

## بررسی اثر دیواره‌ی آب بند بر نیروی زیر فشار و شیب خروجی زیر سازه‌های آبی

### با استفاده از نرم افزار Seep 3D

سارا افتخارافزلی<sup>۱\*</sup>، غلامعباس بارانی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۴/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۱۲

#### چکیده

نفوذ آب از زیرسازه‌هایی که بر روی خاک‌های تراوا بنا می‌شوند یکی از عوامل ایجاد ناپایداری آنها می‌باشد. این ناپایداری‌ها عمدتاً به علت توسعه‌ی زیر فشار، فرسایش تدریجی درونی مصالح پی، و وقوع پدیده‌ی جوشش رخ می‌دهد. لذا، محاسبه‌ی فشار وارده به سطح تماس سازه با پی و نیز شیب آبی خروجی در پایین دست این گونه سازه‌ها ضروری است. از جمله اقداماتی که برای جلوگیری از پدیده‌ی زیرشویی، کاهش شیب خروجی و همچنین بدهی نشت از زیرسازه‌های آبی صورت می‌گیرد، احداث دیواره‌های آب بند می‌باشد. از این رو تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار seep/3D که از روش اجزاء محدود به بررسی و محاسبه‌ی نشت می‌پردازد. بیش از ۱۰۰۰ شبیه تهیه و تأثیر شمار، موقعیت و طول پرده‌های آب بند بر بدهی نشت، فشار برکنش و شیب آبی خروجی در نقاط کلیدی پی با رسم نمودارهای مختلف بررسی گردیدند، و پایداری کلی سد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان دادند که استفاده از دو پرده‌ی آب بند، یکی برای مهار کردن زیر شویی در پایین دست (پنجه)، و دیگری برای مهار کردن بدهی نشت و تعدیل افزایش فشار برکنش ناشی از نصب پرده در پنجه، در بالا دست (پاشنه) نتیجه‌ای قابل قبول به دست خواهد داد. علاوه بر آن، منحنی‌های به دست آمده به طراح این امکان را می‌دهند که دشواری‌های نشت را بدون نیاز به برنامه‌ی رایانه‌ای پیش بینی کرده، و ویژگی‌های جریان مورد نظر خود را به دست آورده، با صرف کمترین زمان طراحی بهینه را انجام داده، و سریعاً تصمیم بگیرد.

**واژه‌های کلیدی:** پرده‌ی آب بند، بدهی نشت، شیب آبی خروجی، فشار برکنش

<sup>۱</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد- رشته عمران- گرایش سازه‌های هیدرولیکی

<sup>۲</sup> - استاد دانشگاه آزاد اسلامی کرمان- رشته کشاورزی- گرایش مهندسی منابع آب

\*- نویسنده مسئول: Saraeftenkharafzali@yahoo.com

## مقدمه

ایجاد سازه های آبی در مناطقی که نفوذ آب از زیرتأسیسات محتمل باشد، به دلیل ناپایداریهای ناشی از نشست آب مستلزم دقت فراوان است. ناپایداریهای یاد شده عمدتاً به دو علت رخ می دهند:

۱- توسعه‌ی زیر فشار و تغییر در تعادل نیروهای مؤثر بر سازه: در فرآیند طراحی سازه های آبی مانند سد، یکی از مهمترین نیروهای وارده، نیروی برکنش ناشی از فشار آب است. این نیرو مقاومت برشی بین سد و پی آن را کاهش داده، و باعث ایجاد تنش کششی شده، و در نهایت منجر به لغزش و واژگونی سد می شود [پارک و پاوالای (۱۹۷۵b)]. ۲- فرسایش تدریجی درونی مصالح پی، و وقوع پدیده‌ی جوشش یا رگاب: یکی دیگر از موارد تأثیرگذار بر عملکرد سازه‌ی سد، جنس مصالح بستر است. وجود مصالح خاکی در پی سد باعث افزایش توان فرسایش بر اثر نیروی شیب زهاب شده، و وجود نیروی برکنش در پی را پر رنگتر خواهد کرد. وقوع پدیده‌ی فرسایش در داخل ذرات ریز بستر بر اثر نیروی تراوش می تواند باعث ایجاد پدیده‌ی جوشش در مصالح بستر و در نتیجه، تشدید خرابی سازه شود. در بسیاری از موارد، وقوع پدیده‌ی فرسایش در بستر سد می تواند منجر به خرابی تمامی سد گردد [پارک و پاوالای (۱۹۷۵a)].

با توجه به آنچه ذکر شد می توان دریافت که شیب خروجی مهمترین معیار طراحی برای تعیین ضریب اطمینان نسبت به زیرشویی می باشد؛ لذا، در تمام مواردی که پی یک سازه روی بستر قابل نفوذ قرار داشته باشد، ضروری است که فشار وارده به سطح تماس سازه و پی، و نیز شیب آبی خروجی در پایین دست سطح تماس نامبرده برآورد و محاسبه گردد (وفائیان، ۱۳۷۷).

در سال ۱۹۲۲، پاولووسکی، و در سال ۱۹۳۶، موسکات روشی را جهت حل مسائل مربوط به ساختار ناتراوا با سپر ورقه ای بر روی لایه ای با ژرفای متناهی ارائه دادند (هار، ۱۹۶۲). در سال ۱۹۲۲، پاولووسکی و در سال ۱۹۳۶، خوسلا، بس و تیلور روشهایی را جهت حل مسائل مربوط به ساختمان آبی مستقر روی سطح محیطی متخلخل با ژرفایی نامحدود پیشنهاد کردند (هار، ۱۹۶۲). هار (۱۹۶۲) به نقل از داس) حل ریاضی

محاسبات نشست را از زیر بسیاری از سازه های آبی ساده واقع بر محیط متخلخل با ژرفای محدود ارائه کرد؛ پولوبارنیووا - کوچینا بر اساس راه‌حلهای بسته برای مقاطعی خاص، روشی تقریبی را ارائه داد که به موجب آن، ویژگیهای نشست ساختارهایی را که در سامانه های لایه لایه احداث شده‌اند، می توان به سادگی و با درجه‌ی اعتماد نسبتاً زیاد به دست آورد.

همچنین، مقالات و پایان نامه های زیادی در داخل و خارج از کشور در خصوص تراوش و حل مسائل مربوط به آن در محیطهای متخلخل، و بویژه پی و تکیه گاه سدها موجود است که در ادامه به برخی اشاره می شود:

عابدی کویایی (۱۳۶۹) مقادیر بار فشاری را با چهار روش بلای، لین، خوسلا و تفاضل محدود بررسی کرد و به این نتیجه رسید که در دو روش بلای و لین زیر فشار کمتر از خوسلا می باشد، و زیر فشار حاصل از تفاضلهای محدود انطباق خوبی را با روش خوسلا دارد. علاوه بر این، توصیه کرد که روش تفاضلهای محدود در طراحی سدهای انحرافی استفاده شود. ابول پور (۱۳۷۳) شیبهی را پیشنهاد نمود که زیر فشار وارده بر سازه های آبی را با چند روش متفاوت محاسبه می کرد. در محاسبه‌ی میزان زیر فشار و زیرشویی از روشهای لین و بلای و خوسلا، و در محاسبه‌ی میزان نشست از روش خوسلا و شبکه‌ی جریان استفاده کرد. اندازه‌ی خطایی را که وی برای نتایج شبیه و داده های فشارسنجی سد درودزن به دست آورد چهار درصد بود. جباری (۱۳۷۶) با ارائه‌ی شبیه ریاضی سه بعدی، حرکت آب را در محیط متخلخل ناهمگن و ناهمسان مورد بررسی قرار داد. این شبیه توانایی تحلیل محیطهای سه بعدی و ناهمگن همسان و با لایه بندی های مختلف را دارد [جباری (۱۳۷۶)]. جای (۲۰۰۴) با استفاده از روش تفاضل محدود مبتنی بر روش انتقال مختصات به بررسی نشست از زیرسدها با کاربرد معادله‌ی پواسون پرداخت و یافتن و همکاران (۲۰۰۸) برای حل مشکلات نشست سدها با سامانه‌های زهکش، حل عددی را ارائه دادند که از روش اجزاء محدود استفاده می کرد.

لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر، مقادیر بدهی نشست، شیب آبی خروجی و تغییر مقدار زیر فشار

هر یک از روشهای نامبرده جهت تحلیل تراوش محدودیتهایی دارند، و این محدودیتها در روشهای شبیه سازی عددی بسیار کمتر است، امروزه بطور وسیعی از روشهای مزبور استفاده می‌شود. برای به دست آوردن یک شبیه عددی، معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسأله با توجه به شرایط اولیه، هندسی و مرزی در زمینه‌ی حوزه‌ی مسأله گسسته می‌شوند.

در پژوهش حاضر با ارائه یک شبیه ریاضی تأثیر تعداد، موقعیت، و طول پرده های آب بند بر بدهی نشت، توزیع زیر فشار و شیب آبی خروجی در پی سدها با کاربرد برنامه رایانه‌ای 3D seep از مجموعه‌ی Geo-slope (این نرم افزار برای شبیه سازی جریانهای پایدار یا گذرا در محیطهای متخلخل با کاربرد اجزاء محدود به کار می‌رود) مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، برای رسیدن به اهداف تحقیق بیش از ۱۰۰۰ شبیه رایانه‌ای از حالات مختلف، ایجاد، و به تجزیه و تحلیل هر کدام پرداخته شده است. فرانسجهای مؤثر و مورد بحث در شبیه مورد نظر با توجه به شکل (۱) به صورت زیر معرفی می‌گردند:

$h_1$ : ارتفاع آب بالادست

$h_2$ : ارتفاع آب پایین دست

$h$ : اختلاف تراز آب بالادست و پایین دست

$T$ : ژرفای لایه‌ی تراوا

$S$ : طول پرده‌ی آب بند

$2b$ : عرض سد در محل اتصال به پی

$k$ : هدایت آبی خاک

روش کار بدین ترتیب است که فرانسجهای موجود در شکل ۱ به عنوان ورودی وارد برنامه‌ی 3D seep شده، و پس از اعمال شرایط مرزی و انتخاب شبکه‌ی بهینه در نهایت مقادیر نشت، شیب و فشار در هر نقطه زیر سد محاسبه می‌گردد. سپس نتایج حاصل به صورت نمودارهای بی بعدی ترسیم می‌شوند تا نتیجه گیری نهایی ساده تر گردد. در منحنیهای مذکور،  $q$  اندازه‌ی نشت در واحد زمان بر واحد عرض سد، و  $I$  شیب آبی خروجی در پایین دست و نزدیک سد می‌باشد. گفتنی است که برای تهیه‌ی این نمودارها از برنامه‌ی رایانه‌ای Excel استفاده شده است.

کل ناشی از ایجاد دیواره آب بند را که تحت عنوان عامل شدت (نسبت واقعی زیر فشار کل در حالتی که دیواره‌ی آب بند وجود دارد به زیر فشار کل در حالت بدون دیواره‌ی آب بند) بیان می‌شود در سدهای ناتراوا، با عرض متغیر و پرده‌ی سپر واقع بر پی همگن با ژرفای متناهی، بررسی و نتایج به دست آمده را به صورت نمودارهای بی بعد ارائه می‌کند.

## مواد و روشها

معادله‌ی حاکم بر جریان های توان دو بعدی در محیط متخلخل عبارت است از:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0$$

(۱)

که به معادله‌ی لاپلاس معروف می‌باشد. در رابطه‌ی فوق  $\varphi$  تابع توان بوده، و مؤلفه های سرعت جریان مشتقات این تابع خواهند بود. با حل معادله‌ی لاپلاس و تعیین تابع توان در نقاط مورد نظر به راحتی می‌توان مشخصات جریان را به دست آورد (وفائیان، ۱۳۷۷).

برای حل معادله‌ی لاپلاس، و به دست آوردن مشخصات جریان در محیطهای متخلخل، و بویژه پی و تکیه‌گاه سدها، روشهای مختلفی پیشنهاد شده‌اند که مهمترین آنها عبارتند از: روشهای آزمایشگاهی، از جمله روش تحلیل الکتریکی، و روش شبیه ماسه ای که بر مبنای شبیه های فیزیکی بنا شده اند. روشهای ترسیمی مانند روشهای ارائه شده توسط دوپویی و کاراگرانده و پاولوسکی، که با کاربرد رسم خطوط جریان و توان (شبکه جریان) مقادیر  $\varphi$  به دست می‌آید (هار، ۱۹۶۲)؛ (براجا، ۱۹۸۳).

روشهای نظری - تجربی مانند روش بلای و لین. روشهای تحلیلی مانند روش توان مرکب، روش خوسلا، که بر مبنای توابع مختلط به حل تحلیلی معادله منجر می‌شود (شمسای، ۱۳۷۸)؛ (لاکشمی، ۲۰۰۳). روشهای شبیه سازی عددی مانند تفاضلات محدود، احجام محدود، اجزاء محدود و روش اجزاء های مرزی (شمسای، ۱۳۷۸)؛ (هافمن و چیانگ، ۱۳۷۷).

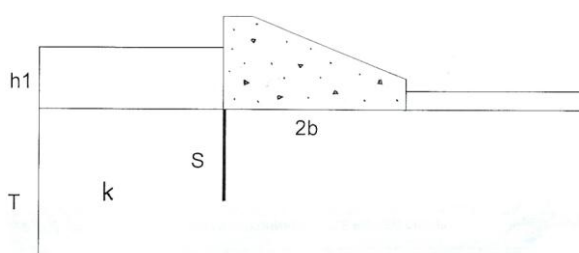
در هر یک از این روشهای بسته به میزان ساده سازی، از دقت جوابها کاسته می‌شود. با توجه به این که

تراز آب بالادست و پایین دست ( $h$ ) به عنوان یک فراسنج در نظر گرفته شده است.

- ۴- در تنظیم نمودارها محورهای بی بعد تنظیم شده اند.  
 ۵- در تعیین هندسه‌ی مسأله، و وارد کردن داده ها به برنامه رایانه‌ای 3D seep، از طرفین کف ناتراوا دست کم به اندازه‌ی ژرفای لایه تراوا همانندسازی شده است تا اثر مرز جانبی بر زیر فشار قابل اغماض باشد.  
 ۶- بیشترین مقدار شیب آبی، در پایین دست و نزدیک سازه در نظر گرفته شده، زیرا خطر پدیده‌ی جوشش در آن وجود دارد.

در رسم نمودارها به کمک این برنامه توجه به نکات زیر ضروری است:

- ۱- برای بررسی اثر هر فراسنج، فراسنجهای دیگر ثابت فرض شده اند تا نمودارهای حاصل چگونگی تأثیر فراسنج مورد نظر را بر بدهی نشت، توزیع نیروی زیر فشار و شیب آبی خروجی نشان دهد.  
 ۲- به علت کم اهمیت بودن ضخامت پرده های آب بند، ضخامت آنها ثابت فرض شده است.  
 ۳- به جای آن که ارتفاع آب بالادست و پایین دست به عنوان دو فراسنج مختلف در نظر گرفته شوند، اختلاف



شکل ۱- شبیه ریاضی سد ناتراوا واقع بر پی همگن با پرده‌ی آب بند بالا دست.

جدول ۱- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر بدهی نشت از زیر سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=0.5$ ).

$q/kh$	$S/T$						
	$X/B$	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
-1	0.43125	0.41375	0.36375	0.3075	0.24	0.19625	
-0.75	0.43125	0.42125	0.37625	0.3175	0.24625	0.2	
-0.5	0.43125	0.424425	0.38375	0.325	0.25125	0.20375	
-0.25	0.43125	0.4253	0.3875	0.32875	0.254625	0.20575	
0	0.43125	0.425538	0.38875	0.33	0.255625	0.2065	
0.25	0.43125	0.4253	0.3875	0.32875	0.254625	0.20575	
0.5	0.43125	0.424425	0.38375	0.325	0.25125	0.20375	
0.75	0.43125	0.42125	0.37625	0.3175	0.24625	0.2	
1	0.43125	0.41375	0.36375	0.3075	0.24	0.19625	

**B**  
 $\bar{T}$  از منحنیهای به دست آمده پیداست که در هر  $\bar{T}$  با صرف نظر کردن از ژرفای پرده‌ی آب بند، و به ازاء موقعیتهایی با فاصله‌ی مساوی از بالادست و پایین دست سد، بدهی نشت مساوی خواهیم داشت. همچنین، سپر ورقه ای در مرکز ساختار حداکثر بده را نشان می دهد؛ یعنی بهترین موقعیت پرده‌ی آب بند برای کاهش نشت، پنجه یا پاشنه‌ی سد می باشد. همان طور که قبلا نیز اشاره شد، با صرف نظر کردن از موقعیت پرده‌ی آب بند، و افزایش عرض سد نسبت به ژرفای لایه تراوا، یا افزایش

## نتایج و بحث

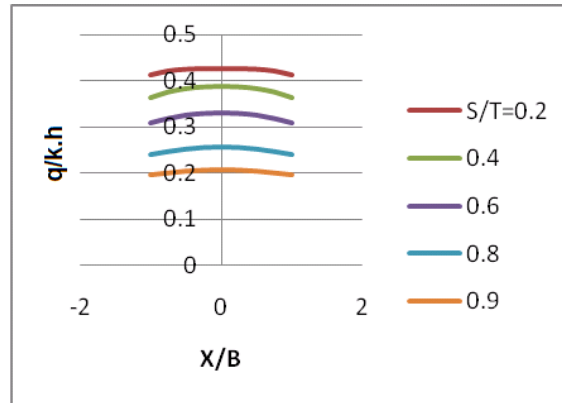
### اثر موقعیت دیوار آب بند بر بدهی نشت از زیر

#### سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن

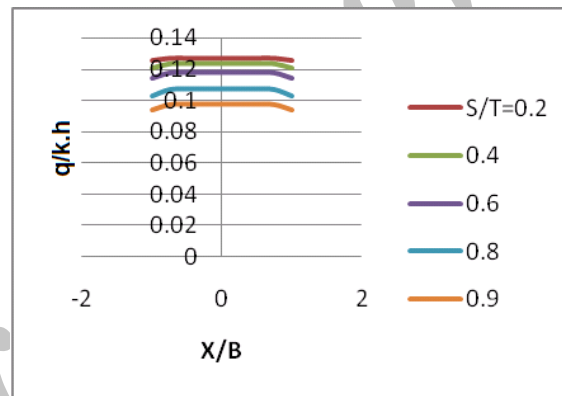
شکلهای ۲ و ۳ اثر محل قرار گرفتن سپر ورقه ای را بر نشت برای ترکیبهای متفاوت ژرفای نصب سپر در خاک  $\bar{T}$  و اندازه‌ی ساختار  $\bar{T}$  نشان می دهند. همچنین، مقادیر بدهی نشت نسبت به مبنا را می توان در شکلهای ۴ و ۵ مشاهده کرد.

از نمودارهای بدهی نشت نسبت به مبنا در این قسمت می‌توان درصد کاهش نشت را به صورت تابعی از موقعیت و ژرفای نصب سپر در خاک و عرض ساختار از نمودار دانست.

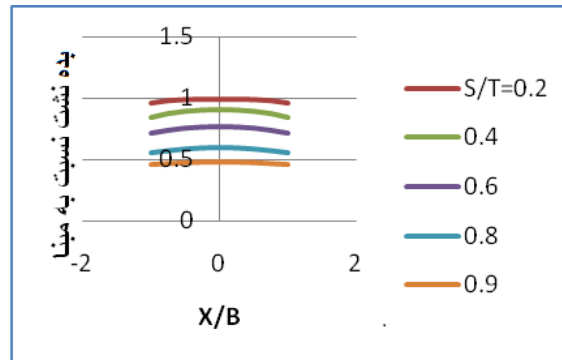
ژرفای پرده‌ی آب بند از مقدار بدهی نشت کاسته شده و مقدار بدهی نشت نسبت به مبنا برای هر موقعیت و ژرفای دلخواه از پرده آب بند همواره کوچکتر از یک می‌باشد؛ ولی همان طور که مشاهده می‌شود، فایده‌ی حاصل از افزایش ژرفای پرده‌ی آب بند در هر موقعیتی با افزایش عرض سد کاهش می‌یابد. شایان ذکر است که با استفاده



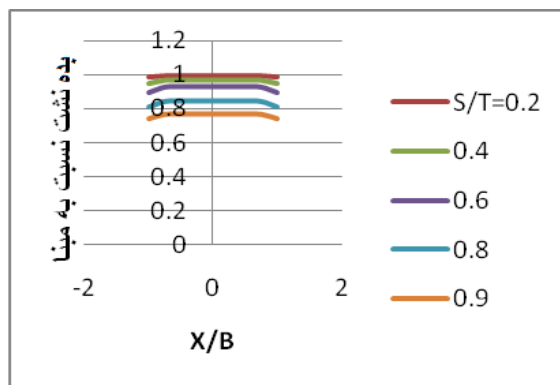
شکل ۲- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر بدهی نشت از زیر سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=0.5$ ).



شکل ۳- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر بدهی نشت از زیر سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=3$ ).



شکل ۴- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر بدهی نشت نسبت به مبنا از زیر سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=0.5$ ).



شکل ۵- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر بدهی نشت نسبت به مبنا از زیر سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=3$ ).

جدول ۲- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر بدهی نشت از زیر سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=3$ ).

q/kh	S/T						
	X/B	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
-1		0.1275	0.125375	0.1205	0.11375	0.103125	0.094038
-0.75		0.1275	0.126538	0.1237	0.11775	0.107125	0.097475
-0.5		0.1275	0.126561	0.123863	0.1181	0.107475	0.097825
-0.25		0.1275	0.126563	0.123873	0.118123	0.107506	0.09785
0		0.1275	0.126563	0.123874	0.118125	0.107508	0.097853
0.25		0.1275	0.126563	0.123873	0.118123	0.107506	0.09785
0.5		0.1275	0.126561	0.123863	0.1181	0.107475	0.097825
0.75		0.1275	0.126538	0.1237	0.11775	0.107125	0.097475
1		0.1275	0.125375	0.1205	0.11375	0.103125	0.094038

جدول ۳- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر بدهی نشت نسبت به مبنا از زیر سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=0.5$ ).

بده نشت نسبت به مبنا	S/T						
	X/B	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
-1		1	0.95942	0.843478	0.713043	0.556522	0.455072
-0.75		1	0.976812	0.872464	0.736232	0.571014	0.463768
-0.5		1	0.984174	0.889855	0.753623	0.582609	0.472464
-0.25		1	0.986203	0.898551	0.762319	0.590435	0.477101
0		1	0.986754	0.901449	0.765217	0.592754	0.478841
0.25		1	0.986203	0.898551	0.762319	0.590435	0.477101
0.5		1	0.984174	0.889855	0.753623	0.582609	0.472464
0.75		1	0.976812	0.872464	0.736232	0.571014	0.463768
1		1	0.95942	0.843478	0.713043	0.556522	0.455072

جدول ۴- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر بدهی نشت نسبت به مبنا از زیر سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=3$ ).

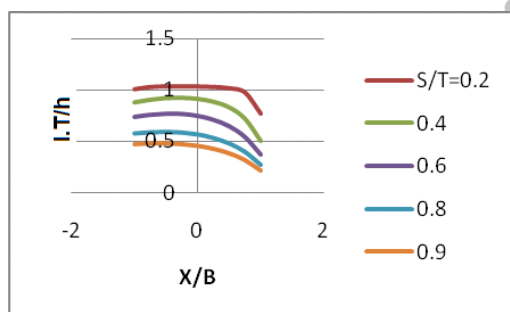
بده نشت نسبت به مبنا	S/T						
	X/B	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
-1		1	0.983333	0.945098	0.892157	0.808824	0.737549
-0.75		1	0.992451	0.970196	0.923529	0.840196	0.76451
-0.5		1	0.992637	0.971471	0.926273	0.842941	0.767255
-0.25		1	0.992647	0.971549	0.926451	0.843186	0.767451
0		1	0.992647	0.971559	0.926471	0.843196	0.767471
0.25		1	0.992647	0.971549	0.926451	0.843186	0.767451
0.5		1	0.992637	0.971471	0.926273	0.842941	0.767255
0.75		1	0.992451	0.970196	0.923529	0.840196	0.76451
1		1	0.983333	0.945098	0.892157	0.808824	0.737549

جدول ۵- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر شیب آبی خروجی در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=0.5$ ).

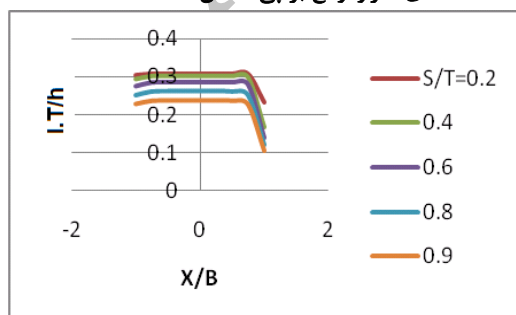
IT/h	S/T						
	X/B	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
-1		1.052	1.006	0.882	0.738	0.574	0.468
-0.75		1.052	1.028	0.908	0.758	0.584	0.4742
-0.5		1.052	1.0334	0.924	0.768	0.588	0.475
-0.25		1.052	1.0346	0.926	0.766	0.582	0.468
0		1.052	1.033	0.916	0.748	0.564	0.452
0.25		1.052	1.028	0.888	0.71	0.53	0.424
0.5		1.052	1.016	0.834	0.648	0.478	0.382
0.75		1.052	0.974	0.724	0.544	0.398	0.318
1		1.052	0.766	0.508	0.374	0.274	0.22

۴- از نکات بالا می‌توان دریافت: چنانچه موقعیت پرده‌ی آب بند از بالادست قاعده‌ی سد به سمت پنجه حرکت کند شیب آبی خروجی به میزان بیشتری کاهش می‌یابد. با این عمل از پدیده‌ی زیرشویی جلوگیری می‌گردد؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که بهترین راه مهار کردن زیرشویی نصب پرده‌ی آب بند در پنجه می‌باشد.

با استفاده از نمودارهای شیب خروجی نسبت به مبنا می‌توان درصد کاهش شیب را به صورت تابعی از موقعیت و ژرفای نصب سپر در خاک، و عرض ساختار، به دست آورد.



شکل ۶- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر شیب آبی خروجی در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=0.5$ ).



شکل ۷- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر شیب آبی خروجی در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=3$ ).

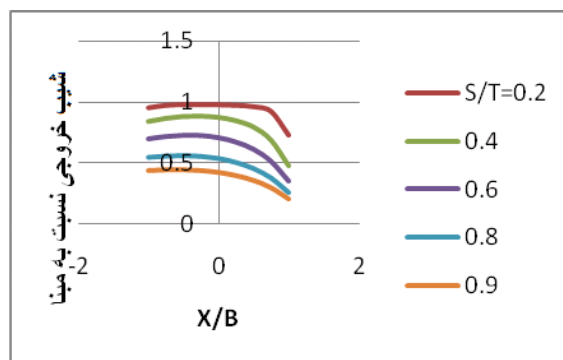
## اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر شیب آبی خروجی در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن

شکل‌های ۶ و ۷ اثر محل قرار گرفتن سپر ورقه‌ای را بر شیب آبی خروجی برای ترکیب‌های متفاوت ژرفای نصب سپر در خاک ( $\bar{T}$ )، و اندازه ساختار ( $\bar{T}$ ) نشان می‌دهند. همچنین، اندازه‌های شیب خروجی نسبت به مبنا را می‌توان در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده کرد. با توجه به نمودارها پیداست که:

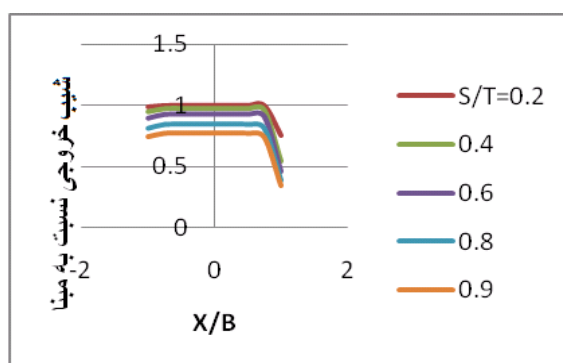
۱- با احداث دیواره آب بند در هر وضعیت مکانی، مقدار شیب خروجی نسبت به شیب خروجی حالت مبنا کاهش می‌یابد (یعنی با صرفنظر کردن از موقعیت و ژرفای دیواره‌ی آب بند، مقدار شیب خروجی نسبی همواره کوچکتر از یک است). با این حال مقدار شیب خروجی از موقعیت نسبی ۱- تا موقعیت نسبی ۰/۵- افزایش یافته، و از موقعیت نسبی ۰/۷۵ تا موقعیت نسبی ۱+ به شدت کاهش می‌یابد.

۲- در هر  $\bar{T}$  با صرفنظر کردن از ژرفای پرده‌ی آب بند، بیشترین شیب آبی خروجی (با صرفنظر کردن از افزایش ناچیز شیب از موقعیت نسبی ۱- تا ۰/۵-) موقعی حاصل می‌شود که دیواره‌ی آب بند در بالادست سد احداث شود، و کمترین شیب خروجی دیواره در پایین دست بنا گردد.

۳- همچنین، با زیاد شدن ژرفای سپر ورقه‌ای، یا عرض سد از مقدار شیب آبی خروجی کاسته می‌شود، اما فایده‌ی حاصل از افزایش ژرفای سپر با زیاد شدن نسبت عرض سد به ژرفای لایه تراوا کاهش می‌یابد.



شکل ۸- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر شیب خروجی نسبت به مبنا در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=0.5$ ).



شکل ۹- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر شیب خروجی نسبت به مبنا در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=3$ ).

جدول ۶- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر شیب آبی خروجی در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=3$ ).

IT/h	S/T					
	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
X/B						
-1	0.308	0.304	0.2928	0.2762	0.2506	0.2286
-0.75	0.308	0.307524	0.30064	0.286	0.26026	0.2369
-0.5	0.308	0.307578	0.301018	0.28702	0.2612	0.23774
-0.25	0.308	0.307582	0.301044	0.28708	0.26127	0.237804
0	0.308	0.30758	0.301044	0.28708	0.261268	0.2378
0.25	0.308	0.307574	0.30102	0.28702	0.2612	0.23774
0.5	0.308	0.30754	0.300752	0.2864	0.2604	0.237
0.75	0.308	0.307	0.2968	0.28	0.25	0.2266
1	0.308	0.232	0.168	0.14	0.12	0.106

جدول ۷- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر شیب خروجی نسبت به مبنا در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=0.5$ ).

شیب خروجی نسبت به مبنا	S/T					
	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
X/B						
-1	1	0.956274	0.838403	0.701521	0.545627	0.444867
-0.75	1	0.977186	0.863118	0.720532	0.555133	0.45076
-0.5	1	0.982319	0.878327	0.730038	0.558935	0.451521
-0.25	1	0.98346	0.880228	0.728137	0.553232	0.444867
0	1	0.981939	0.870722	0.711027	0.536122	0.429658
0.25	1	0.977186	0.844106	0.674905	0.503802	0.403042
0.5	1	0.965779	0.792776	0.61597	0.454373	0.363118
0.75	1	0.925856	0.688213	0.51711	0.378327	0.302281
1	1	0.728137	0.48289	0.355513	0.260456	0.209125



جدول ۸- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر شیب خروجی نسبت به مبنا در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=3$ ).

شیب خروجی نسبت به مبنا X/B	S/T					
	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
-1	1	0.987013	0.950649	0.896753	0.813636	0.742208
-0.75	1	0.998455	0.976104	0.928571	0.845	0.769156
-0.5	1	0.99863	0.977331	0.931883	0.848052	0.771883
-0.25	1	0.998643	0.977416	0.932078	0.848279	0.772091
0	1	0.998636	0.977416	0.932078	0.848273	0.772078
0.25	1	0.998617	0.977338	0.931883	0.848052	0.771883
0.5	1	0.998506	0.976468	0.92987	0.845455	0.769481
0.75	1	0.996753	0.963636	0.909091	0.811688	0.735714
1	1	0.753247	0.545455	0.454545	0.38961	0.344156

جدول ۹- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر عامل شدت در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=0.5$ ).

عامل شدت X/B	S/T					
	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
-1	1	0.944835	0.832327	0.725969	0.62039	0.557013
-0.75	1	0.982789	0.902131	0.815585	0.729092	0.677781
-0.5	1	0.987749	0.932914	0.868188	0.802602	0.764052
-0.25	1	0.997388	0.975921	0.94635	0.91496	0.896379
0	1	1	1	1	1	1
0.25	1	1.002612	1.02408	1.05365	1.08504	1.103622
0.5	1	1.012251	1.067087	1.131812	1.197398	1.235948
0.75	1	1.017211	1.097868	1.184415	1.270908	1.322219
1	1	1.055165	1.167673	1.25257	1.379611	1.442988

یک، و از موقعیت نسبی صفر تا +۱، همان طور که مشاهده می‌شود مقدار عامل شدت بیش از یک به دست می‌آید، یعنی با بناکردن دیواره‌ی آب بند در موقعیت‌های نسبی ۰ تا +۱ مقدار زیر فشار کل به دست آمده بیشتر از زیر فشار کل حالت مبنا می‌شود. شایان ذکر است که با افزایش ژرفای وارد کردن سپر در خاک، در هر یک از موقعیت‌های نسبی ۱- تا صفر، اندازه‌ی عامل شدت کاهش، و در هر یک از موقعیت‌های نسبی صفر تا +۱ مقدار عامل شدت افزایش می‌یابد.

۳- با توجه به نمودار برای سپرهای ورقه‌ای که در مرکز پی قرار دارند، نیروی زیر فشار کل بستگی به ژرفای وارد کردن سپر در خاک نداشته، و همان طور که مشاهده می‌شود، عامل شدت برای این حالت همواره برابر با یک می‌باشد.

### اثر موقعیت دیوار آب بند بر عامل شدت در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن

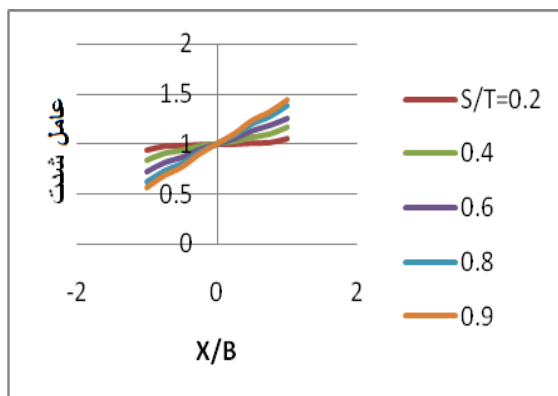
مقادیر عامل شدت (نسبت زیر فشار کل در حالت وجود پرده‌ی آب بند به زیر فشار کل حالت مبنا) برای موقعیت‌های مختلف احداث دیواره‌ی آب بند در زیر سازه

$$\frac{B}{T} = 0.5$$

در شرایط متفاوتی از ژرفای نصب پرده‌ی سپر در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. با دقت در منحنی‌های مذکور نتایج زیر به دست می‌آید:

۱- در هر  $\bar{T}$ ، با صرفنظر کردن از ژرفای پرده‌ی آب بند، کمترین زیر فشار کل موقعی حاصل می‌شود که دیواره‌ی آب بند در بالادست احداث شود، و بالعکس بیشترین نیروی زیر فشار کل در موقعیتی که دیواره‌ی آب بند در پایین دست بنا گردد دیده می‌شود.

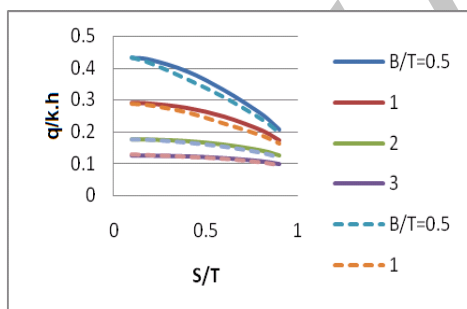
۲- با صرفنظر کردن از ژرفای پرده‌ی آب بند، با احداث پرده در موقعیت نسبی ۱- تا صفر، عامل شدت کمتر از



شکل ۱۰- اثر موقعیت دیواره‌ی آب بند بر عامل شدت در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن ( $B/T=0.5$ ).

### مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌های ارائه شده در این پژوهش با نتایج به دست آمده توسط پولوبارینووا- کوچینا

در پایان، برای به دست آوردن میزان درجه‌ی اعتماد به نتایج حاصل از شبیه‌های ارائه شده، مقایسه‌ای با نتایج پولوبارینووا - کوچینا<sup>۳</sup> انجام شد. پولوبارینووا در سال ۱۹۴۱ منحنی‌هایی برای محاسبه بدهی نشست از زیر سدهای ناتراوا با سپر ورقه‌ای قرینه واقع بر پی همگن با ژرفای متناهی ارائه کرد (هار، ۱۹۶۲). حاصل این مقایسه در شکل ۱۴ آورده شده است.



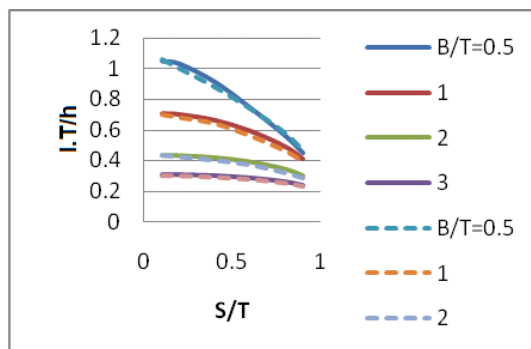
شکل ۱۱- تغییرات بدهی نشست نسبت به تغییر موقعیت دیواره‌ی آب بند از مرکز پی به بالادست یا پایین دست، در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن (خطوط پر: مقادیر بده نشست سد با دیواره‌ی آب بند مرکزی).

### تغییرات بدهی نشست نسبت به موقعیت دیواره‌ی آب بند در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن

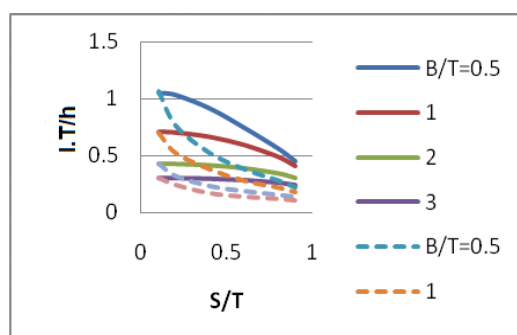
شکل ۱۱ نمایانگر تغییرات بدهی نسبت به موقعیت سپر ورقه‌ای برای ترکیب‌های متفاوت ژرفای نصب سپر در خاک و اندازه‌ی ساختار می باشد. همان طور که پیداست، این تغییرات بسیار ناچیزند، و با زیاد شدن نسبت عرض پی به ضخامت لایه‌ی تراوا کاهش می‌یابند؛ بنابراین، در طراحی معمولاً مقدار بده را برای هر وضعیت سپر ورقه‌ای، می‌توان برای حالتی انتخاب کرد که سپر در مرکز پی قرار داشته باشد.

### تغییرات شیب خروجی نسبت به موقعیت دیواره‌ی آب بند در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن

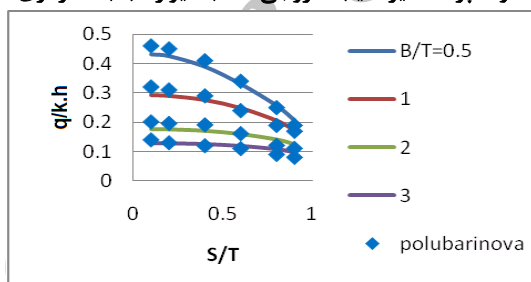
شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تغییرات شیب خروجی نسبت به موقعیت سپر ورقه‌ای را برای ترکیب‌های متفاوت ژرفای نصب سپر در خاک، و اندازه‌ی ساختار نشان می‌دهند. از نمودارها پیداست که تغییرات شیب خروجی نسبت به تغییر وضعیت سپر از بالادست به سمت مرکز پی بسیار ناچیز و افزایشی است، اما از مرکز پی به سمت پایین دست به شدت کاهشی می‌باشد. همچنین، نرخ کاهش داده‌ها با افزایش نسبت عرض پی به ضخامت لایه تراوا کاهش می‌یابد، اما مقدار شیب خروجی نسبی با صرف نظر کردن از موقعیت و ژرفای دیواره‌ی آب بند همواره کوچکتر از یک می‌باشد.



شکل ۱۲- تغییرات شیب خروجی نسبت به تغییر موقعیت دیواره‌ی آب بند از بالا دست به مرکز پی در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن (خطوط پر: مقادیر شیب خروجی سد با دیوار آب بند مرکزی).



شکل ۱۳- تغییرات شیب خروجی نسبت به تغییر موقعیت دیواره‌ی آب بند از مرکز پی به پایین دست در سدهای ناتراوا واقع بر پی همگن (خطوط پر: مقادیر شیب خروجی سد با دیوار آب بند مرکزی).



شکل ۱۴- مقایسه بدهی نشت از زیر سد ناتراوا با سپر ورقه ای قرینه واقع بر پی همگن با ژرفای متناهی با نتایج پولوبارینووا- کوچینا.

## نتیجه گیری

مقدار نشت و شیب خروجی، با افزایش عرض سد نسبت به ضخامت لایه نفوذ پذیر به سرعت کاهش می یابد. با توجه به مزایا و کاستی‌های ذکر شده، برای استفاده عملی پیشنهاد می‌شود که دو پرده‌ی آب بند، یکی برای مهار کردن زیر شویی در پایین دست (پنجه)، و دیگری برای مهار کردن بدهی نشت و تعدیل افزایش فشار برکنش ناشی از نصب پرده در پنجه، در بالا دست (پاشنه) نصب گردند. با وجود دو دیواره‌ی آب بند، یکی در بالادست و دیگری در پایین دست سد، با هر ژرفای دلخواه

از مطالب ذکر شده در بالا می‌توان نتیجه گرفت که اولاً، دیواره‌ی آب بند بالادست سد باعث کاهش مقدار نشت، زیر فشار و شیب آبی خروجی از سد می‌شود، که هر سه، مورد نظر طراح، و از نقطه نظر پایداری سد، مثبت می‌باشند. دیواره‌ی آب بند در پایین دست سد باعث کاهش مقدار نشت و شیب آبی خروجی از سد می‌گردد، اما زیر فشار را که یک عامل منفی پایداری است افزایش می‌دهد همچنین، فایده‌ی حاصل از افزایش ژرفای نصب سپر ورقه‌ای در بالادست یا پایین دست سد، در کاهش

۴. عابدی کوپایی، ج. ۱۳۶۹. بررسی عوامل موثر بر زیر فشار در پایداری سدهای انحرافی به روش تفاضل محدود، پایان نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری، دانشگاه تربیت مدرس.
۵. وفائیان، م. ۱۳۷۷. سدهای خاکی، چاپ دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی، اصفهان، ص ۸۳-۵۵.
۶. هار، م. ۱۹۶۲. آب زیر زمینی و نشت، فریدون کاوه، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ص ۲۰۵-۱۲۸.
۷. هافمن، ک. ا. و س. ت. چیانگ. ۱۳۷۷. دینامیک سیالات محاسباتی برای مهندسان، احمدرضا عظیمیان، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ص ۸۱-۴۵ و ۳۹۶-۳۶۱.
8. Braja M.D. 1983. Advanced soil mechanic, Mac Graw Hill Book Company. New York.
9. Jie, Y. 2004. Seepage analysis based on boundary fitted coordinate transformation method computer and geotechnics 31 2: 279-283.
10. Lakshmi, N.R. 2003. Seepage in soils. John Wiley & Sons Inc., New York.
11. Park, R. and Paulay, T. 1975a. Seepage, drainage and flow Nets. John Wiley & Sons, New York, p.
12. Park, R. and Paulay, T. 1975. Safety of existing dams: Evaluation and improvement. John Wiley & Sons, New York, p.
13. Yifeng, C., Chuangbing, Z. and Hong, Z. 2008. A numerical solution to seepage problems with complex drainage systems, Computers and Geotechnics 35 3: 383-393.

نصب، مقدار بده و شیب نسبت به مبنا در هر صورت کاهش می یابد.

توجه به این نکته ضروری است که با افزایش ژرفای دیواره‌ی آب بند بالادست از مقدار فشار برکنش زیر سد، و عامل شدت (نسبت زیر فشار کل در حالت وجود پرده آب بند به زیر فشار کل حالت مبنا) کاسته می‌شود. عکس این مطلب نیز صادق است، یعنی با صرفنظر کردن از ژرفای دیواره‌ی آب بند بالادست، و افزایش ژرفای دیواره‌ی آب بند پایین دست، مقدار فشار برکنش و عامل شدت در زیر سد افزایش می یابد. ذکر این نکته ضروری است که وقتی هر دو پرده‌ی آب بند در ژرفای یکسانی از خاک قرار دارند، مقدار عامل شدت برابر یک است. در حالت کلی اگر ژرفای پرده‌ی آب بند بالادست بزرگتر از ژرفای پرده آب بند پایین دست باشد، عامل شدت کمتر از یک خواهد بود. عکس این مطلب برای دیواره‌ی آب بند پایین دست با ژرفای بزرگتر صدق می‌کند.

### سپاسگزاری

وظیفه خود می‌دانم از زحمات استاد فرهیخته، جناب آقای دکتر غلامعباس بارانی، که در راهنمایی و مشاوره‌ی این جانب از هیچ لطفی دریغ نکردند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم

### منابع

۱. ابول پور، ب. ۱۳۷۳. روشهای برآورد تراوش، زیرفشار و زیرشویی در سازه های آبی با ارئه شبیه رایانه‌ای، پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری وزهکشی، دانشگاه شیراز.
۲. جباری، ا. ۱۳۷۶. حل شبیه ریاضی سه بعدی جریان دائمی آب در محیط متخلخل ناهمگن و ناهمسان با استفاده از روش احجام محدود و شبکه بندی دلخواه، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه تهران.
۳. شمسایی، ا. ۱۳۷۸. هیدرولیک جریان آب در محیطهای متخلخل، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ص ۹۵-۸۸.