مدل‌سازی دو و سه‌بعدی نشت با استفاده از نتایج ابزارهای دقیق در سدهای خاکی

آمنه فاتحی پور *،[1] علی آرام[2]

چکیده

نفوذ و نشت آب از پدیده‌های مخربی هستند که بعد از احداث سدهای خاکی می‌تواند ایمنی و پایداری این سازه‌ها را به مخاطره بیندازد. پژوهش‌های متعددی درباره مدل‌سازی عددی جریان‌های نشتی از سدهای خاکی انجام‌شده است .بحث تراوش از بدنه و پی سد و تحلیل آن هست. وجود تراوش در سدهای خاکی غیرقابل‌اجتناب است اما اگر شرایط مناسبی برای فرسایش خاک وجود داشته باشد تراوش موجب شسته شدن ذرات خاک در نقاط مساعد می‌گردد. مطالعات انجام‌شده بر روی تعداد زیادی از سدهای خاکی تخریب‌شده نشان داده است که حدود ٪ ۳۸ از این خرابی‌ها ناشی از تراوش کنترل نشده از بدنه سد بوده است. با تجزیه‌وتحلیل نتایج حاصل از ابزار دقیق و مدل عددی می‌توان از صحت اطلاعات ابزار دقیق تعبیه‌شده در سد اطمینان حاصل کرد. روش‌های عددی می‌تواند یک ابزار خوب، دقیق و سودمند برای مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی ازجمله حرکت و جریان آب درون نهشته‌های متخلخل باشد در این مقایسه نقاط ضعف و قوت مدل عددی مشخص‌شده و تلاش می‌شود که پیش‌بینی جریان نشتی و فشار بالابر به‌صورت دقیق صورت پذیرد. درنهایت راهکارهای لازم برای تشخیص مسیر نشت، میزان فرار آب و سایر تمهیدات مربوط به ایمنی سد پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: سد خاکی، جریان تراوشی، مدل‌سازی عددی، ابزار دقیق

۱- مقدمه

آب مهم‌ترین منبع طبیعی درروی زمین است. سرزمین ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک قرارگرفته، و توزیع ناموزون جریان‌های سطحی محدودیت‌های عمده‌ای را در امر استفاده از این عنصر حیاتی به وجود آورده است و به‌علاوه قسمت اعظم این جریان‌ها قبل از اینکه مورداستفاده قرار گیرند از دسترس خارج و به‌سوی دریا سرازیر می‌گردند. به همین لحاظ طرح و اجرای سدهای ایمن و اقتصادی که بتوانند آب‌های سطحی و اضافی را مهار نمایند از اهمیت خاصی برخوردار است(حائزی،۱۳۶۳).

یک سد ممکن است به‌منظور یک یا چند مورد از موارد ذیل ساخته شود. این موارد می‌توانند آبیاری-تامین آب آشامیدنی- تولید برق- کنترل سیلاب- حفاظت آب‌وخاک- پرورش ماهی- ایجاد فضای تفریحی و غیره باشند. سد خاکی، ساختمان یا تأسیساتی است که بر روی رودخانه یا مسیل و با استفاده از مصالح بدون ملاط به‌منظور ذخیره و بالا آوردن سطح آب در پشت آن ساخته می‌شود.

یک سد می‌تواند از نوع مخزنی یا انحرافی باشد:

[1] نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد، مدیریت ساخت ، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران، a.fatehi3221@gmail.com
[2] گروه مهندسی عمران، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران، Aliaram172@yahoo.com

سدهای مخزنی آب‌های اضافی را در فصل‌هایی که آب زیادتر از مقدار نیاز است کنترل و در مخزن سد ذخیره می‌نمایند تا در فصل‌هایی که به آب بیشتری نیاز است از آن استفاده شود، وظیفهٔ اصلی یک سد مخزنی در درجهٔ اول ذخیرهٔ آب و جلوگیری از نفوذ آن به بدنه و پی و در درجهٔ دوّم پایداری در مقابل نیروهای وارده است.
سدهای انحرافی سطح آب را تا حد مورد لزوم بالا آورده آب را از مسیر اصلی به کانال‌های آبیاری یا آب‌رسانی منحرف می‌نمایند.
در سدهای خاکی به دلیل پیوسته نبودن مصالح معمولاً تنها راه مقابله با نیروهای وارد بر بدنهٔ سد استفاده از وزن است، بنابراین سد خاکی به‌ناچار باید به‌صورت وزنی و با مقطع ذوزنقه‌ای شکل ساخته شود. امّا ازنظر نفوذ آب، چون بدنهٔ سد از مصالح خاکی یعنی از ذرات جدا از هم و بدون ملاط ساخته می‌شود، ازاین‌رو در مقابل آب نفوذپذیر خواهد بود و باید برای جلوگیری از نشت و تلفات آب تدابیر لازم اتخاذ گردد(حائزی، ۱۳۶۳).
از روش شبیه‌سازی کامپیوتری این امکان را برای متخصصان امر فراهم می‌آورد که بدون صرف هزینه‌های گزاف به پیش‌بینی رفتار سد در شرایط بحرانی احتمالی و بررسی وضعیت پایداری آن و همچنین کنترل نکات ایمنی مذکور بپردازند و این در صورتی است که فرضیات به‌کاررفته در مدل کامپیوتری و شرایط مرزی اعمال‌شده کاملاً با شرایط واقعی همخوانی داشته باشد. استفاده از نتایج حاصل از قرائت ابزار دقیق روشی مطمئن جهت کنترل صحت فرضیات مدل کامپیوتری و درنتیجه اعطای اعتبار هر چه بیشتر به نتایج حاصل از پیش‌بینی رفتار سد می‌باشد.

۲- ادبیات و پیشینه تحقیق

۲-۱- تراوش در سدهای خاکی

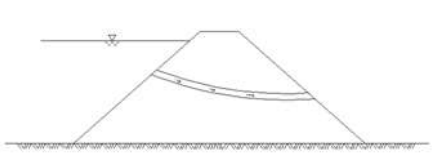
تراوش یا نشت آب یکی از عوامل تخریب در سدهای خاکی می‌باشد، ازآنجاکه بدنهٔ سد خاکی یکپارچه نبوده و متشکل از ذرات جدا از هم است، لذا آب تحت انرژی پتانسیل موجود شروع به حرکت و به‌عبارت‌دیگر نشت (تراوش) در خاک می-کند.
تراوش در سدهای خاکی به دو طریق ممکن است:
۱- تراوش از بدنه سد خاکی
۲- تراوش از پی سد خاکی

۲-۱-۱- تراوش از بدنه سد خاکی

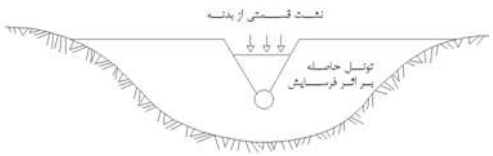
تراوش از بدنهٔ سدهای خاکی در صورت افزایش شیب آبی نسبت به شیب بحرانی، موجب به حرکت درآمدن ذرات خاک و شسته شدن آن‌ها می‌گردد. استمرار این عمل موجب می‌شود تا مجرایی به شکل لوله یا تونل در داخل خاک ایجاد شود و با ازدیاد سطح مقطع آن، سرعت حرکت آب نیز بیشتر شده و ذرات بیشتری شسته و به خارج حمل می‌شوند که درنتیجه تونل حاصله به‌مرور بزرگ و بزرگ‌تر می‌شود. فرسایش داخلی دائماً گسترش‌یافته و درنهایت سبب تخریب سد خاکی خواهد گردید.

۲-۱-۲- تراوش از پی سدهای خاکی

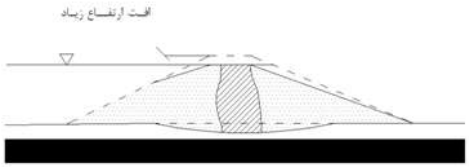
یکی دیگر از محل‌های تراوش در سدهای خاکی پی آن هست، که بر پایداری سد اثر منفی داشته و می‌بایست موردتوجه قرار گیرد.
مولکول‌های آب به دلیل وجود انرژی پتانسیل در محیط متخلخل خاک جریان می‌یابند و طی مسیر در این محیط به‌تدریج انرژی خود را به‌واسطهٔ اصطکاک از دست می‌دهند. این پدیده که تراوش (نشت) آب در محیط متخلخل خاک نام دارد.(رحیمی،۱۳۹۷).



شکل الف- ایجاد فرسایش داخلی و تولید مجرا در داخل بدنه سد خاکی [۴]

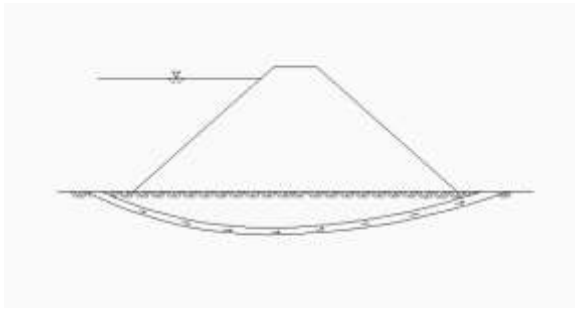


شکل ب- نشست حاصله بر اثر فرسایش داخلی [۴]

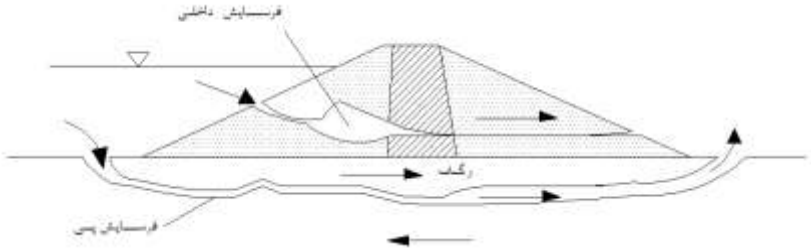


شکل ج- نشست بدنه و پی سد خاکی[۲]

شکل (۱): اشکال مختلف خرابی در بدنه سد خاکی در اثر تراوش



شکل الف- فرسایش پی [رحیمی، ۱۳۹۷]



شکل ب- خرابی براثر فرسایش داخلی ورگاب [خرقانی و همکاران، ۱۳۸۳]

شکل(۲) : اشکال مختلف خرابی در پی سد خاکی

۳- راهکارهای مقابله با تراوش در سدهای خاکی

۳-۱- روش‌های کاهش نشت از بدنه و پی سدهای خاکی

روش‌های کنترل تراوش مقدار نشت آب را کم کرده و باید خطرات احتمالی خرابی ناشی از ناپایداری شیروانی، آب بردگی، غلیان فونداسیون و یا شسته شدن دانه‌های ریز را به حداقل برساند. روش‌های کاهش تراوش در بدنه و پی سدهای خاکی به شرح ذیل است:

- استفاده از هستهٔ با نفوذپذیری بسیار کم در بدنهٔ سد.

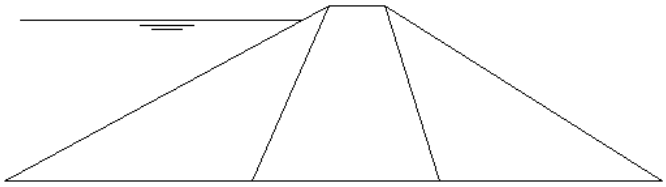
- استفاده از رویهٔ آب‌بند در سطح بالادست.
- استفاده از ترانشه و پرده آب‌بند در پی.
- استفاده از پردهٔ تزریق در پی.
- استفاده از رویه با نفوذپذیری بسیار کم در کف مخزن.
- استفاده از دیواره‌های آب‌بند نازک (دیافراگم) فلزی، بتنی و غیره (رحیمی، ۱۳۹۷).

۳-۲- استفاده از هستهٔ با نفوذپذیری بسیار کم در بدنه سد

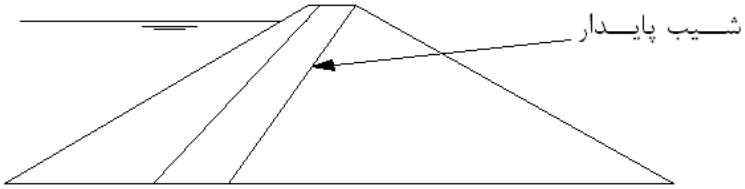
در صورت وجود مصالح مناسب معمولاً برای جلوگیری از نشت آب در داخل سدهای خاکی یا کاهش مقدار نشت، از یک هستهٔ متشکل از مصالح با نفوذپذیری بسیار کم استفاده می‌شود. آب در حین عبور از این بخش از بدنهٔ سد، به دلیل نفوذپذیری بسیار کم، مقدار زیادی از انرژی پتانسیلی خود را به دلیل اصطکاک از دست می‌دهد و درنتیجه مقدار نشت نیز به‌تناسب کاهش می‌یابد در طراحی هستهٔ سدهای خاکی می‌بایست سه مورد ذیل موردتوجه قرار گیرد (رحیمی، ۱۳۹۷)

۳-۳- استفاده از رویهٔ آب‌بند در سطح بالادست

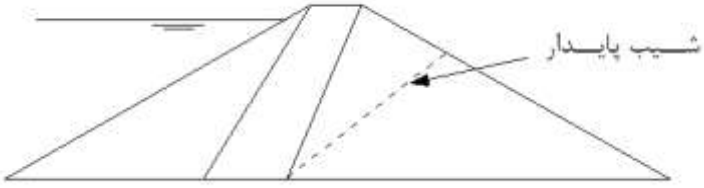
چنانچه مصالح مناسب برای احداث سد خاکی همگن (متشکل از مصالح ریزدانه) در محل موجود نباشد و در مقابل مصالح سنگی مرغوب به میزان زیاد و باقیمت مناسب قابل‌دسترسی باشد، بهتر است از سدهای سنگ‌ریزه‌ای استفاده شود.
در این نوع سد تمام بدنهٔ اصلی سد از قطعات سنگی ریزودرشت ساخته‌شده و برای آب‌بندی آن لازم است از یک‌لایهٔ غیرقابل نفوذ درروی سطح بالادست استفاده شود. به‌طورمعمول این لایه عموماً از نوع بتنی و بعضاً ممکن است از مصالح آسفالتی یا ژئوممبران باشد (رحیمی، ۱۳۹۷)



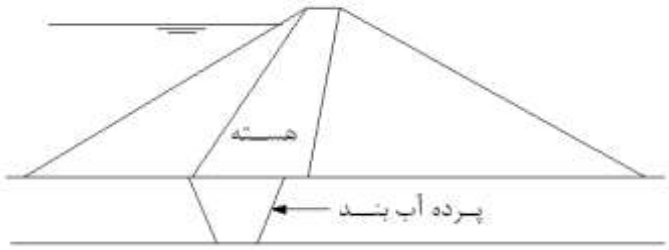
شکل الف- هسته مرکزی قائم(رحیمی، ۱۳۹۷)



شکل ب- هسته کمی شیب‌دار (رحیمی، ۱۳۹۷)



شکل ج- هسته شیب‌دار (رحیمی، ۱۳۹۷)



شکل د- ریشه هسته(رحیمی، ۱۳۹۷)

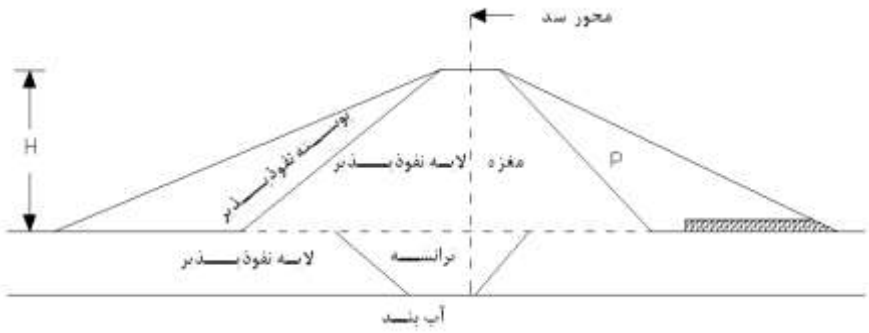
شکل (۳): طرق مختلف قرارگیری هسته در سدهای خاکی

۳-۳- استفاده از پردۀ آب‌بند در پی

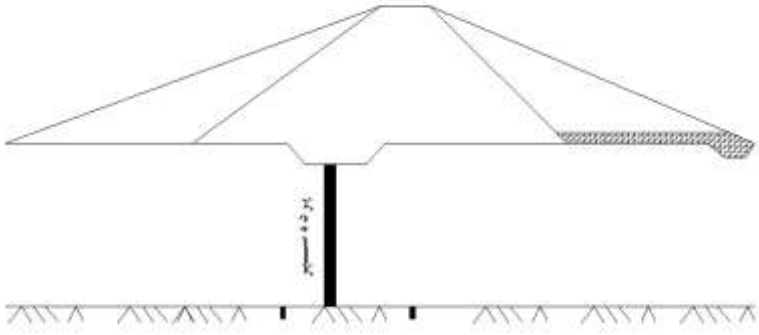
چنانچه مصالح پی سد نفوذپذیر بوده و بدنۀ سد به‌اجبار روی مصالح مذکور استقرار داشته باشد برای جلوگیری از نشت آب از طریق پی، از ترانشه و دیوار آب‌بند استفاده می‌گردد (رحیمی، ۱۳۹۷)

ترانشۀ آب‌بند، گودالی است که در زیر هستۀ سد در داخل لایۀ آبرفتی نفوذپذیر در سراسر عرض رودخانه تا رسیدن به سنگ‌بستر یا لایۀ غیرقابل نفوذ حفر می‌شود؛ و پس از رسیدن به عمق مطلوب، با مصالح نفوذناپذیری که ممکن است همچنین با مصالح هستۀ سد یا مرغوب‌تر از آن باشد، پر می‌گردد و درواقع هسته آن است که هسته به‌صورت ریشه در داخل پی امتدادیافته است.

عمق ترانشۀ آب‌بند بستگی به ضخامت لایۀ نفوذپذیر پی دارد و چنانچه این ضخامت کم باشد، می‌توان آن را تا رسیدن به سطح سنگ‌بستر ادامه داد. در صورت زیاد بودن ضخامت لایۀ نفوذپذیر، معمولاً ترانشۀ آب‌بند تا عمق مناسبی ادامه داده می‌شود و پس‌ازآن برای کاهش مقدار نشت ممکن است از سایر روش‌ها مانند پردۀ تزریق، سپرکوبی و غیره استفاده شود.(خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)



شکل (٤): استفاده از ترانشه رسی آب‌بند (خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)



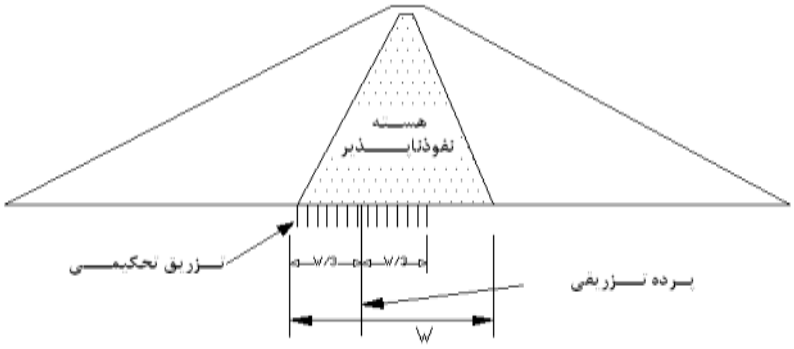
شکل (۵) استفاده از آب‌بند پرده سپری (خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)

۳-٤- استفاده از پردهٔ تزریق در پی

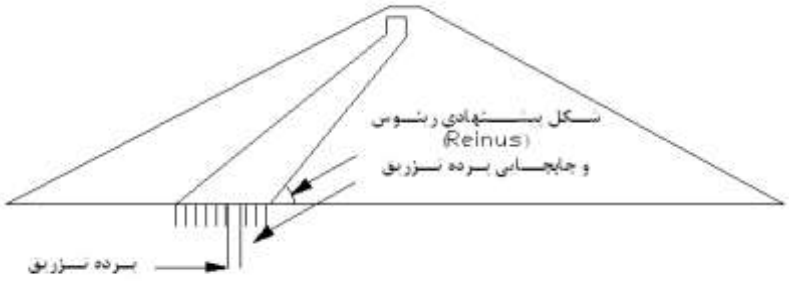
ایجاد پردهٔ تزریق یکی از روش‌های مقابله با تراوش آب در پی سدهای خاکی است. این نوع پرده با تزریق رس، دوغاب سیمان یا مواد شیمیایی مناسب در زیر سدها و به‌منظور کاهش نشت ایجاد می‌گردد.

برای ایجاد یک پردهٔ تزریق در عمق موردنظر، ملاط رقیق سیمان یا سایر مواد مناسب توسط پمپ‌های قوی به داخل سوراخ‌هایی که در پی جانبی یا تحتانی سد ایجادشده، تزریق می‌گردد (رحیمی،۱۳۹۷)

شاید بهترین روش تزریق در خاکه‌ای دانه‌ای عمیق روش منچتز[1] یا لوله حلقه‌دار باشد(رحیمی،۱۳۹۷).

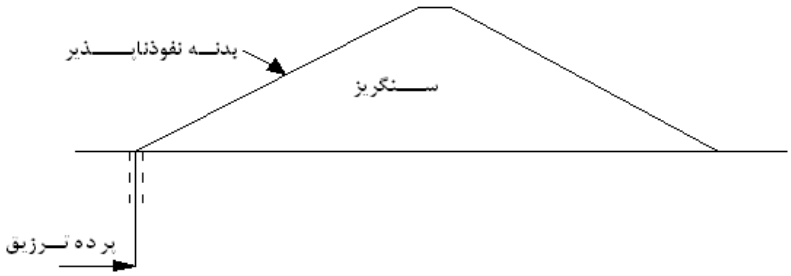


شکل(٦) : استفاده از پرده تزریق زیر هسته رسی (خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)



شکل(۷) : استفاده از پرده تزریق زیر هسته رسی مایل (خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)

[1] *Manchettes*

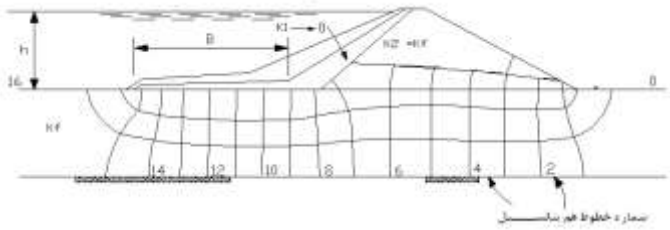


شکل(۸): استفاده از پرده تزریق ابتدای شیب بالادست (خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)

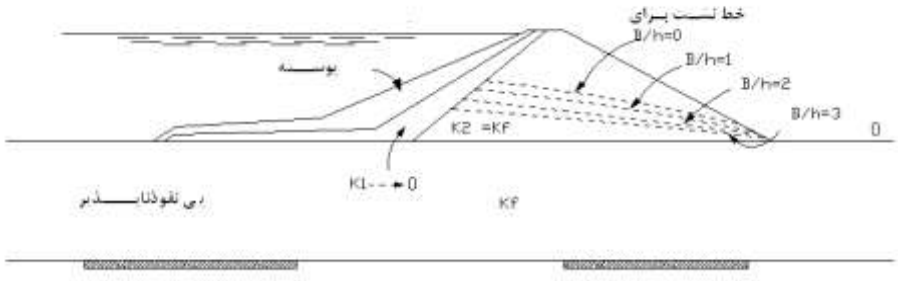
۳-۵- : استفاده از رویه با نفوذپذیری بسیار کم در کف مخزن

یکی از روش‌های کاهش نشت از زیر سدهای خاکی ساخته‌شده بر روی پی‌های آبرفتی با نفوذپذیری زیاد، استفاده از یک لایهٔ پوششی با نفوذپذیری خیلی کم در سطح بستر رودخانه و کف مخزن در بالادست محور سد و اتصال آن به هستهٔ میانی است.

نقش این نوع پوشش افزایش طول خط جریان و درنتیجه افزایش افت پتانسیل و کاهش انرژی آب است که درنهایت موجب کاهش تلفات و کاهش فشار آب منفذی و خطرهای مرتبط با آن می‌گردد.



(الف)



(ب)

شکل (۹) : اثر طول رویه نفوذناپذیر بر موقعیت خط نشت در پوسته پایین‌دست(رحیمی،۱۳۹۷)

۳-٦- : استفاده از دیوارهٔ آب‌بند (دیافراگم)[1]

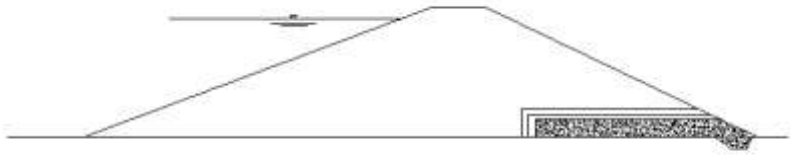
دیواره‌های آب‌بند نازک یا دیافراگم‌ها، صفحات نازک متشکل از نوعی بتن انعطاف‌پذیر هستند (بتن پلاستیک) که در ترانشه‌های حفرشده با روش‌های حفاری بسته در بسترهای آبرفتی رودخانه تا اعماق نسبتاً زیاد اجرا می‌شوند. ضخامت این نوع دیواره بین حدود ۰/۶ تا ۱/۵ متر متغیر است و عمق آن متناسب با نیاز و مشخصات فنی طرح تعیین می‌گردد.
هدف این نوع دیواره‌ها مسدود کردن مسیر جریان تراوش آب از بالادست به پائین‌دست است (رحیمی،۱۳۹۷)

٤- روش‌های کنترل و جمع‌آوری آب نشتی

هدف از اجرای زهکش‌ها خشک نگاه‌داشتن قسمت‌های پایین‌دست سد و جلوگیری از اضافه فشار آب‌منفذی در مناطق مختلف سد و نیز افزایش پایداری سد می‌باشد. ازنظر شکل و موقعیت سیستم زهکش در بدنه سدهای خاکی به‌صورت زیر مورداستفاده قرار می‌گیرد (خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)

٤-۱- : زهکش افقی

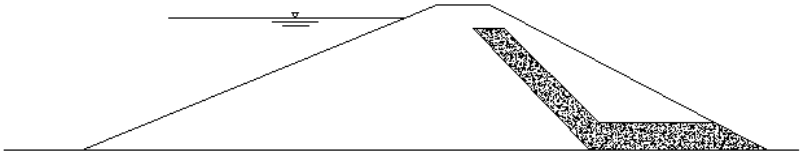
این نوع زهکش در دامنه پایین‌دست و در قاعده سد قرارگرفته و تمامی زه درون بدنه و قسمت عمده زه شالوده را (درصورتی‌که شالوده حاوی زه باشد) به طرف بیرون سد هدایت می‌کند (خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)



شکل(۱۰) : زهکش لایه‌ای افقی(خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)

٤-۲-: زهکش مایل

معمولاً زهکش مایل در نیمه پایین‌دست سد با شیب‌های مختلف در سدها قرار می‌گیرد. **(خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)**



شکل(۱۱) : زهکش مایل و افقی(خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)

۵- پیشینه تحقیق

چشمگیرترین پیشرفت درزمینه رفتار سدها در ارتباط با مسئله تراوش در سد خاکی و تأثیر آن بر پایداری سد است. خرابی‌هایی که در پی سدها براثر تراوش و به دلیل شسته شدن دانه‌های خاک[2] به وقوع پیوسته برای اولین بار توسط ترزاقی[3] به‌درستی توضیح داده‌شده است. سپس، ترزاقی به اهمیت نیروهایی که براثر نشت آب در سدهای خاکی و بتنی به وجود می‌آیند توجه نمود. از مهر و مومهای ۱۹۳۰ به بعد، پیشرفت‌های عمده‌ای درباره حل مسئله تراوش و جریان آب در

[1] *Diaphragm wall cut-off*
[2] *Piping*
[3] *Terzaghi*

خاک، با سطح آزاد، جریان آب در مصالح غیرایزوتروپیک و خصوصیات جریان در مرز دو مصالح مختلف، انجام گرفت(رحیمی،۱۳۹۷)

در سال ۱۸۵۶، دارسی رابطه ساده خود را برای جریان آب در خاک تا آنجا که مربوط به مسئله تراوش در سد خاکی می-شود، ارائه نمود. (خرقانی و همکاران،۱۳۸۳)

در سال ۱۹۳۱، کوزنی[1] برای جریان در یک قشر نفوذناپذیر افقی منتهی به یک قشر نفوذپذیر افقی دیگر (نظیر زهکش افقی در سد خاکی) راه‌حلی تئوری برای مسئله تراوش با سطح آزاد ارائه نمود(حائزی،۱۳۶۳).

در این زمینه به تحقیق مطهری نژاد می‌توان اشاره نمود که بر روی سد خاکی همگن انجام‌شده و با مطابقت فرموله‌ای کوزنی با نتایج حاصل از تحلیل plaxis به نتایجی جهت محاسبه دبی تراوش پرداخته است(مطهری نژاد،۱۳۸۹).

در تحقیقی که توسط زورسنا و همکاران، بر روی سد مخزنی کرخه با هسته رسی صورت گرفته است می‌توان مشاهده نمود که مقدار نشت با متغییر قرار دادن ضریب نفوذپذیری پرده آب‌بند محاسبه‌شده است و در نموداری دیگر با تغییر در میزان ضخامت پرده آب‌بند میزان نشت به‌دست‌آمده است

می‌توان یک نمونه تحقیق که بر روی سد خاکی کالسیک ترکیه توسط دپارتمان مهندسی زمین‌شناسی دانشگاه مرسین ترکیه برای بررسی و ارائه راهکارهای جلوگیری از تراوش در پی سد انجام‌شده است را نام برد. این سد به ارتفاع ۷۷ متر جهت آبیاری قسمت پائین‌دست سد ساخته‌شده بود، در قسمت راست فنداسیون سد شکاف‌هایی در پی سد، از جنس کنگلومرا (سنگ‌آهک) مربوط به دوره سوم زمین‌شناسی ایجادشده بود. شکاف‌ها به سمت داخل سد در حال گسترش بودند، بعد از ذخیره آب در پشت سد، روزنه‌های جدیدی در اطراف ناحیه نشت دیده می‌شد. بررسی‌ها نشان می‌داد که تراوش در امتداد دیوار اصلی سد بوده و سوراخ‌هایی که موجب نشت گردیدند تا ارتفاع ۴۴۲ متری توسعه پیدا کردند. جهت کاهش نشت ملاط رقیق گروت بین دریچه آبریز و بدنه سد و زیر دریچه آبریز تزریق گردید. نتیجه این امر کاهش نسبتاً مناسب نشت از محل چشمه‌های موجود بود. البته نشت اندکی کماکان در بدنه سد وجود دارد که نیازمند بررسی‌های بیشتر و کامل‌تری می‌باشد .(Department of Geological،۲۰۰۳).

تحقیق دیگری بر روی سد سنگ‌ریزه‌ای با هسته رسی روی رودخانه ناک دنگ کره توسط جین‌یانگ[2] و هیانگ[3]، برای تعیین مسیرهای تراوش آب انجام گرفت. آبگیری این سد در آگوست ۱۹۹۴ آغاز و در آوریل ۱۹۹۸ پر شد. هنگامی‌که ارتفاع آب در پشت سد به ۱۵۰ متر رسید، سه حفره نشت در پوسته سد مشاهده شد. برای تعیین کردن مسیرهای ممکن تراوش در نواحی آسیب‌دیده بالقوه در سد، از تست تراسر[4] استفاده‌شده است.

زمانی که ارتفاع آب در پشت سد ۱۴۲ و ۱۴۵ متر رسید، ۱۵ تست تراسر در طی دو دوره انجام شد. از یون بروماید (اسید هیدرو برومیک) به‌عنوان ماده ردیاب استفاده‌شده بود. برای هر تست، ۱۸۰۰ تا ۴۰۰۰ لیتر از محلول فوق برای حدود ۵ ساعت در ریپ رپ تزریق شد. ماده ردیاب در ۲۶ چاه گمانه مشاهده گردید. این چاه‌ها در چهار گروه قرارگرفته بودند: ۱- جناح چپ پوسته. ۲- جناح راست پوسته. ۳- جناح راست پنجه پوسته. ۴- جناح چپ پنجه پوسته. برای هر تست تراسر، بیش از ۳۰ نمونه آب در یک دوره ۹۶ ساعته در هر چاه مشاهده گرفته‌شده بودند، نتیجه آزمایشات نشان از تراوش در میزان بالا در جناح چپ پوسته و به میزان کمتر در جناح راست پوسته بود (Jin-Yong Lee, Hyoung-Soo Kim, Yea-Kwon Choi, Jeong-Woo Kim, Jeong-Yong Cheon, Myeong-Jea Yi،۲۰۰۷).

سیدی و همکاران، با انجام تحقیق کنترل سه‌بعدی نشست در سد اعلی دولت (استان فارس) با استفاده از روش عددی اجزاء محدود، نشت آب در حالت سه‌بعدی از پی و بدنه را به‌طور هم‌زمان به‌وسیله نرم‌افزار Seep – 3D به روش عددی المان محدود مورد تجزیه‌وتحلیل قراردادند و به نتایج مفیدی رسیدند که استفاده از آب‌بند برای کاهش میزان نشت نمونه‌ای از آن می‌باشد. (سیدی و همکاران،۱۳۸۷).

---

[1] *Kozeny*
[2] *Jin-Yong*
[3] *Hyoung*
[4] *Traser*

خزائی و همکاران، بامطالعه آنالیز سه‌بعدی نشت از پی و جناحین سدهای خاکی با در نظر گرفتن توپوگرافی ساختگاه (مطالعه موردی سد گیوی) به‌وسیله نرم‌افزار Seep – 3D که از روش‌های المان محدود برای آنالیز نشت استفاده می‌کند را انجام دادند که نتایج آنالیزها و مقایسه آن با روش‌های معمول در کارهای سدسازی (آنالیز دوبعدی) نشان دادند که برای بررسی و دستیابی به مقادیر واقعی نشت استفاده از مدل‌های سه‌بعدی ضروری می‌باشد(خزائی و همکاران،۱۳۹۲)
رشیدی و همکاران، بامطالعه و ارزیابی نشت و فرار آب از پی و بدنه سد خاکی شاه قاسم، از مدل Seep – 3D استفاده و نتایج را با داده‌های ابزار دقیق سد مقایسه نمودند (رشیدی و همکاران،۱۳۹۱).
موهبت‌زاده و همکاران، شبیه‌سازی عددی پدیده نشت به‌صورت دوبعدی در محدوده پی و بدنه با استفاده از نرم‌افزار Seep/W در سد خاکی کرخه، متناسب با شرایط مختلف و مدل‌سازی خاک نیمه اشباع را انجام دادند، نتایج حاصل حاکی از اختلاف معناداری بین یافته‌های شبیه‌سازی‌شده و داده‌های مشاهداتی بود، بطوریکه داده‌های برآوردی در حدود دو برابر مقادیر واقعی بودند. همچنین نتایج نشان داد که با کاهش ۳۰٪ ضرایب نفوذپذیری مقادیر نشت برآورد شده توسط مدل به میزان ۵۰٪ کاهش می‌یابد(موهبت زاده و همکاران،۱۳۹۰).
هنرمند، با تحلیل سه‌بعدی استاتیکی سد خاکی شهید مدنی (ونیار)، عملکرد سد در پایان مرحله ساخت را با مقایسه نتایج تحلیل عددی سه‌بعدی و ابزار دقیق نصب‌شده در بدنه سد موردبررسی قرارداد، نهایتاً با انجام این آنالیز و بررسی نتایج مشخص شد که تطابق مناسبی بین مقادیر فشار آب حفره‌ای و نشت و تنش کل قائم حاصل از آنالیزهای عددی و نتایج ابزار دقیق برقرار است. همچنین مشخص شد که سد ازنظر گسیختگی هیدرولیکی در سطح ایمنی مناسبی قرار دارد (هنرمند،۱۳۹۰).
سولانکی[1] و همکاران، تحقیقی درزمینه آنالیز نشت و پایداری سد خاکی با استفاده از روش المان محدود انجام دادند، نشت و پایداری سد را در دو حالت پایدار و گذار موردمطالعه قراردادند که نتایج زیر حاصل گردیده است، افزایش در مدول یانگ هسته و پوسته منجر به کاهش حداکثری جابجایی تاج و تغییر در زاویه اصطکاک داخلی می‌شود، همچنین تغییر در ضریب نفوذپذیری تأثیر چشم‌گیری بر میزان نشت دارد(Solanki. H, Athani. S, Shivamanth. C 2015).
کاسیمو[2] و ابنوسو[3]، نشت نزدیک مصالح هسته سد را با راه‌حل‌های تحلیلی انجام دادند، با فرض موازنه جرم جریان در هسته و پوسته نفوذپذیر پایین‌دست خاک‌ریز، توسط تطبیق نرخ جریان نشت در دو منطقه با این فرض که انطباق فشار و مؤلفه‌های نرمال سرعت دارسی بین پوسته و هسته وجود داشته باشد را انجام دادند که نتایج زیر حاصل گردید: مسئله همبستگی رگرسیون خطی برای یک‌شکل مشخص مثلاً تخلیه کننده نیم‌دایره‌ای به‌صورت ریاضی‌وار قابل‌حل است، همچنین نشت دوبعدی در یک دامنه محدودشده توسط یک بخش ورودی ثابت و نیمرخ منحنی نشت خروجی قابل‌بررسی می‌باشد (Kacimov. A, Obnosov. Y 2015).
ژانگ[4] و یان[5]، تجزیه‌وتحلیل سه‌بعدی نشت در سدهای خاکی محصور نشده با استفاده از فرم ضعیف روش المان مربع سازی را انجام دادند، نتایج حاصل شده حاکی از قابلیت اطمینان فرمول مربوطه می‌باشدZhong. H, Yuan. Sh) 2016),
نورانی[6] و همکاران، شبیه‌سازی دوبعدی نشت متغیر با استفاده از آنالوگ‌های فیزیکی (مطالعه موردی سد خاکی ستارخان) را انجام دادند به این نتیجه رسیدند که لوله‌های آنالوگ (MRTA) ابزار تجربی قابل‌اعتماد و راحت برای شبیه‌سازی نشت در شرایط گذرا می‌باشد ,(Nourani. V, Aminfar. M 2014)
استبرق[7] و همکاران، با انجام مدلی برای پیش‌بینی سرعت و نیروی نشت در یک فیبر خاک سیلت مسلح تأثیر تقویت تصادفی روی سرعت و نیروی نشت در خاکه‌ای سیلتی را مورد مطالعه قراردادند، آزمون‌های تجربی در نمونه‌های به‌طور

[1] *Solanki*
[2] *Kacimov*
[3] *Obnosov*
[4] *Zhang*
[5] *Yuan*
[6] *Nourani*
[7] *Estabragh*

تصادفی تقویت‌شده، دو نوع فیبر با طول و درصدهای مختلف را موردمطالعه قراردادند نتایج زیر حاصل گردید که سرعت نشت با افزایش گرادیان هیدرولیکی افزایش اما با افزایش طول و مقدار فیبر کاهش پیدا می‌کند همچنین با افزایش طول و مقدار فیبر خاک نیروی نشت افزایش پیدا می‌کند(Estabragh. A. R, Soltani. A, & Javadi. A. A 2016)
رشیدی با تجزیه‌وتحلیل سه‌بعدی شرایط مختلف نشت جریان از سدهای خاکی و ارائه راه‌حل مناسب برای کنترل فرار جریان آب از بدنه و پی سد شاه قاسم، و ردیابی جریان انجام گرفت که نتایج حاکی از وجود فرار آب در تکیه‌گاه‌های سد بوده است. همچنین در این مدل‌سازی میزان نشت واقعی به مقدار ۲۵۶/۱۸ برابر مقدار نشت محاسبه‌شده به‌وسیله مدل-سازی عددی بوده است که این نشان‌دهنده فرار آب از پی و تکیه‌گاه‌های سد می‌باشد و نرم‌افزار Seep3d نتوانسته است به‌خوبی این فرار آب را مدل‌سازی نماید.

٦- ارزیابی نتایج عددی و داده‌های ابزار دقیق

برای کمی سازی تفاوت بین نتایج داده‌های ابزار دقیق سد و نتایج به‌دست‌آمده از فرمول عددی از معیار آماری درصد خطای نسبی[1] (RE) به‌صورت زیر استفاده می‌شود.

$$\text{درصد خطا نسبی} = \left|\frac{\text{تراز مشاهداتی} - \text{تراز محاسباتی}}{\text{تراز مشاهداتی}}\right| \qquad (۱-۱)$$

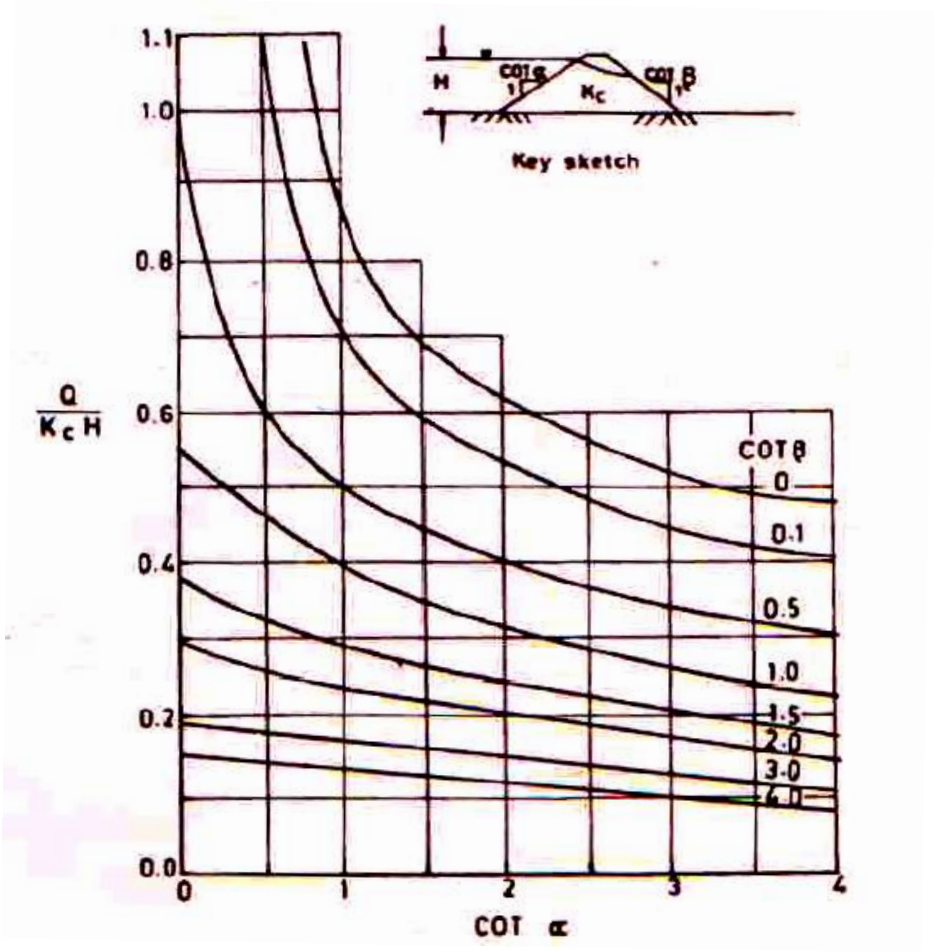
٦-۱- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج داده‌های محلی

مقایسه نتایج هر تحقیقی با نتایج مشاهده‌ای محلی از معتبرترین روش‌های بررسی صحت نتایج می‌باشد. در این قسمت نیز به مقایسه نتایج تحقیق حاضر با داده‌های محلی ارائه‌شده پرداخته می‌شود.

٦-۲- روابط استلو جهت محاسبه تراوش در بدنه سدهای خاکی

این نمودارهای تراوش شکل (۳-۱۰) نمودارهای بی‌بعدی هستند که تغییرات $\frac{Q}{K_C H}$ ا در برابر شیب بالادست هسته ارائه می‌دهند، این نمودارها با استفاده از فرض اینکه عرض هسته برابر ۱۰٪ ارتفاع سد و سطح تراز آب برابر ۹۰٪ ارتفاع سد باشد ارائه‌شده‌اند. (Design of Small Dams,United ،۱۹۶۰)

[1] *Relative error*



شکل(۱۲): $\frac{Q}{K_C H}$ در مقابل co α (Design of Small Dams,United ،۱۹۶۰)

٦-۳- : روابط داکلر جهت محاسبه تراوش در پی سدهای خاکی

همچنین جهت محاسبه تراوش از کل سد بایستی میزان دبی تراوش پی نیز محاسبه شود. جهت محاسبه میزان دبی تراوش از پی سد خاکی می‌توان از رابطه داکلر[1] استفاده نمود، داکلر رابطه ۳-۴ را برای محاسبه تراوش در پی سد خاکی بدون دیواره آب‌بند ارائه نمود (Design of Small Dams,United ،۱۹۶۰)

$$\frac{q}{K_f H} = \frac{1}{0.88 + \frac{B + \acute{B}}{D}} \qquad (۱-۲)$$

رابطه ذکرشده برای شرایط$2D < (B+\acute{B})$ می‌باشد.

همچنین برای شرایط $2D > (B+\acute{B})$ از معادله شماره ۳-۵ استفاده می‌شود.

$$\frac{q}{K_f H} = \frac{1}{2}\left[\frac{2}{(B + B')} - 1\right]^{1/3} \qquad (۱-۳)$$

[1] *Dachler*

در شرایطی که پی سد دارای دیواره آب‌بند باشد و نفوذپذیری پرده آب‌بند عددی معلوم باشد از رابطه زیر جهت محاسبه میزان تراوش از پی استفاده می‌شود.

$$\frac{q}{K_f H} = \frac{1}{0.88 + \frac{B}{D} + \left(\frac{K_f}{K_g} - 1\right)\frac{\mathrm{E}}{D}} \qquad (۱-۴)$$

که در آن: K_g: میزان نفوذپذیری پرده آب‌بند و E: ضخامت پرده آب‌بند می‌باشد.
همچنین برای شرایطی که پرده آب‌بند دارای نفوذپذیری بسیار پایین و قابل‌چشم‌پوشی باشد (پرده آب‌بند از جنس بتن) از رابطه ۳-۷ جهت محاسبه تراوش از پی سد خاکی استفاده می‌شود که در آن:

$$\frac{q}{K_f H} = \frac{1}{0.88 + \frac{B}{D} + \left(\frac{D}{W} - 1\right)\frac{\mathrm{E}}{D}} \qquad (۱-۵)$$

W: مساحت کل بازشدگی در واحد طول پرده آب‌بند می‌باشد، q دبی تراوش، H ارتفاع مخزن (سطح تراز آب)، B عرض پایه سد، B طول پتو، D ضخامت پی.
پس از توضیحات فرمولاسیون محاسبه تراوش از بدنه و پی سد خاکی به مقایسه نتایج تحقیق حاضر با میزان تراوش محاسبه‌ای با استفاده از فرمولاسیون توضیح داده‌شده پرداخته می‌شود.
درنهایت دبی کل از حاصل جمع روابط ذکرشده برای بدنه و پی سد خاکی به دست می‌آید(Design of Small Dams,United ،۱۹۶۰).

۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش‌های قبلی نشت از سدهای خاکی مختلف به‌صورت دوبعدی و یا سه‌بعدی جداگانه بررسی‌شده است که در بعضی موارد مانند تحقیق رشیدی نرم‌افزار به‌خوبی نتوانسته است پدیده فرار آب را مدل‌سازی نماید. در بیشتر این پژوهش‌ها نتایج مدل‌سازی‌ها با واقعیت بیرونی سد موردمطالعه سازگاری داشته است. در تحقیق حاضر با استفاده از تجربیات تحقیقات قبلی و انجام مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی نشت در سد ایزد خواست فارس پدیده نشت در این سد خاکی موردبررسی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از آن در بحث محاسبه دبی نشتی و فشار پیزومتریک در پیزومترها با داده-های ابزاردقیق سد سنجیده می‌شود. با توجه به اینکه طول سد در مقایسه با ابعاد مقطع سد قابل‌ملاحظه می‌باشد و همچنین لزوم تحقیق دقیق‌تر مقدار نشت از این سد خاکی تحلیل علاوه بر دوبعدی به‌صورت سه‌بعدی هم مدل‌سازی شده است.

۸- منابع

- حائری، سید محسن، "سدهای خاکی" ، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۶۳
- رحیمی، حسن، "سدهای خاکی" ، انتشارات دانشگاه تهران،
- خرقانی، فخاری، سعید، ناصر، " مهندسی سدهای خاکی" ، انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق، ۱۳۸۳
- مطهری‌نژاد، محمد، "ارائه فرمولهای کاربردی به روش اجراء محدود جهت تراوش " ، تز کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ۱۳۸۹
- خرقانی، سعید، "راهنمای آموزش نرم‌افزار Plaxis" ، ۱۳۸۵
- سیدی. ح، کرمی مقدم. م و آذری دهکردی. م (۱۳۸۷). "کنترل سه‌بعدی نشت در سد اعلی دولت (استان فارس) با استفاده از روش عددی اجزاء محدود". چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه تهران
- خزائی. ج، شرفی. ح و ستاری. د (۱۳۹۲). "آنالیز سه‌بعدی نشت از پی و جناحین سدهای خاکی با در نظر گرفتن توپوگرافی ساختگاه (مطالعه موردی سد گیوی)". هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشکده مهندسی شهید نیکبخت. دانشگاه زاهدان
- رشیدی. م، پرویزی. م و صدقی‌اصل. م (۱۳۹۱). "ارزیابی سه‌بعدی نشت و فرار آب از پی و بدنه سد خاکی شاه قاسم". یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه ارومیه
- موهبت‌زاده. آ، مشعل. م و هدایت. ن (۱۳۹۰). "تحلیل نشت در سدهای خاکی با هسته رسی با استفاده از نرم‌افزار Seep/W (مطالعه موردی سد کرخه در خوزستان)". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه سمنان
- هنرمند. م (۱۳۹۰). "تحلیل سه‌بعدی استاتیکی سد خاکی شهید مدنی (ونیار)". پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران. دانشگاه اراک.
- رستمیان. ر و عابدی کوپایه. ج (۱۳۹۰). "ارزیابی مدل نرم‌افزاری Seep/w در برآورد میزان نشت آب از کانال‌های خاکی (مطالعه موردی شبکه آبیاری زاینده‌رود)". مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌وخاک، سال پانزدهم، شماره پنجاه و هشتم.

- Zakaria Zoorasna, Amir Hamidi, Alichanbari" Mechanical And Hydraulic
- Department of Geological Engineering.Mersin University, Mersin Turkey " Treatment of the seepage problems at the Kalecik Dam (Turkey) Sedat Turkmen" , Engineering Geology 68(2003) 159-169
- Jin-Yong Lee, Hyoung-Soo Kim, Yea-Kwon Choi, Jeong-Woo Kim, Jeong-Yong Cheon, Myeong-Jea Yi "Sequential tracer tests for determining" water seepage path in a large rockfill dam, Nakdong River basin", Korea– Engineering Geology 89(2007) 300-315
- Solanki. H, Athani. S, Shivamanth. C (2015), "Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method". International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering. Aquatic Procedia 4 (2015) 876 – 883
- Kacimov. A, Obnosov. Y (2015), "Analytical Solutions for Seepage near Material Boundaries in Dam Cores: The Davison – Kalinin Problems Revisited". Applied Mathematical Modelling 36 (2012) 1286 –1301
- Zhong. H, Yuan. Sh (2016), "Three Dimensional Analysis of Unconfined Seepage in Earth Dams by The Weak form Quadrature Element Method". Journal of Hydrology 533 (2016) 403 – 411
- Nourani. V, Aminfar. M (2014), "Unsteady 2 – D Seepage Simulation Using Physical Analog, Case of Sattarkhan Embankment Dam". Journal of Hydrology 519 (2014) 177 – 189
- Estabragh. A. R, Soltani. A, & Javadi. A. A 2016, "Models for Predicting the Seepage Velocity and Seepage Force in a Fiber Reinforced Silty Soil". Computers and Geotechnics 75 (2016) 174 – 181
- Design of Small Dams,United States Department of the Interior (USDI) Bureau of Reclamation,1960
- H.D.Sharma"Embnkment Dams"Oxford &IBH publishing co.PVT.LTD, (1991), 50-60
- www.irandoc.ar.ir
- www.Sciencedirect.com
- www.civilica.com

Two- and three-dimensional modeling of leakage using instrumentation results in earthen dams

Infiltration and water leakage are destructive phenomena that after the construction of earth dams can endanger the safety and stability of these structures. Numerous studies have been conducted on numerical modeling of leakage currents from earth dams. The issue is the seepage from the body and the foundation and its analysis. Leakage in earthen dams is unavoidable, but if there are suitable conditions for soil erosion, seepage will cause soil particles to be washed away in favorable places. Studies on a large number of destroyed earth dams have shown that about 38% of these damages were due to uncontrolled seepage from the dam body. By analyzing the results of instrumentation and numerical model, the accuracy of instrument information embedded in the dam can be ensured. Numerical methods can be a good, accurate and useful tool for modeling physical phenomena such as the movement and flow of water in porous deposits. Finally, the necessary solutions to determine the leakage path, water escape rate and other measures related to dam safety are suggested.

Keywords: earth dam, seepage flow, numerical modeling, instrumentation