مقاله

حل عددی توزیع دما و تحلیل بازده حرارتی سیستم‌های گرمایشی متمرکز و سیستم‌های گرمایش از کف

نادر رحیمی*
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب
naderahimi@yahoo.com

فرزاد جعفر کاظمی
استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب
f_jafarkazemi@azad.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۲۳

چکیده

هدف از این مقاله تحلیل حرارتی دو نوع متفاوت از سیستم‌های گرمایش؛ یعنی سیستم گرمایش از کف و سیستم گرمایش متمرکز رادیاتوری است. برای این منظور، با حل عددی معادلات مربوطه چگونگی روند توزیع دما و لایه‌بندی خطوط همدما در نقاط گوناگون اتاق تحلیل خواهد شد. در این رهگذر، ابتدا با استفاده از مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی[1] اتاق موردنظر مدل و کانتورهای دما در نقاط گوناگون اتاق بررسی خواهد شد. نتایج به‌دست آمده مبین این مطلب خواهد بود که کدام سیستم به ازای گرمایش مطبوع‌تر، بازده بالاتر و مصرف انرژی کمتری خواهد داشت. براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که در سیستم گرمایش از کف، توزیع دما در اتاق بسیار یکنواخت و گرادیان دما نسبت به ارتفاع منفی است. اما سیستم رادیاتوری، به‌علت سطح حرارتی کوچکتر و کمتربودن نرخ انتقال حرارت تابشی، فقط فضاهای پیرامون خود را مستقیماً گرم می‌کند و در نقاط دیگر کانتورهای دما نامتقارن توزیع می‌شوند. همچنین در سیستم رادیاتوری حرارت به‌دلیل دانسیتهٔ کمتر و در نتیجه سبک‌تر بودن، میل به تجمع در نقاط زیر سقف را خواهد داشت که این عیب در سیستم گرمایش از کف وجود ندارد. در سیستم‌های گرمایش از کف لایه‌بندی حرارتی بدین صورت خواهد بود که در کف اتاق دما بیشتر می‌شود و هرچه ارتفاع افزایش می‌یابد و فضای کاربردی افراد کمتر می‌شود، دما نیز کمتر می‌گردد. بنابراین توزیع حرارت برعکس سیستم رادیاتوری خواهد بود.

واژگان کلیدی: گرمایش متمرکز، گرمایش از کف، کانتور دما، انتقال حرارت تابشی، نیروی شناوری

۱. مقدمه

با توجه به اینکه بخش اعظمی از مصرف سالانهٔ انرژی در ایران مربوط به بخش ساختمان است، لذا شناسایی راهکارهای لازم جهت کاهش مصرف انرژی در ساختمان و بهبود بازده سیستم‌های گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها از

اهمیت به‌سزایی برخوردار است. سیستم گرمایش از کف - که در فرایند گرمایشی آن، انتقال حرارت تابشی سهم زیادی دارد (بیش از ۵۰ درصد از انتقال حرارت به‌صورت تابشی است) - در مقایسه با سایر سیستم‌های گرمایشی نه‌تنها در صرفه‌جویی و بهینه‌سازی مصرف انرژی، که در مقولهٔ رفاه و آسایش ساکنان نیز دارای نقاط قوت فراوانی است. در بسیاری از کشورها، از جمله ایران، به‌دلیل بالابودن قیمت انرژی الکتریکی و برخی از مزایای منحصر به‌فرد سیستم‌های هیدرونیک[۲]، اغلب از سیستم‌های گرمایش از کف هیدرونیک استفاده می‌شود. در سیستم‌های گرمایش از کف، مبادلهٔ حرارت بین کف و محیط داخل از طریق سازوکار جابه‌جایی[۳] و تابش صورت می‌گیرد. چون سازوکار جابه‌جایی حرارتی سبب افزایش گردش طبیعی هوای داخل می‌شود، حائز اهمیت است. به‌دلیل اینکه گرادیان دما و نیروی شناوری هم‌جهت‌اند، فرایند گرمایش به‌کمک جابه‌جایی راحت‌تر انجام می‌شود. آن بخش از انتقال حرارت که به‌کمک تابش انجام می‌گیرد سبب از بین رفتن گرادیان دمای نامطلوب در داخل اتاق می‌شود. همچنین به‌دلیل کم‌بودن شدت اغتشاش هوا در این‌گونه سیستم‌ها، امکان ایجاد سرما و گرمای موضعی در محیط و یا کوران هوا تا حدود زیادی کاهش می‌یابد.

در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، اتاق مورد نظر مدل و کانتورهای دما در نقاط گوناگون اتاق بررسی خواهد شد. نتایج به‌دست آمده مبین این است که کدام سیستم در ازای گرمایش مطبوع‌تر، بازدهی بالاتر و مصرف انرژی کمتری خواهد داشت.

۲. مروری بر مطالعات پیشین

در این بخش مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ سیستم‌های گرمایش از کف بررسی می‌شود. در سال ۱۹۹۷ م، تینتیس به بررسی اثر تابش غیرمستقیم نور خورشید بر عملکرد سیستم گرمایش از کف پرداخت [۳]. در این پژوهش کف‌هایی به ضخامت ۵ و ۱۰ سانتی‌متر اجرا و بررسی شد و نهایتاً مشخص گردید که در هر دو حالت، سیستم می‌تواند از لحاظ شرایط دمایی، دمای ۲۹ درجهٔ سانتی‌گراد را به‌راحتی تأمین کند. یک سال بعد، در سال ۱۹۹۸ م، الخلیل و همکاران به مدل‌سازی و تحلیل سیستم گرمایش از کف با استفاده از استخر خورشیدی پرداختند. با توجه به شرایط آب و هوایی کشور اردن ثابت شد که این سیستم می‌تواند حدود ۸۰ تا ۱۰۰ درصد از ایام دو ماه پایانی سال - که نیاز به سیستم گرمایشی احساس می‌شود - را جوابگو باشد. در سال ۲۰۰۰ م، اتنتیس و همکاران، در کشور کانادا، به بررسی انتقال حرارت گذرا در سیستم گرمایش از کف با مدل سه‌بعدی و به‌روش اختلاف محدود و اکسپلیسیت پرداختند [۵]. در سال ۲۰۰۴ م، بـدران و همکارش، در کشور اردن سیستم گرمایش از کف با مولد استخر خورشیدی را با کلکتور خورشیدی مقایسه کردند. نتایج حاصل بدین صورت است که سیستم کلکتوری ۷ درصد کارامدتر از سیستم استخر خورشیدی است [۶]. ویتزمن و همکاران، در سال ۲۰۰۴ م، در کشورهای دانمارک و سوئد، یک سیستم گرمایش از کف را به‌صورت دوبعدی مدل و میزان انتقال حرارت آن را با زمین مطالعه کردند [۷]. با مشاهدهٔ نتایج اهمیت عایق‌کاری کف نمایان می‌شود. ستاری و فرهانیه، در سال ۲۰۰۵ م، در دانشگاه صنعتی شریف، نقش عوامل گوناگون را بر عملکرد سیستم گرمایش از کف بررسی کردند [۸]. در این آزمایش سیستم مورد نظر سیستم گرمایش از کف هیدرونیک بود. این مسئله از آن حیث ذکر می‌شود که گاهی از هوای گرم برای سیستم گرمایش از کف استفاده می‌شود که در حال حاضر به‌دلیل پایین‌بودن ضریب انتقال حرارت هوا چندان مورد توجه نیست. کارداگ و همکاران، در سال ۲۰۰۶ م، در ترکیه به حل عددی آثار دمای سقف و کف و ابعاد اتاق بر عدد ناسلت[۴] سیستم گرمایش از کف پرداختند [۹]. کارداگ و همکارش، در سال ۲۰۰۷ م، در دانشگاه مرمرهٔ ترکیه[۵]، در اتاقی به ابعاد ۲×۱/۷۵×۲ متر مکعب به بررسی عدد ناسلت کف در سیستم گرمایش از کف پرداختند [۱۰]. البته این

گروه در پژوهش پیشین خود به این نتیجه رسیدند که برای رسیدن به عدد ناسلت نیاز است تا بتوان عدد رایلی[۶] را محاسبه کرد و ناسلت را برحسب رایلی نوشت. در نهایت برای محاسبهٔ عدد ناسلت فرمول تجربی ۱ کمک می‌کند:

$$Nu_f = 0.15Ra_f^{0.339} + 0.01069Ra_{ceiling}^{0.4166} f \quad (۱)$$

باید توجه داشت که این معادله با حل عددی ۱۰ درصد انحراف دارد.

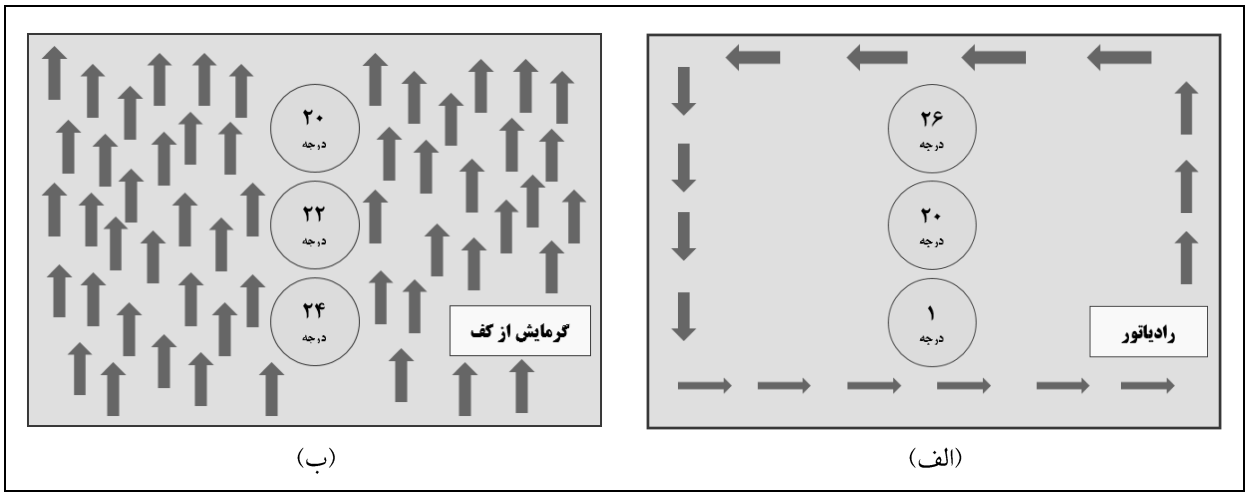
ژای و همکاران، در سال ۲۰۰۸ م، در کشور چین، طی پژوهشی به طراحی و تحقیق دربارهٔ عملکرد سیستم گرمایش از کف در یک ساختمان سبز پرداختند [۱۱]. فونتانا، در سال ۲۰۱۰ م، در کشور ایتالیا، به بررسی سیستم گرمایش از کف و عملکرد پوشش روی آن پرداخت [۱۲]. بعضی از طراحی‌ها برای فضاهای خالی مناسب‌ترند و برخی دیگر برای فضاهای مبـله‌شده. نشان داده شد هنگامی‌که چیدمان اتاق شلوغ می‌شود، بر کاهش تابش تأثیرگذار خواهد بود؛ به‌طوری‌که اگر ۴۰ درصد از مساحت اتاق پوشیده از مبلمان شود، نسبت به حالتی که اتاق خالی است بین ۲۵ تا ۳۰ درصد از نرخ انتقال حرارت کاسته می‌شود. در سال ۲۰۱۰ م، رحیمی و نعیمی، در ایران نقش انتقال حرارت تابشی و جابه‌جایی آزاد را در سیستم گرمایش از کف بررسی کردند [۱۳]. اینتروپ و همکاران، در سال ۲۰۱۱ م، در هلند، بـه بررسی نقش مواد تغییرفازدهنده[۷] در سیستم گرمایش از کف پرداختند [۱۴]. ماله و علی حسین، در سال ۲۰۱۱ م، در کشور سوریه یک سیستم گرمایش از کف را مدل و میزان افت سیالاتی و حرارتی را اندازه‌گیری کردند و این کمیت‌ها را با سیستم گرمایش متمرکز مقایسه نمودند [۱۵]. ماله و همکاران، در سال ۲۰۱۱ م در کشور سوریه در این تحقیق به بررسی و شبیه‌سازی سیستم گرمایش از کف خورشیدی با دبی کم پرداختند [۱۶]. علمداری و همکاران، در سال ۲۰۱۱ م، در دانشگاه صنعتی اصفهان، به بررسی عددی تأثیر آرایش لوله‌ها در سیستم گرمایش از کف بر انتقال حرارت و افت فشار پرداختند [۱۷].

۳. ساختار و عملکرد سیستم‌های گرمایش از کف

به‌طور کلی سیستم‌های گرمایش ساختمان به دو دستهٔ سیستم‌های گرمایش تابشی و سیستم‌های گرمایشی جابه‌جایی تقسیم می‌شوند. ایجاد شرایط آسایش حرارتی مطلوب و مصرف انرژی کم سبب شده است تا استفاده از سیستم‌های گرمایش تابشی روز به‌روز مورد توجه قرار گیرند. در سیستم‌های گرمایش از کف، تمام سطوح و دیواره‌های داخلی اتاق در انتقال حرارت نقش مؤثری ایفا می‌کنند. در حقیقت می‌توان این‌گونه بیان کرد که افزایش سطح مؤثر تبادل حرارتی در سیستم‌های تابشی غیرمستقیم، سبب شده است تا درجه حرارت کارکرد این‌گونه سیستم‌ها به‌مراتب پایین‌تر از سیستم‌های تابشی مستقیم باشد. دمای کارکرد این سیستم‌ها بسته به کارکرد آنها بین ۳۵ تا ۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. پایین‌بودن دمای کارکرد سیال عامل، امکان استفادهٔ همزمان و به‌صورت ترکیبی با پمپ‌های حرارتی و همچنین امکان استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین آب گرم مورد نیاز، از جمله خصوصیات مثبتی است که سیستم‌های گرمایش از کف هیدرونیک را از سایر سیستم‌ها متمایز ساخته است.

در سیستم‌های هیدرونیک معمولاً دمای آب گرم ورودی به لوله‌های گرمایش از کف بین ۳۵ تا ۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد است، در حالی‌که دمای آب ورودی به رادیاتورها در گرمایش مرسوم حدود ۷۰ تا ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. با توجه به اینکه در سیستم‌های گرمایش از کف دمای سطح کف اتاق نباید از ۳۰ درجهٔ سانتی‌گراد بالاتر رود و با در نظر گرفتن سطح وسیع تابش، می‌توان با کاهش ۳ تا ۵ درجهٔ سانتی‌گراد از دمای سیال عامل همچنان در شرایط رفاه حرارتی باقی ماند. این در حالی است که با هر درجهٔ کاهش دما، معادل ۶ درصد صرفه‌جویی انرژی خواهیم داشت. بنابراین استفاده از این سیستم کاهش قابل توجهی (بین

۲۰ تا ۳۰ درصد) در مصرف انرژی ایجاد می‌کند. چون سازوکار جابه‌جایی حرارتی سبب افزایش گردش طبیعی هوای داخل اتاق می‌شود، حائز اهمیت است. در واقع دمای سطوح داخلی اتاق با دریافت حرارت تابش‌شده از کف اتاق گرم می‌شود، سپس حرارت از طریق سازوکار جابه‌جایی بین سطوح جانبی و هوای داخل اتاق مبادله می‌شود. سازوکار تابش مستقیماً بر هوای اتاق تأثیری ندارد و تنها می‌تواند اختلاف دمای سطوح داخلی اتاق را کاهش دهد. چون در سیستم‌های گرمایش جابه‌جایی هوای گرم به‌طور طبیعی بالا می‌رود، مناطق نزدیک به سقف گرم‌تر می‌باشد، اما در سیستم‌های گرمایش از کف گرم‌ترین هوا در نزدیکی زمین قرار می‌گیرد. در شکل ۱ مقایسهٔ توزیع دما بین سیستم‌های گرمایش از کف و سیستم‌های گرمایش رادیاتوری نشان داده شده است.

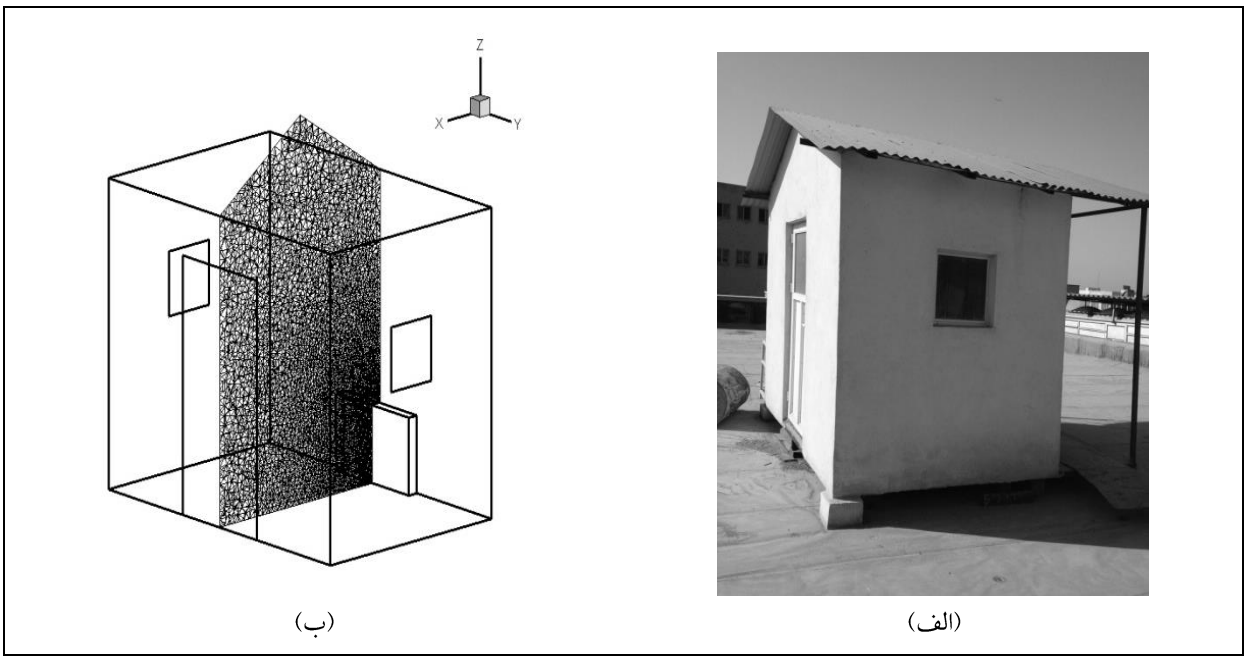


(الف) (ب)

شکل ۱. مقایسه‌ای شماتیک میان سیستم گرمایش رادیاتوری و سیستم گرمایش از کف

در مقالات بررسی‌شده، به شرایط متنوع در طراحی سیستم‌های گرمایش از کف اعم از تأثیر نوع کف بر بازده سیستم، ارتفاع بهینهٔ سقف، ضخامت بهینهٔ کف، چگونگی کوپل‌شدن استخرها و کلکتورهای خورشیدی با سیستم گرمایش از کف اشاره شد. در این مقاله سعی شده است که با استفاده از حل عددی معادلات حرارتی و سیالاتی، به بررسی نحوهٔ توزیع دما در سیستم‌های گرمایش از کف و مقایسهٔ آن با سیستم‌های گرمایش رادیاتوری بپردازیم و با تحلیل یافته‌ها نتیجه‌گیری کنیم که کدام سیستم در عین مصرف کمتر، شرایط حرارتی مساعدتری برای ساکنان ایجاد خواهد کرد. بدین منظور اتاقی را در نظر می گیریم که مطابق شکل ۲ ابعاد کف اتاق ۲×۳ متر و ارتفاع آن ۳ متر واقع در پشت بام دانشکدهٔ فنی، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب می‌باشد. با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی شرایط را مدل کرده و با حل عددی معادلات کوپله‌شدهٔ حرارتی و سیالاتی که عبارت‌اند از معادلات پیوستگی جرم، مومنتوم و انرژی، معادلهٔ دما را حل نموده و دمای تک‌تک نقاط اتاق را به‌دست آورده و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت[8] کانتورهای دما را در کل فضای اتاق رسم و تحلیل کنیم. حال به‌کمک این روش اتاق مورد نظر را مطابق شکل ۲ مدل می‌کنیم و در مقاطعی مشابه با صفحهٔ مشخص‌شده در شکل، مش‌بندی کرده و معادلهٔ مربوط به هر گره را حل و نهایتاً خطوط همدمای به‌دست آمده را تحلیل خواهیم کرد. برای مدل‌سازی این اتاق در حوالی منابع تولید حرارت، اعم از نقاط نزدیک به رادیاتور و مناطق اطراف لوله‌های کف‌خواب به‌علت وجود گرادیان‌های دمایی شدید، مش‌ها ریزتر و در سایر نقاط مش‌ها درشت‌تر ترسیم شده است تا جریان انتقال دما و حرکت سیال به‌درستی

مدل شود؛ به‌نحوی‌که طول کوچکترین سلول محاسباتی ۲ سانتی‌متر و طول بزگترین آن ۸ سانتی‌متر می‌باشد. در این مسئله ۴۲۳۵۶ گره در هر مقطع وجود دارد. در مدل‌نمودن معادلات از حل‌کننده بر پایهٔ فشار به‌عنوان مبنای محاسبات استفاده شده است. از مدل تشعشعی Do برای مدل‌نمودن انتقال حرارت تابشی و از مدل بوسینسک[۹] برای مدل‌نمودن جابه‌جایی طبیعی استفاده شده است. در حل عددی با کمک Grid study کل مش‌بندی کنترل شده، به‌منظور اطمینان از روش مش‌بندی مناسب و انتخاب شرایط مرزی و اولیهٔ مطلوب، تمامی معادلات همگرا می‌باشند. همچنین ضرایب انتقال حرارت برای دیوارهای جانبی ۰/۶۷۵ وات بر متر مربع کلوین، درِ چوبی ۲/۸۳ وات بر متر مربع کلوین، پنجره‌ها ۳/۲۱ وات برمتر مربع کلوین و برای سقف ۲/۵۲ وات بر متر مربع کلوین در نظر گرفته شده است و از روش آپ‌ویند مرتبهٔ دوم[۱۰] برای گسسته‌سازی معادلات اغتشاش استفاده شده است.



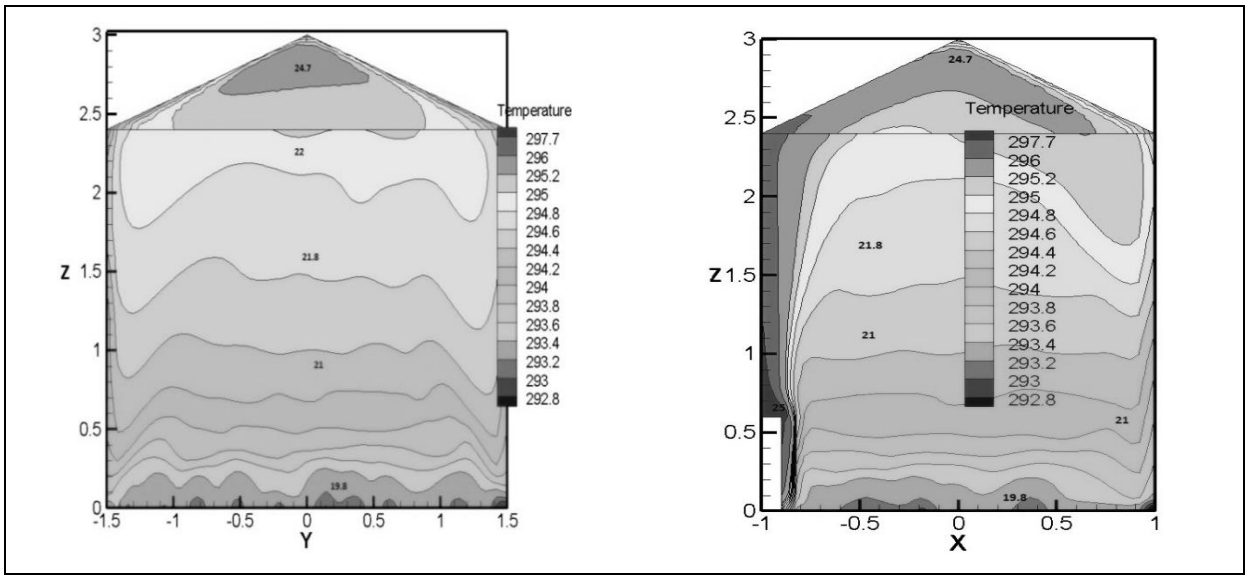
(الف) (ب)

شکل ۲. الف) اتاقک تست مورد بررسی واقع در پشت‌بام دانشکدهٔ فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب
ب) نمایی شماتیک از اتاق اتاق مدل‌سازی شده و صفحات مش‌بندی شده

۴. نتایج

در این بخش با استفاده از شکل‌ها نتایج تحلیل خواهد شد. برای این منظور، ابتدا سیستم رادیاتوری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دمای سطح رادیاتور ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد و ابعاد آن ۰/۶ × ۰/۹۸ × ۰/۱ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۳ چگونگی توزیع دما را در صفحهٔ X-Y برای سیستم رادیاتوری نشان می‌دهد. بیشترین شار حرارتی تولیدشده در فضای بالای رادیاتور است. در این فضا مولکول‌های هوا با سطح رادیاتور انتقال حرارت می‌کنند و گرم می‌شوند. به‌علت نیروی شناوری و سبکترشدن، مولکول‌ها به‌طرف بالا صعود می‌کنند. در این ناحیه اختلاف دما با هوای اطراف بیشتر است، لذا عدد گراشف[۱۱] روبه افزایش می‌باشد. از طرفی طول مشخصه - که انتقال حرارت از این طریق صورت می‌گیرد - رفته‌رفته کاهش می‌یابد، در نتیجه عدد رینولدز[۱۲] روبه کاهش است؛ به بیان دیگر می‌توان گفت که نیروی شناوری بر نیروی جاذبه غلبه می‌کند و گرادیان سرعت نسبت به محور Z بیشتر می‌شود.

تمامی این عوامل حاکی از افزایش نرخ جابه‌جایی آزاد در فضای بالای رادیاتور است. اگرچه به‌علت وجود اختلاف دما بین فضاهای گوناگون اتاق و جابه‌جایی هوای سرد و گرم، سیرکولاسیون اتفاق می‌افتد، اما بنابر شکل ۳ همچنان هوای گرم تمایل به تجمع در ارتفاع بالایی اتاق را خواهد داشت. یکی دیگر از نقاط مورد توجه فضای مقابل رادیاتور است که بنابر شکل ۳، رادیاتور طول محدودی از فضای مقابل خود را به‌طور مستقیم گرم می‌کند. در مدل مورد بررسی، رادیاتور در شرایط مذکور حدود ۱۰ سانتی‌متر از فضای مقابل خود را به‌طور مستقیم گرم کرده است که این مقدار طول مشخصه نسبت به طول اتاق، فضای محدودی است. اگر همین روال به ساختمان‌هایی با مساحت بیشتر تعمیم داده شود، مشاهده خواهد شد که علت گرم‌شدن ساختمان توسط سیستم رادیاتوری عمدتاً سیرکولاسیون هوای گرم و جایگزینی آن با هوای سرد است وگرنه سطح رادیاتور سهم اندکی در گرمایش مستقیم خواهد داشت. لایهٔ مرزی حرارتی با دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد، که حدود ۱۰ سانتی‌متر عرض دارد، هرچه به‌سمت بالا صعود می‌کند پهن‌تر می‌شود تا نهایتاً با دمای ۲۴/۷ درجهٔ سانتی‌گراد در فضای زیر سقف تجمع می‌یابد و رفته‌رفته با از دست دادن حرارت خود، از سمت مقابل رادیاتور به‌طرف پایین بازمی‌گردد. چیدمان حرارت کاملاً غیریکنواخت صورت گرفته است، به‌طوری‌که در کف اتاق دما ۱۹/۸ درجهٔ سانتی‌گراد و در سقف ۲۴/۷ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. برای اتاقی با این ابعاد اختلاف دمای ۴/۹ درجه‌ای، اختلافی زیاد است.



شکل ۳. صفحهٔ X-Z از سیستم رادیاتوری

شکل ۴. صفحهٔ Y-Z از سیستم رادیاتوری

معمولاً در ساختمان‌هایی که از سیستم رادیاتوری برای گرمایش استفاده می‌شود، انسان در اطراف پاهای خود احساس سرما می‌کند، حال آنکه در نواحی اطراف سر، هوا گرم‌تر است و این مطلب با سازوکار فیزیولوژیک بدن کاملاً در تناقض است. بنابر سازوکار فیزیولوژیکی بدن، انسان در شرایطی احساس راحتی می‌کند که دمای اطراف پاها بیشتر و دمای اطراف سر کمتر باشد. در دو ارتفاع مختلف، اگر دمای هوا در مجاورت دیواره‌ها اندازه‌گیری شود و این مقادیر با سیستم گرمایش از کف در همین نقاط مقایسه شود، معیار مناسبی از کارایی دو سیستم مذکور خواهد بود. در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر از کف اتاق، دما در مجاورت رادیاتور ۲۴/۵ درجهٔ سانتی‌گراد و در همین ارتفاع ولی X= +1 دما برابر ۲۰/۲ درجهٔ سانتی‌گراد است. در ارتفاع ۱/۵ متری از کف و در X= -1 دما ۲۴/۸ درجهٔ سانتی‌گراد و در X= +1

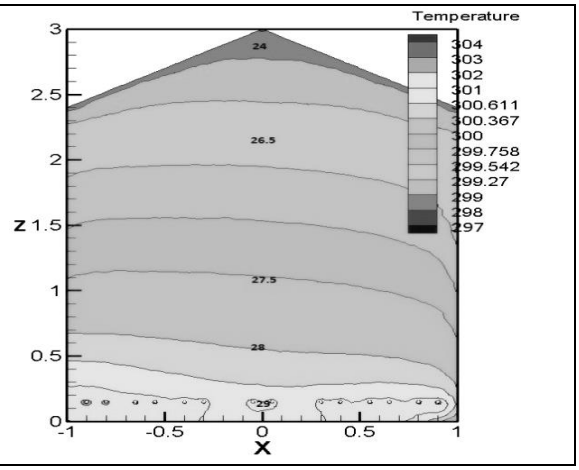
دما ۲۱ درجهٔ سانتی‌گراد است. مشاهده می‌شود که حتی در ارتفاعی یکسان، ولی طول‌های متفاوت، دماهای محلی از هم فاصلهٔ قابل توجهی دارند. شکل ۴ همان شرایط شکل ۳ را در صفحهٔ Y-Z نشان می‌دهد. در این مقطع از فضا، به‌دلیل تقارن هندسی اتاق، خطوط همدما نیز متقارن‌اند اما تجمع حرارت در زیر سقف کماکان مشخص است. در عمل عمدهٔ هزینه‌ای که جهت تأمین انرژی لازم برای گرمایش اتاق صرف شده، صرف گرم‌کردن فضایی بدون کاربرد شده و فضای قابل استفاده برای ساکنان از انرژی تولیدشده بهرهٔ کمتری خواهد برد. در این صفحه هم دما در ارتفاع ۱/۵ متری از کف، برابر ۲۱/۷ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. در این نما از شکل، لایه‌های دمایی مشخص‌تر می‌باشند و در صفحهٔ X-Z سیرکولاسیون هوای اطراف پره‌های رادیاتور نمایان است. شکل ۵ سیستم گرمایش از کف را در صفحهٔ X-Zنشان می‌دهد که دمای آب درون لوله‌ها ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. چون سطح انتقال حرارت‌کننده نسبت به سیستم رادیاتوری بیشتر است، می‌توان دمای کارکرد سیستم را دمای کمتری انتخاب کرد. در این مقطع از اتاق تقارن هندسی وجود ندارد؛ زیرا در یک طرف دیوار (X= -1) و در طرف دیگر درِ ورودی (X= +1) وجود دارد و به‌علت تغییر در ضرایب انتقال حرارت اجزای اتاق کمی عدم تقارن در خطوط همدما مشاهده می‌شود. نحوهٔ چیدمان کانتورهای دما در کف ماکزیمم و هرچه ارتفاع بیشتر می شود، رفته‌رفته دما کمتر می‌شود. بنابراین در فضای زیر سقف گرما تجمع نمی‌کند و انرژی تولیدشده صرف گرم‌کردن فضای مورد استفادهٔ ساکنان خواهد شد. البته اصلی‌ترین دلیل برای چنین چیدمان حرارتی این است که در سیستم گرمایش از کف بیشترین نرخ انتقال حرارت از طریق تابش صورت می‌گیرد؛ برخلاف سیستم رادیاتوری که کمترین نرخ تابش را خواهد داشت. براساس مدل‌سازی انجام‌شده، دمای هوا در کف اتاق ۲۹ درجهٔ سانتی‌گراد و در فضای اطراف سقف برابر با ۲۴ درجهٔ سانتی‌گراد است. بنابراین روند توزیع دما برعکس سیستم رادیاتوری خواهد بود. همچنین در مقایسه با شکل ۳ دمای هر لایه برحسب ارتفاع در طول‌های مختلف اتاق یکسان می‌باشد. مثلاً در ارتفاع ۱/۵ متری از کف، دما در مجاورت دیوار ۲۷ درجهٔ سانتی‌گراد است و در سمت مقابل و در مجاورت درِ ورودی در همین ارتفاع دما برابر با ۲۶/۷ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. حال آنکه در سیستم رادیاتوری، در همین ارتفاع اختلاف دمای بین دو دیوار جانبی ۲/۷ درجه بود. بنابراین هرقدر مساحت اتاق بیشتر باشد، توزیع حرارت نسبت به گرمایش متمرکز، یکنواخت‌تر صورت خواهد گرفت.

شکل ۶ شرایط سیستم گرمایش از کف را در صفحهٔ Y-Z نشان می‌دهد. به‌دلیل وجود تقارن هندسی در اتاق، تقارن در خطوط همدما نیز مشاهده می‌شود و چیدمان لایه‌لایه و یکنواخت حرارت که در کف بیشترین مقدار و ۲۹ درجهٔ سانتی‌گراد و در سقف کمترین مقدار و ۲۴ درجهٔ سانتی‌گراد می باشد مشخص شده است. در مقایسهٔ خطوط همدما بین سیستم رادیاتوری و سیستم گرمایش از کف، هندسهٔ کانتورهای دما در سیستم گرمایش از کف منظم‌تر و پهنای لایه‌ها یکسان‌تر می‌باشد، که این مطلب نشانگر توزیع مطبوع‌تر دما در این سیستم‌هاست. همچنین در ارتفاع بین ۱/۵ تا ۲ متر، به‌دلیل وجود پنجره‌ها، تغییری در شیب کانتورهای دما ایجاد شده است. در مقطع Y-Z هم دمای هر لایه به‌صورت سراسری ثابت می‌باشد. مثلاً در ارتفاع ۱/۵ متری دما در مجاورت هر دو پنجره ۲۷ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد، بنابراین مساحت اتاق تأثیری بر نحوهٔ توزیع دما نخواهد داشت. شکل‌های ۷ و ۸ گرادیان دما را به‌ترتیب در سیستم گرمایش از کف و سیستم گرمایش رادیاتوری نشان می‌دهد.

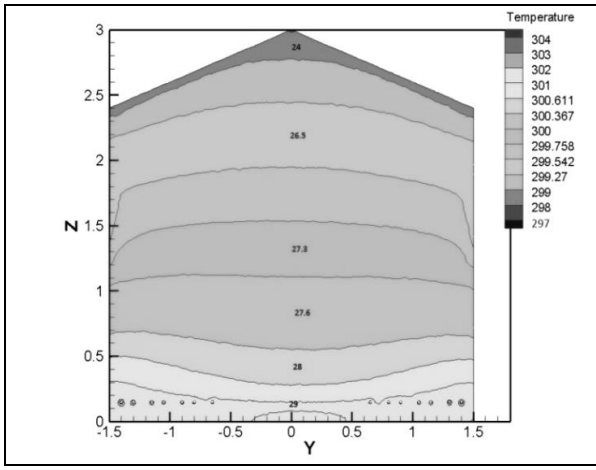
۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله مقایسه چگونگی توزیع دما در سیستم‌های گرمایش متمرکز (رادیاتوری) و سیستم‌های گرمایش از کف بررسی شد. براساس نتایج به‌دست آمده، توزیع دما در سیستم گرمایش از کف بسیار یکنواخت‌تر از سیستم

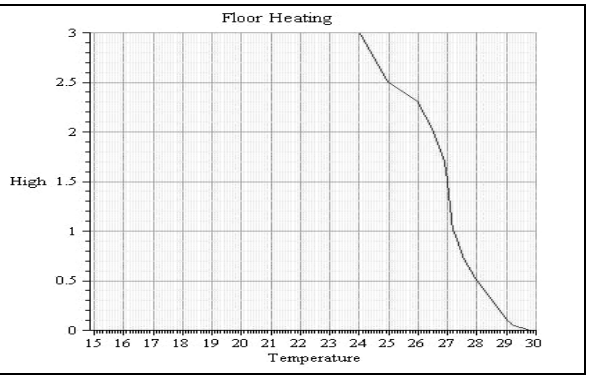
رادیاتوری است. همچنین به‌دلیل وجود نرخ تابش بیشتر، در سیستم‌های گرمایش از کف، که حدود ۶۲ درصد از مجموع انتقال حرارت را تشکیل می‌دهد، شرایط ترمودینامیکی اتاق مطبوع‌تر خواهد بود. از معایب عمدهٔ سیستم گرمایش رادیاتوری تجمع حرارت در زیر سقف است که عملاً انرژی مصرف‌شده صرف گرمایش فضایی بیهوده می‌شود. این عیب در سیستم‌های گرمایش از کف، به‌علت نرخ بیشتر تابش، از بین رفته و برخلاف سیستم‌های گرمایش متمرکز، دما در کف ماکزیمم مقدار و در اطراف سقف مینیمم خواهد بود. نکتهٔ حائز اهمیت دیگر این است که در سیستم رادیاتوری، دمای سطح رادیاتور ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد در نظر گرفته شد و در سیستم گرمایش از کف دمای آب تغذیه ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد تنظیم شد. این مطلب بیانگر استفادهٔ بهینه از انرژی در سیستم‌های گرمایش از کف می‌باشد که با وجود مصرف سوخت کمتر، شرایط ترمودینامیکی مطلوب‌تر را نیز فراهم می‌کند. چون سیستم‌های تأسیساتی، اعم از سرمایشی و گرمایشی، حدود ۶۰ درصد مصرف انرژی هر واحد مسکونی، تجاری و صنعتی را تشکیل می‌دهد، لذا توجه به مبحث طراحی و انتخاب سیستم کم‌مصرف اما پـربازده اهمیت زیادی پیدا خواهد کرد. طی تحقیقات انجام‌شده، سیستم گرمایش از کف بین ۲۵ الی ۳۰ درصد در هر واحد مسکونی مصرف سوخت را کاهش می‌دهد. حال اگر این مقدار صرفه‌جویی را به کل کشور تعمیم دهیم، به این نتیجه خواهیم رسید که با نگاهی نو به انتخاب تأسیسات برودتی و حرارتی و استفاده از سیستم‌های پربازده‌تر مانند سیستم‌های گرمایش و سرمایش تابشی علاوه بر دستیابی به آسایش ترمودینامیکی مطلوب‌تر، می‌توان به اقتصاد کشور کمک شایانی کرد.



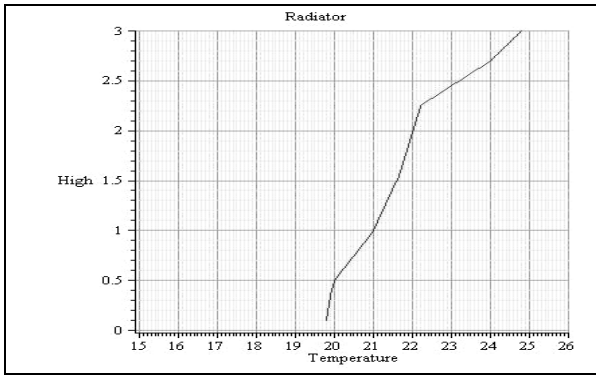
شکل ۵. کانتورهای دما در صفحهٔ X-Z درسیستم گرمایش از کف



شکل ۶. کانتورهای دما در صفحهٔ Y-Z در سیستم گرمایش از کف



شکل ۷. گرادیان دما در سیستم گرمایش از کف



شکل ۸ گرادیان دما در سیستم رادیاتوری

۶. قدردانی

در این مجال نویسندگان برخود لازم می‌دانند تا از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت و کارشناسان خدوم آن شرکت محترم، به‌دلیل حمایت‌های بی‌دریغشان در به بلوغ رسیدن این پژوهش، تشکر و قدردانی کنند.

۷. مآخذ

[۱] طباطبایی، م. *محاسبات تاسیسات ساختمان*، روزبهان، ۱۳۸۵.

[2] Richardson, "Briefing concrete floor heating", ASHRAE, 2002.

[3] Thienitis, A., *Investigation of Thermal Performance of Passive Solar with Floor Radiant Heating*, Pergamon, 1997.

[4] Alkhalaileh, M., *Modeling and simulation of solar pond floor heating system*, Pergamon, 1998.

[5] Athienitis, A., et al., *The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating system*, Pergamon, 2000.

[6] Badran, A., et al. *Comparative study for under floor heating using solar collectors of solar ponds*, Elsevier, 2004.

[7] Weitzmann, P., et al. *Modeling floor heating systems using a validated two dimensional ground coupled numerical model*, Elsevier, 2004.

[8] Sattari, S., et al. *A parametric study on radiant floor heating system performance*, Elsevier, 2005.

[9] Karadag, R., et al. *Investigation of floor Nusselt number in floor heating system for insulated ceiling conditions*, Elsevier, 2006.

[10] Karadag, R., et al. *A numerical investigation on effects of ceiling and floor surface temperatures and room dimensions on the Nusselt number for a floor heating system*, Elsevier, 2007.

[11] Zhai. X.Q., et al. *Design and performance of the solar-powered floor heating system in a green building*, Elsevier, 2008.

[12] Fontana, L., *Thermal performance of radiant heating floors in furnished enclosed spaces*, Elsevier, 2010.

[13] Rahimi, M., et al. *Experimental study of radiation and free convection in an enclosure with under-floor heating system*, Elsevier, 2010.

[14] Entrop, A.G., et al. *Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses*, Elsevier, 2011.

[15] Maleh, H., et al. *Studying, Testing and simulating floor heating solar system*, Elsevier, 2011.

[16] Maleh, H., et al. *Studying and simulating low flow floor heating solar system*, Elsevier, 2011.

[۱۷] علمداری و همکاران. *بررسی عددی تاثیر آرایش لوله ها در سیستم گرمایش از کف بر انتقال حرارت و افت فشار*، پژوهشگاه نیرو، ۲۰۱۱.

پی‌نوشت

1. Computational Fluid Dynamics (CFD)

2. Hydronics

3. Convection
4. Nusselt
5. Marmara University, http://www.marmara.edu.tr (accessed Jan 13, 2014)
6. Rayleigh

۷. از مواد تغییر فاز دهنده (Phase Change Materials)، که گاه به اختصار PCM نیز خوانده می‌شوند، در مواردی چون کاربردهای پزشکی، گرمایش و سرمایش، حفاظت گرمایی مواد غذایی، منسوجات، ساختمان و جز این‌ها استفاده می‌شود. در سالیان گذشته، استفاده از این مواد در کاربردهای ساختمانی به‌منظور کاهش مصرف انرژی بسیار مورد توجه بوده است. مواد تغییر فاز دهنده مناسب برای کاربرد در جدار ساختمان باید دارای ویژگی‌های زیر باشند:

الف) داشتن رسانش گرمایی کم برای ایجاد تأخیر زمانی در فرایند تغییر فاز

ب) دارابودن گرمای نهان بر واحد جرم زیاد

ج) داشتن گرمای ویژهٔ بالا جهت چشم‌گیرتر شدن آثار گرمای محسوس

د) داشتن تغییر حجم کم در حین تغییر فاز جهت سهولت در انتخاب هندسهٔ محفظهٔ نگه‌دارندهٔ مواد تغییر فاز دهنده

ه) داشتن دمای ذوب در محدودهٔ دمای عملیاتی

و) مقاوم‌بودن در برابر خوردگی

ز) داشتن پایداری شیمیایی

ح) اشتعال‌ناپذیری

ت) سمی نبودن

ی) و در نهایت فراوانی و در دسترس بودن.

عملکرد مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان بدین صورت است که در روز به‌عنوان یک عایق در جدار مانع از گرم‌شدن فضای داخل می‌شوند؛ یعنی با گرم‌شدن ذوب می‌شوند و مقداری از انرژی حرارتی نفوذی به جدار ساختمان را در خود ذخیره می‌کنند و شب‌هنگام که هوا روبه سردی می‌رود، شروع به انجماد می‌کنند و گرمای ذخیره‌شده را به محیط داخل یا بیرون پس می‌دهند. تغییرات هوای بیرون پس از عبور از جدار کاهش یافته و همچنین دمای اوج نیز جابه‌جا می‌شود که این امر باعث می‌شود در زمان اوج مصرف نیاز به استفاده از سیستم سرمایشی کمتر شود [ویراستار].

8. Fluent ®

۹. جوزف ولنتین بوسینسک (Joseph Valentin Boussinesq)، ریاضی‌دان و فیزیک‌دان فرانسوی، در سیزدهم مارس ۱۸۴۲ دیده به جهان گشود. او توجه زیادی به تئوری هیدرودینامیک و ارتعاش، نور و حرارت داشت. در سال ۱۸۹۷ نظریهٔ چرخش و آشفتهٔ جریان مایعات را منتشر کرد که این کار تا حد زیادی به مطالعهٔ آشفتگی و هیدرودینامیک کمک کرده است. وی در نوزدهم فوریهٔ ۱۹۲۹ دیده از جهان فروبست [ویراستار].

10. Second Order Upwind
11. Grashof
12. Reynolds

شرکت ایتراک
ITRAC ایتراک
مهندسی و ساخت تجهیزات صنایع ایران

طراحی و ساخت تجهیزات صنایع :
به ویژه برای:
- صنایع غذایی و دارویی
- صنایع شیمیایی و پتروشیمی
- تجهیزات کشتارگاهها و صنایع جنبی گوشت
- سیستم‌های انتقال مواد
- تجهیزات خطوط رنگ کارخانه‌ها
- کوره‌های زباله‌سوز و لاشه سوز
- مخازن تحت فشار و راکتورها
- سازه‌های صنعتی و انواع گریتینگ با گالوانیزه گرم

تهران ـ خیابان ظفر ـ خیابان نصیری ـ بلوار سیما جنوبی ـ شماره ۱۶
صندوق پستی ۱۱۳۶ ـ ۱۹۳۹۵
تلفن: ۲۲۲۶۰۷۴۲ـ ۲۲۲۷۲۸۳۹ تلفکس: ۲۲۲۶۰۹۹۰
web site:www.itrac-co.com
E-mail: info@itrac-co.com

از تمامی خوانندگان و علاقمندان به همکاری با مجلهٔ علمی ترویجی *مهندسی مکانیک* دعوت می‌شود تا دست‌نوشته‌ها، مقاله‌ها و گزارش‌های علمی و فنی خود را به دبیرخانهٔ دائمی مجلهٔ *مهندسی مکانیک* ارسال فرمایند.

هیئت تحریریهٔ مجلهٔ *مهندسی مکانیک*