

ارزیابی روش عدد شدت تزریق (GIN) در عملیات تزریق درزه های هیدرولیکی (مطالعه موردی نیروگاه سد رودبار لرستان)

مهدی نورآبادی^{۱*}، حسن وقارفرد^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، هرمزگان.
^۲ استادیار، عضو هیئت علمی دانشگاه هرمزگان.

NOURABADIMEHDI@YAHOO.COM

چکیده

تزریقات تحکیمی فرایندی است که امروزه در سراسر جهان جهت تحکیم و افزایش ویژگی های ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی سازندهای زمین شناسی مورد استفاده قرار می گیرد. از مهمترین روش های تزریق روش عدد شدت تزریق (Grouting Intensity Number) و روش سنتی است. روش های بیان شده هرکدام دارای معایب و مزایایی است که مطالعه و بررسی دقیق عوامل موثر بر این روش ها، نیازمند مطالعه دقیق ژئوتکنیک سازندهای زمین شناسی منطقه است. در این پژوهش نیروگاه آبی پروژه سد رودبار لرستان به خاطر تنوع لیتولوژی زیاد و تکنیک پیچیده برای مقایسه دو روش مطرح شده مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب تعداد ۱۲۵ گمانه به روش GIN و ۱۲۵ گمانه به روش سنتی تزریق شده و بررسی گردید. در مقام مقایسه روش GIN به دلیل ثابت بودن نسبت آب به سیمان دوغاب (نسبت پیشنهادی برای پروژه $W/C = 0.65/1$) دارای سهولت بیشتری در مراحل اجرا و ساخت دوغاب و کنترل ویژگی های آن می باشد. همچنین در روش GIN به دلیل مشخص بودن حجم دوغاب به ازای سازندهای زمین شناسی مختلف، امکان کنترل و پیش بینی فرایند شکست هیدرولیکی یا جکینگ هیدرولیکی بسیار آسانتر از روش سنتی می باشد. همچنین در این روش بدلیل ثابت بودن نسبت آب به سیمان در طول عملیات تزریق، ویژگی های دوغاب یکنواخت بوده و کنترل و پایش آن با احتیاط بیشتر و دقت بیشتری قابل اجرا می باشد.

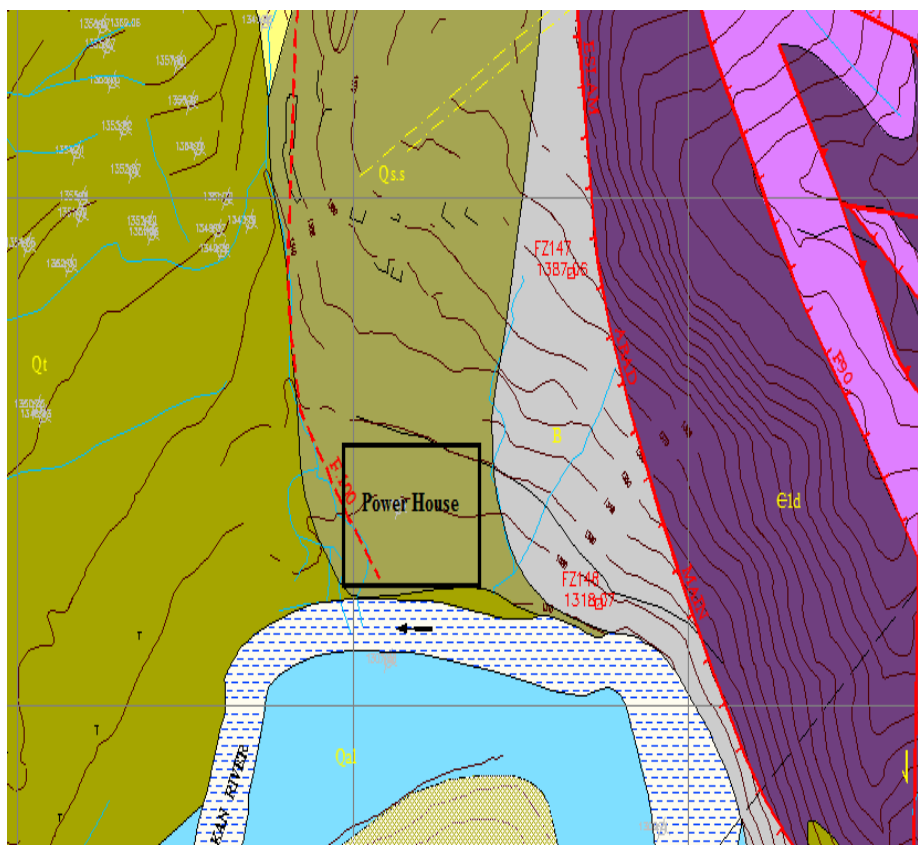
واژگان کلیدی: شدت عدد تزریق (GIN)، روش سنتی تزریق، نیروگاه، سد رودبار لرستان

۱- مقدمه

فرایند تزریق امروزه در سراسر جهان به منظور اهداف مختلفی از جمله بالابردن ویژگی های ژئوتکنیکی سنگها و خاکها، پایدارسازی شیروانیهای سنگی و خاکی، اصلاح سازه ها و مشکلات ناشی فونداسیون آنها، جابجایی سازه ها و اصلاح نشست های فونداسیون سازه ها و غیره مورد استفاده قرار میگیرد. انجام و درک فرایند تزریق پیچیدگی های ویژه ای دارد که شناخت شرایط مختلف آن تفاوت های آن بسیار مهم و مشکل می باشد. روش تزریق سنتی که از گذشته تا به امروز بسیار رایج بوده و برای متخصصان این فن شناخته شده است. ولیکن روش عدد شدت تزریق (GIN) یکی از روش های تزریق است که امروزه وارد عرصه تزریق شده و به خاطر برخی از مزایای آن به شدت گسترده شده است. در این پژوهش بخش نیروگاه سد رودبار لرستان به خاطر وجود شرایط زمین شناسی نامساعد آن و حجوم آبهای زیرزمینی، فرایند تزریق در آن انجام گرفته است. به منظور مقایسه این دو روش و بررسی معایب و مزایای آن در شرایط زمین شناسی مختلف، هردو روش سنتی و GIN جهت تزریق نیروگاه مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- زمین شناسی منطقه

پروژه سد و نیروگاه رودبار لرستان واقع در ۱۰۰ کیلومتری جنوب خاوری شهرستان الیگودرز جزء منطقه زاگرس مرتفع می باشد. این منطقه دارای تنوع لیتولوژی و تکتونیکی بسیار زیادی است. به طوری که از سازند هرمز (کامبرین) تا رسوبات رودخانه ای و واریزه ای عهد حاضر منطقه را دربرمیگیرد. شکل ۱ و جدول ۱ سازندهای زمین شناسی و ساختارهای آنها را نشان داده است.

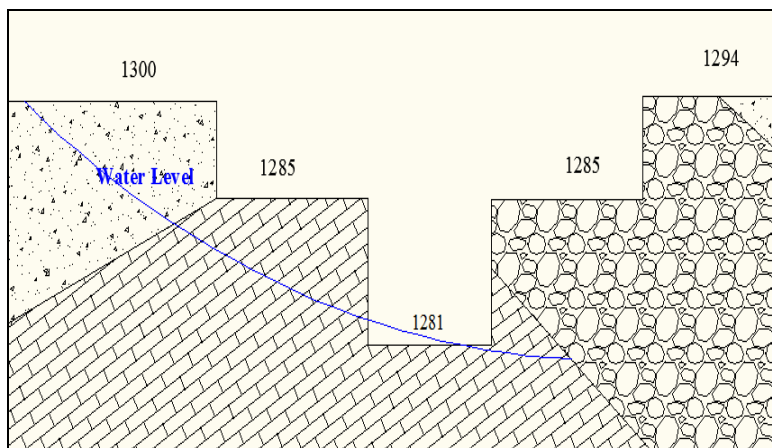


شکل ۱) نقشه زمین شناسی منطقه و موقعیت نیروگاه رودبار لرستان

جدول ۱) ویژگی های سازندهای تشکیل دهنده محدوده نیروگاه

ویژگی ها	جنس مواد	سازند زمین شناسی
نفوذ پذیری بالا	آبرفت های درشت تا سیلت	مصلح رودخانه ای عهد حاضر
نفوذ ناپذیر متورم شونده	قطعات برشی و آهکی	مصلح واریزه ای
نفوذ ناپذیر متورم شونده	برش	برش موجرلا
دارای لایه بندی ضخیم و هوازگی متوسط	سنگ آهک با میان لایه های مارنی	سازند دالان

همانطور که جدول ۱ و شکل ۱ نشان می دهند، بخش نیروگاه با وجود محدوده اندک آن دارای تنوع لیتولوژیکی وسیعی بوده و بنابراین فرایند تزریق در این محدوده دارای پیچیدگی های بسیاری است. بدین منظور مقطع زمین شناسی از نیروگاه در جهت خاوری-باختری تهیه شد که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲) مقطع عرضی زمین شناسی از نیروگاه

همانطور که شکل ۲ نشان می دهد، سطح ایستابی در تراز ۱۲۸۱ سطح زمین را قطع کرده و به صورت چشمه نمایان شده است. به صورت قطع در صورت حفاری گمانه های تزریق در این بخش گمانه ها آبدار بوده و فرایند تزریق با مشکل روبه رو خواهد شد.

۳- اصول روش سنتی و روش GIN

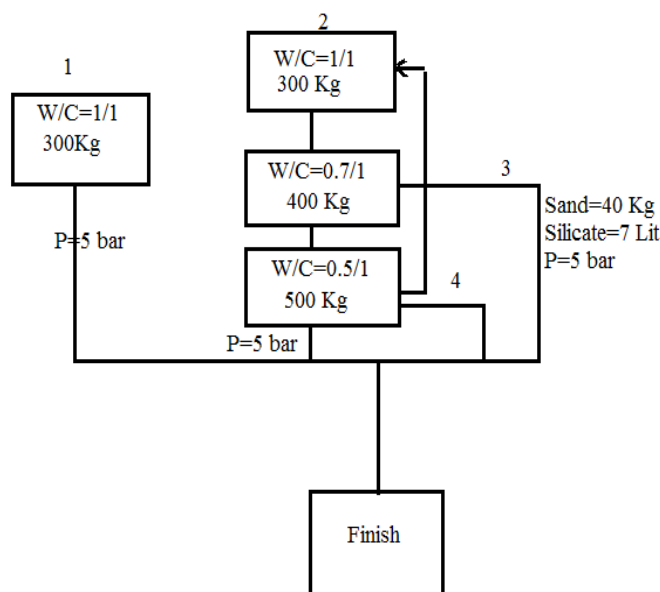
روش سنتی تزریق به طور کلی بدین ترتیب است که دوغاب با نسبت های متفاوت (از رقیق به غلیظ) ساخته شده و تا زمانه که گمانه اشباع نشده و به فشار مورد نظر نرسد فرایند تزریق ادامه می یابد. همچنین در این روش برای تعیین میزان خوردند گمانه ها از آزمایش فشار آب (لوژان) استفاده می شود (Bernander S., 2004). ولیکن در روش GIN قبل از انجام تزریق برای تعیین میزان خوردند گمانه ها از هر سازند و هر بخشی از پروژه تزریق آزمایشی انجام می گیرد. در این روش نسبت دوغاب ثابت بوده و در مراحل مختلف تزریق تفاوتی ندارد. پس از انجام تزریق آزمایشی، برای هرسازند یا هر بخشی عدد جین با توجه به معیارهای مختلف (فاصله درزه ها، طول درزه ها، میزان نفوذ دوغاب در درزه و غیره) معرفی میگردد. تفاوت عمده این روش با روش سنتی در این است که تزریق در گمانه تا زمانی ادامه می یابد که مقدار حجم دوغاب به عدد جین برسد.

روش سنتی با وجود مزایای زیادی که داشته و همواره مورد استفاده قرار می گیرد دارای معایبی است. از جمله می توان گفت در این روش نمی توان امکان شکست هیدرولیکی سنگ را تخمین و ارزیابی نمود. بدین مفهوم که در این روش تزریق تا زمانی ادامه می یابد که گمانه به فشار مطلوب برسد، در حالی که ممکن است فشار مورد نظر باعث باز شدن درزه ها و افزایش میزان خوردند گمانه گردد. همچنین آب یک مایع نیوتونی بوده و از نظر ویژگی های شیمیایی و تزریق پذیری با دوغاب متفاوت است. بنابراین انجام تست لوژان برای تعیین میزان خوردند دوغاب سنگ روش دقیقی نیست. دوغاب با وزن مخصوص ۱/۹ برابر آب و ترکیب غیرهمسانی که دارد در تمام درزه های سنگ نمی تواند حرکت داشته باشد ولی آب در تمام ریزترک ها به راحتی حرکت کرده و بنابراین میزان خوردند سنگ را به درستی نشان نمی دهد.

۴- روش اجرای تزریق

۴-۱- روش سنتی

بمنظور تزریق تحکیمی نیروگاه سد رودبار لرستان طبق نظر طراح حدود ۲۵۰ عدد گمانه با عمق ۷ متر و قطر ۷۶ میلیمتر در تمام ترازهای بیان شده در شکل ۲ مطرح شد. جهت مقایسه دو روش مطرح شده تعداد ۱۲۵ گمانه به روش سنتی در یک طرف نیروگاه و تعداد ۱۲۵ گمانه در طرف مقابل به روش GIN تزریق گردید. تمام گمانه ها به روش ضربه ای-چرخشی و با دستگاه دریل واگن D7 حفاری گردید. فلوجارت طراحی پیشنهادی و اجرا شده برای تزریق این گمانه ها به روش سنتی مطابق شکل ۳ می باشد (گروه ژئوتکنیک کارگاه رودبار، ۱۳۸۸).



شکل ۳) فلوجارت پیشنهادی و اجرا شده برای تزریق تحکیمی به روش سنتی نیروگاه

همانطور که شکل ۳ نشان می دهد، فشار مطرح شده ۵ بار می باشد. در حالت ۱ نسبت آب به سیمان برابر بوده و در صورتی که به فشار مطلوب برسد فرایند تزریق متوقف میگردد. در حالت ۲ نسبت های مختلف تا زمانی که گمانه اشباع گشته و به فشار ۵ بار برسد ادامه می یابد. در صورتی که گمانه بعد از ۱۲۰۰ کیلوگرم سیمان اشباع نشد ۶ ساعت گیرش داده شده و دوباره ادامه فرایند تزریق با نسبت آب به سیمان ۱/۱ ادامه می یابد. در حالت ۳ در صورتی که گمانه به ۷۵٪ فشار مورد نظر رسیده ولی اشباع نگردد با مصرف ۴۰ کیلوگرم ماسه به همراه سیلیکات سدیم (زودگیر کننده دوغاب) تزریق ادامه می یابد تا گمانه اشباع گردد. در حالت ۴ که گمانه دارای نشت نسبتا زیاد است و به حدود ۶۰٪ فشار نهایی رسیده است، مانند حالت قبل با مصرف سیلیکات سدیم و ماسه گمانه اشباع شده و فرایند تزریق به انتها میرسد. در این روش ممکن است گمانه حتی با مصرف ۱۰ تن سیمان نیز به فشار مورد نظر نرسد. در این صورت، حالت ۲ آنگذر ادامه می یابد تا گمانه به فشار مورد نظر برسد. این امر باعث بروز شکست هیدرولیکی (Hydraulic Fracturing)، جکینگ هیدرولیک (Hydraulic Jacking) و یا تخریب بخشی از ساختار سنگ و متورم شدن آن گردد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شد، بخشی از فونداسیون نیروگاه از سنگ برش ساخته شده است. این

بخش تحمل فشار ۵بار تزریق را نداشته و در مرحله ۲ تزریق دچار شکست هیدرولیکی می گردد که ممکن باعث بروز مشکلاتی در سازه و توده سنگ گردد.

۴-۲- روش شدت عدد تزریق (GIN)

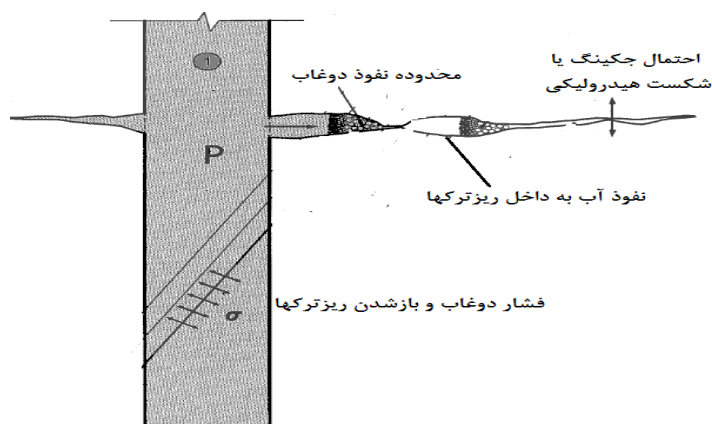
برای ۱۲۵ گمانه ای که روش GIN انجام گرفت سه منطقه تحت تزریق آزمایشی قرار گرفته و برای آنها عدد GIN در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از تزریق آزمایشی و اعداد مورد نظر در جدول ۲ نشان داده شده است (گروه ژئوتکنیک کارگاه رودبار، ۱۳۸۸).

جدول ۲ مقادیر GIN پیشنهادی را برای بخش های مختلف نیروگاه نشان می دهد

محدوده	نوع مصالح	P (bar)	V(Lit/m)	GIN=P×V
۱	آبرفت و مصالح واریزه ای	۷	۶۵۰	۴۵۰۰
۲	برش	۲	۲۰	۴۰
۳	دولومیت و آهک	۵	۳۰۰	۱۵۰۰

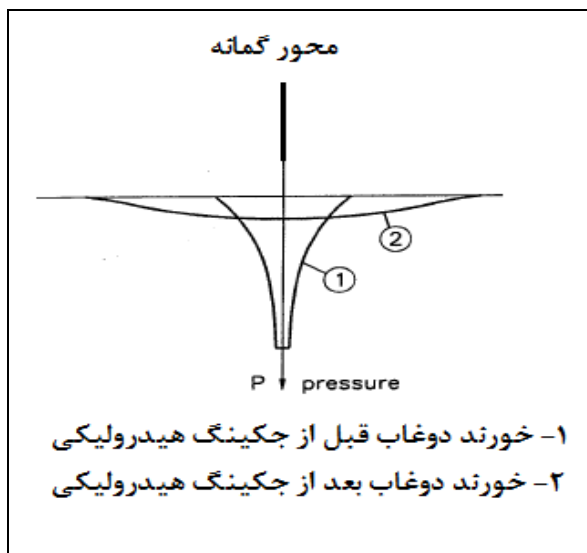
همانطور که جدول ۲ نشان می دهد، به ازای میزان خوردن سازندهای مختلف در بخش نیروگاه مقدار عدد GIN تعیین و پیشنهاد شده است. این بدین مفهوم است که بیشینه فشار طرح مربوط به مصالح آبرفتی ۷ بار و بیشینه حجم دوغاب مصرفی برای هر متر طولی گمانه ۶۵۰ لیتر می باشد. این امر باعث می شود که درزه های سنگ باز نشده و باعث افزایش میزان خوردن سنگ و صدمه به ساختار سنگ (شکست هیدرولیکی) نگردد. از آنجا که دوغاب یک ترکیب غیر یکنواخت است در روش GIN برخلاف روش سنتی از یک ترکیب ثابت برای تزریق استفاده می گردد. طرح دوغاب ثابت پیشنهادی برای روش GIN نیروگاه (W/C = 0.65/1) است. همچنین مطابق جدول ۲ امکان عملیات تزریق در سازندهای برشی به علت خوردن بسیار اندک و عدد جین کم آن امکان پذیر نمی باشد.

همانطور که بیان شد در روش سنتی به خاطر غیرهمسان بودن ترکیب دوغاب و غلظت متفاوت آن، نفوذ دوغاب به درزه های بزرگ انجام شده و با افزایش فشار، آب به درون ریزترک ها نفوذ کرده و زمینه را برای رخداد شکست هیدرولیکی یا جکینگ هیدرولیکی فراهم می نماید (شکل ۴) (Lombardi G., ۲۰۰۳).



شکل ۴) نمایش شماتیک احتمال شکست و جکینگ هیدرولیکی در روش سنتی تزریق

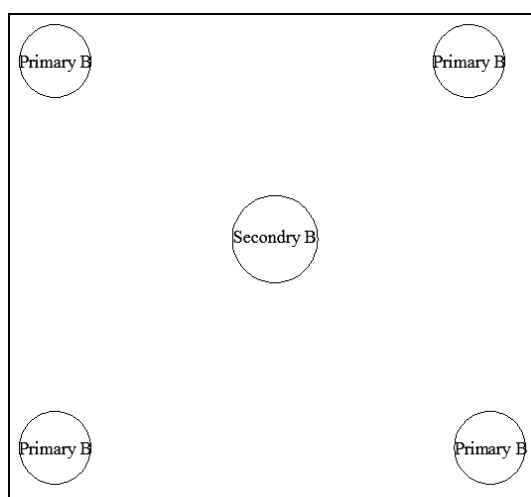
زمانی که فرایند شکست هیدرولیکی رخ می دهد، میزان خوردند گمانه به شدت افزایش می یابد و فشار گنج تزریق افت خواهد نمود که در این حالت زمین شناسان و متخصصان را دچار اشتباه می کند (شکل ۵) (خوش برش ا، ۱۳۸۲).



شکل ۵) زمان جکینگ هیدرولیکی و تغییر در میزان خوردند گمانه

۵- گمانه های افزوده شده (Additional Boreholes)

بعد از اتمام عملیات تزریق لازم است که منطقه از نظر مهندسی و کیفیت فرایند تزریق مورد ارزیابی قرار گیرد. از این لحاظ تعدادی گمانه های اضافی در بخش هایی با خوردند بالا مجدد حفاری و تزریق گردید. این فرایند بدین ترتیب بود که در فاصله گمانه های تزریق شده و با آرایش لوزی گمانه های اضافه مطابق شکل ۶ افزوده و تزریق گردید.



شکل ۶) نمایی از الگوریتم افزودن گمانه های ثانویه به سیستم تزریق

نتایج حاصل نشان می دهد که با افزایش روند گمانه های ثانویه، میزان خوردند در این گمانه ها به شدت کاهش می یابد. این میزان کاهش در بخشی که به روش سنتی تزریق شد در حدود ۷۰٪ تزریق پذیری اولیه سازند و در بخشی که به روش GIN تزریق شد در حدود ۶۰٪ تزریق پذیری گمانه های اولیه می باشد. می توان نتیجه گیری نمود که در روش سنتی چون دوغاب های اولیه بسیار رقیق هستند، تزریق دارای دامنه وسیعتری نسبت به روش GIN است. همچنین میتوان نتیجه گیری نمود که با افزایش گمانه های اضافی و ثانویه به سیستم تزریق، میتوان ویژگی های ژئومکانیکی و هیدرولیکی سنگها و سازندهای زمین شناسی را به مقدار زیادی ارتقاء داد.

۶- شکست هیدرولیکی و جکینگ هیدرولیکی

واژه شکست هیدرولیکی، بدین مفهوم است که زمانی تنش های بیرونی (فشار ناشی از آب یا تزریق) بر مقاومت سنگ بکر غلبه کرده و باعث جدایش آن از یکدیگر و شکست سنگ بکر گردد شکست هیدرولیکی رخ می دهد. ولی واژه جکینگ هیدرولیکی، زمانی رخ می دهد که فشار و تنش بیرونی وارده به سنگ (فشار ناشی از آب یا تزریق) بر مقاومت توده سنگ غلبه کند و باعث جدایش سنگ در راستای ریزترک ها گردد. البته در طی فرایند تزریق یا انجام تست لوژان معمولاً احتمال وقوع شکست هیدرولیکی منتفی است و معمولاً فرایند رخ داده جکینگ هیدرولیکی می باشد (Dalmalm T., 2004).

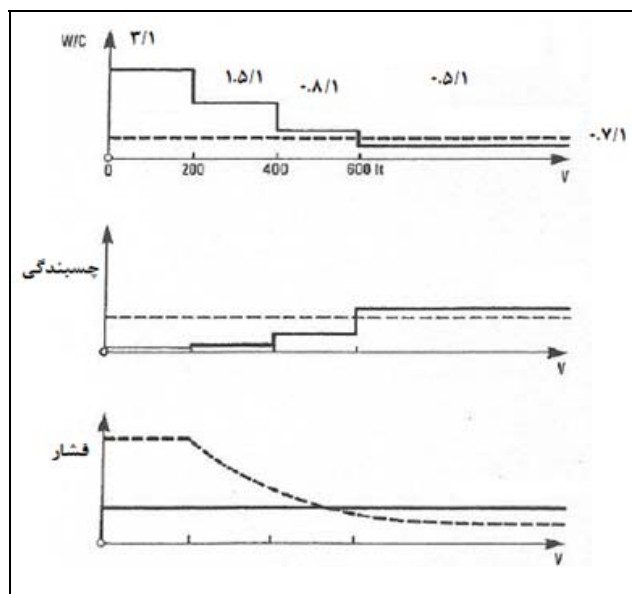
۷- نتیجه گیری

تزریق به روش سنتی یا GIN هر یک دارای مزایا و معایبی است که بحث و بررسی دقیق آنها جهت انتخاب یک مورد در پروژه های مهندسی حائز اهمیت ویژه ای بوده و بستگی زیادی به ویژگی های زمین شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح دارد. جدول ۳ مقایسه کلی این دو روش را به صورت مختصر نشان می دهد.

جدول ۳) مقایسه معایب و مزایای تزریق به روش GIN و روش سنتی

روش سنتی	مزایا	معایب
	سرعت بالاتر به دلیل عدم نیاز به مطالعه دقیق منطقه جهت تعیین خوردند سازندهای زمین شناسی مسافت نفوذ زیاد دوغاب در سازندهای سنگی	عدم امکان تشخیص و پیشگیری از پدیده جکینگ هیدرولیکی مشکل بودن اجرا به دلیل تغییر مداوم در نسبت دوغاب انجام تست لوژان و ایجاد هزینه و وقت اضافی
روش GIN	یکنواخت و ثابت بودن نسبت دوغاب یکنواخت بودن ویژگی های دوغاب در حین عملیات تزریق ایمنی بالاتر جهت تشخیص شکست یا جکینگ هیدرولیکی مشخص بودن حجم دوغاب ورودی عدم نیاز به انجام تست لوژان انجام مطالعه دقیق از وضعیت خوردند سازند مورد نظر ساده کردن عملیات تزریق به خاطر ثابت بودن نسبت دوغاب	عدم دستیابی به دوغاب هایی با مقاومت بالا به دلیل ثابت بودن نسبت دوغاب عدم امکان تزریق در سازندهای کارستی

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، روش GIN دارای مزایای بیشتری نسبت به روش سنتی بوده و ایمنی عملیات تزریق جهت کنترل شکست یا جکینگ هیدرولیکی را به شدت بالا می برد. همچنین این روش به خاطر وجود دوغاب با نسبت ثابت دارای سهولت اجرایی بیشتری نسبت به روش سنتی است. شکل ۷ نیز برخی از تفاوت ها و مزایای بارز روش GIN را نسبت به روش سنتی نشان می دهد (Lombardi G., ۲۰۰۳).



شکل ۷) مقایسه برخی ویژگی های بارز روش GIN و روش سنتی

همانطور که شکل ۷ نیز نشان می دهد در روش سنتی با دوغاب هایی با نسبت بالای آب به سیمان، دوغاب فاقد چسبندگی مناسب بوده و مقاومت کافی برای عملیات تزریق را برآورده نمی کند.

۸- منابع

- خوش برش ا.، (۱۳۸۲)، سد و نیروگاه کارون ۳ حفاری و تزریق، انتشارات جام اندیشه.
 گروه ژئوتکنیک کارگاه رودبار، (۱۳۸۸)، روش اجرای اولیه حفاری و تزریق پرده آبنده سد رودبار لرستان، انتشارات دانش فنی کارگاه رودبار لرستان.
 Dalmalm, Thomas, 2004, Choice of Grouting Method for Jointed Hard Rock based on Sealing Time Predictions, PhD Thesis Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
 Lombardi, G, 2003, Rock Mass Grouting, 3dr International Conference on Grouting and Grout Treatment.
 Rikard GothÅall, 2006, Rock Mass Response during High Pressure
 Stig Bernander, 2004, Grouting in Sedimentary and Igneous Rock with Special Reference to Pressure Induced Deformations. Technical report, Luleå University of Technology.