

تخمین الگوی رفتار جریان سیال در توده سنگ در سد چمشیر

محمد جواد نصری فخرادود
دکتر مکانیک سنگ

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰

چکیده

در این نوشتار با هدف ملاحظه الگوی رفتار جریان سیال در مقیاس توده سنگ به مطالعه و تحلیل نتایج تعدادی از آزمایش‌ها در طرح سد و نیروگاه چمشیر پرداخته شده است. الگوی جریان سیال در توده سنگ یا رابطه بین نرخ جریان سیال با فشار آن به طور معمول به صورت رابطه خطی در نظر گرفته می‌شود حال آنکه در آزمایشات آزمایشگاهی جریان سیال این الگو در سه گروه رفتار خطی داری، رفتار غیرخطی تحت اثر اینرسی زیاد، رفتار غیرخطی تحت تاثیر اتساع شکستگی تقسیم بندی شده است. در این پژوهش با برازش غیر خطی از نتایج آزمایش فشار آب به بررسی الگوی رفتار غیرخطی جریان سیال در توده سنگ در قالب دو رابطه فورچمپیر و ایزباش پرداخته شده است. این تحلیل نشان می‌دهد که این دو رابطه به خوبی رفتار غیرخطی جریان سیال در توده سنگ را توصیف می‌کند. همچنین رابطه فورچمپیر کارایی بهتری برای توصیف رفتار جریان سیال دارد. با استفاده از روابط موجود در خصوص عدد رینولدز بحرانی در آزمون‌های آزمایشگاهی، روشی جهت تخمین عدد رینولدز بحرانی در آزمون‌های صحرایی ارائه شده است. این کمی‌سازی برای تخمین عدد رینولدز بحرانی و تعیین انحراف از جریان خطی به غیرخطی به شناخت بهتر رفتار سیال در آزمایش صحرایی نظیر آزمایش فشار آب کمک می‌کند.

آزمایش لوژان، رفتار غیرخطی، معادله فورچمپیر، عدد رینولدز بحرانی

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

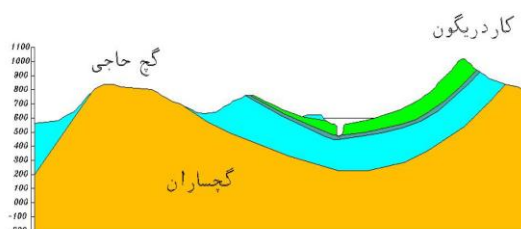
جریان سیال در توده سنگ در عمده از فعالیت‌های مهندسی سنگ (نظیر احداث سازه‌های مهندسی در توده سنگ، اکتشاف و استخراج مواد هیدروکربوری، ذخیره‌سازی زباله‌های هسته‌ای و استحصال انرژی زمین گرمایی) از اهمیت برخوردار است از این رو طراحی و اجرا این فعالیت‌های مهندسی مستلزم شناخت رفتار جریان سیال در توده سنگ است [1, 2].

آزمایش لوژان (فشار آب) رایج‌ترین آزمایش برای تخمین تراوایی و تزریق‌پذیری در توده سنگ به صورت برجا، در پروژه‌های سد سازی است. در این آزمایش تحت یک فشار ثابت مقدار آب خوری توده سنگ اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش اولین بار در سال ۱۹۳۳ توسط موریس لوژان به منظور برآورد تزریق‌پذیری و نفوذپذیری توده سنگ ارائه شده است [3]. ولی امروزه پیشرفت‌های چشمگیری در خصوص

ارزیابی خصیصه‌های هیدرولیکی توده سنگ با استفاده از این آزمایش رخ داده است [4]. در بررسی داده‌های آزمایش‌های هم فشار هیدرولیکی نظیر آزمایش فشار آب در توده سنگ، مقادیر آب‌گذری با استفاده از مدل ریاضی بر مبنای فرضیات جریان داری در شکستگی محاسبه می‌شود [5]. در جریان داری رابطه بین نرخ جریان Q با فشار هیدرولیکی به صورت خطی تغییر می‌کند و به همین دلیل جریان داری به جریان خطی نسبت داده می‌شود. پژوهش‌های بسیاری در خصوص بدست آوردن مقادیر آب‌گذری و یا نفوذپذیری از آزمایش‌های هم فشار هیدرولیکی برحسب مدل ریاضی بر مبنای قانون داری صورت گرفته است. اما در این پژوهش‌ها کمتر بر الگوی رفتاری جریان سیال در توده سنگ توجه شده است. از سوی دیگر در آزمایشات آزمایشگاهی انحراف الگوی جریان سیال از حالت خطی به غیر خطی مشاهده شده است [6]–[10]. در اغلب این پژوهش‌ها یک شکستگی تنها در نمونه سنگ مورد مطالعه قرار گرفته است ولی

لایه قابل تفکیک است [17].

سازندهای زمین شناسی رخنمون یافته در زیر حوزه زهره شامل آهک‌های گروه خامی (فهلپان، سورمه، گدوان و داریان) گروه بنگستان (سازندهای کژدمی و سروک)، سازندهای پابده، گورپی، آسماری، میشان، آغاچاری، بختیاری و نهشته‌های تبخیری گچساران می باشد. آزمایشات فشار آب در قسمت U شکل ساختگاه سد چم شیر و در دو جناح سمت راست و چپ سد در توده سنگ انجام شده است. از لحاظ چینه شناسی توده سنگ موجود در این قسمت در سازند میشان میانی تقسیم بندی می‌شود. این بخش از سنگ آهک‌های متوسط تا ضخیم لایه با میان لایه‌های نازک مارلستون‌های آهکی تا مارلستون تشکیل شده است. سنگ آهک‌های میشان میانی دارای بافت آواری و از نوع کلسی رودایت هستند که در آن قطعات سنگ آهک در یک سیمان مارنی تا آهکی قرار گرفته‌اند. گردشدگی قطعات آهکی در این سنگ کم بوده و به صورت برش رسوبی هستند. بر اساس رخنمون‌های مشاهده شده در تنگه ساختگاه سد چم شیر ضخامت این بخش بین ۸۵-۱۰۰ متر است. بخش اعظم توده سنگ‌های تشکیل دهنده تنگه چم شیر در محل ساختگاه سد از واحدهای سنگی این بخش از سازند میشان تشکیل شده است. در شکل به صورت شماتیک زمین‌شناسی محدوده پروژه سد چم شیر نشان داده شده است [۱۷].



شکل ۱: نمای شماتیک از ناودیس چم شیر و شکل دره در موقعیت ساختگاه سد چم شیر [۱۶]

۲-۲- ناپیوستگی ها

ناپیوستگی سیستماتیک در محل سد عبارت اند از لایه بندی سطحی و سه دسته درزه هستند البته یک دسته درزه در برخی محل ها مشاهده شده است که در کل محل سد مشاهده نمی‌شود. دسته درزه اصلی J1 دارای شیب و امتداد شیب ۷۵/۱۴۰ دسته درزه دوم J2 (۷۷/۳۳۲) دسته درزه سوم J3 (۲۴۶/۷۱) است [17].

انحراف رفتار خطی سیال به غیرخطی در نرخ جریان نسبتا پایین در تحلیل جریان سیال در توده سنگ بسیار حایز اهمیت است [11]. انحراف جریان سیال از حالت خطی به غیرخطی در آزمایش فشار آب، موجب افزایش خطا در تخمین پارامترهای هیدرولیکی توده سنگ می‌شود. بنابراین توجه به الگوی رفتار جریان سیال در آزمایش‌های هیدرولیکی درجا از اهمیت بالایی برخوردار است که تاکنون آنچنان که در خور توجه باشد این موضوع مطالعه نشده است. از سوی دیگر در بررسی‌های آزمایشگاهی به طور گسترده‌ای از عدد رینولدز به عنوان معیاری جهت تعیین انحراف از رابطه خطی به غیرخطی استفاده شده است [14]–[11], [8]. اما در مطالعات صحرایی جریان سیال در توده سنگ به جز موارد اندکی به بررسی این موضوع پرداخته نشده است [15].

در این نوشتار با بررسی داده‌های شماری از آزمایش‌های فشار آب در سد و نیروگاه چم شیر رفتار جریان سیال در این آزمایش مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است، همچنین با به کارگیری معادلات ارائه شده در پژوهش‌های آزمایشگاهی به تعیین عدد رینولدز بحرانی در آزمایش‌های صحرایی پرداخته شده است.

۲- طرح سد و نیروگاه چم شیر

طرح سد و نیروگاه ۱۷۶ مگا واتی چم شیر با هدف تولید انرژی از نیروگاه برقایی در ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر گچساران در استان کهگیلویه و بویر احمد قبل از پیوستن رودخانه خیر آباد به رودخانه زهره در مجاورت محلی به نام تنگه چم شیر نزدیک به مرز استان بوشهر در حال ساخت است و در برگیرنده طراحی و ساخت یک سد بتنی غلطکی (RCC) با ارتفاع ۱۵۵ متر و نیروگاه با ظرفیت اسمی ۱۷۵ مگاوات در رشته کوه زاگراس در جنوب غرب ایران واقع شده است [16].

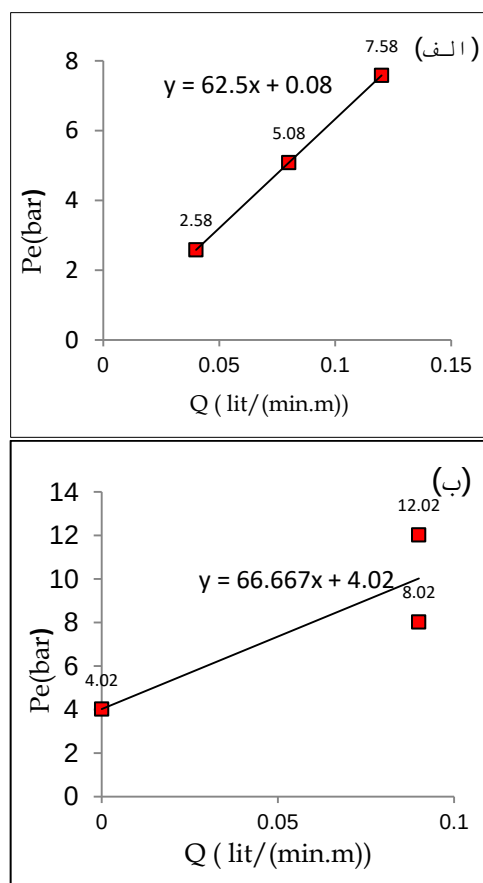
۲-۱- توصیف زمین شناسی محل سد چم شیر

از نظر چینه شناسی ساختگاه سد چم شیر از واحدهای سنگی آهک و مارلستون‌های سازند میشان تشکیل شده که به تفکیک از بالا به پایین شامل میشان بالایی (متشکل از مارلستون با میان لایه های نازک سنگ آهک)، میشان میانی (متشکل از سنگ آهک های ضخیم لایه با میان لایه های نازک مارن) و میشان پایینی (متشکل از واحدهای مارلستون و میان لایه های نازک سنگ آهک) است. تغییر سنگ چینه شناسی واحد میشان پایینی به صورت تدریجی بوده به طوری که یک زون تدریجی متشکل از تناوب سنگ آهک و مارن متوسط لایه قابل تفکیک است. تغییر سنگ چینه شناسی واحد میشان پایینی به میشان میانی به صورت تدریجی بوده به طوری که یک زون تدریجی متشکل از تناوب سنگ آهک و مارنهای متوسط

۴- تحلیل نتایج آزمایش‌های فشار ثابت

نتایج بدست آمده از آزمایش به شیوه رایج در آزمایش‌های هیدرولیکی تحلیل شده است و نمودار گرادیان فشار به صورت تابعی از نرخ جریان سیال رسم شده است. اطلاعات خام برای حالت جریان پایدار برای هر مرحله از یک آزمایش در یک گراف رسم شده تا رژیم جریان سیال مورد ارزیابی قرار بگیرد.

به منظور تعیین نوع جریان با توجه به محدود بودن داده‌ها در آزمایش فشار آب، مشابه مطالعه انجام شده توسط Quinn et al., (2011) با استفاده از رسم نتایج نرخ تزریق آب به گمانه (Q) در برابر فشار موثر در گمانه (P) برای داده‌های که خط بین دو نقطه از مبدا عبور کند جریان خطی (شکل ۳ الف) ولی در داده‌های غیرخطی مقدار عرض از مبدا زیاد است و خط موصلی از مبدا عبور نمی‌کند و جریان به صورت غیرخطی لحاظ شده است (شکل ۳ ب) [18]. بعضی از آزمایش‌ها برای مقادیر کم نرخ جریان جریان کاملاً خطی است و از مبدا عبور می‌کند ولی با افزایش نرخ جریان نتایج از حالت خطی منحرف می‌شود.



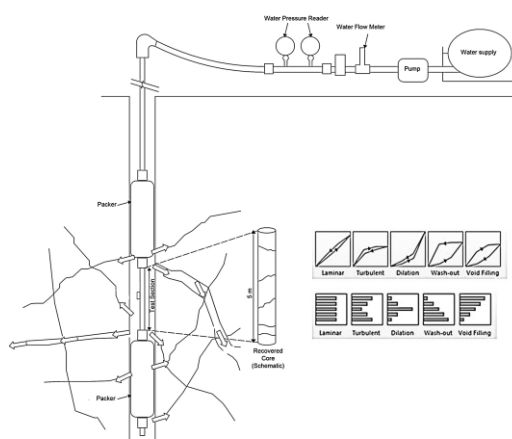
شکل ۳: نتایج آزمایش فشار آب در گمانه L1P5 در دو مقطع (الف) ۲۰-۲۵ متر (ب) ۳۵-۳۹.۵ متر

جدول ۱: نتایج طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ [۱۷].

واحد سنگی	RMR	میشان بالایی
میشان میانی	۵۳	جناح راست جناح چپ ساختگاه
ناحیه انتقال	۶۰	۵۴
میشان زیرین	۶۴	۶۶
میشان زیرین	۶۵	۶۳

۳- تجهیزات و روش انجام آزمایش لوژان

در آزمایش لوژان با هدف ثابت نگه داشتن فشار سیال در محدوده‌ای از گمانه مطالعاتی (ابتدا و انتهای محدوده‌ی ۵ متری از گمانه با استفاده از پکر مسدود می‌شود) تزریق آب صورت می‌گیرد و مقدار آب‌خوری گمانه (Q) در آن فشار ثبت می‌شود در نهایت دو پارامتر Q و فشار موثر P برحسب هم رسم می‌گردد و مقدار عدد لوژان برحسب شکل منحنی P-Q محاسبه می‌شود. خصیصه‌های هیدرولیکی در توده سنگ بر مبنای مقادیر P-Q و منحنی‌های طبقه‌بندی شده و مقادیر عدد لوژان ارزیابی می‌شود. البته این نکته باید مدنظر قرار بگیرد از آنجایی که آزمایش فشار آب تنها در یک گمانه انجام می‌شود و گمانه دومی برای مشاهده در این آزمایش وجود ندارد، نتیجه‌های آن به طور دقیق شرایط هیدرولیکی توده سنگ را توصیف نمی‌کند [3].

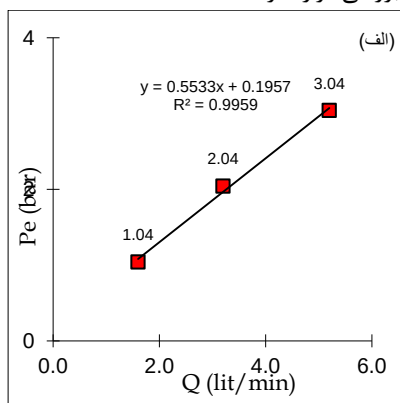


شکل ۴: شماتیکی از آزمایش فشار سیال به همراه نتایج [3].

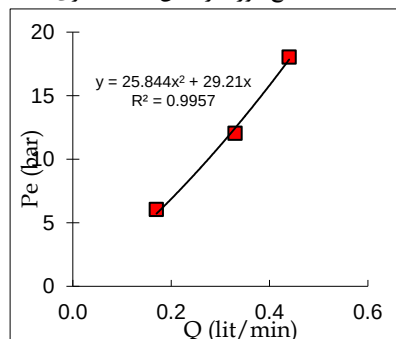
فشارها در آزمایش فشار آب، در ۵ پله که سه پله ابتدایی فشار افزایش و در دو پله پایانی فشار کاهش می‌یابد طراحی شده است. به منظور اندازه‌گیری حجم آب تزریقی کنتوری بر روی مسیر آب نصب می‌شود. همچنین برای کنترل فشار در مقطع از یک عدد با فشارسنج (مانومتر) استفاده می‌شود.

در شکل ۴ انحراف از رفتار غیرخطی در این نوع رفتار مقدار گرادیان فشار بیشتر از مقدار نرخ جریان افزایش می یابد (مقدار آبخوری به نسبت فشار گمانه کمتر است) و به جریان غیر داری شناخته می شود.

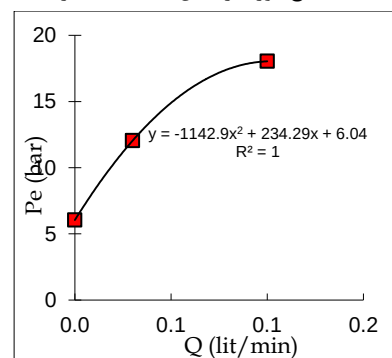
ج- غیرخطی به خاطر اتساع درزه: مطابق نمودار ج در شکل ۴ برای برخی از آزمایش های در گمانه ها مقدار نرخ جریان بیشتر از فشار افزایش می یابد (مقدار آبخوری بیشتر گمانه در فشار بیشتر) که این می تواند به اتساع ناپیوستگی ها مرتبط باشد البته فرار سیال از اطراف پکر هم می تواند دلیل این نوع از رفتار سیال باشد. با توجه به پیچیدگی ها بسیار زیاد این نوع رفتار در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته است.



الف- مقطع مورد آزمایش ۱۳-۸ متری



ب- مقطع مورد آزمایش ۵۰-۴۴ متری



ج- مقطع مورد آزمایش ۸۰/۵-۸۴/۵ متری

شکل ۴: رابطه بین نرخ جریان با گرادیان فشار در گمانه L1P5

در رفتار خطی جریان سیال مقدار $\nabla P/Q$ مقدار ثابتی است ولی برای فشارهای تزریق بالا این مقدار تغییر می کند و به دلیل افت اصطکاکی بیشتر از حالت خطی منحرف می شود. بنابراین مقدار $\nabla P/Q$ افزایش می یابد ولی چنانچه تحت فشار تزریق دهانه بازشدگی ناپیوستگی افزایش یابد و اتساع رخ دهد مقدار $\nabla P/Q$ کاهش پیدا می کند. البته نشد جریان سیال و فرار سیال از پکر به بالا و پایین محدوده آزمایش هم این نوع رفتار را تداعی می کند.

۵- تحلیل نتایج آزمایش

از میان گمانه های پر تعدادی که برای مطالعه سد و نیروگاه چم شیر حفر شده است به دلیل در دسترس بودن تمامی اطلاعات مکانیک سنگی شامل نتایج آزمایش، لاگ زمین شناسی و مشخص بودن وضعیت شکستگی ها در چهار گمانه L1P5, L1P3, L1P1 و L1P7، این گمانه ها انتخاب شده است و از نتایج آزمایش لوژان در این گمانه ها بررسی الگوی رفتاری جریان سیال در توده سنگ پرداخته شده است. در جدول ۲ خلاصه ای از اطلاعات این چهار گمانه آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات گمانه های مورد مطالعه

گمانه	محل	عمق گمانه (متر)	تعداد آزمایش
L1P1		۵۱	۱۰
L1P3	گالری ۴۶۰ سد	۸۶	۱۵
L1P5	چم شیر	۸۰	۱۴
L1P7		۷۵	۱۵

طول مورد آزمایش در گمانه اغلب موارد ۵ متر بوده ولی در چند مورد برای ۵/۵ یا ۴/۵ متر هم آزمایش انجام شده است. با حذف نتایج آزمایش فشار آبی که به خاطر نفوذپذیری پایین مقطع تکمیل نشده است نتایج ۱۹ آزمایش فشار آب مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی نتایج بدست آمده از ۱۹ آزمایش فشار آب در این گمانه ها، نتایج پله های افزایش فشار به صورت تابعی از نرخ جریان سیال رسم شده است تا رژیم جریان سیال مورد ارزیابی قرار بگیرد. پس از بررسی نمودار ها سه الگو رفتار برای جریان سیال در آزمایش فشار سیال مشخص شد که سه نوع رابطه بین نرخ جریان حجمی سیال با گرادیان فشار حاکم است.

الف- رابطه خطی: رابطه خطی بین نرخ جریان با فشار که با نام قانون داری شناخته می شود و در صورتی که اثرات اینرسی کم باشد این رابطه مشابه حالت الف شکل ۴ پدیدار می گردد. در برخی از آزمایشات گمانه های مورد مطالعه این نوع رفتار مشاهده شده است.

ب- رفتار غیرخطی به خاطر اثر اینرسی زیاد: مشابه حالت ب

جدول ۳: مقادیر ضریب خطی و غیر خطی برازش شده توسط رابطه

فورچمیر

گمانه	مقطع	A	B	R ²
L1P1	10-15	۴/۰E+۰۶	۳/۰×۱۰+۱۲	0.988
	۲۰-۱۵	۲/۰E+۰۹	۳/۰E+۱۳	۰/۹۹۶
	۲۵-۲۰	۸/۰E+۱۰	۲/۰-E+۱۴	۱/۰۰۰
	۳۰-۲۵	۶/۰E+۰۸	۲/۰E+۱۲	۰/۹۲۶
	۱۳-۸	۹/۰E+۰۹	۸/۰E+۱۲	۰/۹۹۸
L1P3	۲۹-۲۳	۲/۰E+۰۹	۴/۰E+۱۵	۰/۹۹۸
	-۵۰/۴	۴/۰E+۱۰	۷/۰E+۱۵	۰/۹۹۵
	-۵۹/۴	۶/۰E+۱۰	۶/۰-E+۱۴	۰/۹۲۴
	۶۵/۳	۲/۰E+۰۹	۵/۰E+۱۳	۰/۹۷۶
	۸۰-۷۵	۱/۰E+۱۰	۳/۰E+۱۴	۰/۹۹۰
L1P5	-۸۰	۶/۰E+۱۰	۳/۰-E+۱۴	0.949
	۸۶/۷۵	۸/۰E+۰۸	۳/۰-E+۱۱	۰/۹۹۹
	۱۳-۸	۳/۰E+۱۰	۱/۰E+۱۴	۰/۹۱۱
	۶۵-۶۰	۴/۰E+۱۰	۱/۰E+۱۴	0.933
	-۶۵/۸	۲/۰E+۱۰	۴/۰E+۱۳	۰/۹۴۴
L1P7	۷۰	۴/۰E+۱۰	۸/۰E+۱۵	۰/۹۹۶
	۲۰-۱۵	۵/۰E+۱۰	۶/۰E+۱۵	۰/۹۹۶
	۶۵-۶۰	۱/۰E+۱۱	۱/۰-E+۱۵	۰/۹۹۵
	۶۹/۵	۱/۰E+۱۱	۱/۰E+۱۶	۰/۹۷۹
	-۶۹/۵	۷۴/۷۰		

همچنین رگرسیون توانی با صحت قابل قبولی ($R^2 > 0.85$) قادر است رفتار جریان سیال در آزمایش لوژان را تقریب بزند بنابراین از رابطه ایزباش هم می توان جهت تخمین الگو جریان سیال استفاده نمود. در جدول ۴ مقادیر ضرایب m و λ بدست آمده برای آزمایشات لوژان در هرمقطع آورده شده است.

همانطور که مشخص است هردو رابطه به تقریب قابل قبولی قادر هستند رفتار غیرخطی جریان سیال را در توده سنگ تخمین بزنند. در شکل ۵ مقایسه بین ضریب $R2$ برای تخمین جریان سیال در دو رابطه ایزباش و فورچمیر آورده شده است. مطابق با این شکل مقادیر $R2$ رابطه فورچمیر و به عدد ۱ نزدیک تر است بنابراین برای توصیف رفتار غیرخطی جریان سیال در توده سنگ این رابطه بهتر است.

در خصوص دلایل ایجاد رابطه غیرخطی به خاطر اثر اینرسی زیاد تحقیقات بسیاری در شکستگی سنگی انجام شده است.

این انحراف از جریان خطی می تواند در نتیجه افت اینرسی قابل ملاحظه یا به دلیل اغتشاش القا شده با نوسانات سرعت باشد [19][20]. قبل از شروع اغتشاش، وقتی که اثر اینرسی به خاطر پیچ و خم داری مسیر جریان زیاد شود در اعداد رینولدز کم جریان غیرخطی رخ می دهد [22], [21], [7]

به طور خلاصه عمده ترین دلیل برای رخداد غیرخطی را می توان در زبری سطح شکستگی، تغییر مسیر جریان سیال در طول جریان، تغییر بازشدگی مکرر در طول جریان را می توان نام برد.

دو رابطه فورچمیر^۱ و ایزباش^۲ برای توصیف جریان غیرخطی سیال در شکستگی سنگ به صورت ماکروسکوپی تاکنون ارائه شده اند. رابطه ایزباش یک معادله نمایی به شکل رابطه زیر است.

$$-\nabla P = \lambda Q^m$$

در این رابطه m ، λ ضرایب تجربی هستند، اگر $m=1$ باشد نشان دهنده جریان خطی و اگر $m=2$ جریان کاملاً مغشوش است برای حالت گذر از جریان خطی به جریان کاملاً مغشوش در محدوده بین ۱ تا ۲ قرار می گیرد.

رابطه فورچمیر یک معادله درجه دو برای خصیصه های ماکروسکوپی فرآیند غیرخطی به صورت زیر پیشنهاد داد:

$$-\nabla P = A Q + B Q^2$$

$$A = \frac{\mu}{k A_h} \quad B = \frac{\beta}{A_h^2}$$

در این رابطه A و B ضرایب مدل است که افت فشار را به صورت مولفه های اثر خطی و غیرخطی نشان می دهند. قسمت خطی نشان دهنده افت فشار به سبب نیروهای اینرسی و قسمت غیرخطی نشان دهنده افت فشار به دلیل نیروهای ویسکوز است. رگرسیون چند جمله درجه دوم با صحت بالایی نتایج را برازش می کند ($R^2 > 0.91$) که نشان دهند تخمین خوب رابطه فورچمیر برای این نوع از جریان است. در جدول ۳ مقادیر ضرایب a و b بدست آمده برای آزمایشات لوژان در هرمقطع آورده شده است.

^۱ Forchheimer-^۲ - Izbash

جدول ۴: مقادیر ضرایب تجربی برازش شده توسط رابطه ایزباش

گمانه	مقطع	m	λ	R^2
L1P1	10-15	2.13	8.0×10^2	0.987
	۲۰-۱۵	۲.۹۶	6.0×10^6	0.991
	۲۵-۲۰	۰.۹۸	6.0×10^{10}	1.000
	۳۰-۲۵	۱.۸۳	8.0×10^{11}	0.908
L1P3	۱۳-۸	۱.۰۶	2.0×10^{10}	0.997
	۲۹-۲۳	۲.۰۰	4.0×10^{15}	0.999
	-۵۰/۴ ۵۴/۹	۲.۷۱	1.0×10^{19}	0.992
	-۵۹/۴ ۶۵/۳	۰.۷۹	5.0×10^9	0.853
L1P5	۷۵-۷۰	۱.۹۳	3.0×10^{13}	0.975
	۸۰-۷۵	۱.۶۵	2.0×10^{13}	0.992
	-۸۰ ۸۶/۷۵	۰.۶۵	1.0×10^9	0.۸۸۹
	۱۳-۸	۰.۹۱	4.0×10^8	0.998
L1P7	۶۰-۵۵	۱.۳۳	1.0×10^{12}	0.886
	۶۵-۶۰	۰.۸۵	9.0×10^9	0.۸۸۶
	-۶۵/۸ ۷۰	۱.۲۸	4.0×10^{11}	0.933
	۲۰-۱۵	۱.۵۸	1.0×10^{14}	0.997
L1P7	۶۵-۶۰	۱.۵۹	1.0×10^{14}	0.997
	-۶۵ ۶۹/۵	۰.۷۹	7.0×10^9	0.978
	-۶۹/۵ ۷۴/۷۰	۱.۱۵	1.0×10^{12}	0.981

۲-۳- معیار عدد رینولدز
عدد رینولدز عددی بدون بعد است که نسبت نیروهای اینرسی به ویسکوز را در جریان سیال نشان می‌دهد و به طور رایج در در مکانیک سیالات برای تخمین رژیم جریان استفاده می‌شود. برای جریان سیال در شکستگی عدد رینولدز مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{epv}{\mu} = \frac{\rho Q}{\mu w}$$

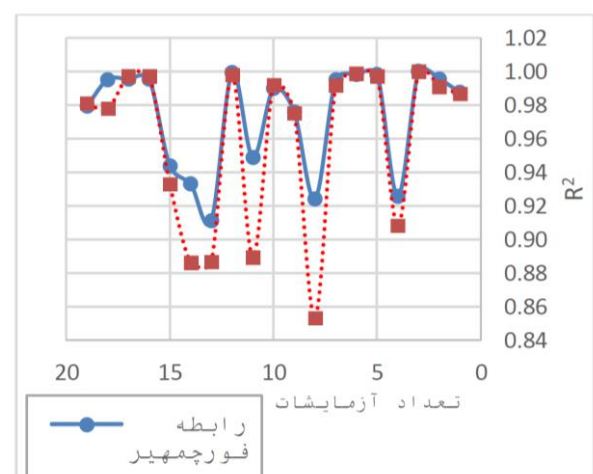
در این رابطه e بازشدگی شکستگی، ρ چگالی آب، v سرعت میانگین جریان سیال و μ ویسکوزیته دینامیکی سیال است از آنجایی که اندازه‌گیری بازشدگی شکستگی و سرعت سیال بسیار پیچیده است و نیازمند ابزار خاصی است می‌توان از رابطه $Q = wev$ استفاده کرد و رابطه دوم در معادله بالا بدست آورد. که در این رابطه عدد رینولدز بدون دانستن بازشدگی و با کمک Q نرخ جریان حجمی و عرض شکستگی در دیواره گمانه بدست می‌آید.

محدوده وسیعی از اعداد را برای عدد رینولدز بحرانی با هدف تعیین انحراف از رابطه خطی به غیرخطی در شکستگی را می‌توان در مطالعات آزمایشگاهی متعدد در این خصوص پیدا کرد.

روما^۳ در مطالعات آزمایشگاهی خود به این نتیجه رسید که قانون دارسی برای شکستگی سنگی تا زمانی که عدد رینولدز کمتر از ۲۴۰۰ باشد معتبر است. عدد رینولدز بحرانی گزارش شده توسط لوییس^۴ کمتر از ۵۰۰-۶۰۰ است. نتیجه گرفتند که تغییر از جریان آرام خطی به جریان غیرخطی در عدد رینولدز بین ۱ تا ۲۵ رخ می‌دهد. جواد و همکاران (۲۰۱۲) با ترکیب عدد فورچمپیر با عدد رینولدز رابطه زیر را برای تعیین رینولدز بحرانی پیشنهاد کردند [8].

$$Re_c = \frac{ap\alpha}{b\mu w(1-\alpha)}$$

که در این رابطه A و B ضرایب فورچمپیر، ρ دانسیته آب، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، w عرض شکستگی و α تعیین نسبت جریان غیرخطی به کل جریان است که در کارهای مهندسی عدد ۰/۱ لحاظ می‌شود [6], [14]. استفاده از عدد رینولدز برای توصیف جریان در آزمایش‌های صحرایی بسیار پیچیده است. باتوجه به این حقیقت که عدد رینولدز به طور



شکل ۵: تغییرات ضریب R2 در دو رابطه فورچمپیر و ایزباش

البته از ضریب m رابطه ایزباش می‌توان الگوی رفتاری جریان سیال را تخمین زد به این گونه که اگر $m=1$ باشد جریان خطی و اگر

^۳ Romma

^۴ Louis

مقادیر تخمین زده شده برای عدد رینولدز بحرانی برای مقاطع مختلف گمانه در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- مقادیر عدد رینولدز بحرانی برای آزمایش فشار آب

گمانه	مقطع (متر)	Re_c
L1P1	۱۰-۵	۱۷,۰۹
	۲۰-۱۵	8.86
	۴۵-۴۰	12.53
	۵۰-۴۵	11.90
	۶۰-۵۵	15.44
L1P3	۱۵-۱۰	2.6۱
	۵۵-۵۰	11.52
	۶۰-۵۵	2.66
	۶۵-۶۰	3.06
	۱۳۰-۱۲۵	8.86
L1P5	۲۰-۱۵	12.13
	۴۵-۴۰	18.35
	۷۰-۶۵	13.90
L1P7	۲۹-۳۱,۵	12.53
	۳۵-۴۰	13.16
	۵۵-۶۰	16.58

مقادیر رینولدز بحرانی در محدوده ۱۸ تا ۲,۵ تغییر می کند این مقدار با مقادیر مشاهده شده در آزمایش های آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. البته مقادیر رینولدز بحرانی برای برخی آزمایشات کمتر از نتایج آزمایشگاهی است که دلیل این تفاوت

در جریان آب در آزمایش های برجا بر عکس آزمایش های آزمایشگاهی که گزارش شده با یک شکستگی، در هر آزمایش با تعدادی شکستگی فعال در رفتار هیدرولیکی مواجه است. از آنجایی که شروع جریان غیرخطی وابسته به نرخ جریان است و به دلیل وجود چند شکستگی در محدوده آزمایش که هر یک بازشدگی متفاوتی دارند. جریان در هر شکستگی انتظار می رود که انحراف از رفتار خطی در هر شکستگی در نرخ جریان متفاوتی صورت پذیرد و این به تغییر تدریجی از جریان خطی خواهد کرد. بنابراین جریان غیرخطی مشاهده شده در آزمایش های گمانه به طور معمول به مکانیسم چند گانه نسبت داده می شود.

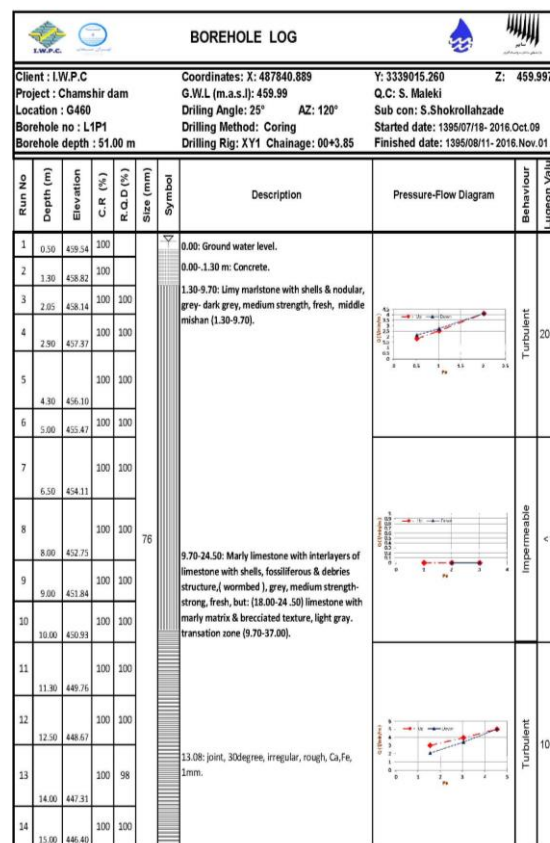
۶- نتیجه گیری

در این مطالعه نتایج آزمایشات فشار آب در چهار گمانه مطالعاتی سد و نیروگاه چم شیر با هدف شناخت بهتر رفتار سیال در شکستگی سنگ در مقیاسی بزرگ تر از مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار

منحصر به الفرد برای جریان شعاعی در آزمایش های برجا تعریف نشده است و به دلیل اینکه گرادیان هیدرولیکی در شکستگی با فاصله از دیواره گمانه کاهش می یابد بنابراین تمامی اعداد رینولدز برای جریان در دیواره گمانه (محلی که سرعت در بیشترین مقدار خود است) استفاده شده است.

موارد معدودی از تعیین عدد رینولدز بحرانی در آزمایش های برجا تاکنون گزارش شده است. در شرایط آزمون های صحرایی عدد رینولدز بحرانی به دهانه بازشدگی، عرض و زبری شکستگی ها، مواد پرکننده آن ها و اتصال شکستگی به یکدیگر بستگی دارد [23].

در هر بخش از گمانه تعداد شکستگی ها و جهت داری آن با استفاده از لاگ زمین شناسی تعیین شده است. (شکل ۶)



شکل ۶: نمونه از لاگ زمین شناسی تهیه شده برای گمانه ها

تخمین عدد رینولدز بحرانی برای جریان در هر شکستگی به تنهایی امکان پذیر نیست ولی می توان یک عدد رینولدز معادل برای تمام مقطع آزمایش محاسبه نمود.

در این مقاله از روش ارائه شده در آزمایش های آزمایشگاهی برای محاسبه عدد رینولدز بحرانی در آزمایش های برجا استفاده شده است.

۷- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
Q	$m^3.se^{-1}$	نرخ جریان سیال
P	Pa	فشار سیال
A	m^2	سطح اعمال نیرو
Re	-	عدد رینولدز
ρ		چگالی آب
μ		ویسکوزیته سیال
w	m	عرض شکستگی
A	$Pa.s.m^{-4}$	ضرایب رابطه
B	$Pa.s^2.m^{-7}$	فورچمپیر
		بازشدگی
e_h	m	هیدرولیکی

گرفته است. با استفاده از منحنی های $P-Q$ رژیم رفتاری جریان سیال مورد تحلیل قرار گرفته است نتایج آزمایشات انحراف از رفتار خطی در نرخ تزریق کم را نشان می دهد. همچنین برازش غیر خطی از نتایج آزمایشات بیانگر این نکته است که رابطه فورچمپیر به نسبت رابطه ایزباش رفتار غیر خطی جریان سیال را بهتر توصیف می کند و ضرایب خطی و غیرخطی این معادله ها مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که ضرایب تجربی معادله ایزباش می توان برای تخمین الگوی جریان آب بهره برد.

عدد رینولدز بحرانی با توجه به روابط موجود در پژوهش های آزمایشگاهی محاسبه شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد که مطابقت خوبی بین این نتایج وجود دارد. با افزایش عمق مقدار عدد رینولدز بحرانی یک روند نزولی را طی می کند. که این روند می تواند به بسته شدن شکستگی ها تحت تاثیر افزایش تنش های جانبی در عمق های بیشتر مرتبط باشد. هرچند انحراف از رفتار غیرخطی در آزمایش فشار آب با توجه به وجود چند شکستگی در گمانه به مکانیسم چند گانه نسبت داده می شود.

۸- منابع ها

- [8] M. Javadi, M. Sharifzadeh, K. Shahriar, and Y. Mitani, "Critical Reynolds number for nonlinear flow through rough-walled fractures: The role of shear processes," *Water Resour. Res.*, vol. 50, no. 2, pp. 1789–1804, 2014.
- [9] P. G. Ranjith and W. Darlington, "Nonlinear single-phase flow in real rock joints," *Water Resour. Res.*, vol. 43, no. 9, pp. 1–9, 2007.
- [10] L. Zou, L. Jing, and V. Cvetkovic, "Roughness decomposition and nonlinear fluid flow in a single rock fracture," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 75, pp. 102–118, 2015.
- [11] J. Q. Zhou, S. H. Hu, S. Fang, Y. F. Chen, and C. B. Zhou, "Nonlinear flow behavior at low Reynolds numbers through rough-walled fractures subjected to normal compressive loading," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 80, pp. 202–218, 2015.
- [12] R. W. Zimmerman and G. S. Bodvarsson, "Effective transmissivity of two-dimensional fracture networks," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 33, no. 4, pp. 433–438, 1996.
- [13] D. J. Brush and N. R. Thomson, "Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes, and local cubic law simulations," *Water Resour. Res.*, vol. 39, no. 4, p. 1085, 2003.
- [14] Z. Zeng and R. Grigg, "A criterion for non-darcy flow in porous media," *Transp. Porous Media*, vol. 63, no. 1, pp. 57–69, 2006.
- [15] and C.-B. Z. Yi-Feng Chen, Shao-Hua Hu, Ran Hu, "Estimating hydraulic conductivity of fractured rocks from high-pressure packer tests with an Izbash's
- [1] A. G. Benardos and D. C. Kaliampakos, "Hydrocarbon storage in unlined rock caverns in Greek limestone," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 175–182, Mar. 2005.
- [2] D. M. Reeves, K. F. Pohlmann, G. M. Pohl, M. Ye, and J. B. Chapman, "Incorporation of conceptual and parametric uncertainty into radionuclide flux estimates from a fractured granite rock mass," *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 24, no. 6, pp. 899–915, Mar. 2010.
- [3] M.J Nasri, A. Rammezanadeh, "evaluate the Behavior of fluid flow in rock mass According to the result of water pressure Tests in the Bakhtiari Dam project," *J. Geotechnical and geological Engineering.*, vol. 38, no. 10, pp. 425–434, 2020.
- [4] M. Karamouz, *Groundwater hydrology*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [5] P. Witherspoon, J. Wang, K. Iwai, and J. Gale, "Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture," *Water Resources Research*, 1980.. [Accessed: 20-Jul-2014].
- [6] M.J.Nasri, A. Ramezanadeh, and H Jenabi., "Laboratory investigation nonlinear flow charastics through natrual rock fracture," *Quarterly journal of Engineering Geology and Hydrology*, vol.52, , 2019.
- [7] Z. Zhang and J. Nemcik, "Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures," *J. Hydrol.*, vol. 477, pp. 139–151, 2013.

- [20] J. Qian, H. Zhan, W. Zhao, and F. Sun, "Experimental study of turbulent unconfined groundwater flow in a single fracture," *J. Hydrol.*, vol. 311, no. 1–4, pp. 134–142, 2005.
- [21] K. Nazridoust, G. Ahmadi, and D. H. Smith, "A new friction factor correlation for laminar, single-phase flows through rock fractures," *J. Hydrol.*, vol. 329, no. 1–2, pp. 315–328, 2006.
- [22] R. W. Zimmerman and G. S. Bodvarsson, "Hydraulic conductivity of rock fractures," *Transp. Porous Media*, vol. 23, no. 1993, pp. 1–30, 1996.
- [23] J. Qian, Z. Chen, H. Zhan, and H. Guan, "Experimental study of the effect of roughness and Reynolds number on fluid flow in rough-walled single fractures: A check of local cubic law," *Hydrol. Process.*, vol. 25, no. 4, pp. 614–622, 2011.
- law-based empirical model," *Water Resour. Res.*, pp. 2096–2118, 2015.
- [16] "Review study of the first Phase of the plan Chamshir dam," 1390.
- [17] Engineering geology and rock mechanics report on completion of site investigations phase I & II: Revision 1 chamshir dam," Tehran, 2017.
- [18] P. M. Quinn, J. A. Cherry, and B. L. Parker, "Quantification of non-Darcian flow observed during packer testing in fractured sedimentary rock," *Water Resour. Res.*, vol. 47, no. 9, 2011.
- [19] M.J.Nasri, A. Ramezanzadeh, and H Jenabi., "Numerical modeling of roghness effect on flouid flow behavior in natrul rock fracture," *J. Petroleum Geomechanic*, vol. 3, no. 2, pp. 1–11 Jul. 2019.