

بررسی پارامترهای مؤثر در تعیین فشار بهینه تزریق دوغاب سیمان در سدهای با بستر سنگی

علی صادقی^۱، مجتبی حیدری^{۲*}، سید حسین جلالی^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

چکیده

یکی از پارامترهای بسیار مهم در عملیات تزریق برای اهداف مختلف بهسازی پی، میزان فشار بهینه تزریق برای نفوذ دوغاب سیمانی است. در این پژوهش، بر اساس داده‌های تزریق و داده‌های زمین‌شناسی مهندسی به‌دست‌آمده در کارگاه‌های حفاری و تزریق از ۴۲ پروژه سدسازی در ایران و جهان، نقش پارامترهای مؤثر در تعیین فشار بهینه تزریق بررسی و مدل‌هایی با روش‌های رگرسیون چندمتغیره خطی (LMR) و غیرخطی (NLMR) و روش‌های محاسبات نرم همچون سیستم فازی (FUZZY)، شبکه عصبی (ANN) و سیستم فازی-عصبی (ANFIS) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد پارامترهای عمق (D)، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) و مقاومت فشاری تک‌محوری توده سنگ (UCSRM)، به ترتیب بیشترین همبستگی را در تعیین فشار تزریق (GP) دارند و از بین روش‌های آماری، مدل ساخته‌شده به روش ANFIS با ضریب تعیین $R^2=0/803$ و کمترین خطای جذر میانگین مربعات $RMSE=4/47$ نسبت به مدل‌های دیگر کارایی بهتری دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد که R^2 و RMSE در روش‌های تحلیل FUZZY، ANN و ANFIS برای تخمین فشار تزریق، در مقایسه با LMR و NLMR بهبود یافته‌اند. در سیستم فازی، از قوانین فازی که با استفاده از تجربه کاربر و نیز نتایج مطالعات سایرین تدوین می‌گردد، استفاده می‌شود. این قوانین با استفاده محدوددهای خاصی از مقادیر ورودی اقدام به انتخاب خروجی می‌نمایند، در نتیجه مدل‌های ساخته‌شده با سیستم فازی، انعطاف بیشتری از خود نشان داده و با داده‌های غیر از داده‌های بکار رفته در مدل، نتایج مناسب‌تری به دست می‌دهند.

کلید واژه‌ها: بهسازی، عملیات تزریق، فشار بهینه تزریق، تحلیل‌های رگرسیونی، محاسبات نرم.

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان moj.heidari@basu.ac.ir

۳. دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

پی سدها به‌ویژه در سدهای بزرگ، نقش بسیار مهمی در پایداری و کارایی آن‌ها دارد. بهسازی پی به دلایل مختلف از جمله، آب‌بندی و جلوگیری از تراوش آب، تأمین پایداری و بالا بردن ظرفیت باربری پی و یا کاهش تغییر شکل‌پذیری صورت می‌گیرد. همچنین در بعضی شرایط هدف از بهسازی ممکن است افزایش پایداری درازمدت از طریق کاهش فرسایش‌پذیری و انحلال و نیز تثبیت و بهسازی خاک روانگرا در مناطق لرزه‌خیز باشد (Ministry of Energy, 2009).

امروزه فناوری حفاری و تزریق به‌عنوان یکی از روش‌های بهسازی، در علم مهندسی زمین توسعه‌یافته است. این شاخه از علوم زمین، به‌طورکلی به‌منظور کاهش نفوذپذیری و نیز تحکیم تکیه‌گاه‌ها و شالوده سدها، فعالیت‌های معدنکاری، حفاری تونل‌ها و شفت‌ها و... به کار گرفته می‌شود (Mohammadi and Sadeghi, 2021). این روش در علاج بخشی مناطقی که تحت فوران آب هستند بسیار مؤثر است (Zhu et al., 2020). برای حل چالش‌های زمین‌شناسی در لایه‌های ماسه‌ای غنی از آب نیز می‌تواند استفاده شود (Wang et al., 2020).

عملیات تزریق پی سد، فرابندی است که در طی آن، منافذ و مجاری موجود در سازندهای زمین‌شناسی، آب‌بندی‌شده و در نتیجه نشت آب کاهش‌یافته و یا پی سد تحکیم می‌یابد. تزریق اغلب یک‌راه حل ترجیحی برای مشکل نشت و تقویت توده سنگ است (Dou et al., 2020). مصالح تزریق ممکن است به‌صورت سوسپانسیون (دوغاب سیمان)، محلول خالص (آمیزه شیمیایی) و یا ترکیبی از این دو باشد (Weaver and Bruce, 2007). در خصوص تزریق در سنگ به جرأت می‌توان گفت دوغاب‌هایی که اساساً از اختلاط آب، سیمان معمولی (پرتلند) و اندکی افزودنی متعارف تشکیل می‌شوند از گذشته تا حال و حتی تا سال‌های متمادی نقشی محوری و جامعی را در تزریق مقاطع سنگی ایفا کرده و خواهند کرد (Khoshbarez, 2005). تزریق‌پذیری و عمق نفوذ دوغاب از مهم‌ترین مسائلی است که در عملیات تزریق موردتوجه قرار

می‌گیرد. پارامترهای مختلف مانند تنش درجا، فشار آب منفذی، ویژگی‌های هندسی و ژئومکانیکی درزه، خواص دوغاب تزریق و عوامل فنی مانند فشار و سرعت جریان دوغاب بر قابلیت تزریق‌پذیری و عمق نفوذ دوغاب در توده سنگ تأثیر می‌گذارد (Mortazavi and Maadikhah, 2016).

یکی از پارامترهای بسیار مهم و تأثیرگذار در عملیات تزریق، میزان فشار مؤثر برای نفوذ دوغاب سیمانی در فرآیند تزریق است (Zhang et al., 2022). تعیین محدوده مناسب این پارامتر در میزان اثربخشی عملیات نقش اساسی دارد (Gholamzadeh et al., 2015). به این معنی که فشار تزریق باید همواره از فشاری که باعث شکستن سنگ شود کمتر باشد ولی درعین‌حال حداقل فشار مؤثری نیز باشد که بتواند دوغاب تزریق را وارد درزه‌های ریز نماید (Ewert, 1985).

نحوه کنترل معقول فشار تزریق یکی از نکات کلیدی در پروژه‌های تزریق سد می‌باشد. در حال حاضر، تنظیم فشار لحظه‌ای به‌شدت به تجربیات متخصصان بستگی دارد. از آنجایی‌که رابطه فشار تزریق، جریان دوغاب و چگالی دوغاب پیچیده و غیرخطی است، کنترل دقیق فشار تزریق برای مهندسان دشوار است (Zhang et al., 2020). مفاهیم غالب و پایدار در مورد فشارهای تزریق بهینه در تئوری و عمل وجود ندارد. فشار تزریق در هر پروژه متفاوت است و در بهترین حالت به‌وسیله آزمایش‌های برجا تعیین می‌شود. دو نظریه اصلی در مورد نرخ فشار وجود دارد: اولی تزریق با فشار بالا به‌منظور افزایش شعاع نفوذ است که در آن هزینه‌های اجرا کاهش می‌یابد و گمانه‌های کمتری موردنیاز است. افزایش معقول فشار تزریق باعث افزایش مقاومت دوغاب سخت شده در درزه و شکاف سنگ نیز می‌شود (Ma et al., 2020). نظریه دومی نیز توسط دانشمندان دیگر ارائه شده است که پیشنهاد می‌کند تزریق با فشار کم انجام شود زیرا اعمال فشار بالا باعث شکست هیدرولیکی در توده سنگ و کاهش کیفیت سنگ می‌شود. تعیین محدوده مناسب برای این پارامتر نقش اساسی در اثربخشی عملیات اجرایی دارد (Bakhshandeh Amnieh and Masoudi, 2017).

چراکه فشار پایین باعث ناکارآمدی و ناتمام ماندن عملیات و نرسیدن به هدف اصلی آن شده، آب‌بندی و بهسازی ساختگاه تکمیل نخواهد شد و نیاز به تزریق مجدد در مراحل بعدی را موجب خواهد شد. از سوی دیگر اعمال فشار بالا و در نتیجه وقوع پدیده شکست هیدرولیکی نیز باعث آسیب بیشتر توده سنگ، کاهش وضعیت کیفی آن، معکوس شدن نتیجه عملیات و عدم آب‌بندی و بهسازی مناسب ساختگاه شده و موجب تحمیل خسارت‌های بسیار زیاد در زمان و هزینه پروژه خواهد شد. با توجه به مجموع موارد ذکر شده، لزوم و نیاز به انجام تحقیقات در این زمینه به منظور تعیین یک مقدار مشخص برای اعمال فشار تزریق، امری اجتناب‌ناپذیر است و باعث افزایش کارایی هرچه بیشتر عملیات می‌شود. همچنین باعث می‌گردد این فرآیند از لحاظ فنی و اقتصادی توجیه‌پذیر باشد.

در این پژوهش برای اولین بار در ایران، بر اساس داده‌های تزریق و داده‌های زمین‌شناسی مهندسی به دست آمده در کارگاه‌های حفاری و تزریق از ۴۲ پروژه مختلف سدسازی در ایران و سایر کشورها، تلاش شده است با روش‌های آماری علاوه بر بررسی نقش پارامترهای مؤثر در تعیین فشار بهینه تزریق، مدل‌ها و روابطی کاربردی برای محاسبه فشار بهینه تزریق در پی‌های سنگی ارائه شود.

۲. مواد و روش‌ها

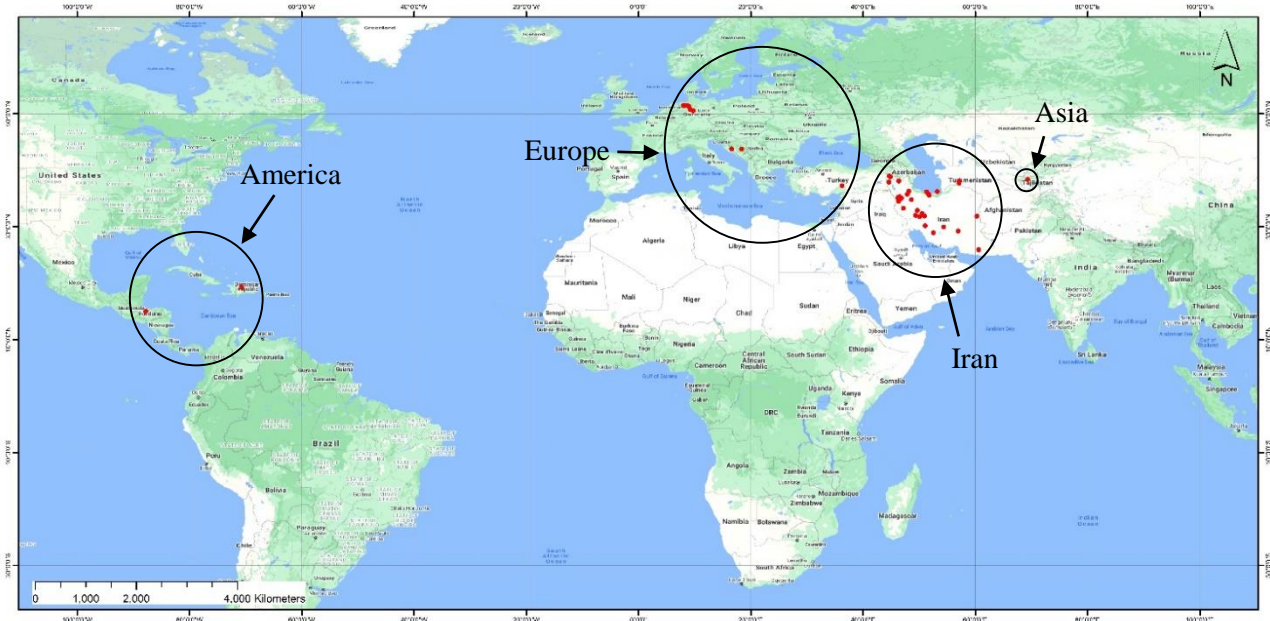
موقعیت و پراکندگی سدهای مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌هایی که از ۴۲ کارگاه حفاری و تزریق در پروژه‌های سدسازی انجام شده در ایران و برخی کشورهای دیگر، جمع‌آوری، مطالعه و بر اساس نیاز پس از صحت سنجی دسته‌بندی شده، شامل پارامترهای زیر بوده است:

- فشار تزریق (GP)
- عمق تزریق (D)
- مقاومت کششی توده سنگ (TS)
- مقاومت فشاری تک‌محوری توده سنگ (UCS_{RM})
- مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ (MOD)

برای محاسبه فشار لازم در عملیات تزریق، نظریات، روابط، جداول و نمودارهای مختلفی توسط دانشمندان ارائه شده است. تمام این موارد تجربی بوده و ممکن است در بعضی موارد به فشار مجاز نزدیک و در بعضی موارد نیز دور باشد (Karbala and Katibeh, 2010). اورت (Ewert, 1985) بیان نمود که اصولاً فشار وابستگی به عمق ندارد، بلکه وابسته به وضعیت ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مقطع است و فشار تزریق نباید موجب شکست محیط شود. لمباردی (Lombardi, 2003) اعتقاد دارد این نظریه که دوغاب‌های رقیق‌تر، راحت‌تر و با فشار کمتری به درزه‌های ریز نفوذ می‌کنند اشتباه است. کوتزرنر (Kutzner, 1996) بیان کرد که فشار باید در حدی بهینه به منظور دستیابی به بیشترین میزان تزریق (عدم کاهش فشار از یک مقدار حداقل) و عدم شکست محیط (عدم افزایش فشار از یک حد بیشینه) اعمال شود. گروندی (Groundy, 1995) فشار تزریق را دو برابر وزن روباره در بالای مقطع در نظر گرفت. هولسبی (Houlsby, 1992) معتقد است وقتی که درزه‌ها برای نفوذ دوغاب ریز هستند، تزریق جایگزینی در گام‌های عمیق، قادر به باز کردن درزه‌ها و افزایش فاصله دوغاب می‌باشد و در نواحی نزدیک سطح زمین تزریق جایگزینی مقرون‌به‌صرفه نیست. به عقیده کامبرفورت (۱۹۷۷) برای انجام یک تزریق خوب، فشار نهایی تزریق باید درزه را از هم باز کند تا پس از پایان تزریق، سنگ با برگشت به حالت اولیه، کانال باریک بالای نهشته‌های سیمان را به‌خوبی بسته و آن را مسدود نماید (Houlsby, 1992).

با وجود اهمیت مقدار فشار لازم در فرآیند تزریق، هنوز هیچ مفهوم ثابت و حاکم بین متخصصین در تعیین فشار بهینه در عمل و یا در کتب مرجع و مقالات موجود گزارش نشده است. به دلیل آنکه تاکنون معیار و رابطه دقیقی به منظور تعیین فشار مناسب وجود نداشته است، برآورد فشار به صورت امری کاملاً تجربی و توسط پیمانکاران در کارگاه‌ها انجام می‌گردد. انتخاب فشار نامناسب، کم یا زیاد، در هر دو حالت باعث تحمیل مشکلات عدیده بر پروژه‌های عمرانی شده است.

- شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI)
 - شیب و سوی شیب ناپیوستگی‌ها
 - بازشدگی ناپیوستگی‌ها
 - فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (S)
 - پرشدگی ناپیوستگی‌ها
 - شاخص کیفیت توده سنگ (RQD)
 - آزمایش فشار آب (آزمایش نفوذپذیری لوژون) (WPT)
 - نسبت آب به سیمان (W/C)
- که در مجموع ۵۲۵ داده گردآوری شده است و تمام پارامترهای موردنظر را در ۴۲ پروژه در برمی‌گیرد.



شکل ۱. موقعیت سدهای مورد مطالعه در ایران و جهان

۵- روش محاسبات نرم، سیستم فازی- عصبی (ANFIS)، به کمک نرم‌افزار Matlab هدف تحلیل آماری پیدا کردن ارتباط بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل است. باینکه ضریب همبستگی نشان‌دهنده ارتباط بین دو متغیر است اما زمانی که هدف، اثر یک متغیر بر متغیر دیگر است، نمی‌توان از آن استفاده کرد. از طرفی گاهی تخمین تغییر در یک متغیر با تغییر متغیر دیگر مهم است که بازهم ضریب همبستگی نمی‌تواند تخمینی از این تغییرات ارائه دهد (Esmailian, 2008).

مطالعات و تحلیل‌های موردنظر نیز با روش‌های آماری و محاسبات نرم به شرح زیر انجام شده است:

- ۱- تحلیل رگرسیونی چندمتغیره خطی (LMR)، به کمک نرم‌افزار GraphPad Prism 9
- ۲- تحلیل رگرسیونی چندمتغیره غیرخطی (NLMR)، به کمک نرم‌افزار XLSTAT
- ۳- روش محاسبات نرم، سیستم فازی (FUZZY)، به کمک نرم‌افزار Matlab
- ۴- روش محاسبات نرم، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، به کمک نرم‌افزار Matlab

- سدهای با شکستگی‌های خیلی باز (دارای بازشدگی‌های نامتعارف بیش از ۵۰ میلی‌متر)
 - سدهایی که برای تزریق توده سنگ پی، در ترکیب دوغاب آن عمدتاً از افزودنی ماسه استفاده شده است
- بر این اساس مطابق جدول ۱، تعداد نهایی سدها به ۴۲ سد کاهش پیدا کرد که از این تعداد، ۳۱ سد در ایران، ۸ سد در اروپا، ۲ سد در آمریکا و ۱ سد در آسیای میانه واقع هستند.

به‌منظور استفاده از پارامترهای ژئوتکنیکی و تزریق که در کارگاه‌های حفاری و تزریق به‌دست آمده است، ابتدا داده‌های تعداد سدهای بیشتری از ایران و سایر نقاط جهان گردآوری شد که به‌منظور کسب نتایج بهتر و اطمینان از صحت داده‌های مورد استفاده، تعدادی از سدها به دلایل زیر حذف شدند:

- سدهای با ساختگاه کارستیک شدید

جدول ۱. موقعیت و جنس ساختگاه سدهای مطالعاتی

Row	Dam Name	Location	Rock Type
1	BABA AHMAD	West Azerbaijan	Metagranite and granodiorite
2	BALVABIN	Zanjan	Slate and schist
3	BIDAKAN	Chaharmahal-Bakhtyari	Limestone and shale
4	KANESPI	West Azerbaijan	Metafelsite to schist
5	RUDBAR	Lorestan	Limestone and dolomite
6	TANGAB	Fars	Limestone and marly limestone
7	DARYAN	Kermanshah	Limestone and radiolarite with basalt
8	ABSHINEH	Hamedan	Marly shale with limy shale and sandstone
9	SIAH BISHEH	Mazandaran	Sandstone and siltstone
10	KAROUN III	Khuzestan	Limestone, marly limestone and marl
11	MASJED SOLEYMAN	Khuzestan	Conglomerate, sandstone and mudstone
12	SHAHID RAJAEI	Mazandaran	Sandstone and limestone
13	LATIAN REGULATORY	Tehran	Limestone, dolomitic limestone, shale, siltstone and sandstone
14	MAMLU	Tehran	Conglomerate with marl, sandstone and mudstone
15	HIRVI	Kermanshah	Limestone, radiolarite chert and shale
16	CHAMSHIR	Kohgiluyeh-Buyer Ahmad	Limestone and marl
17	BELBAR	Kordestan	Limestone
18	SIAHOO	South Khorasan	Andesite and basalt
19	HARAT	Yazd	Conglomerate with mudstone
20	SOUMBAR	North Khorasan	Shale, limy marl and sandstone
21	GHEZEL DASH	North Khorasan	Shale, limy marl and sandstone
22	AZAD	Khuzestan	Granite to granodiorite and phyllite
23	AGHBOLAGH	Chaharmahal-Bakhtyari	Limestone
24	SEYMAREH	Ilam	Limestone and dolomitic limestone
25	TALVAR	Zanjan	Limestone and shale
26	VANIAR	East Azerbaijan	Conglomerate with ophiolite rocks
27	ZHAVEH	Kordestan	Slate
28	ZIRDAN	Sistan and Baluchestan	Conglomerate, sandstone and siltstone
29	AZADI	Kermanshah	Shally limestone and marly limestone
30	AGH CHAI	West Azerbaijan	Conglomerate, sandstone and mudstone

IRAN

31	SAFAROOD	Kerman	Sandstone, marl and mudstone
32	SANGTOUDEH II	Tajikistan	Limestone, dolomitic limestone and brecciated limestone
33	MOHNE	Germany	Alternation of folded siltstone and sandstone
34	AABACH	Germany	Alternation of folded siltstone and sandstone
35	HAUNE	Germany	Sandstone
36	ANTRIFT	Germany	Sandstone with siltstone
37	TWISTE	Germany	Sandstone with siltstone
38	TAVERA	Dominican Republic	Conglomerate with siltstone
39	PERUCA	Croatia	Limestone
40	ELCAHON	Honduras	Limestone
41	ASLANTAS	Turkey	Flysh (sandstone and siltstone)
42	KRUPAC	Montenegro	Limestone and dolomite

هیدرولیکی می‌شود (Weaver and Bruce, 2007). مهم است قبل از شروع عملیات اجرایی، ریزدانه‌ی سیمان متناسب با بازشدگی ناپیوستگی‌ها انتخاب گردد؛ بنابراین می‌توان این پارامتر را هم کنار گذاشت.

• نسبت آب به سیمان (W/C)

در گذشته استفاده از نسبت‌های آب به سیمان (W/C) رقیق به غلیظ در طی مدت فرآیند تزریق، رواج داشته است (Ewert, 1985). در این صورت، برای نسبت‌های رقیق به دلیل دانسیته کمتر، به‌کارگیری فشار کمتر و برای نسبت‌های غلیظ به دلیل دانسیته بیشتر، به‌کارگیری فشار بیشتر اجتناب‌ناپذیر بود. در سال‌های اخیر، استفاده از یک نسبت آب به سیمان (W/C) ثابت و پایدار در طول عملیات اجرایی تزریق و متناسب با نیازهای ژئوتکنیکی محل تزریق، به دلایل مزایای زیادی که دارد رو به گسترش است. به‌طور مثال می‌توان به جلوگیری از پُر شدن درزه و شکاف‌ها با آب بجای سیمان، زمانی که خورند سیمان توده سنگ کم یا نسبتاً کم است اشاره کرد. در این صورت با توجه به نیازهای ژئوتکنیکی، یک نسبت غلیظ یا نسبتاً غلیظ انتخاب می‌گردد و با مواد افزودنی شیمیایی روان کننده یا فوق روان کننده، روانی جریان دوغاب و شعاع نفوذ افزایش می‌یابد و از این نظر عملکردی مشابه دوغاب‌های رقیق دارد؛ بنابراین می‌توان نقش این پارامتر را در تعیین فشار تزریق نادیده گرفت.

در ادامه، به‌منظور ایجاد همبستگی بیشتر بین پارامترها و امکان استفاده قابل قبول از تحلیل‌های آماری، تعدادی از پارامترهای مذکور که در تعیین فشار بهینه تزریق نقش مؤثری نداشته یا نقش کمتری دارند، به شرح زیر حذف شدند:

• شیب و سوی شیب ناپیوستگی‌ها

این پارامتر در تعیین فشار تزریق نقشی ندارد، ولی برای طراحی آزمایشات و زاویه گمانه‌های تزریق بر اساس مطالعات درزه نگاری، دارای نقش بسزایی است (Kutzner, 1996).

• پرشدگی ناپیوستگی‌ها

پارامتر پرشدگی در تعیین فشار تزریق مهم است ولی در عملیات حفاری و تزریق، قبل از شروع تزریق می‌بایست با فشار معمولی آب یا جت آب تا حد امکان پرشدگی‌های داخل درزه و شکاف‌های توده سنگ شسته و از مقطع تزریق خارج گردد؛ بنابراین می‌توان از این پارامتر چشم‌پوشی کرد.

• بازشدگی ناپیوستگی‌ها

نقش بازشدگی در فرآیند تزریق، قابلیت پذیرش ذرات سیمان است. تزریق پذیری یک توده سنگ رابطه مستقیم با بازشدگی ناپیوستگی و اندازه دانه سیمان دارد. معمولاً برای اینکه بتوان توده سنگی را تزریق کرد، باید مقدار بازشدگی بزرگ‌تر از ۳ برابر بزرگ‌ترین قطر دانه سیمان باشد. در غیر این صورت، تزریق یا به‌درستی انجام نمی‌شود و یا باید با فشار بیشتر از فشار بهینه تزریق کرد که موجب وقوع پدیده شکست

- در نهایت بعد از پالایش انجام شده، پارامترهای مرحله اول به ۸ پارامتر نهایی و مؤثر در تعیین فشار بهینه تزریق (bar, GP) به شرح زیر تعدیل پیدا کرد:
- عمق تزریق (D)، m
- مقاومت کششی توده سنگ (TS)، MPa
- مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ (UCS_{RM})، MPa
- مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ (MOD)، MPa
- شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI)، -
- فاصله داری ناپیوستگی ها (S)، cm
- کیفیت توده سنگ (RQD)، %
- آزمایش فشار آب (نفوذپذیری لوژون) (WPT)، Lu

۳. نتایج

نرم، به منظور بررسی و نقش آن‌ها در تعیین فشار بهینه تزریق دوغاب سیمان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

محدوده تغییرات پارامترهای ۸ گانه در جدول ۲ نشان داده شده است. بدین ترتیب، مجموع ۵۲۵ داده نهایی برای هر ۸ پارامتر با روش‌های تحلیل رگرسیونی و روش‌های محاسبات

جدول ۲. محدوده تغییرات پارامترهای نهایی

Dam Name	D	TS	UCS _{RM}	MOD	GSI	S	RQD	WPT
	m	MPa	MPa	MPa		cm	%	Lu
Min	2.5	0.01	0.4	742	20	3	12	1
Max	97.5	10.36	135.9	86012	96	300	102	100
Average	35.3	1.13	22	32214	62	53	68	23
STDEV	23.72	1.67	24.8	25906	16	40	17	21

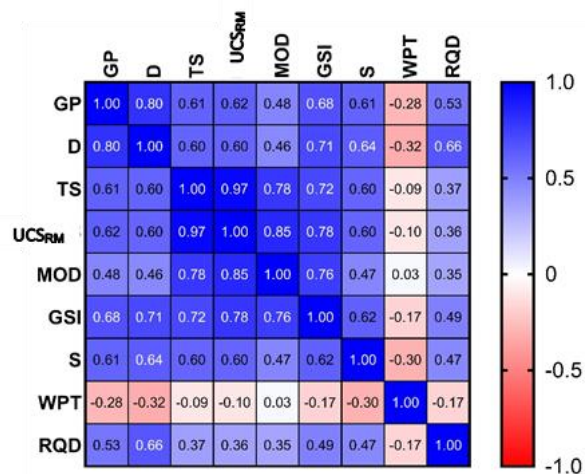
فشار آب (WPT)، کیفیت توده سنگ (RQD) و فشار تزریق (GP) محاسبه گردید که در شکل ۲ نتایج این همبستگی نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است فشار تزریق (GP) به ترتیب بیشترین همبستگی را با پارامترهای عمق (D)، شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI)، مقاومت فشاری توده سنگ (UCS_{RM})، مقاومت کششی توده سنگ (TS) و فاصله داری ناپیوستگی ها (S) دارد.

۳-۱. مدل سازی با روش‌های رگرسیونی

روابط رگرسیونی ممکن است از نوع خطی و یا غیرخطی باشد و تابعی که ارتباط بین متغیرهای مستقل و بین متغیرهای مستقل و وابسته را بیان می‌کند، به تابع رگرسیون موسوم است (Esmailian, 2008).

ابتدا با استفاده از نرم افزار آماری GraphPad Prism 9 میزان همبستگی بین پارامترهای عمق (D)، مقاومت کششی توده سنگ (TS)، مقاومت فشاری توده سنگ (UCS_{RM})، مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ (MOD)، شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI)، فاصله داری ناپیوستگی ها (S)، آزمایش



شکل ۲. موقعیت همبستگی بین پارامترهای منتخب

می‌نمایند. از مهم‌ترین شاخه‌های این محاسبات، می‌توان از منطق فازی (FUZZY)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (AAN)، سیستم استنتاج تطبیقی فازی - عصبی (ANFIS) و الگوریتم ژنتیک نام برد.

۳-۲. مدل‌سازی با روش‌های محاسبات نرم

روش‌های محاسبات نرم یا هوش مصنوعی، دسته‌ای از الگوریتم‌ها می‌باشند که راه‌حل‌های خلاقانه‌ای را، جدای از روش‌های کلاسیک موجود، برای پاسخ دادن به مسائل ارائه

GraphPad Prism 9، مدل رگرسیون چندمتغیره خطی ساخته شد که نتایج آن با عنوان نتایج مدل شماره ۱ در جدول ۳ نشان داده شده است.

۴. بحث

۴-۱. برآورد فشار تزریق با مدل رگرسیون چندمتغیره خطی (LMR)

این مدل میزان وابستگی یک متغیر مستقل به چند متغیر وابسته دیگر را نشان می‌دهد. با استفاده از نرم‌افزار آماری

جدول ۳. خلاصه نتایج رگرسیون مدل شماره ۱

Parameter	Variable	Estimate	Standard error	¹ VIF	² P value	P value summary
β_0	Intercept	-0.7897	1.781		0.6577	ns
β_1	D, (m)	0.242	0.02013	3.488	<0.0001	****
β_2	TS, (MPa)	0.1189	0.7523	24.04	0.8744	ns
β_3	UCSRM, (MPa)	0.07406	0.06119	35.1	0.2266	ns
β_4	MOD, (MPa)	-3.66E-05	2.17E-05	4.843	0.0929	ns
β_5	GSI, (-)	0.09543	0.03491	4.755	0.0065	**
β_6	S, (cm)	0.01776	0.009181	2.068	0.0537	ns
β_7	WPT, (Lu)	-0.01539	0.01332	1.24	0.2485	ns
β_8	RQD, (%)	0.01199	0.02032	1.924	0.5555	ns
R^2			0.685			
RMSE			5.807			

¹Variance inflation factor

²Significant probability

داشته و خودهمبستگی دارند می‌توان یکی از آن‌ها را حذف کرد. مدل رگرسیونی ساخته شده با ضریب تعیین $R^2=0/685$ مدل نسبتاً خوبی است و با این متغیرها امکان پیش‌بینی GP به میزان حدود ۶۸/۵ درصد وجود دارد. با توجه به موارد اشاره شده، با حذف متغیرهایی که معنی‌دار نیستند و یا خودهمبستگی دارند، مدل جدیدی با عنوان مدل شماره ۲ ساخته شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

در مدل ساخته شده، فشار تزریق (GP)، متغیر وابسته است. بر اساس نتایج به دست آمده در جدول ۱، متغیرهای D و GSI از صفر اختلاف معنی‌دار داشته و در مدل و متغیر وابسته یعنی GP تأثیر معنی‌دار دارند ولی بقیه متغیرها از صفر اختلاف معنی‌داری ندارند. متغیر S با مقدار $P=0/0537$ نزدیک به سطح معنی‌داری است. از نظر خودهمبستگی، متغیرهای دارای مقادیر کمتر از ۵، خودهمبستگی ندارند و مستقل هستند. لذا چون متغیرهای TS و UCS_{RM} با یکدیگر ارتباط معنی‌دار

جدول ۴. خلاصه نتایج رگرسیون مدل شماره ۲

Parameter	Variable	Estimate	Standard error	VIF	P value	P value summary
β_0	Intercept	-0.1688	1.423		0/9056	ns
β_1	D, (m)	0.2607	0.0164	۲/۳۰۹	<0/0001	****
β_2	UCS_{RM} , (MPa)	0.05197	0.01715	۲/۷۵۰	0/0026	**
β_3	GSI, (-)	0.06996	0.02973	۳/۴۴۰	0/0190	*
β_4	S, (cm)	0.02184	0.008911	۱/۹۴۳	0/0146	*
R^2			0.682			
RMSE			5.837			

نسبت به مدل شماره ۱ با ۸ متغیر ارجحیت دارد و به عنوان مدل برتر برای انجام تحلیل‌های بعدی با روش رگرسیونی غیرخطی و روش‌های محاسبات نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج مقایسه بین مدل‌های ۱ و ۲ در جدول ۵ قابل مشاهده است.

بر اساس نتایج جدول ۲، همه متغیرها از صفر اختلاف معنی‌دار داشته و بر روی متغیر وابسته GP دارای اثر معنی‌دار هستند. از نظر خودهمبستگی نیز، همه متغیرها مستقل هستند و با یکدیگر ارتباط معنی‌دار ندارند. مدل رگرسیونی ساخته شده با ضریب تعیین $R^2=0/682$ مدل نسبتاً خوبی است. در مجموع، مدلی خوب است که R^2 بالا اما تعداد متغیرهای کمتری داشته باشد. به همین دلیل مدل شماره ۲ با ۴ متغیر

جدول ۵. نتایج مقایسه بین مدل‌های ۱ و ۲

Parameter	Model 1	Model 1
Variable number	8	4
Significant	Mostly NO	YES
VIF	YES	NO
R^2	0.685	0.682

که در آن a_0 عرض از مبدأ و پارامترهای a_1, a_2, \dots, a_n ضرایب رگرسیونی هستند. در نهایت با توجه به نتایج جدول ۲، برای تخمین GP به روش LMR معادله شماره ۲ ارائه شده است: (رابطه ۲)

ارتباط خطی بین متغیرهای مستقل x_1, x_2, \dots, x_n و متغیر Y در مدل LMR، به صورت معادله شماره ۱ است:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + e \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$GP = -0.1688 + 0.2607(D) + 0.05197(UCS_{RM}) + 0.06996(GSI) + 0.02184(S)$$

که در آن GP فشار تزریق، D عمق، UCS_{RM} مقاومت فشاری تک‌محوری توده سنگ، GSI شاخص مقاومت زمین‌شناسی و

S فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها است.

۴-۲. برآورد فشار تزریق با مدل رگرسیون چندمتغیره غیرخطی (NLMR)

فرمول خاصی وجود ندارد؛ بلکه به کمک روش‌های عددی صورت می‌گیرد (Esmailian, 2008).

در بسیاری از موارد، مدل‌های رگرسیون خطی پاسخگوی مناسبی برای تغییرات بین متغیرها نیست (Goldasteh et al., 1998). رگرسیون غیرخطی، روشی برای یافتن مدلی غیرخطی میان متغیر وابسته و مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل است. برخلاف رگرسیون خطی سنتی که محدود به مدل‌های خطی است، در رگرسیون غیرخطی می‌توان مدل‌هایی با ضابطه دلخواه بین متغیرهای مستقل و وابسته برقرار کرد. به لحاظ تنوع بیش‌ازحد مدل‌های غیرخطی برای برآورد پارامترها،

در بخش ۴-۱، مدل شماره ۲ بهترین کارایی را در تحلیل رگرسیونی چندمتغیره خطی نشان داد و برای استخراج و ساخت روابط غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT به‌کاربرده شد. پس از ساخت چندین مدل غیرخطی با روابط مختلف، بهترین نتیجه از معادله شماره ۳ به دست آمد:

$$Y = pr_1 + pr_2 x_1 + pr_3 x_1^2 + \dots \quad (\text{رابطه ۳})$$

در ادامه، نتایج مدل ساخته‌شده به روش رگرسیون چندمتغیره غیرخطی با استفاده از معادله شماره ۳ و مقدار پارامترهای مدل، به ترتیب در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. خلاصه نتایج آماری رگرسیون غیرخطی

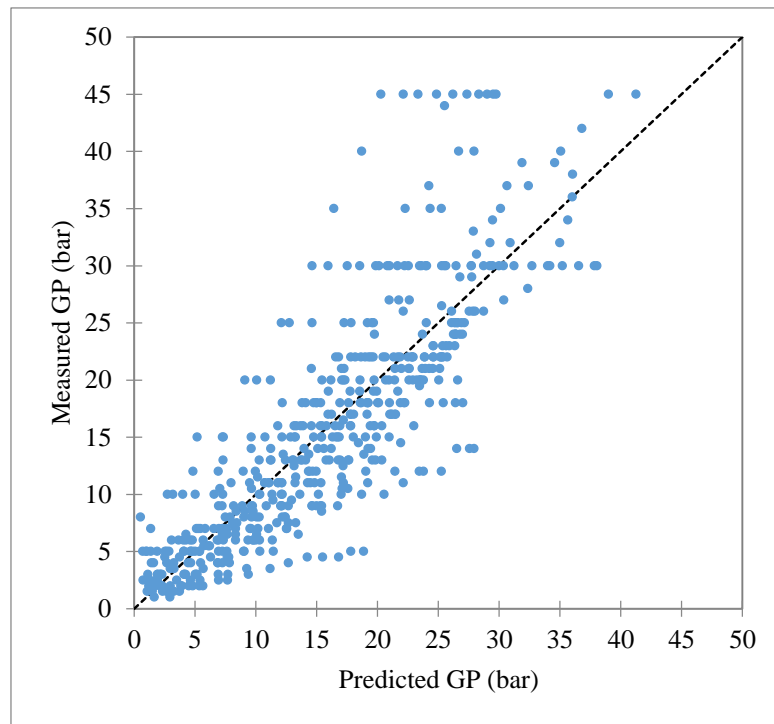
Variable	Observations	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation
GP, (bar)	525	1.000	45.000	15.695	10.345
D, (m)	525	2.500	97.500	35.300	23.718
UCS _{RM} , (MPa)	525	0.400	135.855	21.976	24.754
GSI, (-)	525	20.000	95.524	62.447	15.968
S, (cm)	525	3.000	300.000	52.672	40.044
R ²			0.722		
RMSE			5.499		

جدول ۷. مقدار پارامترهای مدل ساخته‌شده در روش رگرسیون غیرخطی

Parameter	Value	Standard error
pr1	4.010	3.467
pr2	0.477	0.039
pr3	-0.015	0.047
pr4	-0.215	0.127
pr5	0.095	0.019
pr6	-0.003	0.000
pr7	0.001	0.000
pr8	0.002	0.001
pr9	-0.0003	0.00008

در مقابل GP های پیش‌بینی شده نشان داده شده است. از آنجایی که مدل نسبتاً نامنظم و تصادفی است، می‌توان ادعا نمود که مدل خوب بوده و تأییدکننده $R^2=0.722$ است.

در مدل ساخته شده بر اساس نتایج جدول ۴، ضریب تعیین $R^2=0.722$ به دست آمده است که در مقایسه با روش رگرسیون خطی مدل بهتری است. در شکل ۳ نمودار GP های واقعی



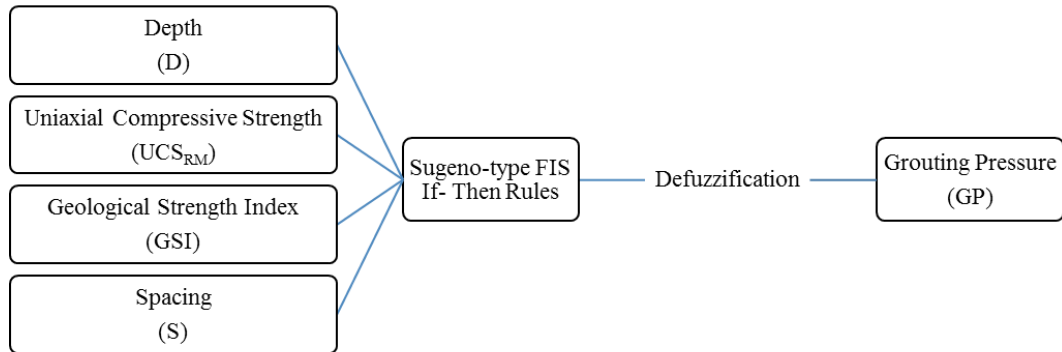
شکل ۳. نمودار تغییرات GP های اندازه‌گیری شده در مقابل GP های پیش‌بینی شده

در نهایت با توجه به نتایج جدول ۵، برای تخمین GP به روش NLMR معادله شماره ۴ ارائه شده است:

$$GP=4.01+0.477(D)-0.015(UCS_{RM})-0.215(GSI)+0.0951(S)-0.003(D^2)+0.0007(UCS_{RM}^2)+0.002(GSI^2)-0.0003(S^2)$$

استفاده شده است. تصویر گرافیکی یک سیستم استنتاج فازی نوع سوگنو در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳-۴. برآورد فشار تزریق با به‌کارگیری سیستم فازی مهم‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های مبتنی بر منطق فازی و استدلال فازی، مدل‌های ممدانی و سوگنو هستند. در این مطالعه از سیستم استنتاج فازی نوع سوگنو برای تعیین GP



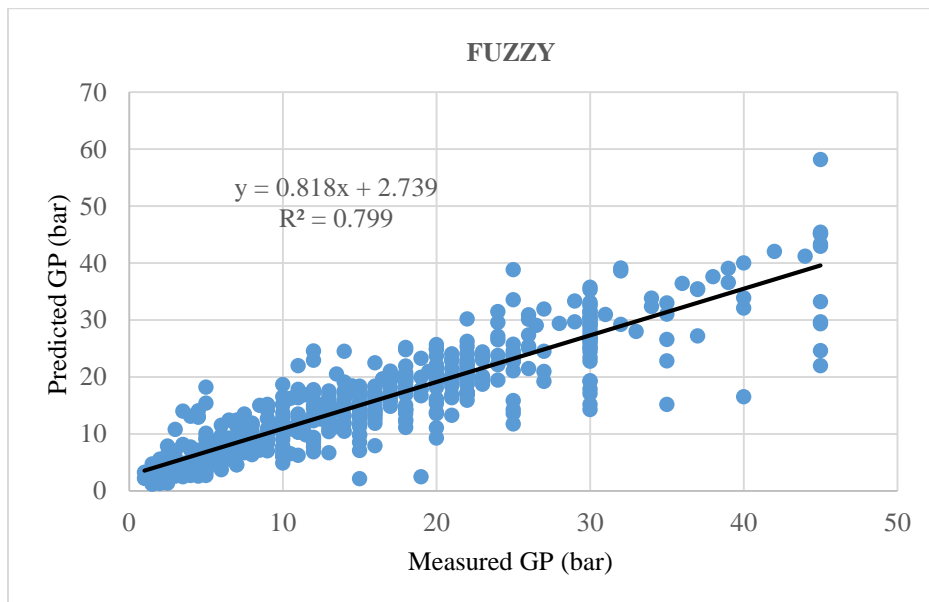
شکل ۴. تصویر ترسیمی یک سیستم استنتاج فازی نوع سوگنو

مشخصات مدل فازی ساخته شده برای تخمین مقدار فشار موردنیاز تزریق در جدول ۸ آورده شده است. این مدل دربردارنده چهار ورودی و یک خروجی آن هم فشار تزریق (GP) می باشد. در این مدل از ۶۲۵ قانون فازی استفاده شده است.

جدول ۸. مقدار پارامترهای مدل ساخته شده در روش فازی

NumInputs	NumOutputs	NumRules	AndMethod	OrMethod	ImpMethod	AggMethod	DefuzzMethod
4	1	625	prod	probor	prod	sum	wtaver

در تحلیل های سیستم فازی، بهترین مدل با استفاده از پارامترها برای تخمین GP از میان مدل هایی که ساخته شده اند، با ضریب تعیین $R^2=0.799$ و $RMSE=4/61$ در شکل ۵ ارائه شده است.

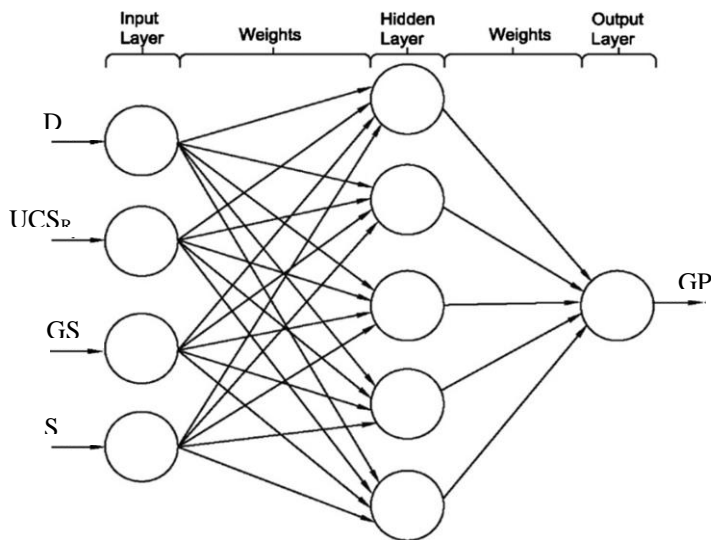


شکل ۵. رابطه بین GP پیش بینی شده و اندازه گیری شده (برحسب بار) در مدل فازی

۴-۴. برآورد فشار تزریق با به کارگیری شبکه عصبی

از لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و لایه خروجی تشکیل شده است. در شکل ۶ ساختار یک شبکه عصبی نشان داده شده است.

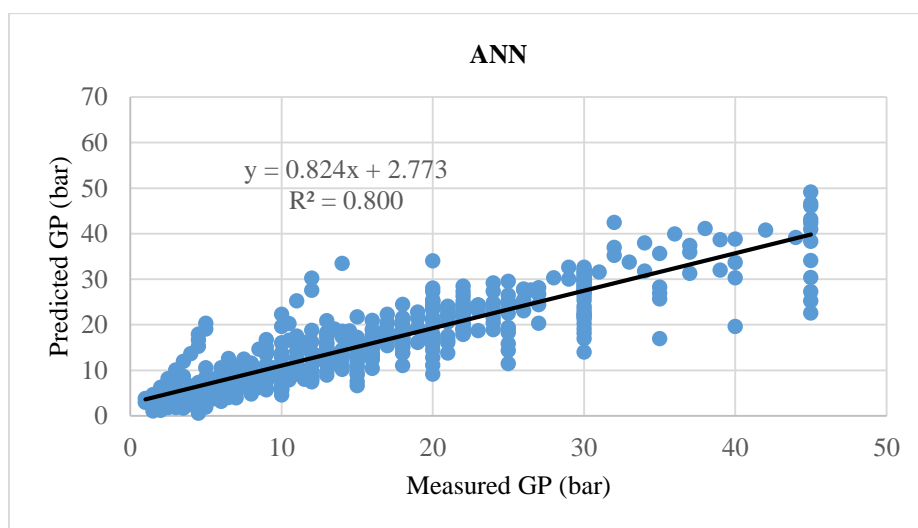
شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل‌های ریاضی هستند که از گره‌های پردازش به هم پیوسته (نرون‌ها) تحت یک توپولوژی (لایه‌ها) از پیش تعیین شده تشکیل شده‌اند. معمولاً نرون‌ها در لایه‌های موازی کار می‌کنند و یک توپولوژی شبکه معمولی،



شکل ۶. ساختار شبکه عصبی مورد استفاده در این مطالعه

با ضریب تعیین $R^2=0/8$ و $RMSE=4/53$ در شکل ۷ ارائه شده است.

در تحلیل‌های شبکه عصبی، بهترین مدل با استفاده از پارامترها برای تخمین GP از میان مدل‌هایی که ساخته شده‌اند،



شکل ۷. رابطه بین GP پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (برحسب بار) در مدل شبکه عصبی

- عصبی (نروفازی ANFIS)

تعیین شده ایجاد کند. قوانین if-then مدل استنتاج فازی سوگنو اغلب برای به دست آوردن استنتاج مدل نادقیق استفاده می شود. در سیستم نامعین می توان نتیجه گیری کرد که بهتر از تجربه بشری است. بر اساس جفت داده های آموزشی ورودی-خروجی تعیین شده توسط توابع عضویت مناسب، این قوانین if-then تولید می شوند.

ANFIS از فرآیند آموزش عصبی برای تنظیم تابع عضویت و پارامتر مرتبط با مجموعه داده های مورد نظر استفاده می کند (Wu et al., 2009; Maiti and Tiwari, 2014).

در این پژوهش از الگوریتم استنتاج فازی سوگنو برای ساخت سیستم های فازی-عصبی استفاده شده است. مقدار پارامترهای مدل ساخته شده نیز در جدول ۹ ارائه شده است.

۴-۵. فشار تزریق با به کارگیری سیستم استنتاج تطبیقی فازی سیستم استنتاج تطبیقی فازی - عصبی شامل بخش هایی از سیستم فازی معمولی خبره می باشد که محاسبات در هر مرحله به وسیله لایه های پنهان نرون و توانایی یادگیری شبکه عصبی ایجاد شده است تا اطلاعات سیستم را افزایش دهد (Fathipour Azar et al., 2011). مدل سازی فازی عصبی به روش استفاده از تکنیک های مختلف یادگیری توسعه یافته در شبکه عصبی برای یک سیستم استنتاج فازی اشاره دارد. Jang (۱۹۹۳) یک الگوریتم ANFIS را پیشنهاد کرد که بر اساس مدل استنتاج فازی سوگنو به نام مدل ANFIS است (Jang, 1993).

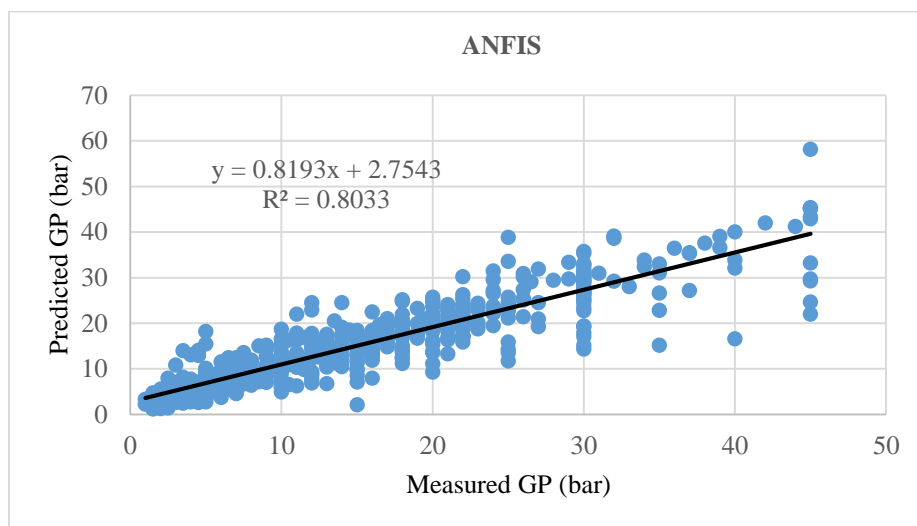
ANFIS می تواند یک نگاشت ورودی-خروجی را بر اساس قوانین if-then فازی و جفت داده های ورودی-خروجی

جدول ۹. مقدار پارامترهای مدل ساخته شده در روش فازی - عصبی

Number of nodes	1297
Number of linear parameters	3125
Number of nonlinear parameters	60
Total number of parameters	3185
Number of training data pairs	425
Number of testing data pairs	100
Number of fuzzy rules	625
Minimal training RMSE	2.87

که ساخته شده اند، با ضریب تعیین $R^2=0/803$ و $RMSE=4/63$ در شکل ۸ ارائه شده است.

در تحلیل های سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی، بهترین مدل با استفاده از پارامترها برای تخمین GP از میان مدل هایی



شکل ۸. رابطه بین GP پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (برحسب بار) در مدل فازی - عصبی

۵. مقایسه کارایی مدل‌ها

بررسی چگونگی عملکرد و مقایسه قدرت پیش‌بینی برای ارزیابی کارایی روابط و مدل‌ها، لازم و ضروری است. بدین منظور در این پژوهش علاوه بر ترسیم نمودارهای مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر تخمین زده شده توسط مدل‌ها، شاخص‌های زیر بکار گرفته شده است:

۱- ضریب تعیین (R^2): معیاری بدون بعد و دامنه آن بین صفر تا یک در نوسان است. برای بررسی این موضوع که متغیر مستقل تا چه اندازه توانسته تغییرات متغیر وابسته را تبیین کند از ضریب تعیین استفاده می‌شود.

۲- کمترین خطای جذر میانگین مربعات (RMSE): بعد این شاخص در مدل‌های ارائه شده بار (bar) بوده و برای محاسبه کارایی مدل‌های پیش‌بینی کننده بسیار مفید است.

این معیارها برای ارزیابی کارایی مدل‌های ارائه شده محاسبه شده‌اند. اگر R^2 برابر یک و RMSE برابر صفر شود، مدل بسیار عالی خواهد شد (Erzin and Cetin, 2012). نتایج تحلیل‌های رگرسیون چندمتغیره خطی و غیرخطی، سیستم فازی، شبکه عصبی و سیستم فازی-عصبی برای تخمین فشار تزریق (GP) در جدول ۱۰ ارائه شده است.

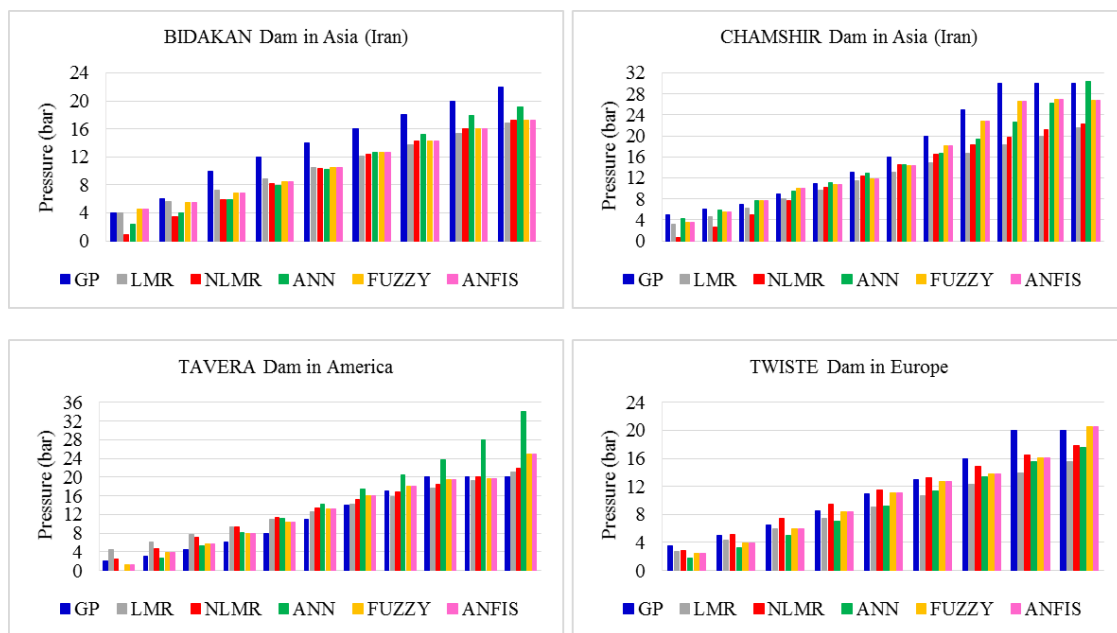
همان‌طور که در جدول ۱۰ مشخص است، ضرایب تعیین در تمامی مدل‌های ساخته شده با روش‌های محاسبات نرم در مقایسه با روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی، افزایش پیدا کرده‌اند و خطای جذر میانگین مربعات آن‌ها کاهش یافته است. در روش‌های محاسبات نرم نیز مدل ساخته شده با سیستم فازی-عصبی با اختلاف خیلی کمی نسبت به دو روش دیگر کارایی بهتری دارد.

جدول ۱۰. مقایسه کارایی مدل‌های رگرسیونی و محاسبات نرم برای تخمین فشار بهینه تزریق

Row	Analysis method		Coefficient of determination (R^2)	Root mean square error (RMSE)
1	Regression methods	LMR	0.685	5.807
2		NLMR	0.722	5.499
3	Soft computing methods	FUZZY	0.799	4.61
4		ANN	0.80	4.53
5		ANFIS	0.803	4.47

و فشارهای تزریق واقعی و مقادیر فشار تزریق تخمین زده شده توسط مدل‌های رگرسیونی (خطی و غیرخطی) و روش‌های محاسبات نرم (شبکه عصبی، فازی و فازی-عصبی) باهم مقایسه شده‌اند که نتایج این بررسی‌ها در شکل ۹ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، می‌توان بین داده‌های تزریق و داده‌های زمین‌شناسی مهندسی با فشار تزریق، همبستگی و ارتباط خوبی برقرار نمود. برای مقایسه و تحلیل کارایی مدل‌ها در سدهای مورد مطالعه، چهار سد بیدکان، چم شیر، TAVERA و TWISTE از جدول ۱ که در مناطق جغرافیایی مختلف واقع هستند، انتخاب گردید



شکل ۹. مقایسه فشار تزریق اندازه‌گیری شده (GP) در اعماق مختلف با فشار تزریق پیش‌بینی شده با روش‌های رگرسیونی و محاسبات نرم

با دقت در شکل ۹ می‌توان دریافت که روش رگرسیون خطی در سد بیدکان و در فشارهای تزریق کم، تخمین نزدیک‌تری به واقعیت داشته است و با افزایش فشار تزریق خطای مدل بیشتر شده است. در حالیکه روش رگرسیون غیرخطی کاملاً برعکس، در فشارهای تزریق پایین اختلاف مقادیر تخمین زده شده توسط مدل زیاد بوده و در فشارهای تزریق بیشتر به مقدار واقعی نزدیک‌تر شده است. در مورد روش‌های محاسبات نرم، روش شبکه عصبی، تمام تخمین‌ها در فشارهای تزریق مختلف از مقدار واقعی با نسبت تقریباً ثابتی کمتر می‌باشد. در مورد روش‌های فازی و فازی-عصبی نیز با توجه به استفاده از قوانین فازی نزدیک به هم و الگوریتم

استنتاج فازی مشابه خروجی مدل‌ها به هم نزدیک هستند. در این دو مدل علیرغم اینکه در فشارهای تزریق کم اختلاف خروجی‌ها با مقادیر واقعی کم است در مقادیر متوسط فشار اختلاف‌ها بیشتر شده و در فشارهای بیشتر اختلاف بین خروجی مدل‌ها و مقادیر واقعی فشار تزریق کمتر شده است. در مورد سد بیدکان تمامی مدل‌ها به سبب مقادیر خاص پارامترهای ورودی، دچار کمی برآورد (Under Estimating) شده‌اند. در مورد سد چم شیر نیز عملکرد مدل‌های رگرسیونی تقریباً مشابه سد بیدکان است با این تفاوت که مدل غیرخطی در فشارهای تزریق متوسط تخمین‌های نزدیک به واقعیت داشته

داشته و بقیه مدل‌ها مقادیر فشار تزریق را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند. در عمق زیاد مجدداً تمامی مدل‌ها فشاری بیش از فشار واقعی به دست داده‌اند.

رگرسیون خطی در سد TWISTE مانند سد بیدکان و چم شیر در فشارهای کم تخمین نزدیک‌تری به واقعیت داشته است. در فشارهای کم و متوسط روش رگرسیون غیرخطی مقادیر بیشتر و در فشارهای زیاد مقادیر کمتری از واقعیت به دست داده است. روش‌های محاسبات نرم، به جز فشارها و عمق زیاد، در این سد دچار کمی برآورد شده‌اند. در این میان روش شبکه عصبی خطای بیشتری از خود نشان داده است.

- از بین همه روش‌های رگرسیونی و روش‌های محاسبات نرم، مدل ساخته‌شده به روش سیستم فازی - عصبی دارای بیشترین R^2 و کمترین RMSE بوده است و نسبت به همه مدل‌ها کارایی بهتری دارد.

- در روش فازی - عصبی، ترکیب مکانیزم یادگیری سیستم عصبی و استنتاج فازی باعث شده است تا با استفاده از داده‌های یادگیری متغیرهای D، UCS_{RM}، GSI و S، مدل بتواند بهترین خروجی فشار تزریق را تخمین بزند. این روند باعث شده است تا این روش بهترین نتایج را برای داده‌های مورد استفاده در این مطالعه به دست دهد. این در حالی است که استفاده از این مدل در تحلیل داده‌های دیگر غیر از داده‌های مذکور نمی‌تواند نتایج به‌دست‌آمده را تکرار کند.

- نقطه ضعف مطرح‌شده برای سیستم فازی - عصبی، برای شبکه عصبی نیز مصداق دارد چون در این روش نیز وابستگی نتایج به داده‌های یادگیری واضح است و مدل‌های ساخته‌شده با این روش نیز در مواجهه با داده‌های غیر از داده‌های بکار برده شده در مدل دچار خطا شده و نتایج به‌دست‌آمده از مطلوبیت کمتری برخوردار خواهد شد.

- در مورد سیستم فازی، هرچند نتایج به‌دست‌آمده از نتایج سیستم فازی - عصبی مطلوبیت کمتری دارد ولی به سبب استفاده از قوانین فازی در سیستم فازی که با استفاده از تجربه

است. از میان روش‌های محاسبات نرم، روش شبکه عصبی در این سد کارایی بهتری داشته و مقادیر تخمین زده‌شده توسط این مدل در اغلب فشارهای تزریق به مقدار واقعی نزدیک‌تر بوده است. در این سد نیز در اغلب فشارها تمامی مدل‌ها دچار کمی برآورد شده‌اند و فقط مدل‌های محاسبات نرم در فشارهای حدود ۸ و ۱۰ بار دچار بیش برآورد شده‌اند.

در سد TAVERA عملکرد مدل‌ها با بقیه سدها متفاوت است. در فشارهای کم و متوسط تقریباً تمامی مدل‌ها مقادیر فشار تزریق را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده‌اند. در فشارهای بیشتر این روند فقط در روش شبکه عصبی ادامه

۶. نتیجه‌گیری

با وجود اهمیت میزان فشار لازم در فرایند تزریق، هنوز هیچ مبنای ثابت و قابل قبولی بین متخصصین برای تعیین فشار بهینه در عمل و نظر ارائه نشده است و برآورد فشار تزریق به‌صورت کاملاً تجربی و توسط پیمانکاران در کارگاه‌ها تعیین می‌شود. در این تحقیق از ۴۲ کارگاه حفاری و تزریق در پروژه‌های سدسازی انجام‌شده در ایران و برخی کشورهای دیگر، داده‌های تزریق و داده‌های زمین‌شناسی مهندسی (درمجموع ۵۲۵ داده) برای هر پارامتر جمع‌آوری گردید. سپس با روش‌های آماری رگرسیون چندمتغیره خطی و غیرخطی و روش‌های فازی، عصبی و فازی - عصبی، نقش پارامترهای مذکور در تعیین فشار بهینه تزریق بررسی و مطالعه شد که خلاصه یافته‌های به‌دست‌آمده از تحقیق به شرح زیر است:

- نتایج نشان داد که در همه مدل‌های ساخته‌شده، پارامتر عمق (D)، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) و مقاومت فشاری توده سنگ (UCS_{RM})، به ترتیب بیشترین نقش را در تعیین فشار تزریق بهینه (GP) دارند.

- از بین روش‌های محاسبات نرم، مدل ساخته‌شده به روش سیستم فازی - عصبی با ضریب تعیین $R^2=0/803$ و $RMSE=4/47$ در مقایسه با روش‌های سیستم فازی و شبکه عصبی با اختلاف خیلی کمی مدل بهتری به دست داده است.

- کارایی و عملکرد مناسب مدل‌های مختلف که با استفاده از روش‌های متفاوت به دست آمده‌اند در سدهای مختلف بسیار متفاوت می‌باشد. این تفاوت به کیفیت داده‌های به دست آمده، مخصوصاً در مورد تمامی پارامترهای مورد استفاده در مدل، ویژگی‌های زمین‌شناسی مناطق مورد مطالعه که تأثیر غیرمستقیم بر عملیات تزریق دارند و نیز میزان تجربه عملی افراد سازنده مدل بخصوص در روش فازی بستگی دارد.

کاربر و نیز نتایج مطالعات سایرین تدوین می‌گردد، داده‌های ورودی مدل که با خطا همراه است، مدیریت شده و تأثیر کمتری بر خروجی مدل خواهد گذاشت. به بیان دیگر چون ورودی سیستم فازی، اعداد فازی است و در خروجی آن نیز مجموعه‌های فازی منظور شده است و نیز قوانین فازی با استفاده محدودی‌های خاصی از مقادیر ورودی اقدام به انتخاب خروجی می‌نمایند، در نتیجه مدل انعطاف بیشتری از خود نشان داده و با استفاده از داده‌های غیر از داده‌های بکار رفته در مدل، نتایج مناسبی به دست می‌دهد.

منابع

- Bakhshandeh Amnieh, H., Masoudi, M., 2017. Predicting the Occurrence of Hydraulic Fracturing in Grouting Operations Based on the Pressure in the Penetrated Cement Grout. *International Journal of mining and Geo-Engineering* 51 (2): 113-118.
- Dou, J., Zhang, G., Chen, A., Yang, B., 2020. Grouting experiment in a completely weathered granite dam abutment: case study on grouting technique and test analysis. *Environmental Earth Sciences* 79.
- Erzin, Y., Cetin, T., 2012. The use of neural networks for the prediction of the critical factor of safety of an artificial slope subjected to earthquake forces. *Scientia Iranica* 19 (2): 188-194.
- Esmailian, M., 2008. *SPSS 14 Comprehensive Guide (in Persian)*. Tehran: dibagaran.
- Ewert, F.K., 1985. *Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Fathipour Azar, H., Choupani, N., Afshin, H., 2011. Estimating fracture energy of concrete (GF) using adaptive neuro-fuzzy inference system (in Persian). *CONCRETE RESEARCH Quarterly Journal* 4 (2): 7-16.
- Gholamzadeh, M., Masoudi, M., Soltani Mohammadi, S., 2015. Analysis of grout pressure in grouting stages of dam structure to achieve optimum pressure. *AmirKabir Journal of Science & Research Civil and Environmental Engineering* 47 (3): 1-4.
- Goldasteh, A., Mirkarimi, A.S., Khodarahmi, M., Torabi, M., Asghari, R., 1998. *SPSS 6.0 User Guide (in Persian)*. Vol. 2. Tehran: Hami.
- Groundy, F., 1995. The Treatment by Grouting of Permeable Foundation of Dams. *Proc. 5th cong. On larg dams*. 647-674.
- Houlsby, A.C., 1992. Grouting in Rock masses. Chap. 17 in *Engineering in Rock Masses*, edited by F G Bell, 334-350. London: Butterworth Heinemann.
- Jang, J.S.R., 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 23 (3): 665-685.
- Karbala, M.A., Katibeh, H., 2010. *Cement Grouting in Rock*. Ahwaz: Tarava.
- Khoshbaresh, A., 2005. *Karun 3 dam and power plant- Drilling and Grouting*. Tehran.
- Kutzner, C., 1996. *Grouting of Rock and Soil*. A.A.Balkema, Brookfield.
- Lombardi, G., 2003. Grouting of rock masses. *3rd International Conference on Grouting and Grout Treatment*. 1-42.
- Ma, X., Zhang, L., Zhou, J., 2020. Experimental Study on the Relationship Between Grouting Pressure and Compressive Strength of Hardened Cement Paste. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 44.
- Maiti, S., Tiwari, R.K., 2014. A comparative study of artificial neural networks, Bayesian neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system in groundwater level prediction. *Environmental earth sciences* 71: 3147-3160.

-
- Ministry of Energy., 2009. Guide to the improvement of dam foundations (Journal No. 338-a). Tehran, March.
- Mohammadi, S.D., Sadeghi, A., 2021. Seal grouting operation of slate and schist rock masses of Zanjan Balvabin Dam site, Northwest of Iran. *Geomechanics and Geoengineering*.
- Mortazavi, A., Maadikhah, A., 2016. An investigation of the effects of important grouting and rock parameters on the grouting process. *Geomechanics and Geoengineering* 11 (3): 219-235.
- Wang, H., Liu, Q., Sun, S., Zhang, Q., Li, Z., Zhang, P., 2020. Damage Model and Experimental Study of a Sand Grouting-Reinforced Body in a Seawater Environment. *Water*.
- Weaver, K., Donald, B., 2007. *Dam Foundation Grouting*. American Society of Civil Engineering.
- Wu, J.D., Hsu, C.C., Wu, G.Z., 2009. Fault gear identification and classification using discrete wavelet transform and adaptive neuro-fuzzy inference. *Expert Systems with Applications* 36 (3): 6244-6255.
- Zhang, B.S., Yan, G.C., Guo, J.Q., 2020. A robust controlling methodology for a grouting process. *Automatika* (Taylor & Francis).
- Zhang, W., Wu, F., Han, C., Li, X., Peng, P., Ren, Q., Yang, F., Zhang, D., 2022. Criterion of Grouting Pressure in Regional Advance Grouting Treatment to Prevent Water Disaster from Karst Aquifers in Coal Seam Floors. *ACS Omega* 29274-29286.
- Zhu, G., Zhang, Q., Lin, X., Liu, R., Zhang, L., Zhang, J., 2020. Analysis of the Sealing Mechanism of Cement-Sodium Silicate Grout in Rock Fractures with Flowing Water. *Water*.