

بهینه‌سازی عددی یک رادیاتور خانگی و بررسی تجربی ظرفیت حرارتی آن

روح‌الله احمدی^{۱*}، محمدحسین سعیدی^۲

^۱ استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

ahmadi@iust.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

saman@sharif.edu

چکیده: رادیاتورها از جمله وسایل رایج در گرمایش فضاهای خانگی و اداری محسوب می‌شوند و ارتباط تنگاتنگ با بخش انرژی دارند. در یک رادیاتور، انتقال حرارت با افزایش جریان هوا در امتداد سطوح گرم و با افزایش اختلاف دمای هوا و سطح حرارتی افزایش می‌یابد. ابتدا تحلیل عددی پدیده انتقال حرارت جابجایی آزاد به کمک نرم‌افزار تجاری فلونت، جهت یافتن طرح بهینه از یک رادیاتور آلومینیومی صورت گرفت و سپس به منظور ارزیابی حرارتی آن از استاندارد ملی ایران به شماره ۴۰۲۲ در تطابق با استاندارد جهانی ایزو ۳۱۴۸ به‌عنوان مرجع آزمون تجربی بهره گرفته شد. مطابق با این استاندارد اتاق آزمون شامل دو اتاقک تودرتو است: اتاقک داخلی و محفظه خارجی؛ در اتاقک داخلی رادیاتور قرار می‌گیرد و محفظه خارجی توسط هوای سرد قابل خنک شدن است. در این تحقیق، سه تست در دماهای مختلف متوسط آب گرم ورودی و خروجی رادیاتور برابر با $80 \pm 5^\circ\text{C}$ ، $65 \pm 5^\circ\text{C}$ و $50 \pm 5^\circ\text{C}$ جهت یافتن رابطه تجربی ظرفیت حرارتی رادیاتور صورت گرفت. در همه تست‌ها، دمای متوسط اتاق به وسیله ۲۰ حسگر دمایی جانمایی شده در محیط اتاق آزمون، در محدوده بین 19°C تا 21°C نگه داشته شد. مقایسه نتایج تجربی ظرفیت حرارتی رادیاتور با نتایج تحلیل عددی توافق خوبی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رادیاتور خانگی، انتقال حرارت جابجایی آزاد، بررسی تجربی، شبیه‌سازی عددی.

این استاندارد ملی به‌عنوان روش آزمایش گرمادهی رادیاتور، مرجع اصلی آزمون‌های تجربی این مطالعه است.

در یک پژوهش تجربی، آزمون‌هایی توسط اولسن و همکاران [۶] در یک اتاق تست به‌عنوان نمونه‌ای از فضای یک خانه یا یک دفتر کار کوچک، صورت پذیرفت. در این اتاق تست، تأسیسات برودتی بر روی دیوار بیرونی طوری تعبیه شد که شرایط پایدار دمای سرد 5°C را ایجاد کند. این دیوار شامل یک پنجره است و نفوذ هوا در اطراف پنجره شبیه‌سازی شد. دیوارهای داخلی، کف و سقف عایق‌بندی شده است. برای گرمایش این اتاق ۹ روش گرمایش مختلف شامل انواع رادیاتورها، جریان هوای گرم، گرمایش از کف و گرمایش از سقف نصب و راه‌اندازی شده است. با توجه به داده‌های آزمایش، توزیع دمایی داخل اتاق معین و میزان سطح آسایش هریک از این سیستم‌ها با یکدیگر مقایسه شد. در مطالعه‌ای که توسط مایرن و هولمبرگ [۷] صورت گرفت، شرایط حرارتی داخل یک ساختمان برای دو مدل اتاق با استفاده از شبیه‌سازی عددی تجزیه و تحلیل شد. اتاق‌ها با چهار سیستم گرمایشی مختلف گرمادهی شدند: یک سیستم گرمایش دماپایین از کف، دو نوع رادیاتور با دمای سطح نسبتاً بالا و یک سیستم گرمایش دیوار با دمای پایین. نتیجه‌گیری کلی از این مطالعه این بود که سیستم‌های گرمایشی دمای پایین، با ایجاد سرعت پایین‌تر هوا و اختلاف دمای پایین‌تر در اتاق، موجب بهبود شرایط هوای داخل اتاق، نسبت به یک سیستم گرمایش رادیاتور با درجه حرارت بالا می‌شود. همچنین برای صحت‌سنجی نتایج عددی، نتایج یکی از این اتاق‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط اولسن و همکاران [۶]، در یک اتاق آزمون واقعی، مقایسه و تأیید شد.

گرمای خروجی از رادیاتور و صفحات عمودی با همرفت طبیعی یا اجباری با تحلیل و شبیه‌سازی عددی در مطالعات متعددی [۷ و ۸] در مؤسسه سلطنتی فناوری، دانشکده فناوری و بهداشت در استکهلم بررسی شده است. هدف اصلی این فعالیت‌ها یافتن راهی برای افزایش راندمان حرارتی رادیاتور بود. مشخص شد که با افزایش سطوح گسترده یا اصلاح رادیاتورهای موجود یا اضافه کردن پره‌هایی جهت افزایش همرفت ممکن است راندمان حرارتی افزایش یابد. نقطه ضعف این تغییرات، با این حال، اغلب افزایش هزینه‌های تولید می‌باشد. لذا نتیجه گرفته شد که توجه به افزایش راه‌های خروج حرارت ممکن است ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر باشد که از آن جمله می‌توان به هدایت تهویه هوا به سمت سطوح رادیاتور گرم یا عبور جریان اجباری هوا بین پانل رادیاتور اشاره کرد.

۱. مقدمه

آزمایشات تجربی به‌علت هزینه‌های بالای مالی و زمانی، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، ولی پرواضح است نتایج حاصل از آزمایشات دقیق، بسیار ارزشمند و قابل اعتماد می‌باشد. در کنار اهمیت مطالعه تجربی، امروزه دینامیک سیالات محاسباتی با به‌کارگیری نرم‌افزارهای تجاری، بسیار مورد توجه قرار گرفته است، زیرا نرم‌افزارهای موجود قادر به ارائه نتایج قابل قبول با دقت و سرعت خوب و همچنین تحلیل نتایج مسائل به‌صورت گرافیکی به بهترین نحو می‌باشند. بهینه‌سازی سیستم‌های تولید انرژی احتیاج به شناخت عملکرد آن‌ها و تعریف و انجام آزمایش‌های متعدد دارد. با پیشرفت فناوری بشر در پردازش داده‌ها و توسعه روش‌های شبیه‌سازی عددی، شبیه‌سازی رفتار این سیستم‌ها مورد توجه وسیع محققان و صنعتگران قرار گرفته است، زیرا این شبیه‌سازی‌ها در صورت تطبیق با نتایج تجربی، این امکان را به طراح می‌دهد که بدون صرف هزینه‌های هنگفت آزمایش، ایده‌های خود را جهت بهینه‌سازی در نرم‌افزار شبیه‌ساز ارزیابی کند.

در این پژوهش، رادیاتور خانگی به‌عنوان یک جزء مؤثر که نقش انکارناپذیری در تأسیسات گرمایشی دارد، مورد بررسی عددی و تجربی قرار گرفته است. اصولاً اساس کارهای تجربی بر پایه یک سری استانداردها بنا شده است. آزمون‌های گرمادهی در سطح استانداردهای معتبر جهانی مانند استاندارد ایزو، در سطح منطقه‌ای مانند استاندارد اروپایی و در سطح ملی مانند استاندارد ملی ایران معرفی و شرح داده شده‌اند. تنها تفاوت روش تست اروپایی با روش تست ایزو، اختلاف دمای مرجع بین ورودی و خروجی رادیاتور است. در استاندارد جهانی (ایزو ۳۱۴۸) [۱] مقادیر مرجع دماهای ورودی و خروجی آب را به ترتیب 90°C و 70°C پیشنهاد می‌کند، درحالی‌که روش تست استاندارد اروپایی (EN-۴۴۲-۱،۲،۳) [۲،۳]، در آخرین ویرایش خود مقادیر ورودی و خروجی آب را به ترتیب 75°C و 65°C بیان کرده است. به عبارتی دیگر، دمای متوسط ورود و خروج آب رادیاتور در استاندارد بین‌المللی و اروپایی به ترتیب برابر با 80°C و 70°C و اختلاف دمای ورود و خروج به ترتیب برابر با 20°C و 10°C تعیین شده است که موجب تفاوت دبی جریان آب گرم در دو استاندارد می‌شود. استاندارد ملی ایران به شماره‌های ۴۰۲۲ با عنوان "رادیاتورها، کنوکتورها^۱ و وسایلی مانند آن‌ها، تعیین میزان حرارت‌دهی و روش‌های آزمون با استفاده از اتاقک بسته‌ای که با هوا خنک می‌شود" [۵]، در تطابق با استاندارد بین‌المللی ایزو ۳۱۴۸ تدوین شده است. لذا

سیستم‌ها را با معادلات حاکم شبیه‌سازی و بررسی کنند. این شبیه‌سازی‌ها در صورت تطبیق با نتایج تجربی، این امکان را به طراح می‌دهد که بدون صرف هزینه بالا، ایده‌های خود را جهت بهینه‌سازی در نرم‌افزار شبیه‌ساز ارزیابی کند.

۱-۲. معادلات حاکم

معادلاتی که جریان جابجایی آزاد آرام را برای سیالات نیوتنی بیان می‌کنند، همان معادلات پیوستگی، مومتم و انرژی است که فرضیات لایه مرزی هم در آن اعمال شده است. اختلاف بین جابجایی آزاد و اجباری تنها در عبارت گرادیان فشار است که در جابجایی آزاد با تقریب بوزینسک^۴ بیان می‌شود. در این تقریب، گرادیان فشار در هر نقطه در داخل لایه مرزی با گرادیان فشار در سیال ساکن خارج لایه مرزی در همان ارتفاع برابر است. به عبارتی:

$$\nabla P_{\infty} = -\rho_{\infty} g \quad (1)$$

که P_{∞} ، ρ_{∞} و g به ترتیب فشار اتمسفر، چگالی هوای آزاد و شتاب گرانش می‌باشند.

از طرفی، با معرفی ضریب انبساط حجمی β ، به صورت زیر می‌توان روابط حاکم بر جابجایی آزاد را ساده‌تر کرد.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_{\infty} - \rho}{T_{\infty} - T} \quad (2)$$

بنابراین:

$$\rho_{\infty} - \rho \approx \rho \beta (T - T_{\infty}) \quad (3)$$

با استفاده از تقریب بالا، در نهایت معادلات پیوستگی، مومتم و انرژی در جریان جابجایی آزاد به ترتیب به صورت زیر است [۱۳]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \nu \nabla^2 w + g \beta (T - T_{\infty}) \quad (5)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \nabla^2 T \quad (6)$$

که u ، v و w سرعت هوا در جهت x ، y و z است و ν و α به ترتیب لزجت سینماتیکی و ضریب نفوذ حرارتی می‌باشند.

۲.۲. فاصله بهینه دو صفحه موازی با انتقال حرارت

جابجایی آزاد

طی انتقال حرارت جابجایی آزاد روی یک صفحه گرم عمودی، لایه مرزی حرارتی و سرعت روی صفحات گرم ایجاد می‌شود که به مرور ضخیم‌تر می‌شود. اگر دو صفحه گرم مطابق شکل (۱) با فاصله مناسب

میریل و همکاران [۹]، با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلونت^۱ به بررسی رادیاتورهای آبی عمودی با دمای سطح پایین پرداخته‌اند. رادیاتورهای مورد بررسی دارای ارتفاع ۲ متر و به موازات دیوار در یک فاصله ۵ سانتی‌متری نصب می‌شوند که مقادیر لحاظ‌شده، مناسب برای یک اتاق با ۴ متر طول، ۴ متر عرض و ۲/۴ متر ارتفاع طراحی شده است. شهریاری [۱۰] به بررسی و مدل‌سازی رادیاتورهای خانگی به روش اپسیلون-ان تی یو^۲ پرداخته است و پس از ساده‌سازی مدل با فرضیات مناسب، با تست نمونه اصلی در اتاق تست استاندارد، نتایج مدل‌سازی را با نتایج تست مقایسه کرده است. آقای بک و همکاران [۱۱] با تحلیل عددی، طراحی جدیدی از رادیاتورهای نوع صفحه‌ای و یا پانلی ارائه کرده‌اند. آن‌ها یک صفحه انعکاس‌دهنده تشعشع حرارت را مابین دو صفحه موازی در یک رادیاتور پانلی قرار دادند و با توجه به نتایج عددی دریافتند که ظرفیت حرارتی این طرح بین ۷۱٪ تا ۸۸٪ ظرفیت حرارتی یک رادیاتور پانلی دارای فین است. طرح جدید در مقایسه با طرح فین‌دار دو مزیت دارد: اول اینکه هزینه ساخت کمتری دارد و دوم اینکه عیب جذب گرد و غبار و جرم‌گیری طرح فین‌دار را ندارد. در مطالعه‌ای دیگر، مایرن و هولمبرگ [۱۲] با تمرکز بر روی مکانیزم انتقال حرارت و پیکربندی پره‌های رادیاتور در یک بررسی تجربی و عددی به طرحی با ۲۰ درصد افزایش راندمان رسیدند. در این پژوهش نتیجه‌گیری مهم این است که با افزایش راندمان می‌توان از دمای کمتر آب ورودی برای جلوگیری از تلفات کل سیستم بهره برد.

در پژوهش حاضر، ابتدا یک نمونه رادیاتور با به‌دست‌آوردن فاصله بهینه بین پره‌ها در نرم‌افزار فلونت طراحی شد و سپس عملکرد حرارتی آن مورد تحلیل عددی قرار گرفت. آنچه اهمیت ویژه‌ای دارد، ظرفیت واقعی این رادیاتور است. بنابراین، بررسی تجربی ترموهیدرولیک این رادیاتور در اتاق تست استاندارد مرجع صورت گرفت. در این مطالعه، عبارتی برای ظرفیت حرارتی رادیاتور استخراج شد که به وسیله آن می‌توان برای هر اختلاف دمای سطح رادیاتور و هوای محیط ظرفیت گرمادهی رادیاتور را به‌دست آورد.

۲. طراحی رادیاتور به وسیله شبیه‌سازی عددی

بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی احتیاج به شناخت عملکرد آن‌ها و تعریف و انجام آزمایش‌های متعدد دارد. اما هزینه‌های هنگفت برای آزمایش و سعی و خطا، محققان و صنعتگران را به سمت پردازش داده‌ها و توسعه روش‌های شبیه‌سازی عددی^۳ کشاند تا رفتار این

1. Fluent
2. ε-NTU
3. Computational Fluid Dynamics

4. Boussinesq

۵۳ مدل‌سازی وابسته به زمان و تحلیل فنی باتری جریان‌ی... ۵۳

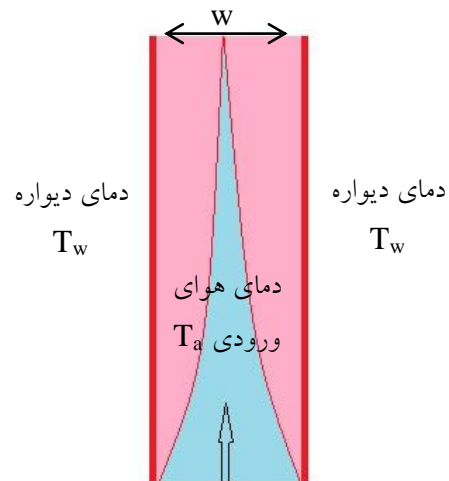
در کنار هم قرار گیرند، به طوری که لایه مرزی گرمایی در بالاترین ارتفاع به یکدیگر برسند، فاصله بین دو صفحه بهینه است. در این حالت از فضای بین دو صفحه به منظور گرمایش سیال مابین آنها به طور بهینه استفاده شده است.

به منظور یافتن فاصله بهینه w بین دو صفحه گرم با دمای ثابت T_w در یک رادیاتور خانگی با ارتفاع استاندارد ۵۰۰ میلی‌متر، از شبیه‌سازی عددی دو بعدی در محیط گمیت-فلوئنت [۱۴] بهره گرفته شده است. برای افزایش دقت حل، از شبکه‌بندی بسیار کوچک و شبکه ریزتری در نواحی نزدیک لایه‌های مرزی استفاده شده است. در این بررسی، دو صفحه با دمای $T_w = 80^\circ\text{C}$ و دمای هوای ورودی $T_a = 20^\circ\text{C}$ با فواصل متفاوت ۱۳، ۱۷، ۲۰، ۲۵، ۳۰ mm در نظر گرفته شد. کانتور سرعت و دما در این بررسی در شکل (۲) نمایش داده شده است.

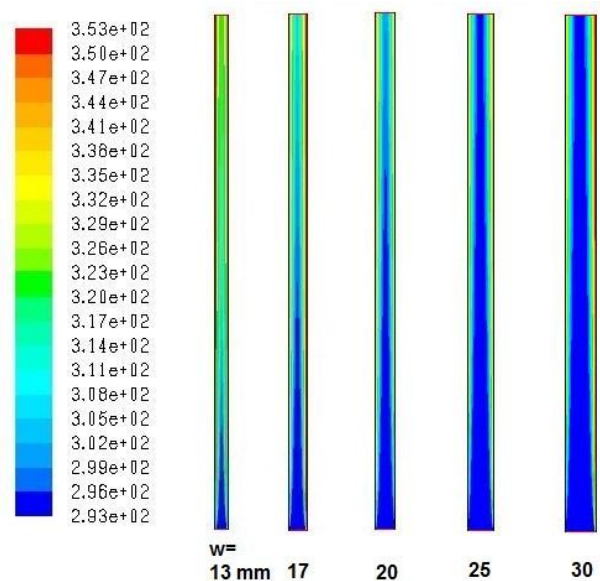
همان‌طور که دیده می‌شود، در فواصل کم ۱۳ و ۱۷ میلی‌متر بین دو صفحه، لایه‌های مرزی حرارتی در میانه راه قبل از خروج از کانال حرارتی همدیگر را ملاقات می‌کنند. هنگامی که فاصله سطوح حرارتی زیاد می‌شود و به ۳۰ میلی‌متر می‌رسد، دیده می‌شود که لایه‌های مرزی حرارتی در طول کانال به یکدیگر نمی‌رسند. در فاصله بین ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر، لایه‌های مرزی حرارتی در نزدیکی خروجی کانال به یکدیگر تماس می‌شوند. برای بررسی فاصله بهینه بین سطوح حرارتی طی انتقال حرارت جابجایی آزاد ضریب انتقال حرارت بر حسب فاصله بین سطوح حرارتی در شکل (۳) نمایش داده شده است. مطابق شکل ملاحظه می‌شود که ضریب انتقال حرارت با افزایش فاصله بین سطوح تا $w = 20\text{ mm}$ افزایش می‌یابد و از آن به بعد، تغییرات چشمگیری دیده نمی‌شود و تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بنابراین، در طراحی رادیاتور با توجه به تأثیرات سطوح در حالت سه‌بعدی می‌توان فاصله بهینه بین پره‌ها را بین ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفت.

۳.۲ هندسه رادیاتور

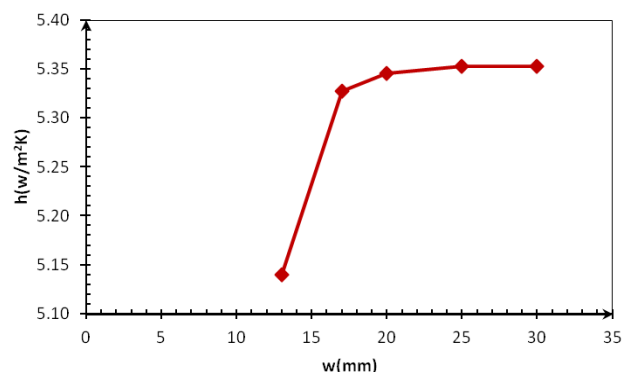
فاصله بهینه بین پره‌های نصب‌شده بر روی لوله حاوی آب گرم، از نکات مهم برای افزایش راندمان حرارتی رادیاتور است. اگر پره‌های زیادی روی سطح در نظر گرفته شود، سطح حرارتی زیاد شده، ولی ضریب انتقال حرارت کم می‌شود و اگر تعداد پره‌ها کم باشد، ضریب انتقال حرارت زیاد می‌شود و سطح کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به محدودیت‌های ابعادی رادیاتور سعی می‌شود که فاصله پره‌های رادیاتور همان فاصله بهینه به منظور بیشینه انتقال حرارت لحاظ شود.



شکل (۱): رشد لایه مرزی حرارتی بین دو صفحه موازی با دمای ثابت



شکل (۲): کانتور دما و سرعت هوا در انتقال حرارت جابجایی آزاد بین دو صفحه موازی با دمای ثابت



شکل (۳): تغییر ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد نسبت به فاصله سطوح گرم

سه بعدی رادیاتور با سطح مقطع شکل (۴) و ارتفاع ۵۰۰ میلی متر در نرم افزار گمبیت تولید و شبکه بندی شده است. شکل هندسی پره رادیاتور به همراه شبکه تولید شده، در شکل (۵) نمایش داده شده است. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود، شبکه به صورت ساختار یافته ایجاد شده است. در جدول (۱) نتایج استقلال حل از شبکه با مقایسه نتایج ظرفیت حرارتی رادیاتور در شبکه های مختلف نشان داده شده است. در این مطالعه، هندسه با تعداد شبکه ۹۱۴۸۶۸ مورد بررسی قرار گرفت.

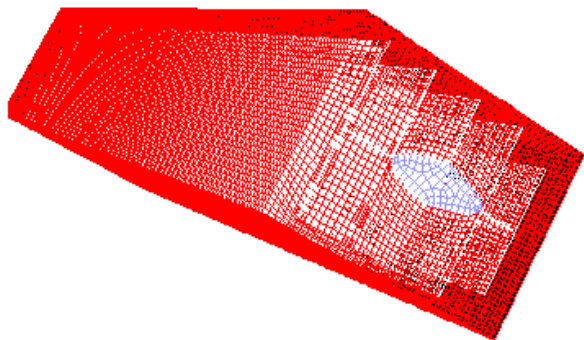
از نرم افزار فلونت برای حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی سه بعدی حاکم بر مسئله، براساس روش حجم محدود بهره گرفته شده است. در روش حجم محدود، ابتدا میدان فیزیکی مربوط به مسئله به حجم کنترل های گسسته ای تقسیم می شود، سپس معادلات حاکم، بر روی هر حجم کنترل انتگرال گیری می شود تا معادلات جبری و گسسته به دست آیند. در گام بعدی معادلات گسسته به دست آمده، خطی سازی می شوند. سیستم معادلات گسسته و خطی سازی شده به صورت همزمان حل می شوند. برای حل مسئله از حل کننده فشار مینا و برای ارتباط فشار و سرعت از رویه سیمپل^۱ استفاده شده است.

جدول (۱): استقلال از شبکه

ظرفیت حرارتی (W)	تعداد شبکه
۱۱۶/۸	۲۱۹۹۳۵
۱۲۵/۱	۵۵۴۰۳۱
۱۲۵/۰	۹۱۴۸۶۸

۵.۲. نتایج محاسبات

برای محاسبه انتقال حرارت جابجایی آزاد رادیاتور از روش حل بوزینسک در نرم افزار فلونت استفاده شده است. دمای متوسط سطح پره رادیاتور و هوای ورودی به ترتیب 80°C و 27°C در نظر گرفته شد.



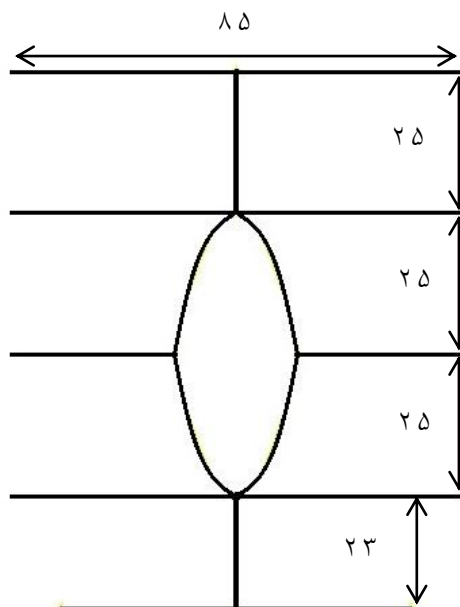
شکل (۵): پره شبکه بندی شده در محیط گمبیت

در راستای افزایش راندمان حرارتی رادیاتور علاوه بر فاصله بهینه بین پره های حرارتی رادیاتور، می توان به نکات زیر نیز اشاره کرد:

۱. از آنجایی که افزایش سطح رابطه مستقیم با نرخ انتقال حرارت دارد، استفاده از سطوحی که تماس مستقیم با منبع حرارتی یعنی لوله حاوی آب گرم دارند، در بهبود انتقال حرارت بسیار مؤثرند.

۲. شکل هندسی سطح مقطع لوله مرکزی جریان آب گرم به عنوان منبع حرارت در یک پره رادیاتور، تاثیر مستقیم در میزان انتقال حرارت از آب گرم به سطوح حرارتی پره دارد. به این منظور، استفاده از لوله های تخت (با سطح مقطع بیضوی) در طرح رادیاتور آلومینیومی توصیه می شود.

بنابر نکات فوق، سطح مقطع رادیاتور مطابق هندسه نشان داده شده در شکل (۴) طراحی و ساخته شد.

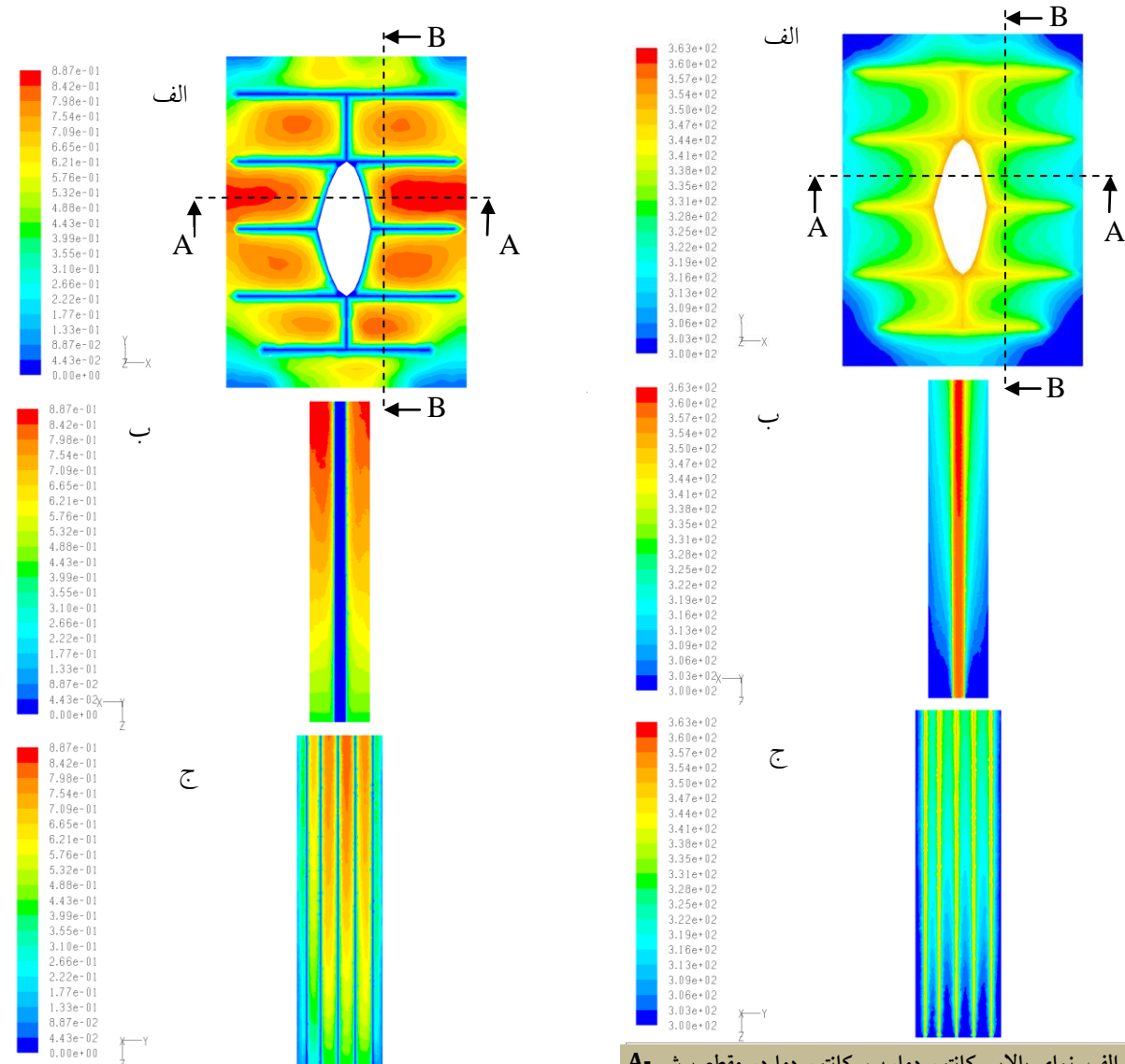


شکل (۴): شماتیک سطح مقطع رادیاتور طراحی شده (اندازه ها بر حسب mm)

۴.۲. مدل سازی عددی

در مدل واقعی، حرارت از طریق هدایت گرمایی به پره ها منتقل می شود. اما در مدل ساده شده سه بعدی برای شبیه سازی انتقال حرارت، شرط مرزی دما ثابت بر روی پره ها به مسئله اضافه شده است. با فرض دمای 90°C و 70°C برای دمای ورودی و خروجی آب، دمای ثابت سطح لوله برابر با 80°C انتخاب شده است. برای حصول نتایجی با دقت بالا، خطای پارامترهای مختلف مورد محاسبه در نرم افزار فلونت کمتر از 10^{-6} لحاظ شده است.

در پره رادیاتور انتقال حرارت جابجایی آزاد و چگونگی جریان های حاصل و همچنین گرادیان دمای ایجاد شده بررسی می شود. هندسه



شکل (۷): الف. کانتور سرعت هوا در مقطع بالایی پره، ب. کانتور سرعت در مقطع برش A-A ج. کانتور سرعت در مقطع برش B-B

شکل (۶): الف. نمای بالایی کانتور دما، ب. کانتور دما در مقطع برش A-A ج. کانتور دما در مقطع برش B-B (دماها بر حسب کلوین)

$$V_m = 0.395 \left(\frac{m}{s} \right) \quad (9)$$

۳. مطالعه تجربی

۱.۳. توصیف اتاق آزمون

رادیاتور یکی از محبوب‌ترین وسایل گرمادهی حرارت مرکزی در ایران و سایر کشورهاست. از طرح‌های مختلف موجود، رادیاتور آلومینیومی با پره‌های بهبوددهنده انتقال حرارت همرفت، معمولاً در کاربرد خانگی و محیط‌های کسب‌وکار و گاهی مکان‌های صنعتی رایج‌اند. در این نوع دستگاه‌ها، آب گرم از طریق کلکتور فوقانی وارد رادیاتور شده و از انشعابات عمودی وارد کلکتور تحتانی می‌شود و سپس از رادیاتور خارج می‌شود. با توجه به اینکه سطح رادیاتور داغ‌تر

پس از اجرای برنامه، کانتور دما و سرعت به‌عنوان نتایج اصلی قابل دستیابی است. نمای بالایی و جانبی کانتور دما در شکل (۶) الف، ب و ج، و کانتور سرعت در شکل (۷) الف، ب و ج به ترتیب نشان داده شده است. با توجه به این دو شکل، مشاهده می‌شود سرعت هوا روی صفحات پره صفر است و در جایی که دمای هوا گرم‌تر است، هوا سرعت بیشتری دارد.

میزان انتقال حرارت یا همان ظرفیت گرمادهی رادیاتور Q ، ضریب انتقال حرارت متوسط h_m و سرعت متوسط هوای خروجی V_m حاصل شده پس از اجرای نرم‌افزار فلونت برابر با مقادیر زیر است:

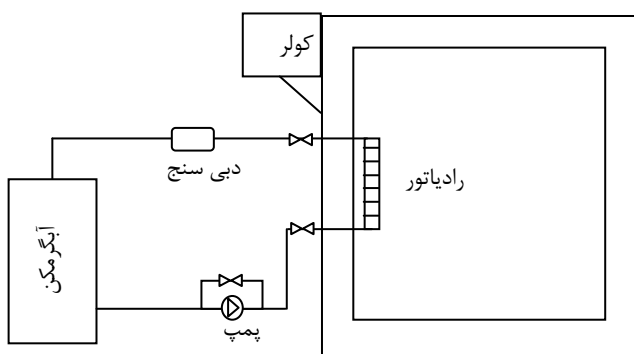
$$Q = 107 \left(\frac{kCal}{hr} \right) = 125 (W) \quad (7)$$

$$h_m = 4.7 \left(\frac{W}{m^2 K} \right) \quad (8)$$

از هوای اطراف آن است، یک مقدار گرما در اثر فرایند جابجایی آزاد به هوا منتقل و در نتیجه، آب در دمای پایین تر خارج می شود. برای مدل سازی تأمین گرمایش ساختمان با رادیاتور و ایجاد شرایط پایدار، لازم است اتاق آزمون به صورت دوجداره ساخته شده و بین دو جداره به روشی خنک نگه داشته شود. این روش ها در استانداردهای ملی ۴۰۲۲ [۵] و ۴۰۲۳ [۱۵] به ترتیب به دو صورت محفظه هوا خنک و محفظه آب خنک تفکیک شده اند. در این استانداردها نحوه قرارگیری تجهیزات اندازه گیری و همچنین دقت آن ها شرح داده شده است. به علاوه، روش تست و طریقه داده برداری و چگونگی ایجاد شرایط پایدار کاملاً تشریح شده است. در اینجا سعی می شود موارد مهم به صورت مختصر شرح داده شود. در استاندارد ملی ۴۰۲۲ فواصل بین دو جداره، میزان عایق بودن دیواره ها و شرایط چرخش هوا بین دو جداره پیشنهاد شده است که اتاق آزمون دقیقاً مطابق با این پیشنهادات ساخته شده است. در کنار این استاندارد، نحوه محاسبه ظرفیت حرارتی از داده های تجربی در استاندارد ایزو ۳۱۵۰ [۱۶] کاملاً تشریح شده است. با توجه به این استاندارد می توان برای هر رادیاتور (یا کانکتور) یک رابطه تجربی استخراج کرد تا به وسیله آن بتوان در هر اختلاف دمای بین متوسط آب رادیاتور (یا کانکتور) و متوسط دمای اتاق، ظرفیت حرارتی و سیله گرمادهی را تعیین کرد.

اتاق آزمون، دمای نقطه مرجع، یعنی حسگر نصب شده در وسط اتاق و دمای محفظه بیرون اتاق را ثبت و کنترل کرد. بیست حسگر دما در نقاط مختلفی در درون اتاق از جمله روی ستون عمودی گذرنده از وسط اتاق، چهار ستون عمودی به فاصله ۰/۸ متر و ۱ متر از دیواره ها و همچنین مرکز هریک از وجوه اتاق نصب شده اند. این حسگرها شرایط پایدار دمایی و توزیع گرادیان دمای اتاق حین تست را نمایش می دهند [۵]. در اتاق تست حسگرهای دما به ترتیب زیر قرار داده شده اند:

۱. یک ترموکوپل در وسط هر شش ضلع داخل اتاق آزمون و همچنین چهار دیواره بین دو جداره تعبیه شده است که مجموعاً ده حسگر دما خواهد شد.
۲. چهار ستون عمودی به فاصله ۰/۸ و ۱ متر از دیواره ها، در داخل اتاق آزمون نصب شده که روی هر ستون دو حسگر دما جاسازی شده است. این حسگر دماها در فواصل ۰/۵ و ۰/۷۵ متری از کف اتاق آزمون روی هریک از این ستون ها قرار دارند که در مجموع هشت حسگر دما را شامل می شوند.



شکل (۸): نمایی از اتاق آزمون و مدار حرارتی

اتاق آزمون استاندارد مطابق شکل (۸)، یک اتاقک دوجداره شامل اتاق آزمون و جداره میانی هوا خنک است. اتاق آزمون مربع شکل با ابعاد $4 \pm 0.2 \times 4 \pm 0.2$ متر مربع و با ارتفاع 2.8 ± 0.2 متر است [۵]. دو سیستم سرمایش تراکمی کنترل دمای اتاق را به عهده دارند. بسته به شرایط دمایی داخل اتاق آزمون، با به کارگیری جداگانه یا همزمان سیستم سرمایش، دمای جداره میانی جهت سرمایش اتاق داخلی تنظیم می شود. جدار خارجی اتاق از یونولیت به ضخامت ۵ سانتی متر و جدار داخلی از نئوپان به ضخامت ۲ سانتی متر ساخته شده است. آب گرمکن به وسیله چهار گرمکن الکتریکی قابل تنظیم، وظیفه تأمین آب گرم ورودی با دمای مشخص به رادیاتور را به عهده دارد. برای ایجاد شرایط پایدار برای دمای اتاقک آزمون و همچنین دمای ورودی و خروجی آب رادیاتور، دستگاه کنترل گرمکن و کولر به نرم افزار مستقر در آزمایشگاه متصل است و این شرایط در کمترین زمان ممکن صورت می گیرد.

۳. چهار ترموکوپل در ستون عمودی مرکز اتاق آزمون، به ترتیب در فواصل ۰/۰۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۵ متر از کف اتاق و یک ترموکوپل به فاصله ۵ سانتی متر از سقف اتاق نصب شده است که مجموعاً پنج حسگر دما خواهد شد.
۴. یک ترموکوپل مقابل رادیاتور به فاصله ۰/۳ متر از کف اتاق تعبیه شده است.

برای کنترل دمای آب، دو عدد حسگر در ورودی و خروجی رادیاتور و یک عدد حسگر درون منبع آب قرار داده شده است. تمام ترموکوپل ها به سیستم داده برداری متصل شده اند. در شکل (۹) نمایی از اتاق، سیکل جریان گرمایش رادیاتور و مکان قرارگیری حسگرهای دما نمایش داده شده است.

برای کنترل دمای اتاق، بیست عدد ترموکوپل یا حسگر دما از نوع PT100 با دقت $\pm 0.2^\circ\text{C}$ در درون اتاق و چهار عدد حسگر دما در جداره میانی، مطابق با استاندارد جانمایی شده اند و دما را در هر ثانیه نشان می دهند. با استفاده از این حسگرهای دما می توان دمای میانگین

برای محاسبه ظرفیت حرارتی رادیاتور، برنامه‌ای در نرم‌افزار EES^۱ با توجه به روش و روابط ارائه‌شده در استاندارد ایزو ۳۱۵۰ [۱۵] تهیه شده است. بنابراین، بعد از هر آزمون با وارد کردن داده‌های تجربی به این برنامه، ظرفیت حرارتی رادیاتور محاسبه می‌شود.

۳.۳. روش آزمون

در مرحله اول آزمون مطابق با استاندارد ملی ۴۰۲۲ [۵]، دمای آب ورودی به رادیاتور ($T_{w,i}$)، 90°C و دمای آب خروجی از رادیاتور ($T_{w,o}$)، 70°C است که در این صورت، دمای متوسط رادیاتور ($T_{w,m}$) برابر 80°C خواهد شد. اختلاف دمای ترموکوپل‌های ورودی و خروجی رادیاتور باید در طول آزمون با دقت $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ثابت بماند. هر تست گرمادهی رادیاتور، حداقل در سه دمای مختلف متوسط رادیاتور به ترتیب 80°C ، 65°C و 50°C با رواداری $\pm 5^{\circ}\text{C}$ انجام می‌گیرد. همچنین مطابق استاندارد، در تست اول می‌بایست اختلاف دمای بین ورودی و خروجی در رادیاتور $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ تنظیم شود. در این شرایط دبی جریان آب رادیاتور تنظیم می‌شود و برای دو مرحله بعد ثابت نگه داشته می‌شود. تست استاندارد در شرایط پایدار انجام می‌گردد و برای رسیدن به شرایط پایدار باید دمای نقطه مرجع، حسگر دمای نصب‌شده در وسط اتاق، با دقت $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ به مدت یک ساعت در دمای بین ۱۹ تا 21°C ثابت باقی بماند. با توجه به طولانی بودن مسیر حسگرهای دما و سیم‌های رابط، تغییرات میدان جریان اطراف سیم‌ها و نیروی محرکه القایی می‌تواند ولتاژ اندازه‌گیری‌شده حسگرهای دما را شدیداً تحت تأثیر قرار دهد، لذا این امر موجب خطای اندازه‌گیری زیاد می‌شود. برای رفع این اشکال، از سیم‌هایی با روکش آلومینیومی استفاده شده است.

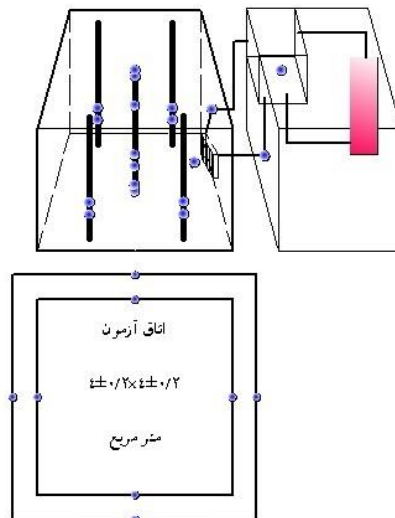
با توجه به دمای ورود و دمای خروج آب رادیاتور و همچنین دبی آب گرم گذرنده از رادیاتور \dot{m} ، نرخ انتقال حرارت رادیاتور به محیط با رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$Q = \dot{m}c(T_{w,i} - T_{w,o}) \quad (10)$$

از طرفی، با تعریف دمای متوسط رادیاتور $T_{w,m}$ ، که متوسط دمای ورود و خروج آب رادیاتور است، در صورت معلوم بودن ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد h ، نرخ انتقال حرارت رادیاتور را با رابطه زیر نیز می‌توان محاسبه کرد:

$$Q = hA(T_{w,m} - T_a) \quad (11)$$

که در آن، A سطح انتقال حرارت بیرونی رادیاتور و T_a متوسط دمای هوای داخل اتاق است. با توجه به مجهول بودن ضریب انتقال حرارت



شکل (۹): نمایی از اتاق آزمون و موقعیت حسگرهای اندازه‌گیری دما

۲.۳. تجهیزات اتاق آزمون

تجهیزات عمده مورد استفاده در این پژوهش، اعم از وسایل اندازه‌گیری و سیکل گرمایش عبارت‌اند از: پکیج گرمایش آب گرم، چیلر، هواساز، پمپ، حسگرهای اندازه‌گیری دما از نوع ترموکوپل PT100، دبی‌سنج نوع توربینی، فشارسنج نوع دیفرانسیلی، رطوبت‌سنج، شیر تنظیم دبی، واحد کنترل، دستگاه داده‌برداری و کامپیوتر.

به‌منظور اطمینان از دقت کافی حسگرهای نصب‌شده، کالیبراسیون آن‌ها با دقت بالا انجام شده است. کالیبراسیون دماسنج مقاومتی پلاتینی از طریق مقایسه با دماسنج استاندارد ثانویه در محفظه عایق‌بندی‌شده صورت گرفته است. همچنین سنسورهای فشارسنج دیفرانسیلی و دبی‌سنج نیز توسط شرکت‌های دارای پروانه، کالیبره شده است. دقت دماسنج، فشارسنج و دبی‌سنج مطابق با مشخصات سازنده به ترتیب برابر با $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ، 1 کیلو پاسکال و ± 0.2 لیتر بر دقیقه است.

برای کنترل تجهیزات آزمایشگاه و شرایط اتاق آزمون، از نرم‌افزاری به‌منظور ارتباط سیستم کنترل با کامپیوتر استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر است دمای تمام حسگرهای دما، اختلاف فشار دو سر رادیاتور، دبی جریان آب و رطوبت نسبی داخل اتاق را به‌طور لحظه‌ای نمایش دهد (شکل ۲). به کمک این نرم‌افزار می‌توان گرمکن‌ها و کولر را در هر زمان که لازم باشد، خاموش یا روشن کرد. همچنین، شیر تنظیم دبی برای ایجاد شرایط آزمون قابل کنترل است. مشخصه دیگر نرم‌افزار نشان دادن روند تغییرات دما در اتاق است. با انتخاب هر کدام از حسگرهای نصب‌شده در مجموعه، می‌توان تغییرات آن‌ها را زیر نظر داشت و اقدامات لازم برای رسیدن به شرایط پایدار آزمون را فراهم کرد.

با این رابطه، ظرفیت حرارتی برای هر اختلاف دمای متوسط اتاق و متوسط رادیاتور قابل محاسبه است. اختلاف دمای ۵۰ و ۶۰°C به ترتیب معرف ظرفیت رادیاتور مطابق استاندارد اروپایی و ایزو می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج تجربی مندرج شده در جدول (۲) ظرفیت حرارتی این رادیاتور مطابق استاندارد اروپایی برابر 1 kCal hr^{-1} و ۱۰۷ و مطابق استاندارد ایزو 1 kCal hr^{-1} است.

مطابق با فرضیات صورت گرفته برای دمای سطح و دمای هوا در بررسی عددی، اختلاف دمای بین سطح و هوا برابر است با:

$$\Delta T = 353 - 300 = 53 \text{ K} \quad (16)$$

بنابر این، با توجه به رابطه تجربی (۱۵)، میزان انتقال حرارت هر پره برابر است با:

$$Q = 0.97144(53)^{1.2026} = 115 (\text{kCal.hr}^{-1}) = 134 \text{ (W)} \quad (17)$$

بنابراین، درصد خطای نسبی بین مدل عددی و نتیجه تجربی برابر است با:

$$\varepsilon = \frac{134 - 125}{134} \times 100 = 6.7\% \quad (18)$$

چنین خطایی به ما اجازه می‌دهد که برای کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی، از مدل عددی برای طراحی و بهینه‌سازی رادیاتورها کمک بگیریم. به علاوه با داشتن مدل عددی اطلاعات مفید دیگری از جمله میزان ضریب انتقال حرارت متوسط پرها و متوسط سرعت بین پرها جهت طراحی بهینه، محاسبه کارایی و بازدهی پره در دسترس خواهد بود.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک رادیاتور آلومینیومی به وسیله روش عددی بر مبنای فاصله بهینه بین پرها طراحی شد. در این شبیه‌سازی، اطلاعات مفیدی از قبیل کانتور دما و سرعت و همچنین ظرفیت حرارتی رادیاتور به دست آمد. برای اندازه‌گیری واقعی ظرفیت حرارتی رادیاتور، اتاق آزمون رادیاتور خانگی براساس استاندارد معتبر ملی معرفی و روش تست آن شرح داده شد. هدف نهایی طراحی و ساخت این اتاق، استخراج ظرفیت حرارتی و مرجعی جهت طراحی بهینه این گونه مبدل‌های حرارتی است. طراحی صحیح تأسیسات گرمایشی منازل، سازمان‌ها و ادارات، منوط به در دست داشتن اطلاعاتی صحیح درباره وسایل گرمایشی نظیر رادیاتور است که از طریق آزمایش در اتاق استاندارد حاصل می‌شود. در این آزمون، رابطه تجربی ظرفیت حرارتی رادیاتور براساس اختلاف دمای سطح رادیاتور و هوای اتاق حاصل گردید. مقایسه بین نتایج تجربی ظرفیت گرمادهی رادیاتور با نتایج شبیه‌سازی عددی اختلاف ناچیزی با خطای ۶/۷٪ در پی داشت.

جایابی آزاد h در رابطه (۱۱)، از داده‌های آزمایش می‌توان استفاده کرد و Q را از رابطه (۱۰) محاسبه و برحسب $(T_{w,m} - T_a)$ رسم کرد و بهترین چند جمله‌ای گذرنده از داده‌ها را به دست آورد:

$$Q = \beta (T_{w,m} - T_a)^n \quad (12)$$

مطابق با استاندارد ایزو ۳۱۵۰، β و n از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۶]:

$$\log \beta = \frac{\sum \log Q \cdot \sum (\log \Delta T)^2 - \sum \log \Delta T \cdot \sum \log Q}{N \sum (\log \Delta T)^2 - (\sum \log \Delta T)^2} \quad (13)$$

$$n = \frac{N \sum \log \Delta T \cdot \sum \log Q - \sum \log \Delta T \cdot \sum \log Q}{N \sum (\log \Delta T)^2 - (\sum \log \Delta T)^2} \quad (14)$$

که $\Delta T = T_{w,m} - T_{w,in}$ و N تعداد دفعات آزمایش است. شایان ذکر است انتقال حرارت نامی رادیاتور در فشار اتمسفر (P_{ref}) محاسبه می‌شود. نکته حائز اهمیت آن است که با استفاده از این رابطه تجربی می‌توان ظرفیت رادیاتور را برای هر اختلاف دمای متوسط سطح رادیاتور و متوسط هوای اتاق محاسبه کرد.

جدول (۲): شرایط آزمون تجربی رادیاتور

آزمون	دمای ورود °C	دمای خروج °C	دمای مرجع °C	دبی آب CC min ⁻¹
مرحله اول	۸۸/۴۰	۶۷/۲۵	۲۰/۴۳	۱۰۵۷
	۸۷/۹۵	۶۷/۶۵	۲۰/۳۴	۱۰۶۰
	۸۸/۲۲	۶۷/۴۷	۲۰/۳۷	۱۰۵۸
	۸۷/۹۱	۶۷/۷۰	۲۰/۵۱	۱۰۳۶
مرحله دوم	۷۵/۲۷	۵۸/۳۵	۱۹/۸۷	۱۰۵۱
	۷۴/۳۵	۵۸/۹۱	۱۹/۸۷	۱۰۴۰
	۷۴/۳۵	۵۸/۵۵	۱۹/۹۶	۱۰۳۱
	۷۴/۹۷	۵۸/۳۳	۱۹/۸۷	۱۰۱۷
مرحله سوم	۶۵/۴۴	۵۲/۲۴	۱۹/۸۵	۱۰۳۹
	۶۵/۱۹	۵۲/۵۰	۱۹/۷۷	۱۰۴۶
	۶۵/۱۱	۵۲/۵۱	۱۹/۸۷	۱۰۳۸
	۶۵/۵۸	۵۲/۴۹	۱۹/۹۲	۱۰۳۲

۴. نتایج تجربی

مطابق با رویه تست استاندارد، آزمون بر روی یک رادیاتور با ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر انجام شد. شرایط آزمون تجربی این آزمایش برای سه مرحله در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به داده‌های استخراج شده، ظرفیت حرارتی رادیاتور، برحسب کیلوکالری بر ساعت به ازای هر پره رادیاتور مطابق رابطه (۱۲)، از رابطه تجربی زیر به دست می‌آید.

$$Q = 0.97144 (T_{w,m} - T_a)^{1.2026} \quad (15)$$

- [1] International Standard ISO 3148, "Radiators, Convectors and Similar Appliances- Determination of Thermal Output – Test Method Using Air-Cooled Closed Booth", 1975-07-01.
- [2] AFNOR 442-1, "European Standard for Water Radiators NF EN", Paris.
- [3] AFNOR 442-2, "European Standard for Water Radiators NF EN", Paris.
- [4] AFNOR 442-3, "European Standard for Water Radiators NF EN", Paris.
- [5] ISIRI No. 4022, "Radiators, Convectors and Similar Appliances- Determination of Thermal Output –Test Method Using Air-Cooled Closed Booth", in persian.
- [6] B.W. Olesen, E. Mortensen, J. Thorshauge, "Thermal Comfort in a Room Heated by Different Methods", Technical Paper no. 2256, Los Angeles Meeting, ASHRAE Transactions 86, 1980.
- [7] J.A. Myhren, S. Holmberg, "Flow Patterns and Thermal Comfort in a Room with Panel, Floor and Wall Heating", Journal of Energy and Buildings 40/4, pp. 524– 536, 2008.
- [8] S. Holmberg, F. Molin, J.A. Myhren, "Space Heating at Low Temperature Difference Between Heating Unit and Ambient Air", 9th International Conference on Air Distributions in Room, Coimbra, Portugal, September, pp. 162–163, 2004.
- [9] J. Miriel, S. Pretot, L.Serres, T. Mare. "Low Temperature Vertical Water Radiator, Study of Thermal Exchanges and Numerical Visualization of Air Velocity Fields". Proceedings of FLUCOME 2000, Sherbrooke, Canada, August 2000.
- [10] S. shahryari, "Experimental and Theoretical Investigation of Household Radiator for Optimization Design", MSc. Thesis, Sharif University of Technology, 1994 (In Persian).
- [11] S.M.B. Beck et.al, "A Novel Design for Panel Radiators", Applied Thermal Engineering 24, pp. 1291–1300, 2004.
- [12] Jonn Are Myhren, "Sture Holmberg, Performance Evaluation of Ventilation Radiators", Applied Thermal Engineering 51, pp. 315-324, 2013.
- [13] A.A. Rostami, "Introduction to Heat Transfer (translation)", Isfahan University of Technology publication, 2000, in persian.
- [14] Fluent Incorporated, GAMBIT: "Modeling Guide", Fluent Incorporated, Lebanon, NH, USA, 1999.
- [15] ISIRI No. 4023, "Radiators, Convectors and Similar Appliances- Determination of Thermal Output –Test Method Using Liquid-Cooled Closed Booth", in persian.
- [16] International Standard ISO 3150, "Radiators, Convectors and Similar Appliances- Calculation of Thermal Output and Presentation of Results", 1975-07-01.