



## بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند تولید بر خواص مکانیکی میلگرد ترمکس با روش تاگوچی

وحید پویافار<sup>1\*</sup>، رامین مشک‌آبادی<sup>2</sup>

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استادیار، دانشکده فناوریهای نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

\* تبریز، صندوق پستی 5166616471، pouyafar@tabrizu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 4 آبان 1399

داوری اولیه: 18 آبان 1399

پذیرش: 15 فروردین 1400

### کلیدواژگان:

ترمکس

میلگرد آجدار

خواص مکانیکی

روش تاگوچی

ترمکس یا خود تمپرینگ یک فرآیند ترمومکانیکی است که به صورت یک عملیات درون خطی در واحدهای نورد به کار گرفته می‌شود. با استفاده از این فرآیند، استحکام تسلیم میلگردهای ساختمانی به حداقل 500 MPa می‌رسد. با توجه به اهمیت استفاده از میلگرد با استحکام بالا، در تحقیق حاضر به بررسی و تعیین پارامترهای فرآیندی مؤثر بر خواص مکانیکی محصول در تولید میلگرد آجدار با استفاده از تست‌های تجربی پرداخته شده است. با در نظر گرفتن چهار فاکتور مؤثر شامل دبی آب، فشار ترمکس، سرعت نورد و دماهای مختلف کوره، تست‌های کشش استاندارد بر روی نمونه‌های مختلفی از میلگرد آجدار انجام پذیرفت. با استفاده از متد تاگوچی آزمایش‌های مختلف طراحی گردید و سپس تأثیر پارامترهای مختلف بر خواص مکانیکی میلگرد (استحکام تسلیم، استحکام نهایی و شکل‌پذیری) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تحلیل آماری شامل نسبت سیگنال به نویز و آنالیز واریانس نشان می‌دهند که تمام پارامترهای مورد بررسی به طور مؤثری بر خواص مکانیکی محصول تأثیرگذار هستند. بر اساس نتایج به دست آمده مقادیر بهینه پارامترها برای رسیدن به شرایط مطلوبی از استحکام و شکل‌پذیری تعیین گردید.

## Investigation of production process parameters effects on the mechanical properties of Thermex rebar by Taguchi method

Vahid Pouyafar<sup>1\*</sup>, Ramin Meshkabadi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Department of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

\* P.O.B. 5166616471 Tabriz, Iran, pouyafar@tabrizu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 26 October 2020

First Decision: 9 November 2020

Accepted: 4 April 2021

### Keywords:

Thermex

Rebar

Mechanical Properties

Taguchi Method

### Abstract

Thermex is a thermo-mechanical process which is used as an in-line operation after rolling process. By using this process, the yield strength of the rebar reaches to at least 500 MPa. Due to the importance of using high-strength rebars, in the present study, the influences of the process parameters on the rebar's mechanical properties are investigated using experimental techniques. Considering four effective factors including water flow rate, Thermex pressure, rolling speed and different furnace temperatures, standard tensile tests were performed. The required experiments according to Taguchi method were designed and then the effect of mentioned parameters on the mechanical properties (yield strength, ultimate strength and ductility) of the rebar was studied. Statistical investigation including signal to noise (S/N) ratio and analysis of variance (ANOVA) showed that all the mentioned parameters have a significant influence on the mechanical properties. Based on the results, the optimal values of the parameters were determined to achieve optimal conditions of strength and ductility.

### 1- مقدمه

در این فرآیند می‌باشد که طی سال‌های اخیر، پیشرفت‌های زیادی در این زمینه اتفاق افتاده است [1، 2]. مطالعات انجام شده در زمینه تولید میلگردهای ساختمانی نشان می‌دهند که آخرین پاس اعمالی در فرآیند نورد کنترل شده، در محدوده دمایی انجام می‌شود که فاز آستنیت به تبلور مجدد نرسد [3، 4].

دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب با ساختار ریزدانه از طریق کنترل نرخ سرد شدن قابل حصول است که مهمترین

صنعت فولاد یکی از صناعی است که نقش مهمی در رشد و توسعه کشورهای پیشرفته صنعتی ایفا کرده است و همواره مصرف سرانه فولاد به عنوان یکی از شاخص‌های رشد و توسعه کشورها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تولید میل‌گردهای با استحکام بالا که مزایای عمده‌ای نسبت به میلگردهای معمولی دارند نیازمند مهارت‌های خاص در همه قسمت‌های نورد می‌باشد. قسمت خنک‌کاری به عنوان اصلی‌ترین ابزار متالورژیکی

Please cite this article using:

V. Pouyafar, R. Meshkabadi, Investigation of production process parameters effects on the mechanical properties of Thermex rebar by Taguchi method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 41- 51, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مکانیکی میلگردهای فولادی تمپکور پرداختند. آنها نشان دادند که ساختار میلگردهای تمپکور به صورت یک ماده کامپوزیتی متشکل از سه قسمت سطح سخت، لایه میانی با سختی متوسط و همچنین هسته نرم می‌باشند. آنها با کمی‌سازی میزان حساسیت لایه‌های تشکیل یافته به نرخ کرنش پارامترهای مدل جانسون-کوک<sup>2</sup> را برای این سه ناحیه تعیین نمودند [12]. خلیفا و همکاران یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی فرایند تمپکور و پیش‌بینی نحوه توزیع دما در مرحله کونچ و خودتمپرینگ پیشنهاد دادند. مدل ارائه شده توسط آنها قادر به پیش‌بینی تأثیر پارامترهای فرایندی شامل قطر میله، دمای نورد، تعداد نازل‌های خنک‌کاری، دبی آب و زمان سریع سرد شدن بود. نتایج به‌دست آمده از مدل ریاضی پیشنهاد شده دارای مطابقت بسیار خوبی با تست‌های تجربی صورت گرفته می‌باشد [13].

دامنه کاربرد فولادهای استحکام بالا در صنایعی نظیر ساخت سازه‌های دریایی، نیروگاه‌های آبی، کشتی‌سازی، صنعت ساختمان و پل‌سازی گسترش یافته است. فولادهای با استحکام خیلی بالا تا حدود 1100 MPa عموماً توسط فرایندهای عملیات حرارتی کونچ - تمپر تولید می‌گردند. افزایش استحکام فولادها همیشه همراه با افزایش عناصر آلیاژی بوده است و افزایش این عناصر معمولاً باعث افزایش سختی پذیری می‌شود که در حالت کنترل نشده منجر به افزایش ریسک شکست ترد و ترک هیدروژنی در سازه‌ها خواهد شد. دستیابی به خواص مکانیکی بالا و جوش پذیری مناسب با به کارگیری فرایند ترمومکانیکی کنترل شده و اصلاح ریزساختار میسر است. بر این اساس، هدف از تحقیق حاضر بررسی و تعیین پارامترهای فرایندی مؤثر بر خواص مکانیکی محصول در تولید میلگرد آجدار به روش ترمو-مکانیکی ترمکس با استفاده از تست‌های تجربی می‌باشد. با در نظر گرفتن چهار پارامتر دبی آب، فشار ترمکس، سرعت نورد و دماهای مختلف کوره، تست‌های کشش استاندارد بر روی نمونه‌های مختلفی از میلگردهای آجدار صورت گرفته است. از روش تاگوچی به منظور طراحی آزمایش‌ها و کاهش تعداد آنها استفاده شده و با انجام تست‌های تجربی، خواص مکانیکی میلگرد مانند استحکام تسلیم، استحکام نهایی و شکل‌پذیری تحلیل آماری گردید. در نهایت پس از بررسی تأثیر متقابل پارامترها و ارائه مدل‌های رگرسیون تخمین خواص مکانیکی سطوح بهینه هر کدام از پارامترها تعیین گردید.

عامل تعیین کننده در خواص نهایی می‌باشد. افزایش نرخ سرد شدن باعث تغییر ریزساختار و افزایش استحکام میلگرد می‌شود. میزان استحکام قابل حصول در روش خنک‌کاری تابع سه عامل: بهسازی دانه‌های فریت، سختی‌رسوبی و استحکام‌پذیری از طریق شکل‌گیری بینیت است [5].

قوش و قوش با انجام تست‌های مکانیکی و بررسی ریزساختاری نشان دادند که میلگردهای تولید شده توسط عملیات ترمو-مکانیکی دارای خواص مکانیکی و مقاومت به ضربه بهتری نسبت به میلگردهای تولید شده از سرد شدن آرام در هوا می‌باشند. در این راستا کشاورز و آقای‌پور به بررسی تأثیر دمای فرآیند تمپکور<sup>1</sup> بر خواص مکانیکی میلگردهای آجدار پرداختند [6]. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که میلگردهای تولید شده با روش ترمومکانیکی تمپکور دارای خواص مکانیکی بهبود یافته‌ای هستند. همچنین، هرچه دمای نورد بالاتر باشد استحکام تسلیم و استحکام نهایی کاهش یافته و چقرمگی افزایش می‌یابد [7]. اکبرپور و همکاران تأثیر فشار و دمای آب، قطر میلگرد و دمای اولیه آن را در ریزساختار و خواص مکانیکی آن به صورت عددی و تجربی در فرایند تمپکور مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که پارامترهای مذکور با تأثیرگذاری بر ریزساختار مارتنزیتی تشکیل شده در سطح و فاز ریزدانه فریت-پرلیت در هسته خواص مکانیکی نمونه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین نشان دادند که فشار آب دارای بیشترین تأثیر در بهبود خواص می‌باشد [8]. سانتوس و همکاران در تحقیقی سختی، استحکام و شکل‌پذیری میلگردهای تمپکور دارای عیب را مورد بررسی قرار دادند. بررسی آنها نشان داد که در میل‌گردهای معیوب کاهش استحکام نهایی عمدتاً به دلیل سخت شدن فولاد است [9]. کادونی و همکاران تأثیر دما بر رفتار کششی میلگردهای آجدار را در نرخ کرنش بالا بررسی نمودند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که با افزایش دما میزان کاهش خواص مکانیکی نظیر استحکام تسلیم و مدول الاستیسیته به نوع فولاد و آلیاژهای مصرفی بستگی دارد [10].

پارک و همکاران یک مجموعه خنک کاری مدرن برای تسریع فرایند سرد کردن بعد از نورد در عملیات تمپکور طراحی نمودند. نتایج نشان داد با تغییر دادن طراحی سیستم خنک کننده ضریب انتقال حرارت به میزان 10% افزایش یافت و به واسطه آن حجم مارتنزیت تشکیل شده در سطح افزایش یافته و خواص مکانیکی نمونه بهبود یافتند [11].

کادونی و همکاران به مطالعه تجربی تأثیر نرخ کرنش در رفتار

<sup>2</sup> Johnson-Cook model

<sup>1</sup> Tempcore

## 2- مواد و روش‌ها

میلگرد به شمار می‌رود. نمونه میلگردهای مورد نظر، در چهار مرحله زمانی مختلف تولید شده و در تمام مراحل برای کوئنچ از دستگاه ترمکس غیریکپارچه استفاده شد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد AISI 430F

Table 1 The chemical composition of AISI 430F steel				
عنصر	C	Si	Mn	P
درصد	0/28-0/37	0/15-0/3	0/5-0/8	0/04
عنصر	Ni	Cr	Cu	S
درصد	0/3	0/3	0/3	0/04

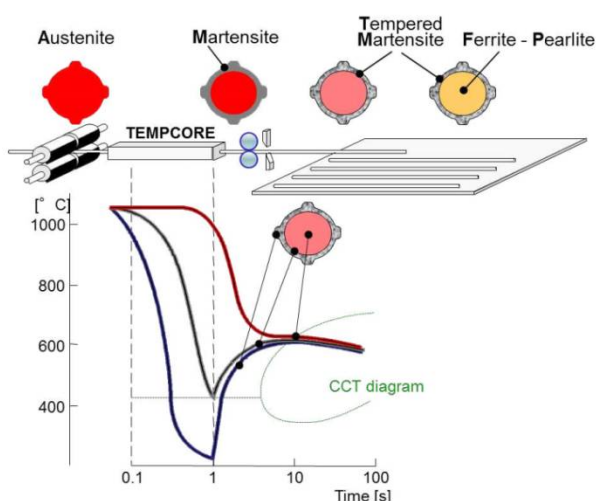


Fig. 1 Thremex operation and phase changes of rebar

شکل 1 شماتیک فرآیند ترمکس و تغییر فاز میلگرد در مراحل مختلف آن [12]

## 2-3- آزمون کشش

در این تحقیق فرآیند تولید میلگرد و انجام آزمایش‌های کشش در کارخانه فولاد ارک تبریز صورت گرفته است. آزمایش کشش توسط دستگاه یونیورسال گوتک<sup>1</sup> ساخت کشور تایوان با تناژ 50 تن، دقت  $0/1\mu\text{m}$  و سرعت ثابت  $0/1\text{mm/s}$  انجام گردید.

## 2-4- طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

به منظور طراحی آزمایش‌های لازم برای بررسی موضوع و انتخاب مقادیر پارامترها در هر آزمون از روش تاگوچی استفاده شده است. روش تاگوچی یک تکنیک شناخته شده است که یک روش سیستماتیک و مؤثر را برای طراحی بهینه آزمون‌ها فراهم می‌کند. این امر به خاطر مزایای روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها، شامل ساده‌سازی برنامه آزمایش و امکان‌سنجی مطالعه برهم کنش بین متغیرهای مختلف می‌باشد. تعداد

در تحقیق حاضر به بررسی و تعیین پارامترهای فرآیندی مؤثر بر خواص مکانیکی محصول در تولید میلگرد ترمکس با استفاده از تست‌های تجربی پرداخته می‌شود. به همین منظور، با در نظر گرفتن چهار فاکتور دبی آب، فشار ترمکس، سرعت نورد و همچنین دماهای مختلف کوره، تست‌های کشش استاندارد بر روی نمونه‌های مختلفی از میلگرد آجدار انجام شده است.

## 2-1- ماده اولیه

ترکیب شیمیایی ماده اولیه براساس دیتاشیت تولیدکننده و مطابق با استاندارد AISI در جدول 1 نشان داده شده است. قطر میلگردهای مورد استفاده در آزمایش‌ها در تمامی نمونه‌ها برابر 18 میلی‌متر بوده و طول نمونه‌ها یک متر می‌باشند. شمش مورد آزمایش، شمش سه متری با مقطع مربعی شکل به ابعاد  $125 \times 125$  میلی‌متر می‌باشد.

## 2-2- فرآیند ترمکس غیر یکپارچه

در تحقیق حاضر، به جای طراحی و ساخت دستگاه ترمکس یکپارچه از مجموعه‌های خنک‌کننده‌ای بنام کولر استفاده شده است. کولر شامل یک بدنه اصلی و یک نازل متحرک است. فلز از داخل بدنه عبور می‌کند، آب از زیر بدنه کولر وارد شده و از فاصله ایجاد شده بین دهانه فلنچ و نازل متحرک روی سطح فلز پاشیده می‌شود.

در شکل 1 تغییر فاز میلگرد در بخش‌های مختلف که تحت عملیات ترمکس قرار می‌گیرد نشان داده شده است. مطابق شکل عملیات حرارتی ترمکس پس از اتمام فرآیند نورد آغاز می‌شود و مرحله اول آن سریع سرد کردن نمونه‌ها در آب توسط مجموعه خنک‌کننده طراحی شده می‌باشد. در این مرحله سطح نمونه سخت شده و ریز ساختار آن شامل ترکیبی از فازهای آستنیت و مارتنزیت است و هسته آن شامل فاز آستنیت می‌باشد. در مرحله دوم نمونه در هوا سرد شده و در اثر شار حرارتی ایجاد شده از اختلاف دمای هسته و سطح خارجی، فاز مارتنزیت سطح برگشت می‌یابد. در مرحله سوم فاز آستنیت هسته در اثر سرد شدن آرام به فاز فریت-پرلیت تبدیل می‌شود. تکنولوژی ترمکس دارای مزایایی از قبیل کیفیت بالا، استحکام بالا در عین انعطاف پذیری و بهبود ایمنی، قابلیت تولید آسان و ساده اما با قیمت تمام شده بالا می‌باشد که با توجه به استحکام بالای آن و در اثر صرفه‌جویی در میزان مصرف فولاد هزینه تولید آن قابل توجیه می‌باشد به طوریکه در مجموع از ارزان‌ترین روش‌های تولید

<sup>1</sup> GOTECH

12، 14 و 16 بار اعمال شدند. سطوح پارامترهای مورد بررسی به طور خلاصه در جدول 2 نشان داده شده است.

با توجه به اینکه پارامترهای متغیر شامل 4 مورد و در سه سطح تعریف شده‌اند با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت<sup>1</sup> آرایه I<sub>n</sub> از جدول آرایه‌های متعامد انتخاب گردید و تحلیل آماری نتایج بر اساس این آرایه انجام شد. جدول 3 آزمایش‌های طراحی شده را نشان می‌دهد.

برای تحلیل نتایج به جای میانگین گرفتن از پاسخ‌ها از نسبت سیگنال به نویز<sup>2</sup> (S/N) استفاده می‌شود. این نسبت اختلاف بین نتایج تجربی و مقدار مطلوب را به کمک یک تابع ضرر مدلسازی می‌کند. نسبت (S/N) با استفاده از رابطه (1) محاسبه می‌گردد.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{Y_i} \right)^n \right) \quad (1)$$

که در آن S سیگنال به معنای اثر پارامترهای قابل کنترل، N نویز به معنای اثر فاکتورهای اغتشاشی، Y مقدار خروجی مورد نظر و n تعداد تکرار می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به محدودیت‌های موجود هر کدام از تست‌های کشش برای هر آزمایش به تعداد (n=2) بار تکرار شده است و میانگین آنها به عنوان مقدار پاسخ (Y) در جداول مربوطه آورده شده است.

جدول 2 محدوده پارامترهای مورد استفاده

Table 2 Range of the used parameters

سطوح	دما (°C)	سرعت نورد (m/min)	فشار ترمکس (bar)	دبی آب (m <sup>3</sup> /min)
1	1100	50	12	100
2	1175	70	14	120
3	1250	90	16	140

جدول 3 مشخصات آزمایش‌ها

Table 3 Test conditions

شماره آزمایش	دبی آب (m <sup>3</sup> /min)	فشار ترمکس (bar)	سرعت نورد (m/min)	دما (°C)
1	100	12	50	1100
2	120	14	70	1100
3	140	16	90	1100
4	140	14	50	1175
5	100	16	70	1175
6	120	12	90	1175
7	120	16	50	1250
8	140	12	70	1250
9	100	14	90	1250

آزمایش‌های کمتر به معنی کاهش زمان و هزینه می‌باشد. روش تاگوچی برای آزمایش‌ها، یک آرایه متعامد از متغیرها و سطوح آنها را ارائه می‌دهد. مطابق روش تاگوچی حداقل تعداد آزمایش‌های لازم انجام می‌شود.

در تحقیق حاضر ابتدا مقادیر پارامترها با توجه به محدودیت‌های موجود انتخاب شدند. در فرایند تولید میلگردهای ترمکس پارامترهای مختلفی می‌توانند بر روی خواص مکانیکی محصول نهایی تأثیرگذار باشند. در تحقیقات صورت گرفته این پارامترها در سه بخش پارامترهای عملیات حرارتی، پارامترهای فیزیکی دستگاه‌های طراحی شده و پارامترهای عملیات مکانیکی قابل تقسیم‌بندی هستند. مطابق آنچه در بخش پیشینه پژوهش ذکر شده است هر تحقیقی از یک منظر تقسیم بندی فوق به مساله نگاه کرده است. در این تحقیق پارامترهایی متشکل از عملیات حرارتی - مکانیکی انتخاب شده‌اند که کمتر مورد توجه قرار داشتند. لازم به ذکر است که پارامترهای دیگری همچون قطر میلگرد و دمای آن، دمای آب و دیگر پارامترهای مرتبط می‌توانند در خواص مکانیکی تأثیرگذار باشند که در تحقیقات گذشته به آنها پرداخته شده است. بر این اساس دمای کوره نورد در سه حالت 1100، 1175 و 1250 درجه سانتیگراد که با استفاده از سیستم اتوماتیک کنترل می‌شود، انتخاب گردید. نمونه های میلگرد پس از خروج از فرایند نورد از طریق ریل هایی که با سرعت ثابت حرکت می کنند وارد دستگاه ترمکس می شوند. بنابراین تغییرات دمایی مقدار ثابت و مشخصی دارند. با انجام تست هایی توسط دماسنج لیزری این تغییرات دمایی در فرایند کار لحاظ شده است. در واقع دماهای مورد نظر دمای ورود به دستگاه ترمکس هستند و در منطقه آستنیته کردن قرار دارند. سرعت نورد در خط تولید از حاصل ضرب شعاع غلطک در سرعت دورانی غلطکها محاسبه می گردد. سرعت نورد با استفاده از کنترل سرعت موتورها انجام شده و مقادیر 50، 70 و 90 متر بر دقیقه اعمال می‌شود. هر چقدر سرعت نورد کمتر باشد، زمان نورد افزایش یافته و دمای شمش در حال نورد کاهش می‌یابد که این کار بر روی استحکام نهایی میلگرد تأثیر می‌گذارد. در فرایند ترمکس آب با فشار و دبی کنترل شده بر روی میلگرد پاشیده می‌شود که این عمل باعث پایین آمدن آبی دمای میلگرد می‌شود. کنترل دبی آب با کنترل سرعت پمپ آب صورت می‌گیرد بدین صورت که با کم و زیاد کردن سرعت موتور بوسیله اینورتر، دبی پمپ افزایش و یا کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه مقدار آب ورودی به ترمکس تغییر می‌کند. مقادیر دبی آب 100، 120 و 140 مترمکعب بر دقیقه و مقادیر فشار ترمکس

<sup>1</sup> Design Expert

<sup>2</sup> Signal to noise ratio

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- استحکام تسلیم

جدول 4 نتایج استحکام تسلیم و نسبت S/N به دست آمده برای هر آزمایش را نشان می‌دهد. در جدول 5 آنالیز واریانس<sup>1</sup> داده‌ها و مدل استحکام تسلیم نشان داده شده است.

جدول 4 نتایج استحکام تسلیم و نسبت S/N به دست آمده

Table 4 The results of yield strength and S/N ratio

شماره آزمایش	استحکام تسلیم (MPa)	S/N	میانگین
1	425	52/5678	
2	509	54/1344	
3	548	54/7756	
4	473	53/4972	
5	492	53/8393	۴۸۷/۴۴
6	515	54/2361	
7	448	53/0256	
8	465	53/3491	
9	512	54/1854	

تسلیم نمونه بیشتر شده به طوری که در کمترین دما و بیشترین فشار ترمکس مقدار بیشینه ای برای استحکام تسلیم حاصل می‌شود. در شکل 2- ج مشاهده می‌گردد که بهترین حالت برای رسیدن به استحکام تسلیم بالا در حالت انتخاب کمترین دما و بیشترین دبی آب حاصل می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کمترین دمای کاری همراه با بیشترین مقدار فشار ترمکس و دبی آب و سرعت نورد 70 (m/min) باعث بهبود استحکام تسلیم نمونه می‌گردد.

به منظور بررسی تأثیر سرعت نورد و فشار ترمکس بر روی خواص مکانیکی میلگرد، نمودار سه بعدی تأثیر همزمان سرعت نورد و فشار ترمکس در شکل 3- الف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که سرعت نورد و فشار ترمکس اثر هم‌افزایی داشته و با افزایش هر کدام از آنها استحکام افزایش می‌یابد به طوری که این پارامترها هم به صورت منفرد و هم به صورت دوتایی باعث تأثیر در استحکام تسلیم می‌شوند. شکل 3- ب نمودار سه‌بعدی اثر همزمان دبی آب و سرعت نورد را نشان می‌دهد. این دو پارامتر نیز، مانند فشار ترمکس و سرعت نورد اثر هم‌افزایی داشته و با افزایش هر کدام از آنها میزان استحکام بیشتر می‌شود. این پارامترها هم به صورت منفرد و هم به صورت دوتایی باعث افزایش استحکام می‌شوند. شکل 3- ج نیز اثر همزمان فشار ترمکس و دبی آب را نشان می‌دهد که همانند پارامترهای قبلی در حضور هم اثر هم‌افزایی داشته و هر دو باعث افزایش استحکام تسلیم نمونه‌ها می‌شوند.

شکل 2 نمودارهای سه بعدی برهمکنش دمای نورد با سایر پارامترها را بر روی استحکام تسلیم نشان می‌دهد. شکل 2- الف نشان می‌دهد که همزمان با کاهش دما استحکام تسلیم افزایش می‌یابد و افزایش سرعت نورد تا مقدار 70 (m/min) باعث افزایش استحکام شده اما در مقادیر بیشتر از آن تأثیر چندانی بر روی استحکام حاصل نمی‌شود. شکل 2- ب نشان می‌دهد که همزمان با تأثیر دما با افزایش فشار ترمکس استحکام

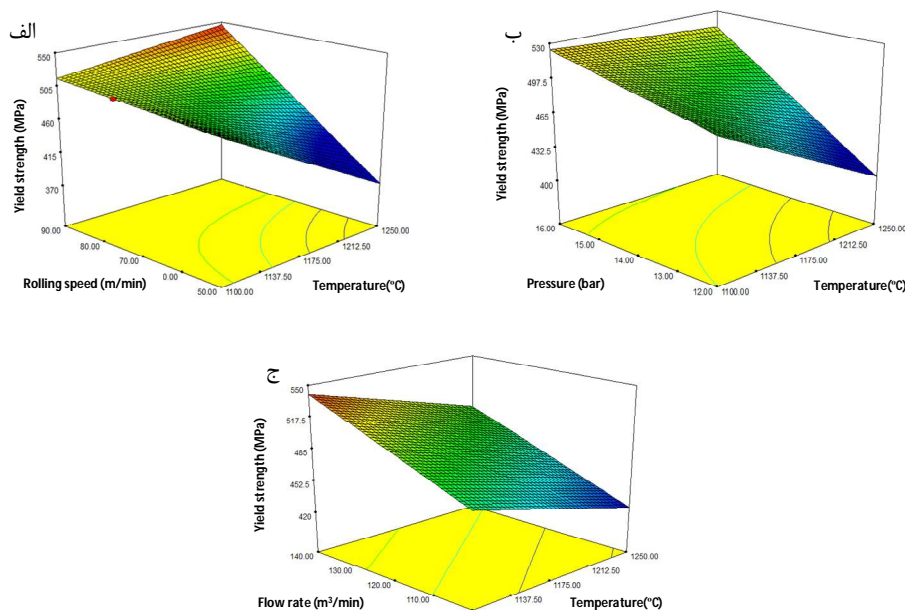


Fig. 2 Simultaneous effect of (a) temperature-rolling speed (b) temperature-Thermex pressure and (c) temperature- flow rate on yield strength

شکل 2 نمودارهای تأثیر همزمان الف- دما و سرعت نورد ب- دما و فشار ترمکس و ج- دما و دبی آب بر روی استحکام تسلیم

<sup>1</sup> Analysis of Variance (ANOVA)

جدول 5 آنالیز واریانس داده‌ها برای استحکام تسلیم

Table 5 Analysis of variance for yield strength

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	پارامتر F	پارامتر P
مدل	11675/55	7	1667/93	249/89	0/0487
A	1020/21	1	1020/21	152/85	0/0514
B	2302/88	1	2302/88	345/02	0/0342
C	1410/56	1	1410/56	211/33	0/0437
D	473/36	1	473/36	70/92	0/0752
AB	535/05	1	535/05	80/16	0/0708
AC	3/05	1	3/05	0/46	0/6217
AD	0	0			
BC	486/88	1	486/88	72/94	
BD	0	0			0/0742
CD	0	0			
Residual	6/67	1	6/62		
Core Total	11682/22	8			

Std. Dev.	2.58	R-Squared	0.9994
Mean	487.44	Adj R-Squared	0.9954
C.V. %	0.53	Pred R-Squared	0.7874
PRESS	1.48	Adeq Precision	50.497

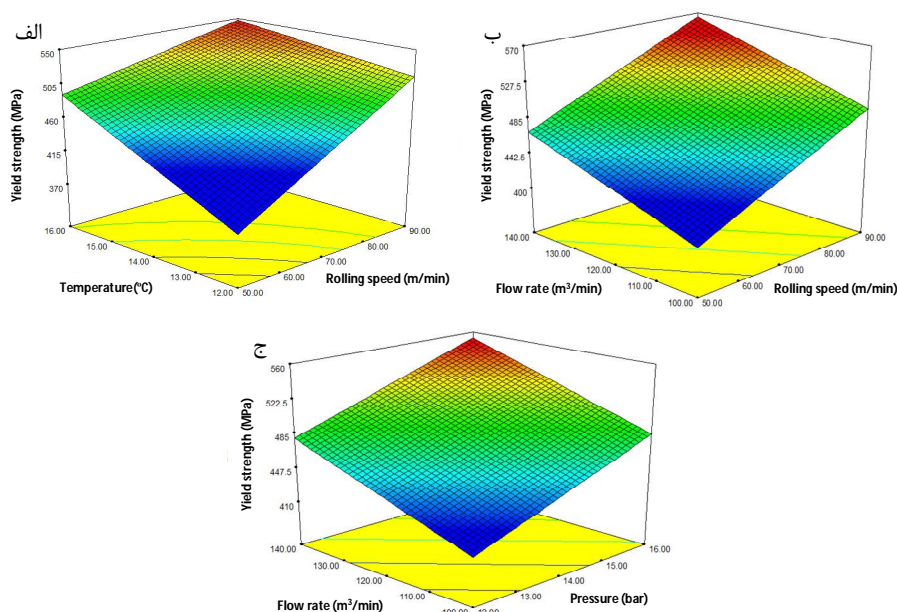


Fig. 3 Simultaneous effect of (a) rolling speed- thermex pressure (b) rolling speed- flow rate and (c) Thermex pressure- flow rate on yield strength

شکل 3 نمودار سه بعدی تأثیر همزمان الف- سرعت نورد و فشار ترمکس ب- سرعت نورد و دبی آب و ج- فشار ترمکس و دبی آب بر روی استحکام تسلیم

### 3-2- استحکام نهایی

جدول 6 نتایج به دست آمده برای استحکام نهایی و نسبت سیگنال به نویز داده‌ها را نشان می‌دهد. جدول 7 آنالیز و تحلیل نتایج آزمایش در جدول واریانس داده‌ها را ارائه می‌کند. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود میزان  $R^2$  نزدیک یک می‌باشد که نشان دهنده صحت مدل‌ها و نتایج است.

بر اساس جداول (4) و (5) با تحلیل رگرسیون چندگانه یک مدل درجه یک ارائه شد. معادله مدل برای تخمین میزان استحکام تسلیم ( $R_1$ ) تابعی از A (دما)، B (سرعت نورد)، C (فشار ترمکس) و D (دبی آب) به صورت معادله (2) به دست آمد:

$$R_1 = +487.44 - 19.71 \times A + 37.02 \times B + 28.98 \times C + 23.50 \times D + 30.29 \times A \times B - 2.29 \times A \times C - 20.43 \times B \times C \quad (2)$$

شکل 4- الف نمودار سه بعدی پاسخ دما و سرعت نورد را بر روی استحکام نهایی نشان می‌دهد. با کاهش دما و افزایش سرعت نورد میزان استحکام افزایش می‌یابد پس این دو پارامتر تأثیر مثبت و هم راستایی دارند. شکل 4- ب نمودار سه بعدی پاسخ سطح دما و فشار ترمکس را بر روی استحکام نشان می‌دهد. ساختار کلی این نمودار مانند نمودار قبلی می‌باشد با این تفاوت که در نمودار قبلی یک انحناء در محور مربوط به سرعت نورد دیده می‌شود، به این صورت که در مقدار سرعت نورد 90 متر بر دقیقه استحکام افت کرده است. شکل 4- ج نمودار سه بعدی پاسخ سطح دما و دبی آب را بر روی استحکام نهایی نشان می‌دهد. در این نمودار با کاهش دما و افزایش دبی آب میزان استحکام افزایش یافته و این پارامترها اثر هم‌افزایی دارند. شکل 4- د نمودار سه بعدی تأثیر فشار ترمکس و سرعت نورد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است کمینه استحکام زمانی اتفاق می‌افتد که این دو پارامتر در کمترین مقدار هستند و با افزایش هر دو میزان استحکام افزایش یافته و بر روی هم اثر هم‌افزایی دارند. بررسی نمودارهای سایر پارامترها در شکل‌های 4-ه و و نشان می‌دهد که همه آنها تأثیر مثبت و هم افزایی داشته و استحکام نهایی را افزایش می‌دهند. بر اساس نتایج آزمایش‌ها و آنالیز داده‌های نشان داده شده در

جداول 6 و 7 با تحلیل رگرسیون چندگانه یک مدل درجه یک برای تخمین میزان استحکام نهایی ( $R_2$ ) تابعی از A (دما)، B (سرعت نورد)، C (فشار ترمکس) و D (دبی آب) به صورت معادله (3) به دست آمد:

$$R_2 = +668.33 - 40.95 \times A + 23.81 \times B + 40.86 \times C + 16.33 \times D + 49.71 \times A \times B - 34.71 \times A \times C - 64.57 \times B \times C \quad (3)$$

جدول 6 نتایج استحکام نهایی و نسبت S/N بدست آمده

Table 6 The results of ultimate strength and S/N ratio

میانگین	S/N	استحکام نهایی (MPa)	شماره آزمایش
	52/5678	580	1
	54/1344	699	2
	54/7756	712	3
	53/4972	666	4
668/33	53/8393	698	5
	54/2361	721	6
	53/0256	622	7
	53/3491	635	8
	54/1854	682	9

جدول 7 آنالیز واریانس داده‌ها برای استحکام نهایی

Table 7 Analysis of variance for ultimate strength

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	پارامتر F	پارامتر P
مدل	17471/60	7	2495/94	8/84	0/2536
A	4491/62	1	4491/62	15/90	0/1564
B	1230/42	1	1230/42	4/36	0/2844
C	3423/50	1	3423/50	12/12	0/1781
D	328/55	1	328/55	1/16	0/4759
AB	1840/43	1	1840/43	6/52	0/2377
AC	144/95	1	144/95	/51	0/6042
AD	0/000	0			
BC	4019/78	1	4019/78	14/23	0/161
BD	0/000	0			
CD	0/000	0			
Residual	282/40	1	282/40		
Core Total	17754/00	8			
Std. Dev.16.80			R-Squared		0.9841
Mean668.33			Adj R-Squared		0.8727
C.V. %2.51			Pred R-Squared		-6.2173
PRESS1.281E+005			Adeq Precision		8.518

3-3- شکل‌پذیری

شکل 5 تأثیر همزمان پارامترهای دوگانه را بر روی شکل‌پذیری نمونه‌های میلگرد در نقطه میانی سایر پارامترها را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل‌ها مشخص است در اکثر موارد روند طی شده برای افزایش شکل‌پذیری همانند استحکام است. به طوری که پارامترها اثر فزاینده نسبت به هم دارند و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهند.

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای انتخاب شده بر روی شکل‌پذیری نمونه میلگرد نتایج به دست آمده از آزمون کشش آنالیز آماری شد. جدول 8 نتایج آنالیز واریانس داده‌های آزمون را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج مشخص است میزان  $R^2$  نزدیک یک است که صحت نتایج و خطای کم و عدم پراکندگی داده‌ها و نتایج را نشان می‌دهد.

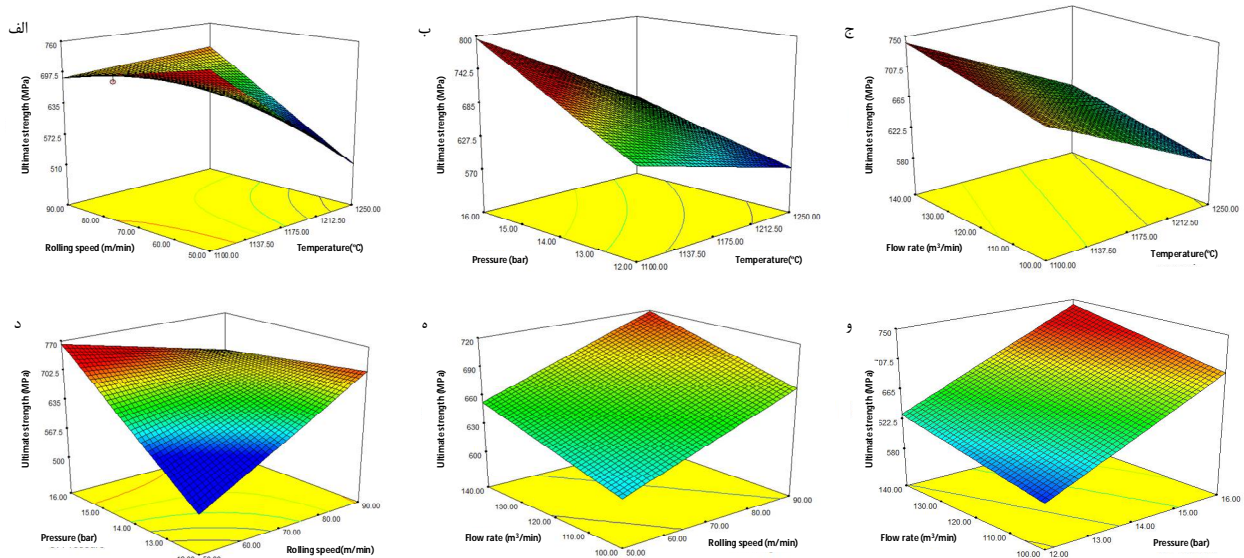


Fig. 4 Simultaneous effect of (a) temperature-rolling speed (b) temperature- Thermex pressure (c) temperature- flow rate (d) rolling speed- Thermex pressure (e) rolling speed- flow rate and (f) Thermex pressure- flow rate on the ultimate strength

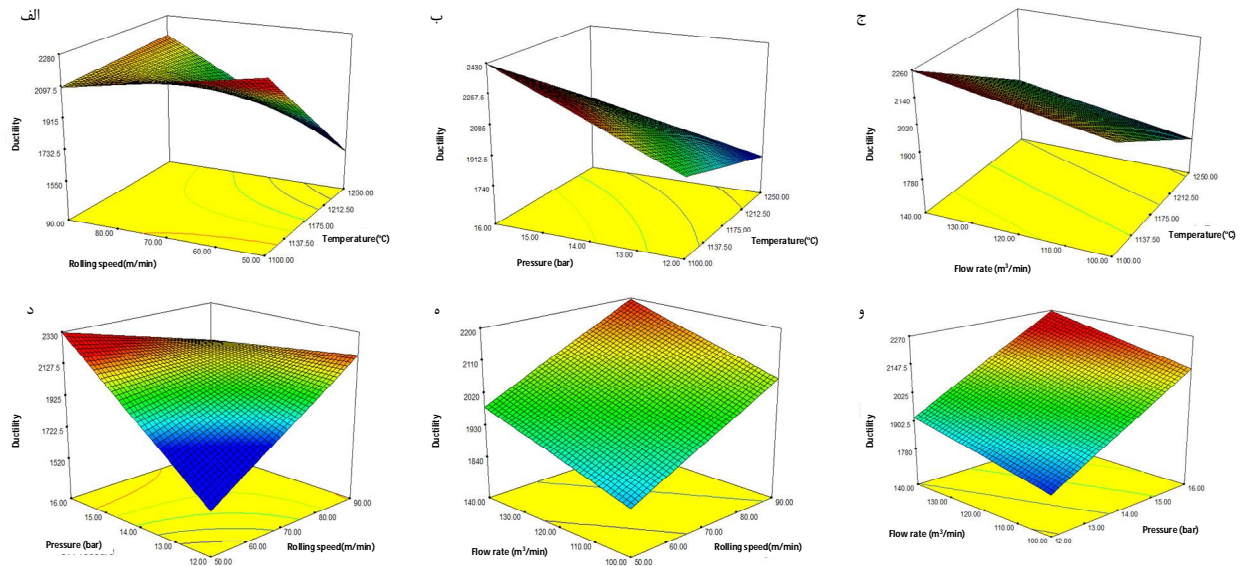
شکل 4 مودار سه بعدی اثر همزمان الف- دما و سرعت نورد ب- دما و فشار ترمکس ج- دما و دبی آب د- سرعت نورد و دبی آب و- فشار ترمکس و دبی آب بر روی استحکام نهایی

جدول 8 آنالیز واریانس داده‌ها و مدل نتایج شکل‌پذیری

Table 8 Analysis of variance for ductility

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	پارامتر F	پارامتر P
مدل	1/638E + 005	7	23397/43	8/47	0/2588
A	41797.01	1	41797/01	15/13	0/1602
B	11610.17	1	11610/17	4/20	0/2889
C	31886.40	1	31886/40	11/54	0/1822
D	3100.97	1	3100/97	1/12	0/4816
AB	17004.74	1	17004/74	6/15	0/2439
AC	1334.22	1	1334/22	0/48	0/6134
AD	0/000	0			
BC	37093/18	1	37093/18	13/43	0/1696
BD	0/000	0			
CD	0/000	0			
Residual	2762/88	1	2762/88		
Core Total	1/665E + 005	8			
Std. Dev.	52.56		R-Squared		0.9834
Mean	2039.11		Adj R-Squared		0.8673
C. V. %	2.58		Pred R-Squared		-6.5271
PRESS	1.254E+006		Adeq Precision		8.315





**Fig. 5** Simultaneous effect of (a) temperature-rolling speed (b) temperature-Thermex pressure (c) temperature- flow rate (d) rolling speed- Thermex pressure (e) rolling speed- flow rate and (f) Thermex pressure- flow rate on ductility

شکل 5 نمودار سه بعدی اثر همزمان الف- دما و سرعت نورد ب- دما و فشار ترمکس ج- دما و دبی آب د- سرعت نورد و دبی آب و- فشار ترمکس و دبی آب بر روی شکل پذیری

افزایش این سرعت تأثیر آن منفی خواهد شد. لذا سرعت نورد نباید بیش از مقدار مناسب به دست آمده افزایش یابد.

**جدول 9** شرایط مناسب تعیین شده

**Table 9** Appropriate conditions of parameters

دبی آب (m <sup>3</sup> /min)	فشار ترمکس (bar)	سرعت نورد (m/min)	دما (°C)
۱۴۰	۱۴	۷۰	۱۱۰۰

**جدول 10** مقایسه نتایج به دست آمده با آزمایش عملی

**Table 10** Comparison of obtained results with practical test

نتایج عملی	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	شکل پذیری (%)
نتایج عملی	490	680	20
نتایج تعیین شده	520	718	21.6
(%) خطا	6.1	5.5	8

شکل 7 تأثیر همزمان فشار ترمکس و دبی آب را در کمترین مقدار دما و سرعت نورد و نیز بیشترین مقدار دما و سرعت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با تغییر دما و سرعت نورد روند تأثیر پارامترها تغییر می‌کند، به طوری که در کمترین مقدار دما و سرعت نورد (شکل 7- الف) تأثیر فشار ترمکس و دبی آب به طور همراستا بوده و به طور همزمان باعث افزایش استحکام شده و آنرا بهبود می‌دهند. در حالی که در بیشترین مقدار دما و سرعت نورد (شکل 7- ب) میزان و نحوه تأثیر پارامترهای فشار ترمکس و دبی آب بر استحکام متفاوت هستند. در دما و سرعت نورد بالا تأثیر دبی آب بیشتر از فشار ترمکس بوده و پارامتر مؤثرتری است.

مدل تخمین میزان شکل پذیری (R<sub>3</sub>) تابعی از A (دما)، B (سرعت نورد)، C (فشار ترمکس) و D (دبی آب) به صورت معادله (4) به دست آمد:

$$R_3 = +2039 - 125.14 \times A + 73.24 \times B + 124.76 \times C + 50.00 \times D + 150.86 \times A \times B - 105.86 \times A \times C - 196.29 \times B \times C \quad (4)$$

#### 4-3- انتخاب شرایط مناسب

با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها شرایط مناسب فرایند تعیین گردیدند. منظور از شرایط مناسب پارامترهایی هستند که منجر به استحکام بالا همراه با شکل‌پذیری مطلوب می‌شوند. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته شرایط مناسب به صورت جدول 9 می‌باشد.

به منظور صحت‌گذاری بر نتایج به دست آمده در جدول 9 آزمایشی بر اساس پارامترهای مناسب تعیین شده صورت گرفت که مقایسه نتایج به دست آمده در جدول 10 نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌گردد روش ارائه شده می‌تواند با درصدی از خطا در حدود 6/5% پیش بینی مناسبی داشته باشد. برای بررسی اثر هر یک از پارامترها در شرایط تعیین شده نمودار تأثیر همزمان پارامترها رسم گردید. در شکل 6 نمودار بررسی تأثیر دما و فشار ترمکس در سرعت نورد 50 و 90 متر بر دقیقه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است سرعت نورد تأثیر مثبتی بر روی خواص میلگرد دارد ولی با

#### 4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی و تعیین پارامترهای فرآیندی مؤثر بر خواص مکانیکی محصول در تولید میلگرد ترمکس با استفاده از تست‌های تجربی پرداخته شد. به همین منظور، با در نظر گرفتن چهار فاکتور دبی آب، فشار ترمکس، سرعت نورد و همچنین دماهای مختلف کوره، تست‌های کشش استاندارد بر روی نمونه‌های مختلفی از میلگرد آجدار انجام پذیرفت. خلاصه‌ای از نتایج تحقیق حاضر به صورت زیر می‌باشد:

- دما در کمترین مقدار بیشترین تأثیر را بر روی استحکام دارد. هرچه دما حین نورد بالاتر باشد استحکام تسلیم و استحکام نهایی کاهش می‌یابند؛ چقرمگی و ازدیاد طول افزایش می‌یابند.

- دبی آب بر روی تنش تسلیم و استحکام میلگرد اثرگذار است، با افزایش دبی آب تنش تسلیم میلگرد افزایش می‌یابد.

- افزایش سرعت نورد و فشار ترمکس اثر هم‌افزایی داشته و با افزایش هر کدام از آنها میزان استحکام تسلیم بیشتر می‌شود به طوری که این پارامترها هم به صورت منفرد و هم به صورت دوتایی باعث افزایش استحکام تسلیم می‌شوند. کمینه استحکام زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار دو پارامتر فشار ترمکس و سرعت نورد در کمترین مقدار هستند و با افزایش هر دو پارامتر میزان استحکام افزایش می‌یابد.

- افزایش سرعت نورد تا حدی تأثیر مثبتی بر روی خواص میلگرد می‌گذارد اما با افزایش بیشتر از آن تأثیر منفی بر روی خواص مکانیکی خواهد گذاشت لذا سرعت نورد نیازی به افزایش بیش از اندازه ندارد.

- با افزایش دبی آب شکل‌پذیری نمونه افزایش می‌یابد.

- بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته ترکیب مناسبی از پارامترها در دمای  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، سرعت نورد  $70\text{ (m/min)}$ ، فشار ترمکس  $14\text{ (bar)}$  و دبی آب  $140\text{ (m}^3\text{/min)}$  به دست آمد. به منظور صحت‌گذاری بر نتایج به دست آمده آزمایش‌های عملی در نقاط به دست آمده صورت گرفت که با خطای قابل قبولی در حدود  $7\%$  نتایج حاصل مورد تایید قرار گرفت.

#### 5- مراجع

- [1] G. M.Chen, Y. H. He, H. Yang, J. Chen, Y. Guo, Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, Vol. 71, pp. 1-15, 2014.
- [2] P. M. Singh, J. J. Lewandowski, Effects of heat treatment and reinforcement size, *Metallurgical*

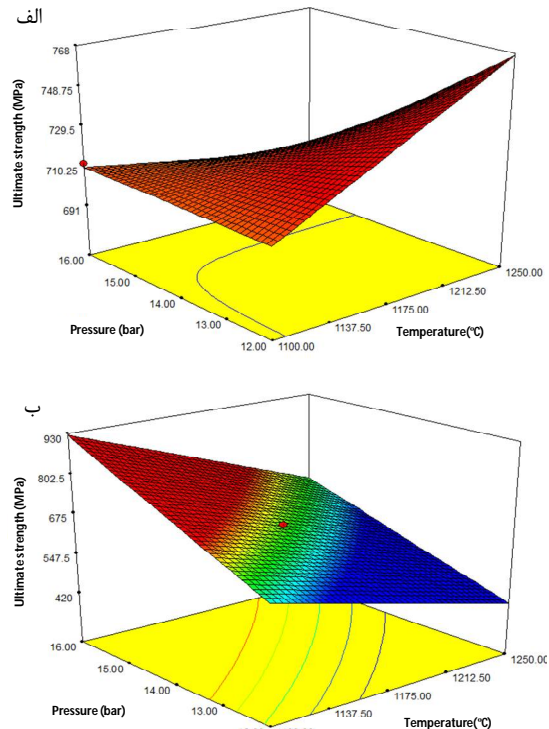


Fig. 6 Three-dimensional diagram of the simultaneous effect of temperature and Thermex pressure on ultimate strength at rolling speed of (a) 90 and (b) 50 (m/min)

شکل 6 نمودار سه بعدی اثر همزمان دما و فشار ترمکس بر روی استحکام در سرعت نورد الف-90 و ب-50 متر بر دقیقه

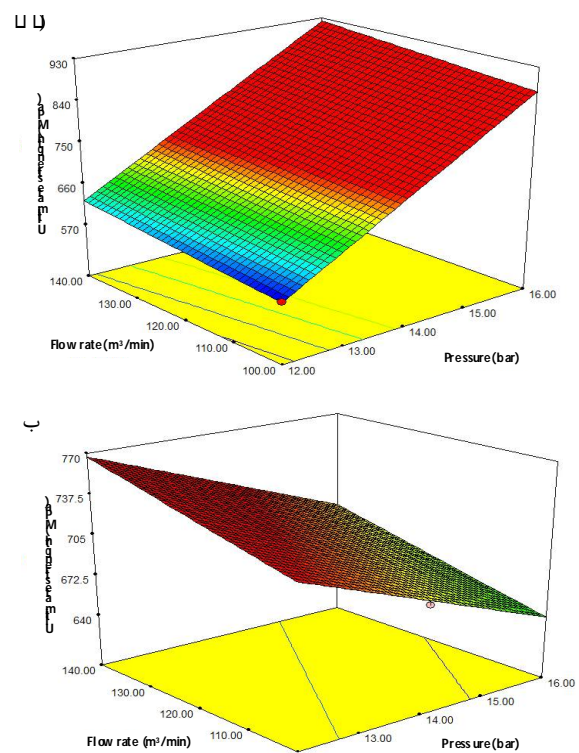


Fig. 7 Three-dimensional diagram of the simultaneous effect of flow rate and Thermex pressure on the ultimate strength (a) temperature  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  and rolling speed  $50\text{ (m/min)}$  and (b) temperature  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$  and rolling speed  $90\text{ (m/min)}$

شکل 7 نمودار سه بعدی اثر همزمان دبی آب و فشار ترمکس بر روی استحکام نهایی الف- دمای  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  و سرعت نورد  $50\text{ (m/min)}$  و ب- دمای  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$  و سرعت نورد  $90\text{ (m/min)}$

- Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Dual-Phase Steel Reinforcing Rebars, *Metals and Materials International*, pp. 1-10, 2020.
- [9] J. Santos, A. A. Henriques, Strength and ductility of damaged tempcore rebars, *Procedia Engineering*, Vol. 114, pp. 800-807, 2015.
- [10] E. Cadoni, M. Dotta, D. Forni, Tensile behaviour of reinforcing steels at high strain rate and high temperature. *Key Engineering Materials*, Vol. 711, pp. 791-798, 2016.
- [11] C. S. Park, S. W. Bae, J. R. Cho, H. Lee, Y. Kim, Y. H. Moon, Corrugated cooling unit for accelerated cooling of rebar subjected to Tempcore process, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 167, pp.114699, 2020.
- [12] E. Cadoni, M. Dotta, D. Forni, N. Tesio, C Albertini, Mechanical behaviour of quenched and self-tempered reinforcing steel in tension under high strain rate, *Materials & Design*, Vol. 49, pp. 657-666, 2013.
- [13] H. Khalifa, G. Megahed, R. M. Hamouda, M. A. Taha, Experimental investigation and simulation of structure and tensile properties of Tempcore treated rebar, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 230, pp. 244-253, 2016.
- Transactions A*, Vol. 24, No. 11, pp. 2531-2543, 1993.
- [3] W. D. Callister, D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*, Vol. 7, New York: John wiley & sons, 2007.
- [4] W. F. Smith, J. Hashemi, S. H. Wang, *Foundations of materials science and engineering*, Vol. 397, New York: McGraw-hill, 2006.
- [5] M. Rocha, E. Brühwiler, A. Nussbaumer, Geometrical and material characterization of quenched and self-tempered steel reinforcement bars, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp. 04016012, 2016.
- [6] A. Ghosh and M. Ghosh, Tensile and impact behaviour of thermo mechanically treated and micro-alloyed medium carbon steel bar, *Construction and Building Materials*, Vol. 192, pp. 657-670, 2018.
- [7] N. Keshavarz and M. Aghaei pour, Investigation of the effect of temperature on mechanical properties of tempcore rebar, *Proceedings of The First National Conference of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Sharkurd, Iran, August 11, 2016. (in persian)
- [8] M. R. Akbarpour, A. Mashhuriazar, M. Daryani, Experimental and Numerical Investigation on the Effect of the Tempcore Process Parameters on