نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۱، بهار ۱۴۰۴، صفحه ۵۰-۶۴

مروری بر فناوری لوله های حرارتی: چالش ها، نوآوری ها و کاربردهای صنعتی

آتیه میرزایی و مانلی خوانچه زرین
دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، واحد علوم و فناوری پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی ،تهران، ایران.
محسن پیرمحمدی
دانشیار مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، واحد علوم و فناوری پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران،ایران (نویسنده مسئول)
mo.pirmohammadi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۱۱/۰۴

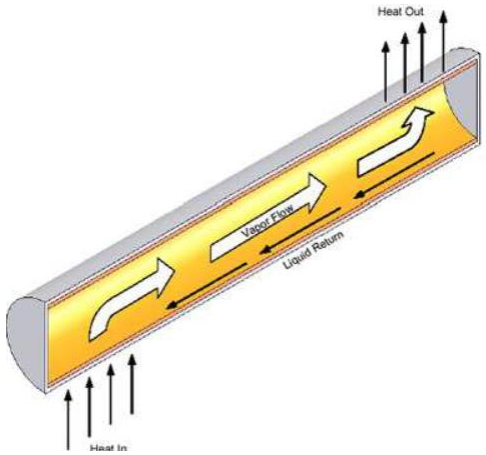
کلمات کلیدی:
لوله‌های حرارتی ، انتقال حرارت، سیال کاری ، ساختار فتیله، کاربردهای صنعتی

لوله‌های حرارتی به‌عنوان یکی از فناوری‌های کارآمد انتقال حرارت، به دلیل بازده و راندمان بالا، افت فشار اندک و توانایی عملکرد در شرایط متنوع، جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف یافته‌اند. در این پژوهش، ساختار، اجزا و عوامل مؤثر بر عملکرد لوله‌های حرارتی از جمله انتخاب سیال کاری و محدوده‌های دمایی و طراحی فتیله بررسی شده است. همچنین انواع پیشرفته شامل لوله‌های حلقوی، تخت و میکرو معرفی و مزایا و چالش های هر کدام تحلیل گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب صحیح سیال کاری، بهینه سازی ساختار داخلی و توسعه مواد با رسانایی بالا نقش مهمی در افزایش پایداری و کارایی این فناوری دارند. این یافته‌ها می‌توانند مبنای تحقیقات آینده و گسترش کاربرد لوله‌های حرارتی در صنایع مختلف قرار گیرند. در پایان، مسیرهای آینده این فناوری شامل طراحی‌های نوین، معرفی سیالات کاری سازگار با محیط زیست و بهینه‌سازی طراحی جهت گسترش کاربرد در شرایط عملیاتی خاص و در صنایع نوظهور پیشنهاد می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۱. مقدمه

مدیریت حرارتی همواره از چالش‌های اصلی در سیستم‌های صنعتی و الکترونیکی بوده است. لوله‌های حرارتی به‌عنوان راهکاری نوآورانه، انتقال انرژی را با استفاده از چرخه تبخیر و میعان یک سیال کاری و بازگشت آن از طریق نیروهای مویینگی انجام می‌دهند. این سازوکار موجب انتقال حرارت با بازده بالا و حداقل افت فشار در فواصل طولانی می‌شود .ساختار لوله حرارتی متشکل از تبخیر کننده[۱] برای جذب گرما، ناحیه بی دررو یا بی‌دمایی[۲] برای انتقال بخار و چگالنده[۳] برای دفع حرارت است. طراحی مناسب فتیله و انتخاب سیال کاری متناسب با دامنه دمایی، اساس عملکرد پایدار این تجهیزات محسوب می‌شود. توسعه‌های اخیر مانند لوله‌های حلقوی، تخت و میکرو نشان‌دهنده ظرفیت بالای این فناوری در پاسخگویی به نیازهای صنایع مختلف از جمله الکترونیک، هوافضا، انرژی‌های تجدیدپذیر و تهویه مطبوع است. هدف این مقاله مرور پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده لوله‌های حرارتی و بررسی نقش آن‌ها در بهبود بهره‌وری انرژی و توسعه صنعتی است. یک لوله حرارتی به صورت طرحواره[۴] در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: شمای کلی یک لوله حرارتی شامل تبخیر کننده (بخش جذب گرما)، بی درو (قسمت انتقال بخار) و چگالنده (بخش دفع گرما) (اندرسون و همکاران[۵]، ۱۳۹۸)

۲. اثر دما برلوله‌های حرارتی و بررسی عملکرد آن‌ها

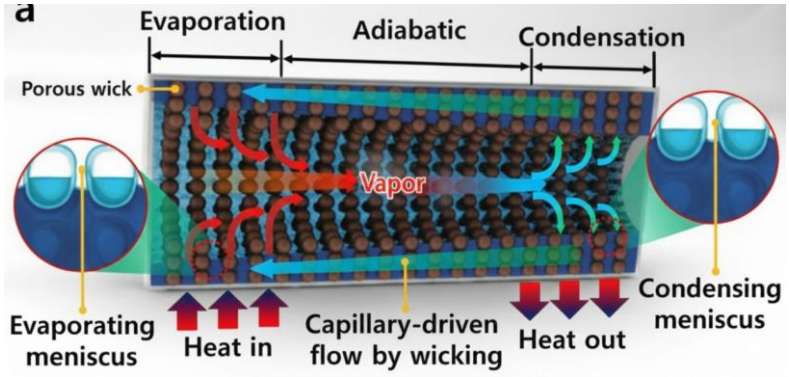
۱,۲ عملکرد لوله های حرارتی در دما بالا

لوله حرارتی معمولی در انتقال سیال و حرارت آن در فواصل طولانی دارای چالش ها و مشکلاتی از جمله افت فشار، محدودیت‌های ساختاری فتیله و کاهش عملکرد مواجه هستند که هر کدام به اندازه ای عملکرد دستگاه را محدود می‌کنند. همچنین دمای سیال کاری یکی از کمیت[۶] هایی است که نقش مهمی در عملکرد و کارکرد آن ها دارد و توسعه انواع آن در یک محدوده‌ی دمایی خاص و مشخص به دلیل کمبود سیالاتی که قادر به عملکرد در آن باشند، یکی از چالش های اصلی به شمار می رود. بر اساس مطالعه درباره دمای عملکرد لوله‌های حرارتی در یک کنفرانس بین‌المللی ارائه شده (پرافول و همکاران[۷]، ۱۳۹۹) در مورد دمای سیال کاری لوله‌های حرارتی نشان داده شده است که برای یک ورودی

[۱] Evaporator
[۲] Adiabatic Section
[۳] Condenser
[۴] Schematic
[۵] William G. Anderson.et al.
[۶] Quantity
[۷] Praful, S. et al.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

حرارتی مشخص، دمای حداقلی وجود دارد که سیستم لوله حرارتی باید در آن کار کند. این پدیده به دلیل وابستگی دما به خواص ترموفیزیکی سیال کاری در لوله‌های حرارتی است. بنابراین، لوله‌های حرارتی در یک سیستم مدیریت حرارتی با توجه به دامنه‌های دمایی دقیق باید به صورت دقیقی طراحی شوند. در تحقیقات انجام شده (گروور و همکاران[۸]، ۱۴۰۳) بر روی لوله های حرارتی با دماهای بسیار بالا (بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) علاوه بر نیاز طراحی خاص، انتخاب سیال کاری مناسب مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن نشان می دهد لوله‌های حرارتی در بازه دمایی ۶۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، با سیالات کاری سدیم و لیتیم عملکرد مناسبی دارند و برای علت آن میتوان به دمای جوش بالا و رسانایی حرارتی مناسب هر دو در شرایط خلا اشاره کرد. کاربرد لوله‌های حرارتی در این محدوده دمایی، بیشتر در زمینه کاربردهای فضایی یا توربین‌های حرارتی است. در یک مطالعه‌ی تجربی و عددی(ژانگ و همکاران [۹]۱۴۰۴)، عملکرد سه نوع ساختار فتیله‌ای[۱۰] متخلخل[۱۱] و شیاردار[۱۲] و توری[۱۳] که در شکل (۲) نیز نمایش داده شده‌اند در محدوده‌ی دمایی ۵۰ تا ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که در دماهای بالا (بالاتر از ۵۰۰°C)، تنها ساختارهای فتیله‌ای از نوع متخلخل قادر بودند عملکرد حرارتی خود را حفظ کنند. این ساختارها مقاومت حرارتی[۱۴] کمتری داشتند و پایداری حرارتی بسیار بالایی از خود نشان دادند. این نتایج نشان می دهد که انتخاب نوع فتیله باید با توجه به دمای کاری سیستم انجام شود؛ ساختارهای متخلخل برای کاربردهای با دمای بالا(معمولاً بالاتر از ۵۰۰°C)، مانند انرژی خورشیدی، توربین‌ها یا فرآیندهای صنعتی بهترین گزینه محسوب می‌شوند به دلیل تخلخل پایدار و مقاومت ساختاری بالا مقاومت بیشتر در برابر تخریب حرارتی دارند و در مورد سیالات کاری سازگاردر محدوده دمایی بالا میتوان به سدیم[۱۵] (بازه دمایی حدود ۴۰۰ °C –۱۰۰۰)، پتاسیم[۱۶](بازه دمایی حدود ۳۰۰–۹۰۰°C) و آلیاژ یوتکتیک سدیم-پتاسیم[۱۷] (بازه دمایی حدود ۲۰۰–۸۰۰°C) اشاره کرد.



شکل ۲ : ساختارهای متخلخل (شیمانسکی و و همکاران[۱۸]، ۱۴۰۱)

۲،۲ عملکرد و کاربرد لوله های حرارتی در دما متوسط

[۸] Grover, G. M. et al.
[۹] Zhang, Y. et al.
[۱۰] Wick Structure
[۱۱] Sintered
[۱۲] Grooved
[۱۳] Mesh
[۱۴] Thermal Resistance
[۱۵] Na
[۱۶] K
[۱۷] Na-K eutectic alloy
[۱۸] P. Szymanski.et al.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

محدوده دمایی دیگر که میتوان طبق تحقیقات و آزمایشات (وِرنِر و همکاران[۱۹]، ۱۴۰۲) مورد بررسی قرار داد به عنوان "محدوده‌ی دمایی متوسط" شناخته می‌شود که به طور تقریبی بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد قرار دارد. در این گستره‌ی دمایی، انتخاب سیالات کاری قابل استفاده محدود است. سیالاتی نظیر جیوه با مشکلاتی از جمله ترشوندگی فتیله، سازگاری با فلزات دیواره، سمیت، احتراق بخار، هزینه‌های توسعه‌ی بالا همراه است و چگالی بالایی دارد .درآزمایش‌های انجام شده گزارش شده است که جیوه نیازمند زمان پیش‌گرم کردن تا ۳۰ ساعت برای عملکرد موفق است. سایر فلزات مایع مانند پتاسیم و سزیم نتایج خوبی را از خود نشان داده اند به طوری که سزیم برای دمای کارکرد پایین تا ۳۲۷ درجه سانتیگراد مناسب است، اما به دلیل حساسیت بالا به رطوبت درجابجایی و مشکل سازگاری خطر انفجار را به دلیل تولید هیدروژن به همراه دارد. جابجایی آن‌ها اغلب نیازمند تجهیزات و آموزش‌های تخصصی است و تنها می‌توان آن را در جوهای خنثی انجام داد. خود این سیالات نیز گران‌قیمت هستند و نیازهای آن‌ها در جابجایی هزینه‌های تولید را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و احتمال استفاده گسترده آن‌ها در بازار مدیریت حرارتی را کاهش می‌دهد اما با توسعه و پیشرفت بیشتر عمدتاً در بازار هسته‌ای استفاده می شود. سیالات دیگر مانند مخلوط فلز مایع سدیم/پتاسیم [۲۰]نیز در محدوده دمایی متوسط مورد آزمایش قرار گرفت و به دلیل پدیده "جوشش جهشی" در دماهای زیر ۸۰۰ درجه سانتیگراد کارکرد نامناسبی دارد و در حال حاضر می توان لوله های حرارتی در این محدوده دمایی متوسط را در صنایع تولید برق، بازیابی حرارت اتلافی، نیروگاه خورشیدی، هسته ای و هوافضا پرکاربرد دانست.

۳,۲ عملکرد و کاربرد لوله های حرارتی در دما پایین

در تحقیقات لی و همکاران([۲۱]۱۴۰۲) لوله های حرارتی در بازه های دمایی پایین عمداتا در صنایع سبک کاربرد دارند وسیالاتی مانند آب، اتانول، متانول و آمونیاک از گزینه های مناسب سیال کاری با فشار بخار مناسب هستند. طبق این تحقیقات برعملکرد لوله‌های حرارتی با سیالات کاری آب و متانول در بازه‌ی دمایی ۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نتایج نشان می دهد که آب در بازه‌ی دمایی بالاتر از C°۱۰۰ عملکرد حرارتی بالاتری نسبت به متانول دارد، اما در دماهای پایین‌تر، متانول به دلیل فشار بخار بالاتر، نرخ تبخیر مؤثرتری دارد. همچنین، هر دو آن ها عملکرد پایداری مناسبی در سیکل‌های حرارتی تکرارشونده دارند که نشان‌دهنده‌ی قابلیت اطمینان بالا در کاربردهای طولانی مدت است. دربخش آزمایشات و نتایج (پرافول و همکاران، [۲۲]۱۳۹۹)، دماهای اندازه‌گیری شده برای لوله‌های حرارتی مسی با سیال کاری متانول و اتانول که با مس سازگاری دارند، به حدود (۱۲۰ ۰C-۱۱۰) می‌رسد. این بازه‌ی دمایی برای بسیاری از کاربردها بالا محسوب می‌شود. از جمله این کاربردها می‌توان به خنک‌سازی قطعات الکترونیکی پُرقدرت مانند پردازنده‌ها[۲۳]، سیستم‌های روشنایی LED و تجهیزات صنعتی اشاره کرد. استفاده از لوله‌های حرارتی در این زمینه‌ها نقش مؤثری در جلوگیری از خرابی سیستم و افزایش راندمان آن‌ها دارد. همانطور که تحقیقات همانطور که تحقیقات (پرافول و همکاران، ۱۳۹۹؛ گروور و همکاران[۲۴]، ۱۴۰۳؛ لی و همکاران، ۱۴۰۲؛ وِرنِر و همکاران، ۱۴۰۲؛ ژانگ و همکاران[۲۵]، ۱۴۰۴) نشان می دهند کارکرد و توسعه لوله های حرارتی در بازه های دمایی مختلف به کمیت های مهمی از جمله جنس، نوع ساختار، انواع فیتیله و سیالات کاری آن وابسته است.

۳. توسعه انواع لوله های حرارتی و بررسی عملکرد آن ها

توسعه لوله های حرارتی و پیشرفت در طراحی انواع مختلف آن به نحوی هر یکی از چالش ها پیش رو را برطرف کرد و عملکرد آن را ارتقا بخشید. براساس مطالعات جعفری و همکاران [۲۶](۱۴۰۲) لوله‌های حرارتی مرسوم [۲۷] به‌عنوان ابزاری با هدایت حرارتی بسیار بالا، در مدیریت حرارتی سیستم‌های الکترونیکی و صنعتی به‌کار گرفته می شود. ساختار اصلی این لوله‌ها همانطور که پیش تر اشاره شد شامل یک پوشش مهر

[۱۹] Werner, T. C. et al.
[۲۰] Na/K
[۲۱] Li, Y. et al.
[۲۲] Praful, S. et al.
[۲۳] (CPU/GPU
[۲۴] Grover, G. M. et al.
[۲۵] Zhang, Y. et al.
[۲۶] Jafari.et al.
[۲۷] Conventional heat pipe(CHP)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

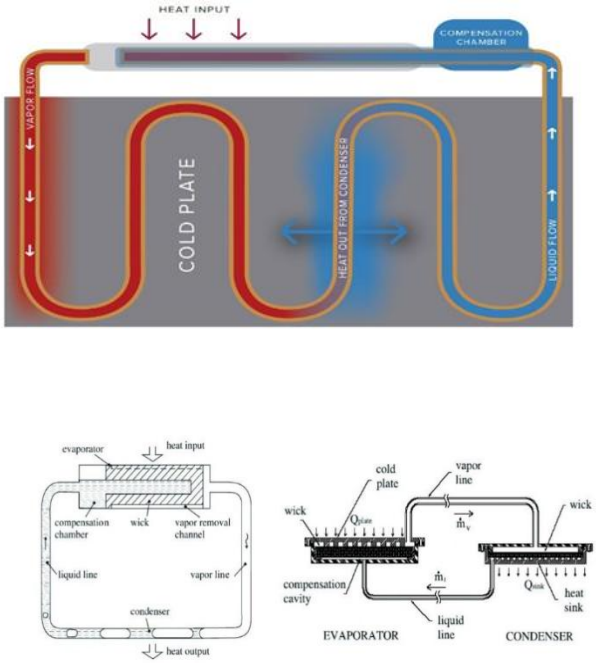
و موم شده، سیال کاری و ساختار فتیله است. عملکرد آن‌ها بر پایه چرخه تبخیر سیال در بخش جذب گرما و حرکت بخار به سمت قسمت دفع گرما و بازگشت مجدد مایع به اواپراتور از طریق نیروی مویینگی فتیله است. با وجود راندمان بالا، لوله‌های حرارتی مرسوم با دو محدودیت اساسی مواجه هستند، حد مویینگی[۲۸] که حداکثر توان انتقال حرارت را محدود می‌کند و عملکرد در برابر نیروی جاذبه؛ هرچند فتیله می‌تواند مایع را خلاف جهت جاذبه بازگرداند، اما افزایش ارتفاع تبخیر کننده نسبت به چگالنده ، به شدت توان انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. این محدودیت‌ها، نیاز به فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند لوله‌های حرارتی حلقوی (LHP)[۲۹] و پمپ شده مویینگی (CPL) را که بر اساس بررسی وانگ و همکاران[۳۰] (۱۳۹۹) و کلیوس [۳۱](۱۴۰۲) انجام پذیرفته است برای انتقال حجم بالای گرما در مسافت‌های طولانی و مستقل از جهت‌گیری طراحی شده‌اند، برجسته ساخت.

۱,۳ لوله های حرارتی حلقوی و پمپ شده مویینگی

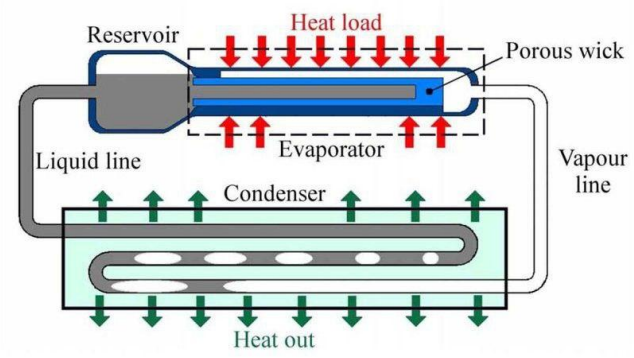
طبق تحقیقات ریفت و همکاران [۳۲] میتوان به لوله های حرارتی حلقوی [۳۳]و حلقه های پمپ شده مویینگی[۳۴] اشاره کرد. بر اساس این تحقیقات ساختار این لوله‌ها شامل اجزایی چون تبخیرکننده، چگالنده، خطوط انتقال و مخزن ذخیره سیال کاری است که درشکل (۳) نمایش داده شده است. مایع کاری را از سطح اصلی تبخیر کننده، تبخیر می‌کند و فشار بخار بالا در تبخیر کننده مایع را از طریق لوله‌های بخار به چگالنده هدایت می‌کند. سپس مایع به محفظه جبران[۳۵] منتقل می‌شود، که به صورت هیدرولیکی تبخیر کننده متصل است و چرخه ی این مدار را کامل می‌کند(ACT[۳۶]، ۱۴۰۲).با این حال، لوله‌های حرارتی حلقوی در تنظیم دمای سیستم با دشواری‌هایی مواجه بوده و حلقه های پمپ شده مویینگی نیز در راه‌اندازی و تحمل فشار در ناحیه پمپ محدودیت دارد. به منظور رفع محدودیت های ذکر شده لوله حرارتی حلقوی پیشرفته[۳۷] توسط هوانگ[۳۸](۱۳۸۳) اختراع و ثبت شده اند. لوله حرارتی حلقوی پیشرفته عملکرد بهتری نسبت به لوله های حرارتی حلقوی متعارف دارند و میتوانند حرارت هدر رفته در مسیر طولانی را در خود حمل کرده و به سینک حرارتی منتقل کنند که به صورت دو فازی است و سیال کاری را از طریق مویینگی[۳۹] به چگالنده منتقل می کند که در شکل (۴) قابل مشاهده است (سیریشا و همکاران[۴۰]، ۱۴۰۱) ، لوله های حرارتی حلقوی پیشرفته در شرایطی که لوله‌های حرارتی حلقوی و حلقه های پمپ شده مویینگی دچار محدودیت و چالش بودند نیز کار می‌کند و ترکیبی از عملکرد های بهینه هر یک را ارائه می دهد. یک پمپ کمکی در لوله حرارتی حلقوی پیشرفته تجمع بخار در مخزن لوله ها را کاهش داده و مانع از توقف کار در آن می شود. همچنین تمرکز بر کوچک‌سازی قطر لوله‌ها و بهینه‌سازی تبخیرکننده، بهبود عملکرد حرارتی را به همراه داشته است.

[۲۸] Capillary Limit
[۲۹] Loop Heat Pipes(LHP)
[۳۰] Wang, Y.et al.
[۳۱] Calyos
[۳۲] Riffat, S. et al.
[۳۳] Loop Heat Pipe (LHP)
[۳۴] Capillary Pumped Loop (CPL)
[۳۵] Compensation Chamber
[۳۶] Advanced Cooling Technologies
[۳۷] Advanced Loop Heat Pipe (ALHP)
[۳۸] Hoang, T. T.
[۳۹] Capillary Action
[۴۰] Sireesha, V. et al.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل ۳: ساختار و عملکرد اساسی یک لوله های حرارتی حلقوی (LHP) (موتت[۴۱]، ۱۳۹۳)



شکل ۴: نمایش لوله حرارتی حلقوی پیشرفته (ALHP) (مایدانیک[۴۲]،۱۳۸۳)

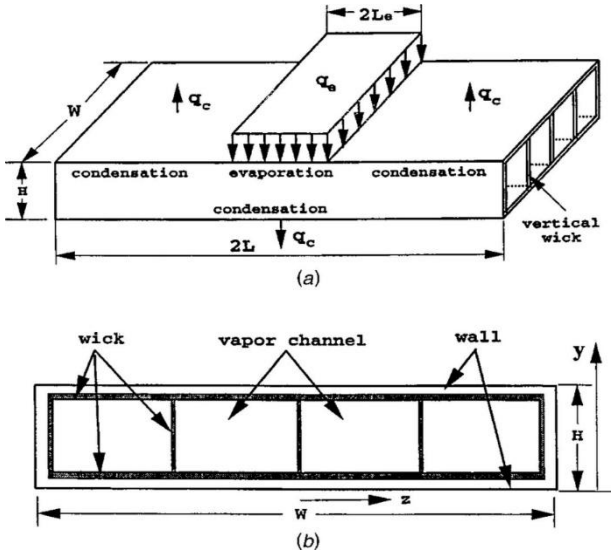
لوله های حرارتی حلقوی [۴۳] نسبت به لوله‌های حرارتی متعارف تفاوت‌های کلیدی دارند که عملکرد آن‌ها را بهبود می‌بخشد. در لوله‌های معمولی، حرکت سیال عامل به صورت مویینگی و از طریق ساختار فتیله‌ای صورت می‌گیرد، اما در لوله‌های حرارتی حلقوی مسیرهای جداگانه‌ای برای فرآیند تبخیر[۴۴] و تقطیر[۴۵] تعریف شده است. این جدایی مسیرها و عملکرد کنترل پیشرفته فشار و دما، امکان انتقال حرارت بالاتر و کنترل دقیق‌تر سیال را فراهم می‌کند.

[۴۱] Mottet, L.
[۴۲] Y. F. Maydanik
[۴۳] LHP
[۴۴] Evaporation
[۴۵] Condensation

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۲،۳ بررسی لوله‌های حرارتی تخت و میکرو

طبق تحقیقات ریفت و همکاران ، لوله‌های حرارتی تخت[۴۶] به‌دلیل طراحی مسطح و ضخامت کم، نصب آسان و تماس بهتر با سطوح صاف، در خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی با فضای محدود مانند رایانه‌ها و تلفن‌های همراه کاربرد گسترده‌ای دارند. این لوله‌ها از فلزات مختلف و ورق‌های نازک ساخته می‌شوند و انتقال حرارت مؤثر و عملکرد حرارتی بالایی ارائه می‌دهند. چالش اصلی آن‌ها بهینه‌سازی ساختار فتیله‌ای است، که برای افزایش کارایی و کاهش مقاومت حرارتی مورد توجه قرار می‌گیرد. لوله‌های حرارتی میکرو[۴۷] با ساختار مویینگی پیشرفته و تیغه‌های مسی تاشو[۴۸]توسعه یافته‌اند تا در ابعاد کوچک، ظرفیت دفع حرارت بالا و عملکرد بهینه ارائه دهند. این لوله‌ها با تنوع در طراحی، جنس و سیالات کاری، گزینه‌های پیشرفته‌ای برای سیستم‌های الکتریکی و خنک‌سازی دقیق محسوب می‌شوند و در کاربردهای با محدودیت فضا و نیاز به کارایی حرارتی بالا، عملکرد مناسبی دارند.



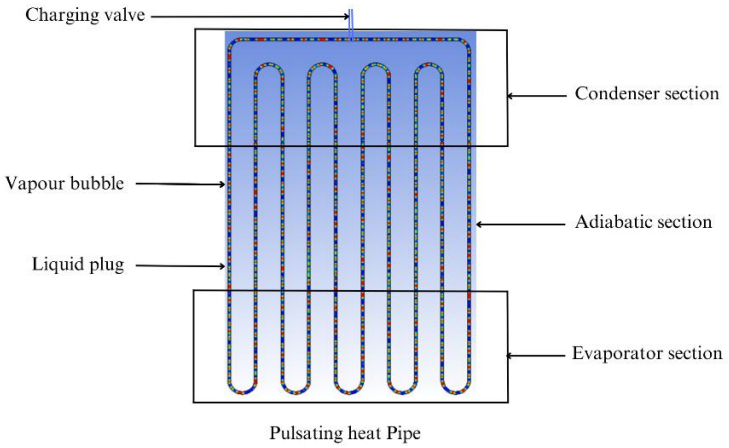
شکل ۵: ساختار داخلی و مقطع عرضی یک لوله حرارتی تخت شامل سه بخش اصلی تبخیر،تقطیر و ساختار فتیله‌ای برای انتقال مایع می‌باشد(تامپسون و همکاران[۴۹]، ۱۳۹۴.)

لوله های حرارتی نوسانی صفحه تخت [۵۰] به‌عنوان یک فناوری نوین در مدیریت حرارتی سیستم‌های الکترونیکی با توان بالا مطرح هستند. این نوع لوله‌ها شامل کانال‌های مارپیچی میکرو هستند که با یک صفحه فلزی دیگر مهر و موم شده‌اند که درشکل (۶) دیده می شود که در این عملکرد، تبخیر کننده در بخش پایینی و چگالنده در بخش بالایی قرار گرفته‌اند و انتقال حرارت از طریق حرکت نوسانی و ناپایدار سیال کاری (مایع و بخار) بین این دو بخش صورت می‌گیرد. عملکرد آن‌ها بر اساس جریان‌های نوسانی دو فازی است که انتقال حرارت را به صورت مؤثری انجام می‌دهند و کمیت هایی مانند شکل مقطع کانال (مربعی یا مستطیلی)، زاویه نصب و جنس ماده تأثیر قابل توجهی بر عملکرد دارند. مطالعات نشان داده‌اند که کانال‌های مربعی به دلیل پدیده پمپینگ مویینگی ، عملکرد حرارتی بهتری نسبت به انواع دایره‌ای دارند(مَهتانی و همکاران[۵۱]،

[۴۶] Flat Heat Pipe (FHP)
[۴۷] Micro Heat Pipe (MHP)
[۴۸] Folded Copper Fins
[۴۹] Thompson, S. M. and Ma, H
[۵۰] Flat Plate Pulsating Heat Pipe (FPPHP)
[۵۱] Mahtani, M. L. et al.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۱۳۹۹). لوله‌های حرارتی نوسانی/پالسی[۵۲] یک فناوری انتقال حرارت دوفازی نوین و امیدوارکننده هستند که برای انتقال شار حرارتی [۵۳] بالا در محدوده‌های دمایی گسترده و با ابعاد کوچک‌تر توسعه یافته‌اند. برخلاف لوله‌های حرارتی مرسوم که به ساختار فتیله متکی هستند، مکانیزم PHPاساساً بر پایه نوسان خودبه‌خودی [۵۴] توده‌های مایع و حباب‌های بخار در یک مدار مویینگی بسته یا باز است .این نوسان که توسط اختلاف فشار در بخش‌های تبخیر کننده و چگالنده ایجاد می‌شود، انتقال حرارت بسیار مؤثری را از طریق پدیده همرفت[۵۵] پدید آمده و تبخیر و میعان نهان فراهم می‌سازد .به دلیل سادگی ساختار و توانایی مدیریت بارهای حرارتی بالا، PHPها به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، فضایی و میکروالکترونیک تبدیل شده‌اند. با این حال، مهم‌ترین چالش‌های آن‌ها شامل تأخیر در شروع به کار[۵۶] ، وابستگی به زاویه قرارگیری (به ویژه در لوله‌های باز) و تأثیرپذیری عملکرد از میزان دقیق شارژ سیال کاری است .(کملش پارمر [۵۷]و همکاران، ۱۴۰۲)



شکل ۶: نمایی از عملکرد یک لوله حرارتی پالس‌زن صفحه‌ای (FPPHP) (مکوانا و همکاران[۵۸]، ۱۴۰۲)

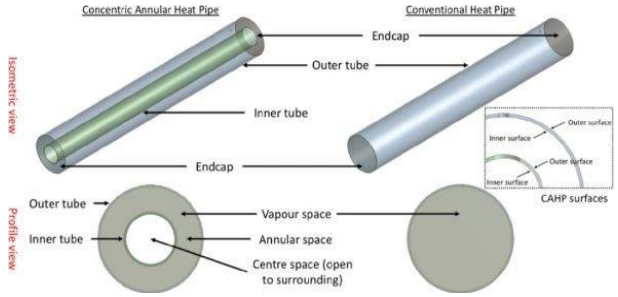
چن و همکاران[۵۹] (۱۳۹۷) ، در مرور خود بر لوله‌های حرارتی تخت میکرو برای خنک‌سازی الکترونیک، به لوله های حرارتی ریز صفحه تخت[۶۰] (MFHPs) اشاره کرده اند. در این مدل از ساختارهای فتیله‌ای پیشرفته مانند شیارها و نانولوله‌ها استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این لوله‌ها با طراحی مناسب، توانایی بالایی در مدیریت حرارتی تجهیزات کوچک با توان بالا دارند و میتوانند برای کاربردهای مختلف در میکروالکترونیک از جمله خنک‌سازی مناسب باشند. در لوله های حرارتی LHPو CPL و لوله های حرارتی متعارف و میکرو سیال های کاری جدیدی ارائه شده است که با شیب مثبت کشش سطحی، دما عملکرد آنها را بهبود بخشیده و از بین لوله های حرارتی مخصوص توسعه یافته میتوان به لوله های حرارتی پالس زن قوی و تبریدی و چرخان اشاره کرد(ریفت و همکاران[۶۱]).

۳،۳ لوله‌های حرارتی استوانه‌ای و نوآوری در ساختار

[۵۲] Pulsating Heat Pipes(PHP)
[۵۳] Heat Flux
[۵۴] Self-Sustained Oscillation
[۵۵] Convection
[۵۶] Start-up
[۵۷] Kamlesh Parmar
[۵۸] Keyur Makwana.et al.
[۵۹] Chen, Y. et al.
[۶۰] Micro Flat Heat Pipe (MFHP)
[۶۱] Riffat, S.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

لوله‌های حرارتی حلقوی هم‌مرکز (CAHP)[۶۲] شامل دو لوله هم‌محور هستند که با ایجاد فضای حلقوی بین آن‌ها، سطح تبادل حرارت را بدون افزایش قطر خارجی افزایش می‌دهند. این طراحی امکان انتقال حرارت بیشتر در فضاهای محدود و کاهش احتمال خشک‌شدن[۶۳] در شار حرارتی بالا را فراهم می‌کند. CAHP برای خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی، مبدل‌های حرارتی و محیط‌هایی با جاذبه کم کاربرد دارد.



شکل ۷: مقایسه‌ای بین عملکرد لوله حرارتی متعارف و لوله حرارتی حلقوی هم‌مرکز که طراحی دایره‌ای آن باعث بهبود توزیع شار حرارتی و بازده انتقال حرارت می‌شود(چُهوکَر و همکاران[۶۴]، ۱۴۰۳)

جدول ۱: مقایسه معیارهای فنی کلیدی انواع لوله‌های حرارتی پیشرفته. (مکوانا و همکاران، ۱۴۰۲_ وانگ و همکاران ،۱۳۹۹_ اندرسون و همکاران، ۱۳۹۸ _ کملش پارمر و همکاران، ۱۴۰۲) و تحلیل توسط نویسندگان

انواع لوله	لوله حرارتی مرسوم (CHP)	لوله حرارتی حلقوی (LHP)	لوله حرارتی نوسانی/پالسی(PHP)	لوله حرارتی تخت میکرو(MHP)
سال توسعه (حدودی)	۱۹۴۲ (اصول اساسی)	طراحی اولیه (CPL ۱۹۷۰)	۱۹۹۰	۲۰۰۰ به بعد
توان انتقال حداکثر (Q max)	کم (تا ۵۰۰ وات)	متوسط تا زیاد (تا ۱۰۰۰ وات)	متوسط تا زیاد (تا ۴۰۰ وات)	کم تا متوسط (تا ۱۵۰ وات)
شار حرارتی (Heat Flux)	متوسط (تا ۱۰ W/cm^2)	متوسط تا بالا (تا ۱۵۰ W/cm^2)	بالا (تا ۴۰۰ W/cm^2)	بالا (تا ۳۰۰ W/mc^2)
راندمان حرارتی (R_{th})	۰,۵ تا ۲ [K/W]	۰,۱ تا ۱ [K/W]	۰,۲ تا ۱,۵ [K/W]	۰,۰۵ تا ۰,۵ [K/W]
قابلیت ضد جاذبه (Anti-Gravity)	ضعیف یا وابسته به نوع فتیله	عالی (مستقل از جاذبه)	ضعیف تا متوسط (وابسته به شارژ)	متوسط
پیچیدگی ساختار	ساده	پیچیده (نیاز به فتیله متخلخل)	ساده (فقدان فتیله مکانیکی)	متوسط (نیاز به ریزکانال)
هزینه تولید	پایین	بالا	متوسط	متوسط تا بالا
مزیت کلیدی	سادگی، قیمت پایین	توان بالا، عملکرد جهت‌ناپذیر	ساختار ساده، تحمل شار بالا	فوق نازک بودن، مناسب میکروالکترونیک
چالش کلیدی	حد مویینگی، وابستگی به جهت	شروع به کار اولیه، هزینه	شروع به کار، وابستگی به شارژ	طراحی و ساخت ریزکانال‌ها

[۶۲] Concentric Annular Heat Pipe (CAHP)
[۶۳] Dry-out
[۶۴] Chhokar, A. et al.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۴. کاربرد لوله های حرارتی

بر اساس تحقیقات ریفت و همکارانش لوله‌های حرارتی در بسیاری از سیستم‌ها و صنایع از جمله انرژی خورشیدی، تهویه مطبوع، بازیابی گرما، تجهیزات الکترونیکی، ذخیره‌سازی انرژی، صنایع فضایی و هسته‌ای کاربرد گسترده دارند. در سیستم‌های خورشیدی، لوله‌های حرارتی انتقال حرارت مستقیم از تبخیرکننده به مخزن را امکان‌پذیر می‌کنند و در جمع‌کننده‌های صفحه‌ای صاف و مبدل‌های حرارتی چگالنده به کار می‌روند . یوان و همکاران[۶۵](۱۴۰۲)، کاربرد لوله‌های حرارتی برای افزایش عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع در ساختمان‌ها را بررسی کرده‌اند.در سیستم‌های تهویه مطبوع[۶۶](HVAC/ACS) ، لوله‌های حرارتی به‌عنوان مبدل حرارتی و بازیاب گرما از جریان هوای خروجی استفاده می‌شوند و سه نوع کاربرد اصلی دارند: بازیابی گرمایی در دستگاه تهویه، پیش‌گرم کردن هوای فرآیندی و استفاده مجدد حرارت در فرآیندها. سیستم‌های ترکیبی شامل لوله‌های حرارتی و بازیاب‌های تبخیری غیرمستقیم می‌توانند ضریب عملکرد را افزایش دهند. لوله‌های حرارتی با انتقال حرارت غیر فعال[۶۷] و هدایت حرارتی بالا، مصرف انرژی سیستم‌های تهویه مطبوع را کاهش داده و عملکرد آن‌ها را بهبود می‌بخشند. نصب این لوله‌ها در واحدهای داخلی یا خارجی ساختمان‌ها می‌تواند صرفه‌جویی انرژی ۳ تا ۲۰ درصدی ایجاد کند و حتی بازیابی حرارت را فراهم آورد. کارایی آن‌ها به ساختار، سیال کاری و شرایط محیطی وابسته است و نقش مهمی در بهبود بازده انرژی ساختمان‌ها دارد.

۵. وضعیت بازاریابی و کاربرد لوله‌های حرارتی

تمرکز جهانی بر کاهش رد پای کربن در محیط زیست و افزایش بهره وری انرژی، تقاضا برای لوله های حرارتی در سیستم های انرژی تجدید پذیر را افزایش می‌دهد. لوله های حرارتی در مبدل های حرارتی در کاربرد انرژی تجدید پذیر استفاده می شوند و باعث پایداری انرژی در سیستم می شوند و با گسترش بازار سیستم‌های تهویه مطبوع(HVAC) ، فرصت‌های قابل‌توجهی برای لوله‌های حرارتی فراهم می‌شود در بررسی تحقیقات و بازارها[۶۸] (۱۴۰۳). ، در سراسر جهان کشورها با ایجاد قوانین و سیاست های سختگیرانه تلاش برای محقق سازی اهداف در زمینه انرژی های تجدید پذیر دارند و این سبب افزایش نیاز و تقاضا برای لوله های حرارتی می شود. افزایش تقاضا کالاهای الکترونیکی و هوشمند و راه حل مدیریت حرارتی کارآمد، تغییر به سمت انرژی های تجدید پذیر و تقاضا برای سیستم های تبادل حرارت، پیشرفت در سیستم های هوانوردی، گسترش سیستم های تهویه مطبوع (HVAC)از جمله عواملی هستند که در بازار باعث افزایش نیاز به لوله های حرارتی و پیشرفت آن می گردد.بازار جهانی لوله‌های حرارتی با سرعت قابل توجهی در حال گسترش است. در این میان، بخش الکترونیک بزرگترین سهم را به خود اختصاص داده است. لوله‌های حرارتی در قطعاتی نظیر کارت‌های گرافیکی و پردازنده‌ها در دستگاه‌هایی مانند تلفن‌های همراه، لپ‌تاپ‌ها، و سرورها نقشی حیاتی ایفا می‌کنند. کاربرد اصلی آنها در این حوزه، دفع حرارت بالا و پیشگیری از بروز مشکلات ناشی از افزایش دما در قطعات الکترونیکی است. در مروری که توسط پیکسل راکت[۶۹] (۱۴۰۴/۱۴۰۳) منتشر شده، به روندهای بازار لوله‌های حرارتی حلقوی اشاره شده است.زمینه رشد لوله های حرارتی حلقوی (LHP) در آینده پیشرفت چشمگیری خواهد داشت علت آن را میتوان به کاربرد بسیار بالا آن در صنایع زیر اشاره نمود :

مدیریت حرارتی، استفاده روز افزون از دستگاه الکترونیکی و کوچک سازی و جلوگیری از اتلاف گرما در میکرو الکترونیک ها، صنعت هوا و فضا و دفاعی، به دلیل گسترش زیاد ماهواره ها و ساخت وسایل نقلیه فضایی ،وسایل و ماشین های الکتریکی، به دلیل نیاز خودرو های برقی برای کنترل دما باتری به روش حرارتی و سبک وزن (LHP)کارآمد خواهد بود. لوله‌های حرارتی حلقوی (LHP) در صنایع جهانی از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. از جمله مزایای آن‌ها می‌توان به ساخت خنک‌کننده‌های سازگار با محیط زیست، کاهش هزینه‌های نگهداری و عملیات مکانیکی، و اطمینان‌پذیری بالا اشاره کرد. این لوله‌ها به دلیل کاربرد گسترده وکارایی بالادر انتقال حرارت غیر فعال در شرایط گرانش صفر و

[۶۵] Yuan, T. et al.
[۶۶] Heating, Ventilation, and Air Conditioning
[۶۷] Passive Heat Transfer
[۶۸] Research and Markets
[۶۹] Pixel Rocket Analysis(

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

قابلیت طول عمر بالا، یکی از گزینه‌های اصلی در طراحی سیستم‌های حرارتی مدرن شناخته می شوند. پیشرفت های امروز، به عنوان ربات و دوقلو دیجیتال، کابرد و استفاده از متریال پیشرفته، تولید اتوماسیون، مسیر آینده بازار و صنعت لوله های حرارتی حلقوی را پر رنگ و مشخص خواهند کرد.در حوزه سیستم‌های تهویه مطبوع (HVAC) و بازیافت حرارتی نیز، لوله‌های حرارتی به دلیل قابلیت‌های پیشرفته خود، نقش مهمی در افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف سوخت ایفا می‌کنند. قابلیت جایگزینی سوخت‌های سنتی با سوخت‌های سازگار با محیط زیست، سیستم‌های مبتنی بر لوله‌های حرارتی را به یکی از پرفروش‌ترین محصولات در این بازار تبدیل کرده است.

۶. تحلیل کمی بازار و چشم‌انداز اقتصادی لوله‌های حرارتی

بازار جهانی لوله‌های حرارتی در سال‌های اخیر به‌دلیل افزایش نیاز به مدیریت حرارتی کارآمد در صنایع الکترونیک، تهویه مطبوع(HVAC) ، هوافضا و انرژی‌های تجدیدپذیر، رشد پایداری را تجربه کرده است. بر اساس گزارش استراتژیک صنعت لوله‌های حرارتی جهانی[۷۰] (۱۴۰۲) ، ارزش بازار جهانی لوله‌های حرارتی در سال ۲۰۲۳ حدود ۳,۳ میلیارد دلار آمریکا بوده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۴,۴ میلیارد دلار برسد که بیانگر نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR) حدود ۴,۳٪ است. (تحقیقات و بازارها (۱۴۰۳)گزارش‌های تحلیلی دیگر نیز این بازه را تأیید کرده و مقدار بازار را در سال ۲۰۲۴ حدود ۳,۳ تا ۳,۵ میلیارد دلار و مقدار پیش‌بینی‌شده برای سال ۲۰۳۰ را حدود ۴,۵ میلیارد دلار برآورد می‌کنند که CAGR تقریبی ۵,۲٪ را نشان می‌دهد. این رشد عمدتاً ناشی از توسعه سیستم‌هایHVAC ، افزایش چگالی توان در تجهیزات الکترونیکی و گسترش مراکز داده است ,GlobeNewswire(۲۰۲٤) .

در میان انواع مختلف، لوله‌های حرارتی حلقوی (LHP) رشد سریع‌تری نسبت به لوله‌های حرارتی مرسوم دارند. بر اساس تحلیل بازار منتشرشده در سال ۲۰۲۵، ارزش بازار جهانی LHP در سال ۲۰۲۴ حدود ۵۲۰ میلیون دلار برآورد شده و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۳ به بیش از ۱,۲ میلیارد دلار برسد که معادل CAGR حدود ۹٪ است. این رشد بالا به کاربردهای پیشرفته در صنایع هوافضا، ماهواره‌ها، الکترونیک توان بالا و خودروهای الکتریکی نسبت داده می‌شود. پیکسل راکت(۱۴۰۴/۱۴۰۳)

از منظر هزینه سرمایه‌گذاری، اگرچه مقالات علمی به‌طور مستقیم به هزینه‌های توسعه اشاره نمی‌کنند، اما برآوردهای صنعتی نشان می‌دهد راه‌اندازی یک خط تولید نیمه‌صنعتی لوله‌های حرارتی شامل تجهیزات آب‌بندی وکیوم، ساخت فتیله و آزمون‌های حرارتی، نیازمند سرمایه‌ای در حدود ۱ تا ۲,۵ میلیون دلار آمریکا است. با توجه به عمر کاری بالا، ماهیت غیرفعال و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، این سرمایه‌گذاری در کاربردهای صنعتی و انرژی‌محور از توجیه اقتصادی مناسبی برخوردار است.

جدول ۲: شاخص های کلیدی بازار جهانی لوله‌های حرارتی

شاخص	مقدار	منبع
اندازه بازار جهانی (۲۰۲۳)	۳,۳ میلیارد دلار	Research and Markets
پیش‌بینی بازار (۲۰۳۰)	۴,۴–۴,۵ میلیارد دلار	GlobeNewswire
CAGR بازار جهانی	۴,۳–۵,۲٪	Research and Markets
اندازه بازار LHP (۲۰۲۴)	≈ ۵۲۰ میلیون دلار	Pixel Rocket Analysis
CAGR بازار LHP	≈ ۹٪	Pixel Rocket Analysis
CapEx خط تولید	۱–۲,۵ میلیون دلار	برآورد صنعتی

[۷۰] Global Heat Pipes Strategic Industry Report

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۷. نتیجه‌گیری

مرور تحقیقات و پیشرفت‌های اخیر نشان می‌دهد که لوله‌های حرارتی از یک فناوری ساده به سامانه‌ای پیچیده و چندمنظوره ارتقا یافته‌اند. توسعه انواع مختلف از جمله لوله‌های تخت، حلقوی پیشرفته و ساختارهای میکرو، امکان استفاده گسترده‌تر در صنایع حساس را فراهم ساخته است. این نوآوری‌ها موجب بهبود راندمان حرارتی، کاهش افت فشار و گسترش کاربرد در شرایط کاری ویژه شده‌اند. با وجود این، چالش‌هایی همچون محدودیت در انتخاب سیالات پایدار و بهینه‌سازی ساختار فتیله همچنان باقی است. افزون بر پیشرفت‌های فنی، تحلیل‌های کمی نشان می‌دهد که بازار جهانی لوله‌های حرارتی رشد پایداری با نرخ رشد مرکب سالانه [۷۱] در حدود ٪۵,۲ را تا سال ۲۰۳۰ تجربه خواهد کرد .در این میان، لوله‌های حرارتی حلقوی (LHP) با نرخ رشد تخمینی ٪۹ ، به دلیل کارایی بالا در صنایع هوافضا و الکترونیک توان بالا، بالاترین توجیه اقتصادی و چشم‌انداز آینده را دارند . این رشد و توجیه سرمایه‌گ[۷۲]ذاری ، موقعیت این فناوری را به‌عنوان یک راه‌حل انرژی‌محور پایدار، تثبیت می‌کند. آینده این فناوری بر توسعه سیالات کاری سازگار با محیط زیست، افزایش دوام در شرایط سخت و طراحی‌های نوین متمرکز خواهد بود. با توجه به نیاز روزافزون به مدیریت حرارتی پیشرفته، انتظار می‌رود لوله‌های حرارتی نقش پررنگ‌تری در صنایع الکترونیک، هوافضا و انرژی‌های پاک ایفا کرده و مسیر تحقیقات آینده را شکل دهند.

منابع

[۱] Anderson, W. G., and C. Tarau. (۲۰۱۹)، "Advanced Cooling Technologies, Inc." *Thermal & Fluids Analysis Workshop (TFAWS ۲۰۱۹), NASA Langley Research Center, Hampton, VA*.

[۲] Chen, Y. and Fan, C. C. (۲۰۱۸)، "Micro Flat Heat Pipes for Microelectronics Cooling: Review" ، *Journal of Heat Transfer*, ۱۴۰(۱۲), ۱۲۰۸۰۱.

[۳] Chhokar, A., Ashouri, H., and Bahrami, M. (۲۰۲۴)، "Modeling the thermal and hydrodynamic performance of grooved wick flat heat pipe" ،*Applied Thermal Engineering*.

[٤] Calyos, Inc. (۲۰۲۴)، "Ultimate Guide to Loop Heat Pipes: How They Work and Applications." [Online]. Available: https://www.calyos-tm.com/technologies/loop-heat-pipes. [Accessed: Dec. ۱۲, ۲۰۲۵].

[۵] GlobeNewswire. (۲۰۲۴)، "Global Heat Pipes Strategic Industry Report ۲۰۲۴–۲۰۳۰." [Online]. Available: [Insert URL/GlobeNewswire Source]. [Accessed: Dec. ۱۲, ۲۰۲۵].

[۷۱] CAGR
[۷۲] CapEx

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[٦] Grover, G. M. et al. (٢٠٢٤) ،"Development and testing of high-temperature heat pipes for space nuclear power applications" ،*Energy Conversion and Management*.

[٧] Hoang, T. T. (٢٠٠٤) ،"Loop heat pipe method and apparatus" ،*United States Patent* No. ٦٨١٠٩٤٦, November ٢, ٢٠٠٤.

[٨] Jafari, M. A., and M. S. E. D. M. M. (٢٠٢٣) ،"Heat pipes and pulsating heat pipes: fundamentals, recent advances, and applications in thermal management" ،*International Journal of Thermal Sciences*,١٨٦,١٠٨١٥١.https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.ijthermalsci.٢٠٢٣,١٠٨١٥١.

[٩] Li, Y. et al. (٢٠٢٣) ،"Thermal performance and reliability of heat pipes using water and methanol for electronics cooling" ،*Applied Thermal Engineering*.

[١٠] LinkedIn – Pixel Rocket Analysis. (٢٠٢٥) ،"Loop Heat Pipes Market Overview ٢٠٢٥." [Online]. Available: [Insert URL/LinkedIn Source]. [Accessed: Dec. ١٢, ٢٠٢٥]

[١١] Mahtani, M. L. et al. (٢٠٢٠) ،"Flat Plate Pulsating Heat Pipes: A Review on the Thermohydraulic Characteristics".

[١٢] Makwana, K., Parmar, K., Parwani, A. K., and S. Tripathi. (٢٠٢٣) ،"Parametric current trends on pulsating heat pipes – A review."

[١٣]https://www.researchgate.net/publication/٣٧٦٤٣٤٢٢٦.

[١٤] Mottet, L. (٢٠١٤) ،"Loop Heat Pipes (LHP) – Operating Principles and Applications" ، *ResearchGate*. [Online]. [Accessed: Aug. ٧, ٢٠٢٥].

[١٥] Parmar, K., and S. Yadav. (٢٠٢٣) ،"Pulsating Heat Pipes: A New Trend in Heat Transfer Technology" ،in *Recent Advances in Mechanical Infrastructure*, A. K. Parwani et al. (Eds.), Springer, pp. ١٨٧–١٩٥. https://doi.org/١٠,١٠٠٧/٩٧٨-٩٨١-١٦-٧٦٦٠-٤_١٧.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[۱۶] Pixel Rocket Analysis. (۲۰۲۵) ،"Loop Heat Pipes Market Overview ۲۰۲۵: Trends and Growth Areas." [Online]. Available: https://www.linkedin.com/company/pixel-rocket-analysis [Accessed: May ۲۳, ۲۰۲۵].

[۱۷] Praful, S. et al. (۲۰۲۰) ،"On the operating temperature of heat pipes" ،*J. Phys.: Conf. Ser.* ۱۴۷۳, ۰۱۲۰۲۵.

[۱۸] QATS. (۲۰۲۵) ،"Understanding Loop Heat Pipes." [Online]. Available: [Insert actual link]. [Accessed: Aug. ۷, ۲۰۲۵].

[۱۹] Research and Markets. (۲۰۲۴) ،"Global Heat Pipes Strategic Industry Report ۲۰۲٤–۲۰۳۰: Expansion of HVAC Systems Market Expands Addressable Market Opportunities." [Online].

[۲۰] Riffat, S. and Ma, X. (۲۰۰۷) ،"Recent developments in heat pipe technology and applications: a review" ،*International Journal of Low-Carbon Technologies*, ۲(۲), ۱۶۲–۱۷۷.

[۲۱] Sireesha, V., Kishore, P. S., and Dharma Rao, V. (۲۰۲۲) ،"Chapter ۸ – Advanced wick materials and structures for loop heat pipes" ،in *Advances in Heat Pipe Technology*, V. Sireesha (Ed.), Elsevier, pp. ۲۰۰–۲۴۰. [https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/B۹۷۸-۰-۳۲۳-۹۰٤۹۸-۸,۰۰۰۰۵-۱](https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/B۹۷۸-۰-۳۲۳-۹۰۴۹۸-۸,۰۰۰۰۵-۱).

[۲۲] S. Thomas et al. (۲۰۲۵) ،"General configuration of concentric annular heat pipe compared to conventional heat pipe." [Online]. Available: [Insert URL]. [Accessed: Aug. ۷, ۲۰۲۵].

[۲۳] Szymanski, P., Mikielewicz, D., and S. Fooladpanjeh. (۲۰۲۲) ،"Current Trends in Wick Structure Construction in Loop Heat Pipes Applications: A Review" ،*Materials*, vol. ۱۵, no. ۱۶, Art. no. ۵۷۶۵. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/ma۱۵۱٦۵۷٦۵.

[۲٤] Thompson, S. M. and Ma, H. (۲۰۱۵) ،"Flat-plate oscillating heat pipe (FP-OHP): (a) schematic; (b) photos" ،*Recent Advances in Two-Phase Thermal Ground Planes*.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[۲۵] Wang, Y., and Wang, H. (۲۰۲۰) ،"Recent developments and applications of loop heat pipes: a review" ،*International Journal of Heat and Mass Transfer*, ۱۵۴, ۱۱۹۷۴۷.
[https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.ijhm.۲۰۲۰,۱۱۹۷٤۷].

[۲٦] Werner, T. C. et al. (۲۰۲۳) ،"Medium Temperature Heat Pipes – Applications, Challenges and Future direction" ،*Applied Thermal Engineering*, ۱۲۱۳۷۱. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.applthermaleng.۲۰۲۳,۱۲۱۳۷۱.

[۲۷] Y. F. Maydanik, “Loop heat pipes,” Applied Thermal Engineering, vol. ۲۵, no. ۵–٦, pp. ٦۳۵–٦۵۷, Apr. ۲۰۰۵, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.applthermaleng.۲۰۰٤,۰۷,۰۱۰.

[۲۸] Yuan, T. et al. (۲۰۲۳) ،"The Review of the Application of the Heat Pipe on Enhancing Performance of the Air-Conditioning System in Buildings" ،*Processes*, ۱۱, ۳۰۸۱.
https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/pr۱۱۱۱۳۰۸۱.

[۲۹] Zhang, Y., Kumar, R., and Lee, C. (۲۰۲۵) ،"Thermal behavior of advanced wick structures in heat pipes under varying temperature ranges" ،*Thermal Science and Engineering Progress*, ۱۰۱۲۸۴.
https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.tsep.۲۰۲۵,۱۰۱۲۸٤.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]