

مطالعه پارامتری عوامل موثر بر وقوع چتر در خط نورد سرد

مهدی آبرویی^۱، علی لقمانی^{۲*}، سید جلال ذهبی^۳، محمدرضا فروزان^۳

^۱ ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکاه مهندسی مکانیک، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، دانشجوی کارشناسی ارشد.

^۲ ایران، اصفهان، آدرس، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، عضو هیأت علمی دانشکده مکانیک.

^۳ ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، عضو هیأت علمی دانشکده برق و کامپیوتر.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.loghmani@iut.ac.ir

چکیده

چتر به عنوان محدودیت اصلی برای افزایش بهره‌وری فرایندهای نورد سرد شناخته شده است. تحقیقات نشان داده‌اند پارامترهای مختلفی در ایجاد پدیده چتر نقش دارند. در این پژوهش با استفاده از برنامه شبیه‌ساز چتر که در پژوهش‌های قبلی ایجاد شده است، به بررسی تاثیر پارامترهای ورودی کاهش ضخامت در قفسه اول، کشش‌های ورودی و خروجی از قفسه اول، کشش خروجی از قفسه دوم و ضریب‌های اصطکاک قفسه‌ی اول و دوم بر روی سرعت بحرانی چتر پرداخته شده است. از روش سطح پاسخ برای بدست آوردن ارتباط بین پارامترهای ورودی و سرعت بحرانی چتر و همچنین به بررسی میزان تاثیر پارامترهای ورودی بر روی سرعت بحرانی چتر پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند روش سطح پاسخ با تعداد ۹۰ آزمایش توانسته است رابطه بین ورودی‌ها و خروجی را با دقت قابل قبولی بدست آورد. پارامترهای کاهش ضخامت در قفسه اول، کشش خروجی از قفسه اول و ضریب اصطکاک قفسه دوم به ترتیب بیش‌ترین تاثیر را بر روی سرعت بحرانی چتر دارند.

کلمات کلیدی: چتر؛ دستگاه نورد سرد؛ روش سطح پاسخ؛ سرعت بحرانی.

۱- مقدمه

فرایند نورد یکی از حیاتی‌ترین بخش‌ها در صنعت فولاد است و هر گونه ناهنجاری تاثیر مستقیم بر روی کیفیت ورق نورد شده می‌گذارد. چتر^۱ نوعی ارتعاشات خودبرانگیخته است که اثرات مخربی بر روی ورق فولادی در فرایند نورد سرد می‌گذارد. تحقیقات بر روی ارتعاشات دستگاه نورد به طور کلی به دو روش ۱. مدل سازی پدیده چتر و ۲. روش‌های تشخیص پدیده چتر دسته‌بندی شده‌اند.

^۱ Chatter

در پژوهش یون و همکاران [۱] مدل‌های ریاضی موجود از ساختار و فرایند نورد مرور شده است و مدل‌های پدیده چتر که براساس تعامل مدل ساختار و مدل فرایند ایجاد شده‌اند بررسی شده است. کیمورا و همکاران [۲] یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی رفتار ارتعاشی یک دستگاه نورد پنج قفسه ایجاد کرده‌اند و به بررسی پایداری ارتعاش دستگاه نورد پرداخته‌اند. برای فهم بیشتر پدیده چتر، یک شاخص پایداری که از یک مدل ارتعاش خود برانگیخته ساده بدست آمده است، تعریف شده است. حیدری و همکاران [۳] با استفاده از داده‌های برنامه شبیه‌ساز و توسعه یک مدل آماری که ارتباط تمایل سیستم به چتر و پارامترهای نورد را بیان می‌کند به بهینه‌سازی فرایند نورد با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۱ پرداخته‌اند. برای مدل‌سازی رابطه بین ورودی و خروجی از دو روش سطح پاسخ^۲ و شبکه عصبی^۳ استفاده شده است. داده‌ها برای روش سطح پاسخ و شبکه عصبی به ترتیب با استفاده از طراحی مرکب مرکزی^۴ و تاگوچی^۵ بدست آمده‌اند. در پژوهش دیگری از حیدری و همکاران [۴] برای فرایند نورد سرد با روانکاری ناپایدار با استفاده از یک مدل شبیه‌ساز نورد به بررسی تاثیر ویسکوزیته روانکار، ضریب ویسکوزیته-فشار و تنش برشی بر روی سرعت بحرانی چتر پرداخته شده است. مهرابی و همکاران [۵] مدل ساختار قفسه را به صورت جرم-فنر-میراگر و مدل فرایند نورد را با استفاده از روش المان محدود^۶ ایجاد کرده‌اند و با ترکیب دو مدل به بررسی تاثیر سرعت غلتش، مقدار کاهش ضخامت ورق، ضخامت ورودی به قفسه و ضریب اصطکاک بر روی پدیده چتر پرداخته‌اند. یکی از روش‌های جدید بررسی پدیده چتر، پیوند یک واحد کنترلی با مدل ریاضی ساختار-فرایند است. در پژوهش گائو و همکاران [۶] با اعمال معیار پایداری راث-هرویتز^۷ بر روی مدل ساختار-فرایند-کنترل، یک مدل محاسبه آستانه سرعت نورد بدست آمده است و تاثیر پارامترهای کاهش ضخامت، ضریب اصطکاک و پارامترهای کنترلی که بر روی پایداری و ناپایداری موثر هستند بررسی شده است. در ادامه پژوهش قبل، گائو و همکاران [۷] به منظور بالا بردن سرعت نورد و محدوده پایداری یک بهینه‌سازی بر روی پارامترهای مقدار کاهش ضخامت در هر قفسه و تنش‌های بین قفسه‌های مجاور انجام داده‌اند.

نیرومند و همکاران [۸] با قرار دادن حسگرهای شتاب‌سنج در قسمت‌های مختلف دستگاه نورد و تجزیه و تحلیل سیگنال‌های شتاب بدست آمده، به بررسی میزان حساسیت نقاط مختلف دستگاه نسبت به پدیده چتر پرداخته‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد رول پشتیبان بالایی و قسمت بالایی بدنه قفسه به ترتیب حساس‌ترین نقاط نسبت پدیده چتر هستند. در پژوهش دیگری از نیرومند و همکاران [۹] با استفاده از حسگرهای شتاب‌سنج و صوت به بررسی پدیده چتر از دو دیدگاه ارتعاش و صدا پرداخته شده است. یک راه دیگری که برای تشخیص پدیده چتر استفاده شده است استفاده از روش‌های پردازش سیگنال و هوش مصنوعی به منظور پیش‌بینی وقوع چتر است. لو و همکاران [۱۰] با استفاده از داده‌های یک دستگاه نورد پنج قفسه که هر قفسه شامل شش غلتک است و مدل‌های رگرسیونی^۸ به پیش‌بینی اندازه دامنه ارتعاشات فرایند نورد پرداخته‌اند.

در این مقاله با استفاده از برنامه شبیه‌ساز چتر که در پژوهش [۴] ایجاد شده است به بررسی تاثیر پارامترهای کاهش ضخامت در قفسه اول، کشش‌های ورودی و خروجی از قفسه اول، کشش خروجی از قفسه دوم و ضریب‌های اصطکاک قفسه‌ی اول و دوم بر روی سرعت بحرانی چتر پرداخته شده است. از آنجایی که اجرای برنامه شبیه‌ساز زمان‌بر است و تعداد پارامترهای تاثیرگذار بر روی سرعت بحرانی نورد زیاد است، برای بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف نورد بر روی سرعت بحرانی چتر و بدست آوردن رابطه بین پارامترهای ورودی و پارامتر خروجی از روش سطح پاسخ که یکی از روش‌های طراحی آزمایش^۹ است استفاده شده است.

^۱ Genetic algorithm

^۲ Response surface method

^۳ Neural network

^۴ Central composite design

^۵ Taguchi

^۶ Finite element

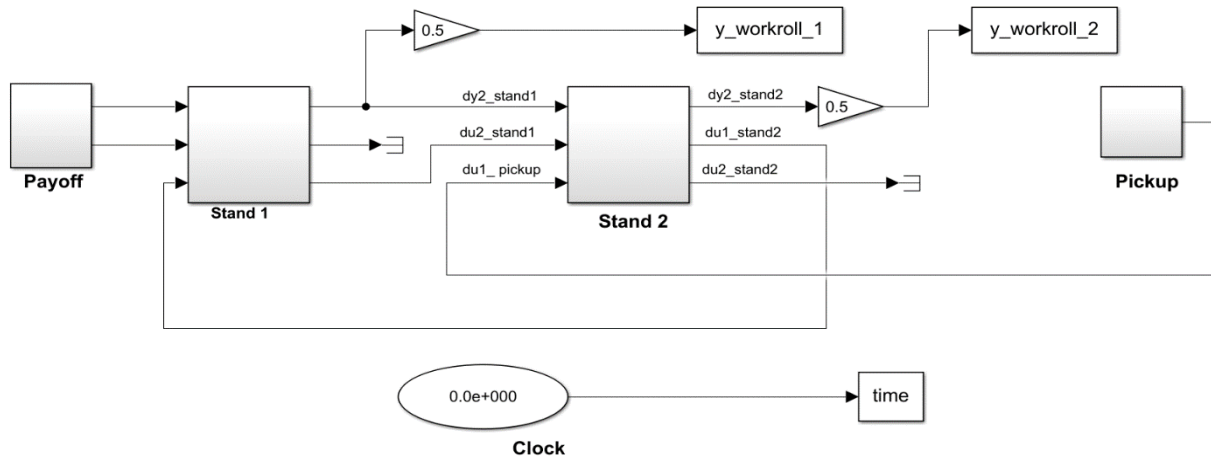
^۷ Routh-Hurwitz

^۸ Regression

^۹ Design of experiment

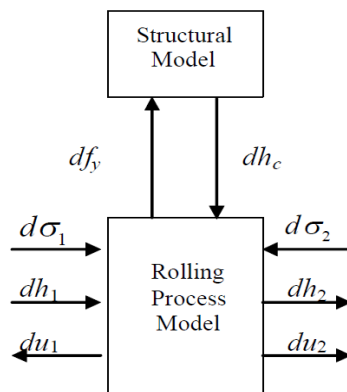
۲- مدل‌سازی چتر در فرایند نورد سرد

شکل (۱) مدل استفاده شده در پژوهش [۴] را نشان می‌دهد که برای خط نورد سرد دو قفسه‌ای موجود در شرکت فولاد مبارکه اصفهان ایجاد شده است. این مدل در محیط سیمولینک^۱ نرم افزار متلب^۲ شبیه‌سازی شده است. در شکل (۱) از سمت چپ به ترتیب هر یک از جعبه‌ها مربوط به ورق بازکن، قفسه اول، قفسه دوم و ورق جمع‌کن هستند. در جعبه‌های ورق بازکن و ورق جمع‌کن تغییرات تنش کششی قبل از قفسه اول و بعد از قفسه دوم در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. برنامه شبیه‌ساز چتر برای دستگاه نورد سرد دو قفسه‌ای

هر کدام از جعبه‌های قفسه، مدل چتر شامل مدل فرایند نورد، مدل ساختار دستگاه و مدل بین قفسه‌ای را شامل می‌شود. در شکل (۲) مدل چتر را که از ترکیب مدل فرایند نورد و مدل ساختار دستگاه ایجاد شده است نشان داده شده است. در شکل (۲) $d\sigma_1$ و $d\sigma_2$ تغییرات کشش از عقب و جلو، dh_1 تغییرات ضخامت ورودی به قفسه، dh_2 تغییرات ضخامت خروجی از قفسه، du_1 تغییرات سرعت ورودی به قفسه و du_2 تغییرات سرعت خروجی از قفسه است. بسته به نوع مدل اصطکاک مورد استفاده در برنامه، معادلات مدل فرایند نورد انتخاب می‌شود. در این پژوهش مدل اصطکاک استفاده شده میرائی کولمب است.



شکل ۲. مدل چتر تک قفسه [۱۱]

در جدول (۱) پارامترهای ورودی مورد مطالعه در مدل و همچنین بازه تغییرات هر پارامتر نشان داده شده است. خروجی مدل دامنه نوسانات قفسه‌ی اول و دوم می‌باشد.

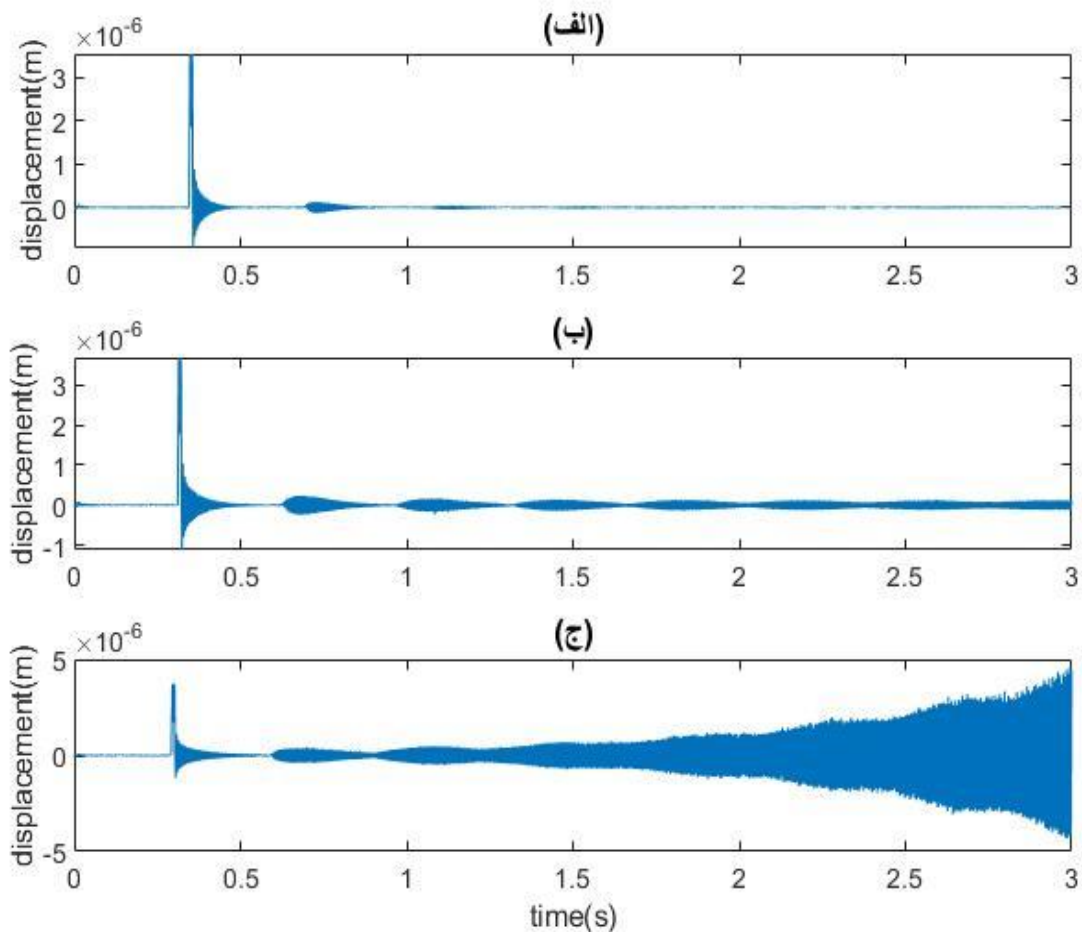
^۱ Simulink

^۲ Matlab

جدول ۱. متغیرهای برنامه شبیه‌ساز و بازه تغییرات آنها

سرعت (m/s)	ضخامت خروجی از قفسه دوم (μm)	ضریب اصطکاک قفسه دوم	ضریب اصطکاک قفسه اول	کشش خروجی از قفسه دوم (MPa)	کشش خروجی از قفسه اول (MPa)	کشش ورودی به قفسه اول (MPa)	مقدار کاهش ضخامت در قفسه اول (%)	مقدار کاهش ضخامت در هر دو قفسه (%)	پارامترها
-	۲۴۰	-۰/۰۰۹۶ ۰/۰۱۱۸	-۰/۰۰۷۷ ۰/۰۰۹۴	-۵۹/۲۵ ۹۸/۷۵	-۱۱۰/۳ ۱۸۳/۷۵	-۷۱/۲۵ ۱۱۸/۷۵	۲۵-۱۷	۴۸ و ۴۶	بازه تغییرات

از مدل برای بدست آوردن سرعت بحرانی نورد در مقادیر پارامترهای مختلف نورد استفاده شده است. مدل برای سرعت‌های مختلف اجرا می‌شود و سرعتی که در آن دامنه ارتعاشات برحسب زمان ثابت می‌ماند به عنوان سرعت بحرانی نورد شناخته می‌شود. در شکل (۳) تغییرات دامنه نوسانات قفسه دوم در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. لازم به ذکر است که هر بار شبیه‌سازی فرایند نورد به مدت ۵ ثانیه به تقریب ۸۰ دقیقه زمان می‌برد.



شکل ۳. نوسانات قفسه دوم در سرعت الف) کم‌تر از سرعت بحرانی، ب) سرعت بحرانی و ج) بالاتر از سرعت بحرانی

۳- روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرایندها مفید است. بیشترین کاربردهای روش سطح پاسخ در دنیای صنعت است، به ویژه در شرایطی که چندین متغیر ورودی به طور بالقوه بر عملکرد یا کیفیت محصول یا فرایند تاثیر می‌گذارد. اگر سیستم شامل پاسخ y که به متغیرهای ورودی x_1, x_2, \dots, x_k قابل کنترل وابسته باشد رابطه بین پاسخ و ورودی‌ها توسط رابطه (۱) نمایش داده می‌شود [۱۲]:

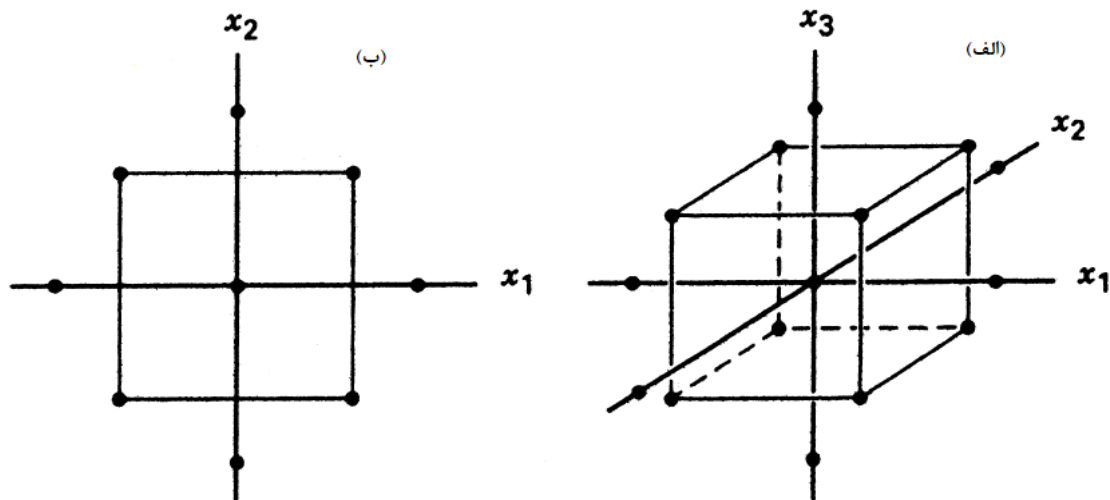
$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (1)$$

که در آن شکل تابع پاسخ f ناشناخته است. در بسیاری از موارد از یک مدل مرتبه اول یا دوم برای f استفاده می‌شود. اغلب انحنای در سطح پاسخ به قدری زیاد است که مدل مرتبه اول ناکافی است، در این شرایط احتمالا یک مدل مرتبه دوم مورد نیاز خواهد بود. رابطه (۲) مدل مرتبه دوم را نشان می‌دهد [۱۲]:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

ضرایب β از روش مربعات خطا محاسبه می‌شوند.

متغیرهای ورودی کاهش ضخامت در قفسه اول، کشش‌های ورودی و خروجی از قفسه اول، کشش خروجی از قفسه دوم و ضرایب اصطکاک قفسه‌ی اول و دوم به عنوان ورودی و سرعت بحرانی به عنوان خروجی یا پاسخ در نظر گرفته شده‌اند. برای هر کدام از درصد کل کاهش ضخامت‌ها رابطه بین پاسخ و متغیرهای ورودی محاسبه می‌شود. تعداد پارامترهای متغیر ورودی ۶ است و برای مثال اگر ۴ سطح بین هر پارامتر انتخاب شود تعداد آزمایش مورد نیاز با استفاده از روش طراحی فاکتوریل کامل^۱، $4^6 = 4096$ است که با توجه به زمان اجرای شبیه‌سازی بسیار زیاد است. به همین دلیل انتخاب تعداد و مقدار سطوح بین کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار متغیرهای ورودی از روش طراحی مرکب مرکزی انجام می‌شود، تا در تعداد آزمایش و زمان کم‌تر تابع پاسخ از روش سطح پاسخ بدست آید. در روش طراحی مرکب مرکزی ۵ سطح در بازه‌ی تغییرات هر عامل در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی برای ۶ متغیر ورودی مدل استفاده شده در این پژوهش، روش سطح پاسخ با تعداد ۹۰ آزمایش در نرم افزار مینی‌تب^۲ پیاده‌سازی شده است. در شکل (۴) نحوه انتخاب تعداد نقاط در حالت دو عاملی و سه عاملی از روش طراحی مرکب مرکزی به عنوان نمونه نشان داده شده است.



شکل ۴. هندسه روش طراحی مرکب مرکزی برای الف) سه عامل و ب) دو عامل

^۱ Full factorial design

^۲ Minitab

۴- نتایج و بحث

برای هر یک از دو مقدار کاهش ضخامت کل ۴۶ و ۴۸ درصد، تابع تغییرات سرعت بحرانی برحسب پارامترهای ورودی با استفاده از روش سطح پاسخ بدست آمده است. برای بررسی دقت پاسخ‌های بدست آمده از انحراف معیار^۱، ضریب‌های تعیین^۲ و نمودارهای باقی‌مانده^۳ استفاده می‌شود. برای ارزیابی این‌که مدل چقدر پاسخ را به خوبی توصیف می‌کند از انحراف معیار استفاده می‌شود. انحراف معیار نشان می‌دهد که مقدار داده‌ها چقدر از مقدار برازش شده فاصله دارند. هر چه مقدار انحراف معیار کم‌تر باشد، مدل پاسخ را بهتر توصیف می‌کند. از ضریب تعیین برای بیان میزان تطابق داده‌ها با مدل استفاده می‌شود. هر چقدر ضریب تعیین بیشتر باشد مدل بیشتر با داده‌ها تطابق دارد. ضریب تعیین بر این فرض است که هر متغیر مستقل مشاهده شده در مدل، در تغییرات متغیر وابسته نقش دارد در صورتی که ضریب تعیین تعدیل شده فقط حاصل از تاثیر واقعی متغیرهای مستقل مدل بر وابسته است و نه همه متغیرهای مستقل. به بیان دیگر زمانی که یک پارامتر جدید به مدل رگرسیون اضافه می‌شود حتی اگر هیچ پیشرفت واقعی بر پاسخ مدل نداشته باشد، مقدار ضریب تعیین افزایش پیدا می‌کند در حالی که ضریب تعیین تعدیل شده^۴ تاثیر واقعی پارامترها بر پاسخ را در نظر می‌گیرد. برای تعیین این‌که مدل چقدر توانایی پیش‌بینی مشاهدات جدید را دارد از ضریب تعیین پیش‌بینی شده^۵ استفاده می‌شود. مقدار ضریب‌های تعیین برای دو پاسخ در جدول‌های (۲) و (۳) آورده شده است.

جدول ۲. انحراف معیار و ضریب‌های تعیین معادله رگرسیون مرتبه دو در حالت کاهش ضخامت کل ۴۶ درصد

ضریب تعیین پیش‌بینی شده	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین	انحراف معیار
۰/۹۸۵۷	۰/۹۹۱۱	۰/۹۹۴۳	۰/۰۵۸۶

جدول ۳. انحراف معیار و ضریب‌های تعیین معادله رگرسیون مرتبه دو در حالت کاهش ضخامت کل ۴۸ درصد

ضریب تعیین پیش‌بینی شده	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین	انحراف معیار
۰/۹۷۸۸	۰/۹۸۶۱	۰/۹۹۱۰	۰/۰۶۷۱

از مقدار انحراف معیار و ضریب‌های تعیین جدول‌های بالا مشخص است که هر دو معادله رگرسیون دقت خوبی برای پیش‌بینی سرعت بحرانی نورد در مقدار پارامترهای مختلف دارند.

در شکل‌های (۵) و (۶) نمودار توزیع باقی‌مانده‌ها برای کاهش ضخامت کل ۴۶ و ۴۸ درصد نشان داده شده است. باقی‌مانده تفاوت بین مقدار مشاهده شده و مقدار پیش‌بینی شده است. در قسمت ب نمودارها، برای تأیید این فرض که باقی‌مانده‌ها به طور معمول توزیع شده‌اند نمودار احتمال معمول باقی‌مانده‌ها نشان داده شده است. محور عمودی قسمت ب نمودارها درصد احتمال توزیع معمول را نشان می‌دهد.

برای تأیید این فرض که باقی‌مانده‌ها به طور تصادفی توزیع شده‌اند و واریانس ثابتی دارند، از نمودار مقدار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقدارهای برازش شده استفاده می‌شود. این نمودار باید یک الگوی تصادفی از باقی‌مانده‌ها را در دو طرف صفر نشان دهد و همچنین نباید هیچ الگوی قابل تشخیصی در باقی‌مانده‌ها وجود داشته باشد. در قسمت الف شکل‌های (۵) و (۶) این نمودار نمایش داده شده است.

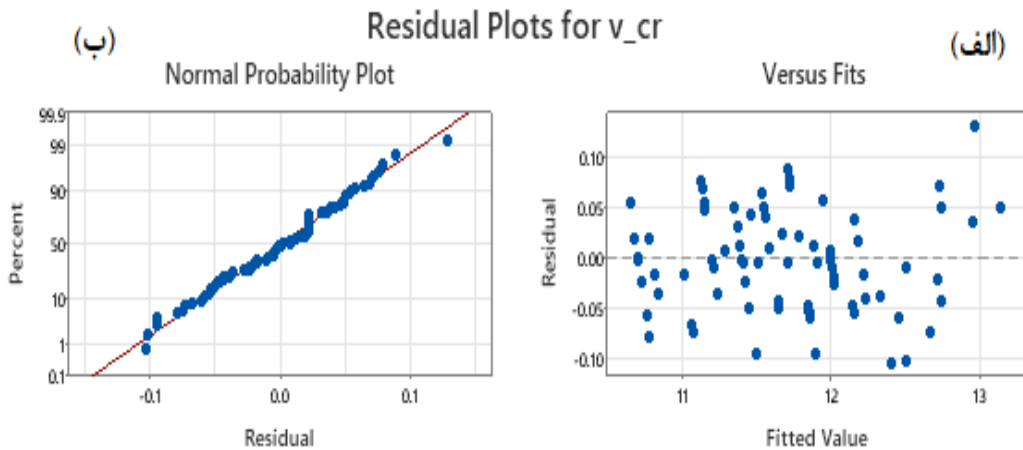
^۱ Standard deviation

^۲ Coefficient of determination or R^2

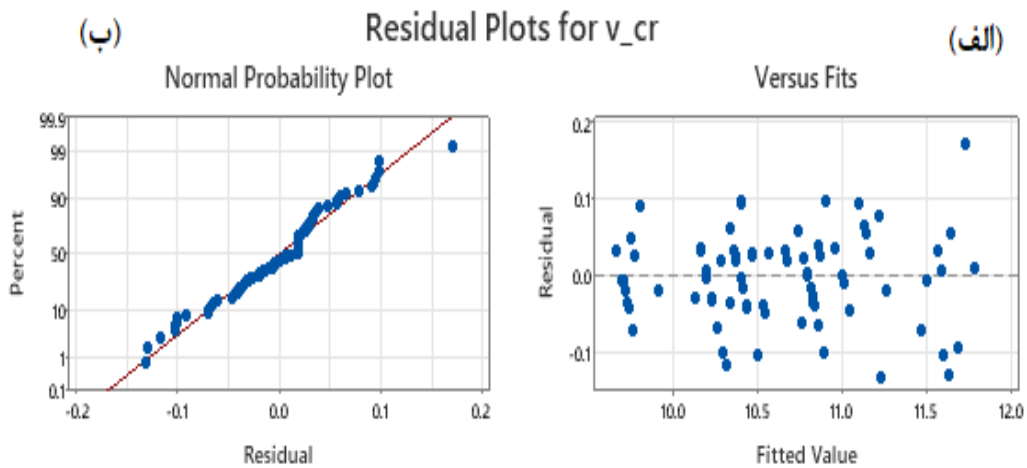
^۳ Residual

^۴ Adjusted R^2

^۵ Predicted R^2

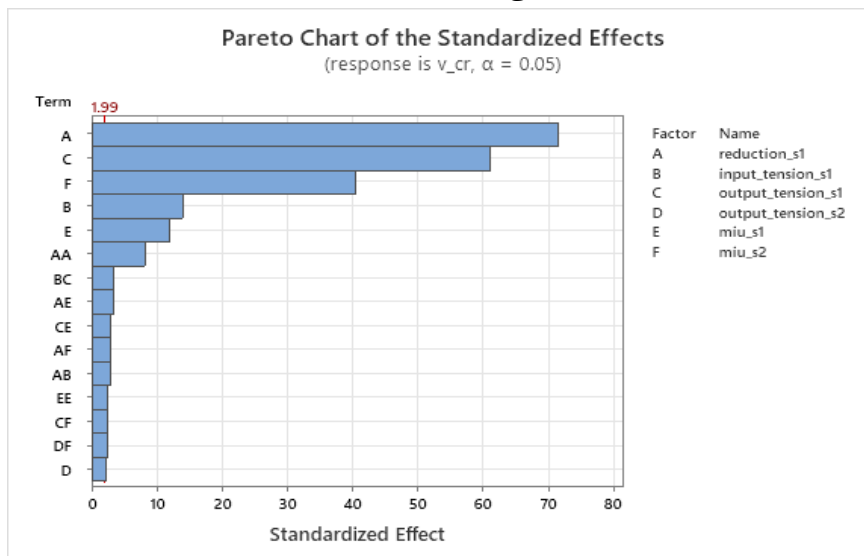


شکل ۵. نمودارهای توزیع باقی‌مانده‌ها در مقدار کاهش ضخامت ۴۶ درصد



شکل ۶. نمودار توزیع باقی‌مانده‌ها در مقدار کاهش ضخامت ۴۸ درصد

از روش سطح پاسخ می‌توان میزان تاثیر هر یک از پارامترها و برهم‌کنش آن‌ها را بر روی سرعت بحرانی بدست آورد. در شکل (۷) تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر روی سرعت بحرانی در حالت کاهش ضخامت کل ۴۶ درصد نشان داده شده است.



شکل ۷. نمایش مقدار تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی و برهم‌کنش آن‌ها بر روی سرعت بحرانی

همان‌طور که از شکل (۷) ملاحظه می‌شود سه پارامتر کاهش ضخامت قفسه اول، کشش خروجی از قفسه اول و ضریب اصطکاک قفسه دوم به ترتیب بیش‌ترین تاثیر را بر روی سرعت بحرانی دارند. این سه پارامتر در حالت کاهش ضخامت ۴۸ درصد نیز بیش‌ترین تاثیر را دارند.

به دلیل زمان‌بر بودن اجرای شبیه‌ساز، می‌توان از معادلات رگرسیون‌های بدست آمده برای تولید داده استفاده کرد. بین مقادیرهای پائین و بالای هر پارامتر که در جدول (۱) آمده است چهار سطح با فاصله مساوی در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از طراحی فاکتوریل کامل تمام ترکیب‌های ممکن از پارامترها ایجاد می‌شود. شرط کشش بین قفسه‌ی ۱ و ۲ بزرگ‌تر از کشش قبل از قفسه اول و کشش بعد از قفسه دوم اعمال شده و تعدادی از داده‌ها حذف می‌شوند. سرعت بحرانی داده‌های باقی‌مانده از معادلات رگرسیون برای مقدار کاهش ضخامت کل ۴۶ درصد بدست می‌آید. تعداد ۲۰ عدد داده غیر تکراری اتفاقی از این مجموعه داده انتخاب شده است و سرعت بحرانی بدست آمده از روش سطح پاسخ با سرعت بحرانی بدست آمده از مدل معرفی شده در بخش دوم مقایسه شده است که مقدار میانگین مربعات خطا ۰/۰۴۷۵ بدست آمده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل ایجاد شده در یکی از پژوهش‌های قبلی به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی پدیده چتر استفاده شده است. از روش سطح پاسخ برای برقراری ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند دقت پیش‌بینی مدل‌های رگرسیون برای کاهش ضخامت ۴۶ و ۴۸ درصد به ترتیب ۹۸/۵۷ و ۹۷/۸۸ درصد می‌باشد و پارامترهای کاهش ضخامت قفسه اول، کشش خروجی از قفسه اول و ضریب اصطکاک قفسه دوم بیش‌ترین تاثیر را بر روی سرعت بحرانی نورد دارند. با مقایسه سرعت‌های بحرانی بدست از مدل و معادله رگرسیون با یکدیگر، نشان داده شده است که معادله رگرسیون به خوبی می‌تواند سرعت بحرانی نورد را در مقدار ورودی‌های مختلف بدست آورد.

مراجع

- [1] I. S. Yun, W. R. D. Wilson, and K. F. Ehmann, "Review of chatter studies in cold rolling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Article vol. 38, no. 12, pp. 1499-1530, 1998, doi: 10.1016/S0890-6955(97)00133-8.
- [2] Y. Kimura, Y. Sodani, N. Nishiura, N. Ikeuchi, and Y. Mihara, "Analysis of chatter in tandem cold rolling mills," *ISIJ International*, Article vol. 43, no. 1, pp. 77-84, 2003, doi: 10.2355/isijinternational.43.77.
- [3] A. Heidari and M. R. Forouzan, "Optimization of cold rolling process parameters in order to increasing rolling speed limited by chatter vibrations," *Journal of Advanced Research*, Article vol. 4, no. 1, pp. 27-34, 2013, doi: 10.1016/j.jare.2011.12.001.
- [4] A. Heidari, M. R. Forouzan, and M. R. Niroomand, "Development and evaluation of friction models for chatter simulation in cold strip rolling," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Article vol. 96, no. 5-8, pp. 2055-2075, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1658-x.
- [5] R. Mehrabi, M. Salimi, and S. Ziaei-Rad, "Finite Element Analysis on Chattering in Cold Rolling and Comparison with Experimental Results," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, Article vol. 137, no. 6, 2015, Art no. 061013, doi: 10.1115/1.4030379.
- [6] Z. Y. Gao, Y. Liu, Q. D. Zhang, M. L. Liao, and B. Tian, "Chatter model with structure-process-control coupled and stability analyses in the cold rolling system," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Article vol. 140, 2020, Art no. 106692, doi: 10.1016/j.ymsp.2020.106692.
- [7] Z. Y. Gao, B. Tian, Y. Liu, L. Y. Zhang, and M. L. Liao, "Dynamics-based optimization of rolling schedule aiming at dual goals of chatter suppression and speed increase for a 5-stand

- cold tandem rolling mill," *Journal of Iron and Steel Research International*, Article vol. 28, no. 2, pp. 168-180, 2021, doi: 10.1007/s42243-020-00551-5.
- [8] M. R. Niroomand, M. R. Forouzan, M. Salimi, and M. Kafil, "Frequency analysis of chatter vibrations in tandem rolling mills," *Journal of Vibroengineering*, Article vol. 14, no. 2, pp. 852-865, 2012.
- [9] M. R. Niroomand, M. R. Forouzan, and A. Heidari, "Experimental analysis of vibration and sound in order to investigate chatter phenomenon in cold strip rolling," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Article vol. 100, no. 1-4, pp. 673-682, 2019, doi: 10.1007/s00170-018-2639-9.
- [10] X. Lu *et al.*, "Prediction and analysis of cold rolling mill vibration based on a data-driven method," *Applied Soft Computing Journal*, Article vol. 96, 2020, Art no. 106706, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106706.
- [11] H. Zhao, "Regenerative chatter in cold rolling, PhD. 3303624, Northwestern University, Ill, USA," 2008.
- [12] M. Raymond, M. Douglas, and A. Christine, *Response Surface Methodology*. Wiley, 2016.