

Approximate and precise mathematical equations to determine the grouting maximum pressure and grouting intensity number of cement grout in joint rocks to prevent hydraulic jacking

Farhad Ghazi¹, Yousef Zandi^{2*}, Sina FardMoradinia³, Rouzbeh Dabiri⁴, Rasoul Jani⁵

1- Student of PhD, Azad university Tabriz branch, Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Civil Engineering group, technical faculty, Azad university Tabriz branch, Tabriz, Iran,

3- Assistant professor, Civil Engineering group, technical faculty, Azad university Tabriz branch, Tabriz, Iran,

4- Assistant professor, Civil Engineering group, technical faculty, Azad university Tabriz branch, Tabriz, Iran,

5- Assistant professor, Civil Engineering group, technical faculty, Azad university Tabriz branch, Tabriz, Iran,

ABSTRACT

Cement grout is grouted in rock joints of the foundations of dams to prevent water leakage and strengthen the foundation. One of the techniques used to control the grouting operation is the grouting intensity number (GIN), which is equal to the sum of the grouting pressure and volume and represents the grouting energy. Pressure in the rock joints creates a hydraulic lifting force that should not exceed its allowable limit so as not to lead hydraulic jacking and failure. The maximum pressure and grouting intensity number are determined accordingly. Simplifying the plan of the grouted joint, which is modeled as a thin cylinder with a radius of the grouting extension radius, the present study determines the relationship between hydraulic lifting force with grouting pressure and grouting intensity number. In this regard, the joint aperture coefficient was defined and determined based on the rock permeability (the amount of joint aperture). Then, following the geometry of rock-soil mass at the top of the joint, which is considered as a truncated cone with a β angle, for the first time approximate and exact mathematical equations were obtained to determine the permissible hydraulic lifting force (based on the approximate and exact formulas of truncated cone volume). Besides, its approximate and exact mathematical equations were compared. Then, following the principle that the hydraulic lifting force should not exceed the allowable limit, the maximum pressure and grouting intensity number were determined. Finally, by defining two parameters the normal pressure and the normal spreading length, the maximum normal pressure was set so that the hydraulic lifting force to be within the allowable range and prevent hydraulic jacking and failure.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 April 2022

Revise Date: 13 May 2022

Accept Date: 18 May 2022

Keywords:

Allowable hydraulic lifting force

Grouting pressure

Grouting Intensity Number (GIN)

Rock permeability

Normal grouting extension length

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.339114.2802>

*Corresponding author: Yousef Zandi.

Email address: zandi@iaut.ac.ir

بررسی روابط ریاضی تقریبی و دقیق جهت تعیین حداکثر فشار و عدد شدت تزریق دوغاب سیمان در سنگ های درزه دار با هدف جلوگیری از جکینگ هیدرولیکی

فرهاد قاضی^۱، یوسف زندی^{۲*}، سینا فرد مرادی نیا^۳، روزبه دبیری^۴، رسول جانی^۵

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی تبریز ایران و مربی دانشگاه آزاد اسلامی مهاباد

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز ایران،

۳- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز ایران،

۴- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز ایران،

۵- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز ایران

چکیده

در درزه های سنگی پی سدها جهت جلوگیری از نشست آب و استحکام پی، تزریق دوغاب سیمانی انجام می شود. یکی از روش های کنترل عملیات تزریق روش عدد شدت تزریق (GIN) بوده که برابر با حاصلضرب فشار و حجم تزریق بوده و بیانگر انرژی تزریق می باشد. فشار در درزه های سنگی ایجاد نیروی بالابرنده هیدرولیکی نموده که نباید از حد مجاز خود بیشتر شود تا منجر به جکینگ و شکست هیدرولیکی نگردد. در این مقاله پلان درزه مورد تزریق که به شکل استوانه ای نازک به شعاع طول گسترش تزریق ساده سازی و مدل شده و بر این مبنا رابطه نیروی بالابرنده هیدرولیکی با فشار و عدد شدت تزریق تعیین گردیده و در این راستا ضریبی تحت عنوان ضریب بازشدگی درزه برای جریان دوغاب تعریف و مقدار آن بر اساس نفوذپذیری سنگ بدست آمده است. سپس با توجه به هندسه توده سنگی-خاکی بالای درزه استوانه ای، که به شکل مخروط ناقص با زاویه β در نظر گرفته شده است، برای اولین بار روابط ریاضی جهت تعیین نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز برای مقادیر مختلف β به دو روش تقریبی و دقیق (بر اساس فرمول های تقریبی و دقیق حجم مخروط ناقص) تعیین و با هم مقایسه شده اند. سپس بر مبنای اینکه نیروی بالابرنده هیدرولیکی نباید از حد مجاز بیشتر باشد، فشار ماکزیمم و عدد شدت تزریق ماکزیمم تعیین شده اند. در انتها با تعریف دو پارامتر بدون دیمانسیون فشار نرمال و طول گسترش نرمال، حداکثر فشار نرمال برای اینکه نیروی بالابرنده هیدرولیکی در حد مجاز بوده و جکینگ و شکست هیدرولیکی اتفاق نیافتد، تعیین شده است.

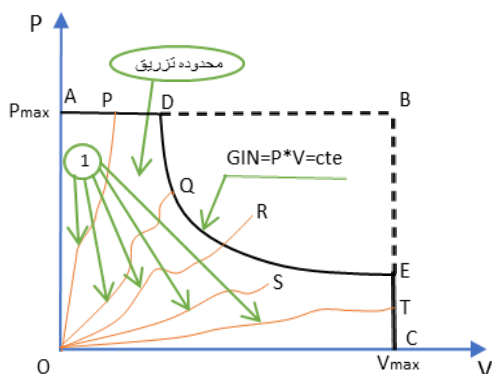
کلمات کلیدی: نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز، فشار تزریق، عدد شدت تزریق (GIN)، نفوذپذیری سنگ، طول گسترش تزریق نرمال.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2022.339114.2802
۱۴۰۱/۰۲/۱۰	۱۴۰۱/۰۲/۲۳	۱۴۰۱/۰۲/۲۸	۱۴۰۱/۰۲/۲۸	۱۴۰۱/۱۲/۲۹	10.22065/jsce.2022.339114.2802
*نویسنده مسئول:		یوسف زندی			
پست الکترونیکی:		zandi@iaut.ac.ir			

برای رفع این نواقص روش جدیدی تحت عنوان "عدد شدت تزریق" در سال ۱۹۹۳ توسط لومباردی و دیر پیشنهاد شد [۲۷، ۲۹]. در این روش که در واقع یک روش بهینه‌سازی در تزریق می‌باشد [۳۰]، حاصلضرب فشار تزریق در حجم دوغاب مصرفی در طی عملیات تزریق ثابت در نظر گرفته می‌شود. این حاصلضرب را همان عدد شدت تزریق می‌نامند [۳۱، ۳۲].

$$GIN = P \cdot V \quad (1)$$

در فضای دو بعدی فشار-حجم، مقادیر فشار ماکزیمم، حجم ماکزیمم و منحنی مقدار ثابت GIN محدوده ای را مشخص می‌کند که عملیات تزریق باید در آن محدوده صورت گیرد [۳۳، ۳۴]؛ بدین معنی که تا هنگامی که پارامترهای فشار و حجم در محدوده تعیین شده قرار دارند، عملیات تزریق ادامه یافته و با رسیدن به مرز این محدوده عملیات متوقف می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲: محدوده تزریق در روش GIN [۲۷، ۲۹، ۳۵]

الف) محدوده OADEC، محدوده تزریق، ب) مسیرهای ۱ مسیره‌های اجرای عملیات تزریق

ج) محدوده DBE محدوده‌ای که در روش سنتی عملیات تزریق ادامه می‌یابد اما در روش GIN ورود به این محدوده مجاز نیست.

طبق شکل ۲ مسیر تزریق نباید از محدوده (OADEC) خارج شود (مانند OR). و هیچ فرایندی نباید داخل محدوده به اتمام برسد (مانند OS). در واقع عملیات تا رسیدن نهایی که یکی از سه مقدار فشار حداکثر، حجم حداکثر و عدد GIN ادامه می‌یابد.

اهمیت این تحقیق در بدست آوردن روابط ریاضی برای تعیین حداکثر فشار و عدد شدت تزریق در سازندهای سنگی به منظور جلوگیری از جکینگ و شکست هیدرولیکی در آنها است. این روابط برای اولین بار بدست آمده و در عملیات تزریق در پی سدها و تونل‌ها کاربرد فراوان خواهد داشت. دلایل دیگر اهمیت تحقیق عدم افزایش بی مورد فشار تزریق و در نتیجه کاهش حجم دوغاب مصرفی و اجتناب از نفوذ دوغاب به مجاری آب زیرزمینی و صرفه‌جویی در زمان و هزینه عملیات تزریق می‌باشد.

۲- مرور کارهای قبل

اگر چه مقالات زیادی در مورد کنترل عملیات تزریق به روش GIN ارائه شده اما مطالعات کمی برای تعیین مقادیر حداکثر فشار و عدد شدت تزریق صورت گرفته است. بطور نمونه تورکوت و دیگران در مطالعه ای که در حین ترمیم سد Lac st jean کانادا انجام دادند [۳۱]، رابطه ای برای ماکزیمم فشار بر حسب چسبندگی دوغاب، نیروی ماکزیمم و متوسط عرض درزه ارائه نمودند. در ترمیم این سد از روش GIN استفاده شده و مقدار آن برای عمق ۱۰ تا ۱۵ متری گمانه‌ها برابر عدد ثابت ۸۵۰ بار-لیتر و برای عمق ۲۵ تا ۵۰ متری ۵۰۰۰ بار-لیتر در نظر گرفته شد. در مقاله‌های دیگری براتنبرگر و دیگران [۳۵، ۳۶] حد بالای فشار را با توجه به نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز تعیین نمودند. در عمل برای انجام عملیات تزریق به روش عدد شدت تزریق، مقدار GIN عدد ثابتی فرض شده و عملیات به شیوه ای کنترل می‌شود که از این مقدار بیشتر نشود [۳۶]. محمد عمران شهزاد و دیگران به مقایسه روش سنتی و GIN از لحاظ هزینه و زمان پرداختند [۳۳]. آنها با مطالعه موردی در دو پانل از سد ترابلا با مشخصات یکسان که تزریق در یکی از پانل‌ها به روش سنتی و در دیگری به روش GIN انجام شد، نتیجه گرفتند که روش سنتی از لحاظ مقدار سیمان ۲/۸ برابر سیمان بیشتر و از لحاظ زمان ۱/۵ برابر روش GIN وقتگیرتر است. هندرسون و دیگران به کنترل و ردیابی نفوذ و پخش دوغاب تزریق شده به روش GIN به داخل شفت تاسیسات هسته‌ای Dounreay

اسکاتلند جهت ترمیم آن پرداخته و نتیجه گرفتند که روش GIN از لحاظ نظری جذاب اما از نظر اجرایی جهت ردیابی نفوذ دوغاب مشکلات زیادی در پی دارد [۳۷]. الکویزی و دیگران استفاده از روش GIN را در بهسازی پی سد تانور اردن بررسی کردند [۳۸]. لی وو چن و همکارانش به بررسی اثر تزریق دوغاب برای کنترل آب زیرزمینی در ساختار سنگهای گرانیتی تونل‌ها پرداختند [۳۹]. امید سعیدی و دیگران برای پیش بینی نفوذ دوغاب در درزهای سنگی از مدل های رگرسیون غیر خطی استفاده کردند [۴۰]. جانسون در رساله دکتری خود مدل های ریاضی برای پیش بینی حجم تزریق در سنگ‌های سخت درزه‌دار را کالیبره کرده است [۴۱].

۲-۱ جنبه جدید و نوآوری و هدف تحقیق:

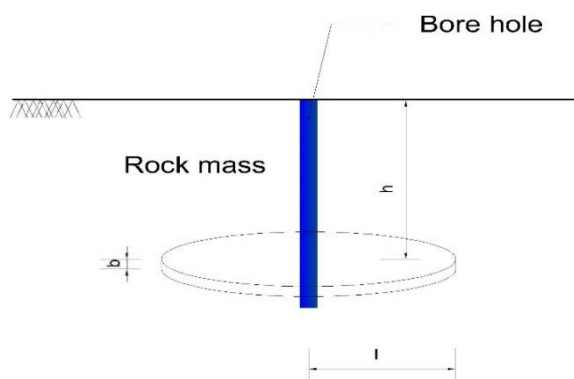
در این مقاله با مدل کردن پلان درزه واقعی مورد تزریق به شکل دایره، برای اولین بار روابط کامل ریاضی برای مقادیر حداکثر فشار و عدد شدت تزریق با هدف جلوگیری از جکینگ هیدرولیکی فرموله و ارائه شده است. در این راستا با تعریف ضریبی برای لحاظ کردن هندسه توده سنگ (مخروط ناقص)، روابط ریاضی برای بدست آوردن این ضریب در حالت کلی بدست آمده است.

۳- مواد و روش ها

در این مقاله با انجام فرضیاتی معقول، نیروی بالابرنده هیدرولیکی ایجاد شده در اثر فشار تزریق دوغاب سیمانی در یک درزه تعیین می‌شود. برای این منظور درزه ای در عمق h با پلان نامشخص و ضخامت b که توسط گمانه ای در مرکز آن مورد تزریق دوغاب قرار می‌گیرد، در نظر گرفته شده و جهت ساده سازی بصورت پلان دایره‌ای مدل گردیده و نیروی بالابرنده هیدرولیکی آن را بر حسب فشار تزریق بدست می‌آوریم. در این راستا با توجه به طبقه بندی سنگ بستر و میزان نفوذ پذیری آن، ضریب بازشدگی درزه برای انواع سنگ تعریف و ارائه می‌شود. نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز بعنوان تابعی از شکل هندسی و جرم مخصوص توده سنگی بالای درزه تعیین می‌شود. هندسه توده سنگ بشکل مخروطی ناقص در بالای درزه مدل شده و سپس با توجه به اینکه نیروی بالابرنده هیدرولیکی نمی‌تواند از حد مجاز خود بیشتر شود، حداکثر مقادیر فشار تزریق و عدد شدت تزریق تعیین می‌گردد. در این مرحله نیز باید ضریب دیگری تحت عنوان ضریب لحاظ کردن هندسه توده سنگ تعریف و ارائه گردد.

۳-۱- تعیین نیروی بالابرنده هیدرولیکی ناشی از تزریق دوغاب

به صورت تئوریک فرض کنیم درزه ای با پلان یک استوانه نازک به ارتفاع b و شعاع I در توده ای سنگی در عمق h از سطح زمین قرار گرفته بطوریکه قاعده آن موازی سطح زمین باشد. (شکل ۳).



شکل ۳: درزه استوانه ای در عمق h

اگر این درزه با فشار P تحت تزریق دوغاب قرار گیرد، نیروی بالابرنده هیدرولیکی F ایجاد می‌گردد که برابر است با:

$$F = \frac{\pi \cdot I^2 \cdot P}{3} \quad (2)$$

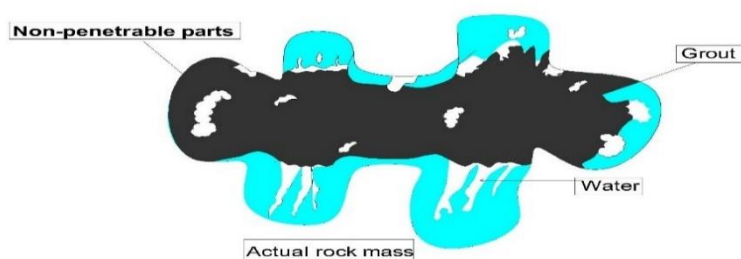
بدیهی است که حجم دوغاب مصرفی در صورتی که جکینگ و شکست هیدرولیکی اتفاق نیافتد برابر حجم استوانه است.

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

از روابط ۱ و ۲ و ۳ رابطه زیر برای نیروی بالابرنده هیدرولیکی بدست می آید:

$$F = \frac{P \cdot V}{3 \cdot b} = \frac{G \cdot I \cdot N}{3 \cdot b} \quad (4)$$

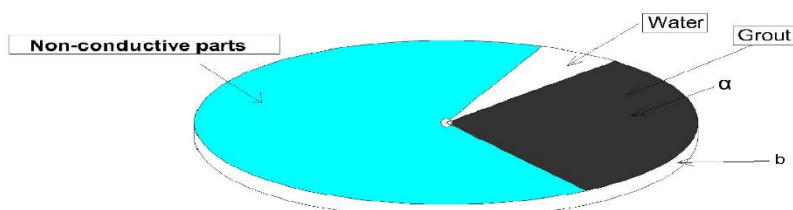
حال اگر درزه ای دارای قاعده ای با شکل نامنظم هندسی و با باز شدگی کم b که بخشی از آن جرم جامد غیر قابل نفوذ و بخشی از آن شکاف هایی باشد که قسمتهایی از آنها حاوی آب بوده، تحت تزریق دوغاب با فشار P قرار گیرد، سه ناحیه در این درزه خواهیم داشت: (۱) ناحیه ای که با دوغاب پر شده و تحت فشار P می باشد، (۲) ناحیه حاوی آب و (۳) ناحیه جامد غیر قابل نفوذ که دوغاب به آن وارد نشده است (شکل ۴a). برای ساده سازی، این پلان نامنظم را به شکل دایره ای به شعاع I مدل می کنیم بطوریکه مساحت آن با مساحت پلان دایره برابر باشد (شکل ۴b) و در آن جریان شعاعی دوغاب با مرکزیت گمانه حفر شده تحت فشار P صورت می گیرد. با توجه به وجود سه ناحیه طبق تفکیک فوق، مدل هندسی این الگو در شکل ۴c آمده است که سه ناحیه به وضوح در آن نمایان است.



شکل ۴a - پلان درزه تزریق شده در عمق h



شکل 4b - مدل فرضی پلان دایره ای برای شکل ۴a



شکل ۴ - مدل هندسی پلان برای تقسیم بندی قسمت های مختلف درزه

اگر نسبت سطح تحت فشار به کل سطح دایره یا نسبت حجم پر شده با دوغاب به کل حجم درزه را با k_1 نشان دهیم، نیروی بالابرنده هیدرولیکی برابر خواهد شد با [۳۵]:

$$F = \frac{\pi \cdot k_1 \cdot I^2 \cdot P}{3} \quad (5)$$

در این حالت حجم دوغاب مصرفی (فضای پر شده با دوغاب)، در صورتی که جکینگ و شکست هیدرولیکی اتفاق نیافتد، برابر حاصلضرب سطح تحت فشار در ارتفاع b بوده و برابر است با:

$$V = k_1 \cdot \pi \cdot I^2 \cdot b \quad (6)$$

از روابط ۱ و ۵ و ۶ رابطه زیر برای نیروی بالابرنده هیدرولیکی بدست می‌آید که دقیقاً همان رابطه ۳ می‌باشد:

$$F = \frac{P \cdot V}{3 \cdot b} = \frac{G \cdot I \cdot N}{3 \cdot b} \quad (7)$$

ضریب k_1 بیانگر بازشدگی درزه برای جریان دوغاب یا نفوذ پذیری سنگ بوده و برابر نسبت حجم پر شده با دوغاب به کل حجم درزه و در نتیجه برابر است با:

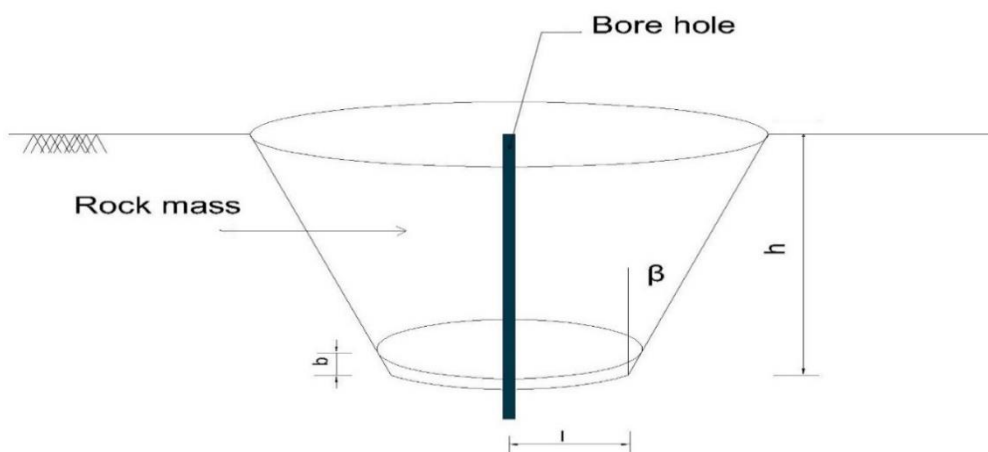
$$k_1 = \frac{\alpha}{2 \cdot \pi} \quad (8)$$

α زاویه پخش دوغاب (بر حسب رادیان) بوده که در شکل ۴c نشان داده شده است. مقادیر ضریب k_1 با توجه به مشخصات سنگ بستتر، در بخش بعد ارائه می‌گردد.

۳-۲- محاسبه نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز به روش تقریبی و دقیق

در اثر فشار تزریق نیروی بالابرنده هیدرولیکی ایجاد می‌شود. برای اینکه این نیرو ایجاد جکینگ هیدرولیکی در جرم سنگی سازند پی نکند، مقدار آن نباید از حد معینی تحت عنوان "نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز" بیشتر باشد. نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز با توجه به هندسه ساده شده توده سنگ بصورت زیر تعیین می‌شود.

فرض کنیم با ایجاد گمانه ای عملیات تزریق انجام شده و در درزه ای به ضخامت b در طول گسترش تزریق I انجام می‌شود. با فرض اینکه درزه استوانه ای نازک به ضخامت b و شعاع I در عمق h از سطح زمین باشد (شکل ۳)، نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز برابر وزن توده سنگ به شکل مخروط ناقص با شعاع کوچکتر I و ارتفاع h و زاویه β خواهد بود (شکل ۵). به این معنی که نیروی بالابرنده هیدرولیکی ایجاد شده در اثر فشار تزریق نباید در حدی باشد که با ایجاد جکینگ هیدرولیکی باعث بالا رفتن این توده سنگی گردد.



شکل ۵- توده سنگی به شکل مخروط ناقص روی درزه سنگی استوانه ای نازک به ضخامت b

وزن این توده سنگ از حاصل ضرب حجم و وزن مخصوص آن بدست می‌آید.

برای $\beta=0^\circ$ شکل توده سنگی یک استوانه بوده و نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز برابر خواهد شد با:

$$F_{all} = \pi \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot I^2 \quad (9)$$

که در آن:

F_{all} نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز، ρ جرم مخصوص توده سنگ، g شتاب جاذبه زمین، h عمق ترک از سطح زمین و I طول گسترش دوغاب می‌باشند.

برای دیگر مقادیر β ، حجم مخروط ناقص به دو روش تقریبی و دقیق حساب می‌شود. در روش تقریبی حجم مخروط ناقص (شکل ۵) برابر است با:

$$V_a = \pi \cdot h \cdot [I^2 + I \cdot h \cdot \tan(\beta) + \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \tan^2(\beta)] \quad (10)$$

در نتیجه نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز (به روش تقریبی) برابر خواهد شد با:

$$F_a = \pi \cdot h \cdot \rho \cdot g \cdot [I^2 + I \cdot h \cdot \tan(\beta) + \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \tan^2(\beta)] \quad (11)$$

در روش دقیق حجم مخروط ناقص (شکل ۵) برابر است با:

$$V_e = \pi \cdot [h \cdot I^2 + I \cdot h^2 \cdot \tan(\beta) + \frac{1}{3} \cdot h^3 \cdot \tan^2(\beta)] \quad (12)$$

در نتیجه نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز (به روش دقیق) برابر خواهد شد با:

$$F_e = \pi \cdot h \cdot \rho \cdot g \cdot [I^2 + I \cdot h \cdot \tan(\beta) + \frac{1}{3} \cdot h^2 \cdot \tan^2(\beta)] \quad (13)$$

روش تقریبی در اینجا به این دلیل ارائه شده که در بسیاری از موارد حجم مخروط ناقص به روش تقریبی حساب می‌شود. ام برانتبرگر، اچ استیل و ام اریکسون [۳۵] رابطه نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز را بصورت زیر ارائه داده‌اند:

$$F_{all} = \pi \cdot k_2 \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot I^2 \quad (14)$$

که در آن k_2 ضریبی برای لحاظ کردن هندسه توده سنگ (مخروط ناقص) و برابر نسبت حجم مخروط ناقص (شکل ۵) به حجم استوانه به شعاع I و ارتفاع h می‌باشد و مقدار k_2 برای β برابر ۴۵ درجه برابر است با [۳۶، ۳۵]:

$$k_2 = 1 + \frac{h}{I} + \frac{1}{3} \left(\frac{h}{I}\right)^2 \quad (15)$$

با مساوی قرار دادن F_a و F_e با F_{all} ، ضریب k_2 برای مقادیر مختلف صفر تا ۸۹ درجه β به روش های تقریبی و دقیق بدست می‌آید.

در روش تقریبی:

$$k_{2a} = 1 + \left(\frac{h}{I}\right) \cdot \tan(\beta) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{I}\right)^2 \cdot \tan^2(\beta) \quad (16)$$

در روش دقیق:

$$k_{2e} = 1 + \left(\frac{h}{I}\right) \cdot \tan(\beta) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{I}\right)^2 \cdot \tan^2(\beta) \quad (17)$$

k_{2a} به روش دقیق می‌باشد. k_2 مقدار ضریب k_{2e} به روش تقریبی و k_2 مقدار ضریب

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تعیین مقادیر ضریب k_1

همچنانکه در قسمت ۲-۱ گفته شد برای تعیین نیروی بالابرنده هیدرولیکی به ضریب k_1 که بیانگر بازشدگی درزه برای جریان دوغاب یا نفوذ پذیری سنگ می‌باشد، نیاز است. بر اساس مطالعات قبلی [۳۵، ۴۲، ۴۳] با توجه به مشخصات سنگ بستر و رابطه ۸ مقدار ضریب k_1 برای سنگ های مختلف از جدول ۱ بدست می‌آید.

جدول ۱: مقدار ضریب k_1 بر اساس نوع درزه سنگ

نوع درزه های سنگ	نوع سنگ از لحاظ نفوذ پذیری	k_1
درزه با باز شدگی بسیار زیاد	نفوذ پذیر بسیار بالا	0.38
درزه باز	نفوذ پذیر متوسط	0.13
درزه با باز شدگی کم	نفوذ پذیر پایین	0.06
درزه با باز شدگی بسیار کم	نفوذ پذیر بسیار پایین	0.03

۴-۲- مقایسه مقادیر ضریب k_2 بدست آمده به روش های تقریبی و دقیق و ارائه مقادیر دقیق آن

با استفاده از روابط ۱۶ و ۱۷ می توان دریافت که روش تقریبی برای $\frac{h}{l} = 1$ و زاویه β تا ۲۸ درجه کمتر از ۵٪ با روش دقیق اختلاف دارد. جدول ۲ مقادیر مختلف $\frac{h}{l}$ و حداکثر زاویه β را برای اختلاف کمتر از ۵٪ روش تقریبی نسبت به روش دقیق بدست می دهد. (روش تقریبی همیشه مقدار بیشتر نسبت به روش دقیق می دهد).

جدول ۲: مقادیر $\frac{h}{l}$ و حداکثر زاویه β جهت اختلاف کمتر از ۵٪ روش تقریبی نسبت به روش دقیق

$\frac{h}{l}$	0.5	1	1.5	2
Max β (degree)	47	28	20	15

ضریب k_2 برای بدست آوردن نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز استفاده شده و برای بعضی مقادیر مشهور β (بر حسب درجه) و نسبت های مختلف $\frac{h}{l}$ می توان مقدار دقیق آن طبق جدول ۳ می باشد.

جدول ۳: مقادیر دقیق ضریب k_2 در نسبت های مختلف $\frac{h}{l}$ و مقادیر مشهور زاویه β

	$\beta=0^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$
$\frac{h}{l} = 0.5$	1	1.32	1.58	2.12
$\frac{h}{l} = 1$	1	1.69	2.33	3.73
$\frac{h}{l} = 1.5$	1	2.12	3.25	5.85
$\frac{h}{l} = 2$	1	2.60	4.33	8.46

۳-۴- تعیین حداکثر فشار و عدد شدت تزریق با رویکرد جلوگیری از جکینگ و شکست هیدرولیکی

برای جلوگیری از جکینگ و شکست هیدرولیکی باید نیروی بالابرنده هیدرولیکی ناشی از فشار تزریق از مقدار مجاز آن کمتر باشد یعنی:

$$F < F_{all} \quad (18)$$

از روابط ۵ و ۱۴ و ۱۸ خواهیم داشت:

$$P < \frac{3.k_2.\rho.g.h}{k_1} \quad (19)$$

رابطه فوق حد بالای فشار تزریق را مشخص کرده و داریم:

$$P_{max} = \frac{3.k_2.\rho.g.h}{k_1} \quad (20)$$

شار حداکثر در عملیات تزریق بوده و با در دست داشتن مشخصات سنگ بستر، با استفاده از رابطه فوق بدست می‌آید. در P_{max} روش های سنتی و عدد شدت تزریق (شکل های ۱ و ۲) به این مقدار نیاز داریم. در واقع یکی از شروط برای پیش گیری از جکینگ و شکست هیدرولیکی این است فشار عملیات تزریق از فشار حداکثر بدست آمده از رابطه ۲۰ بیشتر نباشد.

از روابط ۷ و ۱۴ و ۱۸ خواهیم داشت:

$$GIN < 3. \pi. b. k_2. \rho. g. h. I^2 \quad (21)$$

رابطه فوق حد بالای عدد شدت تزریق را مشخص کرده و داریم:

$$= 3. \pi. b. k_2. \rho. g. h. I^2 \quad GIN_{max} \quad (22)$$

و با توجه به رابطه ۱۲ و ۱۷:

$$GIN_{max} = 3. b. V. \rho. g \quad (23)$$

GIN_{max} عدد شدت تزریق حداکثر می باشد که در روش عدد شدت تزریق (شکل ۲) به آن نیاز داریم. جهت جلوگیری از جکینگ و شکست هیدرولیکی، عدد شدت تزریق انتخاب شده برای انجام عملیات تزریق نباید از عدد شدت تزریق حداکثر بدست آمده از رابطه ۲۲ (یا ۲۳) بیشتر باشد.

بطور خلاصه می توان گفت که برای جلوگیری از خطر جکینگ و شکست هیدرولیکی در عملیات تزریق دوغاب شروط زیر باید برقرار شود:

- ۱- فشار عملیات تزریق کمتر از فشار حداکثر بدست آمده از رابطه ۲۰ باشد.
- ۲- عدد شدت تزریق انتخاب شده کمتر از عدد شدت تزریق حداکثر بدست آمده از رابطه ۲۲ (یا ۲۳) باشد.

۴-۴- تعریف و استفاده از فشار نرمال و طول گسترش نرمال

با معرفی مفاهیم بدون بعد فشار نرمال و طول گسترش نرمال دوغاب طبق روابط زیر [۳۵]:

$$P_n = \frac{P.k_1}{3.\rho.g.h} \quad (24)$$

$$I_n = \frac{I}{h} \quad (25)$$

و با استفاده از روابط ۱۴ و ۱۷ رابطه کلی بین فشار نرمال و طول گسترش نرمال با توجه به نیروی بالابرنده بدست آمده، به این ترتیب خواهیم داشت:

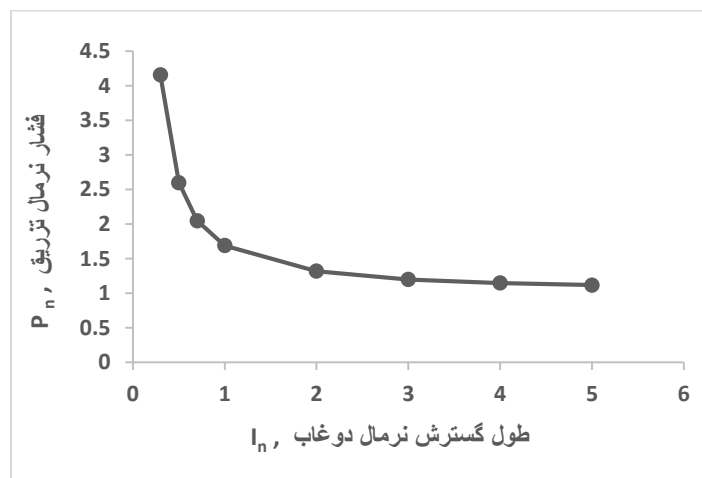
$$P_n < 1 + \frac{1}{I_n} \cdot \tan(\beta) + \frac{1}{3.I_n^2} \cdot \tan^2(\beta) \quad (26)$$

رابطه فوق حد بالای فشار نرمال تزریق را مشخص کرده و در نتیجه:

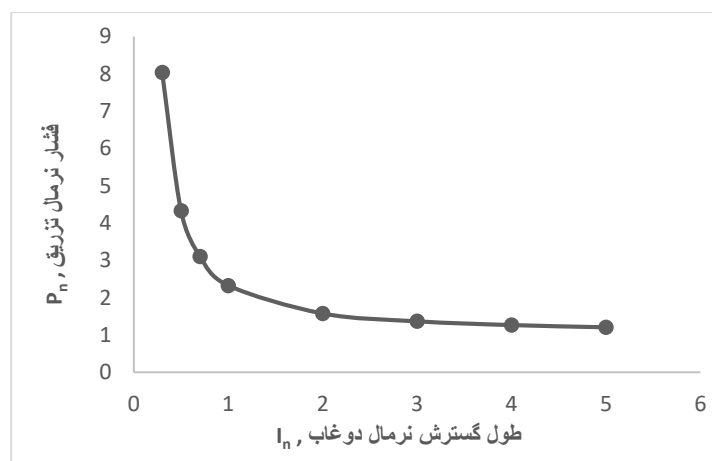
$$P_{nmax} = 1 + \frac{1}{I_n} \cdot \tan(\beta) + \frac{1}{3.I_n^2} \cdot \tan^2(\beta) \quad (27)$$

P_{nmax} فشار نرمال حداکثر و بقیه متغیرها قبلا تعریف شده اند.

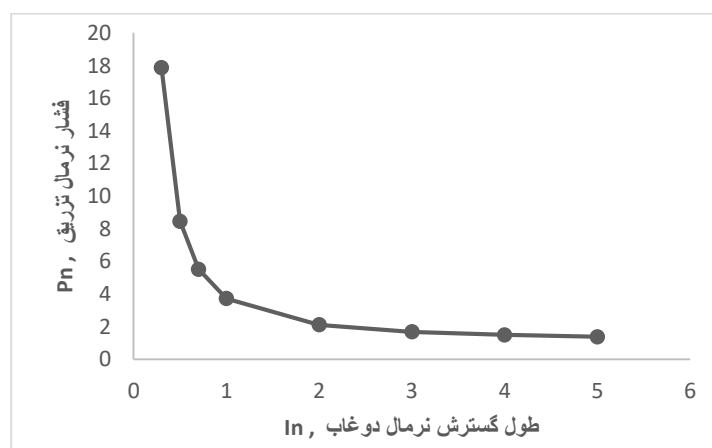
فشار نرمال برای $\beta=0^\circ$ مقدار ثابت یک و برای مقادیر 30° ، 45° و 60° درجه زاویه β ، نمودارهای زیر رابطه فشار نرمال و طول گسترش نرمال نشان می‌دهد:



شکل ۶: رابطه فشار نرمال و طول گسترش نرمال برای $\beta=30^\circ$



شکل ۷: رابطه فشار نرمال و طول گسترش نرمال برای $\beta=45^\circ$



شکل ۸: رابطه فشار نرمال و طول گسترش نرمال برای $\beta=60^\circ$

در نمودارهای فوق (شک ۶ و ۷ و ۸) ناحیه بالای منحنی‌ها بیانگر وجود نیروی بالابرنده هیدرولیکی بیش از حد مجاز و ناحیه زیر منحنی‌ها بیانگر نیروی بالابرنده هیدرولیکی کمتر از حد مجاز و نقاط روی منحنی‌ها دقیقاً در حد مجاز می‌باشند.

برای اینکه نیروی بالابرنده هیدرولیکی از حد مجاز خود بیشتر نشود، حد نهایی فشار برابر P_{max} (رابطه ۲۰) است. از سویی با توجه به رابطه فشار نرمال و فشار (رابطه ۲۴) و رابطه فشار با نیروی بالابرنده هیدرولیکی (رابطه ۳)، می‌توان دریافت که تنها در حالتی نیروی بالابرنده هیدرولیکی از حد مجاز خود بیشتر نمی‌شود که فشار نرمال از مقدار ماکزیمم خود (رابطه ۲۷) بیشتر نگردد؛ بر این مبنا در شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ ناحیه بالای منحنی‌ها که مقادیر بیشتر از فشار نرمال حداکثر را نشان می‌دهند، بیانگر وجود نیروی بالابرنده هیدرولیکی بیش از حد مجاز و ناحیه زیر منحنی‌ها مقادیر کمتر از فشار نرمال حداکثر را نشان می‌دهند، بیانگر نیروی بالابرنده هیدرولیکی کمتر از حد مجاز و نقاط روی منحنی‌ها که مقادیر فشار نرمال حداکثر را نشان می‌دهند، دقیقاً بیانگر حد مجاز این نیرو می‌باشند.

۵- ارزیابی

در عملیات تزریق نیروی بالابرنده هیدرولیکی F عامل جکینگ هیدرو لیکی و تابعی از طول گسترش و فشار دوغاب و نفوذپذیری سنگ بوده و رابطه ریاضی آن (رابطه ۵) بر اساس این پارامترها تعیین شده است. برای این منظور زاویه پخش دوغاب α طبق شکل C_4 و بر مبنای آن ضریب k_1 تعریف و مقدار آن بر اساس نفوذ پذیری سنگ در جدول ۱ ارائه شده است.

نیروی بالابرنده هیدرولیکی مجاز F_{all} تابعی از شکل و جرم توده سنگی واقع در بالای درزه بوده و با فرض اینکه طبق شکل ۵ توده سنگی بالای درزه یک مخروط ناقص به ارتفاع h و شعاع کوچکتر I (طول گسترش دوغاب) و زاویه β است، رابطه ریاضی آن بدست آمده است. در این راستا روابط دقیق و تقریبی ضریب k_2 بدست آمده است.

در ادامه با توجه به اینکه برای جلوگیری از جکینگ و شکست هیدرولیکی نیروی بالابرنده هیدرولیکی F باید از حد مجاز خود F_{all} کمتر باشد ($F < F_{all}$)، روابط ریاضی برای فشار و عدد شدت تزریق حداکثر تزریق تعیین شده‌اند.

در انتها مقادیر نرمال فشار و طول گسترش تزریق تعریف و ماکزیمم فشار نرمال بر اساس طول گسترش نرمال فرموله شده است. این روابط ریاضی در عملیات تزریق بسیار پر اهمیت و کاربردی هستند. کاربرد آنها در روش GIN به این لحاظ اهمیت دارد که مقادیر حداکثر فشار و عدد شدت تزریق پارامترهای اصلی جهت کنترل پروسه تزریق می‌باشند.

۵-۱- مقایسه با مطالعات قبلی

با مقایسه کیفی این مقاله با تحقیقات گذشته می‌توان دریافت که در اینجا روابط ریاضی برای مقادیر حداکثر فشار و عدد شدت تزریق که با هدف جلوگیری از جکینگ و شکست هیدرولیکی ناشی از نیروی بالابرنده هیدرولیکی فرموله شده‌اند، برای تمام مقادیر ممکن زاویه β قابل استفاده است، در صورتیکه در مطالعات قبل روابط فقط برای دو مقدار صفر و ۴۵ درجه زاویه β لحاظ شده‌اند. در واقع محدودیت مطالعات گذشته رفع شده و با استفاده از روابط بدست آمده در اینجا، با کنترل فشار یا عدد شدت تزریق، می‌توان از پدیده جکینگ و شکست هیدرولیکی در هر نوع شکل توده سنگ مورد تزریق جلوگیری کرد. به لحاظ ضرایب و روابط ارائه شده در مقایسه کمی با مطالعات قبل، این مقاله دارای وجوه مشخصه زیر است:

۱- در [۳۵، ۴۱] مقدار زاویه پخش دوغاب α بر اساس مشخصات سنگ‌ها در جدولی ارائه شده اما در این مقاله مقادیر k_1 که بیانگر نفوذ پذیری سنگ است، مستقیماً بدست آمده و در جدول ۱ ارائه شده که استفاده از روابط ۵، ۶، ۲۰ و ۲۴ را ساده تر می‌کند.

۲- در مطالعات قبلی [۳۶، ۳۵] با ارائه رابطه ۱۵ مقدار k_2 فقط برای مقادیر خاص صفر و ۴۵ درجه β تعیین شده است. در اینجا در تکمیل بحث، بر اساس فرمول‌های تقریبی و دقیق حجم مخروط ناقص، برای اولین بار روابط ۱۶ و ۱۷ جهت تعیین ضریب k_2 برای مقادیر مختلف زاویه β ، از صفر تا ۸۹ درجه به دو روش تقریبی و دقیق بدست آمده و در جدول ۲ با هم مقایسه شده‌اند. مقادیر دقیق آن برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه β در جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه کمی k_2 در اینجا و [۳۶، ۳۵] برای $\beta = 0^\circ$ و $\beta = 45^\circ$ نشان می‌دهد که مقادیر دقیقاً برابر می‌باشند.

۳- روابط ریاضی ۲۰، ۲۲، ۲۳ و ۲۷ برای تعیین مقادیر حداکثر فشار و عدد شدت تزریق و فشار نرمال برای اولین بار در این مقاله ارائه شده که نوآوری موضوع را نشان می دهد. در مقایسه با مقالات قبلی، در این مقاله با مدل کردن پلان درزه واقعی مورد تزریق به شکل دایره، برای اولین بار روابط کامل ریاضی برای مقادیر حداکثر فشار و عدد شدت تزریق با هدف جلوگیری از جکینگ هیدرولیکی فرموله و ارائه شده است.

۶- نتیجه گیری کلی

روابط بدست آمده برای فشار حداکثر، عدد شدت تزریق حداکثر و فشار نرمال حداکثر با هدف جلوگیری از جکینگ و شکست هیدرولیکی که در اثر نیروی بالابرنده هیدرولیکی اتفاق می افتند، در این مقاله ارائه شده اند. این روابط با مدل کردن پلان درزه مورد تزریق به شکل استوانه ای نازک و با استنتاج های ریاضی حاصل شده اند؛ در این راستا ضرایب مورد نیاز k_1 و k_2 تعریف و تعیین گردیده که نتایج بدست آمده عبارتند از:

۱- ضریب k_1 که بیانگر نفوذپذیری سنگ می باشد، بسته به نوع سنگ و میزان باز شدگی درزه های سنگ بین 0.03 تا 0.38 می باشد.

۲- ضریب k_2 در زوایای مختلف β (غیر از صفر درجه) با نسبت عمق درزه به طول گسترش دوغاب و همچنین با زاویه β نسبت مستقیم دارد.

۳- با افزایش زاویه β و نسبت $\frac{h}{l}$ می توان فشار تزریق را افزایش داد در صورتیکه با افزایش نفوذپذیری سنگ می توان آن را کاهش داد. بدیهی است که حجم دوغاب مصرفی در این حالت بیشتر شده و رابطه ۶ نیز این را تأیید می کند.

۴- با افزایش زاویه β و نسبت $\frac{h}{l}$ عدد شدت تزریق انتخابی جهت کنترل عملیات تزریق را می توان افزایش داد زیرا با ضریب k_2 نسبت مستقیم دارد اما این عدد تابعی از ضریب k_1 که نشان دهنده نفوذ پذیری سنگ است، نمی باشد. در واقع می توان گفت که اگرچه با افزایش نفوذپذیری سنگ، فشار کاهش یافته اما با توجه به افزایش حجم دوغاب مصرفی در این حالت، حاصلضرب این دو مقدار که همان عدد شدت تزریق می باشد، تغییر نمی کند.

مراجع

- [1] Zhang, S., Johnsson, F. and Stille, H. (2021). Design Methodology for Grout Curtain Under Dams Founded on Rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, 449.
- [2] Petković, B., Agdas, A.S. Zandi, Y., Nikolić, I., Denić, N., Radenkovic, S.D., Almojil, S.F., Roco-Videla, A., Kojić, N., Zlatković, D. and Stojanović, J. (2021). Neuro fuzzy evaluation of circular economy based on waste generation, recycling, renewable energy, biomass and soil pollution. *Rhizosphere*, 19.
- [3] Zandi, Y. (2015). *Technology of Grout Engineering from Dam Construction*. Tabriz: Froozesh.
- [4] Cai, T., Zandi, Y., Agdas, A. S., Selmi, A. Issakhov, A. and Roco-Videla, A. (2021). The compressive strength of concrete retrofitted with wind ash and steel slag pozzolans with a water-cement based polymers. *Advances in concrete construction*, 11(6), 507-519.
- [5] Yanzhen, Q., Zandi, Y., Rahimi, A., Pourkhorshidi, S., Roco-Videla, A., Khadimallah, M., Jameel, M. and Kasehchi, E. and Assilzadeh, H. (2021). Nano-SiO₂ for efficiency of geotechnical properties of fine soils in mining and civil engineering. *Advances in Nano Research*, 11 (3), 301-312.
- [6] Ma, R., Karimzadeh, M., Ghabussi, A., Zandi, Y., Baharom, S., Selmi, A. and Maureira-Carsalade, N. (2021) Assessment of composite beam performance using GWO-ELM metaheuristic algorithm. *Eng. Comput.*
- [7] Zandi, Y. and Alayi, M. (2019). Effect of comparison of Ardabil pozzuoli cement and type 2 Sufyan cement compressive strength viewpoints and improvement solutions. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6 (4), 95-110.

- [8] Arani, K.S., Zandi, Y., Pham, B.T. Mu'azu, M.A. Katebi, J. Mohammadhassani, M., Khalafi, S., Mohamad, E.T., Wakil, K. and Khorami, M. (2019). Computational optimized finite element modeling of mechanical interaction of concrete with fiber reinforced polymer. *Comput. Concr.*, 23 (061).
- [9] Jain, A. and et al. (2017). Effect of Magnetic Water on Properties of Concrete. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 7(5).
- [10] Zandi, Y., Burnaz, O. and Durmus, A. (2012). Determining the temperature distributions of fire exposed reinforced concrete cross sections with different methods. *Res. J. Env. Earth Sci.*, 4(8), 782- 788.
- [11] Zanadi, Y. and Akpinar, M. V. (2012). An experimental study on separately ground and together grinding Portland slag cement strength properties. *Res. J. Recent Sci.*, 1(4), 27- 40.
- [12] Zandi, Y. (2021). Durability evaluation of concrete made of fly ash and copper slag. *Pollack Periodica*. 16(3), M. V. 76-82.
- [13] Shahgoli, A., Zandi, Y., Heirati, A., Khorami, M. Mehrabi, P. and Petkovic, D. (2020) Optimisation of propylene conversion response by neuro-fuzzy approach. *Int. J. Hydromechatronics*, 3(228).
- [14] Reddy, S., V., Kumar, K., Sumanth, A. (2017). Effect of Magnetic Field Treated Water on Fresh and Hardened Properties of Concrete. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 4(2), 134-138.
- [15] Saleh, S. and et al. (2019). Improving the strength of weak soil using Polyurethan grouts: A review. *Construction and Building Materials*, 202, 738-752.
- [16] Cai, T., Zandi, Y., Agdas, A. S., Selmi, A., Issakhov, A. and Roco-Videla, A. (2021). The compressive strength of concrete retrofitted with wind ash and steel slag pozzolans with a water-cement based polymers. *Advances in concrete construction*, 11(6), 507-519.
- [17] Zhang, X. and et al. (2019). Developing an epoxy resin with high toughness for grouting material via copolymerization method. *E-Polymers*, 19 (1), 489-498.
- [18] Yaghoobi Rafi, J. and Stille, H. (2021). A method for determining grouting pressure and stop criteria to control grout spread distance and fracture dilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 112.
- [19] Xiao, F., Liu, Q. and Zhao, Z. (2021). Information and knowledge behind data from underground rock grouting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(6), 1326-1339.
- [20] Rastegarnia, A. and Sohrabi bidar, A. (2017). Assessment of Relationship Between Grouted Values and Calculated Values in Bazoft Site. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, 1299-1310.
- [21] Chen, J., Yang, X. and Ling Li, F. (2020). Investigation into Energy Dissipation During Grouting Uplift. *Indian Geotechnical Journal*, 56, 930-970.
- [22] Majdi, A. and Yazdani, M. (2021). Determination of Hydraulic Jacking Mechanism and Maximum Allowable Grout Pressure during Grout Injection in Anisotropic Rocks. *Journal of Mining and Environment*, 12 (2), 589-603.
- [23] Talukada, P. and Day, A. (2019). Hydraulic failures of earthen dams and embankments. *Innovative Infrastructure Solutions*, 42.
- [24] Rafi, j. and Stille, H. (2014) Control of rock jacking considering spread of grout and grouting pressure. *Tunnelling and underground space technology*, 40, 1-15.
- [25] Wang, F. and Dai, Z. (2018). Experimental study to identify premonitory factors of landslide dam failures. *Engineering Geology*, 232, 123-134.
- [26] Sagong, Myung. (2021). A proposal and evaluation of a revised GIN method. *Journal of Korean Tunnelling and Undergrounding Space Association*, 23, 151-165.
- [27] Sharifzadeh, M. (2008). *Reinforce of rock mass by cement grout in Grouting Intensity Number (GIN) method*. Tehran. Jahad daneshgahi Amirkabir industrial university.
- [28] Lombardi, G. (2011). CONCRETE FACE ROCKFILLDASUSE OF GIN CRITERIA FOR CONSOLIDATION AND IMPERMEABILIZATION OF THE FOUNDATION ROCK. *Consultant, Via R*.
- [29] Lombardi, G. and Deere, D. (1993). Grouting design and control using the GIN principle. *journal of water power International and dam construction*, 15-22.

- [30] Jingya, L. and et al. (2017). Optimization Study on Grouting Method Based on the Grouting Intensity Number. *International Journal of Simulation: Systems science & technology*. 17(1), 35.1-53.3. DOI 10.5013/IJSSST.a.17.01.35.
- [31] Turcotte, L. and et al. (1994). *The use of stable grout and GIN technique in grouting for dam rehabilitation*. Canadian dam safety conferences, 137-161.
- [32] Janson, T. (1993). *Grouting of fracture planes- the Aspo tunnel*. Stockholm, Sweden: Inswidish; abstract in English, 93/10.
- [33] Shahzad, M.I. and et al. (2017). A Case Study of Trial Grouting using Grouting Intensity Number (GIN) and Conventional Method at Trabela 4th Foundation Trabela Dam. *Journal of Geotechnical and Transportation Engineering*, 3(2), 47-52.
- [34] Yaghoobi Rafi, J. and Stille, H. (2015). Applicability of using GIN method, by considering theoretical approach of grouting design. *Geotechnical and geological Engineering*, 33(6), 1431-1448.
- [35] Brantberger, M., Stille, H. and Erikson, M. (2000). Controlling grout spreading in tunnel grouting analyses and developments of the GIN-method. *Tunneling and underground space technology*, 15(4), 343-352.
- [36] Stille, H., Janson, T. and Olsson, P. (1994). *Experiences from the grouting of the section 1340-2565 m of the tunnel*. Progress report 25-94-13, SKB-Aspo HRL, Swedish Nuclear fuel and waste management Co.
- [37] Henderson, A. and others. (2008). A New Method for Real-Time Monitoring of Grout Spread through Fractured Rocks. *Materials Research Society*. 1107.
- [38] Al-Kuisi, M. and et al. (2007). Improvement of dam foundation using grouting intensity number (GIN) technique at Tannur dam site, South Jordan. *ESGE*, 1-15.
- [39] liu w, C. and et al. (2018). Groundwater control and curtain grouting for tunnel construction in completely weathered granite. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 77, 515- 531.
- [40] Saeidi, O. and others. (2012). Predication of grout penetration length into the jointed rock mass using regression analyses. *Scientific Research and Essays*, 7(45), 3931-3943.
- [41] Janson, T. (1998). *Calculation models for estimation of grout take in hard jointed rock*. Doctoral thesis 1018. Royal institute of technology, Stockholm, Sweden.