



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۷، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۱ تا ۸

Vol. 47, No. 3, Winter 2015, pp. 1-8



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

AmirKabir Journal of Science & Research  
Civil and Environmental Engineering  
(ASJR-CEE)

## تحلیل میزان فشار دوغاب در مقاطع تزریق ساختگاه سد به منظور دستیابی به فشار بهینه

محمد غلامزاده\*<sup>۱</sup>، مجید مسعودی آرانی<sup>۲</sup>، سعید سلطانی محمدی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۱۹)

### چکیده

روش‌های مختلفی برای کاهش میزان نشست آب از پی و تکیه‌گاه‌های سد ارائه شده است که متداول‌ترین آنها روش تزریق پرده آب‌بند است. کیفیت و کارایی عملیات تزریق به عوامل متنوعی همچون خوردند، خواص دوغاب و فشار تزریق دوغاب سیمانی بستگی دارد. یکی از تأثیرگذارترین این پارامترها فشار تزریق دوغاب سیمانی است، چرا که اعمال فشار بیش از حد، باعث وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در توده سنگ شده و فشار تزریق پایین، باعث ناقص ماندن عملیات و عدم آب‌بندی کامل ساختگاه می‌شود. تاکنون نظریات، روابط، جداول و نمودارهای مختلفی به منظور محاسبه فشار لازم در عملیات تزریق ارائه شده است. در این مقاله به بررسی تأثیر فشار تزریق در مقاطع مختلف گمانه‌های تزریق پرداخته شده و با مقایسه بین فشار محاسباتی حاصل از روابط تحلیلی با فشار واقعی ثبت شده در سایت تزریق سد سیمره، مدل‌هایی که تخمین‌های بهتری دارند، معرفی شده‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که روابط گروندی و زاروبا (با درزه‌های افقی) دقیق‌ترین برآورد از فشار تزریق را ارائه می‌دهند. همچنین در ادامه رابطه‌ای به منظور محاسبه فشار تزریق بر حسب عدد لوژن و بر اساس داده‌های تزریق سد سیمره ارائه شده است که می‌تواند بیانگر فشار مجاز تزریق به منظور پیشگیری از پدیده‌ی شکست هیدرولیکی در توده سنگ باشد.

### کلمات کلیدی:

خوردند، دوغاب سیمانی، سد سیمره، شکست هیدرولیکی، فشار تزریق، عدد لوژن

## ۱- مقدمه

شده و کاهش کیفیت سنگ را در پی خواهد داشت. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روابط تحلیلی که در ادامه معرفی خواهند شد، به بهترین برآورد در اعمال فشار تزریق دست یابیم. پس از بررسی‌های لازم، فشار اعمال شده متناسب با عمق تزریق، خصوصیات دوغاب، روش تزریق، نفوذپذیری سنگ، خصوصیات درزه‌های سنگی، وضعیت تنش‌های محلی و ابعاد سازه و خصوصیات فیزیکی و مکانیک سنگی توده سنگ انتخاب می‌شود.

برای محاسبه فشار لازم در عملیات تزریق نظریات، روابط، جداول و نمودارهای مختلفی توسط دانشمندان ارائه شده است. تمام این موارد تجربی بوده و ممکن است در بعضی موارد به فشار مجاز نزدیک بوده و در بعضی موارد نیز دور باشند [۱].

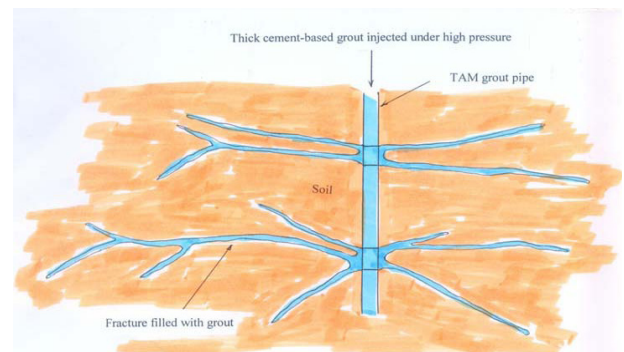
## ۲- نظریات ارائه شده

مدل‌های ریاضی مختلفی برای شبیه‌سازی فرایند تزریق در درزه‌ها و محاسبه فشار مجاز تزریق استفاده می‌شود. با گسترش دانش بشری این مدل‌ها برای بهبود شناخت خصوصیات هندسی و هیدرولیکی کانال‌های مؤثر در نفوذ دوغاب در توده سنگ استفاده می‌شوند. با توجه به شرایط پیچیده و ناآشنای زمین، روابط ریاضی به سختی می‌توانند، برآورد دقیقی از وضعیت موجود داشته باشند، ولی با شبیه‌سازی توده‌سنگ بر اساس فرضیات ساده، می‌توان یک پیش‌بینی قابل قبول و درعین حال کاربردی، از شرایط منطقه بدست آورد و در واقع گامی مؤثر در بهینه‌سازی عملیات تزریق برداشت. در ادامه به برخی از نظریات مهم در رابطه با فشار تزریق پرداخته شده است [۱].

لیپالد (در سال ۱۹۵۸) بیان کرد که مقدار فشار مجاز ایمن به ازای هر متر روباره در حدود  $10^{-3} \times 16/97$  مگاپاسکال تا  $10^{-3} \times 56/56$  مگاپاسکال افزایش می‌یابد. کامبرفورت (در سال ۱۹۷۷) به این نتیجه رسید که ترس از فشار بالا معقول نیست و فشار تزریق باید به حدی باشد که درزه‌ها را از هم باز نماید. اورت نیز (در سال ۱۹۸۵) بیان نمود که اصولاً فشار وابستگی به عمق ندارد، بلکه وابسته به وضعیت ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مقطع است و فشار تزریق نباید موجب شکست محیط شود. نانویلر (در سال ۱۹۸۹) بیان کرد که ایجاد شکست توسط بالا بردن فشار، موجب افزایش نفوذ دوغاب، شعاع تزریق و در نتیجه کارایی بهتر آن خواهد شد، به همین دلیل فاصله گمانه افزایش یافته و از هزینه حفاری کاسته می‌شود. همچنین ورفل (در سال ۱۹۸۹) پی‌برد که اعمال فشار بیش از حد مجاز، موجب شکست محیط و هدررفتن دوغاب و برخاست زمین خواهد شد. هولسبی نیز (در سال ۱۹۹۰) به این نتیجه رسید که وضعیت فشار در سنگ‌های سالم، متوسط و ضعیف متفاوت است و با افزایش عمق، مقدار فشار به طور نسبی افزایش خواهد یافت. ویور (در سال ۱۹۹۱) پس از بررسی‌های خود به این نتیجه رسید که روند افزایش فشار مورد استفاده در تزریق سنگ‌های درزه‌دار یا سنگ‌های ضعیف با لایه‌بندی افقی در مقاطع کم عمق، نباید از  $10^{-3} \times 22/62$  مگاپاسکال

سالهاست عملیات تزریق در فعالیت‌های مهندسی استفاده می‌شود. نخستین تجربه نسبتاً موفق تزریق در زمینه آب‌بندی در ساختگاه سدها، توسط بریگنی در سال ۱۸۰۲ در کشور فرانسه و با به‌کارگیری سوسپانسیون از سیمان پزولانی و آب به منظور پر نمودن حفرات موجود در سنگ پی یک سد صورت پذیرفت. در ابتدا کاربرد تزریق عمدتاً به پر کردن فضاهای خالی، توقف نشست آب و تحکیم زمین محدود بوده است؛ ولی امروزه کاربرد آن برای اهدافی همچون کاهش نشست زمین در نتیجه حفر تونل و فضاهای زیرزمینی و تقویت زمین به گونه‌ای که بتوان آن را به صورت یک ساختار نگهدارنده در حل مسائل ژئوتکنیکی به کار برد، توسعه یافته است [۳].

همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، عملیات تزریق در بیان جامع، مجموعه فرآیندها و اقداماتی را شامل می‌شود که طی آن سیال مورد تزریق که تحت عنوان کلی دوغاب معرفی می‌شود، از منبع آماده‌سازی و با طی مسیری تحت عنوان خط جریان دوغاب، وارد گمانه می‌شود و با عبور از آن به محیطی درون زمین تحت عنوان مقطع تزریق، نفوذ می‌کند و قسمت مورد تزریق قرار گرفته، مستحکم می‌شود و مقاومت آن افزایش می‌یابد [۲].



شکل ۱: نفوذ دوغاب در شکستگی‌های سنگ [۴]

یکی از عوامل مؤثر برای تعیین فاصله نفوذ دوغاب، فشار تزریق است. بنا به تعریف، فشار تزریق عبارت است از ماکزیمم فشار مجاز اعمالی در هر گام تزریق که منشأ اصلی ایجاد آن پمپ تزریق است. فشار تزریق معمولاً از مینیمم مقدار لازم برای نفوذ دوغاب به درزه شروع و در انتهای عملیات تزریق به بیشترین مقدار مجاز خود می‌رسد. البته فشار دوغاب سیمانی با طی مسیر هیدرولیکی مابین پمپ و مقطع تزریق دچار نوسانات و تغییراتی می‌شود که باید در محاسبات لحاظ شود [۲].

به طور کلی دو نظریه در رابطه با میزان فشار تزریق دوغاب وجود دارد: نظریه اول؛ تزریق دوغاب با فشار بالا به منظور افزایش شعاع نفوذ دوغاب است که در هزینه‌های عملیاتی صرفه‌جویی شده و به گمانه‌های تزریق کمتری نیاز است. در مقابل این نظریه یک سری دیگر از دانشمندان، تزریق با فشار پایین را پیشنهاد می‌کنند، چرا که اعمال فشار بالا در تزریق دوغاب باعث شکست هیدرولیکی در توده سنگ

آنجایی که مقدار  $C_p$  و  $P_c$  در داده‌های ما موجود نیست، در این مقاله از این رابطه استفاده نشده است [۱].

کوئزتر نیز در سال ۱۹۹۶ رابطه (۸) را در مورد فشار تزریق ارائه داد:

$$P = \gamma \cdot H + \Delta p \quad (۸)$$

$\gamma$ ، وزن مخصوص روباره  $(\text{MN/m}^3)$ ،  $\Delta p$  مقدار فشار اضافی که برای نفوذ هر چه بهتر دوغاب به مقطع اعمال می‌شود (MPa). مقدار  $\Delta p$  را می‌توان با افزایش عمق افزایش داد، اما در نزدیکی سطح زمین برای ممانعت از شکست شدید و برخاست، صفر در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش به منظور ساده‌سازی و نبودن یک روند در افزایش مقدار فشار اضافی،  $\Delta p$  در طول چال صفر در نظر گرفته شده است [۶]. همچنین میلانویچ در سال ۲۰۰۰ رابطه تجربی (۹) را برای برآورد فشار تزریق ارائه نمود:

$$P = \gamma H / 100n \quad (۹)$$

که در آن  $n$  ضریب فشار دوغاب توزیع شده در درون درزه  $(0.2)$  تا  $(0.3)$  است که در اینجا میانگین آن در نظر گرفته شده است [۲].

#### ۴- معرفی ساختگاه مورد مطالعه

ساختگاه سد و نیروگاه سیمره بر روی رودخانه سیمره و در حدود ۴۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان دره‌شهر از استان ایلام و  $7/5$  کیلومتری روستای چشمه شیرین واقع بوده و هدف از احداث آن استفاده از پتانسیل بالقوه نیروی برق رودخانه سیمره است.

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 شمال سطح آب در ارتفاع ۷۲۰ متری از سطح دریاهای آزاد قرار دارد و طول تاج سد ۲۰۲ متر است. گنجایش مخزن سد ۳/۲۱۵ میلیارد مترمکعب و ساختگاه سد سیمره در فاصله ۳ کیلومتری بالادست روستای تلخاب قرار گرفته است. دره محل سد، U شکل، تقریباً متقارن با دیواره‌های پر شیب و حتی با شیب منفی است. مطابق طرح اولیه، پی سد در تراز ۵۵۰ از سطح دریا در بخش آسماری میانی متشکل از آهک کریستالین خاکستری روشن تا آهک فسیل دار خاکستری تیره با میان لایه‌های ماری واقع گردیده است [۳]. در شکل ۲ موقعیت تقریبی سد سیمره نشان داده شده است.

#### ۵- بکارگیری روابط تحلیلی و مقایسه با مقادیر واقعی

در جدول ۱، نتایج حاصل از تخمین فشار بر اساس روابط ۱، ۲، ۳، ۸ و ۹ با فشار واقعی تزریق در سد سیمره مقایسه شده است. همانطوریکه در شکل‌های ۳ تا ۶ مشاهده می‌شود، روابط (۱) و (۳) یعنی رابطه‌ی گروندی و زاروبا با درزه‌های افقی، دقیق‌ترین برآورد را از فشار تزریق دوغاب سیمانی دارند و در نتیجه تخمین فشار تزریق بر اساس آنها بیشترین اعتبار را در پی خواهد داشت. همچنین روابط زاروبا با درزه‌های پرشیب و میلانویچ، فشار تزریق را بیش از فشار مناسب برای عملیات تزریق،

در هر متر بیشتر شود و گروندی (در سال ۱۹۹۵) فشار تزریق را دو برابر وزن روباره در بالای مقطع در نظر گرفت. کوئزتر نیز (در سال ۱۹۹۶) بیان کرد که فشار باید در حدی بهینه به منظور دستیابی به بیشترین میزان تزریق (عدم کاهش فشار از یک مقدار حداقل) و عدم شکست محیط (عدم افزایش فشار از یک حد بیشینه) اعمال شود. در صورت وجود دسته درزه‌های معمول (به استثنای حالت تقریباً افقی درزه‌ها) عقیده بر آن است که فشار در یک محدوده کوچک در مقطع در تقابل با وزن یک مخروط برگشته ناقص از جنس سنگ موجود است که قاعده کوچک آن منطبق بر محدوده شعاع تزریق است. همچنین ویدمن (در سال ۱۹۹۶) به این نتایج دست یافت که به منظور افزایش شعاع تزریق، فشار را باید تا حد مجاز بالا برد. افزایش بیش از حد فشار، منجر به شکست هیدرولیکی شده که در اکثر موارد نامطلوب است و فشار تزریق نباید موجب باز شدن درزه‌ها از هم شود [۱].

#### ۳- روابط ارائه شده

روابط متعددی برای محاسبه فشار تزریق توسط مؤلفان و محققان مختلف توصیه شده است که در ادامه به مهمترین آنها اشاره خواهد شد:

گروندی در سال ۱۹۵۵ رابطه (۱) را در مورد فشار تزریق ارائه داده است:

$$P = 0.044 \times H \quad (۱)$$

که در آن،  $H$ ، عمق مقطع گمانه (متر) و  $P$  فشار تزریق (MPa) است. همچنین زاروبا در سال ۱۹۶۱ روابط زیر را در مورد فشار تزریق ارائه داد:

$$P = 0.03 \times H + 0.002 \times H^2 \quad (۲)$$

و درزه‌های افقی:

$$P = 0.024 \times H + 0.0005 \times H^2 \quad (۳)$$

در سال ۱۹۸۹ نیز ورفل دو رابطه زیر را ارائه داد:

زمانی که روباره تقریباً همگن باشد:

$$P = C_p \times \rho_o H_o + \Delta P \quad (۴)$$

$$C_p = \frac{P_c}{\rho_o H_o} \quad (۵)$$

و اگر روباره از دو نوع لایه‌بندی با اختلاف چگالی قابل توجه مثل آبرفت و سنگ تشکیل شده باشد:

$$P = C_p \times \rho_{o2} H_{o1-2} + \rho_{o1} H_{o1} \Delta P \quad (۶)$$

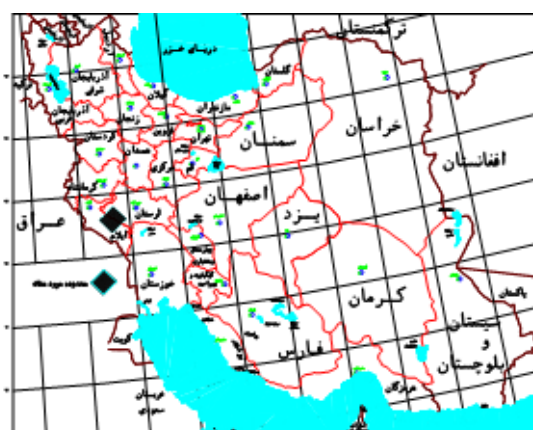
$$C_p = \frac{P_c - \rho_{o1} H_{o1}}{\rho_{o2} H_{o1} - 2} \quad (۷)$$

در این روابط،  $\rho_o$  وزن مخصوص روباره  $(\text{MN/m}^3)$  به ضخامت  $H_o$  متر در حالتی که روباره همگن است،  $\rho_{o1}$  وزن مخصوص لایه‌ی بالایی روباره به ضخامت  $H_{o1}$  متر،  $\rho_{o2}$  وزن مخصوص لایه پایینی تحتانی به ضخامت  $H_{o1-2}$  متر است. مقدار  $C_p$  ضریبی است که بر اساس فشار بحرانی  $P_c$  محاسبه می‌شود.  $P_c$  نیز از آزمون لوژن تعیین می‌شود. از

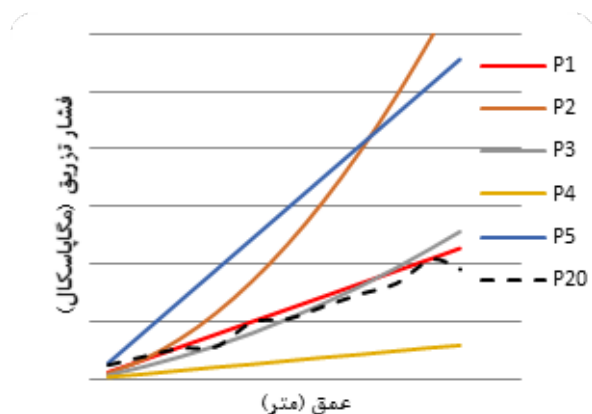
جدول ۱: فشارهای تزریق سد سیمره و فشارهای محاسبه شده از روابط ارائه شده

Depth	(P1) فشار تزریق از رابطه (۱)	(P2) فشار تزریق از رابطه (۲)	(P3) فشار تزریق از رابطه (۳)	(P4) فشار تزریق از رابطه (۸)	(P5) فشار تزریق از رابطه (۹)	P20	P21	P23	C191
2.5	0.11	0.09	0.06	0.03	0.27	0.23	0.23	0.23	0.23
7.5	0.33	0.34	0.21	0.08	0.81	0.38	0.38	0.34	0.48
12.5	0.55	0.69	0.38	0.14	1.35	0.52	0.52	0.52	0.68
17.5	0.77	1.14	0.57	0.2	1.89	0.55	0.76	0.77	0.96
22.5	0.99	1.69	0.79	0.25	2.43	0.97	0.96	0.8	1.06
27.5	1.21	2.34	1.04	0.31	2.97	1.03	1.16	1.04	1.24
32.5	1.43	3.09	1.31	0.37	3.51	1.25	1.30	1.21	1.43
37.5	1.65	3.94	1.6	0.42	4.05	1.46	1.59	1.45	1.72
42.5	1.87	4.89	1.92	0.48	4.59	1.64	1.79	1.66	2.03
47.5	2.09	5.94	2.27	0.54	5.13	2.06	2.23	2.07	
51.5	2.27	6.85	2.56	0.58	5.56	1.89	2.08	2.23	

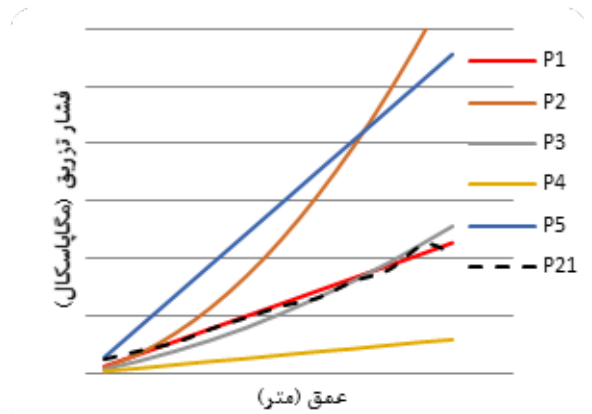
شکل ۲: موقعیت جغرافیایی سد سیمره [۳]



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی سد سیمره [۳]



شکل ۳: مقایسه گمانه P20 با فشار محاسبه شده از روابط



شکل ۴: مقایسه گمانه P21 با فشار محاسبه شده از روابط

تخمین می‌زنند، درحالی‌که رابطه کویتر فشار تزریق را کمتر از مقدار مناسب آن پیش‌بینی می‌کند.

### ۶- محاسبه فشار تزریق بر اساس عدد لوژن

معمولاً آزمایش لوژن یکی از آزمایش‌های اساسی و مهم، قبل از انجام تزریق است و همواره در گزارش‌ها، عدد لوژن برای مقاطع مختلف تزریق آورده می‌شود و می‌تواند بیانگر وضعیت توده‌سنگ و تخمینی از میزان تزریق‌پذیری آن باشد. بر اساس نتایج بدست آمده از سایت تزریق سد سیمره، رابطه‌ای بر اساس عدد لوژن برای محاسبه فشار تزریق ارائه خواهد شد.

در این شکل به نظر می‌رسد مقاطعی که دارای مقادیر لوژن پایین و درعین حال خورند بالایی هستند، در مرحله تزریق دچار شکست هیدرولیکی شده‌اند که این پدیده ناشی از اعمال فشار بیش از حد در مرحله تزریق است. همچنین در مقاطع دیگر که دارای عدد لوژن بالایی هستند، پیش‌بینی می‌شود که به دلیل همین آبخوری بالا، دارای خورند سیمانی بالا باشند [۱].

مقاطعی که دارای خورند پایین هستند، در جدول ۲ و مقاطعی که دارای خورند بالا هستند در جدول ۳ نشان داده شده است.

با رسم نمودار لوژن - فشار می‌توان داده‌های تزریق هر یک از دو جداول ۲ و ۳ را در شکل ۷ مشاهده کرد.

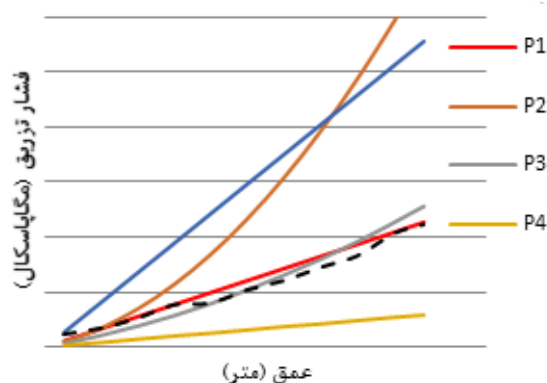
با عبور یک خط از میان داده‌هایی که دارای خورند بالا و پایین هستند، می‌توان معادله مناسب آن را بدست آورد.

معادله این خط عبارت است از:

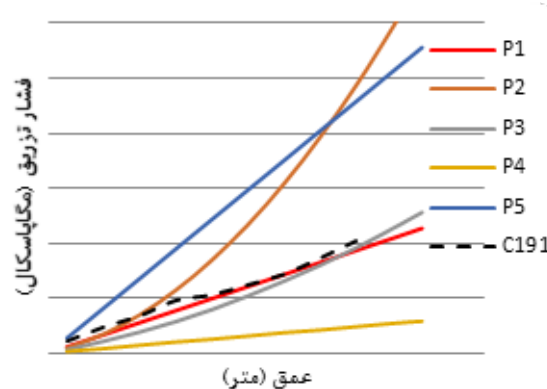
$$Lu = 21.6 \times P^{-1/44} \quad (10)$$

از آنجایی که شکست هیدرولیکی در عملیات تزریق بسیار مهم است و رابطه‌ی مستقیمی با میزان فشار اعمال شده دارد، بنابراین برای مقاطع مختلف، این معادله می‌تواند معیار خوبی برای تزریق بر اساس عدد لوژن باشد. در صورتی که فشار انتخاب شده برای عملیات تزریق بیش از مقدار محاسبه شده از این رابطه باشد، ممکن است توده سنگ دچار شکست هیدرولیکی شود و در صورتی که فشار کمتر از این مقدار باشد، می‌تواند شعاع تزریق کاهش یابد که این امر باعث عقیم ماندن عملیات تزریق و آب بندی ناقص ساختگاه سد می‌گردد.

اورت نیز در سال ۱۹۸۵ نموداری بر اساس عدد لوژن، فشار تزریق و فراوانی درزه‌ها ارائه داد که روندی مشابه با نمودار بدست آمده از نتایج تزریق سیمره دارد (شکل ۹). منحنی شکل (۹)، مقدار مجاز فشار تزریق برای نفوذ بدون ایجاد تغییر شکل (شکست هیدرولیکی) را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار نیز می‌توان میزان فشار مجاز تزریق را با در نظر گرفتن عدد لوژن بررسی کرد. چنانچه فشار اعمال شده بیش از فشار مجاز باشد، مقطع ممکن است دچار شکست شود [۵].

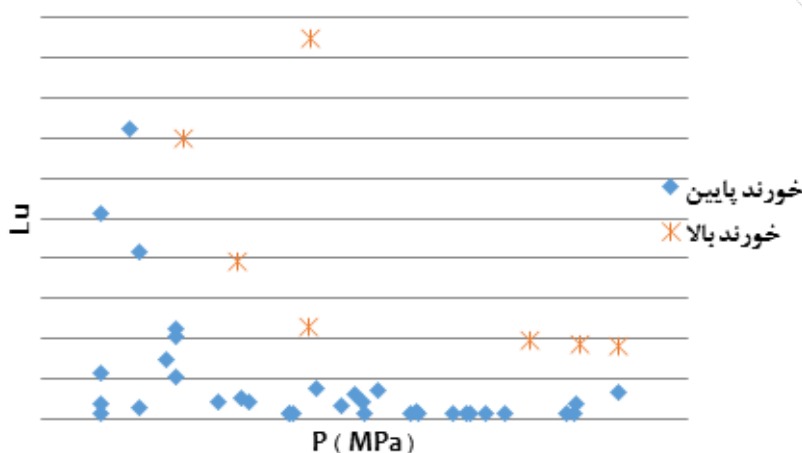


شکل ۵: مقایسه گمانه P23 با فشار محاسبه شده از روابط



شکل ۶: مقایسه گمانه C191 با فشار محاسبه شده از روابط

با در نظر گرفتن مقادیر خورند بالا و پایین در مقاطع مختلف تزریق سایت سیمره که در جداول ۲ و ۳ آورده شده است، روند تغییرات مقادیر عدد لوژن بر حسب فشار تزریق در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل مقاطع با خورند بالا و پایین به صورت جداگانه نشان داده شده است. بر اساس این شکل، می‌توان مرز بین مقاطع با خورند بالا و پایین را به صورت یک منحنی نشان داد که در شکل ۸ دیده می‌شود.

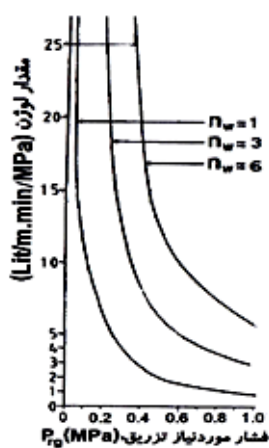


شکل ۷: فشار تزریق مقاطع مختلف بر اساس عدد لوژن

جدول ۲: فشار تزریق و عدد لوژن مقاطعی که دارای خوردند پایین هستند

ردیف	P (MP)	LU	V(kg/m)	ردیف	P (MP)	LU	V(kg/m)	ردیف	P (MP)	LU	V(kg/m)
1	0/23	3/8	3/04	13	1/16	3/1	25/64	25	1/66	1	1/16
2	0/38	2/7	3/04	14	1/3	7	23/37	26	2/07	3/8	5/06
3	0/52	22/4	2/28	15	1/59	1	1/29	27	0/23	1	4/54
4	0/97	1	3/8	16	1/79	1	2/59	28	0/48	14/5	26/51
5	1/25	1	6/08	17	2/23	6/4	5/32	29	0/68	4/3	3/78
6	1/46	1	5/32	18	0/23	51/3	41/43	30	0/96	1/3	4/54
7	1/64	1	4/56	19	0/34	72/2	29/6	31	1/06	7/4	12/42
8	2/06	1	3/8	20	0/52	10/3	6/4	32	1/24	4/3	3/19
9	0/23	11/4	5/19	21	0/77	5	4/67	33	1/43	1	3/78
10	0/38	41/5	7/78	22	0/8	4/1	11/86	34	1/72	1	4/09
11	0/52	20/5	16/43	23	1/21	6/1	17/92	35	2/03	1	4/09
12	0/96	1	37/01	24	1/45	1/82	30/64				

P فشار تزریق (MPa)، LU، عدد لوژن، V، خوردند دوغاب در مقطع تزریق (kg/m)



شکل ۸: منحنی اورت (۱۹۸۵) ارتباط بین عدد لوژن و فشار مورد نیاز تزریق [۱]

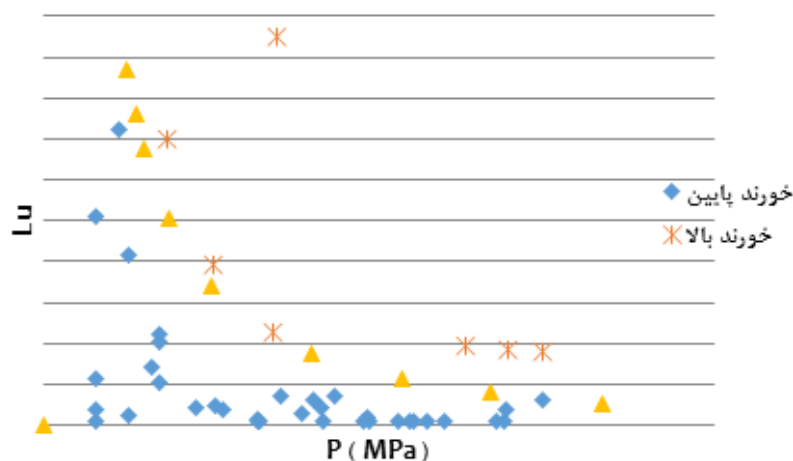
جدول ۳: فشار تزریق و عدد لوژن مقاطعی که دارای خوردند بالا هستند

ردیف	P (MP)	LU	V(kg/m)
1	0/55	69/9	1252
2	1/03	22/8	1837
3	1/89	19/54	1066/6
4	0/76	39/4	1750
5	2/08	18/5	102/45
6	1/04	95	746/6
7	2/23	18/2	1594/66

تعیین کننده معرفی شده است. همچنین  $n_w$  پارامتر کمی که بیان کننده میزان فراوانی درزه-هاست و به شرح ذیل است:  $n_w = 1$  درزه‌های فاصله‌دار (کمتر از ۲ تا ۳ درزه در هر متر)، درزه‌هایی با فاصله متوسط (حدود ۵ تا ۱۰ درزه در هر متر)،  $n_w = 6$  درزه‌های بسیار نزدیک (حدود ۲۰ درزه در هر متر) [۱].

$P_{gg}$  فشار مورد نیاز جهت نفوذ دوغاب در درزه‌ها است. پارامتر مذکور به عنوان یک مقدار لازم برای اعمال فشار، جهت نفوذ دوغاب (بدون ایجاد تغییر شکل در توده سنگ) در درزه‌های تزریق‌پذیر به صورت مستقل از بار روباره، عمق و مقاومت مقطع معرفی شده است و در نتیجه مقدار لوژن و تعداد درزه‌ها در مقطع به عنوان اصلی‌ترین پارامترهای





شکل ۹: فشار تزریق مقاط مختلف بر اساس عدد لوژن

#### ۸- مراجع

[۱] کربلا، محمدامین؛ کتیبه، همایون، "تزریق دوغاب سیمانی در سنگ"، ۱۳۸۸.

[۲] فلاح نژاد، سعید، پایان نامه کارشناسی ارشد، "مطالعات اولیه و مستمر در عملیات تزریق سنگ با نگرش خاص بر پرده آب بند سد سیوند"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۶.

[۳] مسعودی، مجید، پایان نامه کارشناسی ارشد، "ارزیابی، تحلیل و مدل سازی فرآیند تزریق دوغاب سیمانی در ارتباط با ویژگی های زمین شناسی مهندسی ژئوتکنیکی پی های سنگی در سدها"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۷.

[4] Chan man piu, "Analysis and Modeling of Grouting and its Application In Civil Engineering", 2005.

[5] Ewert, F. K., "Rock Grouting with emphasis on dam sites", 1985.

[6] Kutzner C, "Grouting of Rock and Soil" (1st English Edit). Rotterdam A.A. Balkema, 1996.

#### ۷- نتیجه گیری

با بررسی و مقایسه بین نمودارهای بدست آمده، می توان به این نتیجه رسید که رابطه گروندی و زاروبا (با درزه های افقی) دقیق ترین برآورد از فشار تزریق را ارائه می دهند و بکارگیری این روابط به منظور محاسبه و اعمال فشار مجاز در عملیات تزریق در سایر ساختگاه های مشابه نیز پیشنهاد می شود. علاوه بر روابط یاد شده می توان به منظور محاسبه ی فشار تزریق بر اساس نتایج آزمون فشار آب (آزمایش لوژن) از رابطه (۱۰) استفاده نمود. این رابطه، فشار مجاز تزریق به منظور نفوذ بهینه دوغاب و درعین حال جلوگیری از پدیده شکست هیدرولیکی را ارائه می دهد.