



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Evaluation and Comparison of the Effect of Adding Pulverized and Unpulverized Rice Husk into Water-Based Drilling Mud on Rheological Properties Along with Presentation of an Artificial Neural Network Model

Keivan Bakhtiyari Manesh^a, Mojtaba Rahimi^{a,b}, Ali Mokhtarian^{c,*}

^a Department of Petroleum Engineering, Kho.C., Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

^b Department of Mechanical Engineering, Kho.C., Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

^c Stone Research Center, Kho.C., Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-01-20

Revised: 2025-05-19

Accepted: 2025-06-15

Keywords:

Pulverized rice husk;
Unpulverized rice husk;
Rheological properties;
Shear rate;
Two-layered feedforward artificial neural network.

ABSTRACT

The rheological properties of drilling fluids are essential parameters in optimizing drilling operations and reducing the total cost of drilling. In this research, in the first stage, the effect of adding herbal polymers of pulverized and unpulverized rice husk on the amount of shear stress of water-based drilling mud (a mixture of water and bentonite) at different shear rates has been investigated and compared. After determining the plastic viscosity (PV) and yield point (YP) of the samples based on the Bingham model, no uniform trend was observed in the changes in the rheological properties of the drilling mud with the increase in the mass of each additive to the base fluid. In the next step of the research, a model based on a two-layer feedforward artificial neural network is designed to predict the shear stress of the studied drilling muds for the input of the arbitrary mass of the additive polymer and arbitrary shear rate of the mud sample, and the network was trained for each set of data corresponding to each of the additives, which resulted in accurate and favorable estimation results. The percentage of average and maximum error obtained for the output values corresponding to the network test data is smaller compared to the results of applying the widely used Herschel-Bulkley model. Moreover, we found through sensitivity analysis that the importance and degree of influence of the shear rate on changes in shear stress are higher compared to the additive mass.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.36647.2795>

© 2026 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: mokhtarian@iaau.ac.ir

How to cite this article:

K. Bakhtiyari Manesh, M. Rahimi and A. Mokhtarian, "Evaluation and Comparison of the Effect of Adding Pulverized and Unpulverized Rice Husk into Water-Based Drilling Mud on Rheological Properties Along with Presentation of An Artificial Neural Network Model," Journal of Modeling in Engineering, 24 84 (2026): 169-184, doi: 10.22075/jme.2025.36647.2795

ارزیابی و مقایسه تأثیر افزودن پوسته برنج پودر شده و پودر نشده به گل حفاری پایه آبی بر خواص رئولوژیکی گل به همراه یک مدل شبکه عصبی مصنوعی

کیوان بختیاری منش^۱، مجتبی رحیمی^۲، علی مختاریان^{۳*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱	خواص رئولوژیکی سیالات حفاری، پارامترهایی اساسی در بهینه‌سازی عملیات حفاری و کاهش هزینه کل حفاری هستند. در این تحقیق، در مرحله اول به بررسی و مقایسه تأثیر افزودن هر یک از پلیمرهای گیاهی پوسته برنج پودر شده و پوسته برنج پودر نشده بر میزان تنش برشی گل حفاری پایه آبی (مخلوط آب و بنتونایت) در نرخ‌های برش متفاوت پرداخته شده است. پس از تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه تسلیم نمونه‌ها بر مبنای مدل بینگهام، روند یکنواختی در تغییرات خواص رئولوژیکی گل حفاری با افزایش جرم هر یک از افزودنی‌ها به سیال پایه مشاهده نشد. در گام بعدی تحقیق، یک مدل مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی پیشخور دو لایه جهت پیش‌بینی تنش برشی گل‌های حفاری مورد مطالعه برای ورودی‌های مقدار دلخواه جرم پلیمر افزودنی و نرخ برش دلخواه نمونه گل طراحی شد و برای هر دسته از داده‌های متناظر با هر یک از افزودنی‌ها تحت آموزش قرار گرفت که نتایج گویای تخمینی دقیق و مطلوب هستند. بطوریکه میزان درصد خطای نسبی میانگین و بیشینه بدست آمده برای مقادیر خروجی متناظر با داده‌های آزمون شبکه‌ها در مقایسه با نتایج اعمال مدل پرکاربرد هرشل- بالکلی کمتر می‌باشد. همچنین در پی انجام آنالیز حساسیت شبکه‌ها، اهمیت و درجه تأثیر بالاتر نرخ برش بر تغییرات تنش برشی سیال در مقایسه با جرم افزودنی مشاهده شد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵	
واژگان کلیدی:	
پوسته برنج پودر شده، پوسته برنج پودر نشده، خواص رئولوژیکی، نرخ برش، شبکه عصبی مصنوعی پیشخور دو لایه.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.36647.2795>

© 2026 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه
سازند و جلوگیری از ورود سیال مخزن به داخل چاه در هنگام حفاری است [۲]. علاوه بر این، سیال حفاری باید مته و رشته حفاری را روغن‌کاری و خنک کند [۳-۴]. سیال حفاری باید به گونه‌ای طراحی شود که با ساختن یک لایه غیرقابل نفوذ بر روی دیواره چاه مانع از آسیب سازند شود و در عین حال این لایه را باید بتوان به راحتی قبل از لوله‌گذاری و سیمان‌کاری از دیواره چاه جدا کرد. سیال حفاری باید خواص رئولوژیکی پایدار را به منظور ایجاد یک

گل حفاری یک سیال چسبناک و سنگین است که در عملیات حفاری مخازن حاوی هیدروکربن‌ها استفاده می‌شود. سیالات حفاری در اشکال متعددی از جمله گل‌های مبتنی بر نفت، گل‌های مبتنی بر آب، و گل‌های مبتنی بر مواد مصنوعی وجود دارند. در این میان، گل‌های مبتنی بر نفت و گل‌های مبتنی بر آب بیشترین استفاده را در صنعت نفت دارند [۱]. وظیفه اصلی سیال حفاری پشتیبانی از فشار

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mokhtarian@iau.ac.ir

۱- گروه مهندسی نفت، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران

۲- مرکز تحقیقات سنگ، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران

۳- گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران

استناد به این مقاله:

کیوان بختیاری منش، مجتبی رحیمی و علی مختاریان، "ارزیابی و مقایسه تأثیر افزودن پوسته برنج پودر شده و پودر نشده به گل حفاری پایه آبی بر خواص رئولوژیکی گل به همراه یک مدل شبکه عصبی مصنوعی،" مدل سازی در مهندسی، ۲۴ (۱۴۰۵): ۱۶۹-۱۸۴، doi: 10.22075/jme.2025.36647.2795

چاه پایدار و تمیز فراهم کند [۴-۶].

رئولوژی سیال حفاری دانشی است که تغییر شکل و جریان ماده را مطالعه می‌کند. خواص رئولوژیکی از جمله ویسکوزیته پلاستیک، نقطه تسلیم و ویسکوزیته ظاهری بر عملکرد گل حفاری و میزان بازدهی عملیات حفاری تأثیر می‌گذارند [۷-۱۰]. در همین خصوص، استفاده از افزودنی‌ها در گل حفاری که آسیبی به سازند وارد نکنند و همچنین هزینه‌ای مناسب داشته باشند حائز اهمیت است [۱۱]. چگونگی عملکرد پوستره برنج در راستای بهبود خواص رئولوژیکی و در نتیجه تأثیر آن بر عملکرد مطلوب گل حفاری در تعداد بسیار معدودی از پژوهش‌های قبلی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مثال، Raipuria و همکاران [۱۲] به توصیف تهیه نانوذرات سیلیس ترکیب شده با پوستره برنج و استفاده از آنها به عنوان سیال حفاری پرداختند، و این نانوذرات به عنوان افزودنی بالقوه به سیال حفاری برای چاه‌های فشار بالا-دما بالا آزموده شدند. بهبود چشمگیر در خواص رئولوژیکی سیال حفاری هنگام استفاده از نانوذرات سیلیس ترکیب شده با پوستره برنج، در غلظت‌های پایین مشاهده شد. همچنین اثر دما بر خصوصیات رئولوژیکی سیالات حفاری با حضور نانوذرات ذکر شده به عنوان مواد افزودنی بررسی شد. مشاهده شد که حضور این مواد افزودنی باعث حفظ خصوصیات سیال حفاری در دماهای به بزرگی ۱۰۰ درجه سانتیگراد می‌شود. Nasiri و Zarei [۱۳] پژوهشی در مورد تغییر خواص رئولوژیکی سیالات حفاری در حضور نانوذرات اکسید سیلیس ترکیب شده با پوستره برنج ارائه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که نانوذرات مذکور ترکیب شده با پوستره برنج می‌توانند به عنوان یک افزودنی مؤثر جهت بهبود خواص رئولوژیکی سیال حفاری پایه آبی استفاده شوند. Akinyemi و Abdulhadi [۱۴] به مطالعه اثرات دما بر روی خواص رئولوژیکی سیال حفاری بنتونیتی با افزودنی پوستره برنج پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از پوستره برنج به عنوان یک عامل افزایش دهنده ویسکوزیته گل حفاری می‌تواند باعث بهبود ویسکوزیته گل در دماهای بالا شود. Peter و Olamilekan [۱۵] مطالعه مقایسه‌ای در مورد استفاده از پوستره برنج و زانتان‌گام به عنوان افزایش‌دهنده ویسکوزیته در سیالات حفاری پایه آبی انجام دادند. آنها به بررسی امکان استفاده از پوستره برنج به جای زانتان‌گام به عنوان افزایش‌دهنده ویسکوزیته پرداختند و نتیجه گرفتند که پوستره برنج می‌تواند به عنوان افزایش‌دهنده

ویسکوزیته در تولید سیالات حفاری پایه آبی استفاده شود؛ اگرچه در مقایسه با زانتان‌گام به مقدار بیشتری پوستره برنج نیاز است. Akinyemi و همکاران [۱۶] اثرات افزودنی‌های پوستره برنج و زانتان‌گام را بر خواص رئولوژیکی سیال حفاری بررسی کردند. آنها چهار نمونه سیال حفاری که حاوی رس بنتونیت، پوستره برنج، و زانتان‌گام به نسبت‌های مختلف بودند تهیه کردند و سپس به آنها افزودنی‌های شیمیایی دیگر نیز اضافه شد. نمونه‌ای که حاوی ۲۰ گرم پوستره برنج، ۱ گرم زانتان‌گام، و ۲۴/۵ گرم بنتونیت بود، با اضافه شدن هر کدام از مواد افزودنی شیمیایی توانست خصوصیات رئولوژیکی بهتری از خود نشان دهد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های پردازش داده‌ها هستند که با استفاده از اطلاعات تجربی ورودی-خروجی موجود برای به دست آوردن روابط بین آنها در طی یک فرآیند، آموزش داده می‌شوند. کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در حوزه‌های مهندسی در سال‌های اخیر در حال افزایش بوده است زیرا فرآیندهای صنعتی اغلب دارای روابط پیچیده و غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها هستند. در حوزه مهندسی نفت نیز، محبوبیت استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین رابطه بین پارامترهای فرآیند افزایش یافته است [۱۷-۲۱]. مطالعات در این خصوص نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی عملکرد بهتری در مقایسه با رویکردهای متداول در حل انواع مسائل مربوط به تخمین مقادیر کمیت‌ها دارند [۲۲-۲۳]. با این وجود، مطالعات کافی در مورد پیش‌بینی پارامترهای رئولوژیکی گل حفاری توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی در ادبیات فن یافت نمی‌شود. منابع [۲۴-۲۸] از جمله مقالاتی هستند که در این زمینه پژوهش منتشر شده‌اند.

هدف اصلی از تحقیق حاضر اندازه‌گیری تنش برشی گل حفاری پایه آبی پس از اضافه کردن جرم‌های متفاوت (۵/۰، ۱، ۲، و ۳ گرم) از هر یک از پلیمرهای طبیعی پوستره برنج پودر شده و پوستره برنج پودر نشده به گل پایه آبی در نرخ‌های برش متفاوت (متناظر با سرعت‌های دورانی دستگاه ۳، ۶، ۱۰۰، ۲۰۰، و ۳۰۰ دور بر دقیقه) و محاسبه خواص رئولوژیکی ویسکوزیته پلاستیک و نقطه تسلیم نمونه‌ها بر مبنای مدل رئولوژیکی بینگهام و مقایسه نتایج بدست آمده برای هر یک از افزودنی‌ها با در نظر گرفتن جرم پلیمر طبیعی بکار رفته در سیال حفاری است. همچنین برای آنکه بتوان تنش برشی سیال حفاری را برای هر یک از پلیمرها به ازای

شده شروع به چرخش می‌کند. دراگ ویسکوز^۲ که توسط سیال اعمال می‌شود، گشتاوری را روی سیلندر داخلی ایجاد می‌کند. این گشتاور به یک فنر دقیق منتقل می‌شود که در آنجا انحراف آن اندازه‌گیری می‌شود و سپس به شرایط آزمایش و ثابت‌های ابزار ارتباط داده می‌شود. در صورت کارکرد دستگاه در حالت استاندارد (R1-B1-F1)، جهت تبدیل سرعت دورانی سیلندر خارجی دستگاه (N) با واحد rpm به نرخ برش (γ) با واحد sec^{-1} و محاسبه تنش برشی (τ) با واحد $\text{lbf}/100\text{ft}^2$ در اختیار داشتن dial reading (θ) با واحد درجه، به ترتیب باید از روابط (۱) و (۲) استفاده کرد:

$$\gamma = 1/7.23 N \quad (1)$$

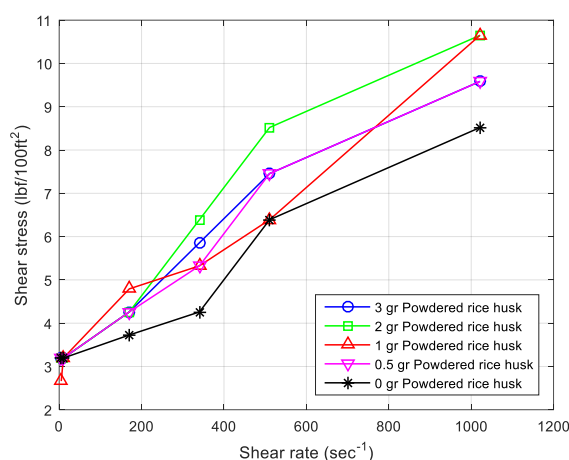
$$\tau = 1/0.65 \theta \quad (2)$$

نمودارهای تغییرات تنش برشی گل حفاری بر حسب نرخ برش برای مقادیر جرم متفاوت افزودنی‌های اضافه شده به نمونه سیال پایه به ترتیب برای پوسته برنج پودر شده و پوسته برنج پودر نشده در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود با افزایش جرم پوسته برنج پودر شده در گل پایه، تغییرات میزان تنش برشی سیال حفاری روند منظمی نداشته است. این در حالیست که با توجه به شکل (۲) افزایش جرم پوسته پودر نشده در سیال حفاری به طور کلی منجر به افزایش تنش برشی گل شده است که خود گویای تأثیر مطلوب افزایش این افزودنی بر خواص رئولوژیکی سیال حفاری است.

ورودی جرم دلخواه پلیمر گیاهی و نرخ برش دلخواه تخمین زد، یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشخور دو لایه طراحی شده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود آموزش دیده است. لازم به ذکر است که مدل هوشمند ارائه شده از دقت زیادی در تخمین تنش برشی گل حفاری برخوردار است. بعلاوه، عملکرد شبکه‌های عصبی طراحی شده با مدل رئولوژیکی پرکاربرد هرشل-بالکلی در توصیف تنش برشی بر حسب نرخ برش سیالات حفاری مقایسه شده است.

۲- انجام آزمایشات

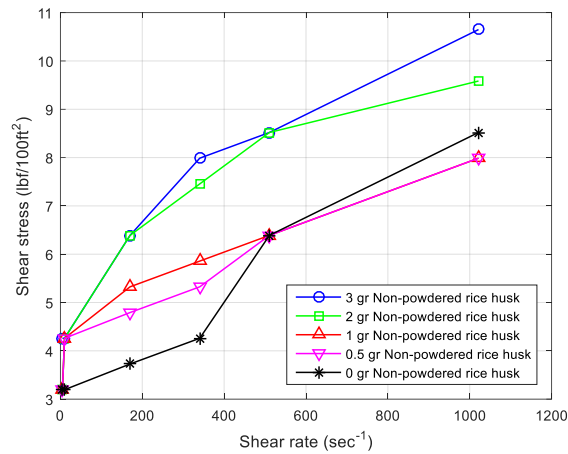
تمامی نمونه گل‌های حفاری طبق استانداردهای نفتی آمریکا^۱ در آزمایشگاه گل حفاری تهیه شده‌اند. نمونه گل حفاری پایه آبی مورد استفاده در این تحقیق مخلوطی از ۳۵۰ سی سی آب بعلاوه ۱۵ گرم بنتونایت است که در طی مراحل مختلف آزمایشات و به طور جداگانه مقادیر مختلف جرم (۰/۵، ۱، ۲، ۳ گرم) از هر یک از پلیمرهای پوسته برنج پودر شده و پودر نشده به گل پایه افزوده می‌شود و عمل اختلاط و هم زدن آن تا رسیدن به یک گل پایدار در یک مخلوط کننده به انجام می‌رسد. برای اندازه‌گیری تنش برشی بر حسب نرخ برش برای گل حفاری از دستگاه ویسکومتر دوار Fann model 35 در سرعت‌های دورانی سیلندر خارجی ۳، ۶، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. جهت انجام هر آزمایش، ابتدا سیال مورد آزمایش در فضای حلقوی یا شکاف برشی بین سیلندرها قرار داده می‌شود. سپس، سیلندر بیرونی با سرعت دورانی تعیین



شکل ۱- نمودارهای تغییرات تنش برشی نمونه گل حاوی مقادیر جرم متفاوت پوسته برنج پودر شده بر حسب نرخ برش

² Viscous drag

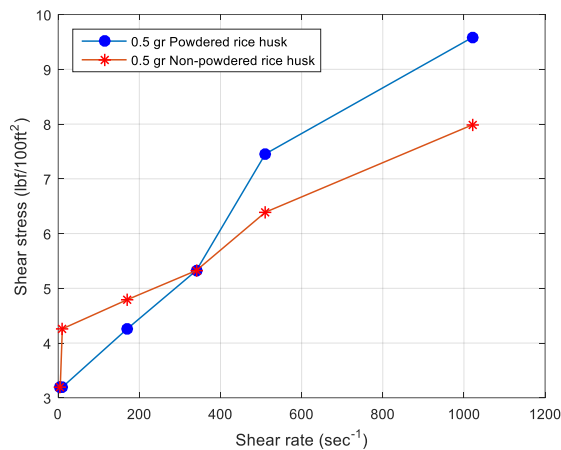
¹ American Petroleum Institute (API)



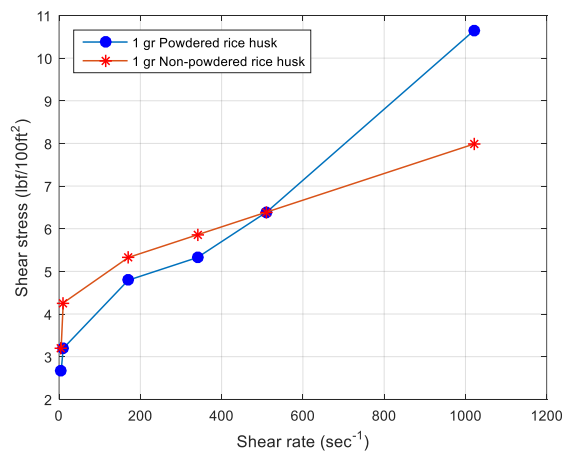
شکل ۲- نمودارهای تغییرات تنش برشی نمونه گل حاوی مقادیر جرم متفاوت پوسته برنج پودر نشده بر حسب نرخ برش

افزودنی‌ها، میزان تنش برشی سیال حاوی پوسته برنج پودر شده در مقایسه با سیال حاوی پوسته برنج پودر نشده در مقادیر نرخ برشی پایین‌تر، کمتر و در مقادیر نرخ برش بالاتر (به استثنای سیال حاوی ۳ گرم افزودنی)، بیشتر بوده است.

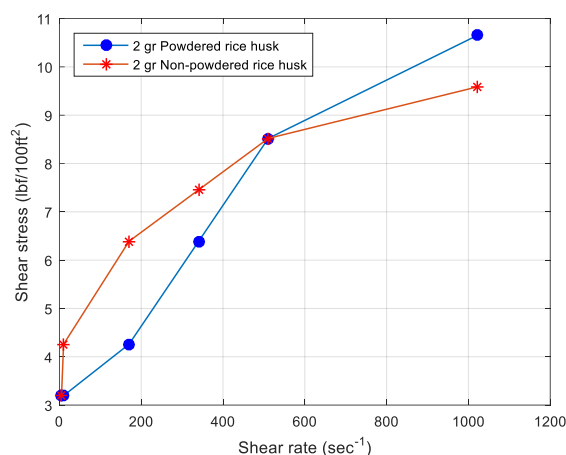
همچنین نمودارهای مقایسه‌ای تغییرات تنش برشی سیال حاوی هر یک از مقادیر جرم (۰/۵، ۱، ۲، و ۳ گرم) پوسته برنج پودر شده و پودر نشده بر حسب نرخ برش به طور جداگانه به ترتیب در شکل‌های (۳) تا (۶) آورده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود متناظر با هر یک از مقادیر جرم



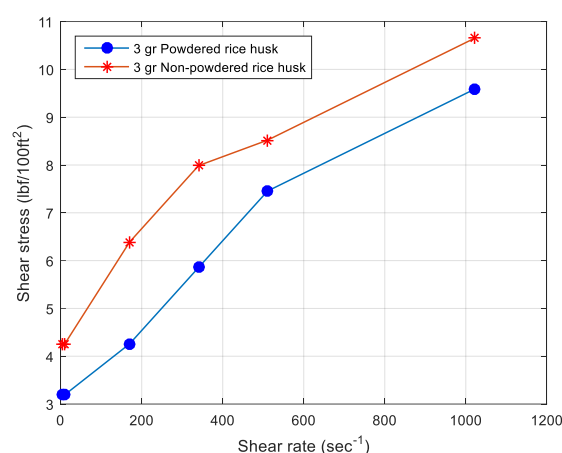
شکل ۳- نمودارهای مقایسه‌ای تغییرات تنش برشی نمونه گل حاوی ۰/۵ گرم افزودنی بر حسب نرخ برش



شکل ۴- نمودارهای مقایسه‌ای تغییرات تنش برشی نمونه گل حاوی ۱ گرم افزودنی بر حسب نرخ برش



شکل ۵- نمودارهای مقایسه‌ای تغییرات تنش برشی نمونه گل حاوی ۲ گرم افزودنی بر حسب نرخ برش



شکل ۶- نمودارهای مقایسه‌ای تغییرات تنش برشی نمونه گل حاوی ۳ گرم افزودنی بر حسب نرخ برش

هستند. در واقع PV بیانگر شیب خط راستی است که از دو نقطه متناظر با نرخ‌های برش فوق‌الذکر در نمودار تنش برشی-نرخ برش سیال می‌گذرد و YP نیز عرض از مبدأ این خط (یعنی محل برخورد این خط راست با محور تنش برشی) است [۲۹].

بر مبنای شکل‌های (۷) و (۸)، می‌توان اذعان کرد بطور کلی مقادیر تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک گل حفاری با افزایش مقدار جرم پوسته برنج پودر شده به ترتیب دارای روند تغییرات نوسانی و روند تغییرات افزایشی-کاهشی و با افزایش مقدار جرم پوسته برنج پودر نشده به ترتیب دارای روند تغییرات افزایشی-کاهشی و روند تغییرات کاهشی-افزایشی هستند. همانطور که مشاهده می‌شود برای سیال حاوی پوسته برنج پودر شده، پایین‌ترین نقطه تسلیم متناظر با بالاترین مقدار ویسکوزیته پلاستیک (برای ۱ گرم افزودنی در نمونه سیال پایه) بوده و بالاترین نقطه تسلیم متناظر با پایین‌ترین مقدار ویسکوزیته پلاستیک (برای ۲ گرم افزودنی

۳- محاسبه ویسکوزیته پلاستیک و نقطه تسلیم

با توجه به رفتار غیرخطی تغییر تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیالات مورد مطالعه در این تحقیق (مطابق شکل‌های ۱ و ۲) می‌توان به ماهیت غیرنیوتنی این سیال‌ها پی برد. در اینجا، با بکارگیری مدل پلاستیک بینگهام که برای ارزیابی رفتار تنش برشی-نرخ برش سیال‌های غیرنیوتنی قابل استفاده است می‌توان خواص مهم رئولوژیکی ویسکوزیته پلاستیک (PV) و نقطه تسلیم (YP) سیال حفاری را از طریق روابط (۳) و (۴) تعیین کرد:

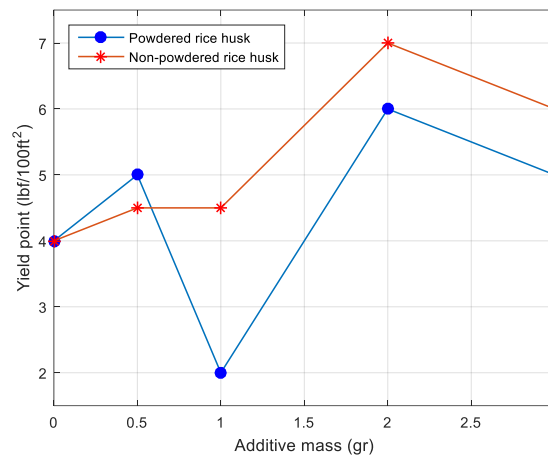
$$PV = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (3)$$

$$YP = \theta_{300} - PV \quad (4)$$

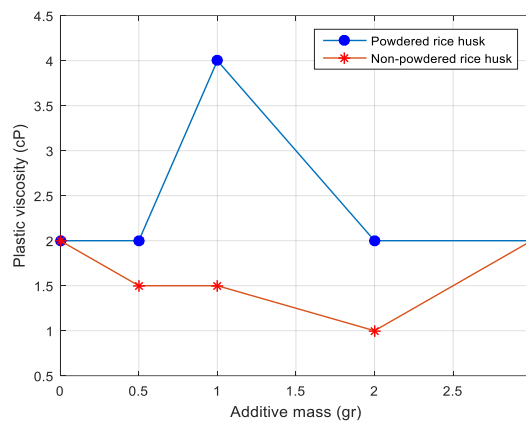
که در این روابط θ_{600} و θ_{300} به ترتیب متناظر با سرعت‌های دورانی ۶۰۰ و ۳۰۰ دور بر دقیقه دستگاه ویسکومتر در زمان انجام آزمایش بر روی نمونه سیال حفاری

افزودنی) بوده و بالاترین نقطه تسلیم متناظر با پایین‌ترین مقدار ویسکوزیته پلاستیک (برای ۲ گرم افزودنی در نمونه سیال پایه) است.

در نمونه سیال پایه) است. برای سیال حاوی پوسته برنج پودر نشده، پایین‌ترین نقطه تسلیم متناظر با بالاترین مقدار ویسکوزیته پلاستیک (برای نمونه سیال پایه بدون حضور



شکل ۷- نمودارهای مقایسه‌ای تغییرات نقطه تسلیم نمونه گل حفاری حاوی مقادیر جرم مختلف افزودنی



شکل ۸- نمودارهای مقایسه‌ای تغییرات ویسکوزیته پلاستیک نمونه گل حفاری حاوی مقادیر جرم مختلف افزودنی

آنها در تخمین و تعیین معادلات و روابط پیچیده بین ورودی‌ها و خروجی‌ها، در مواقعی که داده‌های تجربی و آزمایشگاهی کافی در اختیار باشد، به شکل مؤثری در حوزه‌های مختلف از جمله صنعت نفت و گاز به کار گرفته شده‌اند. توانایی این روش در یادگیری از راه تجربه و سپس قابلیت تعمیم‌پذیری برای ورودی‌های جدید، مزیت اصلی این روش در مقایسه با سایر روش‌ها در این صنعت بوده است [۳۱-۳۰].

برای ارائه مدل تخمین تنش برشی نمونه گل‌های حفاری حاوی هر یک از افزودنی‌های پوسته برنج پودر شده و پوسته برنج پودر نشده، دو شبکه عصبی مصنوعی پیشخور^۴ دو لایه با ۱۰ نورون در لایه پنهان با استفاده از نرم‌افزار متلب^۵

بنابراین بر مبنای نتایج بدست آمده از مدل بینگهام، در زمان افزودن هر یک از این پلیمرهای گیاهی به سیال حفاری باید صرفاً بهبود یکی از خواص نقطه تسلیم و یا ویسکوزیته پلاستیک را مدنظر قرار داد و بهبود همزمان این دو ویژگی با استفاده از افزودنی‌های مذکور میسر نیست. همچنین با مقایسه تأثیر افزودن این پلیمرهای طبیعی می‌توان دریافت که به طور کلی افزودن پوسته برنج پودر نشده از نقطه نظر افزایش نقطه تسلیم، و افزودن پوسته برنج پودر شده از نقطه نظر افزایش ویسکوزیته پلاستیک در مقایسه با دیگری منجر به بهبود رفتار رئولوژیکی گل حفاری خواهد شد.

۴- مدل‌سازی بر مبنای شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل قابلیت‌های بسیار بالای

⁵ MATLAB

⁴ Feedforward

آموزش شبکه را نشان می‌دهد. این نمودار برای شبکه‌های تخمین تنش برشی هر نمونه گل حاوی پوسته برنج پودر شده و پوسته برنج پودر نشده به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است. روند مطلوب کاهشی مقدار شاخص عملکرد خطای میانگین مربعات برای هر دسته از داده‌های مربوط به آموزش، اعتبارسنجی، و آزمون شبکه در هر یک از شکل‌ها مشهود است. همچنین، بهترین مقدار بدست آمده برای شاخص عملکرد متناظر با داده‌های اعتبارسنجی در طی مراحل آموزش با یک دایره سبز رنگ در هر یک شکل‌ها مشخص شده است. بهترین عملکرد اعتبارسنجی بدست آمده برای شبکه عصبی مصنوعی تخمین گر تنش برشی نمونه گل‌های حاوی پوسته برنج پودر شده و پوسته برنج پودر نشده به ترتیب $4-7.033e$ در تکرار ششم و $3-1.7349e$ در تکرار شانزدهم می‌باشند. همچنین کمترین خطای میانگین مربعات مربوط به کل داده‌ها برای شبکه عصبی متناظر با پوسته برنج پودر شده $4-2.8866e$ و برای شبکه عصبی متناظر با پوسته برنج پودر نشده $4-7.4378e$ حاصل شده است.

شاخص دیگر برای تعیین نتیجه آموزش شبکه عصبی مصنوعی، نمودار رگرسیون و ضریب همبستگی بین داده‌های خروجی واقعی و مقادیر هدف است که برای هر یک از نمونه گل‌های حاوی پوسته برنج پودر شده و پوسته برنج پودر نشده به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) ارائه شده‌اند. هر یک از این شکل‌ها بیانگر مقادیر نهایی خروجی بدست آمده از شبکه برای هر دسته از داده‌های آموزش، اعتبارسنجی، و آزمون (محور قائم) در مقابل مقادیر واقعی تنش برشی متناظر آنها (محور افقی) است. بدیهی است در یک شبکه آموزش یافته حالت ایده‌آل هنگامی رخ می‌دهد که مقادیر واقعی و خروجی شبکه برای همه داده‌ها کاملاً یکسان باشند که این به معنای دستیابی به مقدار صفر برای شاخص عملکرد خطای میانگین مربعات است. از اینرو، برای یک شبکه ایده‌آل، مقدار ضریب همبستگی (R) و مقدار شیب خط برازش برابر با عدد ۱ و مقدار عرض از مبدأ خط برازش برابر عدد صفر است. با توجه به مقادیر شاخص‌های مذکور بر روی هر یک از شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان دریافت که مقادیر خروجی شبکه عصبی برای هر دسته از

پیکربندی و آماده تغذیه و آموزش شده است. این شبکه‌ها که شمایک آنها در شکل (۹) قابل مشاهده است در واقع باید بتوانند رابطه‌ای بین دسته ویژگی‌های ورودی شامل جرم پلیمر طبیعی در نمونه گل و نرخ برش، و کمیت خروجی هدف (تنش برشی نمونه سیال حفاری) بیابند. در این پژوهش، متناظر با هر یک از افزودنی‌های اضافه شده به نمونه گل پایه، ۳۰ دسته داده در آزمایشگاه بدست آمده است که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد نیز برای اعتبارسنجی و ۱۵ درصد باقیمانده نیز برای آزمون (تست) شبکه بکار گرفته شده است. همچنین، از الگوریتم بهینه‌سازی لونیگ-مارکوارت^۶ برای آموزش شبکه‌ها به روش پس انتشار خطا^۷ و در واقع برای بازیابی مقادیر وزن‌ها و بایاس‌ها و از تابع خطای میانگین مربعات^۸ بین خروجی شبکه و مقادیر هدف به عنوان شاخص عملکرد^۹ شبکه‌ها مطابق رابطه (۵) استفاده شده است.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (5)$$

که در این رابطه n تعداد داده‌های آزمایشگاهی، Y_i مقدار خروجی واقعی و \hat{Y}_i مقدار خروجی پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی، متناظر با داده i ام هستند. در راستای کمک به عملکرد بهتر شبکه‌ها، پیش از پردازش اطلاعات، کلیه مقادیر ورودی (جرم پلیمر و نرخ برش) و خروجی (تنش برشی) جمع‌آوری شده از آزمایشات در بازه صفر تا ۱ نرمالیزه شده‌اند. توابع تبدیل در لایه پنهان و خروجی نیز به ترتیب تابع تانژانت هایپربولیک^{۱۰} و تابع خطی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین آموزش زمانی متوقف می‌شود که دفعات شکست عملکرد اعتبارسنجی به عدد ۱۰ برسد. لازم به توضیح است ساختار شبکه‌ها (تعداد لایه‌ها و نوروها) و انتخاب پارامترها و تنظیمات شبکه‌ها به روش سعی و خطا^{۱۱} با هدف بهبود هر چه بیشتر عملکرد آنها و دستیابی به نتایج مطلوب‌تر بر مبنای معیارهایی که در ادامه می‌آید صورت گرفته است.

یکی از مهمترین شاخص‌هایی که وضعیت روند آموزش شبکه عصبی مصنوعی را بیان می‌کند، نمودار عملکرد شبکه است که تغییرات خطای میانگین مربعات در طی مراحل

⁹ Performance Index

¹⁰ Hyperbolic Tangent Function

¹¹ Trial and Error

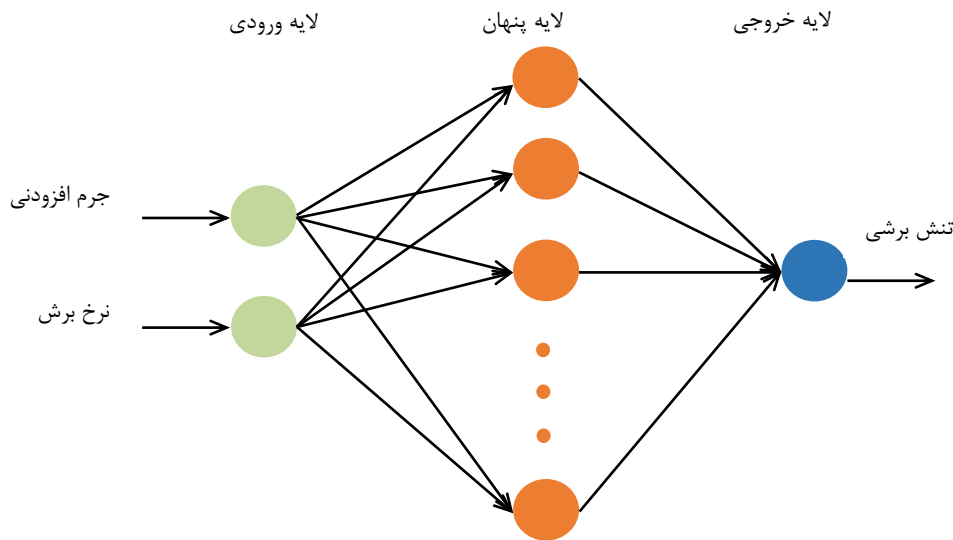
⁶ Levenberg-Marquardt

⁷ Backpropagation

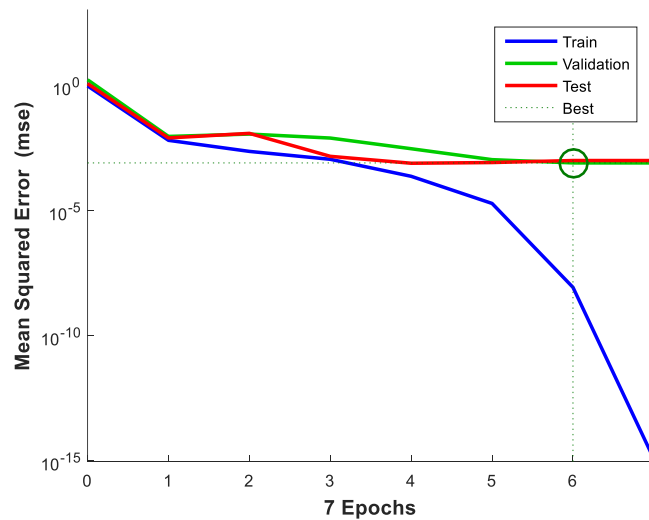
⁸ Mean Squared Error

داده‌ها دارای دقت رضایت‌بخشی بوده و به میزان بالایی به مقادیر هدف نزدیک هستند. مقدار ضریب همبستگی برای هر یک از دسته داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون و نیز کل داده‌ها برای شبکه عصبی متناظر با پوسته برنج پودر شده (مطابق شکل ۱۲) به ترتیب ۱، ۰/۹۹۴۲۷، ۰/۹۹۴۲۵، ۰/۹۹۸۴۷ و برای شبکه عصبی متناظر با پوسته برنج پودر نشده (مطابق با شکل ۱۳) به ترتیب ۰/۹۹۸۷۲، ۰/۹۹۱۷۸،

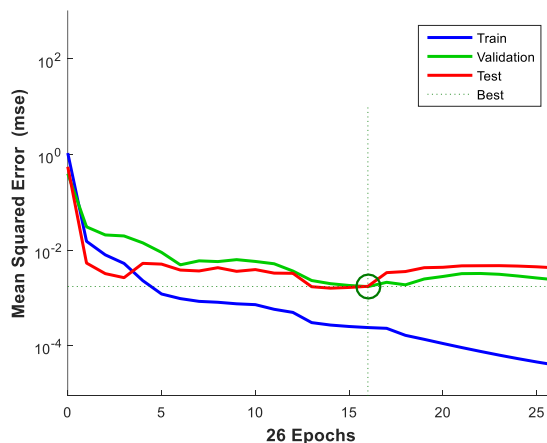
مقدار ایده‌آل یک بسیار نزدیک هستند. این بدان معناست که مدل‌های شبکه عصبی طراحی شده با دقت بسیار بالایی می‌توانند تنش برشی نمونه گل‌های حاوی مقادیر جرم متفاوت افزودنی‌های مورد مطالعه در این تحقیق را برای نرخ‌های برش متفاوت تخمین بزنند.



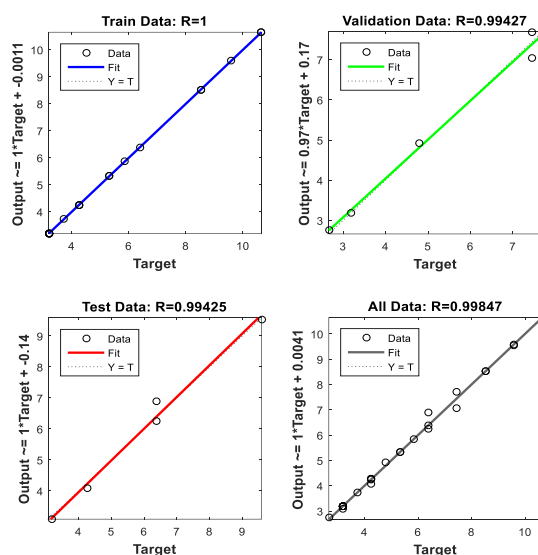
شکل ۹- نمای کلی معماری شبکه عصبی پس انتشار خطا جهت تخمین تنش برشی گل حفاری



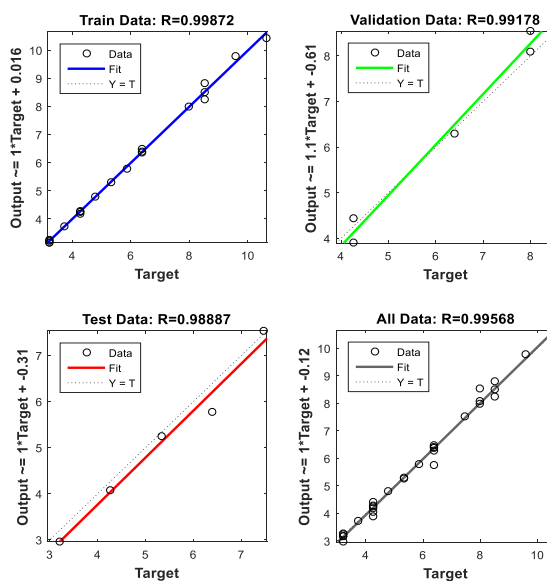
شکل ۱۰- نمودار تغییرات عملکرد شبکه عصبی در طی مراحل بهینه‌سازی شاخص خطای میانگین مربعات برای نمونه گل‌های حاوی پوسته برنج پودر شده



شکل ۱۱- نمودار تغییرات عملکرد شبکه عصبی در طی مراحل بهینه‌سازی شاخص خطای میانگین مربعات برای نمونه گل‌های حاوی پوسته برنج پودر نشده



شکل ۱۲- نمودار رگرسیون شبکه عصبی متناظر هر دسته از داده‌ها برای نمونه گل حاوی پوسته برنج پودر شده



شکل ۱۳- نمودار رگرسیون شبکه عصبی متناظر هر دسته از داده‌ها برای نمونه گل حاوی پوسته برنج پودر نشده

نمودارهای انطباقی و نمودارهای درصد خطای نسبی بین مقادیر واقعی و خروجی شبکه آموزش دیده و نیز بین مقادیر واقعی و نتایج حاصل از مدل هرشل- بالکلی برای داده‌های آزمون مربوط به هر یک گل‌های حاوی پلیمرهای پوسته برنج پودر شده و پودر نشده به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) آورده شده‌اند. تطابق بسیار خوبی بین مقادیر واقعی و خروجی شبکه‌های عصبی و به دنبال آن مقادیر قابل اغماض بدست آمده برای خطاهای متناظر، نشان دهنده عملکرد مطلوب شبکه‌ها در پیش‌بینی تنش برشی نمونه گل با انتخاب مقدار جرم دلخواه افزودنی مربوطه و نرخ برش دلخواه است. مقادیر بیشینه و میانگین درصد خطای نسبی تنش برشی مربوط به داده‌های آزمون با اعمال هر یک از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و هرشل- بالکلی برای هر یک از گل‌های حاوی پوسته برنج پودر شده و پودر نشده در جدول ۱ ارائه شده است.

جهت ارزیابی کامل‌تر عملکرد مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی طراحی شده و آموزش دیده، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از بکارگیری مدل هرشل- بالکلی جهت توصیف رفتار رئولوژیکی سیالات حفاری مقایسه شده است. مطالعات نشان داده‌اند که رفتار رئولوژیکی بیشتر سیالات حفاری را می‌توان با استفاده از مدل هرشل- بالکلی به خوبی توصیف کرد [۳۲]. مدل هرشل- بالکلی ترکیبی از مدل پلاستیک بینگهام^۱ و مدل قانون توانی^۲ است که در آن سه پارامتر برای بیان رابطه‌ای میان تنش برشی (τ) و نرخ برش ($\dot{\gamma}$) سیال مطابق رابطه (۶) بکار رفته است.

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (6)$$

که در این رابطه، پارامترهای τ_0 ، k و n به ترتیب تنش تسلیم سیال، قوام (یکپارچگی) سیال و شاخص سیال هستند که از طریق برازش داده‌های آزمایشگاهی تنش برشی-نرخ برش با استفاده از معادله مدل و در نرم‌افزار متلب تعیین می‌شوند.

جدول ۱- مقادیر بیشینه و میانگین درصد خطای نسبی تنش برشی داده‌های آزمون

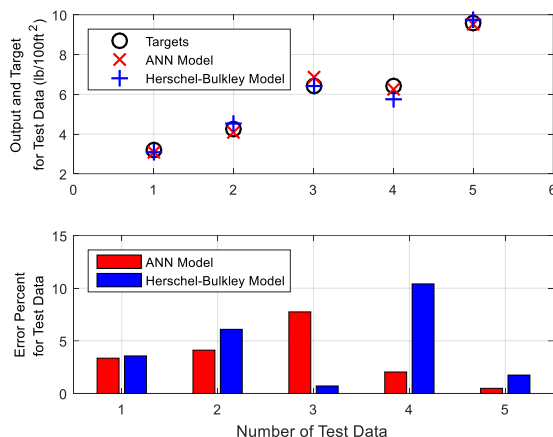
نوع ماده افزودنی	مدل شبکه عصبی مصنوعی		مدل هرشل- بالکلی	
	بیشینه درصد خطای نسبی	میانگین درصد خطای نسبی	بیشینه درصد خطای نسبی	میانگین درصد خطای نسبی
پوسته برنج پودر شده	۷/۷۵۲۳	۳/۵۴۹۲	۱۰/۴۱۰۹	۴/۵۰۵۸
پوسته برنج پودر نشده	۹/۷۰۳۱	۴/۸۱۰۳	۱۳/۹۸۶۶	۵/۸۴۹۰

که صرفاً یک ورودی (نرخ برش) را برای تخمین تنش برشی دریافت می‌کند. این درحالیست که مدل شبکه عصبی مصنوعی برای هر سیال حاوی هر یک از مقادیر جرم افزودنی، یکبار تعیین شده و یگانه بوده و پس از آموزش، دو ورودی جرم افزودنی و نرخ برش را برای تخمین تنش برشی اخذ می‌کند. در واقع مدل شبکه عصبی مانند یک تابع با دو متغیر مستقل که یک رویه را در فضای مختصات پوشش می‌دهد عمل می‌کند. با این وجود عملکرد بهتر آن در مقایسه با مدل رئولوژیکی پرکاربرد هرشل- بالکلی با یک متغیر مستقل (نرخ برش) مشاهده می‌شود.

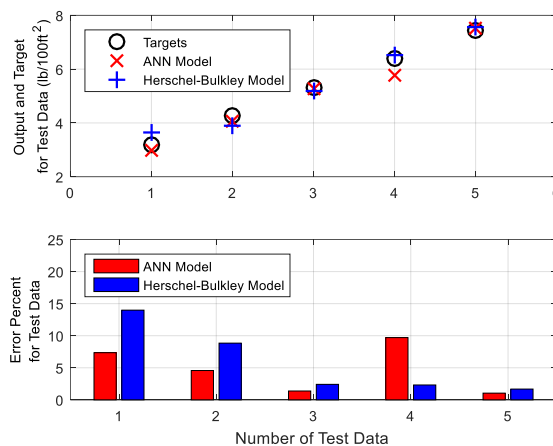
با مقایسه مقادیر آورده شده در جدول ۱، بطور کلی عملکرد بهتر مدل شبکه عصبی مصنوعی نسبت به مدل هرشل- بالکلی را در تخمین تنش برشی نمونه گل حاوی مقدار جرم دلخواه افزودنی و نرخ برش دلخواه می‌توان اذعان کرد. البته توجه به این نکته نیز ضروری است که برای سیال حاوی هر یک از پلیمرهای طبیعی، پارامترهای مدل هرشل- بالکلی متناظر با هر مقدار جرم افزودنی در سیال باید بازایی و تجدید شوند و در واقع برای هر مقدار جرم افزودنی در سیال یک تابع ریاضی هرشل- بالکلی با ضرایب ویژه تعیین می‌شود.

² Power law

¹ Bingham plastic



شکل ۱۴- نمودارهای انطباقی و درصد خطای نسبی بین مقادیر واقعی و خروجی‌های مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل هرشل-بالکلی برای داده‌های آزمون گل حاوی پوسته برنج پودر شده



شکل ۱۵- نمودارهای انطباقی و درصد خطای نسبی بین مقادیر واقعی و خروجی‌های مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل هرشل-بالکلی برای داده‌های آزمون گل حاوی پوسته برنج پودر نشده

افزودنی‌های پوسته برنج پودر شده و پودر نشده را به صورت جداگانه نشان می‌دهد.

با توجه به مقادیر آورده شده در جداول ۲ و ۳، مشاهده می‌شود که مطابق انتظار با افزایش هر چه بیشتر تغییرات هر یک از ورودی‌های شبکه متناظر با هر یک از دو نوع افزودنی (بویژه پوسته برنج پودر شده)، میانگین و حداکثر تغییرات تنش برشی سیال حفاری (خروجی شبکه) افزایش می‌یابد. این تغییرات خروجی شبکه بویژه در ارتباط با تغییرات نرخ برش در داده‌های آزمون محسوس‌تر است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدل شبکه‌های عصبی آموزش دیده متناظر با دو نوع افزودنی در مقابل تغییرات جرم افزودنی گل حفاری پایدارتر بوده و حساسیت کمتری از خود نشان می‌دهد. بنابراین درجه تأثیر ورودی نرخ برش سیال حفاری بر تخمین‌های تنش برشی سیال در مقایسه با ورودی جرم افزودنی بیشتر و قابل توجه‌تر است.

۵- آنالیز حساسیت

برای آنکه بتوان درجه تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی شامل نرخ برش سیال حفاری و جرم هر یک از پلیمرهای افزودنی بر روی خروجی تنش برشی گل حفاری را تعیین کرد و همچنین جهت تعیین میزان پایداری خروجی به تغییرات ناچیز ورودی‌ها، نیاز به پیاده‌سازی یک فرآیند آنالیز حساسیت بر روی شبکه‌های عصبی آموزش دیده متناظر با هر یک از پلیمرهای مورد مطالعه است. به این منظور با ایجاد تغییرات ۲ تا ۱۰ درصدی (با فواصل ۲ درصدی) بر روی هر یک از ورودی‌ها، درصد تغییرات خروجی هر یک از شبکه‌ها محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. جدول‌های ۲ و ۳ نتایج آنالیز حساسیت و مقادیر بدست آمده برای به ترتیب بیشینه و میانگین درصد تغییرات تنش برشی به ازای تغییرات هر یک از ورودی‌ها و متناظر با هر یک از

جدول ۲- بیشینه درصد تغییرات تنش برشی سیال حفاری با ایجاد تغییرات درصدی هر یک از ورودی‌های شبکه عصبی متناظر با هر یک از افزودنی‌ها برای داده‌های آزمون

نوع افزودنی	درصد تغییرات نرخ برش					درصد تغییرات جرم افزودنی				
	۲	۴	۶	۸	۱۰	۲	۴	۶	۸	۱۰
پوسته برنج پودر شده	۳/۹۲	۷/۸۳	۱۱/۶۴	۱۵/۲۷	۱۸/۶۴	۲/۰۵	۴/۱۷	۶/۳۶	۸/۶۴	۱۰/۹۵
پوسته برنج پودر نشده	۱/۸۱	۳/۶۵	۵/۵۰	۷/۳۶	۹/۲۱	۰/۹۰	۱/۷۶	۲/۵۸	۳/۳۵	۴/۰۸

جدول ۳- میانگین درصد تغییرات تنش برشی سیال حفاری با ایجاد تغییرات درصدی هر یک از ورودی‌های شبکه عصبی متناظر با هر یک از افزودنی‌ها برای داده‌های آزمون

نوع افزودنی	درصد تغییرات نرخ برش					درصد تغییرات جرم افزودنی				
	۲	۴	۶	۸	۱۰	۲	۴	۶	۸	۱۰
پوسته برنج پودر شده	۱/۹۸	۳/۹۱	۵/۷۶	۷/۵۳	۹/۲۰	۰/۸۲	۱/۶۳	۲/۴۴	۳/۲۲	۳/۹۸
پوسته برنج پودر نشده	۰/۷۵	۱/۵۰	۲/۲۵	۳/۰۱	۳/۷۷	۰/۳۹	۰/۷۸	۱/۱۵	۱/۵۲	۱/۸۸

۶- نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این تحقیق، بررسی و مقایسه تنش برشی نمونه گل پایه آبی متشکل از آب و بنتونایت با افزودن جداگانه مقادیر مختلف جرم دو پلیمر گیاهی پوسته برنج پودر شده و پوسته برنج پودر نشده به آن بود. همچنین جهت تخمین تنش برشی نمونه حاوی هر یک از پلیمرها برای مقدار جرم دلخواه افزودنی و نرخ برش دلخواه، از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی پیشخور دو لایه استفاده شد. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری تنش برشی در نرخ کرنش‌های متفاوت برای انواع نمونه گل‌های آماده شده و نیز طراحی و آموزش شبکه عصبی مصنوعی به صورت کلی ذیل لیست می‌شوند:

۱- افزایش جرم پوسته برنج پودر شده در گل پایه روند تغییرات معینی را برای تنش برشی سیال در پی ندارد. این درحالیست که افزایش جرم پوسته پودر نشده در سیال حفاری به طور کلی منجر به افزایش تنش برشی گل شده است.

۲- برای هر یک از مقادیر جرم افزودنی‌ها، تنش برشی سیال حاوی پوسته برنج پودر شده در مقایسه با سیال حاوی پوسته برنج پودر نشده در نرخ‌های برش پایین‌تر، مقادیر کمتر و در نرخ‌های برش بالاتر (به استثنای سیال حاوی ۳ گرم افزودنی)، مقادیر بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد.

۳- تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک گل حفاری با افزایش مقدار جرم پوسته برنج پودر شده به ترتیب دارای روند تغییرات نوسانی و روند تغییرات افزایشی-کاهشی و با افزایش مقدار جرم پوسته برنج پودر نشده به ترتیب دارای روند تغییرات افزایشی-کاهشی و روند تغییرات کاهشی-افزایشی هستند.

۴- با مقایسه تأثیر افزودن این پلیمرهای گیاهی می‌توان پی برد که به طور کلی افزودن پوسته برنج پودر نشده با بالا بردن نقطه تسلیم (و در پی آن افزایش توانایی سیال حفاری در بلند کردن خرده‌های سنگ از ته چاه) و افزودن پوسته برنج پودر شده با افزایش ویسکوزیته پلاستیک (و به دنبال آن افزایش قابلیت سیال حفاری در پاکسازی دیواره چاه از

افزایش قابلیت گل حفاری در تمیز کردن چاه از کنده‌ها و بیرون کشیدن آنها از چاه استفاده کرد.

۶- تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه صنعت نفت تهران به دلیل فراهم آوردن فرصتی برای انجام آزمایش‌های ذکر شده در متن مقاله بسیار قدردانی می‌کنیم.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله، تعارض منافع وجود ندارند.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعدد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

کیوان بختیاری منش: انجام تست‌های آزمایشگاهی، جمع‌آوری داده‌ها، نوشتن پیش‌نویس اولیه مقاله
مجتبی رحیمی: نظارت بر انجام پژوهش (استاد راهنما)، تهیه و ویرایش نسخه اولیه و نسخه نهایی مقاله
علی مختاریان: ارائه مدل شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل و تفسیر نتایج، تهیه نسخه اولیه مقاله

منابع مالی

نویسندگان هیچ حمایت مالی برای انجام و تکمیل این پژوهش دریافت نکرده‌اند.

خرده‌های سنگ) در راستای بهبود رفتار رئولوژیکی گل حفاری مؤثر بوده‌اند.

۵- شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده و آموزش دیده برای هر گروه از داده‌های متناظر با هر یک پلیمرهای مورد مطالعه، با دقت بسیار بالایی می‌تواند تنش برشی یک نمونه گل حاوی مقدار جرم دلخواه افزودنی را در نرخ برش دلخواه تخمین بزند.

۶- برای هر یک افزودنی‌های اضافه شده به سیال حفاری، مقایسه بین نتایج شبکه عصبی مصنوعی آموزش دیده و نتایج برازش داده‌های نظیر هر مقدار جرم افزودنی با مدل هرشل- بالکلی، برتری و دقت بالاتر شبکه عصبی مصنوعی در تخمین تنش برشی را با وجود داشتن دو ورودی (در مقابل مدل هرشل- بالکلی با صرفاً یک ورودی نرخ برش) را نشان می‌دهد.

۷- با انجام آنالیز حساسیت شبکه‌های آموزش دیده متناظر با هر یک از افزودنی‌های مورد مطالعه، اهمیت و درجه تأثیر نرخ برش بر تنش برشی سیال حفاری در مقایسه با جرم افزودنی، بیشتر تشخیص داده شد. این بدین معنی است که پایداری خروجی شبکه‌ها نسبت به تغییرات ورودی نرخ برش در مقایسه با تغییرات جرم افزودنی بسیار کمتر است.

از نتایج این تحقیق می‌توان برای انتخاب و تهیه نمونه گل مناسب جهت حفاری چاه در منطقه‌ای با شرایط ساختاری معین با هدف بهبود مشکلات حفاری و کاهش آسیب به سازند و به حداکثر رساندن راندمان حفاری بویژه از طریق

مراجع

- [1] Rabia, H. Oilwell Drilling Engineering: Principles & Practice. London: Graham and Trotman, 1985.
- [2] Bourgoyne, A. T., M. E. Cheever, K. K. Mulheim, and F. S. Young. Applied Drilling Engineering. SPE Textbook Series, Vol. 2. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1986.
- [3] Ahmad, Hafiz Mudaser, Muhammad Shahzad Kamal, and Mamdouh A. Al-Harhi. "Rheological and Filtration Properties of Clay-Polymer Systems: Impact of Polymer Structure." Applied Clay Science 160 (2018): 226–237.
- [4] Sadeghalvaad, M., and S. Sabbaghi. "The Effect of the TiO₂/Polyacrylamide Nanocomposite on Water-Based Drilling Fluid Properties." Powder Technology 272 (2015): 113–119.
- [5] Zhang, X., G. Jiang, Y. Xuan, L. Wang, and X. Huang. "Associating Copolymer Acrylamide/Diallyldimethylammonium Chloride/Butyl Acrylate/2-Acrylamido-2-Methylpropanesulfonic Acid as a Tackifier in Clay-Free and Water-Based Drilling Fluids." Energy & Fuels 31, no. 5 (2017): 4655–4662.
- [6] Luo, Zhihua., Jingjing Pei, Longxiang Wang, Pei-Zhi Yu, and Zhangxin Chen. "Influence of an Ionic Liquid on Rheological and Filtration Properties of Water-Based Drilling Fluids at High Temperatures." Applied Clay Science 136 (2017): 96–102.
- [7] Orodu, Oyinkepreye D., Kale B. Orodu, Richard O. Afolabi, and Eboh A. Dafe. "Rheology of Gum Arabic Polymer and Gum Arabic Coated Nanoparticle for Enhanced Recovery of Nigerian Medium Crude Oil under Varying Temperatures." Data in Brief 19 (2018): 1773–1778.

- [8] Adams, Neal., and Tommie Charrier. *Drilling Engineering: A Complete Well Planning Approach*. Tulsa, OK: Penn Well Publishing Company, 1985.
- [9] Kersten, Glenn. "Results and Use of Oil-Base Fluids in Drilling and Completing Wells." In *Drilling and Production Practice*. OnePetro, 1946.
- [10] Luo, Yuejin, P. A. Bern, B. D. Chambers, and D. S. Kellingray. "Simple Charts to Determine Hole Cleaning Requirements in Deviated Wells." In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, Paper SPE-27486. Richardson, TX: SPE, 1994.
- [11] Zhang, Li-Ming, Tan Yanbing, and Z. M. Li. "Application of a New Family of Amphoteric Cellulose-Based Graft Copolymers as Drilling-Mud Additives." *Colloid and Polymer Science* 277 (1999): 1001–1004.
- [12] Raipuria, Vivek, Nisha Rani, V. P. Sharma, and Tarun Kumar Naiya. "Use of Nanoparticle Derived from Natural Source and Its Application in Drilling Fluid." *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology* 19, no. 3 (2018): 283–295.
- [13] Zarei, Vahid, and A. Nasiri. "Stabilizing Asmari Formation Interlayer Shales Using Water-Based Mud Containing Biogenic Silica Oxide Nanoparticles Synthesized." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 91 (2021): 103928.
- [14] Akinyemi, O. P., and A. Abdulhadi. "Effects of Temperature on the Rheological Properties of Rice Husk Modified Bentonite Drilling Fluids." *International Journal of Engineering and Management Research* 12, no. 6 (2022): 240–250.
- [15] Peter, A. O., and L. O. Olamilekan. "Comparative Study of Rice Husk and Xanthan Gum as Viscosifier in Water-Based Drilling Fluid." *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology* 9, no. 1 (2022).
- [16] Akinyemi, O. P., A. Abdulhadi, and A. Aliyu. "Impacts of Additives on Rheological Properties of Rice Husk and Xanthan Gum Modified Drilling Fluid." *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology* 10, no. 3 (2023).
- [17] Ali, J. K. "Neural Networks: A New Tool for the Petroleum Industry." In *SPE European Petroleum Computer Conference*, Paper SPE-27561. Richardson, TX: SPE, 1994.
- [18] González, A., Maria A. Barrufet, and R. Startzman. "Improved Neural-Network Model Predicts Dewpoint Pressure of Retrograde Gases." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 37, no. 3–4 (2003): 183–194.
- [19] Lotfi, Ehsan., and HamidReza Navidi. "A New Model for Determining OPEC Oil Production Level Based on Price Forecast and Game Theory." *Journal of Modeling in Engineering* 11, no. 35 (2014): 63–76. (in Persian)
- [20] Berenjkar, Ehsan. "Evaluation of the Performance of Artificial Neural Networks Combined with Meta-Heuristic Algorithms of Wall and Ants in Estimating the Penetration Rate of Drilling and Comparison with Simple Neural Networks and Common Mathematical Models." *Journal of Modeling in Engineering* 19, no. 65 (2021): 115–135. (in Persian)
- [21] Mirshah, HamidReza., Ramin Ghasemiasl, Nahid Raoufi, and Mehrdad Malekzadeh. "Modeling and Prediction of Flash Point of Hydrocarbon Compounds Using Neural Network." *Journal of Modeling in Engineering* 19, no. 64 (2021): 109–116. (in Persian)
- [22] Mohaghegh, S. "Neural Network: What It Can Do for Petroleum Engineers." *Journal of Petroleum Technology* 47, no. 1 (1995): 42–42.
- [23] Mohaghegh, S. "Virtual-Intelligence Applications in Petroleum Engineering: Part 1—Artificial Neural Networks." *Journal of Petroleum Technology* 52, no. 9 (2000): 64–73.
- [24] Avcı, E. "An Artificial Neural Network Approach for the Prediction of Water-Based Drilling Fluid Rheological Behaviour." *International Advanced Researches and Engineering Journal* 2, no. 2 (2018): 124–131.
- [25] Elkatatny, Salaheldin. "Real-Time Prediction of the Rheological Properties of Water-Based Drill-In Fluid Using Artificial Neural Networks." *Sustainability* 11, no. 18 (2019): 5008.
- [26] Oguntade, T., T. Ojo, E. Efajemue, B. Oni, and J. Idaka. "Application of ANN in Predicting Water Based Mud Rheology and Filtration Properties." In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*, Paper D013S009R012. Richardson, TX: SPE, August 2020.

- [27] Goma, Ibrahim, Salaheldin Elkatatny, and AbdulAzeez Abdurraheem. "Real-Time Determination of Rheological Properties of High Over-Balanced Drilling Fluid Used for Drilling Ultra-Deep Gas Wells Using Artificial Neural Network." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 77 (2020): 103224.
- [28] Ismail, Atif, Hafiz Muhammad Awais Rashid, Raof Gholami, and Arshad Raza. "Characterization-Based Machine Learning Modeling for the Prediction of the Rheological Properties of Water-Based Drilling Mud: An Experimental Study on Grass as an Environmental Friendly Additive." *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 12, no. 6 (2022): 1677–1695.
- [29] Strømø, S. M. Formulation of New Drilling Fluids and Characterization in HPHT. Master's thesis, University of Stavanger, Norway, 2019.
- [30] Stubble, F. William A., and George F. Luger. *Strategies for Complex Problem Solving & Artificial Intelligence Structures*. Wesley Longman Inc., 2000.
- [31] Rashidi, Mohammad Mehdi, O. Anwar Bég, Amir Basiri Parsa, and Forouzan Nazari. "Analysis and Optimization of a Transcritical Power Cycle with Regenerator Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 225, no. 6 (2011): 701–717.
- [32] Khalil, Munawar, and B. Mohamed Jan. "Herschel-Bulkley Rheological Parameters of a Novel Environmentally Friendly Lightweight Biopolymer Drilling Fluid from Xanthan Gum and Starch." *Journal of Applied Polymer Science* 124, no. 1 (2012): 595–606.