Archive of SID

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۵)
دوره ی ۲ - ۳۲، شماره ی ۲/۱، ص. ۱۱۹-۱۲۸، (یادداشت فنی)

Research Note

بررسی و مقایسه‌ی مدل‌های تحلیلی، عددی و شبکه‌ی عصبی در پیش‌بینی حجم دوغاب تزریق‌یافته در ساخت‌گاه سد سیمره

حسن بخشنده امنیه* (دانشیار)
دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
مجید مسعودی (دانشجوی دکتری)
گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

عملیات تزریق، یکی از راه‌های کاهش نشت آب، افزایش مقاومت، و تحکیم سنگ درزه‌دار در ساخت‌گاه‌هاست. یکی از مسائل مهم، برآورد حجم دوغاب تزریق‌یافته است، که موجب افزایش بازده عملیات می‌شود. در این پژوهش از ۵ مدل تحلیلی، مدل‌سازی عددی، و شبکه‌ی عصبی[1] برای پیش‌بینی حجم دوغاب استفاده شده‌است. با استفاده از نتایج حفاری‌های ژئوتکنیکی و تزریق آزمایشی در ساخت‌گاه سد سیمره، محاسبات خورند توسط مدل‌های تحلیلی و نیز مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار UDEC انجام شده است. نتایج مدل‌های تحلیلی و عددی در مقایسه با خورند واقعی، برآورد ضعیف‌تری از حجم دوغاب ارائه داده‌اند. در نتیجه از روش شبکه‌ی عصبی استفاده شده است. مطالعات نشان داده است که از میان مدل‌های تحلیلی، مدل لمباردی (۱۹۸۵)، برآورد بهتری از حجم دوغاب نشان می‌دهد و مدل‌سازی عددی در مقایسه با مدل‌های تحلیلی، تخمین بهتری ارائه می‌دهد. همچنین مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و عددی با روش شبکه‌ی عصبی نشان داده است که این روش دقیق‌ترین و بهترین پیش‌بینی از حجم دوغاب سیمانی را ارائه می‌دهد و استفاده از آن در تخمین خورند دوغاب در سایر ساخت‌گاه‌ها پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: مدل‌های تحلیلی، مدل‌سازی عددی، شبکه‌ی عصبی، دوغاب سیمانی، برآورد خورند، سد سیمره.

hbakhshandeh@ut.ac.ir
masoudimajid@gmail.com

۱. مقدمه

تزریق دوغاب سیمانی به درون سنگ درزه‌دار فرایندی است که به علت طبیعت پیچیده‌ی زمین، پیش‌بینی و محاسبه‌ی دقیق پارامترهای حجم دوغاب لازم برای تزریق، و شعاع نفوذ آن به سادگی ممکن نیست. به منظور شناخت هر چه بیشتر پارامترهای ذکرشده، ساده‌سازی وضعیت هندسی سنگ و شرایط نفوذ دوغاب امری‌لازم است.[1] برای این‌منظور، درزه‌های سنگ که مسیرهای عبور جریان تزریقی هستند، با دیسک‌های مدور و بازشدگی معادل با میانگین درزه‌ها، شبیه‌سازی می‌شوند. این دیسک‌ها بسته به اینکه فقط قابلیت انتقال آب را دارند و یا اینکه به‌علت بازشدگی بیشتر، توانایی عبور دوغاب سیمانی را نیز داشته باشند، به‌ترتیب به دیسک‌های آب‌بر و تزریق‌پذیر موسوم هستند.[2] گمانه‌ی تزریق، در مرکز دیسک فرض می‌شود و شعاع دیسک برابر با شعاع تأثیر عملیات تزریق است.[3]

دوغاب سیمانی استفاده‌شده در عملیات تزریق به‌عنوان یک سیال بینگهامی شناخته می‌شود. در نتیجه خصوصیات رئولوژیکی دوغاب، شامل: گرانروی و تنش تسلیم، کنترل‌کننده‌ی خصوصیات رفتاری آن خواهند بود. خصوصیات گرانروی، سرعت جریان دوغاب، و تنش تسلیم، بیشترین مسافت نفوذ دوغاب در گمانه در فشار تزریق معین و بازشدگی ثابت درزه را کنترل می‌کنند.[4] بیشترین شعاع تأثیر عملیات، با فشار نهایی تزریق و بازشدگی درزه، رابطه‌ی مستقیم و با تنش تسلیم و گرانروی دوغاب، رابطه‌ی معکوس دارد.[5]

در مدل‌سازی تزریق علاوه‌بر خصوصیات دوغاب، وضعیت زمین‌شناسی مهندسی حاکم بر منطقه از جمله وضعیت بازشدگی درزه‌ها بسیار مهم است. به‌طورکلی بازشدگی درزه یکی از حساس‌ترین پارامترها در تخمین شعاع نفوذ دوغاب سیمانی تزریق‌یافته است. با توجه به نتایج آزمون فشار آب، اطلاعات مغزه‌های حفاری، و حجم خورند واقعی ثبت‌شده، می‌توان به شناخت نسبی از بازشدگی درزه‌ها دست یافت.[6]

مدل‌های تحلیلی پیش‌بینی خورند دوغاب سیمانی که تاکنون توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده‌اند، در این پژوهش معرفی و استفاده شده‌اند. در پژوهشی در

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۲/۶، اصلاحیه ۱۳۹۳/۶/۱۰، پذیرش ۱۳۹۳/۶/۲۹.

www.SID.ir

Archive of SID

سال ۱۹۷۶، خواص سیال تزریقی از قبیل چسبندگی، وزن مخصوص، اختلاف خصوصیات آن با آب زیرزمینی و تأثیر آن در میزان نفوذ دوغاب بررسی شده است.[۷]

در سال ۱۹۸۵ نیز رابطه‌ی دیگری ارائه شد و طول مقطع و عمق گمانه‌ی تزریق در میزان نفوذ دوغاب مؤثر دانسته شده است.[۸] همچنین در مطالعه‌ی دیگری در سال ۱۹۹۱ مدلی معرفی شده است که در آن، محیط گمانه‌ی تزریق تأثیر مهمی در میزان دوغاب تزریقی دارد.[۹]

برخی پژوهشگران نیز با انجام پژوهش‌هایی (۱۹۹۲) میزان خورند دوغاب را به وضعیت درزه‌ها و تفاوت در میزان آب‌خوری در آزمون فشار آب و دوغاب‌پذیری در عملیات تزریق وابسته دانسته،[۱۰] و همچنین نقش تغییرات بازشدگی با دورشدن از گمانه و تأثیر آن را در میزان تزریق بررسی کرده‌اند.[۱۱] در پژوهش دیگری (۱۹۹۴) نیز مدلی برای پیش‌بینی خورند دوغاب ارائه شده است، که در آن، بازشدگی درزه‌ها، فشار تزریق، و چسبندگی دوغاب نقش مهمی در پیش‌بینی داشته‌اند.[۱۲] همچنین در سال ۲۰۰۰ مدل دیگری ارائه شده است که در آن پارامتری به نام زاویه‌ی گسترش دوغاب معرفی شده است، که با توجه به خصوصیات مکانیک سنگی ساخت‌گاه محاسبه شده است.[۱۳] در پژوهشی در سال ۲۰۰۳ نیز نقش تغییرات خواص چسبنده‌ی خمیری و پهنای ناحیه‌یی از سیال که در آن گرادیان سرعت وجود دارد و نیز ویژگی‌های دوغاب که به‌صورت جامد خمیری عمل می‌کند، بررسی و مطالعه شده است.[۱۴]

در مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار UDEC استفاده و با طراحی محیط سنگی، درزه وگمانه و شرایط حاکم بر مقطع تزریق و دوغاب، حجم خورند سیمانی محاسبه شده است.[۱۵] به‌دلیل دقت پایین مدل‌های تحلیلی و عددی در پیش‌بینی خورند دوغاب و به‌منظور به‌دست‌آوردن روشی بهینه و دقیق در برآورد حجم خورند از مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی استفاده شده است.[۱۶]

هدف از این پژوهش، معرفی روش‌های پیش‌بینی و برآورد حجم دوغاب سیمانی تزریق‌یافته با استفاده از مدل‌های تحلیلی و عددی و نیز استفاده از شبکه‌ی عصبی است. درنهایت با استفاده از اطلاعات مقاطع انتخابی تزریق آزمایشی در ساخت‌گاه سد سیمره و خورند واقعی دوغاب ثبت‌شده در این سایت، بهترین و دقیق‌ترین روش برآورد حجم دوغاب سیمانی پیشنهاد شده است.

۲. پارامترهای مهم استفاده‌شده در مدل‌سازی‌ها

به‌طورکلی میزان دوغاب تزریق‌یافته در ساخت‌گاه‌های سنگی و خاکی پی سدها به پارامترهای متنوع ژئوتکنیکی و عملیاتی وابسته است. در ادامه، مهم‌ترین عوامل استفاده‌شده در پیش‌بینی حجم خورند دوغاب سیمانی در روش‌های تحلیلی و عددی و شبکه‌ی عصبی معرفی شده است.

۱.۲. ضریب کیفیت سنگ (RQD)

ضریب کیفیت سنگ عبارت است از درصدی از کل مغزه‌ی بازیافت‌شده که در آن قطعات بکر و سالم سنگ، طولی برابر یا بیش از ۱۰ سانتی‌متر دارند.

به طورکلی وضعیت کیفی سنگ، که در قالب ضریب RQD بررسی می‌شود، اهمیت بالایی در عملیات تزریق دارد. چرا که معمولاً سنگ‌های ضعیف و در نتیجه با مقدار RQD پایین، تزریق‌پذیری بالاتری دارند و بالعکس. بنابراین بررسی RQD مقاطع تزریق‌یافته در تعیین حجم خورند دوغاب سیمانی بسیار اهمیت دارد و مطالعه و بررسی مغزه‌های حفاری و تعیین ضریب کیفیت سنگ در آنها ضروری است.[۱۷]

۲.۲. بازشدگی درزه‌ها

بازشدگی‌ها و مسیرهای هیدرولیکی مانند همه‌ی عوارض و شکل‌های زمین‌شناسی در حال گسترش هستند. این پارامتر، مستقیماً در تزریق‌پذیری منطقه مؤثر است. به‌طورکلی میزان بازشدگی درزه‌ها، که به‌عنوان مسیرهای اصلی نفوذ دوغاب هستند، اهمیت بالایی دارد. مطالعات نشان می‌دهد هر چه بازشدگی درزه‌ها بیشتر باشد، میزان دوغاب تزریق‌یافته بسیار بیشتر خواهد شد. البته بررسی مسائلی چون میزان پُرشدگی درزه و میزان زبری آنها نیز باید درنظرگرفته شود. بازشدگی زیاد باعث بی‌ثباتی و عدم تحکیم دوغاب و همچنین باعث گریز آن از محیط عمل می‌شود. همچنین کمترین عرض درزه‌ها برای تزریق ۰٫۱ تا ۰٫۵ میلی‌متر است. با وجود این در پژوهشی در سال ۱۹۶۸ بیان شده است که بازشدگی‌های با عرض ۰٫۰۳۵ mm در هدایت آب حائز اهمیت هستند. همچنین تداوم سیستم درزه‌های باز در شعاع نفوذ تأثیر می‌گذارد. ناپیوستگی درزه‌های تزریق‌پذیر باعث کاهش فاصله‌ی چال‌های تزریق و افزایش هزینه‌ها می‌شود.[۱۸]

۳.۲. آزمون فشار آب (عدد لوژان LU)

تعیین تراوایی سنگ‌های درزه‌دار معمولاً از طریق آزمایش‌های برجا صورت می‌گیرد. آزمایش پمپاژ آب (لوژان) و آزمایش‌های پُرکردن گمانه‌ها با آب (لفران)، از جمله آزمایش‌های برجا هستند. آزمایش پمپاژ آب معمولاً با نام آزمایش فشار آب (WPT) خوانده می‌شود. آزمایش پله‌یی فشار آب (لوژان اصلاح‌شده)، معمول‌ترین آزمایش در تعیین تزریق‌پذیری سنگ‌ها و میزان حجم دوغاب تزریق‌یافته است. در این روش آب در مقطع خاصی از گمانه و تحت فشار متغیری تزریق می‌شود. نتایج این آزمایش به‌عنوان بهترین ارزیاب هیدرولیکی جهت تزریق در توده‌ی سنگ‌ها به‌شمار می‌رود. مقدار آب واردشده به چاه در طی آزمایش و تحت فشار معین ثبت می‌شود. جذب ۱ لیتر آب در هر دقیقه و هر متر از گمانه در فشار ۱ مگاپاسکال برابر با ۱ لوژان ($1\,LU = 1\,lit.min^{-1}.m^{-1}$) است.[۱۹]

عدد لوژان همواره عددی بین ۱ تا ۱۰۰ است و اگر بیش از ۱۰۰ به‌دست آید، مقدار آن ۱۰۰ قرار داده می‌شود. معمولاً عدد لوژان با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$LU = 10\,Q/P_e \qquad (1)$$

که در آن، Q میزان آب جذب‌شده بر حسب لیتر بر متر بر دقیقه و P_e بالاترین فشار مؤثر در آزمایش و LU مقدار عدد لوژان است.

۴.۲. فشار تزریق

پس از بررسی‌های هیدروژئولوژی، توپوگرافی، زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی، نفوذپذیری و تحلیل اطلاعات، فشار تزریق برای اعماق مختلف زمین تعیین می‌شود. فشار متناسب با عمق مقطع تزریق، خصوصیات دوغاب، روش تزریق، نفوذپذیری سنگ، خصوصیات درزه‌های سنگی، وضعیت تنش‌های محلی، ابعاد سازه و خصوصیات فیزیکی و مکانیک‌سنگی توده‌ی سنگ انتخاب می‌شود. در مناطق تحت فشار، مانند هسته‌ی طاقدیس، می‌توان از فشار بالا استفاده کرد. اما در مناطق تحت کشش نظیر قله‌ی طاقدیس و یا مناطق نزدیک به سطح زمین، جهت جلوگیری از حرکت و جابه‌جایی توده‌ی سنگ یا بلندشدگی لایه‌ها باید از فشارهای پایین و

www.SID.ir

Archive of SID

کنترل‌شده استفاده کرد. برای تزریق در نزدیکی سطوح شیب‌دار و دیواره‌ی درزه‌ها نیز باید این موارد را مدنظر داشت: فشار در عملیات تزریق با دبی عبوری دوغاب قابل کنترل است. لذا ویژگی‌های دوغاب و درزه‌ها در انتخاب فشار تزریق مؤثر هستند.

زمانی که فشار تزریق و غلظت دوغاب ثابت هستند، سرعت و فشار دوغاب نسبت به زمان با دورشدن از محل تزریق کاهش پیدا می‌کند و زمانی که انرژی جنبشی تقلیل یابد و به حد بحرانی برسد، ذرات سیمان شروع به رسوب‌کردن می‌کنند. اما زمانی که فشار تزریق متفاوت و غلظت دوغاب ثابت باشد، باید فشار تزریق با زمان افزایش پیدا کند، تا از رسوب زودرس ذرات سیمان جلوگیری شود. در بیشتر پروژه‌های تزریق در سنگ، از آستانه‌ی شکست هیدرولیکی توده‌ی سنگ داخل گمانه‌ها، در نقاط و اعماق مختلف استفاده می‌شود. برخی مقدار ۲ / ۰ تا ۳ / ۰ میزان روباره (γh) را برای فشار تزریق پیشنهاد کرده‌اند.

دو روش متداول در تزریق، استفاده از فشارهای بالا یا فشارهای نسبتاً پایین است، که هر کدام نقاط ضعف و قوتی دارند. چرا که فشارهای بالا باعث نفوذ و تأثیر بیشتر عملیات تزریق می‌شود، ولی می‌تواند باعث شکست هیدرولیکی و ضعیف‌ترشدن ساختار سنگ منطقه شود. در مقابل فشارهای پایین تزریق، گرچه باعث سالم‌ماندن توده‌ی سنگ می‌شود، ولی می‌تواند میزان اطمینان از کامل‌بودن فرایند تزریق را تحت تأثیر قرار دهد.[۲۰]

۵.۲. موقعیت و عمق گمانه‌ی تزریق

یکی از پارامترهای مهم در تعیین میزان خورند دوغاب در عملیات تزریق، عمق مقطع تزریق‌یافته است. به‌طورکلی از مجموع مطالعات انجام‌شده در ساخت‌گاه‌های مختلف می‌توان گفت که در مناطق سطحی‌تر و نزدیک به سطح زمین، به علت فرسایش و هوازدگی و شرایط ضعیف‌تر و کیفیت پایین‌تر زمین، میزان تزریق‌پذیری سنگ و حجم دوغاب تزریقی بیشتر است. با افزایش عمق گمانه، معمولاً وضعیت کیفی سنگ بهبود و حجم دوغاب کاهش یافته است. پس باید در تعیین حجم خورند دوغاب، عمق مقطع تزریق‌یافته را نیز در نظر گرفت. این تذکر لازم است که شرایط ذکرشده همیشه حاکم نیست و در مقاطعی روند مذکور تغییر می‌کند. وجود حفره‌های کارستی یا گسل‌خوردگی‌ها در اعماق مختلف باعث کاهش دقت پیش‌بینی خورند دوغاب می‌شود.[۲۱]

۳. مدل‌سازی تحلیلی تزریق

این مدل‌سازی براساس روابط ریاضی مختلف ارائه‌شده توسط پژوهشگران درخصوص تزریق انجام شده است. در مدل‌سازی تحلیلی، ابتدا شعاع نفوذ دوغاب توسط رابطه‌یی تعیین و سپس با استفاده از شعاع نفوذ، حجم خورند دوغاب سیمانی در مدل‌های مختلف برآورد شده است. شرایط اولیه‌یی که مدل‌ها براساس آن ارائه می‌شوند، عبارت‌اند از: ۱. عملیات تزریق به پایان رسیده است، بدین معنی که دوغاب دیگری در درزه‌ها نفوذ نمی‌کند؛ ۲. جریان سیال تزریق‌یافته آرام است؛ ۳. اختلاف بین فشار تزریق با فشار آب زیرزمینی ΔP و خصوصیات دوغاب مشخص و مقادیر آن در هنگام تزریق ثابت است؛ ۴. دوغاب در برابر ته‌نشینی پایدار است؛ ۵. هیچ‌گونه دگرشکلی در درزه‌ها رخ نمی‌دهد. در این پژوهش از ۵ مدل تحلیلی تزریق، به این شرح استفاده شده است.

۱.۳. مدل اول

این مدل بر مبنای این فرض شکل گرفته است که توده‌سنگ موردنظر، یک درزه دارد. این تک‌درزه به شکل دیسک دایره‌یی تحت بازشدگی ثابت b است. با شروع عملیات تزریق، دوغاب از گمانه‌یی که در مرکز دیسک مذکور قرار دارد، به‌صورت شعاعی و یکسان، تمام دیسک موردنظر را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. شعاعی از دیسک که توسط دوغاب تزریق می‌یابد، را شعاع نفوذ I می‌نامند. نکته‌ی حائز اهمیت این است که تعداد دیسک‌های تزریق‌پذیر در راستای گمانه برابر با دیسک‌های آب‌بر است. به این ترتیب، شعاع نفوذ دوغاب از گمانه به درون درزه از رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید:[۱۲]

$$I = \Delta P.b/(2\tau.) \qquad (۲)$$

که در آن، ΔP اختلاف فشار آب زیرزمینی با فشار تزریق، $\tau.$ تنش تسلیم (چسبندگی) دوغاب، و b بازشدگی درزه است. حجم دوغاب لازم برای تزریق در دیسک موردنظر از رابطه‌ی ۳ به‌دست می‌آید:[۱۲]

$$V = I^2.b.\pi \qquad (۳)$$

با درنظرگرفتن تعداد دیسک برخوردکننده (N) با گمانه و رابطه‌ی ۳، حجم تزریق‌یافته به رابطه‌ی ۴ تعمیم می‌یابد:[۱۲]

$$V = (\Delta P/2\tau.)^2.N.b^3.\pi \qquad (۴)$$

۲.۳. مدل دوم

در این مدل فرض بر این است که دوغاب از گمانه به درون مجموعه‌یی از درزه‌ها و مسیرهای موجود در سنگ، با زاویه‌ی گسترش α تزریق می‌شود. بخش‌های نفوذپذیر توده‌ی سنگ، با درزه‌هایی دایره‌یی و دیسک‌مانند شبیه‌سازی شده‌اند، و در وسط دیسک، گمانه‌ی تزریق قرار دارد. زاویه‌ی گسترش دوغاب درون درزه‌یی ایده‌آل، $\alpha = 2\pi$ است. اگر فقط بخشی از درزه نفوذپذیر باشد، زاویه‌ی موردنظر کوچک‌تر خواهد بود. در شکل ۱، حالات مختلف گسترش درزه و نفوذ دوغاب نشان داده شده است. طبق نظر Hassler (۱۹۹۲) و Brantberger (۲۰۰۰) با کاهش‌کیفیت مکانیکی سنگ و در نتیجه با افزایش تعداد درزه‌های باز موجود در آن، مقدار α کاهش می‌یابد. با توجه به نظر Stille (۱۹۹۴) و Janson (۱۹۹۸)، زاویه‌ی گسترش دوغاب در این قطاع که با علامت α مشخص می‌شود، با استفاده از ویژگی‌های مکانیکی سنگ به‌صورت تجربی طبق جدول ۱ به‌دست می‌آید.[۷]

بازشدگی دیسک برابر با معکوس مجموع میانگین بازشدگی مسیرهاست. تعداد دیسک‌های تزریق‌پذیر در راستای گمانه نیز برابر با دیسک‌های آب‌بر است. با شروع فرایند تزریق، دوغاب به‌عنوان سیالی بینگهامی، به درون درزه‌ها نفوذ می‌کند. Wallner (۱۹۷۶) و Lombardi (۱۹۸۵) شعاع تأثیر دوغاب را براساس رابطه‌ی ۵ تخمین زده‌اند:[۸]

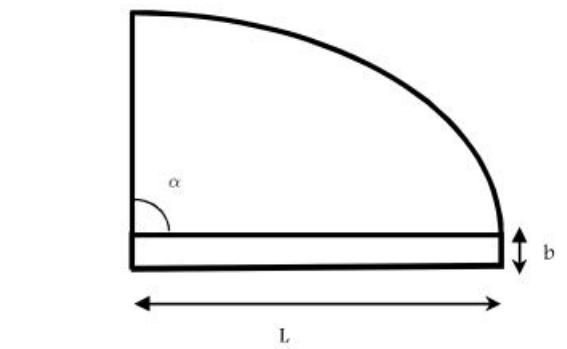
$$I = \rho_w.g.(h_w - h).b/(2\tau.) \qquad (۵)$$

جدول ۱. مقادیر زاویه‌ی گسترش دوغاب براساس شاخص RMR.[۸]

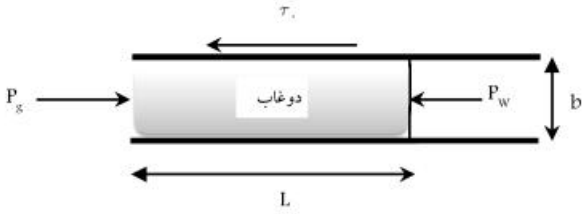
انتخاب زاویه‌ی گسترش دوغاب α (رادیان)	۲/۴	۰/۸	۰/۴	۰/۲
طبقه‌بندی RMR	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف

www.SID.ir

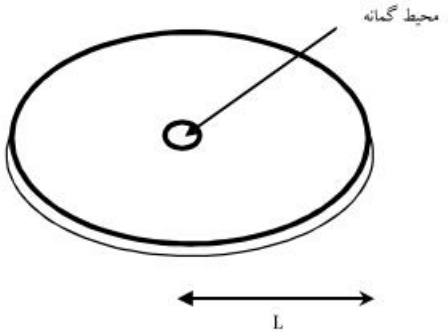
Archive of SID



الف) نفوذ دوغاب با زاویه گسترش α ؛



ب) درزه ی یک بعدی ؛



ج) درزه ی دیسک مانند با گمانه یی در مرکز آن.

شکل ۱. حالات مختلف گسترش درزه و نفوذ دوغاب.[۵]

که در آن، I طول بخش تزریق‌یافته و صورت کسر، اختلاف فشار آب زیرزمینی با فشار تزریق است. حجم دوغاب تزریق‌یافته با شرط وجود یک درزه را می‌توان از رابطه‌ی ۶ برآورد کرد:[۸]

$$V = I^{۲}.b.\alpha/۲ \qquad (۶)$$

با فرض وجود N درزه‌ی تزریق‌پذیر حجم مذکور از رابطه‌ی ۷ به‌دست می‌آید:

$$V = I^{۲}.b.(\alpha/۲).N \qquad (۷)$$

۳.۳. مدل سوم

اصولی که این مدل براساس آن پیشنهاد شده است، مشابه با مدل قبلی است. در این مدل نیز درزه‌یی دیسک مانند، متعامد با گمانه‌یی است که از مرکز آن می‌گذرد. در این مدل پارامتر محیط گمانه‌ی تزریق، (W) نیز در محاسبه‌ی تخمین خورند مؤثر است. بدیهی است که وسعت نفوذ دوغاب در توده‌ی سنگ و حجم عملیات تزریق در گمانه‌هایی با شعاع مختلف و در نتیجه با محیط‌های متفاوت، مشابه نخواهد بود.

شعاع نفوذ دوغاب در این مدل نیز از رابطه‌ی ۸ به‌دست می‌آید:[۱۰]

$$I = \Delta P.b/(۲\tau.) \qquad (۸)$$

Hassler (۱۹۹۱)، حجم دوغاب تزریق‌یافته در این مدل را به‌عنوان تابعی از پارامترهای هندسی سنگ مطابق رابطه‌ی ۹ معرفی کرده است:[۱۰]

$$V = (\Delta P/۲\tau.).b^{۲}.[W + ((\Delta P.b/۲\tau.).\alpha/۲)] \qquad (۹)$$

که در آن، W محیط گمانه‌ی تزریق و α زاویه‌ی انتشار دوغاب است.

۴.۳. مدل چهارم

در این مدل نیز رابطه‌ی شعاع تزریق مشابه مدل‌های قبلی است (رابطه‌ی ۱۰):[۲۲]

$$I = \Delta P.b/(۲\tau.) \qquad (۱۰)$$

Lombardi (۱۹۸۵)، حجم دوغاب تزریق‌یافته‌در هر متر ازگمانه را توسط رابطه‌ی ۱۱ معرفی کرده است، که در آن L طول مقطع تزریق است:[۲۲]

$$V = I^{۲}.b.L/۲ \qquad (۱۱)$$

۵.۳. مدل پنجم

این مدل، حالت توسعه‌یافته‌ی مدل اول است و نفوذ دوغاب را در سنگ، کامل‌تر ازمدل‌های پیشین توصیف می‌کند. در مدل‌پنجم دوغاب تزریق‌یافته از گمانه وارد شبکه‌ی درزه‌ها می‌شود و براساس پارامترهای زمین‌شناسی معرفی‌شده در این روش، با درنظرگرفتن شرایط تزریق، شبیه‌سازی انجام می‌شود. در این حالت، درزه‌ی دیسک‌مانند، دارای بازشدگی میانگین $\overline{b}$ و شعاع نفوذ I برای دوغاب است. دوغاب از گمانه به درون مجموعه‌یی از دیسک‌های دایره‌یی جریان (ثانویه) نیز برخورد می‌کند. تغییرات در بازشدگی با پارامترهای زمین شناسی θ، β و K توصیف‌می‌شوند. بازشدگی میانگین درزه $\overline{b}$ را می‌توان با ضرب‌کردن پارامتر θ در بازشدگی هیدرولیکی میانگین b (که از آزمایش لوژن به‌دست می‌آید)، به دست آورد (رابطه‌ی ۱۲):[۱۲]

$$\overline{b} = \theta.b \qquad (۱۲)$$

ضریب β نسبت مساحت کلی مجموعه‌ی درزه‌ها به مساحت دیسک اولیه است. تعداد دیسک‌های تزریق‌پذیر N_g، که با گمانه برخورد دارند، از حاصل‌ضرب پارامتر تبدیل $K_۱$ در تعداد N_w دیسک‌های آب‌بر تعیین می‌شود (رابطه‌ی ۱۳):[۱۲]

$$K_۱ = N_g.N_w \qquad (۱۳)$$

شعاع نفوذ I نیز به کمک پارامترهای b_g و $K_۲$ محاسبه می‌شود، که $K_۲$ پارامتر مسیر خمیده‌ی مسیرهای درزه در دیسک است؛ یعنی نسبت طول مسیر خمیده به طول مسیر شعاعی نفوذ دوغاب. پارامتر K، نسبت بازشدگی درزه‌ی تزریق‌پذیر b_g، به بازشدگی هیدرولیکی درزه b است (رابطه‌ی ۱۴):[۱۲]

$$K = b_g/b \qquad (۱۴)$$

همچنین شعاع نفوذ دوغاب از طریق رابطه‌ی ۱۵ بیان می‌شود:[۱۲]

$$I = \Delta P.b_g/(۲\tau..K_۲) \qquad (۱۵)$$

www.SID.ir

Archive of SID

که همه‌ی پارامترها پیشتر تعریف شده‌اند و حجم دوغاب در این دیسک‌ها از رابطه‌ی ۱۶ به‌دست می‌آید:[۱۲]

$$V = I^{۲}.\overline{b}.\pi.\beta.N_g \qquad (۱۶)$$

پارامتر $K_۱$ با توجه به وضعیت زمین‌شناسی سنگ از ۰٫۳ - ۰٫۰۵ متغیر است، پارامتر مربوط به بازشدگی مسیر (K) حدود ۴، پارامتر مربوط به نوع مسیر تزریق‌یافته $(K_۲)$ برابر ۱٫۵، θ با فرض درزه‌های بزرگ از ۰٫۳ میلی‌متر و اینکه درزه‌ها دچار دگرشکلی نمی‌شوند، برابر با ۱، و β معادل نصف تعداد دسته درزه‌هاست.[۱۲]

۴. تحلیل عددی عملیات تزریق

در این روش ابتدا شکل هندسی مقطع سنگ، درزه و گمانه‌ی تزریق پیاده‌سازی می‌شود. سپس اطلاعات دیگری از قبیل خصوصیات دوغاب (گرانروی، چگالی، و تنش تسلیم) و میزان بازشدگی درزه وارد می‌شود. در نهایت با ورود اطلاعات فشار نهایی تزریق در مقاطع مختلف، برنامه‌نویسی این نرم‌افزار کامل می‌شود.

مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار UDEC انجام می‌شود. در این نرم‌افزار نیز دوغاب یک سیال بینگهامی فرض می‌شود. مدل‌سازی UDEC با استفاده از رابطه‌ی ۱۷ برای دبی جریان تزریق‌یافته در یک درزه‌ی لوله‌یی استوانه‌یی‌شکل انجام‌می‌شود:[۱۵]

$$Q = \pi.\Delta P.r^{۳}/(۸.L.\mu).[۱-!(۸L.\tau./۳r.\Delta P)+(۲L.\tau./۳r.\Delta P)^{۳}] \qquad (۱۷)$$

که در آن، r شعاع لوله، μ گرانروی، و L شعاع نفوذ دوغاب است (Wilkinson, ۱۹۶۰).

۱.۴. مدل‌سازی هندسی

با توجه به مدل‌سازی عددی انجام‌شده توسط نرم‌افزار UDEC، شعاع نفوذ دوغاب محاسبه شده است. در این مدل‌سازی ابتدا بلوک سنگی طراحی و مقطع تزریق‌یافته در مرکز بلوک سنگی در نظرگرفته شده است. در شکل ۲، موقعیت بلوک سنگی همراه با درزه‌ی متعامد در مرکز آن در UDEC، نشان داده شده است. به‌طورکلی این پارامترها، به‌عنوان اطلاعات ورودی به نرم‌افزار UDEC وارد شده‌اند:

۱. هندسه‌ی توده‌ی سنگ تزریق‌یافته؛

۲. مقطع تزریق‌یافته در مرکز توده‌ی سنگ مذکور در نظرگرفته شده است؛

۳. درزه‌ی تزریق‌یافته‌ی افقی در مرکز گمانه طراحی شده است. بازشدگی میانگین درزه‌ها، براساس داده‌های حاصل از نتایج مغزه‌گیری و آزمایش لوژن در سایت سیمره برآورد شده است؛

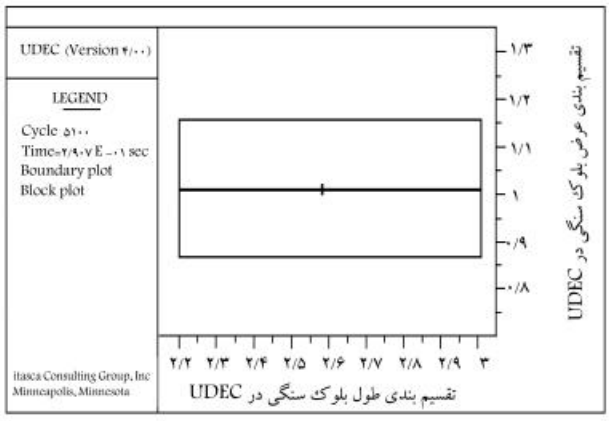
۴. چگالی و تنش تسلیم دوغاب سیمانی، که از نتایج آزمایش قیف مارش محاسبه شده‌اند؛

۵. فشار نهایی تزریق براساس مقادیر فشار تزریق ثبت‌شده در کارگاه تزریق سیمره برآورد شده است.

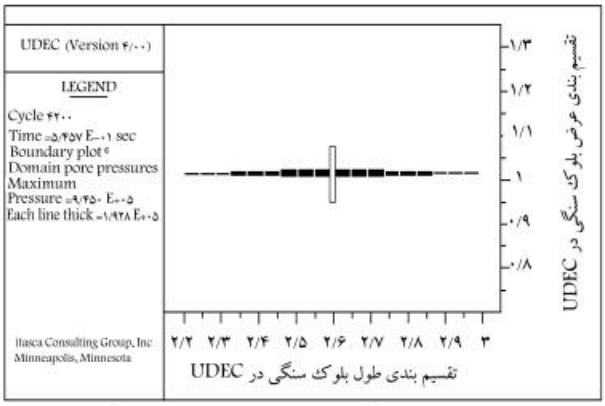
در جدول ۲، خصوصیات هندسی و فیزیکی مدل بلوک سنگی و دوغاب بیان شده است. این نرم‌افزار با توجه به اطلاعات واردشده، فشار نهایی تزریق را در دهانه‌ی درزه بر دوغاب موردنظر اعمال و میزان نفوذ آن‌را محاسبه می‌کند و نتایج را در پلات‌هایی نشان می‌دهد. مدل‌سازی عددی انجام‌شده، براساس تحلیل جریان پایا بوده و شرایط نقطه‌ی پایانی نفوذ دوغاب که در آن سیستم به حالت پایدار است، در نظرگرفته شده است. در نرم‌افزار UDEC، توده‌ی سنگ به‌صورت مجموعه‌یی از بلوک‌های مجزا نمایش داده می‌شود، که توسط سطوح ناپیوستگی (درزه‌ها)، از یکدیگر جدا شده‌اند. بلوک‌ها نفوذ ناپذیر در نظرگرفته شده و جریان سیال به درون درزه‌ها محدود شده است. در شکل ۳، نفوذ دوغاب از گمانه‌ی تزریق به درون توده‌ی سنگ توسط نرم‌افزار UDEC نشان داده شده است.

جدول ۲. خصوصیات هندسی و فیزیکی مدل بلوک سنگی و دوغاب.

ردیف	نام پارامتر ورودی	مقدار پارامتر
۱	ابعاد بلوک سنگی تزریق‌یافته	۵۰ × ۲۰ متر
۲	مقطع تزریق	۵ متر
۳	بازشدگی درزه (b)	۱ - ۰٫۵ میلی‌متر
۴	چگالی دوغاب (ρ_{grout})	۱۱۳۰ $kg/m^{۳}$
۵	تنش تسلیم دوغاب $(\tau_.)$	۲۱ $Kg/ms^{۲}$
۶	فشار تزریق دوغاب (P_{grout})	۴۰ - ۱۰ اتمسفر
۷	نسبت آب به سیمان $(W:C)$	۱:۱ - ۲:۱



شکل ۲. موقعیت بلوک سنگی طراحی‌شده در UDEC همراه با درزه‌ی موردنظر.



شکل ۳. نمایش نفوذ دوغاب از گمانه تزریق به درون توده‌ی سنگ توسط نرم‌افزار UDEC.

www.SID.ir

Archive of SID

۵. پیش‌بینی حجم خورند با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

چون مدل‌های تحلیلی و عددی برآورد ضعیفی از حجم خورند دوغاب سیمانی ارائه می‌دهند، استفاده از روش پیش‌بینی قوی‌تری لازم به نظر می‌رسد. بدین منظور ابتدا از روش‌های آماری در نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. پیش‌بینی خورند و یافتن رابطه‌یی بین متغیرهای مستقل (بازشدگی درزه، فشار تزریق، RQD، میزان آب‌خوری (LU) و عمق مقطع تزریق) با متغیر وابسته‌ی حجم خورند، با استفاده از توابع رگرسیون خطی و غیرخطی انجام شده است.

رگرسیون خطی پیش‌بینی ضعیفی از حجم دوغاب تزریق‌یافته ($R^2 = ۰/۵۵$) ارائه کرده است. پس از آن از رگرسیون غیرخطی با ایجاد یک تابع توانی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته استفاده شده است. گرچه این تابع برآورد بهتری از حجم دوغاب به‌دست آورده است، ولی باز پیش‌بینی قابل قبولی حاصل نشده است ($R^2 = ۰/۶۸$). این نتایج ضرورت استفاده از روش دقیق‌تر دیگری را نشان داده است. در نتیجه در این پژوهش از روش شبکه‌های عصبی برای برآورد حجم دوغاب تزریق‌یافته استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه‌های محاسباتی هستند که به‌منظور شبیه‌سازی شبکه‌ی سلول‌های عصبی سیستم مرکزی (مغز) موجودات زنده (انسان یا حیوان) به‌کار می‌روند. شناخت دانشمندان علوم بیولوژی از چگونگی فعالیت سلول‌های عصبی در چند دهه‌ی گذشته اولین مبنا و زمینه در طراحی این شبکه‌ها بوده است. برخلاف سیستم‌های خبره، که دانش موردنیاز قبلاً به‌صورت روابط و قواعد مشخص در ساختمان آن‌ها داده شده است، شبکه‌های عصبی، قوانین موردنیاز خود را از طریق آموزش به کمک مثال‌های آموزشی پیدا می‌کنند. این توانایی که اصطلاحاً به آن یادگیری[۲] گفته می‌شود، ویژگی متمایزکننده‌ی شبکه‌های عصبی از سایر شیوه‌های حل مسئله است. شبکه‌های عصبی از الگوریتم‌های مختلفی جهت یادگیری استفاده می‌کنند، ولی صرف‌نظر از روش استفاده‌شده، یادگیری به‌طورکلی یک عملیات تکراری است.[۱۶]

۱.۵. ساختمان شبکه‌های عصبی

یک شبکه‌ی عصبی از تعدادی سلول، که در لایه‌های متوالی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. اساساً در این نوع شبکه‌ها، ۳ نوع لایه وجود دارد. این لایه‌ها شامل: یک لایه‌ی ورودی به‌عنوان ظرفیتی جهت دریافت مقادیر ورودی شبکه، یک یا چند لایه‌ی میانی، و یک لایه‌ی خروجی است.

تعداد سلول‌های موجود در لایه‌های خروجی و ورودی براساس تعداد عوامل ورودی و خروجی سیستم و تعداد سلول‌های لایه‌های میانی با توجه به پیچیدگی مسئله به‌صورت تجربی تعیین می‌شود. براساس نحوه‌ی ارتباط سلول‌های موجود در یک شبکه با یکدیگر، شبکه‌های عصبی انواع مختلفی دارند، که در اینجا فقط شبکه‌های با تغذیه‌ی پیشرو[۳] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این شبکه‌ها هر سلول به کلیه‌ی سلول‌های موجود در لایه‌های بعدی متصل است. جهت جریان اطلاعات به‌صورت لایه به لایه از لایه‌ی ورودی به لایه‌های میانی و خروجی است و هیچ‌گونه اتصال برگشتی و یا اتصال بین سلول‌های موجود در یک لایه وجود ندارد. اتصالات موجود در یک شبکه، وزن‌های قابل تغییر دارند، که ابتدا به‌صورت تصادفی مقداردهی و در طول فرایند یادگیری تعیین می‌شوند.[۲۳]

۶. مطالعه‌ی موردی

در این بخش نتایج مدل‌سازی‌های عددی و تحلیلی و شبکه‌ی عصبی با استفاده از اطلاعات تزریق آزمایشی در مقاطع انتخابی گمانه‌های تزریق سد سیمره مورد بررسی قرارگرفته است. این نتایج با خورند واقعی ثبت‌شده در سایت مقایسه شده است.[۲۲]

۱.۶. موقعیت سد سیمره

ساختگاه سد و نیروگاه سیمره بر روی رودخانه سیمره در حدود ۴۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان دره‌شهر از استان ایلام و ۷/۵ کیلومتری روستای چشمه شیرین واقع شده و هدف از احداث آن استفاده از پتانسیل بالقوه‌ی نیروی برق رودخانه‌ی سیمره است. سد سیمره به‌صورت یک سد بتنی دو قوسی نازک به ارتفاع ۱۳۰ متر از بستر فعلی رودخانه (حدود ۱۸۰ متر از سنگ بستر) طراحی شده است. رقوم تاج سد ۷۳۰ متر است و در رقوم نرمال سطح آب در ارتفاع ۷۲۰ متری از سطح دریاهای آزاد قرار دارد. طول تاج سد در رقوم تاج ۲۰۲ متر و گنجایش مخزن سد ۳/۲۱۵ میلیارد مترمکعب است.

۲.۶. نتایج مدل‌سازی تحلیلی

از مدل‌های معرفی‌شده در این پژوهش برای محاسبه‌ی حجم دوغاب تزریق‌شده در عملیات تزریق ساختگاه سد سیمره استفاده شده است. با توجه به کمبود اطلاعات لازم برای محاسبه‌ی زاویه‌ی انتشار دوغاب (α)بر مبنای شاخص RMR، فقط از مقادیر RQD مغزه‌ها، برای تخمین آن استفاده شده است. مقدار این زاویه با توجه به جدول ۱ براساس کیفیت سنگ ساختگاه بین ۰/۴-۲/۴ متغیر است. محاسبه‌ی بازشدگی درزه‌ها با توجه به حجم خورند واقعی و آزمون فشار آب انجام شده است.

نکته‌ی مهم در مدل پنجم، درنظرگرفتن پارامترهای زمین‌شناسی k، k_1، k_2، β و θ است. با توجه به نکات ذکرشده، مقایسه‌ی حجم دوغاب محاسبه‌شده با مدل‌های تحلیلی پنج‌گانه با خورند واقعی $V(r)$ در شکل ۴ نشان شده است.

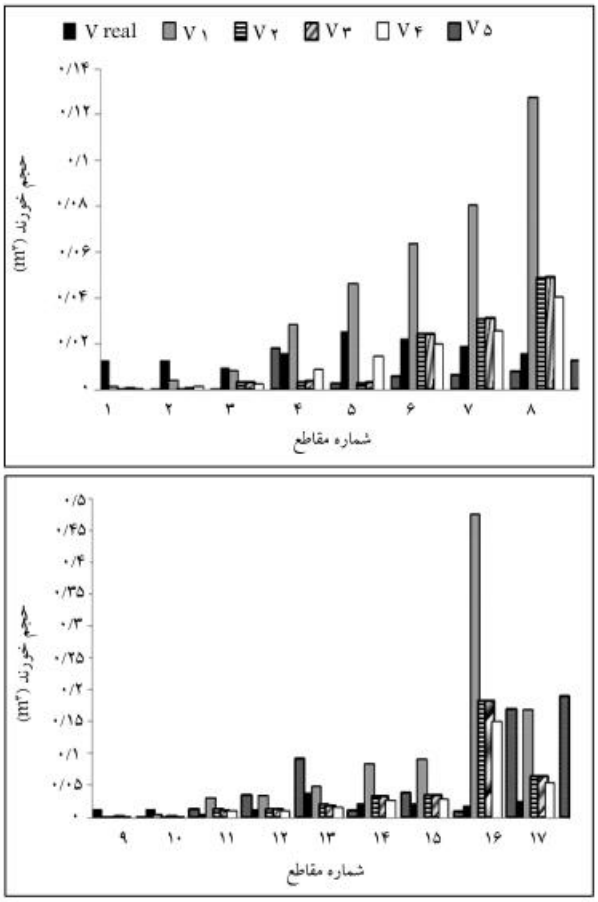
رابطه‌ی حجم خورند واقعی $V(r)$ و میانگین حجم محاسبه‌شده از مدل‌های تحلیلی $V(a)$ در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، همبستگی پایینی بین آنها وجود دارد و ضریب ($R^2 = ۰/۴۱۵$) در این شکل نشان می‌دهد که مدل تحلیلی برآورد ضعیفی از حجم دوغاب ارائه می‌کند.

۳.۶. نتایج مدل‌سازی عددی

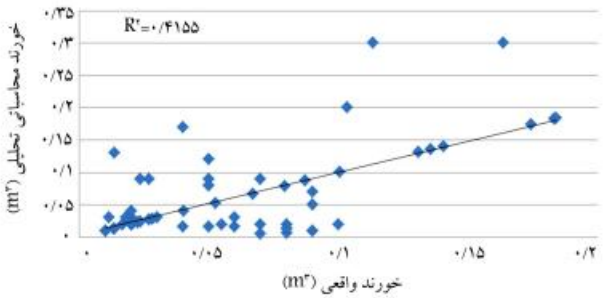
با استفاده از مدل‌سازی در نرم‌افزار UDEC و طراحی شرایط توده‌ی سنگ، درزه، مقطع تزریقی، اعمال شرایط فشار و خواص دوغاب حجم خورند محاسبه شده است. درانتها، حجم دوغاب تزریق‌یافته با استفاده از روش مدل‌سازی عددی محاسبه شده است. رابطه‌ی بین حجم خورند واقعی $V(r)$ و میانگین حجم محاسبه‌شده از مدل عددی $V(n)$ در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مدل عددی در مقایسه با مدل‌های تحلیلی، همبستگی بهتری ارائه داده است و نتایج مدل‌سازی عددی با استفاده از UDEC نسبت به نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی تحلیلی $V(a)$، برآورد صحیح‌تری از خورند واقعی‌ارائه می‌دهند، ولی باز این تخمین از دقت کافی و قابل‌قبولی برخوردار نیست ($R^2 = ۰/۶۲۸$) و پیش‌بینی کاملاً مطلوبی از حجم واقعی دوغاب نشان نمی‌دهد.

www.SID.ir

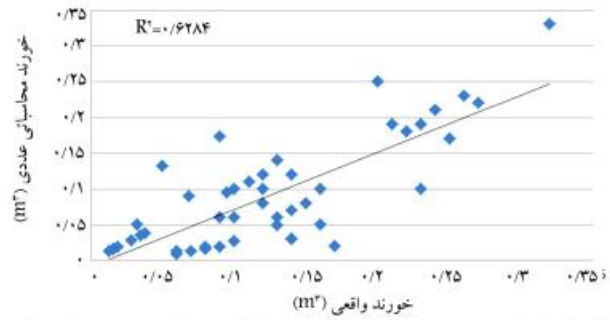
Archive of SID



شکل ۴. مقایسه‌ی حجم دوغاب محاسبه‌شده از مدل‌های تحلیلی V_1 تا V_5 با خورند واقعی $V(r)$، در مقاطع انتخابی.



شکل ۵. رابطه‌ی بین حجم خورند واقعی $V(r)$ و میانگین حجم محاسبه‌شده از مدل‌های تحلیلی $V(a)$.



شکل ۶. رابطه‌ی بین حجم خورند واقعی $V(r)$ و میانگین حجم محاسبه‌شده از مدل‌های عددی $V(n)$.

در شکل ۷، نیز مقایسه‌ی مقادیر خورندهای به‌دست‌آمده در مقاطع تزریقی از مدل‌های تحلیلی و عددی و حجم واقعی دوغاب نشان داده شده است.

۴.۶. نتایج مدل پیش‌بینی‌شده با استفاده از شبکه‌ی عصبی

۱.۴.۶. ورودی‌ها و خروجی‌ها

به‌طورکلی در عملیات تزریق (توسط مسئولان عملیات) پارامترهای متعددی مؤثرند که تعدادی از آنها کنترل‌پذیر و تعدادی کنترل ناپذیرند. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات ۵ پارامتر مؤثر (به‌عنوان پارامترهای مستقل و ورودی‌های شبکه) در میزان نفوذ دوغاب سیمانی، حجم خورند دوغاب سیمانی به‌عنوان پارامتر وابسته و خروجی شبکه پیش‌بینی شده است.

نمونه‌یی از مقادیر نرمالیزه‌شده‌ی داده‌های ورودی به شبکه در جدول ۳ بیان شده است. پارامترهای مستقل ورودی به شبکه شامل بازشدگی درزه‌ها (b)، ضریب کیفیت سنگ (RQD)، میزان آب‌خوری سنگ در آزمایش لوژان (LU)، میزان فشار تزریق (P) و عمق مقطع تزریق‌یافته (H) است. خصوصیات شبکه‌ی استفاده‌شده در این مطالعه به این‌صورت است:

- نوع شبکه‌ی عصبی به‌کاررفته: Feed Forward.
- روش آموزشی به شبکه: Back propagation.
- تابع آموزشی شبکه: TRAILM.
- تعداد لایه‌ها به این صورت است: لایه‌ی اول: ۴ نرون، لایه‌ی دوم: ۶ نرون، و لایه‌ی سوم: ۱ نرون.

تعداد داده‌های مورد استفاده در پیش‌بینی حجم خورند در شبکه‌ی عصبی ۱۱۰ داده بوده است، که از این تعداد، ۸۰ داده (۷۵٪ داده‌ها)، برای آموزش شبکه‌ی عصبی و ۱۴ داده (۱۰٪ داده‌ها) برای تأیید شبکه و ۱۶ داده (۱۵٪ داده‌ها) به‌عنوان آزمایش شبکه مورد استفاده قرارگرفته‌اند. برای راحتی عمل و به‌دست‌آوردن جواب‌های منطقی در شبکه‌ی عصبی، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB داده‌ها بین ۱- تا ۱ نرمالیزه شده‌اند. میزان خطای داده‌ها محاسبه شده است، که نمودار آن در شکل ۸ نشان داده شده است. بررسی ضریب رگرسیون مراحل مختلف عملیات در شبکه‌ی عصبی در شکل ۹ نشان داده شده است.

۲.۴.۶. آموزش شبکه

به‌طورکلی مرحله‌ی آموزش شامل یک ماتریس ۵ سطری و ۱۱۰ ستونی است. منظور از ۵ سطر آن، ۵ پارامتر مؤثر در حجم دوغاب تزریق‌یافته و ۱۱۰ ستون، ۱۱۰ داده‌ی مورد استفاده است.

۳.۴.۶. آزمون شبکه

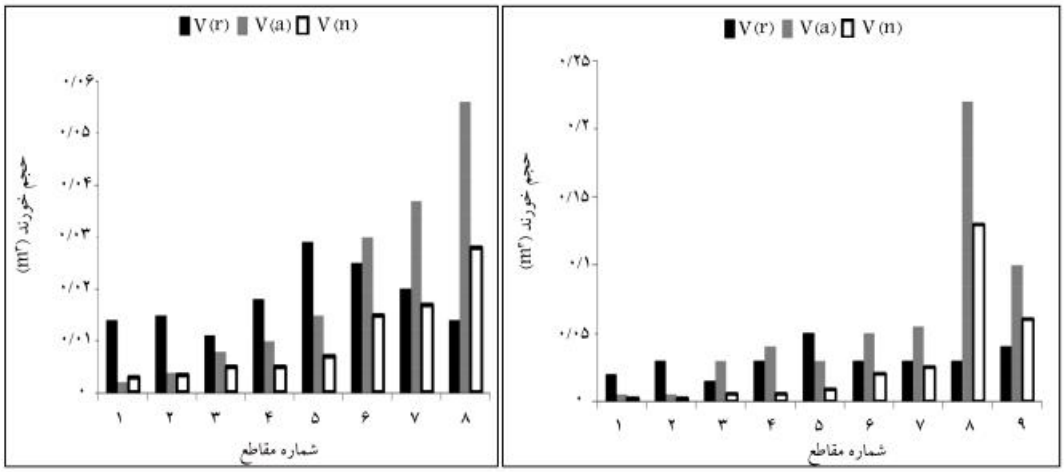
ماتریس هدف موردنظر، یک ماتریس ۱ سطر و ۱۱۰ ستونی است. برای آزمایش شبکه نیز تعداد ۱۳ سری داده به‌کار برده شده است، که هر سری از ۱۳ سری، شامل ۵ پارامتر مؤثر در نفوذ دوغاب است.

۴.۴.۶. نتایج شبیه‌سازی

پس از ورود داده‌ها و شبیه‌سازی، حجم دوغاب توسط شبکه برآورد شده است. نتایج با خورند واقعی ثبت‌شده در سایت تزریق، تطابق خوبی دارد و میزان همگرایی نتایج شبکه‌ی عصبی با حجم واقعی دوغاب، بسیار بیشتر از نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی و عددی است ($R^2 = ۰/۹۲$). در شکل ۱۰، رابطه‌ی بین حجم دوغاب پیش‌بینی‌شده توسط شبکه‌ی عصبی $V(nn)$، با خورند واقعی $V(r)$ نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷. مقایسه‌ی حجم دوغاب تزریق‌یافته‌ی محاسبه‌شده در مدل‌سازی عددی $V(n)$، و میانگین مدل‌های تحلیلی $V(a)$، با میزان خورند واقعی $V(r)$.

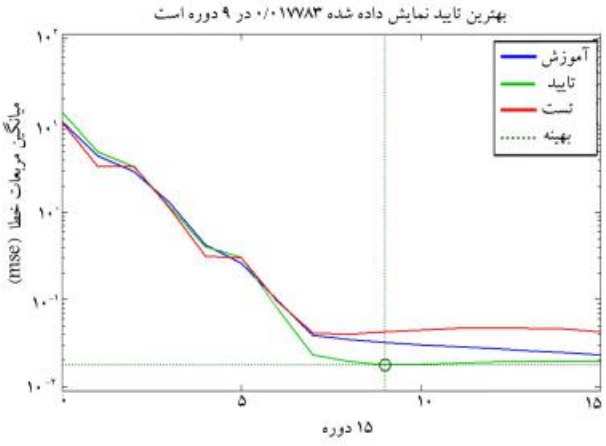
جدول ۳. نمونه‌یی از مقادیر نرمالیزه‌شده‌ی داده‌های ورودی به شبکه‌ی عصبی.

عمق گمانه (H)	ضریب کیفیت سنگ (RQD)	بازشدگی درزه (b)	میزان آب‌خوری سنگ در آزمایش لوژان (LU)	فشار تزریق (P)	حجم دوغاب
−۱٫۲۸۷۲۵۸۰۵۷	۰٫۲۸۲۲۴۲۳۸۴	۰٫۲۸۷۶۳۵۰۰۸	−۰٫۰۰۵۵۲۹۶۷۹	−۱٫۰۶۴۳۳۲۱۴۶	−۰٫۵۲۶۰۵۰۸۴۶
−۱٫۱۷۱۹۸۱۲۵	۱٫۷۶۱۱۲۹۳۵۸	−۰٫۸۵۸۵۰۷۷۰۱	−۰٫۷۹۱۳۲۶۱۵۵	−۰٫۷۴۷۹۹۵۳۸۴	−۰٫۴۴۵۴۳۴۱۹۸
−۰٫۸۵۷۴۲۰۲۹۸	۰٫۷۶۵۱۴۴۲۵۳	۰٫۹۷۹۰۰۲۰۰۵	۰٫۸۰۶۴۶۰۰۱۳	−۰٫۶۳۰۳۶۸۳۵۶	۰٫۳۹۰۶۵۷۷۹۱
−۰٫۵۹۴۹۰۶۰۶۵	۱٫۳۶۸۷۷۱۵۸۹	۰٫۲۸۷۶۳۵۰۰۸	−۰٫۰۰۵۵۲۹۶۷۹	−۰٫۴۲۳۶۶۴۵۵۱	−۰٫۵۸۸۶۵۹۴۳۲
−۰٫۳۷۲۷۹۶۵۲	۱٫۵۰۴۵۸۷۷۴	−۱٫۰۵۴۳۹۵۷۹۶	−۰٫۸۶۹۹۰۵۸۰۲	−۰٫۲۱۵۸۱۸۷۳۶	−۰٫۵۲۶۰۵۰۸۴۶
−۰٫۱۴۵۲۰۸۳۷۴	−۰٫۹۵۵۱۹۳۶۵۶	−۱٫۰۵۴۳۹۵۷۹۶	−۰٫۸۶۹۹۰۵۸۰۲	۰٫۱۲۴۵۰۰۲۳۵	−۰٫۴۹۳۱۷۵۹۴۳
۰٫۰۶۹۳۶۸۰۹۳	۰٫۹۷۶۴۱۳۸۲۱	−۱٫۰۵۴۳۹۵۷۹۶	−۰٫۸۶۹۹۰۵۸۰۲	۰٫۴۷۱۶۷۱۲۶۷	−۰٫۴۹۳۱۷۵۹۴۳
−۰٫۲۹۱۷۶۰۹۷۵	۱٫۳۹۸۹۵۲۹۵۶	−۱٫۰۵۴۳۹۵۷۹۶	−۰٫۸۶۹۹۰۵۸۰۲	−۰٫۰۳۱۹۵۵۱۳۱	−۰٫۷۹۰۲۴۹۰۰۹
۰٫۰۹۶۰۷۶۲۷۷	۱٫۸۲۱۴۹۲۰۹۲	−۱٫۰۵۴۳۹۵۷۹۶	−۰٫۸۶۹۹۰۵۸۰۲	۰٫۲۰۴۴۴۰۹۳۳	−۰٫۶۵۲۳۲۳۰۸۴

۷. نتیجه‌گیری

با استفاده از مدل‌سازی‌های تحلیلی و عددی و شبکه‌ی عصبی می‌توان حجم دوغاب لازم را برای تزریق برآورد کرد. نتایج مدل‌سازی تحلیلی نشان می‌دهد که حجم محاسبه‌شده از مدل اول در مقایسه با سایر مدل‌ها، بیشترین خطا نسبت به خورند واقعی را دارد. این مدل ضعیف‌ترین تخمین از حجم تزریق انجام‌شده ارائه می‌کند. مدل چهارم (لمباردی، ۱۹۸۵)، در مقایسه با سایر مدل‌ها برآورد بهتری از حجم دوغاب تزریق‌یافته ارائه می‌کند. در نتیجه اگر فقط استفاده از یک مدل تحلیلی پیشنهاد شود، آن مدل، مدل چهارم خواهد بود. مدل پنجم، پیچیده‌تر از سایر مدل‌هاست و پارامترهای متعددی در این مدل برای پیش‌بینی حجم دوغاب دخالت دارند و کاربرد صحیح آن نیاز به شناخت دقیقی از شرایط زمین‌شناسی منطقه دارد.

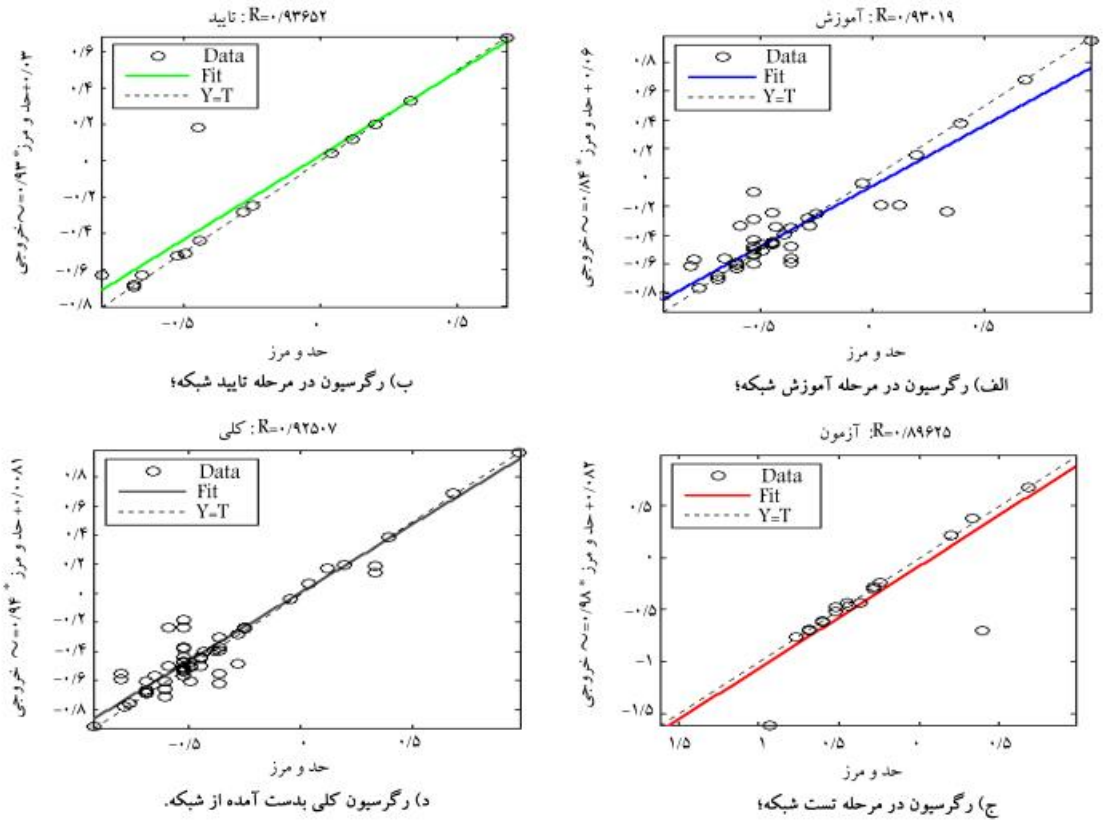
به‌طورکلی نتایج تخمین‌های به‌دست‌آمده از مدل‌های تحلیلی، دقت پایینی



شکل ۸. نمودار خطای داده‌ها در شبکه‌ی عصبی.

www.SID.ir

Archive of SID



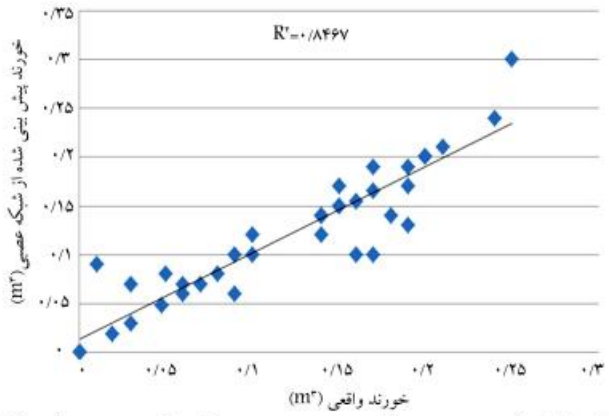
الف) رگرسیون در مرحله آموزش شبکه؛

ب) رگرسیون در مرحله تایید شبکه؛

ج) رگرسیون در مرحله تست شبکه؛

د) رگرسیون کلی بدست آمده از شبکه.

شکل ۹. بررسی رگرسیون حاصل از نقاط ورودی و خروجی در مراحل مختلف محاسبات شبکه‌ی عصبی.



شکل ۱۰. رابطه‌ی بین حجم دوغاب پیش‌بینی‌شده توسط شبکه‌ی عصبی $V(nn)$، با خورند واقعی $V(r)$.

دارد و ضریب همبستگی بین حجم دوغاب واقعی و حجم محاسبه‌شده‌ی تحلیلی ($R^2 = ۰/۴۱۵$) نشان‌دهنده‌ی عدم اطمینان از به‌کارگیری مدل‌های تحلیلی، به تنهایی در پیش‌بینی فرایند تزریق است.

مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار UDEC در مقایسه با مدل‌های تحلیلی، تخمین بهتری از حجم دوغاب ارائه داده و همبستگی خورند محاسبه‌شده با خورند واقعی افزایش یافته است؛ ولی میزان این همگرایی و ضریب همبستگی کافی نیست ($R^2 = ۰/۶۲۸$)، و لزوم استفاده از شبکه‌ی عصبی را نشان می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی و مقادیر محاسبه‌شده در روش شبکه‌ی عصبی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB بهترین برآورد از حجم دوغاب تزریق‌یافته را نشان می‌دهد و همبستگی قابل قبولی ($R^2 = ۰/۹۲$) بین حجم دوغاب به‌دست‌آمده از این روش با خورند واقعی وجود دارد. در نتیجه استفاده از روش شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی خورند دوغاب سیمانی در فرایند تزریق پیشنهاد می‌شود.

پانوشت‌ها

1. neural network
2. learning
3. feed forward

منابع (References)

1. Widmann, R. "Commission on rock grouting", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanical Abstracts*, **33**(8), pp. 803-847 (2012).

www.SID.ir

Archive of SID

2. Foyo, A. and Tomillo, C. "Dam foundation on soluble rocks analysis of the Permeability", Dam Engineering, *VI*(2), pp. 81-102 (1995).
3. Fransson, A., Tsang, F., Rutqvist, J. and Gustafson, G. "A new parameter to assess hydromechanical in single-hole hydraulic testing and grouting", *J. Rock Mechanics and Mining Sciences,* **44**(7), pp. 1011-1021 (2007).
4. Twise, R. and Mooros, K., *Geotechnical Engineering Handbook*, **2** John Willy (2002).
5. Jonson, T. "Calculation models for estimation of grout take in hard jointed rock", Ph.D Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (1998).
6. Barker, J.A. "A generalized radial flow model for pumping tests in fractured rock", *Water Resources Reaserch,* **24**(10), pp. 1796-1804 (1988).
7. Brantberger, H., Stille, H. and Eriksson, M. "Controlling grout spreading in Yunnel Groutin, g-analyses and developments of the GIN-method", *J. Tunneling and Underground Space Technology*, **15**(4), pp. 343-362 (2000).
8. Lombardi, G. and Deer, D. "Grouting design and control using the GIN principle", Water Power & Dam Construction, pp. 15-22 (1993).
9. Ewert, F.K. "Permeability, groutability and grouting of rock, part 4: Grout ability and grouting of rocks dam engineering", *Springer verlarg,* Berlin, **8**, pp. 271-325 (1993).
10. Hassler, L., Hakansson, U. and Stille, H. "Computer-simulated flow of grouting in jointed rock", *J. Tunneling and Underground Space Technology,* **7**(4), pp. 441-446 (1992).
11. Hassler, L., Hakansson, U. and Stille, H. "Classification of jointed rock with emphasis on grouting", *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, **7**(4), pp. 447-452 (1992).
12. Janson, T., Stille, H. and Hakansson, U. "Grouting of jointed rock - a case study", Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (1993).
13. Gustafson, G. and Stille, H. "Prediction of groutability from grout properties and hydrogeological data", *J. Tunneling and Underground Space Technology*, **11**(3), pp. 325-332 (1996).
14. Yang, M.J., Yue, Z.Q., Lee, P.K.K., Su, B. and Tham, L.G., *Prediction of Grout Penetration in Fractured Rocks by Numerical Simulation*, NRC Research Press Web Site, http://cgj.nrc.ca (2002).
15. Universal Distinct Element Code (UDEC) Manual.
16. Zhou, Y. "Reserve estimation using neural network technique", *Computer & Geosciences*, **19**(4), pp. 567-575 (1993).
17. Priest, S.D., *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman, London (1993).
18. Graf, D.E. "Observations grouting of rock fissures", *Proceedings of Conference on Grouting in Rock and Cocrete,* pp. 139-145 (1993).
19. Littlejohn, G.S. "Design of cement based grouts", *Proceeding of Conference on Grouting in Geotechnical Engineering*, pp. 35-48 (1995).
20. Houlsby, A.C. "Optimum water: Cement ratios for rock grouting", *Proceeding of Conference on Grouting in Geotechnical Enginnring*, pp. 317-331 (1990).
21. Wong, Y. and Farmer, I.W. "Hydrofracture mechanism in rock during pressure grouting", *Rock Mechanic,* **5**(1), pp. 21-41 (1998).
22. Lombardi, G. "Selecting the grout intensity", *International Journal on Hydropower & Dam*, **3**(4), pp. 62-66 (1996).
23. Mattew, B., *Neural Network in Artificial Intellhgence*, Ellis Horwood Limited (1991).
24. Estrtus Consulting Engineering Company, Report on Engineering Geology Studies and Grouting Results at Seymareh Site (2006).

www.SID.ir