روش های آبندی پی سد خاکی و انتخاب روش بهینه (مطالعه موردی : سد بینالود)

بهروز غلام احمدی[۱]،کاظم اسماعیلی[۲] ، مجتبی طاوسی[۳]

۱. کارشناس ارشد سازه های آبی دانشگاه آزاد اسلامی

۲. استادیار دانشگاه فردوسی مشهد

۳. مربی دانشگاه آزاد اسلامی

behrouz_a@yahoo.com
esmaili@ferdowsi.um.ac.ir
m_tavoosi54@yahoo.com

خلاصه

در این پژوهش مدلسازی مقطع بحرانی سد خاکی بینالود در نرم افزار اجزامحدود پلکسیس صورت می پذیرد تا اولا پایداری شیب های بدنه موجود به کمک آنالیزهای مرتبط در شرایط عملکردی مختلف کنترل شود. ثانیا به کمک آنالیزهای تراوش راهکارهای منطقی آب بندی پی آبرفتی سد مزبور مورد بررسی و ارزیابی فنی قرار گیرند. نتایج آنالیزها منطقی و خوب بنظر میرسد و طرح بدنه بلحاظ پایداری شیروانی ها مورد قبول است.

در جهان امروز اقتصاد طرح ها حائز اهمیت زیادی در توجیه پذیری آنها است. به همین علت نهایتا با ارزیابی اقتصادی بهینه ترین راهکار آب بندی پی آبرفتی سد از میان گزینه های حائز صلاحیت فنی انتخاب میگردد. از میان راهکارهای مورد بررسی راهکارهای متناظر با بکارگیری المان در داخل پی آبرفتی بلحاظ تاثیرگذاری در کاهش تراوش، موثرتر واقع گردیده اند. نهایتا از میان راهکارهای مورد بررسی گزینه "آب‌بندی به کمک دیوار آب‌بند بتنی" بلحاظ فنی و اقتصادی حائز اولویت شناخته شده است.

کلمات کلیدی : نرم افزار اجزاء محدود ،پلکسیس ، سد خاکی بینالود، تراوش ، آبندی پی

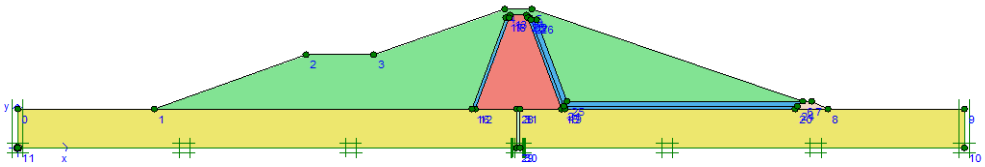
۱. مقدمه

سدها از نظر اقتصادی، اجتماعی و سیاسی دارای اهمیت بسیار زیادی می باشند. نقش سدها در توسعه کشاورزی، عمران مناطق روستایی و شهری، تامین آب آشامیدنی، تولید انرژی هیدروالکتریک، کنترل و تنظیم شدت جریان آب در رودخانه ها و... قابل توجه است. از طرفی این طرح های استراتژیک، نیازمند سرمایه گذاریهای کلان می باشند. در جهانی که روز به روز بر وخامت اقتصادی ملت ها افزوده می شود و روز به روز نیاز به تامین آب آشامیدنی سالم افزایش می یابد، اقتصاد طرح ها حائز اهمیت زیادی است. به علت بالا بودن هزینه ساختمان سدها، مسائل اقتصادی و طرح راهکارهای اجرایی منطقی و بهینه نیز در کنار اخذ راهکارهای نگهداری سدها از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد.

در این پژوهش در ابتدا به بررسی تئوری تراوش در سدهای خاکی پرداخته می شود. سپس به روشهای ممکن در آب بندی پی آبرفتی سد خاکی بینالود پرداخته و نهایتا با مقایسه فنی و اقتصادی ، بهترین روش آب بندی معرفی خواهد شد. برای مدل سازی و آنالیز تراوش سد بینالود از نرم افزار Plaxis نسخه 8.2 استفاده شده است.

۲. خصوصیات سد بینالود

سد بینالود در فاصله تقریبی ۷۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان مشهد ودر بالا دست روستای سلطان آباد بروی رود خانه خشکه رود قره چه واقع شده است .این سد از نوع خاکی با هسته رسی قائم است عرض تاج ۱۵ و طول تاج ۴۵۵ و تراز تاج سد ۱۴۳۰ می باشد .هدف از احداث سد تأمین آب شرب و صنعت شهر بینالود می باشد.



شکل ۱- هندسه مورد تحلیل سد بینالود در نرم افزار Plaxis8.2

۳. روش‌های مورد مطالعه در کنترل تراوش از پی سد بینالود

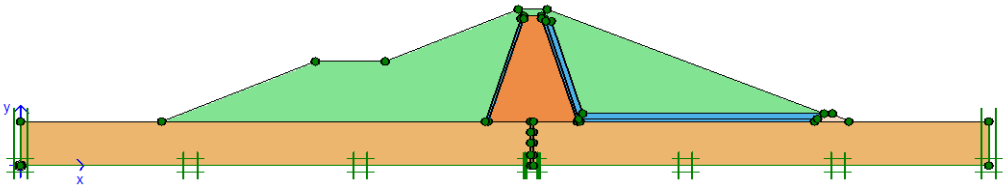
به طور کلی از آنجا که عمده تراوش از بدنه و پی سد خاکی بینالود متمرکز بر پی آبرفتی آن است، روش‌های مورد مطالعه به دو دسته روش کلی بدین منظور قابل معرفی هستند:

الف – کاهش تراوش از پی با بکارگیری المان‌هایی مدفون در پی: در این راهکار، با روش‌های اجرایی مناسب اقدام به کارگذاری المان‌های کم نفوذپذیر در پی آبرفتی می‌شود. این المان‌ها ممکن است خاکی (همچون خاک رس متراکم شده)، دیوار آب‌بند بتنی، سپر فولادی و یا تلفیقی از المان‌های مزبور باشد. از آنجا که بستر رودخانه از مصالح آبرفتی درشت دانه شنی تشکیل شده است، اجرای دیوار آب‌بند سپر فولادی با صعوبت اجرایی مواجه بوده و عملی نیست.

ب – کاهش تراوش از پی با اجرای المان‌های کم نفوذپذیر یا نفوذناپذیر در بستر مخزن: با وجود نفوذپذیری نسبتاً زیاد مصالح پی آبرفتی، در صورتیکه این المان به طول کافی در بستر مخزن اجرا شود، با طولانی کردن مسیر جریان از پی آبرفتی، دبی تراوش را کاهش می‌دهد. این امر با بکارگیری المان‌هایی همچون پتوی رسی مخزن یا پوشش ژئوممبرانی در بستر مخزن مسیر است.

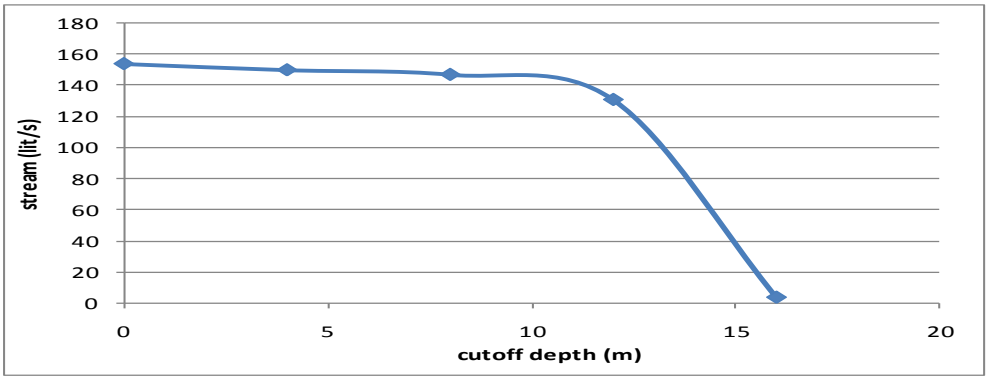
– آب‌بندی به کمک دیوار آب‌بند بتنی

در این روش فرض گردیده است که یک دیوار آب‌بند بتنی به عرض یک متر در زیر هسته رسی سد بینالود اجرا شود.



شکل ۲- شبکه اجزاء محدود و مدل ساخته شده برای آب‌بندی پی با دیوار آب‌بند بتنی

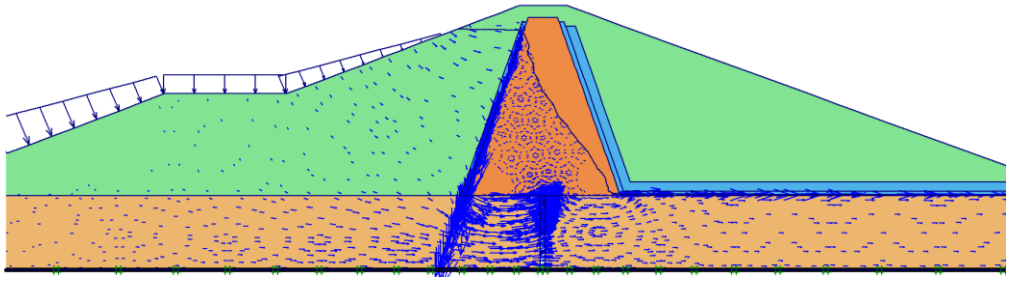
اعماق مورد بررسی عبارتند از صفر، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ متر صورت پذیرفته است.



شکل ۳- تغییرات تراوش از بدنه و پی سد بینالود به ازای اعماق مختلف دیوار آب‌بند بتنی

لازم به ذکر اینکه در برآورد تراوش‌ها، مقطع سد با ارتفاع ۴۰ متر به صورت دو بعدی بر روی آبرفت به ضخامت ۱۶ متر مدلسازی گردیده است.

میزان تراوش به ازای اجرای دیوار با اعماق صفر، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ متری به ترتیب برابر حدود ۱۵۴، ۱۵۰، ۱۴۷، ۱۳۱ و ۴ لیتر بر ثانیه برآورد گردیده است. بنابراین میزان تراوش در حالات اجرای دیوار با اعماق ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ متری نسبت به حالت عدم اجرای دیوار، به ترتیب به میزان ۲/۵، ۴/۵، ۱۵ و ۹۷/۵ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ٤- خط تراوش جریان (فریاتیک)

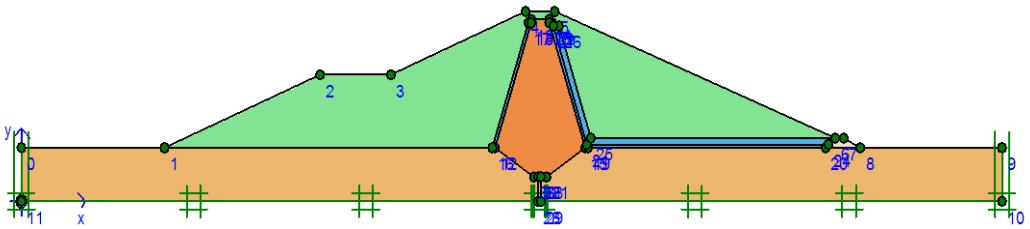
بر این اساس و به کمک فهارس بهای ابنیه و راه و باند سال ۱۳۸۸ سازمان برنامه و بودجه ، به منظور برآورد هزینه‌های اصلاح پی در این روش، هزینه‌های حفر یک ترانشه به عرض یک متر و عمق ۱۶ متر در زیر تراز آب، حمل مصالح حاصل از حفاری تا ۵۰۰ متر، بتن ریزی با میزان تسلیح ۵۰ کیلوگرم آرماتور در هر متر مکعب بتن و هزینه‌های تهیه و حمل بتن برآورد گردیده‌اند. از آنجا که هدف مقایسه چند گزینه در موقعیت مکانی یکسان است، از اعمال ضرایبی همچون ضرایب فهارس بها، منطقه ای، بالاسری و ... صرفنظر شده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از هزینه‌های اجرایی راهکار

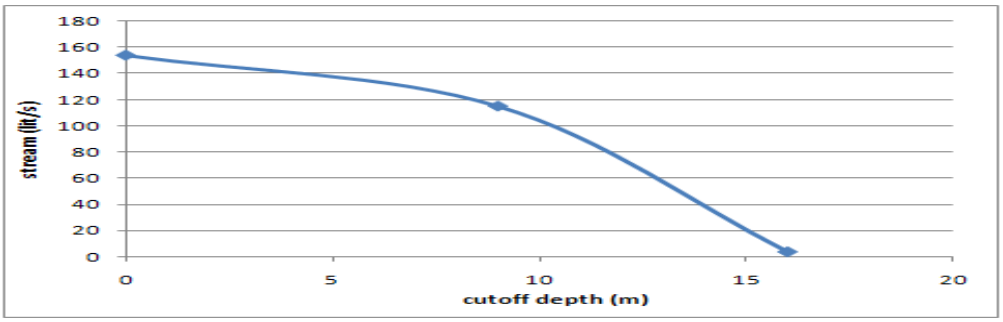
عملیات اجرایی	هزینه بدون ضرایب(میلیون ریال)
اجرا و مصالح دیوار آب بند بتنی	۵،۱۳۲،۲٤۰،۰۰۰
عملیات خاکبرداری و حمل خاک مازاد	۸۲،۱۷۰،۰۰۰
عملیات خاکریزی و تراکم خاک	۰
تهیه و حمل خاک رسی مناسب به کارگاه سد	۰
مجموع	۵،۲۱٤،٤۱۰،۰۰۰

– آب‌بندی با تلفیق دیوار آب‌بند رسی و بتنی

حالت آب بندی تلفیقی دیوار آب‌بند رسی با دیوار آب‌بند بتنی: عمق آب بندی به کمک یک المان رسی تنها، بقیه ضخامت پی آبرفتی (به مقدار ۷ متر) به کمک المان دیگری همچون دیوار آب‌بند بتنی آب‌بندی میشود.



شکل ۵- مدل اجزاء محدود آب‌بندی پی با تلفیق دیوار آب‌بند رسی و بتنی



شکل ٦- تغییرات تراوش از بدنه و پی سد بینالود در دو حالت آب‌بندی با دیوار آب‌بند رسی، و روش تلفیقی دیوار آب‌بند بتنی و رسی

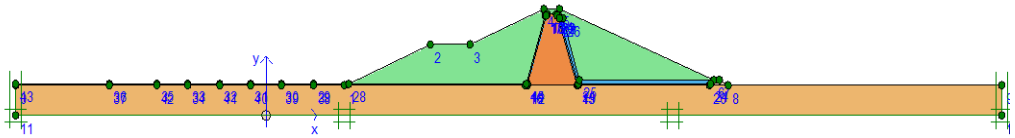
مقدار تراوش از بدنه و پی در روش آب‌بندی به کمک ترانشه رسی به عمق ۹ متر برابر (Lit/s) ۱۱۵ است(۲۵ درصد کاهش تراوش). همچنین مقدار تراوش از بدنه و پی در روش آب‌بندی به کمک تلفیق ترانشه رسی ۹ متری و دیوار آب‌بند بتنی ۷ متری برابر (Lit/s) ۴ خواهد بود(۹۷ درصد کاهش تراوش).

جدول ۲- خلاصه هزینه‌های آب‌بندی پی سد بینالود در راهکار «آب‌بندی به کمک تلفیق دیوار آب‌بند رسی و بتنی»

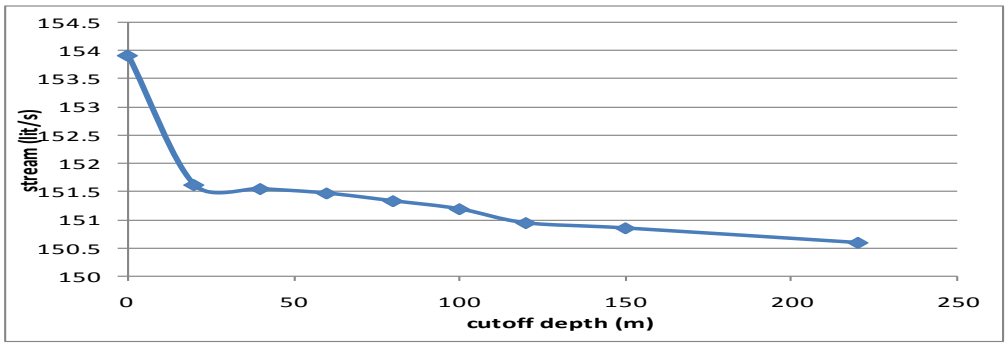
عملیات اجرایی	هزینه بدون ضرایب(میلیون ریال)
اجرا و مصالح دیوار آب بند بتنی	۲,۲٤٥,۳٥٥,۰۰۰
عملیات خاکبرداری و حمل خاک مازاد	۱,۷٤۲,۳۹٤,۰۰۰
عملیات خاکریزی و تراکم خاک	٤,۳۸۱,٥۷٥,۰۰۰
تهیه و حمل خاک رسی مناسب به کارگاه سد	٤,۰٦۲,۲٦۷,۰۰۰
مجموع	۱۲,٤۳۱,٥۹۱,۰۰۰

– آب‌بندی با اجرای پتوی رسی داخل مخزن

در این راهکار سعی می‌شود با اجرای یک پتوی رسی به ضخامت ۱ متر در مخزن سد و طولانی نمودن مسیر جریان اقدام به کاهش جریان نشت شود. پتوی رسی به طول‌های مختلف ۲۰، ٤۰، ٦۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱٥۰ و ۲۲۰ متر بر روی بستر مخزن مدلسازی گردیده است. جنس پتو از نوع مصالح رسی به کار رفته در هسته رسی بدنه سد در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- مدل ساخته شده در نرم افزار Plaxis



شکل ۸- تغییرات دبی تراوش به ازای طول‌های مختلف پتوی رسی مخزن

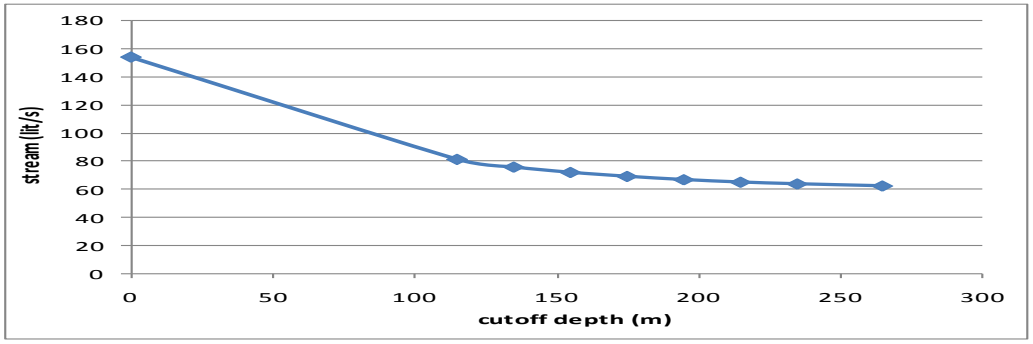
همانطور که مشاهده می شود، شدیدترین کاهش دبی تراوش، در ازای اجرای پتوی زهکش به طول ۲۰ متر رخ داده است و پس از آن افزایش طول پتوی زهکش تا طول ۲۲۰ متر تاثیر چندانی بر کاهش دبی تراوش نداشته است. حداکثر کاهش دبی تراوش در این راهکار، حدود ۲ درصد بوده است.

جدول ۳- خلاصه‌ای از هزینه‌های اجرایی راهکار

عملیات اجرایی	هزینه بدون ضرایب(میلیون ریال)
عملیات اصلاحی بستر مخزن	٦,٣٠٠,٠٠٠
عملیات خاکریزی و تراکم خاک	٣,٩٧٥,٣٠٠,٠٠٠
تهیه و حمل خاک رسی مناسب به کارگاه سد	٣,٦٥٩,٧٠٠,٠٠٠
مجموع	٧,٦٤١,٣٠٠,٠٠٠

– اصلاح پی آبرفتی به کمک پتوی رسی داخل مخزن و کف پوسته بالا دست سد

جزئیات این روش اصلاحی و مدلسازی آن، دقیقاً مشابه روش اصلاحی مورد اشاره در بند ۳ است، با این تفاوت که به منظور انسداد مسیر فرار آب از طریق پوسته بالادست، پتوی رسی مخزن تا رسیدن به هسته رسی مرکزی بدنه سد در زیر پوسته بالا دست نیز ادامه یافته و ضخامت پتوی رسی برابر یک متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۹- تغییرات تراوش به ازای طول‌های مختلف پتوی رسی مورد اشاره

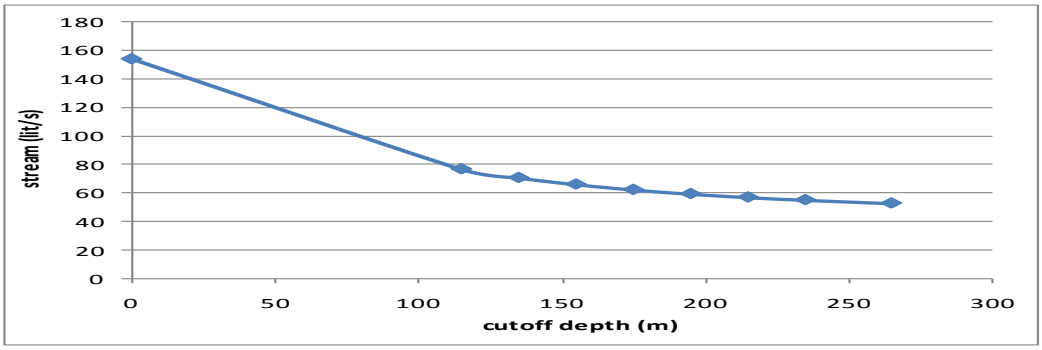
جدول ٤- خلاصه‌ای از هزینه‌های اجرایی راهکار

عملیات اجرایی	هزینه بدون ضرایب(میلیون ریال)
عملیات خاکبرداری و حمل خاک مازاد	۱۱,۱۳۰,۰۰۰
عملیات خاکریزی و تراکم خاک	۷,۰۲۳,۰۳۰,۰۰۰
تهیه و حمل خاک رسی مناسب به کارگاه سد	٦,٤٦٥,٤٧٠,٠٠٠
مجموع	۱۳,٤۹۹,٦۳۰,۰۰۰

همانطور که مشاهده می‌شود، مجموع هزینه‌های اصلاح پی در این راهکار، ۱۳۵۰۰ میلیون ریال برآورد گردیده است. به منظور کنترل گرادیان‌های هیدرولیکی پای پنجه سد نیز حداکثر سرعت تراوش در آن محل برابر $1/77\times10^{-6}$ (m/s) برآورد می‌گردد. لذا بر اساس قانون دارسی، گرادیان تراوش معادل ۰/۰۱۸ بوده که از ضریب اطمینان حدود ۵۶ در برابر جوشش پای پنجه برخوردار است. بنابراین به لحاظ مقاومت در برابر جوشش، پنجه سد ایمن است.

- **اصلاح پی آبرفتی به کمک پتوی رسی ضخیم داخل مخزن و کف پوسته بالا دست سد**

در این راهکار به منظور بررسی میزان تاثیر ضخامت پتوی رسی مورد اشاره در بند ۴ ضخامت آن به ۲ متر افزایش داده شد.



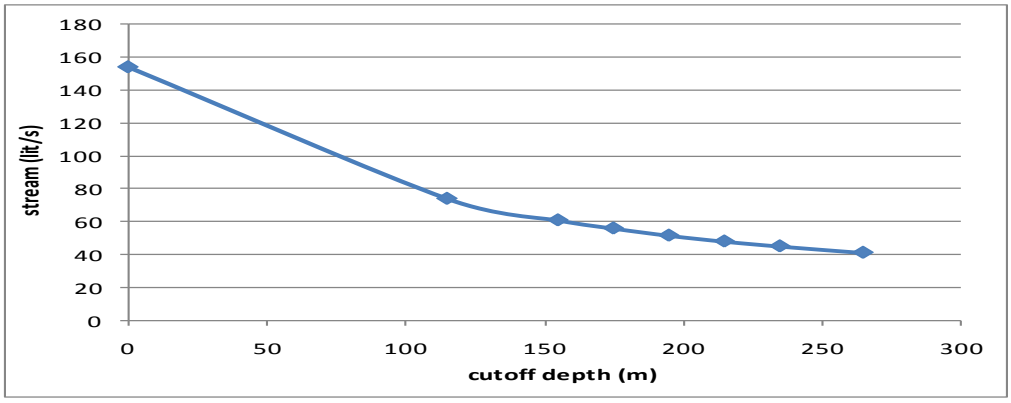
شکل ۱۰- تغییرات تراوش به ازای اصلاح پی آبرفتی به کمک پتوی رسی ضخیم داخل مخزن و کف پوسته بالا دست سد

جدول ٥- خلاصه هزینه‌های اصلاحات در روش

عملیات اجرایی	هزینه بدون ضرایب(میلیون ریال)
عملیات خاکبرداری و حمل خاک مازاد	۱۱,۱۳۰,۰۰۰
عملیات خاکریزی و تراکم خاک	۱۳,۹۹٥,۱۸۰,۰۰۰
تهیه و حمل خاک رسی مناسب به کارگاه سد	۱۲,۹۳۰,۹٤۰,۰۰۰
مجموع	۲٦,۹۳۷,۲٥۰,۰۰۰

- **اصلاح پی آبرفتی به کمک المان ژئوممبران داخل مخزن و کف پوسته بالا دست سد**

این قسمت از المان ژئوممبران با نفوذپذیری ناچیز در مدلسازی جریان تراوش استفاده گردید.



شکل ۱۱- تغییرات دبی تراوش در ازای تغییرات طول ژئوممبران داخل مخزن و کف پوسته بالا دست سد

آیتم‌های مرتبط با عملیات خاکی، شامل اصلاح بستر ژئوممبران، خاکبرداری به ضخامت ۰/۵ متر در زیر ژئوممبران در زیر پوسته بالادست. تهیه مصالح سرندی و اجرای مصالح سرندی در طرفین ژئوممبران در محدوده پوسته بالادست (برای محافظت از آن در برابر بارهای وارده) لحاظ گردیده است.

جدول ٦- مجموع هزینه‌های مرتبط با این راهکار

عملیات اجرایی	هزینه بدون ضرایب(میلیون ریال)
اجرا و مصالح آب بند ژئوممبرانی	۷,٤۲۰,۰۰۰,۰۰۰
عملیات خاکبرداری و حمل خاک مازاد	٤۰۳,۰٦۰,۰۰۰
عملیات خاکریزی و تراکم خاک	۱,۱۳۹,۹۳۰,۰۰۰
تهیه و حمل خاک رسی مناسب به کارگاه سد	۸٦۹,۱۷۰,۰۰۰
مجموع	۹,۸۳۲,۱٦۰,۰۰۰

۴. نتیجه گیری

۱ـ نرم افزار به خوبی شرایط مورد نظر را مدلسازی نموده و نتایج منطقی و قابل دفاعی را ارائه نموده است؛

۲ـ از میان راهکارهای مورد بررسی در آب‌بندی پی آبرفتی سد بینالود، راهکارهای متناظر با بکارگیری المان آب‌بند در داخل پی آبرفتی، تاثیرگذارتر و ارزان‌تر از سایر راهکارها می‌باشند؛

۳ـ اینگونه می‌توان نتیجه گیری نمود که بکارگیری المان‌های آب‌بند در پی‌های آبرفتی کم ضخامت، و بکارگیری المان‌های واقع بر سطح مخزن در پی‌های آبرفتی ضخیم از راندومان بالاتری برخوردار هستند.

۴ـ روش‌های متناظر با بکارگیری المان‌های سطح بستر مخزن به لحاظ فنی و ایمنی عملکرد سد دارای مزایای زیر هستند؛

الف ـ عدم افزایش سرعت جریان در داخل پی و در نتیجه ممانعت از ریزشویی مصالح پی و آسیب‌های بعدی

ب – عدم ایجاد وقفه در عملیات اجرایی بدنه اصلی؛

ج – قابلیت بازدید چشمی و اصلاحات پس از آبگیری.

۵- المان‌های ژئوممبران خصوصاً در نقاطی که دسترسی به مصالح رسی مناسب با مشکل مواجه است، علاوه بر افزایش راندومان آب بندی، باعث کاهش هزینه‌های تمام شده آب‌بندی می‌شوند.

۶- نهایتا از میان راهکارهای مورد بررسی راهکار " آب‌بندی به کمک دیوار آب‌بند بتنی" بلحاظ فنی و اقتصادی حائز اولویت شناخته میشود.

جدول۷- مقایسه فنی و اقتصادی گزینه ها

روش	شرح روش	دبی تراوش lit/s	هزینه اجرایی (ریال)
اول	آبندی دیوار آبند بتنی (عمق دیوار آبند ۱۶ متر و عرض آن ۱ متر)	٤	٥,٢١٤,٤١٠,٠٠٠
دوم	آبندی با تلفیق دیوار آبند بتنی و رسی(ترانشه رسی ۹ متر و دیوار آبند بتنی ۷ متر)	٤	١٢,٤٣١,٥٩١,٠٠٠
سوم	آبندی با اجرای پتوی رسی داخل مخزن (برای طول ۲۰ متر و ضخامت ۱ متر)	١٥٠	٧,٦٤١,٣٠٠,٠٠٠
چهارم	اصلاح پی آبرفتی به کمک پتوی رسی داخل مخزن و کف پوسته بالا دست سد (برای طول ۲۶۵ متر و ضخامت ۱ متر)	٦٥	١٣,٤٩٩,٣٦٠,٠٠٠
پنجم	اصلاح پی آبرفتی به کمک پتوی رسی ضخیم داخل مخزن و کف پوسته بالا دست سد (برای طول ۲۶۵ متر و ضخامت ۲ متر)	٦٠	٢٦,٩٣٧,٢٥٠,٠٠٠
ششم	اصلاح پی آبرفتی به کمک المان ژئوممبران داخل مخزن و کف پوسته بالا دست سد (برای طول ۲۷۰ متر)	٤١	٩,٨٣٢,١٦٠,٠٠٠

۵. منابع

۱- بهپور. م. ، "مرجع کامل Plaxis".۱۳۸۵

۲- پاکزاد. م.، حسینی س. م. ، " ارزیابی فشارهای آب منفذی در پی و بدنه سد کرخه پس از آبگیری"، چهارمین کنفرانس سدسازی تهران.۱۳۸۳

۳- داس ب. ام. ,"اصول مهندسی ژئوتکنیک، جلد اول-مکانیک خاک", ترجمه شاپور طاحونی, انتشارات پارس آئین, چاپ هشتم.۱۳۸۱

۴- رحمانی. ح. "ارزیابی رفتار دیوار آب بند سدهای خاکی با طول نفوذ مختلف در هسته رسی سد"، پایان نامه دانشجویی، دانشگاه تهران.

۵- رحیمی. ح. ، "سدهای خاکی"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول.۱۳۸۲

۶- سروش. ع. ، اخترپور ع. ، "مطالعه و تحلیل عددی فشار آب حفره ای ایجاد شده در هسته سد سنگریزه ای مسجد سلیمان"، هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

۷- صاحب زاده. ک. ، " بررسی آنالیزهای تراوش، استاتیکی و دینامیکی سد خاکی سنگ سیاه".

۸- گزارش سازه سد بینالود، مهندسین مشاور آب پوی مشهد.

۹- وفائیان. م. ، "سدهای خاکی"، مرکز انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ دوم.۱۳۸۰

10- Brinkgreve R. B. J., Vermeer P. A., (1998), “Plaxis Manuals”, A. A. Balkema, P. O. Box 1675, 3000 BR Rotterdam, Netherlands.

11- Karmakar S., Sharma J., Kushwaha R. L., “STRAIN-DEPENDENT ELASTO-PLASTIC CONSTITUTIVE SOIL MODELS”, the Canadian society for engineering, No. GT7, P. No. 03-208.