

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

حسن بخشنده امنیه* (دانشیار)

دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مجید مسودی (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

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

عملیات تزریق، یکی از راه‌های کاهش نشست آب، افزایش مقاومت، و تحکیم سنگ درزه‌دار در ساخت‌گاه‌هاست. یکی از مسائل مهم، برآورد حجم دوغاب تزریق‌یافته است، که موجب افزایش بارده عملیات می‌شود. در این پژوهش از ۵ مدل تحلیلی، مدل‌سازی عددی، و شبکه‌ی عصبی^۱ برای پیش‌بینی حجم دوغاب استفاده شده‌است. با استفاده از نتایج حفاری‌های ژئوتکنیکی و تزریق آزمایشی در ساخت‌گاه سد سیمیره، محاسبات خوردند توسط مدل‌های تحلیلی و نیز مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار UDEC انجام شده است. نتایج مدل‌های تحلیلی و عددی در مقایسه با خوردند 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 خوردند دوغاب در سایر ساخت‌گاه‌ها پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: مدل‌های تحلیلی، مدل‌سازی عددی، شبکه‌ی عصبی، دوغاب سیمانی، برآورد خوردند، سد سیمیره.

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

۱. مقدمه

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.^[۱] بیشترین شعاع تأثیر عملیات، با فشار نهایی تزریق و بازشدگی درزه، رابطه‌ی مستقیم و با تنش تسلیم و گرانروی دوغاب، رابطه‌ی معکوس دارد.^[۵]

در مدل‌سازی تزریق علاوه بر خصوصیات دوغاب، وضعیت زمین‌شناسی مهندسی حاکم بر منطقه از جمله وضعیت بازشدگی درزه‌ها بسیار مهم است. به‌طور کلی 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 خوردند واقعی ثبت‌شده، می‌توان به شناخت نسبی از بازشدگی درزه‌ها دست یافت.^[۶]

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

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 امری لازم است.^[۱] برای این منظور، 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 به علت بازشدگی بیشتر، توانایی عبور دوغاب سیمانی را نیز داشته باشند، به ترتیب به دیسک‌های آب‌بر و تزریق‌پذیر موسوم هستند.^[۲] گمانه‌ی تزریق، در مرکز دیسک فرض می‌شود و شعاع دیسک برابر با شعاع تأثیر عملیات تزریق است.^[۳]

دوغاب سیمانی استفاده‌شده در عملیات تزریق به عنوان یک سیال بینگهائی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۲۶، اصلاحیه: ۱۳۹۳/۶/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۲۹

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 خوردن 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 خوردن 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 چسبندگی خمیری و پهنای ناحیه‌ی سیال که در آن گرادیان سرعت وجود دارد و نیز ویژگی‌های دوغاب که به صورت جامد خمیری عمل می‌کند، بررسی و مطالعه شده است. [۱۴]

در مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار UDEC استفاده و با طراحی محیط سنگی، درزه و گمانه و شرایط حاکم بر مقطع تزریق و دوغاب، حجم خوردن سیمانی محاسبه شده است. [۱۵] به دلیل دقت پایین مدل‌های تحلیلی و عددی در پیش‌بینی خوردن دوغاب و به منظور به دست آوردن روشی بهینه و دقیق در برآورد حجم خوردن 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. در نهایت با استفاده از اطلاعات مقاطع انتخابی تزریق آزمایشی در ساخت‌گاه سد سیمره و خوردن واقعی دوغاب ثبت‌شده در این سایت، بهترین و دقیق‌ترین روش برآورد حجم دوغاب سیمانی پیشنهاد شده است.

۲. پارامترهای مهم استفاده‌شده در مدل‌سازی‌ها

به‌طور کلی 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 خوردن 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 باز یافت‌شده که در آن قطعات بکر و سالم سنگ، طولی برابر یا بیش از ۱۰ سانتی‌متر دارند.

به‌طور کلی 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 خوردن 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. به‌طور کلی 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 پُرسدگی درزه و میزان زبری آنها نیز باید در نظر گرفته 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 ۰/۳۵ mm در هدایت آب حائز اهمیت هستند. همچنین تداوم سیستم درزه‌های باز در شعاع نفوذ تأثیر می‌گذارد. ناپوستگی 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 پُردردن گمانه‌ها با آب (لفران)، از جمله آزمایش‌های برجا هستند. آزمایش پمپاژ آب معمولاً با نام آزمایش فشار آب (WPT) خوانده می‌شود. آزمایش پله‌ی 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 $(1 \text{ LU} = 1 \text{ lit. min}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$ 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:

$$LU = 10Q/P_e \quad (1)$$

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 مکانیک سنگی 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 با مناطق نزدیک به سطح زمین، جهت جلوگیری از حرکت و جابه‌جایی توده‌ی سنگ یا بلندشدگی لایه‌ها باید از فشارهای پایین و

۱.۳. مدل اول

این مدل بر مبنای این فرض شکل گرفته است که توده سنگ مورد نظر، یک درزه دارد. این تک درزه به شکل دیسک دایره‌ی تحت بازشدگی ثابت b است. با شروع عملیات تزریق، دوغاب از گمانه‌ی می که در مرکز دیسک مذکور قرار دارد، به صورت شعاعی و یکسان، تمام دیسک مورد نظر را تحت تأثیر 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 آب‌براست. به این ترتیب، شعاع نفوذ دوغاب از گمانه به درون درزه از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید: [۱۲]

$$I = \Delta P \cdot b / (2\tau_0) \quad (2)$$

که در آن، ΔP اختلاف فشار آب زیرزمینی با فشار تزریق، τ_0 تنش تسلیم (چسبندگی) دوغاب، و b بازشدگی درزه است. حجم دوغاب لازم برای تزریق در دیسک مورد نظر از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید: [۱۲]

$$V = I^2 \cdot b \cdot \pi \quad (3)$$

با در نظر گرفتن تعداد دیسک برخوردکننده (N) با گمانه و رابطه‌ی ۳، حجم تزریق یافته به رابطه‌ی ۴ تعمیم می‌یابد: [۱۲]

$$V = (\Delta P / 2\tau_0)^2 \cdot N \cdot b^2 \cdot \pi \quad (4)$$

۲.۳. مدل دوم

در این مدل فرض بر این است که دوغاب از گمانه به درون مجموعه‌ی از درزه‌ها و مسیرهای موجود در سنگ، با زاویه‌ی گسترش α تزریق می‌شود. بخش‌های نفوذپذیر توده‌ی سنگ، با درزه‌هایی دایره‌ی و دیسک‌مانند شبیه‌سازی شده‌اند، و در وسط دیسک، گمانه‌ی تزریق قرار دارد. زاویه‌ی گسترش دوغاب درون درزه‌ی ایده‌آل، $\alpha = 2\pi$ است. اگر فقط بخشی از درزه نفوذپذیر باشد، زاویه‌ی مورد نظر 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 کاهش کیفیت 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 به صورت تجربی طبق جدول ۱ به دست می‌آید. [۷]

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

$$I = \rho_w \cdot g \cdot (h_w - h) \cdot b / (2\tau_0) \quad (5)$$

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

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

کنترل شده 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 رسوب کردن 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 ۰/۲ تا ۰/۳ 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 ضعیف‌تر شدن ساختار سنگ منطقه شود. در مقابل فشارهای پایین تزریق، گرچه باعث سالم ماندن توده‌ی سنگ می‌شود، ولی می‌تواند میزان اطمینان از کامل بودن فرایند تزریق را تحت تأثیر قرار دهد. [۲۰]

۵.۲. موقعیت و عمق گمانه‌ی تزریق

یکی از پارامترهای مهم در تعیین میزان خوردن دوغاب در عملیات تزریق، عمق مقطع تزریق یافته است. به‌طور کلی از مجموع مطالعات انجام شده 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 خوردن دوغاب، عمق مقطع تزریق یافته را نیز در نظر گرفت. این تذکر لازم است که شرایط ذکر شده همیشه حاکم نیست و در مقاطعی روند مذکور تغییر می‌کند. وجود حفره‌های کارستی یا گسل خوردگی‌ها در اعماق مختلف باعث کاهش دقت پیش‌بینی خوردن دوغاب می‌شود. [۲۱]

۳. مدل‌سازی تحلیلی تزریق

این مدل‌سازی براساس روابط ریاضی مختلف ارائه شده توسط پژوهشگران درخصوص تزریق انجام شده است. در مدل‌سازی تحلیلی، ابتدا شعاع نفوذ دوغاب توسط رابطه‌ی تعیین و سپس با استفاده از شعاع نفوذ، حجم خوردن دوغاب سیمانی در مدل‌های مختلف برآورد شده است. شرایط اولیه‌ی 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 تزریق یافته 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.

شعاع نفوذ دوغاب در این مدل نیز از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:^[۱۰]

$$I = \Delta P \cdot b / (2\tau_0) \quad (۸)$$

Hassler (۱۹۹۱)، حجم دوغاب تزریق یافته در این مدل را به عنوان تابعی از پارامترهای هندسی سنگ مطابق رابطه‌ی ۹ معرفی کرده است:^[۱۰]

$$V = (\Delta P / 2\tau_0) \cdot b^2 \cdot [W + ((\Delta P \cdot b / 2\tau_0) \cdot \alpha / 2)] \quad (۹)$$

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):^[۱۲]

$$I = \Delta P \cdot b / (2\tau_0) \quad (۱۰)$$

Lombardi (۱۹۸۵)، حجم دوغاب تزریق یافته در هر متر از گمانه را توسط رابطه‌ی ۱۱ معرفی کرده است، که در آن L طول مقطع تزریق است:^[۱۲]

$$V = I^2 \cdot b \cdot L / 2 \quad (۱۱)$$

۵.۳. مدل پنجم

این مدل، حالت توسعه یافته‌ی مدل اول است و نفوذ دوغاب را در سنگ، کامل‌تر از مدل‌های پیشین توصیف می‌کند. در مدل پنجم دوغاب تزریق یافته از گمانه وارد شبکه‌ی درزه‌ها می‌شود و براساس پارامترهای زمین‌شناسی معرفی شده در این روش، با در نظر گرفتن شرایط تزریق، شبیه‌سازی انجام می‌شود. در این حالت، درزه‌ی دیسک مانند، دارای بازشدگی میانگین \bar{b} و شعاع نفوذ I برای دوغاب است. دوغاب از گمانه به درون مجموعه‌ی دیسک‌های دایره‌ی جریان (ثانویه) نیز برخورد می‌کند. تغییرات در بازشدگی با پارامترهای زمین‌شناسی θ ، β و K توصیف می‌شوند. بازشدگی میانگین درزه \bar{b} را می‌توان با ضرب کردن پارامتر θ در بازشدگی هیدرولیکی میانگین b (که از آزمایش لوژن به دست می‌آید)، به دست آورد (رابطه‌ی ۱۲):^[۱۲]

$$\bar{b} = \theta \cdot b \quad (۱۲)$$

ضریب β نسبت مساحت کلی مجموعه‌ی درزه‌ها به مساحت دیسک اولیه است. تعداد دیسک‌های تزریق پذیر N_g ، که با گمانه برخورد دارند، از حاصل ضرب پارامتر تبدیل K_1 در تعداد N_w دیسک‌های آب‌بر تعیین می‌شود (رابطه‌ی ۱۳):^[۱۲]

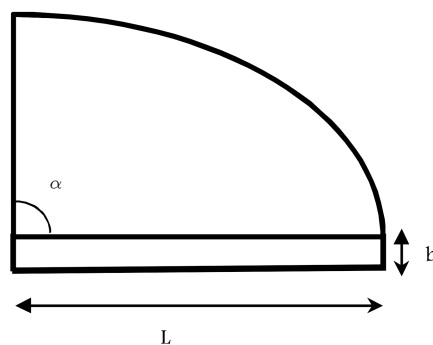
$$K_1 = N_g \cdot N_w \quad (۱۳)$$

شعاع نفوذ I نیز به کمک پارامترهای b_g و K_2 محاسبه می‌شود، که K_2 پارامتر مسیر خمیده‌ی مسیرهای درزه در دیسک است؛ یعنی نسبت طول مسیر خمیده به طول مسیر شعاعی نفوذ دوغاب. پارامتر K ، نسبت بازشدگی درزه‌ی تزریق پذیر b_g ، به بازشدگی هیدرولیکی درزه b است (رابطه‌ی ۱۴):^[۱۲]

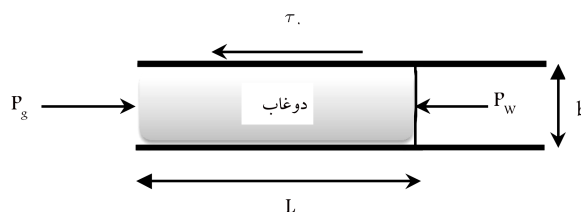
$$K = b_g / b \quad (۱۴)$$

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

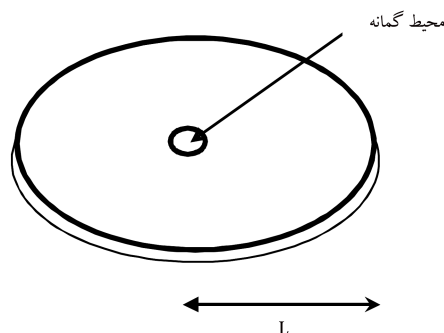
$$I = \Delta P \cdot b_g / (2\tau_0 \cdot K_2) \quad (۱۵)$$



الف) نفوذ دوغاب با زاویه گسترش α ؛



ب) درزه‌ی یک بعدی؛



ج) درزه‌ی دیسک مانند با گمانه‌ی بی در مرکز آن.

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

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

$$V = I^2 \cdot b \cdot \alpha / 2 \quad (۶)$$

با فرض وجود N درزه‌ی تزریق پذیر حجم مذکور از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$V = I^2 \cdot b \cdot (\alpha / 2) \cdot N \quad (۷)$$

۳.۳. مدل سوم

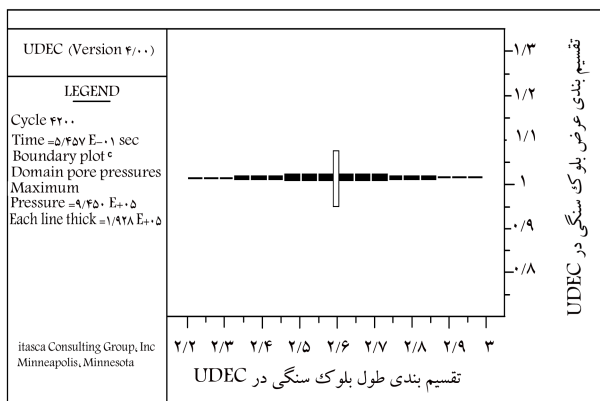
اصولی که این مدل براساس آن پیشنهاد شده است، مشابه با مدل قبلی است. در این مدل نیز درزه‌ی دیسک مانند، متعامد با گمانه‌ی بی است که از مرکز آن می‌گذرد. در این مدل پارامتر محیط گمانه‌ی تزریق، (W) نیز در محاسبه‌ی تخمین خورد مؤثر است. بدیهی است که وسعت نفوذ دوغاب در توده‌ی سنگ و حجم عملیات تزریق در گمانه‌هایی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

۲. مقطع تزریق یافته در مرکز توده سنگ مذکور در نظر گرفته شده است؛
۳. درزه‌ی تزریق یافته 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 ثبت شده 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 وارد شده، فشار نهایی تزریق را در دهانه‌ی درزه بر دوغاب موردنظر اعمال و میزان نفوذ آن را محاسبه می‌کند و نتایج را در پلات‌هایی نشان می‌دهد. مدل‌سازی عددی انجام شده، براساس تحلیل جریان پایا بوده و شرایط نقطه‌ی پایانی نفوذ دوغاب که در آن سیستم به حالت پایدار است، در نظر گرفته شده است. در نرم‌افزار UDEC، توده‌ی سنگ به صورت مجموعه‌ی بلوک‌های مجزا نمایش داده می‌شود، که توسط سطوح ناپوستگی (درزه‌ها)، از یکدیگر جدا شده‌اند. بلوک‌ها نفوذ ناپذیر در نظر گرفته 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 تزریق یافته	۵۰ × ۲۰ متر
۲	مقطع تزریق	۵ متر
۳	بازشدگی درزه (b)	۰/۵ - ۱ میلی‌متر
۴	چگالی دوغاب (ρ_{grout})	۱۱۳۰ kg/m ^۳
۵	تنش تسلیم دوغاب (τ_c)	۲۱ Kg/ms ^۲
۶	فشار تزریق دوغاب (P_{grout})	۳۰ - ۱۰ اتمسفر
۷	نسبت آب به سیمان (W : C)	۱ : ۲ - ۱ : ۱



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

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

$$V = I^2 \cdot \bar{b} \cdot \pi \cdot \beta \cdot N_g \quad (16)$$

پارامتر K_1 با توجه به وضعیت زمین‌شناسی سنگ از ۰/۳ - ۰/۵ متغیر است، پارامتر مربوط به بازشدگی مسیر (K) حدود ۴، پارامتر مربوط به نوع مسیر تزریق یافته (K_2) 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 تزریق یافته در یک درزه‌ی لوله‌ی استوانه‌ی شکل انجام می‌شود: [۱۵]

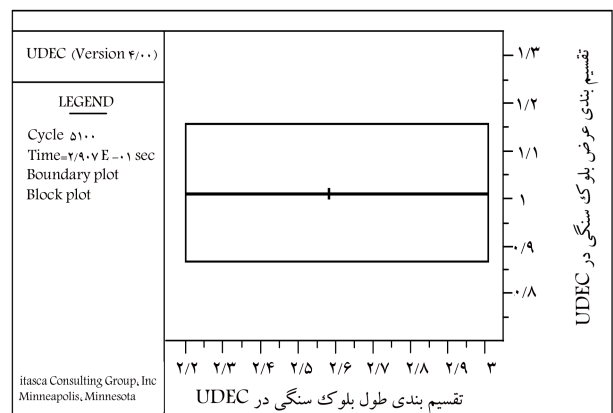
$$Q = \pi \cdot \Delta P \cdot r^3 / (8 \cdot L \cdot \mu) \cdot [1 - (8 \cdot L \cdot \tau_c / 3 \cdot r \cdot \Delta P) + (2 \cdot L \cdot \tau_c / 3 \cdot r \cdot \Delta P)^2] \quad (17)$$

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

۱.۴. مدل‌سازی هندسی

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

۱. هندسه‌ی توده‌ی سنگ تزریق یافته؛



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

۵. پیش‌بینی حجم خوردند با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

چون مدل‌های تحلیلی و عددی برآورد ضعیفی از حجم خوردند 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 خوردند و یافتن رابطه‌ی بین متغیرهای مستقل (بازشدگی درزه، فشار تزریق، RQD، میزان آب‌خوری (LU) و عمق مقطع تزریق) با متغیر وابسته‌ی حجم خوردند، با استفاده از توابع رگرسیون خطی و غیرخطی انجام شده است.

رگرسیون خطی پیش‌بینی ضعیفی از حجم دوغاب تزریق‌یافته ($R^2 = 0/55$) 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 به دست آورده است، ولی باز پیش‌بینی قابل قبولی حاصل نشده است ($R^2 = 0/68$). 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 به منظور شبیه‌سازی شبکه‌ی سلول‌های عصبی سیستم مرکزی (مغز) موجودات زنده (انسان یا حیوان) به کار می‌روند. شناخت دانشمندان علوم بیولوژی از چگونگی فعالیت سلول‌های عصبی در چند دهه‌ی گذشته اولین مینا و زمینه در طراحی این شبکه‌ها بوده است. برخلاف سیستم‌های خیره، که دانش موردنیاز قبلاً به صورت 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 لایه ورودی به‌عنوان ظرفیتی جهت دریافت مقادیر ورودی شبکه، یک یا چند لایه میانی، و یک لایه 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 به صورت 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^۲ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این شبکه‌ها هر سلول به کلیه‌ی سلول‌های موجود در لایه‌های بعدی متصل است. جهت جریان اطلاعات به صورت 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 به صورت تصادفی مقداردهی و در طول فرایند یادگیری تعیین می‌شوند.^[۱۳]

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 سیمه مورد بررسی قرار گرفته است. این نتایج با خوردند واقعی ثبت شده در سایت مقایسه شده است.^[۲۴]

۱.۶. موقعیت سد سیمه

ساخت‌گاه سد و نیروگاه سیمه بر روی رودخانه سیمه 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 سیمه است. سد سیمه به صورت 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 شمال 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 میلیون مترمکعب است.

۲.۶. نتایج مدل‌سازی تحلیلی

از مدل‌های معرفی‌شده در این پژوهش برای محاسبه‌ی حجم دوغاب تزریق‌شده در عملیات تزریق ساخت‌گاه سد سیمه 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 خوردند واقعی و آزمون فشار آب انجام شده است.

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

رابطه‌ی حجم خوردند واقعی $V(r)$ و میانگین حجم محاسبه‌شده از مدل‌های تحلیلی $V(a)$ در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همبستگی پایینی بین آنها وجود دارد و ضریب ($R^2 = 0/415$) 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 خوردند محاسبه شده است. در انتها، حجم دوغاب تزریق‌یافته با استفاده از روش مدل‌سازی عددی محاسبه شده است. رابطه‌ی بین حجم خوردند واقعی $V(r)$ و میانگین حجم محاسبه‌شده از مدل عددی $V(n)$ در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که 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 خوردند واقعی ارائه می‌دهند، ولی باز این تخمین از دقت کافی و قابل‌قبولی برخوردار نیست ($R^2 = 0/628$) و پیش‌بینی کاملاً مطلوبی از حجم واقعی دوغاب نشان نمی‌دهد.

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

۴.۶. نتایج مدل پیش‌بینی شده 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 کنترل‌ناپذیرند. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات ۵ پارامتر مؤثر (به‌عنوان پارامترهای مستقل و ورودی‌های شبکه) در میزان نفوذ دوغاب سیمانی، حجم خوردن دوغاب سیمانی به‌عنوان پارامتر وابسته و خروجی شبکه پیش‌بینی شده است.

نمونه‌ی از مقادیر نرمالیزه‌شده داده‌های ورودی به شبکه در جدول ۳ بیان شده است. پارامترهای مستقل و 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 این صورت 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 خوردن 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 قرار گرفته‌اند. 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

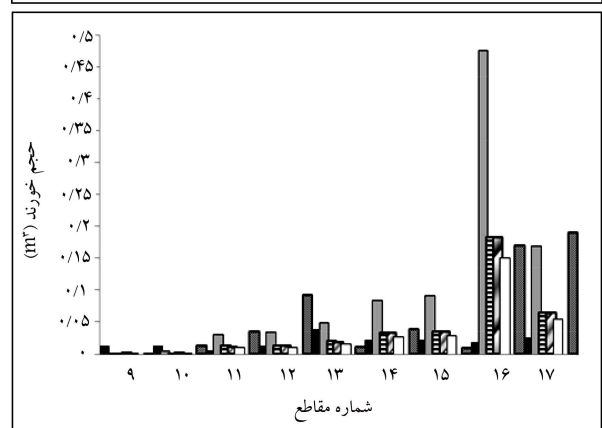
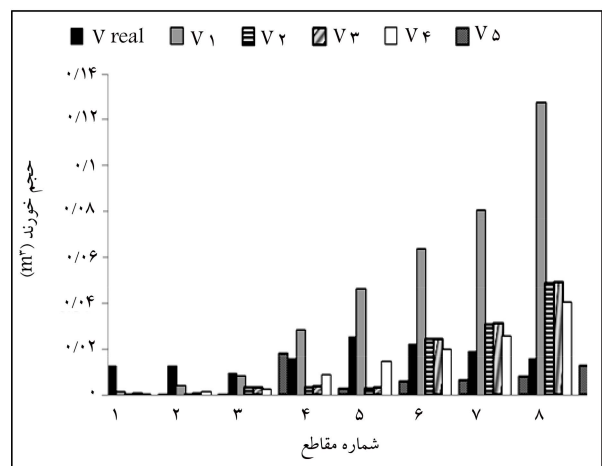
به‌طورکلی مرحله‌ی آموزش شامل یک ماتریس ۵ سطری و ۱۱۰ ستونی است. منظور از ۵ سطر آن، ۵ پارامتر مؤثر در حجم دوغاب تزریق‌یافته و ۱۱۰ ستون، ۱۱۰ داده‌ی مورد استفاده است.

۳.۴.۶. آزمون شبکه

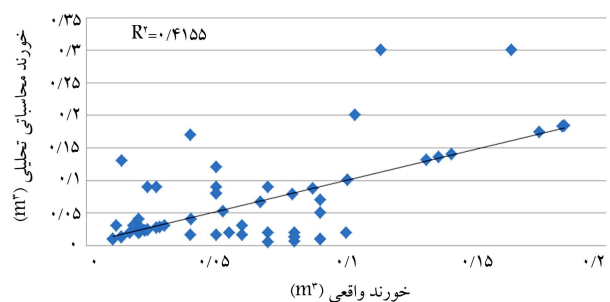
ماتریس هدف موردنظر، یک ماتریس ۱ سطر و ۱۱۰ ستونی است. برای آزمایش شبکه نیز تعداد ۱۳ سری داده به‌کار برده شده است، که هر سری از ۱۳ سری، شامل ۵ پارامتر مؤثر در نفوذ دوغاب است.

۴.۴.۶. نتایج شبیه‌سازی

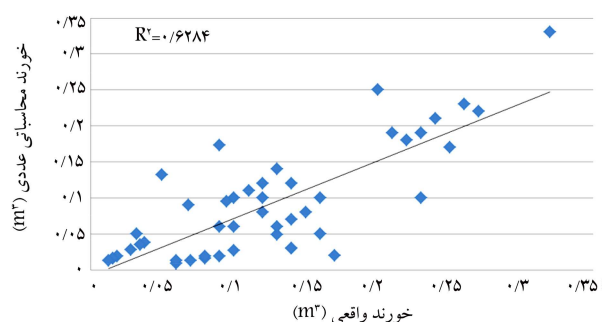
پس از ورود داده‌ها و شبیه‌سازی، حجم دوغاب توسط شبکه برآورد شده است. نتایج با خوردن واقعی ثبت‌شده در سایت تزریق، تطابق خوبی دارد و میزان همگرایی نتایج شبکه‌ی عصبی با حجم واقعی دوغاب، بسیار بیشتر از نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی و عددی است ($R^2 = 0.92$). در شکل ۱۰، رابطه‌ی بین حجم دوغاب پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی ($V(n)$)، با خوردن واقعی ($V(r)$) نشان داده شده است.



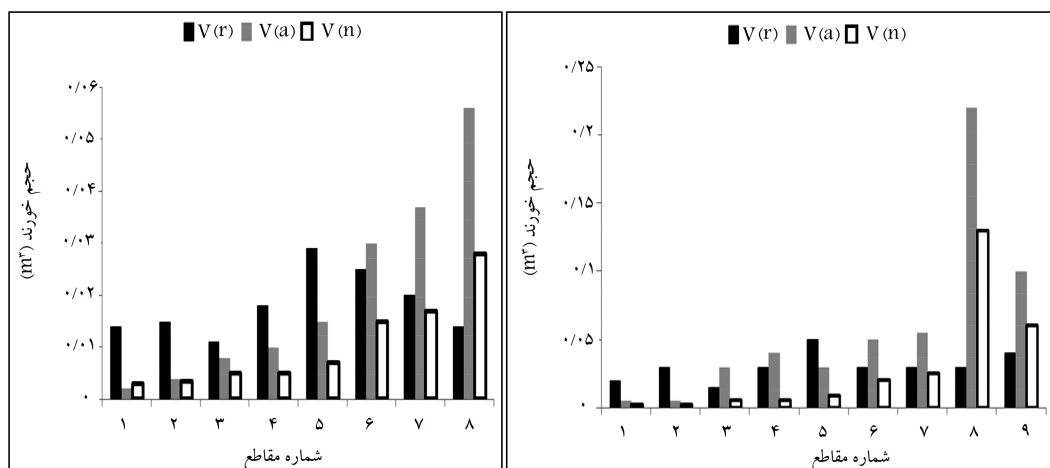
شکل ۴. مقایسه‌ی حجم دوغاب محاسبه‌شده از مدل‌های تحلیلی V_1 تا V_5 با خوردن واقعی $V(r)$ ، در مقاطع انتخابی.



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



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



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

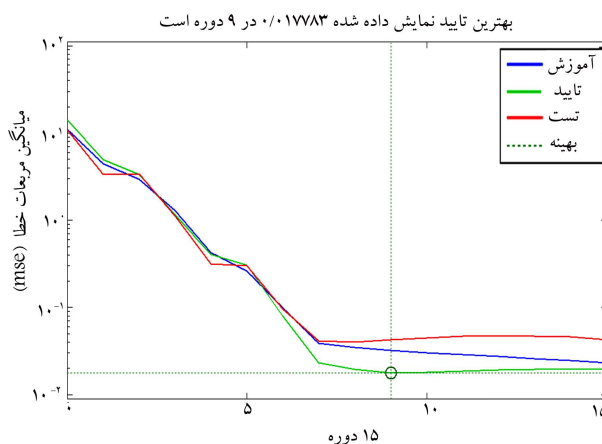
جدول ۳. نمونه‌ی بی از مقادیر نرمالیزه‌شده‌ی داده‌های ورودی به شبکه‌ی عصبی.

حجم دوغاب	فشار تزریق (P)	میزان آب‌خوری سنگ در آزمایش لوژان (LU)	بازشدگی درزه (b)	ضریب کیفیت سنگ (RQD)	عمق گمانه (H)
-۰٫۵۲۶۰۵۰۸۴۶	-۱٫۰۶۴۳۳۲۱۴۶	-۰٫۰۰۵۵۲۹۶۷۹	۰٫۲۸۷۶۳۵۰۰۸	۰٫۲۸۲۲۴۲۳۸۴	-۱٫۲۸۷۲۵۸۰۵۷
-۰٫۴۴۵۴۳۴۱۹۸	-۰٫۷۴۷۹۹۵۳۸۴	-۰٫۷۹۱۳۲۶۱۵۵	-۰٫۸۵۸۵۰۷۷۰۱	۱٫۷۶۱۱۲۹۳۵۸	-۱٫۱۷۱۹۸۱۲۵
۰٫۳۹۰۶۵۷۷۹۱	-۰٫۶۳۰۳۶۸۳۵۶	۰٫۸۰۶۴۶۰۰۱۳	۰٫۹۷۹۰۰۲۰۰۵	۰٫۷۶۵۱۴۴۲۵۳	-۰٫۸۵۷۴۲۰۲۹۸
-۰٫۵۸۸۶۵۹۴۳۲	-۰٫۴۲۳۶۶۴۵۵۱	-۰٫۰۰۵۵۲۹۶۷۹	۰٫۲۸۷۶۳۵۰۰۸	۱٫۳۶۸۷۷۱۵۸۹	-۰٫۵۹۴۹۰۶۰۶۵
-۰٫۵۲۶۰۵۰۸۴۶	-۰٫۲۱۵۸۱۸۷۳۶	-۰٫۸۶۹۹۰۵۸۰۲	-۱٫۰۵۴۳۹۵۷۹۶	۱٫۵۰۴۵۸۷۷۴	-۰٫۳۷۲۷۹۶۵۲
-۰٫۴۹۳۱۷۵۹۴۳	۰٫۱۲۴۵۰۰۲۳۵	-۰٫۸۶۹۹۰۵۸۰۲	-۱٫۰۵۴۳۹۵۷۹۶	-۰٫۹۵۵۱۹۳۶۵۶	-۰٫۱۴۵۲۰۸۳۷۴
-۰٫۴۹۳۱۷۵۹۴۳	۰٫۴۷۱۶۷۱۲۶۷	-۰٫۸۶۹۹۰۵۸۰۲	-۱٫۰۵۴۳۹۵۷۹۶	۰٫۹۷۶۴۱۳۸۲۱	۰٫۰۶۹۳۶۸۰۹۳
-۰٫۷۹۰۲۴۹۰۰۹	-۰٫۰۳۱۹۵۵۱۳۱	-۰٫۸۶۹۹۰۵۸۰۲	-۱٫۰۵۴۳۹۵۷۹۶	۱٫۳۹۸۹۵۲۹۵۶	-۰٫۲۹۱۷۶۰۹۷۵
-۰٫۶۵۲۳۳۰۸۴	۰٫۲۰۴۴۴۰۹۳۳	-۰٫۸۶۹۹۰۵۸۰۲	-۱٫۰۵۴۳۹۵۷۹۶	۱٫۸۲۱۴۹۲۰۹۲	۰٫۰۹۶۰۷۶۲۷۷

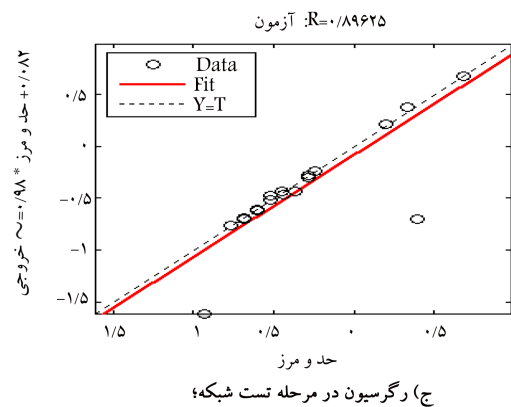
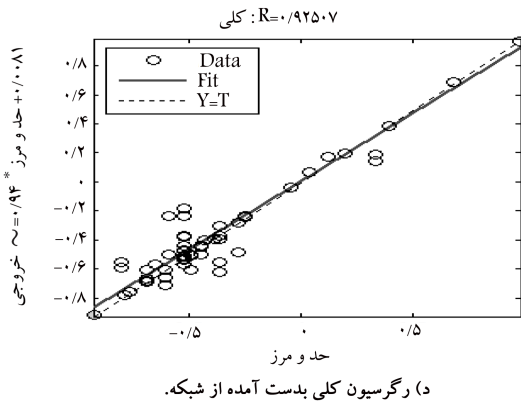
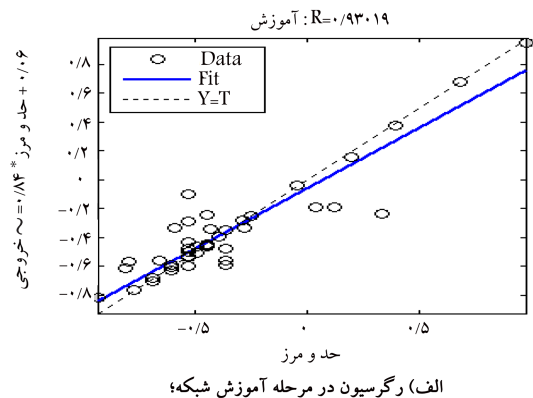
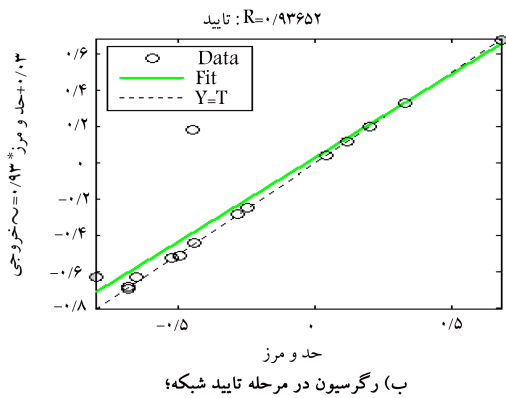
۷. نتیجه‌گیری

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 خوردند 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

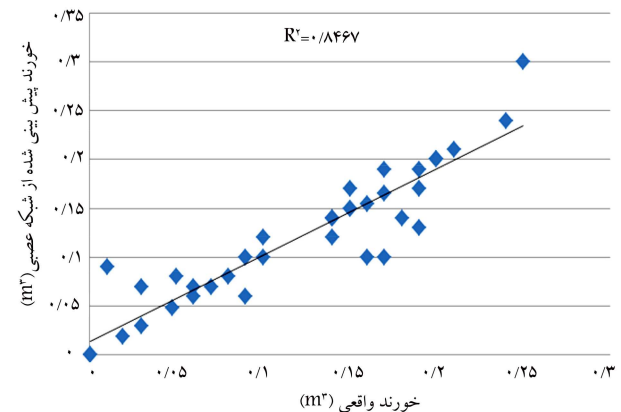


شکل ۸. نمودار خطای داده‌ها در شبکه‌ی عصبی.



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

دارد و ضریب همبستگی بین حجم دوغاب واقعی و حجم محاسبه‌شده‌ی تحلیلی ($R^2 = 0/415$) 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 خوردند محاسبه‌شده با خوردند واقعی افزایش یافته است؛ ولی میزان این همگرایی و ضریب همبستگی کافی نیست ($R^2 = 0/628$)، 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 ($R^2 = 0/92$) بین حجم دوغاب به‌دست‌آمده از این روش با خوردند واقعی وجود دارد. در نتیجه استفاده از روش شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی خوردند دوغاب سیمانی در فرایند تزریق پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۰. رابطه‌ی بین حجم دوغاب پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی $V(mn)$ ، با خوردند واقعی $V(r)$.

پانویس‌ها

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).

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. Twiss, 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 Research*, **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 verlag*, 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 Concrete*, 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 Enginring*, pp. 317-331 (1990).
21. Wong, Y. and Farmer, I.W. "Hydrofracture mechanism in rock during pressure grouting", *Rock Mechanics*, **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).