

بررسی و مقایسه تجربی و عددی عملکرد رادیاتور قرنیزی و رادیاتور پانلی

سجاد نوریان

هادی پاسدار شهری*

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله مقایسه تجربی و عددی دو رادیاتور قرنیزی و رادیاتور پانلی ارائه شده است. ظرفیت نامی دو رادیاتور مورد آزمون ۱۲۰۰ کیلوکالری بر ساعت بود. در بخش تجربی ظرفیت، معادله مشخصه و توزیع دمای هر دو رادیاتور در اتاقی با ابعاد $4 \times 4 \times 2.6$ متری با دمای هوای محیط برابر بدست آمد. نتایج تجربی حاکی از توزیع دمای یکنواخت تر برای رادیاتور قرنیزی بود، به طوریکه اختلاف دما در راستای ارتفاع در مرکز اتاق برای رادیاتور پانلی در ظرفیت‌های مختلف بین ۳ تا ۷ درجه سلسیوس تغییر می‌کرد، در حالیکه برای رادیاتور قرنیزی در تمامی ظرفیت‌ها اختلاف دما در حد ۲ درجه سلسیوس بود. در صفحه افقی نیز اختلاف دمای دیواره‌ای رادیاتور پانلی در آن نصب شده بود تا دیواره روبه رویی در ارتفاع ۱٫۵ متری بین ۳ تا ۶ درجه سلسیوس بود در حالیکه برای نمونه قرنیزی این نتیجه در حد ۰٫۵ درجه سلسیوس بود. نتایج حاصل از حل عددی با خطای بیشینه ۱۰ درصد تطابق مناسبی با نتایج تجربی داشتند. بررسی توزیع سرعت در صفحه تقارن عمودی اتاق نشان دهنده گردش هوای مناسب رادیاتور قرنیزی است.

واژه‌های کلیدی: رادیاتور قرنیزی، رادیاتور پانلی، مقایسه عددی و تجربی، دما و سرعت.

Experimental and Numerical Evaluation and Comparison of the Performance of Baseboard and Panel Radiators

S. Noorian

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

H. Pasdarshahri

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, experimental and numerical comparison of Baseboard radiator and Panel radiator are presented. Rated capacity of both radiators was 1200 kcal per hour. In the experimental section, at the same ambient temperature for both radiators, capacity and characteristic equation and temperature distribution in a room with dimensions of $2.6 \times 4 \times 4$ meter was obtained. The experimental results showed that a Uniform Temperature distribution occurs in the room for the Baseboard radiator, Temperature difference in vertical direction for center of the room for the Panel radiator in various capacities changes 3°C to 7°C , While for the Baseboard radiator at all capacities temperature difference was about 2°C . Temperature difference at height of 1.5 m in horizontal direction from wall that the Panel radiator was installed to facing wall, changes 3°C to 6°C . While for the Baseboard radiator, this result was about 0.5°C . To investigate the cause of the temperature distribution, numerical modeling was used. Numerical results and experimental results were close with 10% error. Temperature distribution curves At plane of symmetry room for both samples was drawn, Baseboard radiators were more uniform temperature distribution again. In the end, the velocity distribution diagram in the vertical plane of symmetry room was obtained which show that a strong circulation occurs in the room for the Baseboard radiator.

Keywords: Baseboard radiator, Panel radiator, Numerical and Experimental Comparison, Temperature and Velocity distribution

خود براساس جنس، آلیاژ، شکل و نوع انتقال گرما تقسیم بندی‌های مختلفی دارند. از جمله انواع رایج رادیاتورها می‌توان رادیاتور پانلی^۱، رادیاتور پره‌ای^۲، رادیاتور حوله‌ای^۳ و رادیاتور قرنیزی^۴ را نام برد. استفاده از گرمکن‌های قرنیزی به سال ۱۹۵۰ برمی‌گردد[۲]. این نوع رادیاتورها بیش از یک دهه است، که در اروپا مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینرسی حرارتی پایین‌تر رادیاتورهای قرنیزی نسبت به سایر سیستم‌ها در مکان‌هایی که نیاز به گرمایش سریع محیط دارند می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند[۳]. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که گرادپان دما در یک اتاق با ارتفاع ۲٫۵ متر برای

۱- مقدمه

امروزه حدود ۴۰٪ از مصرف انرژی و ۳۰٪ از دی‌اکسیدکربن تولیدی در جهان ناشی از بخش ساختمان است[۱]. بنابراین استفاده از سامانه‌های حرارتی با راندمان بالا و عملکرد مناسب در ساختمان ضروری است. این سامانه‌ها باید دو ویژگی داشته باشند:

- کمترین میزان مصرف انرژی
- تامین شرایط آسایش حرارتی

تنوع زیادی از وسایل حرارتی برای رسیدن به این دو هدف وجود دارد. یکی از مهم‌ترین بخش‌های سامانه گرمایش ساختمان، پایه‌های حرارتی نهایی است، که می‌توان آن را منتقل کننده انرژی از سیستم گرمایش به ساختمان نامید. از متداول‌ترین انواع پایه‌ها می‌توان به رادیاتور، فن کویل، بخاری و گرمایش از کف اشاره کرد. رادیاتورها نیز

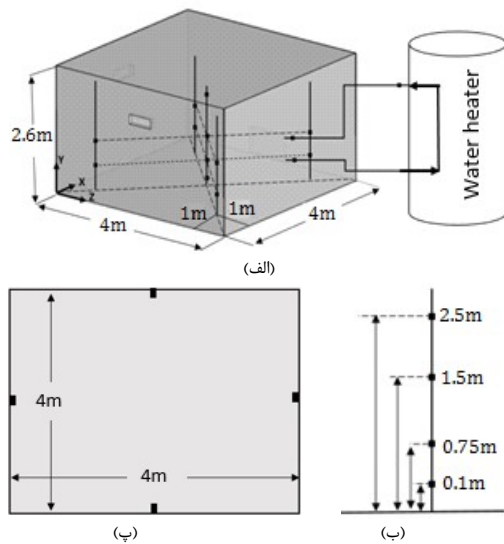
¹Panel radiator

²Fin radiator

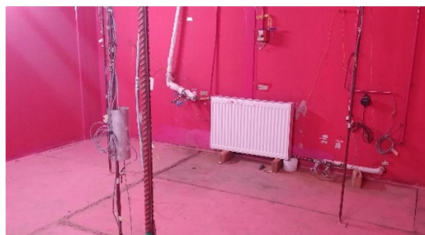
³Towel radiator

⁴Baseboard radiator

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، سیستم آزمایشگاهی دارای یک گرمکن آب می‌باشد. در مجموع ۱۹ حسگر دما از نوع PT100 با حداکثر خطای ۰/۵ درجه سلسیوس در اتاق قرار دارد. حسگرهای دمایی در ستون‌های تعبیه شده در اتاق قرار گرفته‌اند. سه حسگر برای اندازه‌گیری دمای آب خروجی از گرمکن و ورودی و خروجی از رادیاتور استفاده شده است، همچنین برای اندازه‌گیری دمای اتاق و دیواره‌ها به ترتیب، ۱۲ و ۴ حسگر تعبیه شده است. حسگرها با ریزنگری ۰/۱ به فاصله ۳ ثانیه‌ای داده برداری کرده و با استفاده از میکروکنترلر ثبت شده و در کامپیوتر به نمایش درآمدند. در شکل ۲ و ۳ رادیاتور پانلی و قرنیزی نصب شده برای آزمون نمایش داده شده است. در جدول ۱ نیز اطلاعات کاتالوگی مربوط به این دو رادیاتور ارائه شده است.



شکل ۱- اتاق آزمون (الف) - اتاق آزمون. ب- دماسنج های عمودی وسط اتاق. پ- نما از بالا



شکل ۲- رادیاتور پانلی در حین آزمون



شکل ۳- رادیاتور قرنیزی در حین آزمون

رادیاتورهای قرنیزی که در پایین پنجره قرار داده شده‌اند کمتر از ۳°C خواهد بود [۴]. راسل نشان داد که در حالت اختلاف دمای یکسان بین آب ورودی و دمای اتاق، ظرفیت حرارتی رادیاتورهای قرنیزی بیشتر از پانلی است [۵]. پولسکیک و هومبرگ در یک مطالعه عددی نشان دادند که گرمکن‌های قرنیزی به خوبی با سیستم‌های دما پایین کار می‌کنند [۳]. همچنین پولسکیک و هومبرگ نشان دادند که با ترکیب رادیاتور قرنیزی که هوا را نیز پیش گرم می‌کند می‌توان با کاهش اتلاف گرمایی مسیر انتقال به عملکرد بهتری از لحاظ حرارتی دست یافت. با توجه به مطالعه ایشان، با افزایش دبی هوای ورودی تا ۷ لیتر بر ثانیه انتقال گرما در حدود ۲/۱ برابر رادیاتورهای قرنیزی معمولی می‌شود [۶]. کرابی در تحقیقی به صورت عددی نشان داد در سیستم‌های گرمایش از کف چرخش هوا بسیار بیشتر است، دمای کف اتاق و یکنواختی دمای بهتری در اتاق حاصل می‌شود [۷]. پولسکیک و هومبرگ توانستند بر اساس کار تجربی و تحلیلی خود رابطه (۱) را برای محاسبه ظرفیت رادیاتور قرنیزی بر حسب ارتفاع رادیاتور و اختلاف دمای آب ورودی با دمای محیط ارائه کنند [۸]:

$$\phi(H, \Delta\theta) = 2.11 \times H^{0.313} \times \Delta\theta^{1.246-0.147H} \quad (1)$$

ذوالفقاری و سخاوت‌مند [۹] مطالعه‌ای در خصوص تاثیر نفوذ هوا از درز پنجره بر آسایش حرارتی انجام دادند و نشان دادند که با دمای سطح پانل ۴۳ درجه سلسیوس برای رادیاتور قرنیزی سطح آسایش حرارتی مناسبی برای ساکنان اتاق حاصل می‌شود اما در حالت نفوذ هوا از درز پنجره درصد ناراضی افرادی در کف اتاق تا ۴۰٪ افزایش پیدا می‌کند.

با توجه به مطالعات پیشین، رادیاتورهای قرنیزی دارای توزیع دمای یکنواخت‌تری نسبت به سایر رادیاتورها هستند و می‌توانند در زمان کوتاه‌تری محیط را گرم کنند، اما تا کنون تحقیقی با هدف مقایسه رادیاتور پانلی و قرنیزی در ظرفیت و شرایط محیطی یکسان صورت نگرفته است. در میان تحقیقات داخلی نیز تا کنون هیچ تحقیق تجربی برای اندازه‌گیری ظرفیت و مقایسه توزیع دمای رادیاتورهای پانلی و قرنیزی ارائه نشده است. در این مطالعه هدف بررسی تجربی توزیع دما، معادله مشخصه و ضریب انتقال گرمای دو پایانه حرارتی پانلی و قرنیزی در ظرفیت گرمایی و شرایط محیطی یکسان و یافتن علت تفاوت توزیع دما با استفاده از روش‌های عددی است.

۲- فضای آزمون

فضای آزمون بر طبق استاندارد ملی رادیاتور به شماره ۳۶۰-۲ [۱۰] طراحی شده است. مطابق این استاندارد اتاق آزمون بدون هیچ‌گونه مسیر ورود و خروج هوا و در ابعاد ۴×۴×۲/۵ متری ساخته شده است [۱۱]. دمای دیواره‌های جانبی اتاق آزمون با استفاده از روش هوا خنک و با استفاده از چیلر و هواساز کنترل می‌شود. دیواره‌های اتاق از جنس چوب پوشش داده شده با رنگ قرمز مات است. بعد از نصب پایانه حرارتی و رسیدن دمای مرجع اتاق به حالت پایا، تعادل حرارتی با محیط اطراف برقرار می‌شود. (شکل ۱) طرحواره اتاق آزمون و محل قرارگیری حسگرهای دما را نشان می‌دهد.

¹PPD

در رابطه (۳) s_k و n_p به ترتیب ضریب حرارت دهی تابشی و توان تصحیح فشار نامیده می‌شوند که از جدول ۴ استاندارد ملی ۲-۳۶۰ خوانده می‌شوند، P_0 و P به ترتیب فشار جو در محل آزمون و در شرایط مرجع هستند. بعد از محاسبه ظرفیت برای ۳ دمای آب ورودی آزمون شده در واقع ۳ نقطه از نمودار ظرفیت بر حسب دمای مازاد^۱ (اختلاف دمای میانگین آب ورودی و خروجی رادیاتور با دمای مرجع اتاق) بدست آمده است که در این مرحله با استفاده از روش حداقل مجذورات [۱۲] خطی با کمترین خطای ممکن از این ۳ نقطه برازش داده شد. این خط نشان‌دهنده نمودار حرارت‌دهی بر طبق دمای مازاد است. برای استفاده از روش حداقل مجذورات معادله شاخص رادیاتور به صورت (۴) پیش‌بینی شد. در معادله (۴) ضرایب با استفاده از روش حداقل مجذورات از روابط (۵) و (۶) بدست می‌آیند [۱۱].

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_s = K_m \Delta T^n \\ \Delta T = T_{mean} - T_{ref} \\ T_{mean} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$n = \frac{N \sum (\log \Delta T \times \log \phi) - \sum (\log \Delta T) \times \sum \log \phi}{N \sum [\log \Delta T]^2 - (\sum \log \Delta T)^2} \quad (5)$$

$$= \frac{\log K_m}{\frac{\sum \log \phi \cdot \sum [\log \Delta T]^2 - \sum (\log \Delta T \cdot \log \phi) \cdot \sum (\log \Delta T)}{N \sum [\log \Delta T]^2 - (\sum \log \Delta T)^2}} \quad (6)$$

۳-۳- نتایج

نتایج محاسبات در جدول ۲ آورده شده است. جدول ۳ ضرایب معادله مشخصه محاسبه شده با استفاده از روابط (۴ تا ۶) را نشان می‌دهد. ظرفیت حرارتی برای ($\Delta T = 60^\circ\text{C}$) نیز براساس معادله شاخص بدست آمده تقریب زده شد. ظرفیت حرارتی بدست آمده کمتر از ۵ درصد با ظرفیت حرارتی اعلامی سازنده متفاوت است. در شکل ۴ ظرفیت حرارتی استاندارد هر دو رادیاتور برحسب دمای مازاد رسم شده است.

در هر دو آزمون بار گرمایی کاملاً یکسانی وجود داشت، آزمون‌ها در حالی انجام شده‌اند که دمای بیرون اتاق در طول تمام آزمون‌ها در محدوده $15 \pm 1^\circ\text{C}$ حفظ شد. آزمون‌ها در شرایط برابر فشار جو، اتاقک آزمون، ابزار اندازه‌گیری و آزمونگر یکسان صورت گرفته‌اند. در بررسی توزیع دما نتایج حاصل از آزمون در هر سه دمای ورودی آب آورده شده است. تمامی دماها پس از پایداری کامل دمای مرجع اتاق ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) در مدت زمان یک ساعت (هر ۱۰ دقیقه یک بار) و با میانگین‌گیری حسابی از ۶ دمای اندازه‌گیری شده ثبت شد. رسیدن به شرایط پایا تابعی از دمای خارج اتاق است، با توجه به برابری دمای خارج در هر دو آزمون مشاهده شد که در رادیاتور قرنیزی زمان رسیدن به شرایط پایا بیست دقیقه است در حالی که برای رادیاتور پانلی این زمان شصت و پنج دقیقه بود، این امر حاکی از لختی پایین‌تر رادیاتور قرنیزی است. در ارتفاع ۱٫۵ متری و در فاصله ۱۰ سانتیمتری از مرکز هر دیوار یک حسگر در داخل اتاق قرار گرفته، برای مقایسه توزیع دما در صفحه تقارن عمودی در ($Z=2m$) برای هر سه دمای ورودی آب به رادیاتور نمودار توزیع دما در شکل ۵ رسم شده است. برای رادیاتور پانلی اختلاف دمای دیواره‌ها بین ۳ تا ۶ درجه سلسیوس است. در حالی که

جدول ۱- اطلاعات رادیاتورها

پارامتر	واحد	رادیاتور پانلی	رادیاتور قرنیزی
طول	mm	۸۰۰	۸۳۰۰
ارتفاع	mm	۶۰۰	۱۵۳
پهنا	mm	۱۰۰	۴۱
ظرفیت حرارتی کاتالوگ	kcal/h	۱۲۰۰	۱۲۰۰

۳- آزمون تجربی

۳-۱- روش آزمون

آزمون پس از نصب کامل رادیاتورها مطابق با دستورالعمل سازنده، در اتاق آزمون تشریح شده در بند ۲ مطابق با استاندارد ملی به شماره ۲-۳۶۰ انجام شده است. بر طبق استاندارد، رادیاتور در یک چرخه بسته که مطابق با شرایط کارکرد رادیاتورها در منازل است بکار گرفته می‌شود. گرمایش چرخه به‌وسیله یک گرمکن برقی صورت گرفته، گرمکن دارای ۴ المان گرمایش است که مطابق با میزان ظرفیت رادیاتور به ترتیب وارد مدار می‌شوند. دمای آب ورودی و خروجی رادیاتور به ترتیب از طریق تغییر ظرفیت گرمایی گرمکن برقی و تغییر دبی آب کنترل می‌شوند. در تمام فرآیند آزمون دماها به وسیله میکرو کنترلگر مانیتور و ثبت می‌شود. به صورت خلاصه مراحل آزمون به شرح زیر انجام شده است:

- با استفاده از یک چرخه بسته و گرمکن برقی، آب ورودی رادیاتور به دمای 90°C رسانده شد.
- با تغییر دبی آب دمای مرجع اتاق (حسگر دمای نصب شده بر روی میله مرکز اتاق که در ارتفاع ۷۵ سانتی متر با یک روپوش محافظت کننده در برابر اثرات تابش قرار گرفته است) به $20 \pm 1^\circ\text{C}$ رسانده شد. مطابق استاندارد برای بدست آوردن ظرفیت حرارتی رادیاتور این محدوده دما الزامی است [۱۱].
- بعد از پایدار شدن دمای مرکز اتاق و آب ورودی، در مدت زمان یک ساعت به فاصله ده دقیقه یک بار تمامی دماها ثبت شد.
- همین روند برای دماهای آب ورودی ۵۰ و ۷۰ درجه سلسیوس برای بدست آوردن معادله شاخص رادیاتورها تکرار شد.

۳-۲- محاسبات

با توجه به داده‌های آزمون، معادله مشخصه رادیاتور که بر طبق آن ظرفیت استاندارد در هر دما تعیین می‌شود قابل حصول است. برای محاسبه حرارت‌دهی استاندارد، مقدار حرارت آزاد شده با ضرب دبی آب در اختلاف آنتالپی آب ورودی و خروجی، طبق معادله (۲) محاسبه شده است. این مقدار گرما با توجه به فشار اتاق نسبت به شرایط مرجع (دمای 15°C و فشار هوای 101325 mbar) با استفاده از رابطه (۳)، اصلاح می‌شود.

$$\phi_m = q_m \times (h_{in} - h_{out}) \quad (2)$$

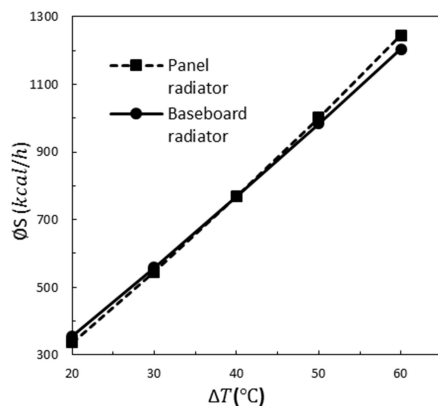
$$\phi = \phi_m \times \left(s_k + (1 - s_k) \left(\frac{P_0}{P} \right)^{n_p} \right) \quad (3)$$

¹ Excess temperature

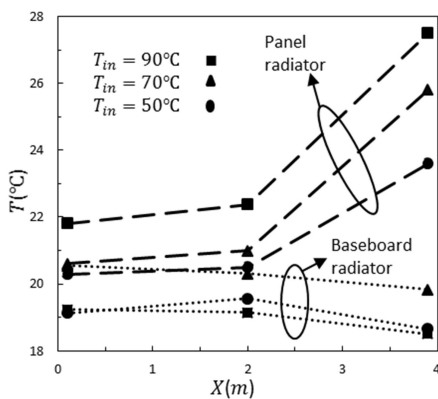
برای رادیاتور قرنیزی این اختلاف در حد ۰.۵ درجه سلسیوس است.

جدول ۲- ظرفیت رادیاتور پانلی و قرنیزی برای ۳ دمای آب ورودی مختلف

ردیف	$T_{ref}(^{\circ}C)$	$T_{in}(^{\circ}C)$	$T_{out}(^{\circ}C)$	$q(kg/s)$	$T_{mean}(^{\circ}C)$	$\Delta T(^{\circ}C)$	$h_{in}(kJ/kg)$	$h_{out}(kJ/kg)$	$\phi_m(kcal/h)$	$\phi(kcal/h)$
رادیاتور پانلی	۱۹,۴۵	۹۰,۲۹	۶۹,۶۹	۰,۰۱۶	۷۹,۹۹	۶۰,۵۴	۳۷۷,۹۹	۲۹۱,۵۸	۱۱۸۱,۰۱	۱۲۲۳,۳۳
	۲۰,۷۳	۷۰,۰۷	۵۶,۴۴	۰,۰۱۶	۶۳,۲۵	۴۲,۵۲	۲۹۳,۱۳	۲۳۶,۱۴	۷۹۰,۵۴	۸۱۷,۸۷
	۲۰,۳۴	۵۲,۰۶	۴۳,۶۱	۰,۰۱۶	۴۷,۸۳	۲۷,۵۰	۲۱۷,۸۶	۱۸۲,۵۶	۴۹۱,۲۱	۵۰۸,۸۱
رادیاتور قرنیزی	۲۰,۳۶	۹۱/۰۱	۷۰,۳۰	۰,۰۲	۸۰,۶۶	۶۰,۳۰	۳۸۱,۰۲۵۱	۲۹۴,۱۰۹۴	۱۲۳۶,۳	۱۲۸۰,۶
	۱۹,۸۷	۷۰,۰۵	۵۶,۴۴	۰,۰۲	۶۳,۲۵	۴۳,۳۸	۲۹۳,۰۶۹۸	۲۳۶,۱۶۱۲	۸۰۷,۴۶	۸۳۶,۳۹
	۲۰,۱۷	۵۰,۶۰	۴۲,۸۵	۰,۰۲	۴۶,۷۳	۲۶,۵۶	۲۱۱,۷۰۶۵	۱۷۹,۴۰۳۲	۴۶۳,۲۰	۴۷۹,۸۰



شکل ۴- ظرفیت حرارتی رادیاتورها بر طبق دمای مازاد



شکل ۵- توزیع دما در صفحه (Y = 1.5 و Z = 2)

جدول ۳- ضرایب معادله مشخصه و ظرفیت حرارتی رادیاتورها

رادیاتور	K_m	n	ظرفیت حرارتی $(\Delta T = 60^{\circ}C)$ (kcal/h)
پانلی	۹,۵۳	۱,۱۹	۱۲۵۷,۳۳
قرنیزی	۱۲,۷۹	۱,۱۱	۱۲۰۷,۲۵

همین امر فضای قابل استفاده اتاق را در فصول سرد در نمونه‌های پانلی بشدت کاهش می‌دهد و عموماً در ایام سرد سال فقط از فضاهای نزدیک به رادیاتور استفاده می‌شود. در (شکل ۶) نیز توزیع دما برای هر سه دمای ورودی بر روی خط مرکزی اتاق ارائه شده است، در حالی که برای رادیاتور پانلی در سه دمای مازاد اختلاف دمایی ۰,۳ و ۵ و ۷ درجه سلسیوس حاصل می‌شود. این اختلاف دما برای رادیاتور قرنیزی در هر سه حالت کمتر از ۲ درجه سلسیوس است. از شکل ۶ می‌توان نتایج زیر را بدست آورد:

- در رادیاتور قرنیزی اختلاف دمای کف اتاق و سقف بسیار کمتر از نمونه پانلی است.
- در رادیاتور پانلی دما در ۲,۵ متری اتاق تا $25,5^{\circ}C$ بالا رفته در حالیکه در آن ارتفاع هیچ نیازی به این دما وجود ندارد.
- برای نمونه قرنیزی در دمای آب ورودی پایین‌تر فضا گرم‌تر از دمای آب ورودی بالاست که دلیل بر سازگاری رادیاتور با سیستم‌های دما پایین است.
- در رادیاتور پانلی با توجه به اختلاف دمای بیشتر در راستای ارتفاع شرایط عدم آسایش حرارتی موضعی ایجاد می‌شود.
- تا ارتفاع تقریباً ۷۵ سانتی‌متری (معادل ارتفاع رادیاتور پانلی) رفتار دو رادیاتور شبیه هم بوده اما بعد از آن اختلاف زیاد شده‌است. این امر به دلیل آن است که رادیاتورهای پانلی بیشتر حجم هوای گرم را به صورت عمودی و از سر رادیاتور هدایت می‌کنند.

آنها آورده شده است.

معادله پیوستگی
(۷) $\nabla \cdot \vec{V} = 0$

معادله بقای ممنتوم خطی
(۸) $\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{V} + \vec{S}$

معادله بقای انرژی
(۹) $V \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T + S_T$

در معادلات لزجت موثر سیال وارد شده است که رابطه محاسبه آن به صورت زیر است:

(۱۳) $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$

در واقع لزجت موثر مجموع لزجت سیال و لزجت اغتشاشی است. لزجت اغتشاشی بر حسب مدل استفاده شده برای اغتشاش به صورت های مختلفی تقریب زده می شود. برای رادیاتور قرنیزی از مدل صفر معادله ای داخلی استفاده شده و لزجت اغتشاشی به صورت معادله (۱۴) تقریب زده شده است [۱۶]:

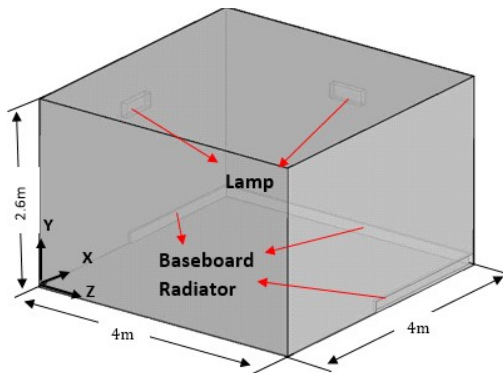
(۱۴) $\mu_t = 0.03874 \rho \vec{V} l$

و برای رادیاتور پانلی از مدل دو معادله ای استاندارد استفاده شده که لزجت اغتشاشی به صورت (۱۵) تقریب زده شده است:

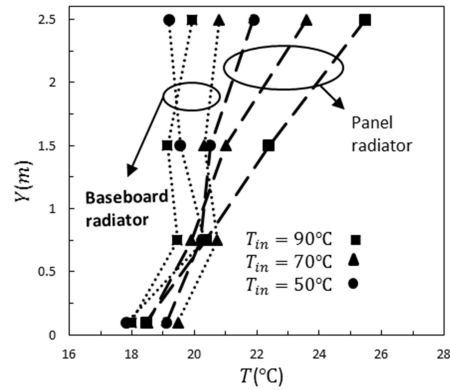
(۱۵) $\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{K^2}{\epsilon}$

۳-۴- شبکه بندی و استقلال شبکه

شبکه سازمان یافته استفاده شده برای رادیاتور پانلی در شکل ۸ ارائه شده است. در شکل ۹ نمودار توزیع دما در وسط اتاق و در راستای ارتفاع برای تعداد مش مختلف ملاحظه می کنید. با توجه به نمودارها برای رادیاتور پانلی و قرنیزی به ترتیب مش بندی ۶۹۰۰۰ و ۱۰۹۰۰۰ به عنوان جواب مستقل از ابعاد شبکه محاسباتی پذیرفته شد. در حل معادلات در مجاورت رادیاتورها به دلیل گرادینن دمایی شدید تراکم شبکه افزایش یافته است. همین امر سبب شده تا برای رادیاتور قرنیزی به دلیل گستردگی بیشتر در طول اتاق تعداد شبکه بیشتری نیاز باشد.



شکل ۷- ابعاد اتاق و نحوه نصب رادیاتور قرنیزی



شکل ۶- توزیع دما بر روی خط مرکز اتاق در راستای ارتفاع

۴- حل عددی

۴-۱- فضای شبیه سازی و روند حل

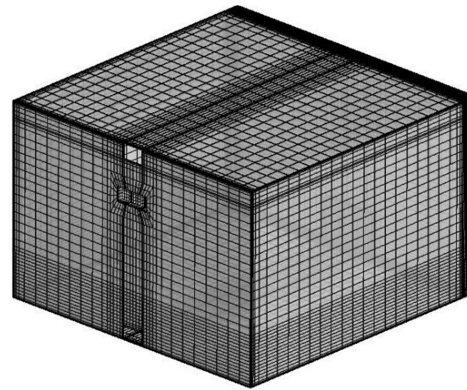
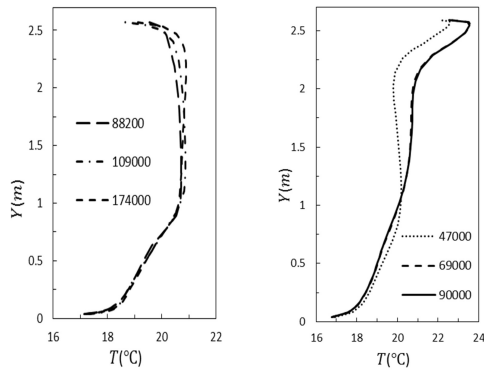
به منظور شبیه سازی فضای آزمون با ابعاد ۴×۴×۲٫۵ متری مطابق با شرایط آزمون تجربی در نرم افزار ایرپک نسخه ۲٫۲ با حلگر فلوئنت^۱ شبیه سازی شد. در (شکل ۷) ابعاد و تجهیزات داخل اتاق (در شبیه سازی قرنیزی) نمایش داده شده است. جنس دیواره های اتاق از چوب پوشیده با رنگ قرمز است و در اتاق ۲ لامپ ۵۰W نیز تعبیه شده که به صورت کامل در مدل سازی وارد شده است.

برای مدل سازی آشفتنی در رادیاتور قرنیزی با توجه به مطالعات گذشته از مدل صفر معادله ای داخلی^۲ استفاده شد [۹]. این مدل در مورد رادیاتور قرنیزی همگرایی معادلات انرژی و پیوستگی را تضمین کرد. برای مدل سازی رادیاتور پانلی در اکثر کارهای انجام شده پیشین به دلیل پایداری و دقت بالا از مدل دو معادله ای استاندارد^۳ استفاده شده است [۱۴، ۱۳]. در تحقیقات پیشین برای در نظر گرفتن چرخش جریان همواره دریچه هایی برای ورود و خروج جریان هوا از بیرون فضای شبیه سازی در نظر گرفته شده است [۱۵]. در تحقیق حاضر نیز پس از بررسی های متعدد دریچه هایی با کمترین خطا در نظر گرفته شد، بر این اساس در دیوار مقابل رادیاتور پانلی دریچه ورود هوا به ابعاد ۰٫۳ در ۰٫۲ متری با دمای محیط و با سرعت ۱ متر بر ثانیه تعبیه شد. در پایین دیوار نیز دریچه تخلیه هوا با ابعاد برابر در نظر گرفته شد. برای حل از شبکه بندی سازمان یافته با استفاده از روش حجم محدود و برای حل کوپلینگ بین سرعت و فشار نیز از الگوریتم سیمپل^۴ استفاده شده است.

۲-۴- معادلات حاکم

با توجه به فرارگیری عدد رایلی در محدوده اغتشاش باید برای حل معادلات از مدل های اغتشاشی استفاده شود. در ادامه معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی برای حالت پایا و تراکم ناپذیر و نحوه مدل سازی

1 Fluent
2 Indoor zero equation
3 Standard Two equation
4 SIMPLE



شکل ۸- مش بندی سازمان یافته رادیاتور پانلی

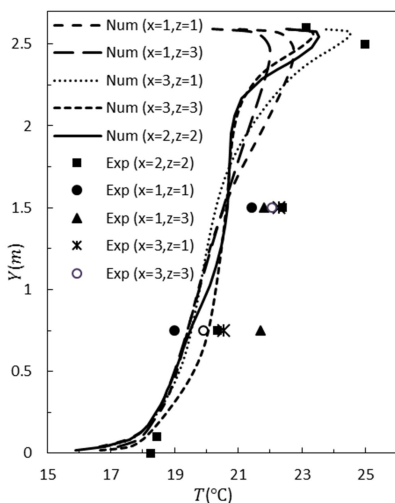
(Panel radiator) (Baseboard radiator)

شکل ۹- بررسی استقلال از شبکه

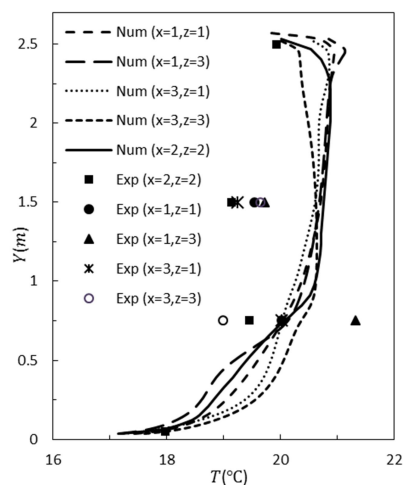
۴-۴- اعتبار سنجی نتایج عددی

برای اعتبار سنجی نتایج حل عددی از نتایج تجربی آزمونهای انجام شده در همین تحقیق استفاده شده است. در داخل فضای اتاق ۵ میله قرار دارد که بر روی آنها دماسنج قرار گرفته است. با توجه به شکل ۱ مختصات هر کدام از میله ها تعیین شده و در همان مختصات و در راستای ارتفاع اتاق برای حالت $(\Delta T = 6.0^\circ\text{C})$ برای هر دو رادیاتور توزیع دمای بدست آمده از حل عددی رسم شده که در شکل های ۱۰ و ۱۱ قابل مشاهده است. رفتار نمودارهای عددی دو رادیاتور هم چون نمودار (شکل ۶) است، به طوریکه تا ارتفاع تقریباً ۸۰ سانتی متری بسیار شبیه هستند و بعد از آن افزایش دمای رادیاتور پانلی ادامه می یابد در حالیکه نمودار قرنیزی دارای یکنواختی دما است. نسبت تفاوت نتایج عددی با نتایج تجربی به عنوان میزان خطا در نظر گرفته شده است. در رادیاتورهای پانلی و قرنیزی بیشترین خطا به ترتیب ۱۰٪ و ۸٪ است که ناشی از دلایل زیر می تواند باشد:

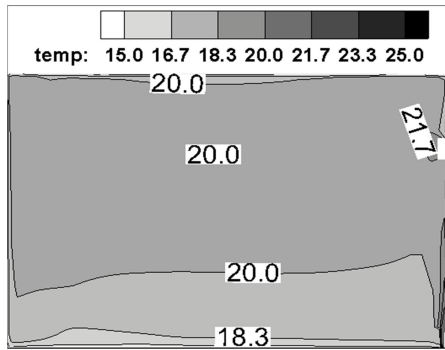
۱. در شبیه سازی دمای خارج اتاق 15°C در نظر گرفته شده است که در مراحل مختلف آزمون گاهی تا 2°C نیز تغییر کرده است.
۲. دماسنج های اتاق تا 0.5°C عدم قطعیت اندازه گیری دارند.
۳. در شبیه سازی رادیاتورها از توزیع دمای متفاوت سطح انتقال حرارت صرف نظر شده و فقط ظرفیت آنها وارد شده است.
۴. در شبیه سازی رادیاتور پانلی دریچه های ورود و خروج هوا در نظر گرفته شده است که با مدل تجربی متفاوت است.
۵. شکل رادیاتور پانلی و قرنیزی به صورت مکعب شبیه سازی شده که با فیزیک واقعی آنها کمی متفاوت است.
۶. در رادیاتورها از باز بودن وجه بالایی صرف نظر شده است. با توجه به قابل پذیرش بودن درصد خطا در هر دو رادیاتور و رفتار فیزیکی قابل قبول نتایج عددی در ادامه به تحلیل توزیع دما و سرعت در مرکز تقارن اتاق پرداخته شده است.



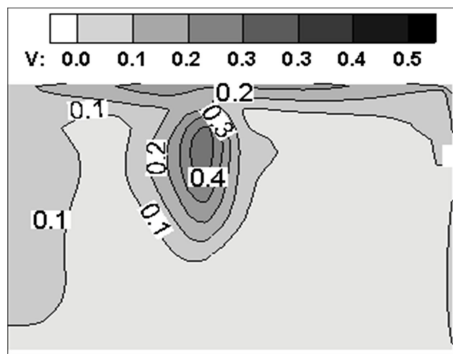
شکل ۱۰- توزیع دمای عددی و تجربی رادیاتور پانلی در راستای ارتفاع اتاق



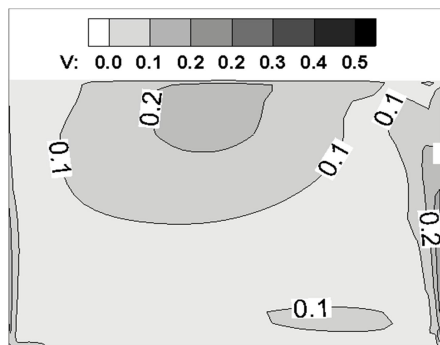
شکل ۱۱- توزیع دمای عددی و تجربی رادیاتور قرنیزی در راستای ارتفاع اتاق



شکل ۱۳- توزیع دمای عددی در صفحه تقارن اتاق ($X=2$) برای رادیاتور قرنیزی



شکل ۱۴- توزیع سرعت عددی در صفحه تقارن اتاق ($X=2$) برای رادیاتور پانلی



شکل ۱۵- توزیع سرعت عددی در صفحه تقارن اتاق ($X=2$) برای رادیاتور قرنیزی

۵- بحث و نتیجه گیری

در تحقیق حاضر دو پایانه حرارتی قرنیزی و پانلی در ظرفیت ۱۲۰۰ کیلو کالری بر ساعت از نظر توزیع دما و سرعت مورد مقایسه و بررسی تجربی و عددی قرار گرفتند. در ابتدا ظرفیت و معادله مشخصه دو رادیاتور بر اساس استاندارد ملی به شماره ۲-۳۶۰ بدست آمدند. آزمون‌ها نشان دادند که در ظرفیت حرارتی یکسان رادیاتور قرنیزی علاوه بر اینرسی حرارتی پایین‌تر، توزیع دمای یکنواخت‌تری نسبت به رادیاتور پانلی دارد، به نحوی که اختلاف دما در راستای ارتفاع و طول اتاق به ترتیب ۲ و ۰٫۵ درجه سلسیوس بود، در حالیکه این اختلاف

۴-۵- نتایج عددی توزیع دما و جریان

در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ نمودارهای توزیع دما و جریان در صفحه تقارن اتاق ($X=2$) برای هر دو رادیاتور رسم شده‌است.

در شکل ۱۲ توزیع دما در راستای ارتفاع برای نمونه پانلی نمایش داده شده است. رفتار نمودار لایه‌ای بوده و با افزایش ارتفاع دما افزایش می‌یابد به طوریکه در بیشترین ارتفاع اتاق بالاترین دما وجود دارد. اختلاف دما در راستای ارتفاع تا 6°C بالا رفته است. این اختلاف دما شرایط عدم آسایش حرارتی موضعی را برای ساکنان بوجود می‌آورد.

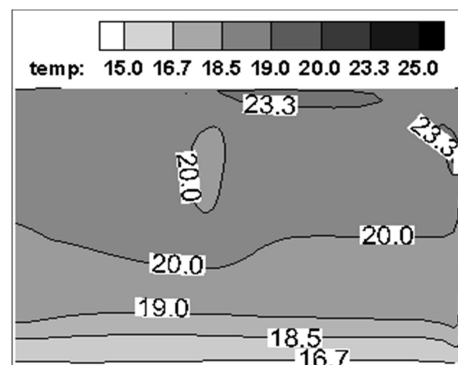
در شکل ۱۳ توزیع دمای یکنواخت رادیاتور قرنیزی در راستای ارتفاع کاملاً مشخص است. نتایج کاملاً با نتایج تجربی شکل ۶ هم خوانی دارد. توزیع دما در اتاق یکنواخت‌تر بوده به طوریکه تغییرات دما در راستای ارتفاع تقریباً 2°C است.

برای یافتن چرایی یکنواختی این نحوه توزیع دما از نمودارهای سرعت استفاده شده‌است. علت توزیع دمای یکنواخت‌تر رادیاتور قرنیزی به نسبت رادیاتور پانلی را می‌توان از مقایسه توزیع سرعت دو رادیاتور در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ بدست آورد.

در شکل ۱۴ توزیع سرعت رادیاتور پانلی ارائه شده‌است، همان‌گونه که از شکل پیداست در ارتفاعات بالاتر سرعت جریان هوا تا ۴ برابر بیشتر از کف اتاق است. همین امر موجب شده تا گردش در ارتفاعات بالاتر مطلوب‌تر از پایین اتاق شکل گیرد و اختلاف دما افزایش یابد.

در شکل ۱۵ توزیع سرعت رادیاتور قرنیزی ارائه شده است، گردش هوا در نمونه قرنیزی مناسب‌تر از نمونه پانلی است، به طوریکه اختلاف سرعت‌ها نهایتاً تا ۲ برابر است. سرعت یکنواخت رادیاتور قرنیزی به دلایل زیر است:

۱. قرارگیری رادیاتور در ارتفاع پایین، این امر موجب می‌شود تا گرمایش از هوای کف اتاق شروع شود که دارای کمترین دما است.
۲. تقسیم انرژی رادیاتور، با افزایش طول رادیاتور انرژی معادل رادیاتور پانلی اما در فضایی بیشتر در اتاق توزیع شده است.



شکل ۱۶- توزیع دمای عددی در صفحه تقارن اتاق ($X=2$) برای رادیاتور پانلی

<i>mean</i>	میانگین دمای آب ورودی و خروجی از رادیاتور
<i>out</i>	آب خروجی از رادیاتور
<i>ref</i>	دمای مرجع اتاق
<i>s</i>	استاندارد
<i>t</i>	اغتشاشی
<i>0</i>	شرایط مرجع

۷- سپاسگزاری

بدینوسیله نویسندگان مراتب قدردانی خود را از مدیریت آزمایشگاه آلفام خانم مهندس خوشنویسان و آقایان مهندس قربانی و جمالی که در تهیه داده‌های تجربی کمال یاری را نمودند اعلام می‌نمایند.

۸- مراجع

- [1] Yang L., Yan H., Lam J. C., Thermal comfort and building energy consumption implications – A review, *Applied Energy*, Vol. 115, pp. 164-173, 2/15/, 2014.
- [2] Performance of a baseboard heater, *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 249, No. 3, pp. 240, 3//, 1950.
- [3] A. Ploskić, S. Holmberg, Heat emission from thermal skirting boards, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 5, pp. 1123-1133, 5//, 2010.
- [4] W.Olesen, Radiant Floor Heating In Theory and Practice, *ASHRAE*, Jullay, 2002.
- [5] A.Rasell, Thermal test on a skirting board heater, *Building Services Research and Information Association(BSRIA)*, Vol. number 513828, November, 2007.
- [6] A. Ploskić, S. Holmberg, Low-temperature baseboard heaters with integrated air supply – An analytical and numerical investigation, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 1, pp. 176-186, 1//, 2011.
- [7] Karabay H., Arıcı M., Sandık M., A numerical investigation of fluid flow and heat transfer inside a room for floor heating and wall heating systems, *Energy and Buildings*, Vol. 67, No. 0, pp. 471-478, 12//, 2013.
- [8] Ploskić A., Holmberg S., Performance evaluation of radiant baseboards (skirtings) for room heating – An analytical and experimental approach, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 62, No. 2, pp. 382-389, 1/25/, 2014.

[۹] ذوالفقاری س. و سخاوت‌مند ب. بررسی تجربی تاثیر نفوذ هوا از درزهای پنجره بر عملکرد سیستم گرمایش قرنیزی و شرایط آسایش حرارتی ساکنان. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۴، ش. ۸، ص ۱۱۳-۱۲۰، ۱۳۹۳.

[۱۰] استاندارد ملی ۳۶۰-۲، رادیاتورها و کنوکتورها- قسمت ۲: طبقه بندی و روش‌های آزمون، سازمان ملی استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۷

- [11] BS EN 442-2 :, Radiators and convectors- Part 2 : Test methods and rating, Amendment A1 : 2000, 1997.
- [12] Bretscher O., Linear Algebra With Applications, 3rd ed., Upper Saddle River NJ: Prentice Hall,, 1995.
- [13] Chen Q., Comparison of different k-ε models for indoor airflow computations, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, Vol. 42, pp. 353-369, 1999.
- [14] Costa J.J., Oliveira L.A., Blay D., Test of several versions for the k-ε type turbulence modeling of internal mixed convection flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 4391-4409, 1999.
- [15] Sevilgen G., Kilic M., Numerical analysis of air flow, heat transfer, moisture transport and thermal comfort in a room heated by two-panel radiators, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 137-146, 2011.
- [16] Chen Q., Xu W., A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation, *Energy and Buildings*, Vol. 28, pp.137-144, 1998

دماها برای رادیاتور پانلی به ترتیب ۷ و ۶ درجه سلسیوس بدست آمدند. نتایج تجربی همچنین حاکی از سازگاری رادیاتور قرنیزی با سیستم‌های دما پایین داشت به نحوی که توزیع دما در حالت آب ورودی ۵۰ درجه سلسیوس بسیار نزدیک به آب ورودی ۹۰ درجه سلسیوس بدست آمد. نتایج عددی نیز با خطای کمتر از ۱۰ درصد با نتایج تجربی هم‌خوانی داشت. در شبیه سازی عددی علاوه بر نمودارهای توزیع دما در صفحه تقارن عمودی اتاق نمودارهای توزیع سرعت نیز ارائه شد، نمودارها حاکی از گرادیان شدید سرعت در رادیاتور پانلی بود به نحویکه سرعت در ارتفاع بالاتر اتاق تا ۴ برابر ارتفاع پایین تر اتاق افزایش پیدا کرده بود. مهم‌ترین عامل توزیع دمای یکنواخت‌تر رادیاتور قرنیزی توزیع سرعت یکنواخت‌تر در کل فضای اتاق بود. به نحویکه اختلاف سرعت در اتاق به اندازه نصف اختلاف سرعت رادیاتور پانلی بود.

بر اساس نتایج بدست آمده رادیاتور قرنیزی با توجه به نصب در ارتفاع پایین‌تر و تقسیم انرژی در کل سطح اتاق توانایی ایجاد توزیع دمای یکنواخت‌تری به نسبت رادیاتور پانلی دارد.

۶- نمادها

$\Delta\theta$	اختلاف دمای هوای اتاق و آب ورودی به رادیاتور (°C)
H	ارتفاع رادیاتور قرنیزی (m)
h	آنتالپی ویژه آب (kJ/kg)
K	انرژی جنبشی توربولانسی
N	تعداد نقاط آزمون
n_p	توان تصحیح فشار (جدول ۴ استاندارد ملی ۳۶۰-۲)
n	توان معادله مشخصه
C_μ	ثابت مدل استاندارد
S	چشمه
T	دما (°C)
ΔT	دمای مازاد (°C)
q	دبی آب ورودی / خروجی رادیاتور (kg/sec)
V	سرعت (m/s)
S_k	ضریب حرارت دهی تابشی (جدول ۴ استاندارد ملی ۳۶۰-۲)
k_m	ضریب معادله مشخصه رادیاتور
ϕ	ظرفیت رادیاتور (kcal/h)
P	فشار متوسط جو در طول آزمون (89.2kPa)

علائم یونانی

α	نفوذ حرارتی (kg/m^3)
β	ضریب انبساط حجمی (K^{-1})
ρ	چگالی (kg/m^3)
μ	لزجت دینامیکی ($kg/m.s$)
ε	نرخ اضمحلال

زیر نویس

<i>eff</i>	موثر
<i>in</i>	آب ورودی به رادیاتور
<i>m</i>	اندازه گیری شده