

مدل‌سازی ترمودینامیکی مصرف انرژی فر اجاق گاز

سیامک کاظم‌زاده‌حنانی (دانشیار)

امیرحسن کاکالی (دکتری)

محمدحسن سعیدی (دانشیار)

سعید ولی‌پور (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

شعبه‌سازی روشی مناسب و کم هزینه برای تعیین عوامل مؤثر در مصرف انرژی و روش‌های بهبود بازده فر در اجاق‌های گاز است. اما این وسیله‌ی ساده به علت ماهیت فیزیکی آن (عدم وجود جریان غالب) با مشکلاتی مواجه است. سرعت سوخت سوخته شده بسیار کم است. و نیز شرایط مرزی پیچیده‌ی بر مسئله حاکم است. چنانچه بخواهیم همه‌ی معادلات حاکم بر جریان و انرژی را به طور کامل (سه‌بعدی و گذرا) حل کنیم مسئله بسیار پیچیده می‌شود. حتی بعد از حل مسئله سازوکاری برای تأیید صحت عملکرد وجود ندارد.

در نوشتار حاضر با رعایت یک سری فرضیات، معادلات دیفرانسیل ساده‌تری مورد استفاده قرار گرفته است. این معادلات مدلی ترمودینامیکی از رفتار محفظه‌ی فر، ظرف داخل فر، عایق‌بندی، محفظه‌ی احتراق و شیر کنترل گاز ارائه می‌دهند. و با استفاده از الگوریتم‌های عددی حل می‌شوند. به این ترتیب می‌توان اطلاعات متعددی از حالت‌های مختلف فر به دست آورد. اما نکته‌ی مهم تأیید روش حل است. با انجام یک سری آزمون‌ها در آزمایشگاه اعتبار مدل، مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است.

مقدمه

مصرف انرژی فر، وجود عدد مرجع برای مقایسه یکی از تفاوت‌های این استانداردها، خصوصاً DOE و بقیه‌ی استانداردهاست. در آزمون مصرف استانداردهای AS و EN، رابطه‌ی که به حجم فر بستگی دارد، برای مقایسه معرفی می‌شود که در استاندارد DOE چنین عدد مرجعی وجود ندارد. مقدار حداکثر مجاز مصرف فر و روش‌های آزمون در جدول ۱ به تفکیک استانداردها آمده است.

در استاندارد DOE از بلوک آلومینیومی برای این تشابه‌سازی استفاده شده است. با این خصوصیت که در بلوک آلومینیوم گردی‌ان دمایی تأثیری نداشته و اندازه‌گیری دما را آسان و دور از خطا می‌کند.

جدول ۱. مقایسه‌ی روش‌های آزمون حد مجاز مصرف انرژی فر.

استانداردها	روش‌ها	حد مجاز
DOE	اندازه‌گیری زمان و حجم گاز مصرفی تا زمانی که دمای بلوک به 130°C بالاتر از محیط برسد.	ندارد ^۳
EN	اندازه‌گیری زمان و حجم گاز مصرفی تا زمانی که دمای داخل فر به 180K بالاتر از دمای محیط برسد.	$0.93+0.35V^*$
AS	اندازه‌گیری زمان و حجم گاز مصرفی تا زمانی که دمای داخل فر به 195°C بالاتر از دمای محیط برسد.	$3+5.0V^*$
ISIRI&ANSI	ندارد	ندارد

* منظور از V در این فرمول‌ها حجم فر است.

مدل‌سازی ابزاری برای شناسایی رفتارهای فیزیکی حاکم، با صرف هزینه و زمان کمتر است. از این ابزار به منظور تعیین پارامترهای مهم در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی در فر اجاق گاز به کار گرفته شده است. در این زمینه مطالعاتی توسط مؤسسات اروپایی و آمریکایی نظیر DOE^۱ و CENELEC^۲ صورت گرفته است اما این تحقیقات با توجه به الگوی مصرفی کشور مورد نظر انجام شده‌اند. به طور مثال اکثر نتایج به دست آمده در گزارش DOE با استفاده از داده‌های AHAM^۳ به دست آمده‌اند. لذا برای الگوی مصرف ایرانی، این تحقیقات با معیار نمونه‌ی ایرانی - که از سری آزمون‌های شناسایی به دست آمده - انجام شده است. به علت در دست نبودن داده‌های متمرکز و معتبر توسط سازندگان ایرانی، از مدل‌سازی ترمودینامیکی برای پیشگویی رفتار پارامترهای مهم در فر اجاق گاز استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی توسط آزمون‌های طراحی شده به همین منظور اعتبار دهی شده است. بر این اساس نیاز به استاندارد مبنای، به منظور تعیین معیار نمونه و شناخت اولیه‌ی فیزیک حاکم، ضروری است.

ارزیابی استانداردها

در این خصوص استانداردهای ANSI، EN، JIS، AS، ISIRI و علاوه بر استاندارد DOE مطالعه شده‌اند.^[۱-۷] در مورد آزمون

مدل‌سازی

برای حل معادلات دیفرانسیلی کلی، به اطلاعاتی در خصوص فیزیک رفتاری فر، رژیم‌های جریانی، شرایط مرزی و پدیده‌های موجود در فرایند نیاز است. با مطالعه‌ی مراجع قابل دسترس متأسفانه اطلاعاتی در خصوص محفظه‌های بسته با این شرایط مرزی و ابعادی موجود نیست. [۱۱-۱۶] نحوه‌ی محاسبه‌ی رایلی در چنین محیطی موجود نیست. مقادیر تقریبی رایلی، که برای محاسبه‌ی ضرایب انتقال حرارت سطوح به دست آمده است، در منطقه‌ی گذرا نشان پیچیدگی مسئله است. همچنین با یک نگاه دقیق و عمیق به مسئله می‌توان تابعیت شدید نسبت به زمان در پدیده‌ی جابه‌جایی آزاد با شرایط مرزی پیچیده و سه‌بعدی بودن کامل پدیده را درک کرد. با این مطالعات اولیه، مدل‌سازی فر از طریق روش‌های عددی مستقیم در این مرحله غیر ممکن است. لذا شناخت پدیده‌های موجود و آگاهی بیشتر در مورد فیزیک حاکم مورد نیاز است. به همین منظور از مدل‌سازی ترمودینامیکی به‌عنوان گامی در جهت شناسایی پدیده‌های موجود استفاده می‌شود.

فرا جاق گاز توسط مدل ترمودینامیکی مدل‌سازی می‌شود. نشان داده می‌شود که چگونه می‌توان به‌جای حل معادلات دیفرانسیلی جزئی حاکم، که نحوه‌ی اعتباردهی آنها در چنین مسئله‌ی مشخص نیست، با استفاده از فرض حرارتی متمرکز و حل معادلات دیفرانسیل معمولی حاکم به‌صورت هم‌زمان به نتایجی کاربردی دست یافت. همچنین به نحوه‌ی تأیید و اعتباردهی نتایج حاصله از مدل ترمودینامیکی پرداخته می‌شود.

معادلات حاکم

شکل ۱ نمایی از فر اجاق گاز است. عملکرد فر بدین صورت است که هوای ورودی از دیواره‌ی عقب گرمخانه و سوراخ‌های زیرین محفظه‌ی مشعل وارد شده و از طریق وتوری با گاز طبیعی آمیخته

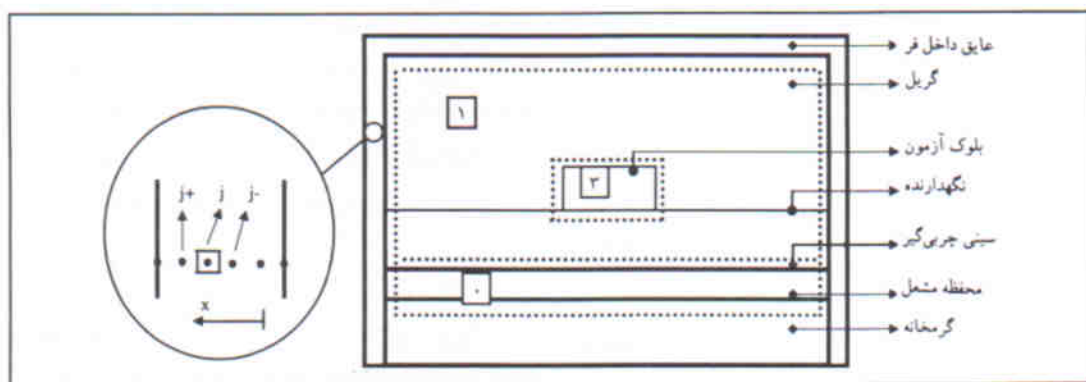
لازم به ذکر است که اخیراً CENELEC نسخه‌ی جدیدی از استاندارد اجاق خوراک‌پزی برقی به‌شماره‌ی EN ۵۰۳۴ ارائه کرده است که البته هنوز در مرحله‌ی تدوین نهایی است. [۸] مطابق این استاندارد برای تعیین مصرف انرژی فر، می‌توان از گرم شدن یک بلوک آزمون به‌نام آزمون آجر استفاده کرد. با این حال، در مورد اجاق‌های خوراک‌پزی گازسوز هنوز استاندارد EN ۳۰۰-۲-۱-۱ EN اعتبار دارد که همان‌طور که ذکر شد، از جسم گرم‌شونده در فر استفاده نمی‌کند. البته برای تدوین برجسب‌های انرژی استاندارد جدیدی نوشته شده که هنوز در مرحله‌ی پیش‌نویس قرار دارد. [۹] بر اساس مطالعات انجام شده، بدون در نظر گرفتن بلوک آزمون در فر، اندازه‌گیری مصرف انرژی فرها ممکن است دچار خطاهای قابل توجهی شود و عملکرد دستگاه را شبیه‌سازی نکند. [۱۰]

استاندارد مینا

استاندارد DOE مناسب نیازها و هدف این نوشتار شناخته شده است. بنابراین مختصراً به توضیح آن می‌پردازیم. وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز عبارت‌اند از: دبی‌سنج، حجم‌سنج (کتور)، فشارسنج U شکل، دستگاه داده برداری، ترموکوپل، بلوک آزمون. روش آزمون چنین است که پس از تنظیم ترموستات و کنترل دمای محیط و فشار گاز، بلوک آزمون را وسط فر قرار داده و میزان مصرف گاز به‌منظور افزایش دمای بلوک به اندازه‌ی 13°C اندازه‌گیری می‌شود. اعداد ثبت شونده عبارت‌اند از: دمای اتاق در ابتدا و انتهای آزمون (T_R)، جرم بلوک، دمای اولیه‌ی بلوک، زمان کل آزمون (t_{CT})، ارزش حرارتی‌گاز مصرفی (H)، فرمول‌های محاسباتی مورد نیاز عبارت‌اند از:

$$E_p(kJ) = H \cdot V_p \quad (۱) \text{ انرژی مصرفی گاز}$$

$$E_{eff} = \frac{W_p \cdot C_p \cdot T_s}{E_p} \quad (۲) \text{ بازده}$$



شکل ۱. حجم کنترل‌های فرض شده در مرحله‌ی نهایی شامل:

• محفظه‌ی مشعل (سیستم متمرکز شماره‌ی صفر) ۱. فر (سیستم متمرکز شماره‌ی یک) ۳. بلوک آزمون (سیستم متمرکز شماره‌ی سه)

علت استفاده از معادله‌ی جبری به‌جای معادله‌ی دیفرانسیلی این است که اختلاف زیاد ظرفیت حرارتی سینی چربی‌گیر با سایر سیستم‌ها باعث اختلاف شدید در ثابت زمانی سیستم‌ها شده که به سخت شدن^۷ معادلات منجر می‌شود، و در نتیجه مشکلات همگرایی حل را در پیش دارد. جمله‌ی اول و دوم ورودی‌ها به سینی چربی‌گیر هستند که ناشی از جابه‌جایی اجباری و تابش شعله‌پخش‌کن به سینی است. جمله‌ی سوم خروجی از سیستم است که ناشی از انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد از سینی چربی‌گیر به سیستم یک است.

سیستم متمرکز شماره‌ی یک

حجم داخل محفظه‌ی فر نیز به‌عنوان سیستم متمرکز یک نامگذاری شده است که غذا یا بار مورد نظر در آن جاگذاری می‌شود. این سیستم با معادله‌ی ۵ مدل می‌شود.

$$(Mc_p)_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \dot{m}c_{p,flue}(T_* - T_1) + hA_{bw}(T_w - T_1) - hA_{sw}(T_1 - T_{t,1}) - hA_{tb}(T_1 - T_p) \quad (5)$$

جمله‌های اول و دوم، ورودی‌های حرارتی به سیستم یک هستند که نشان‌دهنده‌ی دبی عبوری محصولات احتراق و حرارت جابه‌جایی آزاد از طریق سینی چربی‌گیر هستند. اتلافات عبارت‌اند از جابه‌جایی از سیستم به بدنه و به بلوک آزمون، که به‌صورت جمله‌ی سوم و چهارم سمت راست معادله‌ی ۵ آمده‌اند. خروجی این معادله T_1 یا همان دمای محفظه‌ی فر است که جواب مسئله و یا شاخص اصلی مدل است. از همین دما برای کنترل دبی و از طریق به‌کارگیری مستقیم ترموستات استفاده می‌شود.

عایق

نظر به اینکه استفاده از فرض سیستم متمرکز برای عایق به‌علت بالا بودن عدد بیو^۸ نادرست است، این سیستم با معادله‌ی حرارت مدل می‌شود.

$$(\rho c_p)_{ins} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{ins} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6)$$

سیستم متمرکز شماره‌ی سه

بلوک آزمون به‌عنوان سیستم متمرکز سوم در نظر گرفته شده است. بلوک آزمون تمامی حرارت تحویلی از سیستم یک را صرف بالا بردن دمای خود می‌کند. در نتیجه معادله‌ی دیفرانسیلی آن به‌صورت معادله‌ی ۷ است.

$$(Mc_p)_3 \frac{\partial T_p}{\partial t} = hA_{tb}(T_1 - T_p) \quad (7)$$

می‌شود. قسمتی از هوا نیز مستقیماً از روی شعله عبور می‌کند تا فرایند سوخت کامل شود. شعله و محصولات احتراق تأمین‌کننده‌ی حرارت لازم برای افزایش دمای محفظه‌ی فر هستند. شعله از طریق شعله پخش‌کن و با سازوکار تشعشع و جابه‌جایی اجباری سینی چربی‌گیر را داغ می‌کند. سینی چربی‌گیر نیز با سازوکار جابه‌جایی آزاد این حرارت را به محفظه‌ی فر منتقل می‌کند. محصولات احتراق نیز به‌صورت مستقیم از شیارهای تعبیه شده بر سینی چربی‌گیر وارد محفظه‌ی فر می‌شود. علاوه بر نشت حرارتی هدایتی از دیوارها و نشت از درزها، محصولات احتراق نیز، از طریق دودکش تعبیه شده در حد بالایی دیواره‌ی عقبی، مقداری حرارت را از محفظه‌ی فر خارج می‌کند.

در فر اجاق گاز پنج سیستم مجزا در نظر گرفته می‌شود که عبارت‌اند از: محفظه‌ی مشعل، سینی چربی‌گیر، محفظه‌ی فر، عایق بدنه و بلوک آزمون. چهار سیستم اول به‌عنوان سیستم متمرکز فرض می‌شوند و برای سیستم عایق‌بندی، معادله‌ی حرارتی نوشته می‌شود. معادلات هر جزء به‌صورت زیر توضیح داده می‌شود:

سیستم متمرکز شماره‌ی صفر

محفظه‌ی مشعل به‌عنوان سیستم متمرکز صفر در نظر گرفته شده است که با معادله‌ی ۳ مدل می‌شود.

$$(Mc_p)_0 \frac{\partial T_*}{\partial t} = k_{burner} \dot{m} h_{fg} + (\dot{m}c_p T_\infty)_{air} + (\dot{m}c_p T_\infty)_{gas} - hA_s(T_* - T_w) - UA_s(T_* - T_\infty) - \alpha \epsilon AF(T_{flame}^* - T_w^*) - (\dot{m}c_p T_*)_{flue} \quad (3)$$

ورودی‌های سیستم متمرکز صفر عبارت‌اند از: گرمای حاصل از احتراق، دبی هوای ورودی و دبی گساز که به ترتیب به‌صورت جمله‌های اول تا سوم سمت راست معادله‌ی ۳ آمده‌اند. خروجی‌های سیستم عبارت‌اند از: اتلافات حرارتی از طریق سینی چربی‌گیر، بدنه‌ی محفظه‌ی مشعل، تشعشع از شعله پخش‌کن و خروجی محصولات احتراق که جملات چهارم تا هفتم سمت راست معادله‌ی فوق را تشکیل می‌دهند.

سینی چربی‌گیر

حد فاصل سیستم صفر و یک را سینی چربی‌گیر تشکیل می‌دهد که با معادله‌ی جبری ۴ مدل می‌شود.

$$hA_s(T_* - T_w) + \alpha \epsilon AF(T_{flame}^* - T_w^*) - hA_{bw}(T_w - T_1) = 0 \quad (4)$$

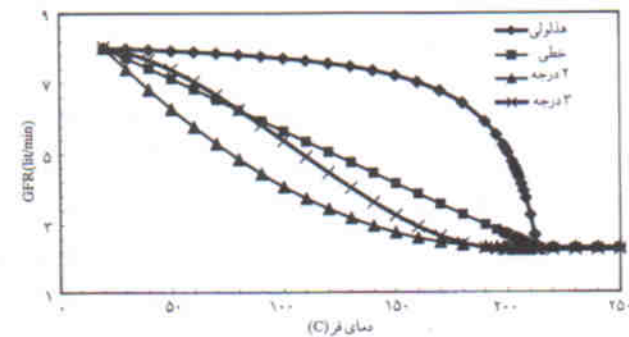
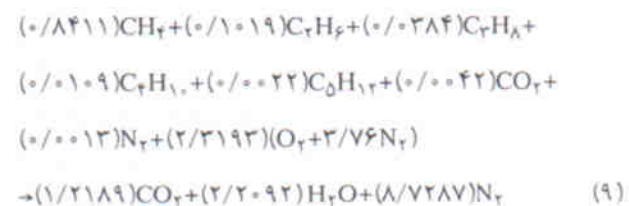
محاسبه‌ی ضرایب

محاسبه یا اندازه‌گیری دقیق ضرایب انتقال حرارت به کار رفته نیازمند وقت و دقت بیشتری است؛ ولی در این کار بدان توجه نشده است. زیرا مطابق آنچه که گفته شد، پیچیدگی جابه‌جایی آزاد ما را از مدل ترمودینامیکی دور می‌سازد. لذا در ابتدا حدس اولیه‌ی (در محدوده‌ی قابل قبول) به منظور حل معادلات در نظر گرفته شده است. سپس با حل مدل و میزان کردن توسط مقایسه‌ی حل عددی با نتایج تجربی به مقادیر دقیق‌تر و واقعی‌تر نزدیک می‌شویم. تخمین اولیه‌ی ضرایب انتقال حرارت با استفاده از یک دسته فرضیات و توسط فرمول‌های ارائه شده برای صفحات تخت به دست می‌آیند. در اینجا محاسبات اولیه‌ی دبی گاز و محصولات احتراق آمده است.

دبی گاز توسط معادلات شکل ۲ مدل شده‌اند. البته این مدل‌ها به‌تنهایی پاسخ‌گوی شبیه‌سازی رفتار ترموستات نیستند، زیرا تأثیر ثابت‌های زمانی در سیستم‌ها و تأثیر تأخیر زمانی خود ترموستات در این مدل‌ها دیده نمی‌شود. لذا مدل تأخیر زمانی به صورت معادله‌ی ۸ به این مدل‌ها اضافه شده تا رفتار ترموستات به صورت مناسبی شبیه‌سازی شود.

$$y(t) = y(t-T) \quad (8)$$

محاسبه‌ی دبی محصولات احتراق براساس درصد مولی اکسیژن در محصولات احتراق خشک در دودکش است که از آزمون به دست می‌آید. آنالیز گاز طبیعی به کار گرفته شده در محاسبات از شرکت ملی گاز به دست آمده است. با توجه به نسبت‌های مولی اجزاء تشکیل دهنده‌ی گاز طبیعی، معادله‌ی استوکیومتری احتراق به صورت زیر نوشته می‌شود:



شکل ۲. تعیین رفتار ترموستات برحسب دمای اجاق.

روش حل

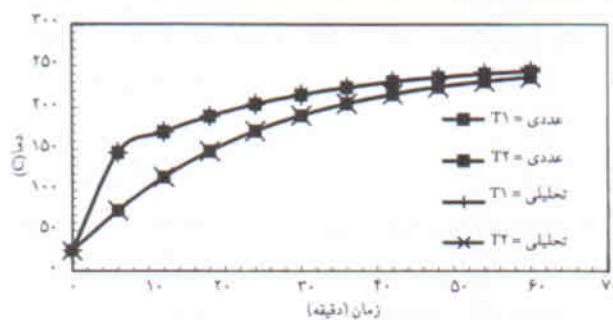
برای حل معادلات حاکم یک برنامه‌ی عددی نوشته شده است. در این برنامه از روش رونگه کوتاه مرتبه چهار برای معادلات دیفرانسیل، و از روش تکرار نقطه‌ی ثابت برای تنها معادله‌ی جبری به همراه تکنیکی برای مدل کردن تأخیر زمانی استفاده شده است. معادله‌ی ۴ نیز به صورت زیر با روش انفصال صریح^۹ گسسته‌سازی شده و با همان روش رونگه کوتاه حل می‌شود.

$$\frac{\partial T_{t,1}}{\partial t} = \frac{h_i}{(\rho cp)_{iso} \Delta x} (T_1 - T_{t,1}) - \frac{k_{iso}}{(\rho cp)_{iso} \Delta x^2} (T_{t,1} - T_{t,2}) \quad (10)$$

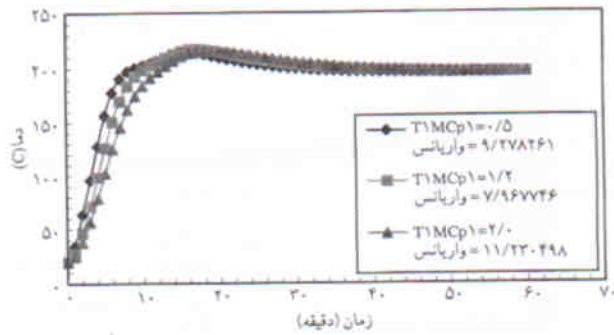
$$\sum_{j=2}^J \frac{\partial T_{t,j}}{\partial t} = a \left[\frac{T_{t,j+1} - 2T_{t,j} + T_{t,j-1}}{\Delta x^2} \right] \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{t,J}}{\partial t} &= \frac{k_{iso}}{(\rho cp)_{iso} \Delta x^2} (T_{t,J-1} - T_{t,J}) - \\ & \frac{h_i}{(\rho cp)_{iso} \Delta x} (T_{t,J} - T_\infty) \end{aligned} \quad (12)$$

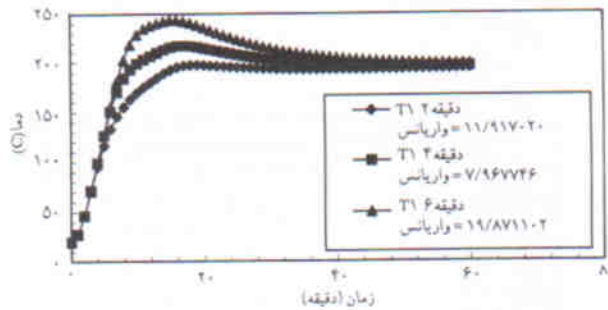
به منظور بررسی صحت عملکرد، پاسخ حل عددی با جواب به دست آمده از حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل ساده شده مطابقت داده شده است. این ساده‌سازی شامل فرض دو سیستم متمرکز برای محفظه‌ی فر و عایق، و ثابت گرفتن ضرایب است. با این فرض معادلات حاکم به دو معادله‌ی دیفرانسیلی معمولی و دارای حل تحلیلی تبدیل می‌شوند. نتایج این ارزیابی در شکل ۳ دیده می‌شود. بررسی دیگر مربوط به بررسی همگرایی است. در روش رونگه کوتاه با کوچک کردن اندازه‌ی گام باید خطای حل عددی نیز کاهش یابد. این موضوع از طریق کنترل کردن مدل با اندازه‌ی گام‌های ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۰۶۷ و ۰/۰۰۰۵۵ دقیقه صورت گرفته که نتایج آن در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است.



شکل ۳. مقایسه‌ی پاسخ تحلیلی و عددی (T_۱ و T_۲ دمای فر و عایق).



شکل ۷. تأثیر ظرفیت حرارتی سیستم ۱ بر دمای فر.



شکل ۸. تأثیر تأخیر زمانی بر دمای فر.

برای ضرایب در نظر گرفته می شود. این شکل ها تأثیر ظرفیت حرارتی سیستم متمرکز یک، تأخیر زمانی و ظرفیت حرارتی سیستم متمرکز صفر و ضریب انتقال حرارت کلی سیستم صفر را بر روی دمای داخل محفظه ی فر نشان می دهد.

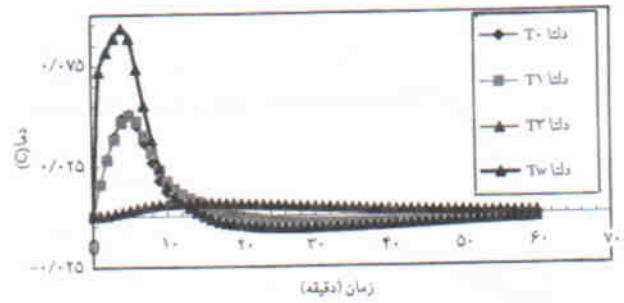
نتایج

با استفاده از مدل نهایی و طی مسیری که در قسمت های قبل برای تنظیم پارامترهای فیزیکی تعیین کننده ی رفتار فر انجام شد نتایج زیر به دست آمده است.

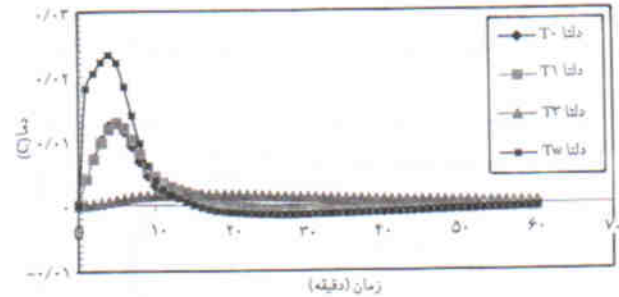
همان طور که در شکل های ۹ و ۱۰ دیده می شود انطباق مناسبی بین داده های تجربی و عددی وجود دارد، به طوری که انحراف معیار پاسخ مدل با نتایج تجربی به اندازه ی $4/7^{\circ}\text{C}$ است.

بحث بر نتایج

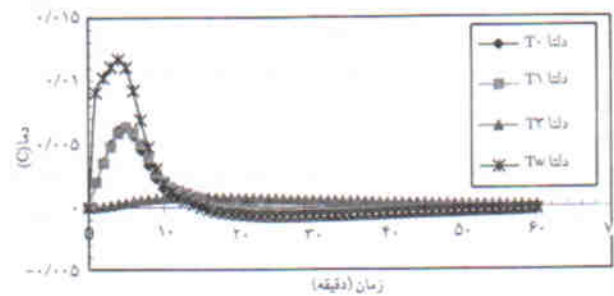
همان طور که در شکل ۱۱ دیده می شود، حدود ۲۰ دقیقه طول می کشد تا دمای داخل فر به حالت دائم برسد. در طول این مدت سازوکار حاکم گذراست. شیب نمودار در این حالت بستگی به ظرفیت های حرارتی داخل فر اجاق گاز دارد. اطلاعات به دست آمده از مدل توسط آزمون ها صحه گذاشته شده است. دمای حالت پایدار در محفظه ی فر از طریق شیر کنترل تنظیم می شود.



شکل ۴. باقیمانده ی $0.002/$ و $0.001/$ دقیقه.



شکل ۵. باقیمانده ی $0.001/$ و $0.0067/$ دقیقه.

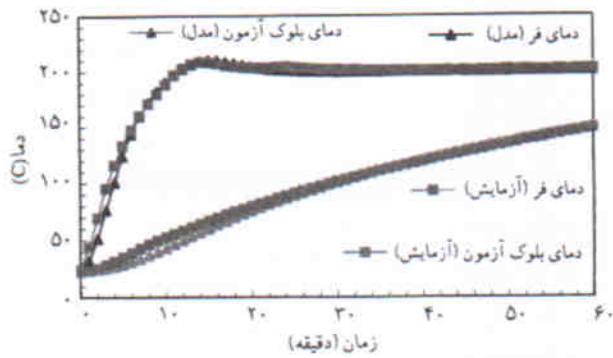


شکل ۶. باقیمانده ی $0.0067/$ و $0.0005/$ دقیقه.

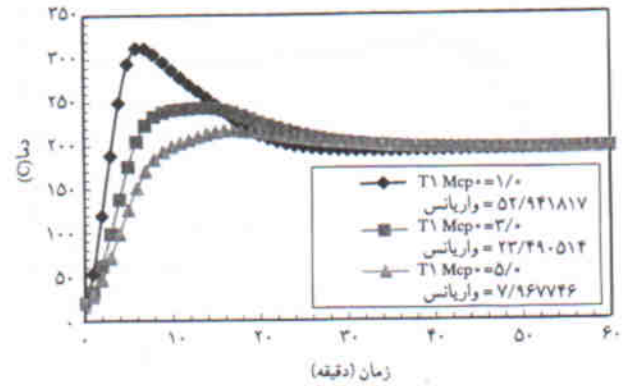
همان طور که ملاحظه می شود با افزایش گام باقی مانده های به دست آمده از تفاضل حل جدید با حل قدیم کاهش یافته که نشان دهنده ی همگرایی جواب هاست. در شکل های ۵ و ۶ ΔT_1 معرف اختلاف دمای داخل فر در حالت های معرفی شده است. ΔT_2 ، ΔT_w و ΔT_0 نیز به همین ترتیب اختلاف دمای سینی چربی گیر، دمای بلوک آزمون و دمای سیستم صفر هستند.

تصحیح ضرایب

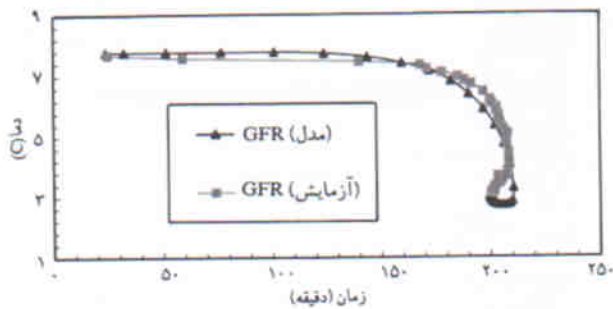
با تنظیم پاسخ عددی و مقایسه ی آن با نتایج آزمایشگاهی، ضرایب تخمینی محاسبه شده تصحیح می شود. در شکل های ۷ و ۸ نمونه هایی از تأثیر ضرایب در پروفیل دمایی و انحراف معیاری که نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارد دیده می شود. با کمینه کردن مقدار انحراف معیار، و نیز مطابقت کیفی پروفیل دمایی مقادیر مناسب تر



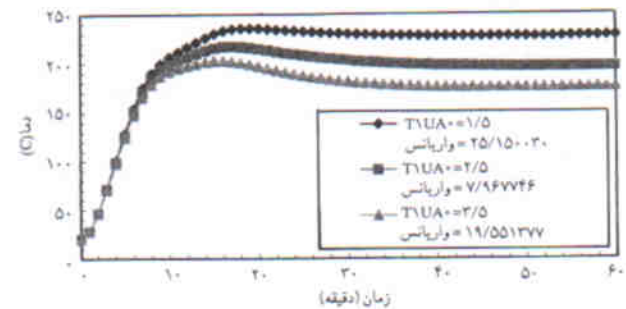
شکل ۱۱. نتیجه‌ی نهایی حاصله از مدل (دمای فر و بلوک آزمون).



شکل ۹. تأثیر ظرفیت حرارتی سیستم صفر بر دمای فر.



شکل ۱۲. نتیجه‌ی نهایی حاصله از مدل (عملکرد ترموستات).



شکل ۱۰. تأثیر ضریب انتقال حرارت کلی محفظه‌ی مشعل بر دمای فر.

نوشتار انطباق مناسبی با رفتار کارکرد فر دارد. بررسی و تحقیق در زمینه‌ی صرفه‌جویی انرژی با شناخت پارامترهای فیزیکی مؤثر و نحوه‌ی تأثیر هر کدام بر عملکرد فر صورت می‌گیرد. مدل می‌تواند از آزمون‌های فراوان و تحمیل هزینه‌ی بسیاری در جهت شناسایی و عملکرد این پارامترها جلوگیری کند. با طراحی آزمون‌هایی در جهت اعتبار نتایج حاصله می‌توان تحقق عملی نتایج را مشاهده کرد. در کارهای آتی به نحوه‌ی استفاده از مدل در ارائه‌ی راهکارهای بهینه‌سازی پرداخته خواهد شد.

طبق گفته‌ی سازنده‌ی شیر ترموستات، رفتار این شیر کنترلی در مقابل درجه حرارت به‌صورت خطی است. اما در عمل، نمودارهای عملکردی آن نشان می‌دهد که پاسخ ترموستات در برابر تغییرات درجه حرارت در داخل محفظه‌ی فر دارای تأخیر زمانی است. این مطلب در نتایج به دست آمده از مدل در شکل ۱۲ دیده می‌شود.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که ملاحظه شد، مدل ترمودینامیکی ارائه شده در این

پانوش

1. Department of Energy (USA)
2. Comite European de Normalisation Electrotechnique
3. American Home Appliances Manufacture
۴. در حال حاضر حد مجازی برای بازده مشعل و حداکثر مصرف فر بر اساس استاندارد وجود ندارد. ولی در گزارشی از DOE در مورد یک نمونه فر اجاق گاز، بدون اصلاحات بهینه‌سازی مصرف انرژی، اعداد زیر به دست آمده است. این آزمایشات بر اساس استاندارد DOE انجام گرفته است.^[۱۷]

مورد آزمایش شده	مصرف سالانه	بازده E_{ff}
فر	۲۹۸۲۶kWh/year	۵۰/۹۲٪

5. Data Acquisition

6. Lumped Capacity
7. Stiff
8. Biot
9. Explicit

منابع

۱. استاندارد ملی ایران، شماره ۸۳۸، «اجاق گاز فردار خانگی»، چاپ سوم، (آبان ۱۳۷۰).
2. DOE 10 CFR, Ch II, Part 430, Subpart B, Appendix I, "Uniform test method for measuring the energy consumption of conventional ranges, conventional tops, conventional oven and microwave oven", (1999).

3. ANSI Z21.1 "Household cooking gas appliances", (1987).
4. AS 4551-2000, AG 101-2000, "Domestic gas cooking appliance", (2000).
5. JIS S 2093, "Test methods of gas burning appliances for domestic use", (1991).
6. BS 5258, "Specification for Safety of domestic gas appliances, Part 2: cooking appliances", (1975).
7. EN 30, "Domestic cooking appliances burning gas. Part 1-1: Safety - General. Part 2-1: Rational use of energy - General".
8. Pr EN 5034, "Electric ovens for household use, methods for measuring the energy consumption", (May 1998).
9. CEN, "draft proposal for European test on gas ovens for the purpose of energy labeling", CEN Technical Committee 49, Working Group 2, (1997).
10. "Efficient domestic ovens, final report SAVE II", Project 4.1031 p/97-047, Helsinki 2000, ISBN 951-788-304-8.
11. Ozisic M.N., *Heat Transfer*, 3rd Ed, McGraw-Hill (1985).
12. Incropera, F.P., De Witt, D.P., *Fundamental of heat and Mass Transfer*, 3rd Ed, John Wiley & Sons (1990).
۱۳. هولمن، ج.ب، «انتقال حرارت هولمن»، مترجم: حقیقی تاجور، ح. چاپ دوم، چاپ شاهین، (۱۳۷۱).
14. Bejan, A., *Convection Heat Transfer*, 2nd Ed., John Wiley & Sons , (1995).
15. Oosthuizen, P.H., Naylor, D., *An Introduction to Convection Heat Transfer Analysis*, McGraw-Hill (1999).
۱۶. کیز، کرافورد، «انتقال حرارت به روش جابه جایی»، چاپ اول، دانشگاه تهران، (۱۳۷۶).
17. "Technical Support Document for Residential Cooking Products, LBNL, ER-R17-S-97-70 Reported for DOE", (1997).