analysis of variable section pin fins.* Energy Conversion and Management, 2009. **50**(4): p. 916-922.

[20] Hatami, M., A. Hasanpour, and D. Ganji, *Heat transfer study through porous fins (Si 3 N 4 and AL) with temperature-dependent heat generation.* Energy Conversion and Management, 2013. **74**: p. 9-16.

[21] Torabi, M. and Q. bao Zhang, *Analytical solution for evaluating the thermal performance and efficiency of convective–radiative straight fins with various profiles and considering all non-linearities.* Energy Conversion and Management, 2013. **66**: p. 199-210.

[22] Kundu, B., D. Bhanja, and K.-S. Lee, *A model on the basis of analytics for computing maximum heat transfer in porous fins.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012. **55**(25): p. 7611-7622.

[23] Kiwan, S., *Thermal analysis of natural convection porous fins.* Transport in porous media, 2007. **67**(1): p. 17-29.

[24] Gorla, R.S.R. and A. Bakier, *Thermal analysis of natural convection and radiation in porous fins.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011. **38**(5): p. 638-645.

[25] Domairry, G. and M. Fazeli, *Homotopy analysis method to determine the fin efficiency of convective straight fins with temperature-dependent*

[1] Delsman
[2] Haddad
[3] Chuan
[4] Enchao Joshi
[5] Yogendra

[48] Bejan, A., *Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture.* International journal of energy research, 2002. **26**(7): p. 0-43.

[49] Culham, J.R. and Y.S. Muzychka, *Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization.* IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001. **24**(2): p. 159-165.

[50] Khan, W.A. and M.M. Yovanovich, *Effect of Bypass on Overall Performance of Pin-Fin Heat Sinks.* Journal of thermophysics and heat transfer, 2007. **21**(3): p. 562-567.

[51] Khan, W.A., M. Yovanovich, and J. Culham, *Optimization of microchannel heat sinks using entropy generation minimization method.* IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006. **32**(2): p. 78-86.

[52] Khan, W.A., R.J. Culham, and M.M. Yovanovich, *Optimal design of tube banks in crossflow using entropy generation minimization method.* Journal of thermophysics and heat transfer, 2007. **21**(2): p. 372-378.

[53] Khan, W.A., J.R. Culham, and M.M. Yovanovich, *Optimization of pin-fin heat sinks using entropy generation minimization.* IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005. **28**(2 :(p. 247-254.

[54] Khan, W.A., M. Yovanovich, and J. Culham. *Optimization of microchannel heat sinks using entropy generation minimization method*. in *Twenty-Second Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement And Management Symposium*. 2006. IEEE.

[55] Kern, D. and A. Kraus, *Extended Surface Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1972*.

[56] Sonn, A. and A. Bar-Cohen, *Optimum cylindrical pin fin.* Journal of Heat Transfer, 1981. **103**(4): p. 814-815.

[57] Iyengar, M. and A. Bar-Cohen. *Least-material optimization of vertical pin-fin, plate-fin, and triangular-fin heat sinks in natural convective heat transfer*. in *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 1998. ITHERM'98. The Sixth Intersociety Conference on*. 1998. IEEE.

[58] Iyengar, M. and A. Bar-Cohen, *Least-energy optimization of forced convection plate-fin heat sinks.* IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003. **26**(1): p. 62-70.

[59] Bar-Cohen, A. and M. Jelinek, *Optimum arrays of longitudinal, rectangular fins in corrective heat transfer.* Heat Transfer Engineering, 1985. **6**(3): p. 68-78.

[60] Khan, W.A., J. Culham, and M. Yovanovich, *Optimization of pin-fin heat sinks in bypass flow using entropy generation minimization method.* Journal of electronic packaging, 2008. **130**: p.031010.

[61] Liu, D. and S.V. Garimella, *Analysis and optimization of the thermal performance of microchannel heat sinks.* International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2005. **15**(1): p. 7-26.

[62] Qu, W. and I. Mudawar, *Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002. **45**(12): p. 2549-2565.

[63] Wang, X.-D., et al., *Inverse geometric optimization for geometry of nanofluid-cooled microchannel heat sink.* Applied Thermal Engineering, 2013. **55**(1): p. 87-94.

[64] Wang, X.-D., B. An, and J.-L. Xu, *Optimal geometric structure for nanofluid-cooled microchannel heat sink under various constraint conditions.* Energy Conversion and Management, 2013. **65**: p. 528-538.

[65] Wang, Z.-H., et al., *Multi-parameters optimization for microchannel heat sink using inverse problem method.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011. **54**(13): p. 2811-2819.

[66] Leng, C., et al., *Optimization of thermal resistance and bottom wall temperature uniformity for double-layered microchannel heat sink.* Energy Conversion and Management, 2015. **93**: p. 141-150.

[67] Leng, C., et al., *Multi-parameter optimization of flow and heat transfer for a novel double-layered microchannel heat sink.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015. **84**: p. 359-369.

[68] Lage, J., et al., *Numerical study of a low permeability microporous heat sink for cooling phased-array radar systems.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996. **39**(17): p. 3633-3647.

[69] Ould-Amer, Y., et al., *Forced convection cooling enhancement by use of porous materials.* International Journal of Heat and Fluid Flow, 1998. **19**(3): p. 251-258.

thermal conductivity. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009. **14**(2): p. 489-499.

[26] Ganji, D.D., Z.Z. Ganji, and H.D. Ganji, *Determination of temperature distribution for annular fins with temperature dependent thermal conductivity by HPM.* Thermal Science, 2011. **15**(5): p. 111.

[27] Joneidi, A., D. Ganji, and M. Babaelahi, *Differential transformation method to determine fin efficiency of convective straight fins with temperature dependent thermal conductivity.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009. **36**(7): p. 757-762.

[28] Hatami, M. and D. Ganji, *Thermal performance of circular convective–radiative porous fins with different section shapes and materials.* Energy Conversion and Management, 2013. **76**: p. 185-193.

[29] Kim, S., J. Paek, and B. Kang, *Flow and heat transfer correlations for porous fin in a plate-fin heat exchanger.* Journal of heat transfer, 2000. **122**(3): p. 572-578.

[30] Chen, T., B. Armaly, and M. ALI, *Natural convection-radiation interaction in boundary-layer flow overhorizontal surfaces.* AIAA journal, 1984. **22**(12): p. 1797-1803.

[31] Hossain, M. and H. Takhar, *Radiation effect on mixed convection along a vertical plate with uniform surface temperature.* Heat and mass transfer, 1996. **31**(4): p. 243-248.

[32] Hossain, M. and M. Alim, *Natural convection-radiation interaction on boundary layer flow along a thin vertical cylinder.* Heat and Mass Transfer, 1997. **32**(6): p. 515-520.

[33] Badruddin, I.A., et al., *Heat transfer by radiation and natural convection through a vertical annulus embedded in porous medium.* International communications in heat and mass transfer, 2006.(4)33 :p. 500-507.

[34] Hossain, M.A. and I. Pop, *Radiation effects on free convection over a vertical flat plate embedded in a porous medium with high porosity.* International journal of thermal sciences, 2001. **40**(3): p. 289-295.

[35] Kundu, B. and D. Bhanja, *An analytical prediction for performance and optimum design analysis of porous fins.* International Journal of Refrigeration, 2011. **34**(1): p. 337-352.

[36] SHOKOUHMAND, H. and A. EJLALI, *ANALYSIS OF HEAT TRANSFER IN AN ARRAY OF TWO DIMENSIONAL POROUS FINS.* 2005.

[37] Ma, J., et al., *Spectral collocation method for radiative–conductive porous fin with temperature dependent properties.* Energy Conversion and Management, 2016. **111**: p. 279-288.

[38] Vahabzadeh, A., D. Ganji, and M. Abbasi, *Analytical investigation of porous pin fins with variable section in fully-wet conditions.* Case Studies in Thermal Engineering, 2015. **5**: p. 1-12.

[39] Kundu, B. and K.-S. Lee, *A proper analytical analysis of annular step porous fins for determining maximum heat transfer.* Energy Conversion and Management, 2016. **110**: p. 469-480.

[40] Yu, X., et al., *Development of a plate-pin fin heat sink and its performance comparisons with a plate fin heat sink.* Applied thermal engineering, 2005. **25**(2): p. 173-182.

[41] Jones, C.D. and L.F. Smith, *Optimum arrangement of rectangular fins on horizontal surfaces for free-convection heat transfer.* Journal of heat transfer, 1970. **92**(1): p. 6-10.

[42] Zilio, C., et al. *Aluminum foams as possible extended surfaces for air cooled condenser*. in *International Congress of Refrigeration. Prague*. 2011.

[43] Yang, Y.-T. and H.-S. Peng, *Numerical study of pin-fin heat sink with un-uniform fin height design.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008. **51**(19): p. 4788-4796.

[44] Bejan, A., *Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes.* Journal of Applied Physics, 1996. **79**(3): p. 1191-1218.

[45] Bejan, A., *Thermodynamic optimization of geometry in engineering flow systems.* Exergy, an International Journal, 2001. **1**(4): p. 269-277.

[46] Bejan, A., *General criterion for rating heat-exchanger performance.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978. **21**(5): p. 655-658.

[47] Bejan, A., *Entropy generation minimization: the method of thermodynamic optimization of finite-time systems and finite-time processes.* New York: CRC Press, 1996. **51**: p. 169-180.

[70] Cui, C., X. Huang, and C. Liu, *Forced convection in a porous channel with discrete heat sources.* Journal of heat transfer, 2001. **123**(2): p. 404-407.

[71] Yang, Y.-T. and C.-Z. Hwang, *Calculation of turbulent flow and heat transfer in a porous-baffled channel.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003. **46**(5): p. 771-780.

[72] Jiang, P.-X., et al., *Boundary conditions and wall effect for forced convection heat transfer in sintered porous plate channels.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. **47**(10): p. 2073-2083.

[73] Hetsroni, G., M. Gurevich, and R. Rozenblit, *Sintered porous medium heat sink for cooling of high-power mini-devices.* International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006. **27**(2): p. 259-266.

[74] Jeng, T.-M., S.-C. Tzeng, and Y.-H. Hung, *An analytical study of local thermal equilibrium in porous heat sinks using fin theory.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**(11–12): p. 1907-1914.

[75] Venugopal, G., C. Balaji, and S. Venkateshan, *Experimental study of mixed convection heat transfer in a vertical duct filled with metallic porous structures.* International Journal of Thermal Sciences, 2010. **49**(2): p. 340-348.

[76] Aguilar-Madera, C.G., et al., *Convective heat transfer in a channel partially filled with a porous medium.* International Journal of Thermal Sciences, 2011. **50**(8): p. 1355-1368.

[77] Wan, Z., et al., *Flow and heat transfer in porous micro heat sink for thermal management of high power LEDs.* Microelectronics Journal, 2011. **42**(5): p. 632-637.

[78] Wang, W., et al., *Numerical study on hydrodynamic characteristics of plate-fin heat exchanger using porous media approach.* Computers & Chemical Engineering, 2014. **61**: p. 30-37.

[79] Hung, T.-C., Y.-X. Huang, and W.-M. Yan, *Thermal performance analysis of porous-microchannel heat sinks with different configuration designs.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013. **66**: p. 235-243.

[80] Hung, T.-C., Y.-X. Huang, and W.-M. Yan, *Thermal performance of porous microchannel heat sink: Effects of enlarging channel outlet.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013. **48**: p. 86-92.

[81] Hung, T.-C. and W.-M. Yan, *Thermal performance enhancement of microchannel heat sinks with sintered porous media.* Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2013. **63**(9): p. 666-686.

[82] Tuckerman, D.B. and R. Pease, *High-performance heat sinking for VLSI.* IEEE Electron device letters, 1981. **2**(5): p. 126-129.

[83] Kleiner, M.B., S. Kuhn, and K. Haberger, *High performance forced air cooling scheme employing microchannel heat exchangers.* IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 1995. **18**(4): p. 795-804.

[84] Aranyosi, A., L. Bolle, and H. Buyse. *Compact air-cooled heat sinks for power packages*. in *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 199 .٧SEMI-THERM XIII., Thirteenth Annual IEEE*. 1997. IEEE.

[85] Harris, C., M. Despa, and K. Kelly, *Design and fabrication of a cross flow micro heat exchanger.* Journal of Microelectromechanical Systems, 2000. **9**(4): p. 502-508.

[86] Delsman, E., et al., *Microchannel plate geometry optimization for even flow distribution at high flow rates.* Chemical Engineering Research and Design, 2004. **82**(2): p. 267-273.

[87] Haddad, O., M. Abuzaid, and M. Al-Nimr, *Entropy generation due to laminar incompressible forced convection flow through parallel-plates microchannel.* Entropy, 2004. **6**(5): p. 413-426.

[88] Chuan, L., et al., *Fluid flow and heat transfer in microchannel heat sink based on porous fin design concept.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016 ;p.65.5. 52-57.

[89] Yu, E. and Y. Joshi, *Heat transfer enhancement from enclosed discrete components using pin–fin heat sinks.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002. **45**(25): p. 4957-4966.