



یک روش عددی طراحی برای کوره‌های پیوسته تشعشعی پخت رنگ در صنعت خودرو

رامین مهدی‌پور^۱، علی اشرفی‌زاده^{۲*}، سیروس آفانجفی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۱۹۹۹

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۱۹۹۹

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۱۹۹۹

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۵/۱۴ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۸۸/۶/۲۰

چکیده

طراحی بهینه کوره‌های تشعشعی پخت رنگ خودرو، بخصوص برای پخت رنگ خودروهای با شکل هندسی پیچیده، کار دشوار و از این رو حائز اهمیت فراوان علمی و صنعتی است که تاکنون کمتر مورد بحث قرار گرفته است. در این مقاله الگوریتمی عددی ارائه می‌شود که قادر به تعیین دماهای بهینه گرمکن‌های سقفی در یک کوره تشعشعی پخت رنگ خودرو است. با تعریف تابع هدف بر اساس معیار کاربردی پنجره پخت، شرایط پخت مطلوب رنگ در نقاط مختلف بدنه خودرو در حالت عملکرد بهینه کوره فراهم می‌گردد. به منظور کوتاه کردن زمان محاسبات، یک مقطع دو بعدی از کوره و خودرو سمند مورد مطالعه قرار گرفته و نشان داده می‌شود که مسأله طراحی را می‌توان به کمک روش بهینه‌یابی بیشترین نرخ نزول به خوبی حل کرد. الگوریتم پیشنهادی قابل تعمیم به شرایط سه بعدی نیز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پخت رنگ، انتقال حرارت تشعشعی، طراحی کوره، بهینه‌یابی.

A Numerical Design Approach for the Continuous Radiation Paint Curing Ovens in Automotive Industries

R. Mehdipour, A. Ashrafizadeh, C. Aghanajafi

K. N. Toosi University of Technology, P.O. Box: 19395-1999, Tehran, Iran

Abstract

Design of radiation paint cure ovens in automotive industries is an important yet difficult task which has not been discussed adequately in the open literature. This is particularly true when complex body frames are considered. In this paper a numerical dynamic optimization algorithm is proposed which provides the optimum temperatures of a fixed number of radiation panels installed on the ceiling of an automotive paint cure oven. Using a paint cure window criterion to define the admissible design space and the objective function, a nearly uniform and satisfactory paint curing condition is obtained at the optimum design point. To describe the method in a simple, clear and computationally affordable context, a two-dimensional section of an oven and the automobile body is considered. It is shown that even the classical steepest descent optimization method converges fast enough in this particular application. The proposed method is also applicable in three-dimensional problems. *J. Color Sci. Tech.* 3(2009), 107-119. © Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Paint curing, Radiation heat transfer, Oven design, Optimization.

۱- مقدمه

در صنایع پخت رنگ استفاده از دو نوع کوره پیوسته و غیر پیوسته متداول است. کوره پیوسته به کوره‌ای گفته می‌شود که محصولات به طور متوالی از یک سمت آن وارد و از سمت دیگر آن خارج گردند. کوره‌های پیوسته برای پخت سریع مقدار زیادی محصول که به انرژی زیادی نیاز داشته باشند مناسب بوده و به همین دلیل در صنعت خودروسازی مورد استفاده گسترده قرار گرفته‌اند.

انتقال حرارت در کوره‌های پخت رنگ کوره با هر دو مکانیسم جابجایی و تشعشع صورت می‌گیرد ولی استفاده از کوره‌های تشعشعی با امواج IR و یا UV به تازگی مورد توجه قرار گرفته است [۱]. از جمله دلایل اقبال روز افزون به کوره‌های تشعشعی می‌توان به آلودگی کمتر و امکان کنترل بهتر فرآیند پخت اشاره نمود. استفاده از کوره‌های تشعشعی در صنعت خودرو تاکنون محدود به خودروهایی با اشکال ساده نظیر کامیون و وانت بوده است و در حال حاضر تلاش می‌شود تا کوره‌های مناسب تشعشعی برای پخت رنگ خودروهایی با اشکال هندسی پیچیده نیز طراحی و مورد بهره برداری قرار گیرد [۱].

طراحی کوره‌های تشعشعی پیوسته برای پخت رنگ بر روی اجسامی با هندسه پیچیده مانند بدنه خودرو، بر مبنای سعی و خطا بوده است. این روش معمولاً وقت‌گیر و در صورت زیاد بودن عوامل طراحی عملاً غیرقابل استفاده است. امروزه با پیشرفت قدرت کامپیوترها، روش‌های طراحی بهینه مورد توجه بیشتر محققین قرار گرفته و مقالات متعددی در این زمینه ارائه گردیده است. استفاده از فرضیات ساده‌سازی به دلیل پیچیده و بالا بودن حجم محاسبات، معمولاً اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. مدل المان محدود به عنوان یکی از کاربردی‌ترین روش‌های انعطاف‌پذیر مدل‌سازی، در همگرایی الگوریتم حل بسیار مؤثر است. روش‌های متفاوت طراحی معکوس و بهینه‌یابی در یک کوره در [۲،۳] مورد تحلیل قرار گرفته اند. بهینه‌یابی گرم‌کن‌ها در طراحی کوره در [۴،۵] مورد بحث قرار گرفته و نحوه طراحی

شرایط مرزی در کوره‌ها به روش معکوس در [۶] تشریح شده است. شرایط گذرای حرارتی که در مسأله مورد نظر نیز مورد توجه می‌باشد، در [۷،۸] مورد بحث قرار گرفته است. روش مدار به عنوان یکی از روش‌های مدل‌سازی کوره‌ها در [۹] مطرح شده است. در اغلب این تحقیقات به موضوع همگرایی محاسبات و دشواری‌های موجود در این زمینه اشاره شده است.

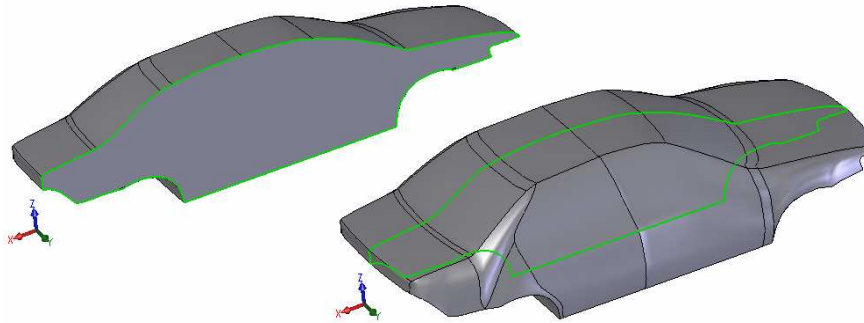
در این تحقیق، به منظور کاهش مشکلات همگرایی در مسائل طراحی کوره‌های با شرایط دینامیک پیشنهاد شده که تابع هدف بر مبنای معیار صنعتی پنجره پخت تعریف شود. روند طراحی تشریح و الگوریتم معرفی شده روی هندسه دو بعدی بدنه خودرو پیاده‌سازی می‌شود. طراحی کوره مورد نظر به دلیل وجود پیچیدگی هندسی و حرکت جسم معمولاً نیاز به الگوریتم‌های توانمند دارد. همچنین با استفاده از روش پیشنهادی در تعریف تابع هدف، طراحی کوره حتی با استفاده از روش بهینه‌یابی کلاسیک بیشترین نرخ نزول نیز امکان‌پذیر است.

۲- مدل‌سازی

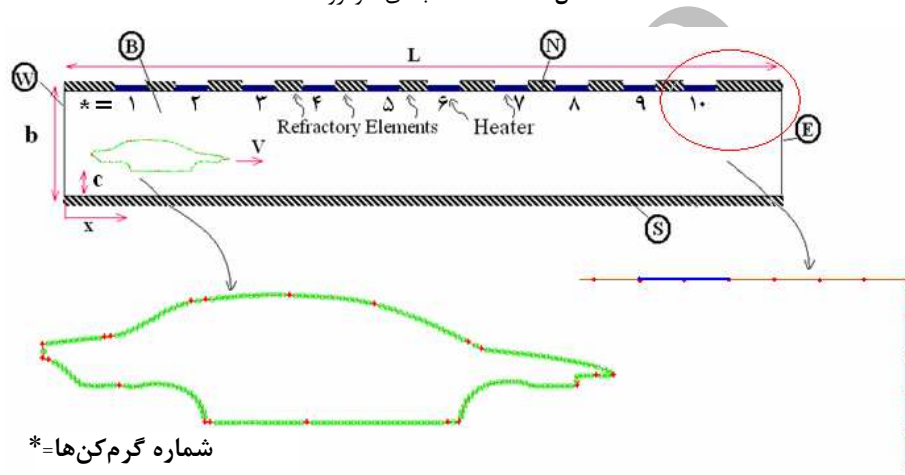
به منظور بررسی کارایی روش ارائه شده در این مقاله، از مسأله پخت رنگ روی بدنه خودرو در یک کوره دو بعدی استفاده شده است. تعمیم این روش به مسایل سه بعدی نیز عملی می‌باشد. مدل دو بعدی خودرو سمنند که در شکل ۱ نشان داده شده در مقطع میانی کوره رنگ ایران خودرو در نظر گرفته شده است [۱۰]. هندسه کوره، مش مورد استفاده بر روی کوره و بدنه خودرو و نیز محل قرارگیری جسم و ده گرم‌کن نصب شده در سقف کوره در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. بدنه خودرو از سمت چپ کوره وارد شده و از سمت راست آن خارج می‌گردد. در این مسأله هدف به دست آوردن دمای گرم‌کن‌ها به نحوی است که رنگ روی بدنه، پخت مناسب داشته باشد. در جدول ۱ مشخصات کلی مسأله ذکر شده است.

جدول ۱: مشخصات کلی مسأله.

۲۰	طول کوره (متر) (L)	۰,۰۳۰	سرعت جسم (m/s)
۲,۹۷	ارتفاع کوره (متر) (b)	۰,۵	ضریب جذب بدنه جسم
۳۵۰	دمای دیواره ورودی (کلوین)	۰,۵	ضریب جذب بدنه کوره
۳۵۰	دمای دیواره خروجی (کلوین)	۸۱۰۰	چگالی بدنه (kg/m ³)
۳۵۰	دمای جسم ورودی (کلوین)	۲	ضخامت بدنه (میلی‌متر)
۰,۸	ابعاد گرم‌کن (متر)	۵۰۰	ظرفیت حرارتی بدنه جسم (J/kg.K)
۰,۴	ابعاد متوسط هر مش روی بدنه کوره (متر)	۲۱۲	تعداد المان‌ها بر روی بدنه کوره و جسم
۰,۳۶	فاصله خودرو از کف کوره (متر) (c)	۰,۰۸	ابعاد متوسط هر مش روی بدنه خودرو (متر)
		۴,۳۴	طول خودرو (متر)



شکل ۱: هندسه سه بعدی خودرو.



شکل ۲: هندسه و مش مورد استفاده در بدنه خودرو و کوره.

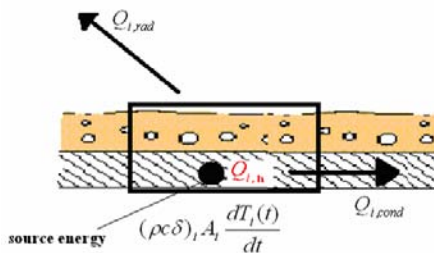
$$Q_{i,rad} = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon) / (\epsilon A_i)} \quad (2)$$

$$Q_{i,rad} = \sum_{j=1}^N A_j (J_i - J_j) F_{i-j} \quad (3)$$

N، تعداد کل نوده‌های بدنه و جسم بوده و J کل انرژی خروجی از سطح می‌باشد و از مجموع بخش انعکاس یافته و بخش صادر شده انرژی تشکیل شده است.

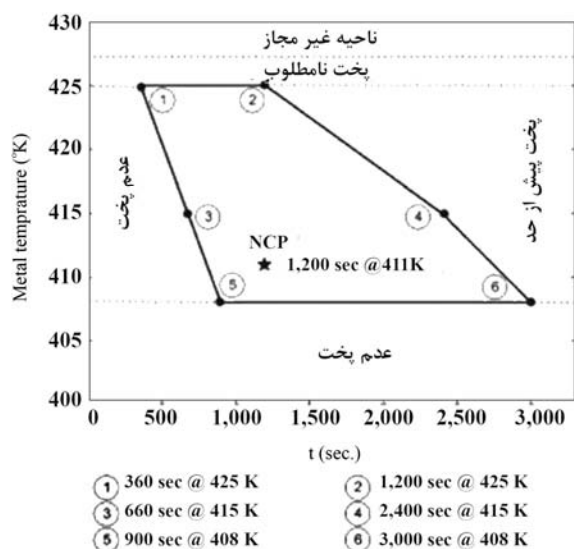
فرض می‌شود که محیط داخل کوره از نظر تشعشعی بی اثر است. دیواره‌ها دیفیوز و خاکستری بوده و برای المان‌های روی بدنه خودرو و کوره به دلیل آنکه ضخامت در برابر طول المان کم می‌باشد از شرط لامپ استفاده می‌گردد. به دلیل نازک بودن لایه رنگ، فرض هم دمایی لایه رنگ با بدنه خودرو فرض مناسبی است. از تغییرات خواص فیزیکی و نیز انتقال حرارت هدایت در دیواره صرف نظر شده است. محاسبات انتقال حرارت در کوره: برای هر المان دیفیوز خاکستری، موازنه انرژی به صورت زیر نوشته می‌شود (شکل ۳):

$$(\rho c_v \delta)_i \frac{dT_i(t)}{dt} = Q_{i,g} - Q_{i,rad} \quad (1)$$



شکل ۳: موازنه انرژی در یک المان (المان روی جسم یا بدنه کوره).

Q_{i,rad}، نشان دهنده انتقال حرارت تشعشعی می‌باشد که از جسم خارج شده و باعث کاهش دما می‌گردد. در رابطه بالا انرژی تولیدی در المان است. این ترم فقط در مورد گرم کن‌ها وجود دارد. برای هر المان روی دیواره کوره و جسم می‌توان دو معادله زیر را نوشت:



شکل ۴: یک نمونه پنجره پخت [۱۱].

که بالا نویسی "old" نشان دهنده حل ماتریس در تکرار پیشین خطی سازی می‌باشد. در صنعت پخت رنگ، کوره بعد از راه‌اندازی پیش گرم می‌شود و بعد از آنکه محیط داخل کوره به شرایط پایدار رسید پخت رنگ محصولات آغاز می‌شود. برای به دست آوردن شرایط کارکرد کف و مرزهای کوره، از حل دمایی یک کوره خالی با توجه به دمای گرم‌کن‌ها استفاده می‌شود. به دلیل آنکه از انتقال حرارت جابجایی صرف نظر شده است مرز ورود و خروج کوره با بدنه و محیط داخل یک تبادل حرارت تشعشعی دارد و مرز ورود و خروج به عنوان یک سطح تشعشعی با دمایی برابر با دمای محیط بیرون فرض می‌شود.

در نهایت ماتریسی به دست می‌آید که مجهولات آن دما و شار در نقاط مختلف است. با حل ماتریس و تصحیح پارامترهای خطی‌سازی، دما و شار حرارتی در تمامی المان‌ها در یک زمان خاص به دست می‌آیند. برای حل ماتریس از روش GMRES کمک گرفته شده است. در هر بازه زمانی مکان جسم تصحیح شده و عملیات مطرح شده تا رسیدن خودرو به انتهای کوره تکرار می‌گردد. در انتهای حل، دمای تمامی المان‌ها در هر زمان به دست می‌آید.

معیار پخت مطلوب: در پخت رنگ، معیار و استاندارد به نام پنجره پخت معرفی شده است. نمودارهای این استاندارد از کار آزمایشگاهی بر روی رنگ‌های متفاوت به دست آمده و سازنده هر رنگ معمولاً این پنجره را برای محصول خود تعیین می‌نماید. نحوه به دست آوردن این نمودارها بسیار ساده است. قطعات رنگ شده با ابعاد استاندارد را در کوره‌ای با دمای ثابت قرار می‌دهند و زمان‌هایی را که پخت مناسب آغاز شده و یا رنگ می‌سوزد، به صورت پنجره‌ای مانند شکل ۴ مشخص می‌کنند. به عنوان مثال فرض کنید در پنجره پخت شکل ۴ ورقه‌ای با لایه رنگ روی آن در محیطی با دمای ثابت ۴۱۵ درجه کلونین قرار گرفته باشد. اگر مدت زمان ماندن در این محیط

$$J = \varepsilon E_b + \rho_{rad} G \quad (4)$$

برای محاسبه ضریب شکل از فرمول تابش دو المان محدود که در مرجع [۴] جزئیات کامل آن مطرح شده است استفاده می‌شود. به دلیل آنکه در روند بهینه‌یابی هندسه تغییر نمی‌کند این ضرایب تنها در اولین مرحله بهینه‌یابی محاسبه شده و ذخیره می‌شوند. با ترکیب دو معادله بالا و حذف J معادله تبادل تشعشعی برای هر المان به شکل زیر به دست می‌آید.

$$Q_{i,rad} = \sum_{j=1}^N (E_{b,i} A_i - Q_{i,rad} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} - \quad (5)$$

$$E_{b,j} A_j + Q_{j,rad} \frac{(1-\varepsilon) A_i}{\varepsilon A_j}) F_{i-j}$$

$$E_{b,i} = \sigma T_i^4, E_{b,j} = \sigma T_j^4 \quad (6)$$

در مسأله حاضر مدل نمودن حرکت خودرو و اثر آن در محاسبه انتقال حرارت موضوع مهمی است. می‌توان حرکت جسم را به بازه‌های مشخصی گسسته نمود و در هر فاصله زمانی شرایط انتقال حرارت را شبه تعادلی فرض کرد. اگر تعداد بازه‌های زمانی به اندازه کافی زیاد باشد، فرض مذکور دقت قابل قبولی خواهد داشت. برای نمونه، در بازه زمانی k، تبادل انرژی مربوط به یک المان به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$Q_{i,rad}^k = \sum_{j=1}^N (E_{b,i}^k A_i - Q_{i,rad}^k \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} - \quad (7)$$

$$E_{b,j}^k A_j + Q_{j,rad}^k \frac{(1-\varepsilon) A_i}{\varepsilon A_j}) F_{i-j}^k$$

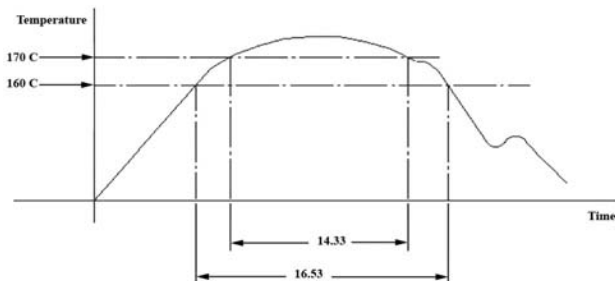
برای هر نود، دو متغیر به عنوان مجهول در نظر گرفته می‌شود؛ دمای المان و حرارت تشعشعی جذب شده. از طرفی با نوشتن معادله بالا برای هر نود، N معادله حاصل می‌شود. برای آنکه معادلات کامل باشند باید تعداد N رابطه دیگر به دستگاه قبلی اضافه شود. برای اضافه نمودن معادلات از رابطه ۱ یا شرایط مرزی معلوم (مانند عایق بودن در المان‌های دیواره) کمک گرفته می‌شود. به عنوان مثال معادله ۱ برای المانی روی بدنه خودرو به ترتیب زیر نوشته می‌شود.

$$(\rho c_v \delta)_i A_i \frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\Delta t} = -Q_{i,rad}^k \quad (8)$$

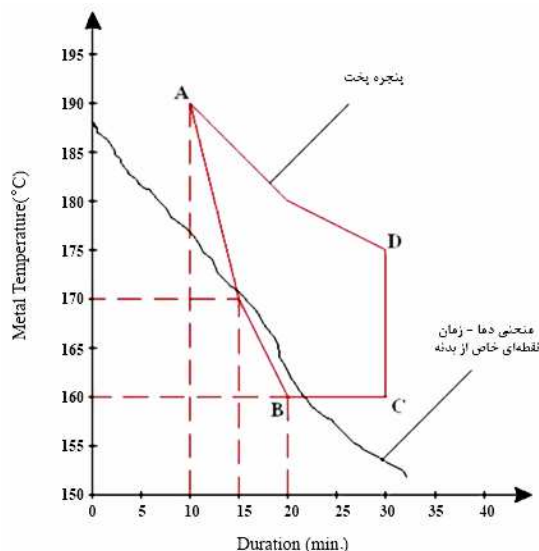
معادله ۷ به شکل زیر خطی‌سازی می‌شود.

$$Q_{i,rad}^k - \sum_{j=1}^N [\sigma (T_i^{k,old})^3 T_i^k A_i^k - \sigma (T_j^{k,old})^3 T_j^k A_j^k - \quad (9)$$

$$(Q_{i,rad}^k \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} - Q_{j,rad}^k \frac{(1-\varepsilon_j) A_i^k}{\varepsilon_j A_j^k}) F_{ij}^k = 0$$



شکل ۵: تغییرات دمای نقطه معینی از بدنه خودرو نسبت به زمان.



شکل ۶: نمونه‌ای از پنجره پخت رنگ و نتیجه به دست آمده از اندازه‌گیری.

$$\Phi_i = EIT_i|_{T_r} = \int_0^{t_c} \exp\left[C_0 \left(\frac{T_i(t) - T_r}{T_i(t)T_r}\right)\right] \Delta t \quad (11)$$

در معادله فوق T_r دمای مینا می‌باشد. عوامل E و R به ترتیب انرژی فعال‌سازی رنگ و ثابت جهانی گازها می‌باشند. در این تعریف اگر زمان معادل در داخل پنجره پخت قرار گیرد پخت مناسب انجام گرفته است. در این مقاله برای سنجش پخت مناسب از معیار زمان معادل استفاده می‌شود. برای منحنی‌های تمامی نقاط، معیار مذکور محاسبه و با پنجره پخت مقایسه می‌شود.

تعیین تابع هدف: معیار پخت مناسب می‌بایست در این مرحله به صورت یک تابع هدف تعریف گردد. در تحقیقات مشابه [۱۳] در تعریف تابع هدف از یک پروفیل دمای گذرا به عنوان پروفیل مطلوب برای تمامی نقاط استفاده شده و در حل معادلات تلاش شده است که دمای گرم‌کن‌ها به گونه‌ای تعیین گردد که تمامی نقاط روی بدنه، دارای همان پروفیل باشند. تجربه نشان داده است که این انتخاب باعث بد وضعی^۳ ماتریس ضرایب در مدل جبری گردیده و احتمال

کمتر از ۶۶۰ ثانیه باشد پخت رنگ به صورت کامل انجام نمی‌شود و اگر در این دما بیش از ۲۴۰۰ ثانیه قرار گیرد رنگ می‌سوزد. برای تهیه پنجره پخت این تست در تمامی دماها انجام می‌گیرد.

در کوره پیوسته، به علت این که هر نقطه بدنه خودرو دارای دمای متغیر نسبت به زمان می‌باشد، استفاده از این معیار کمی مشکل است. نحوه اعمال و کنترل معیار پخت در صنایع خودروسازی، بدین گونه است که در طی فرآیند پخت رنگ در کوره، با متصل کردن سنسورهای حرارتی به نقاط معینی از بدنه خودرو، اطلاعات مربوط به دما و مدت زمان حرارت دیدن آن نقاط، ثبت شده و نموداری مانند شکل ۵ به دست می‌آید. سپس اطلاعات نمودار فوق با استفاده از نرم‌افزاری خاص تحلیل می‌شود.

پس از وارد شدن اطلاعات دمایی هر نقطه، برای هر یک از دماهای مشخص شده، مطابق شکل ۵، مجموع مدت زمان سپری شده بین هر دما و دمای حداکثر محاسبه می‌شود. مثلاً در شکل ۵ در نقطه اندازه‌گیری شده مدت زمان سپری شده بین دمای ۱۷۰ درجه و دمای حداکثر، ۱۴،۳۳ دقیقه محاسبه شده است. پس از اتمام تحلیل، اطلاعات محاسبه شده (دما- مدت زمان) در نموداری که محور عمودی آن دما و محور افقی آن مدت زمان سپری شده است، رسم شده و خطی بر آن نقاط منطبق می‌گردد. نتیجه رسم این اطلاعات برای دماهای اندازه‌گیری شده در هر نقطه از بدنه خط ممتدی است که به عنوان نمودار دما- زمان آن نقطه در شکل ۶ دیده می‌شود.

پس از رسم اطلاعات تمامی نقاط، نمودار رسم شده با پنجره پخت تعریف شده برای رنگ مقایسه می‌شود. پخت استاندارد رنگ زمانی اتفاق می‌افتد که تمامی خطوط رسم شده مربوط به نقاط اندازه‌گیری شده، از وجه سمت چپ پنجره به آن وارد شده باشند. حال اگر خط اطلاعات مربوط به یک نقطه با پنجره پخت تلاقی نداشته باشد، این بدان معناست که رنگ مربوط به آن قسمت طبق معیار تعریف شده، پخت نشده است. همچنین اگر خط از وجه بالای پنجره وارد شود نشانه پخت بیش از حد^۱ است که مطلوب نمی‌باشد.

در تحقیقی پیشنهاد شده است که زمان همدمای معادل (EIT)^۲ در پنجره پخت تعریف و از آن به جای منحنی‌های دما استفاده شود [۱۱]. این پیشنهاد در کتاب توری به صورت کامل تشریح شده است [۱۲]. در روش ارائه شده توسط توری، زمان معادل پخت حالت گذرا با یک دمای مرجع مدل‌سازی می‌شود. این معیار به شکل معادله زیر ارائه شده است.

$$d\Phi_i = \exp\left[C_0 \left(\frac{T_i(t) - T_r}{T_i(t)T_r}\right)\right] \Delta t \quad (10)$$

$$C_0 = \frac{E}{R}$$

- 1- Over-baked
- 2- Equivalent isothermal time

3- Ill condition

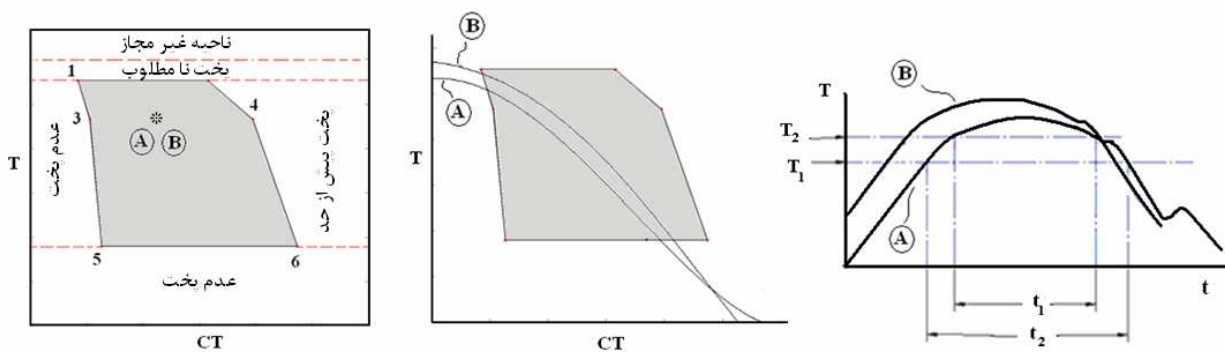
در معادله فوق Φ_i معادل معیار توری برای المان i ام می‌باشد و Φ_1, Φ_2 و Φ_{target} ، معادل زمان پخت دما ثابت در نقاط ۱، ۲ و ۳* در شکل ۸ می‌باشند و a_1, a_2 و a_3 ضرایب وزنی و $H(\Phi)$ تابع پله می‌باشد.

بعد از آنکه پروفیل دمای هر نقطه نسبت به زمان به دست آمد به کمک معادله ۱۱ زمان معادل پخت (Φ_i) به دست می‌آید. ترم اول زمانی حداقل می‌شود که زمان معادل پخت المان مد نظر برابر با زمان نقطه مرکز پنجره پخت (NCP) باشد. ترم P_i ، ترم پینالیتی است و باعث می‌شود که اگر نقاط خارج از پنجره باشند، تابع هدف با افزایش شدیدی همراه گردد. به عبارتی معادله بالا برای یک المان، زمانی حداقل (صفر) می‌شود که شرایط بهترین پخت (شرایط مرکز پنجره پخت) برقرار باشد.

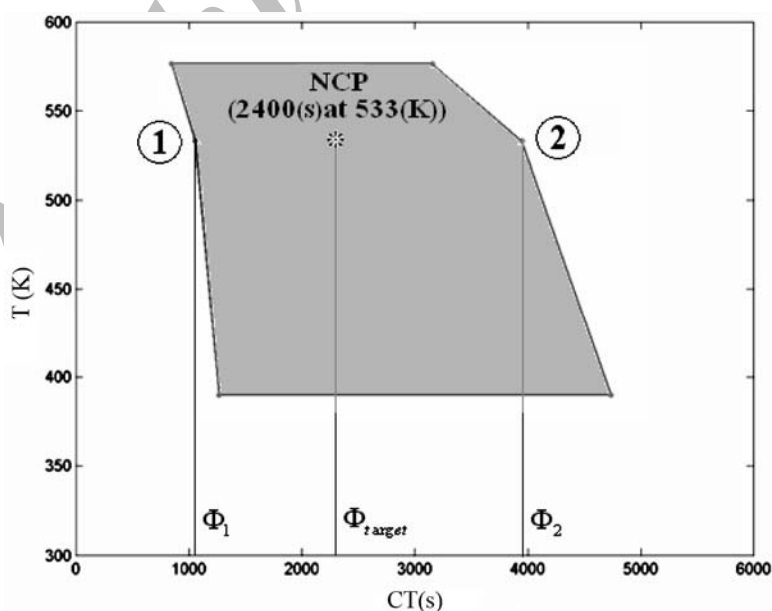
داشتن جواب را کم می‌نماید. در این مقاله از معیار زمان معادل (EIT) استفاده می‌شود. همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود دو پروفیل دمایی متفاوت می‌توانند دارای معیار زمان معادل یکسانی باشند (نقطه * در شکل (۷-ج)). بنابراین، استفاده از معیار زمان معادل عملاً موجب ساده‌تر شدن همگرایی الگوریتم طراحی می‌گردد. یک تابع هدف مناسب با توجه به توضیحات فوق به صورت زیر می‌باشد:

$$F(\Phi_i) = f(\theta_i) = a_1(\Phi_i - \Phi_{target})^2 + P_i$$

$$P_i \equiv a_2 H(\Phi_1 - \Phi_i)(\Phi_i - \Phi_1)^2 + a_3 H(\Phi_i - \Phi_2)(\Phi_i - \Phi_2)^2 \quad (12)$$



شکل ۷: الف) پروفیل دمایی دو نقطه، ب) معیار پنجره پخت اول و ج) معیار پنجره پخت دوم (زمان پخت = CT(Curing Time)).



شکل ۸: پنجره پخت.

در مسأله مد نظر عامل طراحی $(\bar{\theta}_r)$ دمای گرم‌کن‌ها است. با توجه به پنجره پخت پیشنهادی (معادله ۱۱)، برای محاسبه $\bar{g}_i(\bar{\theta}_r)$ لازم است که مقادیر مشتق جزئی تابع هدف محاسبه شود. این مقادیر به کمک معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$g_{i1}(\bar{\theta}_r) = \frac{\partial F(\Phi_i(\bar{\theta}_r))}{\partial \theta_{1,r}} = 2a_1(\Phi_i - \Phi_{i, target}) \frac{\partial \Phi_i}{\partial \theta_{1,r}} + 2a_2 H(\Phi_1 - \Phi_i)(\Phi_i - \Phi_1) \frac{\partial \Phi_i}{\partial \theta_{1,r}} + a_2 \delta(\Phi_1 - \Phi_i)(\Phi_i - \Phi_1)^2 + 2a_3 H(\Phi_2 - \Phi_i)(\Phi_i - \Phi_2) \frac{\partial \Phi_i}{\partial \theta_{1,r}} + a_3 \delta(\Phi_2 - \Phi_i)(\Phi_i - \Phi_2)^2 \quad (19)$$

برای محاسبه $\frac{\partial \Phi_i}{\partial \theta_1}$ از معادله ۱۱ که تعریف معیار پنجره پخت است کمک گرفته می‌شود:

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial \theta_{1,r}} = \int_{t=0}^{t_c} \exp \left[C_0 \left(\frac{T_i(t) - T_r}{T_i(t) T_r} \right) \frac{C_0}{T_i^2} \left(\frac{\partial T_i(t)}{\partial \theta_{1,r}} \right) \right] \Delta t \quad (20)$$

برای محاسبه $\frac{\partial \Phi_i}{\partial \theta_1}$ باید مقدار $\frac{\partial T_i}{\partial \theta_1}$ معلوم باشد. به کمک مشتق گرفتن از دو طرف معادلات ۷ و ۸ برای هر المان، دستگاه معادلات لازم برای به دست آوردن این متغیرها حاصل می‌شود. در نهایت این عملیات برای تمامی عوامل طراحی انجام شده و بردار $\bar{g}_i(\bar{\theta}_r)$ حاصل می‌گردد. به کمک معادلات ۱۴، ۱۵ و ۱۸ دمای گرم‌کن‌ها در مرحله بعد از تکرار بهینه‌یابی، تصحیح می‌شود. در شکل ۹ عملیات محاسبه و بهینه‌یابی نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی کارایی روش طراحی

در این بخش کارایی روش طراحی پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای اطمینان از وجود جواب، پنجره پخت به گونه‌ای تعریف شده است که در یک حالت پیش فرض (دمای گرم‌کن‌ها ۶۰۰ درجه کلونین) معیار زمان معادل برای تمامی نقاط در داخل محدوده مجاز باشد. شکل ۱۰ نقاط اولیه و پنجره پخت به دست آمده را نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که یک روش کارآمد بتواند صرف نظر از حدس اولیه، دمای گرم‌کن‌ها را به گونه‌ای به دست آورد که تمامی نقاط در داخل پنجره پخت و دور از مرزهای آن قرار گیرند.

این تابع هدف، به دلیل محدود نشدن به یک پروفیل دمایی خاص، احتمال وجود جواب را بیشتر کرده و مسأله خوش رفتار می‌شود. رابطه بالا، تابع هدف بر روی یک المان می‌باشد. اگر معیار پخت بر روی چند المان تعریف شود می‌توان تابع هدف را میانگینی از معیار فوق برای تمامی المان‌ها در نظر گرفت.

$$F = F_{avg} = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} F(\Phi_i) \quad (13)$$

الگوریتم بهینه‌یابی: روش انتخاب شده برای حل مسأله طراحی، روش بهینه‌سازی بر مبنای مشتق است که برای اجرای آن از روش بیشترین نرخ نزول^۱ استفاده شده است. این روش بر مبنای بسط درجه یک تابع هدف می‌باشد. در روش بیشترین نرخ نزول متغیرهای طراحی بر مبنای معادله زیر در هر تکرار تصحیح می‌شوند.

$$\bar{\theta}_{r+1} = \bar{\theta}_r + \alpha_r \bar{p}_r \quad (14)$$

که \bar{p}_r جهت تغییرات و α_r گام تغییرات را نشان می‌دهد. برای انتخاب α_r ، معادله زیر پیشنهاد شده است [۱۴]:

$$\alpha_r = \alpha_0 / r^a \quad (15)$$

اگر مقدار حداقل تابع $\bar{\theta}^*$ باشد و مقدار تابع در هر تکرار را با $\bar{\theta}_r$ نشان دهیم و بردار واصل این دو $\alpha_r \bar{p}_r$ باشد، $(\bar{\theta}^* = \bar{\theta}_r + \alpha_r \bar{p}_r)$ می‌توان بسط تیلور زیر را نوشت:

$$F(\Phi_i(\bar{\theta}^*)) = F(\Phi_i(\bar{\theta}_r + \bar{p}_r \alpha_r)) \approx F(\Phi_i(\bar{\theta}_r)) + \bar{c}_r \cdot \bar{g}_i(\bar{\theta}_r) \quad (16)$$

$$\bar{g}_i(\bar{\theta}_r) = \left[\frac{\partial F(\Phi_i(\bar{\theta}_r))}{\partial \theta_{1,r}} \quad \frac{\partial F(\Phi_i(\bar{\theta}_r))}{\partial \theta_{2,r}} \quad \dots \quad \frac{\partial F(\Phi_i(\bar{\theta}_r))}{\partial \theta_{v,r}} \right]^T = \left[g_{i1}(\bar{\theta}_r) \quad g_{i2}(\bar{\theta}_r) \quad \dots \quad g_{iv}(\bar{\theta}_r) \right]^T \quad (17)$$

در روش بیشترین نرخ نزول برای پیدا کردن جهت تغییرات به سمت نقطه حداقل از معادله زیر استفاده می‌شود [۱۳]:

$$\bar{p}_r = -\bar{g}_i(\bar{\theta}_r) = \frac{-1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} \bar{g}_i(\bar{\theta}_r) \quad (18)$$

1- Steepest-descent

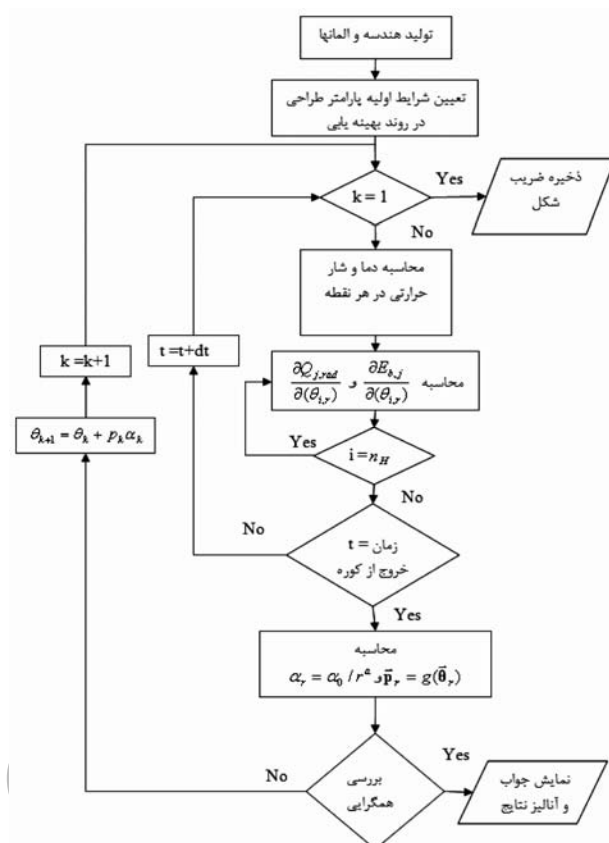
تعداد المان‌ها و فاصله زمانی در دقت حل مسأله مؤثر می‌باشد. با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که فاصله زمانی کمتر از ۱۰ ثانیه و استفاده از تعداد المان‌هایی بیش از ۵۰ المان روی بدنه خودرو و ۱۰۰ المان روی بدنه کوره در مقدار جواب تأثیری نمی‌گذارد و عدم وابستگی به مش و گسسته‌سازی زمان مشاهده می‌گردد. برای حصول اطمینان بیشتر تعداد المان‌ها بر روی بدنه کوره، ۱۱۴ عدد، بر روی بدنه خودرو ۹۸ عدد و فاصله زمانی ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی و بهینه‌یابی برای بدنه خودرو کامل در شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ ارائه شده است. در فرآیند بهینه‌یابی، تابع معیار بر مبنای پخت تمامی المان‌های روی بدنه جسم تعریف شده است و حدس اولیه بهینه‌یابی برای دمای گرم‌کن‌ها ۹۰۰ درجه کلوین می‌باشد. همان گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، نمودار تمامی المان‌های روی بدنه، بعد از ۶۰ مرحله بهینه‌سازی، به هم نزدیک شده‌اند. در شکل ۱۲ تغییرات معیار پنجره پخت دوم برای تمامی المان‌ها نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود در انتهای بهینه‌یابی معیار زمان معادل برای تمامی المان‌ها در داخل پنجره پخت قرار گرفته است.

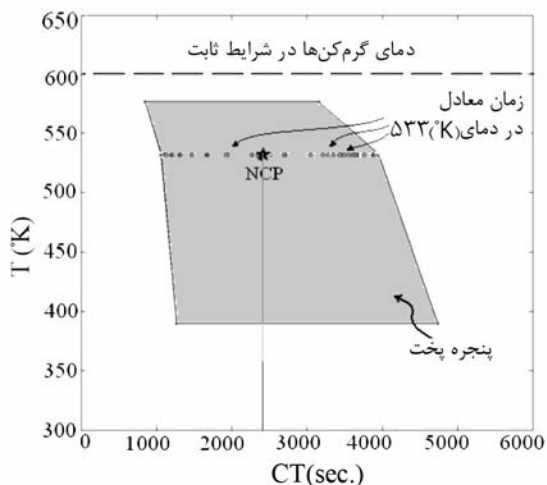
در شکل ۱۳ نحوه تغییرات زمان معادل نقاط بر حسب تکرار نشان داده شده است. محور y معرف تعداد تکرارها و محور x زمان معادل پنجره پخت است. می‌توان گفت که شکل ۱۳ تمامی نتایج موجود در شکل ۱۲ را به صورت خلاصه نشان داده است. نمودار فوق علاوه بر مزیت مطرح شده، نحوه همگرایی را نیز نشان داده است. برای آنکه این موضوع نمایان‌تر باشد تغییرات میانگین تمامی نقاط نیز به صورت نموداری خط‌چین در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

در شکل ۱۴ دمای گرم‌کن‌ها بعد از بهینه‌یابی نشان داده شده است. اگر دمای گرم‌کن‌ها دارای توزیع مشخص شده در شکل ۱۴ باشند، پخت تمامی المان‌های روی بدنه، پخت کامل و مطلوبی خواهد بود.

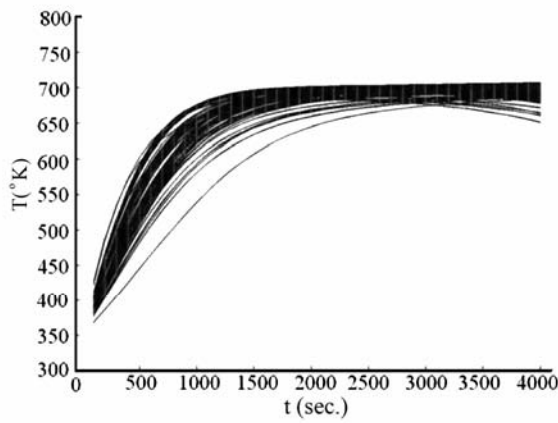
شکل ۱۵ تغییرات تابع هدف در هر تکرار را نشان می‌دهد. نحوه و سرعت همگرایی نیز از این شکل قابل استنتاج است. مقدار تابع هدف در بهینه‌یابی مذکور صفر نشده و دلیل آن عدم قرارگیری تمامی نقاط در مرکز پنجره پخت می‌باشد. همان گونه که قبلاً مطرح شد هدف نهایی فرآیند بهینه‌یابی در این پروژه، قرار گرفتن تمامی نقاط در مرکز پنجره پخت می‌باشد ولی با توجه به تفاوت مکان و زاویه المان‌های روی بدنه و همچنین نحوه چیدمان گرم‌کن‌ها، وجود چنین جوابی غیر ممکن است.



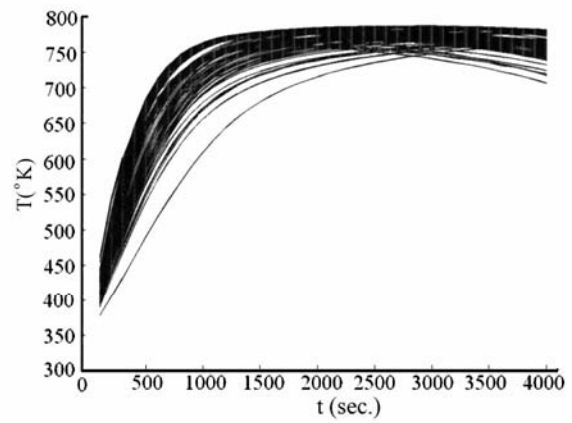
شکل ۹: فلوچارت عملیات محاسبه.



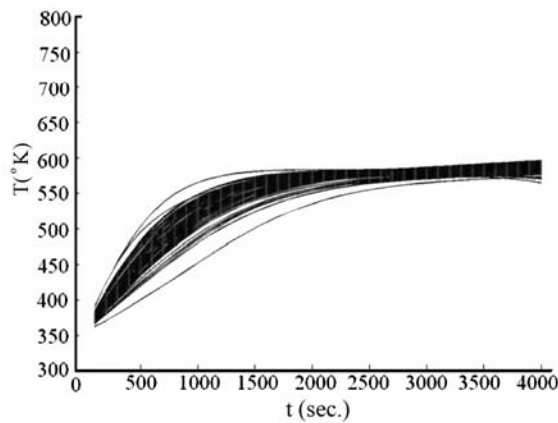
شکل ۱۰: نقاط استفاده شده برای تولید پنجره پخت.



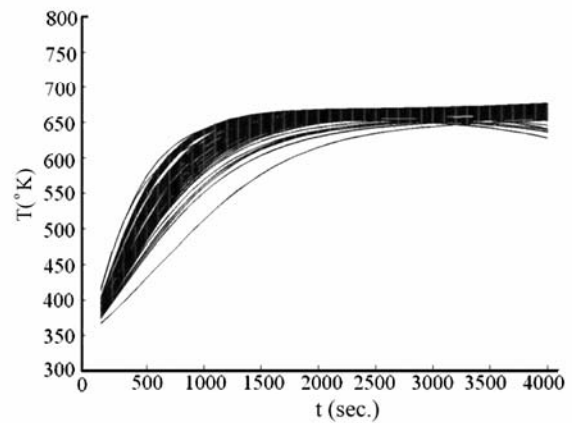
تکرار پنجم



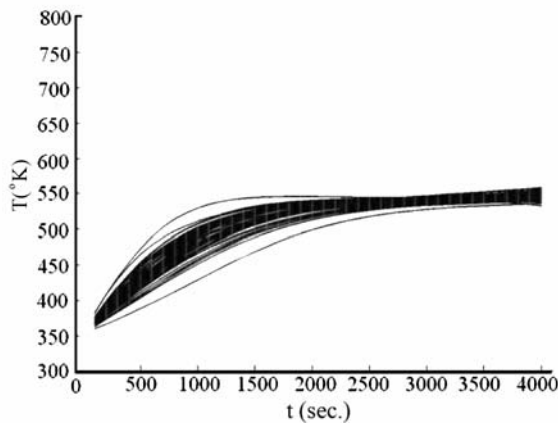
تکرار اول



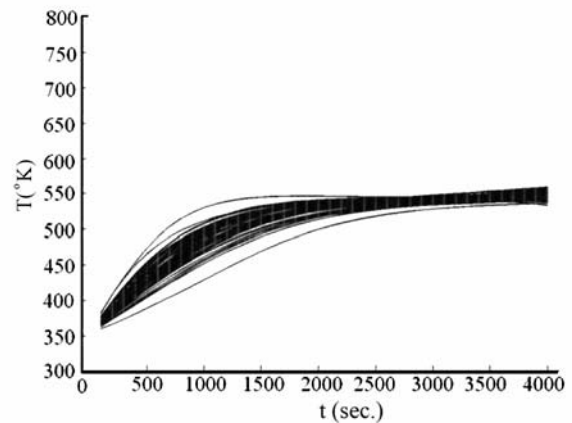
تکرار ۳۰ ام



تکرار ۱۰ ام

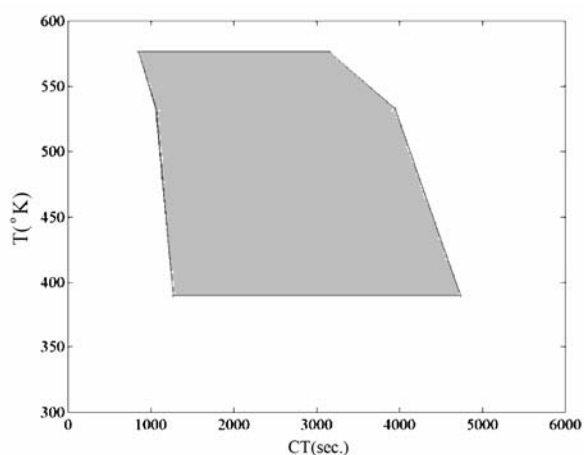


تکرار ۶۰ ام

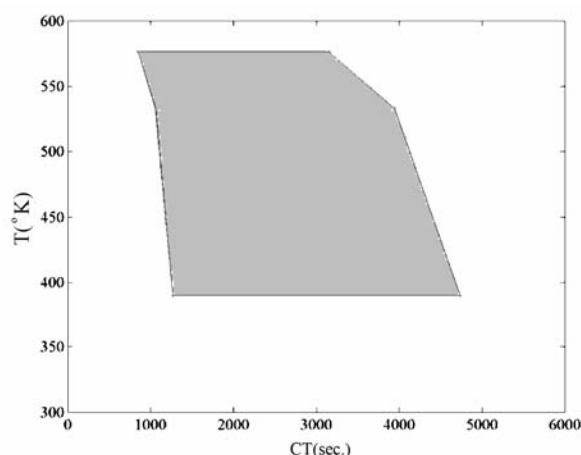


تکرار ۴۰ ام

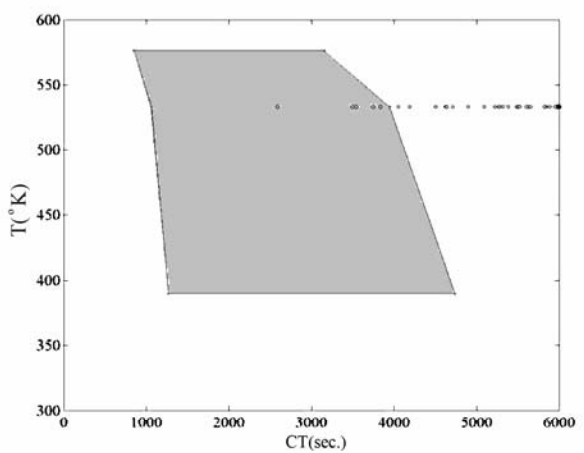
شکل ۱۱: پروفیل دمایی تمامی نقاط روی بدنه در تکرارهای ۱، ۵، ۱۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ ام.



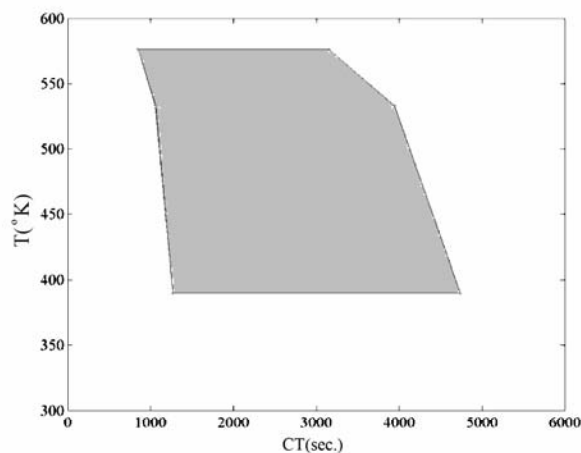
تکرار پنجم



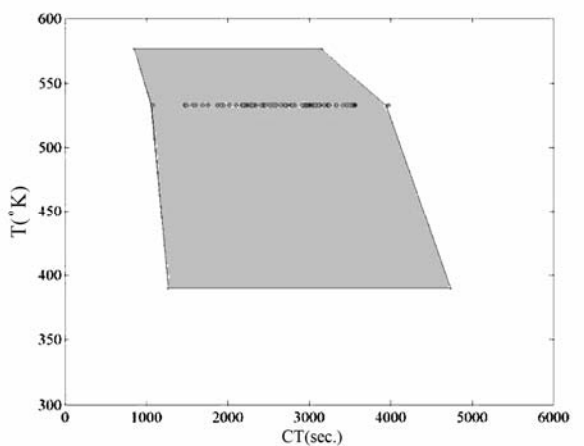
تکرار اول



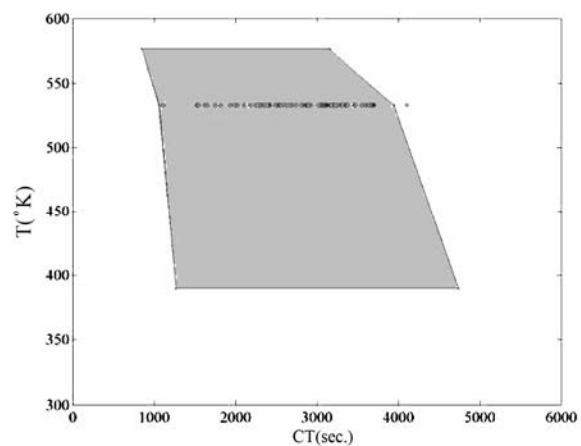
تکرار ۳۰ ام



تکرار ۱۰ ام

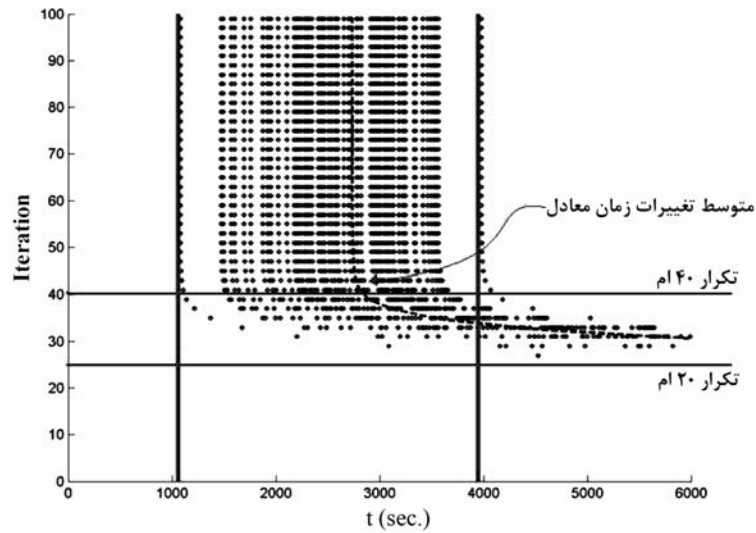


تکرار ۶۰ ام

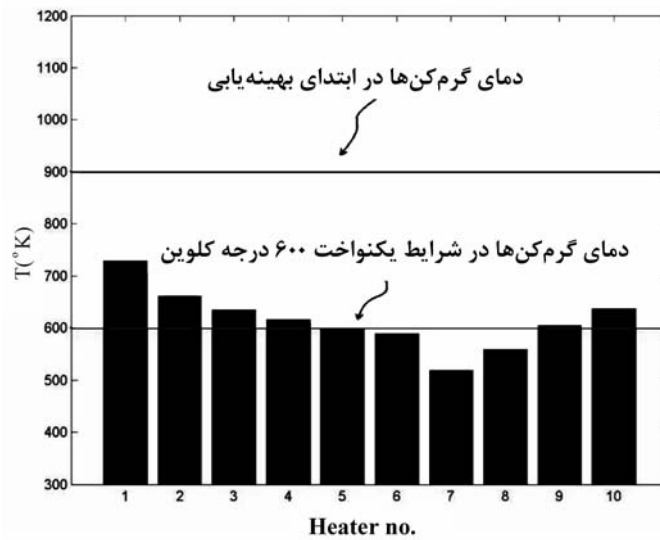


تکرار ۴۰ ام

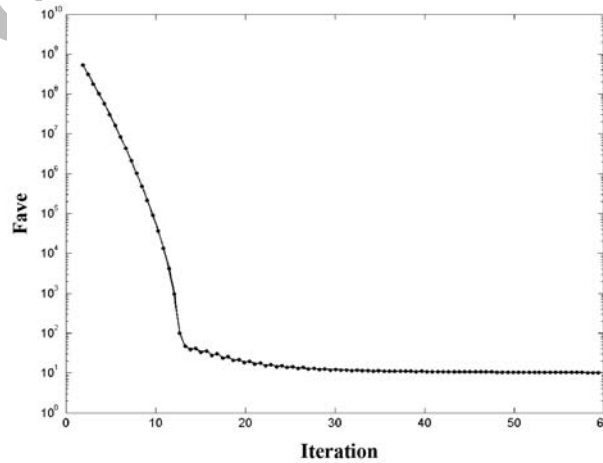
شکل ۱۲: پروفیل معیار پخت تمامی نقاط روی بدنه در تکرارهای ۱، ۵، ۱۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ ام.



شکل ۱۳: تغییرات معیار پنجره پخت در هر تکرار (محور x زمان معادل پخت در دمای ۵۳۳ درجه کلون می‌باشد و محور y نشان دهنده تکرارها می‌باشد).



شکل ۱۴: دمای گرم‌کن‌ها در انتهای بهینه‌یابی.



شکل ۱۵: تغییرات تابع هدف در تکرارهای بهینه‌یابی.

۴- نتیجه‌گیری

باعث گردید که علاوه بر افزایش احتمال وجود جواب، شرایط حل با مسأله صنعتی مشابه، همخوانی بیشتری پیدا کند. در این مقاله، نحوه مدل‌سازی و بهینه‌یابی، کاملاً تشریح شده و با بررسی کارایی این روش در یک هندسه دو بعدی نشان داده شده است که این روش با سرعت مناسبی توانایی طراحی کوره مورد نظر را داراست. بررسی الگوریتم طراحی برای این مثال نشان می‌دهد که تعمیم روش محاسباتی به طراحی کوره‌های سه بعدی نیز امکان‌پذیر است. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی درجه بالاتر می‌تواند به افزایش سرعت محاسبات کمک نماید.

در این مقاله روشی برای طراحی یک کوره تشعشعی پیوسته پخت رنگ ارائه شده است. با توجه به این که طراحی این کوره‌ها برای هندسه‌های پیچیده با روش سعی و خطا امری زمان‌بر و طاقت‌فرساست، راهکاری ارائه شده است که بتوان به کمک روش‌های بهینه‌یابی، دمای گرم‌کن‌های کوره را محاسبه نمود. با بررسی کارهای مشابه می‌توان دریافت که بدو وضع بودن ماتریس حل در اکثر موارد، منجر به عدم حل معادلات شده و یا زمان محاسبات را بالا می‌برد. استفاده از معیار صنعتی پنجره پخت و زمان پخت معادل در این مقاله

نمادها:

CT	زمان پخت	$Q_{i,con}$	انتقال انرژی هدایت از المان i
c	فاصله خودرو از کف کوره	R	ثابت جهانی گازها
c_v	ظرفیت گرمایی	S	دیواره جنوبی کوره
C_0	ضریب ثابت ترموفیزیک در معادله (۱۰)	t_c	زمان پخت
C_i	ضریب حرارتی المان i (J/K)	$T_i(t)$	پروفیل دمای المان i
E	دیواره شرقی کوره	T_r	دمای مبنا (در مثال فوق ۵۳۳ درجه کلوین است)
$E_{b,i}^k$	توان تابش المان i در بازه زمانی k	v	تعداد عوامل طراحی
EIT	زمان معادل دما ثابت	V	سرعت خودرو
F_{i-j}	ضریب شکل بین دو المان i و j	W	دیواره غربی کوره
$F(\Phi)$	تابع هدف	α_r	ضریب گام
G	انرژی ورودی از محیط به یک سطح تشعشعی	ε_i	ضریب گسیل المان i
H	گرم‌کن	σ	ضریب استفان بولزمن
J	کل انرژی خروجی از سطح	$\bar{\theta}_r$	بردار عوامل طراحی
L	طول کوره	ρ_{rad}	ضریب انعکاس
n	تعداد کل المان‌ها روی بدنه خودرو و کوره	ρ	چگالی
n_b	تعداد المان‌های روی بدنه	δ	ضخامت بدنه
N	دیواره شمالی کوره	Φ_{target}	نقطه پخت مطلوب
NCP	نقطه پخت مطلوب	Φ_i	زمان معادل المان i
PCO	کوره پخت رنگ		زیر نویس‌ها و بالانویس‌ها
PCW	پنجره پخت رنگ	i & j	شمارنده المان‌ها
p_i	ترم جریمه در فرمول (۱۲)	i, r	المان i در تکرار بهینه‌یابی r
\bar{p}_r	بردار تغییرات در تکرار بهینه‌یابی r	r	شمارنده تکرارهای بهینه‌یابی
$Q_{i,rad}$	انرژی تشعشع خروجی خالص در المان i	t	زمان
$Q_{i,g}$	مقدار انرژی تولیدی خالص در المان i	A_i	سطح یک المان
K	شمارنده زمانی	b	ارتفاع کوره
*	نقطه مطلوب طراحی	B	بدنه خودرو

۵- مراجع

1. P. Mills, Robotic UV Curing for Automotive Exterior Applications, A Cost-effective and Technically Viable Alternative for UV Curing, Surcar, (2005).
2. K. Daun, F. França, M. Larsen, G. Leduc, J. R. Howell, Comparison of methods for inverse design of radiant enclosures. *J. Heat Transfer*. 128(2006), 269-282.
3. K. J. Daun, J. R. Howell, D. P. Morton, Design of radiant enclosures using inverse and non-linear programming techniques. *Inverse Probl. Eng.* 11(2003), December, 541-560.
4. K. J. Daun, J. R. Howell, D. P. Morton, Geometric optimization of radiative enclosures through nonlinear programming. *Numerical Heat Transfer, Part B*. 43(2003), 203-219.
5. K. J. Daun, D. P. Morton, J. R. Howell, Geometric optimization of radiant enclosures containing specular surfaces. *J. Heat. Transfer*. 125(2003), 845-851.
6. A. Pourshaghaghay, K. Pooladvand, F. Kowsary, K. Karimi-Zand, An inverse radiation boundary design problem for an enclosure filled with an emitting, absorbing, and scattering media, *Int. Commun. Heat Mass*. 33(2006), 381-390.
7. H. R. F. França, J. R. Howell, Transient inverse design of radiative enclosures for thermal processing of materials, *Inverse Problems, Design and Optimization Symposium*, Rio de Janeiro, Brazil, 2004.
8. A. G. Federov, K. H. Lee, R. Viskanta, Inverse Optimal design of the radiant heating in materials processing and manufacturing. *J. Mater. Eng. Perform.* 7(1998), 719-726.
9. J. Zueco, A. Campo, Network model for the numerical simulation of transient radiative transfer process between the thick walls of enclosures. *Appl. Therm. Eng.* 26(2006), 673-679.
10. A. Ashrafizadeh, R. Mehdipour, M. Rezvani, Design, simulation and thermal analysis of an ED oven: Mechanical Engineering Conference, Bahonar University, Kerman, Iran, (2008). (Persian)
11. J. Xiao, J. Li, H. H. Lou, Y. Huang, Cure-window-based proactive quality control in topcoat curing. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45(2006), 2351-2360.
12. E. A. Turi, Thermal characterization of polymeric materials. Academic Press, New York, 1997.
13. H. Erturk, O. A. Ezekoye, J. R. Howell, Boundary condition design to heat a moving object at uniform transient temperature using inverse formulation. *J. Manuf. Sci. Eng.* 126(2004), 619-626.
14. K. Daun, H. Erturk, J. R. Howell, Inverse design methods for high-temperature systems. *Arab. J. Sci. Eng.* 27(2002), Number 2C, 3-48.