

# بررسی عددی کارایی پرده تزریق در سد مخزنی سیاهو بیرجند

علی اخترپور<sup>1</sup>

دکترای مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، کارشناس سدسازی شرکت مهندسی مشاورمه‌ار آب، مشهد<sup>1</sup>

پست الکترونیکی: a\_akhtarpor@yahoo.com

## چکیده

هدف از احداث پرده تزریق در پی سنگی سدها عمدتاً جلوگیری از نشت بیش از حد آب و نیز تامین پایداری پی در برابر فرسایش و نیروی زه آب می باشد. بر این اساس روش متداول، حفاری گمانه ها با فواصل و عمق معین و تزریق دوغاب سیمان تا حصول به نفوذپذیری معین (عموماً 5 لوژن) بوده است. روشهای عددی خصوصاً در سنگهای به شدت خورد شده که از لحاظ هیدرولیکی رفتاری مشابه خاکها دارند، می تواند در بررسی کارایی پرده تزریق سدها مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق کارایی سیستم آب بندی سد سیاهو با استفاده از روش تحلیل تراوش در حالت سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر وجود یک ناحیه نفوذپذیر در پرده تزریق از لحاظ میزان تراوشات و گرادیان ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین حساسیت نتایج تحلیل به نفوذپذیری توده های سنگی پی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج تحلیل حاکی از آن است که پرده تزریق این سد حتی در حالت عدم حصول به آب بندی کامل در بخش هایی از پرده، بطور مناسب از نشت بی رویه جلوگیری خواهد نمود و با توجه به تمهیدات پیش بینی شده امکان ایجاد فرسایش و ناپایداری کلی در پی وجود نخواهد داشت. کلمات کلیدی: سدخاکی باهسته رسی مرکزی پرده تزریق، تراوش، تحلیل عددی، تشکیلات ولکانیکی

## 1- مقدمه و کلیات

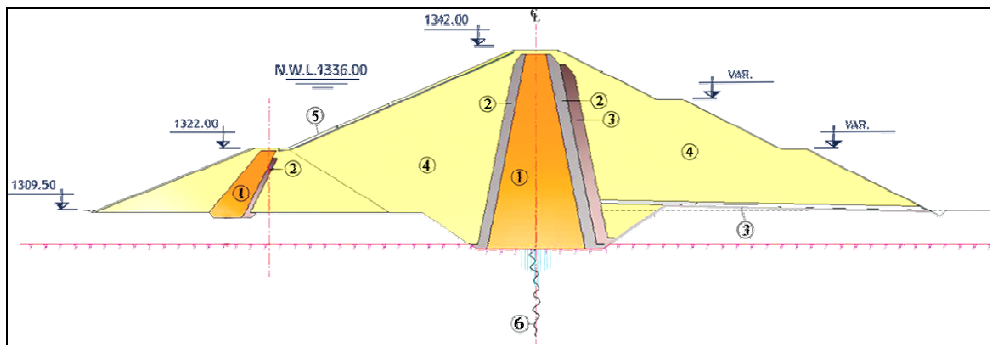
روش متداول در کشور ما برای تامین آب بندی پی سنگی سدها استفاده از پرده تزریق می باشد که با توجه به شرایط زمین شناسی ساختگاه سد، طرح پرده و مشخصات دوغاب متفاوت خواهد بود. در برخی ساختگاهها روشهای متداول تزریق با محدودیت همراه بوده و تامین کننده آب بندی کامل نمی باشد. در این تحقیق کارایی پرده تزریق سد سیاهو از لحاظ کنترل میزان تراوش و گرادیان ها که بر روی تشکیلات ولکانیکی به شدت تکنونیزه و خرد شده قرار گرفته مورد بررسی قرار گرفته است. در این سد علیرغم استفاده از سیمان ریزدانه (بلین بیش از 5000)، در بخش هایی از پرده تزریق امکان حصول به آب بندی کامل (لوژن 5) فراهم نگردید. در این حالت نگرانی بابت کارایی پرده در کنترل میزان تراوش و جلوگیری از فرسایش وجود خواهد داشت که در این تحقیق با استفاده از روش عددی با استفاده از نرم افزار پیشرفته سه بعدی Seep3D به آن پرداخته شده است.

## 2- سد خاکی سیاهو بیرجند

سد سیاهو با هدف مهار بخشی از آبهای مرزی شرق کشور در جهت مصارف کشاورزی احداث خواهد شد. رودخانه سیاهو یکی از رودخانه های مرزی ایران بوده که در دشت درج در استان خراسان جنوبی از شمال به جنوب و شرق جریان داشته و در نهایت وارد کشور افغانستان می گردد.

حوزه رودخانه سیاهو به حدود 3000 کیلومتر مربع بالغ می گردد. سد مخزنی سیاهو دارای ارتفاع 32/5 متر از بستر رودخانه و حدود 39/5 متر از بستر سنگی، طول تاج 352 متر و حجم مخزن 17 میلیون مترمکعب می باشد. بدنه سد از

نوع خاکی به هسته مرکزی رسی می باشد. مقطع تیپ سد در شکل (1) مشاهده می گردد. آبرفت بستر رودخانه درشت دانه متراکم با عمق حداکثر حدود 7 متر می باشد که در ناحیه هسته سد برداشت می گردد.



شکل (1): مقطع تیپ سد سیاهو بیرجند

ساختگاه سد سیاهو در مختصات در جنوب شرق استان خراسان جنوبی انتخاب شده است و از نظر تقسیمات کشوری در مرکز دهستان درح از شهرستان سریشه واقع شده است.

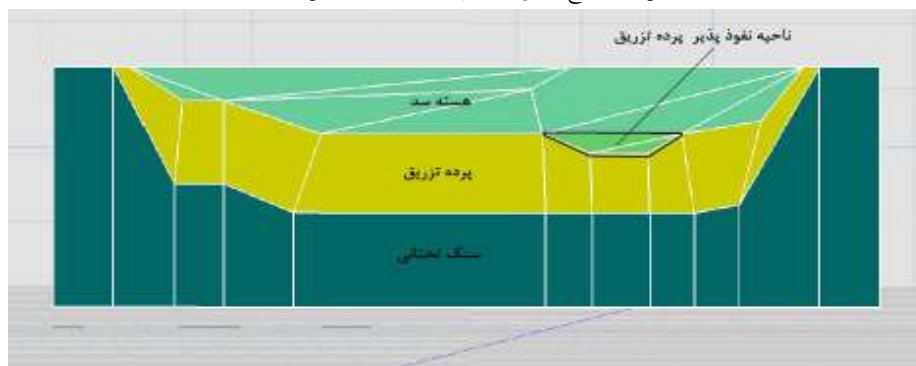
### 3- مدل سازی و تحلیل عددی

به منظور مدل سازی تراوش در پی و بدنه سد سیاهو بیرجند از برنامه کامپیوتری سه بعدی اجزا محدود Seep3D استفاده شده است. این تحلیل در حالت تراوش پایدار Steady Seepage صورت پذیرفته و اجزاء مختلف سیستم آب بندی سد شامل هسته، پرده تزریق و سنگ فوقانی و تحتانی ساختگاهی در تحلیل در نظر گرفته شده است. با توجه به نفوذپذیری بسیار زیاد پی آبرفتی و برداشت آن در ناحیه زیر هسته از مدل سازی آن صرف نظر شده است. همچنین پوسته های سد با توجه به درشت دانه بودن تاثیری در میزان تراوش نداشته و از مدل حذف گردیده اند. لازم به ذکر است که در ساختگاههای سنگی به شدت خورد شده که از لحاظ هیدرولیکی رفتاری مشابه خاکها دارند، استفاده از روش های عددی با فرض محیط پیوسته می تواند با دقت مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

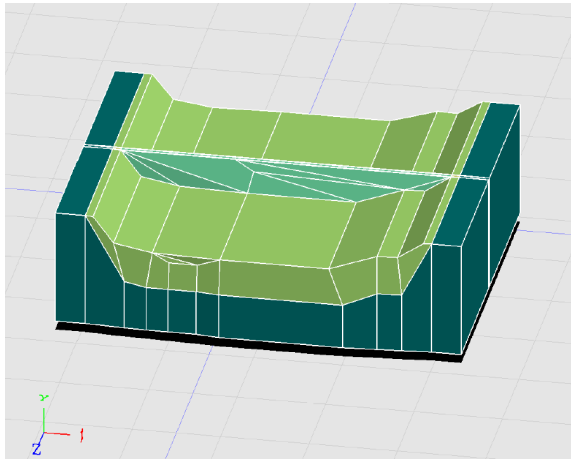
### 3-1- هندسه مدل عددی

در شکل (2) مقطع پرده آب بند و محور سد و در شکل (3) هندسه مدل سه بعدی قابل مشاهده می باشد. در شکل (4) نیز نحوه المان بندی مشاهده می گردد.

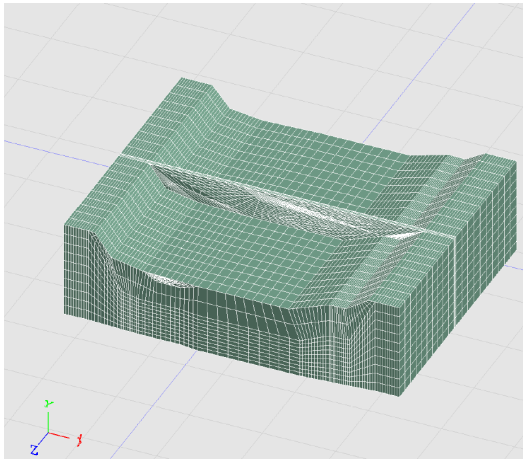
شکل (2): مقطع طولی سد و پرده تزریق در تحلیل عددی



شکل(3): هندسه مدل سه بعدی در تحلیل تراوش



شکل(4): نحوه المان بندی مدل عددی در تحلیل تراوش



### 3-2- پارامترهای هیدرولیکی اجزا سیستم آب بندی

#### - هسته سد

بر اساس 6 مورد آزمایش صورت گرفته در مرحله مطالعات طرح (مهیار آب، 1384) در تحلیل عددی و در جهت اطمینان نفوذپذیری معادل  $10^{-6}$  سانتیمتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

#### - زمین شناسی و نفوذپذیری سنگ بستر

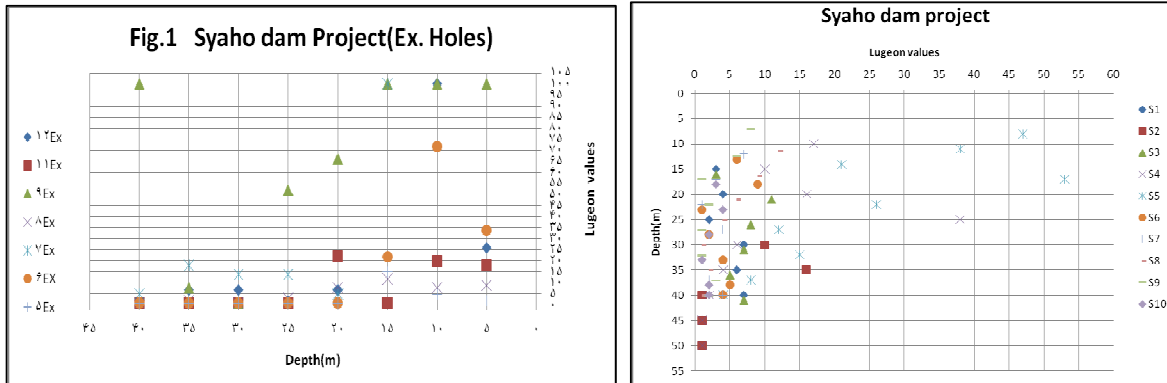
بر اساس مطالعات زمین شناسی طرح سنگ بستر جناح چپ، آذر آواری ها و توده سنگهای ولکانیکی آندزیت و در بخش میانی سد آندزیت بازالت، تراکی آندزیت و آگلومرا می باشد. در جناح راست گدازه های بازالتی متخلخل، آگلومرا و روی آن کنگلومرا مشاهده گردیده است. با توجه به اینکه سد سیاهو در یک ساختگاه با تشکیلات ولکانیکی به شدت تکتونیزه قرار گرفته است، از ابتدای مطالعات بحث آب بندی آن مورد توجه خاص مشاور طرح قرار داشته است. بر این اساس قبل از اجرای پرده تزریق و پس از آن گمانه های اکتشافی و کنترلی حفاری گردیده و آزمایشات آبخوری در آنها صورت پذیرفته است که بر پایه آن نتایج آن طراحی و اجرای تزریقات پرده آب بند مورد ارزیابی قرار گرفته و در صورت نیاز تزریقات تکمیلی انجام شده است. در شکل(5) نتایج آزمایشات آب خوری در گمانه های حفاری شده در مرحله مطالعات آورده شده است. تحلیل آماری مقادیر لوژون بدست آمده از گمانه های اکتشافی مرحله اول گویای آن است که 60٪ نفوذپذیری ها کمتر از 5 واحد لوژون می باشد. با توجه به شکل، توده سنگ حدود 35 متر از سطح توده سنگبستر و 40 متر از سطح زمین نفوذپذیر می باشد. بر این اساس عمق پیشنهادی 40 متر برای پرده آب بند در نظر گرفته شده است.

سری گمانه های EX قبل از اجرای پرده تزریق حفاری شده و آزمایشات فشار آب در گمانه های اکتشافی EX5 تا EX12 صورت پذیرفته است نتایج این آزمایشات در تدقیق عمق پرده آب بند مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (6) زیر نتایج آزمایشات لوژن در گمانه های سری EX مشاهده می گردد.

آنچنانکه مشاهده می شود در تعدادی از گمانه ها در بخش فوقانی سنگ مقادیر در حد 100 لوژن نیز مشاهده می گردد که حاکی از قابلیت آگذری قابل توجه سنگ فوقانی می باشد و اختلاف قابل توجهی با نتایج مطالعات اولیه نشان می دهد.

با توجه به این نتایج سنگ بستر در تحلیل عددی به دو بخش تقسیم شده است.

شکل (5): تغییرات عدد لوژن در گمانه های مرحله مطالعاتی (مهار آب، 1384) شکل(6): نتایج آزمایشات آبخوری در گمانه های سری EX



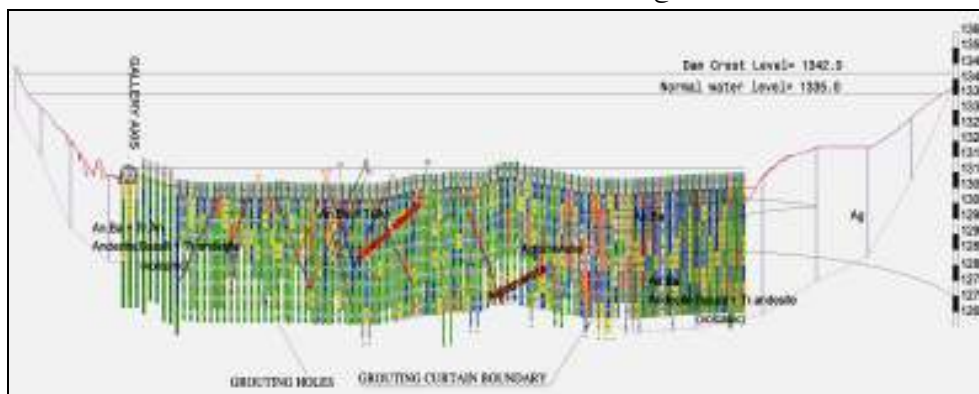
ناحیه فوقانی که تا عمق حدود 40 متر گسترش یافته و

پرده تزریق سد در این ناحیه قرار دارد و ناحیه تحتانی که در زیر پرده تزریق قرار گرفته و دارای نفوذپذیری کمتری نسبت به ناحیه فوقانی می باشد. مقادیر لوژن در نظر گرفته شده برای ناحیه فوقانی بین 15 تا حداکثر 100 لوژن و ناحیه تحتانی 3 تا 15 لوژن مفروض گردیده اند.

### - نفوذپذیری پرده تزریق

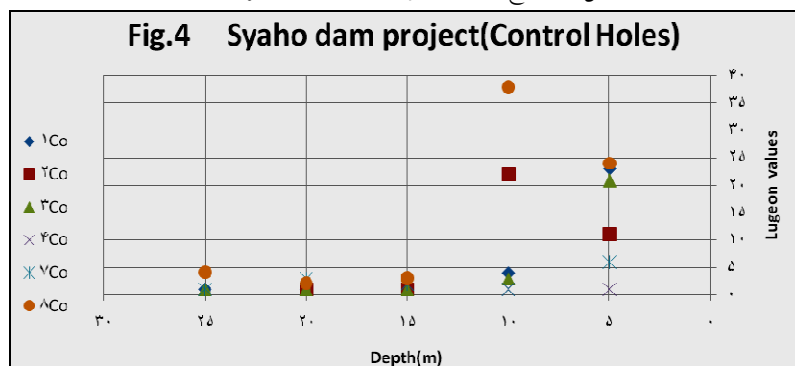
در شکل (7) مقطع طولی پرده آب بند و گمانه های تزریق شده تا دیماه 88 آورده شده است.

شکل(7): مقطع طولی پرده آب بند و گمانه های تزریق شده تا دیماه 88



پس از اجرای اولیه تزریقات پرده آب بند تعدادی گمانه کنترلی سری Co حفاری گردیده و آزمایش لوژن در آن صورت پذیرفت شکل (8) نتایج این آزمایشات در گمانه های مذکور آورده شده است. آنچه مشاهده می گردد علیرغم اجرای یک ردیف گمانه های تزریقی کمکی در بالادست پرده آب بند در 10 متر بالایی توده سنگ در ناحیه ای واقع در بستر و در مجاورت جناح چپ همچنان نفوذپذیری قابل توجه می باشد. لذا به منظور بررسی وجود این ناحیه نفوذپذیر در مقادیر تراوش از پی سد، در تحلیل عددی ناحیه مذکور در نظر گرفته شده است.

شکل(8): نتایج آزمایشات لوژن در گمانه های سری Co

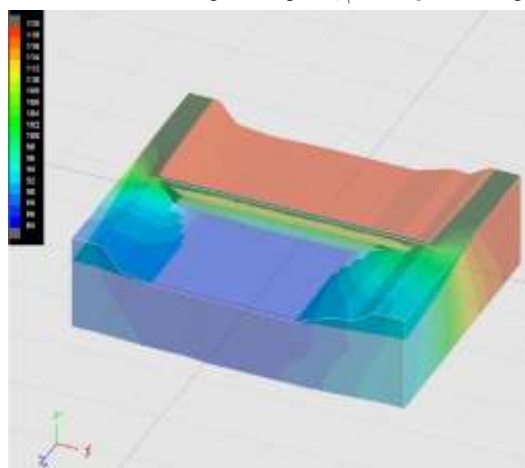


#### 4- نتایج تحلیل

##### 4-1- میزان تراوش

در شکل (9) منحنی های هم پتانسیل در مدل سه بعدی قابل مشاهده می باشد تراز آب مخزن معادل تراز نرمال آب در نظر گرفته شده و در پایین دست ناحیه خروج جریان به صورت خودکار توسط برنامه با در نظر گرفتن نفوذپذیری هسته و تکیه گاه ها در ناحیه غیر اشباع، تعیین می گردد. آنچه انکه ذکر گردید تحلیل های حساسیت به منظور بررسی نقش پارامترهای نفوذپذیری نواحی مختلف مدل شامل سنگهای فوقانی، سنگ تحتانی و ناحیه نفوذپذیر پرده آب بند بر روی میزان تراوشات از سد صورت پذیرفته است.

شکل (9): منحنی های هم پتانسیل در تحلیل تراوش به روش اجزای محدود



در سری اول تحلیلها عدد لوژن نواحی مختلف به صورت جدول ذیل در نظر گرفته شده است.

جدول: مقادیر مفروض نفوذپذیری در سری اول تحلیل ها

سنگ تحتانی	سنگ فوقانی	پرده آب بند	ناحیه نفوذپذیر جناح چپ در پرده آب بند
9	15	6	10-25

با توجه به اینکه بخشی از دبی تراوش یافته از پی در تکیه گاهها سنگی پایین دست ظاهر شده و با ایجاد یک سیستم جمع آوری در داخل پوسته سد قابل اندازه گیری می باشد، این مقدار دبی به تفکیک ارائه شده است. بر این اساس در نمودار شکل (10) میزان تراوش کل و همچنین میزان تراوش قابل رویت در تکیه گاه های سنگی پایین دست به تفکیک

آورده شده است. به منظور مطالعه تاثیر عدد لوژن در ناحیه نفوذپذیر پرده آب بند بر میزان تراوش مقادیر مختلفی برای نفوذپذیری این ناحیه در نظر گرفته شده است.

شکل (10): میزان نشت از بدنه و پی به عنوان تابعی از عدد لوژن ناحیه نفوذپذیر پرده تریق

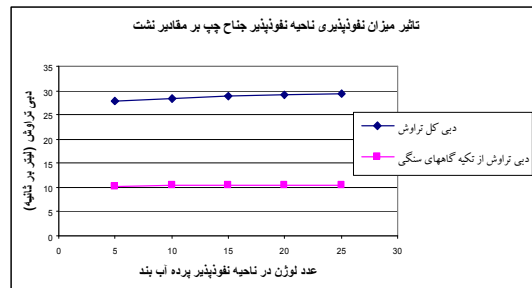


کاهش نفوذپذیری ناحیه جناح چپ از 25 تا 10 لوژن تاثیر بسیار اندکی در کل میزان تراوش خواهد داشت. به منظور بررسی تاثیر عدد لوژن متوسط ناحیه فوقانی سنگ بر میزان تراوشات سری دوم تحلیلها با در نظر گرفتن متوسط عدد لوژن ناحیه فوقانی سنگ معادل 50 لوژن صورت پذیرفت و نتایج به صورت نمودارهای 11 و 12 ارائه شده است. در نمودار 2 متوسط عدد لوژن در سنگ تحتانی معادل 9 لوژن و در نمودار 3 متوسط لوژن ناحیه تحتانی سنگ معادل 3 لوژن در نظر گرفته شده است.

شکل (12): میزان نشت از بدنه و پی به عنوان تابعی از عدد لوژن ناحیه نفوذپذیر پرده تریق (لوژن سنگ تحتانی 3)



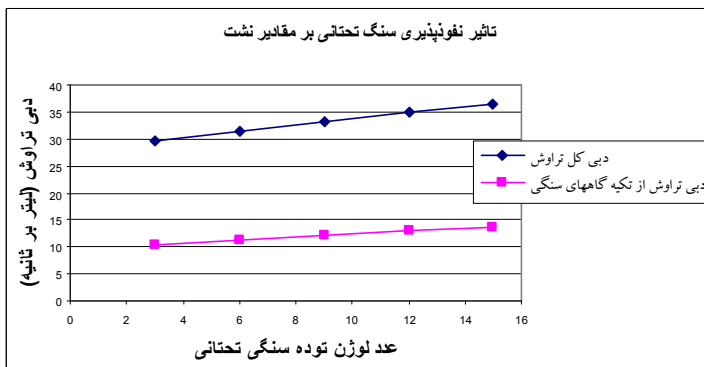
شکل (11): میزان نشت از بدنه و پی به عنوان تابعی از عدد لوژن ناحیه نفوذپذیر پرده تریق (لوژن سنگ تحتانی 9)



آنچنانکه ملاحظه می گردد میزان نفوذپذیری سنگ تحتانی تاثیر قابل توجهی بر مقادیر نفوذپذیری داشته به طوریکه میزان تراوش بسته به نفوذپذیری سنگ تحتانی بین  $33/2$  تا  $27/8$  لیتر بر ثانیه متغیر می باشد. در این حالت میزان نشت خروجی از تکیه گاه های سنگی پایین دست بین  $10/3$  تا  $12/2$  لیتر بر ثانیه متغیر می باشد. در تحلیل دیگری به منظور بررسی تاثیر عدد لوژن ناحیه تحتانی سنگ بستر بر میزان تراوشات از پی سد ، یک سری تحلیل با شرایط مشابه قبلی ( لوژن سنگ فوقانی معادل 50 و لوژن ناحیه نفوذپذیر پرده 25) با مقادیر مختلف نفوذپذیری متوسط سنگ تحتانی صورت گرفته و نتایج به صورت نمودار(13) حاصل شده است.

آنچنانکه ملاحظه می گردد نفوذپذیری ناحیه تحتانی تاثیر قابل ملاحظه ای بر مقادیر نشت داشته بطوریکه با افزایش عدد لوژن متوسط این ناحیه از 3 به 15 لوژن کل دبی تراوش از  $29/5$  به  $36/5$  افزایش می یابد. اگرچه نتایج آزمایشات لوژن در این ناحیه حاکی از آن است که عدد لوژن در این ناحیه کمتر از 5 می باشد.

شکل (13): میزان نشست از بدنه و پی به عنوان تابعی از عددلوژن ناحیه تحتانی سنگ بستر

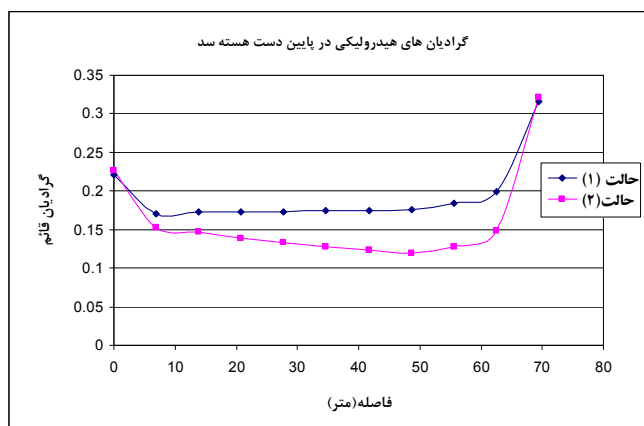


#### 4-2- بررسی گرادیان ها

بمنظور بررسی تاثیر وجود ناحیه نفوذپذیر در پرده تزریق بر میزان گرادیان ها در سنگ پی، میزان گرادیان قائم خروجی از سنگ در پایین دست هسته در دو حالت مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول نفوذپذیری سنگ فوقانی معادل 50 لوژن، سنگ تحتانی 9 لوژن و پرده تزریق بصورت یکنواخت معادل 6 لوژن فرض گردید. تحلیل ها در حالت دوم مشابه حالت قبلی ولی با در نظر گرفتن عدد لوژن ناحیه نفوذپذیر پرده معادل 25 تکرار گردید.

در شکل (14) گرادیان قائم خروجی از سنگ در پایین دست هسته و در مجاورت ناحیه نفوذپذیر پرده تزریق در دو حالت مشاهده می گردد. آنچنانکه در ابتدای گزارش ذکر گردید عرض ناحیه نفوذپذیر بطور محافظه کارانه معادل 70 متر فرض شده و محور افقی در نمودار زیر نشان دهنده این عرض می باشد.

شکل (14): گرادیان های هیدرولیکی در پی سنگی (ناحیه پایین دست هسته سد)



مقادیر نمودار در دو انتها به یکدیگر مشابهت داشته که مورد انتظار است زیرا در مجاورت ناحیه خارجی این منطقه، شرایط دو حالت در تحلیل، مشابه می باشد. اثر وجود سنگ تکیه گاهی و احتمالاً تیز گوشگی المانها در تحلیل سبب تمرکز گرادیان ها در انتهای این ناحیه گردیده است. در محدوده میانی پایین دست ناحیه نفوذپذیر پرده، گرادیان ها تقریباً یکنواخت بوده و نکته قابل توجه آن است که در حالت دوم مقادیر گرادیان ها کاهش یافته است. افزایش نفوذپذیری در

یک ناحیه محدود، طبق قانون داری اگرچه موجب افزایش سرعت ها می گردد ولی لزوماً افزایش گرادیان ها را در پی نخواهد داشت بلکه سبب کاهش گرادیان می گردد.

در صورتیکه بصورت محافظه کارانه سنگ بستر مشابه خاک درشت دانه متراکم فرض گردد، گرادیان هیدرولیکی بحرانی آن را می توان در حدود  $1/3$  ارزیابی نمود و لذا ضریب اطمینان در مقابل فرسایش، در بدترین ناحیه (مجاور دو انتها)، برای هر دو حالت بیش از 4 می باشد و بنابراین با این معیار حاشیه اطمینان کافی در برابر فرسایش وجود دارد.

## 5- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحلیل ها را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- 1- بر اساس نتایج آزمایشات آبخوری در گمانه های مرحله مطالعاتی فرض نفوذپذیری متوسط توده سنگی فوقانی معادل 15 لوژن منطقی بوده و میزان تراوشات از بدنه و پی در این حالت حداکثر  $16/4$  لیتر بر ثانیه می باشد از این میزان تراوش در حدود  $6/7$  لیتر بر ثانیه آن در تکیه گاه های سنگی پایین دست ظاهر خواهد شد.
- 2- بر اساس نتایج گمانه های حفاری شده قبل از شروع عملیات تزریق (سری EX)، فرض نفوذپذیری متوسط توده سنگی فوقانی معادل 50 لوژن منطقی بوده و میزان تراوشات از بدنه و پی حداکثر  $32/2$  لیتر بر ثانیه می باشد. از این میزان تراوش  $12/2$  لیتر بر ثانیه آن در تکیه گاه های سنگی پایین دست بروز خواهد داشت.
- 3- حساسیت میزان تراوش به ناحیه نفوذپذیر پرده تزریق واقع در جناح چپ بستر رودخانه ناچیز بوده به طوریکه افزایش نفوذپذیری این ناحیه از 5 لوژن به 25 لوژن باعث افزایش دبی تراوش به میزان فقط 6 درصد خواهد گردید. لذا تزریقات بیشتر در این ناحیه که توام با افزایش هزینه های طرح خواهد بود، ضروری به نظر نمی رسد.
- 4- اجرای یک سیستم زهکشی در مجاورت تکیه گاههای پایین دست سد بطوریکه بتوان میزان تراوش از تکیه گاهها را مجزا از تراوشات بستر اندازه گیری نمود، توصیه می گردد.
- 5- مقادیر گرادیان های قائم در پایین دست هسته و در سنگ بستر با افزایش نفوذپذیری ناحیه جناح چپ پرده تزریق کاهش نشان می دهد و لذا نگرانی بابت فرسایش وجود ندارد.
- 6- گرادیان های خروجی از سنگ با ضریب اطمینان بیش از 4 در حاشیه اطمینان قرار داشته و بعلاوه در جزئیات طراحی بدنه این سد، برای جلوگیری از وقوع پدیده ریزشویی (فرسایش داخلی)، فیلتر ریزدانه پایین دست بر روی سنگ بستر امتداد یافته و می تواند به عنوان عامل اطمینان مضاعف در برابر فرسایش در این ناحیه فرض شود.

## تشکر و قدردانی

با تشکر ویژه از آقای مهندس بهرامی سامانی و دفتر فنی شرکت مدیریت منابع آب و نیروی ایران خصوصاً آقایان مهندس شکرالهی و دکتر جواهری

## 6- فهرست مراجع

1. مهندسین مشاور مهار آب، "گزارش منابع قرضه و مصالح ساختمانی"، سد سیاهو بیرجند، مطالعات مرحله توجیهی، مهر 84
2. مهندسین مشاور مهار آب، "زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک"، سد سیاهو بیرجند، مطالعات مرحله توجیهی، مهر 84
3. مهندسین مشاور مهار آب، "گزارش فنی - طرح بدنه سد"، سد سیاهو بیرجند، مطالعات مرحله تفصیلی، اسفند 84
4. Geo-Slope International, Ltd. Geostudio (2007) user manual, Calgary, Alberta, Canada, 1991-2008