

## ارزیابی مدل‌های تحلیلی بر آورد حجم دوغاب سیمانی در سنگ درزه‌دار با نگرشی بر نتایج تزریق در سدهای سیمره و تالوار

حسن بخشنده امنیه\*؛ مجید مسعودی ۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران  
۲- دکترای مهندسی معدن، مدرس گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۲؛ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۳۰

### چکیده

در این تحقیق مهم‌ترین مدل‌های برآورد کننده‌ی حجم دوغاب تزریق یافته در سنگ معرفی و سپس ارزیابی آن‌ها به کمک نتایج واقعی در سدهای سیمره و تالوار انجام شده است. این مدل‌ها بر اساس شرایط زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی و مشخصات هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها و نیز فشار تزریق و خواص دوغاب، تدوین شده‌اند. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که مدل چهارم، در مقایسه با مدل‌های دیگر، برآورد بهتری ارائه می‌کند و دارای کمترین خطا (۲۸٪ در سد سیمره و ۳۸٪ در سد تالوار) می‌باشد و استفاده از این مدل در برآورد دوغاب در سایر ساختگاه‌ها پیشنهاد می‌شود. درحالی‌که مدل اول دارای بیشترین خطا (۷۵٪ در سد سیمره و ۹۸٪ در سد تالوار) است. مدل‌های دوم و سوم و پنجم در سد سیمره به ترتیب مقادیر خطای ۵۷٪ و ۵۶٪ و ۴۹٪ و در سد تالوار مقادیر خطای ۶۹٪ و ۶۸٪ و ۷۳٪ را نشان می‌دهند. به‌طورکلی خطای نسبی مدل‌سازی تزریق در سد سیمره کمتر از سد تالوار است. چراکه در ساختگاه تالوار، به دلیل کیفیت پایین‌تر توده‌سنگ و درزه‌های متعدد، شرایط پیچیده‌تری حاکم بوده و مدل‌های تحلیلی امکان در نظر گرفتن تمامی پارامترها را نداشته، در نتیجه بین مقادیر خوردن‌های واقعی و محاسباتی، اختلاف بیشتر و در نتیجه خطای زیادتری در مقایسه با ساختگاه سیمره ایجاد می‌شود.

واژگان کلیدی: تزریق، دوغاب، مدل تحلیلی، سنگ درزه‌دار، سدهای سیمره و تالوار

### ۱- مقدمه

ثابت، شبیه‌سازی شده‌اند. 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. گمانه‌ی تزریق، در مرکز دیسک فرض شده و شعاع دیسک برابر با شعاع تأثیر عملیات تزریق خواهد بود [۲].  
حجم فضای خالی سنگ - که توسط دوغاب پر می‌شود - در حقیقت تابعی از میانگین حسابی بازشدگی است؛ اما تجربه نشان می‌دهد که در مینیمم بازشدگی درزه دوغاب اجازه‌ی

عملیات تزریق درون توده‌سنگ درزه‌دار اجرا می‌گردد. با توجه به تعدد و آرایش درزه‌های تزریق‌پذیر، فرآیند تزریق در توده-سنگ‌های مختلف، متفاوت خواهد بود. شناسایی شرایط پیچیده و وضعیت هندسی توده‌سنگ در افزایش بازدهی عملیات تزریق ضروری است [۱]. به‌وسیله‌ی ساده‌سازی شرایط حاکم بر محیط تزریق، می‌توان شعاع نفوذ و حجم خوردن دوغاب سیمانی را برآورد نمود. برای تحقق این مهم، مسیرهای نفوذ دوغاب به درون سنگ با دیسک‌های مدور با بازشدگی

اولین مدل تحلیلی پیش‌بینی خوردن دوغاب سیمانی توسط والتر در سال ۱۹۸۶ ارائه شده است. در این مدل خواص سیال تزریقی از قبیل چسبندگی، وزن مخصوص، اختلاف خصوصیات آن با آب زیرزمینی و تأثیر آن بر میزان نفوذ دوغاب بررسی گردید. لومباردی در سال ۱۹۹۶ رابطه دیگری ارائه کرد و طول مقطع و عمق گمانه تزریق را در میزان نفوذ دوغاب مؤثر دانست [۹]. هاکانسون در سال ۱۹۹۲، مدلی را معرفی کرد که در آن محیط گمانه تزریق تأثیر مهمی در میزان دوغاب تزریقی دارد [۱۰]. هاسلر در سال ۱۹۹۲ میزان خوردن دوغاب را به وضعیت درزه‌ها و تفاوت در میزان آب‌خوری در تست فشار آب و دوغاب‌پذیری در عملیات تزریق، وابسته دانست [۱۱]. استیل در سال ۱۹۹۳ نقش تغییرات بازشدگی با دور شدن از گمانه و تأثیر آن بر میزان تزریق را بررسی کرد [۱۲]. جانسون در سال ۱۹۹۴ مدلی را برای پیش‌بینی خوردن دوغاب ارائه داد که پارامترهای بازشدگی درزه‌ها، فشار تزریق و چسبندگی دوغاب نقش مهمی داشتند [۱۳]. برانت‌برگر در سال ۲۰۰۰ مدل دیگری را ارائه کرد که در آن پارامتری به نام زاویه‌ی گسترش دوغاب معرفی گردید. این پارامتر با توجه به خصوصیات مکانیک سنگی ساختگاه محاسبه می‌گردد [۱۴]. گوستافسون در سال ۲۰۰۳ نقش تغییرات خواص ویسکوزیته پلاستیک و پهنای ناحیه‌ای از سیال که در آن گرادیان سرعت وجود دارد و ویژگی‌های دوغاب که به‌صورت جامد پلاستیک عمل می‌کند را بررسی و مطالعه نمود [۱۵].

هدف از این تحقیق، معرفی روش‌های محاسبه‌ی شعاع نفوذ عملیات تزریق و برآورد حجم دوغاب سیمانی تزریق یافته با استفاده از مدل‌های تحلیلی است. کاربرد این روش‌ها، با استفاده از مدل‌سازی تحلیلی اطلاعات مقاطع انتخابی تزریق آزمایشی در ساختگاه سدهای سیمره و تالوار بررسی شد و حجم دوغاب به‌دست‌آمده، با خوردن واقعی ثبت‌شده در این سایت‌ها مقایسه گردید.

## ۲- مدل‌سازی تحلیلی تزریق

این مدل‌سازی بر اساس روابط ریاضی مختلفی که توسط محققین در خصوص تزریق ارائه شده، انجام می‌شود. در این مدل‌سازی‌ها، ابتدا شعاع نفوذ دوغاب تعیین شده، سپس با استفاده از آن، حجم خوردن دوغاب سیمانی را می‌توان در مدل‌های مختلف برآورد نمود. شرایط اولیه‌ای که مدل‌ها بر

عبور پیدا نمی‌کند. زیرا ذرات دوغاب بسیار بزرگ‌تر از آن هستند که به‌سادگی از فضا‌های کوچک عبور کنند. همچنین فرض بر این است که گرادیان فشار در کانال‌های ریز بسیار کم بوده بطوریکه اجازه‌ی نفوذ دوغاب را نمی‌دهد. این دو فاکتور در یک راستا عمل کرده و همچنین تابعی از توزیع بازشدگی می‌باشند [۳].

دوغاب سیمانی استفاده‌شده در عملیات تزریق به‌عنوان یک سیال بینگه‌امی شناخته می‌شود. این نوع سیال دارای خصوصیات رئولوژیکی ویسکوزیته و چسبندگی (تنش تسلیم) است که کنترل‌کننده خصوصیات رفتاری آن خواهند بود [۴]. خاصیت ویسکوزیته بیانگر نرخ حرکت دوغاب در یک درزه با بازشدگی مشخص و تحت فشار ثابت است و زمان موردنیاز برای تزریق کامل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. چسبندگی یا تنش تسلیم، بیشترین مسافت نفوذ دوغاب در گمانه در فشار تزریق معین و بازشدگی ثابت درزه را کنترل می‌نمایند و فاصله‌ی نفوذ نهایی دوغاب را تعیین می‌کند [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 و حجم خوردن دوغاب سیمانی تزریق یافته است [۶]. با توجه به نتایج آزمون فشار آب (لوژن) و اطلاعات مغزه‌های حفاری و حجم خوردن واقعی ثبت‌شده می‌توان به شناخت نسبی از بازشدگی درزه‌ها دست‌یافت. در کنار موارد فوق شرایط فنی حاکم بر عملیات، به‌ویژه میزان فشار تزریق اعمال‌شده نیز نفوذ دوغاب سیمانی را کنترل می‌نماید [۷].

در طول فرآیند تزریق چهار پارامتر اساسی فشار، دبی، میزان خوردن و نسبت اجزا دوغاب به ترتیب به‌صورت چهار تابع  $I(t), Q(t), P(t)$  و  $N(t)$  نسبت به زمان تغییر خواهند کرد. در حالت معمول انتظار می‌رود که دو تابع  $P(t)$  و  $I(t)$  باگذشت زمان به‌موازات هم افزایش تدریجی داشته باشند. همچنین  $Q(t)$  در ابتدا افزایش یافته، اما پس از اشباع شدن مقطع، روند کاهشی را در پیش می‌گیرد و  $N(t)$  نیز با نزدیک شدن به انتهای عملیات و اعمال دوغاب غلیظ‌تر طبق روند متعارف، کاهش می‌یابد. می‌توان این حالت نرمال را بدون توجه به وضعیت کمی محورهای مختصات به‌عنوان مرجع قرارداد و حالت‌های متفاوت ممکن را بر اساس آن تفسیر نمود [۸].

درزه‌هایی دایره‌ای شکل، شبیه‌سازی شده که در وسط دیسک، گمانه‌ی تزریق قرار دارد. زاویه گسترش دوغاب درون درزه‌ای ایده‌آل  $\alpha = 2\pi$  است. اگر تنها بخشی از درزه نفوذپذیر باشد زاویه موردنظر کوچک‌تر خواهد بود. بر طبق نظر هاسلر و برانت‌برگر، با کاهش کیفیت مکانیکی سنگ و در نتیجه با افزایش تعداد درزه‌های باز موجود در آن، مقدار  $\alpha$  کاهش می‌آید [۱۰]. با توجه به نظر استیل و جانسون، زاویه گسترش دوغاب در این قطاع، با استفاده از ویژگی‌های مکانیکی سنگ به صورت تجربی طبق جدول ۱ به دست می‌آید. بازشدگی دیسک برابر با معکوس مجموع میانگین بازشدگی مسیرها است. تعداد دیسک‌های تزریق‌پذیر در راستای گمانه نیز برابر با دیسک‌های آب‌بر است. با شروع فرآیند تزریق، دوغاب به‌عنوان سیالی بینگه‌امی، به درون درزه‌ها نفوذ می‌کند. لومباردی در سال ۱۹۸۵ و والنر در سال ۱۹۷۶ شعاع تأثیر را بر اساس رابطه ۴ تخمین زدند [۱۰]:

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

جدول ۱- انتخاب زاویه گسترش دوغاب  $\alpha$  (رادیان).

انتخاب زاویه گسترش دوغاب $\alpha$	طبقه‌بندی توده‌سنگ (رادیان)
۲/۴	خیلی خوب
۰/۸	خوب
۰/۴	متوسط
۰/۲	ضعیف

در این رابطه  $I$ ، طول بخش تزریق یافته و نیز  $\rho_w g (h_w - h)$ ، اختلاف فشار آب زیرزمینی با فشار تزریق است. حجم دوغاب تزریق یافته با شرط وجود یک درزه از رابطه ۵ به دست می‌آید [۱۰]:

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

با فرض وجود  $N$  درزه تزریق‌پذیر حجم مذکور از رابطه ۶ به دست می‌آید [۱۱]:

$$V = \frac{I^2 \cdot b \cdot \alpha}{2 \cdot N} \quad (6)$$

### ۲-۳- مدل هاسلر

اصولی که این مدل بر اساس آن پیشنهاد شده است، مشابه با

اساس آن قابل‌ارائه می‌باشند 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  $\Delta P$  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 [۵]. در ادامه مهم‌ترین مدل‌های تحلیلی ارائه‌شده توسط محققین مختلف معرفی می‌شوند:

### ۲-۱- مدل دیسک دایره‌ای

این مدل بر مبنای این فرض شکل‌گرفته است که توده‌سنگ موردنظر 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 موردنظر را تحت‌تأثیر 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 [۹]:

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

در این رابطه  $\Delta P$  اختلاف فشار آب زیرزمینی با فشار تزریق،  $\tau$  تنش تسلیم دوغاب و  $b$  بازشدگی درزه است. حجم دوغاب لازم برای تزریق در دیسک موردنظر برابر است با [۹]:

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

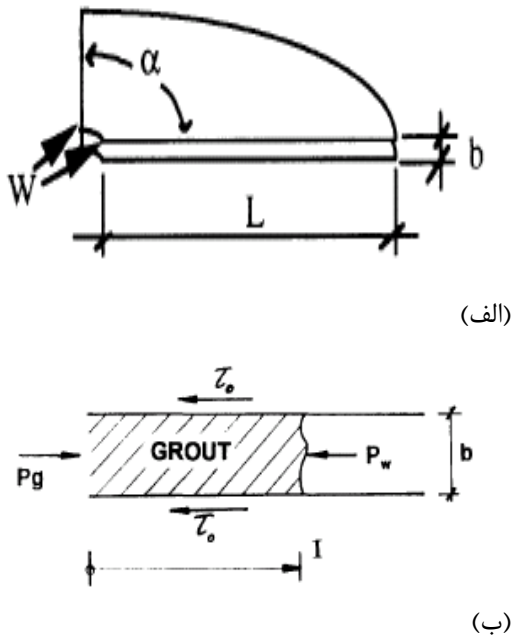
با در نظر گرفتن تعداد  $N$  دیسک برخوردکننده با گمانه و رابطه ۲ حجم تزریق یافته به رابطه ۳ تعمیم می‌یابد [۹]:

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

### ۲-۲- مدل والنر

در این مدل فرض بر این است که دوغاب از گمانه به درون مجموعه‌ای از درزه‌ها و مسیره‌های موجود در سنگ، با زاویه‌ی گسترش  $\alpha$ ، تزریق می‌شود. بخش‌های نفوذپذیر توده‌سنگ، با

بازشدگی با پارامترهای زمین‌شناسی  $\theta$ ،  $\beta$  و  $K$ ، توصیف می‌شود.



شکل ۱: حالات مختلف گسترش درزه و نفوذ دوغاب [۱۰]:

الف. نفوذ دوغاب با زاویه گسترش  $\alpha$

ب. درزه‌ی یک‌بعدی

ج. درزه‌ی دیسک مانند با گمانه‌ای در مرکز آن

این پارامترها، تفاوت‌های میان نفوذ دوغاب و آب در سنگ، مسیر منحنی دوغاب در سنگ و اثر دیسک‌های ثانویه را در نظر می‌گیرند. بازشدگی میانگین درزه  $b^-$  را می‌توان با ضرب کردن پارامتر  $\theta$  در بازشدگی هیدرولیکی میانگین  $b$  (که از آزمایش لوژن به دست می‌آید)، به دست آورد:

$$b^- = \theta \cdot b \quad (11)$$

مدل قبلی است. در این مدل نیز درزه‌ای دیسک مانند، متعامد با گمانه‌ای است که از مرکز آن می‌گذرد. در این مدل پارامتر محیط گمانه‌ی تزریق،  $(W)$  نیز در محاسبه‌ی تخمین خورد مؤثر است.

در شکل ۱، حالات مختلف گسترش درزه و نفوذ دوغاب نشان داده شده 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 نخواهد بود. شعاع نفوذ دوغاب در این مدل نیز از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید [۹]:

$$I = \frac{\Delta P \cdot b}{\gamma \tau_c} \quad (7)$$

هاسلر در سال ۱۹۹۱ حجم دوغاب تزریق یافته در این مدل را به‌عنوان تابعی از پارامترهای هندسی سنگ با استفاده از رابطه ۸ معرفی نمود [۱۰]:

$$V = \frac{\Delta P}{\gamma \tau_c} b^2 \left( W + \frac{\Delta P \cdot b}{\gamma \tau_c} \times \frac{\alpha}{\gamma} \right) \quad (8)$$

که در آن،  $W$ ، محیط گمانه تزریق و  $\alpha$ ، زاویه‌ی انتشار دوغاب است.

#### ۲-۴- مدل لومباردی

در این مدل نیز رابطه شعاع تزریق مشابه مدل‌های قبلی است [۷] و از رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$I = \frac{P \cdot b}{\gamma \tau_c} \quad (9)$$

لومباردی، حجم دوغاب تزریق یافته در هر متر از گمانه را توسط رابطه‌ی ۱۰ معرفی نمود. در این رابطه  $L$  طول مقطع تزریق است [۸]:

$$V = I^3 \cdot b \cdot L / \gamma \quad (10)$$

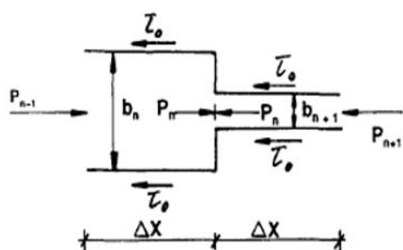
#### ۲-۵- مدل دیسک اولیه و ثانویه

این مدل، حالت توسعه‌یافته‌ی مدل اول است و 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  $b^-$  و شعاع نفوذ  $I$  برای دوغاب است. دیسک اصلی گذرنده از گمانه، با دیسک‌های دیگر (ثانویه) نیز برخورد می‌کند. تغییرات در

بازشدگی‌ها  $\sum b^r$  متناسب است و نیز تحت تأثیر بیشترین مقدار بازشدگی درزه‌ها می‌باشد، بنابراین برای محاسبه‌ی بیشترین میزان نفوذ دوغاب  $(\sum b^r)^{1/2}$  یک تخمین معقولی از بازشدگی حاکم بر محیط خواهد بود. به‌طور خلاصه روابط ۱۶ و ۱۷ برای شعاع نفوذ و حجم دوغاب تزریق یافته ارائه شده است [۲]:

$$I_{max} = \frac{\Delta P}{\gamma \tau} (\sum b^r)^{1/2} \quad (16)$$

$$V_{grouit} = \left(\frac{\Delta P}{\gamma \tau}\right)^2 \cdot \pi \cdot \sum b^r \quad (17)$$



شکل ۲- درزه با بازشدگی متغیر [۲].

### ۲-۷- مدل سیال بینگه‌امی

در این مدل رابطه‌ی مستقیمی برای محاسبه‌ی شعاع نفوذ و حجم دوغاب ارائه نشده است. بلکه رابطه‌ای برای محاسبه‌ی دبی جریان دوغاب معرفی شده است. این رابطه برای یک کانال تزریق یافته و شبکه‌ی کانال‌های متقاطع محاسبه شده است. با به دست آوردن دبی، طبق این مدل می‌توان حجم خوردن دوغاب را به دست آورد. کانال‌ها می‌توانند افقی یا شیب‌دار باشند. دبی جریان در یک مسیر یک‌بعدی و افقی که با سیال بینگه‌امی پر شده است از رابطه ۱۸ به دست می‌آید [۷]:

$$Q = \frac{\rho_w g \cdot b^r W (h_s - h_D)}{12 \mu_g (t) \cdot L} (1 - \tau Z + \epsilon Z^2) \quad (18)$$

$$Z = \min \left[ \frac{\tau_s(t)}{\tau \cdot b \rho_w g \left| \frac{(h_s - h_D)}{L} \right|} \right] \quad (19)$$

که در آن:  $Q$  دبی جریان،  $\rho_w$  چگالی آب،  $g$  شتاب گرانش،  $\mu_g$  ویسکوزیته پلاستیک،  $W$  عرض بازشدگی و  $\tau$  تنش برشی دوغاب است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است گذشت زمان باعث می‌شود در خواص رئولوژیکی دوغاب تغییر ایجاد گردد. با تعیین دبی، می‌توان حجم خوردن دوغاب سیمانی

ضریب  $\beta$ ، نسبت مساحت کلی مجموعه‌ی درزه‌ها به مساحت دیسک اولیه است. تعداد دیسک‌های تزریق‌پذیر  $N_g$  که با گمانه برخورد دارند، از حاصل ضرب پارامتر تبدیل  $K_1$  در تعداد  $N_w$  دیسک‌های آب‌بر تعیین می‌شود [۶]:

$$N_g = K_1 \cdot N_w \quad (12)$$

شعاع نفوذ  $I$  به کمک پارامترهای محاسبه می‌شود که  $K_3$  پارامتر مسیر خمیده‌ی مسیره‌های درزه در دیسک یا نسبت طول مسیر خمیده به طول مسیر شعاعی نفوذ دوغاب می‌باشد. پارامتر  $K$ ، نسبت بازشدگی درزه تزریق‌پذیر،  $b_g$  به بازشدگی هیدرولیکی درزه است:

$$K = b_g / b \quad (13)$$

شعاع نفوذ دوغاب با رابطه ۱۴ بیان می‌شود:

$$I = \Delta P \cdot b_g / (\gamma \cdot \tau \cdot K_r) \quad (14)$$

که همه‌ی پارامترها پیشتر تعریف شده‌اند و حجم دوغاب در این دیسک‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$V = I^2 \cdot \bar{b} \cdot \pi \cdot \beta \cdot N_g \quad (15)$$

پارامتر  $K_1$  با توجه به وضعیت زمین‌شناسی سنگ از ۰/۳-۰/۵ متغیر است، پارامتر مربوط به بازشدگی مسیر  $K_3$ ، حدود ۰/۴، پارامتر مربوط به نوع مسیر تزریق یافته  $K_3$ ، برابر ۱/۵،  $\theta$  با فرض درزه‌های بزرگ از ۰/۳ میلی‌متر و این که درزه‌ها دچار دگرشکلی نمی‌شوند، برابر با ۱ و  $\beta$  معادل نصف تعداد دسته‌درزه‌هاست.

### ۲-۶- مدل بازشدگی متغیر

در این مدل فرض بر این است که بازشدگی درزه‌های موجود در سنگ ثابت نیست. این حالت را می‌توان به این صورت شبیه‌سازی نمود که بازشدگی درزه در فواصل  $\Delta X$  ثابت بوده و مرحله‌به‌مرحله افزایش می‌یابد. شکل ۲ تصویری از این حالت را نشان می‌دهد. اگرچه حجم دوغاب تزریق یافته در توده‌سنگ با میانگین حسابی بازشدگی‌ها مشخص می‌گردد، ولی تجربه‌ها نشان می‌دهد یک بازشدگی حداقل وجود دارد که اجازه می‌دهد دوغاب نفوذ پیدا کند. چراکه ذرات سیمان برای بازشدگی‌های کمتر خیلی بزرگ بوده و نیز اعمال فشار در این مسیرها به‌سختی صورت می‌گیرد. نکته این‌که در هنگام تزریق، تعدادی از درزه‌ها (نه لزوماً تمامی آن‌ها) متأثر از عملیات خواهند بود. از آنجایی که ضریب انتقال با توان سوم مجموع

دانست. مطالعات درزه‌نگاری تفصیلی و دقیق سطحی و غیر سطحی نشان می‌دهد که لایه‌بندی فاقد هرگونه بازشدگی می‌باشد و بر اساس بررسی مغزه‌های به‌دست‌آمده از حفاری اکتشافی عموماً حالت صفحه‌ای- زبر دارد. میانگین ضریب کیفیت سنگ در کلیه گمانه‌های حفار شده در جناح راست در رده خوب (۷۶) تا عالی (۹۶) می‌باشد. گمانه‌های تکیه‌گاه چپ نیز در رده خوب (۷۹) تا عالی (۹۳) و گمانه‌های بستر نیز در رده خوب (۷۴) تا عالی (۹۴) قرار دارند. کیفیت توده‌سنگ، معرف افزایش درصد شاخص کیفی سنگ با دور شدن محل گمانه از دامنه‌های پرشیب مشرف به دره می‌باشد که علت این امر را باید در ایجاد درزه‌های رهایی در توده‌سنگ و کلاً تمایل توده‌سنگ به نوعی انبساط در اثر حذف بار رویی به واسطه عملکرد فرسایشی رودخانه جستجو نمود.

### ۳-۲- سد تالوار

سد تالوار در مرز بین استان کردستان و استان زنجان، در ۱۵۲ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان زنجان و در ۷ کیلومتری جنوب روستای حسن‌تیمور قرار دارد. دستیابی به محل سد از طریق کیلومتر ۱۲۵ جاده زنجان - بیجار (روستای خورخوره) امکان‌پذیر است که پس از طی ۲۷ کیلومتر می‌توان به محل سد تالوار دسترسی پیدا کرد. این سد که در حال حاضر در دست‌ساخت قرار دارد، در طبقه‌بندی انواع سدها در گروه سدهای خاکی- سنگریزه‌ای با هسته رسی قرار گرفته و ارتفاع آن از بستر رودخانه ۷۸ متر و حجم مخزن آن حدود ۵۰۰ میلیون مترمکعب برآورد گردیده است. هدف از احداث سد مخزنی تالوار، بهره‌برداری از آب رودخانه تالوار، برای آبیاری دشت‌ها و اراضی پایین دست سد می‌باشد.

### ۳-۲-۱- وضعیت زمین‌شناسی ساختگاه سد تالوار

آثار گسله‌های فرعی و زون‌های بُرشی ناشی از این راندگی در محدوده ساختگاه و گستره‌ی طرح مشاهده می‌شود. چین‌خوردگی درآهک‌های محل سد به‌خوبی قابل‌مشاهده بوده و گسله‌های فرعی زیادی آهک‌ها را بریده‌اند و زون‌های بُرشی زیادی ایجاد شده است. شالوده‌ی سد عموماً از سنگ‌های آواری تشکیل یافته که از نظر دانه‌بندی محدوده‌ی گسترده‌ای از رس تا کنگلومرا را شامل می‌گردد. زون‌های مذکور به پهنای چند سانتی‌متر تا چندین متر اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج حاصل از درزه‌نگاری‌ها و آنالیز داده‌ها موجب شناسایی چهار دسته‌درزه اصلی در تکیه‌گاه راست و دو دسته‌درزه اصلی در

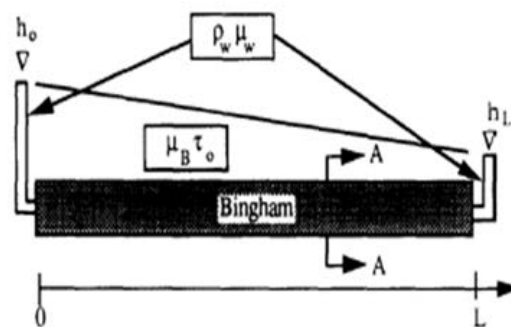
را با توجه به مدت‌زمان تزریق،  $t$ ، بر اساس رابطه  $Q=V/t$  محاسبه نمود.

### ۳- مطالعه موردی

در این بخش نتایج مدل‌سازی تحلیلی با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از مقاطع انتخابی گمانه‌های تزریق آزمایشی در ساختگاه سدهای سیمره و تالوار مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج با خوردن واقعی ثبت‌شده در سایت مقایسه گردید.

### ۳-۱- سد سیمره

ساختگاه سد و نیروگاه سیمره بر روی رودخانه سیمره و در حدود ۴۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان دره شهر 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 به‌صورت یک سد بتنی دو قوسی نازک به ارتفاع ۱۳۰ متر از بستر فعلی رودخانه (حدود ۱۸۰ متر از سنگ‌بستر) 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.



شکل ۳- کانال افقی یک‌بعدی پر شده با سیال بینگهامی [۷].

### ۳-۱-۱- وضعیت زمین‌شناسی ساختگاه سد سیمره

به‌طور کلی تا پایان مطالعات زمین‌شناسی ساختگاه سیمره، ۱۳ گسل اصلی در محل سد شناسایی شده است. بررسی عکس‌های هوایی جدید همراه با پیمایش‌های صحرائی نشان می‌دهد که تعدادی بزرگ درزه یا گسله امتدادلغز با طول قابل‌توجه در راستایی مورب نیز نسبت به محور طاق‌دیس در هر دو یال طاق‌دیس وجود دارند که می‌توان آن‌ها را از نوع درزه‌های برشی

شدند. در مجموع کیفیت توده سنگ در حد ضعیف تا متوسط است. مقدار متوسط ضریب کیفیت سنگ در تکیه‌گاه چپ ۳۵٪ (ضعیف)، تکیه‌گاه راست ۴۹٪ (متوسط) و بستر رودخانه ۳۳٪ (ضعیف) می‌باشد. در تمامی موارد با افزایش عمق در مقدار ضریب کیفیت سنگ، افزایش قابل توجهی رخ نمی‌دهد که علت آن را می‌توان در ساختار تکتونیکی منطقه جستجو کرد. با توجه به وضعیت گسل خوردگی و درزه خیزی منطقه، می‌توان گفت شالوده از شرایط نامناسب هیدرولیکی برخوردار است. شالوده در نواحی برخورد با درزه‌ها، محتوی مناطقی با تزریق پذیری بالا می‌باشد. زیرا اکثر درزه‌ها دارای بازشدگی زیاد (بیش از ۰/۱ میلی‌متر)، گستردگی صفحه‌ای (حدود ۱ الی ۱۰ متر) و فاقد پرشدگی (یا با پرشدگی‌های قابل شستشو مثل مواد خردشده) هستند. با توجه به شرایط لایه‌بندی، ناپیوستگی‌ها، وجود ضعف مکانیکی در محیط همچنین وضعیت هیدروژئولوژیکی حاکم بر منطقه، در طرح پرده‌ی تزریق، دلایل کافی به منظور اعمال سخت‌گیرانه‌ترین حالات انتخاب و پارامترها وجود داشت.

#### ۴- مقایسه شرایط زمین‌شناسی دو ساختگاه

با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی به‌دست‌آمده از ساختگاه‌های سیمره و تالوار، می‌توان گفت سایت تالوار از شرایط زمین‌شناسی ضعیف‌تری برخوردار بوده و توده سنگ این ساختگاه شرایط کیفی نامطلوب‌تری دارد. مقادیر شاخص کیفیت سنگ نسبت به ساختگاه سیمره پایین‌تر بوده و درزه‌داری بیشتری دیده می‌شود و در نتیجه لزوم عملیات تزریق بیشتر احساس می‌گردد.

#### ۵- مدل‌سازی تزریق

با توجه به وجود پیش‌فرض‌های خاص در مدل‌های ۶ و ۷ مانند وجود درزه با بازشدگی‌های متفاوت و مدت‌زمان مربوط به هریک از دوره‌های تزریق و کمبود اطلاعات به‌دست‌آمده از عملیات تزریق ساختگاه سدهای سیمره و تالوار برای تعیین دقیق این پارامترها، از میان ۷ مدل معرفی شده در این تحقیق، مدل‌های اول تا پنجم برای محاسبه شعاع نفوذ و حجم دوغاب استفاده شد. برای محاسبه زاویه انتشار دوغاب ( $\alpha$ ) از مقادیر RQD مغزه‌ها، استفاده شد. مقدار این زاویه با توجه به جدول ۱ بر اساس کیفیت سنگ ساختگاه بین ۰/۴ تا ۲/۴ متغیر است. محاسبه بازشدگی درزه‌ها با توجه به حجم خوردند واقعی و آزمون فشار آب انجام شد [۶]. در مدل چهارم با حذف پارامتر

#### ۶- مقایسه و تحلیل نتایج

با توجه به نکات فوق و نتایج شعاع تأثیر عملیات تزریق، با توجه به اطلاعات تزریق آزمایشی در ساختگاه سدهای سیمره و تالوار، حجم دوغاب با استفاده از مدل‌های تحلیلی پنج‌گانه  $V_1$  تا  $V_5$  محاسبه و با خوردند واقعی  $V_{real}$ ، مقایسه گردید. به‌عنوان نمونه، مقادیر ورودی به مدل‌ها برای یک گمانه در سدهای تالوار و سیمره در جدول ۲ نشان داده شده است.

در شکل‌های ۴ و ۵ و ۶ و ۷ نیز مقایسه روند تغییرات خوردند محاسباتی و واقعی نشان شده است. این نتایج از مقاطع موجود در گمانه‌های تزریق شده در دو سایت سیمره و تالوار به‌دست‌آمده است. به‌گونه‌ای که هر گمانه به طول‌های ۵ متری به نام مقطع تقسیم شده و عملیات تزریق در هر مقطع انجام می‌گردد. پس از اتمام تزریق در هر مقطع، فرآیند، در مقطع بعدی ادامه می‌یابد. ترتیب تزریق هم معمولاً از مقاطع پایینی به سمت مقاطع بالایی تا سطح زمین ادامه می‌یابد. بررسی جزئیات نتایج، خطای نسبی محاسبه‌ی حجم دوغاب با استفاده از ۵ مدل تحلیلی ( $V_a$ )، در مقایسه با خوردند واقعی ثبت شده در سایت تزریق ( $V_{real}$ ) با استفاده از رابطه محاسبه خطا با  $E = (V_{real} - V_a) / V_{real}$  محاسبه گردید؛ که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است.

همانگونه که از این شکل پیداست، مدل چهارم دارای کمترین خطا (۲۸٪ در سیمره و ۳۸٪ در تالوار) و مدل اول دارای بیشترین خطا (۷۵٪ در سیمره و ۹۸٪ در تالوار) است. مدل‌های دوم و سوم و پنجم در سد سیمره به ترتیب مقادیر ۵۷٪ و ۵۶٪ و ۴۹٪ و در سد تالوار مقادیر ۶۹٪ و ۶۸٪ و ۷۳٪ را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی خطای نسبی مدل‌سازی تزریق در سد سیمره کمتر از سد تالوار است.

با مقایسه شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی این دو سایت، می‌توان گفت که در ساختگاه تالوار، به دلیل شرایط زمین‌شناسی

به خوردند واقعی است. درواقع این مدل ضعیف‌ترین تخمین را از حجم تزریق انجام‌شده ارائه می‌نماید. در مدل دوم، محاسبه‌ی خوردند، تأثیر بیشتری از وضعیت کیفی سنگ دریافت می‌کند، چراکه پارامتر  $a$  مستقیماً در تعیین حجم محاسبه‌شده 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 به دست می‌آورد. در این مدل، میزان طول تماس گمانه با سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل چهارم، در مقایسه با سایر مدل‌ها، برآورد بهتری از حجم دوغاب تزریق یافته، ارائه می‌کند. در نتیجه تنها اگر استفاده از یک مدل مدنظر باشد، مدل چهارم پیشنهاد می‌شود. این مسئله در مورد داده‌های سد سیمره انطباق بیشتری دارد.

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 درزه‌های دایره‌ای شکل ثانویه را در نظر می‌گیرند.

ضعیف‌تر و کیفیت پایین‌تر توده‌سنگ و درزه‌های متعدد میزان خطا افزایش می‌یابد. چراکه درزه‌های زیادتر و کیفیت ضعیف‌تر سنگ، معرف وجود شرایط زمین‌شناسی پیچیده‌تر منطقه می‌باشد. در چنین شرایطی درزه‌ها با امتداد، شیب، جهت‌داری و فاصله‌داری متفاوت نسبت به گمانه‌ی تزریق و نیز وجود زبری و پرشدگی‌های مختلف، شرایط پیچیده‌تری را ایجاد می‌کنند. درحالی‌که مدل‌های تحلیلی، توانایی در نظر گرفتن تمامی این پارامترها را نداشته، در نتیجه بین مقادیر خوردندهای واقعی و محاسباتی در ساختگاه تالوار، اختلاف بیشتر و در نتیجه میزان خطای زیادتری در مقایسه با ساختگاه سیمره ایجاد می‌شود

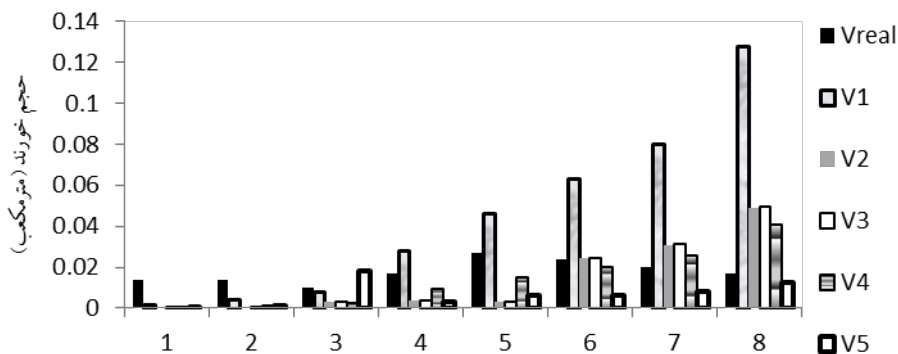
## ۷- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه، می‌توان بهترین مدل برآوردکننده حجم دوغاب سیمانی تزریق یافته را تعیین نمود. با استفاده از مدل‌سازی‌های تحلیلی می‌توان حجم دوغاب لازم برای تزریق و نیز شعاع نفوذ عملیات تزریق را برآورد نمود. طبیعی است که 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 باخطا است.

مدل اول در مقایسه با سایر مدل‌ها، دارای بیشترین خطا نسبت

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ورودی به مدل‌ها در یک گمانه در سدهای الف- تالوار و ب- سیمره

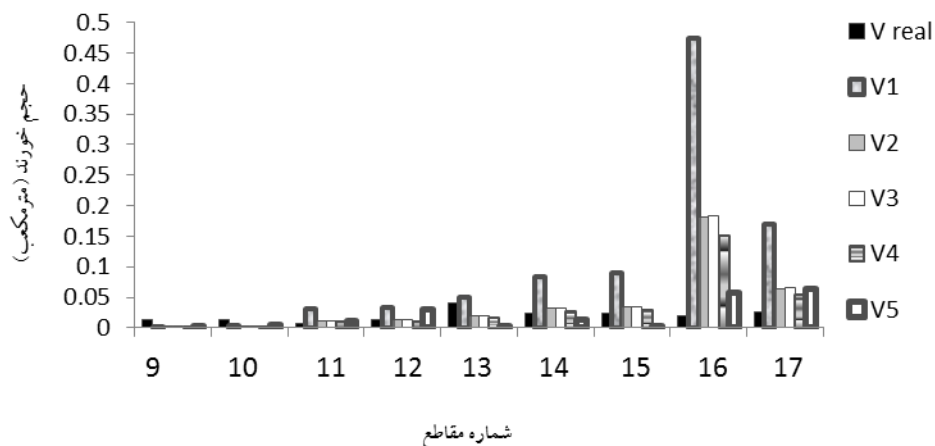
(ب)		(الف)	
مقدار پارامتر	نام پارامتر ورودی	مقدار پارامتر	نام پارامتر ورودی
0/2 mm	b	0/1 mm	b
20/4 Kg/ms <sup>2</sup>	$\tau_0$	21 Kg/ms <sup>2</sup>	$\tau_0$
280000 pa	$\Delta P$	300000 pa	$\Delta P$
0/8 rad	$\alpha$	$\pi/4$ rad	$\alpha$
0/219 m	W	0/219 m	W
5 m	L	5 m	L
0/2	$K_1$	0/1	$K_1$
1	$\theta$	1	$\theta$
1/5	$K_3$	1/5	$K_3$



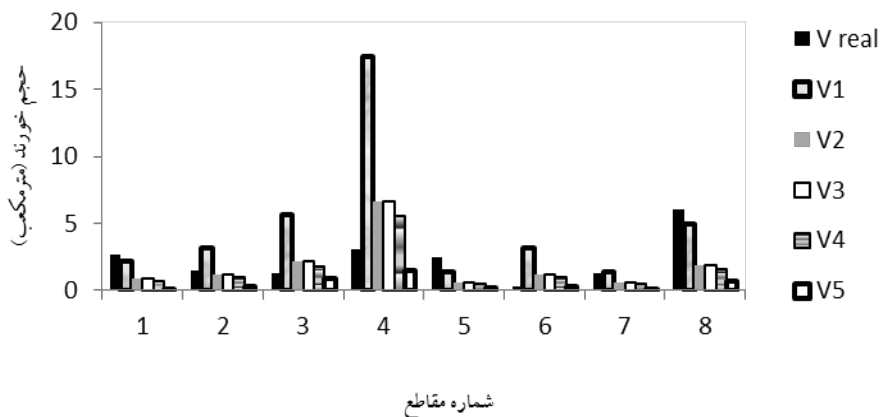
شکل ۴- مقایسه حجم دوغاب محاسبه‌شده از میانگین مدل‌های تحلیلی  $V_1$  تا  $V_5$ ،



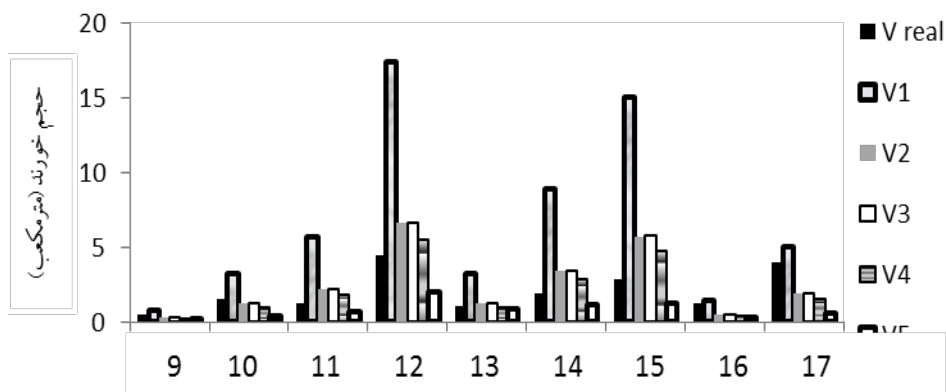
با خوردن واقعی،  $V_{real}$ ، در مقاطع انتخابی ۸-۱ در ساختمان سیمره



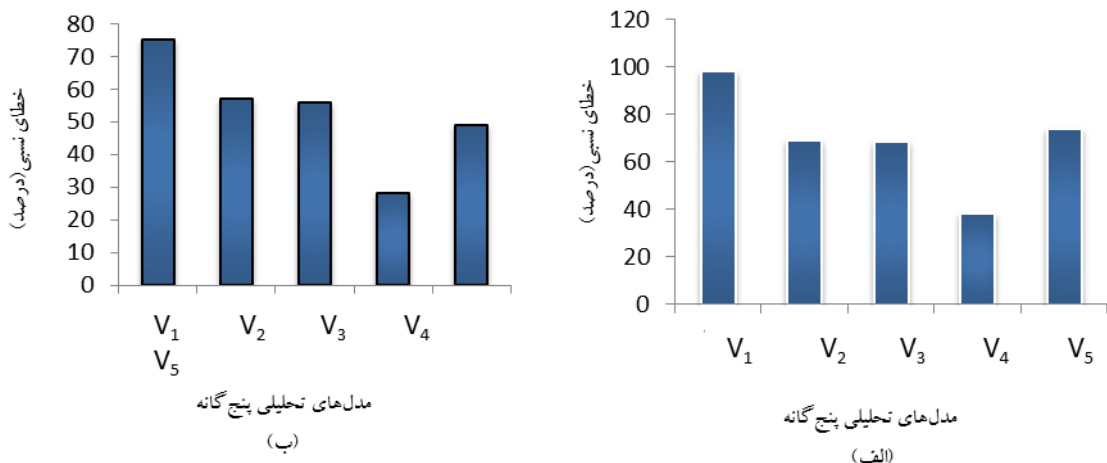
شکل ۵- مقایسه حجم دوغاب محاسبه شده از میانگین مدل‌های تحلیلی  $V_1$  تا  $V_5$ ، با خوردن واقعی،  $V_{real}$ ، در مقاطع انتخابی ۱۷-۹ در ساختمان سیمره



شکل ۶- مقایسه حجم دوغاب محاسبه شده از میانگین مدل‌های تحلیلی  $V_1$  تا  $V_5$ ، با خوردن واقعی،  $V_{real}$ ، در مقاطع انتخابی ۸-۱ در ساختمان تالوار



شکل ۷- مقایسه حجم دوغاب محاسبه شده از میانگین مدل‌های تحلیلی  $V_1$  تا  $V_5$ ، با خوردن واقعی،  $V_{real}$ ، در مقاطع انتخابی ۱۷-۹ در ساختمان تالوار



شکل ۸- مقدار خطای نسبی محاسبه‌ی خوردن دوغاب با استفاده از پنج مدل تحلیلی برحسب درصد در ساختگاه‌های الف) تالوار و ب) سیمره

### ۸- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
<b>b</b>	<i>m</i>	بازشدگی درزه
<b>P</b>	<i>Pa</i>	فشار تزریق
<b><math>\alpha</math></b>	<i>Degree</i>	زاویه گسترش دوغاب
<b><math>\tau</math></b>	<i>Pa</i>	تنش تسلیم دوغاب
<b>I</b>	<i>m</i>	شعاع نفوذ دوغاب
<b>V</b>	<i>m<sup>3</sup></i>	حجم دوغاب سیمانی
<b>L</b>	<i>m</i>	طول مقطع تزریق یافته

در بین مدل‌های معرفی‌شده، مدل پنجم در نیمی از مقاطع انتخابی سایت سیمره، کمترین برآورد از حجم دوغاب را نشان می‌دهد. در صورتی که در سایت تالوار این مدل در همه‌ی مقاطع، کمترین تخمین را ارائه می‌دهد. به‌طور کلی نتایج مدل-سازهای در سایت تالوار به دلیل شرایط ضعیف‌تر توده‌سنگ از خطای بیشتری نسبت به ساختگاه سیمره برخوردار است چراکه کیفیت ضعیف‌تر سنگ، معرف وجود شرایط زمین‌شناسی پیچیده‌تر ساختگاه بوده و به دلیل آنکه مدل‌های تحلیلی امکان در نظر گرفتن تمامی این شرایط را ندارند، تحلیل نتایج، توسط این مدل‌ها، با خطای بیشتری مواجه می‌گردد.

### ۹- مراجع

- H. (2013). Evaluation of Pre-Grouting with the RTGC Method and Results from the City Line project (pp. 135-145)
- [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] Nguyen, V.H., S. Remond, J., Gallias, I. (2010). Influence of cement grouts composition on the rheological behaviour. *Cem. Concr. Res.* (pp. 292- 300)
- [8] Wang, I., Zhang, w., Zhang, j. (2014). Effect of insufficient grouting and strand corrosion on flexural behavior of pc beams. *Constr. Build. Mater.* (pp. 213-224.)
- [1] Fransson, A., Tsang, C.F., Rutqvist, J., Gustafson, G. (2010). Estimation of deformation and stiffness of fractures close to tunnel using data from single-hole hydraulic testing and grouting. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* (pp. 887-893)
- [2] Karbala, M., Katibeh, H., Sharifzadeh, M. (2009). Numerical and Analytical Characterization of a Horizontal Single Joint Based on Radial Flow in Water Pressure Test. *J. Applied Sciences* (pp. 1859-1869)
- [3] Draganovic, A., Stille, H. (2011). Filtration and penetrability of cement-based grout: Study performed with a short slot. *Tunnel. Undergr. Space Technol* (pp. 548-559)
- [4] Gothll, R., Stille, H. (2009). Fracture dilation during grouting. *Space Technol*. (pp. 126-135)
- [5] Holmberg, M., Tsuji, M., Stille, B., Rafi, J., Stille,

Grouting of Jointed Rock-A Case Study, Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology. *Stockholm, Sweden*.

[14] Brantberger, H., Stille, H., Eriksson, M. (2000). Controlling Grout Spreading in Tunnel Grouting, Analyses and Developments of the GIN-Method. *J. Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 15, No.4., (pp. 343-362).

[15] Gustafson, G., Stille, H. (2003). Prediction of Groutability from Grout Properties and Hydrogeological Data. *J. Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No.3, pp325-332.. (pp. 325-332).

[16] Twiss, R., Mooros, k. (2002). Geotechnical Engineering Hand book. Vol. 2, JohnWilly.

[9] Lombardi, G., Deer, D. (1996). Grouting design an control using GIN principle, *Water Power & Dam Construction*. (pp. 15-22).

[10] Hassler, L., Hakansson, U. & Stille, H. (1992). Classification of Jointed Rock With Emphasis on Grouting. *J. of Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 7, No.4. (pp. 447-452).

[11] 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).

[12] Ewert, F. K., Stille, H. (1993). Permeability, Groutability and Grouting of Rock, part 4: Grout ability and Grouting of Rocks *Dam Engineering*. Vol. 8., (pp. 271-325).

[13] Janson, T., Stille, H., Hakansson, U. (1994).

