

مدل سازی تحلیلی و عددی فرآیند تزریق دوغاب سیمانی در سنگ درزه دار بر اساس نتایج تزریق آزمایشی در ساختگاه سد سیمره

مجید مسعودی^۱؛ محمدمین کربلا^۲؛ همایون کتیبه^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- دانشجوی دکتری مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر و عضو هیات علمی مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق خوزستان
۳- عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، E-mail:katibeh@aut.ac.ir

(دریافت ۱۵ مهر ۱۳۸۷، پذیرش ۲۹ فروردین ۱۳۸۸)

چکیده

عملیات تزریق، یکی از راه‌های کاهش نشست آب، افزایش مقاومت و تحکیم سنگ درزه دار در ساختگاه‌هاست. یکی از مسایل پیش‌رو در این عملیات، برآورد میزان سیمان مصرفی و تخمین شعاع نفوذ دوغاب سیمانی است که به عنوان پارامترهای اصلی فرآیند تزریق معرفی شده‌اند. در نتیجه، تخمین این پارامترها به منظور اجرای عملیات تزریق امری ضروری است که موجب افزایش بازده عملیات می‌شود. در این تحقیق ۵ مدل تحلیلی، همراه با مدل سازی عددی برای پیش‌بینی شعاع نفوذ و حجم دوغاب تزریق یافته معرفی شده‌اند. از مدل‌های تحلیلی برای انجام محاسبات تزریق در ساختگاه سد سیمره، بوسیله نتایج حفاری‌های ژئوتکنیکی و تزریق آزمایشی، استفاده شد. سپس با استفاده از مدل سازی عددی به وسیله نرم افزار UDEC نیز شعاع تاثیر و حجم خوردن محاسبه شد. نتایج دو مدل سازی تحلیلی و عددی با خوردن واقعی ثبت شده در ساختگاه مقایسه و بررسی شده‌اند. مطالعات نشان دهنده آن است که در مدل سازی تحلیلی، مدل لمباردی در مقایسه با سایر مدل‌ها برآورد بهتری از حجم دوغاب تزریق یافته ارائه می‌دهد. سایر مدل‌ها تخمین‌های متفاوتی از خوردن دوغاب نشان می‌دهند. علت این تفاوت را می‌توان ناشی از ساده سازی بیش از حد شرایط حاکم بر عملیات تزریق در این مدل‌ها دانست. نتایج مدل سازی عددی دارای تطابق قابل قبولی با میانگین مدل‌های تحلیلی است، اما بطور کلی می‌توان گفت که مدل سازی عددی در مقایسه با مدل‌های تحلیلی، تخمین بهتری از حجم دوغاب تزریق یافته نشان می‌دهد. با این وجود یکی از نقاط ضعف مدل سازی عددی، سهل‌الوصول نبودن محاسبات با توجه به تعدد مقاطع تزریقی و محدودیت امکانات محاسباتی در حین اجرای عملیات است. در حالیکه به کارگیری مدل‌های تحلیلی با توجه به سادگی محاسبات، کاربردی تر می‌نماید.

کلمات کلیدی

مدل سازی تحلیلی و عددی، شعاع نفوذ، خوردن دوغاب، سد سیمره

۱- مقدمه

تزریق دوغاب سیمانی به درون سنگ درزه‌دار، فرآیندی است که به علت طبیعت پیچیده و ناآشنای زمین، پیش‌بینی و محاسبه دقیق پارامترهای حجم دوغاب لازم برای تزریق و شعاع نفوذ آن به سادگی ممکن نیست. به منظور شناخت هرچه بیشتر این پارامترها، ساده‌سازی وضعیت هندسی سنگ و شرایط نفوذ دوغاب، امری لازم است. برای این منظور درزه‌های سنگ که مسیرهای عبور جریان تزریقی هستند، با دیسک‌های مدور با بازشدگی معادل با بازشدگی 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 موسومند. گمانه تزریق، در مرکز دیسک فرض شده و شعاع دیسک برابر با شعاع تاثیر عملیات تزریق خواهد بود [۱].

دوغاب سیمانی استفاده شده در عملیات تزریق به عنوان یک سیال بینگه‌امی شناخته می‌شود. در نتیجه خصوصیات رئولوژیکی دوغاب، شامل ویسکوزیته (μ) و تنش تسلیم (τ_0) کنترل‌کننده خصوصیات رفتاری آن خواهند بود. ویسکوزیته، سرعت جریان دوغاب و تنش تسلیم، بیشترین مسافت نفوذ دوغاب در گمانه در فشار تزریق معین و بازشدگی ثابت درزه را کنترل می‌نمایند. بیشترین شعاع تاثیر عملیات، با فشار نهایی تزریق و بازشدگی درزه رابطه مستقیم و با تنش تسلیم و ویسکوزیته دوغاب رابطه معکوس دارد [۲].

در مدل‌سازی تزریق علاوه بر خصوصیات دوغاب، وضعیت زمین‌شناسی مهندسی حاکم بر منطقه از جمله وضعیت بازشدگی درزه‌ها بسیار مهم است. به طور کلی بازشدگی درزه یکی از حساس‌ترین پارامترها در تخمین شعاع نفوذ دوغاب سیمانی تزریق یافته است. با توجه به نتایج آزمون فشار آب و اطلاعات مغزه‌های حفاری و حجم خوردن واقعی ثبت شده می‌توان به شناخت نسبی از بازشدگی درزه‌ها دست یافت [۱]. در کنار موارد فوق شرایط فنی حاکم بر عملیات، به ویژه میزان فشار تزریق اعمال شده نیز نفوذ دوغاب سیمانی را کنترل می‌نماید. هدف از این تحقیق، معرفی روش‌های محاسبه شعاع نفوذ عملیات تزریق و برآورد حجم دوغاب سیمانی تزریق یافته با استفاده از مدل‌های تحلیلی و عددی است. در نهایت مدل‌سازی‌ها با استفاده از اطلاعات مقاطع انتخابی تزریق آزمایشی در ساختگاه سد سیمره انجام شد و حجم دوغاب بدست آمده با خوردن واقعی ثبت شده در این سایت مقایسه گردید.

۲- مدل سازی تحلیلی تزریق

این مدل‌سازی بر اساس روابط ریاضی مختلفی که توسط محققین در خصوص تزریق ارائه شده، انجام می‌شود. در مدل‌سازی تحلیلی، ابتدا توسط رابطه ۱، شعاع نفوذ دوغاب تعیین شده، سپس با استفاده از شعاع نفوذ، حجم خوردن دوغاب سیمانی را می‌توان در مدل‌های مختلف برآورد کرد. شرایط اولیه‌ای که مدل‌ها بر اساس آن قابل ارائه می‌باشند عبارتند از: (۱) عملیات تزریق به پایان رسیده است. بدین معنی که دوغاب دیگر 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) هیچ گونه دگرشکلی در درزه‌ها رخ نمی‌دهد [۱]. در این تحقیق از مدل تحلیلی تزریق، به شرح زیر بهره‌گرفته شده است.

۲-۱- مدل اول

این مدل بر مبنای این فرض شکل گرفته است که توده سنگ مورد نظر دارای یک درزه است. و این تک‌درزه به شکل دیسک دایره‌ای تحت بازشدگی ثابت b است. با شروع عملیات تزریق، دوغاب از گمانه‌ای که در مرکز این دیسک قرار دارد به صورت شعاعی و یکسان تمام دیسک مورد نظر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. شعاعی از دیسک که توسط دوغاب تزریق می‌یابد را شعاع نفوذ I نامند. نکته اینکه تعداد دیسک‌های تزریق‌پذیر در راستای گمانه برابر با دیسک‌های آب‌بر است. با توجه به توضیحات بالا شعاع نفوذ دوغاب از گمانه به درون درزه از رابطه ۱ به دست می‌آید [۱]:

$$I = \frac{\Delta P \cdot b}{2\tau_0} \quad (1)$$

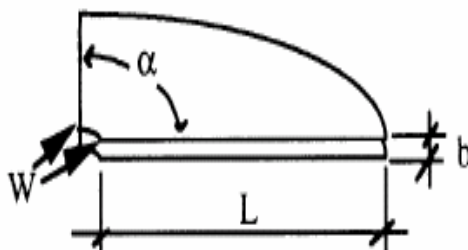
در این رابطه ΔP اختلاف بین فشار آب زیرزمینی با فشار تزریق، τ_0 چسبندگی دوغاب (یا تنش تسلیم دوغاب) و b بازشدگی درزه است. حجم دوغاب لازم برای تزریق در دیسک مورد نظر برابر است با [۱]:

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

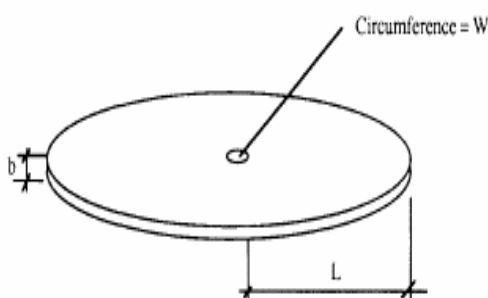
با در نظر گرفتن تعداد N دیسک برخورد کننده با گمانه و رابطه ۲ حجم تزریق یافته به رابطه زیر تعمیم می‌یابد [۱]:

با فرض وجود N درزه تزریق پذیر حجم مذکور از رابطه زیر بدست می‌آید [۳]:

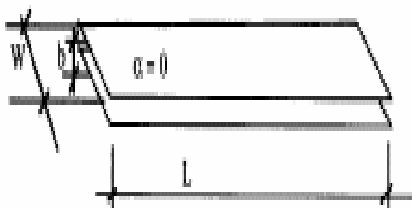
$$V = I^2 \cdot b \cdot \alpha / 2 \cdot N \quad (6)$$



الف: درزه دیسک مانند با گمانه‌ای در مرکز آن

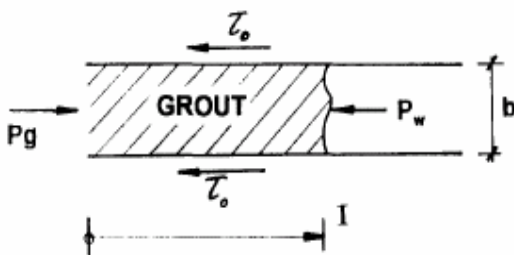


ب: نفوذ دوغاب با زاویه گسترش α



ج: درزه یک بعدی

شکل ۱: حالات مختلف گسترش درزه و نفوذ دوغاب [۲].



شکل ۲: نفوذ دوغاب درون درزه ای با بازشدگی b [۳].

$$V = \left(\frac{\Delta P}{2 \cdot \tau_0}\right)^2 \cdot N \cdot b^3 \cdot \pi \quad (3)$$

۲-۲- مدل دوم

در این مدل فرض بر این است که دوغاب از گمانه به درون مجموعه‌ای از درزه‌ها و مسیرهای موجود در سنگ، با زاویه گسترش α ، تزریق می‌شود. بخش‌های نفوذپذیر توده سنگ، با درزه‌هایی دایره‌ای و دیسک مانند شبیه‌سازی شده که در وسط دیسک، گمانه تزریق قرار دارد. زاویه گسترش دوغاب درون درزه‌ای ایده‌آل $\alpha = 2\pi$ است. اگر تنها بخشی از درزه نفوذپذیر باشد زاویه مورد نظر کوچک‌تر خواهد بود. در شکل ۱، حالات مختلف گسترش درزه و نفوذ دوغاب نشان داده شده است. برطبق نظر هاسلر^۱ در سال ۱۹۹۲ و برانت‌برگر^۲ در سال ۲۰۰۰ با کاهش کیفیت مکانیکی سنگ و در نتیجه با افزایش تعداد درزه‌های باز موجود در آن، مقدار α کاهش می‌یابد [۱]. با توجه به نظر استیل^۳ در سال ۱۹۹۴ و جانسون^۴ در سال ۱۹۹۸، زاویه گسترش دوغاب در این قطاع که با علامت α مشخص می‌شود، با استفاده از ویژگی‌های مکانیکی سنگ به صورت تجربی طبق جدول ۱ بدست می‌آید.

جدول ۱: مقادیر زاویه گسترش دوغاب بر اساس شاخص RMR [۳]

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

بازشدگی دیسک برابر با معکوس مجموع میانگین بازشدگی مسیرها است. تعداد دیسک‌های تزریق‌پذیر در راستای گمانه نیز برابر با دیسک‌های آب‌بر است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، با شروع فرآیند تزریق، دوغاب به عنوان سیالی بینگه‌امی، به درون درزه‌ها نفوذ می‌کند. لومباردی^۵ در سال ۱۹۸۵ و والنر^۶ در سال ۱۹۷۶ شعاع تاثیر دوغاب را بر اساس رابطه ۴ تخمین زدند [۳]:

$$I = \frac{\rho_w g (h_w - h)}{2 \cdot \tau_0} b \quad (4)$$

در این رابطه I ، طول بخش تزریق یافته و نیز $\rho_w g (h_w - h)$ ، اختلاف فشار آب زیرزمینی با فشار تزریق است. برای حجم دوغاب تزریق یافته با شرط وجود یک درزه رابطه ۵ برقرار است [۳]:

$$V = I^2 \cdot b \cdot \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

۳-۲- مدل سوم

اصولی که این مدل بر اساس آن پیشنهاد شده است، مشابه با مدل قبلی است. در این مدل نیز درزه‌های دیسک مانند، متعامد با گمانه‌ای است که از مرکز آن می‌گذرد. در این مدل پارامتر محیط گمانه تزریق (W) نیز در محاسبه تخمین خورند موثر است. بدیهی است که وسعت نفوذ دوغاب در توده سنگ و حجم عملیات تزریق در گمانه‌هایی با شعاع مختلف و در نتیجه با محیط‌های متفاوت مشابه خواهد بود. شعاع نفوذ دوغاب در این مدل نیز از رابطه ۱ بدست می‌آید [۴].

هاسلر در سال ۱۹۹۱ حجم دوغاب تزریق یافته در این مدل را به عنوان تابعی از پارامترهای هندسی سنگ مطابق رابطه ۷ معرفی کرد [۴].

$$V = (W + \frac{\Delta P \cdot b}{2\tau_0} \times \frac{\alpha}{2}) b^{\frac{\Delta P}{2\tau_0}} \quad (7)$$

در این رابطه W ، محیط گمانه تزریق و α ، زاویه انتشار دوغاب است.

۴-۲- مدل چهارم

در این مدل نیز رابطه شعاع تزریق مشابه مدل‌های قبلی است [۵]:

$$I = \frac{P \cdot b}{2\tau_0} \quad (8)$$

لومباردی (۱۹۸۵)، حجم دوغاب تزریق یافته در هر متر از گمانه را توسط رابطه ۹ معرفی کرد. در این رابطه L طول مقطع تزریق است [۵]:

$$V = \frac{I^2 \cdot b \cdot L}{2} \quad (9)$$

۵-۲- مدل پنجم

این مدل، حالت توسعه یافته مدل اول است و می‌کوشد نفوذ دوغاب را در سنگ، مفصل‌تر از مدل‌های پیشین توصیف کند. در مدل پنجم دوغاب از گمانه به درون مجموعه‌ای از دیسک‌های دایره‌ای جریان می‌یابد. دیسک دارای بازشدگی میانگین \bar{b} و شعاع نفوذ I برای دوغاب است. دیسک اصلی گذرنده از گمانه، با دیسک‌های دیگر (ثانویه) نیز برخورد می‌کند. تغییرات در بازشدگی با پارامترهای زمین‌شناسی θ ، β و K توصیف می‌شود. در این پارامترها، تفاوت‌های میان نفوذ دوغاب و آب در سنگ، مسیر منحنی دوغاب در سنگ و اثر دیسک‌های ثانویه در نظر گرفته 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 [۱]:

$$\bar{b} = \beta \cdot b \quad (10)$$

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_1 در تعداد دیسک‌های آب‌بر N_w تعیین می‌شود [۱]:

$$N_g = K_1 \cdot N_w \quad (11)$$

شعاع نفوذ I به کمک پارامترهای b_g و K_3 محاسبه می‌شود که K_3 پارامتر مسیر خمیده مسیره‌های درزه در دیسک است؛ یعنی نسبت طول مسیر خمیده به طول مسیر شعاعی نفوذ دوغاب. پارامتر K ، نسبت بازشدگی درزه تزریق‌پذیر b_g به بازشدگی هیدرولیکی درزه است [۱]:

$$K_3 = \frac{b_g}{b} \quad (12)$$

شعاع نفوذ دوغاب با رابطه زیر بیان می‌شود [۱]:

$$I = \frac{\Delta P \cdot b_g}{(2\tau_0 K_3)} \quad (13)$$

که همه پارامترها پیشتر تعریف شده‌اند و حجم دوغاب در این دیسک‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید [۱]:

$$V = I^2 \cdot b \cdot \pi \cdot \beta \cdot N_g \quad (14)$$

پارامتر K_1 با توجه به وضعیت زمین‌شناسی سنگ از ۰/۳-۰/۵ متغیر است، پارامتر مربوط به بازشدگی مسیر K ، حدود ۴/۰، پارامتر مربوط به نوع مسیر تزریق یافته K_3 ، برابر ۱/۵، θ با فرض درزه‌های بزرگ از ۰/۳ میلی‌متر و این که درزه‌ها دچار دگرشکلی نمی‌شوند، برابر با ۱، و β معادل نصف تعداد دسته درزه هاست [۱].

۳- مدل سازی عددی تزریق

مدل سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار UDEC انجام می‌گردد. در این نرم‌افزار نیز دوغاب یک سیال بینگه‌امی فرض می‌شود. مدل سازی UDEC با استفاده از رابطه زیر برای دبی جریان تزریق یافته در یک درزه لوله‌ای استوانه‌ای شکل، انجام می‌شود (Wilkinson, ۱۹۶۰):

$$Q = \frac{\pi \Delta P r^4}{8L\mu} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2L\tau_0}{r\Delta P} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2L\tau_0}{r\Delta P} \right)^4 \right] \quad (15)$$

در این رابطه r ، شعاع لوله، μ ویسکوزیته و L شعاع نفوذ دوغاب است.

خورند دوغاب در مقاطع مختلف نشان داد، با حذف پارامتر $L/2$ در مدل چهارم، نتایج دقیق‌تری بدست می‌آید. در نتیجه برای مقایسه مدل‌ها، رابطه تصحیح یافته این مدل استفاده شد. در مدل پنجم نکته مهم، در نظر گرفتن پارامترهای زمین‌شناسی K_1, K_2, θ و β است. با توجه به نکات فوق، مقادیر حجم دوغاب محاسبه شده با مدل‌های تحلیلی پنج‌گانه و خورند واقعی $V(\text{real})$ در جداول ۲ و ۳ و نیز مقایسه این مقادیر با یکدیگر در شکل‌های ۳ و ۴ نشان شده است.

۴-۲-۲- نتایج مدل سازی عددی

با توجه به مدل‌سازی عددی انجام شده بوسیله نرم‌افزار $UDEC$ شعاع نفوذ دوغاب محاسبه شد. به طوریکه به عنوان مثال در دو مقطع تزریق آزمایشی، شعاع نفوذ دوغاب به ازاء فشار تزریق ۱ مگاپاسکال برابر با ۷/۷ متر و در فشار ۴ مگاپاسکال برابر با ۱۵/۵ متر بدست آمد. نتایج شعاع بدست آمده از مدل‌سازی عددی با نتایج شعاع نفوذ محاسبه شده در مدل‌سازی تحلیلی مقایسه گردید. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج این دو مدل‌سازی وجود دارد. در واقع مدل‌سازی عددی، محاسبات مدل‌سازی تحلیلی را تایید می‌کند. در شکل ۶ چگونگی نفوذ دوغاب از گمانه تزریق به درون درزه، در نرم‌افزار $UDEC$ نشان داده شده است.

در انتها، حجم دوغاب تزریق یافته با استفاده از روش مدل‌سازی عددی محاسبه گردید و نتایج آن با یافته‌های مدل‌سازی تحلیلی مقایسه شد. با بررسی نتایج دو مدل‌سازی در مقاطع مختلف و مقایسه اختلاف بین میانگین حجم محاسبه شده در مدل‌های تحلیلی V_1 تا V_5 ، $V(a)$ ، و حجم بدست آمده از مدل‌سازی عددی، $V(n)$ با میزان خورند واقعی $V(\text{real})$ ، طبق روابط ۱۷ و ۱۸، مشاهده می‌شود که نتایج مدل‌سازی عددی با استفاده از $UDEC$ نسبت به نتایج بدست آمده از مدل‌سازی تحلیلی، برآورد صحیح‌تری از خورند واقعی ارائه می‌دهد. مقادیر خورند واقعی، تحلیلی و عددی و همچنین خطای نسبی E_1 و E_2 در جداول ۴ و ۵ بیان شده است. مقایسه بین خورندها در شکل ۷ نشان داده شده است.

$$E_1 = \frac{V(\text{real}) - V(n)}{V(\text{real})} \times 100 \quad (16)$$

$$E_2 = \frac{V(\text{real}) - V(a)}{V(\text{real})} \times 100 \quad (17)$$

در این روش ابتدا شکل هندسی مقطع سنگ، درزه و گمانه تزریق پیاده‌سازی می‌شود. سپس اطلاعات دیگری از قبیل خصوصیات دوغاب (ویسکوزیته، 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 می‌گردد. $UDEC$ با اجرای برنامه فوق و با اعمال فشار نهایی تزریق در دهانه درزه، حداکثر شعاع نفوذ دوغاب به درون درزه موردنظر را محاسبه می‌کند. با توجه به شعاع نفوذ بدست آمده حجم دوغاب تزریق‌یافته، محاسبه و با خورند واقعی مقایسه می‌شود.

۴- مطالعه موردی

در این بخش نتایج مدل‌سازی‌های عددی و تحلیلی با استفاده از اطلاعات تزریق آزمایشی در مقاطع انتخابی گمانه‌های سد سیمره مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج با خورند واقعی ثبت شده در سایت مقایسه گردید.

۴-۱- موقعیت سد سیمره

ساختمان سد و نیروگاه سیمره بر روی رودخانه سیمره و در حدود ۴۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان دره‌شهر از استان ایلام و ۷/۵ کیلومتری روستای چشمه شیرین واقع بوده و هدف از احداث آن استفاده از پتانسیل بالقوه نیروی برق رودخانه سیمره می‌باشد.

سد سیمره به صورت یک سد بتنی دو قوسی نازک به ارتفاع ۱۳۰ متر از بستر فعلی رودخانه (و حدود ۱۸۰ متر از سنگ بستر) طراحی شده است. رقوم تاج سد ۷۳۰ متر بوده و در رقوم نرمال سطح آب در ارتفاع ۷۲۰ متری از سطح دریاهای آزاد قرار دارد. طول تاج سد در رقوم تاج ۲۰۲ متر می‌باشد. گنجایش مخزن سد ۳/۲۱۵ میلیارد مترمکعب می‌باشد.

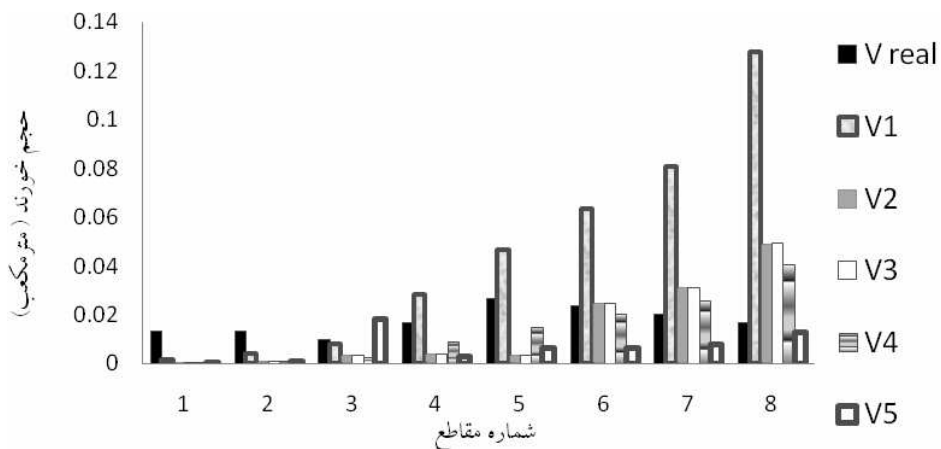
۴-۲- نتایج مدل سازی

۴-۲-۱- نتایج مدل سازی تحلیلی

از مدل‌های معرفی شده در این تحقیق برای محاسبه شعاع نفوذ و حجم دوغاب تزریق شده در عملیات تزریق ساختگاه سد سیمره استفاده شد. با توجه به کمبود اطلاعات لازم برای محاسبه زاویه انتشار دوغاب (α) بر مبنای شاخص RMR تنها از مقادیر RQD مغزه‌ها، برای تخمین آن استفاده شد. مقدار این زاویه با توجه به جدول ۱ براساس کیفیت سنگ ساختگاه بین ۲/۴ - ۰/۴ متغیر است. محاسبه بازشدگی درزه‌ها با توجه به حجم خورند واقعی و آزمون فشار آب انجام شد [۱]. محاسبه

جدول ۲: مقادیر حجم دوغاب محاسبه شده از میانگین مدل های تحلیلی V_1 تا V_5 ، $V(a)$ ، V_Δ با خوردند واقعی، $V(\text{real})$ ، در مقاطع ۱ تا ۸.

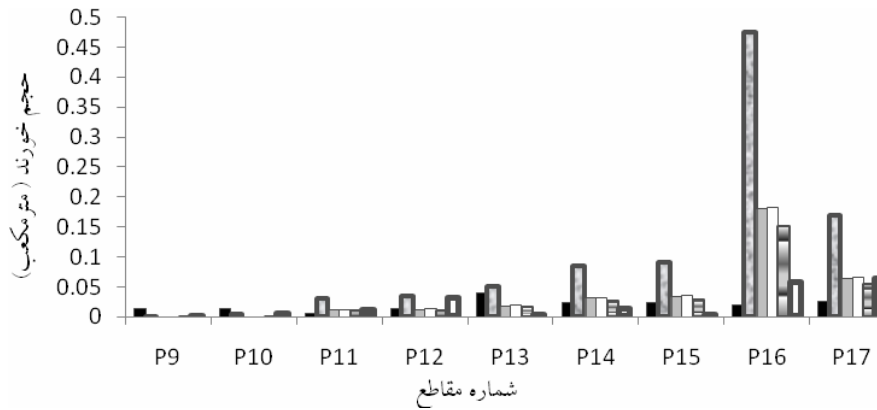
شماره مقطع	V_{real}	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
1	0.013451	0.001586	0.000202	0.000263	0.000505	0.000599
2	0.013451	0.004262	0.000543	0.000642	0.001357	0.001143
3	0.010088	0.008201	0.003134	0.003272	0.002612	0.018255
4	0.016814	0.028445	0.003624	0.00388	0.009059	0.002826
5	0.026903	0.046625	0.00297	0.003298	0.014849	0.006208
6	0.02354	0.063564	0.024292	0.024675	0.020243	0.006316
7	0.020177	0.080546	0.030782	0.031213	0.025652	0.008004
8	0.016814	0.127734	0.048816	0.049359	0.04068	0.012692



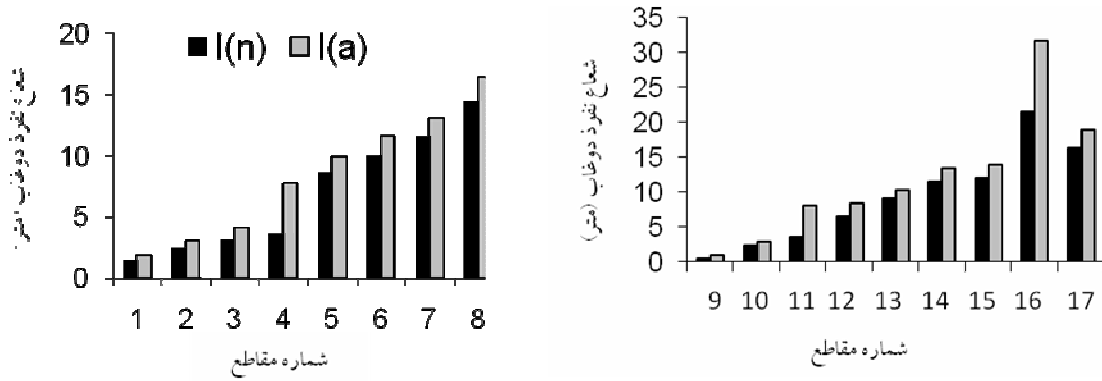
شکل ۳: مقایسه حجم دوغاب محاسبه شده از میانگین مدل های تحلیلی V_1 تا V_5 ، $V(a)$ ، V_Δ با خوردند واقعی، $V(\text{real})$.

جدول ۳: مقادیر حجم دوغاب محاسبه شده از میانگین مدل های تحلیلی V_1 تا V_5 ، $V(a)$ ، V_Δ با خوردند واقعی، $V(\text{real})$ ، در مقاطع ۹ تا ۱۷.

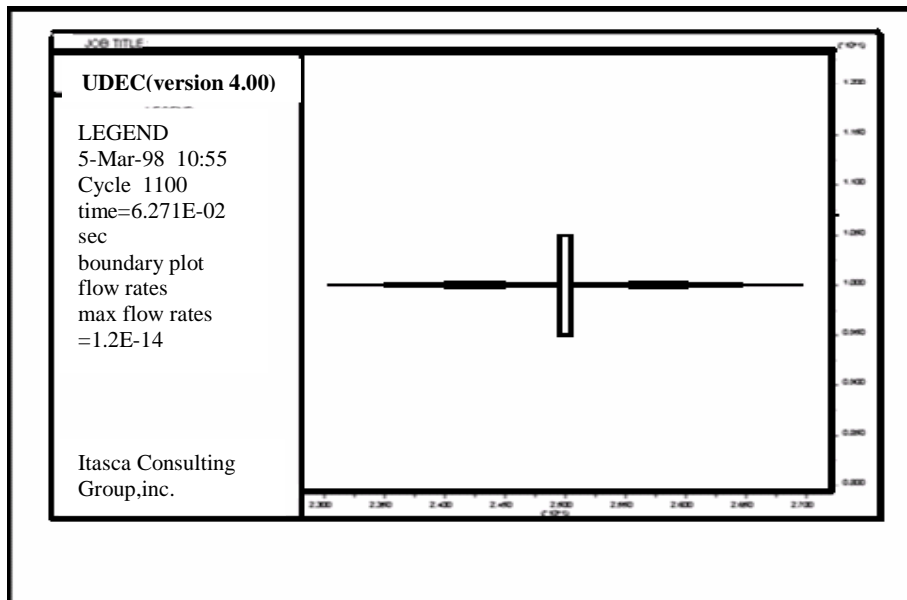
شماره مقطع	V_{real}	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
9	0.013451	0.000507	0.0000646	0.0000987	0.000161	0.000911
10	0.013451	0.004262	0.000543	0.000642	0.001357	0.004206
11	0.006726	0.03089	0.011805	0.012072	0.009838	0.011807
12	0.013451	0.034072	0.013021	0.013302	0.010851	0.030358
13	0.040354	0.049974	0.019098	0.019438	0.015915	0.003641
14	0.02354	0.084828	0.032418	0.032861	0.027015	0.012644
15	0.02354	0.091092	0.034812	0.035271	0.02901	0.003017
16	0.020177	0.474957	0.181512	0.182559	0.15126	0.056633
17	0.026894	0.169983	0.064962	0.065588	0.054135	0.063058



شکل ۴: مقایسه حجم دوغاب محاسبه شده از میانگین مدل‌های تحلیلی V_1 تا V_5 ، $V(a)$ ، با خوردن واقعی، $V(real)$ ، در مقاطع ۹ تا ۱۷.



شکل ۵: مقایسه شعاع نفوذ دوغاب محاسبه شده از مدل‌سازی عددی $I(n)$ و تحلیلی $I(a)$.



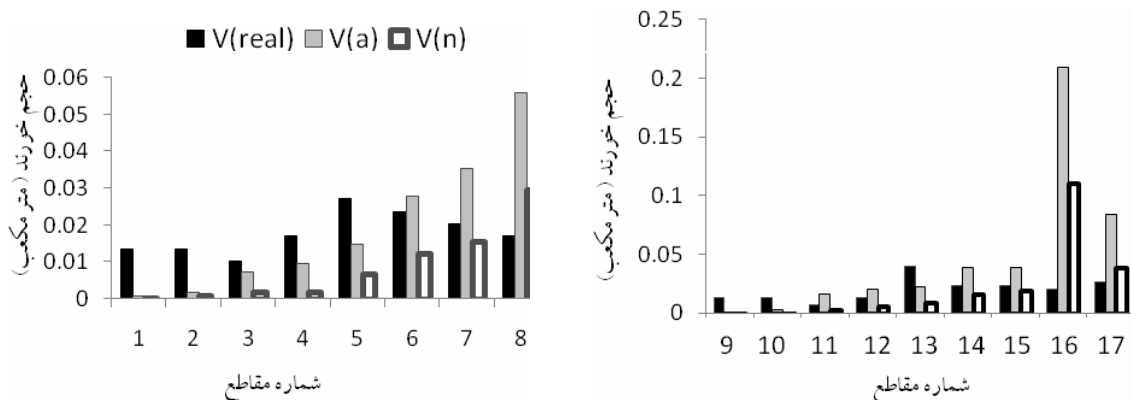
شکل ۶: نمایش نفوذ دوغاب از گمانه تزریق به درون توده سنگ بوسیله نرم افزار UDEC.

جدول ۴: مقادیر حجم دوغاب تزریق یافته‌ی محاسبه شده در مدل سازی عددی، $V(n)$ ، و میانگین مدل‌های تحلیلی، $V(a)$ ، با میزان خوردند واقعی $V(real)$ و میزان خطای نسبی در مقاطع ۱ تا ۸.

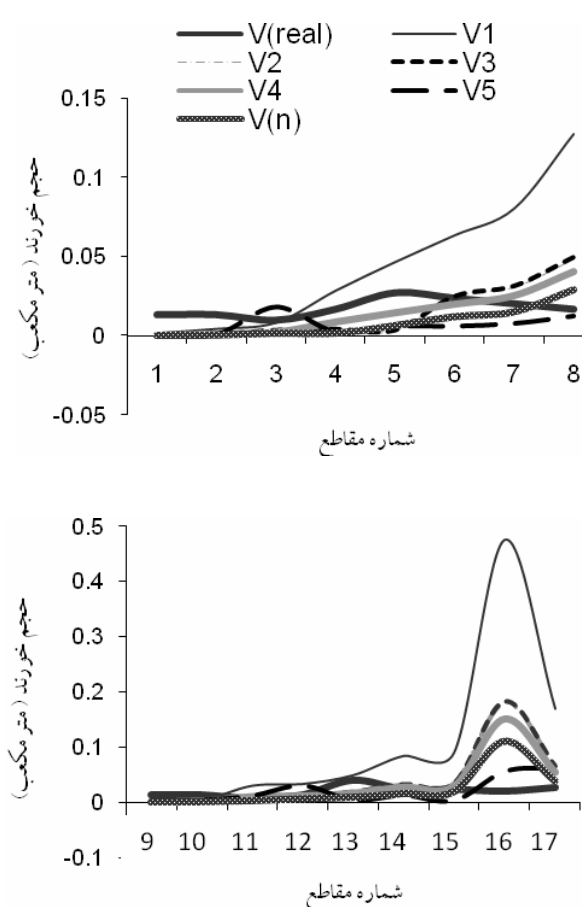
شماره مقاطع	V_{real}	V_a	V_n	E_1	E_2
1	0.013451	0.000631	0.000185	55	72
2	0.013451	0.001589	0.00069	54	65
3	0.010088	0.007095	0.001863	45	20
4	0.016814	0.009567	0.001871	48	13
5	0.026903	0.01479	0.006688	25	15
6	0.02354	0.027818	0.012321	12	23
7	0.020177	0.035239	0.01539	3	42
8	0.016814	0.055856	0.029325	35	62
				میانگین E_1	34.32
				میانگین E_2	40

جدول ۵: مقادیر حجم دوغاب تزریق یافته‌ی محاسبه شده در مدل سازی عددی، $V(n)$ ، و میانگین مدل‌های تحلیلی، $V(a)$ ، با میزان خوردند واقعی $V(real)$ و میزان خطای نسبی در مقاطع ۹ تا ۱۷.

شماره مقاطع	V_{real}	V_a	V_n	E_1	E_2
9	0.013451	0.000348	0.0008	64	67
10	0.013451	0.002202	0.000696	63	53
11	0.006726	0.015282	0.002725	23	78
12	0.013451	0.020321	0.006027	25	21
13	0.040354	0.021613	0.008847	48	16
14	0.02354	0.037953	0.015474	14	31
15	0.02354	0.03864	0.018913	2	34
16	0.020177	0.209384	0.110143	85	89
17	0.026894	0.083545	0.038424	12	87
				میانگین E_1	37.3
				میانگین E_2	53



شکل ۷: مقایسه حجم دوغاب تزریق یافته‌ی محاسبه شده در مدل سازی عددی، $V(n)$ ، و میانگین مدل‌های تحلیلی، $V(a)$ ، با میزان خوردند واقعی $V(real)$.



شکل ۸: روند تخمین خوردند نسبت به حجم تزریق شده واقعی $V(\text{real})$ ، بوسیله مدل‌های تحلیلی V_1 تا V_5 و مدل عددی $V(n)$.

شعاع نفوذ محاسبه شده در مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار UDEC، با نتایج شعاع نفوذ حاصل از مدل‌سازی تحلیلی تطابق خوبی دارد. و این دو مدل، نتایج یکدیگر را تایید می‌کنند. با بررسی و مقایسه نتایج حجم دوغاب تزریق یافته با استفاده از اطلاعات مدل‌سازی عددی مشخص می‌شود که این مدل‌سازی، برآورد قابل قبول‌تری از خوردند دوغاب در مقایسه با مدل‌سازی تحلیلی ارائه می‌دهد. البته یکی از نقاط ضعف مدل‌سازی عددی، پیچیده بودن و زمان‌بر بودن محاسبات با توجه به تعدد مقاطع تزریقی و پارامترهای لازم برای مدل‌سازی و نیز محدودیت امکانات محاسباتی در حین اجرای عملیات در سایت تزریق است. درحالی که مدل‌های تحلیلی در مقایسه با مدل‌های عددی با توجه به سادگی محاسبات، تخمین سریع‌تری از خوردند دوغاب ارائه می‌دهند.

۵- نتیجه‌گیری

آنچه در این تحقیق بیان گردید، تلاشی برای بهبود پیش‌بینی و محاسبه روند حاکم بر فرآیند تزریق است. با استفاده از مدل‌سازی‌های تحلیلی و عددی می‌توان حجم دوغاب لازم برای تزریق و نیز شعاع نفوذ عملیات تزریق را برآورد کرد. طبیعی است بررسی شرایط بسیار ناشناخته و کاملاً ناهمگون زمین، برای یک عملیات تزریق ایده‌آل در نقاط مختلف یک ساختگاه و در مرحله بالاتر در ساختگاه‌های گوناگون کاری پیچیده و توأم با خطا است. ولی حرکت به سوی شناخت بیشتر آن، امری لازم و ارزشمند است. و برای هرچه بیشتر علمی شدن عملیات تزریق، تصویری قابل قبول از پس پنجره‌ی ناگشوده و ناآشنای زمین، می‌نمایند. با در نظر گرفتن مجموع محاسبات انجام شده در این مطالعه، روند تخمین خوردند نسبت به حجم تزریق شده واقعی، بوسیله مدل‌سازی‌های عددی و تحلیلی را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد.

نتایج مدل‌سازی تحلیلی نشان می‌دهد که حجم محاسبه شده از مدل اول در مقایسه با سایر مدل‌ها، دارای بیشترین خطا نسبت به خوردند واقعی است. در واقع این مدل ضعیف‌ترین تخمین را از حجم تزریق انجام شده ارائه می‌نماید. در مدل دوم، محاسبه خوردند، تاثیر بیشتری از وضعیت کیفی سنگ دریافت می‌کند. چراکه پارامتر α مستقیماً در تعیین حجم محاسبه شده نقش دارد و در نتیجه نیاز به شناخت صحیحی از سنگ درزه‌دار، در این مدل الزامی است. در مدل سوم، با بررسی مقاطع، مشاهده می‌شود که نتایج آن، هماهنگی زیادی با نتایج مدل دوم دارد. و خوردندی مشابه را بدست می‌آورد. در این مدل، میزان طول تماس گمانه با سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل چهارم (لمباردی ۱۹۸۵)، در مقایسه با سایر مدل‌ها، برآورد بهتری از حجم دوغاب تزریق یافته، ارائه می‌کند. در نتیجه اگر تنها استفاده از یک مدل پیشنهاد شود، آن مدل، مدل چهارم (با تصحیح صورت گرفته)، خواهد بود. مدل پنجم، پیچیده‌تر از سایر مدل‌ها است و پارامترهای متعددی در پیش‌بینی حجم تزریق دخالت دارند و کاربرد صحیح آن نیاز به شناخت دقیقی از شرایط زمین‌شناسی منطقه دارد. این شرایط، تفاوت‌های میان نفوذ دوغاب و آب در سنگ، مسیر منحنی دوغاب در سنگ و اثر دیسک‌های ثانویه را در نظر می‌گیرند. در بین مدل‌های معرفی شده در نیمی از مقاطع انتخابی، مدل پنجم کمترین برآورد از حجم دوغاب را نشان می‌دهد.

منابع

- [5] Lombardi, G.; (1996); "*Selecting the Grouting Intensity*". Consulting Engineer, Switzerland.
- [6] Fransson, A.; Tsang, F.; Rutqvist, J.; Gustafson, G.; (2007); "*A New Parameter to Assess Hydromechanical in Single - Hole Hydraulic Testing and Grouting*"; J. Rock Mechanics and Mining Sciences. pp.1011-1021.
- [7] Hassler, L.; Hakansson, U.; Stille, H.; (1992); "*Computer-Simulated Flow of Grouting in Jointed Rock*". J. Tunneling and Underground Space Technology. Vol.7, No.4, pp.441-446.
- [8] Yang, M.J.; Yue, P.K.K.; Lee, B.; Tham, L.G.; (2002); "*Prediction of Grout Penetration in Fractured Rocks by Numerical Simulation*". College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University.
- [1] Janson, T.; Stille, H.; Hakansson, U.; (1993); "*Grouting of Jointed Rock-A Case Study*". Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- [2] Hassler, L.; Hakansson, U.; Stille, H.; (1992); "*Classification of Jointed Rock with Emphasis on Grouting*". J. Tunneling and Underground Space Technology. Vol.7, No.4, pp.447-452.
- [3] Brantberger, H.; Stille, H.; Eriksson, M.; (2000); "*Controlling Grout Spreading in Yunnel Grouting-Analyses and Developments of the GIN-Method*"; J. Tunneling and Underground Space Technology. Vol.15, No.4, pp.343-362.
- [4] Gustafson, G.; Stille, H.; (1996);, "*Prediction of Groutability from Grout Properties and Hydrogeological Data*". J. Tunneling and Underground Space Technology. Vol.11, No.3, pp.325-332.

پی‌نوشت‌ها

-
- ¹ - Hassler
² - Brantberger
³ - Stille
⁴ - Janson
⁵ - Lombardi
⁶ - Wallner