

کاربرد روش شناسی سطح پاسخ برای تعیین عوامل موثر بر فرآیند آبکاری الکتریکی

مهدی یزدانی*
مهشید ایوبی**
امین غروری***

چکیده

گروهی از مسائل دنیای واقعی شامل تعیین مقادیر بهینه برای دسته‌ای از متغیرهای ورودی، جهت دستیابی به سطوحی دلخواه از متغیر خروجی (متغیر سطح پاسخ) می‌باشند. یکی از تکنیک‌های کاربردی برای مدل‌سازی و حل این مسائل روش شناسی سطح پاسخ است. در این مقاله با استفاده از طراحی آزمایش‌ها تأثیر سه عامل ورودی قابل کنترل دما، غلظت سیانید سدیم و آمپر بر سطح پاسخ مورد نظر یعنی ضخامت پوشش آبکاری الکتریکی پیچ دم‌خوکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از اجرای آزمایش‌ها و شناخت عوامل موثر، با توجه به کاربرد روش شناسی سطح پاسخ، رابطه بین متغیرهای مربوط به عوامل موثر ورودی و متغیر سطح پاسخ با استفاده از مدل رگرسیون غیرخطی تعیین می‌شود. سپس مقدار بهینه هر یک از متغیرهای مدل غیرخطی به وسیله روش برنامه‌ریزی آرمانی به دست می‌آید.

واژگان کلیدی: روش شناسی سطح پاسخ، طراحی آزمایش‌ها، روش برنامه‌ریزی آرمانی

* دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران (مسئول مکاتبات) Email: m_yazdani@qiau.ac.ir

** دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

*** دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

مقدمه

در فرآیندهای صنعتی، عوامل ورودی متعددی با سطوح مختلف وجود دارند که هر کدام ممکن است بر روی مشخصات محصول نهایی تاثیرگذار باشند و در بسیاری از این فرآیندها از روش سعی و خطا برای شناسایی عوامل ورودی موثر استفاده می‌شود. اما اجرای روش سعی و خطا به آزمایش‌های زیادی احتیاج دارد لذا هزینه و صرف زمان بالایی را برای شرکتها به وجود می‌آورد. روش شناسی سطح پاسخ، ترکیبی از تکنیک‌های ریاضی و آمار است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که متغیر پاسخ موردنظر تحت تاثیر چندین متغیر ورودی قرار می‌گیرد مفید می‌باشد و هدف آن بهینه‌سازی این پاسخ است [۱]. این روش می‌تواند به شرکت‌ها کمک نماید تا بهترین ترکیب از عوامل مربوط به فرآیند تولید محصول را با صرف هزینه و زمان کمتر شناسایی کنند و در نتیجه بازدهی و کارایی را در سیستم افزایش دهند. از روش شناسایی سطح پاسخ در صنایع مختلف استفاده شده است. گرابو و همکارانش [۲] یک فرآیند تحلیلی بر اساس روش‌های سطح پاسخ ارائه نموده‌اند که به کمینه‌سازی ضایعات ایجاد شده در مسایل مربوط به تعادل خط مونتاژ می‌پردازد. مورگان و پارمار [۳] با استفاده از روش شناسایی سطح پاسخ، مدلی ریاضی برای بررسی اثرات اصلی و متقابل پارامترهای جوشکاری قوسی غوطه‌ور شامل ولتاژ مدار باز، نرخ تغذیه کابل، سرعت جوش و فاصله نازل تا قطعه، بر روی عمق نفوذ، استحکام، ضخامت و رقت جوش ارائه دادند. علیزاده و همکارانش [۴] برای بررسی همزمان تاثیر ۴ عامل دما، زمان عمل‌آوری، مایه پنیر و آب نمک بر کیفیت پنیر فتای ایرانی و تعیین مقادیر بهینه این پارامترها، روش شناسایی سطح پاسخ را به کار بردند. بهلول و همکارانش [۵] برای کمینه یا بیشینه‌سازی حجم بار سوراخ کاری در طول فرآیند خم کاری ورق‌های آهنی، از مدل‌های شناسایی سطح پاسخ بر پایه طراحی آزمایش‌ها استفاده نمودند. ما در این تحقیق قصد داریم از روش شناسی سطح پاسخ برای بهبود یکی دیگر از فرآیندهای صنعتی مهم استفاده کنیم. از پدیده‌های صنعتی مخرب که بشر از دیرباز با آن روبرو بوده، خوردگی است. خوردگی اثر تخریبی محیط برفلزات و آلیاژها می‌باشد و در اثر این پدیده، فلز از

درجه اکسیداسیون صفر تبدیل به گونه‌ای با درجه اکسیداسیون بالا می‌شود. برآورد هزینه سالانه خوردگی از نظر جنبه‌های اقتصادی بالغ بر ۵ میلیارد دلار است. راه‌های مختلفی برای مبارزه با خوردگی وجود دارد. یکی از این راه‌ها استفاده از فرآیند آبکاری فلزات می‌باشد که به دو روش می‌تواند صورت گیرد:

۱. روش آبکاری گالوانیزاسیون

۲. روش آبکاری الکتریکی.

در هر دو فرآیند ذکر شده عوامل ورودی موثر مختلفی وجود دارند که کنترل این عوامل جهت بهبود فرآیند آبکاری ضروری می‌باشد. برای مدل‌سازی این عوامل موثر و سپس بهینه‌سازی آنها می‌توان از روش شناسی سطح پاسخ استفاده نمود.

چی چانگ هو و همکارانش [۶] برای تنظیم ترکیبات روی - قلع رسوب داده شده در فرآیند آبکاری الکتریکی، روش شناسی سطح پاسخ را به کار گرفتند. دومینگوئز و همکارانش [۷] برای بررسی تاثیر عوامل دما، زمان و غلظت جریان بر فرآیند آبکاری الکتریکی برنج فولاد از طراحی آزمایش‌ها بهره گرفتند، سپس مقادیر بهینه برای این عوامل تخمین زده شد.

در این مقاله، روش شناسی سطح پاسخ برای مطالعه و مدل‌سازی عوامل موثر بر ضخامت پوشش آبکاری الکتریکی پیچ دم‌خوکی به کار گرفته شده است. ابتدا عوامل ورودی موثر با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و تشکیل جدول تحلیل واریانس تعیین شده و سپس با تشکیل مدل رگرسیون، یک رابطه غیرخطی بین متغیر سطح پاسخ و متغیرهای مربوط به عوامل ورودی موثر برقرار می‌شود. در ادامه مقدار بهینه هر یک از متغیرهای مدل به کمک روش برنامه‌ریزی آرمانی به دست می‌آید. نتایج این تحقیق می‌تواند در انواع فرآیندهای آبکاری الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد.

عوامل ورودی فرآیند آبکاری الکتریکی

پیچ دم‌خوکی یکی از ابزارآلاتی است که جهت نصب انواع کابل‌های برق بر روی تیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت استفاده از این ابزار سرعت بالای نصب و طول عمر طولانی می‌باشد. شکل ۱ پیچ دم‌خوکی را نشان می‌دهد. این ابزار از جنس

فولاد است و برای جلوگیری از خوردگی و پایداری در شرایط مختلف محیطی، باید تحت فرآیند آبکاری الکتریکی قرار گیرد.



شکل ۱. پیچ دم‌خوکی

آبکاری الکتریکی فرآیندی است که در آن با استفاده از جریان برق لایه نازکی از یک فلز بر سطح فلز دیگر رسوب داده می‌شود. جریان برق و عوامل احیاکننده‌ای که در این فرآیند مصرف می‌شوند ارزان هستند. این امر توجیه اقتصادی خوبی برای توسعه آبکاری الکتریکی است. یکی از انواع آبکاری‌های الکتریکی که امروزه بیش از انواع دیگر مورد توجه است، آبکاری الکتریکی روی می‌باشد. در این روش فلز آب‌گیرنده یا فاسد شدنی را به جای کاتد و فلز پوشش‌دهنده را به جای آنود قرار می‌دهند و در ظرف الکترولیز، محلولی از یک نمک فلز آب‌دهنده (فلز پوشش‌دهنده) را به عنوان الکترولیت می‌ریزند. با برقراری جریان، اتم‌های فلز آب‌دهنده (فلز پوشش‌دهنده) به صورت یون مثبت از آنود کنده شده و از طریق الکترولیت، به طرف کاتد یا آب‌گیرنده (فلز مورد آبکاری) رفته و از آن الکترون می‌گیرند و مجدداً به صورت فلز درآمده، بر سطح فلز (مورد آبکاری) می‌نشینند و تمامی سطح آن را می‌پوشانند. آبکاری صنعتی روی از طریق سه سیستم مختلف انجام می‌گیرد: حمام‌های سیانیدی، حمام‌های غیر سیانیدی قلیایی و حمام‌های کلریدی. حمام‌های سیانیدی روی بر حسب مقدار سیانید به چهار دسته تقسیم می‌شوند: حمام‌های سیانیدی استاندارد، حمام‌های سیانید متوسط، حمام‌های سیانید کم و حمام‌های سیانید خیلی کم.

فرآیند مورد بررسی در این مقاله، فرآیند آبکاری الکتریکی روی برای پیچ دم‌خوکی در حالت حمام‌های سیانید متوسط است. در فرآیند مورد مطالعه بصورت تجربی سه عامل ورودی دما، غلظت سیانید سدیم و آمپر به عنوان عوامل ورودی مهم تشخیص داده شده‌اند. جدول ۱ عوامل ورودی مرتبط با فرآیند را با در نظر

گرفتن سطوح مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱. عوامل ورودی مربوط به فرآیند آبکاری الکتریکی پیچ دم‌خوکی با سطوح مختلف

پارامترهای فرآیند	سطح ۱	سطح ۲
آمپر	۰/۵	۱
غلظت سیانید سدیم	۱۵	۲۸
دما	۲۰	۳۰

طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌های منتخب، طرح عاملی 2^3 با هشت نقطه عاملی و در هر نقطه چهار تکرار می‌باشد. جدول ۲ مقادیر عوامل ورودی و سطح پاسخ را پس از انجام آزمایش‌ها به صورت تصادفی نشان می‌دهد که در هر اجرا اندازه‌گیری شده‌اند. مقدار پاسخ، ضخامت پوشش آبکاری الکتریکی پیچ دم‌خوکی بر حسب میکرون می‌باشد.

ترکیب‌های عاملی به ترتیب استاندارد ۱، a، b، c، ab، ac، bc و abc در جدول ۳ آورده شده است. اطلاعات موجود در این جدول کل مشاهدات در نظر گرفته شده در هر ترکیب عاملی را نشان می‌دهند. نمادهای مثبت و منفی نشان دهنده سطوح بالا و پایین هر عامل است. همچنین نتایج تحلیل واریانس در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به نتایج جدول تحلیل واریانس طرح عاملی 2^3 مشخص می‌شود که در سطح اطمینان ۹۵٪، عوامل آمپر و غلظت سیانید سدیم بر فرآیند آبکاری الکتریکی پیچ دم‌خوکی موثرند، همچنین اثر متقابل بین آمپر و غلظت سیانید سدیم وجود دارد.

روش شناسی سطح پاسخ

روش شناسی سطح پاسخ مجموعه‌ای از ابزارهای آماری و ریاضی است که توسط مهندسان و آماردانان در آزمایش‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته

است [8]. اولین قدم در روش شناسی سطح پاسخ، یافتن یک رابطه تقریبی مناسب میان متغیرهای ورودی موثر و متغیر سطح پاسخ می‌باشد. برای مدل سازی این رابطه از تابع رگرسیون استفاده می‌شود. تابع رگرسیون بر اساس مقادیر کدگذاری شده (۱-۱)، به صورت معادله زیر تنظیم می‌شود:

$$\hat{Y} = 12.86 + 0.584X_1 + 0.322X_2 + 0.228X_1X_2 \quad (1)$$

در این مدل، عامل آمپر با نماد X_1 ، غلظت سیانید سدیم با نماد X_2 و اثر متقابل آمپر و غلظت سیانید سدیم با نماد X_1X_2 نام گذاری شده‌اند.

بررسی کفایت مدل رگرسیون جهت صحت گذاری نتایج به دست آمده ضروری است. شکل ۲ نمودار احتمال نرمال و شکل ۳ نمودار بررسی ثبات واریانس خطا را نشان می‌دهد. نمودار احتمال نرمال نشان می‌دهد که داده‌های به دست آمده از فرآیند در سطح اطمینان ۹۵٪ تقریباً نرمال هستند و نمودار بررسی ثبات واریانس با توجه به عدم وجود الگوی قیفی شکل نشان می‌دهد که واریانس ثابت است.

جدول ۲. نتایج طراحی آزمایش ها

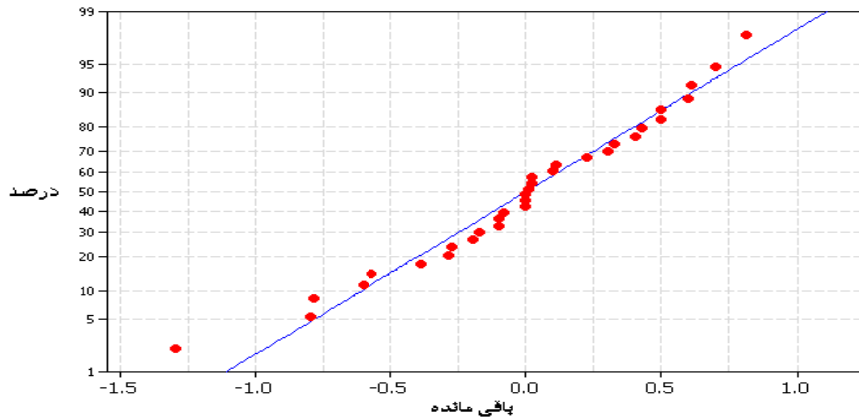
ردیف	مقادیر واقعی عوامل ورودی			مقدار پاسخ
	آمپر	سیانید سدیم	غلظت دما	ضخامت
۱	۰/۵	۱۵	۲۰	۱۲/۲
۲	۱	۲۸	۳۰	۱۴/۴
۳	۰/۵	۱۵	۳۰	۱۲/۳
۴	۰/۵	۱۵	۳۰	۱۲/۱
۵	۱	۲۸	۲۰	۱۲/۷
۶	۱	۱۵	۲۰	۱۲/۸
۷	۰/۵	۲۸	۲۰	۱۲/۲
۸	۱	۱۵	۲۰	۱۲/۷
۹	۱	۱۵	۳۰	۱۲/۹
۱۰	۱	۲۸	۲۰	۱۴
۱۱	۱	۱۵	۲۰	۱۳
۱۲	۰/۵	۱۵	۲۰	۱۱/۴
۱۳	۰/۵	۱۵	۲۰	۱۱/۸
۱۴	۰/۵	۱۵	۲۰	۱۳
۱۵	۰/۵	۲۸	۲۰	۱۲/۸
۱۶	۰/۵	۱۵	۳۰	۱۲/۸
۱۷	۰/۵	۲۸	۳۰	۱۲/۴
۱۸	۱	۱۵	۳۰	۱۳/۲
۱۹	۰/۵	۲۸	۳۰	۱۲/۱
۲۰	۰/۵	۲۸	۳۰	۱۲/۷
۲۱	۱	۱۵	۳۰	۱۲/۹
۲۲	۱	۲۸	۳۰	۱۴/۷
۲۳	۰/۵	۲۸	۲۰	۱۲/۴
۲۴	۱	۱۵	۲۰	۱۲/۳
۲۵	۱	۲۸	۲۰	۱۳/۹
۲۶	۰/۵	۲۸	۲۰	۱۱/۸
۲۷	۱	۲۸	۳۰	۱۳/۲
۲۸	۱	۲۸	۳۰	۱۴/۵
۲۹	۱	۱۵	۳۰	۱۳/۴
۳۰	۱	۲۸	۲۰	۱۴/۶
۳۱	۰/۵	۱۵	۳۰	۱۱/۹
۳۲	۰/۵	۲۸	۳۰	۱۲/۶

جدول ۳. ترکیب های عاملی

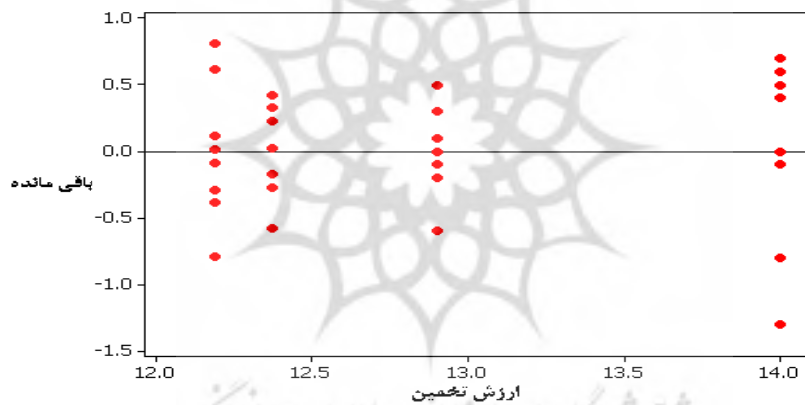
تکرار ۴	تکرار ۳	تکرار ۲	تکرار ۱	abc	bc	ac	ab	c	b	a	۱	اجرا
۱۳	۱۱/۸	۱۱/۴	۱۲/۲	-	+	+	+	-	-	-	+	۱
۱۲/۳	۱۳	۱۲/۷	۱۲/۸	+	+	-	-	-	-	+	+	۲
۱۱/۸	۱۲/۴	۱۲/۸	۱۲/۲	+	-	+	-	-	+	-	+	۳
۱۱/۹	۱۲/۸	۱۲/۱	۱۲/۳	+	-	-	+	+	-	-	+	۴
۱۴/۶	۱۳/۹	۱۴	۱۲/۷	-	-	-	+	-	+	+	+	۵
۱۳/۴	۱۲/۹	۱۳/۲	۱۲/۹	-	-	+	-	+	-	+	+	۶
۱۲/۶	۱۲/۷	۱۲/۱	۱۲/۴	-	+	-	-	+	+	-	+	۷
۱۴/۵	۱۳/۲	۱۴/۷	۱۴/۴	+	+	+	+	+	+	+	+	۸

جدول ۴. تحلیل واریانس برای داده‌های ضخامت آبکاری الکتریکی پیچ دم‌خوکی

F_0	میانگین مربعات	درجات آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
۲/۴۱	۰/۶۳۳	۱	۰/۶۳۳	دما
۴۱/۷۱	۱۰/۹۳	۱	۱۰/۹۳	آمپر
۱۲/۵۶	۳/۳۱۵	۱	۳/۳۱۵	غلظت سیانید سدیم
۰/۴۳	۰/۱۱۳	۱	۰/۱۱۳	دما*آمپر
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۱	۰/۰۰۰۳	دما*غلظت سیانید سدیم
۶/۳۵	۱/۶۶۵	۱	۱/۶۶۵	آمپر*غلظت سیانید سدیم
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۱	۰/۰۰۰۳	دما*آمپر*غلظت سیانید سدیم
		۲۴	۶/۲۹۵۴	خطا
		۳۱	۲۲/۹۵۲	مجموع



شکل ۲. نمودار احتمال نرمال



شکل ۳. نمودار بررسی ثبات واریانس خطا

با توجه به مدل رگرسیون غیرخطی به دست آمده می توان مقادیر بهینه متغیرهای ورودی موثر را محاسبه کرد. برای تعیین مقادیر بهینه باید به این نکته توجه نمود که شرکت مورد مطالعه، هدف فرآیند خود را ضخامت ۱۳ میکرون در آبکاری الکتریکی پیچ دمخوکی قرار داده است و ضخامت بیش از این مقدار برای شرکت هزینه دربرداشته و مقرون به صرفه نمی باشد. از سوی دیگر ضخامت کمتر از ۱۳ میکرون نیز از سوی مشتریان قابل پذیرش نیست. در نتیجه ما با توجه به محدودیت های موجود، برای بهینه سازی مقادیر متغیرهای مربوط به مدل رگرسیون

به دست آمده، از روش برنامه‌ریزی آرمانی به شرح زیر استفاده کرده‌ایم:

$$\text{Minimize } Z = y_1^+ - y_1^- \quad (2)$$

$$12.86 + 0.584 X_1 + 0.322 X_2 + 0.228 X_1 X_2 - 13 = y_1^+ - y_1^-$$

$$-1 \leq X_1 \leq 1$$

$$1 \leq X_2 \leq -1$$

$$y_1^+, y_1^- \geq 0$$

مدل فوق توسط نرم‌افزار LINGO حل شده و نتایج در جدول ۵ قرار گرفته است. مقادیر متغیرهای کدگذاری شده یعنی X_1 و X_2 در این جدول نشان داده شده است. برای بدست آوردن مقادیر واقعی این متغیرها آنها را از حالت کدگذاری (۱- و ۱) خارج می‌نماییم. در نتیجه مقدار بهینه برای متغیر آمپر برابر با ۰/۸۱۰۱ و برای متغیر غلظت سیانید سدیم برابر با ۲۱/۶۳۵۹ به دست می‌آید.

جدول ۵. نتایج حل مدل رگرسیون با استفاده از نرم‌افزار LINGO

Variable	Value	Reduced Cost
y_1^+	۰	۰
y_1^-	۰	۰
X_1	۰/۲۴۰۷۰۴۶	۰
X_2	۰/۰۲۰۹۳۰۸۰	۰

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از طراحی آزمایش‌ها مشخص شد که عوامل موثر بر فرآیند آبکاری الکتریکی پیچ دم‌خوکی، آمپر و غلظت سیانید سدیم می‌باشد. همچنین وجود اثر متقابل میان دو عامل آمپر و غلظت سیانید سدیم تشخیص داده شد. سپس کاربرد روش شناسی سطح پاسخ در مدل‌سازی و ایجاد رابطه بین

متغیرهای ورودی موثر و متغیر سطح پاسخ در فرآیند آبکاری الکتریکی پیچ دم‌خوکی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مرحله با استفاده از تابع رگرسیون یک رابطه غیرخطی بین این متغیرها شکل گرفت و مقادیر بهینه آنها با بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی آرمانی تعیین گردید. می‌توان در تحقیقات آتی، روش شناسی سطح پاسخ را برای بهینه‌سازی انواع فرآیندهای آبکاری الکتریکی به کار گرفت.

تقدیر و تشکر

شرکت افق گستران نور از جمله شرکت‌های فعال در زمینه آبکاری ابزارهای صنعتی است و یکی از ابزارهایی که در این شرکت تحت فرآیند آبکاری الکتریکی قرار می‌گیرد پیچ دم‌خوکی است. به دلیل آن که شرکت مایل به اجرای یک پژوهش علمی برای تعیین عوامل موثر بر فرآیند آبکاری این ابزار و تشخیص مقادیر بهینه این عوامل بود، ما این مبحث را مورد مطالعه قرار دادیم. دستاوردهای موجود در این مقاله حاصل این تحقیق علمی است که با همکاری‌های صمیمانه شرکت افق گستران نور تحقق یافت. در پایان از مدیریت دلسوز و مهندسین محترم این شرکت کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم.

منابع

1. Montgomery, D. C., (2005). **Design and analysis of experiments**. 6th Ed, John Wiley and sons, New York.
2. Grabau, M., Maurer, R., and Ott, D. P., (1997). **Optimizing a simulation to generate the data to balance an assembly line**. Proceedings of the IEEE Winter Simulation Conference, Piscataway, NJ, USA , Pages 733–738.
3. Murugan, N., and Parmar, R. S., (1997). **Effect of welding conditions on microstructure and properties of tupe316L stainless steel submerged arc cladding**. Welding Journal, Volume 76, Issue 5, Pages 210-220.
4. Alizadeh, M., Hamed, M., and Khosroshahi, A., (2005). **Optimizing Sensorial Quality of Iranian White Brine Cheese Using Response Surface Methodology**. Journal of Food Science, Volume 70, Issue 4, Pages 299-303.
5. Bahloul, R., Mkaddem, A., Dal Santo, Ph., and Potiron, A., (2006). **Sheet metal bending optimisation using response surface method, numerical simulation and design of experiments**. International Journal of Mechanical Sciences, Volume 48, Issue 9, Pages 991–1003.
6. Chi-Chang, H., Chun-Kou, W., and Gen-lan, L., (2005). **Composition control of tin-zinc deposits using experimental strategies**. Electrochimica Acta, Volume 51, Issue 18, Pages 3692-3698.
7. Dominguez-Ríos, C., Torres-Sánchez, R., and Aguilar-Elguezabal, A., (2006). **Effect of Zinc Flash on the Brass Plating Electroless in Steel AISI**, <http://www.electrochem.org/dl/ma/206/pdfs/2245.pdf>
8. Bauer Jr. K. W., Parnell G. S., and Myers D. A., (1999). **Response surface methodology as a sensitivity analysis tool in decision analysis**. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, Volume 8, Issue 3, Pages 162–180.